

เครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสง

FIBER OPTIC SENSORS



นางสาวมยุรี หาญสุภาณุสรณ์  
MISS. MAYUREE HANSUPANUSORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2538

ISBN 974-621-365-2

# FIBER OPTIC SENSORS



A THESIS SUBMITTED IN PATIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
GRADUATE SCHOOL  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
1995  
ISBN 974-621-365-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสง

นักศึกษา

นางสาวมยุรี หาญสุภาอนุสรณ์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร. ปรีชา ยุพาพิน

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

ผศ. สุวรรณ คูสำราญ

และ ผศ. ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต

ระดับการศึกษา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ. ศ.

2538

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบต้นแบบของเครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสงเพื่อทำเป็นเครื่องตรวจวัด แรง ตำแหน่ง และอุณหภูมิ โดยมีหลักการว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางกายภาพที่ต้องการตรวจวัดมีความสัมพันธ์กับปริมาณของการกระตุ้นบนเส้นใยนำแสง สำหรับการออกแบบระบบตรวจวัดแรงนั้นได้ออกแบบเพื่อทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงกระตุ้นบนเส้นใยนำแสงที่สัมพันธ์กับความเข้มแสงเอาท์พุทโดยใช้ขนาดของแรงตั้งแต่ 0-5 นิวตัน ส่วนการตรวจวัดตำแหน่งทำได้โดยตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงระยะห่างสองจุดของตำแหน่งของตัวกระตุ้นบนเส้นใยนำแสงสัมพันธ์กับความต่างของเส้นทางเดินของแสงระหว่างตัวกระตุ้น โดยตำแหน่งดังกล่าวนั้นอยู่ในช่วง 50-120 เซนติเมตร สำหรับการตรวจวัดอุณหภูมิทำได้โดยการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของระยะความต่างของเส้นทางเดินของแสงสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 25-120 องศาเซลเซียสเมื่อกำหนดให้ตำแหน่งคงที่ จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกราฟของข้อมูล พบว่าการตรวจวัดแรงมีกราฟของความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้งพาราโบลา ส่วนการตรวจวัดตำแหน่งกราฟของความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น สำหรับการตรวจวัดอุณหภูมินั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระยะความต่างของเส้นทางเดินของแสงจะเพิ่มขึ้นด้วยโดยมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่าเครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสงสำหรับในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมกับการตรวจวัดตำแหน่งที่ดีที่สุด โดยพบว่ามีความผิดพลาดจากการทดลองเป็น 5.4% ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆดังกล่าวนี้ย่อมเป็นการชี้ให้เห็นว่าเครื่องตรวจวัดด้วยเส้นใยนำแสงนี้มีแนวโน้มที่สามารถพัฒนาเป็นเครื่องมือตรวจวัดที่สมบูรณ์ต่อไป

Thesis Title	Fiber Optic Sensors
Student	Miss. Mayuree Hansupanusorn
Thesis Advisor	Assist. Prof. Dr. Preecha Yupapin
Thesis Coadvisors	Assist. Prof. Suwan Kusamran Assist. Prof. Dr. Sanay Akavipat
Level of study	Master of Science in Applied Physics
Department	Applied Physics, Faculty of Science King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	1995

## ABSTRACT

A prototype of fiber optic sensors, using a polarization maintaining fiber is investigated. A number of sensor applications such as force, position and temperature sensors were employed and demonstrated. The principle is that the change of physical quantity of the sensing fiber is relatively varied as the coupling output light when light propagates through it. The theoretical aspects of the sensor system and its experimental arrangement was discussed and demonstrated. The range of applied force, using in the force sensor system was 0-5 N. The result showed the parabolic relationship between force and normalized intensity. The range of displacement of 50-120 cm was applied in the displacement sensor system, the result was that the change of optical path difference depended on the the variation of displacement. The linear relationship of displacement sensor was observed. The applied temperature employed of 25-120 °C was employed in the temperature sensing unit, the

experimental result was showed that the optical path difference was changed by the temperature variations. The linearity of the relationship between optical path difference and temperature was obtained. In conclusion, experimental results have shown that this device may be configured as the fiber optic position sensor, where the relative error of 5.4 % was observed in this investigation.



## กิตติกรรมประกาศ

ความภาคภูมิใจอันเกิดจากความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่ข้าพเจ้าได้รับ จะบังเกิดขึ้นไม่ได้หากปราศจากบุคคลสำคัญที่ข้าพเจ้าเคารพเป็นอย่างสูง คือคุณครูทุกท่านผู้ซึ่งประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ให้โอกาสแก่ข้าพเจ้าในการเข้ามาศึกษา และให้ความรู้ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ในภาควิชา และบุคคลสำคัญที่ก่อให้เกิดความสำเร็จในครั้งนี้คือ ผศ. ดร. ปรีชา ยุพาพิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับเส้นใยนำแสงให้แก่ข้าพเจ้าอย่างเต็มที่ตั้งแต่เริ่มต้นด้วยความอดทน ตลอดจนคอยกระตุ้นความรับผิดชอบในหน้าที่ให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา ขอขอบพระคุณ ผศ. สุวรรณ คูสำราญ, ผศ. ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต และ ผศ. อนุพงศ์ สรงประภา ที่คอยให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ แก้ไข และปรับปรุงงานวิจัยให้ดียิ่งๆ ขึ้นตามลำดับ รวมทั้ง ดร. รัชภาคย์ จิตต์อารี ที่มีส่วนสำคัญในการให้คำแนะนำ และปรับปรุงความรู้ ด้วยความเต็มใจและสละเวลาอันมีค่า ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยจนสำเร็จ และบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ และมอบทุนการศึกษาให้สามารถทำการศึกษาวิจัยได้อย่างเต็มที่

ขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยออปโตอิเล็กทรอนิกส์ และบุคคลรอบข้างทุกคนที่ร่วมทุกข์ ร่วมสุข ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ท้ายที่สุดนี้ข้าพเจ้าขอระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ที่ข้าพเจ้าเคารพรักและผู้มีอุปการะแก่ข้าพเจ้าทุกท่าน ที่คอยสนับสนุนปัจจัยด้านต่างๆ และให้กำลังใจมิให้ทอดอภัยต่ออุปสรรคใดๆ

ขอขอบคุณประโยชน์ที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

มยรี หาญสุภาานุสรณ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
คำนิยามศัพท์.....	XIII
<b>บทที่ 1. บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 การดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	3
<b>บทที่ 2. ทฤษฎีและหลักการของเส้นใยนำแสง</b>	
2.1 ปรัชญาการณพื้นฐานของแสง.....	4
2.1.1 การหักเหและการสะท้อนกลับหมดของแสง.....	4
2.1.2 การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน.....	5
2.1.3 โฟลาโรเซชัน.....	7
2.1.4 การหักเหสองแนว.....	10
2.2 ชนิดของเส้นใยนำแสง.....	12
2.2.1 เส้นใย	
2.2.2 เส้นใยนำแสงโหมดเดียว.....	15
2.2.3 เส้นใยนำแสงโหมดเดียวชนิดอนุรักษ์สภาวะทางโฟลาโรเซชัน.....	16

2.3	พารามิเตอร์ของเส้นใยนำแสง.....	19
2.3.1	ค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะ.....	19
2.3.2	นิวเมอริคัล อะเพอร์เจอร์.....	20
2.3.3	มุมรับแสง.....	21
2.3.4	ความถี่นอร์มอลไลซ์.....	22
2.4	สรุป.....	23
บทที่ 3	แหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์รับสัญญาณแสง	
3.1	ประเภทของแหล่งกำเนิดแสง.....	25
3.1.1	แอล อี ดี.....	26
3.1.2	เลเซอร์ไดโอด.....	29
3.2	อุปกรณ์รับสัญญาณแสง.....	32
3.2.1	โฟโตไดโอดแบบธรรมดา.....	32
3.2.2	โฟโตไดโอดแบบพิน.....	33
3.2.3	โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์.....	34
3.2.4	โฟโตทรานซิสเตอร์.....	35
3.2.5	อุปกรณ์รับ ซี ซี ดี.....	36
3.3	สรุป.....	37
บทที่ 4	อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์	
4.1	อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน.....	38
4.2	อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแมช-เซนเดอร์.....	41
4.3	อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแซนแยค.....	42
4.4	สรุป.....	44
บทที่ 5	ขั้นตอนการดำเนินการตรวจวัด	
5.1	การออกแบบระบบตรวจวัด.....	45
5.2	การตรวจวัดแรง.....	50
5.3	การตรวจวัดตำแหน่ง.....	52
5.4	การตรวจวัดอุณหภูมิ.....	54
5.5	สรุป.....	56

บทที่ 6. ผลการทดลอง	
6.1 ผลการทดลองการตรวจวัดแรง.....	57
6.2 ผลการทดลองการตรวจวัดตำแหน่ง.....	63
6.3 ผลการทดลองการตรวจวัดอุณหภูมิ.....	69
6.4 อภิปรายผลการทดลองและสรุป.....	74
บทที่ 7. บทสรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อไป	
7.1 บทสรุป.....	76
7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	78
7.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป.....	79
เอกสารอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก ก. รูปแสดงชุดการทดลองเครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสง.....	ก-1 ~ ก-5
ภาคผนวก ข. แบบแปลนชิ้นส่วนของชุดตรวจวัดแรง และอุณหภูมิ.....	ข-1 ~ ข-3
ภาคผนวก ค. ข้อมูลผลการทดลองวัดค่าความยาวโคฮีเรนซ์ของเลเซอร์ไดโอด รุ่น LT 023 MDO และ LT 010 MDO.....	ค-1 ~ ค-3
ภาคผนวก ง. ข้อมูลจำลอง (simulation data) แสดงผลของอัตราการคับปลิงแสงสูงสุด โดยพิจารณาจากการปรับมุม (ระหว่างทิศของแรงที่กระทำกับแกน ที่มีความเร็วมากกว่าของเส้นใยนำแสง).....	ง-1 ~ ง-3
ภาคผนวก จ. รายงานการสอบเทียบมวลที่ใช้ในการทดลองกับมวลมาตรฐาน (ข้อมูลจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ) และการคำนวณหาค่าความ ไม่แน่นอนของการวัด.....	จ-1 ~ จ-2

## ประวัติผู้เขียน

## VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	แสดงดัชนีหักเหแสงของผลึกหักเหสองแนว แบบผลึกแกนเดียว (uniaxial).....	10
ตารางที่ 3.1	แสดงความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นแสง เมื่อเปลี่ยนชนิดของสารที่ใช้ทำ แอล อี ดี.....	27
ตารางที่ 6.1	แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ของความเข้มแสงเปรียบเทียบกับแรง ที่กระทำที่อุณหภูมิ 25°C.....	61
ตารางที่ 6.2	แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนระยะ OPD ของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสันและระยะห่างระหว่างจุด ที่ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 25°C.....	67
ตารางที่ 6.3	แสดงข้อมูลระยะ OPD ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	72
ตารางที่ ง-1	แสดงข้อมูลจำลองความสัมพันธ์ของอัตราการคัปปลิงแสงสูงสุดกับมุม (ระหว่างทิศของแรงที่กระทำกับแกนที่มีความเร็วมากกว่า ของเส้นใยนำแสง).....	ง-2
ตารางที่ จ-1	แสดงรายงานการสอบเทียบมวลที่ใช้ในการทดลองกับมวลมาตรฐาน.....	จ-1
ตารางที่ จ-2	แสดงค่าที่แพ็คเกจสัมพันธ์กับระดับความเชื่อมั่น ของความไม่แน่นอน (confidence level).....	จ-2

## VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	แสดงระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์ตรวจวัด.....	3
รูปที่ 2.1	แสดงการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงโดยอาศัยหลักการ การสะท้อนกลับหมด.....	5
รูปที่ 2.2	แสดงผลที่ได้จากการแทรกสอดและการเลี้ยวเบน ซึ่งอธิบายด้วยเฟสและแอมพลิจูดของคลื่น.....	7
รูปที่ 2.3	แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโพลาไรซ์ระนาบ.....	8
รูปที่ 2.4	แสดงแสงโพลาไรซ์ระนาบตกกระทบทำมุม $\theta$ กับแกนโพลาไรซ์.....	9
รูปที่ 2.5	แสดงแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นจุดอยู่ในผลึกหักเหสองแนว.....	11
รูปที่ 2.6	แสดงแสงไม่โพลาไรซ์เมื่อตกกระทบตั้งฉากกับผิวของผลึกที่มีแกนทัศน ( ก ) ตั้งฉากกับผิว ( ข ) ขนานกับผิวผลึก และ ( ค ) ทำมุมใดๆกับผิวผลึก.....	12
รูปที่ 2.7	แสดงลักษณะของแสงที่เดินทางภายในแกนเส้นใยนำแสง ( ก ) เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว ( ข ) เส้นใยนำแสงหลายโหมด ชนิดดัชนีชั้นบันได (step-index multimode fiber) ( ค ) เส้นใยนำแสง หลายโหมดชนิดดัชนีรูปมน (graded index multimode fiber).....	13
รูปที่ 2.8	แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยนำแสงหลายโหมด.....	14
รูปที่ 2.9	แสดงชนิดของเส้นใยนำแสงตามลักษณะดัชนีหักเหแสงของแกน ( ก ) กราฟแสดงดัชนีหักเหแสงของแกนเมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีหักเหแสง ของอากาศมีลักษณะเป็นชั้นบันได ( ข ) เพื่อลดการกระจายของสัญญาณ โดยการสร้างให้ดัชนีหักเหภายในแกนมีค่าค่อยๆเปลี่ยนแปลงไปโดยมี ลักษณะต่อเนื่องมากกว่า.....	15
รูปที่ 2.10	แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยว.....	15
รูปที่ 2.11	แสดงโหมดของแสงโพลาไรซ์สองโหมดที่ตั้งฉากกัน โดยความเร็วต่างกัน.....	16
รูปที่ 2.12	แสดงการจัดประเภทของเส้นใยนำแสง	

## IX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	ชนิดอนุรักษัสภาพะทางโพลาริเซชัน.....	17
รูปที่ 2.13	แสดงตัวอย่างของเส้นใยนำแสงไฮลิ-ไบร์พริเนเจอร์บางชนิด.....	18
รูปที่ 2.14	แสดงการเปรียบเทียบ ( ก ) ความสัมพันธ์ของ ความยาวบิตส์ของเส้นใยนำแสง และ ( ข ) ความสามารถในการ อนุรักษัสภาพะทางโพลาริเซชันภายในของเส้นใยนำแสง ชนิดไฮลิ ไบร์พริเนเจอร์.....	19
รูปที่ 2.15	แสดงความสัมพันธ์ของนิวเมอริคัล อะเพอร์เจอร์ และขนาดของแกนใน การป้อนแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงอย่างมี ประสิทธิภาพ.....	20
รูปที่ 2.16	แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง.....	22
รูปที่ 2.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่นอร์มอลไลซ์ และโหมดของเส้นใยนำแสง.....	23
รูปที่ 3.1	แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ แอล อี ดี.....	26
รูปที่ 3.2	แสดงโครงสร้างของ แอล อี ดี ตามลักษณะการเปล่งแสง.....	28
รูปที่ 3.3	แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอด.....	29
รูปที่ 3.4	แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไบแอสกับกำลังของแสงที่เปล่งออกมา.....	30
รูปที่ 3.5	แสดงเลเซอร์ไดโอดชนิดโหมดเดียวและชนิดหลายโหมดของ Sharp รุ่น LT022MDO และ LT023MDO ที่ความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร.....	31
รูปที่ 3.6	แสดงโฟโตไดโอดแบบธรรมดา.....	33
รูปที่ 3.7	แสดงโครงสร้างของพินโฟโตไดโอด.....	34
รูปที่ 3.8	แสดงโครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์.....	34
รูปที่ 3.9	แสดงโครงสร้างของโฟโตทรานซิสเตอร์.....	35
รูปที่ 3.10	แสดงโครงสร้างทั่วไปและการทำงานของซี ซี ดี.....	36
รูปที่ 4.1	แสดงชุดอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน.....	39
รูปที่ 4.2	แสดงสัญญาณการแทรกสอดที่อ่านค่าได้บนจอออสซิลอสโคป.....	40
รูปที่ 4.3	แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเมื่อระยะ OPD เปลี่ยนไป (เลื่อนปรับระยะแขนข้างหนึ่งของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์) เป็นสเปกตรัม ที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดชนิดหลายโหมด.....	40
รูปที่ 4.4	แสดงชุดอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแมช-เซนเดอร์.....	41

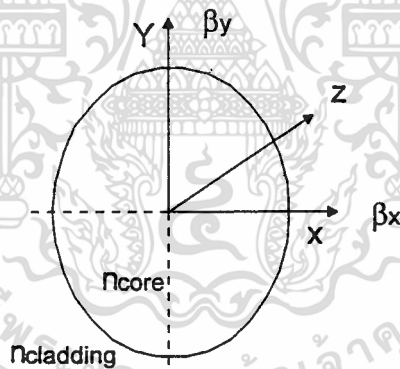
รูปที่ 4.5	แสดงเส้นทางเดินของแสงในอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแซนแนค.....	42
รูปที่ 4.6	แสดงชุดเครื่องตรวจวัดอัตราการหมุนโดยใช้เส้นใยนำแสง.....	43
รูปที่ 5.1	แสดงระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์การตรวจวัด.....	46
รูปที่ 5.2	แสดงสัญญาณความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้เมื่อผ่านอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์.....	47
รูปที่ 5.3	แสดงสัญญาณแสงที่ตรวจวัดได้ ( ก ) เมื่อหมุนตัววิเคราะห์ขนาน และ ( ข ) ตั้งฉากกับตัวทำแสงโพลาไรซ์.....	48
รูปที่ 5.4	แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสระหว่างโหมดทั้งสองของการโพลาไรเซชัน.....	49
รูปที่ 5.5	แสดงตำแหน่งตรวจวัดแรงบนเส้นใยนำแสง.....	50
รูปที่ 5.6	แสดงการตรวจวัดตำแหน่งบนเส้นใยนำแสง.....	52
รูปที่ 5.7	แสดงระยะ OPD เปรียบเทียบที่ตำแหน่งกลางและตำแหน่งซ้าย-ขวา.....	53
รูปที่ 5.8	แสดงตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิ.....	55
รูปที่ 6.1	แสดงขั้นตอนการตรวจวัดแรง.....	58
รูปที่ 6.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มแสงเปรียบเทียบกับแรงที่กระทำ ที่อุณหภูมิ 25°C.....	62
รูปที่ 6.3	แสดงวิธีการตรวจวัดตำแหน่ง.....	64
รูปที่ 6.4	แสดงสัญญาณความเข้มแสงสูงสุดที่อ่านค่าบนจอออสซิลโลสโคป เมื่อทำการปรับเลื่อนระยะกระบอก $M_2$ เข้าหรือออกจากตำแหน่งสมดุล.....	65
รูปที่ 6.5	แสดงระยะ OPD เมื่อทำการปรับเลื่อนระยะกระบอก $M_2$ ของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์เข้าหรือออกจากตำแหน่งสมดุล ที่อุณหภูมิ 25°C (จะได้ผลมีลักษณะสมมาตรทั้งซ้ายและขวา).....	66
รูปที่ 6.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงระยะ OPD ของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสันและระยะห่างระหว่างจุด ที่ทำการกระตุ้น ที่อุณหภูมิ 25°C.....	68
รูปที่ 6.7	แสดงขั้นตอนการตรวจวัดอุณหภูมิ.....	70
รูปที่ 6.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะ OPD ที่เปลี่ยนแปลง กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	73
รูปที่ ก-1	แสดงการจัดเรียงชุดการทดลอง.....	ก-1
รูปที่ ก-2	แสดงระบบตรวจวัดบนเส้นใยนำแสง.....	ก-1
รูปที่ ก-3	แสดงแสงจากเลเซอร์ไดโอดลอนซ์เข้าสู่เส้นใยนำแสง	

	โดยจัดเรียงบนแท่นปรับ 3 มิติ.....	ก-2
รูปที่ ก-4	แสดงแสงเลเซอร์ผ่านเข้าสู่เลนส์ทำให้เป็นลำแสงขนาน ผ่านโพลาไรเซอร์แล้วเข้าสู่เลนส์รวมแสงเพื่อรวมแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสง.....	ก-2
รูปที่ ก-5	แสดงแสงเมื่อผ่านออกจากปลายเส้นใยนำแสง เข้าสู่ส่วนประมวลสัญญาณแสง.....	ก-3
รูปที่ ก-6	แสดงส่วนประมวลสัญญาณแสง.....	ก-3
รูปที่ ก-7	แสดงส่วนของชุดอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน ก่อนเข้าสู่ตัวรับสัญญาณแสง.....	ก-4
รูปที่ ก-8	แสดงการมอดูเลตด้วยสัญญาณความถี่ค่าหนึ่ง โดยติดกระจก M2 ที่ลำโพง.....	ก-4
รูปที่ ก-9	แสดงแสงจากเส้นใยนำแสงผ่านเข้าสู่ตัวโพลาไรเซอร์ ก่อนเข้าสู่ชุดอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์.....	ก-5
รูปที่ ก-10	แสดงแขนของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ข้างหนึ่ง ที่สามารถหมุนปรับได้อย่างละเอียด 3 มิติ.....	ก-5
รูปที่ ข-1	แสดงชิ้นส่วนตรวจวัดแรง.....	ข-1
รูปที่ ข-2	แสดงชิ้นส่วนระบบควบคุมอุณหภูมิ (ชั้นบน).....	ข-2
รูปที่ ข-3	แสดงชิ้นส่วนระบบควบคุมอุณหภูมิ (ชั้นล่าง).....	ข-3
รูปที่ ค-1	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของสัญญาณความเข้มแสงจาก เลเซอร์ไดโอด sharp รุ่น LT023MDO และระยะเลื่อนปรับกระจก M2 ของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ (ทำการทดลอง 3 ครั้ง).....	ค-1
รูปที่ ค-2	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของสัญญาณความเข้มแสงจาก เลเซอร์ไดโอด sharp รุ่น LT023MDO และระยะเลื่อนปรับกระจก M2 ของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์.....	ค-2
รูปที่ ค-3	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของสัญญาณความเข้มแสงจาก เลเซอร์ไดโอด sharp รุ่น LT010MDO และระยะเลื่อนปรับกระจก M2 ของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์.....	ค-3
รูปที่ ง-1	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการใช้พลังงานสูงสุดกับมุม (ระหว่างทิศของแรงที่กระทำกับแกนที่มีความเร็วมากกว่า ของเส้นใยนำแสง).....	ง-3

# คำนิยามศัพท์

## 1. ไบรฟรินเจนซ์ (birefringence)

หมายถึงพารามิเตอร์ที่แสดงถึงสภาพทางโพลาไรเซชัน (polarization) ของแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง โดยอธิบายในเทอมของผลต่างของค่าคงที่ของการแพร่  $\delta\beta = \beta_y - \beta_x$  เมื่อ  $\beta$  คือค่าคงที่ของการแพร่ (propagation constant) ของโพลาไรเซชันในแนวแกน y และในแนวแกน x อันเนื่องมาจากความไม่สมมาตรของการกระจายค่าดัชนีหักเหในส่วนของแกน (core) ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของเส้นใยนำแสงเอง (intrinsic birefringence) หรือการให้ความเค้น แรง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำให้เกิดการรบกวนจากภายนอก (extrinsic birefringence) ของสถานะทางโพลาไรเซชันของแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง โดยจะทำให้ความเร็วของการแพร่ของระนาบโพลาไรเซชันในแนวแกนทั้งสองไม่เท่ากัน [ 22 ]



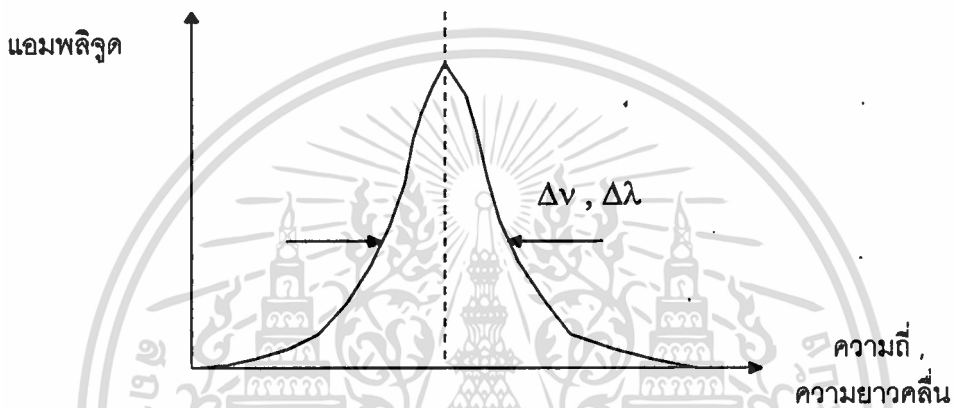
รูปที่ 1 แสดงความไม่สมมาตรของการกระจายค่าดัชนีหักเหในส่วนของแกน

## 2. นอร์มอลไลซ์ไบรฟรินเจนซ์ (normalized birefringence)

หมายถึงอัตราส่วนไบรฟรินเจนซ์เปรียบเทียบ ( B ) โดย  $B = \delta\beta/\beta$  เมื่อ  $\beta$  คือค่าเฉลี่ยระหว่าง  $\beta_y$  และ  $\beta_x$  [ 22 ]

### 3. แบนวิดธ์ (bandwidth)

เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงช่วงกว้างของความถี่ ( $\Delta\nu$ ) หรือช่วงกว้างของความยาวคลื่น ( $\Delta\lambda$ ) ของแสงซึ่งแสดงดังรูปที่ 2 สำหรับแหล่งกำเนิดแสงและเส้นใยนำแสงที่มีแบนวิดธ์กว้าง หมายความว่า ในเวลา 1 วินาที สามารถส่งพัลส์ของแสงได้มาก หรือสามารถส่งข่าวสารได้เป็นจำนวนมากนั่นเอง

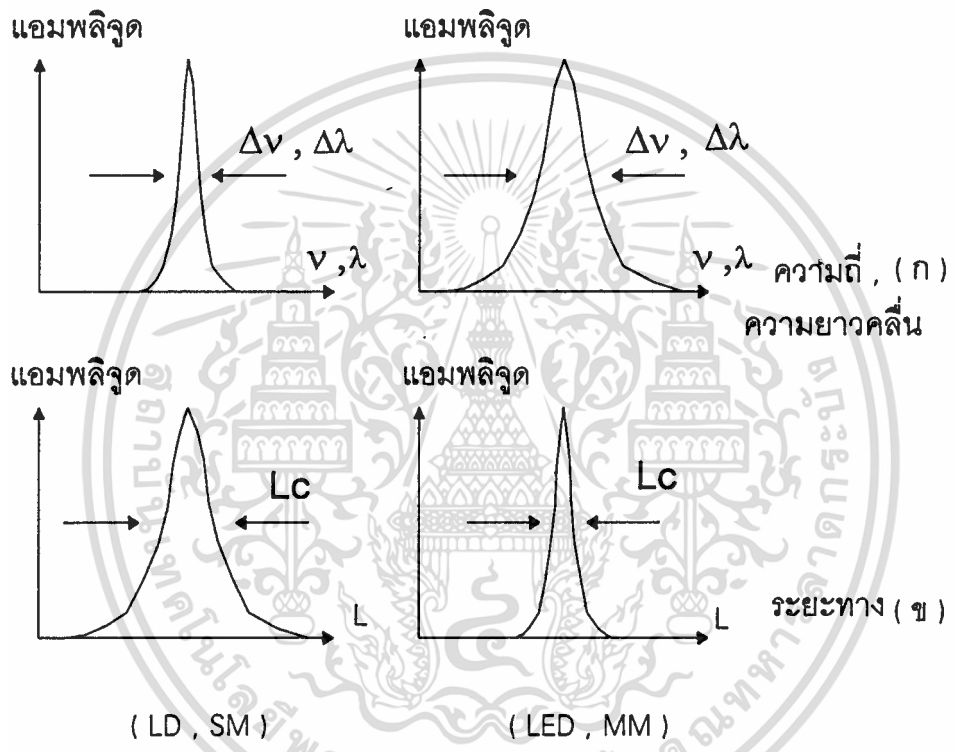


รูปที่ 2 แสดงการกระจายสเปกตรัม หรือแบนวิดธ์

แสงจากเลเซอร์สารกึ่งตัวนำเลเซอร์ไดโอด (laser diode) จะมีแบนวิดธ์ในช่วงที่แคบกว่า แอล ซี ดี (light emitting diode : LED) ดังนั้นเลเซอร์ไดโอดจึงแสดงคุณสมบัติความเป็นแสงสีเดียว (monochromatic) ซึ่งจะทำให้แสงที่ได้มีประสิทธิภาพเหมาะกับการลอนซ์ (launching) แสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง (แบนวิดธ์ยิ่งแคบจะยิ่งแสดงคุณสมบัติความเป็นแสงสีเดียว) หรือหากทำการเปรียบเทียบเลเซอร์ไดโอดซึ่งแบ่งเป็นชนิดโหมดเดี่ยว (single mode laser) และชนิดหลายโหมด (multimode laser) พบว่า เลเซอร์ไดโอดชนิดหลายโหมดจะมีแบนวิดธ์กว้างกว่าชนิดโหมดเดี่ยว จึงสามารถส่งข้อมูลได้ในปริมาณที่มากกว่าเป็นต้น โดยแสดงการเปรียบเทียบดังรูปที่ 3 สำหรับในงานด้านการสื่อสารนั้นนิยมใช้เลเซอร์ไดโอดมากกว่าแอล ซี ดี ทั้งที่มีแบนวิดธ์แคบกว่าเนื่องจากข้อเสียของแอล ซี ดี คือมีกำลังต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเลเซอร์ไดโอดจึงนิยมใช้ในระบบการสื่อสารที่มีระยะทางไม่ไกลนัก

#### 4. ความยาวโคฮีเรนซ์ (coherence length)

เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงเช่นเดียวกัน โดยความยาวโคฮีเรนซ์จะแปรผกผันกับแบนวิดธ์ กล่าวคือเลเซอร์ไดโอดชนิดหลายโหมดซึ่งมีแบนวิดธ์กว้างกว่าเลเซอร์ไดโอดชนิดโหมดเดียวจะมีความยาวโคฮีเรนซ์สั้นกว่า (short coherence length) ดังรูปที่ 3



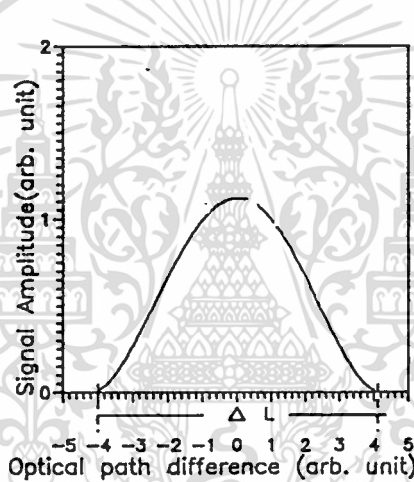
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของ  $(\nu)$  แบนวิดธ์ และ  $(x)$  ความยาวโคฮีเรนซ์  
เปรียบเทียบระหว่างเลเซอร์ไดโอด (LD) - แอลอีดี (LED)  
และเลเซอร์ไดโอดชนิดโหมดเดียว (SM) - เลเซอร์ไดโอดชนิดหลายโหมด (MM)

พิจารณาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวโคฮีเรนซ์ และแบนวิดธ์ของแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งแสดงเป็นสมการดังนี้ [ 24,25 ]

$$L_c = c / \Delta\nu = \lambda / \Delta\lambda \quad (1)$$

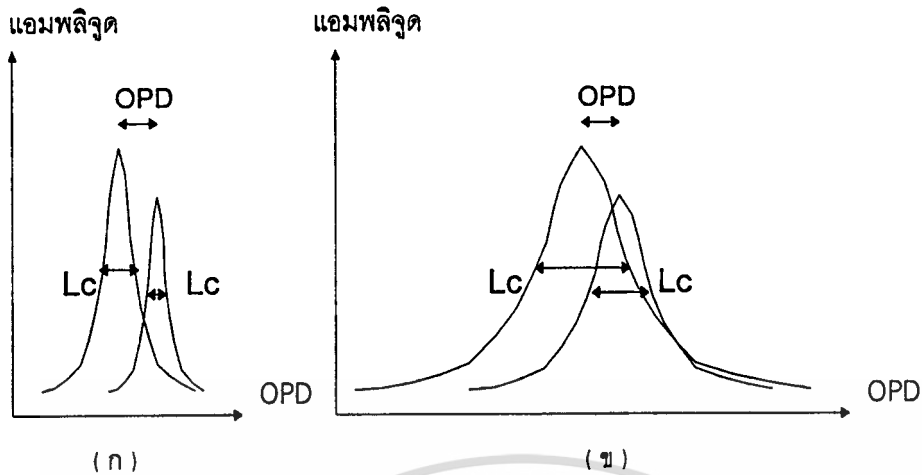
เมื่อ  $L_c$  คือความยาวโคฮีเรนซ์ของแหล่งกำเนิดแสง  
 $\Delta v, \Delta \lambda$  คือแบนวิดธ์ของแหล่งกำเนิดแสง

ความยาวโคฮีเรนซ์ของแหล่งกำเนิดแสงสามารถหาได้จากชุดอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน (Michelson Interferometer) โดยความยาวโคฮีเรนซ์สามารถหาได้จากระยะช่วงกว้างของพีคของสัญญาณในแนวระดับโดยวัดจากช่วงแบ่งครึ่งแอมพลิจูดของพีคสัญญาณที่มีค่าสูงสุด หรือ FWHM (full-width half-maximum) เมื่อระยะที่แกนทั้งสองของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์สมดุล ดังรูปที่ 4 (รายละเอียดศึกษาเพิ่มเติมจากภาคผนวก ค.)



รูปที่ 4 แสดงความยาวโคฮีเรนซ์ซึ่งหาได้จากระยะ FWHM ของพีคสัญญาณ  
 เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการแทรกสอดมาเขียนกราฟ

สำหรับในงานด้านการตรวจวัดจำเป็นต้องเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวโคฮีเรนซ์สั้น (ชนิดหลายโหมด) เนื่องจากมีความละเอียดในการวัดสูง โดยในการพิจารณาระยะความต่างของเส้นทางเดินของแสงหรือ OPD (optical path difference) นั้นหากแหล่งกำเนิดแสงมีความยาวโคฮีเรนซ์สั้น (พีคของสัญญาณจะแหลม) ซึ่งทำให้ค่าการจำแนก (resolution) พีคของสัญญาณที่เกิดขึ้นชัดเจน หรือละเอียดกว่าเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวโคฮีเรนซ์ยาว แสดงเปรียบเทียบดังรูปที่ 5 [ 10,11 ]



รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการจำแนกค่า OPD

( ก ) เมื่อแหล่งกำเนิดแสงมีความยาวโคฮีเรนซ์สั้น

( ข ) เมื่อแหล่งกำเนิดแสงมีความยาวโคฮีเรนซ์ยาว

## 5. ความยาวบิตส์ของเส้นใยนำแสง (fiber beat length)

ความยาวบิตส์ของเส้นใยนำแสง ( $L_B$ ) เป็นค่าที่บอกความสามารถของการรักษาภาวะโพลาไรเซชันของเส้นใยนำแสงแต่ละชนิด (polarization-maintaining fiber) นั่นคือถ้าเส้นใยนำแสงใดมีค่าความยาวบิตส์สั้น จะมีคุณสมบัติในการรักษาภาวะโพลาไรเซชันได้ดีกว่า ความยาวบิตส์ของเส้นใยนำแสงสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการ [ 14 ]

$$L_B = \lambda / B \quad (2)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยนำแสง

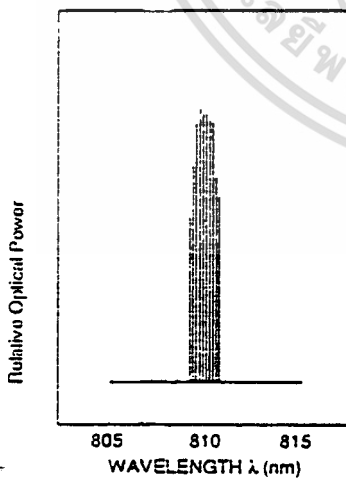
$B$  คือคอนอร์มอลไลซีไบร์พริเนนซ์

ดังนั้นเส้นใยนำแสงเส้นใดที่มีการกระจายค่าดัชนีหักเหในส่วนของแกนมาก นั่นคือจะมีค่าคอนอร์มอลไลซีไบร์พริเนนซ์มาก ซึ่งจะมีความยาวบิตส์สั้น

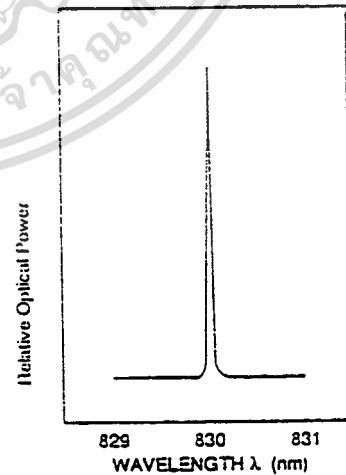
## 6. โหมดของแสงเลเซอร์

เนื่องจากออปติคัลเรโซเนเตอร์ในระบบเลเซอร์เป็นแบบฟาบรี-เพอร์โรอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ (fabry-perot interferometer) ทำให้แสงเลเซอร์ที่ออกมามีความถี่ต่างๆ ที่เหมาะสมกับสภาพเรโซเนเตอร์ของฟาบรี-เพอร์โรอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ ซึ่งในกรณีเช่นนี้พบว่าแสงเลเซอร์นั้นจะประกอบด้วยโหมด (modes) ต่างๆ ซึ่งแสดงรูปแบบของการกระจายค่าพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเลเซอร์ควิตี้ (laser cavity) โหมดที่เกิดขึ้นในเลเซอร์ควิตี้นั้นอาจพิจารณาได้เป็น 2 แบบ คือโหมดตามยาว (longitudinal modes หรือ axial modes) ซึ่งแสดงรูปแบบการเปล่งแสงเป็นสเปกตรัมของความยาวคลื่น ดังรูปที่ 6 โดยแสดงการเปรียบเทียบโหมดตามยาวของแสงเลเซอร์ชนิดหลายโหมดและชนิดโหมดเดี่ยวตามลำดับ ส่วนโหมดตามขวาง (transverse modes) หรือ TEM (transverse electromagnetic modes) ซึ่งพิจารณาจากรูปแบบของการกระจายพลังงานแสงที่เปล่งออกมา (เป็นจุดของแสง หรือพิจารณาจากขนาดของรัศมีของลำแสง) ดังรูปที่ 7 ซึ่งแสดงการกระจายพลังงานแสง (จุดของแสงที่เกิดขึ้น) ( ก ) แบบโหมดเดี่ยว ( ข ) ( ค ) และ ( ง ) แบบหลายโหมด เมื่อแสงเลเซอร์ถูกลอนซ์เข้าไปในเส้นใยนำแสง โหมดตามขวางของแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นจะเรียกว่าโหมด LP (linear polarized) แทน TEM ดังรูปที่ 8 แสดงโหมดของแสงที่ปลายเส้นใยนำแสงเมื่อแสงชนิดโหมดเดี่ยวคือ  $LP_{01}$  และชนิดหลายโหมดคือ  $LP_{11}$   $LP_{02}$  และ  $LP_{21}$  [ 19,32 ]

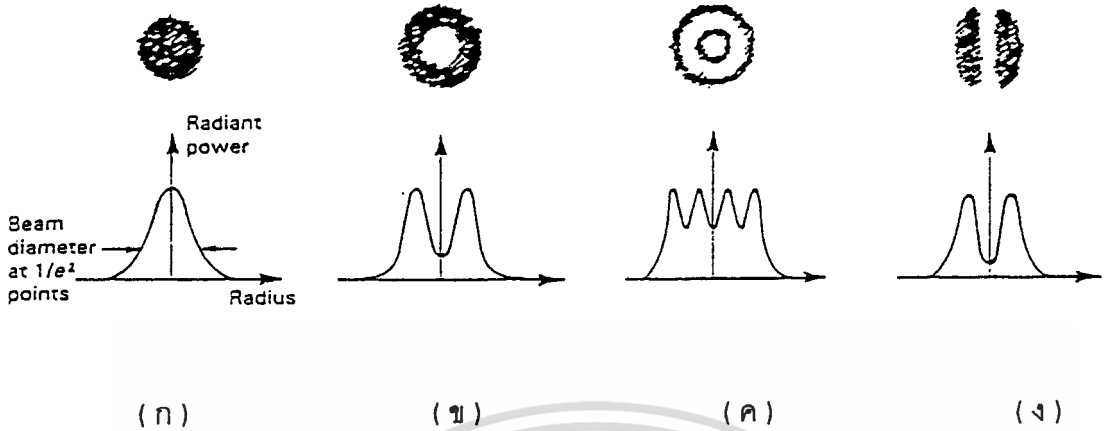
MULTI LONGITUDINAL MODE



SINGLE LONGITUDINAL MODE



รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบโหมดตามยาวของแสงเลเซอร์ชนิดหลายโหมด และชนิดโหมดเดี่ยวตามลำดับ



รูปที่ 7 แสดงการกระจายพลังงานแสง (จุดของแสงที่เกิดขึ้น)  
 ( ก ) โหมดพื้นฐาน TEM<sub>00</sub> แบบโหมดเดียว ( ข ) ( ค ) และ ( ง ) แบบหลายโหมด [ 32 ]



รูปที่ 8 แสดงรูปแบบของแสงที่ปลายเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว LP<sub>01</sub>  
 และชนิดหลายโหมด LP<sub>11</sub> LP<sub>02</sub> และ LP<sub>21</sub> [ 19 ]

### 7. ความเข้มแสงเปรียบเทียบ (normalized intensity)

หมายถึงอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างความเข้มแสงเอาที่พุดเมื่อผ่านการตรวจวัดกับความเข้มแสงเริ่มต้นค่าหนึ่งก่อนทำการตรวจวัดในแต่ละครั้ง ซึ่งค่าที่ได้นี้จะเป็อัตราส่วนเปรียบเทียบซึ่งมีค่าไม่เกิน 1 เสมอ เนื่องจากในการทดลองแต่ละครั้งนั้น ความสามารถในการจัดเรียงอุปกรณ์ทางแสงอาจไม่เท่าเดิมซึ่งรวมถึงค่าที่ตรวจวัดด้วย แต่เมื่อจัดให้อยู่ในรูปอัตราส่วนซึ่งเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นค่าหนึ่งก่อนการตรวจวัดในแต่ละครั้งแล้วจะได้ในรูปอัตราส่วนเดียวกันเสมอ

## 8. อัตราส่วนการวัดคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์ ( extinction ratio ; ER )

เป็นการวัดคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์ เมื่อหมุนโพลาไรซ์จนกระทั่งสามารถวัดความเข้มของแสงได้มากที่สุดแล้ว จากนั้นหมุนโพลาไรซ์ตั้งฉากหรือทำมุม  $90^\circ$  จากระนาบเดิมจะได้ความเข้มแสงที่น้อยที่สุด (โดยวัดในรูปของความเข้มแสงหรือกำลังของแสง) แล้วเขียนความสัมพันธ์ของอัตราส่วนการสูญหายได้ดังสมการ [ 14 ]

$$ER = 10 \log ( P_{\max} / P_{\min} ) \quad (3)$$

เมื่อ  $P_{\max}$  คือกำลังของแสงมากที่สุดที่วัดได้

$P_{\min}$  คือกำลังของแสงน้อยที่สุดที่วัดได้

ดังนั้นคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์สามารถบอกได้จากพารามิเตอร์ ER หรือมีความแตกต่างของกำลังแสงที่มากที่สุดและน้อยที่สุดอย่างชัดเจน

ถ้าความแตกต่างระหว่าง  $P_{\max}$  และ  $P_{\min}$  มีค่ามาก จะทำให้ ER มาก นั่นคือคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์ดี

## 9. ความชัดเจนของริ้วการแทรกสอด ( visibility of interference fringes )

ความชัดเจนของริ้วของการแทรกสอดมีความสัมพันธ์ดังสมการ [ 26 ]

$$Q = [ I_{\max} - I_{\min} ] / [ I_{\max} + I_{\min} ] \quad (4)$$

เมื่อ

$I_{\max}$  และ  $I_{\min}$  คือค่าความเข้มแสงสูงสุดและต่ำสุดของแสง โดย  $0 \leq Q \leq 1$  กล่าวคือถ้าหาก  $Q = 1$  จะแสดงความชัดเจนของริ้วได้ชัดเจนที่สุดโดยแยกความสว่างและมีได้ชัดเจน แต่ถ้า  $Q = 0$  แสดงว่าไม่สามารถแยกความชัดเจนของริ้วได้

## 10. ค่าการลดทอนของแสงภายในเส้นใยนำแสง ( fiber attenuation )

เมื่อทำการส่งสัญญาณผ่านสายส่งสัญญาณออกไปก็ย่อมเกิดการลดทอนสัญญาณนั้นขึ้นเป็นธรรมดา การคิดค่าการลดทอนของแสงภายในเส้นใยนำแสงจะบอกค่าเป็นอัตราส่วนของกำลังสัญญาณในหน่วยเดซิเบล ( dB ) หรือในหน่วย dB<sub>m</sub> (เป็นการเปรียบเทียบกำลังของสัญญาณกับระดับกำลังสัญญาณอ้างอิงเมื่อ P<sub>i</sub> = 1 มิลลิวัตต์) โดยพิจารณาจากสมการที่ 6 [ 24 ]

$$L_{dB} = 10 \log ( P_o / P_i ) \quad ( 6 )$$

เมื่อ

P<sub>o</sub> คือกำลังของแสงเอาต์พุต

P<sub>i</sub> คือกำลังของแสงอินพุตที่ป้อนเข้าไปในเส้นใยนำแสง

โดยค่าการลดทอนของแสง หรือกำลังการสูญเสียต่ำสุดของเส้นใยนำแสงขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นใยนำแสง และค่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีเส้นใยนำแสงได้ทวีบทบาทมากขึ้น ทั้งด้านการสื่อสาร การตรวจวัด และอุปกรณ์วงจรรวมออปติกส์ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากข้อดีของเส้นใยนำแสง เช่น มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ปราศจากสัญญาณรบกวน (ในย่านคลื่นวิทยุ) และไม่ขึ้นกับความแปรปรวนของสภาพดินฟ้าอากาศขณะใช้งาน อีกทั้งยังสามารถส่งสัญญาณได้มาก และยังเหมาะสำหรับใช้ทำเป็นเครื่องตรวจวัดแบบกระเป๋าหิ้ว (portable) หรือเครื่องตรวจวัดระยะไกล (remote sensing) ได้

เครื่องมือตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสงได้เข้ามามีบทบาทในเชิงอุตสาหกรรมมาตั้งแต่ปี 1970 จากข้อดีดังกล่าวมาแล้ว และยังสามารถนำไปตรวจวัดในบริเวณแคบๆ ได้ดี เนื่องจากมีขนาดเล็กมาก อีกทั้งยังเหมาะกับการปฏิบัติงานที่ต้องเสี่ยงต่ออันตรายในการตรวจวัด เช่น การวิเคราะห์ทางเคมี การวัดอุณหภูมิสูง โดยเครื่องมือตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสงนี้สามารถนำมาใช้วัดปริมาณพื้นฐานต่างๆ ในกระบวนการควบคุมทางอุตสาหกรรม เช่น อุณหภูมิ ความดัน ระดับของของไหล การไหล ตำแหน่ง การสั่น สภาพความเป็นกรด-เบส ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน ความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าเป็นต้น [ 12 ] โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง เฟส โพลาริเซชัน และความยาวเมื่อมีการกระตุ้น

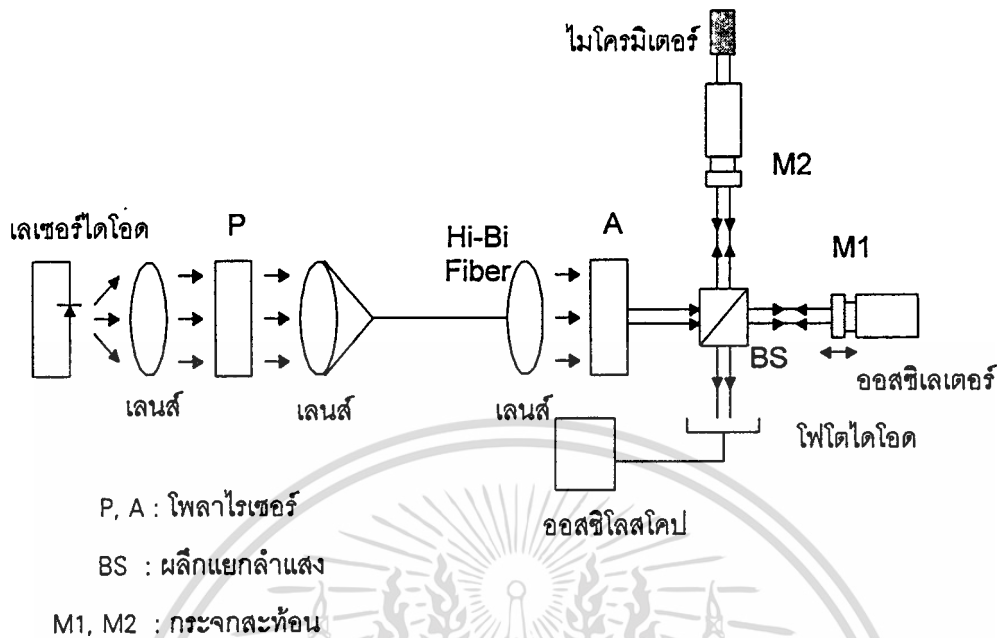
เครื่องมือตรวจวัดในปัจจุบันนับว่ายังต้องการการพัฒนาอีกมาก เช่น เครื่องมือตรวจวัดที่สามารถตรวจวัดได้หลายหน้าที่โดยใช้เครื่องมือตรวจวัดเพียงเครื่องเดียว จนถึงปัจจุบันอุปกรณ์ชนิดนี้กำลังเป็นที่สนใจและการทำวิจัยกันอย่างกว้างขวาง เพื่อจะได้เครื่องมือตรวจวัดที่มีประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างและพัฒนาต้นแบบเครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสง ซึ่งจะเป็นการกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาการสร้างเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีขั้นภายในประเทศ

## 1.3 การดำเนินงานวิจัย

ทำการค้นคว้าศึกษาทฤษฎีของการตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสงจากหนังสือ วารสาร หรือเอกสารต่างๆ และเปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดลองที่ได้มีการศึกษาไว้แล้ว [ 29 ] สำหรับการศึกษานี้ใช้เส้นใยนำแสงชนิดอนุรักษสภาวะทางโพลาไรเซชัน แบบไฮลิ-ไบร์ฟรินเจนซ์ หรือไฮ-ไบร์ (highly-birefringent fiber ;Hi-Bi fiber) ในการสร้างเป็นเครื่องตรวจวัด โดยเส้นใยนำแสงชนิดนี้มีคุณสมบัติว่าถ้าลอนซ์ หรือนำแสงโพลาไรซ์ชนิดเชิงเส้นเข้าไปในเส้นใยนำแสงโดยให้แสงเข้าเพียง 1 โหมดของเส้นใยนำแสงไฮ-ไบร์แล้ว การโพลาไรซ์นี้จะคงสภาพเดิมตลอดความยาวของเส้นใยนำแสง หากเมื่อมีการกระตุ้นบนจุดใดก็ตามลงบนเส้นใยนำแสงจะทำให้เกิดการส่งผ่านพลังงานหรือคัปปลิง (coupling) จากโหมดหนึ่งไปยังอีกโหมดหนึ่งตรงจุดนั้น ดังนั้นจึงสามารถหาปริมาณทางฟิสิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวกระตุ้นได้ถ้ารู้ปริมาณที่เปลี่ยนไปของพลังงานสำหรับงานวิจัยนี้ปริมาณทางกายภาพที่เป็นตัวกระตุ้นได้แก่ แรง อุณหภูมิ และนอกจากนั้นยังสามารถบอกตำแหน่งตรงจุดที่มีการกระตุ้นสัมพันธ์กับปริมาณที่เปลี่ยนแปลงได้อีกด้วย จากหลักการดังกล่าวนี้สามารถนำไปศึกษาและสร้างเครื่องตรวจวัดได้ โดยประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง ส่วนของการตรวจวัดซึ่งใช้เส้นใยนำแสง แสงที่วัดได้สามารถตรวจวัดด้วยวิธีการประมวลสัญญาณทางแสง (optical signal processing) โดยใช้อุปกรณ์รับสัญญาณแสง (photo detector) หรืออุปกรณ์รับสัญญาณแสงซี ซี ดี อเรย์ (charge-coupled devices;CCD-array) ส่วนการตรวจวัดตำแหน่งสามารถกำหนดโดยใช้การปรับอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ของไมเคลสัน สัญญาณที่ตรวจวัดได้นี้เมื่อทำการปรับแต่ง (calibration) และทำการชดเชย (compensation) แล้วจะสามารถหาความสัมพันธ์ของปริมาณที่กระตุ้นตลอดจนสามารถหาความไวของการตอบสนอง (sensitivity) ของเครื่องมือได้ และอาจพัฒนาเป็นเครื่องตรวจวัดที่สมบูรณ์ได้ต่อไป



รูปที่ 1.1 แสดงระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์การตรวจวัด

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

เป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างและพัฒนาเครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสง เพื่อส่งเสริมและพัฒนาการสร้างเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางด้านเส้นใยนำแสงขึ้นภายในประเทศ นอกจากนี้ยังเป็นการเสริมสร้างทักษะการทำปฏิบัติการทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ การลอนซ์แสง และการคัปปลิง ซึ่งคาดว่าจะ成为พื้นฐานสำหรับงานวิจัยระดับสูงต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการของเส้นใยนำแสง

สำหรับในงานวิจัยที่ใช้เส้นใยนำแสงในระบบตรวจวัดนั้น สิ่งแรกควรจะต้องทำการ ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์พื้นฐานของแสงในเส้นใยนำแสง การจัดแบ่งประเภทและชนิดของ เส้นใยนำแสง และการเลือกใช้ชนิดของเส้นใยนำแสงให้เหมาะสมสำหรับในงานวิจัย โดย พิจารณาถึงพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นตัวบอกคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงนั้นๆ

#### 2.1 ปรากฏการณ์พื้นฐานของแสง

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงปรากฏการณ์พื้นฐานสำคัญของแสงที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยนำแสง เช่น การหักเหและการสะท้อนกลับหมด (reflection and total internal refraction) ซึ่งทำให้แสงสามารถ เดินทางอยู่ในเส้นใยนำแสงได้ การหักเหสองแนว (double refraction) และโพลาไรเซชัน อัน เนื่องมาจากโครงสร้างภายในของเส้นใยนำแสงบางชนิดมีคุณสมบัติเป็นผลึกหักเหสองแนวตลอดจน มีคุณสมบัติเชิงอนุรักษสถานะทางโพลาไรเซชัน ตลอดจนหลักการการแทรกสอด (interference) และการเลี้ยวเบนของแสง (diffraction) ที่ใช้อธิบายในส่วนของ การตรวจวัดสัญญาณ

##### 2.1.1 การหักเหและการสะท้อนกลับหมดของแสง

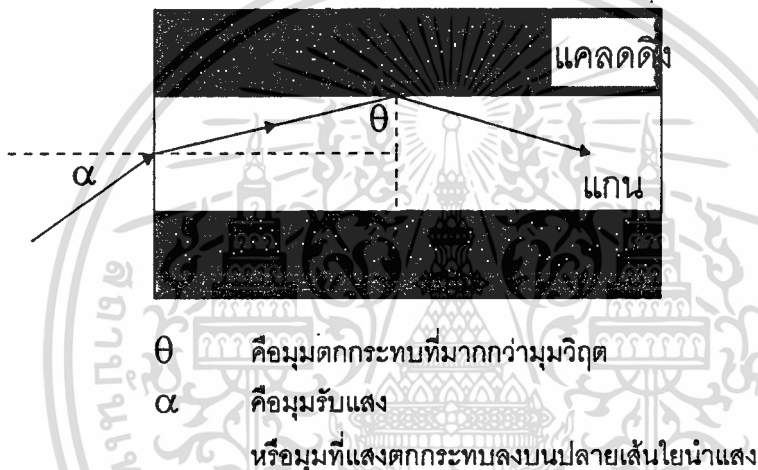
เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลาง 2 ชนิด ที่มีดัชนีหักเหแสง (light refractive index) ต่างกัน แล้ว จะมีการหักเหแสงเกิดขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของสเนลล์ (Snell's law)

$$\sin\theta_1 / \sin\theta_2 = n_2 / n_1 \quad (2.1)$$

ในที่นี้  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  คือมุมตกกระทบและมุมหักเหที่ลำแสงกระทำกับเส้นปกติ (normal line) บนพื้นผิวรอยต่อของตัวกลางทั้งสองนั้น ส่วน  $n_1$  และ  $n_2$  คือดัชนีหักเหแสงของตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ

ในกรณีที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหมากกว่าไปยังตัวกลางที่มีดัชนีน้อยกว่า นั้น หากมุมตกกระทบ  $\theta_1$  มีค่ามากขึ้นจะทำให้มุมหักเห  $\theta_2$  มีค่าเข้าใกล้  $90^\circ$  เรียกมุมตกกระทบที่ทำให้มุมหักเหเท่ากับ  $90^\circ$  นี้ว่ามุมวิกฤต (critical angle,  $\theta_c$ ) ดังสมการที่ 2.2 และหากเพิ่มมุมตกกระทบอีก ( $\theta > \theta_c$ ) จะทำให้แสงไม่สามารถเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่สองได้เลย นั่นคือเกิดการสะท้อนกลับหมดภายในนั่นเอง แสดงดังรูปที่ 2.1

$$\theta_c = \sin^{-1}(n_{\text{clad}} / n_{\text{core}}) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 แสดงการเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสงโดยอาศัยหลักการการสะท้อนกลับหมด

ในการนำแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสงดังรูปที่ 2.1 โดยการทำให้ดัชนีหักเหของแกน มีค่ามากกว่าดัชนีหักเหของแคลดดิง (cladding) ที่หุ้มส่วนของแกนไว้ โดยอาศัยปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมดภายในของแสงดังกล่าวข้างต้น สามารถทำให้แสงที่ป้อนเข้าไปในแกนเดินทางไปได้โดยอาศัยหลักการสะท้อนกลับเข้าไปภายในแกน

### 2.1.2 การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน

การแทรกสอดเกิดขึ้นเมื่อคลื่นสองขบวน หรือมากกว่า 2 ขบวนเคลื่อนที่มาซ้อนกันที่ตำแหน่งเดียวกัน ผลที่ได้จากการแทรกสอดสามารถอธิบายในเทอมเฟสและแอมพลิจูดของคลื่น

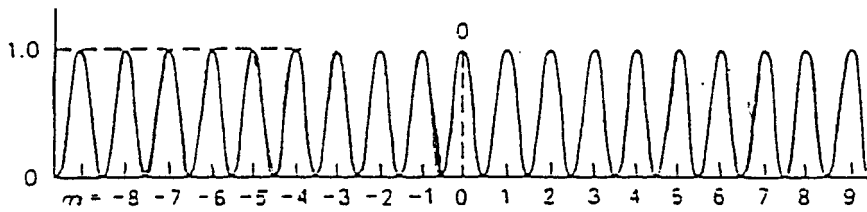
โทมัส ยัง (Thomas Young) ได้ทำการทดลองการแทรกสอดของแสงโดยใช้ช่องเล็กยาว (slit) คู่ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสีเดียวผ่านช่องเล็กคู่ดังกล่าวจะปรากฏริ้วสว่างสลับกับริ้วมืดบนฉาก และสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเฟสและแอมพลิจูดของคลื่น โดยที่ริ้วสว่างนั้นความเข้มของแสงจะมีแอมพลิจูดมากที่สุดหรือเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน (constructive interference) ของคลื่น ส่วนริ้วมืดความเข้มของแสงจะมีแอมพลิจูดเป็นศูนย์หรือเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง (destructive interference) นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มแสงของริ้วสว่างที่ทุกอันดับจะเท่ากันหมดด้วย ดังรูปที่ 2.2 ( ก )

ส่วนการเลี้ยวเบนของแสงรอบวัตถุที่บดบังแสงนั้นสามารถอธิบายได้โดยใช้หลักของฮอยเกนส์ (Huygens' principle) คือทุกๆจุดบนหน้าคลื่น (wave front) จะทำหน้าที่เป็นเสมือนแหล่งกำเนิดของคลื่นชุดใหม่ซึ่งเคลื่อนที่ไปในตัวกลางด้วยความเร็วเท่าเดิม โดยในการเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องเล็กเดี่ยวนั้นผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 2.2 ( ข )

เมื่อคลื่นระนาบผ่านช่องเล็กยาวเดี่ยวก็จะเกิดริ้วสว่างสลับกับริ้วมืดบนฉากเช่นกัน โดยริ้วสว่างที่กลางฉากมีความกว้างเป็นสองเท่าของริ้วมืด และความเข้มแสงของริ้วสว่างที่ตำแหน่งกลางจะมีแอมพลิจูดมากที่สุด ส่วนความเข้มแสงที่ริ้วสว่างถัดไปแอมพลิจูดจะลดลง โดยความเข้มแสงที่ริ้วมืดจะมีแอมพลิจูดเป็นศูนย์

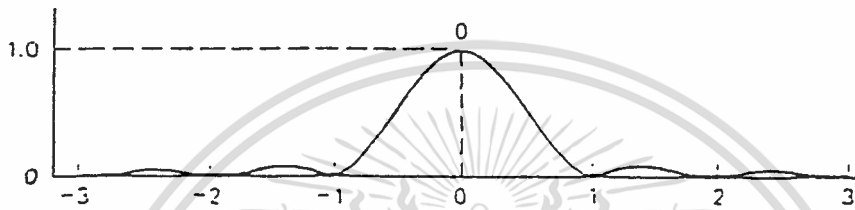
ในการทดลองการแทรกสอดของยัง ความกว้างของช่องเล็กต้องแคบมากๆ ดังนั้นจึงมีเฉพาะความสว่างตรงกลางของการเลี้ยวเบนที่แผ่กระจายไปยังฉาก และหากระยะห่างระหว่างช่องเล็กทั้งสองน้อยมาก ผลที่ได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดและเฟสเป็นดังรูปที่ 2.2 ( ค ) โดยภาพที่ได้บนฉากจะเป็นผลรวมของการแทรกสอดผ่านช่องเล็กคู่ ( ก ) และการเลี้ยวเบนผ่านช่องเล็กเดี่ยว ( ข )

แอมพลิจูด



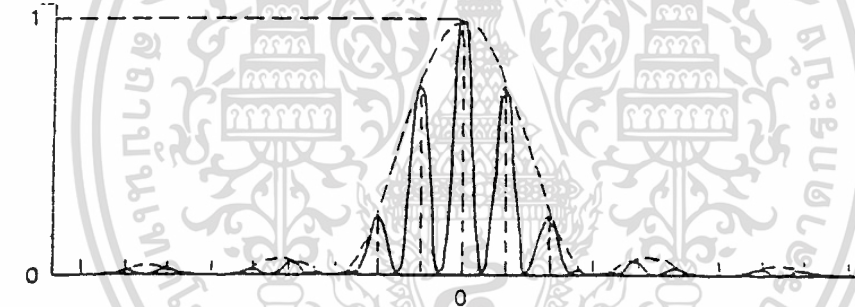
( ก )

แอมพลิจูด



( ข )

แอมพลิจูด



( ค )

เมื่อ  $m$  คือลำดับของเฟส

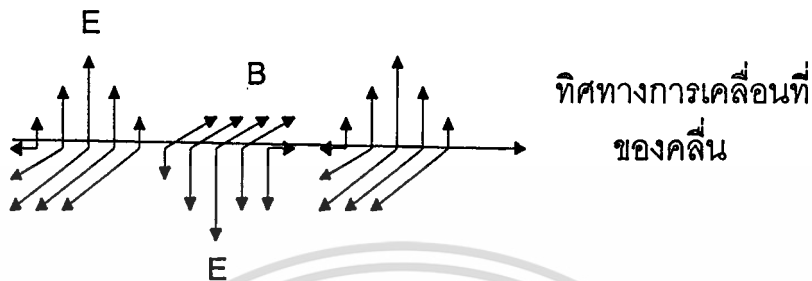
รูปที่ 2.2 แสดงผลที่ได้จากการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนซึ่งอธิบายด้วยเฟส และแอมพลิจูดของคลื่น [ 34,36 ]

### 2.1.3 โพลาริเซชัน

ปรากฏการณ์การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนนั้นเกิดขึ้นได้กับคลื่นทุกชนิดทั้งคลื่นตามขวางเช่นคลื่นแสง และคลื่นตามยาวเช่นคลื่นเสียง แต่ในกรณีของโพลาริเซชันจะเกิดเฉพาะในคลื่นตามขวางเท่านั้นไม่เกิดในคลื่นตามยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นที่ทราบกันดีว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้า ( E ) ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ( B ) และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น



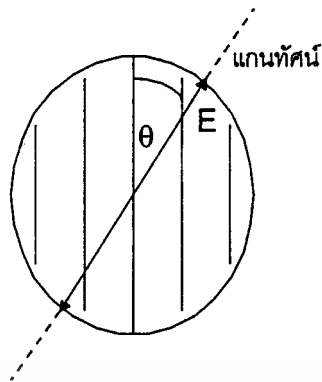
รูปที่ 2.3 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโพลาไรซ์ระนาบ

แสงโดยทั่วไปเป็นแสงไม่โพลาไรซ์นั่นคือสนามไฟฟ้ามีการสั่นในหลายๆระนาบในเวลาเดียวกัน ถ้าแสงไม่โพลาไรซ์เคลื่อนผ่านแผ่นโพลาไรซ์ (polaroid) โดยมีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าขนานกับแกนโพลาไรซ์ และมีลักษณะพิเศษคือยอมให้โพลาไรซ์ในทิศทางที่ขนานกับแกนของโพลาไรซ์ผ่านและจะดูดกลืนโพลาไรซ์ที่ตั้งฉากกับแกน

ถ้ามีแสงโพลาไรซ์ระนาบตกกระทบบนทำมุม  $\theta$  กับแกนของโพลาไรซ์ดังรูปที่ 2.4 สนามไฟฟ้าส่วนที่ขนานกับแกนของแผ่นโพลาไรซ์คือ  $E \cos \theta$  จะสามารถผ่านแผ่นโพลาไรซ์ออกมาได้และเนื่องจากความเข้มของแสงเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับแอมพลิจูดยกกำลังสอง จะได้ความเข้มของแสงโพลาไรซ์ระนาบที่ผ่านออกจากแผ่นโพลาไรซ์ดังสมการที่ 2.3 หรือเรียกว่ากฎของมาลุส (Malus' law) ได้ดังนี้ [ 9 ]

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (2.3)$$

เมื่อ  $I_0$  เป็นความเข้มแสงที่ตกกระทบบมากที่สุดที่เข้ามาถึงแผ่นโพลาไรซ์



รูปที่ 2.4 แสดงแสงโพลาไรซ์ระนาบตกกระทบทำมุม  $\theta$  กับแกนโพลาไรซ์

แผ่นโพลาไรซ์ใช้ทำเป็นโพลาไรเซอร์ (polarizer) หรือตัวทำแสงโพลาไรซ์โดยทำแสงที่ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ให้เป็นแสงโพลาไรซ์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้โพลาไรเซอร์อีกแผ่นหนึ่งวางซ้อนกันและทำหน้าที่เป็นตัววิเคราะห์ (analyzer) เพื่อทำหน้าที่จัดมุมของการโพลาไรซ์ของแสงที่ผ่าน โดยถ้าวางแกนของโพลาไรเซอร์สองแผ่นตั้งฉากกัน ( $90^\circ$ ) จะไม่มีแสงส่งผ่านออกมา แต่ถ้าหมุนตัววิเคราะห์ให้ทำมุม  $\theta$  กับตัวทำแสงโพลาไรซ์ โดยให้ความเข้มของแสงโพลาไรซ์ระนาบที่ออกจากตัวทำแสงโพลาไรซ์ไปยังตัววิเคราะห์เป็น  $I_0$  ความเข้มแสงที่ออกจากตัววิเคราะห์จะเป็นไปตามกฎของมาลุส

ถ้าหมุนตัววิเคราะห์ไปเป็นมุมต่างๆ แล้วหาความเข้มแสงสูงสุด ( $I_{\max}$ ) และความเข้มแสงต่ำสุด ( $I_{\min}$ ) แล้วสามารถพิจารณาในเทอมของอัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงสูงสุดและความเข้มแสงต่ำสุดที่ส่งผ่านออกมาหรือเป็นการวัดคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์ ER [14]

$$ER = 10 \log ( I_{\max} / I_{\min} ) \quad (2.4)$$

ถ้าความแตกต่างระหว่าง  $I_{\max}$  และ  $I_{\min}$  มีค่ามาก จะทำให้ค่า ER มาก นั่นคือคุณภาพของลำแสงโพลาไรซ์ดี

สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ตัวทำแสงโพลาไรซ์และตัววิเคราะห์ในการกำหนดแสงให้เข้าไปในเส้นใยนำแสง เนื่องจากเส้นใยนำแสงชนิดที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติอนุรักษัภาพทางโพลาไรเซชัน

### 2.1.4 การหักเหสองแนว

เมื่อแสงเคลื่อนที่ในตัวกลางสมลักษณะ (isotropic) ความเร็วของแสงจะเท่ากันในทุกทิศทาง แต่ในตัวกลางอสมลักษณะ (anisotropic) ถึงแม้จะเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ความเร็วแสงในทิศทางที่ต่างกันจะไม่เท่ากัน ซึ่งตัวกลางชนิดนี้จะมีดัชนีหักเหแสงที่แตกต่างกันเล็กน้อยเรียกว่าเกิดการหักเหสองแนว หรือ ไบรฟรินเจนซ์ (birefringence) ซึ่งในหัวข้อต่อไปจะได้กล่าวถึงชนิดของเส้นใยนำแสงที่ใช้ในงานวิจัยโดยมีคุณสมบัติดังกล่าว

เมื่อแสงตกกระทบผลึกหักเหสองแนวในทิศทางที่เหมาะสม จะมีลำแสงหักเหออกจากผลึกสองแนว โดยแนวหนึ่งมาจากรังสีธรรมดา (ordinary ray) หรือรังสี  $o$  และอีกแนวหนึ่งมาจากรังสีพิเศษ (extraordinary ray) หรือรังสี  $e$  ซึ่งรังสีทั้งสองมีสมบัติต่างกัน โดยรังสี  $o$  เป็นไปตามกฎการหักเหของสเนลล์ แต่รังสี  $e$  ไม่เป็นไปตามกฎของสเนลล์ซึ่งสรุปได้ว่า [ 7,9 ]

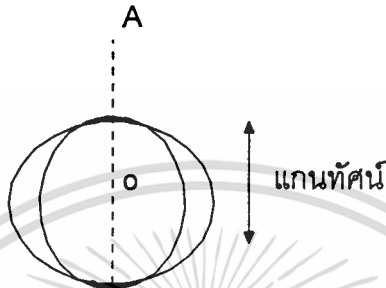
1. รังสี  $o$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_o$  คงที่ในทุกทิศทางของผลึก นั่นคือผลึกมีดัชนีหักเห  $n_o$  ซึ่งมีสมบัติเหมือนกับดัชนีหักเหของผลึกสมลักษณะ
2. รังสี  $e$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่คงที่ในทุกทิศทางของผลึก โดยความเร็วเปลี่ยนจาก  $v_o$  เป็น  $v_e$  ถ้า  $v_e > v_o$  นั่นคือดัชนีหักเห  $n_e < n_o$  โดยมีความสัมพันธ์  $n = c / v$  เมื่อ  $c$  เป็นความเร็วของแสง กล่าวคือความเร็วของคลื่น  $e$  จะมากกว่าคลื่น  $o$  หรือในเวลาเท่ากันคลื่น  $e$  และคลื่น  $o$  จะเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางไม่เท่ากัน

#### ตารางที่ 2.1

แสดงดัชนีหักเหแสงของผลึกหักเหสองแนวแบบผลึกแกนเดียว (uniaxial) [ 7 ]

เมื่อ $n_e > n_o$ (positive)			เมื่อ $n_e < n_o$ (negative)		
	$n_o$	$n_e$		$n_o$	$n_e$
Ice	1.309	1.310	Beryl	1.598	1.590
Quartz	1.544	1.553	NaNO <sub>3</sub>	1.587	1.336
BeO	1.717	1.732	Calcite	1.658	1.486
Rutile	2.616	2.903	Tourmaline	1.638	1.618
ZnS	2.354	2.358	BaTiO <sub>3</sub>	2.416	2.364

พิจารณาเมื่อแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นจุดอยู่ในผลึกหักเหสองแนว จะมีหน้าคลื่นเกิดขึ้นสองชุดโดยหน้าคลื่น  $o$  จะเป็นรูปวงกลมและหน้าคลื่น  $e$  เป็นรูปวงรี คลื่นทั้งสองชุดจะสัมพันธ์กันที่แกนทัศน (optical axis) ดังรูปที่ 2.5 โดยความเร็วของคลื่น  $o$  และ  $e$  จะเท่ากันเฉพาะในแนวแกนทัศนเท่านั้น สำหรับในแนวอื่นจะมีความเร็วต่างกัน

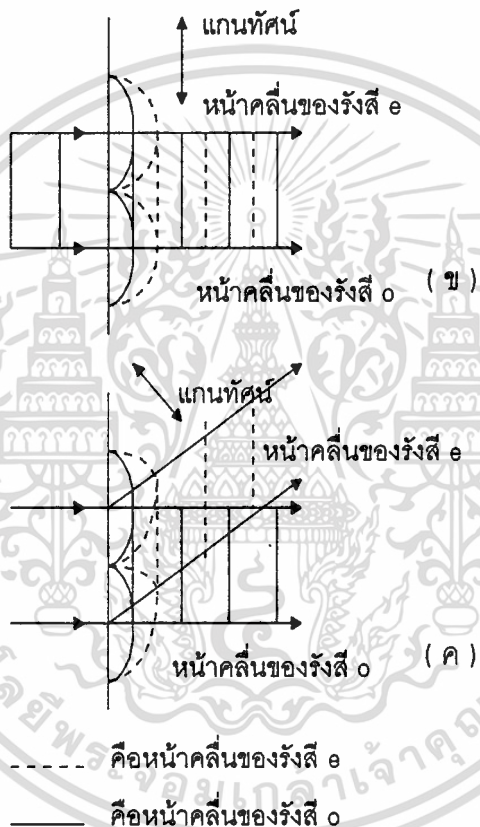
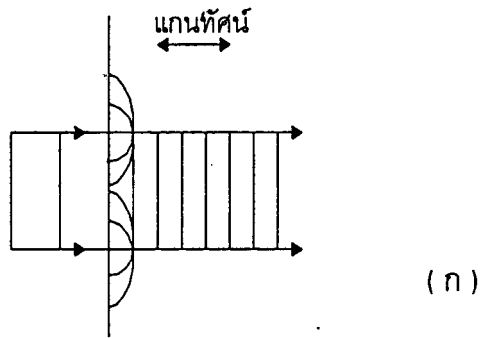


รูปที่ 2.5 แสดงแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นจุดอยู่ในผลึกหักเหสองแนว

ถ้าแสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบบนตั้งฉากกับผิวของผลึกซึ่งมีแกนทัศนตั้งฉากกับผิวของผลึกและอยู่ในแนวเดียวกับทิศของแสงตกกระทบบน ดังรูปที่ 2.6 ( ก ) คลื่นทั้งสองชุดจะเคลื่อนที่ในผลึกด้วยความเร็ว  $v_o$  ในทิศเดียวกับแสงตกกระทบบน ดังนั้นแสงเคลื่อนที่ออกจากผลึกในทิศทางเดียวกับแสงตกกระทบบนและเป็นแสงไม่โพลาไรซ์ นั่นคือไม่แยกคลื่น  $o$  ออกจากคลื่น  $e$

ถ้าแสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบบนตั้งฉากกับผิวผลึกซึ่งมีแกนทัศนขนานกับผิวของผลึกดังรูปที่ 2.6 ( ข ) คลื่น  $o$  และคลื่น  $e$  จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันด้วยความเร็วต่างกันคือ  $v_o$  และ  $v_e$  ตามลำดับ โดยคลื่นทั้งสองต่างก็เป็นคลื่นโพลาไรซ์ระนาบซึ่งการสั่นของคลื่นทั้งสองอยู่ในระนาบตั้งฉากกัน ซึ่งกรณีนี้จะเกิดขึ้นภายในเส้นใยนำแสงชนิดเป็นผลึกหักเหสองแนวดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.2.3

เมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบบนตั้งฉากกับผลึกซึ่งมีแกนทัศนทำมุมใดๆกับผิวผลึก ดังรูปที่ 2.6 ( ค ) คลื่น  $o$  และคลื่น  $e$  จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต่างกันและความเร็วไม่เท่ากัน



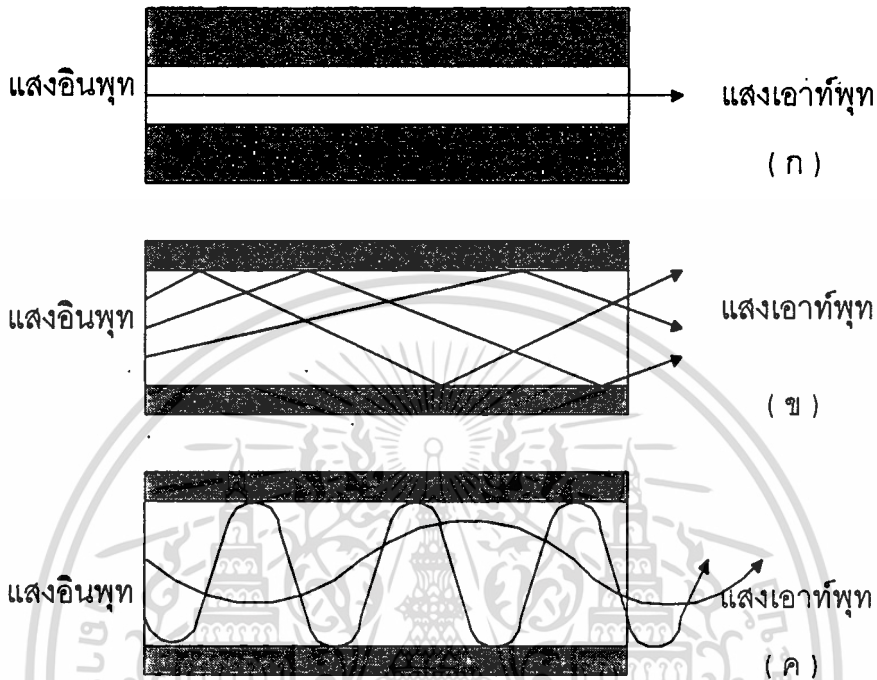
รูปที่ 2.6 แสดงแสงไมโพลาไรซ์เมื่อตกกระทบตั้งฉากกับผิวของผลึกที่มีแกนทึบ  
( ก ) ตั้งฉากกับผิวผลึก ( ข ) ขนานกับผิวผลึก และ ( ค ) ทำมุมใดๆ กับผิวผลึก [ 7 ]

## 2.2 ชนิดของเส้นใยนำแสง

ภายในเส้นใยนำแสงนั้นจำนวนลำแสงที่เกิดขึ้นเป็นตัวบอกจำนวนโหมดของเส้นใยนำแสง เส้นใยนำแสงที่มีแนวลำแสงอยู่เพียงแนวเดียวเรียกว่าเส้นใยนำแสงโหมดเดียว (single mode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

fiber) แต่ถ้าภายในเส้นใยนำแสงนั้นมีแนวลำแสงเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เรียกเส้นใยนำแสงนั้นว่า เส้นใยนำแสงหลายโหมด (multimode fiber)



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของแสงที่เดินทางภายในแกนเส้นใยนำแสง

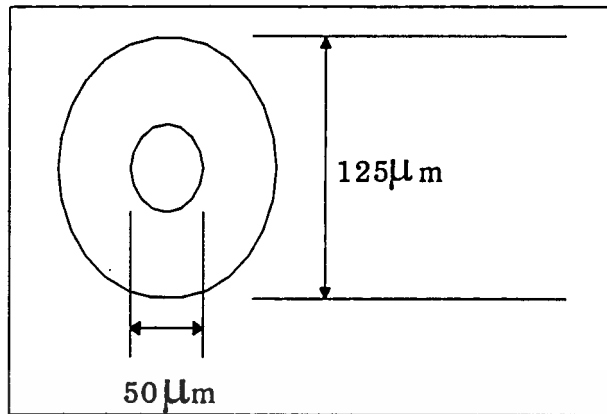
( ก ) เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยว

( ข ) เส้นใยนำแสงหลายโหมดชนิดดัชนีชั้นบันได (step-index multimode fiber)

( ค ) เส้นใยนำแสงหลายโหมดชนิดดัชนีรูปมน (graded index multimode fiber)

### 2.2.1- เส้นใยนำแสงหลายโหมด

จากโครงสร้างภายในของเส้นใยนำแสงซึ่งประกอบด้วยแกน และแคลดดิ้ง ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สำหรับเส้นใยนำแสงหลายโหมดส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนและแคลดดิ้งโดยประมาณ 50 ไมครอน และ 125 ไมครอนตามลำดับ ดังรูปที่ 2.8

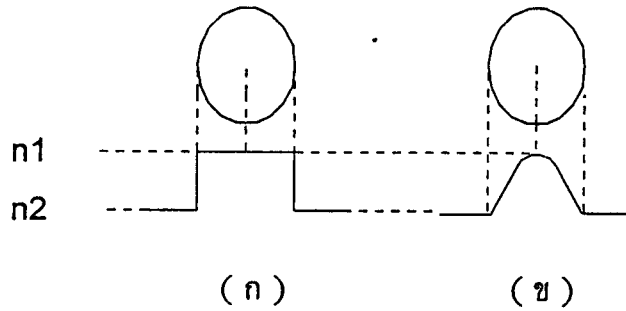


รูปที่ 2.8 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยนำแสงหลายโหมด

เนื่องจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแกนของเส้นใยนำแสงหลายโหมดนั้นมีขนาดใหญ่ ดังนั้นแสงที่ตกกระทบที่ปลายอินพุทของเส้นใยนำแสงมีมุมตกกระทบที่แตกต่างกันหลายค่า จากหลักการสะท้อนกลับหมดของแสงที่เกิดขึ้นภายในส่วนของแกนทำให้มีแนวลำแสงเกิดขึ้นหลายโหมด และแสงแต่ละโหมดเดินทางในเส้นใยนำแสงโดยใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกัน อันเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกกระจายของสัญญาณ (modal dispersion) จึงได้มีการพัฒนาที่จะลดค่าการแตกกระจายของสัญญาณซึ่งเกิดขึ้นจากเส้นใยนำแสงหลายโหมด โดยแบ่งเส้นใยนำแสงตามลักษณะดัชนีการหักเหแสงของแกน

จากรายละเอียดในหัวข้อ 2.1.1 ถ้าคิดว่าแกนของเส้นใยนำแสงนั้นมีค่าดัชนีหักเหแสงที่สม่ำเสมอเท่ากันตลอด ความสัมพันธ์ของกราฟแสดงค่าดัชนีหักเหแสงของส่วนแกนเส้นใยนำแสงเมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีหักเหแสงในอากาศ ดังรูปที่ 2.9 ( ก ) มีลักษณะเหมือนขั้นบันได โดยเรียกเส้นใยนำแสงซึ่งมีลักษณะการแจกแจงของค่าดัชนีหักเหแสงภายในแกนเช่นนี้ว่า เส้นใยนำแสงชนิดดัชนีขั้นบันได

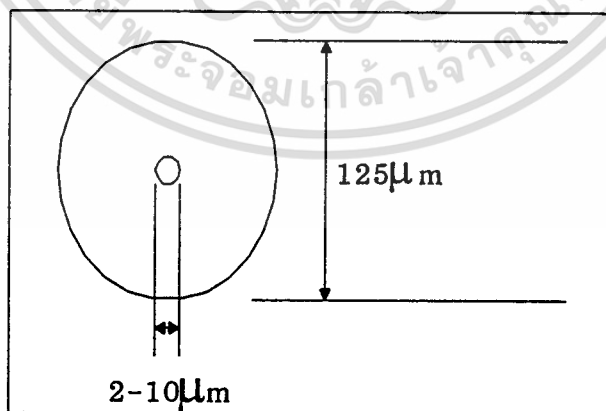
เมื่อสร้างเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีขั้นบันไดนี้เป็นแบบหลายโหมดก็ย่อมทำให้เกิดการแตกกระจายของสัญญาณเอาท์พุทมาก ด้วยเหตุที่ว่าแนวทางเดินของแสงในแต่ละโหมดนั้นต้องใช้เวลาในการเดินทางต่างๆ กัน เพื่อปรับปรุงลดการแตกกระจายของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากเส้นใยนำแสงหลายโหมดนี้ สามารถทำได้โดยการสร้างเส้นใยนำแสงให้มีดัชนีหักเหแสงภายในส่วนของแกนมีค่าค่อยๆเปลี่ยนแปลงโดยบริเวณจุดศูนย์กลางมีดัชนีหักเหมากที่สุดและค่อยๆลดลงตามแนวรัศมี ดังรูปที่ 2.9 ( ข ) ซึ่งเส้นใยนำแสงชนิดนี้เรียกว่าเส้นใยนำแสงชนิดดัชนีรูปมน ทำให้ลำแสงทุกลำหรือทุกโหมดใช้เวลาในการเดินทางผ่านเส้นใยนำแสงต่างกันน้อยมาก



รูปที่ 2.9 แสดงชนิดของเส้นใยนำแสงตามลักษณะดัชนีหักเหแสงของแกน  
 ( ก ) กราฟแสดงดัชนีหักเหแสงของแกนเมื่อเปรียบเทียบกับดัชนีหักเหแสงของอากาศมีลักษณะเป็นขั้นบันได ( ข ) เพื่อลดการกระจายของสัญญาณโดยการสร้างให้ดัชนีหักเหภายในแกนมีค่าค่อยๆเปลี่ยนแปลงไปโดยมีลักษณะต่อเนื่องมากกว่า

### 2.2.2 เส้นใยนำแสงโหมดเดียว

เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกน และของแคลดดิ้งโดยประมาณ 2-10 ไมครอน และ 125 ไมครอน ตามลำดับซึ่งส่วนของแกนมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยนำแสงชนิดหลายโหมดมาก และให้แสงออกมาเพียงโหมดเดียว ดังรูปที่ 2.10

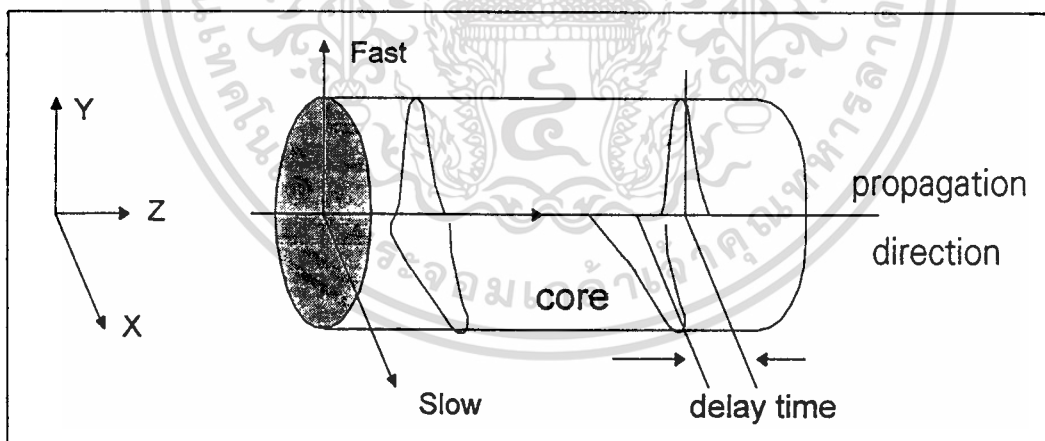


รูปที่ 2.10 แสดงภาคตัดขวางของเส้นใยนำแสงโหมดเดียว

สังเกตว่าขนาดของแกนที่ใช้ส่งสัญญาณนั้นเล็กมาก ทำให้ยากต่อการที่จะนำแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสง แต่เนื่องจากข้อดีของเส้นใยนำแสงชนิดใหม่ก็คือไม่มีการแตกกระจายของสัญญาณเกิดขึ้นจึงมีแบนวิดธ์ที่ใช้ประโยชน์ได้กว้างกว่า

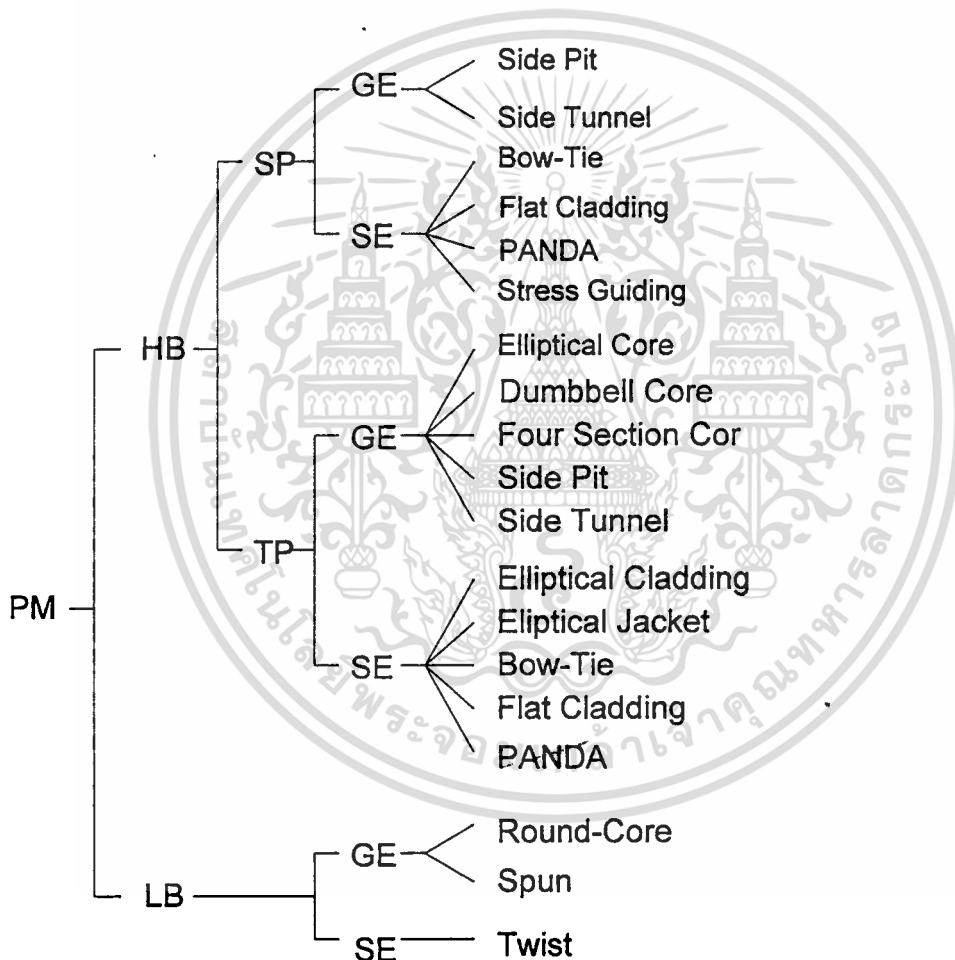
### 2.2.3 เส้นใยนำแสงโหมดเดียวชนิดอนุรักษ์สภาวะทางโพลาริเซชัน

สำหรับเส้นใยนำแสงโหมดเดียวแบบธรรมดาในทางทฤษฎีนั้นองค์ประกอบของความเร็วของแสงในส่วนแกนจะเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติเส้นใยนำแสงจะไม่สมมาตรสมบูรณ์ โดยมีรูปร่างและดัชนีหักเหที่ไม่สมมาตรทำให้โหมดทั้งสองนั้นมีความเร็วที่แตกต่างกันเล็กน้อย องค์ประกอบของความเร็วนั้นประกอบด้วยองค์ประกอบตามแกนที่มีความเร็วมากกว่า (fast axis) และอีกแกนหนึ่งที่ตั้งฉากกันที่มีความเร็วน้อยกว่า (slow axis) ทำให้เกิดการหักเหสองแนว ดังรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในหัวข้อ 2.1.4 ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติภายในของเส้นใยนำแสงเองในกระบวนการผลิตโดยโครงสร้างของส่วนแกนภายในอันเกิดจากการให้ความเค้นบริเวณรอบๆ แกน (geometrical effect, G.E.) หรือเกิดจากการรบกวนจากภายนอกก็ได้โดยผลของการให้ความเค้นภายนอก (stress effect, S.E.)

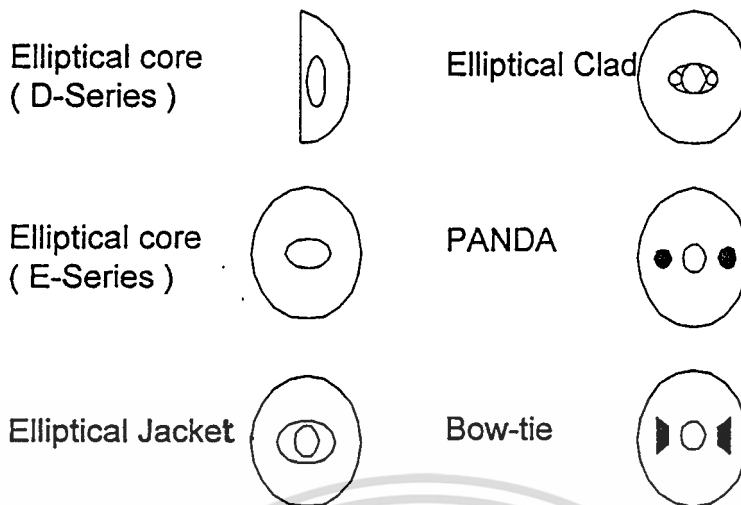


รูปที่ 2.11 แสดงโหมดของแสงโพลาริเซชันสองโหมดที่ตั้งฉากกัน โดยความเร็วต่างกัน [ 15 ]

เส้นใยนำแสงโหมดเดี่ยวที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้มีความสามารถในการอนุรักษ์สภาวะทางโพลาไรเซชัน (PM) ซึ่งแบ่งเป็นชนิดไฮลิ์ ไบรฟ์รินเจนซ์ (HB) และชนิดโลว์ ไบรฟ์รินเจนซ์ (low-birefringence, LB) โดยพิจารณาจากผลต่างของดัชนีหักเหแสง (ไบรฟ์รินเจนซ์) กล่าวคือถ้า ไบรฟ์รินเจนซ์  $B > 10^{-5}$  จัดเป็นชนิดไฮลิ์ ไบรฟ์รินเจนซ์ แต่ถ้าไบรฟ์รินเจนซ์  $B < 10^{-5}$  จัดเป็นชนิดโลว์ ไบรฟ์รินเจนซ์ โดยเส้นใยนำแสงชนิดไฮลิ์ ไบรฟ์รินเจนซ์ยังแยกพิจารณาเป็นแบบโหมดโพลาไรเซชันเดี่ยว (single-polarization mode, SP) และโหมดโพลาไรเซชันสองโหมด (two-polarization modes, TP) [ 17 ]

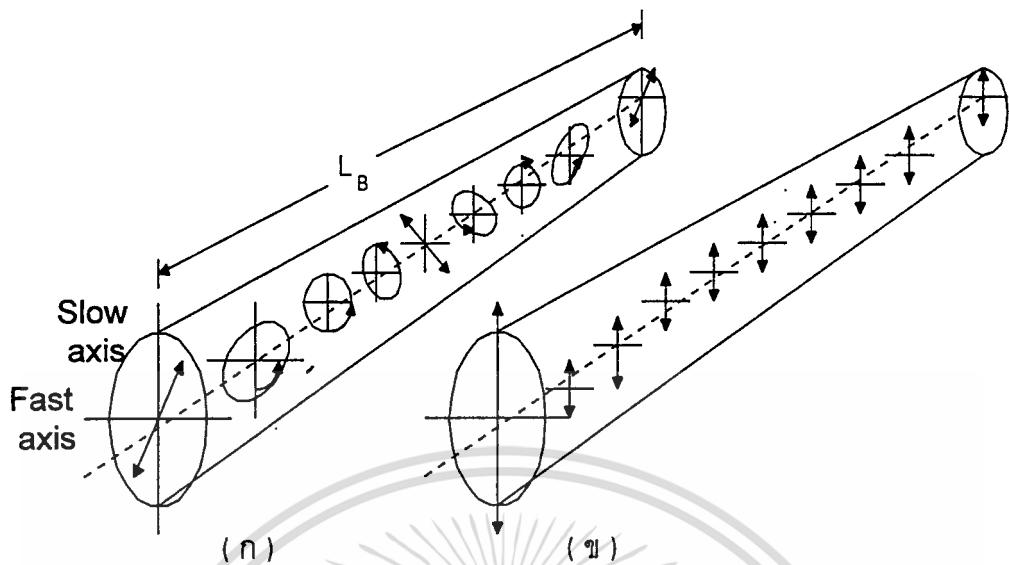


รูปที่ 2.12 แสดงการจัดประเภทของเส้นใยนำแสงชนิดอนุรักษ์สภาวะทางโพลาไรเซชัน



รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างของเส้นใยนำแสงโพลีโพรพิลีนบางชนิด

เส้นใยนำแสงชนิดอนุรักษสภาวะทางโพลาริเซชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดโพลีโพรพิลีน ซึ่งมีความยาวบิดสลัน จากรูปที่ 2.14 [ 25 ] พิจารณาความสัมพันธ์ของความยาวบิดสลันของเส้นใยนำแสง (  $\kappa$  ) และความสามารถในการอนุรักษสภาวะทางโพลาริเซชันภายใน (  $\chi$  ) ของเส้นใยนำแสงชนิดโพลีโพรพิลีน โดยรูป (  $\kappa$  ) เมื่อลอนซ์แสงเข้าในทิศทำมุม  $45^\circ$  กับแกนทั้งสอง (แกนที่มีความเร็วกว่าและแกนที่มีความเร็วต่ำกว่า) จะมีการเปลี่ยนรูปแบบของโพลาริเซชันจากเดิมซึ่งเป็นโพลาริเซชันเชิงเส้น เป็นวงรี วงกลม เชิงเส้น (ที่เฟสต่างจากเชิงเส้นเดิมไป  $180^\circ$ ) วงรี วงกลม และเชิงเส้น (รูปแบบเดิม) ระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงครบรอบของรูปแบบการโพลาริเซชัน จะเรียกว่าระยะความยาวบิดสลันของเส้นใยนำแสง ซึ่งถ้าเป็นเส้นใยนำแสงชนิดโลว์-โพรพิลีน ความยาวบิดสลันของเส้นใยนำแสงจะยาวกว่าชนิดโพลีโพรพิลีน ส่วนรูป (  $\chi$  ) สำหรับในระบบตรวจวัดนั้นจะทำการลอนซ์แสงในแนวขนานกับแกนใดแกนหนึ่ง จะพบว่ารูปแบบของโพลาริเซชันจะไม่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือในระหว่างการเดินทางของแสงภายในแกนนั้น สภาวะของโพลาริเซชันมีความแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัด เพราะไม่ว่าจะทำการตรวจวัดที่จุดใดๆบนเส้นใยนำแสง ย่อมให้ผลเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบ ( ก ) ความสัมพันธ์ของความยาวบิตส์ของเส้นใยนำแสง และ ( ข ) ความสามารถในการอนุรักษ์สถานะทางโพลาไรเซชันภายในของเส้นใยนำแสงชนิดไฮลี โปรฟรินเจนซ์

## 2.3 พารามิเตอร์ของเส้นใยนำแสง

พารามิเตอร์ทางแสงที่เกี่ยวข้องกับดัชนีหักเหซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อการเดินทางของแสง ได้แก่ค่าผลต่างของดัชนีหักเหจำเพาะ (refractive index contrast) ซึ่งแสดงความแตกต่างระหว่างค่าดัชนีหักเหแสงของแกนกับแคลดดิ้ง นิวเมอริคัล อะเพอร์เจอร์ (numerical aperture) หรือ NA และมุมรับแสง (acceptance angle) ซึ่งแสดงความสามารถของการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงและการปล่อยแสงออกจากเส้นใยนำแสง ตลอดจนค่าความถี่นอร์มอลไลซ์ (normalized frequency) หรือ  $V$  ที่กำหนดจำนวนโหมดภายในเส้นใยนำแสง

### 2.3.1 ค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะ ( $\Delta$ )

เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงขนาดความแตกต่างของดัชนีหักเหแสงในส่วนแกนและแคลดดิ้ง โดยกำหนดค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะดังสมการ [ 20 ]

$$\Delta = (n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}) / n_{\text{core}} \quad (2.5)$$

โดยทั่วไปค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะจะมีค่าน้อยกว่า 1 มาก จึงมักแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยค่าผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะนี้หากมีค่ามากจะทำให้ง่ายต่อการป้อนแสงเข้าไปภายในแกน (ดังจะได้อธิบายในพารามิเตอร์อื่นๆเปรียบเทียบต่อไป)

### 2.3.2 นิวเมอริคัล อะเพอร์เจอร์

หมายถึงตัวเลขที่บอกถึงความสามารถในการรับแสงของเส้นใยนำแสงโดยพิจารณาเป็นมุมกรวย (solid angle) ซึ่งเป็นการโฟกัสแสงให้เข้าไปในเส้นใยนำแสงได้พอดี

[ 19,20 ]



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ของนิวเมอริคัล อะเพอร์เจอร์ และขนาดของแกน ในการป้อนแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงอย่างมีประสิทธิภาพ

การหาค่า NA จากความสัมพันธ์ของดัชนีหักเหแสงของส่วนแกนและเคลดดังดังนี้

[ 19,20 ]

$$\begin{aligned} \text{NA} &= (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2)^{1/2} \\ &= n_{\text{core}} (\Delta)^{1/2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

ตัวอย่างค่า NA ของเส้นใยนำแสงแต่ละชนิด [ 32 ]

เส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวคือ 0.1

เส้นใยนำแสงชนิดมัลติโหมดแบบดัชนีชั้นบันไดคือ 0.3-0.4

เส้นใยนำแสงชนิดมัลติโหมดแบบดัชนีรูปมนคือ 0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.15 เห็นได้ว่าถ้าขนาดของแกนและ NA มีค่าคงที่แล้วสามารถกำหนดปริมาณของแสงที่ป้อนเข้าไปในแกนของเส้นใยนำแสงได้ ซึ่งเส้นใยนำแสงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแกนใหญ่กว่า และมีค่า NA มาก จะมีประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับเส้นใยนำแสงสูง

ในการป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.1 รูปที่ 2.1 นั้น หากแสงตกกระทบบที่ปลายเส้นใยนำแสงด้วยมุมตกกระทบบที่มีค่ามากกว่า  $\alpha_{\max}$  แล้วจะไม่เกิดการสะท้อนกลับหมดภายในที่ผิวรอยต่อระหว่างแกนและเคลดติง นั่นคือแสงไม่สามารถเดินทางเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ แต่จะมีแสงส่วนหนึ่งหักเหเข้าไปในเคลดติงและสูญเสียออกไป

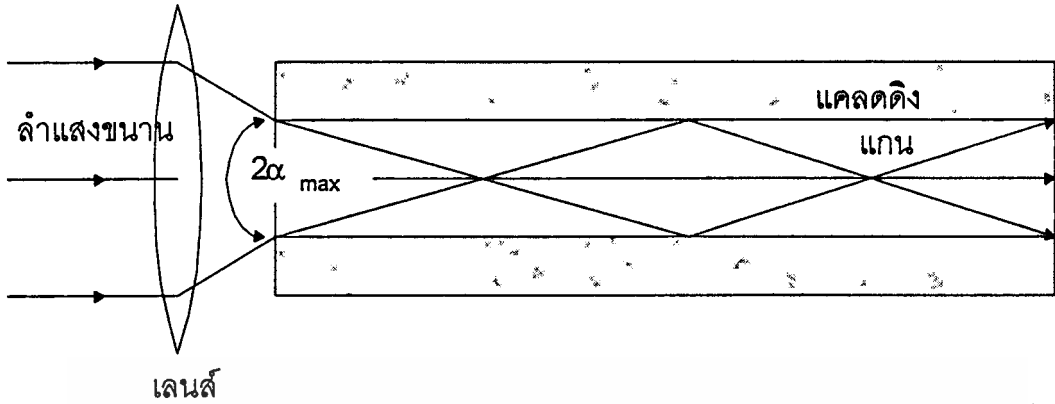
พิจารณาที่ผิวรอยต่อระหว่างอากาศและแกนของเส้นใยนำแสง จากกฎของสเนลล์

$$\begin{aligned} \sin\alpha &= (n_{\text{core}} / n_0) \cos\theta \\ \text{เมื่อ } n_0 &\text{ คือดัชนีหักเหแสงในอากาศ } (n_0 = 1) \text{ ดังนั้น} \\ n_0 \sin\alpha_{\max} &= n_{\text{core}} (1 - \sin^2\theta)^{1/2} \\ &= (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2)^{1/2} \\ \sin\alpha_{\max} &= NA / n_0 \\ \alpha_{\max} &= \sin^{-1}(NA / n_0) \quad (2.7) \end{aligned}$$

สมการที่ 2.7 [ 20,29 ] แสดงความสัมพันธ์ของค่า NA กับมุมตกกระทบบที่กว้างที่สุดที่สามารถนำแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้ ซึ่งการที่จะป้อนแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงอย่างมีประสิทธิภาพดีที่ที่สุดนั้น จะต้องโฟกัสแสงโดยใช้เลนส์รวมแสงที่มีค่า NA สัมพันธ์กับ NA ของเส้นใยนำแสง

### 2.3.3 มุมรับแสง

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นการที่แสงสามารถเดินทางเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้นั้น มุมตกกระทบบที่ปลายเส้นใยนำแสงนั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่า  $\alpha_{\max}$  พิจารณารูปที่ 2.16 ดังนั้นมุมรับแสงที่เหมาะสมจึงหมายถึงมุมที่มีค่าเป็น 2 เท่าของ  $\alpha_{\max}$



รูปที่ 2.16 แสดงมุมรับแสงของเส้นใยนำแสง

นั่นคือความสัมพันธ์ของผลต่างดัชนีหักเหจำเพาะ นิวเมอริคัล อะเปอร์เจอร์ และมุมรับแสง อธิบายจากตัวอย่างของเส้นใยนำแสงดังนี้ [ 20 ]

$$\begin{aligned}
 n_{\text{core}} &= 1.53, & n_{\text{clad}} &= 1.50, & n_0 &= 1 \\
 \theta_c &= \sin^{-1} (1.50 / 1.53) = 78.6^\circ \\
 \Delta &= (1.53 - 1.50) / 1.53 = 0.0196 = 1.96 \% \\
 \text{NA} &= 1.53 (2 \times 0.0196)^{1/2} = 0.303 \\
 \alpha_{\text{max}} &= \sin^{-1} 0.303 / 1 = 17.6^\circ
 \end{aligned}$$

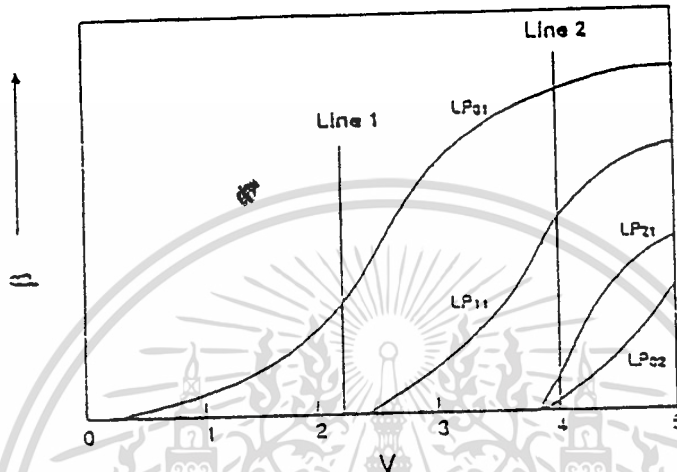
#### 2.3.4 ความถี่นอร์มอลไลซ์ ( V )

ในการหาจำนวนโหมดของการเคลื่อนที่ของคลื่นภายในเส้นใยนำแสงสามารถหาได้จากพารามิเตอร์ที่เรียกว่าความถี่นอร์มอลไลซ์หรือ V ดังสมการ [ 32 ]

$$V = (2\pi a / \lambda) \text{NA} \quad (2.8)$$

เมื่อ a เป็นรัศมีของแกน  
 $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นของแสง

จะเห็นได้ว่าขนาดของแกนภายในเส้นใยนำแสงนั้นมีความสัมพันธ์กับค่า NA และ V โดยทราบแล้วว่าแกนของเส้นใยนำแสงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าจะมีค่า NA มากกว่า และจากสมการที่ 2.8 ค่า V สัมพันธ์กับค่า NA สำหรับเส้นใยนำแสงโหมดเดียวมี  $0 \leq V < 2.405$  แต่สำหรับเส้นใยนำแสงหลายโหมด  $V \geq 2.405$



รูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่นอร์มอลไลซ์ และโหมดของแสงเมื่อออกจากปลายเส้นใยนำแสง [ 27 ]

เมื่อ LP หมายถึงรูปแบบของการกระจายพลังงานของแสงที่ใช้เมื่อออกจากปลายเส้นใยนำแสง เมื่อ  $LP_{01}$  หมายถึงการกระจายพลังงานแสงเมื่อแสงออกจากปลายเส้นใยนำแสงชนิดโหมดเดียว ส่วน  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  และ  $LP_{02}$  เป็นชนิดหลายโหมด และ  $\beta$  คือค่าคงที่ของการแพร่

## 2.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงปรากฏการณ์พื้นฐานของแสงที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่นการสะท้อนกลับหมดภายในซึ่งเป็นหลักการเบื้องต้นของเส้นใยนำแสง ผลึกหักเหสองแนว โฟลาโรเซชันตลอดจนการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสงซึ่งนำไปใช้อธิบายในส่วนของทฤษฎีการประมวลสัญญาณแสง โดยเส้นใยนำแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเส้นใยนำแสงชนิดอนุกรมทิศทางโฟลาโรเซชันชนิดไฮลิ-ไบร์ฟรินเจนซ์ ซึ่งมีความเหมาะสมกับงานด้านการตรวจวัด นอกจากนี้ยังต้องพิจารณา

พารามิเตอร์อื่นๆ ของเส้นใยนำแสงซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงแต่ละชนิด เช่น นิเวอริรัคัล-อะเพอร์เจอร์ มุมรับแสง และความถี่นอร์มอลไลซ์ เป็นต้น เพื่อให้แสงสามารถเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้เหมาะสมกับความต้องการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### แหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์รับสัญญาณแสง

อุปกรณ์สำคัญที่ทำให้ระบบเส้นใยนำแสงนั้นมีความแตกต่างจากระบบอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปก็คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งและรับสัญญาณแสงที่ใช้นำข้อมูลไปตามเส้นใยนำแสง โดยอุปกรณ์เหล่านี้ทำหน้าที่คล้ายตัวแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณไฟฟ้ากับสัญญาณแสง ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

#### 3.1 ชนิดของแหล่งกำเนิดแสง

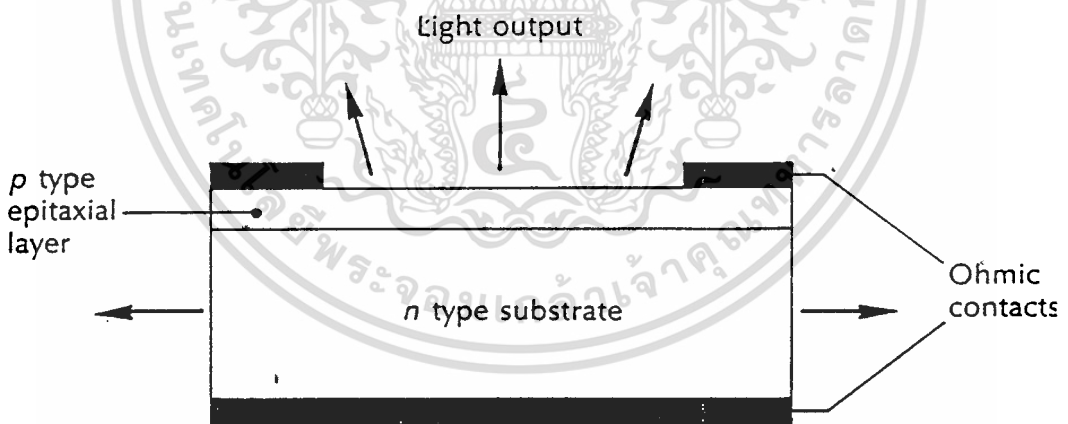
แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในระบบเส้นใยนำแสงนั้น จำเป็นจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ [ 4 ]

1. สามารถให้แสงที่มีพลังงานหรือความเข้มแสงมากพอที่จะส่งสัญญาณหรือเดินทางไปตามตลอดระยะทางของการส่งสัญญาณได้
2. โครงสร้างของแหล่งกำเนิดแสงต้องสามารถส่งพลังงานแสงส่วนใหญ่หรือทั้งหมดเข้าไปในเส้นใยนำแสงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กได้ นั่นคือมุมของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงต้องเป็นมุมแคบๆ และมีทิศทางที่แน่นอน ในกรณีที่แสงจากแหล่งกำเนิดแสงกระจายเป็นมุมกว้างสามารถใช้ทัศนอุปกรณ์เช่น เลนส์รวมแสงเพื่อโฟกัสแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสงได้
3. ความยาวคลื่นของแสงต้องมีความเหมาะสมกับเส้นใยนำแสงที่ใช้
4. พิจารณาค่าแบนวิดธ์ของแหล่งกำเนิดแสง ตลอดจนความยาวโคฮีเรนซ์ ต้องมีค่าเหมาะสมกับการใช้งาน
5. ช่วงเวลาตอบสนองของแหล่งกำเนิดแสง (response time) หรือช่วงเวลาที่แหล่งกำเนิดแสงได้รับสัญญาณไฟฟ้าแล้วสร้างเป็นสัญญาณแสงออกมาต้องมีค่าสั้นมากๆ
6. พลังงานแสงต้องมีค่าคงที่ต่อเนื่องตลอดเวลาและไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆอันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิ และสภาพแวดล้อม
7. ในระบบการสื่อสารแบบอนาล็อก (analog) ต้องใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณแสงชนิดเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น เพื่อลดการผิดเพี้ยนของสัญญาณให้น้อยที่สุด

โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้จะขึ้นอยู่กับระบบ เช่นในระบบที่มีระยะทางการส่งสัญญาณไม่ไกลนัก หรือในระบบที่ใช้ในการศึกษา อาจใช้แอล อี ดี เป็นแหล่งกำเนิดแสงได้ ส่วนในระบบที่ต้องการประสิทธิภาพสูงๆ จะใช้แสงเลเซอร์เป็นตัวนำข้อมูล ซึ่งอาจอยู่ในลักษณะของเลเซอร์สารกึ่งตัวนำ หรือเลเซอร์ไดโอด หรือเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิดต่างๆ โดยในที่นี้จะกล่าวถึงแหล่งกำเนิดแสงชนิดแอล อี ดี และเลเซอร์ไดโอด

### 3.1.1 แอล อี ดี

แอล อี ดี คือไดโอดที่ออกแบบโครงสร้างให้สามารถแปลงพลังงานแสงออกมาได้เมื่อมีการไบแอสตาม (forward bias) โครงสร้างของแอล อี ดี แบบพื้นฐานนั้นแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยสารชนิดแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ถูกได้ไปเป็นสารชนิดพี ( P ) และสารชนิดเอ็น ( N ) วางต่อกัน หลักการทำงานเหมือนกับไดโอดหรือแอล อี ดี ธรรมดาทั่วไปคือเมื่อมีการไบแอสถูกทางด้วยค่าที่เหมาะสมแล้ว จะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังโหนดในระหว่างช่วงรอยต่อของสารพี-เอ็น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของชั้นอิเล็กตรอนแล้วจะคายพลังงานออกมาในรูปของแสง



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ แอล อี ดี [ 4 ]

สารที่ใช้ทำแอล อี ดี อาจเป็นสารประเภทแกลเลียมอาร์เซไนด์หรือแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสเฟอ (GaAsP) แกลเลียมฟอสเฟอ (GaP) แกลเลียมอินเดียมอาร์เซไนด์ (GaInAs) หรืออินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสเฟอ (InGaAsP) เพื่อเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวคลื่นแสงตามต้องการ

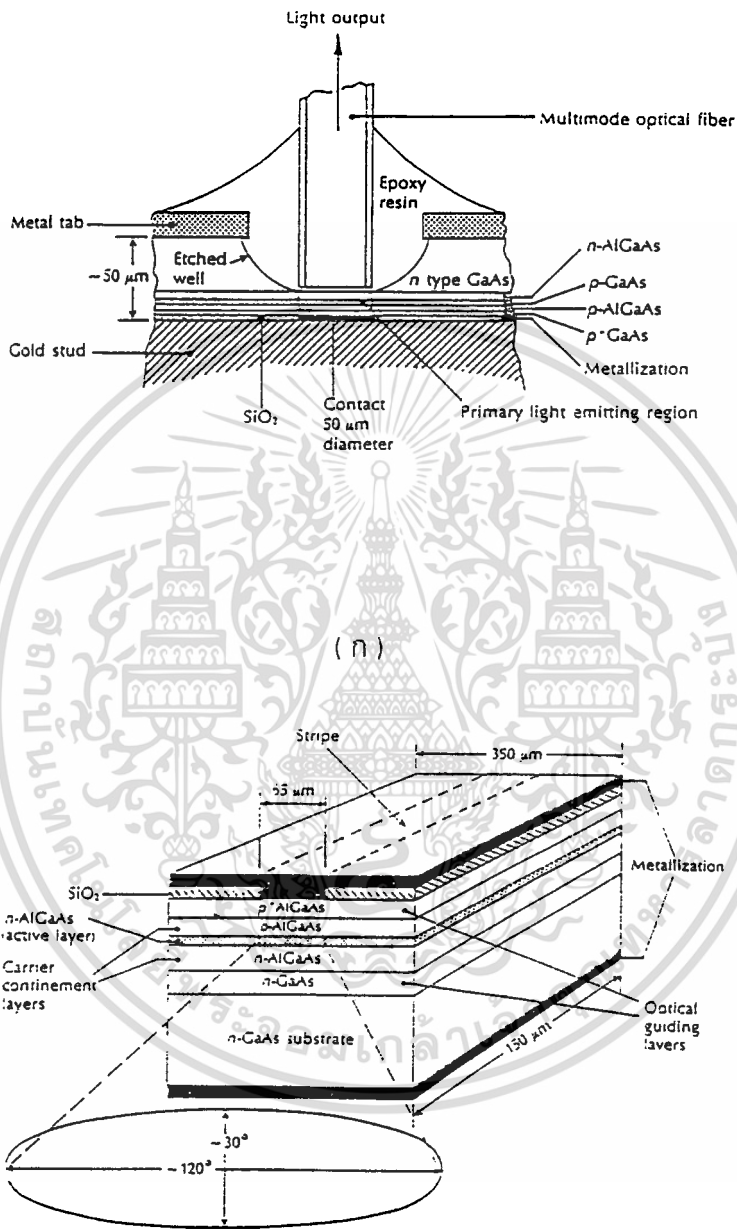
## ตารางที่ 3.1

แสดงความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นแสงเมื่อเปลี่ยนชนิดของสารที่ใช้ทำ แอล อี ดี [ 36 ]

Material	Wavelength (nm)
GaP (gallium phosphide)	520-570
GaP (gallium phosphide)	630-790
GaAsP (gallium arsenide phosphide)	640-700
GaAlAs (gallium aluminum arsenide)	650-700
GaAs (gallium arsenide)	920-950

แสงที่เปล่งจากแอล อี ดี ในช่วงรอยต่อจะมีลักษณะกระจายไม่มีแนวทางเดียวกันนัก และมักทำมุมค่อนข้างกว้างทำให้แสงที่ได้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ การแก้ไขทำได้โดยการปรับปรุงโครงสร้างของสารให้มีความซับซ้อนมากขึ้น และมีการกำหนดขอบเขตการเปล่งแสงเพื่อให้แสงมีการรวมตัวออกมาในทิศทางเดียวกัน

นอกจากนั้นแอล อี ดี ถูกจำแนกตามลักษณะการเปล่งแสงเป็น 2 ประเภท แสดงในรูปที่ 3.2 คือ ( ก ) แบบเปล่งแสงจากผิว (surface-emitting LED) และ ( ข ) แบบเปล่งแสงจากขอบ (edge emitting LED) ซึ่งเป็นแอล อี ดี ที่ปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพของแสงอาทิตย์พุทมากขึ้นโดยโครงสร้างของแอล อี ดี ประเภทนี้จะประกอบด้วยทัศนอุปกรณ์ต่างๆ เช่นเลนส์ และอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อเข้ากับเส้นใยนำแสง เป็นต้น



( ข )

รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของ แอล อี ดี ตามลักษณะการเปล่งแสง [ 16 ]

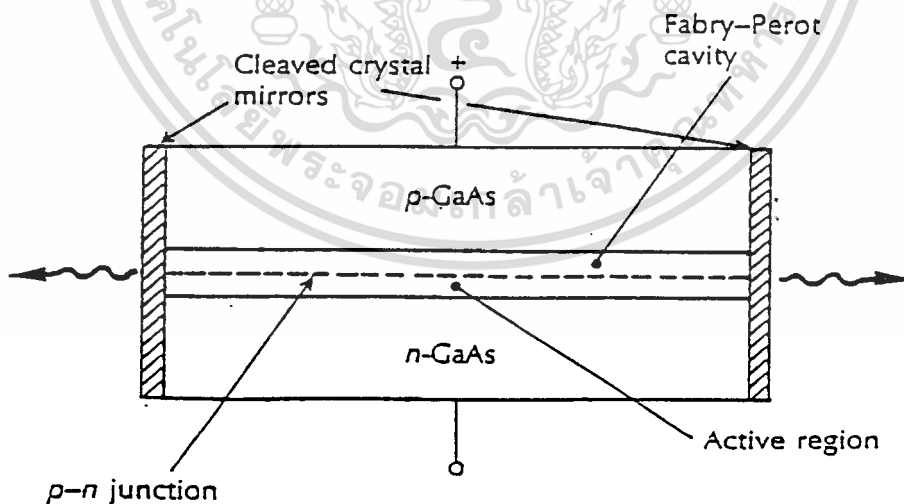
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 เลเซอร์ไดโอด

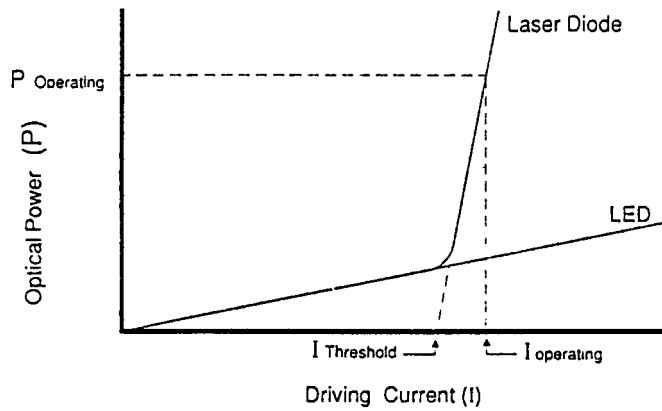
เลเซอร์ไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทเดียวกับไดโอดโดยถูกออกแบบให้สามารถแปลงแสงเลเซอร์ออกมาได้ ลักษณะของแสงเลเซอร์คือมีทิศทางของแสงไปในทางเดียวกัน และมีเฟสตรงกันจึงทำให้มีความเข้มแสงสูงมาก ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอดแสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยสารแบบเดียวกับที่ใช้ทำแอล อี ดี ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ที่ปลายทั้งสองถูกเคลือบด้วยสารที่ทำหน้าที่เสมือนกระจกเงา

เมื่อมีการไบแอสตามทำให้เกิดการแตกตัวของโฮลและอิเล็กตรอนอิสระบริเวณรอยต่อพี-เอ็น โดยจะเคลื่อนที่ไปกระทบตัวอื่น ทำให้เกิดโฮลและอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้นมากมายและสะท้อนกลับไปมาที่บริเวณรอยต่ออันเนื่องมาจากกระจกเงาที่ปลายทั้งสอง สาเหตุดังกล่าวทำให้เกิดการสะสมพลังงานภายในมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อพลังงานมีค่ามากพอจะเปล่งแสงเลเซอร์ออกมา

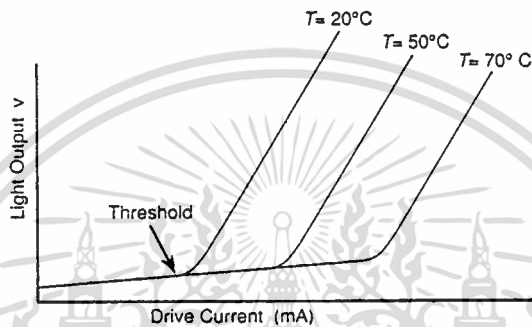
การไบแอสเลเซอร์ไดโอดให้ทำงานจนเปล่งแสงเลเซอร์ออกมาได้นั้น ขึ้นอยู่กับกระแสที่ป้อนให้โดยต้องมีค่าสูงกว่ากระแสเทรชโฮลด์ (threshold current,  $I_{th}$ ) ซึ่งเป็นขีดเริ่มของช่วงกระแสทำงานที่กำหนดตามข้อมูลของเลเซอร์ชนิดนั้นๆ [ 33 ] หากกระแสไบแอสมีค่าต่ำกว่ากระแสเทรชโฮลด์แล้วเลเซอร์ไดโอดจะยังคงทำงานอยู่ แต่แสงที่เปล่งออกมาจะมีลักษณะไม่เป็นระเบียบคล้ายกับการเปล่งแสงของแอล อี ดี



รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเลเซอร์ไดโอด [ 19 ]



( ก )



( ข )

$I_{\text{threshold}}$  = กระแสขีดเริ่ม

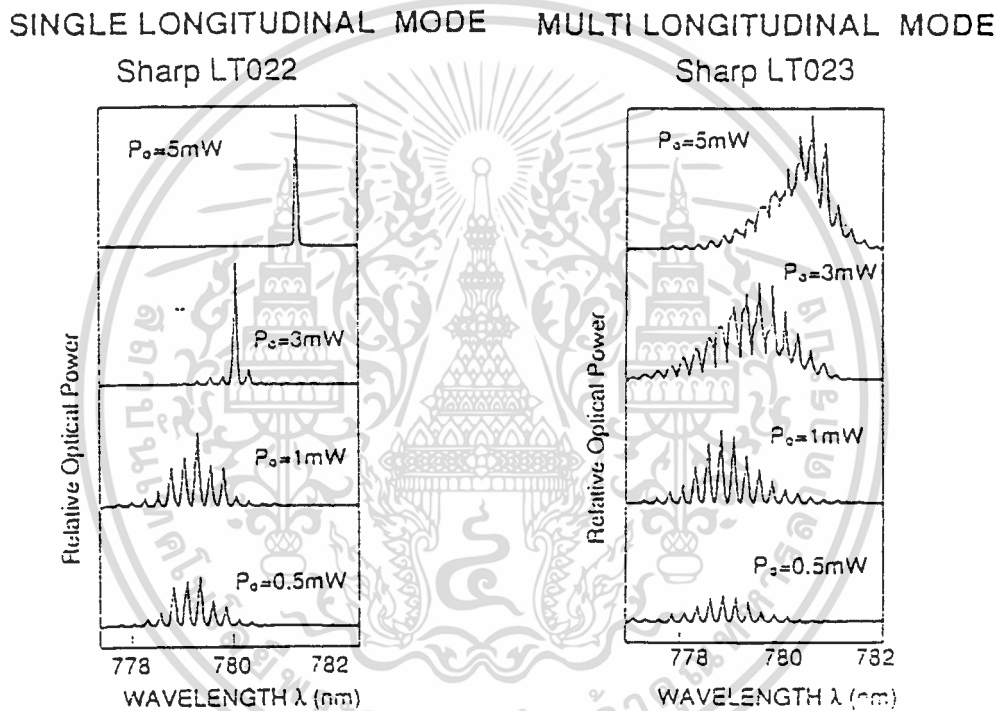
$I_{\text{operating}}$  = กระแสทำงาน

รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสไบแอสกับกำลังของแสงที่เปล่งออกมา [ 25 ]

รูปที่ 3.4 ( ก ) เมื่อเพิ่มกระแสไบแอสให้เลเซอร์ทำงานในช่วงแรกจะเป็นการเปล่งแสงด้วยตัวเอง (spontaneous emission) แต่เมื่อถึงช่วงกระแสเทรชโฮลด์จะเป็นการเปล่งแสงแบบถูกกระตุ้น (stimulated emission) โดยกำลังแสงที่ได้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยความชันเป็นเชิงเส้น แต่หากเพิ่มกระแสไบแอสขึ้นเรื่อยๆจนเลยช่วงกระแสทำงานหรือถึงจุดที่กำลังอิ่มตัว (power saturation) จะไม่เป็นเชิงเส้นและอาจทำให้เลเซอร์เสียหายได้และจะกลายเป็นคุณสมบัติเป็นแอล อี ดี ในที่สุด ส่วนรูปที่ 3.4 ( ข ) หากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะใช้งานจะทำให้ช่วงกระแสทำงานเปลี่ยนไปด้วย

นอกจากนั้นยังได้จำแนกชนิดของเลเซอร์ไดโอดตามลักษณะของสเปกตรัมของแสงที่แผ่ออกมาเป็น 2 ชนิดคือชนิดโหมดเดี่ยว และชนิดหลายโหมด พิจารณาจากรูปที่ 3.5 เปรียบเทียบ

เลเซอร์ไดโอดของ Sharp รุ่น LT022MDO (ชนิดโหมดเดียว) และ LT023MDO (ชนิดหลายโหมด) ที่ความยาวคลื่นแสง 780 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มกระแสไบแอสขึ้นเรื่อยๆ พบว่าในช่วงแรกที่กระแสไบแอสยังไม่ถึงช่วงทำงานจะยังไม่สามารถวิเคราะห์สเปกตรัมของเลเซอร์ที่เกิดขึ้นได้ แต่เมื่อเพิ่มกระแสขึ้นจนถึงช่วงทำงานถ้าเป็นเลเซอร์ชนิดโหมดเดียวจะเห็นพีคของสัญญาณเพียงพีคเดียว แต่หากเป็นเลเซอร์ชนิดหลายโหมดจะมีพีคของสัญญาณบริเวณด้านข้างเกิดขึ้นด้วย



รูปที่ 3.5 แสดงเลเซอร์ไดโอดชนิดโหมดเดียวและชนิดหลายโหมด ของ Sharp รุ่น LT022MDO และ LT023MDO ที่ความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร [ 32 ]

## 3.2 อุปกรณ์รับสัญญาณแสง

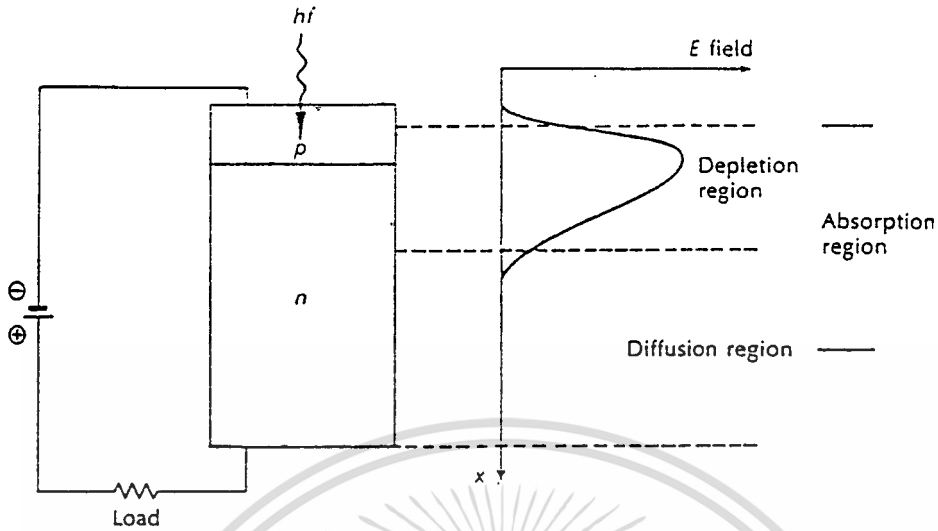
อุปกรณ์รับสัญญาณแสงหรือโฟโตดีเทคเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า คุณสมบัติที่สำคัญของอุปกรณ์รับสัญญาณแสงในระบบเส้นใยนำแสงได้แก่

1. ต้องมีความไวในการรับแสงได้ดีเฉพาะในช่วงที่ต้องการ เนื่องจากการส่งสัญญาณแสงจะให้ความยาวคลื่นแสงในช่วงเฉพาะ ดังนั้นหากแสงอื่นที่มีความยาวคลื่นไม่เกี่ยวข้องมาตกกระทบพร้อมกันย่อมทำให้ข้อมูลมีความผิดพลาดได้
2. เวลาในการตอบสนองสัญญาณต้องสั้นมาก กล่าวคือเมื่อมีแสงตกกระทบที่ตัวรับสัญญาณแสงจะต้องเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยเวลาที่สั้นที่สุด เพื่อที่ว่าข้อมูลจำนวนมากสามารถใช้รับส่งด้วยความเร็วสูงได้
3. ในระบบการสื่อสารแบบอนาล็อก ต้องใช้อุปกรณ์รับสัญญาณแสงชนิดเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น เพื่อลดการผิดเพี้ยนของสัญญาณให้น้อยที่สุด
4. สัญญาณรบกวน (noise) จากสภาพแวดล้อมต้องมีค่าน้อยที่สุด

การเลือกใช้อุปกรณ์รับสัญญาณแสงนั้นขึ้นกับความต้องการในการใช้งาน ในที่นี้จะกล่าวถึงโฟโตไดโอดแบบธรรมดา โฟโตไดโอดแบบพิน ( PIN photodiode, PIN ) โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ (avalanche photodiode, APD) โฟโตทรานซิสเตอร์ ( phototransistor ) และอุปกรณ์รับ ซี ซี ดี ดังนี้

### 3.2.1 โฟโตไดโอดแบบธรรมดา

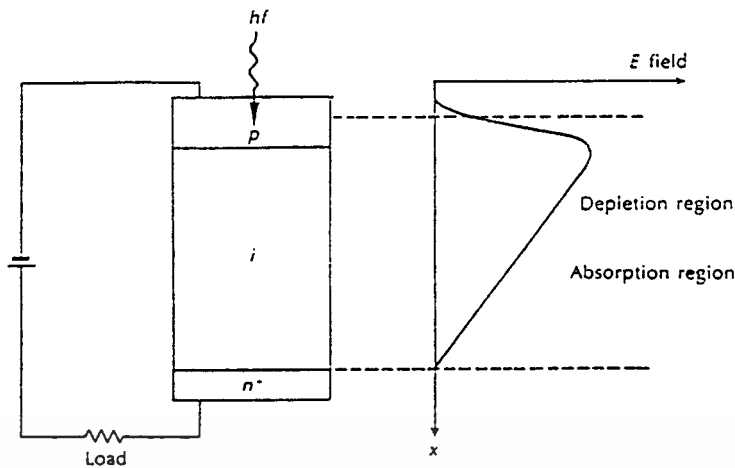
โฟโตไดโอดดังแสดงในรูปที่ 3.6 มีหลักการทำงานตรงข้ามกับไดโอดเปล่งแสงหรือแอลอีดี กล่าวคือเมื่อโฟโตไดโอดได้รับพลังงานแสงจากภายนอกตกกระทบบริเวณรอยต่อพี-เอ็น จะทำให้เกิดการแตกตัวของโฮลและอิเล็กตรอนอิสระ เกิดเป็นกระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current) ในช่วงนี้หากมีการไบแอสกลับ (reverse bias) ด้วยแรงดันค่าหนึ่งให้แก่ไดโอด บริเวณรอยต่อจะขยายกว้างขึ้น โฮลและอิเล็กตรอนอิสระจะถูกแรงดันไบแอสกลับเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลข้ามรอยต่อเป็นกระแสเนื่องจากแสงได้ ทิศทางการไหลของกระแสเนื่องจากแสงนี้มีทิศทางเดียวกับกับการไบแอสกลับคือจะไหลจากขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟเข้าสู่ขั้วแคโทดของไดโอด



รูปที่ 3.6 แสดงโฟโตไดโอดแบบธรรมดา [ 16 ]

### 3.2.2 โฟโตไดโอดแบบพิน

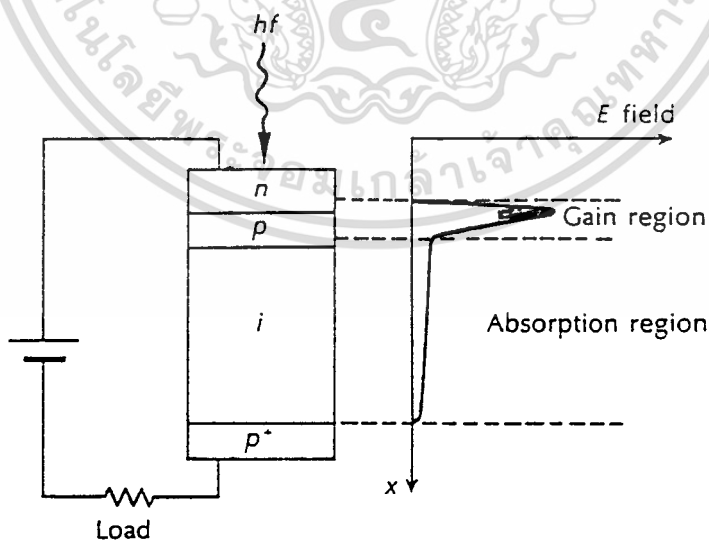
การเพิ่มบริเวณรอยต่อของพี-เอ็นให้กว้างขึ้น นอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มค่าแรงดันไบแอสกลับของโฟโตไดโอดแล้ว อาจทำได้โดยแทรกสารแบบอินทรินซิก (intrinsic) ไว้ระหว่างรอยต่อพี-เอ็น ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเป็นโฟโตไดโอดชนิดพินโฟโตไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งช่วยให้กระแสไหลได้มากขึ้นกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดาเมื่อมีแสงมาตกกระทบ และมีช่วงเวลาตอบสนองของสัญญาณสั้นมากเป็นนาโนวินาที และจากผลของโครงสร้างแบบพินโฟโตไดโอดนี้ทำให้มีโหมดของการทำงานได้สองแบบคือโหมดโฟโตวอลทาอิก (photovoltaic) ซึ่งจะผลิตกระแสเมื่อแสงตกกระทบโดยไม่ต้องมีการไบแอส และโหมดโฟโตคอนดักทีฟ (photoconductive) เป็นการทำงานเมื่อมีการไบแอสกลับให้กับตัวมัน แต่สำหรับโหมดโฟโตคอนดักทีฟจะมีความไวต่อการตอบสนองสัญญาณสูงกว่าโหมดโฟโตวอลทาอิก



รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างของพินโฟโตไดโอด [ 16 ]

### 3.2.3 โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์

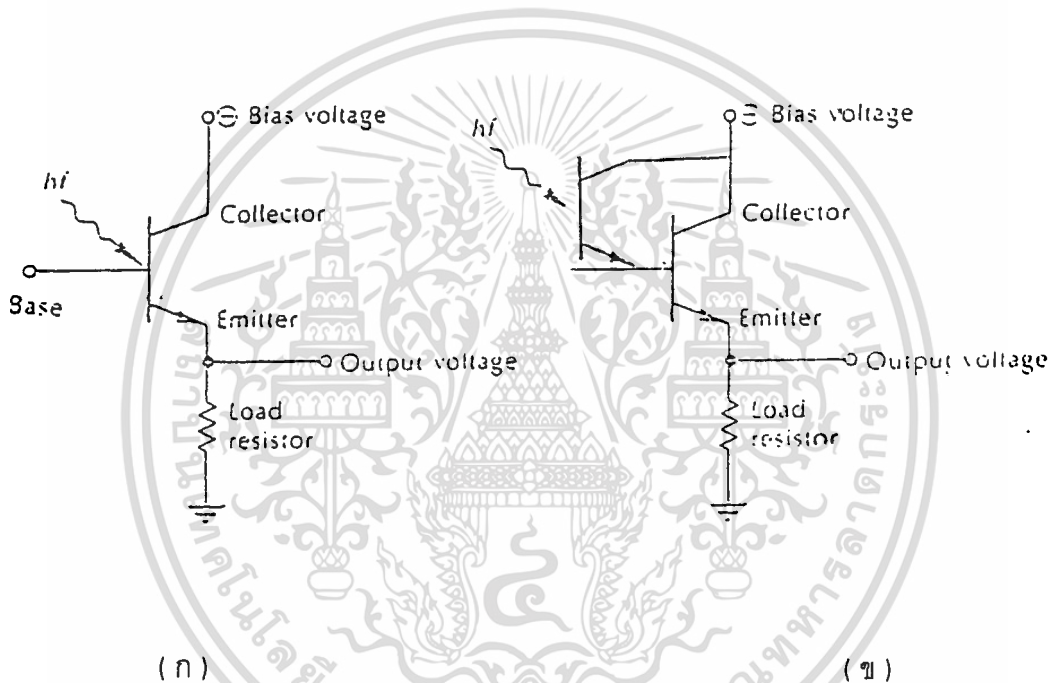
โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์อาศัยหลักการทำงานเช่นเดียวกับอะวาลานซ์ไดโอด โดยทำให้มีกระแสไหลมากขึ้นกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดาหลายเท่า แต่มีข้อเสียตรงที่มีความไวต่ออุณหภูมิสูง และเกิดสัญญาณรบกวนมาก การใช้งานโฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์จำเป็นต้องใช้แรงดันไบแอสกลับค่อนข้างสูง (ประมาณ 40-400 โวลต์) แต่ก็เป็ผลดีเพราะทำให้เวลาตอบสนองของสัญญาณสั้นมาก



รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ [ 16 ]

### 3.2.4 โฟโตทรานซิสเตอร์

การทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์นั้นจะขึ้นกับขนาดความเข้มแสงที่ตกกระทบโดยอาศัยหลักการเดียวกับโฟโตไดโอด แต่โฟโตทรานซิสเตอร์มีข้อดีกว่าโฟโตไดโอดมาก ทั้งนี้เพราะค่ากระแสที่ได้จะผ่านการขยายด้วยทรานซิสเตอร์ก่อน รูปที่ 3.9 ( ก ) เป็นโฟโตทรานซิสเตอร์แบบธรรมดา ( ข ) เป็นโฟโตทรานซิสเตอร์แบบดาร์ลิงตัน (darlington) ที่มีอัตราการขยายกระแสสูงขึ้นมากรกว่าแบบธรรมดาเมื่อมีแสงตกกระทบเท่ากัน



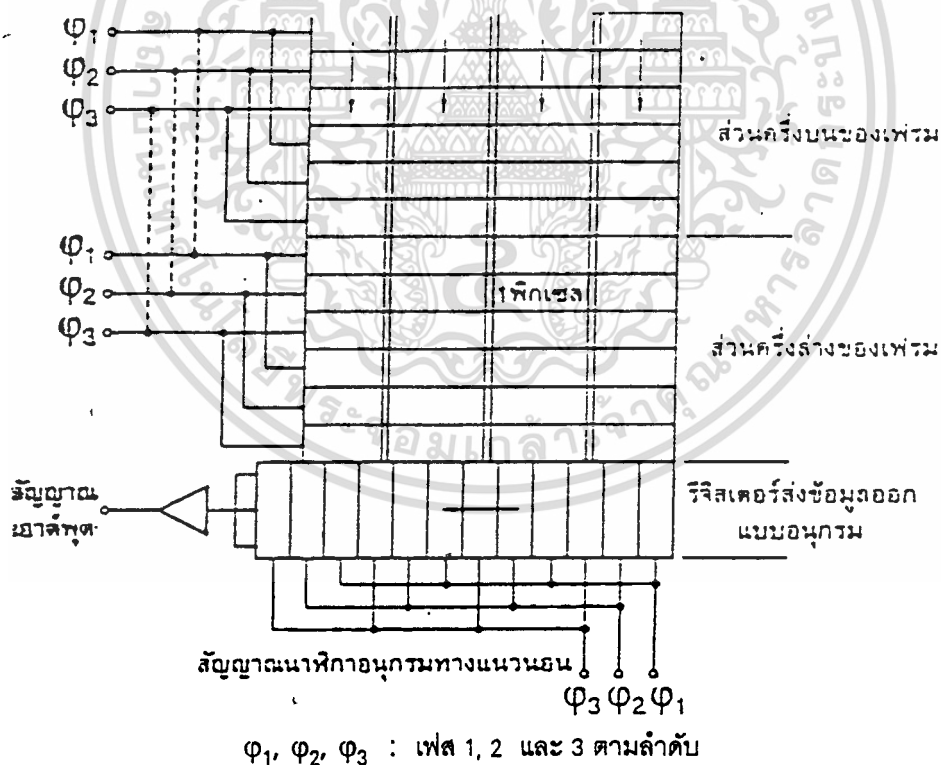
รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างของโฟโตทรานซิสเตอร์ [ 16 ]

ข้อดีของโฟโตทรานซิสเตอร์คือสามารถรับสัญญาณที่มีขนาดความเข้มแสงน้อยๆ ได้ดี แต่มีช่วงเวลาตอบสนองของสัญญาณค่อนข้างช้า ซึ่งไม่เหมาะกับระบบข้อมูลขนาดใหญ่ ในการใช้งานกับระบบที่มีข้อมูลจำนวนมาก หรือแบนวิธสูงๆ ( 100 เมกะเฮิรตซ์ขึ้นไป ) จะใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ชนิดพิน-เฟท (PIN-FET) ที่มีโครงสร้างเป็นวงจรรวมเสมือนมีพินโฟโตไดโอดเป็นตัวรับสัญญาณ และมีวงจรถานซิสเตอร์แบบเฟทเป็นตัวขยายสัญญาณอยู่ในตัวเดียวกัน จากหลักการนี้ทำให้ได้ตัวรับสัญญาณแสงที่มีความไวในการรับสัญญาณสูงและมีค่าสัญญาณรบกวนต่ำ

### 3.2.5 อุปกรณ์รับ ซี ซี ดี

อุปกรณ์รับสัญญาณแสงซี ซี ดี เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าและเข้าสู่ระบบอิมเมจโปรเซสซิง (image processing) เกิดภาพ โครงสร้างภายในแบ่งเป็นพื้นที่เล็กๆเรียกว่าพิกเซล (pixels) ภายในแต่ละพิกเซลจะมีประจุทำให้เกิดภาพ และจะมีการถ่ายเทประจุเมื่อมีแสงตกกระทบ โดยการถ่ายเทจะใช้หลักการหมุนเฟส (phase clock voltages) ในแต่ละแถวและหลักจะมีการกำหนดสถานะทางไฟฟ้าด้วยการหมุนเฟส 3 เฟสที่มีความสัมพันธ์กันของช่วงเวลาและแรงดันไฟฟ้า ประจุที่ถ่ายเทออกสู่ภายนอกจะนำไปประมวลผลและสร้างภาพต่อไป [ 2 ]

ข้อดีของอุปกรณ์รับซี ซี ดี คือมีช่วงการตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นได้กว้าง รวมถึงย่านที่ตามองไม่เห็น สามารถถ่ายภาพที่มีความเข้มแสงน้อยๆ และเก็บรายละเอียดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจุบันได้พัฒนาให้มีราคาถูกลง และใช้ในด้านการถ่ายภาพ กล้องถ่ายรูป วีดีโอ กล้องโทรทรรศน์ ตลอดจนในงานด้านดาราศาสตร์



รูปที่ 3.10 แสดงโครงสร้างทั่วไปและการทำงานของซี ซี ดี [ 2 ]

### 3.3 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงชนิดของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ส่งแสงเข้าไปในเส้นใยนำแสง 2 ชนิด คือ แอล อี ดี และเลเซอร์ไดโอด นอกจากนั้นยังกล่าวถึงชนิดของอุปกรณ์รับแสงชนิดต่างๆ เช่นไฟโตไดโอดแบบธรรมดา ไฟโตไดโอดแบบพิน ไฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ ไฟโตทรานซิสเตอร์ และอุปกรณ์ซี ซี ดี โดยจะเลือกใช้งานตามความเหมาะสมของสัญญาณที่ตรวจรับ สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้เลเซอร์ไดโอดชนิดหลายโหมดของ sharp รุ่น LT023 MDO [ 33 ] และพินไฟโตไดโอดของ RS รุ่น BPX65 [ 31 ]



## บทที่ 4

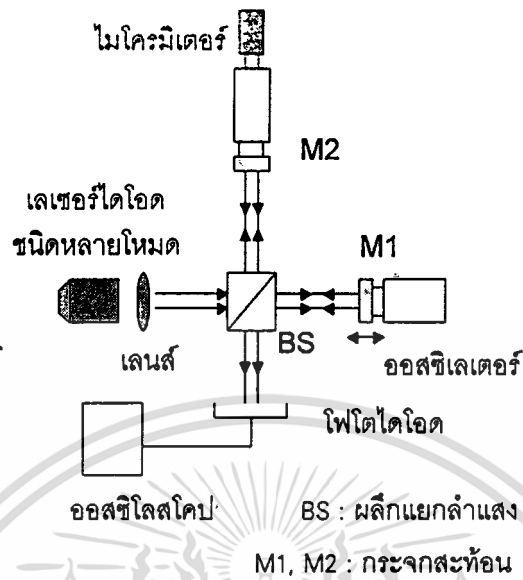
### อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์

อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจวัดสัญญาณจากผลของการแทรกสอด อันเนื่องมาจากการกระตุ้นปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆในระบบตรวจวัดทางแสง และอ่านค่าที่ตรวจวัดได้โดยใช้เทคนิคการประมวลสัญญาณทางแสง และการปรับระยะทางของแขนข้างหนึ่งของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์บางชนิดซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆที่เกี่ยวกับเครื่องมือวัดทางแสงดังนี้

- 4.1 อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน
- 4.2 อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแมช-เซนเดอร์ (Mach-Zehnder Interferometer)
- 4.3 อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแซนแยค (Sagnac Interferometer)

#### 4.1 อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน

เป็นอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบพื้นฐานที่ใช้สำหรับงานด้านการตรวจวัดความยาวอย่างละเอียดโดยอาศัยหลักการการแทรกสอดกันของแสงสองลำ โดยสัญญาณการแทรกสอดสามารถตรวจสอบได้โดยใช้อุปกรณ์รับสัญญาณแสงแล้วแสดงผลออกมาเป็นความเข้มแสง ความเข้มแสงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการปรับระยะแขนข้างหนึ่งของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์เลื่อนเข้าและออกจากตำแหน่งสมดุล (กระจก  $M_2$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยระยะดังกล่าวเรียกว่าความต่างของเส้นทางเดินของแสง ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากสเกลปรับละเอียด (ไมโครมิเตอร์) ระยะความต่างของเส้นทางเดินของแสงเมื่อเทียบกับตำแหน่งสมดุลนั้นนอกจากจะบอกถึงลักษณะของสัญญาณการแทรกสอด ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 แล้ว ยังสามารถนำสัญญาณที่วัดได้หาความยาวโคฮีเรนซ์ของแหล่งกำเนิดแสงชนิดที่ใช้ได้



รูปที่ 4.1 แสดงชุดอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน

เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวโคฮีเรนซ์สั้นเข้าสู่ผลึกแยกลำแสง (beam splitter) จะแยกลำแสงออกเป็นสองลำโดยแต่ละลำจะมีความเข้มของแสงลดลงครึ่งหนึ่ง แสงลำหนึ่งสะท้อนที่ผลึกแยกลำแสงและตกกระทบบนกระจก  $M_2$  ซึ่งสามารถเลื่อนปรับระยะได้ด้วยไมโครมิเตอร์ ส่วนแสงอีกลำหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านผลึกและตกกระทบบนกระจก  $M_1$  ที่กระจก  $M_1$  นั้นอยู่กับที่เป็นตัวอ้างอิงและทำการมอดดูเลต (modulate) ด้วยสัญญาณความถี่ค่าหนึ่ง [ 26 ] แสงที่สะท้อนกลับจากกระจก  $M_1$  และ  $M_2$  จะกลับมาถึงผลึกแยกลำแสงอีกครั้งเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดแสงสองแหล่งที่มีความถี่ต่างกันมารวมกันและเกิดการแทรกสอดสามารถตรวจรับสัญญาณได้ที่อุปกรณ์รับสัญญาณแสงและแสดงผลบนจอออสซิลโลสโคป โดยความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไปดังสมการที่ 4.1 [ 29 ]

$$I = I_0 [1 + Q \cos \varphi (t)] \quad (4.1)$$

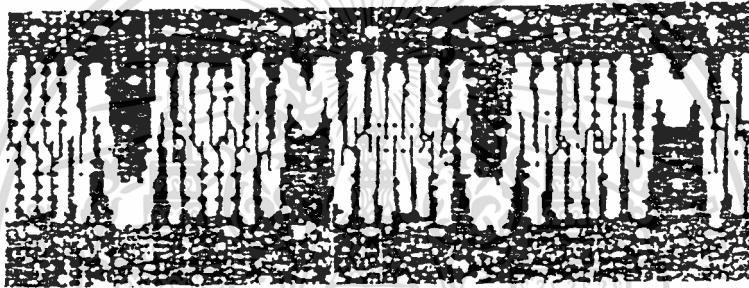
เมื่อ  $I_0$  คือความเข้มแสงอินพุท  
 $\varphi (t)$  คือเฟสที่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลาเมื่อปรับแขนของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์  
 $= 2\beta\Delta L$  เมื่อ  $\beta = 2\pi n / \lambda$  หรือค่าคงที่ของการแพร่  
 เมื่อ  $n$  คือดัชนีหักเหของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

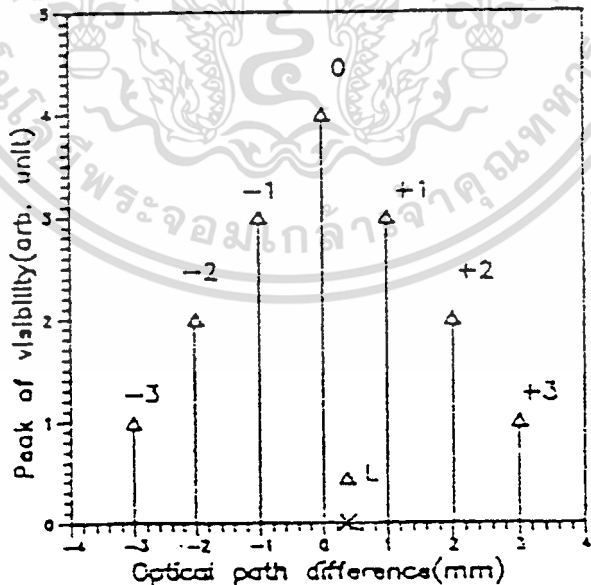
- $\lambda$  คือความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ  
 $Q$  คือความชัดเจนของริ้วการแทรกสอด

$$Q = [I_{\max} - I_{\min}] / [I_{\max} + I_{\min}] \quad (4.2)$$

เมื่อ  $I_{\max}$  และ  $I_{\min}$  คือค่าความเข้มแสงสูงสุดและต่ำสุดของแสงในอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ โดย  $0 \leq Q \leq 1$  กล่าวคือถ้าหาก  $Q = 1$  จะแสดงความชัดเจนของริ้วได้ชัดเจนที่สุดโดยแยกความสว่างและมีดได้ชัดเจน แต่ถ้า  $Q = 0$  แสดงว่าไม่สามารถแยกความชัดเจนของริ้วได้



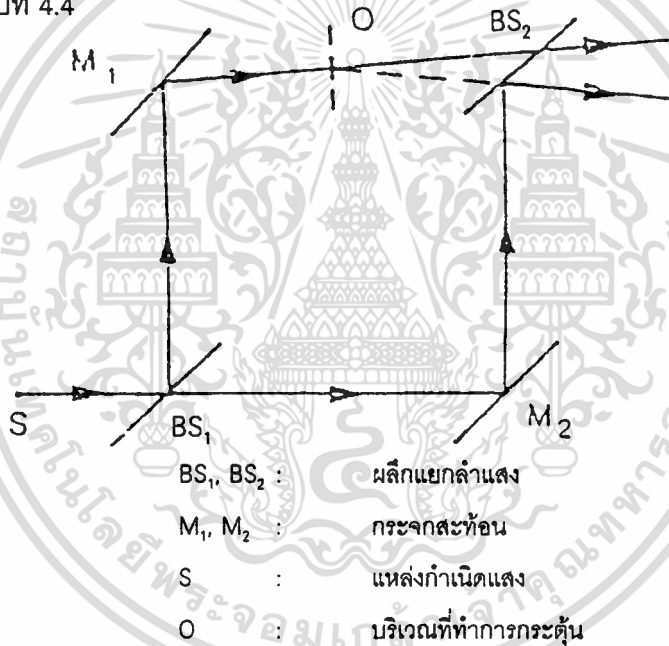
รูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณการแทรกสอดที่อ่านค่าได้บนจอออสซิลอสโคป [ 29 ]



รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเมื่อระยะ OPD เปลี่ยนไป (เลื่อนปรับระยะแขนข้างหนึ่งของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์) เป็นสเปกตรัมที่ได้จากเลเซอร์ไดโอดชนิดหลายโหมด [ 29 ]

## 4.2 อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแมช-เซนเดอร์

อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแมช-เซนเดอร์เป็นอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์อีกแบบหนึ่งที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ได้ถูกนำมาใช้สำหรับตรวจวัดอัตราการไหล (fluid flow) ตัวอย่างเช่นการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) การกระจายอุณหภูมิในพลาสมา (temperature distribution in plasmas) โดยอาศัยหลักการการแทรกสอดกันของแสงสองลำ โดยรับสัญญาณการแทรกสอดหลังจากผ่านการตรวจวัดอัตราการไหลสามารถตรวจวัดได้โดยใช้ตัวตรวจรับสัญญาณแสงโดยแสดงผลออกมาเป็นความเข้มแสง ความเข้มแสงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการปรับมุมของลำแสงหรือมีการเปลี่ยนแปลงระยะความแตกต่างของเส้นทางเดินของแสง เมื่อมีตัวกลางที่มีอัตราการไหลเป็นตัวกระตุ้น แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงชุดอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแมช-เซนเดอร์ [ 26 ]

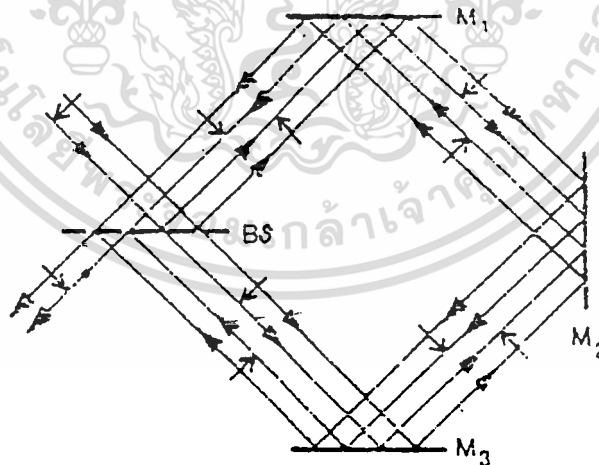
เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านเข้าสู่ผลึกแยกลำแสง BS<sub>1</sub> ทำการแยกลำแสงออกเป็นสองลำ ผ่านกระจก M<sub>1</sub> และ M<sub>2</sub> โดยแสงสะท้อนที่กระจกผ่านเข้าสู่ผลึกแยกลำแสง BS<sub>2</sub> โดยเส้นทาง BS<sub>1</sub>-M<sub>2</sub>-BS<sub>2</sub> เป็นเส้นทางอ้างอิง ส่วนเส้นทาง BS<sub>1</sub>-M<sub>1</sub>-BS<sub>2</sub> มีการกระตุ้นด้วยอัตราการไหล โดยการเปลี่ยนแปลงระยะความแตกต่างของเส้นทางเดินของแสงเนื่องจากตัวกลางที่มากระตุ้นนั้นจะทำให้ความเข้มของแสงที่ถูกตรวจรับเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในสมการที่ 4.3 [ 29 ]

$$I = I_0 [1 + Q \cos ( 2\pi n\Delta L / \lambda )] \quad (4.3)$$

เมื่อ	$I_0$	คือกำลังแสงอินพุท
	$Q$	คือความชัดเจนของริ้วการแทรกสอด
	$n$	คือดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงของตัวกลางที่ทำการรบกวน (perturbed medium)
	$\Delta L$	คือความต่างของเส้นทางเดินของแสงของหน้าคลื่นทั้งสอง
	$\lambda$	คือความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ

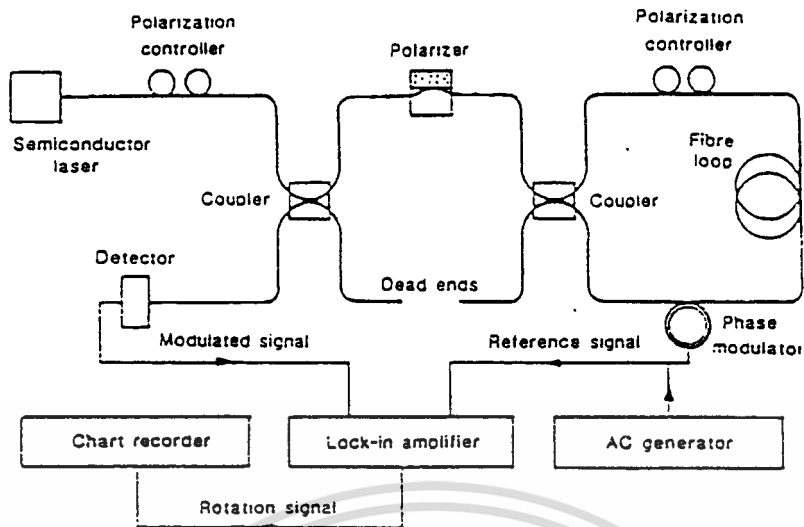
### 4.3 อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแซนแยค

เป็นอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดอัตราการหมุน (rotation sensing) โดยอาศัยหลักการการแทรกสอดกันของแสงสองลำที่เคลื่อนที่ไปในเส้นทางเดียวกันแต่มีทิศทางการเคลื่อนที่สวนทาง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยเส้นทางทั้งสองที่สวนทางกันนั้นมีระยะทางเท่ากัน และสามารถตรวจรับสัญญาณการแทรกสอดได้ที่ตัวตรวจรับสัญญาณแสง โดยพิจารณาจากเฟสที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการกระตุ้นด้วยอัตราการหมุนแล้วทำให้เกิดผลต่างของเส้นทางเดินของแสง ซึ่งสามารถอ่านค่าได้โดยวิธีการประมวลสัญญาณทางแสง



BS : ผลึกแยกลำแสง  
 $M_1, M_2, M_3$  : กระจกสะท้อน

รูปที่ 4.5 แสดงเส้นทางเดินของแสงในอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแซนแยค [ 26 ]



รูปที่ 4.6 แสดงชุดเครื่องตรวจวัดอัตราการหมุนโดยใช้เส้นใยนำแสง [ 26 ]

รูปที่ 4.6 แสดงชุดเครื่องตรวจวัดอัตราการหมุนโดยใช้เส้นใยนำแสงเป็นตัวตรวจวัด โดยเมื่อมีการกระตุ้น(การหมุน)ด้วยอัตราเร็วเชิงมุม  $\omega$  ใดๆ(ที่ต้องการทราบค่า)ให้กับระบบตรวจวัด ซึ่งภายในวงของเส้นใยนำแสงทำการมอดูเลตด้วยความถี่ค่าหนึ่ง หากเมื่อมีการกระตุ้นใดๆจะทำให้เฟสเปลี่ยนแปลงไปดังสมการที่ 4.4 [ 26 ] ซึ่งทำให้สามารถทราบค่าอัตราการหมุนได้

$$\Delta\phi = 4\pi\omega Lr \cos\theta / \lambda c \quad (4.4)$$

- เมื่อ
- L ความยาวเส้นรอบวงของเส้นใยนำแสงในส่วนของวงซ้อนกัน
  - r คือรัศมีของวงกลมแต่ละวง
  - $\lambda$  คือความยาวคลื่นของแสง
  - c คือความเร็วของแสง

นอกจากนั้นยังสามารถตรวจวัดความต่างของเส้นทางเดินแสงได้จากสมการที่ 4.5 [ 26 ]

$$OPD = 4\omega A \cos\theta / c \quad (4.5)$$

- เมื่อ
- A คือพื้นที่วงกลมภายในของวงเส้นใยนำแสงที่ซ้อนกัน

เครื่องตรวจวัดอัตราการหมุนโดยใช้เส้นใยนำแสงเป็นตัวตรวจวัดเช่นเครื่องใจโรสโคป (gyroscope) ปัจจุบันได้ทำการพัฒนาให้สามารถมีความไวในการตรวจวัดสูง ลดขนาดให้เล็กลง และมีราคาถูกลง มีความสะดวกและสามารถนำข้อมูลชุดนี้ไปติดตั้งไว้ในบริเวณที่ต้องการตรวจวัดอัตราการหมุนได้

#### 4.4 สรุป

ในระบบตรวจวัดทางแสงนั้นสิ่งที่ทำการตรวจวัดคือผลของการแทรกสอดของแสงโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่าอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ ซึ่งอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แต่ละชนิดจะนำไปใช้ในงานสำหรับตรวจวัดในแต่ละด้าน เช่นงานด้านการตรวจวัดความยาวอย่างละเอียดจะใช้อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแมช-เซนเดอร์ใช้สำหรับการตรวจวัดอัตราการไหล อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบแซนแยคใช้สำหรับวัดอัตราการหมุน นอกจากนั้นอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบเรลีย์ (Rayleigh Interferometer) ที่ใช้ในงานวิเคราะห์ก๊าซเป็นต้น [ 26 ]

## บทที่ 5

### ขั้นตอนการดำเนินการตรวจวัด

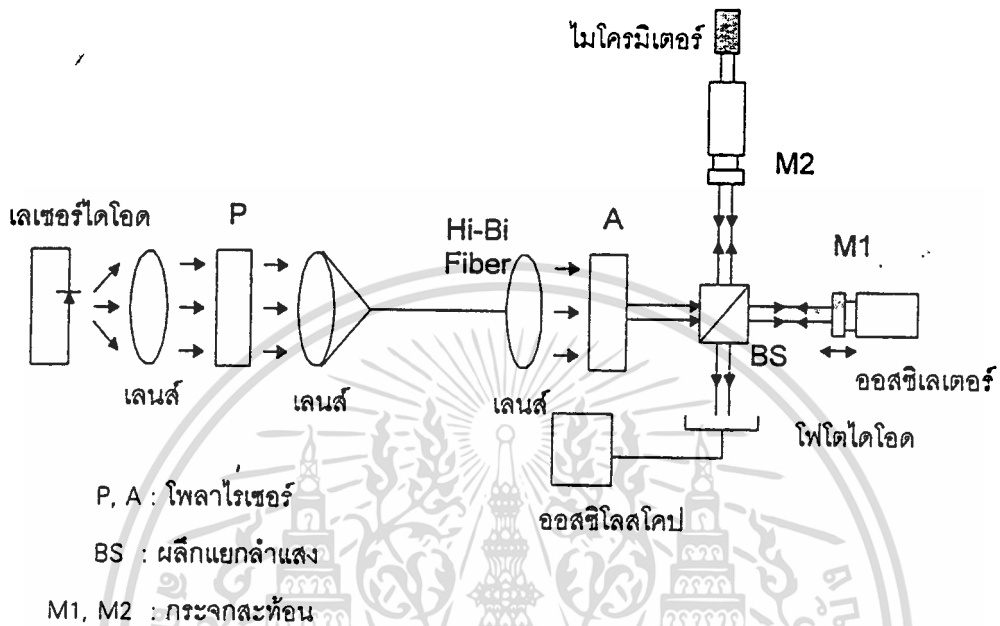
ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการก่อนการทดลอง ได้แก่การออกแบบระบบตรวจวัด โดยใช้เส้นใยนำแสง การเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆที่เหมาะสมในการสร้างเครื่องตรวจวัด การจัดเรียง อุปกรณ์ทางแสง ตลอดจนการออกแบบชิ้นส่วนสำหรับกระตุ้นลงบนเส้นใยนำแสง นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการใช้เส้นใยนำแสงมาทำเป็นเครื่องตรวจวัดแรง ตำแหน่ง อุณหภูมิ และความสัมพันธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางกายภาพเมื่อมีการกระตุ้นบนเส้นใยนำแสง

#### 5.1 การออกแบบระบบตรวจวัด

สำหรับการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้ใช้เส้นใยนำแสงชนิดออปติคัลสภาวะทางโพลาไรเซชันแบบไฮลี ไบรฟ์พรีนเจอร์ ชนิดไบร์-โท ของ York รุ่น HB 800 ความยาวคลื่น 830 นาโนเมตร ความยาวบิตส์ 2.2 มิลลิเมตร [ 23,29 ] ในการสร้างเครื่องตรวจวัด โดยเส้นใยนำแสงชนิดนี้มีคุณสมบัติคือถ้าคลื่นแสงที่โพลาไรซ์เชิงเส้นเข้าไปในเส้นใยนำแสงโดยให้แสงเข้าเพียง 1 โหมดของเส้นใยนำแสงการโพลาไรซ์นี้จะคงสภาพเดิมตลอดความยาวของเส้นใยนำแสง เมื่อมีการกระตุ้นใดๆลงบนเส้นใยนำแสงก็จะทำให้เกิดการคัปปลิงหรือการส่งผ่านของแสงที่ส่งไปในเส้นใยนำแสงจากโหมดหนึ่งไปยังอีกโหมดหนึ่ง โดยการคัปปลิงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับปริมาณทางกายภาพที่เป็นตัวกระตุ้นเช่น แรง ความดัน อุณหภูมิ สนามแม่เหล็ก เป็นต้น และนอกจากนี้ยังสามารถบอกตำแหน่งตรงจุดที่มีการคัปปลิงนั้นๆสัมพันธ์กับปริมาณที่เปลี่ยนแปลงได้อีกด้วย

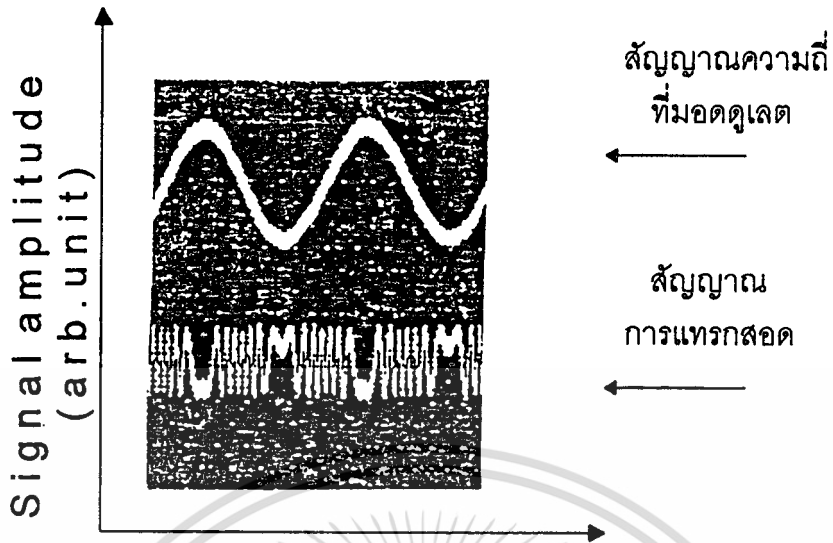
แสงจากการคัปปลิงสามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธีการประมวลสัญญาณทางทัศนศาสตร์ โดยใช้อุปกรณ์รับสัญญาณแสงหรืออุปกรณ์รับสัญญาณแสงชนิดซี ซี ดี อเรย์ ส่วนตำแหน่งสามารถกำหนดได้โดยใช้ตำแหน่งสัมพันธ์ของจุดคัปปลิงที่ตรวจวัดจากการเลื่อนปรับความยาวแขนข้างหนึ่งของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสัน จากความสัมพันธ์ของพลังงานจากการ

คัปปลิง และปริมาณทางกายภาพที่ต้องการวัดจะสามารถหาความสัมพันธ์และใช้เป็นหลักเกณฑ์สำหรับสร้างเครื่องมือได้



รูปที่ 5.1 แสดงระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์การตรวจวัด

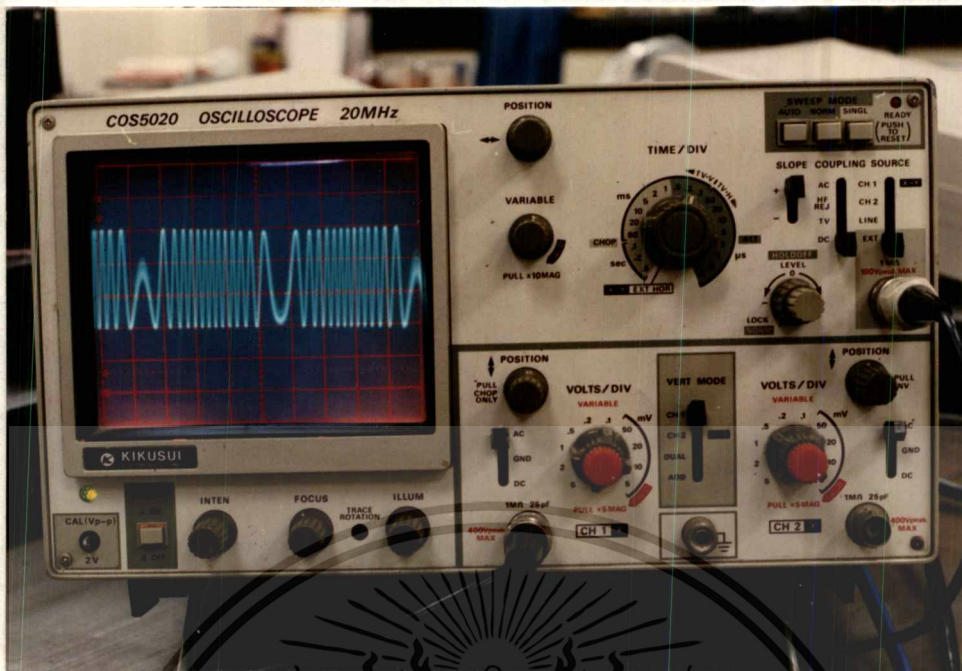
จากรูป 5.1 แสงจากแหล่งกำเนิดแสง(ในการทดลองนี้ใช้เลเซอร์ไดโอดชนิดหลายโหมด) ที่มีความยาวโคฮีเรนซ์สั้นของ Sharp รุ่น LT023MDO ให้กำลังแสงเอาร์ทพุท 3 มิลลิวัตต์ ทำงานที่ความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร หรืออยู่ในย่านอินฟราเรด [ 33 ] สัญญาณที่วัดได้เมื่อผ่านอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แล้วเป็นดังรูป 5.2 [ 29 ] โดยแสงถูกทำให้เป็นลำแสงขนานโดยใช้เลนส์นูนกำลังขยาย  $\times 10$  ที่มี  $NA = 0.25$  แล้วผ่านตัวทำแสงโพลารไรซ์ (P) ทำให้แสงเป็นโพลารไรซ์เชิงเส้น (linear polarization) อย่างสมบูรณ์แล้วโฟกัสด้วยเลนส์รวมแสงกำลังขยาย  $\times 10$  เข้าสู่เส้นใยนำแสง



รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้เมื่อผ่านอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์

เมื่อแสงเดินทางออกจากเส้นใยนำแสงแล้วจะถูกทำให้เป็นลำแสงขนานโดยผ่านเลนส์รวมแสงก่อนแล้วจึงผ่านเข้าสู่ตัววิเคราะห์แสง ( A ) เพื่อบังคับทิศทางของโพลาไรเซชันของแสง หลังจากนั้นจึงเข้าสู่ชุดอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสันที่สามารถเลื่อนปรับความยาวของแขนข้างหนึ่งได้ แล้วทำการวัดสัญญาณจากตัวรับสัญญาณแสงที่ส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์แสดงผล (แสดงรายละเอียดของชุดการทดลองไว้ในภาคผนวก ก.)

เมื่อยังไม่มีมีการกระตุ้นใดๆบนเส้นใยนำแสง และแขนทั้งสองข้างของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์มีระยะทางเท่ากัน สัญญาณแสงที่วัดได้ที่ตัวรับสัญญาณแสงเมื่อหมุนตัววิเคราะห์ให้ขนานกับตัวทำแสงโพลาไรซ์แล้วพบว่าความเข้มของการส่งผ่านของแสงจะมากที่สุด ดังรูปที่ 5.3 ( ก ) นั่นคือเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันที่แนวกลาง แต่ถ้าหมุนตัววิเคราะห์ให้ตั้งฉากกับตัวทำแสงโพลาไรซ์พบว่าจะไม่มีการส่งผ่านออกมาหรือความเข้มของการส่งผ่านแสงจะมีค่าน้อยที่สุด (off set) ดังรูปที่ 5.3 ( ข ) สำหรับกรณีหลังนี้ถ้ามีสัญญาณแสงที่ตรวจวัดได้เมื่อมีการกระตุ้นใดๆบนเส้นใยนำแสงย่อมจะสังเกตได้ง่ายและชัดเจนกว่า



( ก )



( ข )

รูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณแสงที่วัดได้ ( ก ) เมื่อหมุนตัววิเคราะห์หวน  
และ ( ข ) ตั้งจากกับตัวทำแสงโพลาริซ์

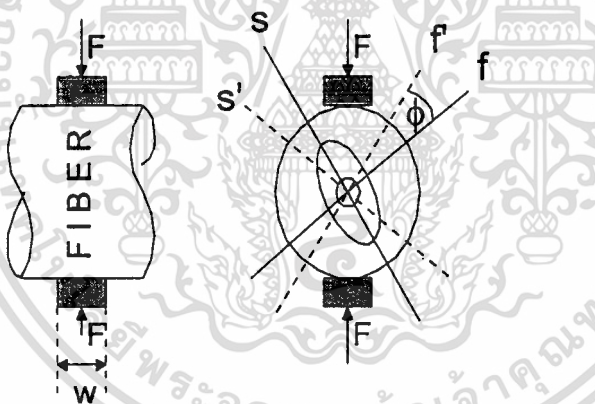
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตำแหน่งความเข้มของแสงน้อยที่สุดนี้เอง ถ้ามีการกระตุ้นด้วยแรงกดลงบนเส้นใยนำแสงดังรูปที่ 5.4 แล้วสามารถอธิบายการเปลี่ยนเฟสระหว่างโหมดทั้งสองของการโพลาไรเซชันดังกล่าว [ 8,23 ]

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda) (\Delta n L) \quad (5.1)$$

เมื่อ

- $\Delta n$  ผลต่างของดัชนีหักเห  $\Delta n = |n_f - n_s|$   
หรือเรียกว่าเกิดไบรฟรินเจนซ์
- $n_f$  ดัชนีหักเหของแกนที่มีความเร็วมากกว่า
- $n_s$  ดัชนีหักเหของแกนที่มีความเร็วน้อยกว่า
- $L$  ความยาวของเส้นใยนำแสงจากจุดที่ทำการกระตุ้นถึงปลายเอาทพุท



F : แรงกระตุ้นลงบนเส้นใยนำแสง

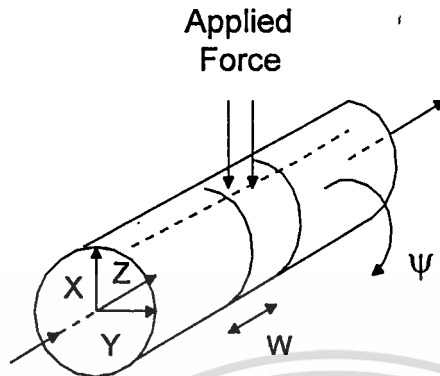
W : ความกว้างของจุดที่ทำการกระตุ้น

f, s, f', s' : แกนที่มีความเร็วมากกว่าและน้อยกว่าตามลำดับ

$\phi$  : เฟสที่เปลี่ยนไประหว่างโหมดทั้งสองของการโพลาไรเซชัน

รูปที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนเฟสระหว่างโหมดทั้งสองของการโพลาไรเซชัน

## 5.2 การตรวจวัดแรง



W : ความกว้างของจุดที่ทำการกระตุ้น

ψ : มุมระหว่างทิศของแรงที่กระทำกับแกนที่มีความเร็วมากกว่าของเส้นใยนำแสง

รูปที่ 5.5 แสดงตำแหน่งตรวจวัดแรงบนเส้นใยนำแสง

เมื่อมีแรงกระตุ้นลงบนเส้นใยนำแสงดังรูปที่ 5.5 โดยแรงที่ทราบค่านั้นได้จากการกำหนดมวลมาตรฐาน สำหรับสัญญาณแสงที่ตรวจวัดได้เมื่อทำการปรับให้ระยะแขนของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ทั้งสองสมดุลซึ่งก็คือแสงจากแหล่งกำเนิดแสงนั่นเอง พบว่าความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้ที่ตัวตรวจวัดอันเกิดจากกระตุ้นด้วยแรงภายนอกสัมพันธ์กับแรงที่กระทำเป็นดังสมการที่ 5.2\* [ 23,29 ]

$$K = G \left[ (\sin 2\psi) \sin \left( \frac{\pi B w}{\lambda} \right) \right]^2 f^2 \quad (5.2)$$

เมื่อ

- K อัตราส่วนการคัปปลิง (coupling ratio)
- G ค่าคงที่
- ψ มุมระหว่างทิศของแรงที่กระทำกับแกนที่มีความเร็วมากกว่าของเส้นใยนำแสง
- B นอร์มอลไลซ์ไบริฟรินเจนซ์ของเส้นใยนำแสง

\* รายละเอียดศึกษาเพิ่มเติมจากภาคผนวก ง. , หน้า ง-1.

- $\lambda$  ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง  
 $w$  ความกว้างของจุดที่ทำการกระตุ้น  
 $f$  แรงต่อหน่วยความกว้าง ( $F / w$ )

จากสมการที่ ( 5.2 ) อัตราการคับปลิงแสงสูงสุดโดยมุมที่แรงกระทำมีค่า

$$\psi = (2n + 1) \pi / 4 \quad (5.3)$$

และความกว้างของจุดคับปลิงคือ

$$w = (2n + 1) L_B / 2 \quad (5.4)$$

เมื่อ  $n$  คือ 0,1,2,...  
 $L_B$  ความยาวบิตส์ของเส้นใยนำแสง

ดังนั้นในการออกแบบระบบตรวจวัดจึงต้องพิจารณามุม  $\psi$  และความกว้าง  $w$  ให้เหมาะสมเพื่อให้อัตราส่วนการคับปลิงสูง โดยถ้าออกแรงยิ่งมาก ความเข้มแสงจะสูงขึ้น

ส่วนค่านอร์มอลไลซ์ไบร์พริ้นเจนท์ของเส้นใยนำแสงนั้นสามารถหาค่าได้ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าความยาวบิตส์ของเส้นใยนำแสงและความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนเข้าไปในเส้นใยนำแสงดังสมการ [ 23,29 ]

$$L_B = \lambda / B \quad (5.5)$$

สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยนำแสงความยาวบิตส์ 2.2 มิลลิเมตร และแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 780 นาโนเมตร ดังนั้นค่านอร์มอลไลซ์ไบร์พริ้นเจนท์ของเส้นใยนำแสง  $B = 3.54 \times 10^{-4}$

### 5.3 การตรวจวัดตำแหน่ง

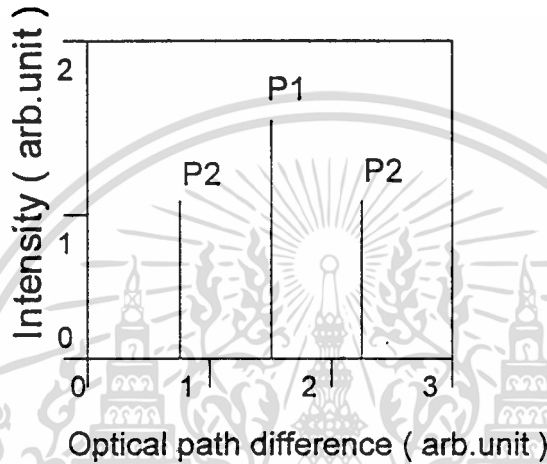
จากคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงดังกล่าวมาแล้ว เมื่อมีการกระตุ้นที่จุดใดจุดบนเส้นใยนำแสงสามารถตรวจวัดปริมาณที่มากกระตุ้นได้แล้วยังพบว่าสามารถบอกตำแหน่งที่จุดกระตุ้นได้อีกด้วย



รูปที่ 5.6 แสดงการตรวจวัดตำแหน่งบนเส้นใยนำแสง

ตำแหน่งของจุดที่กระตุ้นลงบนเส้นใยนำแสงสามารถตรวจวัดได้ โดยให้มีแรงกระทำที่จุด 2 จุดบนเส้นใยนำแสง ดังรูปที่ 5.6 เส้นใยเช่นเดียวกับการตรวจวัดด้วยแรง โดยกรณีนี้จุดหนึ่งเป็นจุดที่ต้องการทราบตำแหน่ง ส่วนอีกจุดหนึ่งเป็นจุดอ้างอิง สัญญาณที่ตรวจวัดได้ที่ตัวตรวจวัดหลังจากการผ่านชุดอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสันจะให้สัญญาณที่มีค่าความเข้มแสงสูงสุดสองค่า (อันเนื่องมาจากการกระตุ้นสองจุด) อ่านค่าบนจอออกสซิโลสโคป โดยค่าหนึ่งวัดได้ขณะเมื่อระยะแขนของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ทั้งสองเท่ากัน ส่วนอีกค่าหนึ่งวัดได้เมื่อทำการปรับความยาวแขนข้างหนึ่งของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์โดยการเลื่อนปรับระยะของกระจก  $M_2$  กระจก  $M_2$  จะถูกเลื่อนเข้าและออกจากตำแหน่งสมดุล (ดังรายละเอียดในบทที่ 4) ระยะห่างระหว่างสัญญาณที่มีค่าความเข้มแสงสูงสุดสองตำแหน่งนั้นได้จากการอ่าน

ค่าที่สเกลของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่างระยะความต่างของเส้นทางเดินแสงหรือ OPD ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของระยะ OPD กับความเข้มแสงสูงสุด ที่ตำแหน่งกลางคือตำแหน่งที่แขนของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์สมดุล ( $P_1$ ) ส่วนตำแหน่งทางซ้ายและขวาเกิดจากเมื่อปรับแขนของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ทั้งสองเข้าหรือออกจากตำแหน่งสมดุล ( $P_2$  และ  $P_2$ ) ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แสดงระยะ OPD เปรียบเทียบที่ตำแหน่งกลางและตำแหน่งซ้าย-ขวา

กำหนดให้  $L_r$  และ  $L_i$  เป็นความยาวของเส้นใยนำแสงจากปลายของเส้นใยนำแสงด้านหนึ่งถึงตำแหน่งที่อ้างอิงและตำแหน่งที่ต้องการทราบตามลำดับ โดยความต่างระหว่างระยะทั้งสองดังกล่าวสัมพันธ์กับค่า OPD กำหนดได้ดังสมการ [ 23,29 ]

$$OPD = B (L_r - L_i) \quad (5.6)$$

ดังนั้นจากการทดลองเมื่อพิจารณาค่า OPD จากอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์จะสามารถบอกตำแหน่งที่กระตุ้นลงบนเส้นใยนำแสงได้ เนื่องจากระยะ  $L_r$  เป็นระยะอ้างอิงที่กำหนดขึ้นก็จะสามารถหาตำแหน่งที่คับปลิงหรือตำแหน่งของ  $L_i$  ได้

อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดว่าระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างจุดที่กระตุ้น 2 จุดนั้นมีค่าหนึ่งหาได้จากอัตราส่วนของความยาวโคฮีเรนซ์ของแหล่งกำเนิดแสงกับค่าอนุกรมออลไลซ์ไบร์พริ้นเจนซ์ของเส้นใยนำแสงนั้น ดังสมการที่ 5.7 [ 23,29 ] ซึ่งถ้าหากระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการกระตุ้น 2 จุดนั้นน้อยกว่านี้จะไม่สามารถอ่านค่า OPD ได้

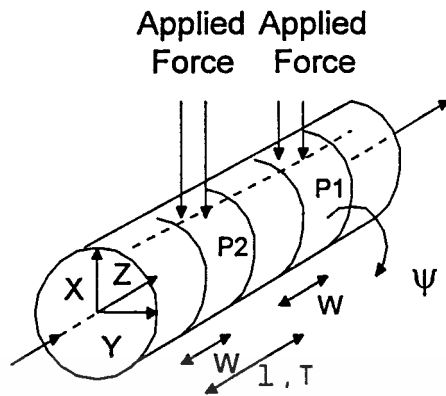
$$(L_r - L_i)_{\min} = L_c / B \quad (5.7)$$

เมื่อ  $L_c$  คือความยาวโคฮีเรนซ์ของแหล่งกำเนิดแสง

#### 5.4 การตรวจวัดอุณหภูมิ

การตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสงนั้นพบว่าหากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในขณะที่ทำการตรวจวัดจะมีผลต่อค่าของการตรวจวัดด้วย ดังนั้นในขณะที่ทำการตรวจวัดจึงต้องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ตลอดจนบันทึกค่าอุณหภูมิขณะทำการทดลองไว้

ความไวของอุณหภูมิสำหรับเส้นใยนำแสงแต่ละชนิดสังเกตได้จากการใช้วิธีการตรวจวัดตำแหน่งดังรูปที่ 5.8 กล่าวคือถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบริเวณเส้นใยนำแสงพบว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระยะ OPD เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งที่ทำการคัปปลิงคิงที่จากสมการที่ 5.6 ดังนั้นคุณสมบัติดังกล่าวนี้จึงสามารถใช้เส้นใยนำแสงมาทำเป็นเครื่องตรวจวัดอุณหภูมิได้



- P1, P2 : ตำแหน่งของจุดที่ทำการกระตุ้น  
 W : ความกว้างของจุดที่ทำการกระตุ้น  
 l : ความยาวของเส้นใยนำแสงบริเวณที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง  
 T : อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น  
 $\psi$  : มุมระหว่างทิศของแรงที่กระทำกับแกน  
 ที่มีความเร็วมากกว่าของเส้นใยนำแสง

รูปที่ 5.8 แสดงตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอธิบายจากหลักการที่ว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง  $\Delta\phi$  ระหว่างโหมดทั้งสองของการไหลาไรที่ดังจากกันที่แผ่เข้าไปในเส้นใยนำแสงจากสมการที่ 5.1 เป็นไปตามสมการ [ 24,29 ]

$$d(\Delta\phi) / dT = (2\pi / \lambda) [\Delta n (dl / dT) + l (d\Delta n / dT)] \quad (5.8)$$

เมื่อ  $l$  คือความยาวของเส้นใยนำแสงบริเวณที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง  
 $dT$  คือช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

จากสมการ 5.8 พบว่าเฟสที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำให้ความยาว ( $\Delta l$ ) ของเส้นใยนำแสงบริเวณดังกล่าวเปลี่ยนแปลงโดยเกิดการขยายออกหรือหดตัว นอกจากนั้นผลต่างของดัชนีหักเห ( $\Delta n$ ) ก็เปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระยะ OPD ย่อมมีการเปลี่ยนแปลงขณะเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

## 5.5 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการใช้เส้นใยนำแสงมาทำเป็นเครื่องตรวจวัดแรง ตำแหน่ง และอุณหภูมิ ซึ่งสรุปได้ว่าการตรวจวัดแรงนั้นการเปลี่ยนแปลงของแรงที่กระตุ้นบนเส้นใยนำแสงสัมพันธ์กับความเข้มแสงเอาทพุท ส่วนการตรวจวัดตำแหน่งนั้นการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างของตำแหน่งของตัวกระตุ้นทั้งสองจุดบนเส้นใยนำแสงมีความสัมพันธ์กับระยะความต่างของเส้นทางเดินของแสง สำหรับการตรวจวัดอุณหภูมินั้นการเปลี่ยนแปลงของระยะความต่างของเส้นทางเดินของแสงมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อกำหนดให้ระยะห่างของตำแหน่งของตัวกระตุ้นคงที่

นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินการก่อนการทดลอง ตลอดจนสาเหตุที่เลือกใช้อุปกรณ์แต่ละชนิด เช่น เลือกใช้เส้นใยนำแสงชนิดอนุรักษ์สภาวะทางโพลาไรเซชัน การเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวโคฮีเรนซ์สั้นเป็นต้น และการออกแบบระบบตรวจวัดเพื่อให้สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแสงเมื่อมีการกระตุ้นใดๆ ได้อย่างชัดเจน

## บทที่ 6

### ผลการทดลอง

ในบทนี้ได้แสดงรูปขั้นตอนการทดลอง ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ ตลอดจนทำการอภิปรายผลการทดลองและสรุป

#### 6.1 ผลการทดลองการตรวจวัดแรง

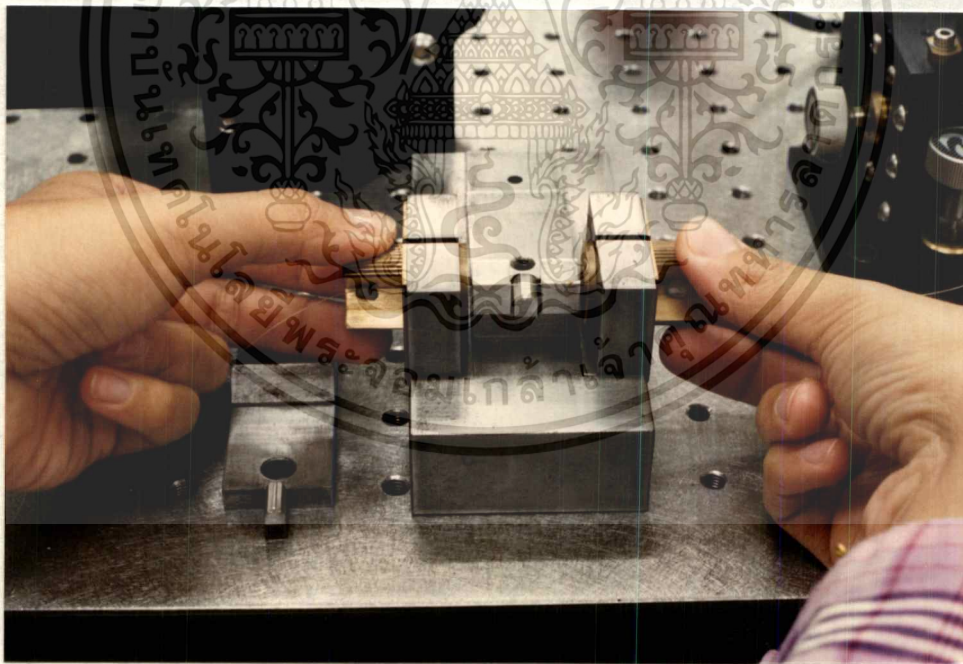
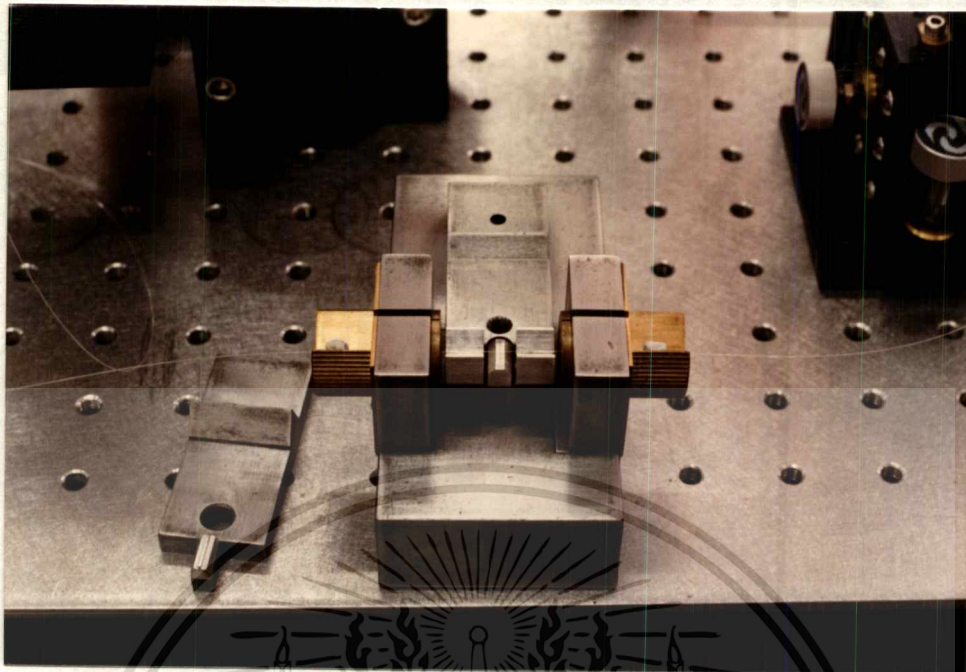
##### ผลการทดลอง

ในการทดลองต้องการให้ความเข้มของแสงที่วัดได้มีค่ามากที่สุด โดยทำการปรับให้มุมที่แรงกดกระทำกับแกนที่มีความเร็วกว่าของเส้นใยนำแสงเป็นมุม  $\psi = 45^\circ, 135^\circ, \dots$  (การปรับใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงที่ออกแบบขึ้น\* ปรับจนกระทั่งได้ความเข้มแสงมากที่สุด) ดังรูปที่ 6.1 ( ก - ค ) ส่วนความกว้างของจุดที่กุดนั้นออกแบบให้มีขนาดความกว้างดังสมการที่ 5.4 และจากสมการที่ 5.2 พบว่าความเข้มแสงที่วัดได้อันเกิดจากการกระตุ้นด้วยแรงภายนอกสัมพันธ์กับแรงที่กระทำเมื่อพิจารณาให้เทอมอื่นๆ คงที่

ผลการทดลองดังตารางที่ 6.1 แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงเปรียบเทียบกับแรงที่กระทำ โดยข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลเฉลี่ยจากการทดลองเมื่อใช้เส้นใยนำแสงไฮ-ไบร์ชนิดโบริว-ไท เป็นตัวตรวจวัด ปรับมุมให้ความเข้มแสงที่วัดได้มีค่าสูงสุด ( $45^\circ$ ) และออกแบบให้ขนาดความกว้างของจุดที่กดลงบนเส้นใยนำแสงมีค่าเป็น 1.1 มิลลิเมตร โดยวางมวลขนาด 100.0085, 200.0216, 300.0301, 400.0549 และ 523.5665 กรัม\*\* ตามลำดับดังรูปที่ 5.6 ( ง - จ ) เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์เป็นดังรูป 6.2

\* รายละเอียดศึกษาเพิ่มเติมจากภาคผนวก ข., หน้า ข-1.

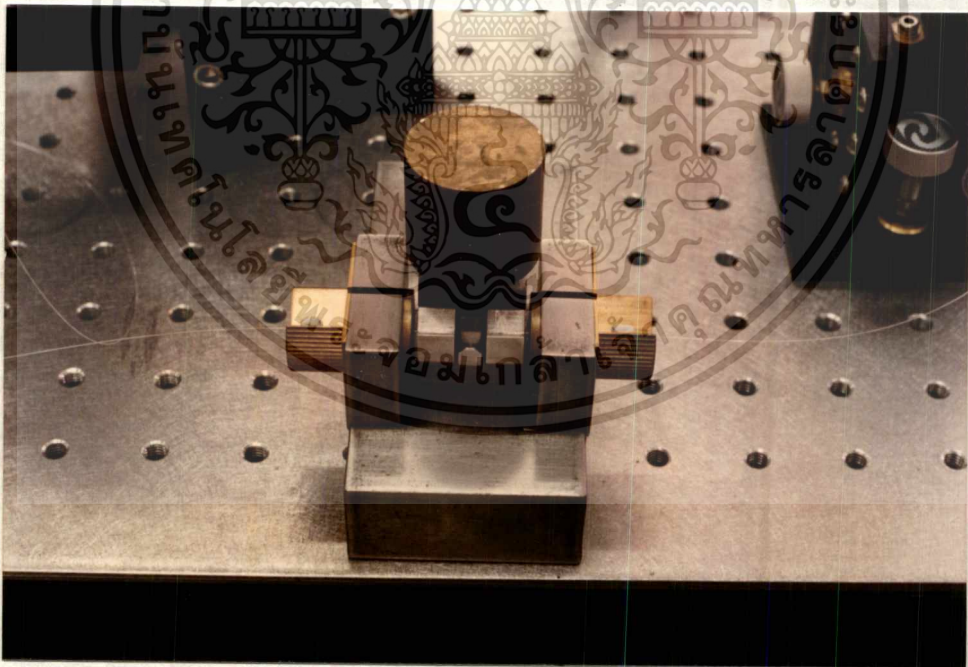
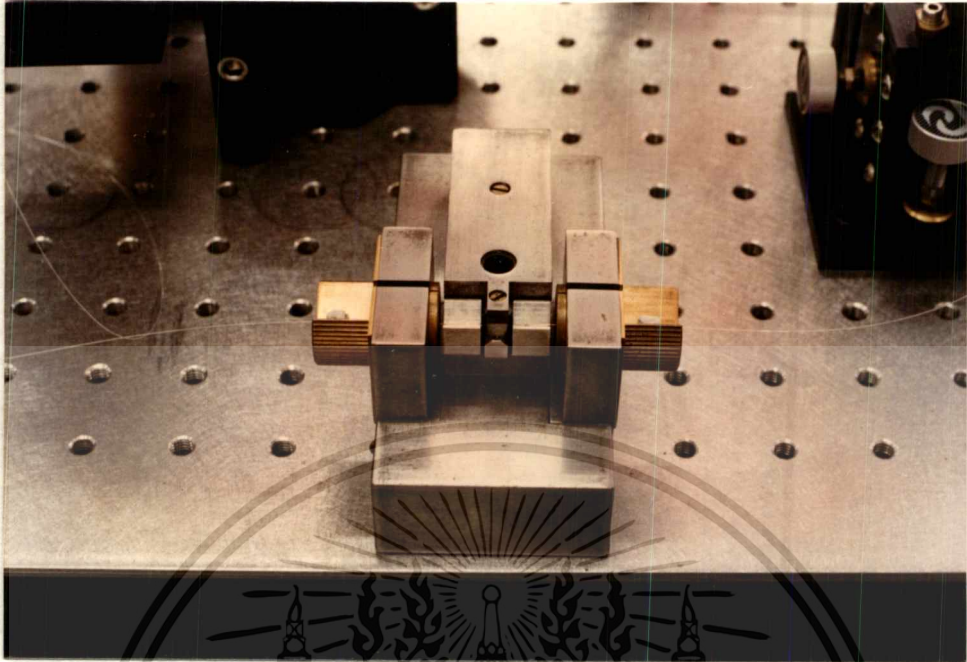
\*\* รายละเอียดศึกษาเพิ่มเติมจากภาคผนวก จ., หน้า จ-1.



( ก )

รูปที่ 6.1 แสดงขั้นตอนการตรวจวัดแรง

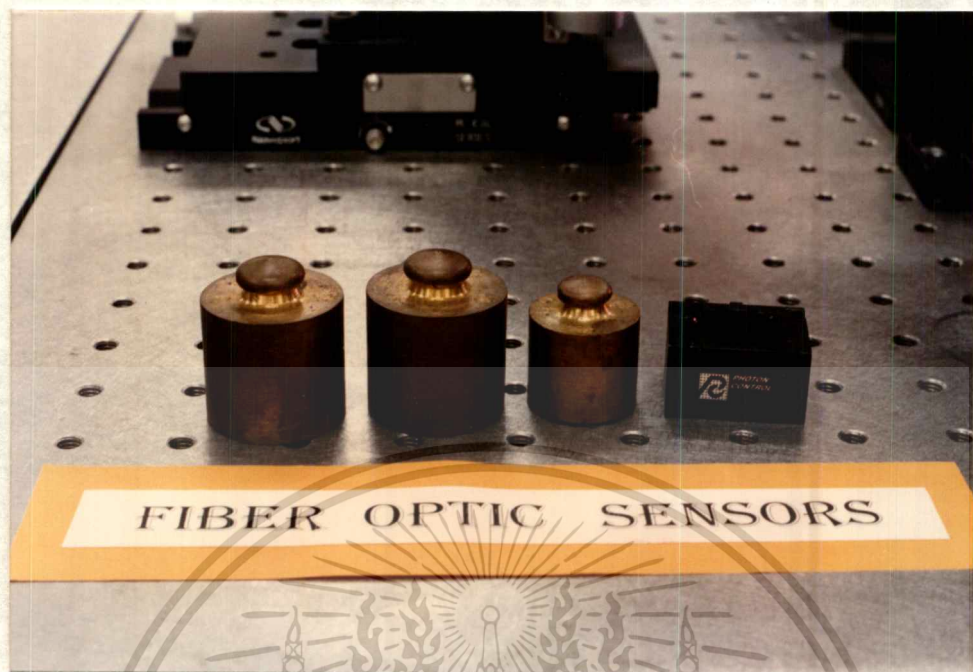
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ 6.1 แสดงขั้นตอนการตรวจวัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)  
รูปที่ 6.1 แสดงขั้นตอนการตรวจวัดแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 6.1

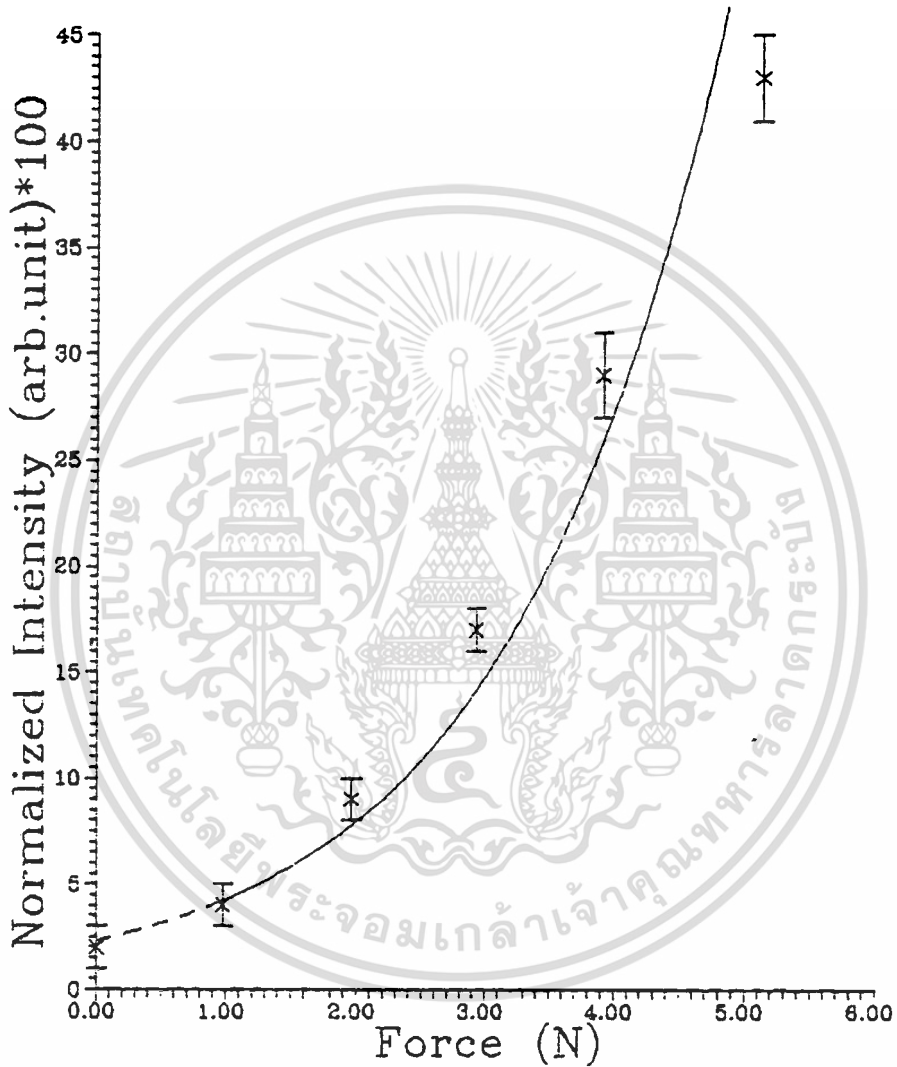
แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ของความเข้มแสงเปรียบเทียบกับแรงที่กระทำที่อุณหภูมิ 25°C

แรง ( นิวตัน )	ความเข้มแสงเปรียบเทียบ
0.978	0.04 ( $\pm 0.01$ )*
1.96	0.09 ( $\pm 0.01$ )
2.93	0.17 ( $\pm 0.01$ )
3.91	0.29 ( $\pm 0.02$ )
5.12	0.43 ( $\pm 0.02$ )

ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( g ) มีค่า 9.7829722 เมตร/วินาที<sup>2</sup> ( ข้อมูลจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ ) แต่สำหรับในการคำนวณใช้ 9.78 เมตร/วินาที<sup>2</sup>

\* ค่าความไม่แน่นอนของการวัด (uncertainty) ศึกษาจากรายละเอียดในภาคผนวก จ., หน้า จ-2.

ERROR BARS SPECIFIED BY +/- VALUE



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มแสงเปรียบเทียบกับแรงที่กระทำ ที่อุณหภูมิ 25°C

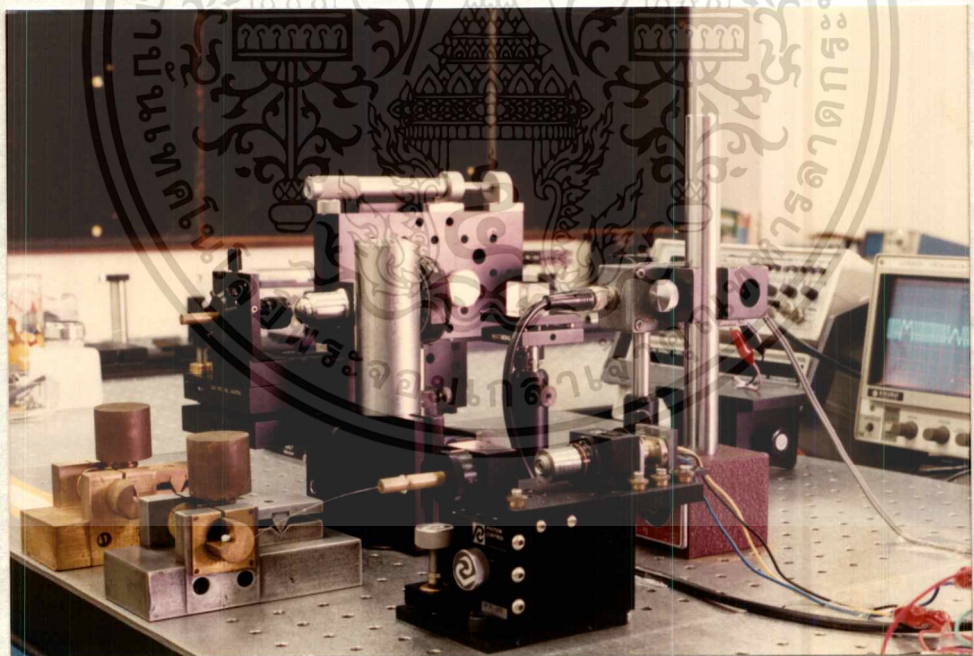
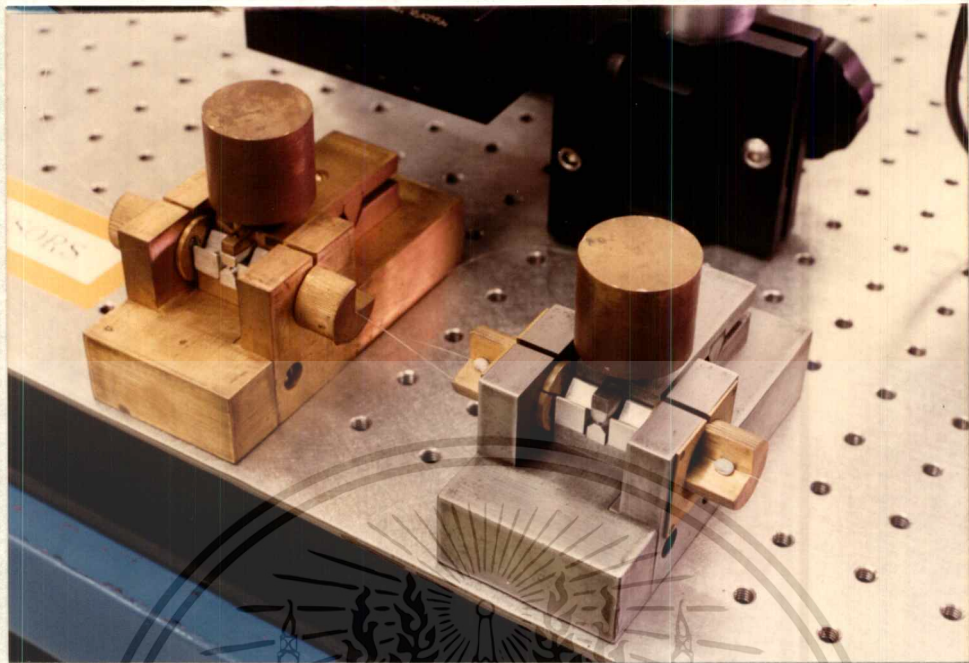
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ผลการทดลองการตรวจวัดตำแหน่ง

### ผลการทดลอง

รูปที่ 6.3 แสดงวิธีการทดลองตรวจวัดตำแหน่ง ส่วนรูปที่ 6.4 แสดงค่าความเข้มแสงสูงสุดที่อ่านค่าบนจอออสซิลอโคปเมื่อทำการปรับเลื่อนระยะกระจก  $M_2$  เข้าหรือออกจากตำแหน่งสมดุล แล้วนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงระยะ OPD เมื่อทำการปรับเลื่อนกระจก  $M_2$  ซึ่งสังเกตจากระยะห่างระหว่างจุดที่ความเข้มแสงสูงสุดสองตำแหน่งดังรูปที่ 6.5 โดยในการทดลองจุดที่กระดุนั้นให้แรงคงที่ประมาณ 2 นิวตัน อ่านค่า OPD ได้ 0.325 มิลลิเมตร เมื่อระยะห่างระหว่างจุดที่กระดุนสองจุด 100.00 ( $\pm 1.00$ ) เซนติเมตร

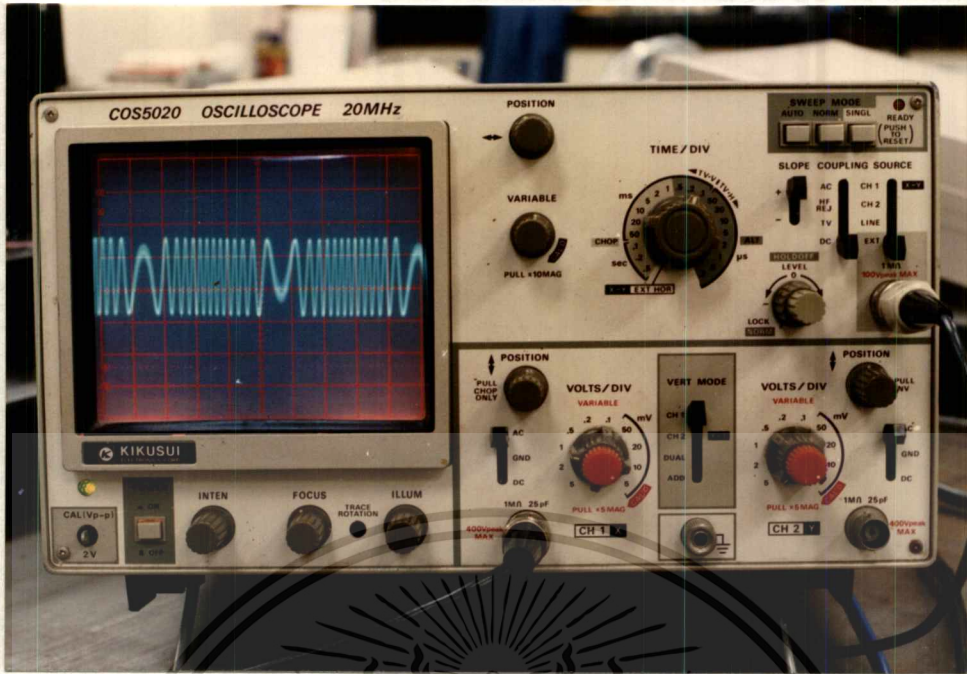




( ๓ )

รูปที่ 6.3 แสดงวิธีการตรวจวัดตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



( ก ) สัญญาณความเข้มแสงสูงสุดเมื่ออินเทอร์เฟียโรมิเตอร์สมดุ

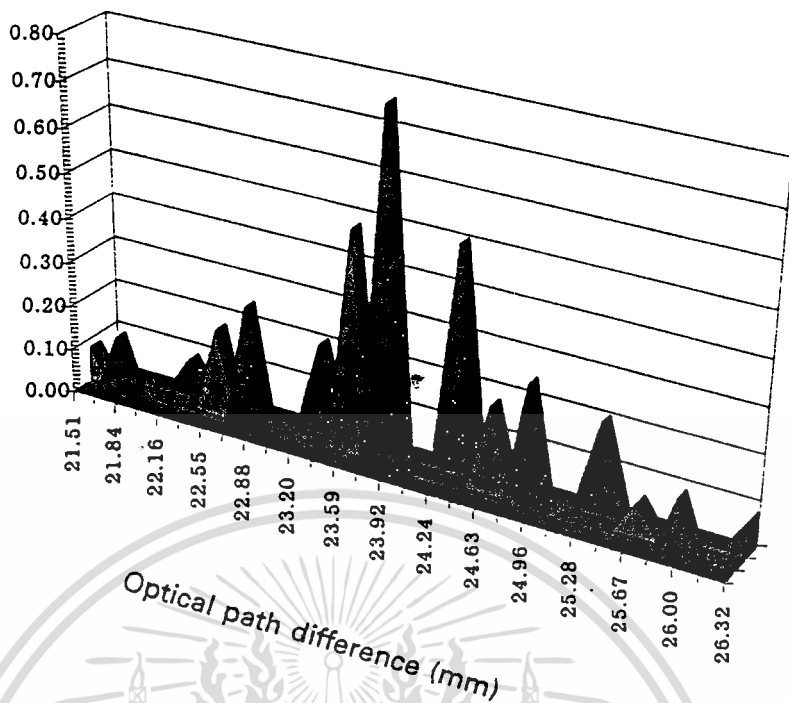


( ข ) สัญญาณความเข้มแสงสูงสุดตำแหน่งที่สอง (เนื่องจากการกระตุ้นอีกจุดหนึ่ง)

รูปที่ 6.4 แสดงสัญญาณความเข้มแสงสูงสุดที่อ่านค่าบนจอออสซิลโคป  
เมื่อทำการปรับเลื่อนระยะกระจก  $M_2$  เข้าหรือออกจากตำแหน่งสมดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Intensity ( arb.unit )



รูปที่ 6.5 แสดงระยะ OPD เมื่อทำการปรับเลื่อนระยะกระจก  $M_2$  ของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์เข้าหรือออกจากตำแหน่งสมดุล ที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  จะได้ผลมีลักษณะสมมาตรทั้งซ้ายและขวา (โดยเป็นข้อมูลจากผลการทดลอง)

จากผลการทดลองวัดค่าความยาวโคฮีเรนซ์ของแหล่งกำเนิดแสงได้ 0.16 มิลลิเมตร หรือ 160 ไมครอน\* ซึ่งพบว่าข้อจำกัดของระยะระหว่างจุดที่กระตุ้นสองจุด ต้องไม่น้อยกว่า 45.71 เซนติเมตร จากสมการที่ 5.7 จึงจะเห็นระยะ OPD ชัดเจน ถ้าระยะต่างกันน้อยกว่านี้ ความเข้มแสงที่มีค่าสูงสุดสองตำแหน่งจะเหลื่อมซ้อนกันจนแยกความแตกต่างไม่ได้

เมื่อปรับเพิ่มระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการกระตุ้น  $L_r - L_l$  ให้เพิ่มขึ้นพบว่าระยะ OPD มีการเปลี่ยนแปลงโดยข้อมูลจากการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.2 และเมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่างระยะ OPD และระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการกระตุ้น ดังรูปที่ 6.6 พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงโดยความชันของกราฟคือค่าอนุกรมลอรีนซ์ไบร์ฟรินเจนซ์ จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.6 ดังกล่าวข้างต้น

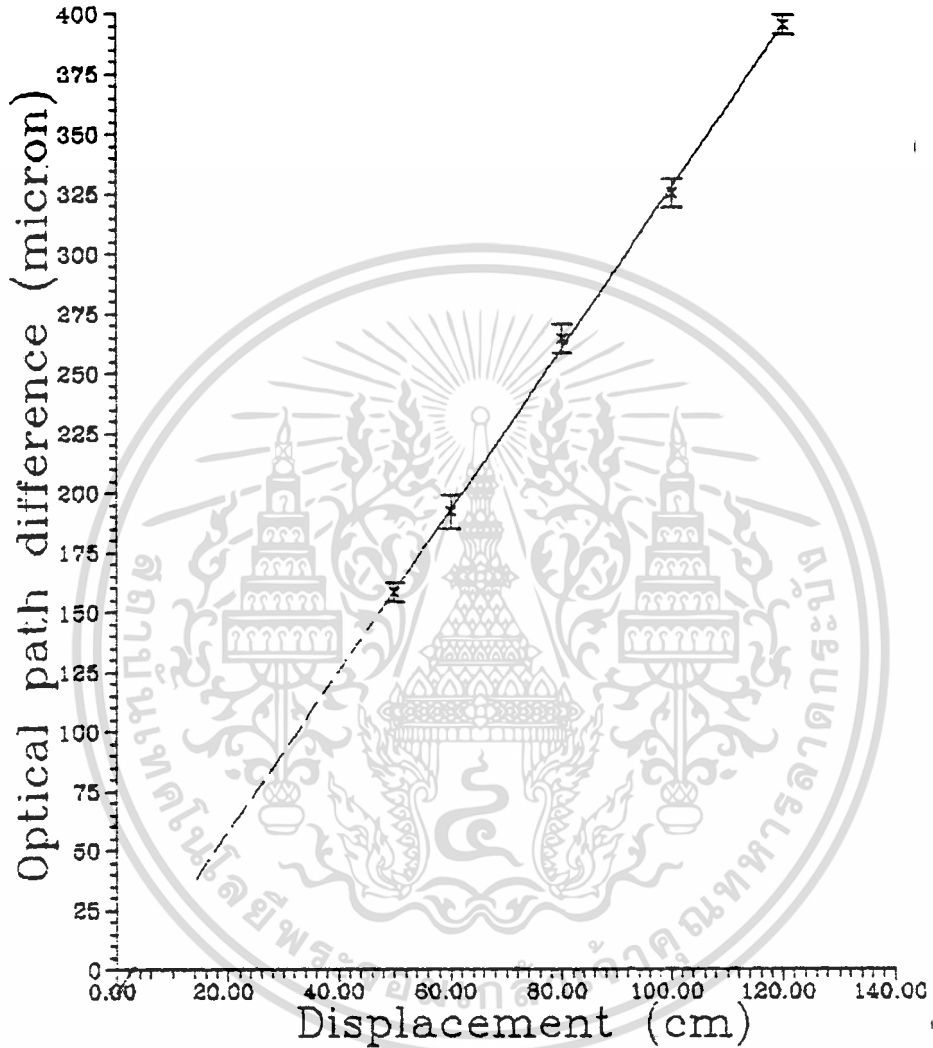
\* รายละเอียดศึกษาเพิ่มเติมจากภาคผนวก ค., หน้า ค-2.

ตารางที่ 6.2

แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนระยะ OPD ของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์  
แบบไมเคลสันและระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการกระตุ้น ที่อุณหภูมิ 25°C

$L_r - L_i$ (เซนติเมตร) ( $\pm 1.00$ )	OPD ( มิลลิเมตร )
50.00	0.158 ( $\pm 0.004$ )
60.00	0.192 ( $\pm 0.007$ )
80.00	0.264 ( $\pm 0.006$ )
100.00	0.325 ( $\pm 0.006$ )
120.00	0.395 ( $\pm 0.004$ )

ERROR BARS SPECIFIED BY +/- VALUE



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนระยะ OPD ของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบ ไมเคลสันและระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการกระตุ้น ที่อุณหภูมิ 25°C

พิจารณาจากกราฟสมการเส้นตรง  $Y$  (mm) =  $3.35 \times 10^{-4} X$  (cm) -  $7.7 \times 10^{-3}$  (mm)

โดยความชันของกราฟคือค่าอนุกรมोलไลซ์ไบร์พริเนเจนซ์  $B = 3.35 \times 10^{-4}$  เปรียบเทียบกับค่าอนุกรมोलไลซ์ไบร์พริเนเจนซ์จากสมการที่ 5.5 คือ  $B = 3.54 \times 10^{-4}$  มีค่าใกล้เคียงกัน

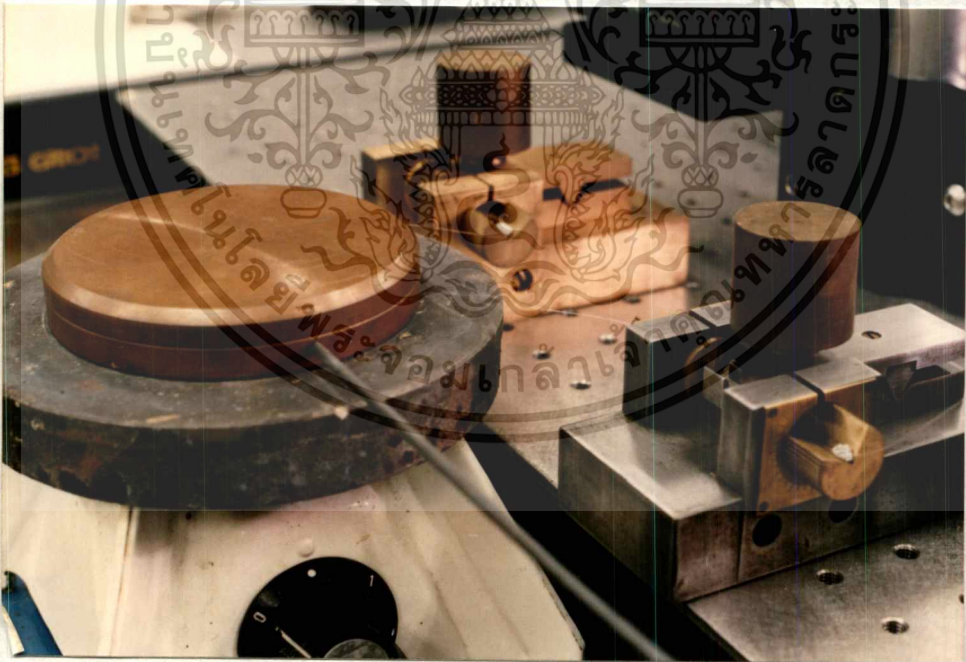
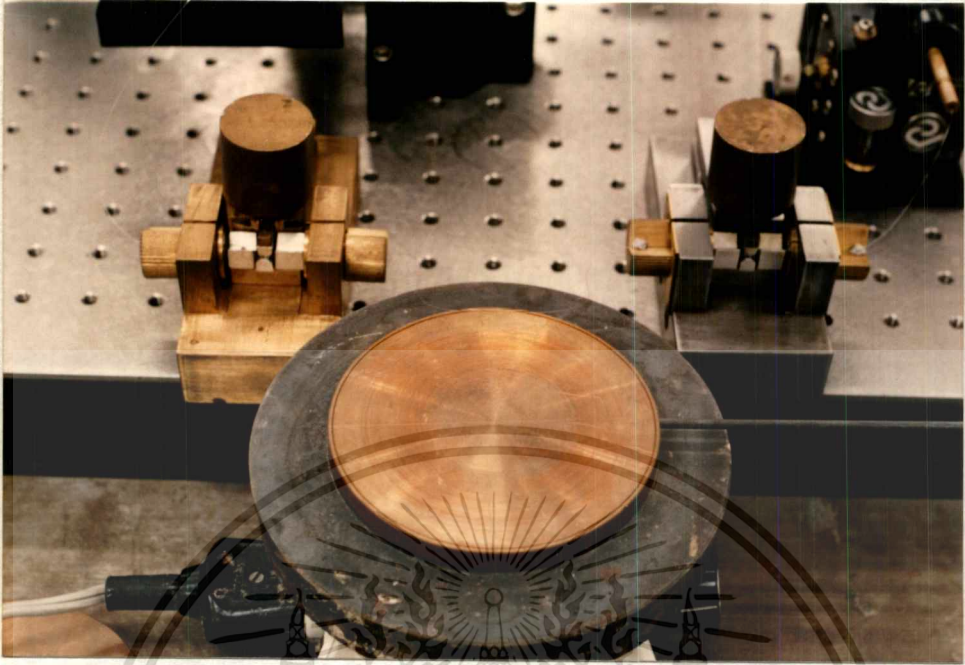
ดังนั้นในระบบตรวจวัดตำแหน่ง เมื่อหาระยะ OPD จากการทดลอง และทราบค่าอนุกรมोलไลซ์ไบร์พริเนเจนซ์จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.5 แล้วจะสามารถหาระยะ  $L_r - L_i$  ได้ โดยเมื่อระยะ  $L_r$  เป็นระยะอ้างอิงที่กำหนดขึ้นก็จะสามารถบอกตำแหน่งที่ทำกาการกระตุ้นหรือ  $L_i$  ได้

### 6.3 ผลการทดลองการตรวจวัดอุณหภูมิ

#### ผลการทดลอง

รูปที่ 6.7 แสดงขั้นตอนการตรวจวัดอุณหภูมิ โดยนำเส้นใยนำแสงช่วงระหว่างจุดที่ทำกาการคับปลิงคองที่สองตำแหน่งฝังในโลหะทองแดงแผ่นกลมที่เจาะร่องเล็กๆตามแนวรัศมีขนาดเท่ากับ ความหนาของเส้นใยนำแสง\* และทำการให้ความร้อนโดยถูกออกแบบเพื่อให้เส้นใยนำแสงได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิโดยเจาะรูด้านข้างของแผ่นทองแดงเพื่อวัดอุณหภูมิภายในเนื้อทองแดงที่ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งของเส้นใยนำแสงที่ฝังอยู่ สำหรับข้อมูลในตารางที่ 6.3 แสดงผลการทดลองโดยระยะ OPD มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปซึ่งทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิห้องประมาณ  $25^{\circ}\text{C}$  ถึงอุณหภูมิประมาณ  $120^{\circ}\text{C}$  โดยระยะห่างระหว่างจุดที่กระตุ้นสองจุดคองที่  $55.00 (\pm 1.00)$  เซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้องอ่านค่าระยะ OPD ได้  $0.165 (\pm 0.009)$  มิลลิเมตร แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะ OPD ที่เปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังรูปที่ 6.8

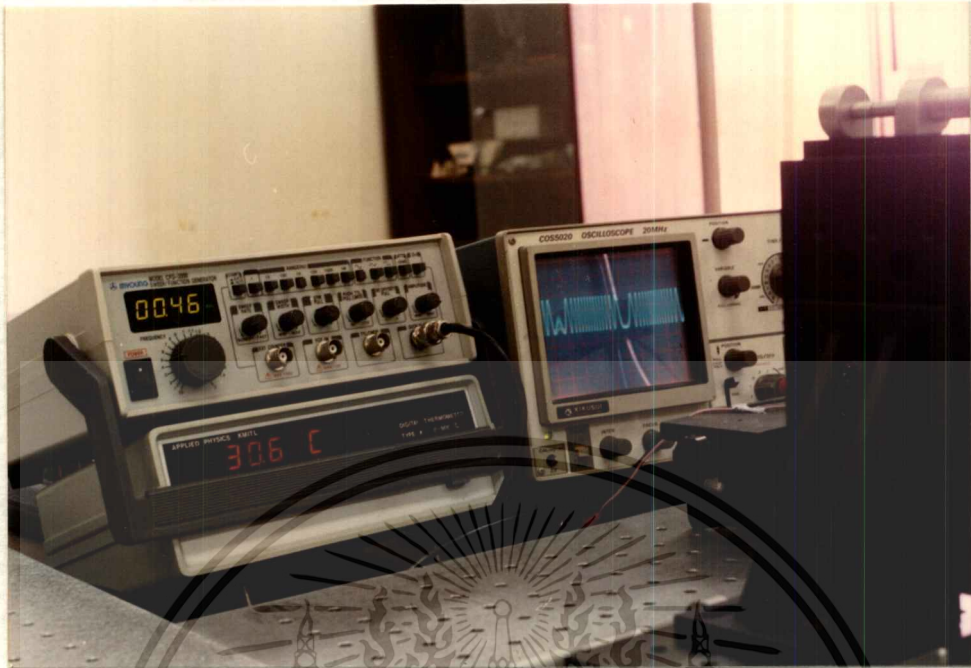
\* รายละเอียดศึกษาเพิ่มเติมจากภาคผนวก ข., หน้า ข-3.



( ข )

รูปที่ 6.7 แสดงขั้นตอนการตรวจวัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 6.7 แสดงขั้นตอนการตรวจวัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

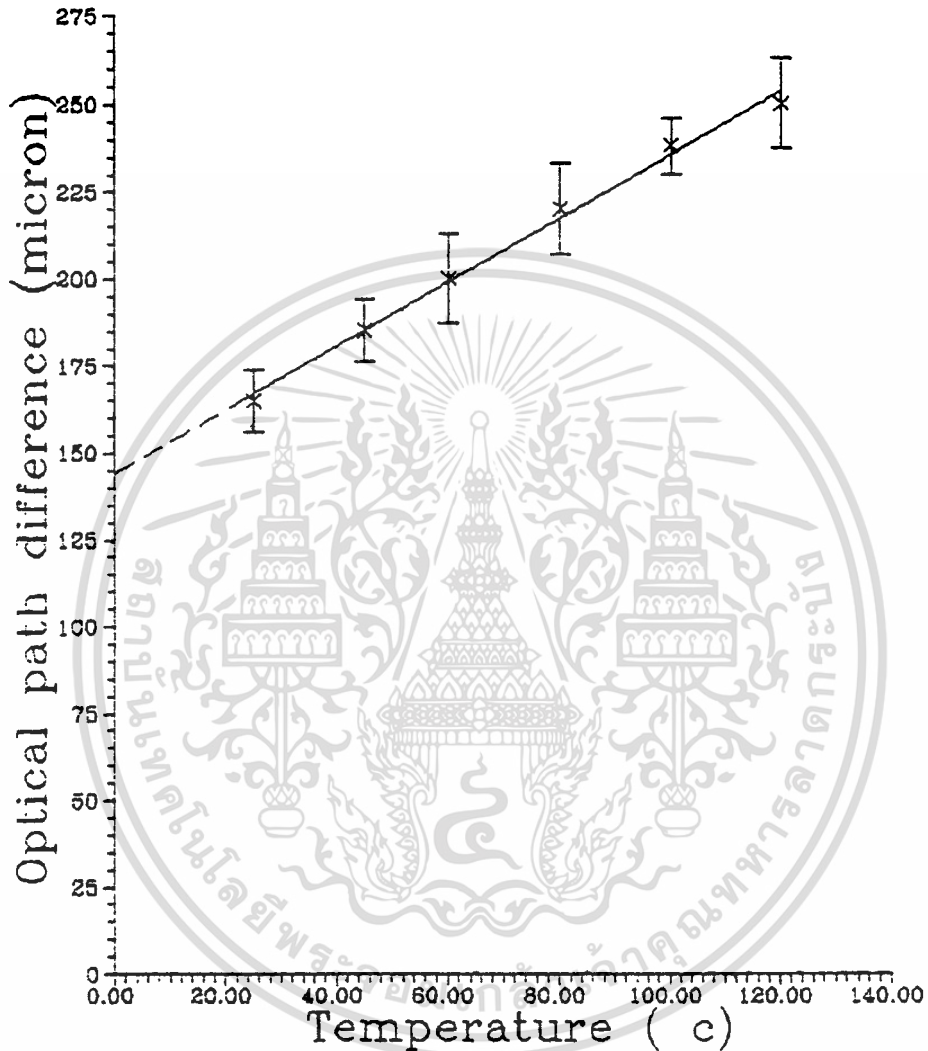
## ตารางที่ 6.3

แสดงข้อมูลระยะ OPD ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) ( $\pm 2.00$ )	OPD ( มิลลิเมตร )
25.00	0.165 ( $\pm 0.009$ )
45.00	0.185 ( $\pm 0.009$ )
60.00	0.200 ( $\pm 0.013$ )
80.00	0.220 ( $\pm 0.013$ )
100.00	0.238 ( $\pm 0.008$ )
120.00	0.250 ( $\pm 0.013$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ERROR BARS SPECIFIED BY +/- VALUE



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะ OPD ที่เปลี่ยนแปลง  
กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.4 อภิปรายผลการทดลองและสรุป

ในบทนี้ได้แสดงขั้นตอนวิธีการตรวจวัด บันทึกข้อมูลผลการทดลอง และแปลความหมายของข้อมูลให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของกราฟ

สำหรับการตรวจวัดแรงนั้นทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงกระตุ้นบนเส้นใยนำแสงที่สัมพันธ์กับความเข้มแสงเอาท์พุทโดยใช้ขนาดของแรงตั้งแต่ 0-5 นิวตัน พบว่ากราฟของความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงกับแรงเป็นเส้นโค้งพาราโบลา ส่วนการตรวจวัดตำแหน่งนั้นการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของตำแหน่งของตัวกระตุ้นบนเส้นใยนำแสงซึ่งสัมพันธ์กับความต่างของเส้นทางเดินของแสงระหว่างตัวกระตุ้น โดยตำแหน่งดังกล่าวนั้นอยู่ในช่วง 50-120 เซนติเมตร ซึ่งกราฟของความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น สำหรับการตรวจวัดอุณหภูมินั้นการเปลี่ยนแปลงของระยะความต่างของเส้นทางเดินของแสงสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25-120 องศาเซลเซียสเมื่อกำหนดให้ตำแหน่งคงที่ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นระยะความต่างของเส้นทางเดินของแสงจะเพิ่มขึ้นด้วยโดยมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของกราฟเมื่อใช้เส้นใยนำแสงทำเป็นเครื่องตรวจวัดปริมาณทั้ง 3 ชนิดนั้นอาจสรุปได้ว่า เครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสงสำหรับในงานวิจัยชุดนี้มีความเหมาะสมกับการตรวจวัดตำแหน่งดีที่สุดใน มีความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเชิงเส้น และผลของการวัดที่ได้ (measured value) พิจารณาจากความชันของกราฟเป็น  $3.35 \times 10^{-4}$  ซึ่งก็คือค่านอร์มอลไลซ์ไบร์พรินเจนซ์ (เนื่องจากเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับสิ่งที่ต้องการตรวจวัด) เปรียบเทียบกับค่านอร์มอลไลซ์ไบร์พรินเจนซ์ของเส้นใยนำแสงที่ทราบค่า (true value) เท่ากับ  $3.54 \times 10^{-4}$  ดังนั้นจึงหาค่าความผิดพลาด (relative error) [ 13 ] ได้เป็น  $(0.19 \times 10^{-4} / 3.54 \times 10^{-4}) \times 100\% = 5.4\%$  ส่วนการตรวจวัดอุณหภูมินั้นมีความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นเช่นกัน แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระยะความต่างของเส้นทางเดินของแสงเพียงเล็กน้อยในขณะที่มีช่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกว้าง มีความไวของการตอบสนองและค่าความสามารถในการจำแนกเพียง 10 ไมครอน ต่อ 12 ( $\pm 4$ ) องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากสเกลของเครื่องมือวัดที่ใช้มีความละเอียดอยู่ในระดับไมครอน สำหรับการตรวจวัดแรงนั้นพบว่ามีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเอาท์พุทสัมพันธ์กับแรงกระตุ้นยกกำลังสอง

สำหรับการเปลี่ยนแปลงแบบย้อนกลับครบรอบ (hysteresis) ของการตรวจวัดทั้ง 3 กรณี นั้น จะให้ผลเช่นเดิมยกเว้นการตรวจวัดอุณหภูมิ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเส้นใยนำแสงจะมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิมในช่วงระยะเวลาหนึ่ง [ 5 ]

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆ ดังกล่าวย่อมเป็นการชี้ให้เห็นว่าเครื่องตรวจวัด โดยใช้เส้นใยนำแสงนี้มีแนวโน้มที่สามารถพัฒนาเป็นเครื่องมือตรวจวัดที่สมบูรณ์ได้



## บทที่ 7

# บทสรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

### 7.1 บทสรุป

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการสร้างเครื่องตรวจวัดต่างๆ ขึ้นมากมายเพื่อตอบสนองกับความต้องการทางด้านอุตสาหกรรมที่ต้องอาศัยขั้นตอนการตรวจวัด และควบคุมปริมาณที่มีประสิทธิภาพสูง และมีความเหมาะสมกับงานวัดเฉพาะด้าน ในยุคที่เทคโนโลยีเส้นใยนำแสงเข้ามามีบทบาทมากขึ้นนี้จึงได้มีการวิจัยเพื่อนำเส้นใยนำแสงมาใช้ประโยชน์ในงานด้านการตรวจวัดสำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอถึงรายละเอียดในการศึกษาและออกแบบเครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสง จากข้อได้เปรียบต่างๆมากมายของเส้นใยนำแสงเช่น มีน้ำหนักเบา ขนาดเล็ก และสามารถทำเป็นโพรบ (probe) ตรวจวัดในบริเวณแคบๆได้ อีกทั้งยังสามารถเคลื่อนที่ไปในบริเวณต่างๆได้ง่าย เหมาะที่จะใช้ในงานตรวจวัดระยะไกล และในงานที่เสี่ยงต่ออันตรายในการตรวจวัด

การออกแบบเครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสงที่ทำการวิจัยนี้ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังต่อไปนี้คือ

- แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอด
- ส่วนของการตรวจวัดซึ่งใช้เส้นใยนำแสงชนิดอนุรักษ์สภาวะทางโพลาไรเซชัน และชิ้นส่วนที่ออกแบบขึ้นสำหรับออกแรงกด และส่วนระบบสำหรับควบคุมอุณหภูมิ
- ส่วนประมวลสัญญาณแสงโดยใช้อินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสันเพื่อตรวจวัดผลของการแทรกสอดของแสง และตัวรับสัญญาณแสงโฟโตไดโอดเพื่อตรวจรับสัญญาณแสงและแปลค่าสัญญาณ โดยสัญญาณที่ตรวจวัดมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณที่มากกระตุ้น เช่น แรง ตำแหน่ง และอุณหภูมิ

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่จะทำให้การตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสงประสบความสำเร็จได้คือ

- ( 1 ) การเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสง ชนิดของเส้นใยนำแสง และตัวรับสัญญาณแสงต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน

( 2 ) การเลือกใช้ทัศนอุปกรณ์ให้เหมาะสม ตลอดจนการจัดเรียง ชุดอุปกรณ์ทางแสง ต่างๆ เพื่อให้การลนซ์แสงเข้าไปในเส้นใยนำแสงได้อย่างสมบูรณ์ และให้แสงเอาท์พุทจากเส้นใย นำแสงมีการสูญเสียน้อยที่สุด

( 3 ) การออกแบบชิ้นส่วนสำหรับให้แรงกดลงบนตำแหน่งที่ต้องการ และอุณหภูมิ กระตุ้นลงบนเส้นใยนำแสงต้องสามารถควบคุมได้เพื่อให้ความเข้มแสงหลังผ่านการตรวจวัดมีค่า มากที่สุด เพื่อสะดวกต่อการแปลความหมายของข้อมูลต่อไป

( 4 ) การประมวลสัญญาณแสงซึ่งแปลงจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้านั้น โดยการอ่านค่าจากจอออกสซิลโคปแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ อ่านค่าความหมายจาก กราฟเปรียบเทียบกับปริมาณที่ทำการกระตุ้น หรืออ่านค่าจากสเกลไมโครมิเตอร์ ปัจจัยที่สำคัญ สำหรับขั้นตอนนี้จึงขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงทั้งของเครื่องมือตลอดจนผู้ทำการทดลองเอง ซึ่งควร พิจารณาเทอมของความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นด้วย

จากการพิจารณาข้อมูลผลการทดลองเมื่อใช้เส้นใยนำแสงทำเป็นเครื่องตรวจวัดแรง ตำแหน่ง และอุณหภูมิ สรุปได้ว่าเครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสงสำหรับในงานวิจัยชุดนี้มีความ เหมาะสมกับการตรวจวัดตำแหน่งดีที่สุดใน เนื่องจากมีความสัมพันธ์ของกราฟของการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของตำแหน่งของตัวกระตุ้นบนเส้นใยนำแสงกับความต่างของเส้นทางเดินของแสง ระหว่างตัวกระตุ้นเป็นเชิงเส้น และผลของการวัดมีความผิดพลาดเป็น 5.4% ส่วนการตรวจวัด อุณหภูมินั้นความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและระยะความต่างของเส้นทางเดินของ แสงเป็นเชิงเส้นเช่นกัน แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระยะความต่างของเส้นทางเดินของแสง เพียงเล็กน้อยในขณะที่มีช่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกว้าง ซึ่งมีความไวของการตอบสนอง และค่าความสามารถในการจำแนก 10 ไมครอน ต่อ 12 ( $\pm 4$ ) องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากสเกล ของเครื่องมือวัดที่ใช้มีความละเอียดอยู่ในระดับไมครอน สำหรับการตรวจวัดแรงนั้นพบว่ามีความ ไน้มของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเอาท์พุทสัมพันธ์กับแรงกระตุ้นยกกำลังสอง

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาแนวทางจากเอกสารอ้างอิงเกี่ยวกับการศึกษา คุณสมบัติของเส้นใยนำแสงชนิดอนุรักษสภาวะทางโพลาริเซชัน 3 ชนิด คือ บี-โรว์ , อี-ซีรี่ (E-series) และ ดี-ซีรี่ (D-series) [ 28 , 29 ] และได้ทำการประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด เมื่อนำข้อมูลที่ ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองที่มีผู้ได้เคยทำการศึกษา พบว่าแนวโน้มของ ผลที่ได้จากการทดลองและค่าความผิดพลาดของวิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับผล การทดลองในวิธีที่เอกสารอ้างอิงดังกล่าวนำเสนอ

## 7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

เนื่องจากงานวิจัยเป็นการออกแบบเครื่องตรวจวัด ซึ่งจะต้องนำอุปกรณ์ทางแสงต่างๆที่มีอยู่แล้วนำมาประกอบขึ้นเป็นชุดตรวจวัด ปัญหาที่พบในส่วนนี้คือการจัดเรียงชุดอุปกรณ์เพื่อให้การลอนซ์แสงได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะต้องมีความสามารถในการปรับได้อย่างละเอียด โดยการปรับได้ทั้ง 3 มิติ และจะต้องมีความมั่นคง แข็งแรง การจัดเรียงชุดอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคลสันเพื่อดูรูปแบบของการแทรกสอดของแสง จะต้องอาศัยทักษะและการฝึกฝนเพื่อให้เกิดความชำนาญ นอกจากนี้ปัญหาของการออกแบบอุปกรณ์บางชิ้นซึ่งจะต้องออกแบบขึ้นเองโดยพิจารณาตามจุดประสงค์ของการใช้งาน เช่นออกแบบชิ้นส่วนสำหรับกระตุ้นด้วยแรงลงบนเส้นใยนำแสงจะต้องสามารถปรับมุมที่แรงกดกระทำลงบนเส้นใยนำแสงได้ และออกแบบความกว้างของจุดที่กดให้มีขนาดเหมาะสมเพื่อให้ได้ความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้มีค่ามากที่สุด การออกแบบชิ้นส่วนสำหรับให้ความร้อนซึ่งจะต้องออกแบบให้เส้นใยนำแสงในบริเวณที่ได้รับความร้อนนั้นได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ และตรวจวัดอุณหภูมิที่แท้จริงที่เส้นใยนำแสงได้รับเป็นต้น

นอกจากปัญหาในเรื่องการออกแบบอุปกรณ์แล้ว เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่นำเส้นใยนำแสงมาทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดซึ่งจะต้องเก็บข้อมูลแล้วนำข้อมูลมาทำการปรับแต่ง เพื่อสามารถหาความสัมพันธ์ของปริมาณที่กระตุ้นตลอดจนความไวของเครื่องมือ ปัญหาในส่วนนี้จึงเกี่ยวข้องกับเรื่องการประมวลสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้มีค่าน้อย (เปลี่ยนแปลงจากเดิมไม่มากนัก) โดยเฉพาะเมื่อปริมาณที่มากกระตุ้นเพียงเล็กน้อย อีกทั้งในการตรวจวัดแต่ละครั้งความสามารถในการลอนซ์แสง และการตรวจรับสัญญาณแสงอาจไม่เท่าเดิม การแก้ปัญหาโดยการพิจารณาในเทอมของความเข้มแสงเปรียบเทียบ (หมายถึงอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างความเข้มแสงเอาท์พุทเมื่อผ่านการตรวจวัดกับความเข้มแสงเริ่มต้นค่าหนึ่งก่อนทำการตรวจวัดในแต่ละครั้ง) ซึ่งจะช่วยให้การแปลความหมายของข้อมูลเป็นไปในทางเดียวกัน นอกจากนี้เนื่องจากการประมวลสัญญาณโดยผู้ทำการทดลองเป็นผู้แปลความหมายตามความสัมพันธ์ของกราฟที่ได้จากการอ่านค่าบนจอออสซิลโคปซึ่งจะเกิดปัญหาของความไม่แน่นอนในการตรวจวัดอันเนื่องมาจากผู้ทำการทดลองเองด้วย วิธีการแก้ปัญหาคือทำการทดลองซ้ำหลายๆครั้งโดยผลการทดลองเป็นข้อมูลเฉลี่ย ตัวอย่างเช่นการหาความยาวโคฮีเรนซ์ของแหล่งกำเนิดแสง การวัดระยะความต่างของเส้นทางเดินของแสงเป็นต้น

### 7.3 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

ผลของงานวิจัยเรื่องอุปกรณ์ตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสงจากการตรวจวัดแรง ตำแหน่ง และอุณหภูมิด้วยวิธีการที่เสนอไปนี้ ขอเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาดังต่อไปนี้

ควรปรับปรุงเรื่องการตรวจวัดอุณหภูมิเพื่อให้มีความไวของการตรวจวัด และมีความละเอียดของผลการตรวจวัดมากขึ้น โดยเปลี่ยนให้ความละเอียดของสเกลที่ใช้วัดอยู่ในระดับนาโนเมตร และอาจเพิ่มช่วงของอุณหภูมิในการตรวจวัดให้สูงขึ้น (ซึ่งเดิมประมาณ 120 องศาเซลเซียส) โดยเปลี่ยนเป็นใช้เส้นใยนำแสงชนิดที่มีตัวหุ้ม (jacket) แต่ทั้งนี้จะต้องทำการปรับแต่งข้อมูลให้มีความเหมาะสมเสียก่อน สำหรับในการตรวจวัดแรงนั้นความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับแรงกตมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ความสัมพันธ์ของข้อมูลเป็นเส้นโค้งพาราโบลา ซึ่งถ้าปรับปรุงให้มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นจะแปลความหมายได้ชัดเจนขึ้น นอกจากนี้ อาจปรับปรุงให้ขนาดของแรงที่ใช้กตมีค่ามากกว่าเดิม (ซึ่งเดิมประมาณ 5 นิวตัน) ได้โดยใช้หลักการของเครื่องอัดไฮดรอลิกเป็นต้น

ตัวอย่างแนวทางในการพัฒนาในด้านต่างๆ เช่นในด้านการวัดเชิงอุตสาหกรรม ทางด้านเคมี ทางด้านการแพทย์ดังนี้ [ 12 ]

- การควบคุมแขนกลโดยอาศัยเทคนิคการตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสง (robotic arm control based fiber optic sensor) โดยติดระบบตรวจวัดซึ่งใช้เส้นใยนำแสงที่บริเวณด้านในของแขนกล เมื่อระบบเคลื่อนที่เข้าจับวัตถุจะเกิดแรงกระทำบนเส้นใยนำแสงเนื่องจากวัตถุสัมผัสเส้นใยนำแสงและจะทำการควบคุมการทำงานของแขนกลให้หยุดออกแรงบีบวัตถุ ทำให้วัตถุนั้นไม่เสียหายเนื่องจากออกแรงบีบมากเกินไป

- การควบคุมสัญญาณไฟจราจรโดยอาศัยหลักการตรวจวัดแรงและตำแหน่ง โดยทำการฝังเส้นใยนำแสงไว้ใต้พื้นดินบริเวณเสาสัญญาณไฟจราจร และจะทำการตรวจวัดหรือน้ำหนักเมื่อมีผู้คนจำนวนหนึ่งที่พอดีตามที่กำหนดยื่นรอสัญญาณไฟและจะทำการเปลี่ยนสัญญาณไฟจราจรอัตโนมัติคนจึงข้ามถนนได้ จากนั้นทำการตรวจวัดตำแหน่งเมื่อคนสุดท้ายเดินไปถึงถนนอีกด้านหนึ่งสัญญาณไฟก็จะเปลี่ยนกลับ

- การพัฒนาเครื่องตรวจวัดอัตราการหมุนโดยใช้เส้นใยนำแสงเป็นตัวตรวจวัด เช่นเครื่องไจโรสโคป

- การพัฒนาเครื่องตรวจวัดเพื่อใช้ในงานตรวจวัดคุณสมบัติทางเคมี เช่นการวิเคราะห์เชิงเคมีต่างๆ และการวิเคราะห์ผลภาวะ
- งานการตรวจวัดอุณหภูมิสูง เช่นในบริเวณที่เสี่ยงต่ออันตรายก็สามารถนำเส้นใยนำแสงที่เป็นโพรบสอดเข้าไปในบริเวณแคบๆได้
- ในด้านการแพทย์ เช่นการตรวจวัดอัตราการหายใจโดยใช้หลักการตรวจวัดอัตราการสั่นหรือการวิจัยเพื่อสร้างเครื่องเอนโดสโคป (endroscope) โดยไม่ต้องส่งข้อจากต่างประเทศที่มีราคาแพงเป็นต้น

นอกจากนั้นเทคนิคในการประมวลสัญญาณเพื่อให้ความสามารถในการจำแนกของพิกัดสัญญาณสังเกตง่ายขึ้น อาจใช้เทคนิคดังรายละเอียดในบทความวิจัย [ 10,11 ] ซึ่งใช้แหล่งกำเนิดแสง 3 แหล่งจะทำให้รั้วสว่างกลางสังเกตได้ง่ายขึ้นกว่าเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงเพียงแหล่งเดียว นอกจากนั้นยังทำให้อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ดีขึ้นด้วย

เนื่องจากระบบเส้นใยนำแสงนั้นมีความสามารถในการส่งข้อมูลได้มากหรือมีความเร็วสูง แต่ในการนำไปใช้งานต้องนำมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์มีข้อจำกัดในเรื่องความจุข้อมูล เพื่อให้สอดคล้องกันจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์เส้นใยนำแสง (fiber optic devices) เพื่อทดแทนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่มีแนวความคิดว่าจะออกแบบอุปกรณ์ทางแสงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆให้อยู่ภายในเส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียว โดยจะเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานได้เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แต่มีความสามารถเหนือกว่าในเรื่องความเร็วและกำลังของสัญญาณ อีกทั้งยังสามารถลดขนาดของระบบลงอีกด้วย ซึ่งได้มีการเริ่มทำวิจัยที่ห้องปฏิบัติการวิจัยทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ทำการวิจัยโดยแบ่งเป็นอุปกรณ์ทางแสงสำหรับงานด้านการสื่อสาร และด้านอุปกรณ์ตรวจวัด [ 30 ] เพื่อเป็นการพัฒนานำมาใช้กับระบบเส้นใยนำแสงต่อไป เช่น ไฟเบอร์เกรตติง (fiber grating) ซึ่งใช้ทำเป็นอุปกรณ์ฟิลเตอร์ (filter) มัลติเพล็กซ์เซอร์ (multiplexer) สวิตชิงทางแสง (switching) และไมโครไฟเบอร์ (micro fiber) ที่ใช้สำหรับงานด้านการตรวจวัดเป็นต้น

เส้นใยนำแสงนั้นนับวันจะเข้ามามีบทบาทต่อเทคโนโลยีด้านต่างๆ มากขึ้นเรื่อยๆ ฉะนั้นจึงจำเป็นอย่างมากที่จะต้องเริ่มเผยแพร่ความรู้และเทคโนโลยีทางด้านนี้ให้รู้จักกันอย่างทั่วถึงทุกระดับพร้อมกับส่งเสริมให้มีการทำการวิจัยและพัฒนาทางด้านนี้อย่างจริงจัง

## เอกสารอ้างอิง

- 1.) วชิระ มีทอง, วิศวกรรมการวัดละเอียด, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี.
- 2.) สัจจา เทียมอยู่เย็น, รู้จักกับ ซี ซี ดี อุปกรณ์สำหรับระบบอิมเมจโปรเซสซิ่ง, วารสารเซมิคอนดักเตอร์ฯ, 135 (2537) : 126-130.
- 3.) อธิคม ฤกษ์บุตร, ระบบสื่อสารด้วยไฟเบอร์ออปติก ตอนที่ 1, วารสารเซมิคอนดักเตอร์ฯ, 118 (2535) : 74-82.
- 4.) อธิคม ฤกษ์บุตร, ระบบสื่อสารด้วยไฟเบอร์ออปติก ตอนที่ 2, วารสารเซมิคอนดักเตอร์ฯ, 119 (2535) : 89-94.
- 5.) A. Ourmazd, M. P. Varnham, R. D. Birch, and D. N. Payne, Thermal Properties of Highly Birefringent Optical Fibers and Preforms, Applied Optics, 22(15), 1983 : 2374-2379.
- 6.) A. Vanderlugt, Optical Signal Processing, John Willey & Sons, Inc., New York, 1992.
- 7.) A. Yariv, P. Yeh, Optical Waves in Crystals Propagation and Control of Laser Radiation, John Wiley & Sons, Inc., 1984.
- 8.) D. A. Jackson, Review Article Recent Progress in Monomode Fiber Optic Sensors, Meas. sci.Technol. 5 (1994) : 621-638.
- 9.) D. C. giancoli, Physics Principles with Applications, Prentice-Hall, Inc.,1991.
- 10.) D. N. Wang, Y. N. Ning, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, and K. Weir, The Optimized Wavelength Combinations of Two Broadband Sources for White Light Interferometry, Journal of Lighthwave Technology, 12(5),1994 : 909-916.

- 11.) D. N. Wang, Y. N. Ning, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, and K. Weir, **Three-Wavelength Combination Source for White-Light Interferometry**, IEEE Photonics Technology Letters, 5(11),1993 : 1350-1352.
- 12.) E. Udd, **Fibre Optic Sensors : An Introduction for Engineers and Scientists**, John Willey & Sons, Inc., New York, 1991.
- 13.) G. D. Christian, **Analytical Chemistry**, John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- 14.) H. Marth, **Fiber Optic Standard Dictionary**, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
- 15.) J. J. Refi, **Novel Fiber Designs Fulfill Information Superhighway Needs**, Laser Focus World, 6 (1994) : s5-s7.
- 16.) J. M. Senior, **Optical Fiber Communications : Principle and Practice**, Prentice Hall, Inc., 1992.
- 17.) J. Noda, K. Okamoto and Y. Sasai, **Polarization Maintaining Fibers and Their Applications**, IEEE Journal of Lightwave Technology, 4 (1986) : 1071-1089.
- 18.) J. P. Dakin, **The Distributed Fiber Optics Sensing Handbook**, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- 19.) J. Watson, **Optoelectronics (Tutorial Guides in Electronic Engineering : 14)**, Van Nostrand Reinhold (International), 1989.
- 20.) J. Wilson, J. F. B. Hawker, **Optoelectronics An Introduction**, Prentice Hall, Inc., 1989.
- 21.) K. Petermann, **Laser Diode Modulation and Noise**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.
- 22.) L. B. Jeunhomme, **Single-Mode Fiber Optics Principles and Applications**, Marcel Dekker, Inc., 1993.

- 23.) M. Hansupanusorn, P. V. P. Yupapin, S. Kusamran and S. Akavipat, **Polarization Maintaining Fiber Characteristics and Their Application**, Songklanakarin J. Sci. Technol., 15(2),1993 : 181-196.
- 24.) Newport Corporation, **Projects in Fiber Optics Applications Handbook**, 1986.
- 25.) Newport Corporation, **Projects in Single-Mode Fiber Optics, Application Workbook**.
- 26.) P. Hariharan, **Basics of Interferometry**, Academic Press, Inc., 1992.
- 27.) P. V. P. Yupapin, K. Weir, K. T. V. Grattan, and A. W. Palmer, **An Optical Pressure Sensor using a Low-Coherence Light Source with a Photoelastic Sensing Element**, Sensors and Actuators A, 36 (1993) : 105-111.
- 28.) P. V. P. Yupapin, K. Weir, K. T. V. Grattan, and A. W. Palmer, **A Study of Polarization Maintaining Fibre Characteristics Using an Interferometric Techniques for Sensor Applications**, Optical Fiber Technology, in press.
- 29.) P. V. P. Yupapin, **Optical Pressure Sensors Using Interferometric Techniques**, (A thesis Submitted to City University for the Degree of Doctor of Philosophy, 1993.)
- 30.) R. Kashyap, **Photosensitive Optical Fibers : Devices & Applications**, Optical Fiber Technology (1) 1994 : 17-34.
- 31.) RS Components, **Electronic and Electrical Products Part 1**, March-June 1992.
- 32.) Seastar Optics Inc., **Optical Devices & Laser Diode Instrumentation (product catalog)**, 1993.

- 33.) Sharp Corporation, **Sharp Laser Diodes (Laser Diode User's Manual)**, 1986.
- 34.) T. V. Higgins, **Wave Nature of Light Shapes Its Many Properties**, Laser Focus World , March 1994, : 59-63.
- 35.) T. E. Jenkins, **Optical Sensing Techniques and Signal Processing**, Prentice-Hall, Inc., 1987.
- 36.) W. J. Mooney, **Optoelectronic Devices and Principles**, Prentice-Hall, Inc., 1991.

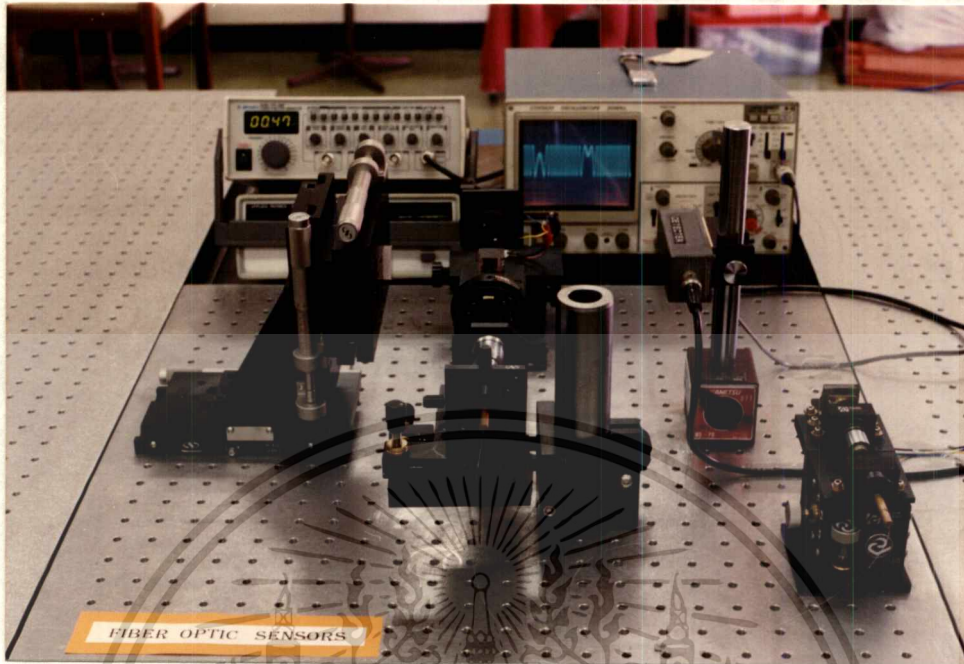


ภาคผนวก ก.

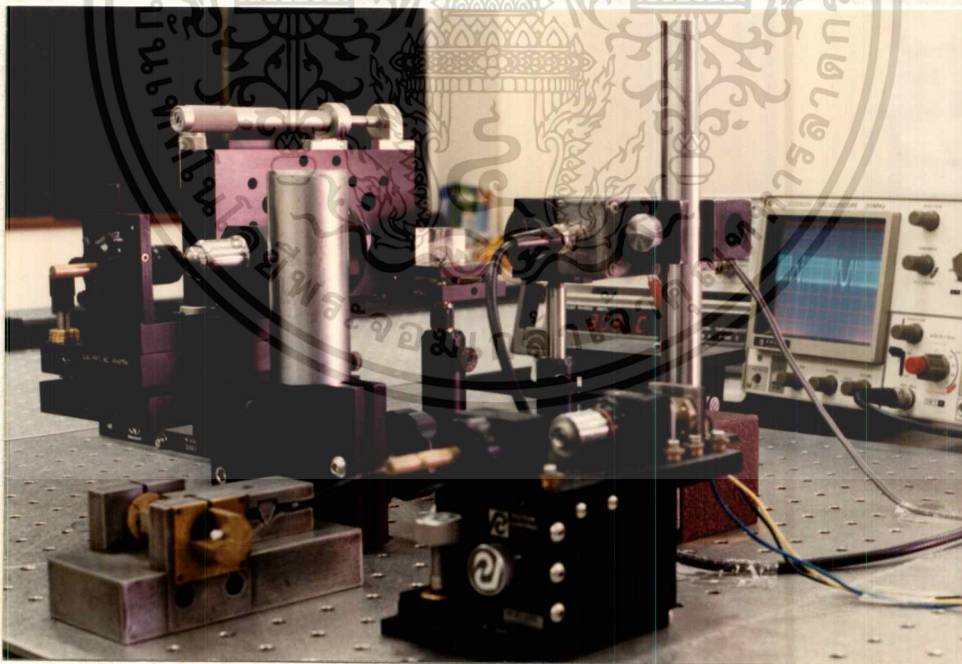
รูปแสดงชุดการทดลองอุปกรณ์ตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

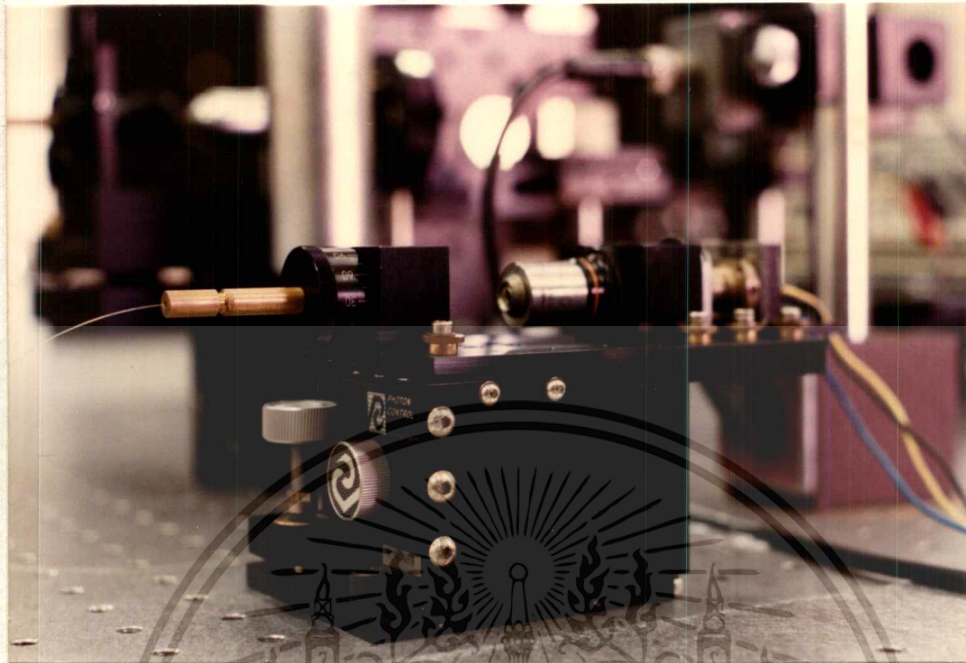


รูปที่ ก - 1 แสดงการจัดเรียงชุดการทดลอง

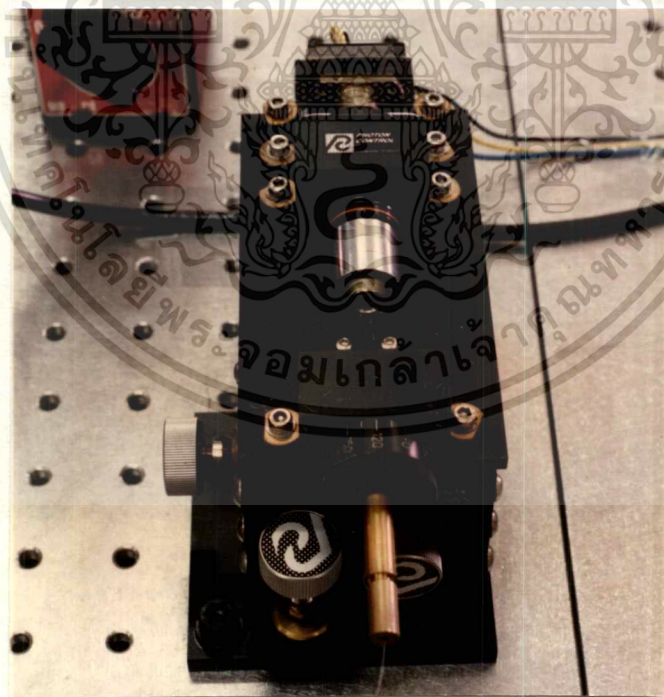


รูปที่ ก - 2 แสดงระบบตรวจวัดบนเส้นใยนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

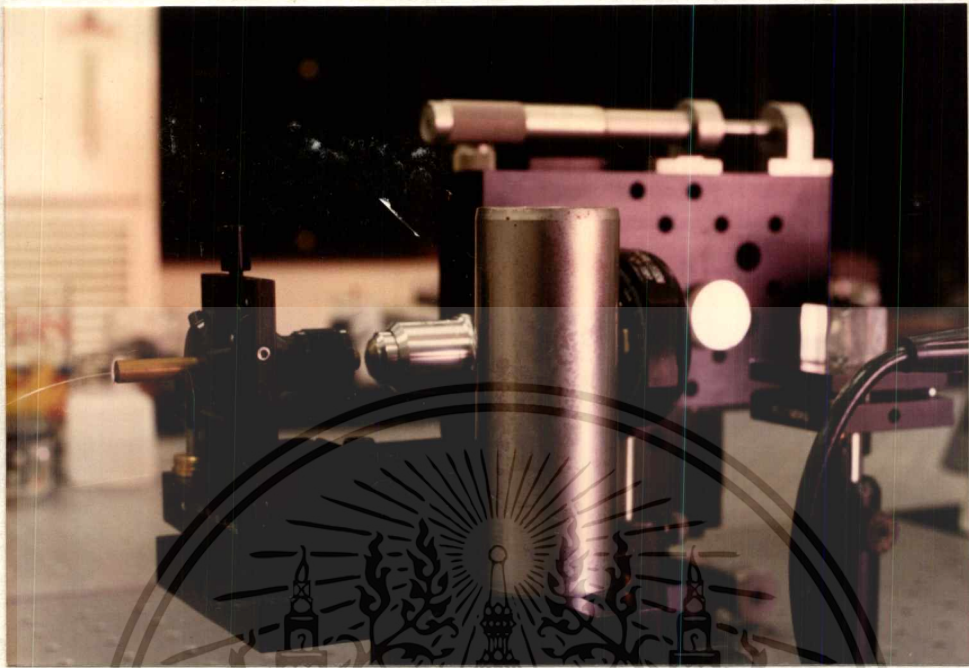


รูปที่ ก - 3 แสดงแสงจากเลเซอร์ไดโอดลอนซ์เข้าสู่เส้นใยนำแสง โดยจัดเรียงบนแท่นปรับ 3 มิติ

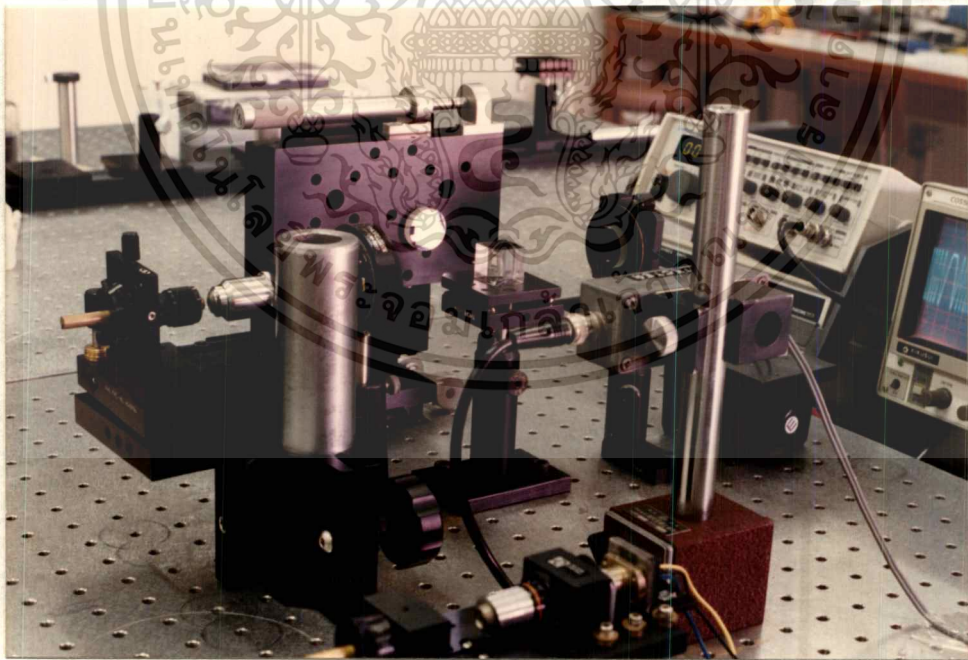


รูปที่ ก - 4 แสดงแสงเลเซอร์ผ่านเข้าสู่เลนส์ทำให้เป็นลำแสงขนาน ผ่านโฟลวโรเซอร์แล้วเข้าสู่เลนส์รวมแสงเพื่อรวมแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

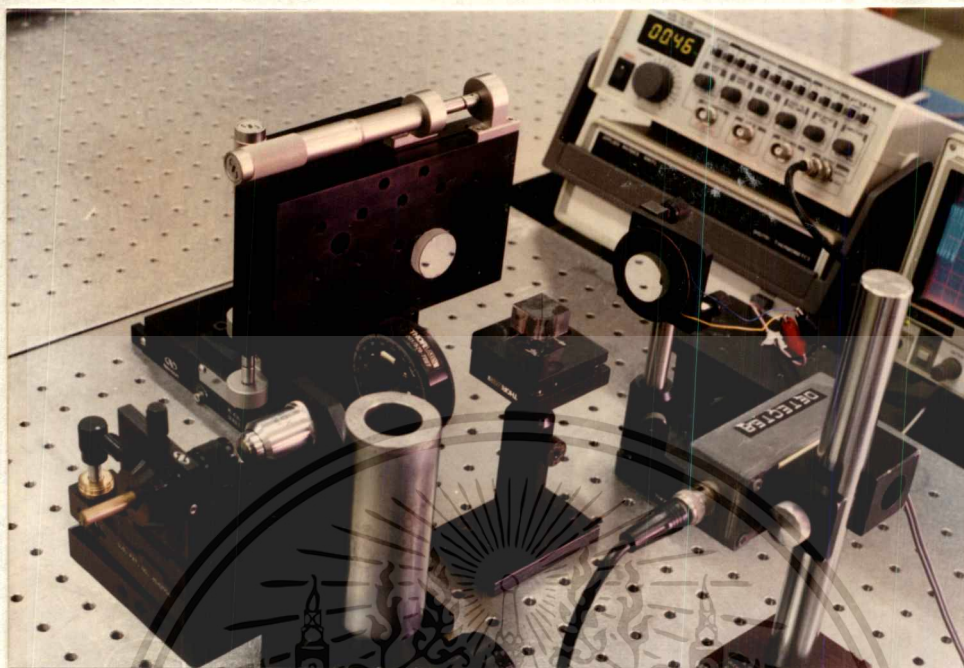


รูปที่ ก - 5 แสดงแสงเมื่อผ่านออกจากปลายเส้นใยนำแสง เข้าสู่ส่วนประมวลสัญญาณแสง

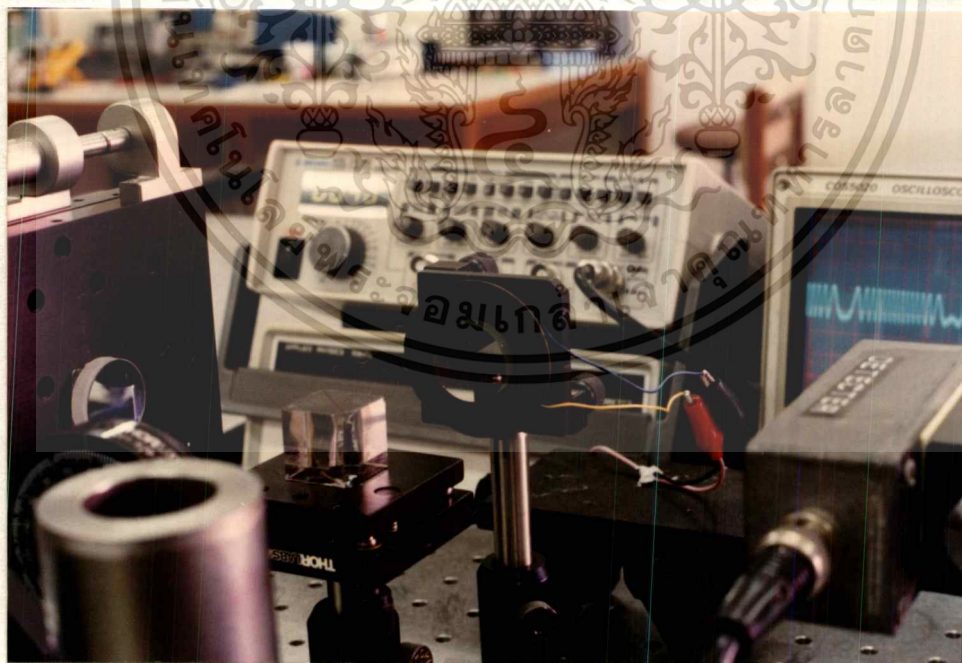


รูปที่ ก - 6 แสดงส่วนประมวลสัญญาณแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

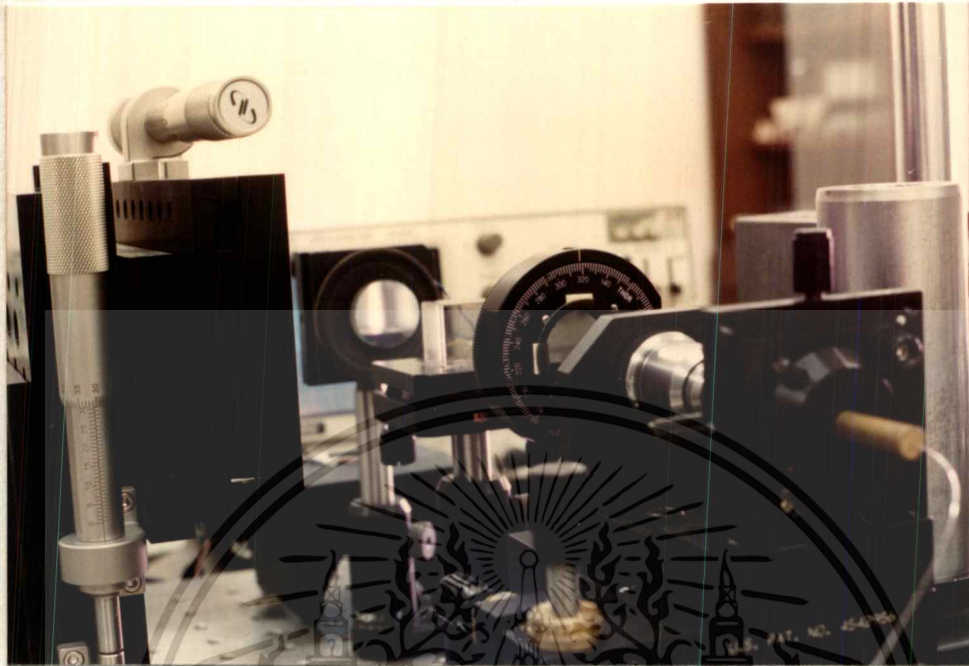


รูปที่ ก - 7 แสดงส่วนของชุดอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์แบบไมเคิลสัน ก่อนเข้าสู่ตัวตรวจรับสัญญาณแสง

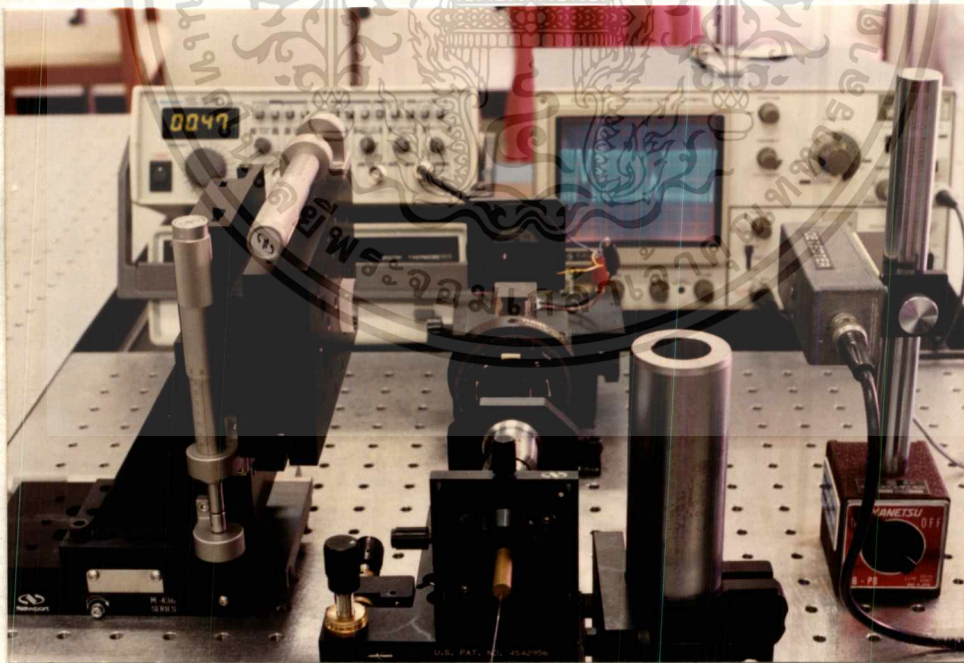


รูปที่ ก - 8 แสดงการมอดดูเลตด้วยสัญญาณความถี่ค่าหนึ่ง โดยติดกระจก M2 ที่ลำโพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกร้นำไปใช้



รูปที่ ก - 9 แสดงแสงจากเส้นใยนำแสงผ่านเข้าสู่ตัวโฟลวโรเซอรัว  
ก่อนเข้าสู่ชุดอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์

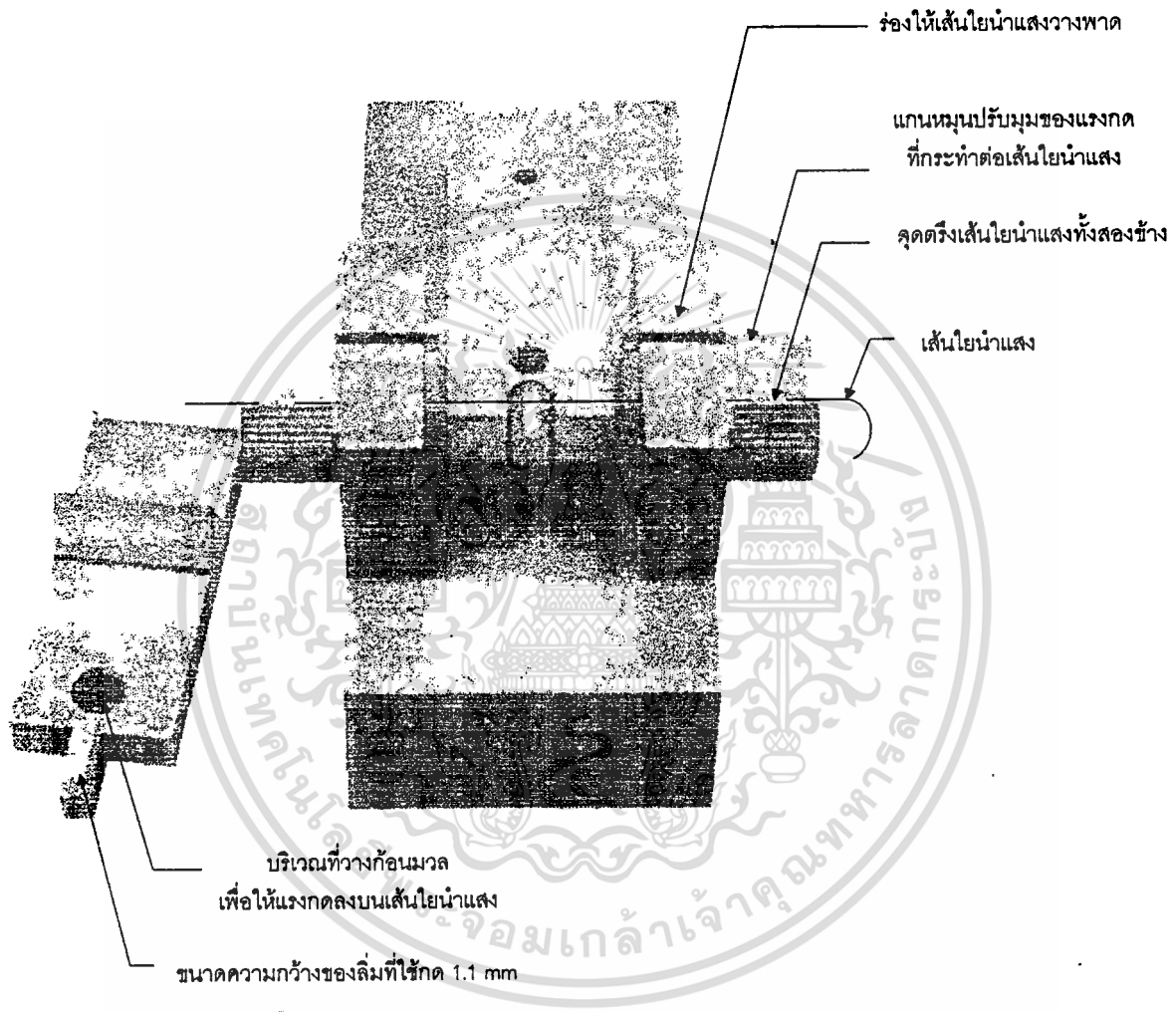


รูปที่ ก - 10 แสดงแขนของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ข้างหนึ่ง  
ที่สามารถหมุนปรับได้อย่างละเอียด 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

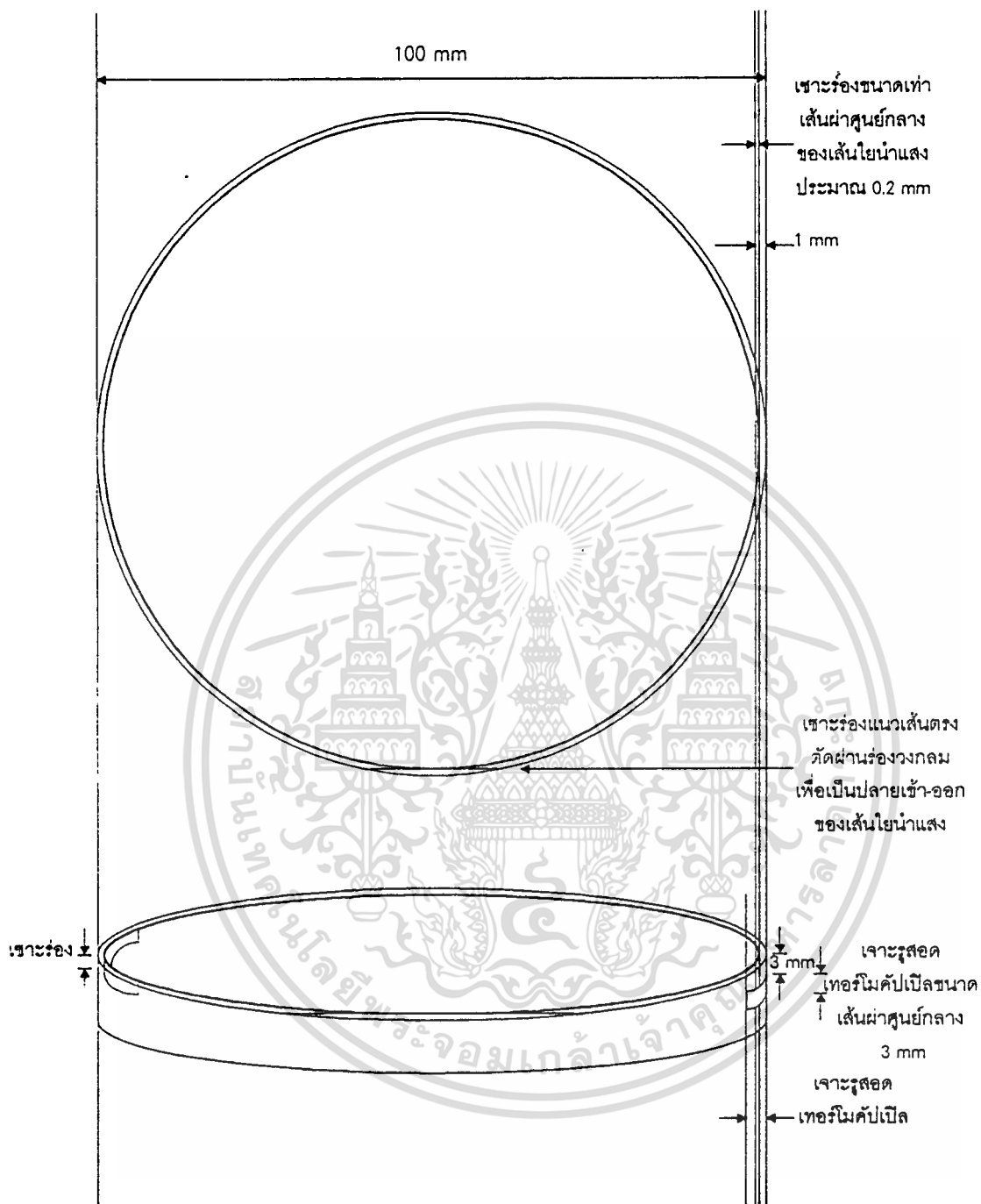


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข - 1 แสดงชิ้นส่วนตรวจวัดแรง

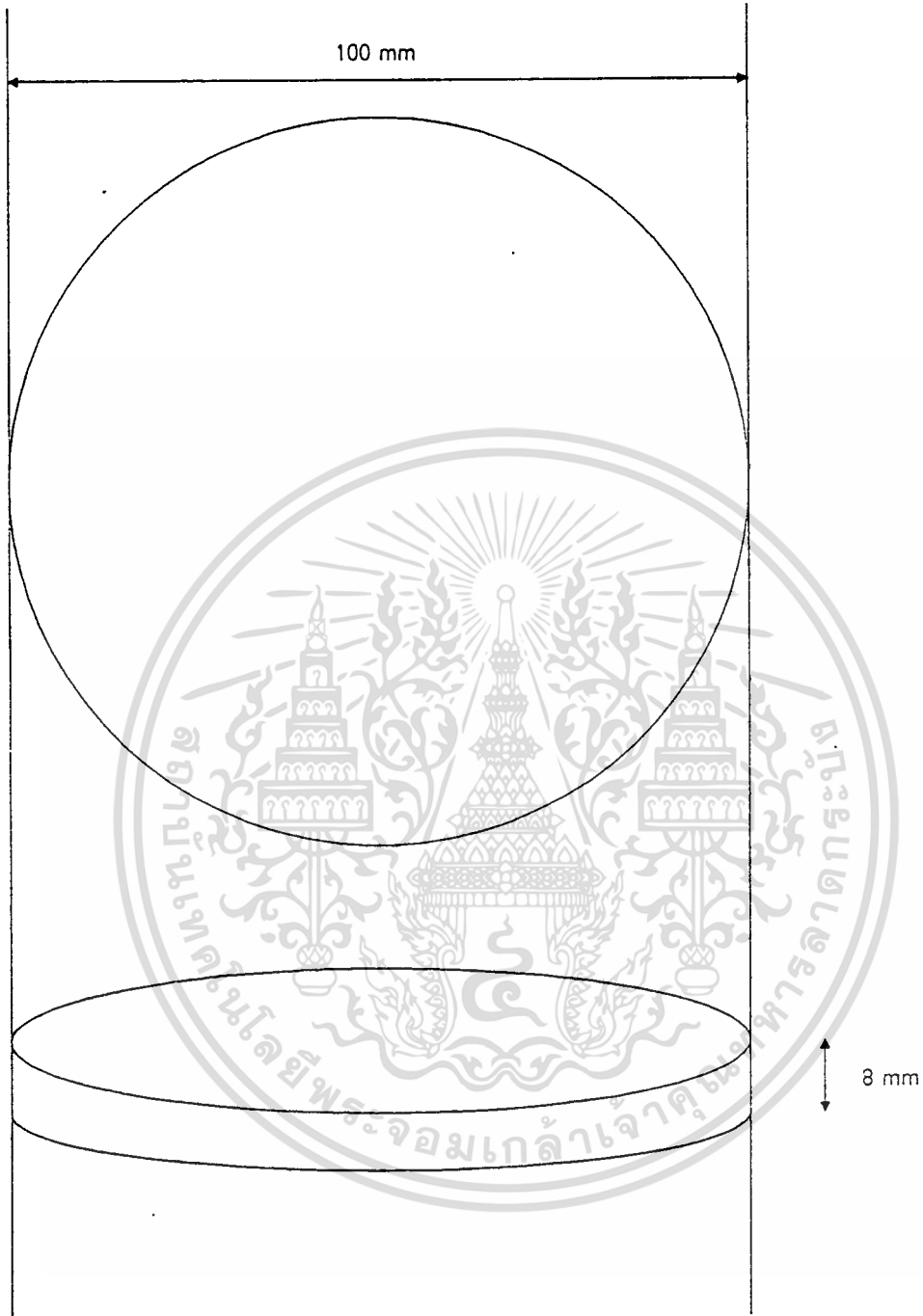
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNIT	mm
SCALE	1 : 1

รูปที่ ข - 2 แสดงชิ้นส่วนระบบควบคุมอุณหภูมิ (ขึ้นบน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNIT	mm
SCALE	1 : 1

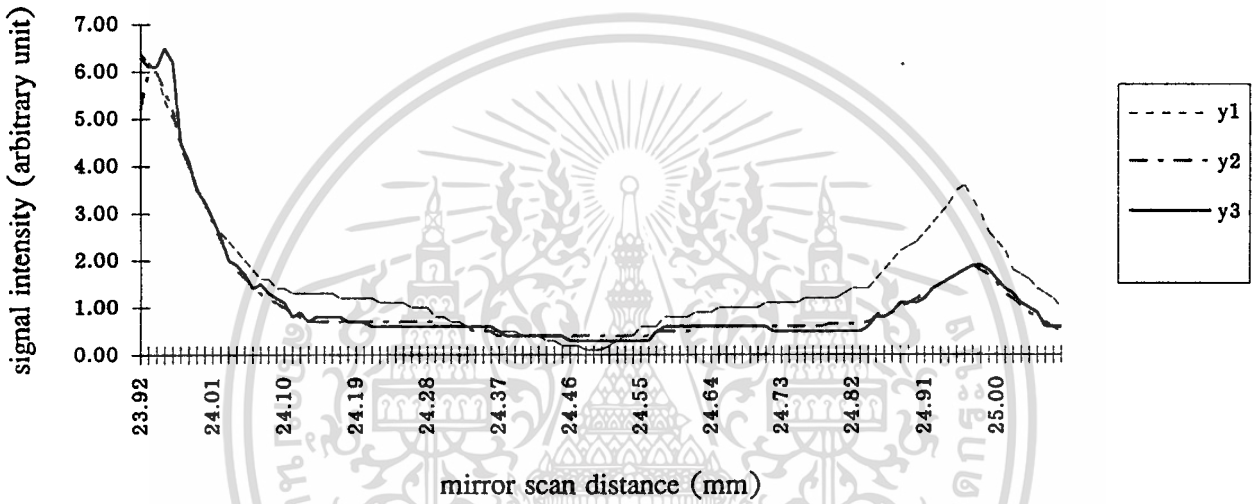
รูปที่ ข - 3 แสดงชิ้นส่วนระบบควบคุมอุณหภูมิ (ชิ้นล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

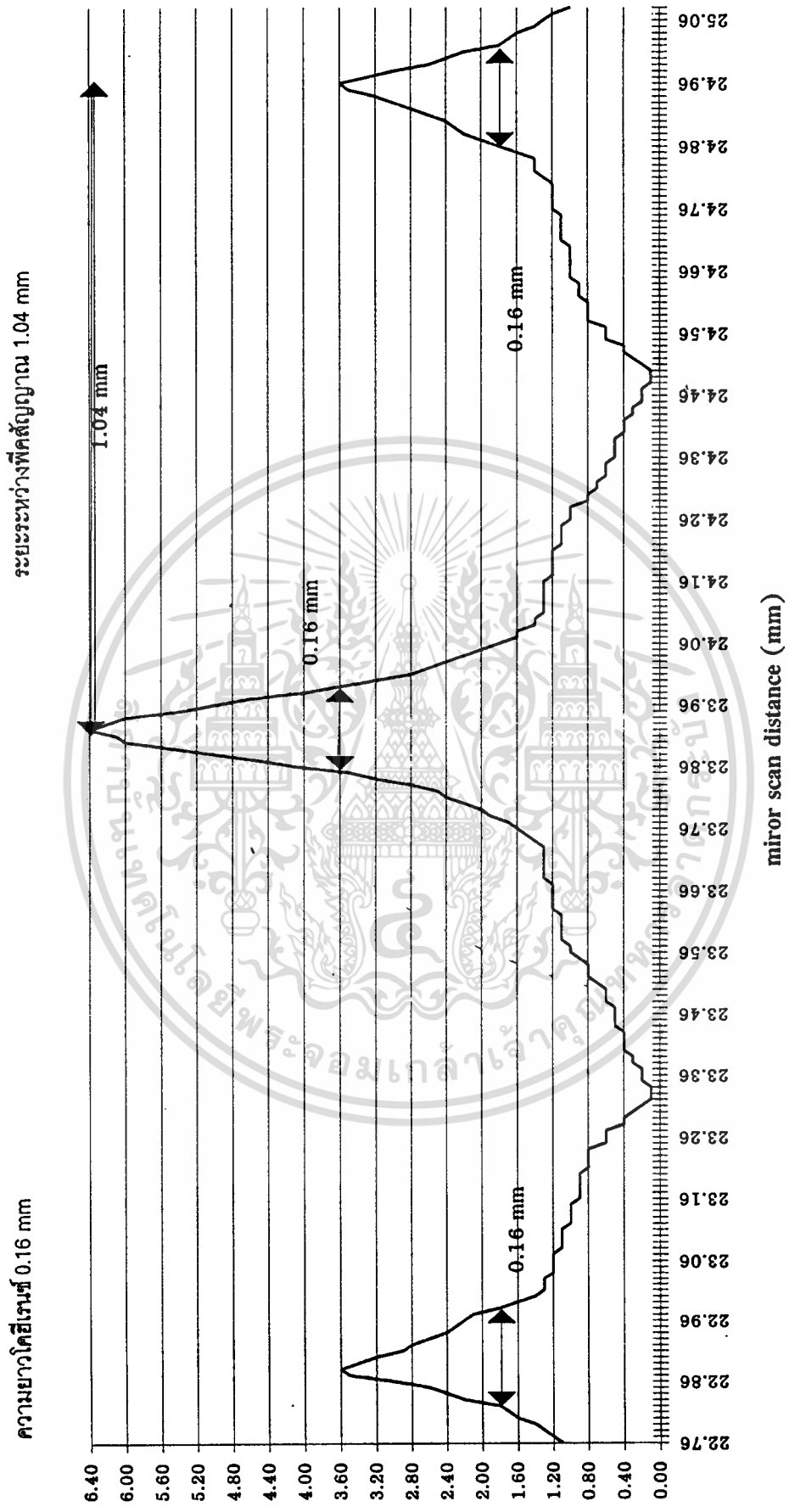
ข้อมูลผลการทดลองวัดค่าความยาวโคฮีเรนซ์ของเลเซอร์ไดโอด  
รุ่น LT 023 MDO และ LT 010 MDO

SHARP LT023MDO



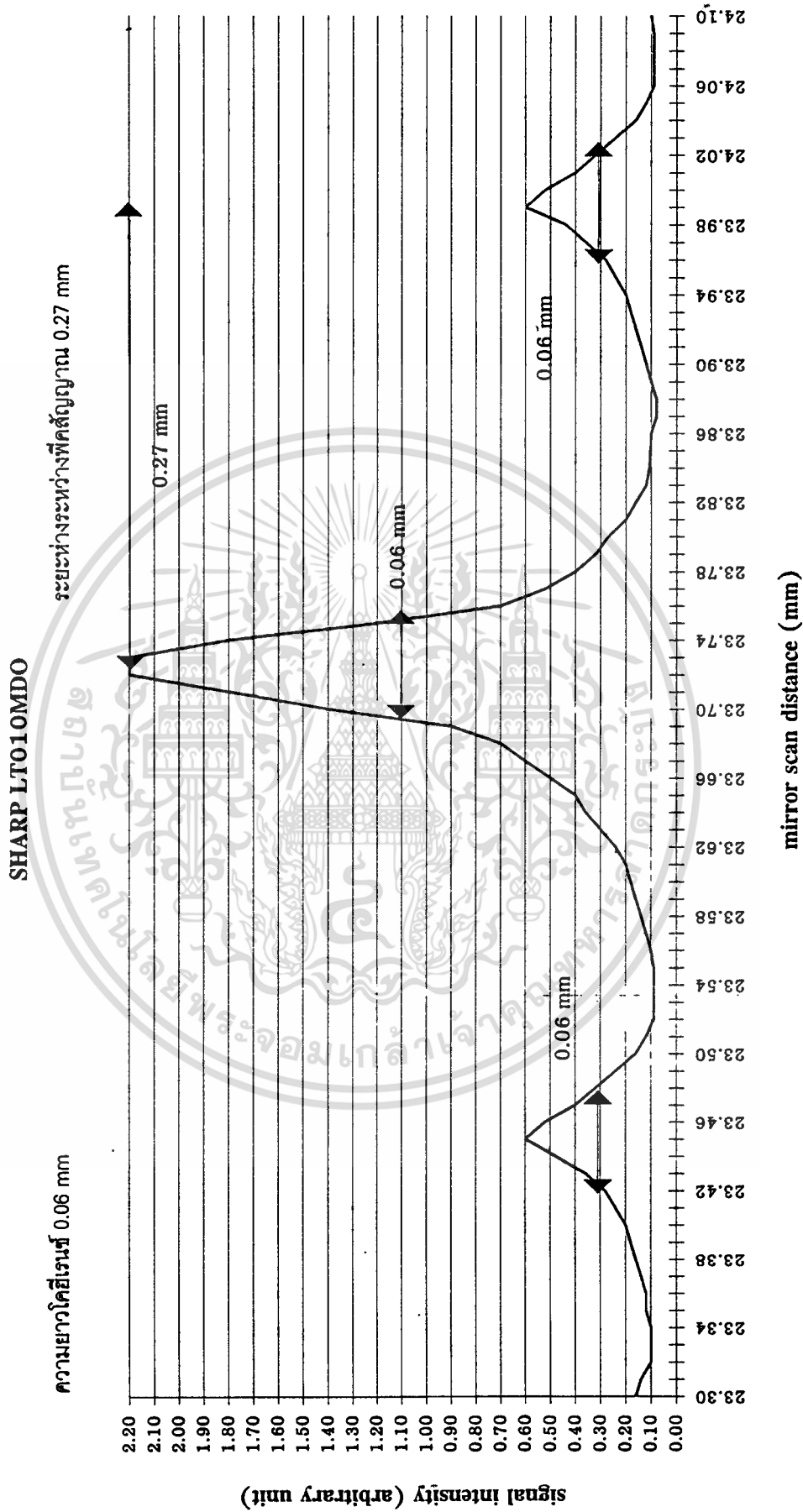
รูปที่ ค - 1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของสัญญาณความเข้มแสงจากเลเซอร์ไดโอด sharp รุ่น LT023MDO และระยะเลื่อนปรับกระจก M2 ของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์ (ทำการทดลอง 3 ครั้ง)

### SHARP LTO23MDO



รูปที่ ค - ๒ แสดงกราฟความเข้มของสัญญาณความเข้มแสงจากเลเซอร์ไดโอด sharp รุ่น LTO23MDO และระยะที่เลื่อนปรับกระจก M2 ของอินเทอร์เฟียโรมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค- 3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของสัญญาณความเข้มแสงจากเลนเซอร์ไดโอด sharp รุ่น LT010MDO และระยะที่เลื่อนปรับกระจก M2 ของจินเทอร์เฟียโรมิเตอร์

ภาคผนวก ง.

ข้อมูลจำลอง (simulation data) แสดงผลของอัตราการคัปปลิงแสงสูงสุด  
โดยพิจารณาจากการปรับมุม (ระหว่างทิศของแรงที่กระทำกับ  
แกนที่มีความเร็วมากกว่าของเส้นใยนำแสง)



ข้อมูลของเส้นใยนำแสงที่ใช้ [ 23,29 ]

เส้นใยนำแสงไฮลี-ไบร์ฟรินเจนซ์ชนิดโบว์-โท ของ York รุ่น HB 800
ความยาวคลื่น 830 นาโนเมตร
การลดทอนของสัญญาณ 2 เดซิเบล / กิโลเมตร
ความยาวเบรตส์ของเส้นใยนำแสง 2.2 มิลลิเมตร

พิจารณาสมการที่ 5.2

$$K = G [ (\sin 2\phi) \sin (\pi Bw / \lambda) ]^2 f^2$$

เมื่อ

- K อัตราส่วนการค้ำปลิง
- G ค่าคงที่ใดๆ
- $\phi$  มุมระหว่างทิศของแรงที่กระทำกับแกนที่มีความเร็วมากกว่าของเส้นใยนำแสง
- B นอร์มอลไลซ์ไบร์ฟรินเจนซ์ของเส้นใยนำแสง =  $3.54 \times 10^{-4}$
- $\lambda$  ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิด = 780 นาโนเมตร
- w ความกว้างของจุดที่ทำการกระตุ้นจากสมการที่ 5.4  
w = 1.1 มิลลิเมตร
- f แรงต่อหน่วยความกว้าง (F / w) ถ้ากำหนดให้แรงขนาด 1.96 นิวตัน  
F / w = 1.96 / 1.1 นิวตัน / มิลลิเมตร

แทนค่าในสมการและเขียนกราฟความสัมพันธ์ของมุม (ระหว่างทิศของแรงที่กระทำกับแกนที่มีความเร็วมากกว่าของเส้นใยนำแสง) กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ตรวจวัด

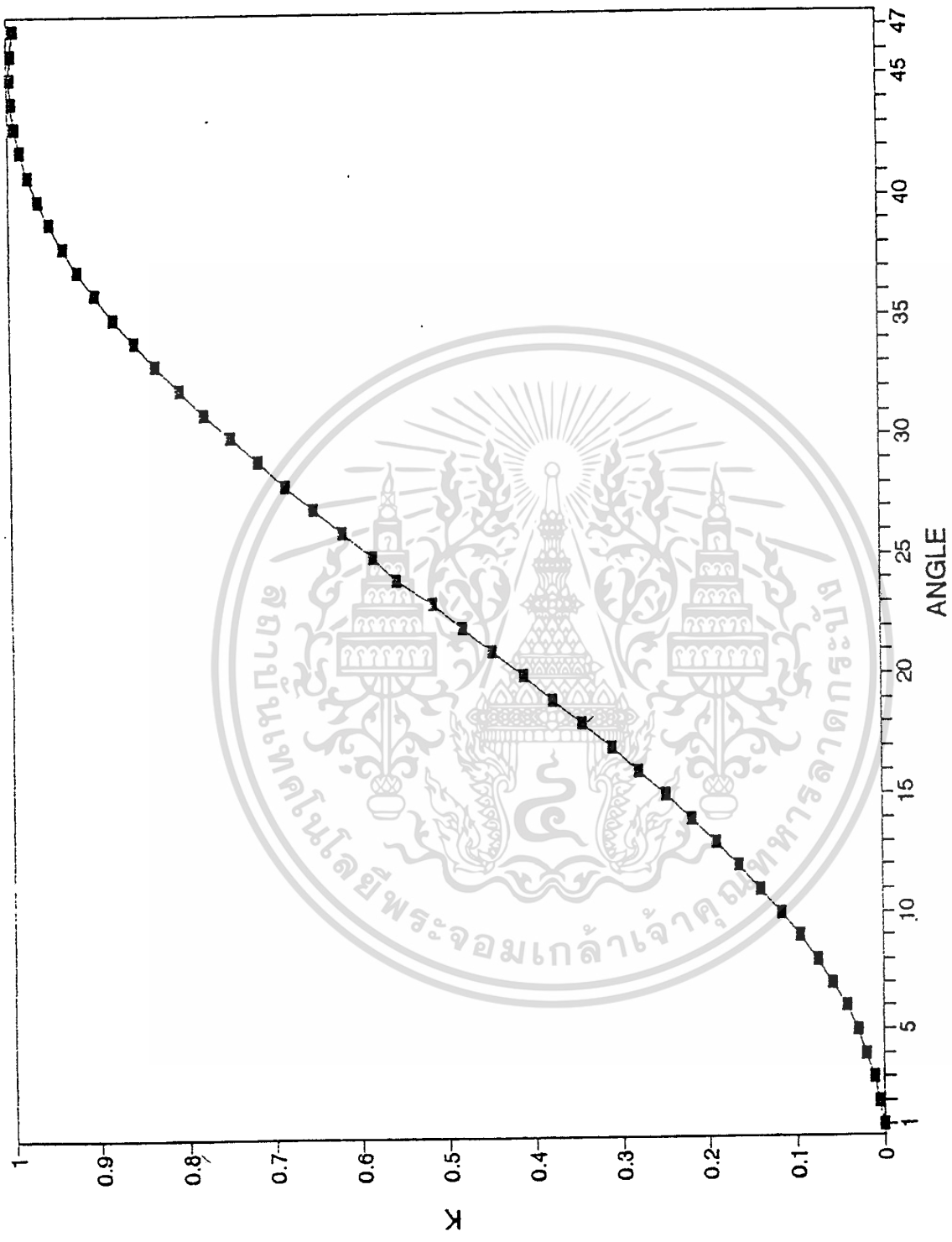
ตารางที่ ง - 1 แสดงข้อมูลจำลองความสัมพันธ์ของอัตราการใช้พลังงานสูงสุด  
กับมุม (ระหว่างทิศของแรงที่กระทำกับแกนที่มีความเร็วมากกว่าของเส้นใยนำแสง)

ANGLE (degrees) K

1	0.00121201764
2	0.00484616085
3	0.01088172934
4	0.01929031841
5	0.03003096227
6	0.04305133357
7	0.05828799838
8	0.0756667252
9	0.09510284662
10	0.1165016718
11	0.13975894783
12	0.1647613676
13	0.19138712181
14	0.21950649249
15	0.24898248487
16	0.2796714949
17	0.31142400879
18	0.34408533149
19	0.37749634032
20	0.41149426021
21	0.4459134567
22	0.48058624293
23	0.51534369657
24	0.5560164828
25	0.58443567929
26	0.61843359917
27	0.651844608
28	0.6845059307
29	0.7162584446
30	0.74694745462
31	0.776423447
32	0.80454281768
33	0.8311685719
34	0.85617099166
35	0.87942826769
36	0.90082709288
37	0.92026321429
38	0.93764194111
39	0.95287860593
40	0.96589897723
41	0.97663962108
42	0.98504821015
43	0.99108377863
44	0.99471692185
45	0.99592993948
46	0.99471692185
47	0.99108377863

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง - 1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอัตราการคัปปลิงแสงสูงสุด กับมุม (ระหว่างทิศของแรงที่กระทำกับแกนที่มีความเร็วมากกว่าของเส้นใยนำแสง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก จ.**

**รายงานการสอบเทียบมวลที่ใช้ในการทดลองกับมวลมาตรฐาน  
(ข้อมูลจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ)  
และการคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของการวัด**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ จ-1

แสดงรายงานการสอบเทียบมวลที่ใช้ในการทดลองกับมวลมาตรฐาน

## รายงานการตรวจวิเคราะห์ ทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง เครื่องหมาย หมายเลข

ตรา ๗๗

ตามและผู้ส่งเรียก ที่ระบุตัวอย่าง ปฏิบัติการ

ตุ้มน้ำหนัก

ค่าที่ระบุตัวอย่าง ( กรัม )	ค่าที่อ่านได้ ( กรัม )	ค่าความไม่แน่นอน (กรัม)
200	200.0333	$\pm 0.0003$
200	200.0216	$\pm 0.0001$
100	100.0085	$\pm 0.0001$
50	49.9810	$\pm 0.0001$
10	9.9901	$\pm 0.0002$
5	5.0133	$\pm 0.0001$
23.4	23.5031	$\pm 0.0003$

## หมายเหตุ

1. ตู้มน้ำหนักตัวอย่างได้รับการทดสอบโดยซึ่งในอากาศเปรียบเทียบกับมวลมาตรฐานของกรมวิทยาศาสตร์บริการ ซึ่งสอบเทียบกับมวลมาตรฐาน 1 กิโลกรัม ที่รับรองโดย BIPM
2. อุณหภูมิห้อง, ความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างการสอบเทียบเท่ากับ  $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$  ,  $(74 \pm 5) \%$
3. ระดับความเชื่อมั่นของความไม่แน่นอนที่ใช้คือ 99 %
4. สอบเทียบเมื่อวันที่ 29 มิถุนายน 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของการวัด (uncertainty)

$$\text{uncertainty} = \frac{\sigma \times t\text{Factor}}{\sqrt{N}} \quad (จ-1)$$

เมื่อ  $\sigma$                       ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)

$$\text{โดย } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(N-1)}} \quad (จ-2)$$

$t\text{Factor}$                       ค่าคงที่ (ข้อมูลจากตารางที่ จ-2)  
 $\sqrt{N}$                               จำนวนชุดข้อมูลที่ทำการวัด

ตารางที่ จ-2

แสดงค่าที่-แฟกเตอร์สัมพันธ์กับระดับความเชื่อมั่นของความไม่แน่นอน (confidence level) [ 13 ]

Values of t for  $\nu$  Degrees of Freedom for Various Confidence Levels<sup>a</sup>

$\nu$	Confidence Level, 90%	95%	99%	99.5%
1	6.314	12.706	63.657	127.32
2	2.920	4.303	9.925	14.089
3	2.353	3.182	5.841	7.453
4	2.132	2.776	4.604	5.598
5	2.015	2.571	4.032	4.773
6	1.943	2.447	3.707	4.317
7	1.895	2.365	3.500	4.029
8	1.860	2.306	3.355	3.832
9	1.833	2.262	3.250	3.690
10	1.812	2.228	3.169	3.581
15	1.753	2.131	2.947	3.252
20	1.725	2.086	2.845	3.153
25	1.708	2.060	2.787	3.078
$\infty$	1.645	1.960	2.576	2.807

<sup>a</sup> $\nu = N - 1 =$  degrees of freedom.

เมื่อ  $\nu = N - 1$

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระดับความเชื่อมั่นของความไม่แน่นอนคือ 95%

ถ้าทำการทดลอง 10 ครั้ง ค่าที่-แฟกเตอร์ 2.262 เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำโดย นางสาวมยุรี หาญสุภานุสรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ.2512 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเบญจมราชาลัย กรุงเทพฯ การศึกษาชั้นปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยบูรพา บางแสน จังหวัดชลบุรี สาขาการศึกษาวิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์ เมื่อปีการศึกษา 2534 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2535 ประสบการณ์การทำงานเป็นครูสอนวิชาฟิสิกส์ในโรงเรียนอัสสัมชัญคอนแวนต์ กรุงเทพฯ ในปี 2533-2534 เป็นอาจารย์พิเศษในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี 2535-2536 และเป็นผู้ช่วยนักวิจัยโครงการวิจัยเรื่อง “เครื่องตรวจวัดโดยใช้เส้นใยนำแสง” ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติเมื่อปี 2536-2537 สำหรับผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์นั้นเป็นบทความวิจัยจำนวน 2 เรื่อง ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19 และ ครั้งที่ 20 และบทความวิชาการจำนวน 5 เรื่องซึ่งตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์ของมหาวิทยาลัยต่างๆ