



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาตัวตรวจจับไอออนของโลหะด้วยนาโนเซนเซอร์  
เพื่อประยุกต์ใช้ในการแพทย์

Development of metal ion detectors using ion-sensitive  
nanosensors for medical applications

โดย

ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์และคณะ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

โดยคณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติ สาขานาโนเทคโนโลยี

ประจำปีงบประมาณ 2553

กรกฎาคม 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาตัวตรวจจับไอออนของโลหะด้วยนาโนเซนเซอร์  
เพื่อประยุกต์ใช้ในการแพทย์

Development of metal ion detectors using ion-sensitive  
nanosensors for medical applications



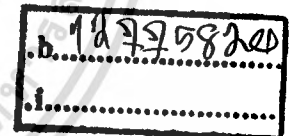
T142519

โดย

ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์และคณะ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

โดยคณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติ สาขานาโนเทคโนโลยี

ประจำปีงบประมาณ 2553

กรกฎาคม 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 142519  
รับเดือนปี 11 พ.ค. 2559

## คณะนักวิจัย

1. ดร. บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์ หัวหน้าแผนงานวิจัยและหัวหน้าโครงการย่อยที่ 2
2. ดร. นันทินต์ย์ วานิชชีวะ หัวหน้าโครงการย่อยที่ 1
3. รองศาสตราจารย์ ดร. วรารุณี เถาลัดดา นักวิจัย
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทรียา กิตติเดชาชาญ นักวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยในโครงการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาตัวตรวจจับไอออนของโลหะด้วยนาโนเซนเซอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการแพทย์” ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยชาติและคณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติ สาขานาโนเทคโนโลยี สำหรับการสนับสนุนทุนการวิจัย ประจำปี 2553

คณะนักวิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร โอสถจันทร์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์รับเป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัยและให้คำปรึกษา และคำแนะนำในด้านต่างๆ ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นอกจากนี้คณะนักวิจัย ขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องของนักศึกษาทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการพัฒนางานวิจัยนี้ ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมถึงหน่วยงานต้นสังกัด ได้แก่ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนในด้านสถานที่และทรัพยากรต่างๆที่จำเป็นต่อการดำเนินการวิจัย

## Abstract

Microfabricated cantilever sensors represent a powerful platform for high-sensitive and high-resolution sensing applications in physics, chemistry, material science and biomedicine. When absorption and/or recognition of molecules occurs on the surface of functionalized microcantilevers, it will result in bending of the microcantilever beam due to the formation of surface stress. In this research, we proposed to develop a microcantilever-based ion-sensitive nanosensor. A gold-coated microcantilever, which is typically used in atomic force microscopy, was used as a sensor base. Its surface was then modified with self-assembled monolayers (SAMs) of 21-(16-mercaptohexadecan-1-oyl)-4,7,13,16-tetraoxa-1,10,21-triazabicyclo-[8.8.5]tricosane-19,23-dione which shows moderate selectivity for detection of  $\text{Li}^+$  ions in solution. The synthesis of the compound used for the preparation of the SAM was performed and characterized using NMR and ESI-MS.

We also report the design and development of an optical beam deflection detection system for measuring beam deflection. A high sensitive position sensitive detector (PSD) was employed to measure the displacement of the laser spot on the PSD which is related to cantilever bending. The detailed analysis of the designed read-out circuit was presented. Furthermore, the implemented read-out circuit was tested and characterized to ensure the linearity of the output signal in response to the displacement of the laser spot. In order to examine the performance of the developed optical beam deflection system, an atomic force microscope cantilever was used as a sensor. Experiments were also conducted to characterize the long term stability and the performance of the system. The experimental results showed that the noise level of the system in root mean square voltage was about 0.034 mV when operating the cantilever sensor in air and 0.027 mV when the cantilever sensor was in water.

## บทคัดย่อ

เซนเซอร์คานกลิจิวถูกนำมาใช้เป็นแพลตฟอร์มในการตรวจวัดที่ต้องการความไวและความละเอียดในการตรวจวัดสูง ทั้งการประยุกต์ใช้ในงานทางฟิสิกส์ เคมี วัสดุศาสตร์ และชีวการแพทย์ เมื่อโมเลกุลของสิ่งที่ต้องวัดถูกดักจับบนผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลิจิว จะส่งผลให้เซนเซอร์เกิดการโค้งงอเนื่องจากผลของความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้า โดยในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยเสนอการพัฒนานาโนเซนเซอร์สำหรับดักจับไอออนของโลหะโดยอาศัยหลักการของเซนเซอร์คานกลิจิว ในงานวิจัยนี้ เราใช้เซนเซอร์คานกลิจิวที่มีการเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำ จากนั้นนำมาปรับปรุงผิวหน้าด้วยกรรมวิธีทางเคมีเพื่อสร้างชั้นสารหล่อ หรือ self-assembled monolayers (SAMs) ของ 21-(16-mercaptohexadecan-1-oyl)-4,7,13,16-tetraoxa-1,10,21-triazabicyclo-[8.8.5]tricosane-19,23-dione ซึ่งแสดงความไวต่อการตรวจจับไอออนของลิเทียมที่อยู่ในสารละลาย เราได้ทำการสังเคราะห์สารประกอบเพื่อใช้ในการเตรียมผิวหน้าของชั้น SAM และศึกษาคุณสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค NMR และ ESI-MS

ในรายงานฉบับนี้ คณะผู้วิจัยได้รายงานการออกแบบและพัฒนาระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลิจิว โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง PSD เพื่อวัดตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ที่เปลี่ยนไปเมื่อเซนเซอร์คานกลิจิวเกิดการโค้งงอ พร้อมทั้งรายงานการออกแบบและการวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้ วงจรที่พัฒนาขึ้นได้ถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติเพื่อยืนยันความเป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตที่อ่านได้กับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ เซนเซอร์คานกลิจิวที่ใช้ในกล่องจุลทรรศน์แรงอะตอมถูกนำมาใช้เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบวัดความโค้งงอด้วยเทคนิคทางแสงที่พัฒนาขึ้น โดยทำการทดลองเพื่อทดสอบเสถียรภาพและประสิทธิภาพของระบบ จากการทดลองพบว่าระบบมีสัญญาณรบกวนอยู่ในช่วง 0.034 Vrms เมื่อใช้เซนเซอร์คานกลในตัวกลางอากาศ และ 0.027 mVrms เมื่อทดสอบเซนเซอร์คานกลจิวในของเหลว

## สารบัญเรื่อง

	หน้า
<b>บทที่ 1</b>	<b>บทนำ</b>
1.1	ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย
1.2	ทฤษฎี สมมติฐาน และ/หรือ กรอบแนวความคิดของแผนงานวิจัย
1.3	วัตถุประสงค์ของการวิจัย
1.4	แผนการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ
1.5	ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย
1.6	ความสำเร็จจากผลการดำเนินการวิจัยเฟสที่หนึ่ง
1.7	เอกสารอ้างอิง
<b>บทที่ 2</b>	<b>การเตรียมและการเคลือบชั้น SAMs บนเซนเซอร์คานกลจิว</b>
2.1	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2.2	วิธีดำเนินการวิจัย
2.2.1.	ออกแบบสารประกอบสำหรับดักจับไอออนลิเทียม ( $\text{Li}^+$ )
2.2.2.	การสังเคราะห์เซนเซอร์
2.2.3.	การเคลือบชั้น SAMs บนผิวหน้าของเซนเซอร์คานกล
2.2.4.	การทดสอบคุณสมบัติของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น
2.3	ผลการศึกษาการเตรียมสารประกอบ SAM สำหรับดักจับไอออนของลิเทียม
2.4	การเตรียมชั้น SAM
2.5	ผลการศึกษา
2.6	สรุปผล
2.7	เอกสารอ้างอิง
2.8	ภาคผนวก
<b>บทที่ 3</b>	<b>ระบบวัดความโค้งของเซนเซอร์คานกลจิว เวอร์ชัน 1</b>
3.1	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
3.2	การออกแบบระบบวัดความโค้งของเซนเซอร์คานกลจิวด้วยเทคนิคทางแสง
3.2.1	วงจรขับเลเซอร์ไดโอด (laser diode driver circuit)
3.2.2	วงจรพีเอสดี (PSD circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
3.3 ผลการศึกษาระบบวัดความโค้งของเซนเซอร์คานกลจิวด้วยเทคนิคทางแสง เวอร์ชันที่ 1	3-17
3.4 สรุปผลการศึกษา	3-54
3.5 ภาคผนวก	3-55
<b>บทที่ 4</b> ระบบวัดความโค้งของเซนเซอร์คานกลจิว เวอร์ชัน 2	4-1
4.1 การออกแบบระบบวัดความโค้งของเซนเซอร์คานกลจิวด้วยเทคนิคทางแสง เวอร์ชัน 2	4-1
4.2 ผลการศึกษาระบบวัดความโค้งของเซนเซอร์คานกลจิวด้วยเทคนิคทางแสง เวอร์ชันที่ 2	4-9
4.3 สรุปผลการทดลองเบื้องต้น	4-18
4.4 ภาคผนวก	4-20
<b>บทที่ 5</b> สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ	5-1
5.1 สรุปผลและอภิปราย	5-1
5.2 ความสำเร็จจากผลการดำเนินการวิจัยเฟสที่หนึ่ง	5-6
5.3 งานวิจัยที่ต้องทำต่อในอนาคต	5-6
<b>ประวัติคณบดีวิจัย</b>	

โครงการการพัฒนาตัวตรวจจับไอออนของโลหะด้วยนาโนเซนเซอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการแพทย์

โดย บดินทร์ คำรงค์ดีและคณะ

---



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
<b>บทที่ 1</b>	
ตารางที่ 1.1	ตารางสรุปผลดำเนินงานวิจัยที่คาดหวัง 1-7
ตารางที่ 1.2	ตารางสรุปกิจกรรมและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย (Gantt chart) 1-9
<b>บทที่ 3</b>	
ตารางที่ 3.1	แสดงค่ากระแสของเลเซอร์ไดโอดกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากรบวงจกรทดลองครั้งที่ 1 3-18
ตารางที่ 3.2	แสดงค่ากระแสของเลเซอร์ไดโอดกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากรบวงจกรทดลองครั้งที่ 2 3-20
ตารางที่ 3.3	แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยให้กระแสของเลเซอร์ไดโอดคงที่ที่ 10 mA 3-25
ตารางที่ 3.4	แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยให้กระแสของเลเซอร์ไดโอดคงที่ที่ 25 mA 3-26
ตารางที่ 3.5	แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยให้กระแสของเลเซอร์ไดโอดคงที่ที่ 50 mA 3-28
ตารางที่ 3.6	แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยให้กระแสของเลเซอร์ไดโอดคงที่ที่ 10 mA 3-31
ตารางที่ 3.7	แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยให้กระแสของเลเซอร์ไดโอดคงที่ที่ 25 mA 3-32
ตารางที่ 3.8	แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยให้กระแสของเลเซอร์ไดโอดคงที่ที่ 50 mA 3-34
ตารางที่ 3.9	ผลที่ได้จากการทดลองที่กระแสของเลเซอร์ไดโอด 10.4 mA 3-37
ตารางที่ 3.10	ผลที่ได้จากการทดลองที่กระแสของเลเซอร์ไดโอด 25 mA 3-40
ตารางที่ 3.11	ผลจากการทดลองทำการพิตกราฟเพื่อหาสมการเชิงเส้นที่อธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูล 3-42
ตารางที่ 3.12	แสดงค่าผลที่ได้จากการทดลองที่กระแสของเลเซอร์ไดโอด 50 mA 3-43
ตารางที่ 3.13	ผลจากการทดลองทำการพิตกราฟเพื่อหาสมการเชิงเส้นที่อธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูล 3-45

## สารบัญญภาพ

	หน้า
<b>บทที่ 1</b>	
รูปที่ 1.1	ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของคานกลขนาดจิ๋ว 1-3
รูปที่ 1.2	การทำงานของเซนเซอร์แบบคานกลในโหมด mass sensing 1-4
รูปที่ 1.3	การเกิด closed-packed highly ordered ของฟิล์มบาง Self-Assembled Monolayers (SAMs) 1-5
รูปที่ 1.4	โครงสร้างของสารประกอบกลุ่ม thiol ที่ถูกดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุล 1-5
รูปที่ 1.5	ภาพโครงสร้างระบบวัดความโค้งของเซนเซอร์คานกลที่จุ่มอยู่ในสารละลาย 1-6
<b>บทที่ 2</b>	
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนสำหรับดักจับเฉพาะไอออนของลิเทียม [Wanichacheva et al., 2006] 2-2
รูปที่ 2.2	(a) แบบจำลองโมเลกุลของสารประกอบสำหรับดักจับไอออนของลิเทียม (b) โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบที่ออกแบบขึ้นโดยดัดแปลงส่วนหางให้มีสารประกอบของหมู่ thiol เพื่อจับยึดกับอะตอมของทอง 2-5
รูปที่ 2.3	เส้นทางสังเคราะห์สารประกอบสำหรับดักจับไอออนของลิเทียม 2-6
รูปที่ 2.4	<sup>1</sup> H-NMR ของสารประกอบ I-2 2-9
รูปที่ 2.5	<sup>13</sup> C-NMR ของสารประกอบ I-2 2-10
รูปที่ 2.6	<sup>1</sup> H-NMR ของสารประกอบ I-3 2-11
รูปที่ 2.7	<sup>13</sup> C-NMR ของสารประกอบ I-3 2-12
รูปที่ 2.8	<sup>1</sup> H-NMR ของสารประกอบ I-4 2-13
รูปที่ 2.9	<sup>13</sup> C-NMR ของสารประกอบ I-4 2-14
รูปที่ 2.10	<sup>1</sup> H-NMR ของสารประกอบ II 2-15
รูปที่ 2.11	<sup>13</sup> C-NMR ของสารประกอบ II 2-16
รูปที่ 2.12	ESI-MS ของสารประกอบ II 2-17
รูปที่ 2.13	ระบบวัด contact angle ที่พัฒนาขึ้นที่สาขาวิชาฟิสิกส์ สจล. เพื่อใช้ทดสอบแรงตึงผิวหน้าของชิ้นงาน 2-18
รูปที่ 2.14	การวัด impedance spectroscopy ของไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทรานเซนเซอร์ 2-21

		หน้า
รูปที่ 2.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอิมพีแดนซ์และความถี่ของไมโครอิเล็กโทรดเซนเซอร์ โดยเซนเซอร์ถูกเคลือบด้วยทอง (Au) และ SAM photomask ที่ใช้สร้างลวดลายลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยสีขาวจะโปร่งแสง และสีดำทึบแสง	2-22
รูปที่ 2.16	แผ่นทองแดง หรือ แผ่น PCB	2-24
รูปที่ 2.17	เครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง	2-25
รูปที่ 2.18	เครื่องฉายแสงยูวี	2-25
รูปที่ 2.19	ฟิล์มไวแสง	2-25
รูปที่ 2.20	การเคลือบฟิล์มไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์ม	2-26
รูปที่ 2.21	การสร้างลวดลายไมโครอิเล็กโทรดลงบนแผ่น PCB ที่เคลือบด้วยฟิล์มไวแสง โดยใช้เครื่องฉายแสง UV เป็นเวลา 150 วินาที	2-26
รูปที่ 2.22	ภาพถ่ายขั้นตอนการ develop ฟิล์มไวแสง เมื่อฟิล์ม develop โดยสมบูรณ์แล้ว	2-26
รูปที่ 2.23	ภาพถ่ายแผ่น PCB พร้อมลวดลายไมโครอิเล็กโทรดที่ถูกตัดออกเป็นชิ้น	2-27
รูปที่ 2.24	ภาพถ่ายขั้นตอนการกัดทองแดงออกจากแผ่น PCB ด้วย ferric chloride	2-27
รูปที่ 2.25	ภาพถ่ายไมโครอิเล็กโทรดเซนเซอร์ที่สร้างขึ้นจากขั้นตอนที่ 1 - 6	2-27
รูปที่ 2.26	รูปถ่ายแสดงการเคลือบไมโครอิเล็กโทรดเซนเซอร์ด้วยสารละลายทองแดงต่าง	2-28
รูปที่ 2.27	รูปถ่ายแสดงการเคลือบไมโครอิเล็กโทรดเซนเซอร์ด้วยสารละลายทองแดงกรด	2-29
รูปที่ 2.28	รูปถ่ายแสดงการเคลือบไมโครอิเล็กโทรดเซนเซอร์ด้วยสารละลายนิกเกิลซัลเฟต	2-29
รูปที่ 2.29	รูปถ่ายแสดงการเคลือบไมโครอิเล็กโทรดเซนเซอร์ด้วยสารละลายสำหรับชุบทอง	2-29
รูปที่ 2.30		
<b>บทที่ 3</b>		
รูปที่ 3.1	การทำงานของเซนเซอร์คานกลจิวแบ่งออกได้เป็น (a) โหมดวัดความโค้งงอ และ (b) โหมดวัดการสั่นพ้อง	3-2
รูปที่ 3.2	การทำงานของคานกลจิวแบบโหมดสั่นพ้อง: (a) ในสภาวะปกติคานกลจิวจะแกว่งด้วยความถี่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความถี่กำทอน (fundamental resonant frequency) และ (b) เมื่ออนุภาคเกาะติดบนผิวหน้าจะทำให้ความถี่ในการแกว่งหรือสั่นพ้องของคานกลจิวเปลี่ยนไป	3-4
รูปที่ 3.3	การทำงานของคานกลจิวในโหมดวัดความโค้งงอ: (a) สภาพปกติของคานกลจิวจะตั้งอยู่ในแนวตรง ไม่โค้งงอ (stress free) และ (b) เมื่อมีอนุภาคมาเกาะติดอยู่บนพื้นผิวของคานกลจิวจะทำให้เกิดความเค้น ส่งผลให้คานกลจิวโค้งงอ	3-5

	หน้า
รูปที่ 3.4	ไดอะแกรมระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลด้วยเทคนิค optical beam deflection measurement 3-6
รูปที่ 3.5	แสดงแผนภาพไดอะแกรมของวงจรอ่านค่าตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD 3-7
รูปที่ 3.6	ภาพแบบจำลองเซนเซอร์แบบ PSD 3-8
รูปที่ 3.7	ภาพถ่ายเซนเซอร์ชนิด PSD 3-8
รูปที่ 3.8	แผนผังแสดงวงจรขับเลเซอร์ไดโอด 3-9
รูปที่ 3.9	แผนผังแสดงวงจรรวมแรงดันเอาต์พุตระหว่าง ( $V_A + V_B$ ) และ ( $V_C + V_D$ ) 3-11
รูปที่ 3.10	แสดงวงจรบวกตัวยุทธ์ระหว่าง $[V_{(A+B)} + V_{(C+D)}]$ และวงจรลบตัวยุทธ์ $[V_{(A+B)} - V_{(C+D)}]$ 3-13
รูปที่ 3.11	การโค้งงอของคานกลจะคำนวณหาความโค้งงอได้ตามสมการ $\Delta z \approx 3 \frac{1-\nu}{Et^2} L^2 \Delta \sigma$ 3-15
รูปที่ 3.12	แสดงภาพลักษณะของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนเซนเซอร์แบบ PSD 3-16
รูปที่ 3.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของเลเซอร์ไดโอดที่ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุตทดลองครั้งที่ 1 และมีสมการเส้นตรง $y = -3.6433x - 68.180$ 3-20
รูปที่ 3.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของเลเซอร์ไดโอดที่ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุตทดลองครั้งที่ 2 และมีสมการเส้นตรง $y = -3.613x - 69.7913$ 3-21
รูปที่ 3.15	อุปกรณ์และการตั้งค่าการทดลอง 3-23
รูปที่ 3.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีใส่เลนส์รวมแสง 3-26
รูปที่ 3.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีใส่เลนส์รวมแสง 3-28
รูปที่ 3.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีใส่เลนส์รวมแสง 3-29
รูปที่ 3.19	ภาพแสดงลักษณะกรณีลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบริเวณช่องว่างระหว่าง 4 จุดภาค 3-30

	หน้า	
รูปที่ 3.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีใส่เลนส์รวมแสง	3-32
รูปที่ 3.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีใส่เลนส์รวมแสง	3-34
รูปที่ 3.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD	3-35
รูปที่ 3.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีไม่มีเลนส์รวมแสง	3-39
รูปที่ 3.24	กราฟแสดงชุดข้อมูลเฉพาะส่วนเพื่อหาสมการเส้นตรง $y = 40x - 0.53227$	3-39
รูปที่ 3.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีไม่มีเลนส์รวมแสง	3-41
รูปที่ 3.26	กราฟแสดงชุดข้อมูลเฉพาะส่วนเพื่อหาสมการเส้นตรง $y = 74.92843x - 8.31646$	3-43
รูปที่ 3.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีไม่มีเลนส์รวมแสง	3-45
รูปที่ 3.28	กราฟแสดงชุดข้อมูลเฉพาะส่วนเพื่อหาสมการเส้นตรง $y = 98.40787x - 7.26995$	3-46
รูปที่ 3.29	การติดตั้งชุดทดลองระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลจิว	3-48
รูปที่ 3.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับการเปลี่ยนแปลงของเวลาในระบบเซนเซอร์คานกลจิวที่มีตัวกลางเป็นอากาศ	3-49
รูปที่ 3.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับการเปลี่ยนแปลงของเวลาในระบบเซนเซอร์คานกลจิวที่มีตัวกลางเป็นอากาศ โดยเก็บบันทึกข้อมูลเมื่อสัญญาณมีการกวัดแกว่งแบบคงที่	3-49
รูปที่ 3.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับการเปลี่ยนแปลงของเวลาในระบบเซนเซอร์คานกลจิวที่มีตัวกลางเป็นน้ำ	3-50
รูปที่ 3.33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับการเปลี่ยนแปลงของเวลาในระบบเซนเซอร์คานกลจิวที่มีตัวกลางเป็นน้ำ โดยเก็บบันทึกข้อมูลเมื่อสัญญาณมีการกวัดแกว่งแบบคงที่	3-51
รูปที่ 3.34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์แบบ PSD กับเซนเซอร์คานกลจิวที่มุมต่างๆที่มีตัวกลางเป็นน้ำ	3-53

	หน้า	
รูปที่ 3.35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุทของเซนเซอร์แบบ PSD กับมุมการโค้งงอของเซนเซอร์คานากลจิว ที่มีมุม 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 องศา	3-53
รูปที่ 3.36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุทของเซนเซอร์แบบ PSD กับเซนเซอร์คานากลจิวเมื่อเคลือบด้วยชั้น SAM ในสารละลายที่มีองค์ประกอบของลิเทียมไอออน พบว่าสัญญาณมีการกวัดแกว่งค่อนข้างสูง	3-55
<b>บทที่ 4</b>		
รูปที่ 4.1	ภาพรวมของการวัดวางแนวลำแสงของระบบ	4-1
รูปที่ 4.2	แบบจำลองโครงสร้างแท่นยึดที่ใช้ในการทดลอง	4-2
รูปที่ 4.3	แท่นยึดสำหรับทดลองที่สร้างขึ้น	4-2
รูปที่ 4.4	ทิศทางการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์	4-3
รูปที่ 4.5	ภาพเมื่อสังเกตคานากลขนาดจิ๋วด้วยตา	4-4
รูปที่ 4.6	ภาพที่สังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์	4-4
รูปที่ 4.7	กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการทดลอง	4-4
รูปที่ 4.8	การแบ่งควอดแดรนต์ในควอดแดรนต์โพโตไดโอด	4-6
รูปที่ 4.9	แผนผังการรับ-ส่งค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์	4-6
รูปที่ 4.10	การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสงกับวงจร Signal Condition และไมโครคอนโทรลเลอร์	4-7
รูปที่ 4.11	โปรแกรมที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นซึ่งค่าความต่างของแรงดันที่เข้าใกล้ศูนย์แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์อยู่บริเวณจุดกึ่งกลาง	4-8
รูปที่ 4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{com}$ กับ $V_{A+B}$ และความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{com}$ กับ $V_{C+D}$ ที่มีมุม 40 องศา	4-10
รูปที่ 4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{com}$ กับ $V_{total}$ ที่มีมุม 40 องศา	4-11
รูปที่ 4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{laser}$ กับ $V_{uc}$ ที่มีมุม 40 องศา	4-11
รูปที่ 4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{laser}$ กับ $V_{com}$ ที่มีมุม 40 องศา	4-12
รูปที่ 4.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{com}$ กับ $V_{A+B}$ และความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{com}$ กับ $V_{C+D}$ ที่มีมุม 50 องศา	4-12
รูปที่ 4.17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{com}$ กับ $V_{total}$ ที่มีมุม 50 องศา	4-13
รูปที่ 4.18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{laser}$ กับ $V_{uc}$ ที่มีมุม 50 องศา	4-13

	หน้า	
รูปที่ 4.19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{\text{laser}}$ กับ $V_{\text{com}}$ ที่มุม 50 องศา	4-14
รูปที่ 4.20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{\text{com}}$ กับ $V_{A+B}$ และความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{\text{com}}$ กับ $V_{C+D}$ ที่มุม 60 องศา	4-14
รูปที่ 4.21	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{\text{com}}$ กับ $V_{\text{total}}$ ที่มุม 60 องศา	4-15
รูปที่ 4.22	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{\text{laser}}$ กับ $V_{\text{uc}}$ ที่มุม 60 องศา	4-15
รูปที่ 4.23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{\text{laser}}$ กับ $V_{\text{com}}$ ที่มุม 60 องศา	4-16
รูปที่ 4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างองศาการเอียงของคานกลขนาดจิวกับค่า $V_{C+D}$ ที่ระยะ 4.5 เซนติเมตร	4-17
รูปที่ 4.25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างองศาการเอียงของคานกลขนาดจิวกับค่า $V_{C+D}$ ที่ระยะ 6 เซนติเมตร	4-17
รูปที่ 4.26	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างองศาการเอียงของคานกลขนาดจิวกับค่า $V_{C+D}$ ที่ระยะ 7.5 เซนติเมตร	4-18
<b>บทที่ 5</b>		
รูปที่ 5.1	ภาพถ่ายการ setup ระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลที่คณะผู้วิจัยพัฒนาขึ้นในโครงการที่ 2 (ช่วงรายงานความก้าวหน้ารอบหกเดือน)	5-3
รูปที่ 5.2	ไดอะแกรมแสดงทิศทางเดินของแสงของ ระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลที่คณะผู้วิจัยพัฒนาขึ้น	5-4
รูปที่ 5.3	ภาพถ่ายการ setup ระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลจิวด้วยหลักการสะท้อนแสง	5-5

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ในร่างกายคนเรามีไอออนโลหะอัลคาไลน์ อาทิเช่น โซเดียม (Sodium,  $\text{Na}^+$ ) โพแทสเซียม (Potassium,  $\text{K}^+$ ) และลิเทียม (Lithium,  $\text{Li}^+$ ) ประกอบอยู่ โดยปริมาณของธาตุโลหะเหล่านี้มีบทบาทต่อสุขภาพร่างกายของคนเรา ซึ่งสามารถบ่งชี้ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับร่างกายของเราได้ เช่น ภาวะโซเดียมในเลือดต่ำ (Hyponatremia) บ่งบอกถึงความผิดปกติกับระบบทางเดินอาหาร ไต ภาวะโซเดียมในเลือดสูง (Hypernatremia) บ่งบอกถึงความผิดปกติกับระบบทางสมอง ความไม่สมดุลของระดับโพแทสเซียมในเลือด (Hypokalemia และ Hyperkalemia) จะส่งผลให้คลื่นหัวใจทำงานผิดปกติ และกล้ามเนื้ออ่อนแรงหรืออาจอันตรายถึงขั้นเป็นอัมพาตได้ อีกตัวอย่างหนึ่งที่น่าสนใจได้แก่ ไอออนลิเทียม ซึ่งปกติไม่มีในร่างกายมนุษย์ แต่ไอออนลิเทียมเป็นส่วนประกอบในยาที่ใช้รักษาผู้ป่วยที่มีความผิดปกติทางจิตและผู้ป่วยโรคซึมเศร้า ถ้าปริมาณของลิเทียมไอออนในเลือดสูงเกินไป ก็จะทำให้การรักษาอาการของผู้ป่วยมีผลในเชิงลบและ อาจมีผลทำให้ผู้ป่วยเสียชีวิตได้ ดังนั้นในระหว่างการรักษาผู้ป่วยที่มีความผิดปกติทางจิตจึงจำเป็นต้องคอยเฝ้าระวังปริมาณของไอออนลิเทียมในเลือดของผู้ป่วย

ประเด็นปัญหาในการตรวจวัดปริมาณไอออนโลหะที่ปะปนอยู่ในตัวอย่างเลือดซึ่งมีธาตุอื่นๆปะปนอยู่ด้วย ก็คือความสามารถในการดักจับ (chelating) และคัดแยก (selectivity) เพื่อเลือกตรวจวัดเฉพาะไอออนของโลหะที่สนใจ และเมื่อดักจับไอออนของไอออนโลหะดังกล่าวแล้ว อุปกรณ์ดังกล่าวจะต้องมีความไวไวเพียงพอในการวิเคราะห์ปริมาณของไอออนโลหะที่มีปริมาณน้อยๆได้ (high sensitivity)

การมีเซนเซอร์ที่สามารถดักจับหรือตรวจวัดปริมาณของธาตุโลหะอัลคาไลน์ที่ปะปนอยู่ในตัวอย่างเลือด จะช่วยให้เราสามารถตรวจพบและวิเคราะห์หาความผิดปกติในร่างกายของผู้ป่วยได้อย่างทันที่ อีกทั้งยังมีโอกาสและความเป็นไปได้ (potential) ในการนำเซนเซอร์ไปพัฒนาต่อยอดเพื่อสร้างและพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์และวินิจฉัยทางการแพทย์ที่มีราคาถูกลงและเหมาะสมในเชิงพาณิชย์ต่อไป ซึ่งจะสามารถตอบสนองต่อนโยบายและความต้องการของประเทศในการพัฒนาวิทยาการใหม่ๆทางด้านนาโนเทคโนโลยี และเป็นการเตรียมความเข้มแข็งเพื่อให้กับประเทศ พึ่งพาตัวเองได้ และสามารถแข่งขันได้ในระดับสากล คณะผู้วิจัยจึงได้

ริเริ่มการวิจัยทางด้านเซนเซอร์ตรวจวัดไอออนของธาตุโลหะอัลคาไลน์ อาทิ โพแทสเซียม โซเดียม และ ลิเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อที่ 1-1 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยประยุกต์ใช้เซนเซอร์คานกลชนิดเดียวกับที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope, AFM) ร่วมกับเทคนิคการเคลือบผิวหน้าด้วยชั้น self-assembled monolayers (SAMs) เพื่อดักจับและวัดปริมาณของไอออนเฉพาะธาตุอัลคาไลน์ที่สนใจ

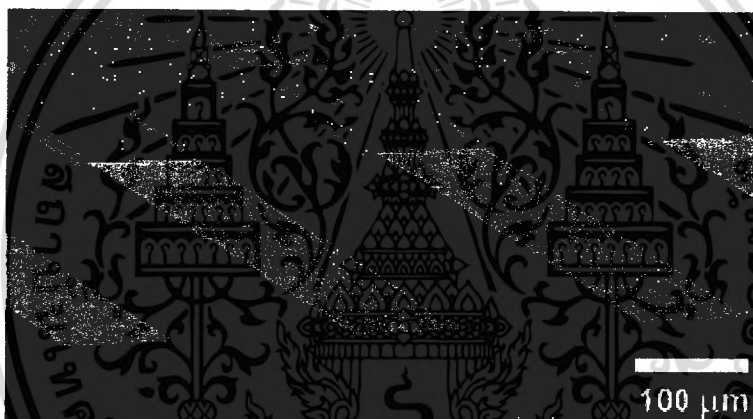
โครงการวิจัยนี้แบ่งงานออกเป็น 2 ส่วน กำหนดระยะเวลาวิจัย 1 ปี งานวิจัยส่วนแรกจะเป็นความร่วมมือระหว่างภาควิชาเคมีและภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในการศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบสำหรับดักจับไอออนของโลหะอัลคาไลน์สำคัญในร่างกายมนุษย์ โดยคณะผู้วิจัยสนใจการดักจับไอออนของลิเทียม ( $\text{Li}^+$ ) งานวิจัยอีกส่วนที่สองจะเป็นการสร้างและพัฒนาระบบการวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกล (ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณของโมเลกุลที่มาเกาะบนเซนเซอร์คานกล) เพื่อวัดความโค้งงอของเซนเซอร์ในตัวกลางอากาศและของเหลว ซึ่งมีเป้าหมายจะพัฒนาระบบขนาดเล็กและมีราคาถูก โดยงานวิจัยส่วนที่สองนี้จะเป็นความร่วมมือระหว่างภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และ ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยงานวิจัยส่วนที่หนึ่ง จะเลือกศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบสำหรับดักจับเฉพาะไอออนของโลหะลิเทียมเพียงธาตุเดียวก่อน ซึ่งผู้วิจัยมีประสบการณ์ในการสังเคราะห์มาแล้ว และมุ่งเน้นไปที่วิธีและกระบวนการเคลือบชั้น SAMs ลงบนเซนเซอร์คานกลขนาดจิ๋ว จากนั้นจึงนำเซนเซอร์คานกลที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับระบบวัดความโค้งงอของคานกลด้วยเทคนิคทางแสง

งานวิจัยส่วนที่สอง คณะผู้วิจัยจะเลือกพัฒนาเทคนิคการวัดความโค้งงอของคานกลขนาดจิ๋วด้วยเทคนิคทางแสงด้วยวิธี Optical beam deflection โดยแบ่งทีมออกเป็นสองทีม ทีมแรก (ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร) จะ setup ระบบจากเครื่องมือทดลองที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการแสงเลเซอร์ (ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีราคาแพง) ทีมที่สอง (ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง) จะศึกษาระบบเดียวกันโดยใช้อุปกรณ์วัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น laser diode, photodetector เพื่อพัฒนาระบบที่เล็กและมีราคาถูกกว่า โดยคณะผู้วิจัยจะศึกษาทดลองวัดความโค้งงอของคานกลขนาดจิ๋วในตัวกลางอากาศ และศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบสำหรับใช้วัดความโค้งงอของคานกลในตัวกลางของเหลวเพื่อทดสอบกับเซนเซอร์คานกลที่พัฒนาจากโครงการย่อยส่วนที่หนึ่ง

## 1.2 ทฤษฎี สมมติฐาน และ/หรือ กรอบแนวความคิดของแผนงานวิจัย

เซนเซอร์คานกลขนาดจิ๋ว<sup>1</sup> (micro/nanomechanical cantilever-based sensors) เป็นเซนเซอร์เชิงกล ความละเอียดสูง ซึ่งส่วนใหญ่พบได้ในกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) เพื่อเป็นสร้างภาพพื้นผิวของวัสดุที่มีความละเอียดในระดับโมเลกุล [Binnig *et al.*, 1986] โดยทั่วไปแล้วเซนเซอร์คานกลมีลักษณะเป็นแท่งคาน แสดงดังรูปที่ 1.1 มีปลายด้านหนึ่งยึดติดอยู่กับที่ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งเป็นอิสระ (ลักษณะคล้ายสปริงบอร์ด กระโดดน้ำขนาดจิ๋ว) ปัจจุบันมีการนำเซนเซอร์คานกลนี้มาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ทางเคมีและชีวภาพชนิดต่างๆ [Fritz *et al.*, 2000; Ji *et al.*, 2002] ด้วยข้อดีของเซนเซอร์แบบคานกระดกซึ่งมีความไวและความละเอียดในการตรวจวัดสูง ทางคณะผู้วิจัยจึงเลือกประยุกต์ใช้คานกลที่มีขายสำหรับใช้กับเครื่อง AFM โดยนำมาดัดแปลงสำหรับเป็นเซนเซอร์ในการดักจับไอออนของโลหะอัลคาไลน์

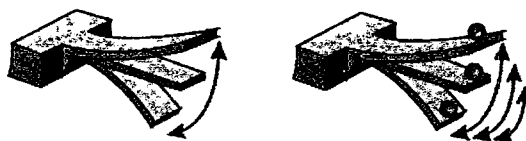


รูปที่ 1.1: ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของคานกลขนาดจิ๋ว [Fritz *et al.*, 2000]

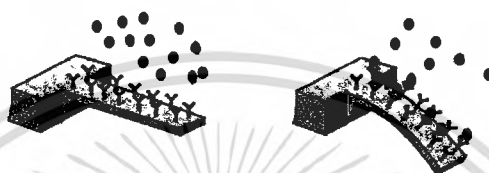
ปัจจัยที่จะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลเฉพาะที่ต้องการมาเกาะติดบนเซนเซอร์คานกลคือการเคลือบผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลด้วย สารตัวล่อ (functionalized materials) เพื่อดักจับเฉพาะโมเลกุลหรืออนุภาคที่ต้องการ เมื่อโมเลกุลที่ต้องการถูกดักจับ จะทำให้เกิดความเค้นบนผิวของคานกลส่งผลให้คานกลโค้งงอหรือความถี่ก่าทอนของคานกลเปลี่ยนไป (ดูรูปที่ 1.2 ประกอบ) [Levrik *et al.*, 2004] โดยสารตัวล่อที่ดีนั้นนอกจากจะต้องสามารถคัดกรองและดักจับเฉพาะอะตอมหรือโมเลกุลที่ต้องการได้ จะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของเซนเซอร์คานกล (ไม่หนาและหนักเกินไป จนทำให้คานกลโค้งงอหรือเสียหายไปเสียก่อนที่จะมีโมเลกุลที่ต้องการมาเกาะติด)

<sup>1</sup>โดยทั่วไปแล้วชุดคานกลขนาดจิ๋วจะมีความหนาประมาณ 100 nm ถึง 50  $\mu\text{m}$  และมีความยาวประมาณ 100 ถึง 500  $\mu\text{m}$   
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Mass Sensing

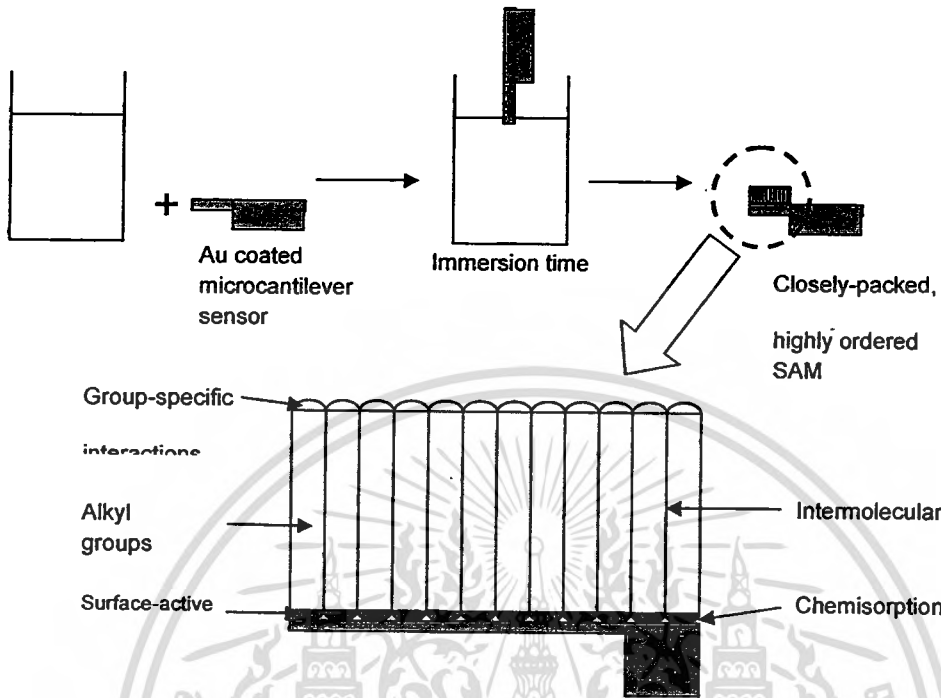


### Surface Stress Sensing

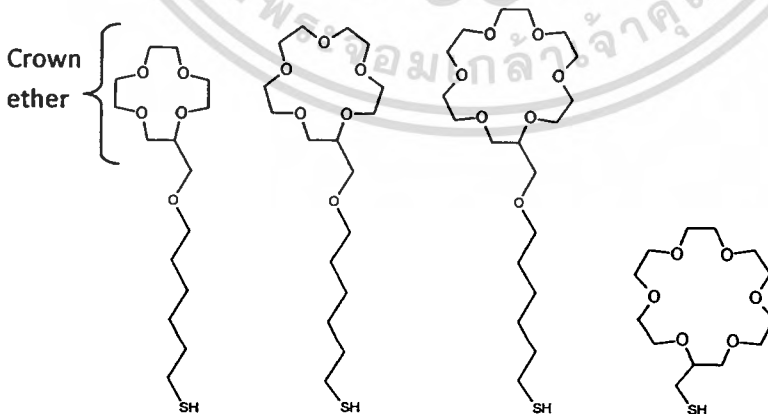


รูปที่ 1.2: การทำงานของเซนเซอร์แบบคานกลในโหมด mass sensing เป็นการวัดความถี่กำทอนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีอนุภาคมาเกาะติดบนผิวหน้าของเซนเซอร์ โดยความถี่ที่เปลี่ยนไปจะสัมพันธ์กับมวลของอนุภาคที่มาเกาะติด และโหมด surface stress sensing หรือการวัดความโค้งของคานกลเมื่อมีอนุภาคมาเกาะติด

จากประสบการณ์ในการวิจัยด้าน SAMs ของคณะผู้วิจัย [Wanichacheva *et al.*, 2006] ซึ่งสามารถเตรียมและสังเคราะห์สารตัวล่อที่มีความหนาแน่นน้อยมากๆ ซึ่งเป็นชั้นที่มีความหนาเพียงหนึ่งโมเลกุลของสารประกอบเท่านั้น โดยการสังเคราะห์สารประกอบสำหรับสร้างชั้น SAMs จะต้องสังเคราะห์สารประกอบให้มีส่วนของสายโซ่ยาว (alkyl chain) เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวให้ใกล้กันมากที่สุด (closed-packed highly ordered) ดังแสดงไว้ด้วยรูปที่ 1.3 จากนั้นจะนำสารประกอบที่สังเคราะห์ได้มาดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลให้เหมาะสมเพื่อดักจับเฉพาะไอออนของโลหะอัลคาไลน์ชนิดที่ต้องการตรวจวัด (ส่วนของ crown ether ดังแสดงในรูปที่ 1.4) โดยคณะผู้วิจัยจะเลือกสังเคราะห์และดัดแปลงสารประกอบที่มีส่วนประกอบสำคัญสองส่วนคือ 1) ส่วนที่ทำให้เกิดการดักจับไอออนอย่างเฉพาะเจาะจง และ 2) ส่วนที่มีหมู่ thiols (HS) เป็นองค์ประกอบภายในโมเลกุล (รูปที่ 1.4) โดยใช้หลักที่ว่า อะตอมซัลเฟอร์จะยึดเกาะได้ดีกับพื้นผิวทอง (favourable electrostatic interaction) [Flink *et al.*, 2003] ดังนั้นการเคลือบชั้น SAMs บนเซนเซอร์คานกลให้ได้ผลดีจำเป็นต้องเคลือบผิวหน้าของคานกลด้วยทองเสียก่อน

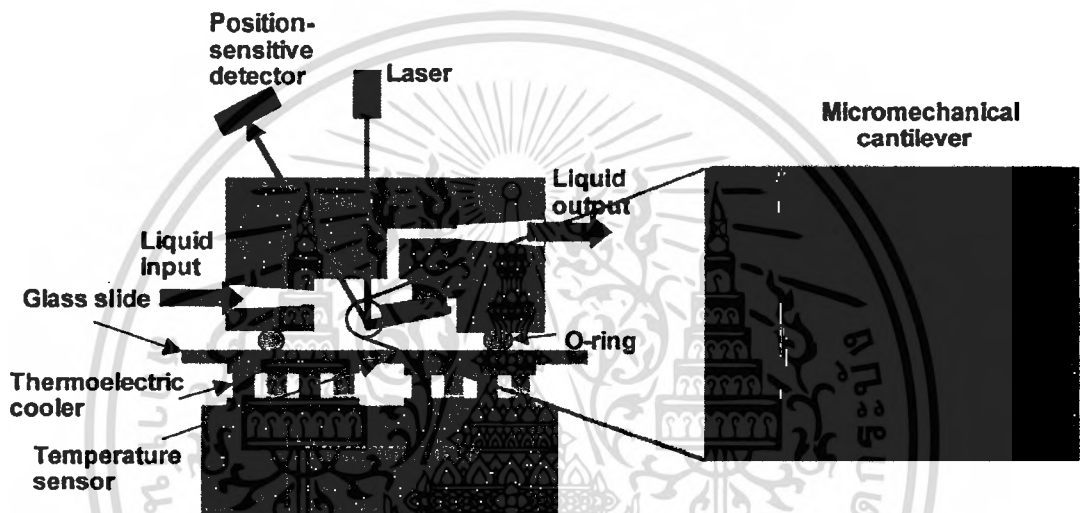


รูปที่ 1.3: การเกิด closed-packed highly ordered ของฟิล์มบาง Self-Assembled Monolayers (SAMs) โดยในกรณีนี้ Group-Specific Interaction ด้านบนของ SAMs คือส่วนของ crown ether ดังในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4: โครงสร้างของสารประกอบกลุ่ม thiol ที่ถูกดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุล (บริเวณส่วนบน ซึ่งเรียกว่า crown ethers) ให้ดักจับเฉพาะไอออนของโลหะอัลคาไลที่ต้องการศึกษาได้

การวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลที่เกิดขึ้นเมื่อมีไอออนของโลหะอัลคาไลนมาเกาะติดบนผิวหน้า คณะผู้วิจัยเลือกใช้เทคนิคทางแสง (คล้ายกันกับที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความไวในการตรวจวัดสูง โดยผู้วิจัยเลือกศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลด้วยวิธี optical beam deflection โดยมุ่งเน้นที่จะพัฒนาระบบขึ้นมาเองจากวัสดุที่จัดหาได้ในประเทศไทย เพื่อให้ระบบวัดมีขนาดเล็ก ราคาถูก และสามารถนำไปใช้กับเซนเซอร์คานกลที่พัฒนาขึ้นได้ โดยรูปที่ 1.5 แสดงภาพวาดของระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลซึ่งเป็นเป้าหมายของงานวิจัยในส่วนที่สอง



รูปที่ 1.5: ภาพโครงสร้างระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลที่จุ่มอยู่ในสารละลาย โดยเซนเซอร์คานกลจะถูกยึดติดอยู่กับแก้วหรือพลาสติกใส ซึ่งลำแสงเลเซอร์สามารถทะลุผ่านได้ เมื่อแสงเลเซอร์กระทบกับเซนเซอร์คานกลที่เคลือบด้วยทองและชั้น SAMs แสงจะสะท้อนกลับไปหาเซนเซอร์วัดตำแหน่ง (position-sensitive detector) ของเหลวหรือสารละลายจะถูกป้อนเข้าไปในระบบซึ่งควบคุมอุณหภูมิด้วย thermoelectric cooler และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อนำสารประกอบที่สังเคราะห์ได้สำหรับเลือกดักจับเฉพาะไอออนของโลหะลิเทียม มาเคลือบเป็นชั้น SAMs (self-assembled monolayers) บนผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลขนาดจิ๋ว
- เพื่อพัฒนาและสร้างระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลในตัวกลางอากาศ

#### 1.4 แผนการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ

##### ตารางที่ 1.1 ตารางสรุปผลดำเนินงานวิจัยที่คาดหวัง

โครงการ วิจัยย่อย	Milestones	
	6 เดือน	12 เดือน
1	- ได้สารประกอบที่สังเคราะห์และ ดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลสำหรับดักจับ ไอออนลิเทียม	- ได้เซนเซอร์คานกลขนาดจิ๋วซึ่งเคลือบ ด้วยชั้น SAMs สำหรับดักจับไอออน ลิเทียม  - ได้ผลทดสอบคุณสมบัติการดักจับไอออน ลิเทียมจากเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น
2	- ได้ระบบวัดความโค้งงอเพื่อทดสอบกับ เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นจากโครงการย่อยที่ 1  - ได้ทดสอบระบบกับเซนเซอร์คานกลที่ยัง ไม่ได้เคลือบชั้น SAMs	- ได้ทดสอบระบบกับเซนเซอร์ที่เคลือบชั้น SAMs จากโครงการย่อยที่ 1  - ได้ระบบวัดที่เหมาะสมสำหรับพัฒนาใน เฟสถัดไป

##### ระเบียบวิธีดำเนินงานวิจัยโครงการย่อยที่ 1

1. ออกแบบสารประกอบสำหรับดักจับไอออนลิเทียม ( $Li^+$ ) ที่เหมาะสมที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ โดยใช้ Molecular modeling โดยเลือกสังเคราะห์สารประกอบที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด (complexation energy) เมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนโลหะที่สนใจชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น
2. สังเคราะห์สารประกอบสำหรับจับไอออน ลิเทียม ที่ได้ออกแบบไว้แล้วจากขั้นตอนที่ 1
3. Characterize โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้ NMR spectroscopy และ Mass Spectroscopy
4. เตรียมผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลโดยการเคลือบชั้น Chrome/Gold ลงบนเซนเซอร์คานกลด้วยวิธี evaporation หรือ sputtering
5. ศึกษากระบวนการเคลือบชั้น SAMs บนเซนเซอร์คานกลขนาดจิ๋ว

6. Characterize คุณสมบัติของฟิล์มที่สร้างขึ้นเมื่อเคลือบบนเซนเซอร์คานกล โดยใช้วิธีการ เช่น Atomic force microscope, Contact angle goniometer, Grazing incidence infrared spectrophotometer, Electrochemical techniques และ Ellipsometry
7. ศึกษาประสิทธิภาพของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมา โดยทดสอบการดักจับไอออนลิเทียม ( $\text{Li}^+$ ) เปรียบเทียบกับไอออนรบกวนอื่นๆ เช่น ไอออนโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) ไอออนโพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) ไอออนแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ )

### ระเบียบวิธีดำเนินงานวิจัยโครงการย่อยที่ 2

1. ออกแบบและสร้างระบบวัดความโค้งของเซนเซอร์คานกลด้วยวิธี optical beam deflection
2. ออกแบบและสร้างฐานจับยึดเซนเซอร์คานกลขนาดจิ๋ว เนื่องจากเซนเซอร์มีขนาดเล็กมาก ความกว้างของคานกลประมาณ 50 – 200  $\mu\text{m}$  ฐานยึดจับจะติดตั้งชุด manipulator เพื่อสามารถ align ตำแหน่งของคานกลขนาดจิ๋วกับลำแสงเลเซอร์ได้
3. ออกแบบและสร้าง chamber ขนาดเล็ก เพื่อติดตั้งชุดวัดทางแสงและจับยึดเซนเซอร์คานกลขนาดจิ๋ว
4. ทดสอบระบบวัดโดยทดลองกับเซนเซอร์คานกลที่ยังไม่ได้เคลือบชั้น SAMs
5. ทดสอบระบบวัดโดยทดลองกับเซนเซอร์คานกลที่เคลือบชั้น SAMs จากโครงการย่อยที่หนึ่ง
6. ศึกษาระบบที่พัฒนาขึ้นมากับเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นจากโครงการย่อยที่หนึ่ง เพื่อดักจับไอออนลิเทียม ( $\text{Li}^+$ ) เปรียบเทียบกับไอออนรบกวนอื่นๆ และเปรียบเทียบผลกับเครื่องมือที่มีขายตามท้องตลาด เช่น ion selective electrode หรือ flame spectrometer เป็นต้น

ตารางที่ 1.2 ตารางสรุปกิจกรรมและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย (Gantt chart)

Gantt chart โครงการย่อยที่ 1

กิจกรรม	ปีที่ 1			
	เดือนที่ 1-3	เดือนที่ 4-6	เดือนที่ 7-9	เดือนที่ 10-12
1. ออกแบบสารประกอบ สำหรับดักจับ $Li^+$	○ —▶			
2. สังเคราะห์สารประกอบ สำหรับจับไอออน $Li^+$	○ —▶	▶		
3. Characterize โครงสร้าง ทางเคมีของสารประกอบที่ สังเคราะห์ขึ้น		○ —▶		
4. เคลือบผิวหน้าของเซ็นเซอร์ คานกลขนาดจิ๋วด้วยชั้นทอง			○ —▶	
5. ศึกษากระบวนการเคลือบ ชั้น SAMs ลงบนเซ็นเซอร์คาน กล			○ —▶	
6. Characterize फिल्म SAMs ที่เคลือบบนเซ็นเซอร์คานกล			○ —▶	
7. ทดสอบประสิทธิภาพของ เซ็นเซอร์ในการดักจับไอออน $Li^+$			○ —▶	▶

Gantt chart โครงการย่อยที่ 2

กิจกรรม	ปีที่ 1			
	เดือนที่ 1-3	เดือนที่ 4-6	เดือนที่ 7-9	เดือนที่ 10-12
1. ออกแบบระบบวัดความโค้งของคานกลด้วยเทคนิคทางแสง	○ → ▲			
2. ออกแบบฐานจับยึดเซนเซอร์คานกลขนาดจิ๋ว	○ → ▲			
3. ออกแบบและสร้าง chamber ขนาดเล็กสำหรับยึดเซนเซอร์คานกลที่พัฒนาขึ้น		○ → ▲		
4. ทดสอบระบบวัดเซนเซอร์คานกลที่ยังไม่ได้เคลือบชั้น SAMs			○ → ▲	
5. ทดสอบระบบวัดกับเซนเซอร์คานกลที่เคลือบชั้น SAMs			○ → ▲	
6. ทดสอบประสิทธิภาพของระบบร่วมกับเซนเซอร์ในการตรวจจับไอออน $Li^+$				○ → ▲

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- เสนอผลงานในงานประชุมวิชาการและ/หรือ ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร ไม่น้อยกว่า 2 เรื่อง
- มีความเป็นไปได้ในการนำผลงานวิจัยนี้ไปจดอนุสิทธิบัตรหรือสิทธิบัตร และต่อยอดเพื่อสร้างและพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์และวินิจฉัยทางการแพทย์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป
- ผลงานวิจัยนี้เป็นโครงการนำร่องในการพัฒนาเซนเซอร์วัดปริมาณไอออนของธาตุโลหะชนิดอื่นๆต่อไป

### 1.6 ความสำเร็จจากผลการดำเนินการวิจัยเฟสที่หนึ่ง

- สามารถสังเคราะห์สารประกอบสำหรับใช้ตรวจจับไอออนของลิเทียมได้
- สามารถเคลือบชั้น SAM ลงบนผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลจิวได้
- ได้ต้นแบบระบบวัด optical beam deflection สำหรับพัฒนาต่อยอดในเฟสที่สอง
- เสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ Siam Physics Congress 2 เรื่อง

### 1.7 เอกสารอ้างอิง

- [1] Binning G, Quate CF, Gerber Ch: Atomic force microscope. Physical Review Letters 1986; 56(9):930–933.
- [2] Flink S., van Veggel FCJM, Reinhoudt DN: Self-assembled monolayers on gold for applications in chemical sensing. Sensors Update 2003; 8(1):3–19.
- [3] Fritz J, Baller MK, Lang HP, Rothuizen H, Vettiger P, Meyer E, Gunterodt HJ, Gerber Ch, Gimzewski JK: Translating biomolecular recognition into nanomechanics. Science 2000; 288(5464):316–318.
- [4] Ji HF, Thundat TG: In situ detection of calcium ions with chemical modified microcantilevers. Biosensors & Bioelectronics 2002; 17:337–343.
- [5] Lavrik N, Sepaniak MJ, Datskos PG: Cantilever transducers as a platform for chemical and biological sensors. Review of Scientific Instruments 2004, 75(7): 2229–2253.
- [6] Wanichacheva N, Soto ER, Lambert CR, McGimpsey WG: Surface-based Lithium ion sensor: An electrode derivatized with a self-assembled monolayer. Analytical Chemistry 2006; 78(20):7132–7127.

## บทที่ 2

### การเตรียมและการเคลือบชั้น SAMs บนเซนเซอร์คานกลจิว

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เซนเซอร์คานกลขนาดจิว (micromechanical cantilever-based sensors) เป็นเซนเซอร์เชิงกลที่มีความไวและความละเอียดสูง ซึ่งส่วนใหญ่ถูกใช้ในกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) เพื่อเป็นสร้างภาพพื้นผิวของวัสดุที่มีความละเอียดในระดับโมเลกุล [Binnig *et al.*, 1986] ด้วยข้อดีของเซนเซอร์แบบคานกลดังกล่าว จึงมีนักวิจัยสนใจนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ทางเคมีและชีวภาพชนิดต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นใช้ตรวจจับ ดีเอ็นเอ [Fritz *et al.*, 2000] ไอระเหยของระเบิด TNT [Pinnaduwege *et al.*, 2003] และการวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารเคมี [Ji *et al.*, 2001] เป็นต้น ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเลือกประยุกต์ใช้คานกลที่มีขายสำหรับใช้กับเครื่อง AFM มาดัดแปลงเป็นเซนเซอร์ในการตรวจจับไอออนของโลหะอัลคาไลน์ ( $K^+$ ,  $Na^+$  และ  $Li^+$ )

กุญแจสำคัญในการใช้เซนเซอร์คานกลขนาดจิวเพื่อวัดเฉพาะปริมาณของไอออนของโลหะอัลคาไลน์ที่ปะปนอยู่กับไอออนของธาตุอื่นๆในสารละลาย ได้แก่ การเลือกใช้ สารตัวล่อ (functionalized material) ที่มีคุณสมบัติ (1) สามารถยึดเกาะได้ดีบนเซนเซอร์คานกล (2) มีน้ำหนักน้อยไม่หนาและหนักเกินไป จนทำให้คานกลโค้งงอหรือเสียหายไปเสียก่อนที่จะมีโมเลกุลที่ต้องการมาเกาะติด และที่สำคัญที่สุด (3) มีความจำเพาะเจาะจงในการตรวจจับเฉพาะโมเลกุลหรืออนุภาคที่ต้องการได้ดี

สารตัวล่อที่ยึดเกาะได้ดีและไม่กระทบหรือส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของเซนเซอร์คานกล

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยพบว่า สารประกอบบางชนิดสามารถเคลือบและเกาะติดเป็นชั้นของฟิล์มบางที่มีความหนาเพียงหนึ่งโมเลกุล หรือ monolayers ได้บนพื้นผิวของฐานรองที่ทำมาจากแก้ว โลหะออกไซด์ (metal oxide) และ ทองคำ โดยสารประกอบ alkyltrichlorosilanes จะยึดติดได้ดีบนแก้ว [Sagiv, 1980] fatty-acids จะยึดเกาะได้ดีกับโลหะออกไซด์ [Allara, 1985] และสารประกอบที่มี sulfur-containing adsorbates จะเกาะติดได้ดีกับพื้นผิวของทองคำ [Nuzzo, 1983] จากวัสดุที่กล่าวมาทั้งสามตัว ทองคำเป็นวัสดุที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเซนเซอร์คานกลได้ง่ายและสะดวกที่สุด (เนื่องจากทองคำเป็นวัสดุที่มีใช้อยู่แล้วในกระบวนการผลิตเซนเซอร์) ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้เซนเซอร์คานกลจิวที่มีการเคลือบพื้นผิวด้วยทองคำ ซึ่งมีการเคลือบพื้นผิวของเซนเซอร์คานกลด้วยชั้นของ Chromium หนา 5–10 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกาะของทองคำกับผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลซึ่งทำจากซิลิกอน หรือ ซิลิกอนไนไตรด์) แล้วตามด้วยชั้นทองคำ หนาประมาณ 50–200 nm โดยสารต่อล่อจะดัดแปลงโครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบที่มีหมู่ thiol (หรือ HS-group) [Flink *et al.*, 2000]

### สารตัวล่อที่ดักจับเฉพาะไอออนของโพแทสเซียม โซเดียม และลิเทียม

Flink และคณะ [Flink *et al.*, 1999] รายงานวิธีการสังเคราะห์และการสร้างชั้น SAMs ของ crown ethers บนพื้นผิวทองคำ สำหรับดักจับไอออนบวกของโลหะ (metal cations) โดยชั้น monolayers ของ 12-crown-4 adsorbate ใช้ดักจับไอออนของโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) ได้ดี ชั้น monolayers ของ 15-crown-5 adsorbate และ 18-crown-6 adsorbates (ดูรูปที่ 1.4 ประกอบ) มีความสามารถในการจับไอออนของโพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) โดยชั้น monolayers ของ 15-crown-5 ใช้คัดเลือกจับเฉพาะไอออนของ  $\text{K}^+$  ได้ดีที่สุด ส่วนการดักจับไอออนของธาตุลิเทียม ( $\text{Li}^+$ ) จะใช้ monolayers ของ 21-(16-mercaptohexadecan-1-oyl)-4,6,13,16-tetraoxa-1,10,21-triazabicyclo-[8.8.5]tricosane-19,23-dione ซึ่งรายงานโดย Wanichacheva [Wanichacheva *et al.*, 2006] โดยโครงสร้างของเซนเซอร์  $\text{Li}^+$  แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1: โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนสำหรับดักจับเฉพาะไอออนของลิเทียม [Wanichacheva *et al.*, 2006]

## 2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.2.1. ออกแบบสารประกอบสำหรับดักจับไอออนลิเทียม ( $\text{Li}^+$ )

ในงานวิจัยนี้จะใช้ Molecular modeling ในการออกแบบไอออนเซนเซอร์สำหรับไอออนลิเทียม ( $\text{Li}^+$ ) โดยศึกษาความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจากการคำนวณพลังงานของโมเลกุลก่อน และหลัง การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของเซนเซอร์กับไอออนเซนเซอร์สำหรับไอออนลิเทียม ( $\text{Li}^+$ ) โดยจะเลือก สังเคราะห์เซนเซอร์ที่ให้ระดับพลังงานต่ำสุดภายหลังการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนโลหะหนักชนิดใด ชนิดหนึ่งเท่านั้น

### 2.2.2. การสังเคราะห์เซนเซอร์

ในงานวิจัยนี้จะเลือกสังเคราะห์เซนเซอร์สำหรับไอออนลิเทียม โดยอาจมีการปรับเปลี่ยนเส้นทางการ สังเคราะห์จากวิธีการที่ได้รายงานมาก่อนหน้าแล้ว [Flick *et al.*, 1999; Wanichacheva *et al.*, 2006] โดย เซนเซอร์ดังกล่าวจะถูกนำไปสร้างชั้น self-assembled monolayers (SAMs) บนพื้นผิวของทองคำที่เคลือบ อยู่บนผิวของเซนเซอร์คานกล ซึ่งวิธีการในการสร้าง SAMs บนพื้นผิวของวัสดุดังกล่าวนั้นอาจจะทำได้โดย

- 1) การดัดแปลงโครงสร้างของเซนเซอร์ แล้วสร้าง SAMs กับพื้นผิวโดยตรง
- 2) สร้าง SAMs ด้วยสารประกอบ alkyl chain ที่มี active group ชนิดอื่นก่อน แล้วจึงนำเซนเซอร์ที่มี active group มาทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวอีกทีหนึ่ง

สารที่สังเคราะห์ได้แล้วนั้นจะถูกนำมาแยกบริสุทธิ์โดยใช้วิธีทางโครมาโตกราฟี (Chromatography) และนำมาระบุโครงสร้างทางเคมีโดยใช้วิธีทางสเปกโตรสโคปี (NMR และ Mass Spectroscopy)

### 2.2.3. การเคลือบชั้น SAMs บนผิวหน้าของเซนเซอร์คานกล

ผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลจะถูกเคลือบด้วย monolayers ของสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาโดยการจุ่ม เซนเซอร์คานกลลงในสารที่สังเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อให้เซนเซอร์คานกลมีประสิทธิภาพสูงสุด ชั้น SAMs ที่เคลือบ จำเป็นต้องมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวหน้าของคานกล ดังนั้นคณะผู้วิจัยจะศึกษาผลของ คุณภาพของฟิล์ม SAMs ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลาย และเวลาในการจุ่มอยู่ ในสารละลาย โดยหลังจากสร้างชั้น SAMs บนพื้นผิวของทองคำแล้ว ผิวหน้าของเซนเซอร์จะนำไป

characterize ด้วยวิธีการเช่น Goniometer, grazing FTIR spectrometer, Ellipsometry และ AFM เพื่อหาเงื่อนไขการเคลือบชั้น SAMs ที่ดีที่สุด (มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวหน้าของคานกล)

#### 2.2.4. การทดสอบคุณสมบัติของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น

ในขั้นตอนสุดท้ายของการวิจัย เราจะนำเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นไปศึกษาการดักจับไอออนลิเทียม ( $\text{Li}^+$ ) เปรียบเทียบกับไอออนรบกวนอื่นๆ เพื่อศึกษา selectivity และ sensitivity รวมทั้งช่วงความเข้มข้นที่เซนเซอร์สามารถทำงานได้ (working range) โดยใช้วิธีการต่างๆไป เช่น cyclic voltammetry, impedance spectroscopy หรือ ion selective electrode เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับวิธีในโครงการย่อยที่สอง (การนำเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นไปใช้ร่วมกับระบบวัดความโค้งงอของคานกลด้วยเทคนิคทางแสง)

#### สรุปขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

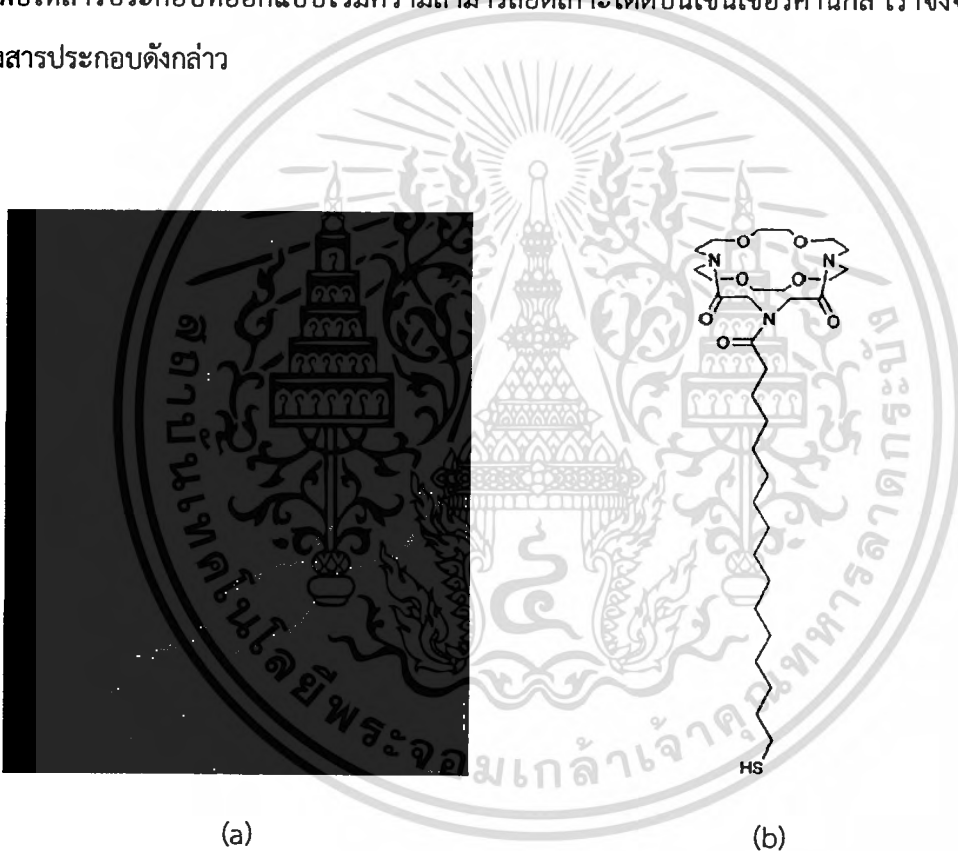
1. ออกแบบสารประกอบสำหรับดักจับไอออน ลิเทียม ( $\text{Li}^+$ ) ที่เหมาะสมที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ โดยใช้ Molecular modeling โดยเลือกสังเคราะห์สารประกอบที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดเมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนโลหะที่สนใจชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น
2. สังเคราะห์สารประกอบสำหรับจับไอออนลิเทียม ที่ได้ออกแบบไว้แล้วจากขั้นตอนที่ 1
3. Characterize โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้ NMR spectroscopy และ Mass Spectroscopy
4. เตรียมผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลโดยการเคลือบชั้น Chrome/Gold ลงบนเซนเซอร์คานกลด้วยวิธี evaporation หรือ sputtering
5. ศึกษากระบวนการเคลือบชั้น SAMs บนเซนเซอร์คานกลขนาดจิ๋ว
6. Characterize คุณสมบัติของฟิล์มที่สร้างขึ้นเมื่อเคลือบบนเซนเซอร์คานกล โดยใช้วิธี เช่น Atomic force microscope, Goniometer, Grazing FTIR spectrophotometer และ Ellipsometry
7. ศึกษาการใช้เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมาดักจับไอออนลิเทียม ( $\text{Li}^+$ ) เปรียบเทียบกับไอออนรบกวนอื่นๆ เช่น ไอออนโพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) ไอออนโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) หรือ ไอออนแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ )

#### 2.3 ผลการศึกษาการเตรียมสารประกอบ SAM สำหรับดักจับไอออนของลิเทียม

กุญแจสำคัญในการใช้เซนเซอร์คานกลขนาดจิ๋วเพื่อวัดเฉพาะปริมาณของไอออนของโลหะอัลคาไลน์ที่ปะปนอยู่กับไอออนของธาตุอื่นๆในสารละลาย ได้แก่ การเลือก สารตัวล่อ (functionalized material) หรือ SAMs สำหรับเคลือบบนผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลเพื่อดักจับไอออนของโลหะที่ต้องการ โดยสารตัวล่อที่ดี

นั้นต้องมีคุณสมบัติ (1) สามารถยึดเกาะได้ดีบนเซนเซอร์คานกล (2) มีน้ำหนักน้อยไม่หนาและหนักเกินไป จนทำให้คานกลโค้งงอหรือเสียหายไปเสียก่อนที่จะมีโมเลกุลที่ต้องการมาเกาะติด และที่สำคัญที่สุด (3) มีความจำเพาะเจาะจงในการดักจับเฉพาะโมเลกุลหรืออนุภาคที่ต้องการได้ดี

จากผลการศึกษา Molecular modeling ช่วยให้เราได้สารประกอบสำหรับดักจับไอออนของลิเทียมที่มีความจำเพาะเจาะจงสูง โดยเลือกสารประกอบที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด (complexation energy) เมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนโลหะของลิเทียม แบบจำลองโมเลกุลที่ออกแบบไว้แสดงดังรูปที่ 2.2(a) อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สารประกอบที่ออกแบบไว้มีความสามารถยึดเกาะได้ดีบนเซนเซอร์คานกล เราจึงจำเป็นต้องดัดแปลงสารประกอบดังกล่าว

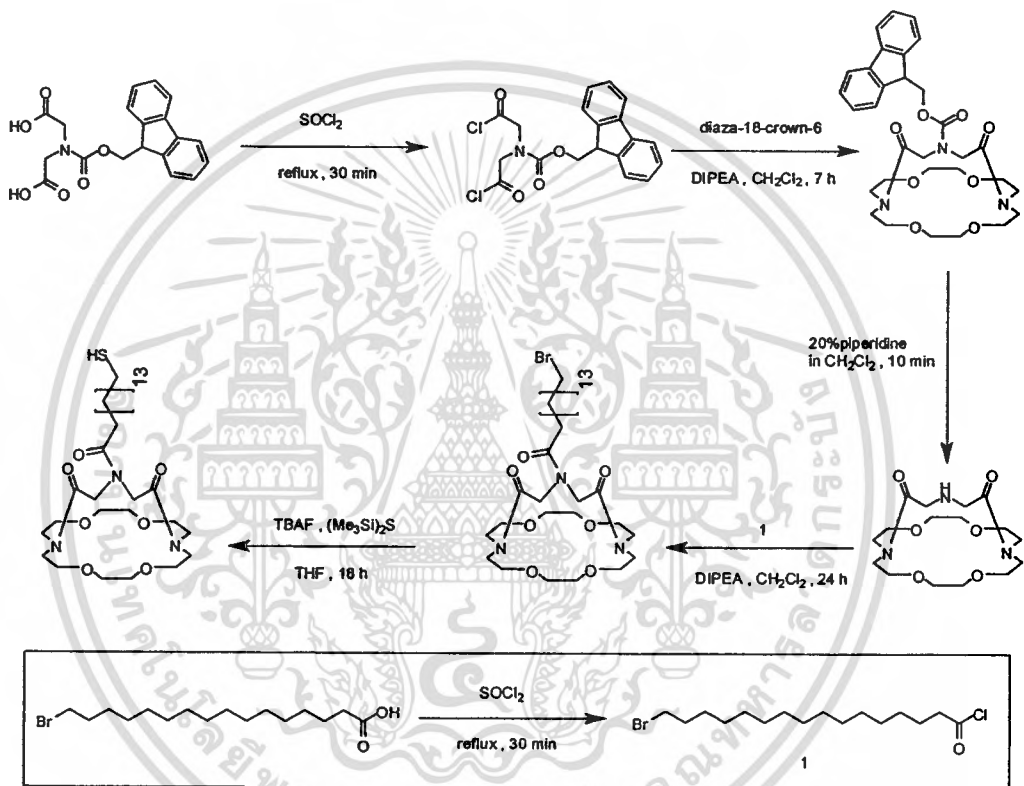


รูปที่ 2.2: (a) แบบจำลองโมเลกุลของสารประกอบสำหรับดักจับไอออนของลิเทียม (b) โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบที่ออกแบบขึ้นโดยดัดแปลงส่วนหางให้มีสารประกอบของหมู่ thiol เพื่อจับยึดกับอะตอมของทอง

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยพบว่า ทองคำเป็นวัสดุที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเซนเซอร์คานกลได้ง่ายและสะดวกที่สุด (เนื่องจากทองคำเป็นวัสดุที่มีใช้อยู่แล้วในกระบวนการผลิตเซนเซอร์) ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาสารตัวล่อหรือ SAMs ที่ยึดติดได้ดีกับพื้นผิวทองคำ โดยสารประกอบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบไว้จะถูกตัดแปลงโครงสร้างโมเลกุล โดยการตัดโครงสร้างของ Anthracene ออก แล้วต่อด้วยสารประกอบที่มีหมู่ thiol (หรือ HS-group) ซึ่งมีส่วนของสายโซ่ยาว (alkyl chain) เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวให้ใกล้เคียงกันมากที่สุดของ SAMs ดังแสดงในรูปที่ 2.2(b) โดยกระบวนการสังเคราะห์สารประกอบที่ออกแบบไว้แสดงดังรูปที่ 2.3

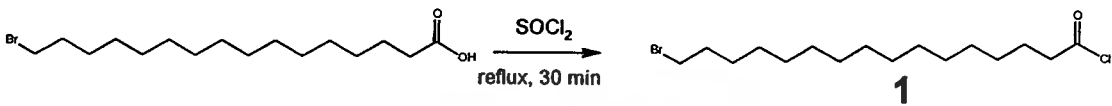


รูปที่ 2.3: เส้นทางการสังเคราะห์สารประกอบสำหรับดักจับไอออนของลิเทียม

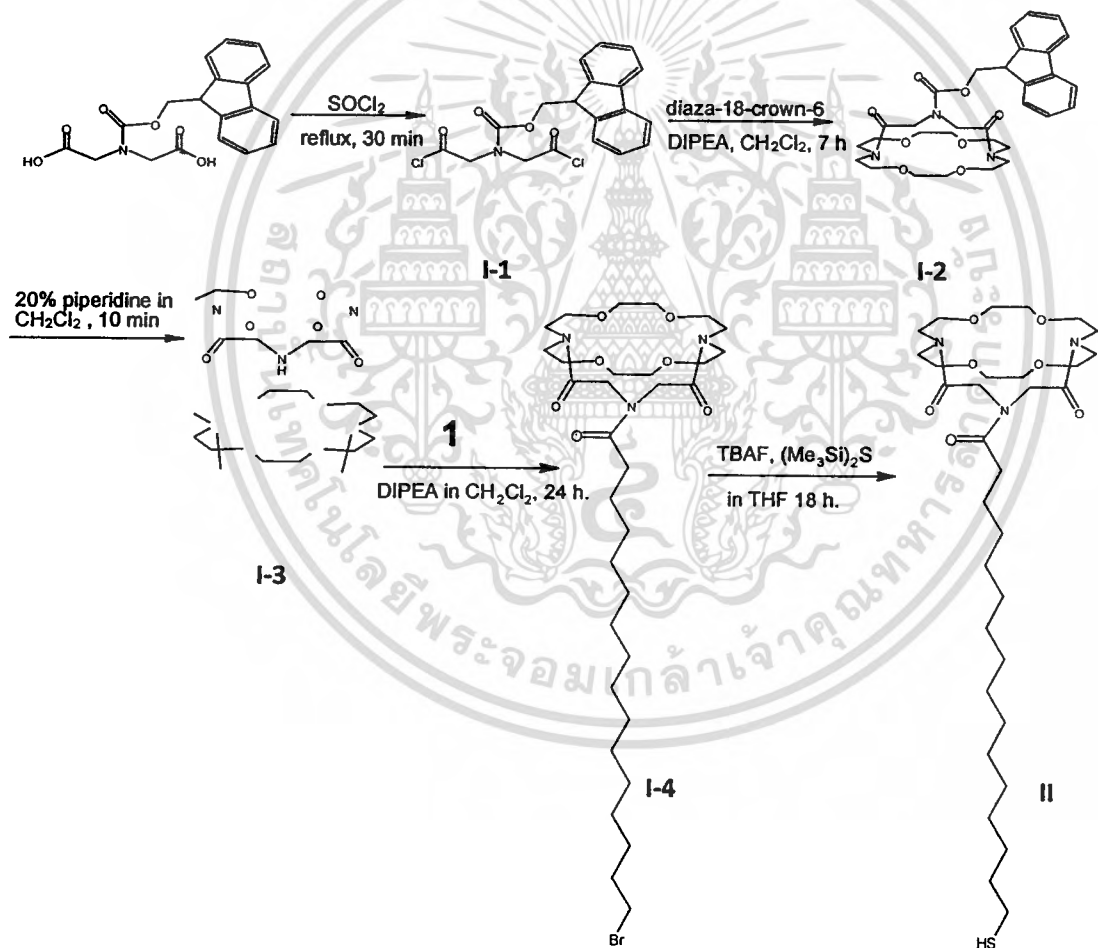
การสังเคราะห์สารประกอบในรูปที่ 2.2(b)

สารประกอบดังแสดงในรูปที่ 2.2(b) ถูกสังเคราะห์ตามแผนภาพที่ 1 และ 2

แผนภาพที่ 1

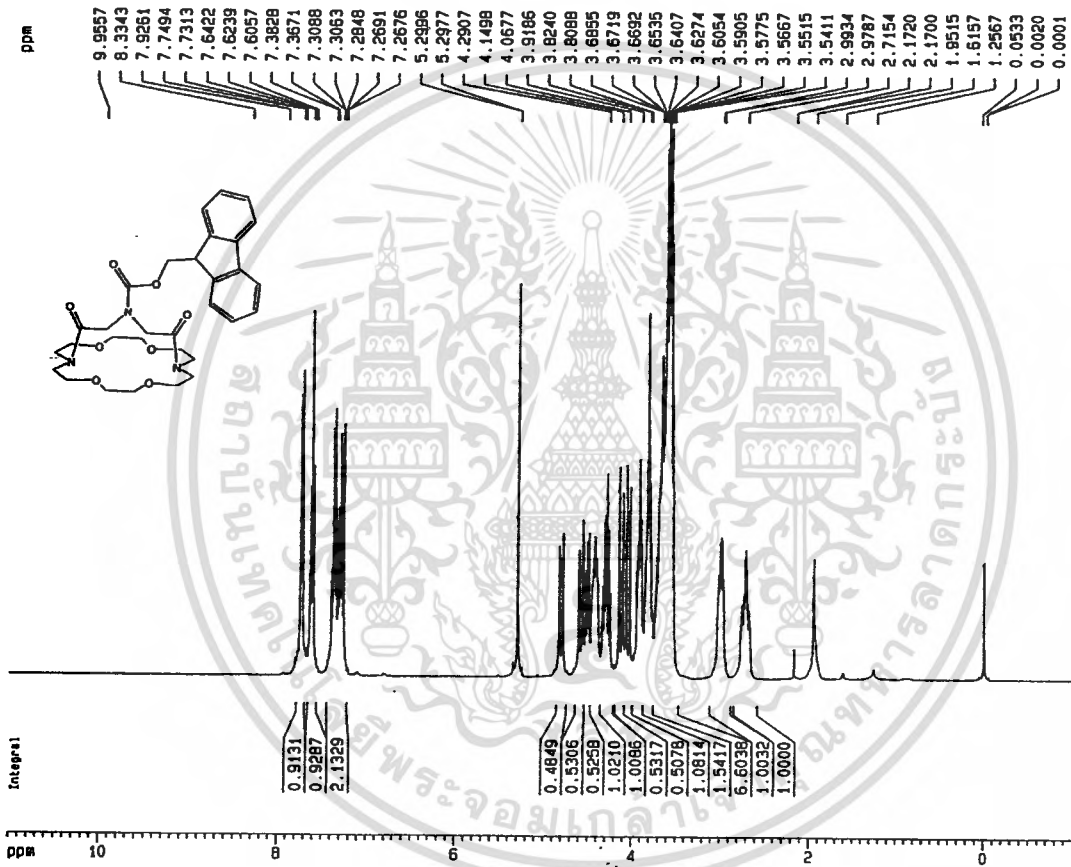


แผนภาพที่ 2

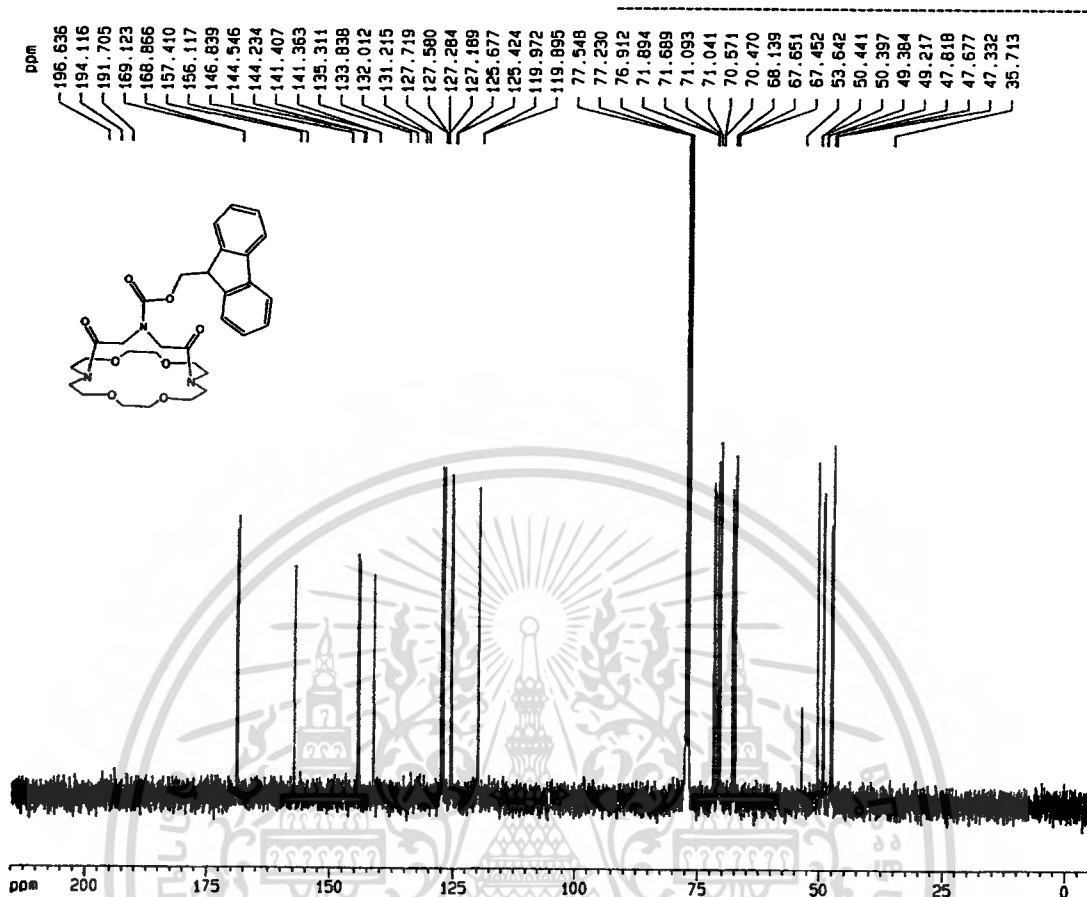


การเตรียม 9H-9-fluorenylmethyl-19,23-dioxo-4,7,13,16-tetraoxa-1,10,21-triazabicyclo  
[8.8.5] tricosane-21-carboxylate, (I-2)

ใส่ N-Fmoc-iminodiacetic acid 1.78 g (5.00 mmol) ในขวดก้นกลมขนาดจากนั้นใส่ thionyl chloride 15 mL (21 eq.) รีฟลักซ์สารละลายเป็นเวลา 30 นาทีที่จะได้สารประกอบ I-10 จากนั้นกำจัด thionyl chloride ออกโดยใช้เครื่องระเหยตัวทำละลาย นำสารที่ได้ละลายใน dichloromethane (DCM) 250 mL จากนั้นใส่ diaza-18-crown-6 1.31 g (1 eq.) และ diisopropylethylenediamine (DIPEA) 2.6 mL (3 eq.) นำของผสมดังกล่าว stir เป็นเวลา 7 ชม เมื่อครบเวลาทำการกำจัด DCM และ DIPEA โดยใช้เครื่องระเหยตัวทำละลายจากนั้นนำสารที่ได้ละลายใน DCM 100 mL นำไปสกัดสามครั้งด้วย 2 M HCl 100 mL ตามด้วย 1 ครั้งของน้ำเก็บชั้น DCM กำจัดน้ำด้วย  $MgSO_4$  กำจัด DCM ด้วยเครื่องระเหยตัวทำละลายที่ 40 °C จะได้ของแข็งสีขาว จากนั้นแยกของผสมโดยใช้ chromatography (column 15 cm x 7 cm, DCM: methanol 15:1) ได้สารประกอบ (I-2) ให้ผลผลิตของแข็งสีขาว 2.03 g (70 %ผลผลิต)  $R_f = 0.5$  (15:1 DCM: methanol); mp = 181-182 °C;  $^1H$ -NMR (400 MHz,  $CDCl_3$ ),  $\delta$  2.64-2.82 (m, 2H), 2.92-3.09 (m, 2H), 3.50-3.87 (m, 16H), 3.88-3.98 (m, 2H), 4.05 (d,  $J = 16.67$  Hz, 1H), 4.13 (d,  $J = 16.67$  Hz, 1H), 4.22-4.35 (m, 2H), 4.36-4.47 (m, 2H), 4.47-4.55 (m, 1H), 4.58 (d,  $J = 16.67$  Hz, 1H), 4.81 (d,  $J = 16.67$  Hz, 1H), 7.25-7.44 (m, 4H), 7.56-7.67 (m, 2H), 7.74 (d,  $J = 7.58$  Hz, 2H);  $^{13}C$ -NMR (100 MHz,  $CDCl_3$ ),  $\delta$  47.3 (CH), 47.7 (CH<sub>2</sub>), 47.8 (CH<sub>2</sub>), 49.2 (CH<sub>2</sub>), 49.4 (CH<sub>2</sub>), 50.4 (CH<sub>2</sub>), 50.4 (CH<sub>2</sub>), 67.5 (CH<sub>2</sub>), 67.7 (CH<sub>2</sub>), 68.1 (CH<sub>2</sub>), 70.5 (CH<sub>2</sub>), 70.6 (CH<sub>2</sub>), 71.0 (CH<sub>2</sub>), 71.1 (CH<sub>2</sub>), 71.7 (CH<sub>2</sub>), 71.9 (CH<sub>2</sub>), 119.9 (CH), 120.0 (CH), 125.4 (CH), 125.7 (CH), 127.2 (CH), 127.3 (CH), 127.6 (CH), 127.7 (CH), 141.4 (CH), 141.4 (CH), 144.2 (CH), 144.5 (CH), 157.4 (C=O), 168.9 (C=O), 169.2 (C=O).



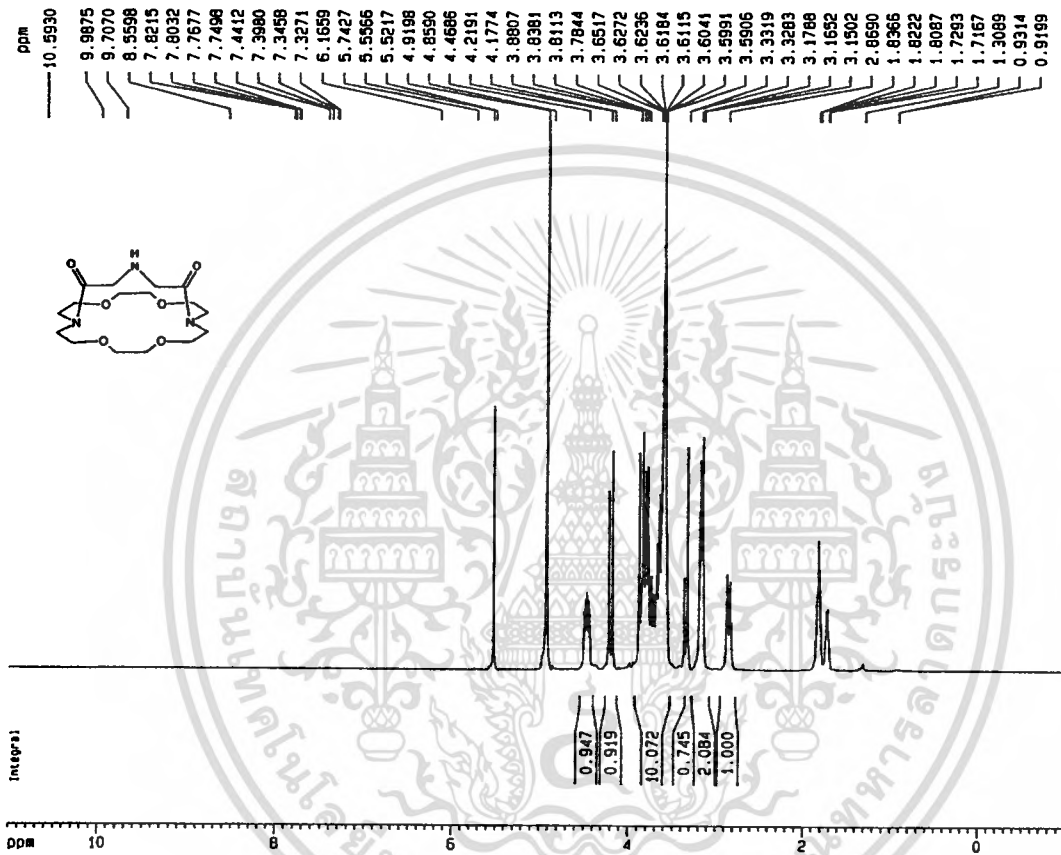
รูปที่ 2.4:  $^1\text{H-NMR}$  ของสารประกอบ 1-2



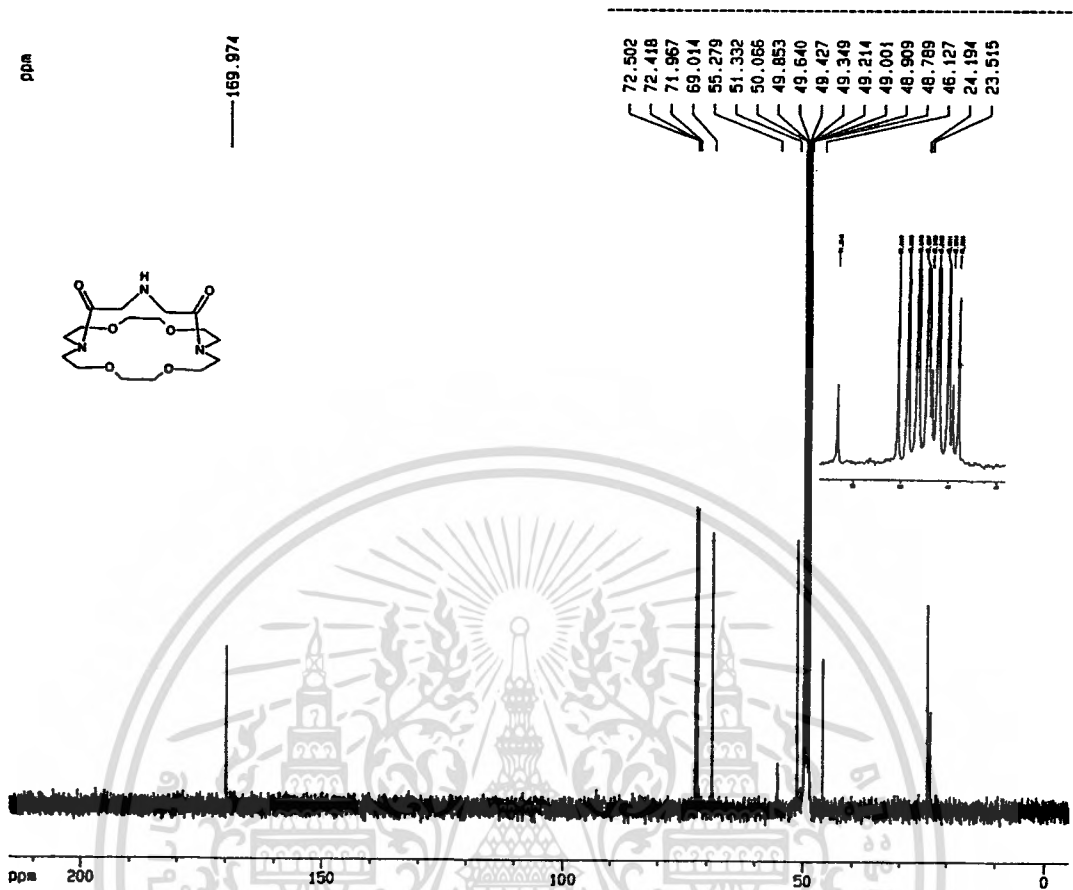
รูปที่ 2.5:  $^{13}\text{C-NMR}$  ของสารประกอบ I-2

การเตรียม of 4,7,13,16-tetraoxa-1,10,21-triaza-bicyclo[8.8.5]tricosane-19,23-dione, (I-3)

นำ I-2 0.49 g (0.84 mmol) ละลายด้วย 20 % piperidine ใน DCM จำนวน 20 mL ปล่อยให้สารทำปฏิกิริยากัน 30 นาที จากนั้นกำจัด DCM และ piperidine ด้วยเครื่องระเหยตัวทำละลายที่ 40 °C จะได้สารเป็นของหนืดสีเหลือง ตามด้วยแยกของผสมโดยใช้ chromatography (column 15 cm x 7 cm, MeOH: Et3N 25:1) ได้ของแข็งใสไม่มีสี (I-3) 0.28 g (93 %ผลผลิต). Rf = 0.4 (25:1 MeOH: Et3N); mp. 279-280 °C;  $^1\text{H-NMR}$  (400 MHz, MeOD),  $\delta$  2.81-2.88 (m, 2H), 3.29-3.39 (m, 2H), 3.53-3.92 (m, 20H), 4.19 (d, J =16.67 Hz, 2H), 4.32-4.51 (m, 2H);  $^{13}\text{C-NMR}$  (100 MHz, MeOD),  $\delta$  48.9 (2CH<sub>2</sub>), 49.4 (2CH<sub>2</sub>), 51.3 (2CH<sub>2</sub>), 69.0 (2CH<sub>2</sub>), 72.0 (2CH<sub>2</sub>), 72.4 (2CH<sub>2</sub>), 72.5 (2CH<sub>2</sub>), 170.0 (2C=O).



รูปที่ 2.6:  $^1\text{H-NMR}$  ของสารประกอบ I-3

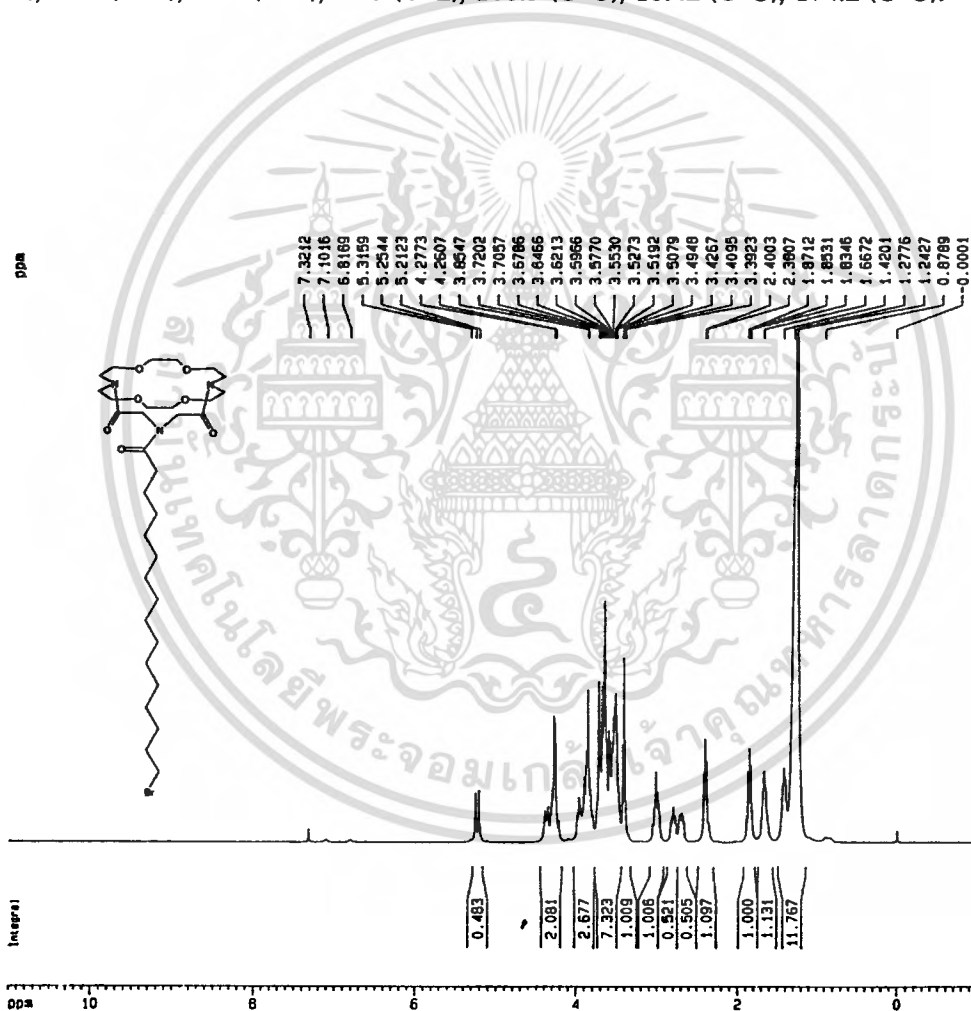


รูปที่ 2.7:  $^{13}\text{C}$ -NMR ของสารประกอบ I-3

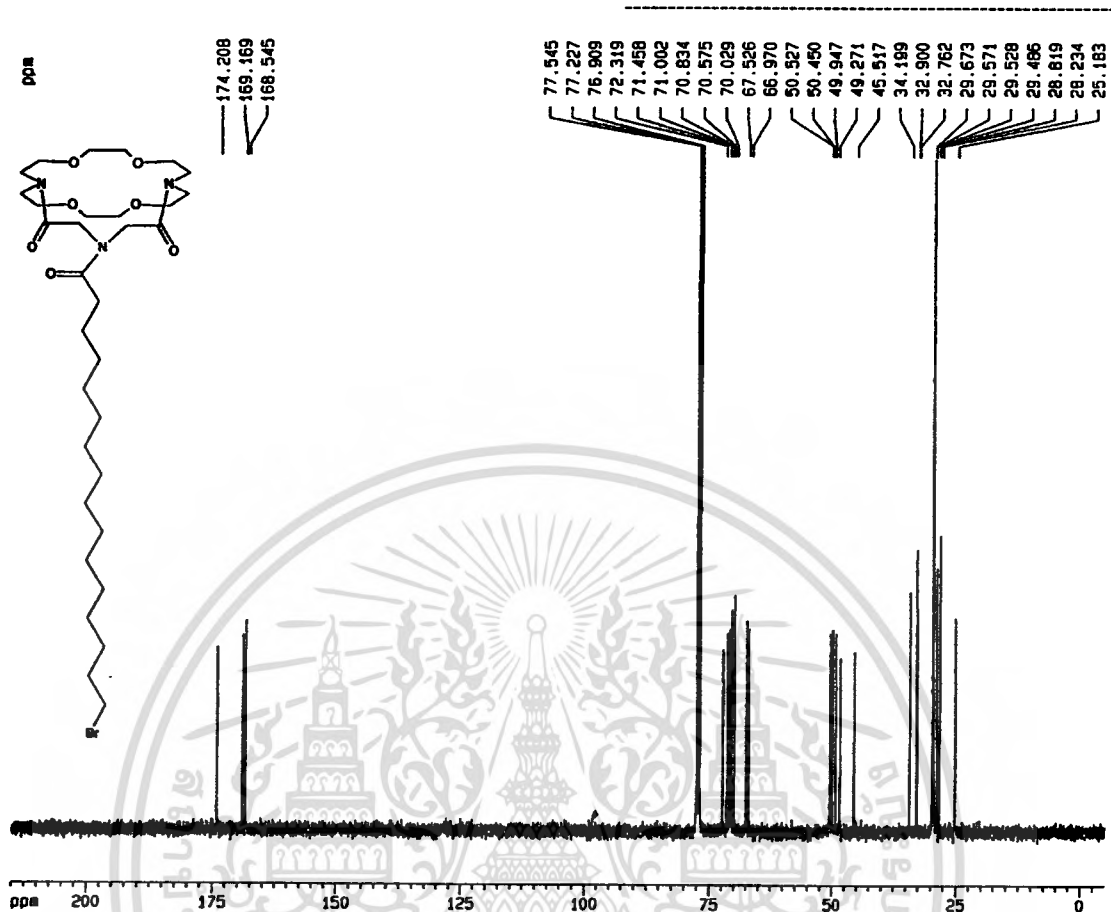
การเตรียม 21-(16-bromo-hexadecanoyl)-4,7,13,16-tetraoxa-1,10,21 triazabicyclo [8.8.5] tricosane-19,23-dione, I-4

นำ 16-bromohexadecanoic 0.99 g (3.00 mmol) ละลายใน thionyl chloride 15 mL (21 eq.) รีฟลักซ์สารละลายเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นกำจัด thionyl chloride ด้วยเครื่องระเหยตัวทำละลายที่  $40^{\circ}\text{C}$  จากนั้นละลายด้วย anhydrous dichloromethane 30 mL ต่อมาใส่ I-3 1.11 g (3.10 mmol) และ DIPEA 1.4 mL (7.70 mmol) ปล่อยให้ทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน ทำการกำจัด DIPEA และตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยตัวทำละลายแบบลดความดัน จากนั้นนำสารที่ได้มาละลายด้วย dichloromethane 100 mL ทำการสกัดสามครั้งด้วย 2 M HCl 100 mL และหนึ่งครั้งด้วยน้ำและสุดท้ายทำให้ชั้น organic layer แห้งด้วย anhydrous  $\text{MgSO}_4$  นำสารที่ได้ระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยตัวทำละลายแบบลดความดัน แยกสารผสมด้วย column chromatography (DCM:CH<sub>3</sub>OH 20:1) จะได้สารเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

น้ำมันสีเหลือง II-10.96 g (72%ผลผลิต); Rf: 0.32 (DCM:CH<sub>3</sub>OH 20:1), <sup>1</sup>H-NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ 1.10-1.49 (m, 22H), 1.56-1.75 (m, 2H), 1.78-1.92 (m, 2H), 2.29-2.42 (m, 2H), 2.62-2.74 (m, 1H), 2.74-2.87 (m, 1H), 3.11-3.09 (m, 2H), 3.41 (t, J=6.82, 2H), 3.44-3.77 (m, 16H), 3.77-4.03 (m, 4H), 4.17-4.45 (m, 4H). <sup>13</sup>C-NMR (100 MHz, CDCl<sub>3</sub>): δ 25.2 (CH<sub>2</sub>), 28.2 (CH<sub>2</sub>), 28.8 (CH<sub>2</sub>), 29.5 (CH<sub>2</sub>), 29.5 (CH<sub>2</sub>), 29.6 (CH<sub>2</sub>), 29.7 (CH<sub>2</sub>), 32.8 (CH<sub>2</sub>), 32.9 (CH<sub>2</sub>), 34.2 (CH<sub>2</sub>), 45.5 (CH<sub>2</sub>), 48.4 (CH<sub>2</sub>), 49.3 (CH<sub>2</sub>), 49.9 (CH<sub>2</sub>), 50.5 (CH<sub>2</sub>), 50.5 (CH<sub>2</sub>), 67.0 (CH<sub>2</sub>), 67.5 (CH<sub>2</sub>), 70.0 (CH<sub>2</sub>), 70.6 (CH<sub>2</sub>), 70.8 (CH<sub>2</sub>), 71.0 (CH<sub>2</sub>), 71.5 (CH<sub>2</sub>), 72.3 (CH<sub>2</sub>), 168.5 (C=O), 169.2 (C=O), 174.2 (C=O).



รูปที่ 2.8: <sup>1</sup>H-NMR ของสารประกอบ I-4

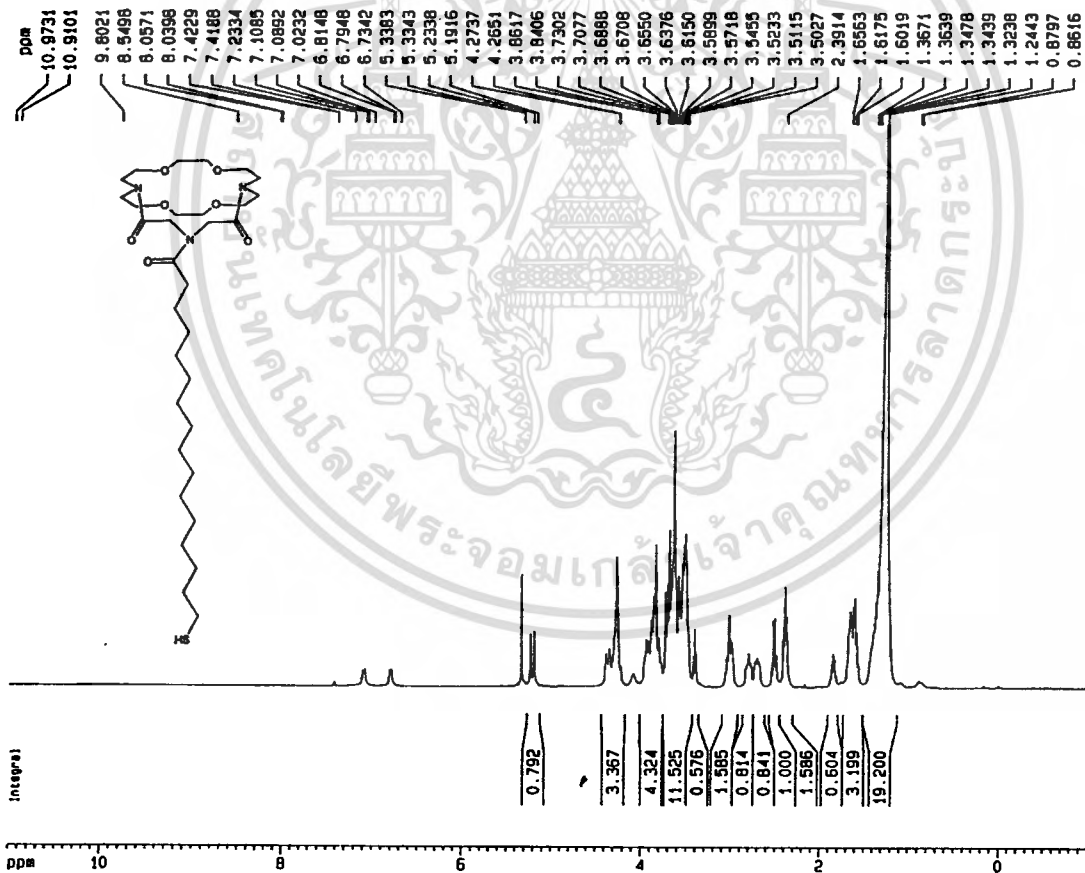


รูปที่ 2.9:  $^{13}\text{C}$ -NMR ของสารประกอบ I-4

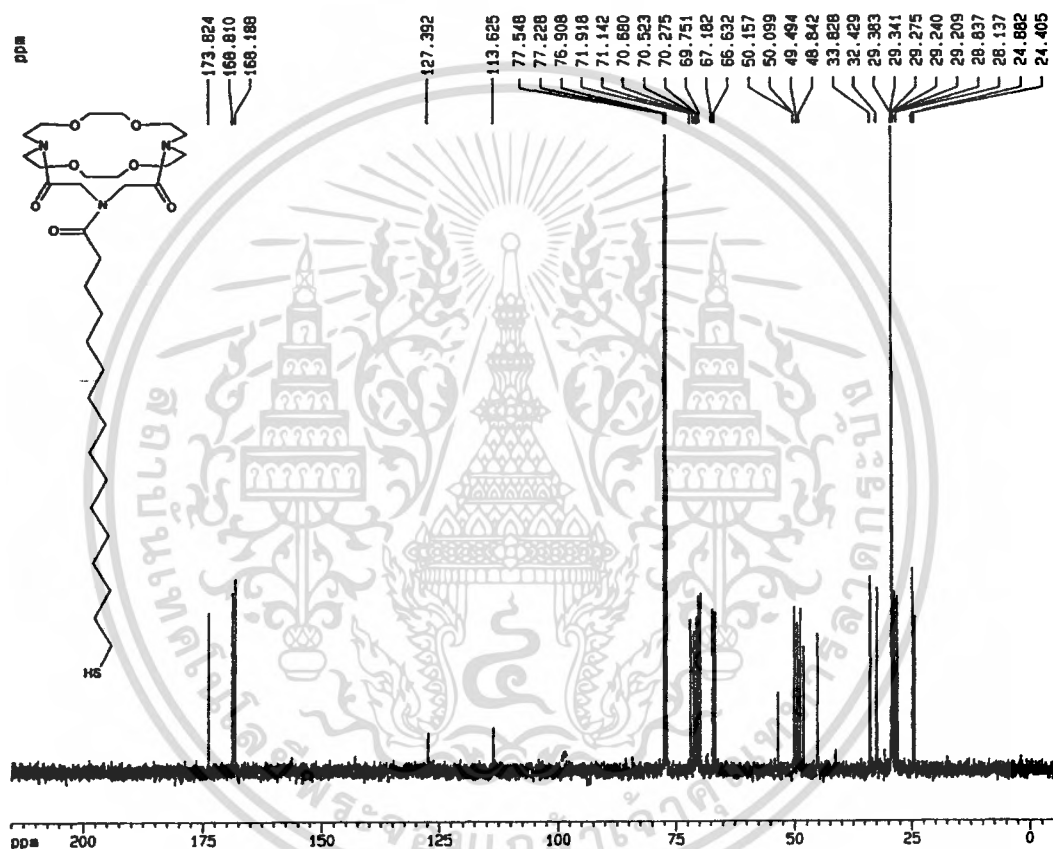
การเตรียม 21-(16-mercapto-hexadecan-1-oyl)-4,7,13,16-tetraoxa-1,10,21 triazabicyclo [8.8.5] tricosane-19,23-dione, II.

ทำ Direct mercapto-dehalogenation ของ alkyl halide เริ่มจากใส่ II-1 0.80 g (1.20 mmol) ละลายด้วย dry THF 1 mL และทำให้สารผสมมีอุณหภูมิ  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 10 min. จากนั้นใส่ hexamethyldisilathiane  $((\text{Me}_3\text{Si})_2\text{S})$  0.29 mL, 1.40 mmol) และ tetrabutylammonium fluoride (TBAF, 1.3 mmol, 1.0 M solution in THF with 5% water) 1.29 mL ปล่อยให้สารละลายทำปฏิกิริยา โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาใส่ DCM 50 mL และสกัดสามครั้งด้วย สารละลายอิ่มตัว ammonium chloride แยกของผสมด้วย column chromatography (DCM: methanol 20:1) จะได้สารน้ำมันสีเหลือง 0.45 g (62 %ผลผลิต).  $R_f = 0.27$  (20:1 DCM:  $\text{CH}_3\text{OH}$ ); 1H-

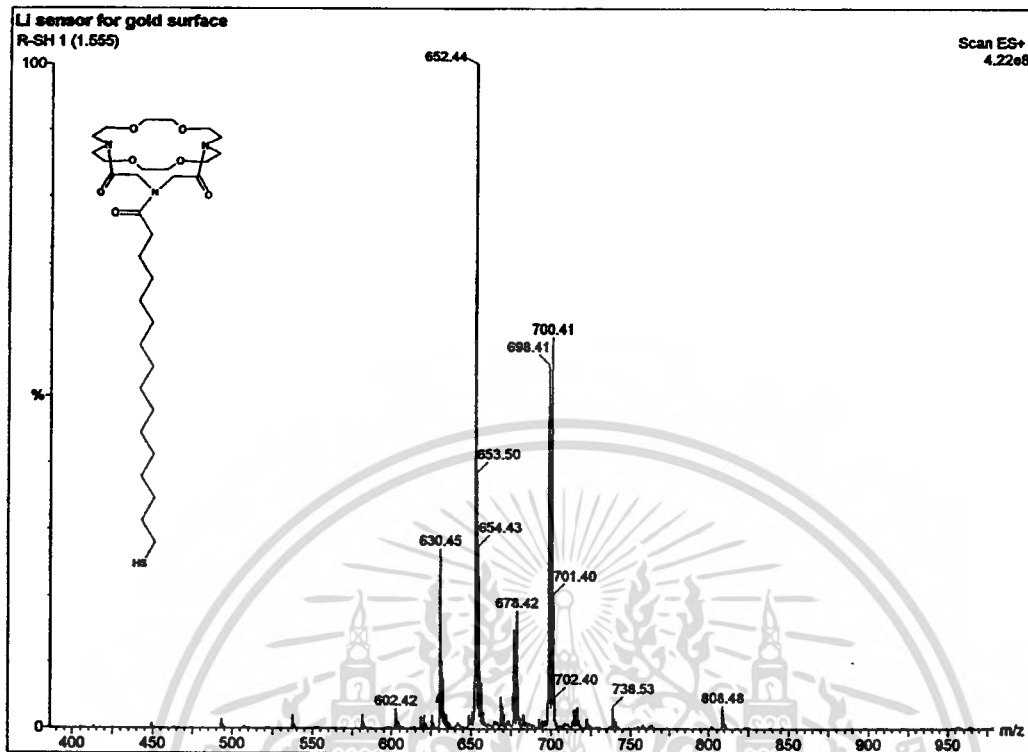
NMR (400 MHz, CDCl<sub>3</sub>), δ 1.12-1.50 (m, 22H), 1.52-1.74 (m, 4H), 1.79-1.91 (impurity), 2.30-2.45 (m, 2H), 2.51 (q, J=7.07 Hz, 2H), 2.62-2.75 (m, 1H), 2.75-2.86 (m, 1H), 2.92-3.10 (m, 2H), 3.41 (impurity), 3.45-3.76 (m, 16H), 3.76-4.00 (m, 4H), 4.20-4.49 (m, 4H). <sup>13</sup>C-NMR (100 MHz, CDCl<sub>3</sub>), δ 24.4 (CH<sub>2</sub>-SH), 24.9 (CH<sub>2</sub>), 27.9 (impurity-CH<sub>2</sub>), 28.1 (CH<sub>2</sub>), 28.5 (impurity-CH<sub>2</sub>), 28.8 (CH<sub>2</sub>), 29.2 (CH<sub>2</sub>), 29.2 (CH<sub>2</sub>), 29.3 (CH<sub>2</sub>), 29.3 (CH<sub>2</sub>), 29.4 (CH<sub>2</sub>), 30.8 (CH<sub>2</sub>), 32.4 (CH<sub>2</sub>), 32.6 (impurity-CH<sub>2</sub>), 33.8 (CH<sub>2</sub>), 33.9 (impurity-CH<sub>2</sub>), 45.2(CH<sub>2</sub>), 48.1 (CH<sub>2</sub>), 48.8 (CH<sub>2</sub>), 49.5 (CH<sub>2</sub>), 50.1 (CH<sub>2</sub>), 50.2 (CH<sub>2</sub>), 66.6 (CH<sub>2</sub>), 67.2 (CH<sub>2</sub>), 69.8 (CH<sub>2</sub>), 70.3 (CH<sub>2</sub>), 70.5 (CH<sub>2</sub>), 70.7 (CH<sub>2</sub>), 71.1 (CH<sub>2</sub>), 71.9 (CH<sub>2</sub>), 168.2 (C=O), 168.8 (C=O), 173.8 (C=O).



รูปที่ 2.10 <sup>1</sup>H-NMR ของสารประกอบ II



รูปที่ 2.11: <sup>13</sup>C-NMR ของสารประกอบ II



รูปที่ 2.12: ESI-MS ของสารประกอบ II

## 2.4 การเตรียมชั้น SAM

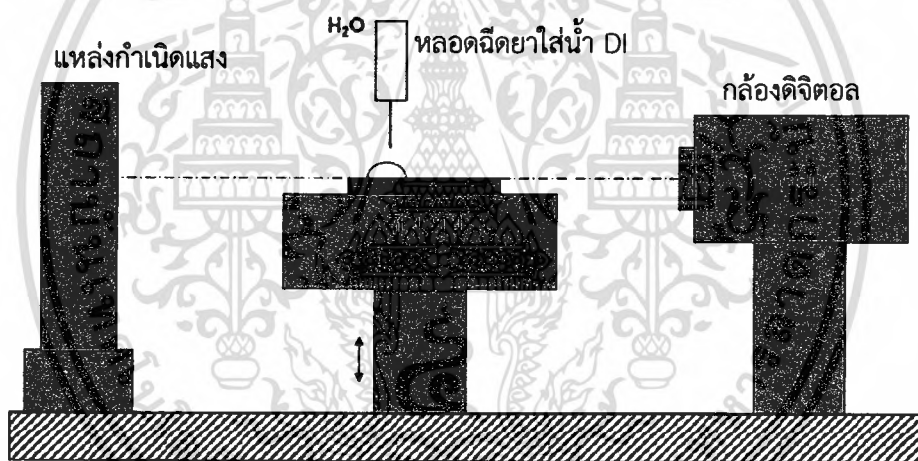
กระบวนการเตรียมชั้น SAM บนผิวหน้าของเซนเซอร์คานกล แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- ทำความสะอาดผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลจิว
- จุ่มเซนเซอร์คานกลจิวลงในสารละลาย thiol ที่เตรียมไว้ที่ความเข้มข้น 1 – 3 mM ใน ethanol เป็นเวลา 24 – 48 ชั่วโมง
- สูดท้าย rinse ด้วย ethanol แล้วทำให้แห้งโดยใช้แก๊สไนโตรเจน

โดยขั้นตอนที่สำคัญที่สุด คือ การทำความสะอาดผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลจิว ก่อนที่จะนำไปจุ่มในสารละลาย thiol วิธีการที่ใช้ทำความสะอาดผิวหน้าโดยทั่วไป ทำได้โดยจุ่มเซนเซอร์คานกลจิวลงในสารละลาย piranha (70%  $H_2SO_4$  และ 30%  $H_2O_2$ ) หรือ ทำความสะอาดผิวหน้าโดยใช้เครื่องทำความสะอาดพลาสมา (plasma cleaner) โดยวิธีที่สองมีความเหมาะสมสำหรับการทำความสะอาดผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลจิว แต่เนื่องจากครุภัณฑ์ที่จัดซื้อ (ด้วยงบประมาณของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ม.ศิลปากร) เกิดความ

ล่าเข้ามาไม่ทันภายในช่วงโครงการเฟสที่หนึ่ง ผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการแบบเปียก หรือการล้างทำความสะอาดผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลจิวด้วยสารละลาย piranha

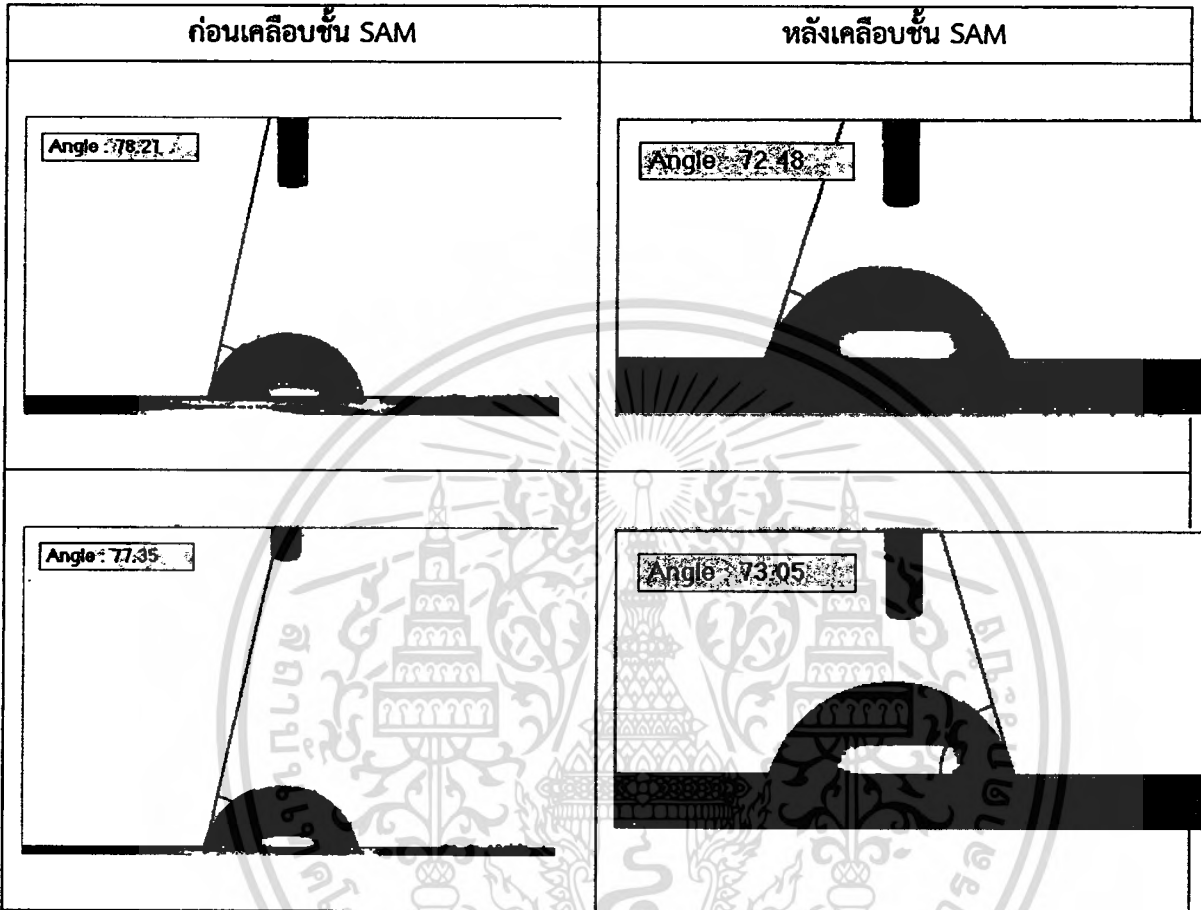
อนึ่งสารละลาย piranha เป็นกรดรุนแรง และต้องใช้ความชำนาญสูงในการล้างเซนเซอร์คานกลจิว คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองล้างและเตรียมผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลจิวด้วยกัน 2 วิธี โดยวิธีแรก ใช้ solvent เป็นหลัก เนื่องจากสามารถจัดการได้สะดวกกว่า โดยการจุ่มคานกลจิวใน acetone เป็นระยะเวลา 10 นาที ในถังอัลตราโซนิก ตามด้วย IPA 10 นาที ในถังอัลตราโซนิก และจุ่มใน ethanol อีก 10 นาที วิธีที่สองคือวิธีมาตรฐาน โดยการจุ่มเซนเซอร์คานกลจิวในสารละลาย piranha เป็นเวลา 15 – 20 นาที จากนั้นทดสอบการยึดเกาะของชั้น SAM บนผิวหน้าของทองคำด้วยเครื่อง contact angle ที่พัฒนาขึ้นเองที่สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล.



รูปที่ 2.13: ระบบวัด contact angle ที่พัฒนาขึ้นที่สาขาวิชาฟิสิกส์ สจล. เพื่อใช้ทดสอบแรงตึงผิวหน้าของชิ้นงาน

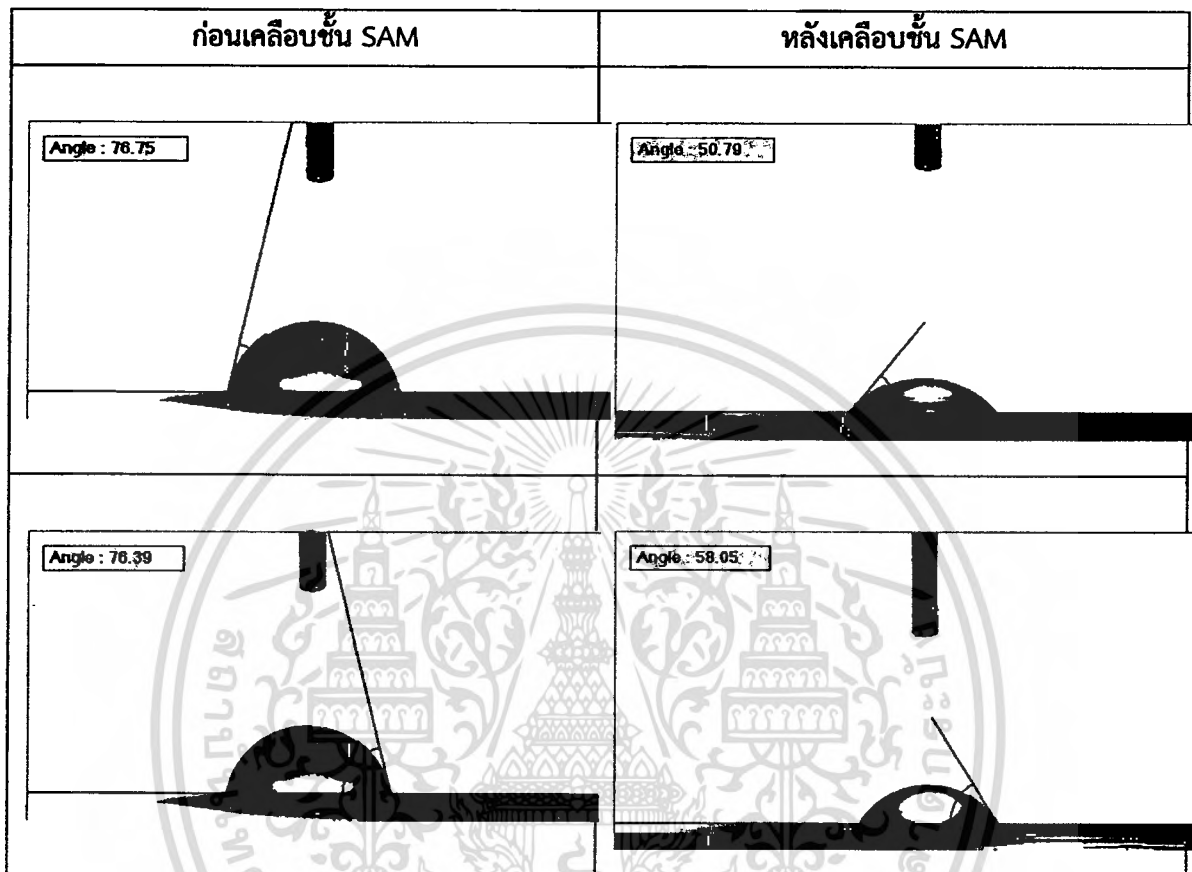
## 2.5 ผลการศึกษา

ผลการวัด contact angle ของผิวหน้าทองคำที่ทำความสะอาดด้วย solvent ก่อนและหลังเคลือบชั้น SAM



จะเห็นได้ว่า วิธีการล้างทำความสะอาดผิวหน้าของทองคำด้วย solvent ไม่ดีนัก โดยหลังจากนำชิ้นงานไปจุ่มในสารละลาย thiol แล้วนำมาวัด contact angle ไม่พบว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงตึงผิวเกิดที่ผิวหน้าของทองคำ แสดงว่าไม่เกิดการเคลือบของชั้น SAM บนผิวหน้าของชิ้นงาน

ผลการวัด contact angle ของผิวหน้าทองคำที่ทำความสะอาดด้วยสารละลาย piranha ก่อนและหลังเคลือบชั้น SAM



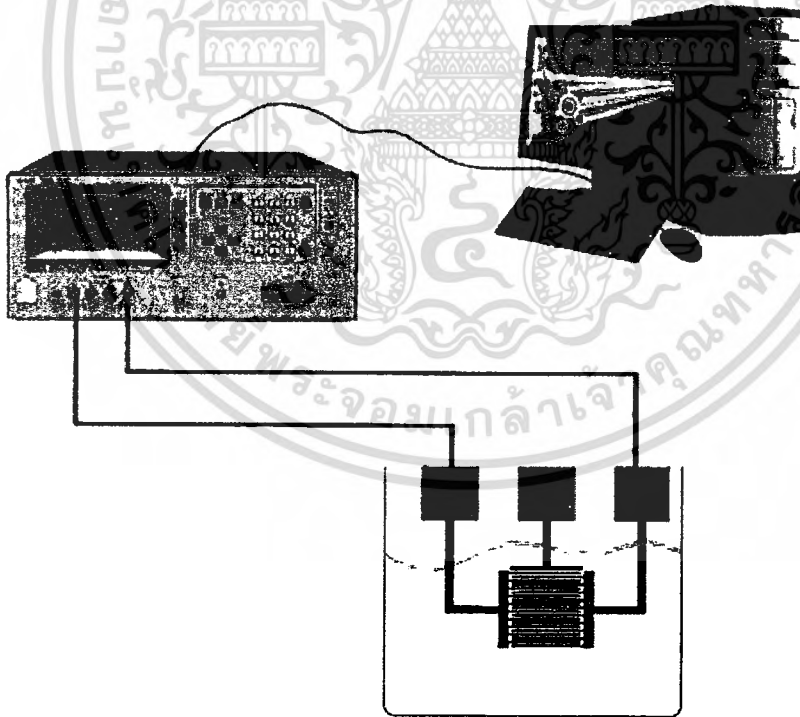
จะเห็นได้ว่า วิธีการล้างทำความสะอาดผิวหน้าของทองคำด้วยสารละลาย piranha ได้ผลดีตามที่มีการรายงานผลการวิจัยไว้ โดยจะสังเกตได้ว่า หลังจากนำชิ้นงานไปจุ่มในสารละลาย thiol แล้วนำมาวัด contact angle แรงดึงผิวเกิดที่ผิวหน้าของทองคำมีการเปลี่ยนแปลง คือ contact angle มีขนาดเพียง 50 – 58 องศา ลดลงจาก contact angle เดิม ซึ่งมีค่าประมาณ 76 องศา แสดงว่าเกิดการเคลือบของชั้น SAM บนผิวหน้าของชิ้นงาน

## 2.6 สรุปผล

- ออกแบบสารประกอบสำหรับดักจับไอออนลิเทียม ( $Li^+$ ) ที่เหมาะสมที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ โดยใช้ Molecular modeling
- ส่งข้อสารเคมีที่จำเป็นต้องใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบ
- ส่งชื่อ AFM probe สำหรับใช้เป็นเซนเซอร์คานกอล

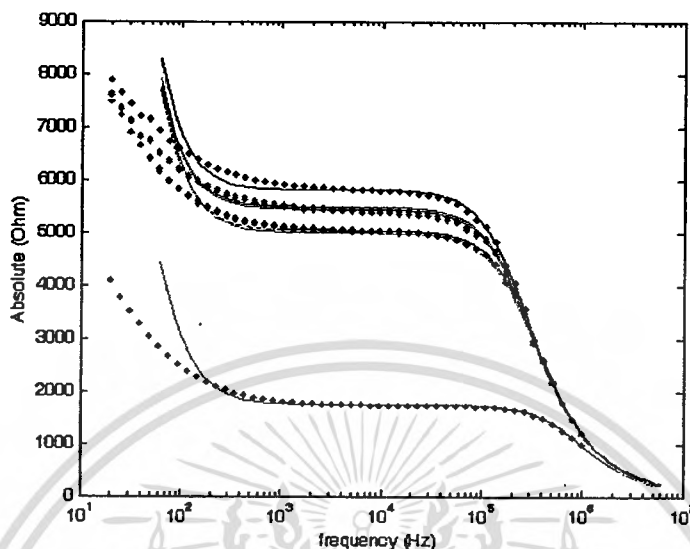
- สังเคราะห์สารประกอบสำหรับจับไอออน ลิเทียม ที่ได้ออกแบบไว้
- Characterize โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบที่สังเคราะห์ขึ้นในเบื้องต้น โดยใช้ NMR spectroscopy และ Mass Spectroscopy
- Characterize โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบที่สังเคราะห์ขึ้นเพิ่มเติม
- ศึกษาการเคลือบชั้น SAM ลงบนเซนเซอร์คานกลจิว
- นำเซนเซอร์คานกลจิวที่เคลือบด้วยชั้น SAM ไปทดสอบการดักจับไอออนของลิเทียม

ทั้งนี้เนื่องจาก เซนเซอร์คานกลจิวมีขนาดเล็กมาก วิธีที่เหมาะสมในการทดลองควรจะต้องรอเครื่องต้นแบบระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลจิวที่พัฒนาขึ้นในโครงการย่อยที่ 2 แล้วเสร็จสมบูรณ์ โดยในที่นี้ผู้วิจัยได้ทดลองสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ขึ้น และเคลือบด้วยสารละลาย thiol ที่เตรียมขึ้น จากนั้นนำไปวัด impedance spectroscopy ตามรูปที่ 2.14 พบว่า สารละลาย thiol ที่เตรียมขึ้นสามารถดักจับไอออนลิเทียมได้จริง โดยดูผลจากความต้านทานที่ลดลงของไมโครอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ (ดูรูปที่ 2.15 ประกอบ)



รูปที่ 2.14: การวัด impedance spectroscopy ของไมโครอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์

**ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เซลือบผิวหน้าด้วยทองและ SAM**



รูปที่ 2.15: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอิมพีแดนซ์และความถี่ของไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เซนเซอร์ โดยเซนเซอร์ถูกเคลือบด้วยทอง (Au) และ SAM จากกราฟ เส้นประ แทน ผลที่ได้จากการทดลองวัดอิมพีแดนซ์ของไมโครอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ด้วยเครื่อง LCR meter เส้นทึบ แทน ผลที่ได้จากแบบจำลองทางไฟฟ้า

- เส้นสีดำ แสดงผลการวัดครั้งที่ 1 วัดอิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์ที่เคลือบด้วยชั้น SAM ในน้ำ DI
- เส้นสีน้ำเงิน แสดงผลการวัดครั้งที่ 2 เมื่อจุ่มเซนเซอร์ในสารละลายที่มีลิเทียมไอออนที่ความเข้มข้น  $10^{-5}$  mol/L
- เส้นสีแดง แสดงผลการวัดครั้งที่ 3 เมื่อจุ่มเซนเซอร์ในน้ำ DI อีกครั้ง สังเกตว่า อิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์ลดลงจากการวัดครั้งที่ 1 แสดงว่ามีการเกาะติดของไอออนบนผิวหน้าของ SAM
- เส้นสีชมพู แสดงผลการวัดครั้งที่ 4 เมื่อจุ่มเซนเซอร์ในสารละลายที่มีลิเทียมไอออนที่ความเข้มข้น  $10^{-4}$  mol/L (อิมพีแดนซ์รวมลดต่ำลงมาก ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายมีการนำไฟฟ้าสูงขึ้น)
- เส้นสีเขียว แสดงผลการวัดครั้งที่ 5 เมื่อจุ่มเซนเซอร์ในน้ำ DI อีกครั้ง สังเกตว่า อิมพีแดนซ์ของเซนเซอร์ลดลงจากการวัดครั้งที่ 3 เล็กน้อย แสดงว่ามีการเกาะติดของไอออนบนผิวหน้าของ SAM เพิ่มเติม

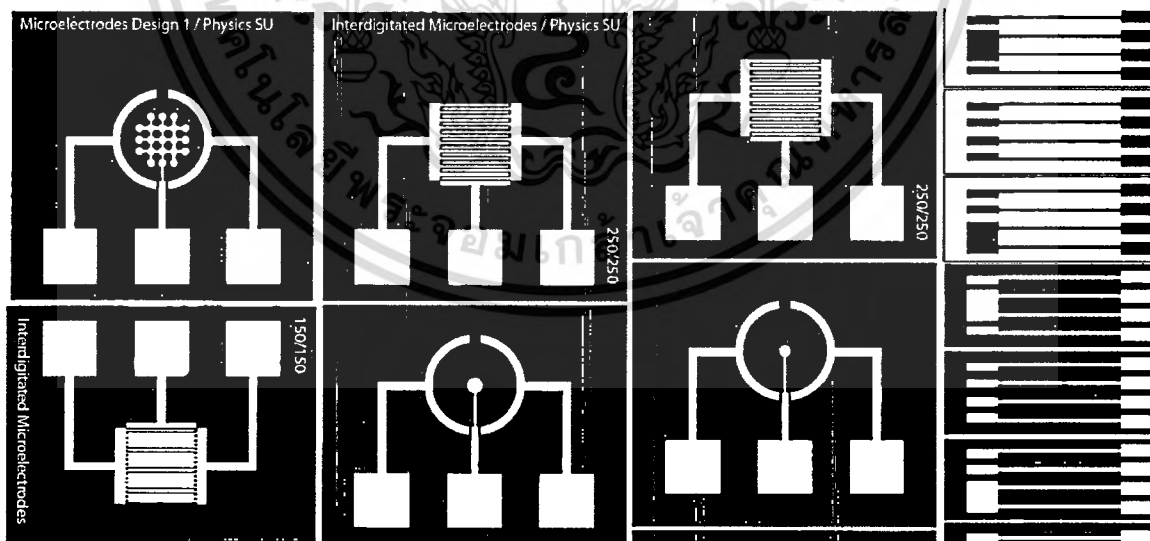
## 2.7 เอกสารอ้างอิง

- [1] Allara DL, Nuzzo RG: Spontaneously organized molecular assemblies. I: Formation, dynamics, and physical properties of n-alkanoic acids adsorbed from solution on an oxidized aluminum surface. *Langmuir* 1985; 1(1): 45–52.
- [2] Binning G, Quate CF, Gerber Ch: Atomic force microscope. *Physical Review Letters* 1986; 56(9):930–933.
- [3] Flink S., van Veggel FCJM, Reinhoudt DN: Self-assembled monolayers on gold for applications in chemical sensing. *Sensors Update* 2003; 8(1):3–19.
- [4] Fritz J, Baller MK, Lang HP, Rothuizen H, Vettiger P, Meyer E, Gunterodt HJ, Gerber Ch, Gimzewski JK: Translating biomolecular recognition into nanomechanics. *Science* 2000; 288(5464):316–318.
- [5] Ji HF, Hansen KM, Hu Z, Thundat TG: Detection of pH variation using modified microcantilever sensors. *Sensors and Actuators B* 2001; 72:233–238.
- [6] Ji HF, Thundat TG: In situ detection of calcium ions with chemical modified microcantilevers. *Biosensors & Bioelectronics* 2002; 17:337–343.
- [7] Lavrik N, Sepaniak MJ, Datskos PG: Cantilever transducers as a platform for chemical and biological sensors. *Review of Scientific Instruments* 2004, 75(7): 2229–2253.
- [8] Nuzzo RG, Allara DL: Adsorption of bifunctional organic disulfides on gold surfaces. *Journal of the American Chemical Society* 1983, 105(13):4481–4483.
- [9] Pinnaduwege LA, Boiadjev V, Hawk JE, Thundat TG: Sensitive detection of plastic explosives with self-assembled monolayer-coated microcantilevers. *Applied Physics Letters* 2003, 83(7): 1471–1473.
- [10] Sagiv J: Organized monolayers by adsorption. 1. Formation and structure of oleophobic mixed monolayers on solid surfaces. *Journal of the American Chemical Society* 1980, 102(1):92–98.
- [11] Wanichacheva N, Soto ER, Lambert CR, McGimpsey WG: Surface-based Lithium ion sensor: An electrode derivatized with a self-assembled monolayer. *Analytical Chemistry* 2006; 78(20):7132–7127.

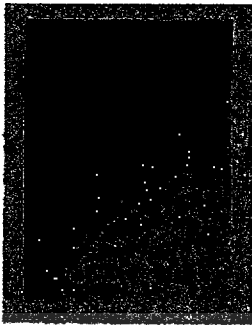
## 2.8 ภาคผนวก

### การสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคโนโลยีการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์

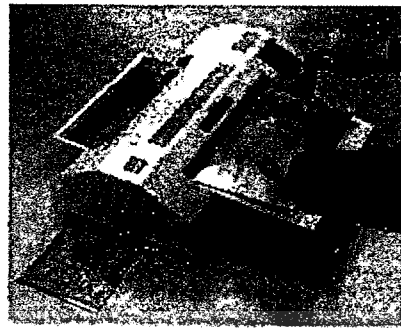
ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เพื่อทดสอบการเคลือบชั้น SAM ลงบนผิวทองคำ และทดสอบคุณสมบัติการดักจับไอออน ซึ่งแผ่นฐานรอง (substrate) ทำมาจากแผ่น epoxy เคลือบด้วยโลหะทองแดง โดยการสร้างลวดลายหรือรูปทรงของไมโครอิเล็กทรอนิกส์จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า photolithography ซึ่งเป็นการเคลือบชั้นฟิล์มไวแสงลงบนแผ่นฐานรองด้วยวิธี Dry film lamination จากนั้นก็นำลวดลายของไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบไว้จากโปรแกรม CAD มาทำเป็นหน้ากาก (รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างของหน้ากากหรือ photomask ที่ออกแบบขึ้น) จากนั้นเมื่อฉายแสง UV ลงไปบนแผ่นฟิล์มไวแสง ส่วนฟิล์มที่ถูกแสงจะแข็งตัว (cross-linked) เมื่อนำแผ่นไปทำการ develop ส่วนฟิล์มที่ได้รับแสงจะยังติดอยู่บนฐานรอง ส่วนบริเวณที่ไม่ได้รับแสงจะหลุดออก เกิดเป็นลวดลายของไมโครอิเล็กทรอนิกส์ตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นจึงนำไปกัดในกรดกัดทองแดง ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นไปเคลือบโลหะนิกเกิลและทองคำด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์แสดงดังรูปที่ 2.17 – 2.20



รูปที่ 2.16: photomask ที่ใช้สร้างลวดลายลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยสีขาวจะโปร่งแสง และสีดำทึบแสง



รูปที่ 2.17: แผ่นทองแดง หรือ แผ่น PCB



รูปที่ 2.18: เครื่องเคลือบฟิล์มไวแสง



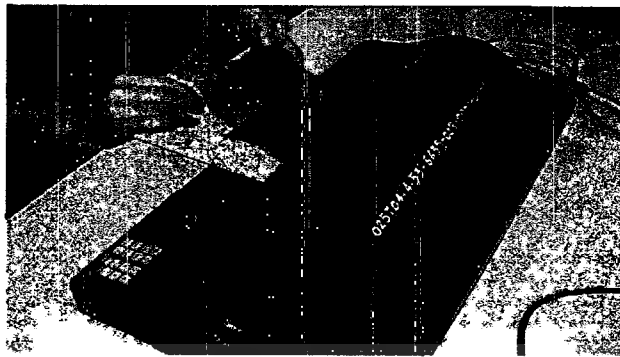
รูปที่ 2.19: เครื่องฉายแสงยูวี



รูปที่ 2.20: ฟิล์มไวแสง

ขั้นตอนการสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ด้วยเทคโนโลยีแผ่นวงจรพิมพ์

1. นำแผ่น PCB มาเคลือบแผ่นฟิล์มไวแสงโดยใช้เครื่องเคลือบฟิล์ม Laminator ที่อุณหภูมิ 110 °C โดยใช้ความเร็วในการหมุนอยู่ที่ระดับ 2 ขั้นตอนนี้จำเป็นต้องทำในห้องมืด หรือห้องที่ใช้หลอดไฟส่องสว่างเป็นสีเหลืองหรือสีแดง โดยการเคลือบฟิล์มให้มีความสม่ำเสมอจำเป็นต้องตั้งแผ่นฟิล์มไวแสงให้ตั้งในระหว่างการเคลือบฟิล์ม (แสดงดังรูปที่ 2.21)



รูปที่ 2.21: การเคลือบฟิล์มไวแสงด้วยเครื่องเคลือบฟิล์ม

- นำแผ่น PCB ที่เคลือบด้วยฟิล์มไวแสงมาพิมพ์ลายไมโครอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องฉายแสง UV เป็นเวลา 150 วินาที



รูปที่ 2.22: การสร้างลวดลายไมโครอิเล็กทรอนิกส์ลงบนแผ่น PCB ที่เคลือบด้วยฟิล์มไวแสง โดยใช้เครื่องฉายแสง UV เป็นเวลา 150 วินาที

- นำแผ่น PCB ที่ฉายแสงแล้ว ไปทำการกัดฟิล์มโฟสออก ขั้นตอนนี้เรียกว่า film development ด้วยโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) โดยใช้ผง  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  10 กรัมต่อน้ำ 400 มิลลิลิตร



รูปที่ 2.23: ภาพถ่ายขั้นตอนการ develop ฟิล์มไวแสง เมื่อฟิล์ม develop โดยสมบูรณ์แล้ว จะสังเกตเห็นได้ว่าส่วนที่ได้รับแสงจะยังมีลวดลายติดค้างอยู่ ในขณะที่ ส่วนที่ไม่ได้รับแสง UV จะหายไป

4. นำแผ่น PCB จากข้อ 3 ไปตัดให้ได้ขนาดตามที่ต้องการด้วยเครื่องตัดแผ่นวงจรพิมพ์



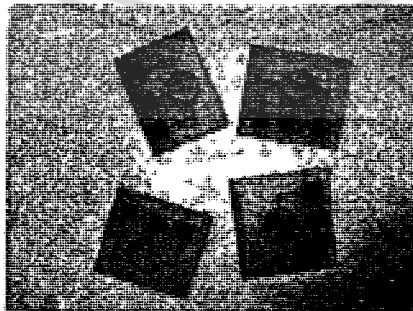
รูปที่ 2.24: ภาพถ่ายแผ่น PCB พร้อมลวดลายไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกตัดออกเป็นชิ้น

5. นำแผ่น PCB ที่ตัดแล้ว ไปกัดทองแดงส่วนที่ไม่ใช่ออกด้วย ferric chloride



รูปที่ 2.25: ภาพถ่ายขั้นตอนการกัดทองแดงออกจากแผ่น PCB ด้วย ferric chloride

6. นำแผ่น PCB ที่กัดได้ลวดลายไมโครอิเล็กทรอนิกส์เรียบร้อยแล้วจากขั้นตอนที่ 5 ไปล้างฟิล์มไวแสงออกด้วย acetone



รูปที่ 2.26: ภาพถ่ายไมโครอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ที่ทำขึ้นจากขั้นตอนที่ 1 - 6

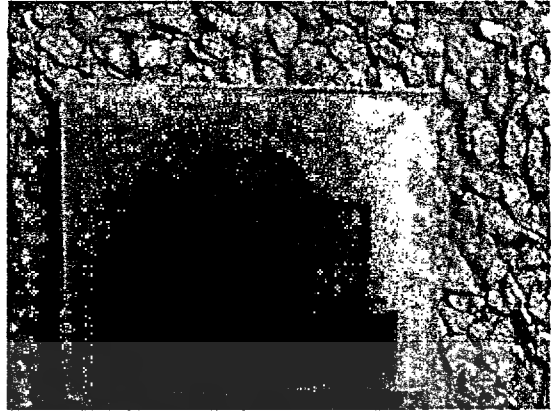
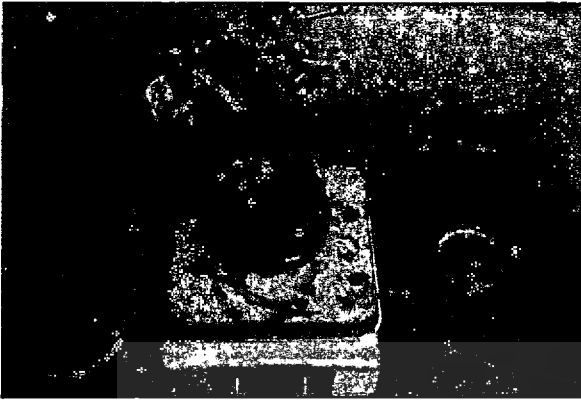
7. จากนั้นนำไมโครอิเล็กทรอนิกส์มาเคลือบด้วยนิกเกิลและ/หรือทอง ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electroplating) โดยเริ่มจากสารละลายทองแดงต่างก่อน จากนั้นจึงทำการชุบด้วยสารละลายทองแดงกรด สารละลายนิกเกิล และสารละลายทอง ตามลำดับ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการชุบทางไฟฟ้าเคมีแสดงดังตารางด้านล่าง รูปที่ 2.27 - 2.30 แสดงภาพขั้นตอนการเคลือบนิกเกิลและทองคาลงบนแผ่น PCB

รายละเอียดวิธีการเคลือบโลหะนิกเกิลและทองลงบนแผ่นไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ชนิดของสารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm <sup>2</sup> )	เวลา
สารละลายทองแดงต่าง	40 - 60	0.025 A	1 นาที
สารละลายทองแดงกรด	20 - 50	0.025 A	10 นาที
สารละลายนิกเกิล	45 - 65	0.025 A	10 นาที
สารละลายทอง	35 - 40	0.025 A	30 วินาที



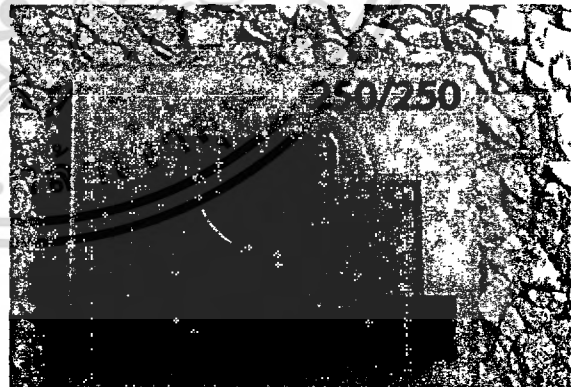
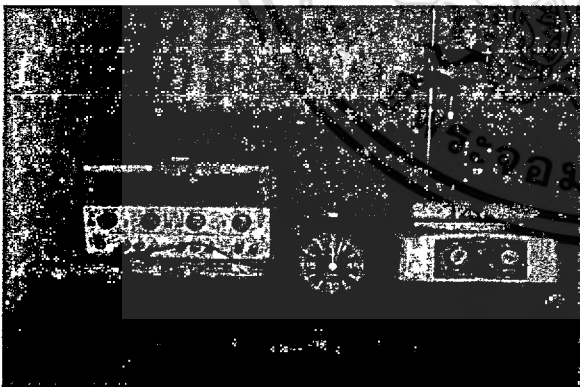
รูปที่ 2.27: รูปถ่ายแสดงการเคลือบไมโครอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายทองแดงต่าง



รูปที่ 2.28: รูปถ่ายแสดงการเคลือบไมโครอิเล็กโทรดเซนเซอร์ด้วยสารละลายทองแดงกรด



รูปที่ 2.29: รูปถ่ายแสดงการเคลือบไมโครอิเล็กโทรดเซนเซอร์ด้วยสารละลายนิกเกิลซัลเฟต



รูปที่ 2.30: รูปถ่ายแสดงการเคลือบไมโครอิเล็กโทรดเซนเซอร์ด้วยสารละลายสำหรับขุบทอง

## บทที่ 3

### ระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานากลจิว เวอร์ชัน 1

#### 3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เป้าหมายหลักของงานวิจัยและพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีไบโอเซนเซอร์หรือเซนเซอร์ชีวภาพคือการพัฒนาอุปกรณ์ที่ (1) มีความไวและความละเอียดในการตรวจวัดสูง ในระดับที่สามารถตรวจวัดจำนวนเซลล์หรือโมเลกุลขนาดเล็กๆได้ (2) มีขนาดเล็กพกพาสะดวก สามารถใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างปริมาณน้อยๆได้ ในระดับไมโครลิตร นาโนลิตร (3) มีความเฉพาะเจาะจง ดักจับเฉพาะสิ่งที่ต้องการตรวจวัดเท่านั้น และ (4) มีราคาถูก โดยไบโอเซนเซอร์ที่มีความสามารถดังที่กล่าวมาจะมีประโยชน์สำหรับประยุกต์ใช้งานในหลายๆด้านด้วยกัน ทั้งการตรวจสอบคุณภาพและความสดใหม่ของอาหารนำเข้าและส่งออก การวิเคราะห์ทางเคมี และการวินิจฉัยโรคทางการแพทย์ อาทิเช่น นำไปใช้เพื่อตรวจจับเซลล์มะเร็ง หรือไวรัส ซึ่งเป็นโมเลกุลจำนวนน้อยๆที่ปะปนอยู่ในเลือด เป็นต้น คำถามก็คือ “จะวัดหรือตรวจจับอนุภาคโมเลกุลขนาดเล็กๆเหล่านั้นได้อย่างไร?”

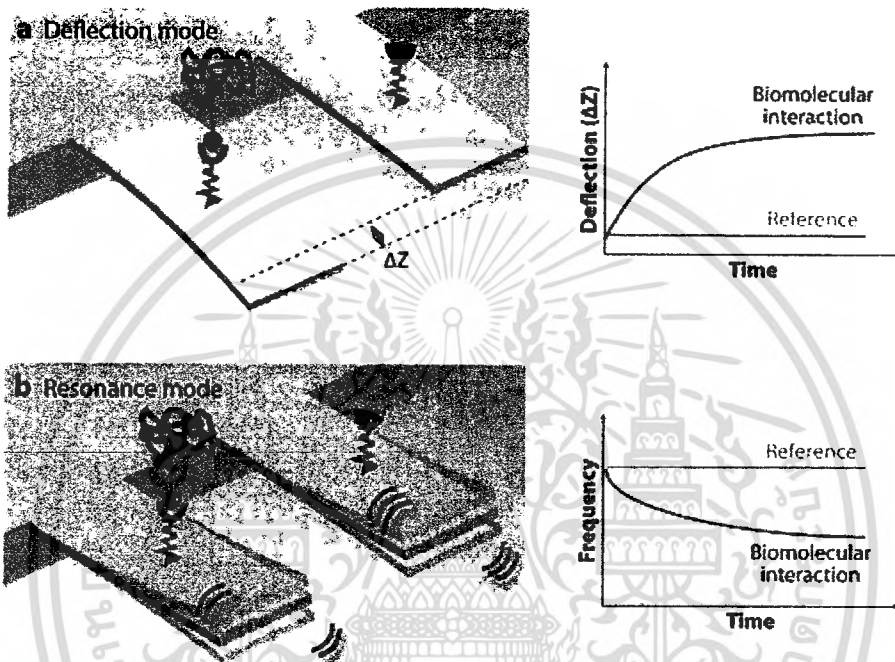
ปัจจุบันมีนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยจากทั่วทุกมุมโลกพยายามคิดค้น ออกแบบ และประดิษฐ์ไบโอเซนเซอร์ที่มีความละเอียดและความไวการตรวจวัดสูง ด้วยเทคนิคและวิธีการต่างๆกัน อาทิเช่น เซนเซอร์ประเภทไมโครอิเล็กโทรด (microelectrode-based sensors) เซนเซอร์ประเภทควออร์ทคริสตัลไมโครบาลานซ์ (quartz crystal microbalance sensors) และ เซนเซอร์ประเภทโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescent-based sensors) เทคนิคหนึ่งที่ได้รับความสนใจ ได้แก่ เซนเซอร์ชนิดคานากลจิว (microcantilever-based sensors) ซึ่งมีจุดเด่นในแง่ของความไวและความละเอียดในการตรวจวัด ขนาดเล็ก มีความไวในการตรวจจับ และมีราคาต่อหน่วยการผลิตที่ค่อนข้างถูก เซนเซอร์ชนิดนี้โดยทั่วไปจะถูกนำมาใช้ในกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) เพื่อสร้างภาพพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งต้องการความละเอียดสูงๆในระดับโมเลกุล [Binnig *et al.*, 1986]

#### ฟิสิกส์และหลักการทำงานของเซนเซอร์คานากลจิว

หลักการทำงานของเซนเซอร์คานากลจิวแบ่งออกเป็นสองโหมดด้วยกัน ได้แก่ โหมดวัดความโค้งงอ (deflection mode) ใช้หลักการตรวจจับความโค้งงอของคานากลจิวเมื่อมีอนุภาคหรือมวลมาเกาะติดบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนเซอร์ (ดูรูปที่ 3.1(a) ประกอบ) และ โหมดสั่นพ้อง (resonant mode) เป็นการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความถี่ก่าทอนของคานากลจิว เพื่อใช้ในการตรวจวัดมวลของสสารที่มาเกาะติดบนผิวหน้าของเซนเซอร์ (ดูรูปที่ 3.1(b) ประกอบ) โดยคุณสมบัติเชิงกลที่ใช้บ่งบอกประสิทธิภาพของไมโครแคนทิลเวอร์ทั้งสองโหมดได้แก่ค่าคงที่สปริง (spring constant,  $k$ ) และ ความถี่ก่าทอน (resonant frequency,  $f$ )



รูปที่ 3.1: การทำงานของเซนเซอร์คานากลจิวแบ่งออกได้เป็น (a) โหมดวัดความโค้งงอ และ (b) โหมดวัดการสั่นพ้อง

ค่าคงที่สปริงของเซนเซอร์เป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) ซึ่งแปรผันกับแรง  $F$  ที่กดลงบนผิวหน้าของคานากลจิว และความโค้งงอ  $z$  ที่เกิดขึ้นบนแคนทิลเวอร์ ดังสมการ

$$F = -kz$$

โดยค่าคงที่ของสปริงใช้บ่งบอกคุณสมบัติความแข็งตึงและความอ่อนตัวของคานากลจิว (stiffness of the microcantilever) ค่าคงที่นี้จะขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของวัสดุ หรือ ค่าคงที่ของความยืดหยุ่น (Elastic modulus,  $E$ ) และรูปทรงทางกายภาพของแคนทิลเวอร์ สำหรับแคนทิลเวอร์เซนเซอร์ที่มีรูปทรงเป็นคานสี่เหลี่ยมเหมือนในรูปที่ 3.1 ค่าคงที่ของสปริงจะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$k = \frac{3EWH^3}{L^3}$$

โดยกำหนดให้  $W$   $L$  และ  $H$  คือ ความกว้าง ความยาว และความหนาของคานแคนทิลิเวอร์ ตามลำดับ ซึ่ง

โดยทั่วไปค่าคงที่ของสปริงของคานกลจิวจะอยู่ในช่วง  $1 \text{ mN/m}$  to  $1 \text{ N/m}$

ความถี่ก่าทอนหรือความถี่ธรรมชาติของคานกลจิวจะแปรผันกับค่าคงที่ของสปริงและมวล  $m$  ของคานกลจิว

$$f_n \propto \sqrt{\frac{k}{m}}$$

สำหรับคานกลจิวที่มีรูปทรงเป็นคานสี่เหลี่ยมเหมือนในรูปที่ 1 ความถี่ธรรมชาติของคานจะเขียนได้อยู่ในรูปของสมการต่อไปนี้

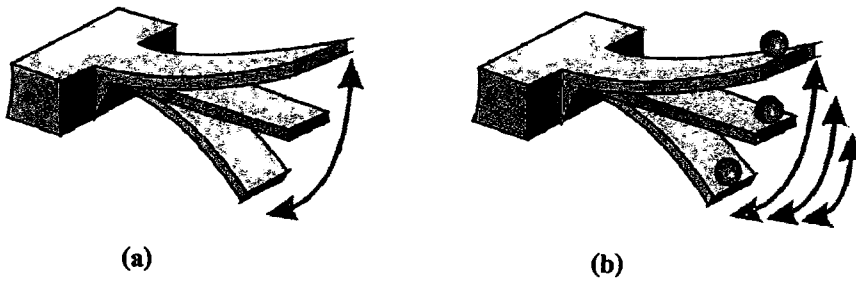
$$f_n = \underbrace{\left( \frac{\Omega_n^2}{4\sqrt{3}\pi} \right)}_{\text{constant}} \cdot \underbrace{\left( \frac{H}{L^2} \right)}_{\text{device geometry}} \cdot \underbrace{\left( \sqrt{\frac{E}{\rho}} \right)}_{\text{material properties}}$$

เมื่อ  $\rho$  คือความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ทำแคนทิลิเวอร์ และ  $\Omega_n$  คือ ค่าคงที่ที่กำหนดโหมดในการก่าทอน (the flexural mode identifier constant) โดย  $\Omega_1 = 1.875$  จากสมการจะเห็นว่าความถี่ก่าทอนจะขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของวัสดุ (เทอมสุดท้ายของสมการ) และขนาดรูปทรงของคานกลจิว (เทอมที่สองในสมการ)

#### การทำงานของเซนเซอร์ชนิดคานกลจิวในโหมดสั่นพ้อง

จากที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น เซนเซอร์ชนิดคานกลจิวแบ่งการทำงานออกเป็นสองโหมด การทำงานของแคนทิลิเวอร์ในโหมดสั่นพ้องอาศัยการวัดความเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ก่าทอนของเซนเซอร์  $\Delta f$  เพื่อใช้ตรวจจับอนุภาคที่มาเกาะบนผิวหน้าของเซนเซอร์ โดยเมื่อคานแคนทิลิเวอร์มีมวลเปลี่ยนแปลง  $\Delta m$  (เนื่องจากมีอนุภาคมาเกาะ) ความถี่ก่าทอนของเซนเซอร์ก็จะเปลี่ยนแปลง โดยใช้อุณหภูมิเทอร์โมอิเล็กทริก เราสามารถประมาณค่าความถี่ก่าทอนของเซนเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงได้ดังสมการ

$$\Delta f = -\frac{1}{2} \frac{\Delta m}{m} f_n$$



รูปที่ 3.2: การทำงานของคานากลจิวแบบโหมดคลื่นพ้อง: (a) ในสภาวะปกติคานากลจิวจะแกว่งด้วยความถี่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความถี่กำหนด (fundamental resonant frequency) และ (b) เมื่ออนุภาคเกาะติดบนผิวหน้าจะทำให้ความถี่ในการแกว่งหรือสั่นพ้องของคานากลจิวเปลี่ยนไป

โดยความไวในการตรวจจับมวลที่มากเกาะบนผิวหน้าของเซนเซอร์ (sensor sensitivity) สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของคุณสมบัติของวัสดุและขนาดรูปร่างทางกายภาพของเซนเซอร์ได้ดังสมการ

$$\frac{\Delta f}{\Delta m} = \underbrace{\left(-\frac{\Omega_n^6}{12\sqrt{3}}\right)}_{\text{constant}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{L^3W}\right)}_{\text{device geometry}} \cdot \underbrace{\left(\sqrt{\frac{E}{\rho^3}}\right)}_{\text{material properties}}$$

การทำงานของแคนทิลิเวอร์ในโหมดนี้นิยมนำมาใช้ในกรณีที่เซนเซอร์อยู่ในตัวกลางที่เป็นอากาศหรือแก๊ส เพื่อใช้วัดอนุภาคของแก๊สพิษ หรือไอระเหยของระเบิด เป็นต้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อใช้แคนทิลิเวอร์ในโหมดสั่นพ้องกับตัวกลางที่เป็นของเหลว ความหนืดของของเหลวจะไปลดแอมพลิจูดของการแกว่งของคานากลจิวลง ส่งผลให้การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงความถี่กำหนดของเซนเซอร์ทำได้ยาก

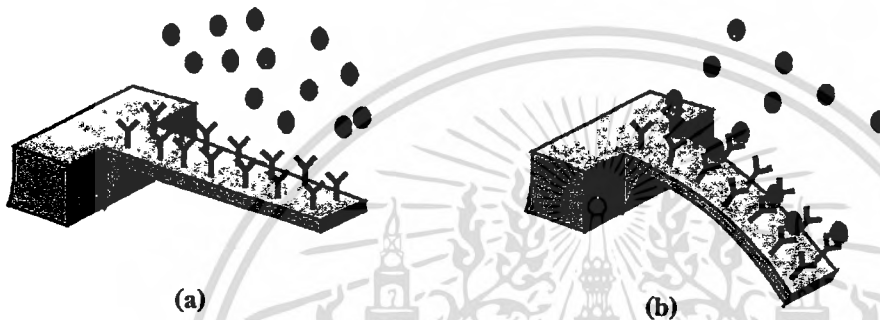
#### การทำงานของเซนเซอร์ชนิดคานากลจิวในโหมดวัดความเค้นงอ

การทำงานของแคนทิลิเวอร์ในโหมดวัดความเค้นงอนิยมนำมาใช้ในไบโอเซนเซอร์ เนื่องจากการตรวจจับอนุภาคหรือชีวโมเลกุลโดยทั่วไปแล้วจะทำการวัดในตัวกลางที่เป็นของเหลว เช่น น้ำ หรือ เซรั่มของผู้ป่วย ซึ่งความหนืดของของเหลวไม่ได้ส่งผลอย่างมากต่อความเค้นงอของเซนเซอร์

ความเค้นงอของคานากลจิวที่เกิดขึ้นเมื่อมีอนุภาคมาเกาะเป็นผลมาจากการเกิดความเค้นบนพื้นผิวหน้าของเซนเซอร์ โดยความเค้นงอของแคนทิลิเวอร์ จะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Stoney

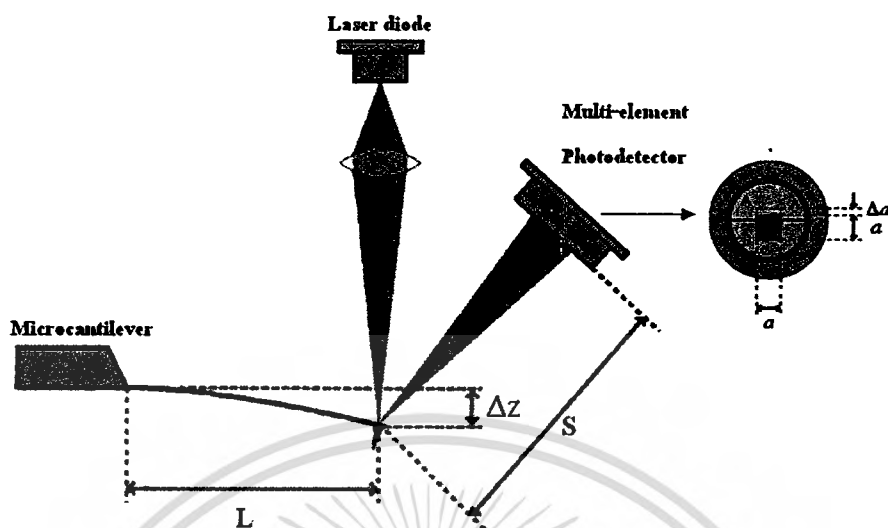
$$\Delta z = \frac{3(1-\nu)L^2}{EH^2} \Delta\sigma$$

เมื่อ  $\Delta z$  คือความโค้งงอที่เกิดขึ้นที่ปลายคานของแคนทิลิเวอร์  $\Delta\sigma$  เป็นความแตกต่างระหว่างความเค้นของอนุภาคที่มาเกาะบนคานกับความเค้นของแคนทิลิเวอร์  $\nu$  และ  $E$  เป็นคุณสมบัติของวัสดุ (poison ratio และค่าคงที่ของความยืดหยุ่น ตามลำดับ)



รูปที่ 3.3: การทำงานของคานกลจิวโนโหมควัดความโค้งงอ: (a) สภาพปกติของคานกลจิวจะตั้งอยู่ในแนวตรง ไม่โค้งงอ (stress free) และ (b) เมื่อมีอนุภาคมาเกาะติดอยู่บนพื้นผิวของคานกลจิวจะทำให้เกิดความเค้น ส่งผลให้คานกลจิวโค้งงอ

การวัดความโค้งงอของคานกลจิวสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน วิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือการใช้เทคนิคทางแสง โดยการฉายลำแสงเลเซอร์ไปตกกระทบบนงอผิวหน้าของคานกลจิวและวัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกจากผิวหน้าของแคนทิลิเวอร์เมื่อเกิดการโค้งงอ



รูปที่ 3.4: โดอะแกรมระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลด้วยเทคนิค optical beam deflection measurement

รูปที่ 3.4 แสดงเทคนิคการวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลด้วยเทคนิคทางแสง optical beam deflection measurement อุปกรณ์หลักของระบบการวัดนี้จะประกอบไปด้วย เลเซอร์ไดโอด และ โฟโต้ไดโอดแบบหลายอีลีเมนต์ (multi-element photodetector) โดยเมื่อลำแสงเลเซอร์ที่ออกมาจากเลเซอร์ไดโอดตกกระทบเซนเซอร์คานทิลเวอร์ที่อยู่ในสภาพปกติ (ไม่โค้งงอ) ลำแสงของเลเซอร์จะสะท้อนไปยังตำแหน่งกึ่งกลางของโฟโต้ไดโอดพอดี ดังนั้นกระแสเอาท์พุทของแต่ละอีลีเมนต์ของ โฟโต้ไดโอดจะมีค่าเท่ากัน เมื่อมีอนุภาคใดๆมาเกาะบนผิวหน้าของเซนเซอร์คานทิลเวอร์ จะทำให้เซนเซอร์โค้งงอ ดังนั้นลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนออกจากคานจะตกไปยังตำแหน่งอื่น (off center) ของ โฟโต้ไดโอด ทำให้กระแสเอาท์พุทของแต่ละอีลีเมนต์มีค่าไม่เท่ากัน

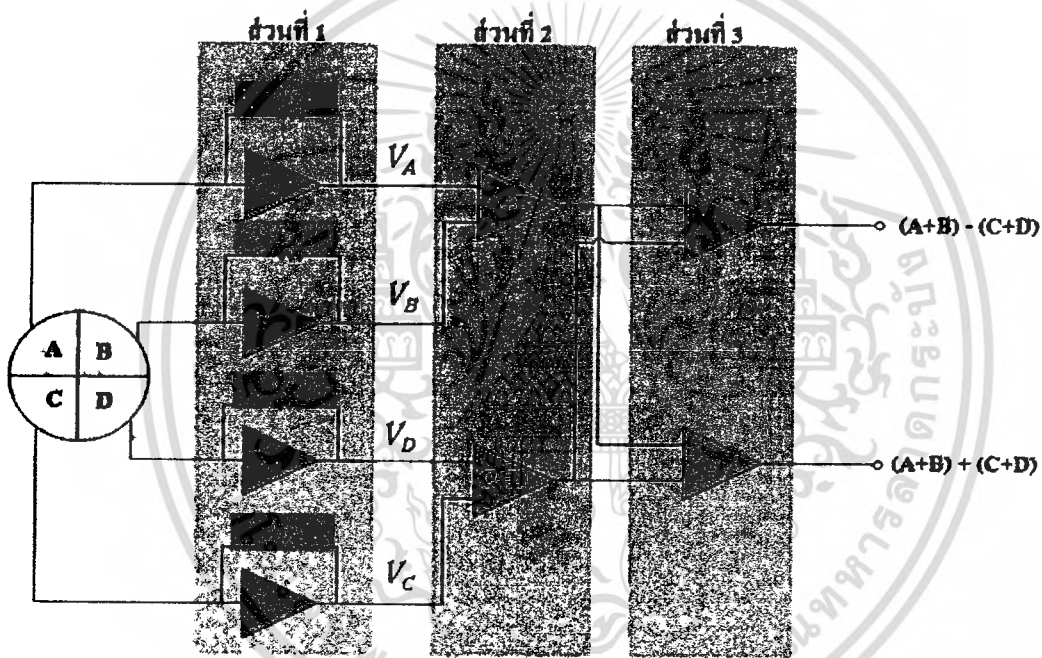
### 3.2 การออกแบบระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลด้วยเทคนิคทางแสง

ในโครงการวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบวงจรสำหรับใช้ในการทดลอง 2 วงจร ได้แก่

1. วงจรขับเลเซอร์ไดโอด (laser diode driver circuit) ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดและควบคุมความเข้มของลำแสงเลเซอร์
2. วงจรพีเอสดี (PSD circuit) ใช้เชื่อมต่อกับเซนเซอร์วัดตำแหน่งแสงที่ตกกระทบบนโฟโต้เซนเซอร์

แผนภาพแสดงหลักการทำงานของวงจรที่ใช้ในการทดลอง

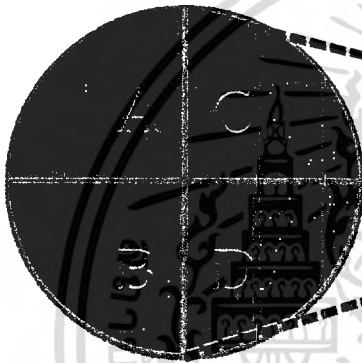
หลักการทำงานของวงจรอ่านค่าตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบบนเซนเซอร์แบบ PSD แสดงดัง ไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 ส่วนที่ 1 เป็นวงจรที่แปลงค่ากระแสจากโฟโตไดโอดเซนเซอร์แบบ PSD ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าได้ที่แต่ละตำแหน่งเป็น  $V_A, V_B, V_C$  และ  $V_D$  ส่วนที่ 2 เป็นวงจรที่นำแรงดันเอาต์พุต  $(V_A + V_B)$  และ  $(V_C + V_D)$  ส่วนที่ 3 เป็นวงจรที่นำค่าแรงดันเอาต์พุต  $(V_A + V_B) - (V_C + V_D)$  และ  $(V_A + V_B) + (V_C + V_D)$



รูปที่ 3.5: แสดงแผนภาพไดอะแกรมของวงจรอ่านค่าตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD

### เซนเซอร์บอกตำแหน่ง (position sensitive detector, PSD)

เซนเซอร์บอกตำแหน่ง (PSD) มีหลักการทำงานเหมือนกับโฟโตไดโอด (photodiode) และมีความไวในการตอบสนองต่อแสงสูง ซึ่งเซนเซอร์แบบ PSD จะประกอบด้วยโฟโตไดโอด 4 ตัว นำมาประกอบกับเป็นจตุภาค (quadrant) กำหนดให้แต่ละจตุภาคเป็น A, B, C และ D ดังรูปที่ 3.6 นิยมนำมาใช้ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแสงที่ตกกระทบบนเซนเซอร์ หลักการทำงานของเซนเซอร์แบบ PSD และวงจรเชื่อมต่อ รวมไปถึงการทดลองวัดคุณสมบัติของเซนเซอร์ร่วมกับวงจรที่ได้ออกแบบขึ้นได้ดังนี้



รูปที่ 3.6: ภาพแบบจำลองเซนเซอร์แบบ PSD



รูปที่ 3.7: ภาพถ่ายเซนเซอร์ชนิด PSD

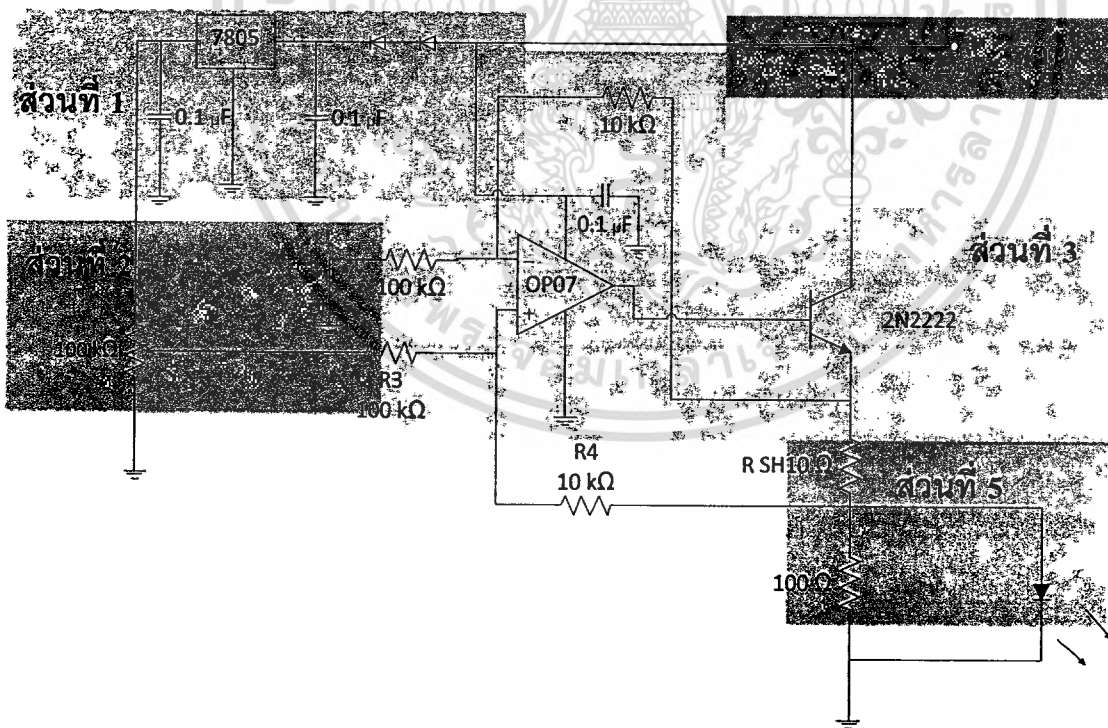
### หลักการทำงานของเซนเซอร์ชนิด PSD

เซนเซอร์แบบ PSD มีหลักการทำงานเหมือนกับโฟโตไดโอด ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์รับแสงที่ทำจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยจะเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า เมื่อแสงตกกระทบบนเซนเซอร์ประเภทโฟโตไดโอด อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานวาเลนซ์ (valence band) เมื่อได้รับพลังงานมากพอจะสามารถกระโดดขึ้นไปบนแถบการนำ (conduction band) ได้เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระขึ้น อิเล็กตรอนที่กระโดดขึ้นไปบนแถบวาเลนซ์มากขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนได้รับพลังงานมากขึ้นก็จะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนทำให้เกิดกระแสไหล

### 3.2.1 วงจรขับเลเซอร์ไดโอด (laser diode driver circuit)

#### อุปกรณ์การทดลอง

- |  |       |
|--|-------|
| 1. เรกกูเลเตอร์ 7805 (regulator 7805)      | 1 ตัว |
| 2. ตัวเก็บประจุ 0.1 $\mu\text{F}$          | 4 ตัว |
| 3. ตัวต้านทาน 10 k $\Omega$                | 2 ตัว |
| 4. ตัวต้านทาน 100 k $\Omega$               | 3 ตัว |
| 5. ตัวต้านทาน 10 $\Omega$                  | 1 ตัว |
| 6. ตัวต้านทาน 100 $\Omega$                 | 1 ตัว |
| 7. ออปแอมป์ 07 (OP07)                      | 1 ตัว |
| 8. แหล่งกำเนิดแรงดัน 6 -9 V (power supply) | 1 ตัว |
| 9. เลเซอร์                                 | 1 ตัว |
| 10. ไดโอด                                  | 2 ตัว |



รูปที่ 3.8: แผนผังแสดงวงจรขับเลเซอร์ไดโอด

จากรูปที่ 3.8 สามารถคำนวณกระแสเอาต์พุต ( $I_{OUT}$ ) ได้ตามสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{IN}}{I_{OUT}} = \frac{R_3}{R_4} \times R_{SH} \quad (3.1)$$

### หลักการการทำงานของวงจรควบคุมหรือขับเลเซอร์ไดโอดตามรูปที่ 3.8

ส่วนที่ 1 ให้แรงดันเอาต์พุต 5 V และควบคุมการไหลของกระแสให้ไหลทิศทางเดียว

ส่วนที่ 2 ควบคุมแรงดันอินพุตให้อยู่ในช่วง 0 – 5 V หรือควบคุมกระแสให้อยู่ในช่วง 0 – 50 mA

ส่วนที่ 3 วงจรขยายแรงดัน

ส่วนที่ 4 แหล่งจ่ายกระแสให้กับวงจร 6-9 V

ส่วนที่ 5 แหล่งกำเนิดลำแสงเลเซอร์

### 3.2.2 วงจรพีเอสดี (PSD circuit)

#### อุปกรณ์การทดลอง

1. CA 3140	8 ตัว
2. ไดโอด	4 ตัว
3. ตัวเก็บประจุ 0.1 $\mu$ F	14 ตัว
4. ตัวต้านทาน 100 k $\Omega$	4 ตัว
5. ตัวต้านทาน 20 k $\Omega$	13 ตัว
6. ตัวต้านทาน 6.8 k $\Omega$	3 ตัว
7. ตัวต้านทาน 51 k $\Omega$	1 ตัว
8. ตัวต้านทาน 100 $\Omega$	1 ตัว
9. ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 100 k $\Omega$	1 ตัว
10. แหล่งจ่ายกระแส	- 15 V, + 15 V

เซนเซอร์แบบ PSD ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามที่แสดงในรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

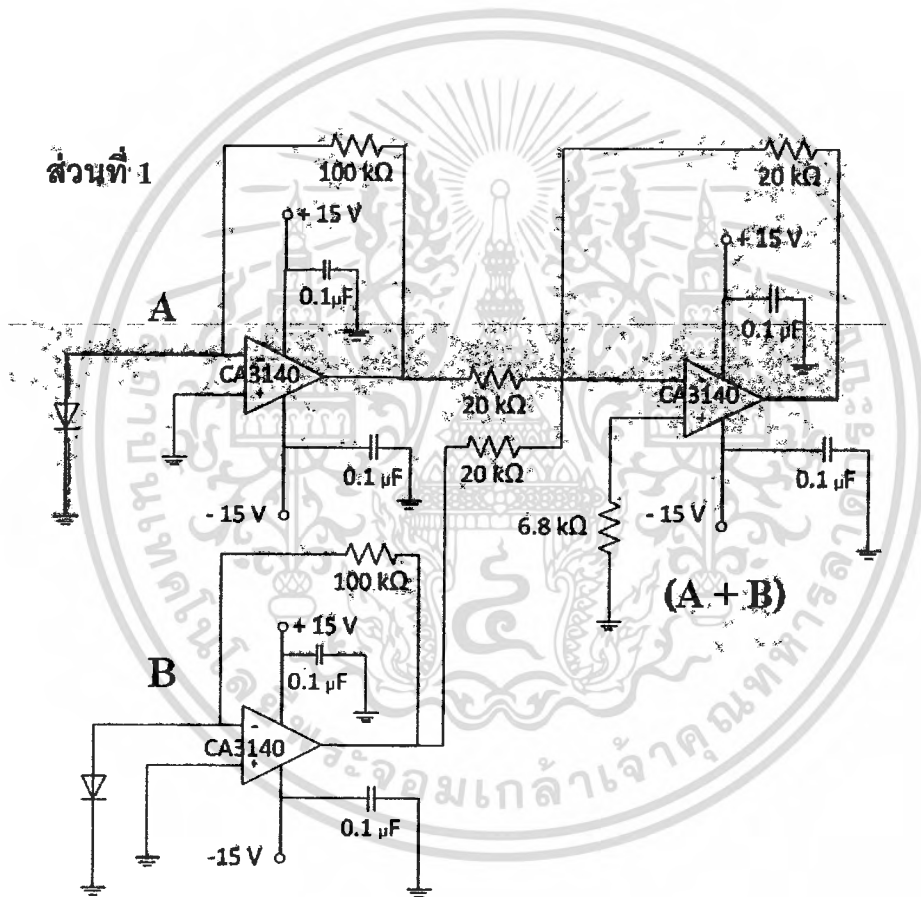
หลักการทำงานของวงจรเซนเซอร์แบบ PSD ในรูปที่ 3.9

ส่วนที่ 1 แปลงกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากโฟโตไดโอดเป็นแรงดันไฟฟ้าและรวมแรงดันเอาต์พุต ( $V_A + V_B$ )

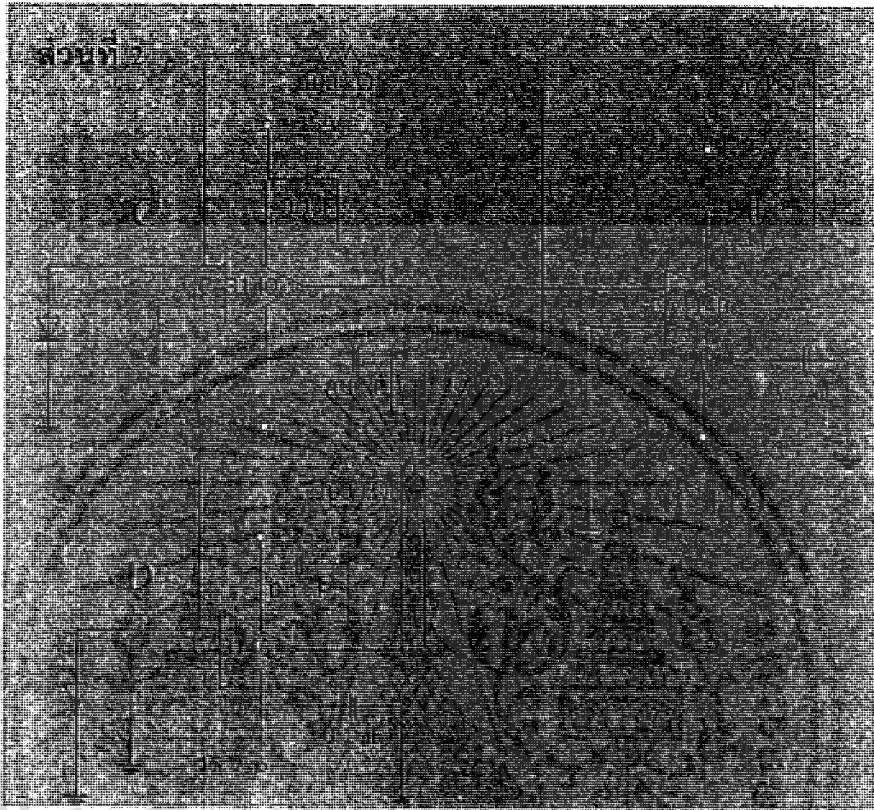
เนื่องจากลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD ที่บริเวณ A และ B

ส่วนที่ 2 รวมแรงดันเอาต์พุต ( $V_C + V_D$ ) เนื่องจากลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์ PSD ที่บริเวณ

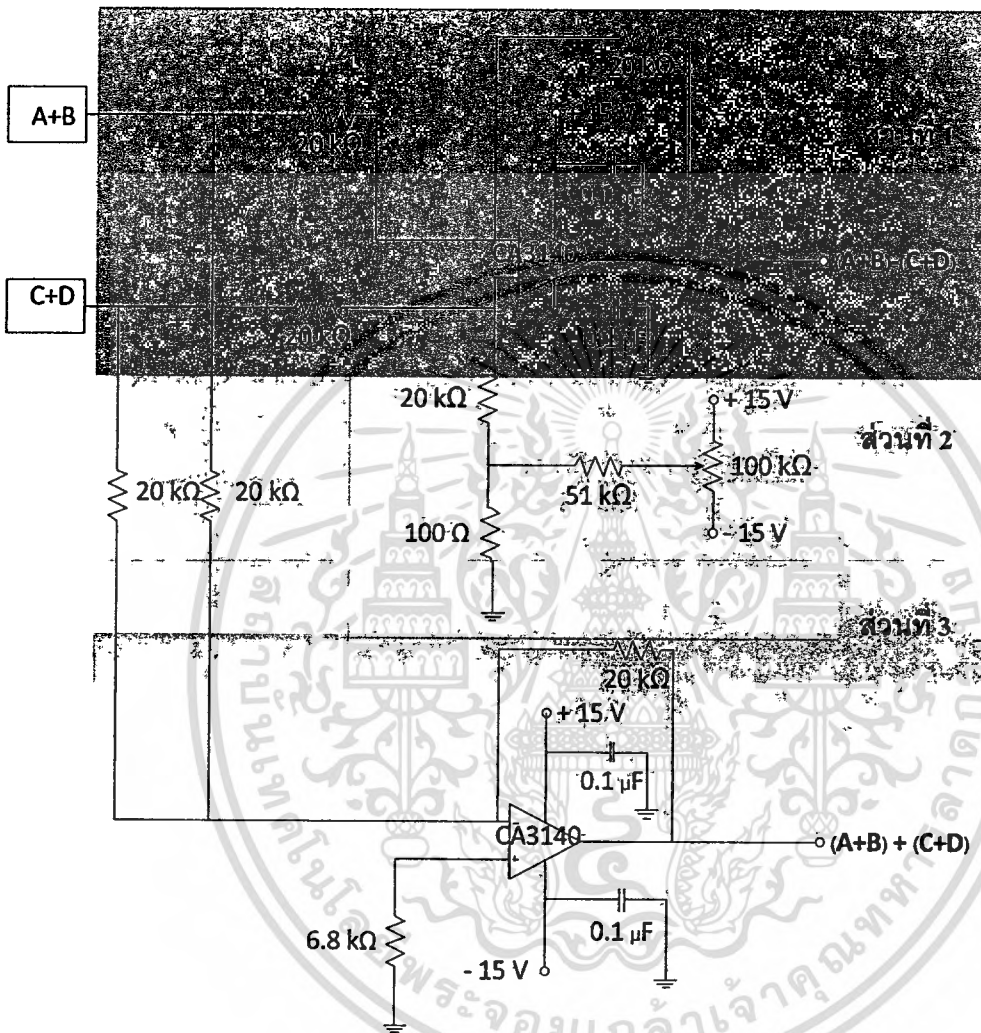
C และ D



รูปที่ 3.9: แผนผังแสดงวงจรรวมแรงดันเอาต์พุตระหว่าง ( $V_A + V_B$ ) และ ( $V_C + V_D$ )



รูปที่ 3.9 (ต่อ): แผนผังแสดงวงจรรวมแรงดันเอาต์พุตระหว่าง  $(V_a + V_b)$  และ  $(V_c + V_d)$



รูปที่ 3.10: แสดงวงจรบวกสัญญาณระหว่าง  $[V_{(A+B)} + V_{(C+D)}]$  และวงจรลบสัญญาณ  $[V_{(A+B)} - V_{(C+D)}]$

### หลักการการทำงานของวงจรเซนเซอร์แบบ PSD ตามรูปที่ 3.10

ส่วนที่ 1 เป็นวงจรลบศักร์ (differential amplifier) ซึ่งทำหน้าที่วัดความแตกต่างของสัญญาณอินพุตระหว่าง  $V_{(A+B)}$  และ  $V_{(C+D)}$  ซึ่งทำหน้าที่บอกตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนเซนเซอร์ PSD ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุตแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{out} = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \right) \frac{R_4}{R_1} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (3.2)$$

สำหรับ  $R_1 = R_3$  และ  $R_2 = R_4$

$$V_{OUT} = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (3.3)$$

$R_1 // R_2$  และ  $R_3 // R_4$

โดยจากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นว่า เมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบบนตรงกึ่งกลางของเซนเซอร์แบบ PSD แรงดันไฟฟ้า  $V_{(A+B)}$  จะ เท่ากับ  $V_{(C+D)}$  ดังนั้นเอาต์พุตของวงจรจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อแสงเลเซอร์ไปตกกระทบบนเซนเซอร์แบบ PSD บริเวณ A และ B มากกว่า C และ D จะทำให้แรงดันเอาต์พุตของ  $V_{(A+B)}$  มากกว่า  $V_{(C+D)}$  ส่งผลให้เอาต์พุตของวงจรมีค่าเป็นลบ และเมื่อแสงเลเซอร์ไปตกกระทบบนเซนเซอร์แบบ PSD บริเวณ C และ D มากกว่า A และ B จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของ  $V_{(C+D)}$  มากกว่า  $V_{(A+B)}$  ส่งผลให้เอาต์พุตของวงจรมีค่าเป็นบวก โดยวงจรที่ออกแบบมีอัตราขยายประมาณ 1 เท่า

ส่วนที่ 2 ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 100 kΩ มีหน้าที่ปรับค่าออฟเซต (offset) เนื่องจากการทดลองทุกครั้งจะมีค่าแรงดันค้างอยู่ค่าหนึ่งที่เกิดจากอุปกรณ์การทดลอง ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ปรับค่าแรงดันนั้นที่ค้างอยู่ให้เป็นศูนย์หรือเข้าใกล้ศูนย์ เพื่อให้ค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงๆ มากที่สุด

ส่วนที่ 3 เป็นวงจรบวกศักร์ (summation amplifier) ซึ่งทำหน้าที่รวมสัญญาณอินพุตระหว่าง  $V_{(A+B)}$  และ  $V_{(C+D)}$  ซึ่งทำหน้าที่บอกตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนเซนเซอร์ PSD ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับแรงดันอินพุตแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

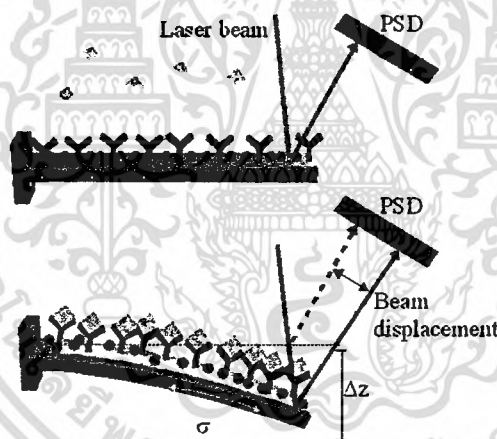
$$V_{out} = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \right) \frac{R_4}{R_1} V_2 + \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (3.4)$$

สำหรับ  $R_1 = R_3$  และ  $R_2 = R_4$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_2 + V_1) \quad (3.5)$$

$R_1 // R_3$  และ  $R_2 // R_4$

### ระบบวัดความโค้งของคานกลจิวด้วยเทคนิคทางแสง



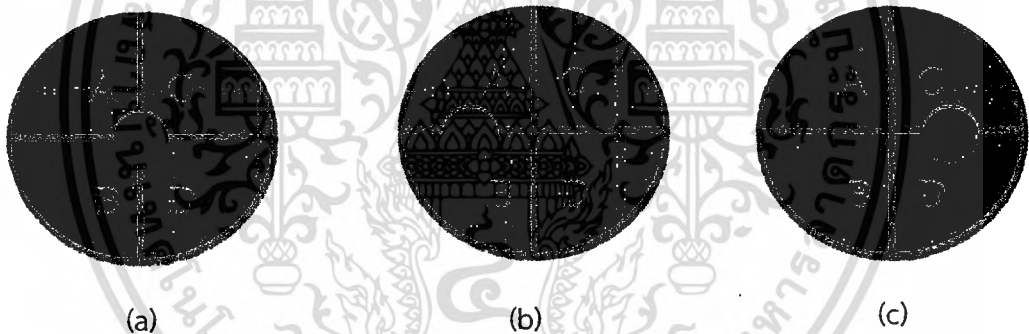
รูปที่ 3.11: การโค้งงอของคานกลจิวจะคำนวณหาความโค้งได้ตามสมการ  $\Delta z \approx 3 \frac{1-\nu}{Et^2} L^2 \Delta \sigma$

การตรวจวัดการโค้งงอโดยใช้เทคนิคทางลำแสงเป็นที่นิยมใช้ในการโค้งงอของเซนเซอร์คานกลจิว โดยมีหลักการทำงานเหมือนเครื่อง AFM เมื่อลำแสงเลเซอร์โฟกัสตกกระทบบนปลายเซนเซอร์คานกลจิวและเกิดการสะท้อนไปตกกระทบบนเซนเซอร์แบบ PSD ซึ่งประกอบไปด้วยสี่จุดภาคกำหนดให้เป็น A, B, C และ D ซึ่งเซนเซอร์แบบ PSD มีความไวในการตอบสนองต่อแสง ดังนั้นจึงนำมาใช้เพื่อวัดการเปลี่ยนตำแหน่งของแสงโดยใช่วงจรลบศักร์และวงจรวัดศักร์วัดค่าแรงดันเอาท์พุทที่เปลี่ยนไป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ที่มาตกกระทบบนเซนเซอร์แบบ PSD สามารถแยกได้เป็น 3 กรณีดังต่อไปนี้

**กรณีที่ 1** ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบริเวณตรงกลางของเซนเซอร์แบบ PSD ดังรูปที่ 3.12(a) ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากวงจรลบบั๊กย์เท่ากับศูนย์ ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากวงจรบวกลบบั๊กย์จะมีค่าสูงสุด

**กรณีที่ 2** ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบริเวณด้านซ้ายของเซนเซอร์แบบ PSD ดังรูปที่ 3.12(b) ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากวงจรลบบั๊กย์จะมีค่าเป็นลบ ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากวงจรบวกลบบั๊กย์จะมีค่าลดลงตามระยะที่ลำแสงเลเซอร์เปลี่ยนตำแหน่งไป เมื่อลำแสงเลเซอร์หลุดออกนอกบริเวณเซนเซอร์แบบ PSD ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จะเข้าใกล้ศูนย์

**กรณีที่ 3** ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบริเวณด้านขวาของเซนเซอร์แบบ PSD ดังรูปที่ 3.13 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากวงจรลบบั๊กย์จะมีค่าเป็นบวก ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากวงจรบวกลบบั๊กย์จะมีค่าลดลงและค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้เข้าใกล้ศูนย์ เมื่อลำแสงเลเซอร์หลุดออกจากเซนเซอร์แบบ PSD เช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.12: แสดงภาพลักษณะของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนเซนเซอร์แบบ PSD

- ภาพกรณีที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD บริเวณตรงกลาง
- ภาพกรณีที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD บริเวณด้านซ้าย
- ภาพกรณีที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD บริเวณตรงด้านขวา

### 3.3 ผลการศึกษาระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานากลจิวด้วยเทคนิคทางแสง เวอร์ชันที่ 1

ในส่วนนี้ เราจะทำการศึกษาคูสมบัติของวงจรถัดที่พัฒนาขึ้น และคุณสมบัติของระบบวัดทางแสงที่พัฒนาขึ้น โดยในการทดลองที่ 1 เราจะทำการศึกษาคูสมบัติของวงจรถัดเลเซอร์ไดโอดเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอินพุท กับ ความเข้มแสงของเลเซอร์ไดโอด (ซึ่งเป็นค่า relative กับแรงดันเอาต์พุทของโฟโตไดโอด) การทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาคุณสมบัติของ PSD เซนเซอร์ เมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบบที่ตำแหน่งต่างๆ ของ PSD เซนเซอร์ รวมถึงผลของขนาดของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบ การทดลองที่ 3 และ 4 เป็นการทดลองเพื่อทดสอบระบบวัดความโค้งงอที่พัฒนาขึ้นเมื่อนำมาใช้กับเซนเซอร์คานากลจิว โดยแบ่งเป็นส่วนการทดสอบเสถียรภาพการวัดความโค้งงอในตัวกลางอากาศและน้ำ และส่วนทดสอบเมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบบกับเซนเซอร์คานากลจิวที่มุมต่างๆกัน

#### การทดลองที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุทของโฟโตไดโอดกับกระแสของเลเซอร์ไดโอด

การทดลองนี้ศึกษาแรงดันเอาต์พุทของโฟโตไดโอดกับกระแสของเลเซอร์ไดโอดว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร จากทฤษฎีเมื่อเพิ่มกระแสของเลเซอร์ไดโอดจะทำให้แรงดันเอาต์พุทมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยหรือความเข้มแสงเลเซอร์เพิ่มขึ้นนั่นเอง

#### อุปกรณ์การทดลอง

- |   |        |
|---|--------|
| 1. วงจรถัดเลเซอร์ไดโอด                      | 1 วงจร |
| 2. เซนเซอร์แบบ PSD พร้อมวงจรถัด             | 1 วงจร |
| 3. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (digital multimeter) | 2 ตัว  |

#### ขั้นตอนการทดลอง

- กำหนดให้วงจรถัดควบคุมกระแสเลเซอร์ไดโอดวางห่างจากเซนเซอร์แบบ PSD พร้อมวงจรถัด ประมาณ 12 cm
- ให้กระแสเลเซอร์ไดโอดเริ่มต้นที่ 10 mA แล้วปรับให้ลำแสงเลเซอร์ไดโอดตกกระทบบที่บริเวณตรงกลางของเซนเซอร์แบบ PSD แล้วบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุทจากวงจรถัดที่อ่านค่าโดยดิจิตอลมัลติมิเตอร์
- เพิ่มค่ากระแสเลเซอร์ไดโอดขึ้นครั้งละ 2 mA จาก 10 mA-50 mA พร้อมบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุท
- เมื่อเพิ่มกระแสเลเซอร์ไดโอดถึง 50 mA แล้วจากนั้นก็ลดค่ากระแสเลเซอร์ไดโอดลงครั้งละ 2mA เช่นเดียวกันจนถึง 10 mA แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

5. นำค่าแรงดันเอาต์พุตและค่ากระแสเลเซอร์ไดโอดมาเขียนกราฟ
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง
7. สรุปผลการทดลอง

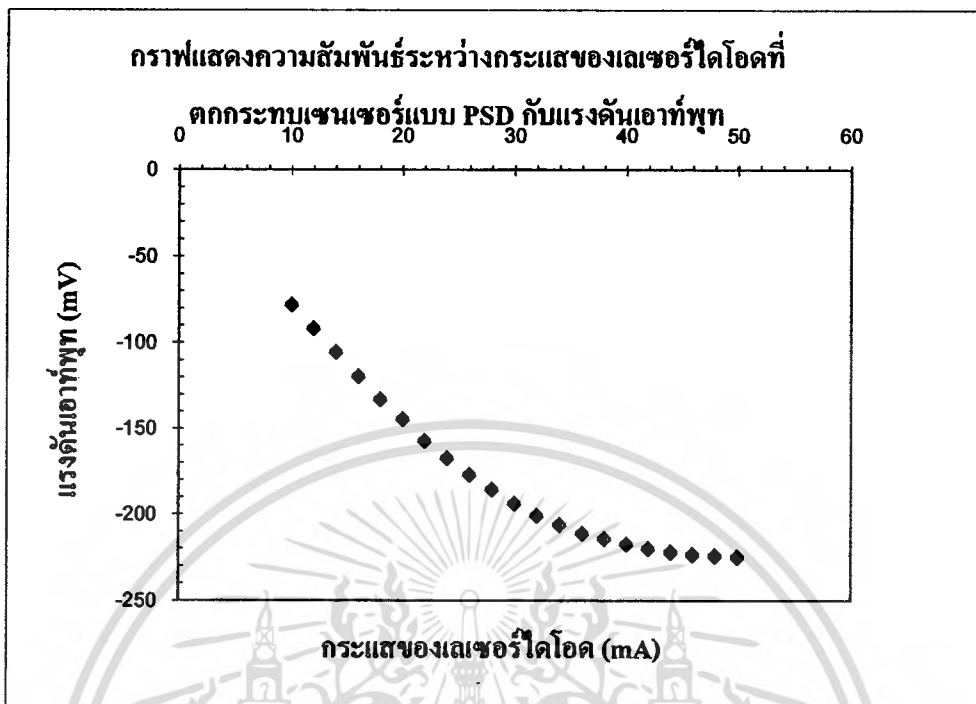
#### ผลการทดลอง

วงจรขั้วเลเซอร์ไดโอดที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดและควบคุมความเข้มของลำแสงเลเซอร์วัดแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์แบบ PSD ที่สัมพันธ์กับกระแสของเลเซอร์ไดโอด ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์แบบ PSD กับเลเซอร์ 12 cm

ตารางที่ 3.1 แสดงค่ากระแสของเลเซอร์ไดโอดกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากรบวงจากการทดลองครั้งที่ 1



กระแสของเลเซอร์ไดโอด (mA)	แรงดันเอาต์พุตจากวงจรบวกศักย์ (mV)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10	-78.88	-78.89	-78.885
12	-93.12	-92.25	-92.685
14	-106.56	-105.72	-106.14
16	-121.43	-119.3	-120.365
18	-134.16	-132.91	-133.535
20	-146.32	-143.78	-145.05
22	-159.54	-155.76	-157.65
24	-170.65	-165.29	-167.97
26	-180.32	-174.9	-177.61
28	-188.93	-183.72	-186.325
30	-197.03	-191.54	-194.285
32	-204.52	-197.98	-201.25
34	-210.01	-202.84	-206.425
36	-215.05	-208.23	-211.64
38	-218.7	-211.2	-214.95
40	-221.71	-213.91	-217.81
42	-224.31	-216.44	-220.375
44	-226.62	-218.31	-222.465
46	-227.56	-220.25	-223.905
48	-226.51	-222.28	-224.395
50	-226.31	-224.45	-225.38

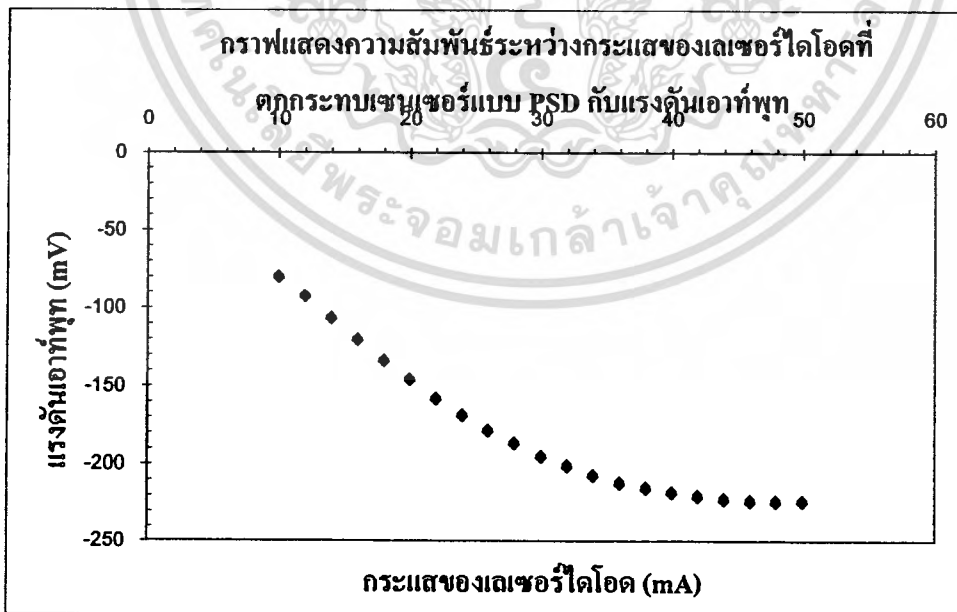


รูปที่ 3.13: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของเลเซอร์ไดโอดที่ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุตทดลองครั้งที่ 1 และมีสมการเส้นตรง  $y = -3.6433x - 68.180$

ตารางที่ 3.2 แสดงค่ากระแสของเลเซอร์ไดโอดกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จงบรวกจากการทดลองครั้งที่ 2

กระแสของเลเซอร์ไดโอด (mA)	แรงดันเอาต์พุตจากจงบรวกครั้ง (mV)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
10	-83.04	-78.55	-80.795
12	-93.93	-92.47	-93.2
14	-108	-106.33	-107.165
16	-121.79	-119.82	-120.805
18	-135.45	-132.74	-134.095
20	-148.01	-144.8	-146.405
22	-160.02	-156.88	-158.45
24	-171.01	-166.82	-168.915
26	-181.09	-176.56	-178.825

กระแสของเลเซอร์ไดโอด (mA)	แรงดันเอาต์พุตจากวงจรบวกศักย์ (mV)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
28	-190.25	-184.15	-187.2
30	-198.47	-192.87	-195.67
32	-205.43	-198.23	-201.83
34	-211.65	-203.85	-207.75
36	-215.55	-209.43	-212.49
38	-218.73	-211.85	-215.29
40	-222.34	-214.58	-218.46
42	-224.46	-216.95	-220.705
44	-226.02	-219	-222.51
46	-227.23	-220.48	-223.855
48	-226.19	-221.28	-223.735
50	-226.43	-222.11	-224.27



รูปที่ 3.14: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของเลเซอร์ไดโอดที่ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD

กับแรงดันเอาต์พุตทดลองครั้งที่ 2 และมีสมการเส้นตรง  $y = -3.613x - 69.7913$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มกระแสเลเซอร์ไดโอดแรงดันเอาต์พุตก็เพิ่มขึ้นซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นและมีความสอดคล้องกับทฤษฎี พบว่าเมื่อเพิ่มค่ากระแสเลเซอร์ไดโอดมากกว่า 50 mA แรงดันเอาต์พุตค่อนข้างมีค่าคงที่หรือความเข้มแสงมีค่าคงที่ ฉะนั้นแม้เพิ่มค่ากระแสเลเซอร์ไดโอดให้มากขึ้นเรื่อยๆ ก็ไม่ส่งผลต่อความเข้มแสงของเลเซอร์ไดโอด

## การทดลองที่ 2 ทดสอบคุณสมบัติเซนเซอร์แบบ PSD

ในส่วนนี้ เป็นการทดสอบเซนเซอร์แบบ PSD โดยมีเงื่อนไขหลัก 2 ข้อดังนี้

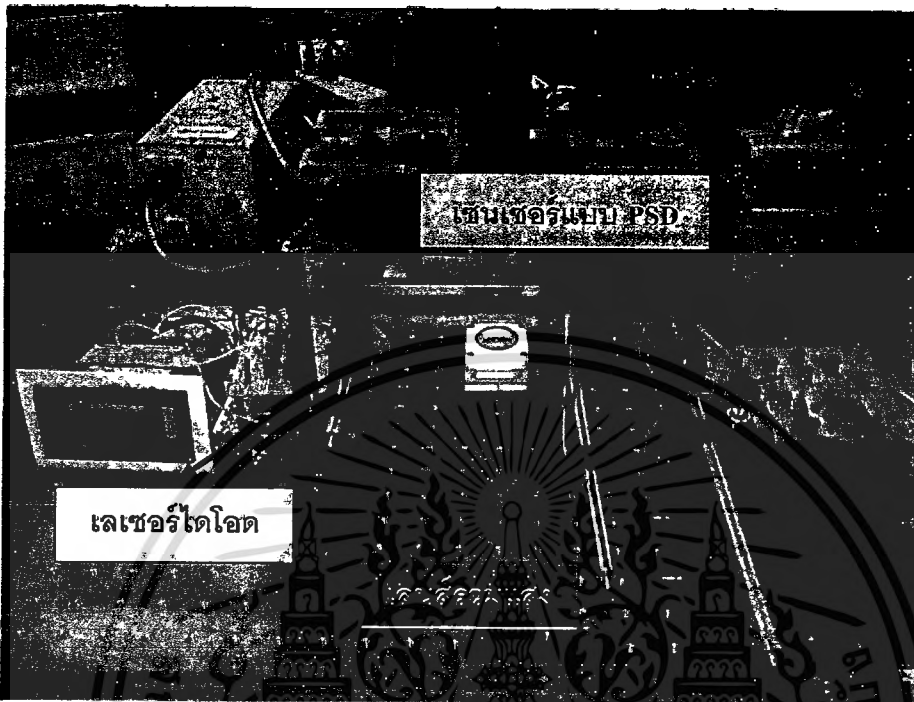
- กรณีที่ 1 ลำแสงเลเซอร์ผ่านเลนส์รวมแสงแล้วเข้าสู่เซนเซอร์แบบ PSD (ขนาดลำแสงเลเซอร์มีขนาดเล็ก)
- กรณีที่ 2 ให้ลำแสงเลเซอร์เข้าสู่เซนเซอร์แบบ PSD โดยตรง (ขนาดของลำแสงเลเซอร์มีขนาดปกติ)

จากทั้งสองเงื่อนไขนี้ทำการเปลี่ยนค่ากระแสของเลเซอร์ที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงเป็น 10 mA, 25 mA และ 50 mA แล้ววัดค่าแรงดันเอาต์พุตที่ให้ออกมาที่แต่ละค่ากระแส จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับเพื่อต้องการที่จะตรวจสอบว่าความเข้มแสงที่เปลี่ยนไป เมื่อเปลี่ยนค่ากระแสจะมีผลต่อการทดลองหรือไม่

## อุปกรณ์การทดลอง

- |                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| 1. วงจรขับเลเซอร์ไดโอด             | 1 วงจร |
| 2. เซนเซอร์แบบ PSD พร้อมวงจรการวัด | 1 วงจร |
| 3. แกนเลื่อนระนาบ X-Y              | 1 ชุด  |
| 4. เลนส์รวมแสง                     | 1 อัน  |
| 5. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์             | 2 ตัว  |

กรณีศึกษา 1 มีเลนส์รวมแสง



รูปที่ 3.15: อุปกรณ์และการตั้งค่าการทดลอง

ขั้นตอนการทดลอง

1. ตั้งค่าอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลองข้างต้น
2. จ่ายกระแส 10 mA ให้กับเลเซอร์
3. ให้ลำแสงเลเซอร์ไปตรงกระทบบเซนเซอร์แบบ PSD แล้วหมุนแกนเลื่อนแกนระนาบ X-Y เพื่อหาค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากวงจรบวกศักย์ให้มีค่าสูงสุดคือ  $V_{(A+B)} + V_{(C+D)} = V_{\text{maximum}}$  (ลำแสงเลเซอร์น่าจะตกกระทบบริเวณตรงกลางของเซนเซอร์ PSD)
4. เมื่อได้ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุด  $V_{\text{maximum}}$  จากวงจรบวกศักย์ แล้วก็จะได้ผลต่างของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรลบศักย์จะมีค่าใกล้เคียงศูนย์คือ  $V_{(A+B)} + V_{(C+D)} = 0$  จึงบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตคู่แรก
5. จากนั้นเลื่อนเซนเซอร์แบบ PSD โดยแกนเลื่อนแกนระนาบ X-Y ไปทางด้านจุดภาค A, จุดภาค B (ด้านซ้าย) ครึ่งละ 0.2 mm แล้วบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตจนกว่าลำแสงเลเซอร์จะหลุดออกนอกเซนเซอร์แบบ PSD แล้วจึงเลื่อนเซนเซอร์แบบ PSD กลับมาที่ตำแหน่งแรก (วงจรวัดบวกศักย์มีค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุด)

6. แล้วเลื่อนเซนเซอร์แบบ PSD โดยแกนเลื่อนระนาบ X-Y ไปทางด้านจุดภาค C จุดภาค D (ด้านขวา) ครึ่งละ 0.2 mm แล้วบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตจนกว่าลำแสงเลเซอร์จะหลุดออกนอกเซนเซอร์แบบ PSD แล้วจึงเลื่อนเซนเซอร์แบบ PSD กลับมาที่ตำแหน่งแรก (ที่วงจรวกศักร์ยมีค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุด)
7. เมื่อได้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่บันทึกจากข้อ 3 - 5 แล้วนำแต่ละค่าแรงดันเอาต์พุตมาหาค่าเฉลี่ย แล้ววาดกราฟโดยที่แกน X เป็นค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากวงจรวกศักร์ยและบวกรวม ส่วนแกน Y เป็นระยะของการแกนเลื่อน (ครึ่งละ 0.2 mm)
8. เปลี่ยนกระแสที่ให้กับวงจรควบคุมกระแสพร้อมเลเซอร์เป็น 25 mA และ 50 mA แล้วทำการทดลองตามข้อ 3 - 7
9. วิเคราะห์ผลการทดลอง
10. สรุปผลการทดลอง

#### ผลการทดลอง

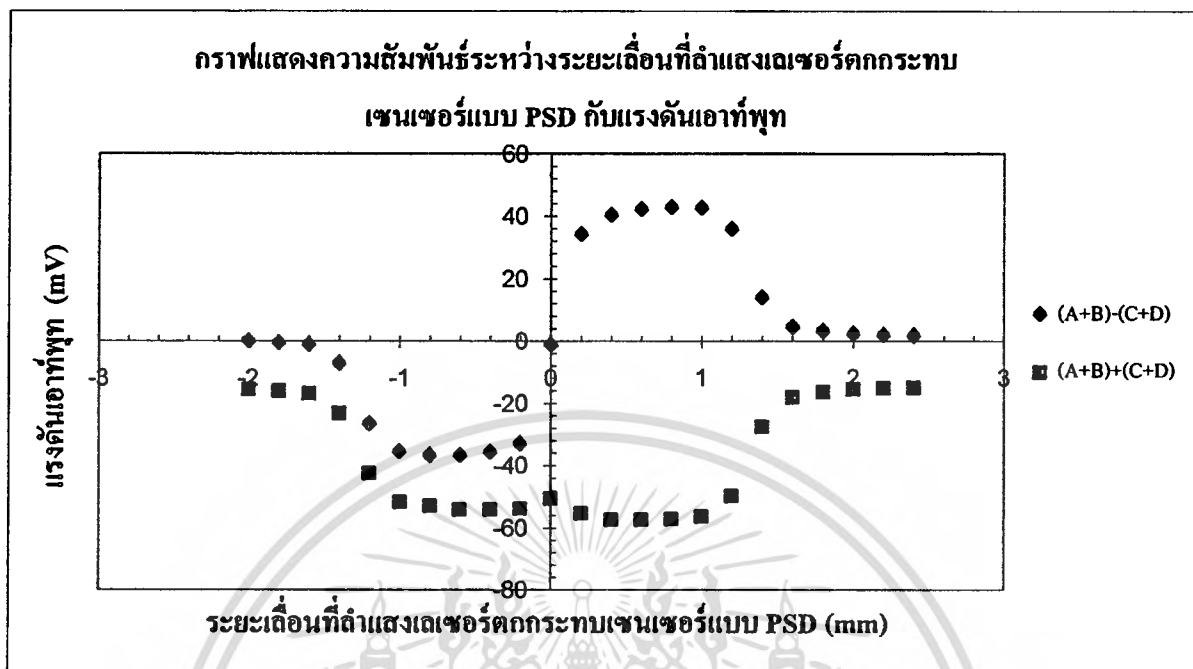
การทดลองนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต ( $V_{out}$ ) ของโฟโตไดโอด (Photodiode) กับตำแหน่งที่ลำแสงเลเซอร์ไดโอดตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กรณีใส่เลนส์รวมแสง

#### -เงื่อนไขการทดลองที่ 1

ระยะห่างระหว่างเลเซอร์กับเลนส์รวมแสง	11.5 cm
ระยะห่างระหว่างเลนส์รวมแสงกับเซนเซอร์แบบ PSD	5.5 cm
กระแสของเลเซอร์ไดโอด	10 mA

ตารางที่ 3.3 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยให้กระแสของเลเซอร์ไดโอดคงที่ที่ 10 mA

ระยะเลื่อนระนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย
0	-1.04	-1.82	-1.43	-50.45	-50.88	-50.665
-0.2	-32.86	-33.43	-33.145	-53.68	-54.2	-53.94
-0.4	-35.76	-36.18	-35.97	-53.97	-54.4	-54.185
-0.6	-36.71	-37.24	-36.975	-53.68	-54.79	-54.235
-0.8	-36.5	-37.1	-36.8	-52.7	-53.43	-53.065
-1	-35.63	-36.14	-35.885	-51.57	-52.05	-51.81
-1.2	-26.83	-26.53	-26.68	-42.71	-42.3	-42.505
-1.4	-7.43	-7.3	-7.365	-23	-23.22	-23.11
-1.6	-1.35	-1.28	-1.315	-16.81	-16.74	-16.775
-1.8	-0.79	-0.74	-0.765	-16.02	-16.03	-16.025
-2	-0.2	-0.18	-0.19	-15.48	-15.5	-15.49
0.2	34.01	34.14	34.075	-55.19	-55.58	-55.385
0.4	39.92	40.5	40.21	-57.24	-57.85	-57.545
0.6	41.88	42.43	42.155	-57.13	-57.74	-57.435
0.8	42.47	43.14	42.805	-56.93	-57.44	-57.185
1	42.12	42.79	42.455	-56.1	-56.46	-56.28
1.2	35.68	35.8	35.74	-49.68	-49.5	-49.59
1.4	13.8	14.06	13.93	-27.21	-27.65	-27.43
1.6	4.38	4.37	4.375	-17.91	-17.82	-17.865
1.8	3.01	3.02	3.015	-16.18	-16.16	-16.17
2	2.16	2.18	2.17	-15.14	-15.37	-15.255
2.2	1.84	1.83	1.835	-14.92	-14.94	-14.93
2.4	1.6	1.6	1.6	-14.72	-14.72	-14.72



รูปที่ 3.16: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีใส่เลนส์รวมแสง

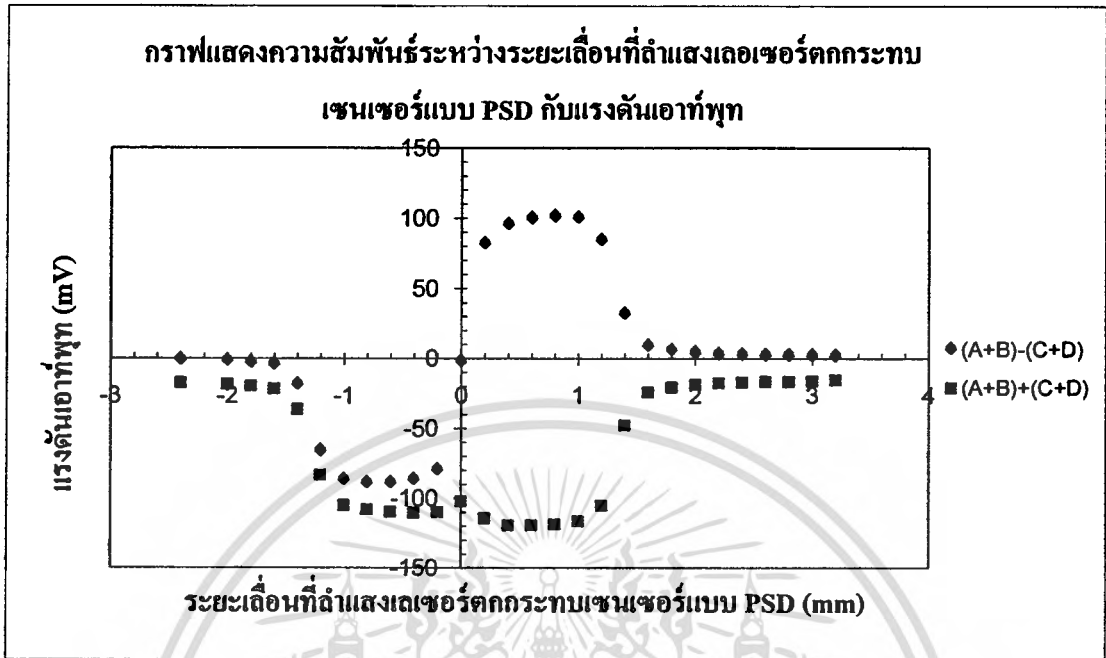
ตารางที่ 3.4 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยให้กระแสของเลเซอร์ไดโอดคงที่ที่ 25 mA

ระยะเลื่อนระนาบ X_Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย
0	-3.14	-1.21	-2.175	-102.34	-102.35	-102.345
-0.2	-80.71	-79.16	-79.935	-110.48	-109.53	-110.005
-0.4	-87.23	-86.19	-86.71	-111.02	-110	-110.51
-0.6	-89.7	-88.52	-89.11	-110.38	-109.22	-109.8
-0.8	-89.56	-88.2	-88.88	-108.7	-107.47	-108.085
-1	-87.63	-86.23	-86.93	-105.84	-104.54	-105.19
-1.2	-66.38	-65.15	-65.765	-84.22	-82.58	-83.4
-1.4	-18.26	-18.68	-18.47	-36.08	-36.62	-36.35
-1.6	-4.4	-4.28	-4.34	-21.47	-21.55	-21.51
-1.8	-3.05	-2.96	-3.005	-19.71	-19.83	-19.77

โครงการการพัฒนาตัวตรวจจับไอออนของโลหะด้วยนาโนเซนเซอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการแพทย์

โดย บดินทร์ คำรงค์ดีและคณะ

ระยะเลื่อนรนาบ X_Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย
-2	-1.75	-1.59	-1.67	-18.39	-18.27	-18.33
-2.4	-0.92	-0.84	-0.88	-17.32	-17.34	-17.33
0.2	81.54	82.36	81.95	-114.24	-114.71	-114.475
0.4	95.88	95.82	95.85	-119.53	-119.67	-119.6
0.6	100.17	100.12	100.145	-119.34	-119.37	-119.355
0.8	101.56	101.54	101.55	-118.6	-118.52	-118.56
1	100.7	100.56	100.63	-116.67	-116.53	-116.6
1.2	84.39	85.33	84.86	-99.91	-110.49	-105.2
1.4	31.83	32.38	32.105	-46.85	-47.86	-47.355
1.6	9.08	9.03	9.055	-24.03	-23.84	-23.935
1.8	5.92	5.93	5.925	-20.54	-20.42	-20.48
2	3.99	3.95	3.97	-18.4	-18.35	-18.375
2.2	3.13	3.14	3.135	-17.33	-17.37	-17.35
2.4	2.68	2.66	2.67	-16.86	-16.76	-16.81
2.6	2.32	2.34	2.33	-16.33	-16.29	-16.31
2.8	2.14	2.18	2.16	-16.3	-16.1	-16.2
3	2.07	2.09	2.08	-15.81	-15.84	-15.825
3.2	1.64	1.64	1.64	-15.05	-15.05	-15.05

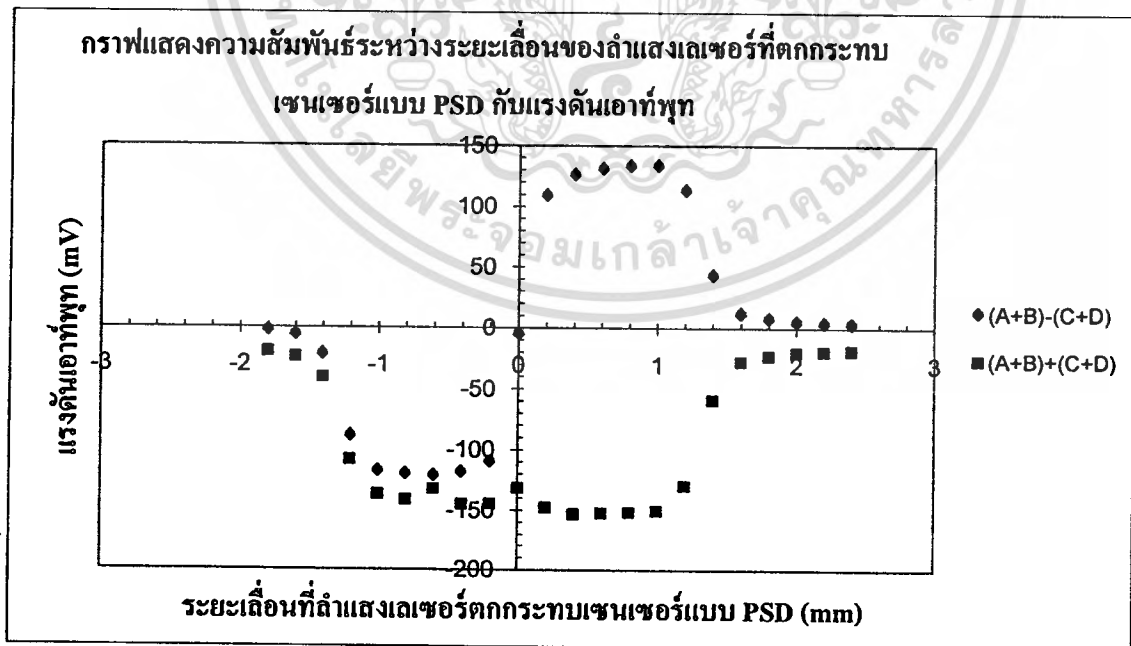


รูปที่ 3.17: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีใส่เลนส์รวมแสง

ตารางที่ 3.5 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยให้กระแสของเลเซอร์ไดโอดคงที่ที่ 50 mA

ระยะเลื่อนระนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย
0	-6.92	-3.22	-5.07	-131.58	-131.65	-131.615
-0.2	-110.9	-109.42	-110.16	-145.28	-144.21	-144.745
-0.4	-119.32	-118.47	-118.895	-145.85	-144.66	-145.255
-0.6	-121.34	-121.57	-121.455	-143.58	-121.52	-132.55
-0.8	-120.6	-121.06	-120.83	-141.79	-141.54	-141.665
-1	-117.8	-118.31	-118.055	-136.94	-137.48	-137.21
-1.2	-89.76	-88.85	-89.305	-109.13	-107.95	-108.54
-1.4	-23.37	-20.98	-22.175	-42.13	-39.49	-40.81
-1.6	-6.16	-6.23	-6.195	-23.98	-24	-23.99
-1.8	-2.75	-2.62	-2.685	-19.89	-19.81	-19.85

ระยะเลื่อนระนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย
0.2	108.55	108.85	108.7	-147.21	-147.86	-147.535
0.4	125.5	125.42	125.46	-153.21	-152.8	-153.005
0.6	130.02	131.14	130.58	-151.44	-152.55	-151.995
0.8	132.3	133.3	132.8	-151.06	-151.81	-151.435
1	133.58	132.48	133.03	-150.67	-149.57	-150.12
1.2	114.21	112.15	113.18	-130.45	-128.88	-129.665
1.4	42.85	42.4	42.625	-59.08	-58.1	-58.59
1.6	11.6	11.71	11.655	-27.33	-27.18	-27.255
1.8	7.57	7.47	7.52	-22.77	-22.73	-22.75
2	4.89	4.84	4.865	-19.87	-19.83	-19.85
2.2	3.79	3.77	3.78	-18.68	-18.61	-18.645
2.4	3.18	3.16	3.17	-17.86	-17.77	-17.815



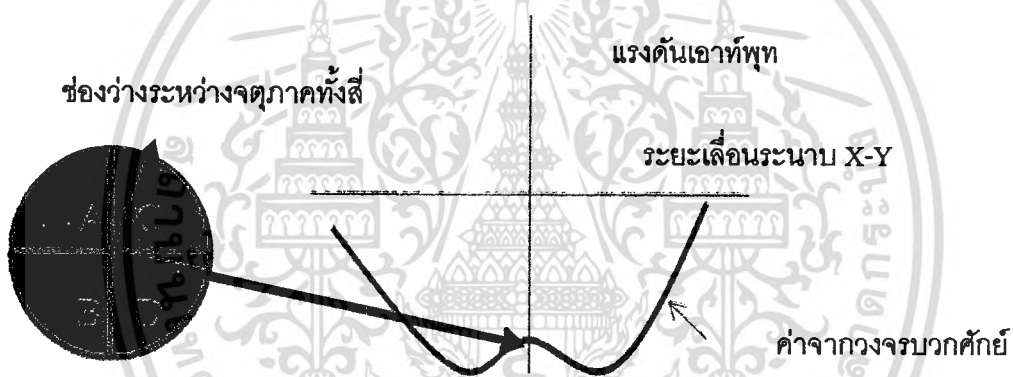
รูปที่ 3.18: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD

กับแรงดันเอาต์พุต กรณีใส่เลนส์รวมแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**วิเคราะห์ผลการทดลองกรณีเลนส์รวมแสงห่างจากเซนเซอร์แบบ PSD 5.5 cm**

กรณีใส่เลนส์รวมแสงทำให้ลำแสงเลเซอร์มีขนาดเล็กหรือเปรียบเสมือนจุดเล็กๆ จึงทำให้ยากต่อการทดลองและทำให้ผลการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนมาก เพราะเซนเซอร์แบบ PSD จะมีช่องว่างระหว่างจุดภาคทั้งสี่ (ดังรูปที่ 3.19) เมื่อลำแสงเลเซอร์ไปตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD แสงบางส่วนหรือทั้งหมดก็จะตกไปบริเวณช่องว่างระหว่างแต่ละจุดภาคซึ่งช่องว่างนี้ไม่สามารถเปลี่ยนแสงให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้ เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบที่ตรงกลางของเซนเซอร์แบบ PSD อาจจะทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรบวกศักย์ไม่ใช่ค่าสูงสุด เพราะบริเวณตรงกลางของเซนเซอร์ PSD มีพื้นที่ว่างมากที่สุด ดังนั้นลำแสงเลเซอร์ที่เหลืออีกจะน้อยทำให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตลดลงจากค่าสูงสุดเล็กน้อยกราฟที่ได้จะมีลักษณะบุ่มที่ปลายเล็กน้อย



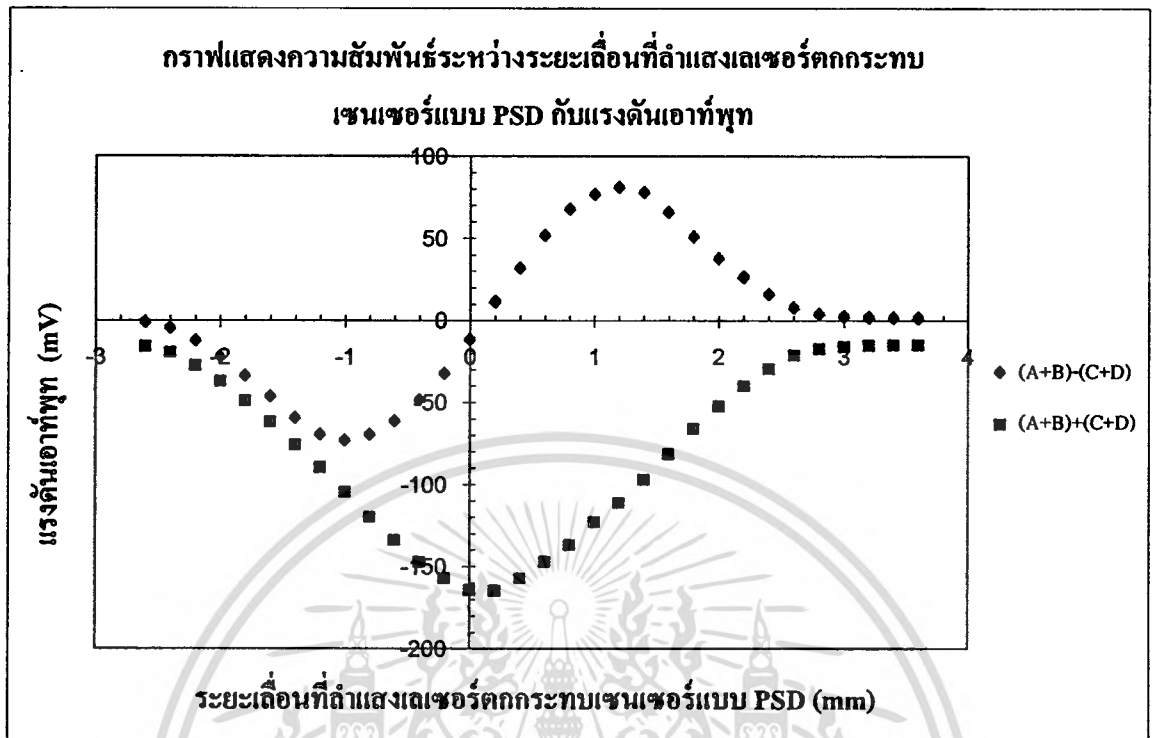
รูปที่ 3.19: ภาพแสดงลักษณะกรณีที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบริเวณช่องว่างระหว่าง 4 จุดภาค

**- เงื่อนไขการทดลองที่ 2**

ระยะห่างระหว่างเลเซอร์กับเลนส์รวมแสง	11.5 cm
ระยะห่างระหว่างเลนส์รวมแสงกับเซนเซอร์แบบ PSD	6.5 cm
กระแสของเลเซอร์ไดโอด	10 mA

ตารางที่ 3.6 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยให้กระแสของเลขเซอรีโคคคองที่ที่ 10 mA

ระยะเลื่อนระนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)
0	5.68	-55.62
-0.2	-11.09	-55.66
-0.4	-26.81	-56
-0.6	-37.08	-56.05
-0.8	-38.61	-55.75
-1	-33.94	-50.32
-1.2	-26.98	-43.09
-1.4	-18.98	-34.76
-1.6	-10.48	-26.09
-1.8	-4.07	-19.48
0.2	21.59	-56.02
0.4	35.36	-56.21
0.6	41.36	-57.04
0.8	39.01	-53.64
1	32.55	-46.83
1.2	24.68	-38.72
1.4	16.08	-29.89
1.6	8.74	-22.42
1.8	3.28	-16.84
2	2.01	-15.55
2.2	1.66	-15.14
2.4	1.42	-14.89



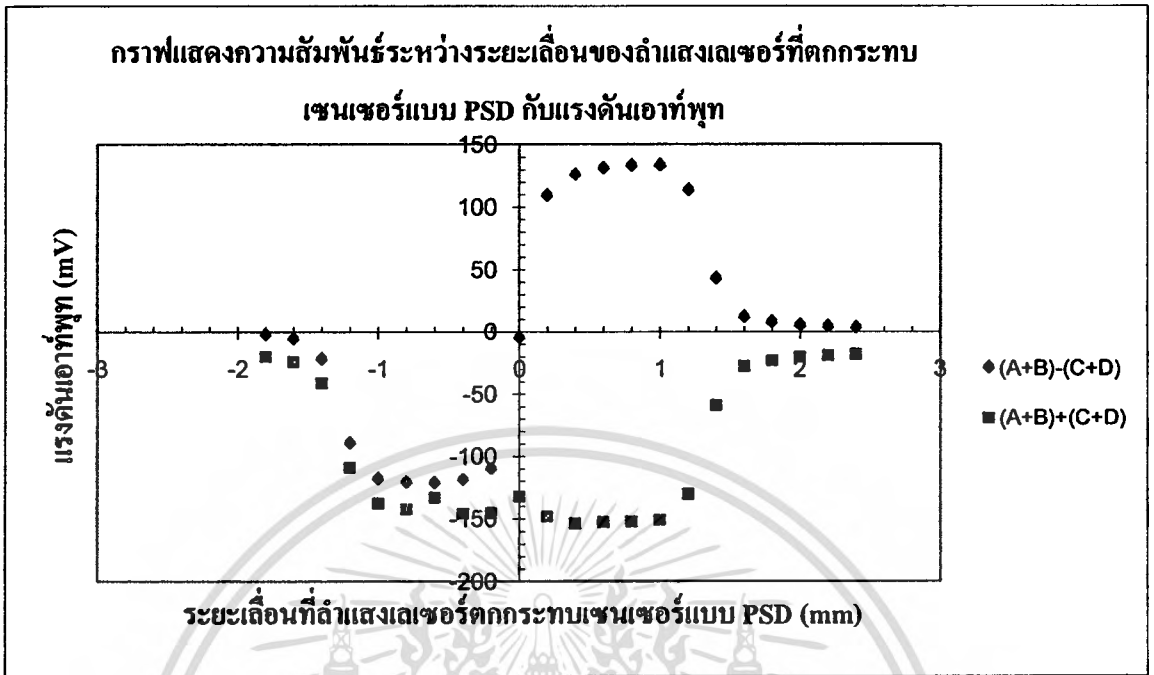
รูปที่ 3.20: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีใส่เลนส์รวมแสง

ตารางที่ 3.7 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยให้กระแสของเลเซอร์ไดโอดคงที่ที่ 25 mA

ระยะเลื่อนระนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)
0	-24.69	-109.65
-0.2	-60.2	-108.94
-0.4	-91.04	-123.94
-0.6	-96.11	-117.22
-0.8	-85.26	-104.93
-1	-68.43	-87.18

โครงการการพัฒนาตัวตรวจจับไอออนของโลหะด้วยนาโนเซนเซอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการแพทย์  
โดย บดินทร์ ดำรงศักดิ์และคณะ

ระยะเลื่อนรนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)
-1.2	-49.24	-67.04
-1.4	-28.64	-46.13
0.2	14.62	-112.65
0.4	50.48	-110.79
0.6	80.6	-111.49
0.8	91.55	-111.38
1	86.47	-103.36
1.2	62.48	-79.44
1.4	43.51	-59.17
1.6	25.83	-41.38
1.8	10.34	-26.28
2	4.23	-19.28
2.2	2.6	-17.7

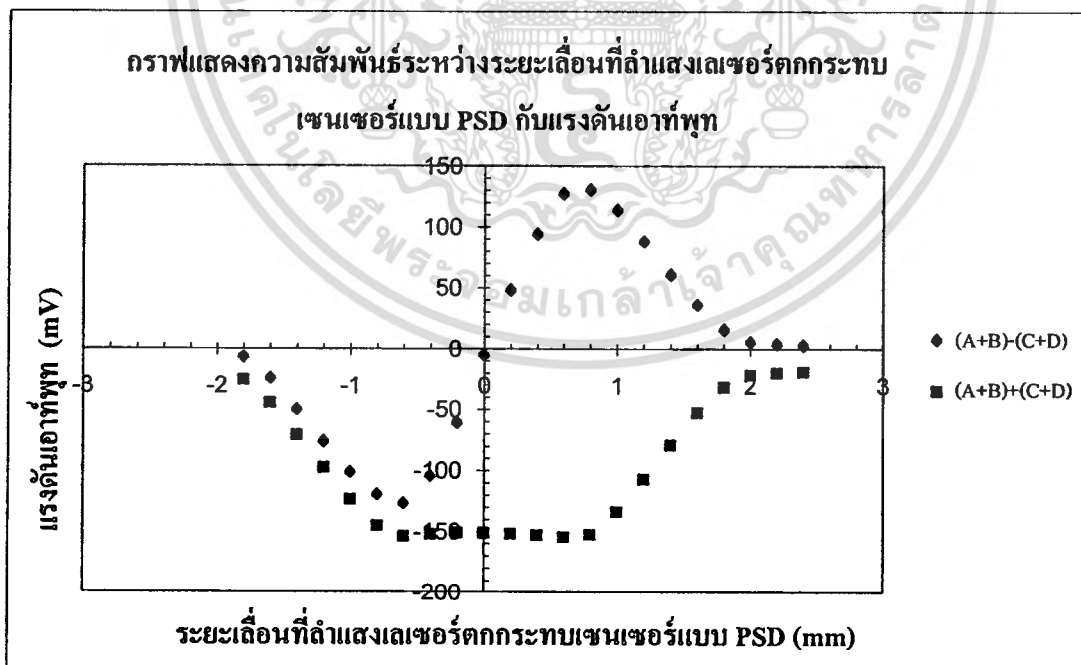


รูปที่ 3.21: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีใส่เลนส์รวมแสง

ตารางที่ 3.8 แสดงผลที่ได้จากการทดลองโดยให้กระแสของเลเซอร์ไดโอดคงที่ที่ 50 mA

ระยะเลื่อนระนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)
0	-5.93	-150.71
-0.2	-61.52	-150.43
-0.4	-104.87	-151.64
-0.6	-127.58	-153.5
-0.8	-120.28	-144.73
-1	-101.61	-123.12
-1.2	-76.34	-97.34
-1.4	-50.85	-70.76
-1.6	-25.01	-44.3
-1.8	-7.46	-25.7

ระยะเลื่อนรนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)
0.2	47.48	-151.28
0.4	93.34	-152.29
0.6	126.61	-153.92
0.8	129.69	-151.86
1	113.2	-133.26
1.2	87.7	-106.26
1.4	60.5	-78.61
1.6	35.47	-52.09
1.8	14.99	-31.24
2	5.02	-21.14
2.2	3.38	-19.35
2.4	2.43	-18.43



รูปที่ 3.22: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีใส่เลนส์รวมแสง

## กรณีไม่มีเลนส์รวมแสง

### -เงื่อนไขการทดลอง

ระยะห่างระหว่างเลเซอร์กับเซนเซอร์แบบ PSD

17 cm

### ขั้นตอนการทดลอง

1. ตั้งค่าอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลองข้างต้น
2. จ่ายกระแส 10 mA ให้กับเลเซอร์
3. ให้นำแสงเลเซอร์ไปตรงกระทบบเซนเซอร์แบบ PSD แล้วหมุนแกนเลื่อนแกนระนาบ X-Y เพื่อหาค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากวงจรบวกศักย์ให้มามีค่าสูงสุดคือ  $V_{(A+B)} + V_{(C+D)} = V_{maximum}$  (ลำแสงเลเซอร์น่าจะตกกระทบบบริเวณตรงกลางของเซนเซอร์ PSD)
4. เมื่อได้ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุด  $V_{maximum}$  จากวงจรบวกศักย์ แล้วก็จะได้ผลต่างของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากวงจรลบศักย์จะมีค่าใกล้เคียงศูนย์คือ  $V_{(A+B)} + V_{(C+D)} = 0$  จึงบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตคู่แรก
5. จากนั้นเลื่อนเซนเซอร์แบบ PSD โดยแกนเลื่อนแกนระนาบ X-Y ไปทางด้านจุดภาค A, จุดภาค B (ด้านซ้าย) ครึ่งละ 0.2 mm แล้วบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตจนกว่าลำแสงเลเซอร์จะหลุดออกนอกเซนเซอร์แบบ PSD แล้วจึงเลื่อนเซนเซอร์แบบ PSD กลับมาที่ตำแหน่งแรก (วงจรวัดบวกศักย์มีค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุด)
6. แล้วเลื่อนเซนเซอร์แบบ PSD โดยแกนเลื่อนระนาบ X-Y ไปทางด้านจุดภาค C จุดภาค D (ด้านขวา) ครึ่งละ 0.2 mm แล้วบันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตจนกว่าลำแสงเลเซอร์จะหลุดออกนอกเซนเซอร์แบบ PSD แล้วจึงเลื่อนเซนเซอร์แบบ PSD กลับมาที่ตำแหน่งแรก (ที่วงจรวัดบวกศักย์มีค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุด)
7. เมื่อได้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่บันทึกจากข้อ 3 - 5 แล้วนำแต่ละค่าแรงดันเอาต์พุตมาหาค่าเฉลี่ย แล้ววาดกราฟโดยที่แกน X เป็นค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากวงจรวัดบวกศักย์และบวกรวม ส่วนแกน Y เป็นระยะของการแกนเลื่อน (ครึ่งละ 0.2 mm)
8. เปลี่ยนกระแสที่ให้กับวงจรควบคุมกระแสพร้อมเลเซอร์เป็น 25 mA และ 50 mA แล้วทำการทดลองตามข้อ 3 - 7
9. วิเคราะห์ผลการทดลอง

## 10. สรุปผลการทดลอง

### ผลการทดลอง

การทดลองนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของโฟโตไดโอดกับตำแหน่งที่แสงของเลเซอร์ไดโอดตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD พิจารณาในกรณีไม่ใส่เลนส์รวมแสง โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้

ระยะห่างระหว่างเลเซอร์ไดโอดกับเซนเซอร์แบบ PSD

17 cm

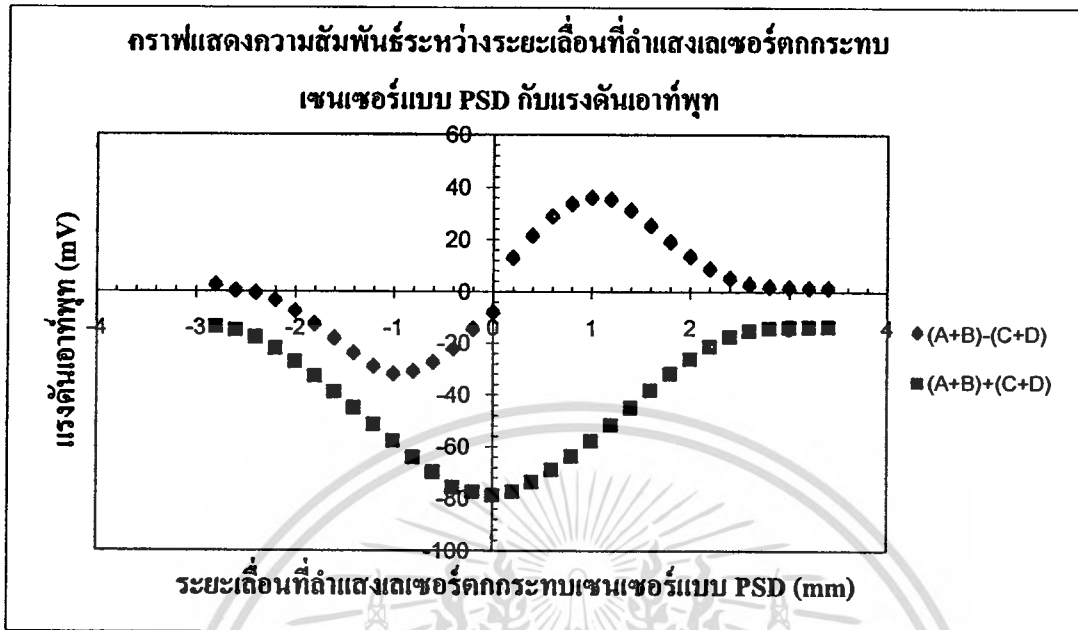
กระแสของเลเซอร์ไดโอด

10.4 mA

ตารางที่ 3.9 ผลที่ได้จากการทดลองที่กระแสของเลเซอร์ไดโอด 10.4 mA

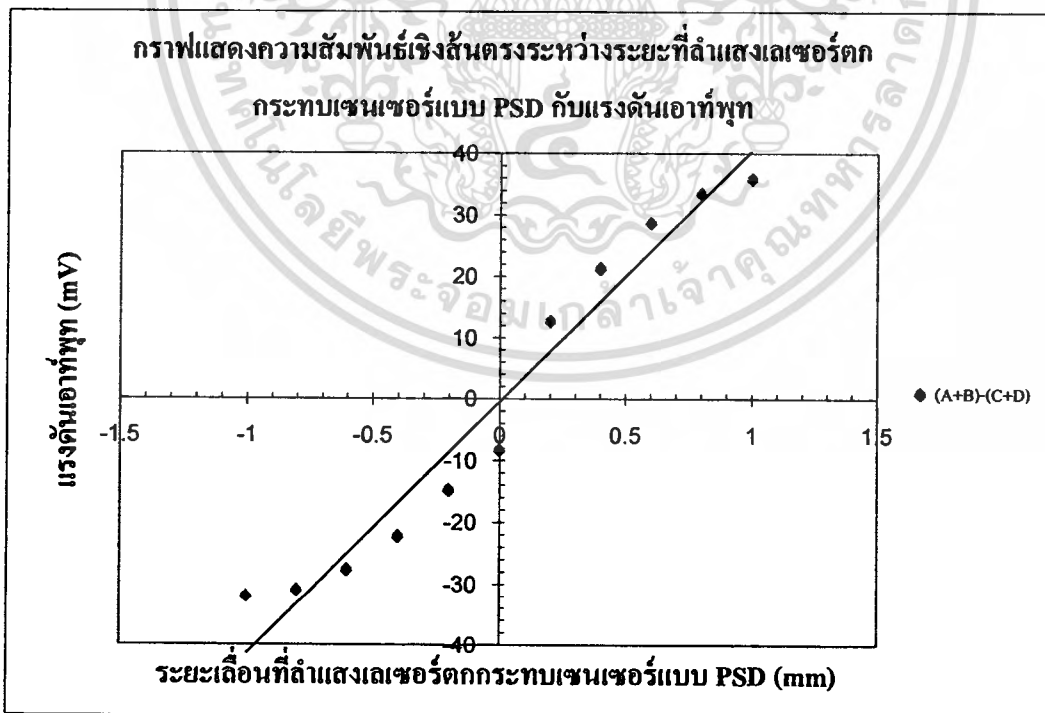
ระยะเลื่อนระนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย
0	-8.38	-8.51	-8.445	-78.85	-78.44	-78.645
-0.2	-12.9	-16.96	-14.93	-78.01	-76.62	-77.315
-0.4	-20.84	-23.86	-22.35	-75.97	-75.12	-75.545
-0.6	-26.95	-28.68	-27.815	-71.61	-67.76	-69.685
-0.8	-30.93	-31.38	-31.155	-66.09	-62.04	-64.065
-1	-32.66	-31.66	-32.16	-59.68	-55.92	-57.8
-1.2	-30.69	-27.96	-29.325	-53.37	-49.33	-51.35
-1.4	-25.78	-22.43	-24.105	-46.94	-43.2	-45.07
-1.6	-19.86	-16.99	-18.425	-40.71	-37.2	-38.955
-1.8	-14.25	-11.66	-12.955	-34.34	-31.26	-32.8
-2	-9.11	-6.83	-7.97	-28.54	-25.92	-27.23
-2.2	-4.65	-2.86	-3.755	-23.34	-20.93	-22.135
-2.4	-1.5	-0.58	-1.04	-18.7	-16.94	-17.82
-2.6	-0.1	-0.16	-0.13	-15.53	-14.68	-15.105

ระยะเลื่อนรนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย
-2.8	2.21	1.98	2.095	-14.12	-13.8	-13.96
0.2	12.69	12.23	12.46	-77.29	-76.96	-77.125
0.4	21.38	20.87	21.125	-73.63	-73.29	-73.46
0.6	28.61	28.41	28.51	-68.93	-68.46	-68.695
0.8	33.4	33.12	33.26	-63.54	-63.42	-63.48
1	35.65	35.64	35.645	-57.64	-57.47	-57.555
1.2	34.99	35.01	35	-51.44	-51.46	-51.45
1.4	30.81	30.91	30.86	-44.76	-44.82	-44.79
1.6	25	24.95	24.975	-38.26	-38.05	-38.155
1.8	18.81	18.81	18.81	-31.76	-31.68	-31.72
2	13.2	13.15	13.175	-26.05	-25.96	-26.005
2.2	8.42	8.34	8.38	-21.18	-21.13	-21.155
2.4	4.67	4.67	4.67	-17.4	-17.26	-17.33
2.6	2.43	2.42	2.425	-15.05	-15.07	-15.06
2.8	1.55	1.52	1.535	-14.16	-14.16	-14.16
3	1.19	1.2	1.195	-13.83	-13.79	-13.81
3.2	1.08	1.12	1.1	-13.62	-13.67	-13.645



รูปที่ 3.23: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเล็งที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีไม่มีเส้นร่วมแสง

จากผลการทดลองทำการฟิตกราฟ (curve fitting) เพื่อหาสมการเชิงเส้นที่อธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูล

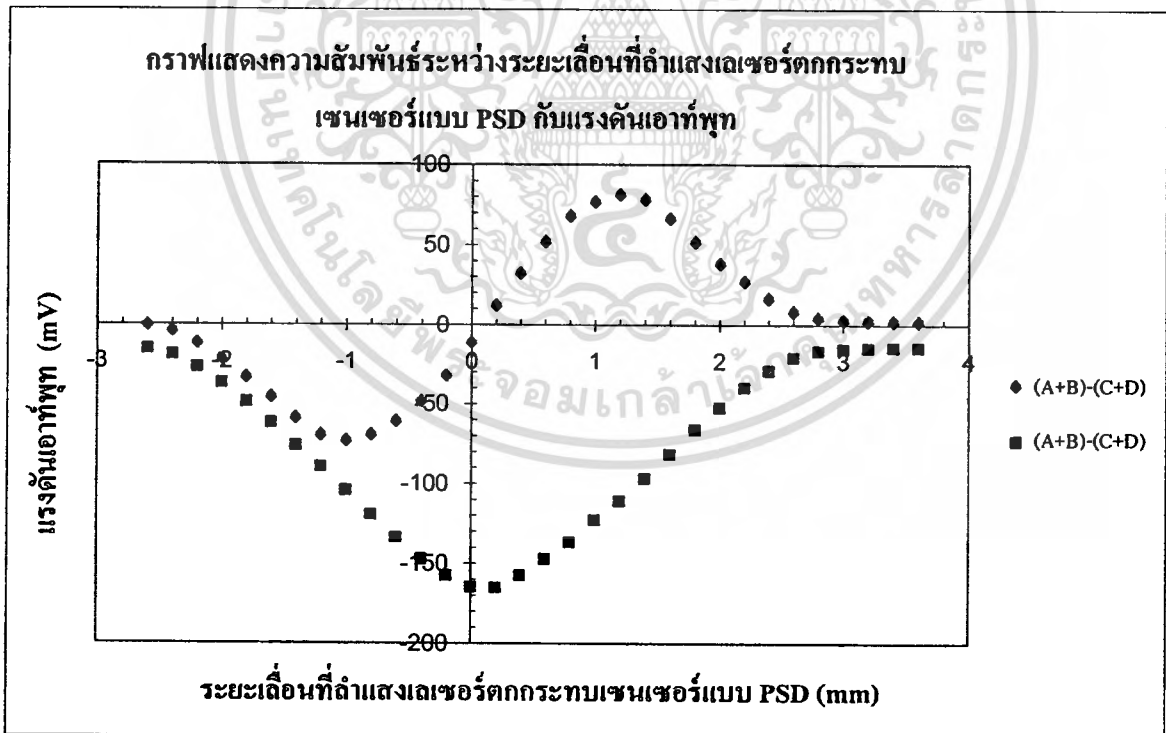


รูปที่ 3.24: กราฟแสดงชุดข้อมูลเฉพาะส่วนเพื่อหาสมการเส้นตรง  $y = 40x - 0.53227$

ตารางที่ 3.10 ผลที่ได้จากการทดลองที่กระแสของเลเซอร์ไดโอด 25 mA

ระยะเลื่อนรนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย
0	-11.05	-12.65	-11.85	-164.42	-164.39	-164.405
-0.2	-32.18	-33.14	-32.66	-157.29	-156.9	-157.095
-0.4	-48.81	-48.82	-48.815	-147.51	-146.57	-147.04
-0.6	-61.63	-61.63	-61.63	-134.42	-132.89	-133.655
-0.8	-70.15	-69.38	-69.765	-120.2	-118.74	-119.47
-1	-73.48	-73.42	-73.45	-104.46	-104.12	-104.29
-1.2	-69.75	-69.83	-69.79	-89.38	-89.3	-89.34
-1.4	-59.67	-59.25	-59.46	-75.93	-75.66	-75.795
-1.6	-46.64	-46.42	-46.53	-61.75	-61.96	-61.855
-1.8	-33.73	-33.95	-33.84	-48.66	-49.06	-48.86
-2	-22.17	-22.42	-22.295	-36.81	-37.31	-37.06
-2.2	-12.35	-12.62	-12.485	-27.09	-27.36	-27.225
-2.4	-4.66	-4.83	-4.745	-19.11	-19.41	-19.26
-2.6	-1.26	-1.35	-1.305	-15.56	-15.76	-15.66
0.2	11.78	10.67	11.225	-164.29	-165.09	-164.69
0.4	31.98	31.4	31.69	-155.38	-158.74	-157.06
0.6	50.77	51.83	51.3	-144.58	-149.16	-146.87
0.8	66.61	67.94	67.275	-135.18	-137.88	-136.53
1	74.53	77.68	76.105	-119.87	-125.3	-122.585
1.2	79.38	81.95	80.665	-109.75	-111.57	-110.66
1.4	76.85	78.16	77.505	-95.58	-97.45	-96.515
1.6	64.63	66.83	65.73	-80.01	-82.32	-81.165
1.8	48.73	52.77	50.75	-64.53	-67.05	-65.79

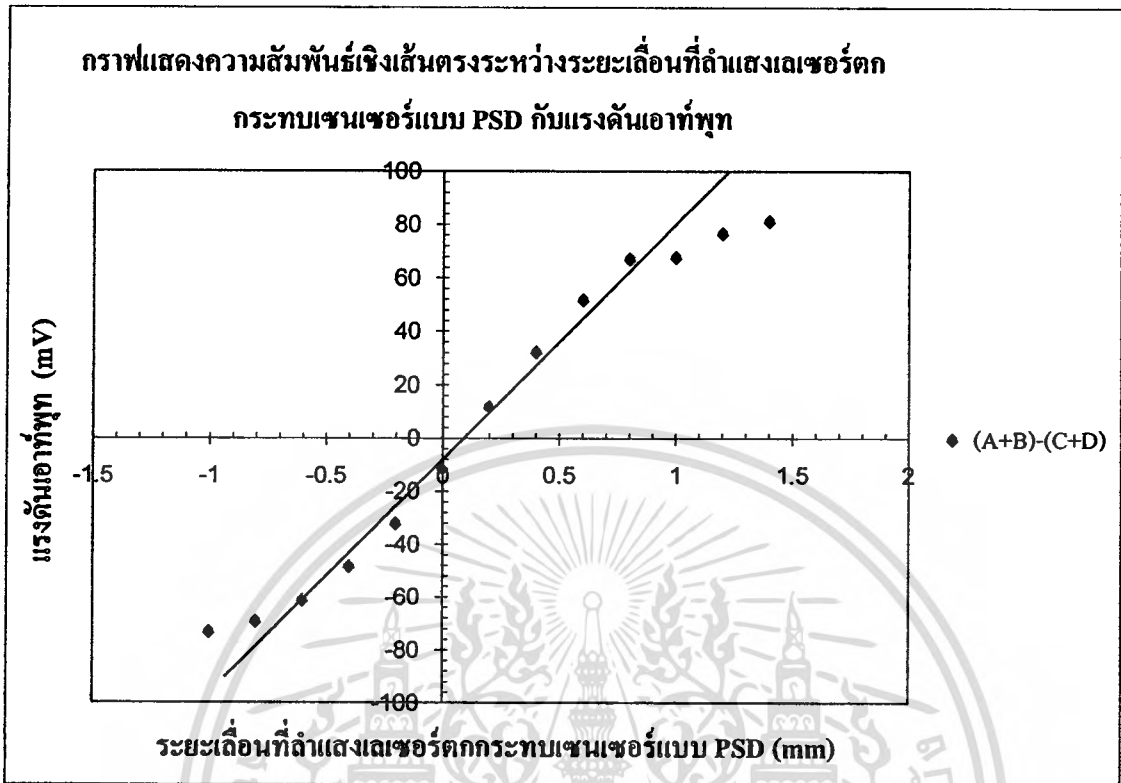
ระยะเลื่อนระนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย
2	36.56	38.61	37.585	-51.71	-52.46	-52.085
2.2	25.73	26.31	26.02	-39.36	-39.86	-39.61
2.4	15.37	15.75	15.56	-28.89	-29.25	-29.07
2.6	7.42	7.42	7.42	-20.68	-20.86	-20.77
2.8	3.5	3.46	3.48	-16.77	-16.72	-16.745
3	2.14	2.08	2.11	-15.36	-15.3	-15.33
3.2	1.62	1.62	1.62	-14.76	-14.66	-14.71
3.4	1.36	1.35	1.355	-14.31	-14.44	-14.375
3.6	1.19	1.19	1.19	-14.28	-14.28	-14.28



รูปที่ 3.25: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีไม่มีเลนส์รวมแสง

ตารางที่ 3.11 ผลจากการทดลองทำการพิกตรภาพเพื่อหาสมการเชิงเส้นที่อธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูล

ระยะเลื่อนรนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)
0	-11.85
-0.2	-32.66
-0.4	-48.815
-0.6	-61.63
-0.8	-69.765
-1	-73.45
0.2	11.225
0.4	31.69
0.6	51.3
0.8	66.61
1	67.275
1.2	76.105
1.4	80.665



รูปที่ 3.26: กราฟแสดงชุดข้อมูลเฉพาะส่วนเพื่อหาสมการเส้นตรง  $y = 74.92843x - 8.31646$

ตารางที่ 3.12 แสดงค่าผลที่ได้จากการทดลองที่กระแสของเลเซอร์ไดโอด 50 mA

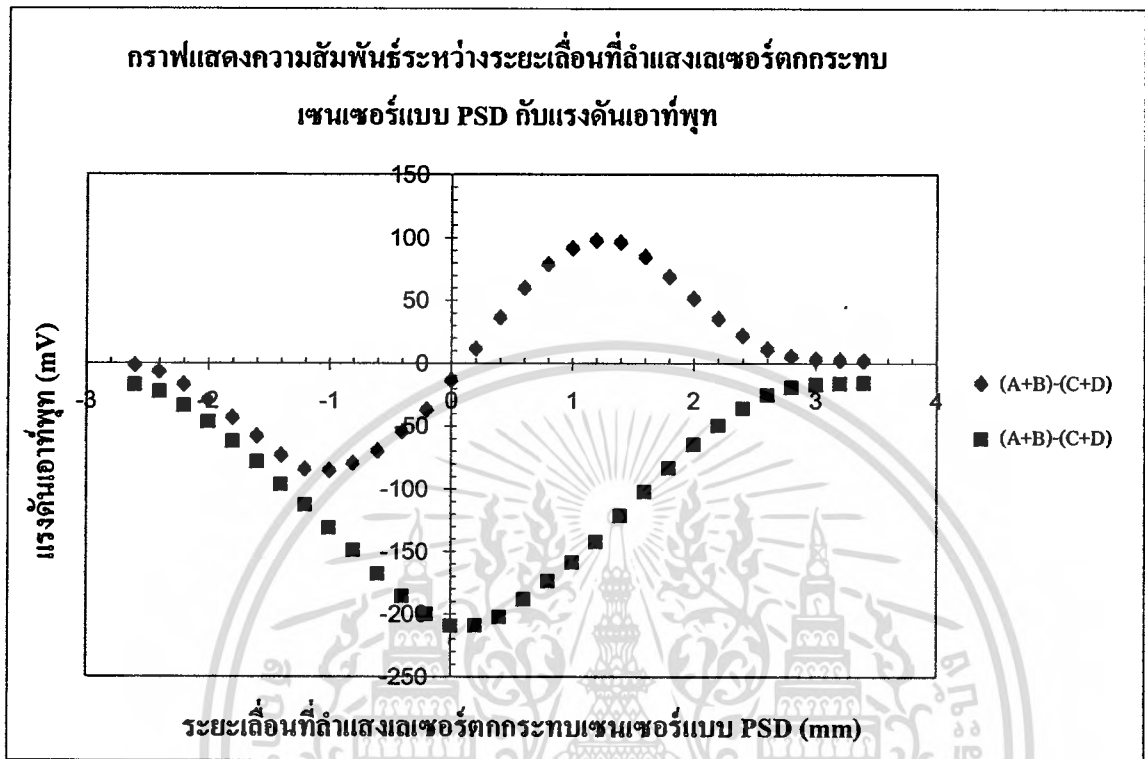
ระยะเลื่อนระนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย	$V_{(A+B)+(C+D)}$ (mV)		ค่าเฉลี่ย
0	-14.27	-12.09	-13.18	-209.58	-203.87	-206.725
-0.2	-37.48	-39.61	-38.545	-200.28	-191.34	-195.81
-0.4	-55.2	-60.45	-57.825	-186	-177.45	-181.725
-0.6	-70.47	-76.16	-73.315	-168.3	-160.39	-164.345
-0.8	-80.39	-86.91	-83.65	-149.37	-142.98	-146.175
-1	-86.32	-93	-89.66	-130.88	-124.84	-127.86
-1.2	-84.95	-89.98	-87.465	-112.73	-107.85	-110.29

โครงการการพัฒนาตัวตรวจจับไอออนของโลหะด้วยนาโนเซนเซอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการแพทย์

โดย บดินทร์ ดำรงค์ดีและคณะ

ระยะเลื่อนระนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}(mV)$		ค่าเฉลี่ย	$V_{(A+B)+(C+D)}(mV)$		ค่าเฉลี่ย
-1.4	-73.95	-78.65	-76.3	-96.66	-91.59	-94.125
-1.6	-59.09	-61.94	-60.515	-78.31	-75.11	-76.71
-1.8	-44.08	-47.05	-45.565	-62.11	-59.89	-61
-2	-29.87	-31.87	-30.87	-46.77	-45.05	-45.91
-2.2	-17.59	-18.72	-18.155	-33.66	-32.42	-33.04
-2.4	-7.19	-7.42	-7.305	-22.38	-21.94	-22.16
-2.6	-2.19	-2.32	-2.255	-17.05	-16.79	-16.92
0.2	11.09	12.6	11.845	-209.31	203.5	-2.905
0.4	35.92	38.68	37.3	-202.52	-195.67	-199.095
0.6	59.25	63.52	61.385	-188.41	-183.44	-185.925
0.8	78.47	83.77	81.12	-173.73	-169.72	-171.725
1	91.46	97.5	94.48	-158.63	-154.42	-156.525
1.2	97.31	104.48	100.895	-142.21	-136.17	-139.19
1.4	96.04	99.12	97.58	-121.33	-119.58	-120.455
1.6	84.28	85.13	84.705	-101.97	-102.08	-102.025
1.8	68.56	67.73	68.145	-82.88	-83.84	-83.36
2	50.86	49.92	50.39	-64.56	-65.22	-64.89
2.2	34.74	35.11	34.925	-49.39	-48.47	-48.93
2.4	21.82	21.32	21.57	-35.47	-35.72	-35.595
2.6	10.66	10.86	10.76	-24.74	-24.54	-24.64
2.8	4.89	5.01	4.95	-18.85	-18.68	-18.765
3	2.7	2.68	2.69	-16.37	-16.37	-16.37
3.2	1.88	1.89	1.885	-15.48	-15.45	-15.465
3.4	1.54	1.57	1.555	-15.02	-15.08	-15.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

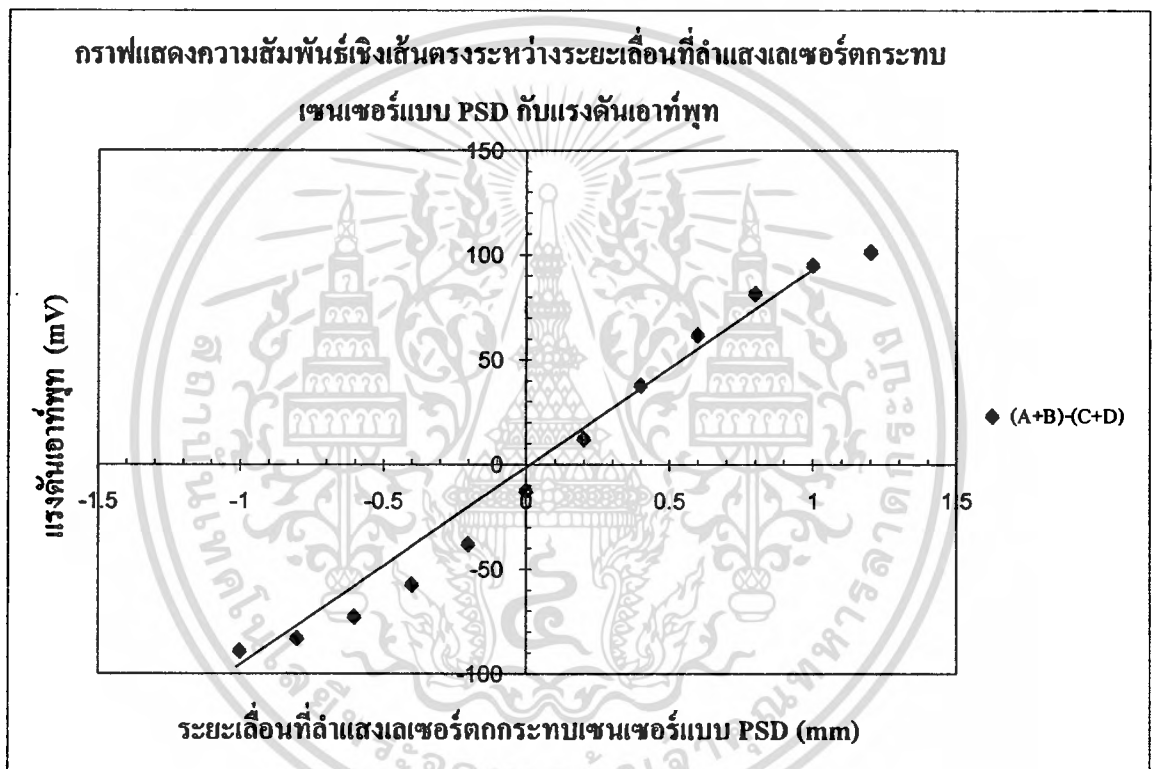


รูปที่ 3.27: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเลื่อนที่ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กับแรงดันเอาต์พุต กรณีไม่มีเลนส์รวมแสง

ตารางที่ 3.13 ผลจากการทดลองทำการฟิตกราฟเพื่อหาสมการเชิงเส้นที่อธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูล

ระยะเลื่อนระนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)
0	-13.18
-0.2	-38.545
-0.4	-57.825
-0.6	-73.315
-0.8	-83.65
-1	-89.66
0.2	11.845
0.4	37.3

ระยะเลื่อนรนาบ X-Y (mm)	$V_{(A+B)-(C+D)}$ (mV)
0.6	61.385
0.8	81.12
1	94.48
1.2	100.895



รูปที่ 3.28: กราฟแสดงชุดข้อมูลเฉพาะส่วนเพื่อหาสมการเส้นตรง  $y = 98.40787x - 7.26995$

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

กรณีที่ไม่ม่มีเลนส์รวมแสงลำแสงเลเซอร์จะมีขนาดใหญ่กว่ากรณีใส่เลนส์รวมแสงทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า เพราะลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD ได้มากกว่าในกรณีใส่เลนส์รวมแสง ซึ่งช่องว่างระหว่างจุดภาคทั้งสองส่งผลน้อยมากลำแสงเลเซอร์ส่วนใหญ่จะตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD และ

สามารถรับแสงหรือเปลี่ยนแสงให้เป็นกระแสได้ เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบริเวณตรงกลางของเซนเซอร์แบบ PSD จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดที่วัดได้จากวงจรบวกศักย์

**การทดลองที่ 3** ศึกษาเสถียรภาพของระบบวัดความโค้งงอกับเซนเซอร์คานากลจิวที่อยู่ในตัวกลางที่เป็นอากาศและน้ำ

การทดลองนี้ศึกษาความเสถียรภาพของระบบที่ใช้ในการทดลองโดยดูการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุตเมื่อปล่อยให้ระบบเซนเซอร์คานากลจิวอยู่ในสภาวะนิ่งๆ ที่ถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อมน้อยที่สุดว่าระหว่างระบบคานากลจิวที่มีตัวกลางเป็นอากาศหรือที่มีตัวกลางเป็นน้ำระบบใดจะมีความเสถียรภาพดีกว่ากัน

#### อุปกรณ์การทดลอง

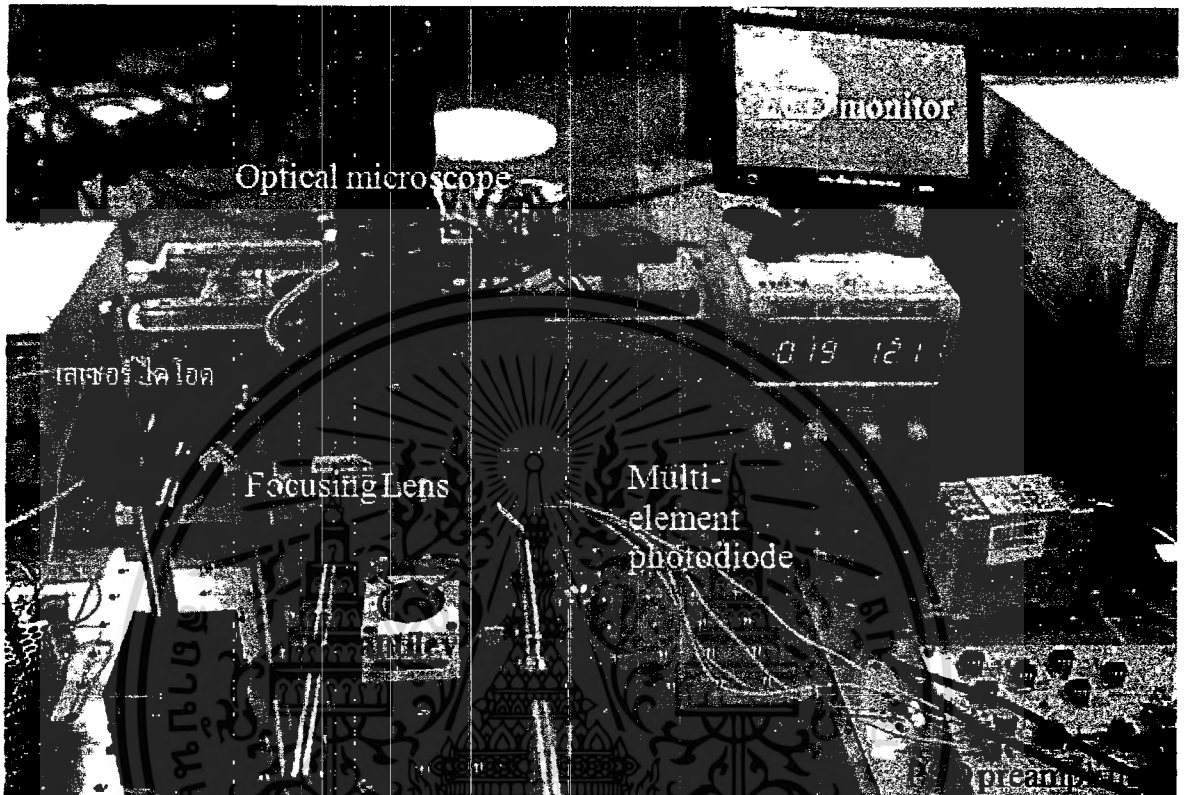
- |   |        |
|---|--------|
| 1. ระบบเซนเซอร์คานากลจิว                    | 1 อัน  |
| 2. วงจรควบคุมกระแสเลเซอร์ไดโอด              | 1 วงจร |
| 3. วงจรวัดพร้อมเซนเซอร์แบบ PSD              | 1 วงจร |
| 4. เลนส์รวมแสง                              | 1 อัน  |
| 5. กล้องขยาย                                | 1 ตัว  |
| 6. หน้าจอ LED                               | 1 อัน  |
| 7. แหล่งกำเนิดแสง                           | 1 ตัว  |
| 8. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (digital multimeter) | 2 ตัว  |

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งระบบตามรูปที่ 3.29
2. ลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากปลายคานากลจิวจะตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กำหนดให้ลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนอยู่บริเวณตรงกลางเซนเซอร์แบบ PSD พอดี เมื่อวัดค่าแรงดันเอาต์พุตจากวงจรบวกศักย์จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดและวงจรลบศักย์จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ตามทฤษฎี แต่การทดลองเราต้องปรับ off set ให้มีค่าใกล้เคียงศูนย์มากที่สุดเพื่อให้เกิดความคลื่อนน้อยที่สุด
3. เขียนคำสั่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ให้เก็บข้อมูลจากทั้งสองวงจร โดยเก็บค่าทุกๆ 30 วินาทีแล้วปล่อยให้ระบบทำงานไปจนกว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้มีค่าคงที่แล้วจึงหยุดการทดลอง
4. ทำการทดลองเหมือนดังกล่าวข้างต้นทั้งตัวกลางที่เป็นอากาศและตัวกลางที่เป็นน้ำ

5. วิเคราะห์ผลการทดลอง

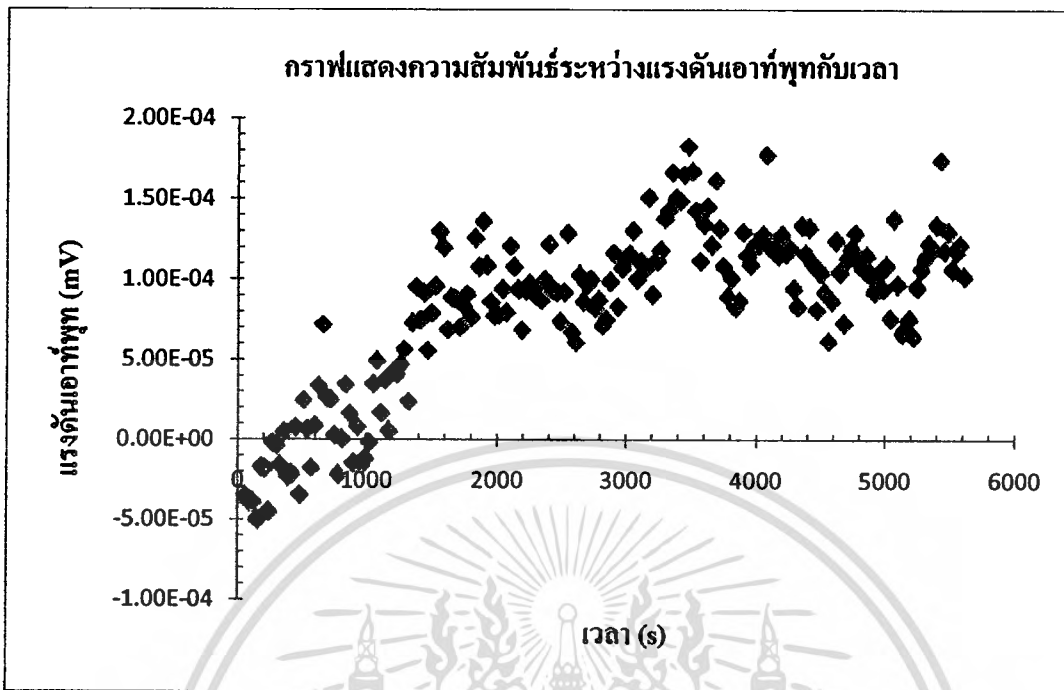
6. สรุปผลการทดลอง



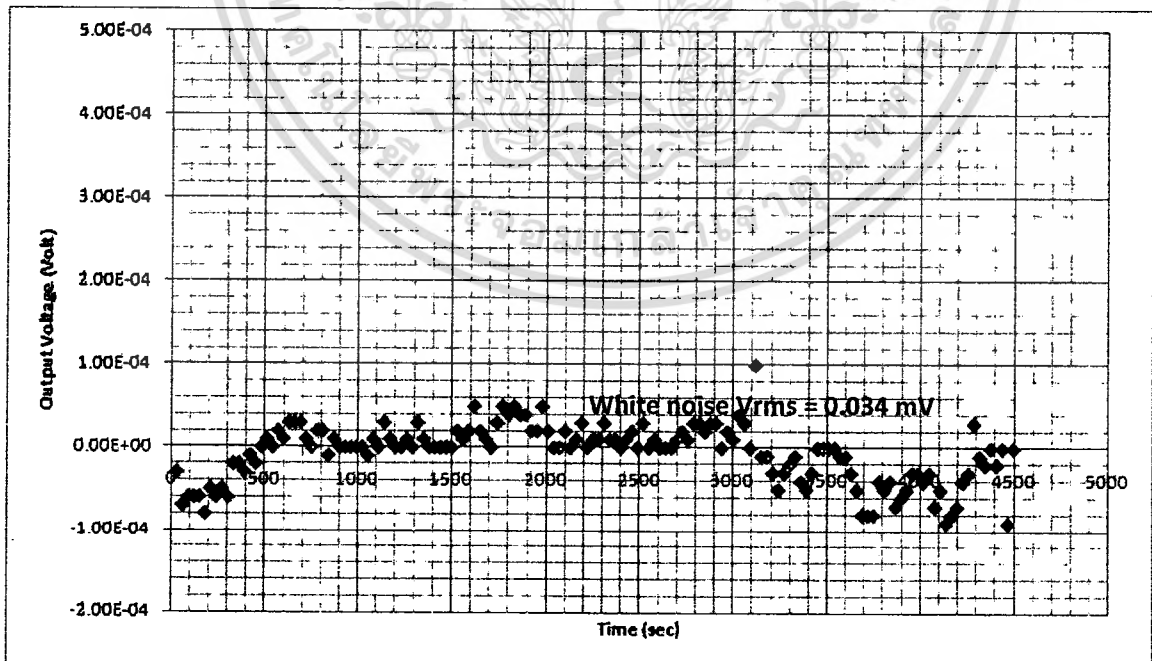
รูปที่ 3.29: การติดตั้งชุดทดลองระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลจิว

ผลการทดลอง

ระบบเซนเซอร์คานกลจิวในตัวกลางที่เป็นอากาศ พบว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากวงจรสลักยมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆอย่างช้าๆจนถึงระยะเวลาหนึ่งจึงจะมีการแกว่งแบบคงที่ กราฟที่ได้จากการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 3.30 และ 3.31พบว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ steady state ในเวลาประมาณ 50 นาที โดยเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะ steady state เรียบร้อยแล้ว สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีการกวัดแกว่งอยู่บ้าง โดยสามารถคำนวณหาค่า White noise ของระบบวัดในตัวกลางอากาศได้เท่ากับ  $0.034 \text{ mV}_{\text{rms}}$

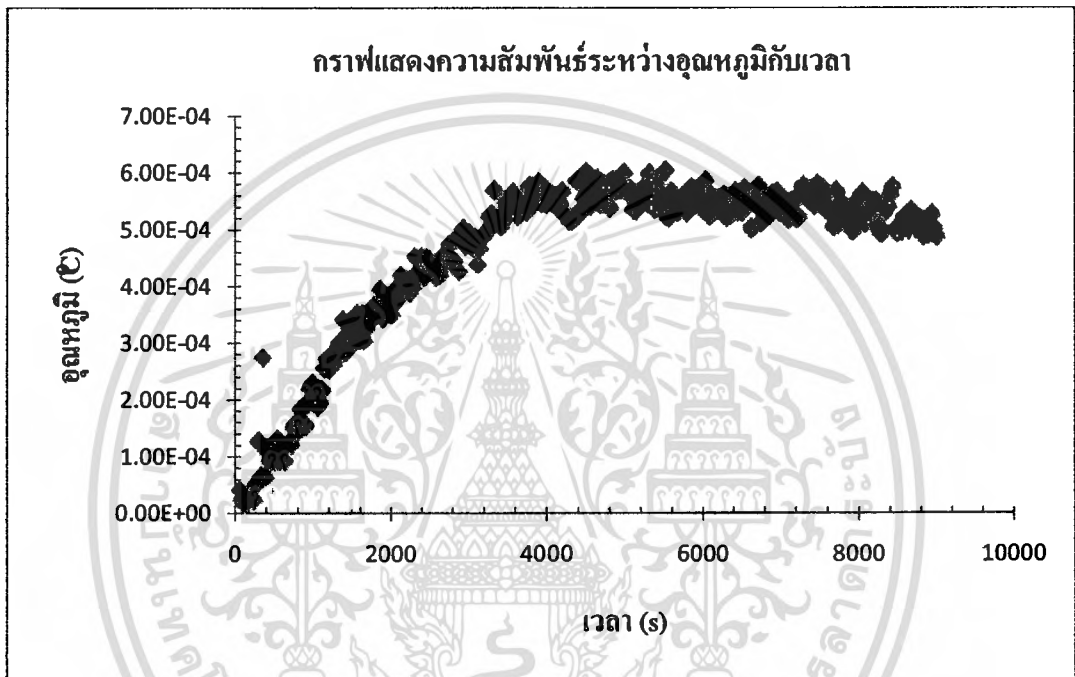


รูปที่ 3.30: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับการเปลี่ยนแปลงของเวลาในระบบเซนเซอร์คานกลจิวที่มีตัวกลางเป็นอากาศ

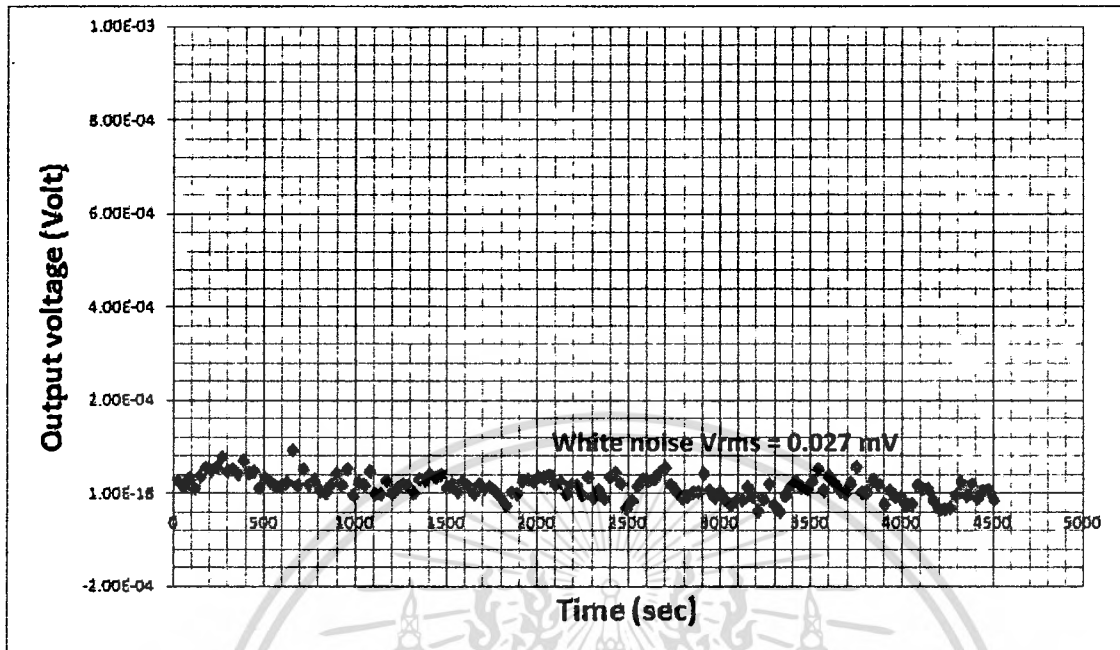


รูปที่ 3.31: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับการเปลี่ยนแปลงของเวลาในระบบเซนเซอร์คานกลจิวที่มีตัวกลางเป็นอากาศ โดยเก็บบันทึกข้อมูลเมื่อสัญญาณมีการกวัดแกว่งแบบคงที่

ระบบเซนเซอร์คานกลจิวในตัวกลางที่เป็นน้ำ พบว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากวงจรลบบคัยจะมีเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกัน แต่เข้าสู่สภาวะ steady state ช้ากว่าในกรณีอากาศ ใช้เวลาประมาณ 1 – 1.30 ชั่วโมง (ดูรูปที่ 3.32 ประกอบ) การกวัดแกว่งของสัญญาณมีอยู่บ้าง เมื่อรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล (ดูรูปที่ 3.33) พบว่าค่า White noise ของระบบวัดในตัวกลางอากาศได้เท่ากับ  $0.027 \text{ mV}_{\text{rms}}$  ซึ่งกล่าวได้ว่าการใช้งานเซนเซอร์คานกลจิวในตัวกลางที่เป็นน้ำมีความเสถียรภาพที่ต่ำกว่า แต่จำเป็นต้องรอให้ระบบเข้าสู่สมดุลนานกว่าด้วย



รูปที่ 3.32: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับการเปลี่ยนแปลงของเวลาในระบบเซนเซอร์คานกลจิวที่มีตัวกลางเป็นน้ำ



รูปที่ 3.33: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับการเปลี่ยนแปลงของเวลาในระบบเซนเซอร์คานกลจิวที่มีตัวกลางเป็นน้ำ โดยเก็บบันทึกข้อมูลเมื่อสัญญาณมีการกวัดแกว่งแบบคงที่

#### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าระบบเซนเซอร์คานกลจิวในตัวกลางที่เป็นน้ำมีความเสถียรภาพมากกว่าระบบเซนเซอร์คานกลจิวในตัวกลางที่เป็นอากาศ ซึ่งน่าจะเป็นเพราะตัวกลางที่เป็นอากาศ สามารถถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอกได้ง่ายกว่าในตัวกลางที่เป็นน้ำ

#### การทดลองที่ 4 ศึกษาแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์แบบ PSD กับคานกลจิวที่มุมต่างๆ

ในการทดลองนี้ เราทำการจำลองการโค้งงอของเซนเซอร์คานกลจิว โดยใช้การหมุนเปลี่ยนมุมคานกลจิวแทนการจับกันของสารล่อและสารจำเพาะที่จะเกิดขึ้นในระบบการทดลองจริงๆ

#### อุปกรณ์การทดลอง

1. คานกลจิว 1 อัน
2. วงจรจ่ายกระแสพร้อมเลเซอร์ 1 วงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 3-51 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

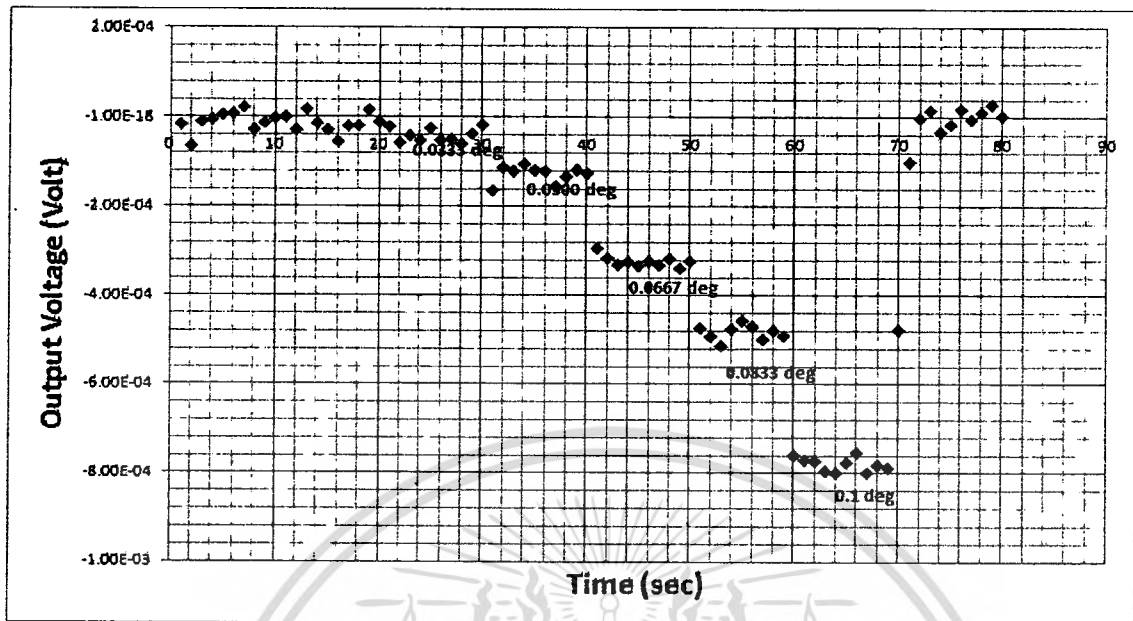
3. วงจรวัดพร้อมเซนเซอร์แบบ PSD	1 วงจร
4. เลนส์รวมแสง	1 อัน
5. กล้องขยาย	1 ตัว
6. หน้าจอ LED	1 อัน
7. แหล่งกำเนิดแสง	1 ตัว
8. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	2 ตัว

### ขั้นตอนการทดลอง

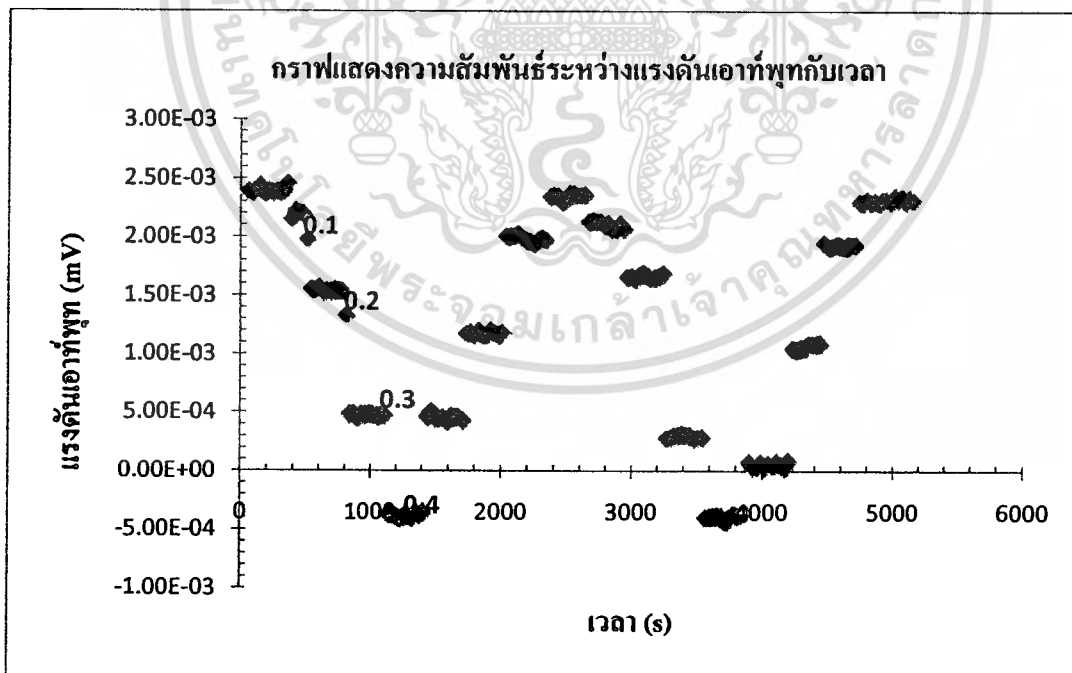
1. ติดตั้งระบบตามรูปที่ 3.29
2. ลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากปลายคานากลจิวจะตกกระทบเซนเซอร์แบบ PSD กำหนดให้ลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนอยู่บริเวณตรงกลางเซนเซอร์แบบ PSD พอดี เมื่อวัดค่าแรงดันเอาต์พุตจากวงจรบอกศักย์จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดและวงจรบอกศักย์จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ตามทฤษฎี แต่การทดลองเราต้องปรับออปเซตให้มีค่าใกล้เคียงศูนย์มากที่สุดเพื่อให้เกิดความคลื่อนน้อยที่สุด
3. บันทึกค่าแรงดันเอาต์พุตจากวงจรทั้งสอง โดยคอมพิวเตอร์
4. เมื่อค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้มีค่าคงที่แล้ว ให้หมุนเปลี่ยนมุมคานากลจิวครึ่งละ 0.1 องศา เพื่อดูการเปลี่ยนแปลง เพราะเมื่อหมุนเปลี่ยนมุมคานากลจิวจะทำให้ตำแหน่งลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบที่ปลายคานากลจิวจะเปลี่ยนตำแหน่งไปด้วย ส่งผลให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนไปจากเดิม
5. ทำเหมือนกับข้อ 7. จนกว่าลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบปลายคานากลจิวจะไม่โดนที่คานากลจิวแล้วจึงหมุนกลับครึ่งละ 0.1 องศา เช่นเดิมจนกว่าจะมาอยู่ที่ตำแหน่งแรกที่ตั้งค่าไว้
6. นำค่าที่ได้จากการทดลองมาทำการเขียนกราฟ
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง
8. สรุปผลการทดลอง

### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.34 และ 3.35 โดยการปรับมุมคานากลจิวที่มุมต่างๆกัน



รูปที่ 3.34: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์แบบ PSD กับเซนเซอร์คานกลจิวที่มีมุมต่างๆ ที่มีตัวกลางเป็นน้ำ

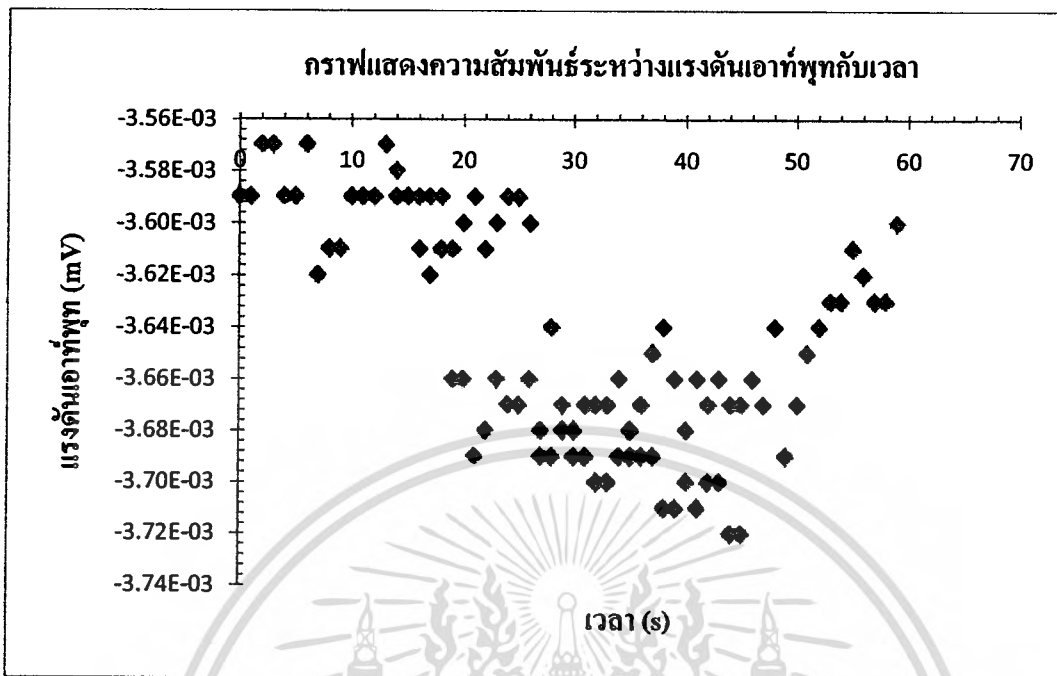


รูปที่ 3.35: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์แบบ PSD กับมุมการโค้งงอของเซนเซอร์คานกลจิว ที่มีมุม 0.1 0.2 0.3 และ 0.4 องศา

### 3.4 สรุปผลการศึกษา

- ออกแบบวงจรสำหรับใช้กับระบบวัดความโค้งของเซนเซอร์คานกลด้วยวิธี optical beam deflection measurement
- จัดหาอุปกรณ์แสง optical table และอุปกรณ์ที่จำเป็น
- สั่งซื้อวัสดุและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับสร้างวงจรที่ได้ออกแบบไว้
- สั่งซื้อเซนเซอร์คานกลเพื่อใช้ในการทดสอบเบื้องต้น
- ออกแบบการทดลองสำหรับทดสอบการวัดความโค้งของเซนเซอร์คานกลด้วยวิธี optical beam deflection measurement
- ประกอบและสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็น สำหรับใช้กับ multi-element photodetector และวงจรอื่นๆ
- ออกแบบและสร้างฐานจับยึดเซนเซอร์คานกลขนาดจิ๋ว
- ทดสอบระบบวัดโดยทดลองกับเซนเซอร์คานกลที่ยังไม่ได้เคลือบชั้น SAMs
- ออกแบบ chamber ขนาดเล็ก เพื่อติดตั้งชุดวัดทางแสงและจับยึดเซนเซอร์คานกล
- สร้าง chamber ขนาดเล็ก เพื่อติดตั้งชุดวัดทางแสงและจับยึดเซนเซอร์คานกล
- ทดสอบเสถียรภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น
- ทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นโดยการจำลองการโค้งของเซนเซอร์คานกลจิ๋ว
- ทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นกับเซนเซอร์คานกลจิ๋วที่เคลือบชั้น SAM

จากการทดลองยังไม่สามารถใช้วัดกับเซนเซอร์คานกลจิ๋วที่เคลือบชั้น SAM ไว้แล้วได้ โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.36 ทั้งนี้ปัญหาที่พบมีอยู่หลายจุด ปัญหาแรก คือ การจัดทิศทางแสง ซึ่งจำเป็นต้องจัดอยู่ตลอดเวลา และใช้เวลานาน อุปกรณ์ไม่ fix ตายตัว สามารถเคลื่อนไปมาได้ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในการวัด ปัญหาที่สอง คือ เรื่องของอุณหภูมิของสารละลาย อาจไม่คงที่ และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ



รูปที่ 3.36: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์แบบ PSD กับเซนเซอร์คานกล จีวเมื่อเคลือบด้วยชั้น SAM ในสารละลายที่มีองค์ประกอบของลิเทียมไอออน พบว่าสัญญาณมีการกวัดแกว่งค่อนข้างสูง

### 3.5 ภาคผนวก

โปรแกรม MATLAB บันทึกผลของแรงดันเอาต์พุตจากวงจร PSD ที่ใช้ในการทดลองระบบเซนเซอร์คานกลจีว

```
%Kiethley 195A: DMM
```

```
%(c) Badin Damrongsak, Physics Department, Silpakorn University
```

```
clear all; clc;
```

```
d = gpib('ni',0,16); %กำหนดให้ d แทนอุปกรณ์ตำแหน่ง 16 diff
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

s = gpib('ni',0,23); %กำหนดให้ s แทนอุปกรณ์ตำแหน่ง 23 sum

t = gpib('ni',0,7); %กำหนดให้ t แทนอุปกรณ์ตำแหน่ง 7 temp

fopen(d); %สั่งเปิดเครื่อง d

fopen(s); %สั่งเปิดเครื่อง s

fopen(t); %สั่งเปิดเครื่อง t

fprintf(d,'\*rst'); %reset ตำแหน่ง diff

fprintf(d,'\*cls'); %clear ตำแหน่ง diff

fprintf(s,'\*rst'); %reset ตำแหน่ง sum

fprintf(s,'\*cls'); %clear ตำแหน่ง sum

fprintf(t,'\*rst'); %reset ตำแหน่ง temp

fprintf(t,'\*cls'); %clear ตำแหน่ง temp

time = 0; %กำหนดให้เวลาเริ่มต้นเท่ากับศูนย์

for ix=1:2000 %จำนวนรอบ

c = clock; %กำหนดให้ C แทนเวลา

oldtime = c(6); %ให้ oldtime เป็นวินาที

time\_sec = c(6); %ให้ time\_sec เป็นวินาที

fprintf(d,'G1X'); %ส่งคำสั่งให้เครื่องรับค่าโดยไม่ต้องมีชื่อเครื่องออกไปยังอุปกรณ์แห่ง diff

```

fprintf(d,'T4X'); %ส่งคำสั่ง continuous on ออกไปยังอุปกรณ์ตำแหน่ง diff

fprintf(d,'FOX'); %ส่งคำสั่ง DC Volts ออกไปยังอุปกรณ์ตำแหน่ง diff

fprintf(d,'R2X'); %ส่งคำสั่งอ่านค่าในช่วง 200mV ออกไปยังอุปกรณ์ตำแหน่ง diff

fprintf(s,'G1X');%ส่งคำสั่งให้เครื่องรับค่าโดยไม่ต้องมีชื่อเครื่องออกไปยังอุปกรณ์ตำแหน่ง sum

fprintf(s,'T4X');%ส่งคำสั่ง continuous on ออกไปยังอุปกรณ์ตำแหน่ง sum

fprintf(s,'FOX');%ส่งคำสั่ง DC Volts ออกไปยังอุปกรณ์ตำแหน่ง sum

fprintf(s,'R2X');%ส่งคำสั่งอ่านค่าในช่วง 200mV ออกไปยังอุปกรณ์ตำแหน่ง sum

fprintf(t,'G1X');%ส่งคำสั่งให้เครื่องรับค่าโดยไม่ต้องมีชื่อเครื่องออกไปยังอุปกรณ์ตำแหน่ง temp

fprintf(t,'T4X');%ส่งคำสั่ง continuous on ออกไปยังอุปกรณ์ตำแหน่ง temp

fprintf(t,'FOX');%ส่งคำสั่ง DC Volts ออกไปยังอุปกรณ์ตำแหน่ง temp

fprintf(t,'R2X');%ส่งคำสั่งอ่านค่าในช่วง 200mV ออกไปยังอุปกรณ์ตำแหน่ง temp

while(abs(time_sec-oldtime) < 10) %กำหนดเงื่อนไขถ้าค่าสัมบูรณ์ของผลต่างของ time_sec กับ
oldtime น้อยกว่า 10 ให้ทำคำสั่งใน While loop

    c = clock; %กำหนดให้ C แทนเวลา

    time_sec = c(6); %รับค่าเวลามาเก็บไว้ในตัวแปร time_sec

end % จบคำสั่ง While loop

oldtime = time_sec; %นำค่า time_sec มาเก็บไว้ใน oldtime

time = time+10 %เพิ่มค่าตัวแปร time ขึ้น 10

fprintf(d,'BOX'); %ส่งคำสั่ง Readings from A/D converter ไปยังตำแหน่ง diff
    
```

```
diff = fscanf(d); %รับค่าจาก d ไปเก็บไว้ใน diff
```

```
Vd = str2num(diff);%เปลี่ยน diff จาก string เป็น number
```

```
fprintf(s,'BOX'); %ส่งคำสั่ง Readings from A/D converter ไปยังตำแหน่ง sum
```

```
sum = fscanf(s); %รับค่าจาก s ไปเก็บไว้ใน sum
```

```
Vs = str2num(sum); %เปลี่ยน diff จาก string เป็น number
```

```
fprintf(t,'BOX'); %ส่งคำสั่ง Readings from A/D converter ไปยังตำแหน่ง temp
```

```
temp = fscanf(t); %รับค่าจาก s ไปเก็บไว้ใน tempแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
```

```
Vt = str2num(temp);%เปลี่ยน diff จาก string เป็น number
```

```
name = ['C:\Users\user\Desktop\project\3watertri60155.txt']; %ให้ name แทนตำแหน่งไฟล์ที่
```

จะเก็บ

```
f1=fopen(name,'at+'); %เปิดไฟล์ name ที่เป็น text อ่านและเพิ่มเติม สร้างใหม่ถ้าจำเป็น
```

```
fprintf(f1,'%d %e %e %e\n',time,Vt,Vd,Vs); %เก็บค่า time,Vt,Vd,Vs เป็นจำนวนเต็มในไฟล์ f1
```

```
fclose(f1); %ปิดไฟล์ f1
```

```
end %จบคำสั่ง for
```

```
fclose(d); %คำสั่งปิดเครื่อง diff
```

```
clear d; % clear diff
```

```
fclose(s); %คำสั่งปิดเครื่อง sum
```

```
clear s; % clear sum
```

```
fclose(t); %คำสั่งปิดเครื่อง temp
```

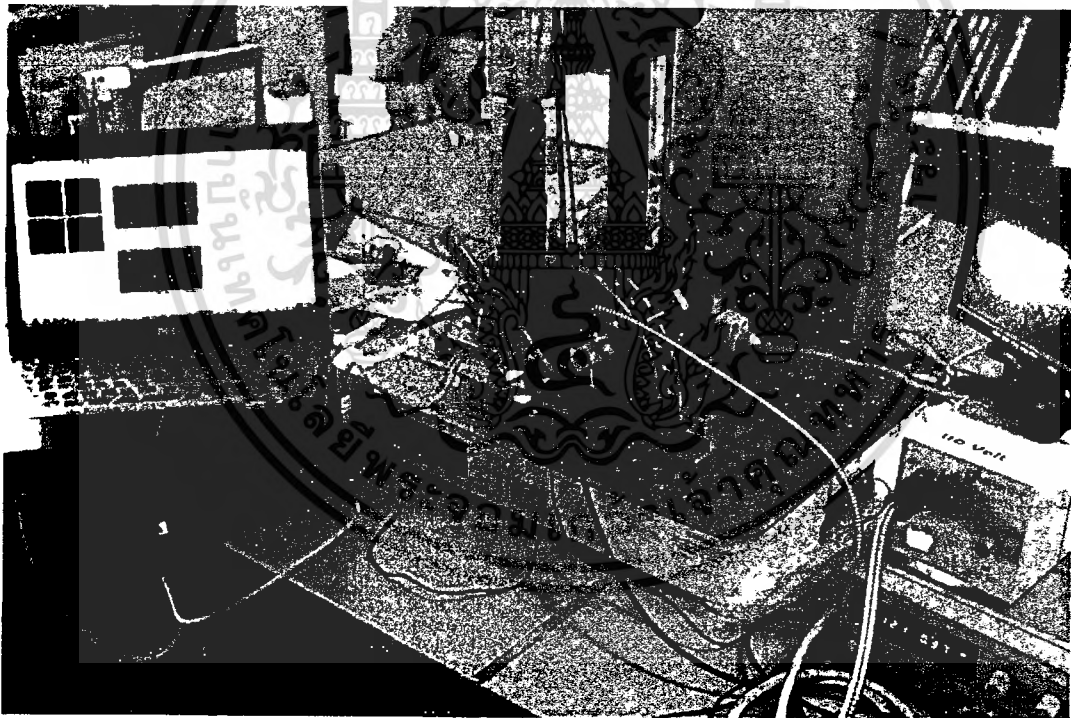
```
clear t; % clear temp
```

## บทที่ 4

### ระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลจิว เวอร์ชัน 2

#### 4.1 การออกแบบระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลจิวด้วยเทคนิคทางแสง เวอร์ชัน 2

การพัฒนาระบบวัดทางแสงสำหรับเซนเซอร์คานกลขนาดจิวให้มีประสิทธิภาพการวัดที่ถูกต้องและแม่นยำ ต้องมีการจัดเรียงอุปกรณ์ต่างๆของระบบอย่างแม่นยำ อาทิเช่น การจัดแนวลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนคานกลขนาดจิว การจัดแนวลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสง การปรับระยะโฟกัสของลำแสงเลเซอร์ การติดตั้งตำแหน่งของกล้องจุลทรรศน์ เป็นต้น หากการจัดเรียงอุปกรณ์ต่างๆมีความผิดพลาดหรือไม่เที่ยงตรง จะทำให้ค่าที่ได้จากระบบคลาดเคลื่อนและผิดพลาดได้ ซึ่งลักษณะการจัดอุปกรณ์จะเป็นดังในรูปที่ 4.1 แสดงภาพรวมของการวัดวางแนวลำแสงของระบบ

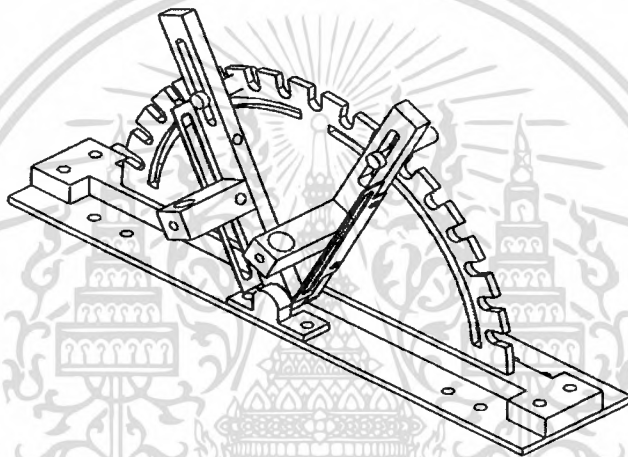
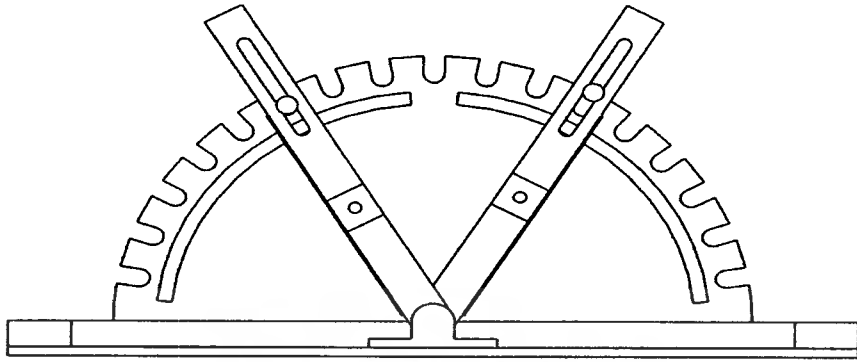


รูปที่ 4.1: ภาพรวมของการวัดวางแนวลำแสงของระบบ

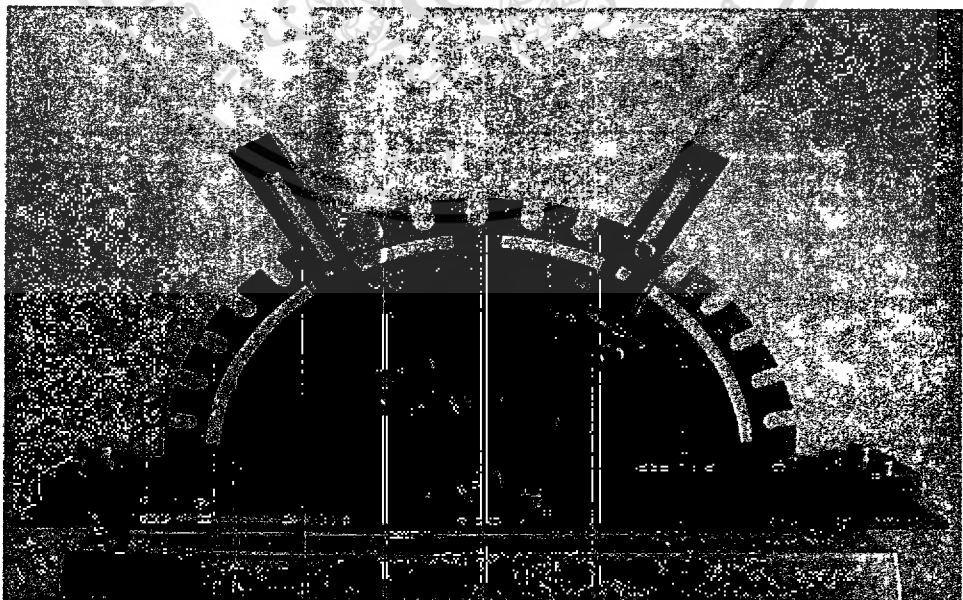
การออกแบบแท่นจับยึดในการทดลอง

ในการออกแบบแท่นจับยึดที่ใช้ในการทดลอง ผู้วิจัยได้ออกแบบให้สามารถปรับเปลี่ยนมุมที่ใช้ในการยิงเลเซอร์และควอดแดรนต์ที่ติดตั้งที่ใช้ในการทดลอง รวมถึงสามารถปรับระยะโฟกัสของเลเซอร์ได้ (ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



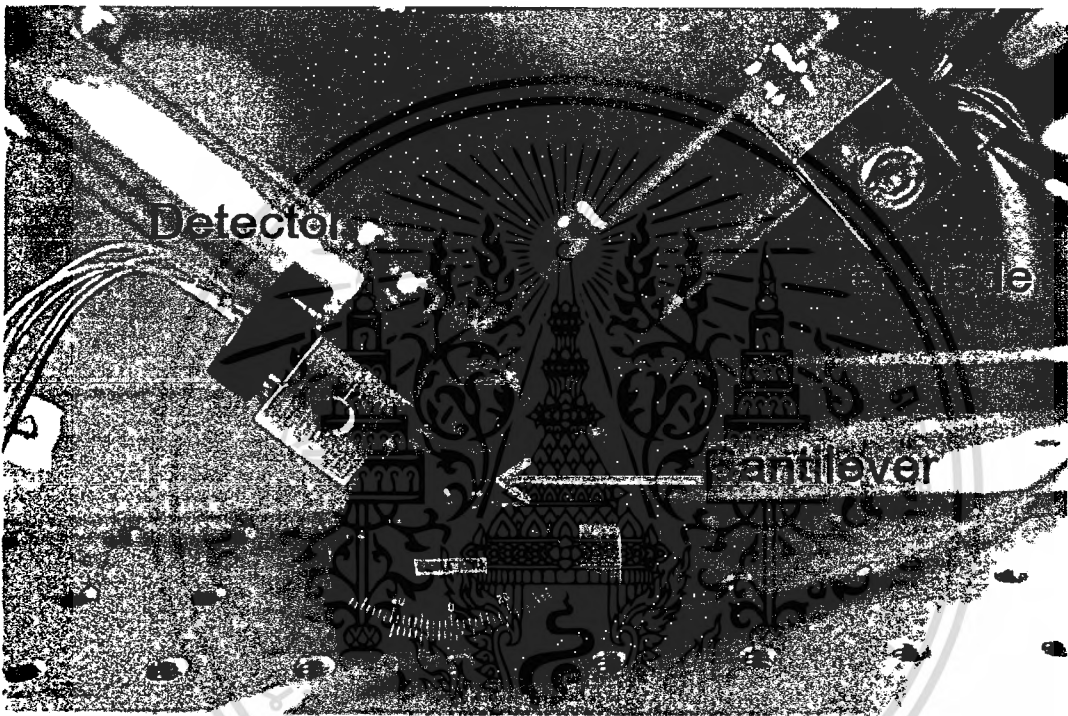
รูปที่ 4.2: แบบจำลองโครงสร้างแท่นยึดที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.3: แท่นยึดสำหรับทดลองที่สร้างขึ้น

### การจัดแนวลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนคานกลขนาดจิ๋ว

ลำแสงเลเซอร์ถือว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของระบบ เนื่องจากในการอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของคานกลขนาดจิ๋ว จำเป็นอย่างมากที่จะต้องใช้ลำแสงเลเซอร์ในการสะท้อนกับคานกลขนาดจิ๋วไปตกกระทบกับ อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสง แล้วนำค่าที่ได้ส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลค่าแรงดันที่ได้จากควอดแดรนต์ทีเทคเตอร์

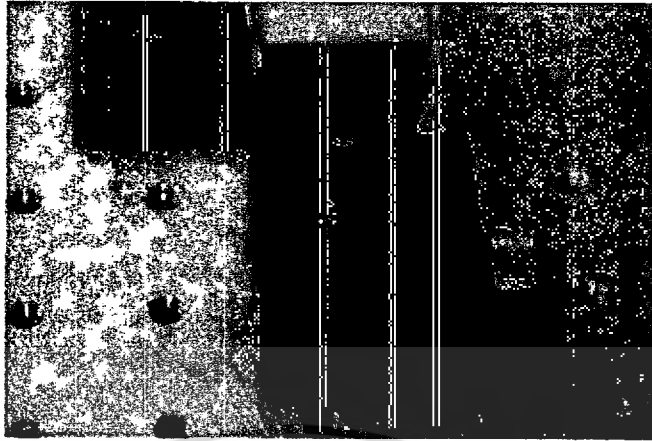


รูปที่ 4.4: ทิศทางการเคลื่อนที่ของลำแสงเลเซอร์

### การจัดวางแนวของกล้องจุลทรรศน์

เนื่องจากคานกลขนาดจิ๋วมีขนาดเล็กมากในระดับไมครอน จึงทำให้ยากที่จะสังเกตด้วยตาว่าขณะนี้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบลงบนปลายคานกลขนาดจิ๋วหรือยังดังรูปที่ 4.5 จึงจำเป็นที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์เข้ามาช่วยในการมองลำแสงเลเซอร์ขณะตกกระทบปลายของคานกลขนาดจิ๋ว เมื่อทำการต่อสัญญาณภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์เข้ากับจอแสดงภาพดังรูปที่ 4.6 จะทำให้สามารถสังเกตตรงบริเวณที่เราสนใจได้ง่ายขึ้น

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการทดลองสามารถปรับระดับได้ตามความเหมาะสม เนื่องจากมีจุดหมุนและสเกลบอกตำแหน่งทำให้สามารถปรับความสูงของกล้องได้ตั้งแต่ 0 - 20 เซนติเมตร และมีกำลังขยายสูงถึง 4.5 เท่า ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.5: ภาพเมื่อสังเกตุคานกลขนาดจิ๋วด้วยตา



รูปที่ 4.6: ภาพที่สังเกตุได้จากกล้องจุลทรรศน์



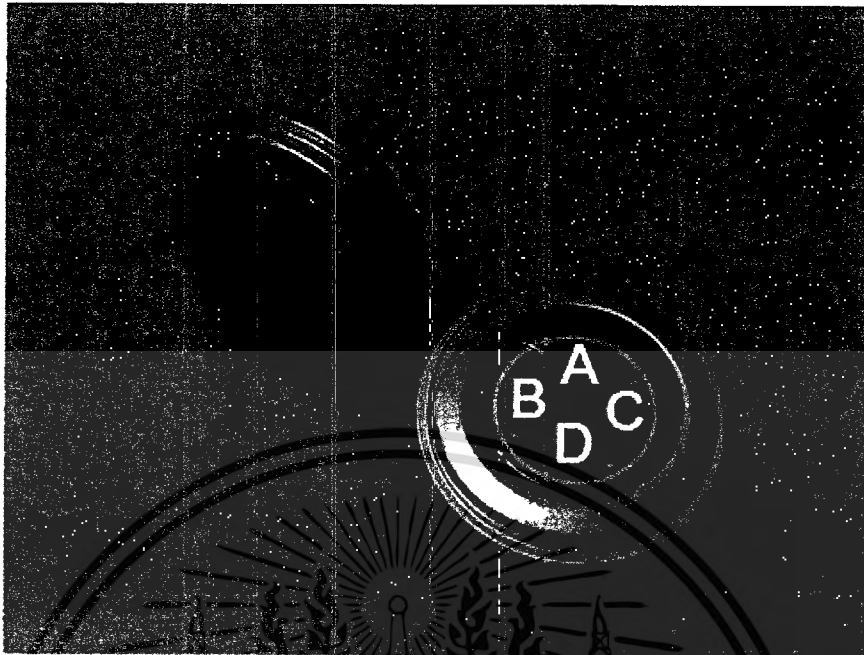
รูปที่ 4.7: กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในการทดลอง

### ข้อควรระวังในการปรับตำแหน่งของกล้องจุลทรรศน์

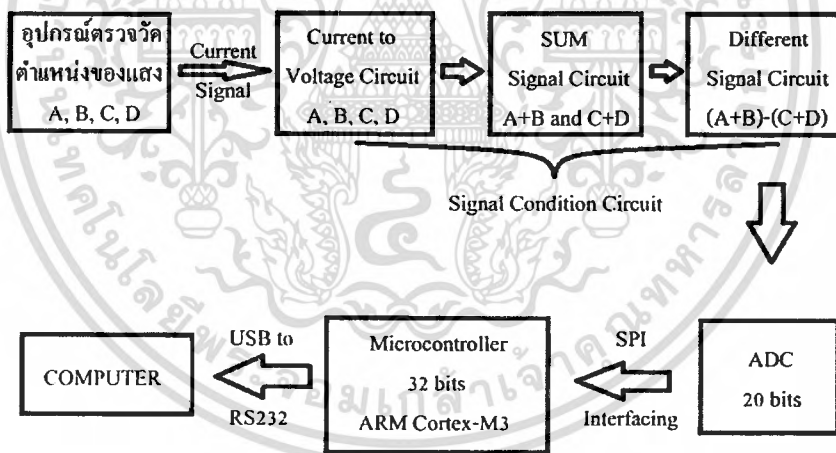
เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้มีขนาดใหญ่ รวมถึงพื้นที่ที่จำกัดในการทดลอง จึงทำให้ในการปรับตำแหน่งของกล้องจุลทรรศน์บางครั้ง ส่วนปลายของกล้องจุลทรรศน์อาจบังลำแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดทำให้ลำแสงเลเซอร์ไม่สามารถสะท้อนไปยังคานากลขนาดจิ๋ว และ อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสงได้ หรือในการปรับตำแหน่งของกล้องจุลทรรศน์หากผู้ทดลองไม่ระมัดระวังอาจทำให้ส่วนปลายของกล้องจุลทรรศน์ชนหรือกระแทกกับแท่นวางคานากลขนาดจิ๋ว ดังนั้นในขณะที่ทำการปรับตำแหน่งของกล้องจุลทรรศน์ผู้ทดลองควรมีความระมัดระวังในการปรับตำแหน่งแต่ละครั้งด้วย

### การรับ-ส่งค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์

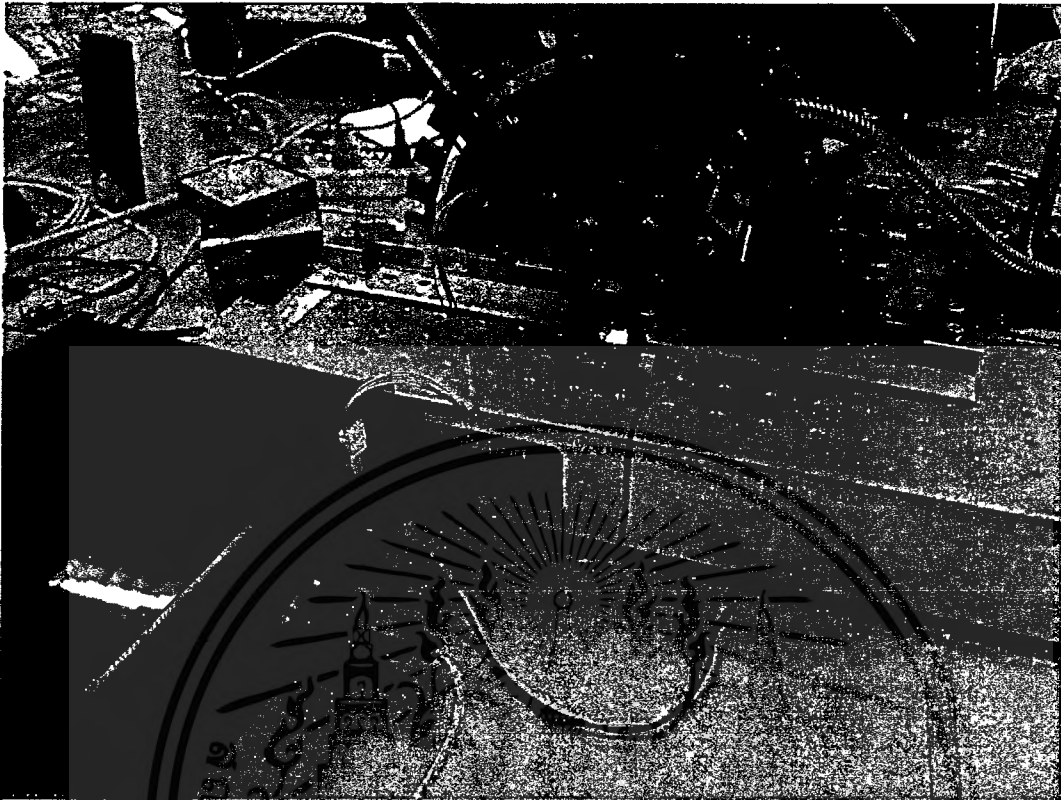
การรับข้อมูลประกอบด้วย อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสง ซึ่งมีพื้นที่การทำงาน 4 ส่วน สมมติให้เป็นส่วน A, B, C, D เมื่อลำแสงเลเซอร์ตกกระทบลงบน อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสง จะทำให้ได้เอาท์พุทเป็นกระแส ซึ่งปริมาณกระแสที่ได้ในแต่ละส่วนจะขึ้นกับความเข้มแสงของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบในส่วนนั้นๆ ด้วย จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปเข้าสู่วงจร signal condition เพื่อแปลงกระแสเป็นแรงดันและทำการรวมสัญญาณของพื้นที่ในส่วน A เข้ากับ B จะเป็นสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์วัดตำแหน่งของแสงในส่วนบน และในส่วน C เข้ากับ D จะเป็นสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์วัดตำแหน่งของแสงในส่วนล่าง เมื่อได้สัญญาณที่ต้องการแล้ว นำสัญญาณทั้ง 2 ส่วนมาเข้าวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter : ADC) ซึ่งมีขนาด 20 บิต เพื่อส่งเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการประมวลผลเพื่อหาความต่างของสัญญาณทั้งสอง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประสิทธิภาพสูง (ARM CORTEC M3) ขนาด 32 บิต โดยส่งข้อมูลแบบ SPI (serial peripheral interface) เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ข้อมูลแล้วจะแปลงข้อมูลเป็นข้อมูลฐานสิบหก แล้วส่งไปให้คอมพิวเตอร์ผ่านสายส่งสัญญาณข้อมูลแบบ USB to RS232 โดยจะส่งเป็นข้อมูล 2 ช่วงติดกัน คือ 1) A+B และ 2) C+D เมื่อคอมพิวเตอร์ได้รับข้อมูลทั้ง 2 ค่านี้แล้วจะนำไปแสดงผลด้านกราฟฟิก โดยใช้โปรแกรม Visual Basic ในการแสดงผลต่อไป โดยแผนผังการทำงานจะเป็นดังในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8: การแบ่งควอดแดรนต์ในควอดแดรนต์โฟโตไดโอด



รูปที่ 4.9: แผนผังการรับ-ส่งค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.10: การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสงกับวงจร Signal Condition และไมโครคอนโทรลเลอร์

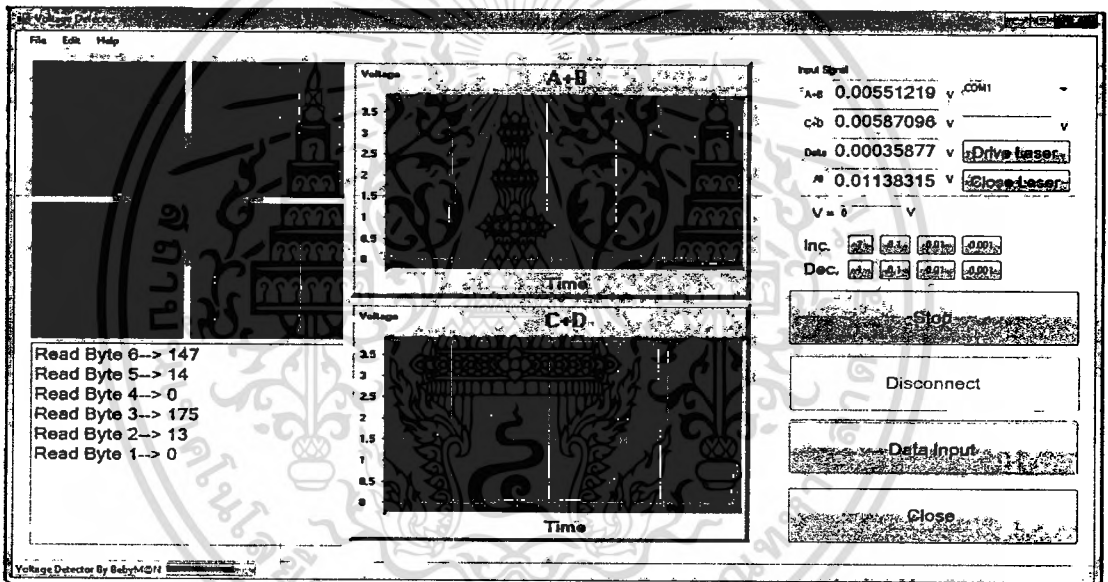
#### การแสดงผลผ่านทางคอมพิวเตอร์

ในการแสดงผลผ่านทางคอมพิวเตอร์จะแสดงผลในรูปของคอมพิวเตอร์กราฟิก ค่าแรงดันที่อ่านได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์และผลต่างระหว่างแรงดันของ อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสง ครึ่งบนกับครึ่งล่าง โดยรูปคอมพิวเตอร์กราฟิกจะแสดงถึงการเปลี่ยนไปของตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบลงบน อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสง

ในการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์ จะทำการเชื่อมต่อโดยใช้สาย serial port โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งข้อมูลของแรงดันมาในรูปแบบเลขฐานสิบหกมายังคอมพิวเตอร์โดยผ่านสาย serial port โดยคอมพิวเตอร์จะใช้โปรแกรมที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นในการรับค่าจากไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งมีหน้าตาโปรแกรมดังรูปที่ 4.11 โดยเมื่อโปรแกรมทำการรับค่ามาแล้วโปรแกรมจะทำการนำค่าที่ได้ไปคำนวณและสร้างเป็นภาพกราฟิกและแสดงผลต่อไป

### การตั้งค่าเริ่มต้นของระบบ

ในการตั้งค่าของระบบเริ่มต้น ทางผู้วิจัยจะสมมติให้ค่านอยู่ในขานานกับแนวระดับพอดี ดังนั้นการสะท้อนลำแสงเลเซอร์ควรจะสะท้อนไปยังจุดศูนย์กลางของอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสงพอดีโดยการที่เราจะทราบได้ว่าลำแสงของเลเซอร์ตกกระทบบนจุดกึ่งกลางของอุปกรณ์วัดตำแหน่งของแสงพอดีหรือไม่ เราจะสังเกตจากค่าที่คอมพิวเตอร์ได้รับจากไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสังเกตค่าความต่างของแรงดันระหว่างส่วน A+B กับ C+D หากผลต่างของแรงดันมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าความเข้มแสงของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสงมีค่าใกล้เคียงกันมาก หรืออาจเท่ากันจึงทำให้ทราบได้ว่าลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนบริเวณกึ่งกลางของอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11: โปรแกรมที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นซึ่งค่าความต่างของแรงดันที่เข้าใกล้ศูนย์แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์อยู่บริเวณจุดกึ่งกลาง

### ขั้นตอนการทดลอง

#### ตอนที่ 1 การทดลองเพื่อหาค่ามุมที่ดีที่สุด

1. จัดเตรียมระบบวัดทางแสงสำหรับเซนเซอร์คานกลขนาดจิ๋วให้พร้อม
2. ทำการยิงลำแสงเลเซอร์ไปยังคานกลขนาดจิ๋วให้ลำแสงเลเซอร์สะท้อนเข้าสู่คูวอดแดรนทีโฟโอดีเทคเตอร์ โดยมุมตกกระทบบของลำแสงเลเซอร์คือ 40 องศา
3. เพิ่มค่าแรงดันที่ใช้ในการขับเลเซอร์ขึ้น เริ่มตั้งแต่ 0 เพิ่มทีละ 0.1 โวลต์ บันทึกค่าตัวแปรต่างๆดังนี้  $V_{com}$ ,  $V_{uc}$ ,  $I_{laser}$ ,  $V_{A+B}$ ,  $V_{C+D}$ ,  $V_{delta}$ ,  $V_{total}$  บันทึกผลจนกระทั่งแรงดันมีค่าเป็น 1 โวลต์

- เปลี่ยนมุมตกกระทบเป็น 50, 60 องศา ตามลำดับแล้วทำตามของ 2 และ 3
- คำนวณหาค่า  $V_{total}$  เฉลี่ย
- คำนวณที่ให้ค่า  $V_{total}$  เฉลี่ย มากที่สุดจะเป็นมุมที่เหมาะสมที่สุด

**ตอนที่ 2** การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเอียงของคานกับตำแหน่งของเลเซอร์ที่เปลี่ยนไป

- จัดมุมตกกระทบของเลเซอร์ตามมุมที่หาได้จากตอนที่ 1
- จ่ายแรงดันที่ใช้ในการขับเลเซอร์เท่ากับ 0.96 โวลต์
- ปรับระยะระหว่างคานกลขนาดจิวถึงควอดแดรนต์โฟโตไดโอด เป็นระยะ 4.5 เซนติเมตร
- ปรับมุมเอียงของคานกลขนาดจิวเพิ่มขึ้นที่ 0.2 องศา แล้วบันทึกค่าแรงดันเหมือนตอนที่ 1 โดยเริ่มตั้งแต่ 0 องศา ถึง 2 องศา
- ปรับระยะระหว่างคานกลขนาดจิวถึงควอดแดรนต์โฟโตไดโอด เป็นระยะ 6.0 และ 7.5 เซนติเมตร ตามลำดับ แล้วทำการทดลองข้อที่ 4 ซ้ำ
- บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.2 ผลการศึกษาระบบวัดความโค้งของเซนเซอร์คานกลจิวด้วยเทคนิคทางแสง เวอร์ชันที่ 2 การวิเคราะห์หามุมตกกระทบเหมาะสมที่สุดของระบบ

จากการทดลองยิงลำแสงเลเซอร์ไปตกกระทบบนคานกลขนาดจิวที่มุมต่างๆ แล้วให้ลำแสงที่สะท้อนจากคานกลขนาดจิวตกกระทบลงบนจุดกึ่งกลางของควอดแดรนต์โฟโตดีเทคเตอร์ (Quadrant Photodiode) โดยให้คานกลขนาดจิวอยู่ในแนวระดับ แล้วทำการทดลอง เพื่อหามุมตกกระทบที่เหมาะสมที่สุด จะทำการวัดจากข้อมูลแรงดันที่ของควอดแดรนต์โฟโตดีเทคเตอร์วัดได้ค่าที่มากที่สุด โดยค่าที่วัดจากการทดลองมีดังนี้

$V_{com}$  คือ ค่าแรงดันที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการส่งไมโครคอนโทรลเลอร์ในการขับเลเซอร์

$V_{uc}$  คือ ค่าแรงดันที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จ่ายให้แก่วงจรขับเลเซอร์

$I_{laser}$  คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านเลเซอร์ไดโอด

$V_{A+B}$  คือ ค่าผลรวมแรงดันที่ได้จากควอดแดรนต์ดีเทคเตอร์ในส่วนของควอดแดรนต์ A และ B

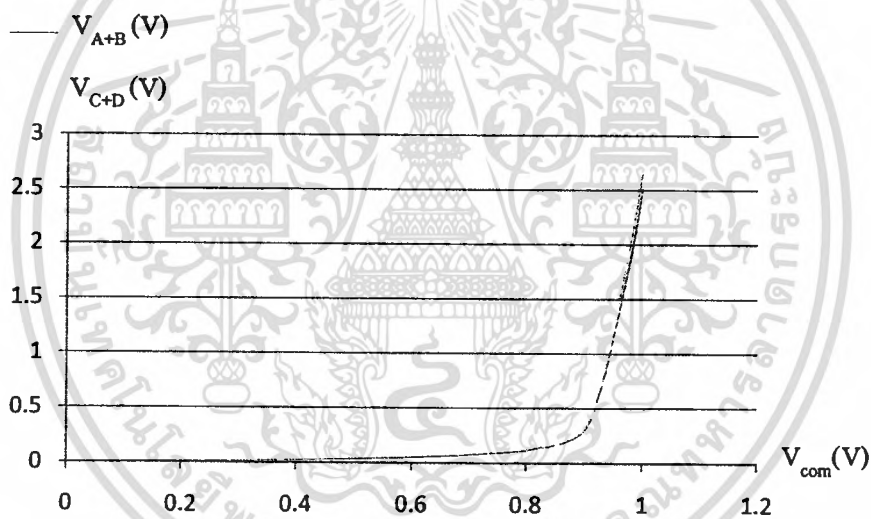
$V_{C+D}$  คือ ค่าผลรวมแรงดันที่ได้จากควอดแดรนต์ดีเทคเตอร์ในส่วนของควอดแดรนต์ C และ D

$V_{Delta}$  คือ ค่าผลต่างแรงดันของ  $V_{A+B}$  กับ  $V_{C+D}$

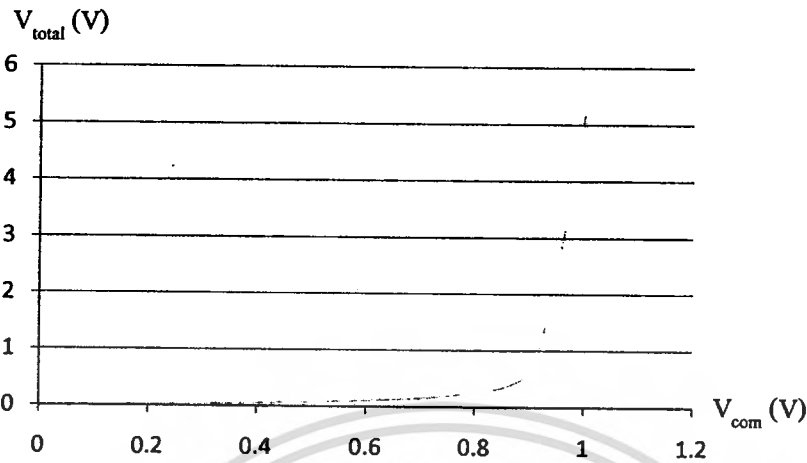
$V_{Total}$  คือ ค่าผลรวมแรงดันของ  $V_{A+B}$  กับ  $V_{C+D}$

เมื่อมีพลังงานโฟตอนที่เกิดจากลำแสงของเลเซอร์ไดโอดเข้ามาตกกระทบในแต่ละส่วนของพื้นที่ตรวจวัด A และ B และพื้นที่ตรวจวัด C และ D ในควอดแดรนต์โฟโอดีทีเทคเตอร์จะทำให้ได้ค่ากระแสออกมา จากนั้นจะทำการแปลงค่ากระแสที่ได้เป็นแรงดันเพื่อวัดค่า  $V$  โดยค่าที่วัดได้แต่ละค่าจะเปลี่ยนไปเมื่อทำการเปลี่ยนค่า  $V_{com}$  ที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอด และมีความสัมพันธ์ตามกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของเลเซอร์ไดโอด กราฟจะแสดงให้เห็นถึงค่า  $V$  ที่ได้จากการแปลงค่ากระแสในแต่ละส่วนของพื้นที่ตรวจวัด A และ B และพื้นที่ตรวจวัด C และ D ในควอดแดรนต์โฟโอดีทีเทคเตอร์โดยในการทดลองจะกำหนดให้ลำแสงของเลเซอร์ไดโอดยิงไปที่จุดกึ่งกลางระหว่างพื้นที่ตรวจวัด A และ B กับ C และ D กราฟที่ได้จะต้องมีความใกล้เคียงกัน นำข้อมูลจากการทดลองมาพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลจะได้กราฟดังนี้

**มุมตกกระทบเท่ากับ 40 องศา**

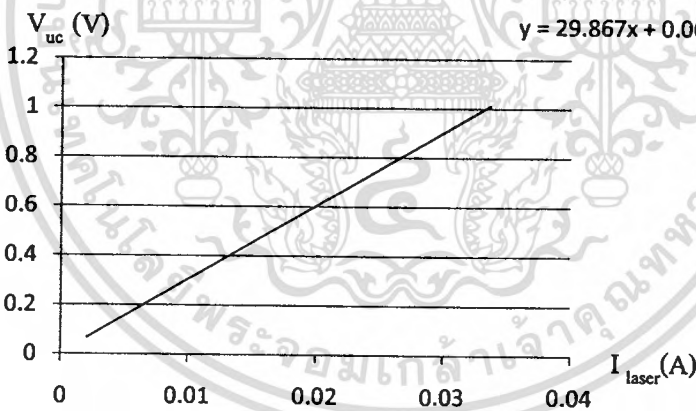


รูปที่ 4.12: กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{com}$  กับ  $V_{A+B}$  และความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{com}$  กับ  $V_{C+D}$  ที่มุม 40 องศา



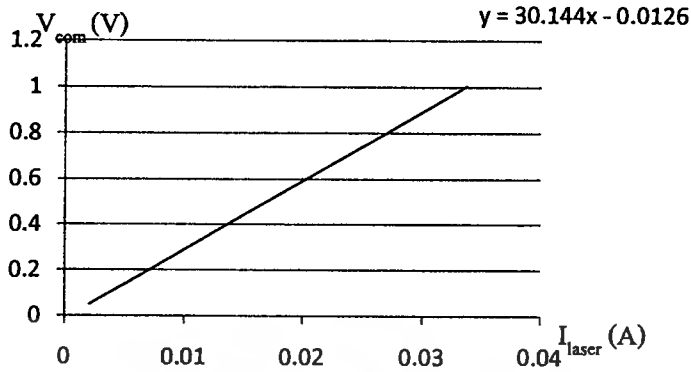
รูปที่ 4.13: กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{com}$  กับ  $V_{total}$  ที่มุม 40 องศา

จากกราฟที่ 4.13 แสดงถึงการนำค่า  $V_{A+B}$  และ  $V_{C+D}$  มารวมกันจะได้เป็น  $V_{total}$  ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการแปลงกระแสในพื้นที่ตรวจวัดทั้งหมดในควอดแดรนต์โฟโตดีเทคเตอร์ ความสัมพันธ์ของ  $V_{com}$  และ  $V_{total}$  มีลักษณะเป็นเชิงเส้นดังกราฟที่ 4.13



รูปที่ 4.14: กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{laser}$  กับ  $V_{uc}$  ที่มุม 40 องศา

จากกราฟที่ 4.14 แสดงถึงแรงดันควบคุมที่ขับออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อไปควบคุมการจ่ายกระแสให้กับเลเซอร์ไดโอดซึ่งความชันที่ได้แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างแรงดันควบคุมกับกระแสที่จ่ายให้กับเลเซอร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราส่วนในวงจรขับกระแสของฮาวแลนด์ ซึ่งได้จากการคำนวณ  $V/I = 30$  มิลลิโวลต์/มิลลิแอมป์

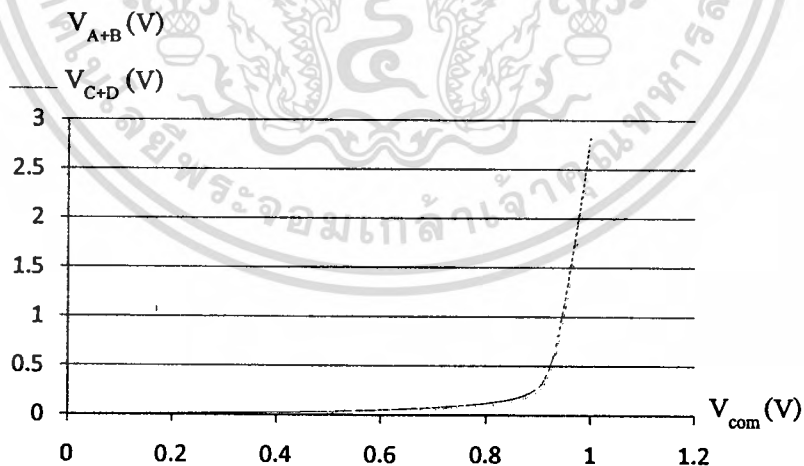


รูปที่ 4.15: กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{laser}$  กับ  $V_{com}$  ที่มุม 40 องศา

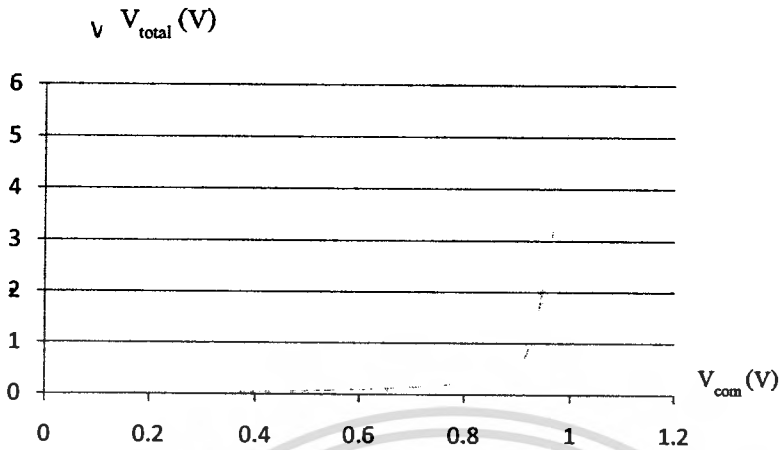
จากกราฟที่ 4.15 แสดงถึงความสัมพันธ์ของแรงดันควบคุมที่ถูกป้อนลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับกระแสที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอด ซึ่งความชันของกราฟมีค่าใกล้เคียงกับความชันของกราฟที่ 4.14 ทำให้ทราบว่า  $V_{uc}$  มีค่าใกล้เคียงกับ  $V_{com}$  ที่ป้อนเข้าไป

จากนั้นผู้วิจัยทำการทดลองซ้ำที่มุมตกกระทบ 50 และ 60 องศา ตามลำดับ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับมุมตกกระทบ 40 องศา ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.16 – 4.23

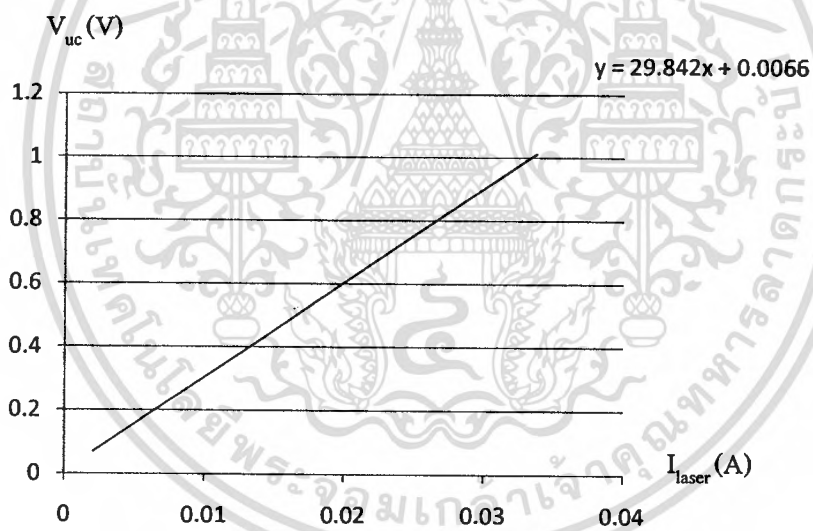
**มุมตกกระทบเท่ากับ 50 องศา**



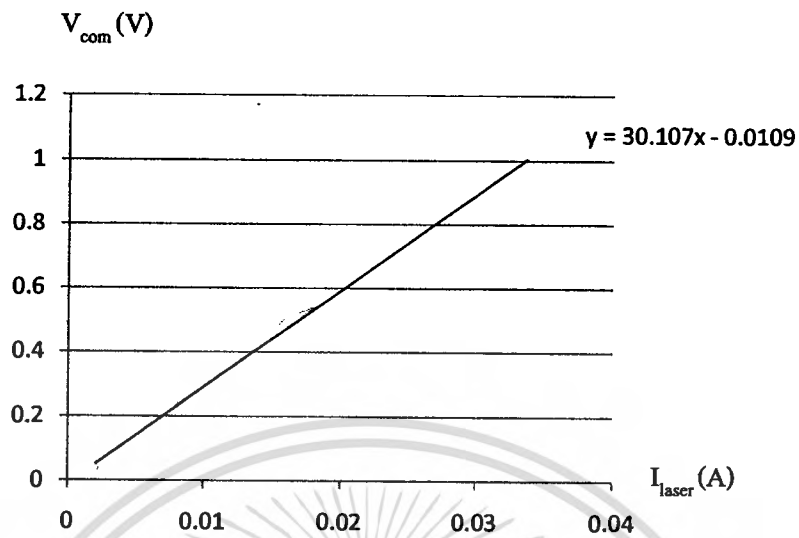
รูปที่ 4.16: กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{com}$  กับ  $V_{A+B}$  และความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{com}$  กับ  $V_{C+D}$  ที่มุม 50 องศา



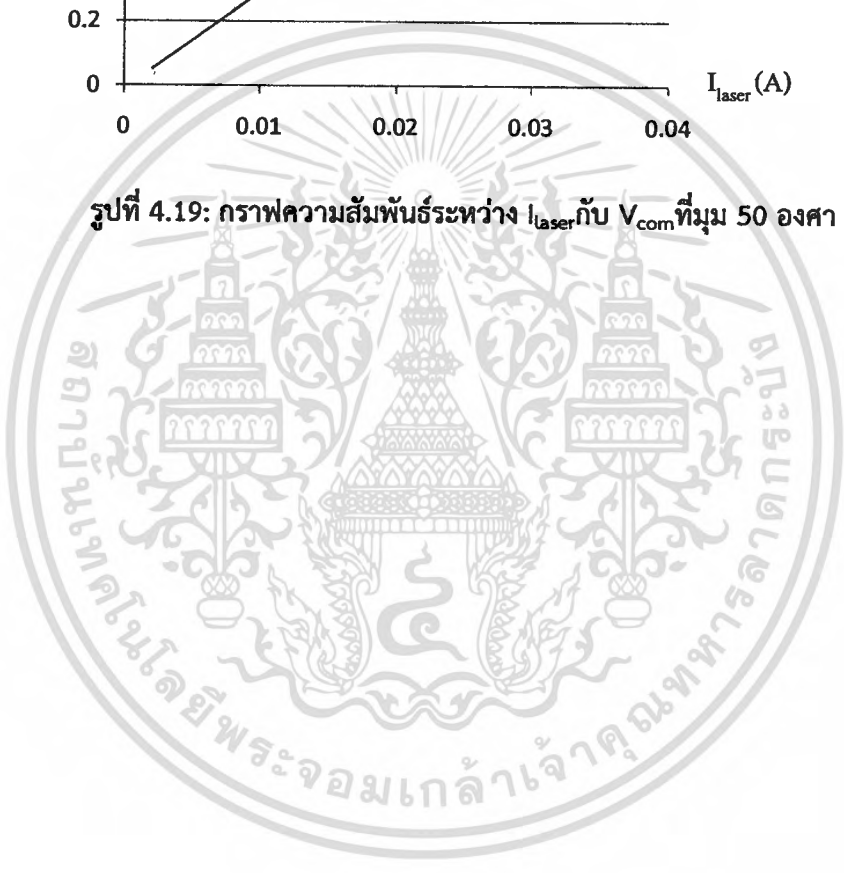
รูปที่ 4.17: กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{com}$  กับ  $V_{total}$  ที่มุม 50 องศา



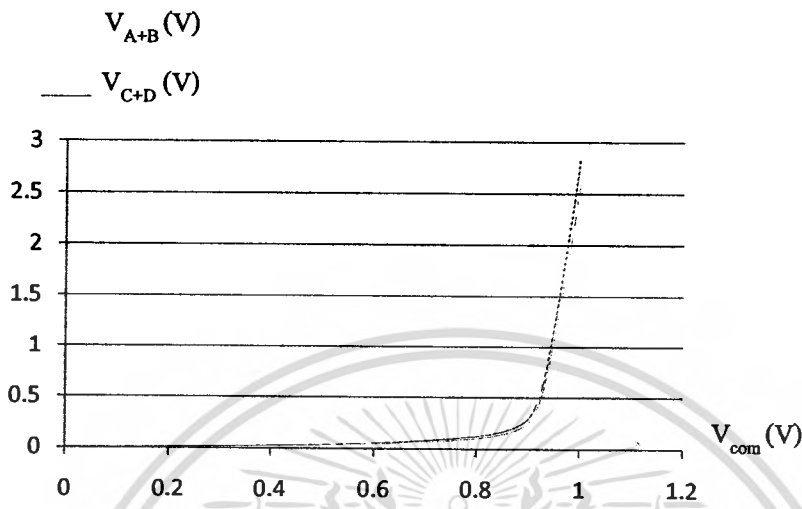
รูปที่ 4.18: กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{laser}$  กับ  $V_{uc}$  ที่มุม 50 องศา



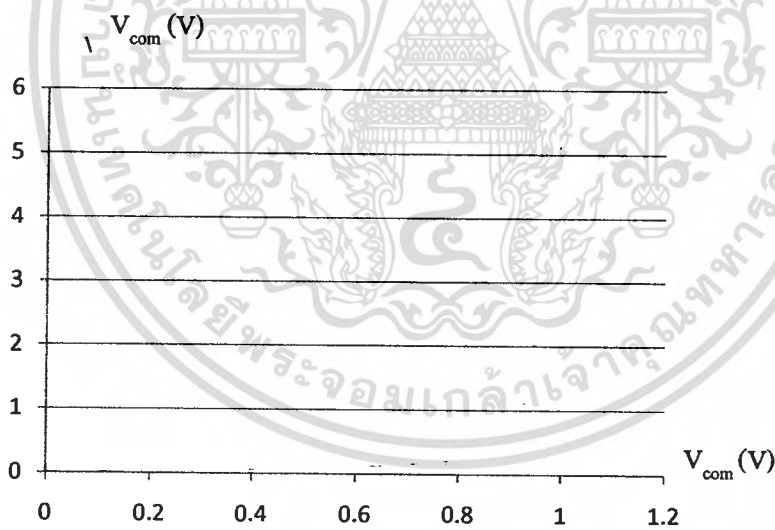
รูปที่ 4.19: กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{laser}$  กับ  $V_{com}$  ที่มุม 50 องศา



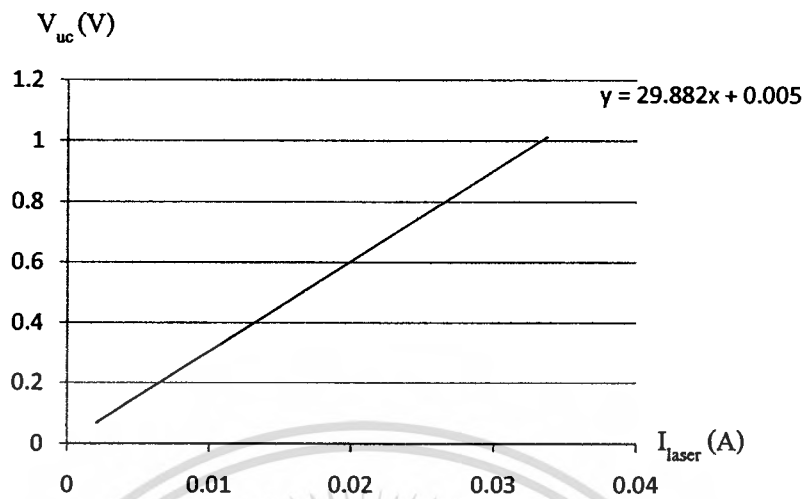
**มอดกกระทบเท่ากับ 60 องศา**



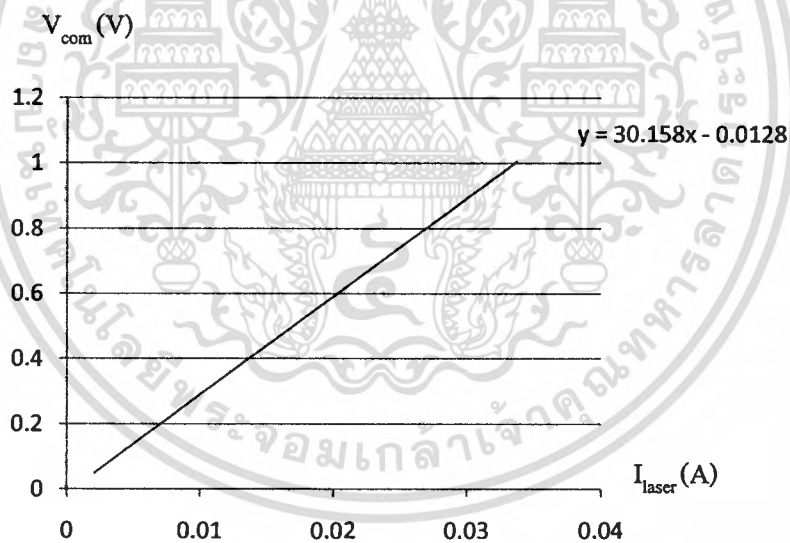
**รูปที่ 4.20:** กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{com}$  กับ  $V_{A+B}$  และความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{com}$  กับ  $V_{C+D}$  ที่มุม 60 องศา



**รูปที่ 4.21:** กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{com}$  กับ  $V_{total}$  ที่มุม 60 องศา



รูปที่ 4.22: กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{laser}$  กับ  $V_{uc}$  ที่มุม 60 องศา



รูปที่ 4.23: กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_{laser}$  กับ  $V_{com}$  ที่มุม 60 องศา

### การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของแรงดันและมุมที่เปลี่ยนไปของคานกลขนาดจิ๋ว

เนื่องจากการประยุกต์ใช้ระบบนี้ มีความจำเป็นที่จะต้องทราบว่า คานกลขนาดจิ๋วมีการเบี่ยงเบนหรือเอียงลงไปกี่องศา ในการทดลองนี้ผู้ทำการทดลองจึงได้ทำการจำลองมุมเอียงของคานกลขนาดจิ๋วตั้งแต่ 0-2 องศา โดยใช้อุปกรณ์ปรับมุม ซึ่งในการทดลองกำหนดให้ระยะห่างระหว่าง ควอดแดรนท์โฟโต้ดีเทคเตอร์กับคานกลขนาดจิ๋วเปลี่ยนแปลงไป 3 ระดับ คือ 4.5, 6, 7.5 เซนติเมตร และมีระยะห่างระหว่างเลเซอร์กับคานกล

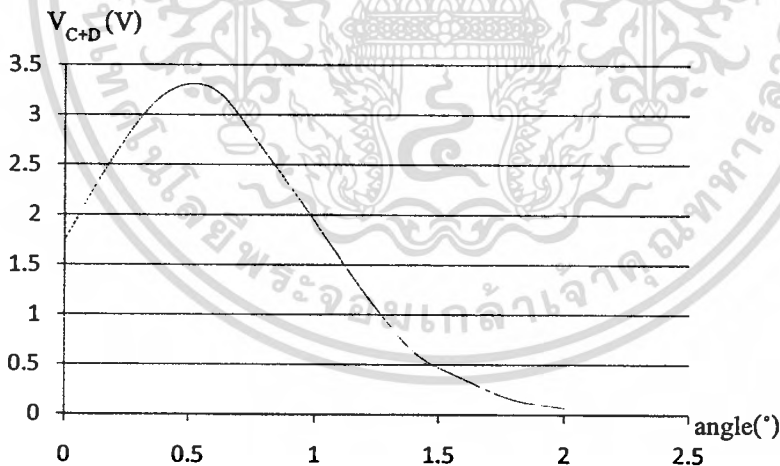
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดจิวคองที่เท่ากับจุดโฟกัสนั้นคือเท่ากับ 8 เซนติเมตร และทำที่มุม 50 องศา กับแนวระดับโดยกำหนดให้  $V_{uc} = 0.982$  โวลต์ และ  $I_{laser} = 32.7$  มิลลิแอมป์ ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนควอดแดรนท์โฟโตดีเทคเตอร์ฝั่ง C กับ D เมื่อมุมเอียงของคานกลขนาดจิวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 – 2 องศา

จากความสัมพันธ์ของกราฟ  $V_{A+B}$ ,  $V_{C+D}$  กับ  $V_{com}$  พบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันเพื่อไปควบคุมกระแสของเลเซอร์ ค่า  $V_{A+B}$  และ  $V_{C+D}$  จะยังไม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากโครงสร้างของ PSD เป็น PN junction จึงต้องมีแสงตกกระทบบจนถึงจุดแรงดันไบอัสก่อนนั้นคือประมาณ 0.9 โวลต์ จึงจะเริ่มนำกระแส จากกราฟ  $V_{A+B}$  และ  $V_{C+D}$  จะมีค่าเท่ากันอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ทราบว่า การจัดวางตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ อยู่ในตำแหน่งที่สมมาตรแล้ว

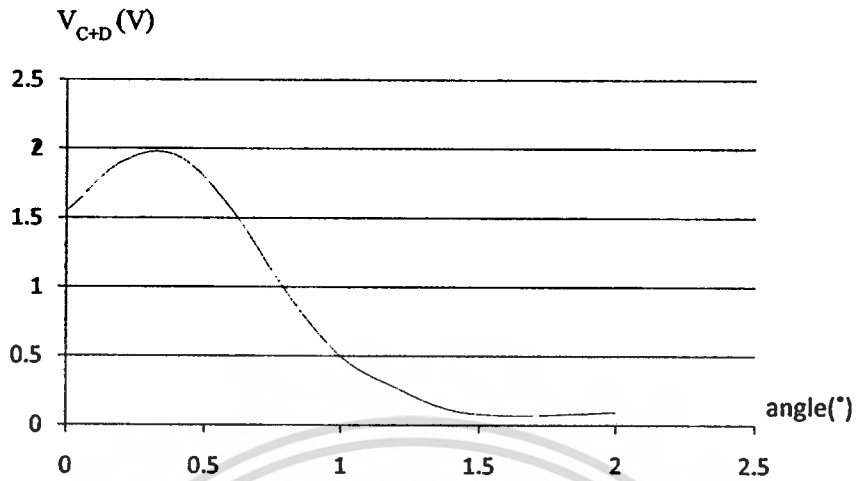
จากกราฟความสัมพันธ์  $V_{com}$  กับ  $V_{total}$  เป็นการเปรียบเทียบว่าเมื่อทำการจ่ายแรงดันไปควบคุมกระแสของเลเซอร์แล้ว จะเริ่มรับรู้ข้อมูลแรงดันจาก PSD ได้ที่ช่วงไหนและเป็นการตรวจสอบค่าสูงสุดของการรับข้อมูลนั้นก็คือผลรวมของทั้งสี่ส่วนใน PSD (A, B, C และ D)

จากกราฟความสัมพันธ์  $I_{laser}$  กับ  $V_{com}$  ความชันของกราฟคืออัตราส่วนระหว่างแรงดันควบคุมกับกระแสที่ได้ โดยอัตราส่วนนี้เป็นไปตามการออกแบบวงจรขับกระแสแบบฮาวแลนด์ ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 30 โวลต์/แอมแปร์ จากความชันของแต่ละมุมทำให้ทราบว่าการทำงานของวงจรเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้

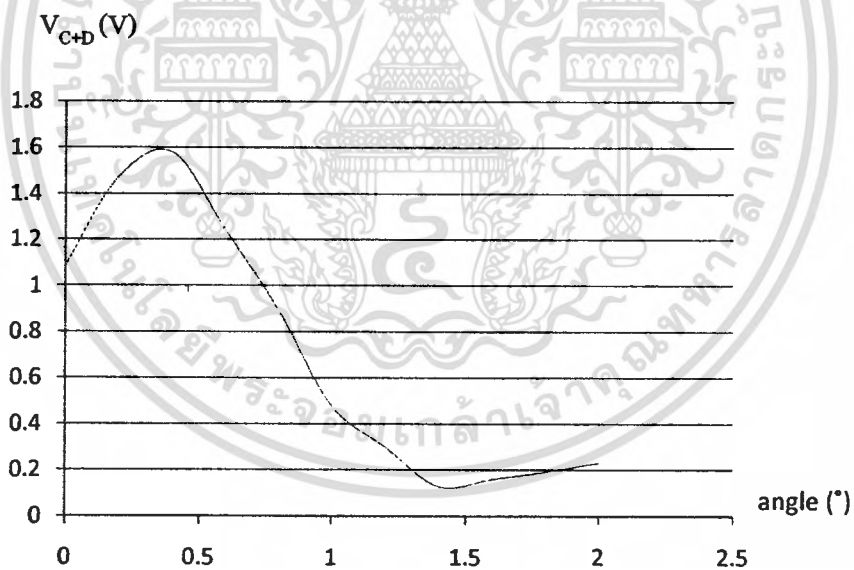


รูปที่ 4.24: กราฟความสัมพันธ์ระหว่างองศาการเอียงของคานกลขนาดจิวกับค่า  $V_{C+D}$  ที่ระยะ 4.5 เซนติเมตร

จากกราฟที่ 4.24 แสดงค่า  $V_{C+D}$  โดยค่าที่ได้แต่ละค่าจะขึ้นอยู่กับระนาบของคานกลขนาดจิวที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละมุมมอง



รูปที่ 4.25: กราฟความสัมพันธ์ระหว่างองศาการเอียงของคานกลขนาดจี้กับค่า  $V_{C+D}$  ที่ระยะ 6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.26: กราฟความสัมพันธ์ระหว่างองศาการเอียงของคานกลขนาดจี้กับค่า  $V_{C+D}$  ที่ระยะ 7.5 เซนติเมตร

#### 4.3 สรุปผลการทดลองเบื้องต้น

เมื่อทำการยิงลำแสงเลเซอร์ไปตกกระทบบนคานกลขนาดจิ๋ว ลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากคานกลขนาดจิ๋วจะมีทิศทางเข้าสู่ควอดแดรนทีโฟโตดีเทคเตอร์ โดยมุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์มุมต่างๆ จะมีผลทำให้ค่าแรงดันที่ได้จากควอดแดรนทีโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าแตกต่างกัน เมื่อระยะห่างระหว่างควอดแดรนทีโฟโตดีเทคเตอร์กับคานกลขนาดจิ๋วมีค่าคงที่ เมื่อระยะห่างระหว่างควอดแดรนทีโฟโตดีเทคเตอร์กับคานกลขนาดจิ๋วมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยมุมตกกระทบและมุมสะท้อนมีค่าเท่าเดิม จะพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างควอดแดรนทีโฟโตดีเทคเตอร์กับคานกลขนาดจิ๋วเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความเข้มแสงลดน้อยลงทำให้แรงดันที่ได้จากควอดแดรนทีโฟโตดีเทคเตอร์ลดน้อยลงด้วย

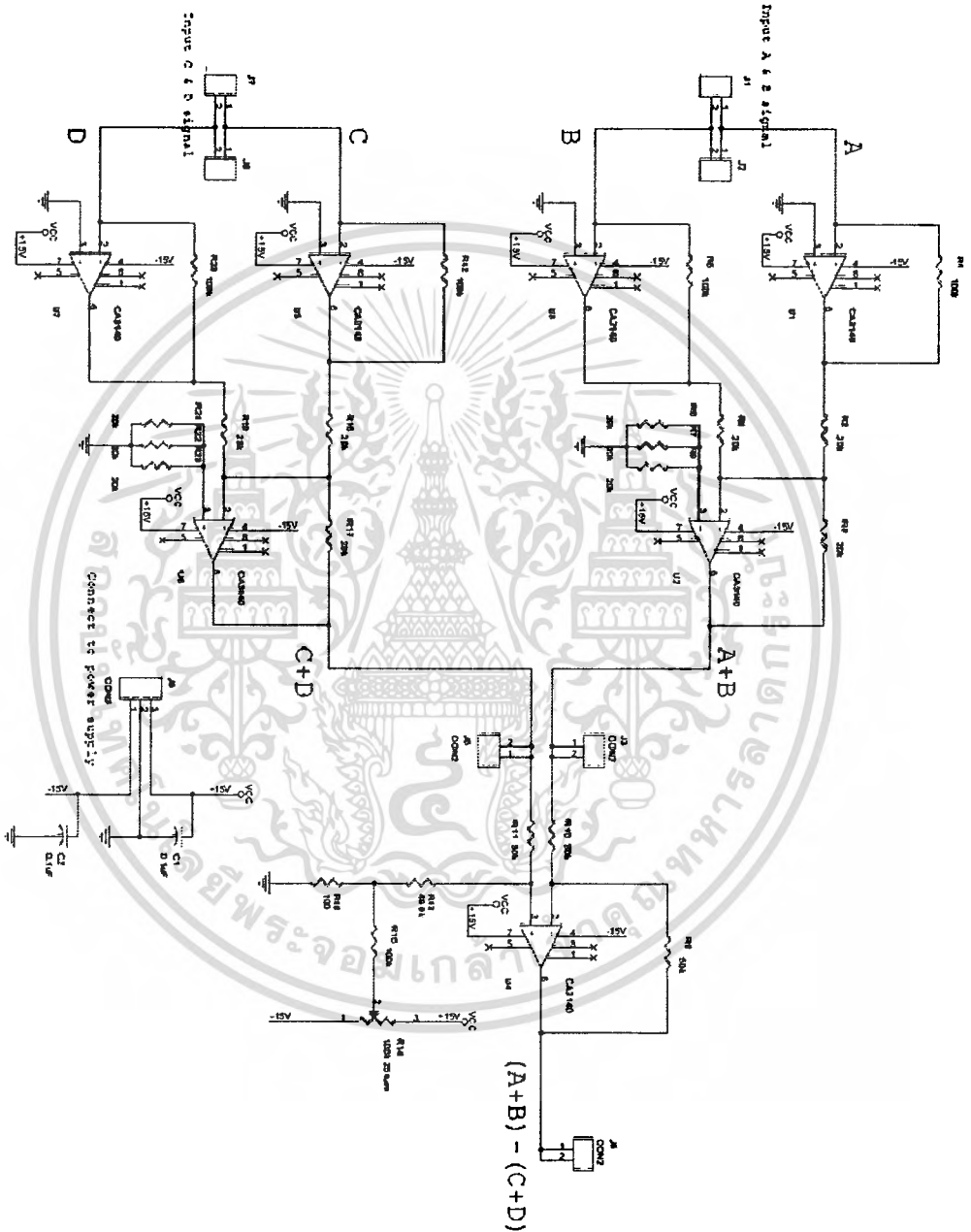
จากผลการทดลองหามุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์ที่ดีที่สุดจะเห็นได้ว่ามุมตกกระทบที่ดีที่สุดของเลเซอร์คือ มุม 50 องศา เนื่องจากที่มุมดังกล่าวทุกค่าแรงดันที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดจะทำให้ควอดแดรนทีโฟโตไดโอดสามารถรับแสงได้มากกว่ามุมอื่นๆ ทำให้ค่าแรงดันที่อ่านได้ที่มุม 50 องศา มีค่าสูงกว่าแรงดันที่อ่านได้จากมุมอื่นๆ

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเมื่อทำการเอียงคานกลขนาดจิ๋วไปเป็นมุมที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบลงบนควอดแดรนทีโฟโตไดโอดฝั่ง A และ B จะมีความเข้มลดลงเรื่อยๆ และ ลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบลงบนควอดแดรนทีโฟโตไดโอดฝั่ง C และ D จะมีความเข้มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงมุมค่าหนึ่งจะทำให้ลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบลงบนควอดแดรนทีโฟโตไดโอดฝั่ง C และ D มีขนาดลดลง และลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบลงบนควอดแดรนทีโฟโตไดโอดฝั่ง A และ B มีความเข้มลดลงด้วย แสดงว่า ณ มุมดังกล่าวทำให้ลำแสงเลเซอร์เริ่มหลุดออกจากควอดแดรนทีโฟโตดีเทคเตอร์ เมื่อคานกลขนาดจิ๋วเอียงมากกว่ามุมดังกล่าวจะทำให้ลำแสงเลเซอร์ไม่ตกกระทบลงบนควอดแดรนทีดีเทคเตอร์

ระยะห่างระหว่างควอดแดรนทีโฟโตดีเทคเตอร์กับคานมีผลกับค่าแรงดันที่วัดได้ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างควอดแดรนทีโฟโตดีเทคเตอร์กับคานกลขนาดจิ๋วเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสว่างของลำแสงเลเซอร์ลดลงเป็นผลให้ค่าแรงดันที่ได้จากควอดแดรนทีโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าลดลงด้วย โดยที่ระยะทาง 4.5, 6, 7.5 เซนติเมตร แรงดันสูงสุดที่ได้จากควอดแดรนทีโฟโตดีเทคเตอร์ในแต่ละระยะมีค่า 3.46, 3.08, 2.16 โวลต์ ตามลำดับ

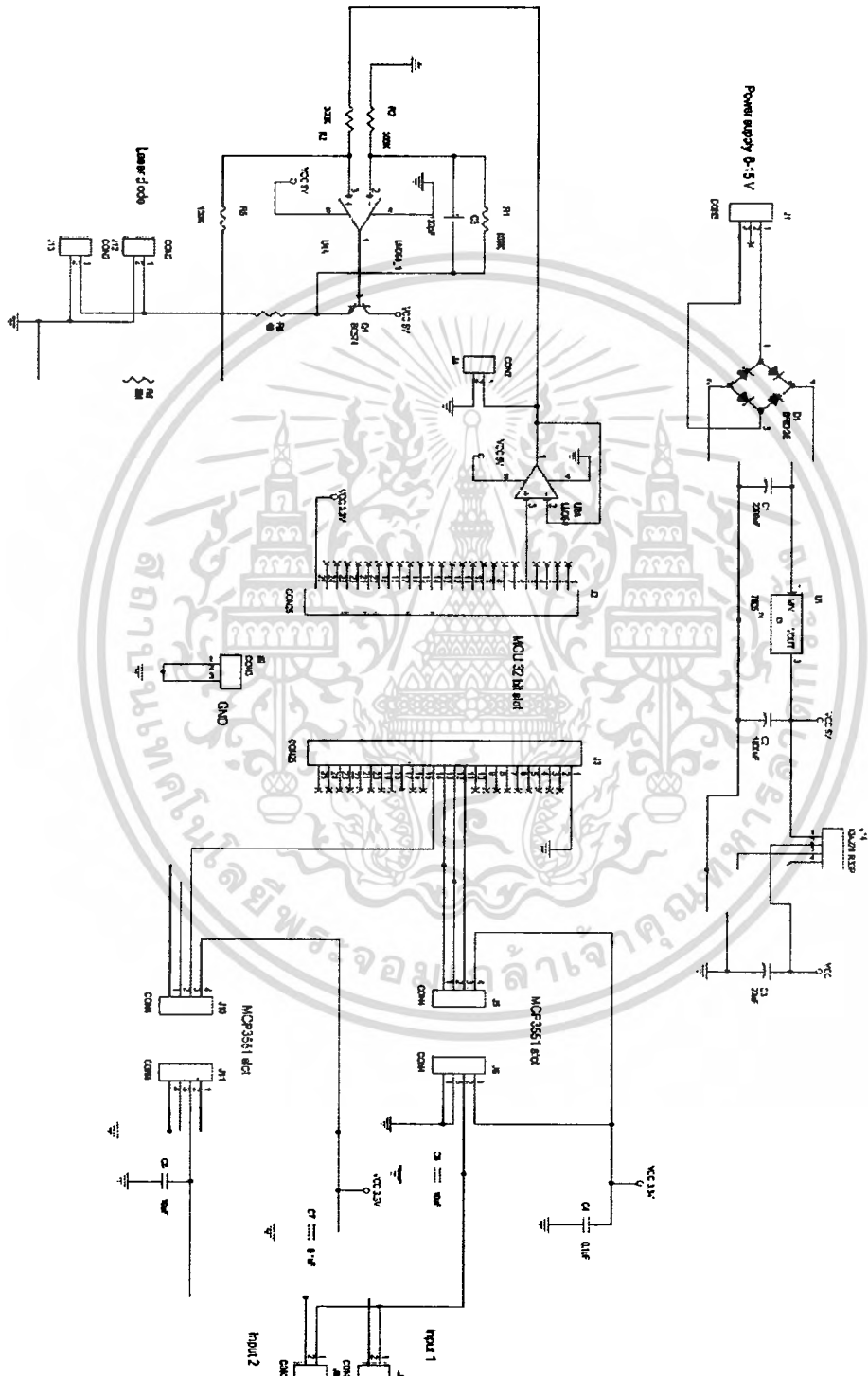
4.4 ภาคผนวก

แผนผังวงจร



แผนผังวงจรรวมแรงดัน

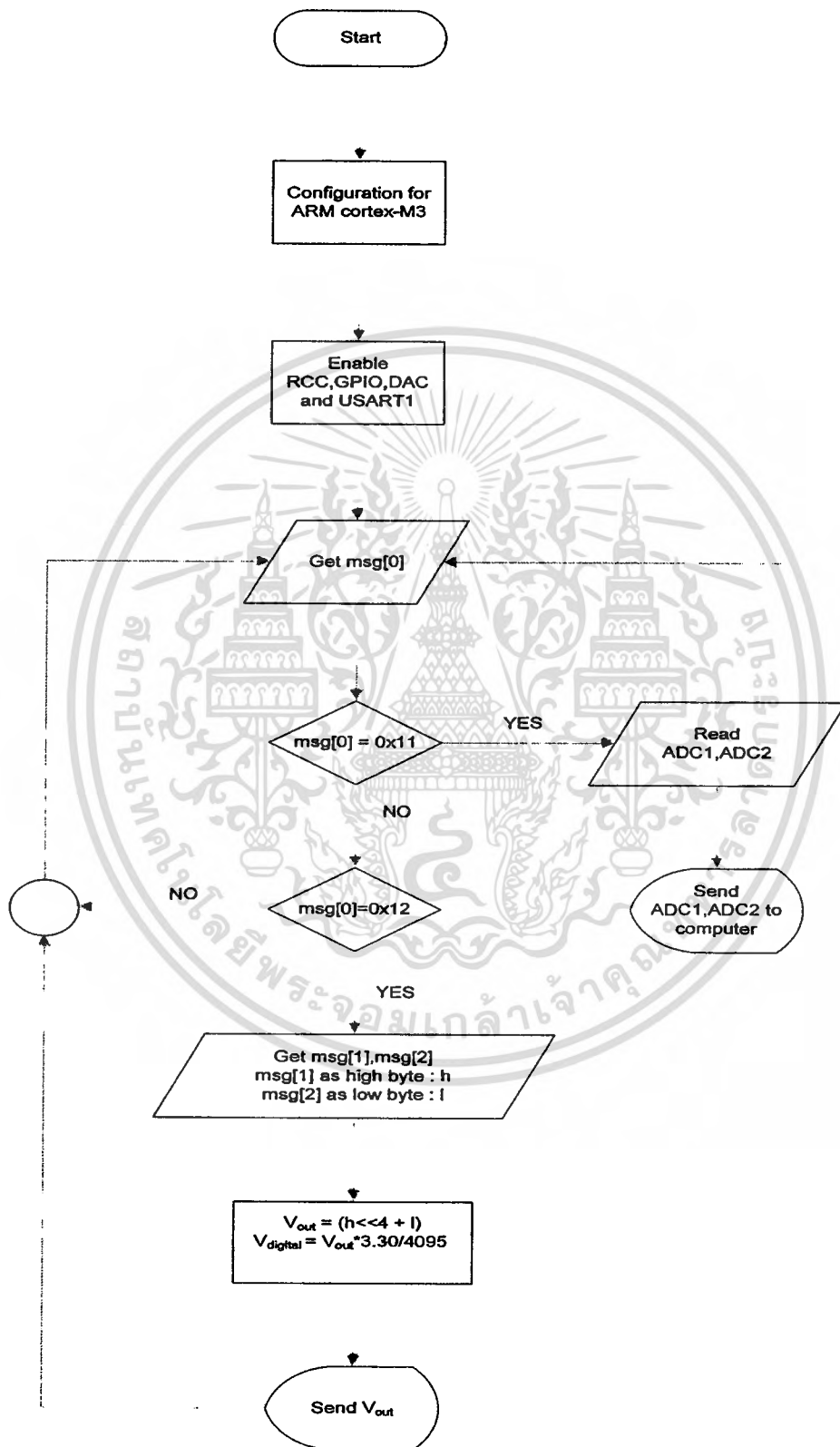
โครงการการพัฒนาตัวตรวจจับไอออนของโลหะด้วยนาโนเซนเซอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการแพทย์  
 โดย บดินทร์ ดำรงศักดิ์และคณะ



แผนผังวงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 4-21  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flowchart of Microcontroller Programming.



### ซอสซี้โค้ดโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

```
#include "stm32f10x_lib.h"          // Include STM32 header file

#include "stdio.h"

#define channel 2

unsigned int msg[3],vout;

float value,aout,iout;

void delay(unsigned long ms)      // delay 1 ms per count at 8MHz and PLL9x or SYSCLK
= 72 MHz
{
    volatile unsigned long i,j;
    for(i=0;i<ms;i++)
        for(j=0;j<5525;j++);
}

// -----Function RCC Configuration -----

void RCC_setup(void)
{
    ErrorStatus HSEStartUpStatus;           // Keep reeoe status

    RCC_DeInit();                          // RCC system reset(for debug
purpose)

    RCC_HSEConfig(RCC_HSE_ON);             // Enable HSE

    HSEStartUpStatus = RCC_WaitForHSEStartUp(); // Wait till HSE is ready
```

```

if(HSEStartUpStatus == SUCCESS)
{
    RCC_HCLKConfig(RCC_SYSCLK_Div1);           // HCLK = SYSCLK
    RCC_PCLK2Config(RCC_HCLK_Div1);           // PCLK = HCLK
    RCC_PCLK1Config(RCC_HCLK_Div2);           // PCLK = HCLK/2
    FLASH_SetLatency(FLASH_Latency_2);       // Flash 2 Wait state
    FLASH_PrefetchBufferCmd(FLASH_PrefetchBuffer_Enable); // Enable Prefetch Buffer
    RCC_PLLConfig(RCC_PLLSource_HSE_Div1,RCC_PLLMul_9); // PLLCLK = 8MHz*9 =
72MHz
    RCC_PLLCmd(ENABLE);                        // Enable PLL
    RCC_ADCCLKConfig(RCC_PCLK2_Div4);          // ADCCLK = PCLK2/4
    while(RCC_GetFlagStatus(RCC_FLAG_PLLRDY) == RESET); // Wait untill PLL is ready
    RCC_SYSCLKConfig(RCC_SYSCLKSource_PLLCLK); // Select PLL as system
clock source
    while(RCC_GetSYSCLKSource() != 0x08);      // Wait till PLL is used as
system clock source
}
}

//----- Function GPIO Configuration -----

void GPIO_setup()
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;

```

```
// Enable GPIO clock

RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOA | RCC_APB2Periph_GPIOC |
RCC_APB2Periph_AFIO,ENABLE);

// For SPI PIN PC3 as SCLK , PC5 as CS1 , PC2 as CS2

GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_2 | GPIO_Pin_3 | GPIO_Pin_5;

GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;

GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_Out_PP;

GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStructure);

// PC4 as SI

GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_4 ;

GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN_FLOATING;

GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStructure);

// Configure A4 as analog output

GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_4;

GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AIN;

GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);

// Configure USART1 Tx (PA9) as alternate function push-pull

GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_9;

GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;

GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF_PP;

GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);

// Configure USART1 Rx (PA10) as input floating
```

```
GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_10;

GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN_FLOATING;

GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure);
}

void DAC_setup()
{
    // DAC Periph clock enable
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_DAC, ENABLE);
    DAC_InitTypeDef DAC_InitStructure;
    // DAC channel1 Configuration
    DAC_InitStructure.DAC_Trigger = DAC_Trigger_Software;
    DAC_InitStructure.DAC_OutputBuffer = DAC_OutputBuffer_Enable;
    DAC_InitStructure.DAC_WaveGeneration = DAC_WaveGeneration_None;
    DAC_Init(DAC_Channel_1, &DAC_InitStructure);
    /* Enable DAC Channel 1: Once the DAC channel 1 is enable, PA4 is
    automatically connected to the DAC converter. */
    DAC_Cmd(DAC_Channel_1, ENABLE);
}

void USART1_setup()
{
    USART_InitTypeDef USART_InitStructure;
```

```
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_USART1,ENABLE);
```

```
// USART1 configured

USART_InitStructure.USART_BaudRate = 115200;

USART_InitStructure.USART_WordLength = USART_WordLength_8b;

USART_InitStructure.USART_StopBits = USART_StopBits_1;

USART_InitStructure.USART_Parity = USART_Parity_No;

USART_InitStructure.USART_HardwareFlowControl = USART_HardwareFlowControl_None;

USART_InitStructure.USART_Mode = USART_Mode_Rx | USART_Mode_Tx;

USART_Init(USART1, &USART_InitStructure); // Configure the USART1

USART_Cmd(USART1, ENABLE); // Enable USART1
}

void usart1_putc(unsigned char c)
{
    while(USART_GetFlagStatus(USART1,USART_FLAG_TXE)==RESET); // Wait until
transmission ready

    USART_SendData(USART1,(int)c); // Send character
}

void usart1_puts(unsigned char *s)
{
    while(*s) // Check end of string
    {
        usart1_putc(*s++); // Send character 1 time
    }
}
```

```

}

int usart1_getc()
{
    while(USART_GetFlagStatus(USART1,USART_FLAG_RXNE)==RESET);    // Wait until
    receive data

    return(USART_ReceiveData(USART1));
}

void receive_DAC(unsigned int h,unsigned int l)
{
    vout = (h<<4) + l;
    // value = (aout/3.3)*4095;
    value = vout;    // convert int to float
    aout = (value*3.3)/4095;
    iout = aout/30;
    DAC_SetChannel1Data(DAC_Align_12b_R, vout);
    DAC_SoftwareTriggerCmd(DAC_Channel_1, ENABLE);
}

unsigned long spi_read_1(void) // SPI Mode 0,0
{
    unsigned char i=0,x;

    unsigned long val1 = 0;

    //GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_3,1);    // SCLK = 1

```

```

GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_5,0); // CS1 = 0

//GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_3,0); // SCLK = 0

for(i=0;i<25;i++)

{

    val1 <<=1 ;

    GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_3,1); // SCLK = 1;

    asm("nop");

    asm("nop");

val1 += GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC,GPIO_Pin_4); // receive value from Dout

    asm("nop");

    asm("nop");

    GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_3,0); // SCLK = 0

}

//GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_3,1); // SCLK = 1;

//delay(1);

GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_5,1); // CS1 = 1;

GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_2,1); // CS2 = 1

GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_3,0); // SCLK = 0

return(val1);

}

```

```

unsigned long spi_read_2(void) // SPI Mode 0,0

```

```

{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unsigned char i=0,x;

    unsigned long val2 = 0;

GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_2,0);    // CS2 = 0

    for(i=0;i<25;i++)

    {

        val2 <<=1 ;

        GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_3,1);    // SCLK = 1;

        asm("nop");

        asm("nop");

        val2 += GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC,GPIO_Pin_4);    // receive value from Dout

        asm("nop");

        asm("nop");

        GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_3,0);    // SCLK = 0;

    }

    //GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_3,1);    // SCLK = 1;

    //delay(1);

    GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_2,1);    // CS2 = 1;

    GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_5,1);    // CS1 = 1;

    GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_3,0);    // SCLK = 0

    return(val2);

}

```

```
int main()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
{  
  
    char i=0;  
  
    //unsigned long dat,info1,info2;  
  
    RCC_setup();  
  
    GPIO_setup();  
  
    DAC_setup();  
  
    USART1_setup();  
  
    GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_5,1); // CS1 = 1  
    GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_2,1); // CS2 = 1  
    GPIO_WriteBit(GPIOC, GPIO_Pin_3,0); // SCLK = 0  
// send 0x11 to MCU for initial program  
while(1)  
    {  
        msg[0] = usart1_getc();  
        if(msg[0] == 0x11)  
            {  
                ADC_value();  
  
                ADC_value();  
            }  
        else if(msg[0] == 0x12)  
            {  
                msg[1] = usart1_getc();
```

```
msg[2] = usart1_getc();  
  
receive_DAC(msg[1],msg[2]);  
  
}  
  
}  
  
}
```

### ข้อสขี้โค้ดโปรแกรม Visual Basic

Imports System.Drawing.Drawing2D

Public Class Form1

Dim c1, c2 As DYNAPLOT3Lib.Curve

Dim m1 As DYNAPLOT3Lib.Marker

Dim m2 As DYNAPLOT3Lib.Marker

Dim dataC1(0), dataC2(0) As Double

Dim X0 As Double = 0

Dim X1(), X2(), Y1(), Y2() As Double

Dim deltaX As Double = 0.1

Dim PtIndex As Integer = 0

Dim dataNum As Integer = 50

Dim NewPtLaser As Double

Dim deltaVoltage

Const pi = 3.1415926535897931

Dim Start As Boolean

Dim IncDecAandB As Double

Dim FullScale As Double = 3.3

Dim ReciveValue(7) As Double

Dim AplusB As Double

Dim CplusD As Double

```
Dim OpenPort As Boolean = False
Dim dataview As Boolean = False
Dim sndCurrentIndicator As Integer = 2
Dim sndIndicator As Boolean = True
Dim Connecting As Boolean = False
```

```
Sub GetNewData()
```

```
Dim AplusBNo1, AplusBNo2, AplusBNo3, CplusDNo1, CplusDNo2, CplusDNo3 As Double
```

```
If sndIndicator = True Then
```

```
    ReciveData()
```

```
    AplusBNo1 = ReciveValue(1)
```

```
    AplusBNo2 = ReciveValue(2)
```

```
    AplusBNo3 = ReciveValue(3)
```

```
    CplusDNo1 = ReciveValue(4)
```

```
    CplusDNo2 = ReciveValue(5)
```

```
    CplusDNo3 = ReciveValue(6)
```

```
End If
```

```
AplusB = (ReciveValue(1) * 65536) + (ReciveValue(2) * 256) + ReciveValue(3)
```

```
CplusD = (ReciveValue(4) * 65536) + (ReciveValue(5) * 256) + ReciveValue(6) ' change to
```

decimal

```
dataC1(0) = (AplusB / 2097151) * FullScale ' to mV
```

```
dataC2(0) = (CplusD / 2097151) * FullScale ' to mV
```

```
TxtBox1.Text = dataC1(0)
```

```
TxtBox2.Text = dataC2(0)
```

```
TxtBox3.Text = Math.Abs(dataC1(0) - dataC2(0))
```

```
TextBox1.Text = dataC1(0) + dataC2(0)
```

```
End Sub
```

```
Sub UpdateChart()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

If AxDynaPlot1.DataCurves.Count = 0 Or AxDynaPlot2.DataCurves.Count = 0 Then
    c1 = AxDynaPlot1.DataCurves.AddParametric("A+B", X0, deltaX, Y1, Y1.Length).Curve
    c2 = AxDynaPlot2.DataCurves.AddParametric("C+D", X0, deltaX, Y2, Y2.Length).Curve

Else
    c1.PatchData(PtIndex, Nothing, dataC1, -1)
    c2.PatchData(PtIndex, Nothing, dataC2, -1)
    m1.PositionX = X0 + PtIndex * deltaX
    m2.PositionX = X0 + PtIndex * deltaX
    m1.PositionY = dataC1(0)
    m2.PositionY = dataC2(0)

    PtIndex += 1
    ToolStripProgressBar1.Value = PtIndex * 2
    If PtIndex >= dataNum Then PtIndex = 0

End If
End Sub
Sub RePaint()
    If dataC1(0) > dataC2(0) Then
        deltaVoltage = dataC1(0) - dataC2(0)
        NewPtLaser = (deltaVoltage * 90) / FullScale
        TopPoint = 90 - NewPtLaser
    ElseIf dataC2(0) > dataC1(0) Then
        deltaVoltage = dataC2(0) - dataC1(0)
        NewPtLaser = (deltaVoltage * 90) / FullScale
        TopPoint = 90 + NewPtLaser
    End If
    Dim Sumdata As Double
    Sumdata = dataC1(0) + dataC2(0)
    If Sumdata > 0.1 Then

```

PictureBox1.Invalidate()

End If

End Sub

Sub ReciveData()

If OpenPort = True Then

Dim voltageValue As Double

voltageValue = (txtCurrentIn.Text \* 1000 \* 4095) / 3300

Dim sndCurrentData(4), HbitCurrent, LbitCurrent As Byte

HbitCurrent = voltageValue \ 16

LbitCurrent = voltageValue Mod 16

sndCurrentData(0) = 18

sndCurrentData(1) = HbitCurrent

sndCurrentData(2) = LbitCurrent

Dim sndData(1) As Byte

sndData(0) = 17

Try

If sndCurrentIndicator = 0 Then

SerialPort1.Write(sndData, 0, 1)

ListBox1.Items.Clear()

Elseif sndCurrentIndicator = 1 Then

SerialPort1.Write(sndCurrentData, 0, 3)

ListBox1.Items.Clear()

Exit Sub

Elseif sndCurrentIndicator = 2 Then 'fix bug start

SerialPort1.Write(sndData, 0, 1)

ListBox1.Items.Clear()

Exit Sub

End If

```

Dim sw As New Stopwatch
sw.Reset()
sw.Start()
Do
    Application.DoEvents()
Loop Until sw.ElapsedMilliseconds > 100 'ms
sw.Stop()

Dim count As Integer
count = 1
For count = 1 To 6
    Dim buff As Byte
    buff = SerialPort1.ReadByte
    ReciveValue(count) = buff
    ListBox1.Items.Insert(0, "Read Byte " & count & "--> " & buff.ToString)
Next count
Catch ex As Exception
    System.Windows.Forms.MessageBox.Show(ex.Message, "ERROR",
    MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
    SerialPort1.ReadExisting()
End Try

End If
End Sub

Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles MyBase.Load

    AxDynaPlot1.Axes.XAxis.From = X0
    AxDynaPlot1.Axes.XAxis.To = 5
    AxDynaPlot1.Axes.YAxis.From = -0.2
    AxDynaPlot1.Axes.YAxis.To = FullScale + 0.5

```

```
AxDynaPlot2.Axes.XAxis.From = X0  
AxDynaPlot2.Axes.XAxis.To = 5  
AxDynaPlot2.Axes.YAxis.From = -0.2  
AxDynaPlot2.Axes.YAxis.To = FullScale + 0.5
```

```
AxDynaPlot1.Timer.Interval = 250 'ms  
AxDynaPlot2.Timer.Interval = 250 'ms
```

```
ReDim Preserve Y1(0 To dataNum)  
ReDim Preserve Y2(0 To dataNum)
```

```
For i As Integer = 0 To dataNum
```

```
Y1(i) = 1.25
```

```
Y2(i) = 1.25
```

```
Next
```

```
Start = True
```

```
Btn_StartStop.Text = "Pause Process"
```

```
m1 = AxDynaPlot2.Markers.Add(0, 0, RGB(1, 0, 0),
```

```
DYNAPLOT3Lib.dpsMARKERTYPE.dpsMARKER_VERTLINE)
```

```
m2 = AxDynaPlot2.Markers.Add(0, 0, RGB(1, 0, 0),
```

```
DYNAPLOT3Lib.dpsMARKERTYPE.dpsMARKER_VERTLINE)
```

```
UpdateChart()
```

```
AxDynaPlot1.Timer.Enable = True
```

```
AxDynaPlot2.Timer.Enable = False
```

```
End Sub
```

```
Dim TopPoint As Integer = 90
```

```
Private Sub PictureBox1_Paint(ByVal sender As System.Object, ByVal e As  
System.Windows.Forms.PaintEventArgs) Handles PictureBox1.Paint
```

```
Dim G As Graphics = e.Graphics
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Dim C1 As Color = Color.FromArgb(255, Color.Red)
```

```
Dim C2 As Color = Color.FromArgb(50, Color.Black)
```

```
Dim p As New GraphicsPath()
```

```
p.AddEllipse(90, TopPoint, 170, 170)
```

```
Dim b As New PathGradientBrush(p)
```

```
b.CenterColor = C1
```

```
Dim cc(0) As Color
```

```
cc(0) = C2
```

```
b.SurroundColors = cc
```

```
G.FillEllipse(b, 90, TopPoint, 170, 170)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub AxDynaPlot1_TimerEvent(ByVal sender As Object, ByVal e As  
System.EventArgs) Handles AxDynaPlot1.TimerEvent
```

```
    If Start Then
```

```
        GetNewData()
```

```
        UpdateChart()
```

```
        'add new event repaint
```

```
        Dim Sumdata As Double
```

```
        Sumdata = dataC1(0) + dataC2(0)
```

```
        If Sumdata > 1 Then
```

```
            RePaint()
```

```
        End If
```

```
        'RePaint()
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub AxDynaPlot2_TimerEvent(ByVal sender As Object, ByVal e As  
System.EventArgs) Handles AxDynaPlot2.TimerEvent
```

```
    If Start Then
```

```
        GetNewData()
```

```
        UpdateChart()
```

End If

End Sub

```
Private Sub Button4_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
```

Handles Button4.Click

```
Me.Close()
```

End Sub

```
Private Sub Btn_StartStop_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
```

System.EventArgs) Handles Btn\_StartStop.Click

```
Start = Not Start
```

```
If Start Then
```

```
Btn_StartStop.Text = "Pause Process"
```

```
Else
```

```
Btn_StartStop.Text = "Run Process"
```

```
End If
```

End Sub

```
Private Sub TestModeToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
```

System.EventArgs) Handles TestModeToolStripMenuItem.Click

```
Me.Width = 880
```

```
GpTest.Visible = True
```

```
TestModeToolStripMenuItem.Checked = True
```

```
MeasurementToolStripMenuItem.Checked = False
```

```
ListBox1.Visible = True
```

End Sub

```
Private Sub MeasurementToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal
```

e As System.EventArgs) Handles MeasurementToolStripMenuItem.Click

```
Me.Width = 730
```

```
GpTest.Visible = False
```

```
TestModeToolStripMenuItem.Checked = False
```

```
MeasurementToolStripMenuItem.Checked = True
ListBox1.Visible = False
End Sub
Private Sub btn_connect_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btn_connect.Click
    OpenPort = Not OpenPort
    If OpenPort = True Then
        btn_connect.Text = "Disconnect"

        SerialPort1.PortName = ComboBox1.Text
        SerialPort1.BaudRate = 115200
        SerialPort1.Parity = IO.Ports.Parity.None
        SerialPort1.Handshake = IO.Ports.Handshake.None
        SerialPort1.NewLine = vbCrLf
        SerialPort1.Encoding = System.Text.Encoding.Default
        SerialPort1.DataBits = 8
        SerialPort1.StopBits = IO.Ports.StopBits.One
        SerialPort1.ReadTimeout = 2000
        SerialPort1.Open()
        Connecting = True
        btn_connect.Enabled = False
        Btn_Downlaser.Enabled = True
        btn_DriveLaser.Enabled = True
        Btn_StartStop.Enabled = True
    ElseIf OpenPort = False Then
        btn_connect.Text = "Connect"
        SerialPort1.Close()
    End If

End Sub
```

```
Private Sub CreditsToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles CreditsToolStripMenuItem.Click
```

```
    frm_Credits.Show()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub ComboBox1_SelectedIndexChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ComboBox1.SelectedIndexChanged
```

```
    btn_connect.Enabled = True
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Button3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Button3.Click
```

```
    dataview = Not dataview
```

```
    If dataview = True Then
```

```
        ListBox1.Visible = True
```

```
    ElseIf dataview = False Then
```

```
        ListBox1.Visible = False
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub txtCurrentIn_TextChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles txtCurrentIn.TextChanged
```

```
    sndCurrentIndicator = 1
```

```
    ReciveData()
```

```
    sndCurrentIndicator = 0
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles btn_DriveLaser.Click
```

```
    Btn_Downlaser.Enabled = False
```

```
    While (txtCurrentIn.Text < txt_driveLaser.Text)
```

```
        txtCurrentIn.Text = txtCurrentIn.Text + 0.001
```

```
        Delay(10)
    End While
    Btn_Downlaser.Enabled = True
End Sub
Dim sw As New Stopwatch
Private Sub Delay(ByVal Millisecond As Double)
    sw.Reset()
    sw.Start()
    While (sw.ElapsedMilliseconds <= Millisecond)
        Application.DoEvents()
    End While
    sw.Stop()
End Sub

Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles Btn_Downlaser.Click
    btn_DriveLaser.Enabled = False
    While (txtCurrentIn.Text > 0)
        txtCurrentIn.Text = txtCurrentIn.Text - 0.001
        Delay(10)
    End While
    btn_connect.Enabled = True
    btn_DriveLaser.Enabled = True
End Sub

Private Sub btn_V_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles btn_Vinc.Click
    txtCurrentIn.Text = txtCurrentIn.Text + 1

End Sub
```

```
Private Sub btn_W_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
```

```
Handles btn_Winc.Click
```

```
txtCurrentIn.Text = txtCurrentIn.Text + 0.1
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_WW_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
```

```
Handles btn_WWinc.Click
```

```
txtCurrentIn.Text = txtCurrentIn.Text + 0.01
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_WWW_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
```

```
Handles btn_WWWinc.Click
```

```
txtCurrentIn.Text = txtCurrentIn.Text + 0.001
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_Vdec_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
```

```
Handles btn_Vdec.Click
```

```
txtCurrentIn.Text = txtCurrentIn.Text - 1
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_Wdec_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
```

```
Handles btn_Wdec.Click
```

```
txtCurrentIn.Text = txtCurrentIn.Text - 0.1
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_WWdec_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
```

```
System.EventArgs) Handles btn_WWdec.Click
```

```
txtCurrentIn.Text = txtCurrentIn.Text - 0.01
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_WWWdec_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
```

```
System.EventArgs) Handles btn_WWWdec.Click
```

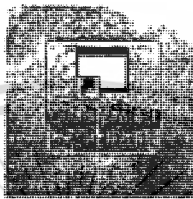
```
txtCurrentIn.Text = txtCurrentIn.Text - 0.001
```

End Sub

End Class

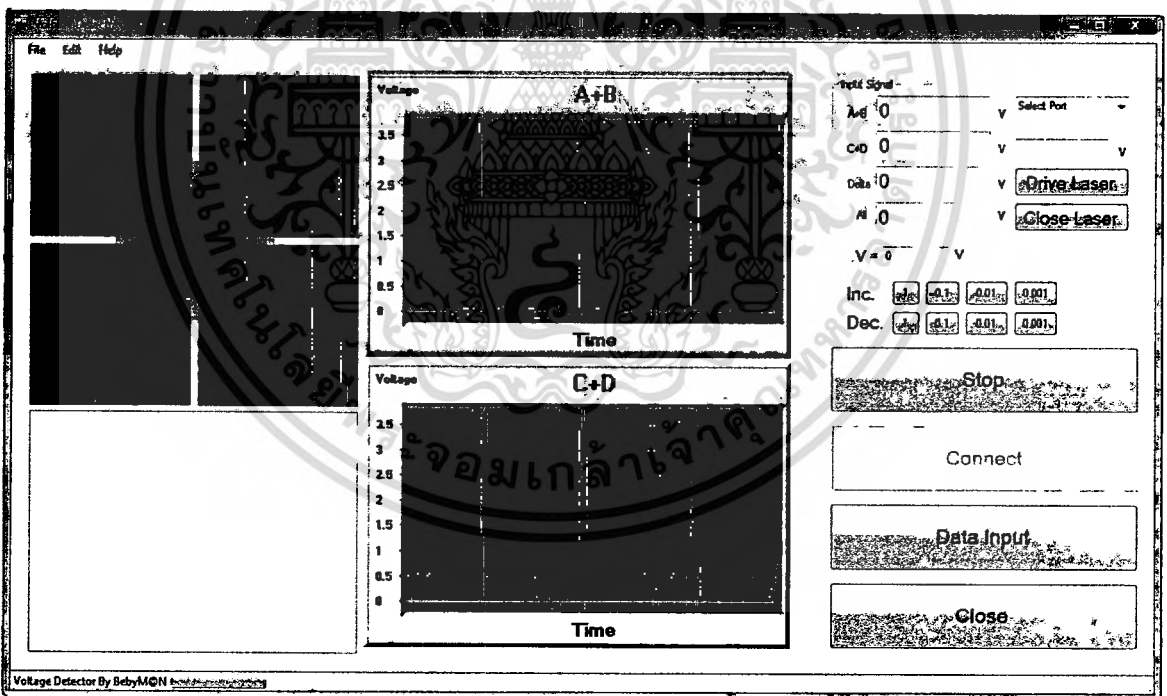
### ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมตรวจวัดแรงดันจากควอดแดรนท์โฟลด์ดีเทคเตอร์

1. เปิดโปรแกรมโดย Double Click ที่ไอคอนโปรแกรม



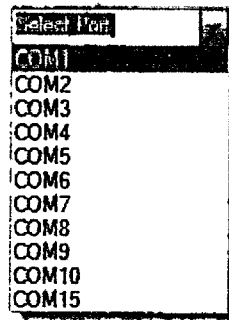
ไอคอนของโปรแกรม

2. เมื่อ Double Click ที่ไอคอนโปรแกรมแล้วจะปรากฏหน้าต่างโปรแกรมขึ้นมาดังรูป



หน้าต่างโปรแกรม

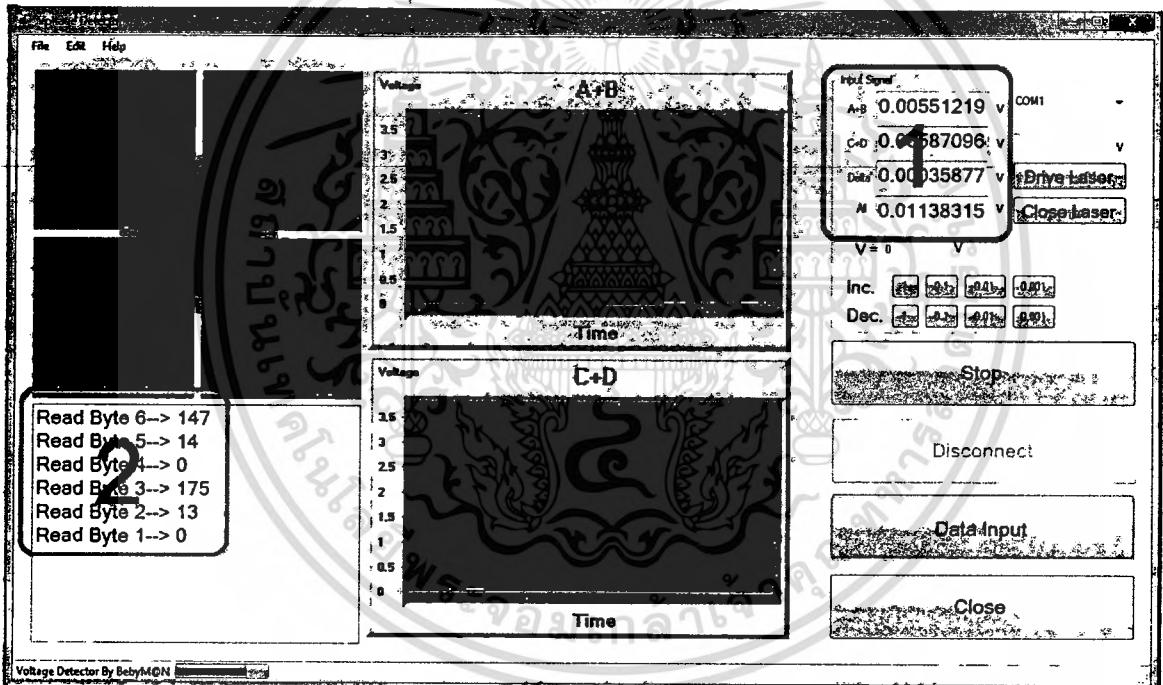
3. ทำการเลือกพอร์ตที่ต้องการเชื่อมกับคอมพิวเตอร์ โดยการคลิกที่  จะปรากฏชื่อของพอร์ตที่ใช้ในการเชื่อมต่อให้เลือกดังรูป สามารถเลือกพอร์ตต่างๆได้โดยการคลิกที่ชื่อพอร์ตที่ต้องการ



รายชื่อพอร์ตที่สามารถใช้เชื่อมต่อได้

4. กดปุ่ม Connect  เพื่อทำการเชื่อมต่อ

5. เมื่อทำการเชื่อมต่อสำเร็จข้อมูลที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์จะปรากฏในโปรแกรมดังรูป



หน้าต่างโปรแกรมเมื่อทำการเชื่อมต่อสำเร็จ

ซึ่งข้อมูลที่แสดงจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 (กรอบสีแดง) จะแสดงค่าแรงดันที่วัดได้จาก PSD โดยมีการคำนวณจากค่าที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งมาซึ่งเป็นเลขฐานสิบหกให้กลายเป็นเลขฐานสิบ ซึ่งจะแบ่งเป็น 4 ค่า ได้แก่

A+B คือ ค่าผลรวมของแรงดันที่ได้จากควอดแดรนต์โฟโตดีเทคเตอร์ในควอดแดรนต์ A และ B

C+D คือ ค่าผลรวมของแรงดันที่ได้จากควอดแดรนต์โฟโตดีเทคเตอร์ในควอดแดรนต์ C และ D

Delta คือ ผลต่างของแรงดันระหว่างช่อง A+B และ C+D

All คือ ผลต่างของแรงดันของช่อง A+B และ C+D

Input Signal	
A+B	0.19465923 v
C+D	0.91741891 v
Delta	0.72275968 v
All	1.11207814 v

ตัวอย่างข้อมูลในส่วนที่ 1

ส่วนที่ 2 (กรอบสีเขียว) จะแสดงค่าที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งมาให้ โดยมีการแปลงจากเลขฐานสิบหกเป็นเลขฐานสิบในแต่ละไบต์ จำนวน 6 ไบต์

Read Byte 6-->	108
Read Byte 5-->	229
Read Byte 4-->	8
Read Byte 3-->	58
Read Byte 2-->	227
Read Byte 1-->	1

ตัวอย่างข้อมูลในส่วนที่ 2

6. ทำการจุดเลเซอร์โดยการป้อนค่าให้กับโปรแกรม ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี

วิธีที่ 1 เพิ่มโดยที่รู้ค่าแรงดันที่ต้องการแล้ว

1) ใส่ค่าแรงดันที่ใช้ในการขับเลเซอร์ลงในช่อง Drive Laser  $V_{Laser}$  v

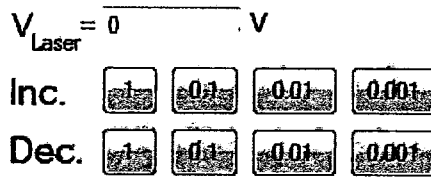
2) กดปุ่ม Drive Laser 

3) โปรแกรมจะค่อยๆเพิ่มแรงดันจนกระทั่งถึงค่าแรงดันที่กำหนดไว้ โดยสังเกตดูได้ที่ช่อง

$$V_{Laser} \quad V_{Laser} = 0 \quad v$$

วิธีที่ 2 เพิ่มค่าแรงดันแบบคงที่

โดยแรงดันที่เพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มขึ้นได้ครั้งละ 1 V, 100 mV, 10 mV หรือ 1 mV  
โดยจะมีปุ่มให้กดเพื่อเพิ่ม/ลด ค่าแรงดันตามที่ต้องการ ดังรูป

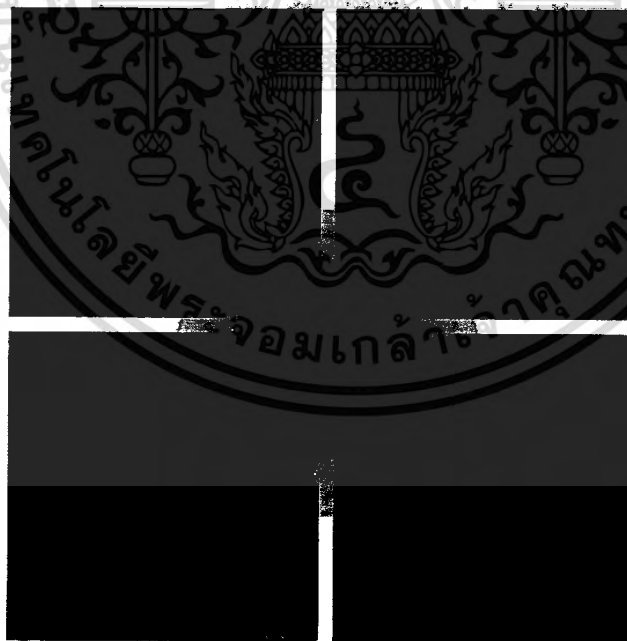


ฟังก์ชันที่ใช้ในการเพิ่มหรือลดค่าแรงดัน

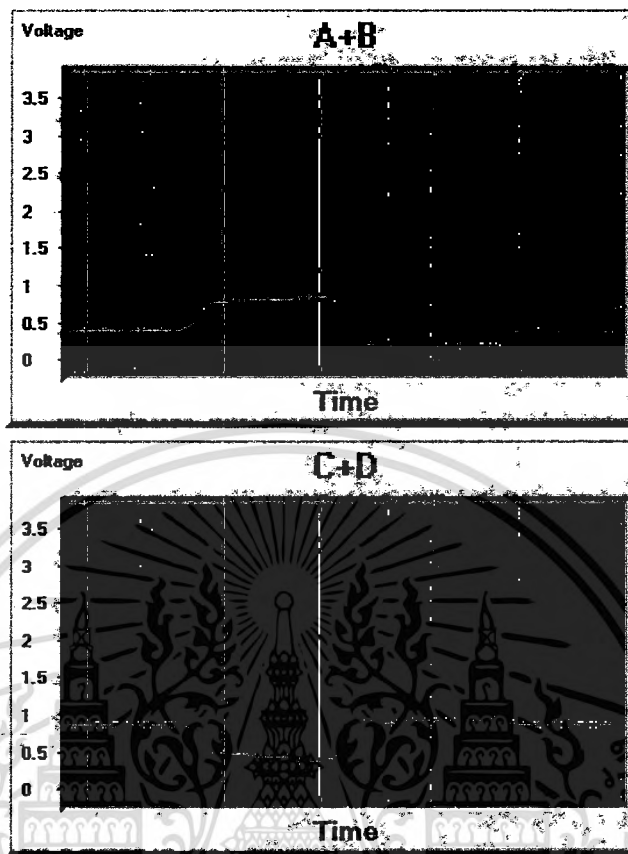
โดยในแถว Inc. จะเป็นการเพิ่มค่าและในแถว Dec. จะเป็นการลดค่า ซึ่งสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงดันได้ในช่อง  $V_{\text{Laser}}$

เมื่อทำการยิงลำแสงเลเซอร์ตกกระทบกับคานกลขนาดจิ๋วแล้วสะท้อนไปยังควอดแดรนต์โฟโตดีเทคเตอร์ จะทำให้แรงดันที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนไปตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ

8. เมื่อแรงดันมีค่าเปลี่ยนแปลงไปซึ่งจะสังเกตได้จากกราฟและตำแหน่งจำลองของเลเซอร์ จะทำให้ทราบว่าความเข้มของลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบในควอดแดรนต์แต่ละส่วนมีค่ามากขึ้นหรือลดลง



การจำลองการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์



กราฟที่เปลี่ยนไปตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ

9. ขณะที่ระบบทำงานค่าข้อมูลที่ส่งมาจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทำให้ยากต่อการสังเกตหรือบันทึกผล เมื่อต้องการหยุดการทำงานเพื่อสังเกตหรือบันทึกผล ให้กดปุ่ม **Pause Process** ที่โปรแกรม



โปรแกรมจะหยุดการรับส่งค่า ทำให้สามารถอ่านค่าได้ หากต้องการให้โปรแกรมกลับไปทำงานเป็นปกติให้กดที่ปุ่ม **Run Process** อีกครั้ง



10. เมื่อทำการทดลองเสร็จและต้องการปิดระบบ ให้ทำการปิดเลเซอร์โดยการกดปุ่ม **Close Laser**



เพื่อทำการลดแรงดันที่ใช้ขับจนกระทั่งแรงดันเป็นศูนย์ จากนั้นทำการตัดการ

เชื่อมต่อโดยกดปุ่ม **Disconnect**



เพื่อตัดการเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์จากนั้นกดปุ่ม **Close**



เพื่อปิดโปรแกรม

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลและอภิปราย

แผนงานวิจัยการพัฒนาตัวตรวจจับไอออนของโลหะด้วยนาโนเซนเซอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการแพทย์ ริเริ่มมาจากความต้องการเซนเซอร์และระบบวัดเพื่อนำมาใช้ตรวจจับไอออนของโลหะอัลคาไลน์ อาทิเช่น โซเดียม (Sodium,  $\text{Na}^+$ ) โพแทสเซียม (Potassium,  $\text{K}^+$ ) และลิเทียม (Lithium,  $\text{Li}^+$ ) ประกอบอยู่ โดยปริมาณของธาตุโลหะเหล่านี้มีบทบาทต่อสุขภาพร่างกายของคนเรา ซึ่งสามารถบ่งชี้ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับร่างกายของเราได้ เช่น ภาวะโซเดียมในเลือดต่ำ (Hyponatremia) บ่งบอกถึงความผิดปกติกับระบบทางเดินอาหาร ไต ภาวะโซเดียมในเลือดสูง (Hypernatremia) บ่งบอกถึงความผิดปกติกับระบบทางสมอง ความไม่สมดุลของระดับโพแทสเซียมในเลือด (Hypokalemia และ Hyperkalemia) จะส่งผลให้คลื่นหัวใจทำงานผิดปกติ และกล้ามเนื้ออ่อนแรงหรืออาจอันตรายถึงขั้นเป็นอัมพาตได้ อีกตัวอย่างหนึ่งที่น่าสนใจได้แก่ ไอออนลิเทียม ซึ่งปกติไม่มีในร่างกายมนุษย์ แต่ไอออนลิเทียมเป็นส่วนประกอบในตัวยาที่ใช้รักษาผู้ป่วยที่มีความผิดปกติทางจิต และผู้ป่วยโรคซึมเศร้า ถ้าปริมาณของลิเทียมไอออนในเลือดสูงเกินไป ก็จะส่งผลให้การรักษาอาการของผู้ป่วยมีผลในเชิงลบและ อาจมีผลทำให้ผู้ป่วยเสียชีวิตได้ และ ในท้ายที่สุดสามารถพัฒนาต่อยอดเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เพื่อตรวจจับไวรัสชนิดต่างๆ ที่สนใจต่อไป

โดยนาโนเซนเซอร์ที่จะพัฒนาขึ้นต้องมี ความสามารถในการดักจับ (chelating) และคัดเลือก (selectivity) เพื่อเลือกตรวจวัดเฉพาะไอออนของโลหะที่สนใจ และเมื่อตรวจจับไอออนของไอออนโลหะดังกล่าวแล้ว อุปกรณ์ดังกล่าวจะต้องมีความไวเพียงพอในการวิเคราะห์ปริมาณของไอออนโลหะที่มีปริมาณน้อยๆ ได้ (high sensitivity) โดยคณะผู้วิจัยสนใจการนำเอาเซนเซอร์คานกลิจิว์ ซึ่งนิยมใช้ในกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เป็นแกนหลัก เนื่องจากมีความไวในการตรวจจับสูง โดยนำเซนเซอร์คานกลิจิว์ดังกล่าวมาปรับปรุงผิวหน้าด้วยกรรมวิธีทางเคมีเพื่อทำให้เซนเซอร์คานกลิจิว์มีความสามารถในการดักจับและคัดเลือกเอาเฉพาะไอออนของโลหะที่สนใจ

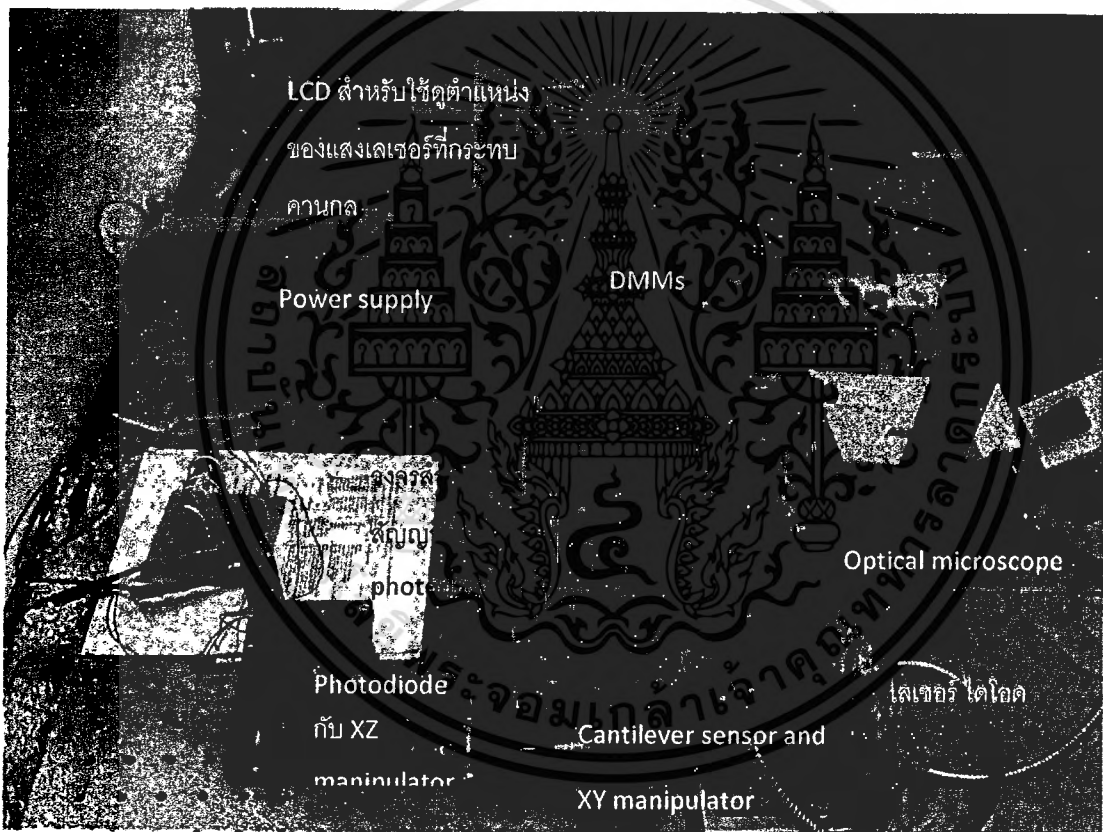
โครงการวิจัยนี้แบ่งงานออกเป็น 2 ส่วน กำหนดระยะเวลาวิจัยเฟสที่หนึ่งเป็นระยะเวลา 1 ปี งานวิจัยส่วนแรกจะเป็นความร่วมมือระหว่างภาควิชาเคมีและภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในการศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบสำหรับดักจับไอออนของโลหะอัลคาไลนสำคัญๆในร่างกายมนุษย์ โดยคณะผู้วิจัยสนใจการดักจับไอออนของลิเทียม ( $\text{Li}^+$ ) งานวิจัยอีกส่วนที่สองจะเป็นการสร้างและพัฒนาระบบการวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกล (ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณของโมเลกุลที่มาเกาะบนเซนเซอร์คานกล) เพื่อวัดความโค้งงอของเซนเซอร์ในตัวกลางอากาศและของเหลว ซึ่งมีเป้าหมายจะพัฒนาระบบขนาดเล็กและมีราคาถูกลง โดยงานวิจัยส่วนที่สองนี้จะมีความร่วมมือระหว่างภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และ ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยงานวิจัยส่วนที่หนึ่ง ผู้วิจัยได้ศึกษาและสังเคราะห์สารประกอบสำหรับดักจับเฉพาะไอออนของโลหะลิเทียมเพียงธาตุเดียวก่อน โดยงานวิจัยในส่วนนี้ได้ทำสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย และทำการ characterize สารที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเทคนิค Nuclear Magnetic Resonance (NMR) และ ESI Mass Spectroscopy (MS) จากนั้นนำสาร thiol ที่สังเคราะห์ขึ้นมาใช้เพื่อเคลือบชั้น SAM บนผิวหน้าทองคำของเซนเซอร์คานกลจีว โดยขั้นตอนสำคัญในการเตรียมชั้น SAM บนผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลจีว ได้แก่ กระบวนการทำความสะอาดผิวหน้า ซึ่งพบว่า การใช้สารละลาย piranha มีความเหมาะสมต่อการเตรียมผิวหน้าของเซนเซอร์มากกว่าการใช้ solvent ในการทำความสะอาด อย่างไรก็ตาม จากการประสพการณ์ของผู้วิจัย พบว่า วิธีดังกล่าวก็ยังคงสร้างความยุ่งยากในการ handle ชิ้นงานหรือเซนเซอร์คานกลจีว ซึ่งมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นในงานวิจัยต่อไป คณะผู้วิจัยตั้งใจจะทดลองใช้เทคนิคการทำความสะอาดด้วยวิธีพลาสมาแทน ซึ่งถึงปัจจุบัน คณะผู้วิจัยได้รับเครื่องดังกล่าวแล้ว จากงบประมาณของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ม.ศิลปากร

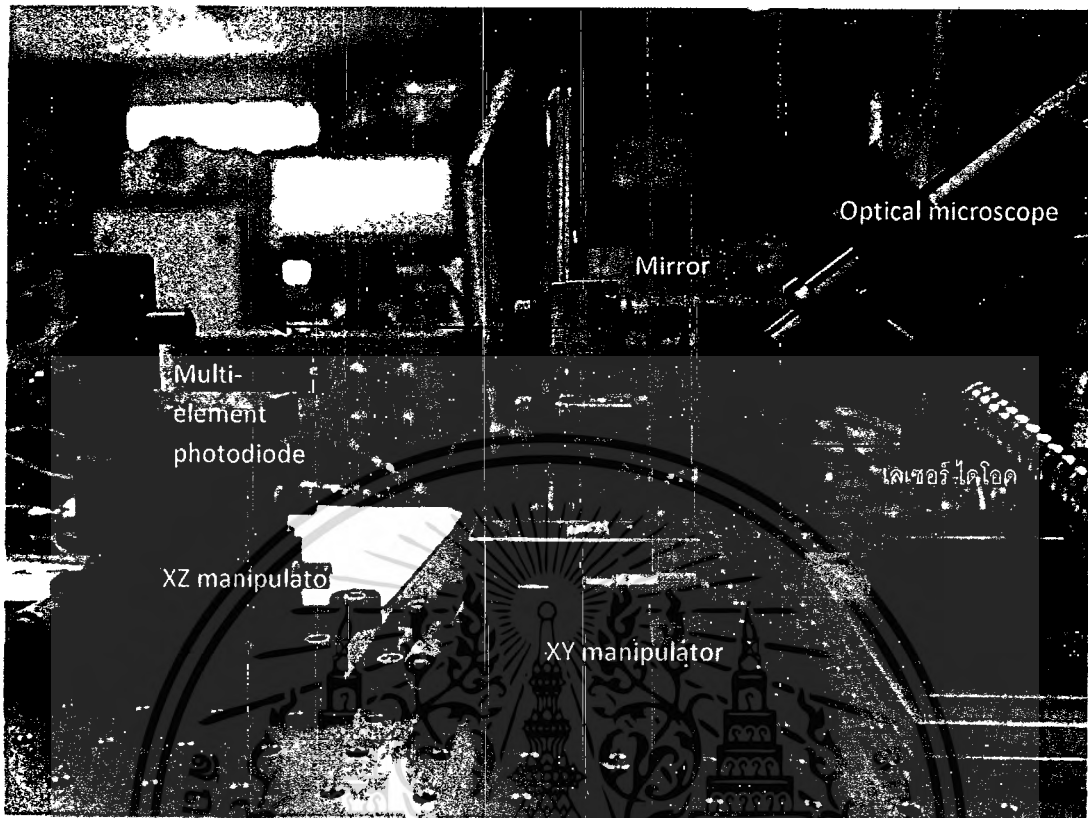
งานวิจัยส่วนที่สอง คณะผู้วิจัยได้พัฒนาเทคนิคการวัดความโค้งงอของคานกลขนาดจิ๋วด้วยเทคนิคทางแสงด้วยวิธี Optical beam deflection โดยศึกษาหลักการจัดแนวทางแสงทั้งหมด 2 วิธี

วิธีแรกเป็นการใช้หลักการตั้งอธิบายหลายละเอียดไว้แล้วใน รายงานความก้าวหน้ารอบหกเดือน ซึ่งมีไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ เซนเซอร์ และ multi-element photodiode จะวางอยู่ในแนวระนาบเดียวกันบน optical table เพื่อความสะดวกในการจัดเส้นทางเดินของแสง ดังนั้นการจะให้ลำเลเซอร์ตกกระทบบนเซนเซอร์ จำเป็นต้องใช้ beam splitter และกระจกเงาช่วยในการปรับทิศทางแสงให้ลำเลเซอร์สะท้อนตกลงบนเซนเซอร์คานกล โดยเมื่อแสงเลเซอร์ออกมาจากเลเซอร์ไดโอด จะตกกระทบบน beam splitter ลำแสงส่วนหนึ่งจะทะลุผ่านไป ลำแสงอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อน

ลงบนเซนเซอร์คานกล (เนื่องจากคานกลของหัวโพรบ AFM มีขนาดเล็กมาก จึงจำเป็นต้องมี optical microscope ช่วยในการจัดทิศทางแสงให้ตกลงบนปลายของคานกลขนาดจิ๋ว) โดยแสงที่สะท้อนกลับออกจากเซนเซอร์จะผ่านตัว beam splitter อีกครั้งหนึ่ง ลำแสงส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับไปทีเลเซอร์ไดโอด ส่วนอีกลำหนึ่งจะทะลุไปถึงกระจกเงา และสะท้อนไปยัง multi-element photodetector โดย photodetector จะยึดติดกับตัวปรับตำแหน่ง xz เพื่อปรับตำแหน่งให้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบที่จุดกึ่งกลางของ photodiode พอดี (โดยพิจารณาได้จากเอ้าท์พุทของสัญญาณ  $V_{ab} - V_{cd}$  จะต้องมีค่าใกล้เคียงศูนย์มากที่สุด)

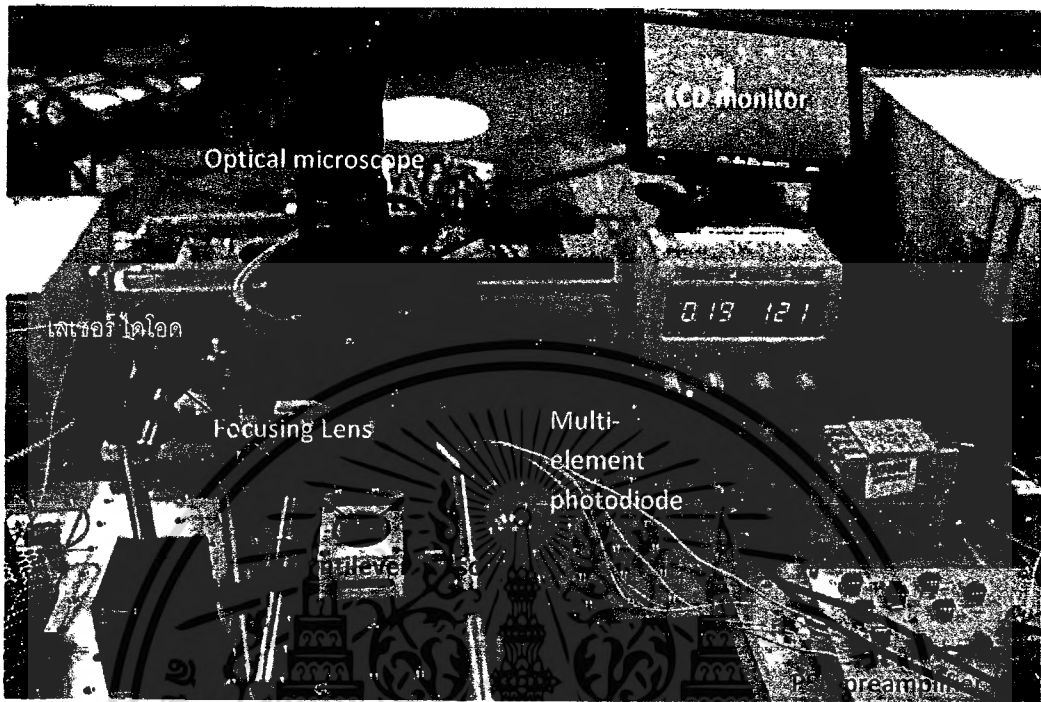


รูปที่ 5.1: ภาพถ่ายการ setup ระบบวัดความโค้งของเซนเซอร์คานกลที่คณะผู้วิจัยพัฒนาขึ้นในโครงการที่ 2 (ช่วงรายงานความก้าวหน้ารอบหกเดือน)



รูปที่ 5.2 โดอะแกรมแสดงทิศทางเดินของแสงของ ระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานกลที่คณะผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเมื่อแสงเลเซอร์ออกมาจากเลเซอร์ไดโอด จะตกกระทบกับ beam splitter ลำแสงส่วนหนึ่งจะทะลุผ่านไป ลำแสงอีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนลงบนเซนเซอร์คานกล แสงที่สะท้อนกลับออกจากเซนเซอร์จะผ่านตัว beam splitter อีกครั้งหนึ่งและจะทะลุไปถึงกระจกเงา ซึ่งจะสะท้อนแสงเลเซอร์ไปยัง multi-element photodiode โดย photodiode จะยึดติดกับตัวปรับตำแหน่ง xz เพื่อปรับตำแหน่งให้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบที่จุดกึ่งกลางของ photodiode พอดี

จากการทดลองพบว่าวิธีดังกล่าวไม่เหมาะสม เนื่องจากมีลำแสงเลเซอร์สะท้อนกลับมาสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่กระทบกับคานกลจั่ว และอีกส่วนคือ ลำแสงที่สะท้อนออกจากพื้นฐานรอง ซึ่งลำแสงทั้งสองเกิดการแทรกสอดกันและส่งผลต่อการวัดความเข้มแสงที่เกิดขึ้นบนเซนเซอร์ PSD



รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายการ setup ระบบวัดความโค้งงอของเซนเซอร์คานากลจิวด้วยหลักการสะท้อนแสง

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเลือกพัฒนาด้วยเทคนิคที่สอง คือ ใช้หลักการสะท้อนแสง ซึ่งต้องจัดทิศทางเดินแสงให้ดี ต้องจัดมุมของการยิงแสงเลเซอร์และมุมของการรับแสงให้เป็นมุมเดียวกันพอดี แสดงดังรูปที่ 5.3 วิธีดังกล่าวตัดปัญหาการแทรกสอดของแสงจากวิธีแรกไป ซึ่งรายละเอียดของวิธีนี้อธิบายไว้ในบทที่ 3

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของวงจรขับเลเซอร์ไดโอดและวงจรเชื่อมต่อกับเซนเซอร์แสง PSD รวมถึงทดสอบเสถียรภาพของระบบวัดความโค้งงอเรียบร้อย และทำการทดลองจำลองการโค้งงอของเซนเซอร์คานากลจิว โดยการปรับมุมรับแสงของเซนเซอร์คานากลจิวเป็นค่ามุมต่างๆกัน พบว่าวงจรและระบบที่พัฒนาขึ้นใช้งานได้ดี อย่างไรก็ตามเมื่อผู้วิจัยนำเซนเซอร์คานากลจิวที่เคลือบด้วยชั้น SAM เป็นวัฏจักรในระบบที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยยังติดปัญหาที่ไม่สามารถอ่านค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากสัญญาณมีการแกว่งมาก และไม่สามารถนำมาบ่งบอกได้ว่า มีการเคลือบติดของลิเทียมไอออนบนเซนเซอร์หรือไม่ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมของเซนเซอร์คานากลจิว และ/หรือ การจัดทิศทางเดินแสงซึ่งไม่สมมาตรจริง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาระบบวัดความโค้งงอ เวอร์ชันที่สอง ขึ้น โดยมีรายละเอียดในบทที่ 4 แต่การทดลองยังไม่แล้วเสร็จเรียบร้อย ปัจจุบันคณะผู้วิจัยได้จัดทำเพียงการวัดคุณสมบัติของเครื่องที่ออกแบบ

ขึ้นเท่านั้น และได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งต่อไปผู้วิจัยจะนำระบบดังกล่าว มาทดสอบกับเซนเซอร์คานกลที่เคลื่อน  
ชั้น SAM ต่อไป

## 5.2 ความสำเร็จจากผลการดำเนินการวิจัยเฟสที่หนึ่ง

- สามารถสังเคราะห์สารประกอบสำหรับใช้ตรวจจับไอออนของลิเทียมได้
- สามารถเคลื่อนชั้น SAM ลงบนผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลจิวได้
- ได้ต้นแบบระบบวัด optical beam deflection สำหรับพัฒนาต่อยอดในเฟสที่สอง
- เสนอผลงานในงานประชุมวิชาการ Siam Physics Congress 2 เรื่อง

## 5.3 งานวิจัยที่ต้องทำต่อในอนาคต

- ทดลองทำความสะอาดผิวหน้าของเซนเซอร์คานกลจิวด้วยวิธีทำความสะอาดด้วยพลาสมา
- จัดทำ microfluidic chamber ที่มีขนาดเหมาะแก่การทดลองที่ใช้ปริมาณสารตัวอย่างน้อยๆ
- นำต้นแบบระบบวัด optical beam deflection เวอร์ชันที่สอง มาทดลองวัดร่วมกับเซนเซอร์คานกล  
จิวที่เคลือบผิวหน้าด้วยชั้น SAM
- ทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับผลการทดลองของเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

## ประวัติคณะนักวิจัย

### หัวหน้าแผนงานวิจัยและหัวหน้าโครงการย่อยที่ 2

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย)	นาย บดินทร์ ดำรงศักดิ์
ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ)	Mr. Badin Damrongsak
คุณวุฒิ	ปริญญาเอก
ตำแหน่ง	อาจารย์ระดับ 6
หน่วยงาน	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
โทรศัพท์	(034)243430; 087-5903545 โทรสาร (034)273049
E-mail	<a href="mailto:badin@su.ac.th">badin@su.ac.th</a> ; <a href="mailto:badin@rocketmail.com">badin@rocketmail.com</a>

### หัวหน้าโครงการย่อยที่ 1

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย)	นางสาวนันท์นิตย์ วานิชชีวะ
ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ)	Miss Nantanit Wanichachewa
คุณวุฒิ	ปริญญาเอก
ตำแหน่ง	อาจารย์ระดับ 6
หน่วยงาน	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
โทรศัพท์	(034)255797 โทรสาร (034)271356
E-mail	<a href="mailto:nantanit@su.ac.th">nantanit@su.ac.th</a>

**นักวิจัย 1**

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นาย วราวุฒิ เถาลัดดา  
ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Warawoot Taoladda  
คุณวุฒิ ปริญญาเอก  
ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ระดับ 9  
หน่วยงาน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ที่อยู่ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โทรศัพท์ (02) 3264111 ต่อ 6197 โทรสาร (02) 3264413  
E-mail [ktwarawo@kmitl.ac.th](mailto:ktwarawo@kmitl.ac.th)

**นักวิจัย 2**

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย) นางสาว ปัทริยา กิตติเดชาชาญ  
ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Pattareeya Kittidachachan  
คุณวุฒิ ปริญญาเอก  
ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์  
หน่วยงาน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ที่อยู่ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โทรศัพท์ (02) 3264339 ต่อ 285 โทรสาร (02) 3264413  
E-mail [kkpattar@kmitl.ac.th](mailto:kkpattar@kmitl.ac.th)

## Development of optical beam deflection detection system for microcantilever-based sensors

Theerapap Kaewon<sup>1</sup>, Autchara Chomna<sup>1</sup>, Phuangbuppha Saowaros<sup>1</sup>, Phasini Khunrungrueng<sup>1</sup>,  
Pattareeya Kittidachachan<sup>2</sup>, Warawoot Thowladda<sup>2</sup> and Badin Damrongsak<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Engineering Physics Research Group, Department of Physics,  
Faculty of Science, Silpakorn University, Nakorn Pathom, 73000, Thailand

<sup>2</sup>Department of Physics, Faculty of Science,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

In this paper, we report the design and development of an optical beam deflection detection system for measuring beam deflection. A high sensitive position sensitive detector (PSD) was employed to measure the displacement of the laser spot on the PSD which is related to cantilever bending. The design of the laser diode driver and PSD read-out circuit was presented. The implemented read-out circuit was tested and characterized to ensure the linearity of the output signal in response to the displacement of the laser spot. In order to examine the performance of the developed optical beam deflection system, an atomic force microscope cantilever was used as a sensor. Experiments were also conducted to characterize the long term stability and the performance of the system. The experimental results showed that the noise level of the system in root mean square voltage was about 0.034 mV when operating the cantilever sensor in air and 0.027 mV when the cantilever sensor was in water.

**Keywords:** microcantilever sensors, position sensitive detector, beam deflection measurement, cantilever-based biosensors.

### 1. INTRODUCTION

Microfabricated cantilever sensors represent a powerful platform for high-sensitive and high-resolution sensing applications in physics, chemistry, material science and biomedicine. The use of microcantilevers in an atomic force microscope (AFM) is a well-established application. Recently, they have been used successfully as extremely sensitive biosensors. When absorption and/or recognition of molecules occurs on the surface of functionalized microcantilevers, it will result in bending of the microcantilever beam or shifts in its resonance frequency [1]. The detection of these responses is referred as static and dynamic modes of operation. There are several methods proposed for measuring the deflection of microcantilever sensors [2–4]. Among them, the optical beam deflection detection method [4] has been the most widely used because it is simple and easy to setup.

In this paper, we focused on development of an optical beam deflection detection system for measuring the deflection of a microcantilever working in the static mode. The bending arises as a consequence of a surface stress change induced by molecular reaction taking place on the cantilever surface. The displacement of the cantilever free end can be estimated using Stoney's model [5] as:

$$\Delta z = \left( \frac{3(1-\nu)L^2}{Et^2} \right) \Delta \sigma \quad (1)$$

where  $\Delta z$  is the cantilever displacement,  $E$  is the Young's modulus,  $\nu$  is the Poisson ratio and  $\Delta \sigma$  is the change in surface stress.  $L$  and  $t$  are geometrical parameters referring to as the microcantilever length and thickness, respectively.

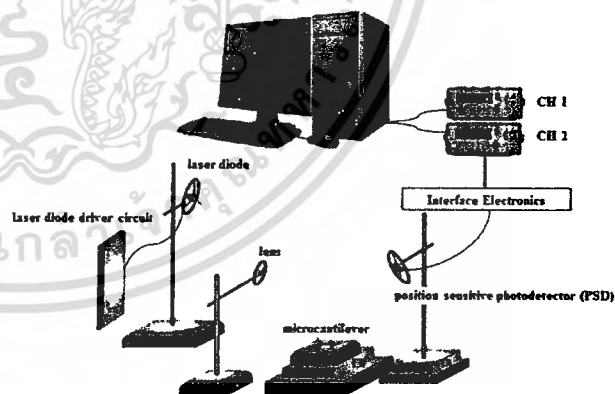


FIGURE 1. Schematic diagram of the optical beam deflection detection system for microcantilever based sensors.

### 2. OPTICAL BEAM DEFLECTION DETECTION

A schematic diagram of the optical beam deflection detection system developed in this work is shown in Figure 1. The developed system is composed of (1) laser diode (LD) and a LD driver, (2) position sensitive photodetector (PSD) and a read-out circuit, (3) optical microscope and (4) a microcantilever holder. A focused laser beam is irradiated onto the backside of the microcantilever. The reflected beam is detected with a PSD, which is two-element (A and

\*Corresponding author. Tel: (034) 245329  
Fax: (034)273049; E-mail: badin@su.ac.th

B) silicon photodiode array. At each element, the induced current is converted to a voltage signal by a read-out circuit. The output voltage signals ( $V_A$  and  $V_B$ ) are then fed into a differential amplifier ( $V_A - V_B$ ) and a summing amplifier ( $V_A + V_B$ ). When the microcantilever bends due to a change in surface stress, the laser spot on the PSD is displaced. This results in the difference between the photoinduced currents at the photodiode elements.

2.1 Laser diode driver

Figure 2 shows the simplified circuit of the laser diode driver. The LD driver is based on the modified Howland current source [6], which is widely used for realizing voltage controlled current sources for loads with one end connected to the ground. An OP-07 op-amp was used for two reasons: low offset (not more than  $75\mu V$ ) and low drift (less than  $1.5\mu V/month$ ). The transfer function of the LD driver can be estimated using Equation (2).

$$\frac{V_{IN}}{I_{OUT}} = \frac{R_3}{R_4} \times R_{SH} \quad (2)$$

where  $V_{IN}$  is the input voltage (adjusted by  $100\text{ k}\Omega$  pot resistor),  $I_{OUT}$  is the output current and  $R_3$ ,  $R_4$  and  $R_{SH}$  are defined in Figure 2.

2.2 PSD read-out circuit

Figure 3 shows the block diagram of a PSD read-out circuit. A four-segmented photodiode array (QP5.8-6-T05, Pacific Silicon Sensor) was used as a PSD sensor. Its active area is  $2.4 \times 2.4\text{ mm}^2$ . The photoinduced current at each element is converted to a voltage signal using a current-to-voltage amplifier. For our purpose, only two elements are required for detecting the deflection of a microcantilever sensor. Therefore, the voltage signals from upper (A and B) and lower (C and D) two elements are added together using a summing amplifier to generate two voltage signals ( $V_{A+B}$  and  $V_{C+D}$ ). These two signals are input to a unity gain differential amplifier, which outputs the difference between the voltage signals from upper and lower photodiodes. A summing amplifier at the final stage is used for measuring the total photoinduced current. The schematic diagram of the developed PSD read-out is shown in Figure 4. CA3140 op-amps are used due to its high input impedance ( $> 1\text{ T}\Omega$ ) and low bias current ( $< 10\text{ pA}$ ).

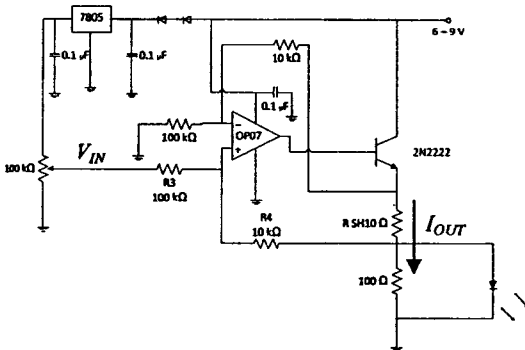


FIGURE 2. Schematic diagram of the laser diode driver. The circuit was designed based on a modified Howland current source.

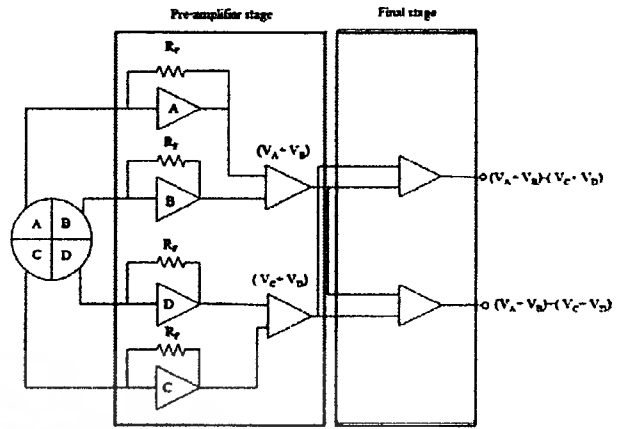


FIGURE 3. Block diagram for the PSD read-out circuit.

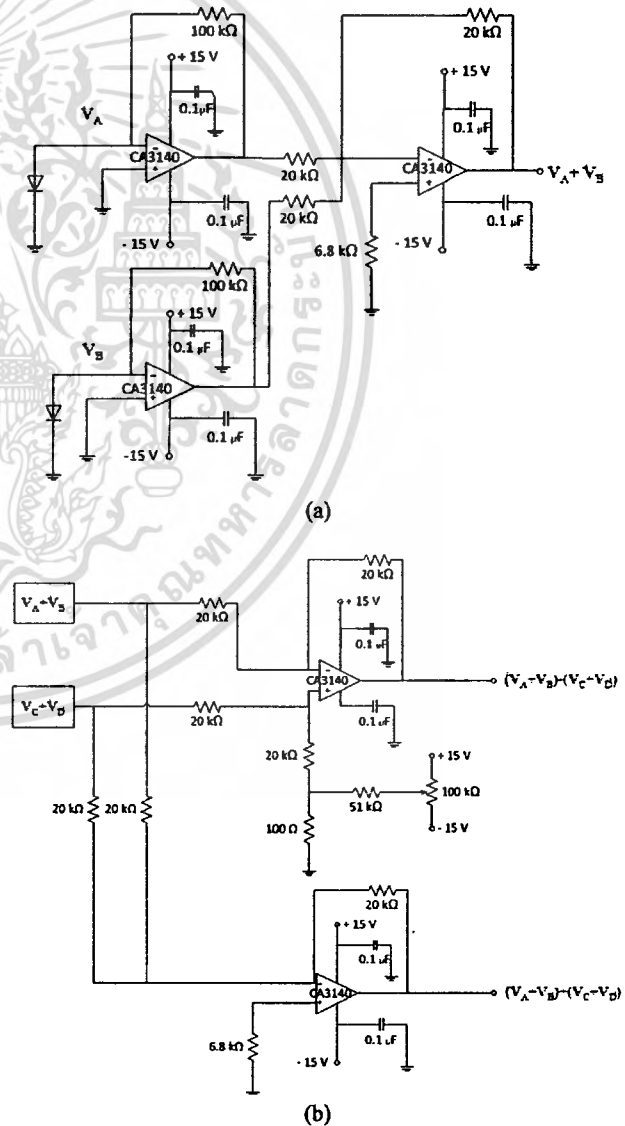


FIGURE 4. Schematic diagram of the PSD read-out circuit: (a) a pre-amplifier stage consisting of a current-to-voltage amplifier and a summing amplifier (b) a final stage consisting of a differential amplifier and a summing amplifier.

### 3. EXPERIMENTAL

#### 3.1 Characterization of a PSD read-out circuit

The implemented read-out circuit was characterized to ensure the linearity of the output signal in response to the displacement of the laser spot. The position of a laser diode was fixed and positioned in such a way that it is perpendicular to the PSD sensor. The PSD sensor was attached to a xyz microstage and was positioned so that the laser spot was located at the center of the PSD sensor. Then, the PSD sensor was moved across the x direction with a step length of 0.2 mm. The voltage signals at the final stage of the read-out circuit were simultaneously recorded.

#### 3.2 System performance testing

Experiments were conducted to characterize the long term stability of the system when operating the cantilever sensor in air and liquid medium. AFM probes (SiNi, Budget Sensors) were used as a microcantilever sensor in this study. The measurement system was set up as shown in Figure 1. A focused laser beam was irradiated onto the backside of the microcantilever. The reflected beam was detected with a PSD sensor. The PSD was positioned in such a way that the laser spot was at the center. The output voltages of the read-out circuit were recorded for a period of 15 minutes with a time step of 10 seconds.

Performance of the measurement system was tested using the experimental setup shown in Figure 1. In this experiment, the microcantilever sensor was attached to a goniometer. The goniometer angle was adjusted to simulate the bending of the microcantilever beam. The experiment was then carried out to measure the output voltage of the read-out circuit in response to the angle of the goniometer.

### 4. RESULTS AND DISCUSSION

The output voltages of the differential amplifier ( $V_{A+B} - V_{C+D}$ ) in response to the position of the laser spot on the PSD sensor were recorded and plotted as shown in Figure 5. It shows a good linearity when the laser spot was within  $\pm 1$  mm. The sensitivity of the PSD read-out circuit was 75 mV/mm, approximately.

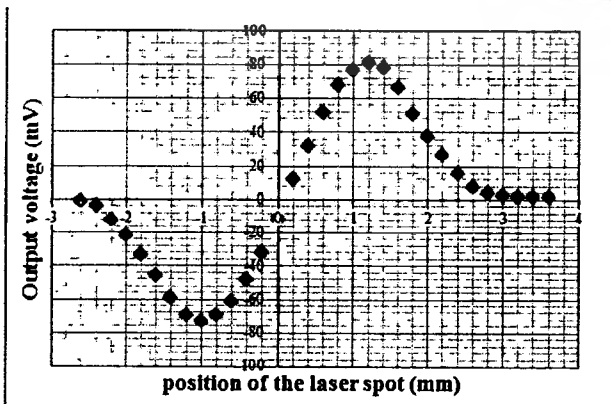
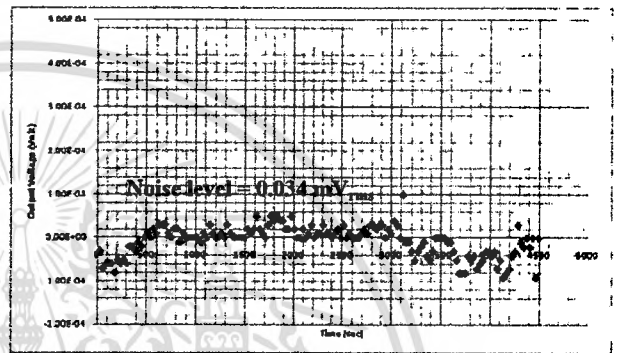


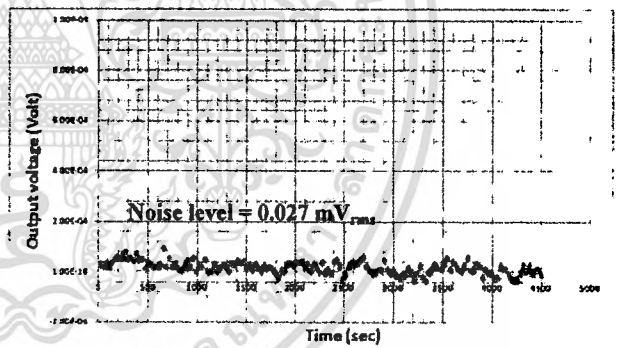
FIGURE 5. The relationship between the output voltages of the final-stage circuits and the position of the laser spot on the PSD sensor.

For the long term stability test, the experimental results (see Figure 6) showed that the noise level of the system in root mean square voltage was about 0.034 mV when operating the cantilever sensor in air and 0.027 mV when the cantilever sensor was in water.

To demonstrate a use of the developed optical beam deflection detection system to measure the deflection of a microcantilever sensor, the microcantilever sensor was fixed to a goniometer. The goniometer angle was adjusted to simulate the bending of the microcantilever beam. The output voltage of the differential amplifier in response to the angle of the goniometer (0.033 to 0.1 deg) is shown in Figure 7.



(a)



(b)

FIGURE 6. The measurement results obtained from the long-term stability test when a microcantilever sensor operated in (a) air and (b) liquid.

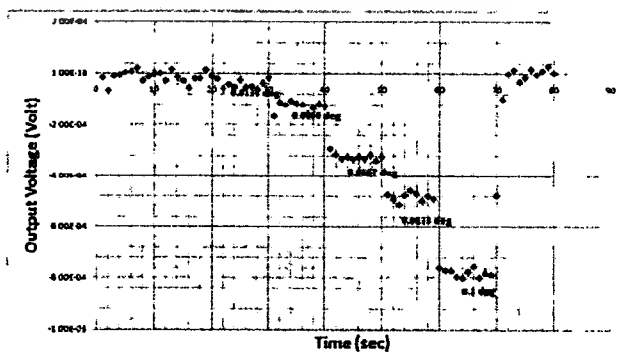


FIGURE 7. The measurement results showing the output voltage of the read-out circuit in response to the bending angle of the microcantilever sensor.

## 5. CONCLUSION

In this paper, the design and development of the optical beam deflection detection system was presented. The design of the laser diode driver was based on the Howland current source. A high sensitive PSD was employed to measure the displacement of the laser spot on the PSD which is related to cantilever bending. The implemented read-out circuit was characterized to ensure the linearity of the output signal in response to the displacement of the laser spot. Experimental results show that a good linearity can be obtained when the laser spot was within  $\pm 1$  mm of the PSD active area. The sensitivity of the PSD read-out circuit was about 75 mV/mm. The noise level of the system in root mean square voltage was about 0.03 mV.

## ACKNOWLEDGMENTS

Authors would like to acknowledge office of National Research Council of Thailand (NRCT) and Faculty of Science, Silpakorn University for funding and financial support.

- [1] Vo-Dinh, T., Cullum, B. M., and Stokes, D. L., Nanosensors and biochips: Frontiers in biomolecular diagnostics, *Sens. Actuators B*, vol. 74, pp. 2–11, 2001.
- [2] McKendry, R., Zhang, J., Arntz, Y., et al., Multiple label free biodetection and quantitative DNA-binding assays on a nanomechanical cantilever array, *Proc. Natl. Acad. Sci. US*, vol. 99, no. 15, pp. 9783–9788, Jul. 2002. 3.
- [3] Tamayo, J., Humphris, A. D. L., Malloy, A. M., and Miles, M. J., Chemical sensors and biosensors in liquid environment based on microcantilevers with amplified quality factor, *Ultramicroscopy*, vol. 86, no. 1/2, pp. 167–173, Jan. 2001.
- [4] Ilic, B., Craighead, H. G., Krylov, S., Senaratne, W., Ober, C., and Neuzil, P., *J. Appl. Phys.*, 2004, 95(7), 3694–3703.
- [5] Stoney, G. G., The tension of metallic film deposited by electrolysis, *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 82, pp. 172–175, 1909.
- [6] Pease, R. A., AN 1515 – A comprehensive study of Howland current pump, National Semiconductor, January 29, 2008. (<http://www.ti.com/lit/an/snoa474/snoa474.pdf>)



PCL XL Error  
Subsystem:  
Error:  
Operator:  
Position:

KERNEL  
IllegalCharacterData  
ReadChar  
3537860



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้