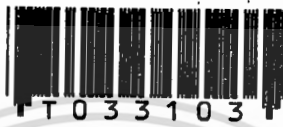


อุปกรณ์แบบหลอมรวมที่นำแสงและการประยุกต์

FUSED-TAPERED SINGLE-MODE FIBERS  
AND SENSING APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-434-4

๖  
๐  
๖

ดขหม.....  
ดขทะเบียน..... 33103  
ัน, เดือน, ปี..... 5 ป.ศ. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FUSED-TAPERED SINGLE-MODE FIBERS  
AND SENSING APPLICATIONS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**1999**

**ISBN 974-622-434-4**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 1999**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงและการประยุกต์
นักศึกษา	นายภัทรพงศ์ รักน้อย
รหัสประจำตัว	36064182
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปรีชา อุพาพิน

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา และสร้างคัปเปลอร์แบบหลอมรวม โดยใช้ใยแก้วนำแสงโหมดเดี่ยวสองเส้นประกบติดกัน จากนั้นก็ทำการหลอมรวมด้วยการใช้ก๊าซร้อนออกซิเจน-บิวเทนที่อุณหภูมิ 700-1,000 องศาเซลเซียส แล้วดึงด้วยแท่นเครื่องท่อนำแสงให้ยืดออกตามความยาวที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ การทดสอบอุปกรณ์หลอมรวมนี้ทำได้ด้วยการป้อนแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร เข้าที่ปลายอินพุตด้านหนึ่งของท่อนำแสง ส่วนปลายด้านเอาต์พุตของอุปกรณ์ต่อเข้ากับภาครับสัญญาณซึ่งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ จากหลักการคัปปลิงแสงระหว่างท่อนำแสงทั้งสองทำให้ได้กำลังแสงด้านเอาต์พุตทั้งสองของคัปเปลอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงและระยะการดึงเป็นรูปไซน์ไซคอด ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองมีผลที่สอดคล้องกับผลจากการจำลองเชิงตัวเลข โดยพบว่าในการดึงสำหรับการบิดครั้งแรกนั้นมีค่าเฉลี่ยของระยะการดึงเป็น 4.0 มิลลิเมตร ที่มีผลของการทดลองต่างจากผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขอยู่ 9.55 เปอร์เซ็นต์ การทดสอบอุปกรณ์สำหรับการประยุกต์ใช้งานทำได้โดยการคัปปลิงแสงกับอุปกรณ์หลอมรวมด้วยการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อม แล้วศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังแสงคัปปลิง การศึกษานี้ได้ทำอุปกรณ์เป็นรูปมิลเลอร์สำหรับใช้ในการตรวจรู้ระยะไกล ผลจากการทดสอบด้วยเครื่องโอทีดีอาร์ พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงย้อนกลับจากคูปลิงเปลี่ยนแปลงตามชนิดของของเหลวที่เคลือบโดยรอบท่อนำแสงหลอมรวม ผลการทดสอบนี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ซึ่งสามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้

<b>Thesis Title</b>	Fused-Tapered Single-Mode Fibers and Sensing Applications
<b>Student</b>	Mr. Pattrapong Raknoi
<b>Student ID.</b>	36064182
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	1999
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Preecha Yupapin

### ABSTRACT

This research is the study and fabrication of a single mode tapered fibers. Such a device was fused by using oxygen-butane heat source with temperature range of 700-1,000 ° C , then pulled along the fiber length using computer control system. The device was tested by launching a HeNe laser with wavelength of 632.8 nm into one end of the input fibers. The output ends were connected to the photodetectors where the computer control system was employed. The principle of the device is that the coupling light between two fibers is occurred and observed when light is propagated into the tapered device. The output power is detected and formed the sinusoidal signal waveform. Results of the experimental data have shown good satisfaction with the numerical simulation data, where the average beat-length of 4.0 mm was observed with 9.55 percent of error. In application, the device was submerged into the environment, then the coupling power was detected using OTDR. A loop-mirror fibers was also used to investigate in the experiment whereby the coupling power variation was observed, where the results have shown the potential of using such a device for sensor applications.

# กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จากคณาจารย์ภายในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ดร. ปรีชา ยูพาพิน รศ.ศุวรรณ คุณำราญ ผศ.อนุพงศ์ สรงประภา และ ดร.รัชภาคย์ จิตต์อารี ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำเนื้อหาทางด้านหลักการและทฤษฎีทางแสงด้วยดีเสมอมา ตลอดจนคอยดูแลในเรื่องการเขียนวิทยานิพนธ์ การใช้ภาษาโดยได้รับความเอาใจใส่ตลอดมา ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. ฐิตินัย แก้วแดง และ ดร.ศุภฤกษ์ ศุขวัฒน์ ซึ่งเป็นผู้ตรวจทานเนื้อหาและให้คำแนะนำตลอดจนชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ พันโททวีศักดิ์ บุญรักษา คุณนิศาพร เกียรติไพศาลโสภณ คุณรังสิตา วงษ์สุจิน ร้อยเอกชำนานูย์ ลำเกาพ้อคำ อาจารย์มยุรี กิตติเดชาชาญ และคุณประเมษฐ์ จันทร์เพ็ง ที่กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่ บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ภัทรพงศ์ รักน้อย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	IX
สารบัญภาพ .....	X
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย .....	1
1.1.1 อุปกรณืใยแก้วนำแสง .....	1
1.1.2 คัปเปิลอร์แบบหลอมรวม .....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 การดำเนินงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นของแสงและท่อนำแสง .....	5
2.1 การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลาง .....	5
2.2 สมการของแมกซ์เวล .....	8
2.3 โพลาริเซชันเชิงเส้น .....	9
2.4 สมการพื้นฐานสำหรับท่อนำแสง .....	12
2.5 ใยแก้วนำแสง .....	17
2.5.1 โครงสร้างของใยแก้วนำแสง .....	17
2.5.2 ชนิดของใยแก้วนำแสง .....	17
2.5.3 โหมดแสง .....	19
2.5.4 โหมดแสงในท่อนำแสง .....	21
2.6 ใยแก้วนำแสงที่มีขนาดค้อย ๆ เล็กกลง .....	22
2.7 โหมดแสงในใยแก้วนำแสงแบบเพอะเทิบ .....	24
2.8 สรุปล .....	26

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การคัปปลิงแสงระหว่างท่อนำแสง.....	27
3.1 โหมดแสงภายในท่อนำแสงแบบคู่ขนาน.....	27
3.1.1 ฟังก์ชันคัปปลิงของใยแก้วนำแสงแบบไอเดนติคัล .....	29
3.1.2 ผลรวมของโหมดแสงอันเนื่องมาจากโพราไรเซชัน .....	29
3.1.3 ค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ของโหมดแสง .....	30
3.1.4 ครอสทอล์กกระหว่างใยแก้วนำแสงแบบ ไอเดนติคัล.....	31
3.2 ทฤษฎีโหมดคู่.....	33
3.3 การคัปปลิงแสงระหว่างท่อนำแสงที่มีขนาดค้อย ๆ เล็ก.....	34
3.3.1 ครอสทอล์ก .....	34
3.3.2 ทฤษฎีโหมดคู่สำหรับท่อนำแสงคู่ที่มีขนาดค้อย ๆ เล็ก.....	35
3.4 สัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสง .....	36
3.5 ผลการรบกวนจากตัวแปรภายนอก .....	38
3.5.1 การเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อม .....	38
3.5.2 การรบกวนเนื่องจากแรงภายนอก .....	39
3.6 สรุป.....	42
บทที่ 4 อุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงและการประยุกต์ใช้งาน.....	43
4.1 คัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสง (Fused-tapered Couplers) .....	43
4.1.1 การสร้างคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมชนิด 2×2 ช่องสัญญาณ.....	44
4.1.2 คัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมที่มีรูปแบบเป็นพาราโบลา.....	45
4.1.3 โมเดลของการหลอมรวม.....	46
4.1.4 การคัปปลิงแสงภายในคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม .....	49
4.2 อุปกรณ์แบบลูป.....	49
4.2.1 ลูปมิลเลอร์ .....	50
4.2.2 แบบลูปเรโซเนเตอร์ .....	52
4.3 อุปกรณ์แบบหลอมรวมและการประยุกต์ใช้งานด้านสื่อสาร .....	53
4.3.1 คัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม.....	53

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การมัลติเพล็กซ์ทางแสงและอุปกรณ์แบบหลอมรวม.....	55
4.3.3 อุปกรณ์แบบลูป .....	56
4.4 อุปกรณ์แบบหลอมรวมกับการใช้งานด้านการตรวจวัด.....	56
4.4.1 คัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม.....	56
4.4.2 อุปกรณ์แบบลูป .....	58
4.5 เทคนิคการตรวจวัดแบบ โอทีดีอาร์ .....	59
4.5.1 หลักการของโอทีดีอาร์.....	59
4.5.2 โครงสร้างของโอทีดีอาร์.....	63
4.5.3 ข้อพิจารณาทางปฏิบัติของ โอทีดีอาร์ .....	64
4.6 การใช้โอทีดีอาร์ตรวจสอบคัปเปิลเลอร์.....	66
4.7 การใช้โอทีดีอาร์ตรวจสอบลูปมิลเลอร์ .....	67
4.8 สรุป .....	68
บทที่ 5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	69
5.1 บทนำ.....	69
5.2 การสร้างคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสง.....	69
5.2.1 การสร้างเครื่องหลอมและคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสง .....	69
5.2.2 การทดสอบระบบและการทำงานของเครื่องมือ.....	73
5.2.3 การสร้างและทดสอบ.....	75
5.3 การศึกษาคุณสมบัติบางประการของคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม.....	77
5.3.1 การออกสวิตลิตของกำลังแสง .....	78
5.3.2 การเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสง.....	81
5.3.3 การตอบสนองต่อแรงจากภายนอก .....	82
5.4 การศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบหลอมรวมท่อนำแสง.....	84
5.4.1 การสร้างและศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัด .....	84
5.4.2 การสร้างและตรวจสอบอุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์.....	85
5.4.3 อุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์และการตรวจวัด .....	85

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5 สรุป .....	88
<b>บทที่ 6 ผลของงานวิจัย.....</b>	<b>89</b>
6.1 คัมป์เลเตอร์แบบหกลอมรวม.....	89
6.1.1 ซอฟต์แวร์โซน .....	91
6.1.2 ระยะเวลาในการคั่งขมะหกลอมรวม.....	91
6.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติของท่อนำแสงหกลอมรวม.....	93
6.2.1 การออสซิลเลชันของกำลังแสง.....	93
6.2.2 การเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก.....	95
6.2.3 การศึกษาผลการตอบสนองต่อแรงจากภายนอก .....	96
6.3 ผลการศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบหกลอมรวมท่อนำแสง .....	97
6.3.1 อุปกรณ์ตรวจวัดโดยคัมป์เลเตอร์แบบหกลอมรวม .....	97
6.3.2 อุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์.....	101
6.3.3 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบลูปมิลเลอร์.....	103
6.4 สรุป .....	107
<b>บทที่ 7 บทสรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อไป.....</b>	<b>109</b>
7.1 บทสรุป.....	109
7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	111
7.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป.....	112
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>114</b>
ภาคผนวก ก แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออน .....	116
ภาคผนวก ข อุปกรณ์รับแสงพินโฟโตไดโอด .....	118
ภาคผนวก ค โปรแกรมจำลองเชิงตัวเลข.....	122
ภาคผนวก ง โปรแกรมควบคุมระบบ.....	136

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก จ อุปกรณ์การทดลองและผลการทดลองอื่น ๆ.....	140
ภาคผนวก ฉ รายชื่อผลงานวิจัย.....	145
ประวัติผู้เขียน.....	146



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงรูปแบบต่าง ๆ ของโหมคแสงภายในท่อนำแสง .....	16
6.1 แสดงผลการหาขนาดของซอฟต์แวร์โซนจากหัวก้ำร้อนขนาด 2 มิลลิเมตร .....	91
6.2 แสดงผลการศึกษาระยะบิตของท่อนำแสงหลอมรวม โดยใช้ซอฟต์แวร์โซน เท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร .....	93
6.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงกำลังแสง $P_1$ เมื่อท่อนำแสงหลอมรวมสัมผัสกับ สารชนิดต่าง ๆ .....	96
6.4 แสดงผลการตรวจวัดการสะท้อนกลับของแสงแบบเฟรสนเอล เมื่อจุ่มปลาย ของหัววัดแบบใยแก้วนำแสงลงในสารชนิดต่าง ๆ .....	99
6.5 แสดงผลการทดลองใช้อุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์ที่ L เท่ากับ 6 มิลลิเมตร ในการตรวจจับสารเคมีชนิดต่าง ๆ.....	104



# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสง .....	6
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมวิกฤติและการสะท้อนกลับหมด .....	7
2.3 แสดงการเลี้ยวเบนเมื่อเกิดการสะท้อนกลับหมด .....	8
2.4 แสดงระนาบคลื่นโพลาไรเซชันเชิงเส้น .....	10
2.5 แสดงโพลาไรเซชันของสองคลื่นซึ่งมีเฟสตรงกัน .....	11
2.6 แสดงโครงสร้างทั่วไปของท่อนำแสง .....	12
2.7 ภาพแสดงลักษณะของใยแก้วนำแสง .....	17
2.8 แสดงโครงสร้างของใยแก้วนำแสง .....	18
2.9 แสดงสทิวเรย์ในใยแก้วนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์ .....	20
2.10 แสดงเมอริดิออนัลเรย์ของคลื่นเคลื่อนที่ภายในใยแก้วนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์ .....	21
2.11 แสดงสนามไฟฟ้าต่อเนื่องสำหรับ โหมดนำแสงที่ลำดับต่ำ ๆ ภายในท่อนำแสง แบบระนาบ .....	22
2.12 แสดงโครงสร้างของใยแก้วนำแสงที่มีขนาดค้อย ๆ เล็กกลง .....	24
3.1 แสดงรูปภาคตัดขวางของท่อนำแสงคู่ขนาน .....	28
3.2 แสดงภาพภาคตัดขวางของท่อนำแสงแบบไอเคนติคัลคอมโพสิต .....	29
3.3 แสดงความสมมาตรของโพลาไรเซชันโหมดในท่อนำแสงแบบคอมโพสิต .....	30
3.4 แสดงรูปภาคตัดขวางของท่อนำแสงแบบไอเคนติคัลคอมโพสิต .....	31
3.5 แสดงกราฟของเอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์เมื่อท่อนำแสงแบบไอเคนติคัลถูกบิดไปโดย รอบแกนกลางของท่อนำแสง .....	41
4.1 แสดงการสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมชนิด $2 \times 2$ ช่องสัญญาณ .....	44
4.2 แสดงภาคตัดขวางของท่อนำแสงหลอมรวม .....	45
4.3 แสดงโหมดของการโพลาไรเซชันของแสงภายในท่อนำแสงแบบหลอมรวม .....	46
4.4 แสดงโมเดลของการหลอมรวม .....	48
4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{D_f}{D_i}$ และ $\frac{l}{\Delta z}$ .....	48
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\gamma$ และ $\frac{l}{\Delta z}$ .....	48

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7 ภาพแสดงโครงสร้างของลูปรีโซเนเตอร์ .....	50
4.8 ภาพแสดงโครงสร้างของลูปริลเรอร์ .....	50
4.9 แสดงโครงสร้างของคัปเปิลเลอร์แบบต่าง ๆ .....	54
4.10 แสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์ดับบลิวดีเอ็ม(WDM).....	55
4.11 แสดงการใช้คัปเปิลเลอร์ในการตรวจวัดระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา.....	57
4.12 แสดงการใช้คัปเปิลเลอร์ในการตรวจวัดระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น .....	57
4.13 แสดงหลักการของอุปกรณ์แบบลูปอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ .....	58
4.14 แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบโรสโคปโยแก้วนำแสง .....	59
4.15 แสดงหลักการตรวจวัดโดยเทคนิคทีดีอาร์ .....	60
4.16 แสดงเวลาต่าง ๆ ซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งของการเดินทางของสัญญาณพัลส์ในสายส่ง สัญญาณ .....	61
4.17 แสดงลักษณะของการกระเจิงภายในเส้นใยนำแสง .....	62
4.18 แสดงการสะท้อนกลับของแสงที่บริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางแก้วกับอากาศ.....	62
4.19 แสดง โครงสร้างของโอทีดีอาร์ .....	63
4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสง ที่สะท้อนกลับมาตามความยาวใยแก้ว นำแสง .....	64
4.21 กราฟแสดงสัญญาณที่สะท้อนกลับจากจุดต่าง ๆ ในใยแก้วนำแสง ซึ่งมีลักษณะ ทางกายภาพบนเส้น ใยนำแสงที่แตกต่างกัน .....	65
4.22 แสดงการเชื่อมต่อคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมเข้ากับเครื่องโอทีดีอาร์ .....	66
4.23 แสดงรูปแบบการตรวจวัดแบบเครือข่าย โดยใช้คัปเปิลเลอร์และ โอทีดีอาร์ .....	67
4.24 แสดงการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับเนื่องจากลูปริลเรอร์ .....	68
5.1 แสดงภาพเครื่องมือและอุปกรณ์การสร้างคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสง.....	70
5.2 แสดงภาคินพุดการป้อนลำแสงเลเซอร์เข้าสู่ใยแก้วนำแสง.....	71
5.3 แสดงภาพของแท่นตรึงและอุปกรณ์การดึงใยแก้วนำแสง .....	71
5.4 แสดงภาครับแสงของระบบเครื่องมือหลอมรวมท่อนำแสง.....	72
5.5 แสดงแผนผังการทำงานของ โปรแกรมชื่อ MCOUP.BAS .....	74
5.6 แสดงแผนผังการทำงานของ โปรแกรมย่อยใน โปรแกรมชื่อ BCOUP.BAS .....	76

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.7	แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองสร้างคัปเปลอร์แบบหลอมรวม ..... 77
5.8	แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรม OCO.P.BAS ..... 79
5.9	แสดงการทดลองการเคลื่อนที่แผ่นของเหลวผ่านท่อनाแสงแบบหลอมรวม ..... 80
5.10	แสดงการทดลองการรบกวนการคัปปลิ่งแสงโดยการเปลี่ยนดัชนีหักเหแสง ของสิ่งแวดลอม ..... 80
5.11	แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง การคัปปลิ่งแสงกับดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดลอมภายนอก..... 83
5.12	แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองการตรวจสอบผลของแรงจากภายนอกที่มีต่อการ คัปปลิ่งแสง..... 84
5.13	แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมการจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง การคัปปลิ่งแสงกับดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดลอมภายนอก..... 86
5.14	แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากอุปกรณ์ที่ได้รับ ผลของแรงจากภายนอก..... 87
6.1	แสดงผลการทดลองของการสร้างคัปเปลอร์แสงแบบหลอมรวม ..... 90
6.2	แสดงผลการจำลองเชิงตัวเลขของการทดลองคัปเปลอร์แสงโดยใช้ซอฟต์แวร์ เท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร..... 90
6.3	แสดงผลการจำลองเชิงตัวเลขของการทดลองสร้างคัปเปลอร์แสง โดยใช้ ซอฟต์แวร์เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร..... 92
6.4	แสดงผลการจำลองเชิงตัวเลขของการทดลองสร้างคัปเปลอร์แสง โดยใช้ ซอฟต์แวร์เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ..... 92
6.5	แสดงผลการจำลองเชิงตัวเลข ในการทดลองศึกษาการรบกวนการคัปปลิ่ง แสงตลอดระยะเวลาการหลอมรวม ..... 94
6.6	แสดงผลการทดลองรบกวนการคัปปลิ่งแสงตลอดระยะเวลาการหลอมรวม โดยใช้ ซอฟต์แวร์ 1.2 มิลลิเมตร และระยะเวลาคัปปลิ่งแสงหลอมรวมเท่ากับ 4 มิลลิเมตร..... 94
6.7	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสง $P_1$ และการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเห แสงของสิ่งแวดลอมภายนอก ซึ่งได้จากการจำลองเชิงตัวเลข ..... 95

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.8 แสดงผลการทดลองการตรวจวัดสัดส่วนกำลังแสงเอาต์พุต เทียบกับการ โต้่งงอ ท่อนำแสงเป็นระยะต่าง ๆ.....	97
6.9 แสดงผลการตรวจวัดการสะท้อนกลับของแสง จากปลายด้านเอาต์พุตทั้งสองของ คัปเปิลอร์แสง ตามหลักการสะท้อนของเฟรสเนล .....	98
6.10 แสดงผลการตรวจวัดการสะท้อนกลับแบบเฟรสเนล เมื่อวางหัววัด ไว้ในอากาศ .....	99
6.11 แสดงผลการตรวจวัดการสะท้อนกลับแบบเฟรสเนล เมื่อจุ่มหัววัดลงในอัลกอกฮอลล์ .....	100
6.12 แสดงผลการตรวจวัดการสะท้อนกลับแบบเฟรสเนล เมื่อจุ่มปลายหัววัดลงในน้ำ บริสุทธิ์ .....	100
6.13 แสดงผลการตรวจวัดการสะท้อนกลับแบบเฟรสเนล เมื่อจุ่มปลายหัววัดลงใน กลีเซอรินเข้มข้น .....	101
6.14 แสดงผลการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากลูปมีลเรอร์ด้วยเทคนิค โอทิตีอาร์ .....	102
6.15 แสดงผลการศึกษากำลังแสงย้อนกลับจากลูปเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงดัชนี หักเหแสงของสิ่งแวดล้อมจากภายนอก โดยการจำลองเชิงตัวเลข .....	103
6.16 แสดงผลการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากลูป เมื่อท่อนำแสงหลอมรวมสัมผัสกับ อากาศ .....	105
6.17 แสดงผลการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากลูป เมื่อท่อนำแสงหลอมรวมสัมผัสกับ อัลกอกฮอลล์ .....	105
6.18 แสดงผลการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากลูปเมื่อท่อนำแสงสัมผัสกับน้ำบริสุทธิ์.....	106
6.19 แสดงผลการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากลูป เมื่อท่อนำแสงหลอมรวมสัมผัสกับ กลีเซอริน 50%.....	106
6.20 แสดงผลการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากลูป เมื่อท่อนำแสงหลอมรวมสัมผัสกับ กลีเซอรินเข้มข้น (99%).....	107

# บทที่ 1

## บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและสร้างอุปกรณ์ใยแก้วนำแสงโดยใช้ใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียว ซึ่งมีรายละเอียดในส่วนที่มา วัตถุประสงค์และขั้นตอนการดำเนินงาน ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย ดังต่อไปนี้

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันใยแก้วนำแสงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการนำไปใช้งานด้านการสื่อสาร และการตรวจวัดเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ปราศจากการรบกวนจากคลื่นวิทยุ ไม่ขึ้นกับความแปรปรวนของอากาศ สามารถส่งสัญญาณได้ครั้งละมาก ๆ อีกทั้งยังเหมาะสำหรับงานการตรวจวัดระยะไกลและเครือข่าย เป็นต้น จากข้อดีที่ได้กล่าวมานี้จึงทำให้เทคโนโลยีใยแก้วนำแสงมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และการพัฒนาอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้กับการสื่อสารและการตรวจวัดใยแก้วนำแสงก็ได้มีการพัฒนาควบคู่กันไปอย่างไม่หยุดยั้ง ดังนั้นการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์การสื่อสารและการตรวจวัดแบบใยแก้วนำแสงจึงมีแพร่หลายอยู่โดยทั่วไป

#### 1.1.1 อุปกรณ์ใยแก้วนำแสง

อุปกรณ์ใยแก้วนำแสงนั้นมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น อุปกรณ์การป้อนแสง อุปกรณ์เชื่อมต่อใยแสง อุปกรณ์กรองแสง แหล่งกำเนิดแสง อุปกรณ์รับแสง ฯลฯ ในบรรดาอุปกรณ์ที่กล่าวถึงทั้งหมดนี้ อุปกรณ์เชื่อมต่อใยแสง นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมาก เนื่องจากสามารถเชื่อมต่อใยสัญญาณจากสายสัญญาณเส้นหนึ่งไปยังสายสัญญาณอื่น ๆ ได้เป็นอย่างดี ทำให้การสื่อสารแบบเครือข่ายเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์แบบมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดได้เป็นอย่างดี เช่น อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ อุปกรณ์ตรวจวัดแรงกด และอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือน เป็นต้น ตัวอย่างของอุปกรณ์เชื่อมต่อใยแสงที่สำคัญ คือ อุปกรณ์แยกแสง อุปกรณ์รวมแสง อุปกรณ์เชื่อมต่อ (คอนเน็คเตอร์) และอุปกรณ์แบบลูป เป็นต้น

อุปกรณ์แยกแสงและอุปกรณ์รวมแสง มักทำจากอุปกรณ์ชนิดเดียวกันคือคัปเปลอร์แสง (Optical Couplers) ซึ่งนอกจากจะทำหน้าที่แยกและรวมแสงแล้วยังสามารถประยุกต์เป็นอุปกรณ์อื่น ๆ ได้ เช่น อุปกรณ์มอดูเลตเชิงแสง (Optical Modulators) [1] อุปกรณ์แบบลูป (Optical Loop Devices) [2] อุปกรณ์กรองความถี่แสง (Optical Filters) [3-5] อุปกรณ์มัลติเพลกซ์เชิงแสง (Optical Multiplexers) [3] เลเซอร์ใยแก้วนำแสง (Optical Fiber Laser) [3] และอุปกรณ์ตรวจวัด (Optical Sensors) เป็นต้น [6,7]

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาและเปรียบเทียบการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้ เพื่อใช้ในการเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คัปเปิลเลอร์แสงที่ใช้ในงานสื่อสารปัจจุบันนั้นมีหลายแบบขึ้นกับเทคนิคในการสร้าง เช่น คัปเปิลเลอร์แบบขัด (Polished Couplers) และคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม (Fused-tapered Couplers) เป็นต้น โดยคัปเปิลเลอร์แบบขัดนั้นใช้วิธีการขัดผิวของคัปเปิลเลอร์จนเกือบถึงแกนของใยแก้ว จากนั้นนำมาประกบติดกันเป็นอุปกรณ์ เมื่อนำไปใช้งานโดยให้แสงเคลื่อนที่ผ่านอินพุตเส้นใดเส้นหนึ่งของคัปเปิลเลอร์ ก็จะเกิดการคัปปลิงแสงข้ามช่องสัญญาณไปยังเอาต์พุตของอีกเส้นหนึ่งได้ [3,6] ส่วนคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมนั้นเป็นคัปเปิลเลอร์ที่สร้างขึ้นจากการหลอมใยแก้วนำแสงสองเส้นให้หลอมติดกันและดึงให้ท่อนำแสงหลอมรวมมีขนาดเล็กลง ซึ่งจะเกิดการคัปปลิงแสงได้เช่นกัน [3, 6-18]

### 1.1.2 คัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม

ข้อดีของคัปเปิลเลอร์แสงคือสามารถนำไปประยุกต์ไปทำอุปกรณ์อื่น ๆ ได้อย่างกว้างขวาง ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น แต่เนื่องจากการสร้างคัปเปิลเลอร์มีขั้นตอนยุ่งยากโดยเฉพาะคัปเปิลเลอร์แบบขัด ซึ่งมีขั้นตอนซับซ้อนและต้องอาศัยความละเอียดถูกต้องสูงจึงทำให้คัปเปิลเลอร์แสงแบบนี้มีราคาแพง ส่วนคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมสามารถสร้างได้ง่ายกว่าแบบขัด ทั้งยังมีต้นทุนต่ำและควบคุมการสูญเสียความเข้มแสงได้ง่าย [3] อย่างไรก็ตามทฤษฎีและหลักการของคัปเปิลเลอร์แสงแบบหลอมรวมนี้มีความซับซ้อนมาก [19] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาทฤษฎีและหลักการของคัปเปิลเลอร์แสงแบบหลอมรวมนี้เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้สร้างคัปเปิลเลอร์ และอุปกรณ์หลอมรวมแบบอื่น ๆ เช่น อุปกรณ์แบบลูป [20] และอุปกรณ์ตรวจวัด เป็นต้น โดยจะทำการศึกษากonstruktion และคุณสมบัติของคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม ส่วนวิธีการศึกษาจะใช้การจำลองด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์แล้วนำมาเทียบกับผลการทดลอง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

จากการที่คัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาหลักการและคุณสมบัติของคัปเปิลเลอร์แสงโดยมีวัตถุประสงค์สำคัญ ๆ ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาเทคนิคการสร้างคัปเปิลเลอร์แสงแบบหลอมรวม โดยอาศัยหลักการจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองสร้างคัปเปิลเลอร์แสง

1.2.2 เพื่อทดสอบเทคนิคการสร้างคัปเปิลเลอร์แสง ซึ่งได้ออกแบบสร้างโดยใช้หัวใจความร้อนและใช้สเต็ปมอเตอร์ควบคุมการดึงขมวดหลอมรวม

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของคัปเปิลเลอร์แสงแบบหลอมรวม แล้วนำผลที่ได้ไปเป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงแบบต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และเพื่อประยุกต์ทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด

1.2.4 เพื่อสร้างและศึกษาอุปกรณ์แบบลูป และทำการศึกษากำล้างแสงย้อนกลับจากลูปมิลเลอร์ (Loop Mirror) ด้วยเทคนิคโอทีดีอาร์ (OTDR) ซึ่งอาจจะนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้

1.2.5 เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการใช้อุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด โดยทำการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดจากคัปเปิลเลอร์แสง และอุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์ด้วยเทคนิคโอทีดีอาร์

### 1.3 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในเรื่องการสร้างและศึกษาอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงนี้ เริ่มต้นจากการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีการคัปปลิงแสง โดยใช้หลักการคัปปลิงข้ามช่องสัญญาณในท่อนำแสงคู่ที่มีขนาดค้อย ๆ เล็กกลง ซึ่งมีการแบ่งสัดส่วนกำลังแสงเป็นฟังก์ชันไซน์ไซคอลลกำลังสองของระยะการหลอมรวมคูณกับสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสง โดยมีสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงเป็นฟังก์ชันของโครงสร้างและขนาดของท่อนำแสงหลอมรวม จากการจำลองด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์พบว่าสัดส่วนการคัปปลิงแสงเป็นฟังก์ชันไซน์ไซคอลลของระยะการคัปปลิงแสงหลอมรวมท่อนำแสง เมื่อออกแบบการทดลองโดยการหลอมและคัปปลิงท่อนำแสงเป็นระยะทางต่าง ๆ และนำกราฟที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกันจะได้ผลสอดคล้องกัน การทดลองนี้ทำให้สามารถหาระยะการคัปปลิงที่เหมาะสมในการสร้างคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมได้ และนำไปศึกษาคุณสมบัติการคัปปลิงแสง ตลอดจนประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้

การศึกษาคูสมบัติการคัปปลิงแสงแบ่งออกเป็นการศึกษาคูสมบัติภายในของคัปเปิลเลอร์แสง และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการคัปปลิงแสงอันเนื่องมาจากตัวแปรภายนอก การศึกษาคูสมบัติภายในของคัปเปิลเลอร์แสงเริ่มจากการรบกวนการคัปปลิงแสง ณ จุดต่าง ๆ ตามความยาวของท่อนำแสงหลอมรวม โดยใช้แผ่นของเหลวเคลื่อนที่ไปตามระยะความยาวของท่อนำแสงหลอมรวม ซึ่งผลจากการคัปปลิงแสงไม่เท่ากันในแต่ละจุดตลอดระยะความยาวของการหลอมรวมจะทำให้สัดส่วนกำลังแสงที่วัดได้ตรงเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงตามระยะการเคลื่อนที่ของแผ่นของเหลว ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกันกับการจำลองเชิงตัวเลข ส่วนการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการคัปปลิงแสงอันเนื่องมาจากตัวแปรภายนอกได้ทำการศึกษาโดยการจำลองของกำลังแสงเอาต์พุตด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ขณะมีการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงภายนอกท่อนำแสงหลอมรวมจาก 1.0 ถึง 1.46 เพื่อนำผลนี้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อมีการเปลี่ยนดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมรอบท่อนำแสงแบบหลอมรวม 3 ค่า คือ 1.0 1.3 และ 1.47 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเคลื่อนปลายทั้งสองด้านของท่อนำแสงหลอมรวมของคัปเปิลเลอร์แสงให้โค้งเข้าหากันโดยใช้สเต็ปมอเตอร์ซึ่งในแต่ละสแต็ปจะทำการบันทึกกำลังแสงเอาต์พุตทั้งสองของคัปเปิลเลอร์แสงเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงการคัปปลิงแสงอันเนื่องจากการโค้งงอ

ส่วนการศึกษาการประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดนั้น ได้สร้างอุปกรณ์แบบหลอมรวมชนิด  
 ปลูกโดยการทำให้ปลายเอาต์พุตทั้งสองของคัปเปิลเลอร์แสงเชื่อมติดกัน เพื่อให้มีโหมดแสงเคลื่อนที่  
 ผ่านคัปเปิลเลอร์แสงทางอินพุตแล้ววนกลับมาผ่านคัปเปิลเลอร์แสงอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะมีกำลังแสงบาง  
 ส่วนย้อนกลับเข้าสู่ปลายอินพุตเดิม เมื่อใช้เครื่อง โอทีดีอาร์ตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากปลูกจะพบ  
 ว่ากำลังแสงย้อนกลับจากปลูกสามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค โอทีดีอาร์ เมื่อทดลองเปลี่ยนแปลงดัชนี  
 หักเหแสงรอบท่อนำแสงหลอมรวมของปลูกมิลเลอร์ 3 ค่า พบว่ากำลังแสงย้อนกลับจากปลูกมีค่าแตก  
 ต่างกัน ส่วนการศึกษาการตรวจวัดแรงโดยปลูกมิลเลอร์ได้ทำเช่นเดียวกันกับการตรวจวัดแรงโดยคัป  
 เปิลเลอร์แสง แต่เปลี่ยนเป็นใช้เทคนิค โอทีดีอาร์บันทึกผล ซึ่งพบว่าแสงจากภายนอกที่ทำให้ท่อนำ  
 แสงโค้งงอจะทำให้กำลังแสงย้อนกลับเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน นอกจากนี้ยังได้ทดลองใช้คัปเปิลเลอร์  
 แสงเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด โดยใช้หลักการสะท้อนกลับของแสงที่ปลายด้านเอาต์พุตตามหลักการ  
 สะท้อนกลับของเฟรสนเนล ซึ่งเมื่อตรวจวัดโดยเทคนิคของ โอทีดีอาร์ พบว่ากำลังแสงสะท้อนกลับ  
 เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำปลายด้านเอาต์พุตของคัปเปิลเลอร์จุ่มลงในสารละลายชนิดต่าง ๆ

#### 1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางส่งเสริมและพัฒนาเทคโนโลยีสื่อสารและการตรวจวัดที่ใช้  
 อุปกรณ์ใยแก้วนำแสง ด้วยการพัฒนาด้านแบบอุปกรณ์สื่อสารและอุปกรณ์การตรวจวัดขึ้นใช้เอง  
 โดยเริ่มจากการสร้างคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์แบบหลอม  
 รวมอื่น ๆ เช่น อุปกรณ์แบบปลูกและอุปกรณ์ตรวจวัด เป็นต้น ทั้งยังสามารถประยุกต์อุปกรณ์ดัง  
 กล่าวนี้ให้ใช้งานร่วมกับระบบตรวจวัดด้วยเทคนิค โอทีดีอาร์ (OTDR) หรือเครื่อง โอทีดีอาร์ได้ จึง  
 ทำให้สามารถประยุกต์ไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางขึ้น อีกทั้งยังได้พัฒนาด้านแบบของอุปกรณ์ตรวจ  
 วัดแบบใยแก้วนำแสงขึ้นใช้กับระบบตรวจวัด โอทีดีอาร์ นอกจากนี้ยังได้พัฒนาทักษะในการเขียน  
 โปรแกรมควบคุมการทำงานของคอมพิวเตอร์ และได้เรียนรู้การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับกล  
 ไกของมอเตอร์และอุปกรณ์ตรวจวัดทางอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ซึ่งประกอบอยู่ในระบบการหลอม  
 และดึงท่อนำแสง ตลอดจนได้เรียนรู้เทคนิคการป้อนแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสง และได้ศึกษาวิธีการใช้  
 งานอุปกรณ์ทางแสงอื่น ๆ เช่น แหล่งกำเนิดแสง และอุปกรณ์รับแสง เป็นต้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีเบื้องต้นของแสงและท่อนำแสง

อุปกรณ์แบบหลอรวมท่อนำแสงที่จะสร้างและศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นอุปกรณ์ที่อธิบายด้วยหลักการและทฤษฎีทางแสง ดังนั้นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานทางแสง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาท่อนำแสงในรูปแบบต่าง ๆ รวมทั้งท่อนำแสงที่เป็นองค์ประกอบของอุปกรณ์แบบหลอรวม ซึ่งเป็นท่อนำแสงที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อย่างไรก็ตามการกล่าวถึงทฤษฎีทางแสงให้ครอบคลุมเนื้อหาทั้งหมดนั้น ไม่สามารถทำได้ ดังนั้นผู้เขียนจึงเลือกทฤษฎีส่วนที่สำคัญ ๆ และเกี่ยวข้องโดยตรงกับการศึกษาอุปกรณ์แบบหลอรวมท่อนำแสงเท่านั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังจะกล่าวถึงต่อไป

#### 2.1 การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลาง

เมื่อกล่าวถึงการเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางต่าง ๆ นั้นต้องคำนึงถึงตัวแปรสำคัญ คือ ดัชนีหักเหแสง (Refractive Index) ซึ่งเป็นตัวแปรที่แสดงอัตราส่วนระหว่างความเร็วของแสงในตัวกลางนั้น ๆ เทียบกับความเร็วของแสงในสุญญากาศ ถ้ากำหนดให้ความเร็วของแสงในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $c$  และความเร็วของแสงในตัวกลางต่าง ๆ มีค่าเป็น  $v$  ดังนั้นจะได้ค่าดัชนีหักเหแสงสำหรับตัวกลางแสงนั้น ๆ สัมพันธ์กับสมการดังนี้

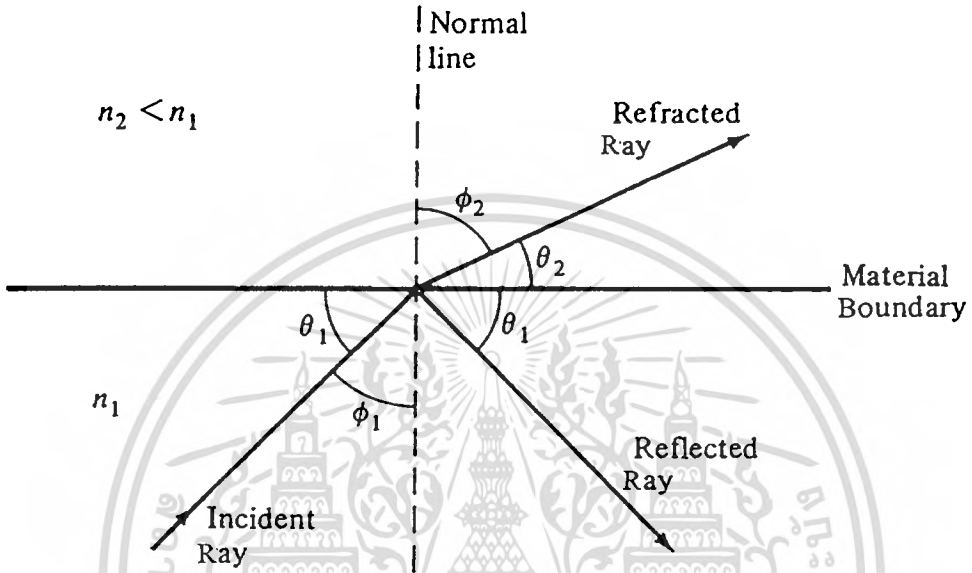
$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

ค่าดัชนีหักเหแสงของแต่ละตัวกลางมีค่าไม่เท่ากันซึ่งแตกต่างกันตามชนิดของตัวกลางแสง เช่น ดัชนีหักเหแสงของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 1.00 ดัชนีหักเหแสงของน้ำมีค่าเท่ากับ 1.33 ดัชนีหักเหแสงของแก้วมีค่าเท่ากับ 1.5 และดัชนีหักเหแสงสำหรับเพชรมีค่าเท่ากับ 2.42 เป็นต้น เมื่อพิจารณาในส่วนที่การสะท้อนและการหักเหแสงที่รอยต่อของตัวกลางแสง พบว่าแสงที่เป็นวัสดุที่ทำจากสารไดอิเล็กตริก (Dielectric Material) ดังรูปที่ 2.1 กล่าวคือเมื่อแสงเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อของตัวกลางแสงที่มีดัชนีหักเหแสงแตกต่างกันสองตัวกลาง ( $n_1, n_2$ ) พบว่าบางส่วนของแสงสะท้อนกลับไปในตัวกลางแรก ( $n_1$ ) และแสงส่วนที่เหลือจะหักเหผ่านไปยังตัวกลางแสงที่สอง ( $n_2$ ) ซึ่งในที่นี้กำหนดให้  $n_2 < n_1$  การหักเหของแสงเกิดขึ้นเนื่องจากผลต่างของความเร็วแสงในตัวกลางทั้งสอง ความสัมพันธ์ดังกล่าวมานี้เรียกว่า " กฎของสเนล " (Snell's law) ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการหักเหแสงและดัชนีหักเหแสงดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $n_1$  และ  $n_2$  คือดัชนีหักเหแสงในตัวกลางแสงที่ 1 และตัวกลางแสงที่ 2 ตามลำดับ  $\phi_1$  คือมุมที่แนวทางการเดินทางของแสงตกกระทบเทียบกับแนวตั้งฉากกับรอยต่อตัวกลางแสง และ  $\phi_2$  คือมุมหักเหแสงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของตัวกลางแสง

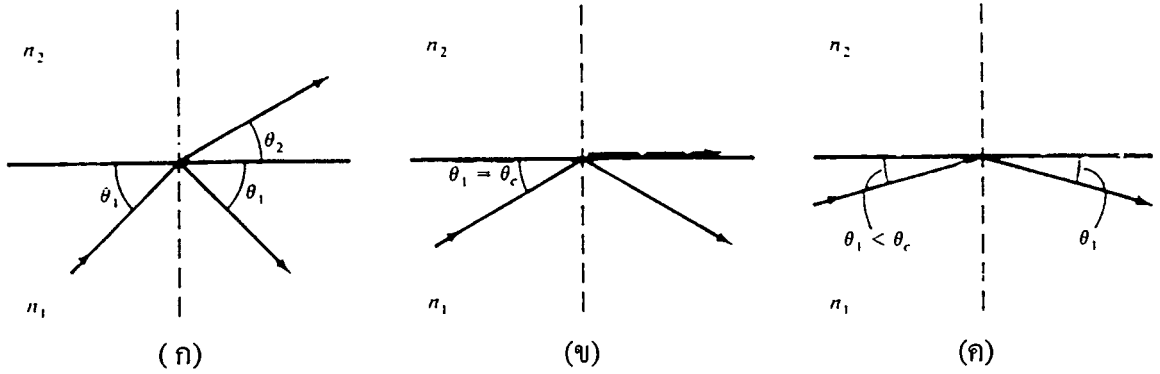


**รูปที่ 2.1** แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสงที่รอยต่อของสองตัวกลาง เมื่อ Incident Ray คือรังสีตกกระทบ Normal Line คือเส้นที่ตั้งฉากกับรอยต่อของตัวกลาง ส่วน Material Boundary คือขอบเขตรอยต่อของตัวกลาง

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างมุมสะท้อนแสงและมุมตกกระทบได้แสดงไว้ดังนี้

$$n_1 \cos \theta_1 = n_2 \cos \theta_2 \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  คือมุมตกกระทบและมุมสะท้อน ในกรณีที่มุมของการสะท้อนทำให้แสงเคลื่อนที่กลับเข้าสู่ตัวกลางแสงเดิมเรียกว่าการสะท้อนกลับภายใน (Internal Reflection) ส่วนการที่แสงเคลื่อนที่จากตัวกลางเดิมผ่านรอยต่อไปยังอีกตัวกลางหนึ่งเรียกว่า การสะท้อนออกสู่ภายนอก (External Reflection)

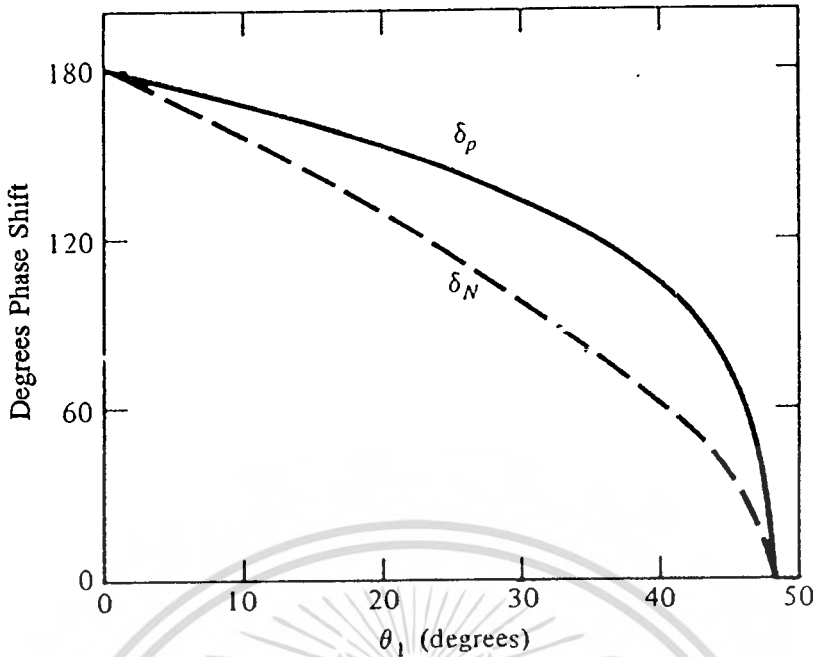


รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมวิกฤติ และการสะท้อนกลับหมดที่รอยต่อระหว่างแก้วกับอากาศ

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงผิวระนาบของแก้ว ( $n_1$ ) ในอากาศ ( $n_2$ ) พบว่าทางเดินของแสงจะเบนเข้าหาผิวระนาบของแก้วในขณะที่เคลื่อนผ่านรอยต่อ ซึ่งสอดคล้องกับกฎของสเนล ถ้ามุมตกกระทบ  $\theta_1$  ลดลงจนกระทั่งแนวทางเดินของแสงในอากาศขนานไปกับผิวระนาบของแก้วดังรูปที่ 2.2(ข) ที่จุดนี้เราเรียกว่า "มุมวิกฤติของมุมตกกระทบ" เมื่อมุมตกกระทบมีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤติจะทำให้แสงเกือบทั้งหมดเกิดการสะท้อนกลับเข้าสู่ภายในตัวกลางเดิมที่เป็นแก้ว ดังรูปที่ 2.2(ค) ซึ่งจะเรียกว่า " การสะท้อนกลับหมด " (Total Internal Reflection) จากหลักการดังกล่าวสามารถหามุมวิกฤติได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\theta_c = \arccos \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

สมการ (2.4) นี้แสดงให้เห็นว่ามุมวิกฤติสัมพันธ์กับดัชนีหักเหแสงของตัวกลางทั้งสอง หรืออาจกล่าวได้ว่ามุมวิกฤติสัมพันธ์กับความเร็วของแสงในตัวกลางทั้งสอง เมื่อแสงเกิดการสะท้อนกลับหมดจะทำให้เฟส (Phase) ของแสงเปลี่ยนแปลงไปเป็นมุม  $\delta$  การเปลี่ยนแปลงของเฟสดังกล่าวนี้ขึ้นกับมุมตกกระทบ  $\theta_1$  ซึ่งสอดคล้องกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างองศาของการเลื่อนเฟส (Degrecphase Shift) กับ  $\theta_1$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการเลื่อนเฟสเมื่อเกิดการสะท้อนกลับหมดที่องค์ประกอบตามแนวแกนปกติ ( $\delta_N$ ) และตามแนวแกนขนาน ( $\delta_\rho$ ) เมื่อเทียบกับระนาบของการตกกระทบ

## 2.2 สมการของแมกซ์เวลล์

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรมของแสงจึงต้องพิจารณาถึงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นสำคัญ และสมการนิยมนำมาอธิบายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงในตัวกลางต่าง ๆ นั่นคือสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) เนื่องจากสมการนี้เหมาะสำหรับอธิบายพฤติกรรมของแสงในตัวกลางแสงที่เป็นแบบไอโซโทรปิก ไดอิเล็กตริก (Isotropic Dielectric Material) เช่น แก้วและพลาสติก เป็นต้น ซึ่งสมการของแมกซ์เวลล์มีรูปแบบดังนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.5(ก))$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.5(ข))$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (2.5(ค))$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.5(ง))$$

เมื่อ  $\vec{E}$  คือสนามไฟฟ้า  $\vec{H}$  คือสนามแม่เหล็ก  $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$  และ  $\vec{B} = \mu\vec{H}$  โดยที่ตัวแปร  $\epsilon$  คือสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้า (Permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ส่วนตัวแปร  $\mu$  คือค่าซึมซาบทางไฟฟ้า (Permeability) ของตัวกลางแสง จากสมการ (2.5) เมื่อหาค่าเคิร์ล (Curl) ของพจน์ทางด้านขวามือสมการ (2.5(ก)) และแทนด้วยสมการ (2.5(ข)) จะได้ความสัมพันธ์ซึ่งอธิบาย สมการของคลื่น (Wave Equations) ดังนี้

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu \frac{\partial (\nabla \times \vec{H})}{\partial t} = -\epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

เมื่อใช้หลักการของเวกเตอร์ไอดี้นิตี (Vector Identity) กับสมการ (2.6) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \quad (2.7)$$

จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (2.5(ค)) ซึ่งจะทำให้  $\nabla \cdot \vec{E} = 0$  เมื่อแทนค่าลงไป ในสมการ (2.6) จะได้สมการอนุพันธ์สำหรับสนามไฟฟ้าของแสงดังนี้

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

ในกรณีของสนามแม่เหล็กก็เช่นเดียวกันเราสามารถหาค่าเคิร์ลของพจน์ทางขวามือของสมการ (2.5(ข)) และใช้วิธีการตามลำดับขั้นตอนคล้ายกันกับกรณีของสนามไฟฟ้า และสุดท้ายจะได้สมการอนุพันธ์สำหรับสนามแม่เหล็กดังนี้

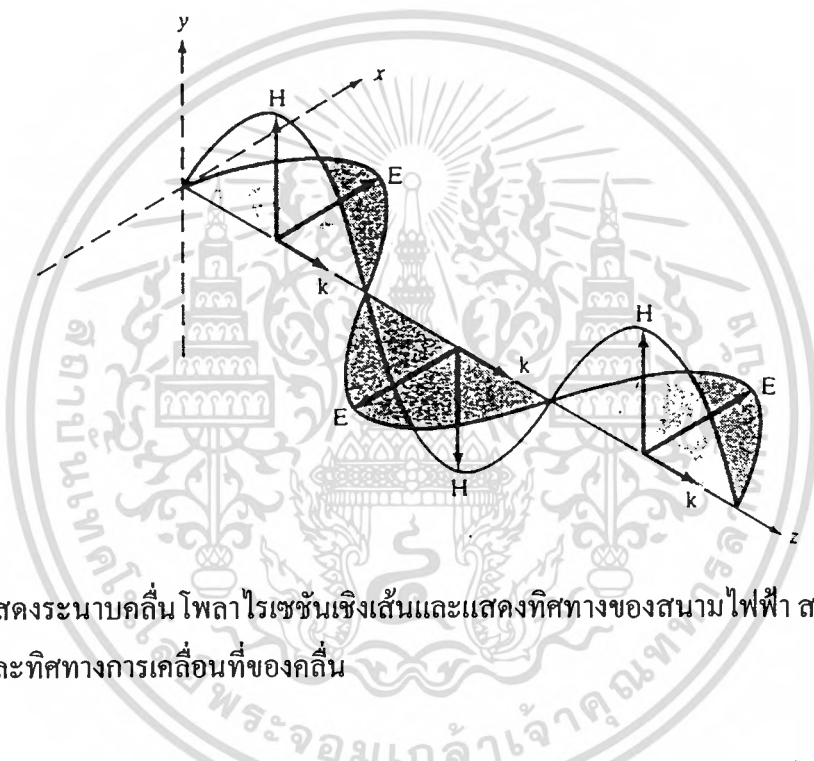
$$\nabla^2 \vec{H} = \epsilon\mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

สมการ (2.8) และ (2.9) เรียกว่าสมการมาตรฐานสำหรับสมการอนุพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้จะได้นำไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาสมการอนุพันธ์สำหรับท่อนำแสง

### 2.3 โพลาริเซชันเชิงเส้น

โดยทั่วไปสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นปริมาณเวกเตอร์จะถูกกำหนดให้มีองค์ประกอบตามแนวแกนสำคัญ ๆ 3 แนวแกนด้วยกันคือ แนวแกนตามทิศทางของสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  แนวแกนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามทิศทางของสนามแม่เหล็ก  $\vec{H}$  และแนวแกนตามทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่น  $\vec{k}$  ซึ่งแต่ละแนวแกนจะตั้งฉากซึ่งกันและกันดังรูปที่ 2.4 โดยที่  $\vec{E}$  และ  $\vec{H}$  มีทิศตั้งฉากกันและตั้งฉากกับทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่น โดยเรียกคลื่นที่มีคุณสมบัติแบบนี้ว่าคลื่นตามขวาง (Transverse Wave) และเรียกเซตของ เวกเตอร์  $\vec{E}$   $\vec{H}$  และ  $\vec{k}$  ดังกล่าวนี้ออร์โทโกนัลเวกเตอร์ (Orthogonal Vectors) สิ่งที่น่าสังเกตอีกประการหนึ่งของคลื่นตามรูปที่ 2.4 คือ ระนาบของคลื่นจะมีสนามไฟฟ้าชี้ไปตามทิศทางของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย  $\vec{e}_x$  เสมอ ซึ่งเรียกคลื่นที่มีทิศของสนามไฟฟ้าชี้ไปในทิศทางเดียวเสมอ ๆ นี้ว่า “ คลื่นที่มีโพลาไรเซชันเชิงเส้น ” (Linearly Polarized) และเรียกคลื่นตามรูปที่ 2.4 นี้ว่า โพลาไรเซชันเชิงเส้นที่ประกอบด้วย โพลาไรเซชันเวกเตอร์  $\vec{e}_x$



รูปที่ 2.4 แสดงระนาบคลื่น โพลาไรเซชันเชิงเส้นและแสดงทิศทางของสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่น

ในการศึกษาสถานภาพทางโพลาไรเซชันเชิงเส้นจะใช้การพิจารณาโพลาไรเซชันเชิงเส้นของคลื่นที่มีโพลาไรเซชันเวกเตอร์เป็นออร์โทโกนัลซึ่งกันและกัน แต่จะเป็นอิสระจากกันเช่น  $\vec{e}_x$  และ  $\vec{e}_y$  เป็นต้น โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างของสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรเซชันเชิงเส้นในแนวแกน  $y$  ดังนี้

$$\vec{E}_y(z,t) = \vec{e}_y E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\delta$  คือการเปลี่ยนแปลงเฟสสัมพัทธ์ และมีความเร็วเชิงมุมเป็น  $\omega = 2\pi\nu$  โดยที่  $\nu$  คือความถี่ของคลื่นแสง  $\vec{k}$  คือขนาดของเวกเตอร์ของคลื่นโดยที่  $k = 2\pi/\lambda$  และเรียกกันโดยทั่วไปว่าค่าคงที่สำหรับคลื่นเคลื่อนที่  $\lambda$  คือความยาวคลื่นแสง ส่วน  $\vec{e}_y$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นในแนวแกน  $y$   $E_{oy}$  คือขนาดแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าในแนวแกน  $y$   $z$  คือระยะทาง และ  $t$  คือเวลา เมื่อพิจารณาสถานภาพความเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นจากออร์โทโกนัลเวกเตอร์จะพบว่า

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_x(z,t) + \vec{E}_y(z,t) \quad (2.11)$$

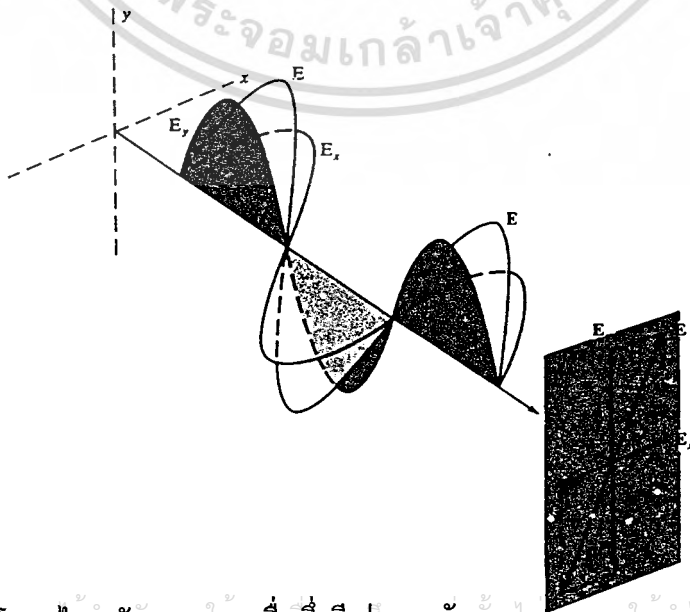
ถ้าค่า  $\delta$  ในสมการของ  $\vec{E}_x(z,t)$  และ  $\vec{E}_y(z,t)$  มีค่าเป็นศูนย์หรือเป็นจำนวนเท่าของ  $2\pi$  แล้วคลื่นทั้งสองจะมีเฟสตรงกันและจะส่งผลให้สมการ (2.11) เป็นสมการของคลื่นที่มีเวกเตอร์ของ โพลาไรเซชันเชิงเส้นซึ่งทำมุมกันตามสมการดังนี้

$$\theta = \arctan \frac{\vec{E}_{oy}}{\vec{E}_{ox}} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $\theta$  คือมุมของโพลาไรเซชันเวกเตอร์ซึ่งเทียบกับเวกเตอร์  $\vec{e}_x$  และขนาดของ  $\vec{E}$  คือ

$$|\vec{E}| = (E_{ox}^2 + E_{oy}^2)^{1/2} \quad (2.13)$$

ในกรณีที่กล่าวถึงข้างต้นนี้สามารถแสดงภาพของระนาบคลื่นและเวกเตอร์ลิฟท์ของโพลาไรเซชันเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะพบว่ามีสองระนาบคลื่นที่เป็นออร์โทโกนัลกัน และสามารถรวมกันเป็นคลื่นที่มีโพลาไรเซชันเชิงเส้นแบบอาบีทารี (Arbitrary Linearly Polarized Wave) โดยอาจแยกออกได้เป็น 2 ระนาบคลื่นที่มีออร์โทโกนัลกันและมีเฟสตรงกัน



เอกสารรูปที่ 2.5 แสดงโพลาไรเซชันของสองคลื่นซึ่งมีเฟสตรงกันนั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

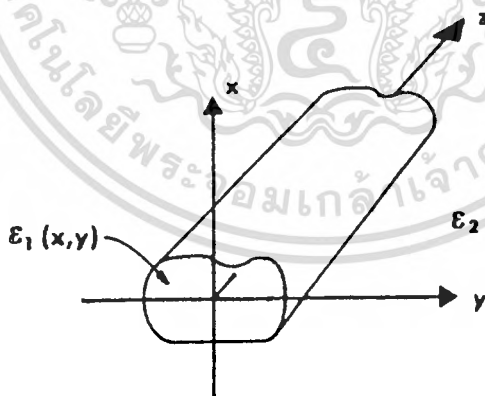
## 2.4 สมการพื้นฐานสำหรับท่อนำแสง

ที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นเป็นการกล่าวถึงการเคลื่อนที่ของแสงในบริเวณที่ไม่มีขอบเขตจำกัด (Free Space) พฤติกรรมต่าง ๆ ของแสงจึงเป็นไปแบบอุดมคติ แต่การเคลื่อนที่ของแสงภายในท่อนำแสงต่าง ๆ หรือในตัวกลางที่มีขอบเขตจำกัดนั้นพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของแสงแตกต่างไปจากการเคลื่อนที่ของแสงที่ไม่มีขอบเขตจำกัด ดังนั้นในหัวข้อต่อจากนี้จะขอกกล่าวถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ และคุณลักษณะของคลื่นแสงที่เคลื่อนที่ภายในขอบเขตจำกัดแบบต่าง ๆ เช่น ในท่อนำแสงแบบระนาบและท่อนำแสงแบบทรงกระบอก หรือใยแก้วนำแสง ตลอดจนท่อนำแสงซึ่งมีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น

เพื่อพิจารณาท่อนำแสงที่มีโครงสร้างแบบทั่วไปดังรูปที่ 2.6 จะพบว่าท่อนำแสงมีขอบเขตจำกัดทั้งในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ส่วนในแนวแกน  $z$  ไม่ถูกกำหนดขอบเขตจำกัด ซึ่งในที่นี้จะสมมติว่าการเคลื่อนที่ของคลื่นมีทิศทางตามแกน  $z$  สมมติว่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นที่เคลื่อนที่ภายในท่อนำแสงนี้เป็น  $\vec{E}$  และ  $\vec{H}$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลของค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่คลื่น (Propagation Constant)  $\beta$  และระยะทางตามแนวแกน  $z$  ดังนี้

$$\vec{E} = \vec{E}_0(x, y)e^{-j\beta z} \quad (2.14)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0(x, y)e^{-j\beta z} \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างทั่วไปของท่อนำแสงที่มีทิศการเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน  $z$

เมื่อนำสมการ (2.14) และ (2.15) แทนค่าลงในสมการของแมกซ์เวลล์จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \bar{H}_y}{\partial z} \right) \hat{a}_x + \left( \frac{\partial \bar{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial x} \right) \hat{a}_y + \left( \frac{\partial \bar{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \bar{H}_x}{\partial y} \right) \hat{a}_z \\ = \varepsilon \frac{\partial \bar{E}_x}{\partial t} \hat{a}_x + \varepsilon \frac{\partial \bar{E}_y}{\partial t} \hat{a}_y + \varepsilon \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial t} \hat{a}_z \end{aligned} \quad (2.16)$$

และ

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \bar{E}_y}{\partial z} \right) \hat{a}_x + \left( \frac{\partial \bar{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial x} \right) \hat{a}_y + \left( \frac{\partial \bar{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \bar{E}_x}{\partial y} \right) \hat{a}_z \\ = -\mu \frac{\partial \bar{H}_x}{\partial t} \hat{a}_x - \mu \frac{\partial \bar{H}_y}{\partial t} \hat{a}_y - \mu \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial t} \hat{a}_z \end{aligned} \quad (2.17)$$

เนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลา  $e^{j\omega t}$  ดังนั้นจึงสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังกล่าวนี้เทียบกับเวลา  $t$  และระยะทางตามแนวแกน  $z$  ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \bar{E}_x}{\partial t} = j\omega \bar{E}_x, \quad \frac{\partial \bar{E}_y}{\partial t} = j\omega \bar{E}_y, \quad \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial t} = j\omega \bar{E}_z \quad (2.18(ก))$$

$$\frac{\partial \bar{H}_x}{\partial t} = j\omega \bar{H}_x, \quad \frac{\partial \bar{H}_y}{\partial t} = j\omega \bar{H}_y, \quad \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial t} = j\omega \bar{H}_z \quad (2.18(ข))$$

$$\frac{\partial \bar{E}_y}{\partial z} = -j\beta \bar{E}_y, \quad \frac{\partial \bar{E}_x}{\partial z} = -j\beta \bar{E}_x \quad (2.18(ค))$$

$$\frac{\partial \bar{H}_y}{\partial z} = -j\beta \bar{H}_y, \quad \frac{\partial \bar{H}_x}{\partial z} = -j\beta \bar{H}_x \quad (2.18(ง))$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.18) ลงในสมการ (2.16) และ (2.17) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\frac{\partial \bar{H}_z}{\partial y} + j\beta \bar{H}_y = j\omega \varepsilon \bar{E}_x \quad (2.19(ก))$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-j\beta\bar{H}_x - \frac{\partial\bar{H}_z}{\partial x} = j\omega\varepsilon\bar{E}_y, \quad (2.19(\text{ข}))$$

$$\frac{\partial\bar{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial\bar{H}_x}{\partial y} = j\omega\varepsilon\bar{E}_z \quad (2.19(\text{ค}))$$

$$\frac{\partial\bar{E}_z}{\partial y} + j\beta\bar{E}_y = -j\omega\mu\bar{H}_x \quad (2.20(\text{ก}))$$

$$-j\beta\bar{E}_x - \frac{\partial\bar{E}_z}{\partial x} = -j\omega\mu\bar{H}_y \quad (2.20(\text{ข}))$$

$$\frac{\partial\bar{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial\bar{E}_x}{\partial y} = -j\omega\varepsilon\bar{H}_z \quad (2.20(\text{ค}))$$

การแทนค่าสมการ (2.20(ข)) ลงในสมการ (2.19(ก)) จะได้ผลลัพธ์คือ สมการของ  $\bar{E}_x$  ใน  
เทอมของ  $\bar{E}_z$  และ  $\bar{H}_z$  ดังนี้

$$j\omega\varepsilon\bar{E}_x = \frac{\partial\bar{H}_z}{\partial y} + \frac{j\beta}{-j\omega\mu} \left( -j\beta\bar{E}_x - \frac{\partial\bar{E}_z}{\partial x} \right) \quad (2.21)$$

หรือ

$$\left( j\omega\varepsilon + \frac{-j\beta^2}{\omega\mu} \right) \bar{E}_x = \frac{\partial\bar{H}_z}{\partial y} + \frac{\beta}{\omega\mu} \frac{\partial\bar{E}_z}{\partial x} \quad (2.22)$$

คูณทั้งสองข้างของสมการด้วย  $-j\omega\mu$  จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$(\omega^2\mu\varepsilon - \beta^2)\bar{E}_x = -j \left( \omega\mu \frac{\partial\bar{H}_z}{\partial y} + \beta \frac{\partial\bar{E}_z}{\partial x} \right) \quad (2.23)$$

ถ้ากำหนดให้  $K^2 = k^2 + \beta^2$  เมื่อ  $k^2 = \omega^2\mu\varepsilon$  จะได้ผลลัพธ์เป็นสมการของสนามตาม  
แนวแกน x ดังนี้

$$\bar{E}_x = \frac{-j}{K^2} \left( \omega\mu \frac{\partial\bar{H}_z}{\partial y} \right) + \beta \frac{\partial\bar{E}_z}{\partial x} \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันถ้าแทนสมการ (2.19(ข)) ลงใน (2.20(ก)) และใช้วิธีคล้ายกับที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะได้ผลลัพธ์เป็นสมการของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน  $y$  ดังนี้

$$\bar{E}_y = \frac{-j}{K^2} \left( \beta \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial y} - \omega \mu \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial x} \right) \quad (2.25)$$

ในกรณีของสนามแม่เหล็กในแนวแกน  $x$  จะใช้สมการ (2.20(ก)) แทนลงในสมการ (2.19(ข)) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\bar{H}_x = \frac{-j}{K^2} \left( \beta \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial x} - \omega \varepsilon \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial y} \right) \quad (2.26)$$

ส่วนในกรณีของสนามแม่เหล็กในแกน  $y$  จะใช้สมการ (2.20(ข)) แทนลงในสมการ (2.19(ก)) จะได้

$$\bar{H}_y = \frac{-j}{K^2} \left( \beta \frac{\partial \bar{H}_z}{\partial y} + \omega \varepsilon \frac{\partial \bar{E}_z}{\partial x} \right) \quad (2.27)$$

สมการ (2.24) ถึง (2.27) เป็นสมการของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวแกน  $z$  และสอดคล้องกับความต้องการศึกษาสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นแสงตามแนวแกน  $z$  ดังนั้นเมื่อแทนค่า  $\bar{H}_x$  และ  $\bar{H}_y$  ลงในสมการ (2.19(ค)) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\frac{-j}{K^2} \beta \frac{\partial^2 \bar{H}_z}{\partial x \partial y} - \frac{j}{K^2} \omega \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{E}_z}{\partial x^2} + \frac{j}{K^2} \beta \frac{\partial^2 \bar{H}_z}{\partial x \partial y} - \frac{j}{K^2} \omega \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{E}_z}{\partial y^2} = j \omega \varepsilon \bar{E}_z \quad (2.28)$$

โดยการคูณด้วย  $jK^2 / \omega \varepsilon$  ทั้งสองข้างสมการจะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \bar{E}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{E}_z}{\partial y^2} + K^2 \bar{E}_z = 0 \quad (2.29)$$

และโดยวิธีคล้ายกันคือแทนค่า  $\bar{E}_x$  และ  $\bar{E}_y$  ในสมการ (2.24) และ (2.25) ลงในสมการ (2.20(ค)) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial^2 \bar{H}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{H}_z}{\partial y^2} + K^2 \bar{H}_z = 0 \quad (2.30)$$

สมการ (2.29) และ (2.30) เป็นสมการอนุพันธ์ของคลื่นแสงภายในท่อนำแสง ซึ่งเรียกว่า สมการพื้นฐานสำหรับท่อนำแสง และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\nabla_T^2 \bar{E}_z + K^2 \bar{E}_z = 0 \quad (2.31)$$

$$\nabla_T^2 \bar{H}_z + K^2 \bar{H}_z = 0 \quad (2.32)$$

เมื่อ  $\nabla_T$  คือลาปลาเซียนโอเปอเรเตอร์ตามแนวขวาง (Transverse Laplacian Operator) โดยที่

$$\nabla_T^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (2.33)$$

สมการ (2.31) และ (2.32) สามารถแปลงไปใช้กับโคออร์ดิเนตของทรงกระบอกได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามสิ่งที่น่าสนใจในสมการทั้งสองนี้ คือคำตอบของสมการทั้งสองจะไม่คาบเกี่ยวกันตามแนวแกน  $z$  และการคาบเกี่ยวกันจะเกิดขึ้นได้ที่ขอบเขตรอบท่อนำแสงเท่านั้น ซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะท่อนำแสงแบบทรงกลมเท่านั้น และถ้าที่ขอบเขตโคจรของท่อนำแสงไม่เกิดการคับปลิงกันระหว่างสนามทั้งสองจะสามารถหาโหมดของคลื่นแสงด้วยเงื่อนไข  $\bar{E}_z = 0$  หรือ  $\bar{H}_z = 0$  ซึ่งก็คือ TE (Transverse Electric Mode) หรือ TM (Transverse Magnetic Mode) โหมดตามลำดับ นอกจากนี้เรายังสามารถหาโหมดแสงต่าง ๆ ได้ด้วยการพิจารณาสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามแนวขวางได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงรูปแบบต่างของโหมดแสงภายในท่อนำแสง

Nomenclature	Longitudinal Components	Transverse Components
TEM(Transverse Electromagnetic)	$\bar{E}_z = 0, \bar{H}_z = 0$	$\bar{E}_T, \bar{H}_T$
TE (Transverse Electric)	$\bar{E}_z = 0, \bar{H}_z \neq 0$	$\bar{E}_T, \bar{H}_T$
TM (Transverse Magnetic)	$\bar{H}_z = 0, \bar{E}_z \neq 0$	$\bar{E}_T, \bar{H}_T$
HE or EH (Hybrid)	$\bar{H}_z \neq 0, \bar{E}_z \neq 0$	$\bar{E}_T, \bar{H}_T$

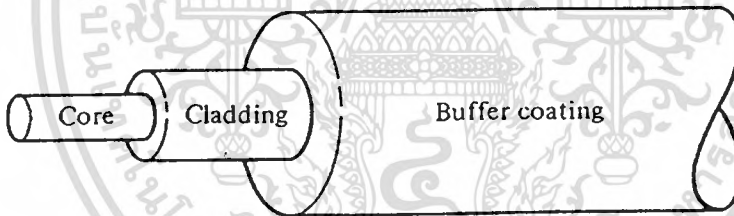
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 โยแก้วนำแสง

ท่อนำแสงที่มีความสำคัญต่อการสื่อสารมีหลายชนิด เช่น ท่อนำแสงแบบระนาบ ท่อนำแสงแบบทรงกระบอก หรือใยแก้วนำแสง เป็นต้น ส่วนท่อนำแสงที่จะกล่าวถึงในที่นี้คือใยแก้วนำแสง ซึ่งเป็นท่อนำแสงที่ถูกนำมาสร้างเป็นท่อนำแสงหลอมรวมในงานวิจัยนี้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะต่าง ๆ ของใยแก้วนำแสง โหมดแสงภายในใยแก้วนำแสง และชนิดของใยแก้วนำแสง ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาท่อนำแสงแบบหลอมรวมต่อไป

### 2.5.1 โครงสร้างของใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Structure)

ใยแก้วนำแสงสร้างขึ้นจากแก้วหรือสารที่เป็นไดอิเล็กทริก โดยมีโครงสร้างเป็นตัวกลางทรงกระบอกอย่างน้อย 2 ชั้น คือ ชั้นแรกเรียกว่าแกน (Core) ของใยแก้วนำแสง ซึ่งมีดัชนีหักเหแสงเป็น ขนาดของแกนใยแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2a$  ส่วนชั้นที่อยู่ถัดออกมาเป็นชั้นของแคลดดิ้ง (Cladding) ซึ่งมีดัชนีหักเหแสงเป็น ดังรูปที่ 2.7 โดยหน้าที่สำคัญของแกนใยแก้วคือเป็นตัวกลางนำแสง ส่วนหน้าที่ของแคลดดิ้งก็คือลดการสูญเสียกำลังแสงเนื่องจากการสะท้อนแสงแบบกลับหมด และป้องกันการดูดกลืนกำลังแสงเมื่อแกนของใยแก้วไปสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นส่วนป้องกันมิให้แกนของใยแก้ว โค้งงอหรือหักได้ง่าย



รูป 2.7 ภาพแสดงลักษณะของใยแก้วนำแสง

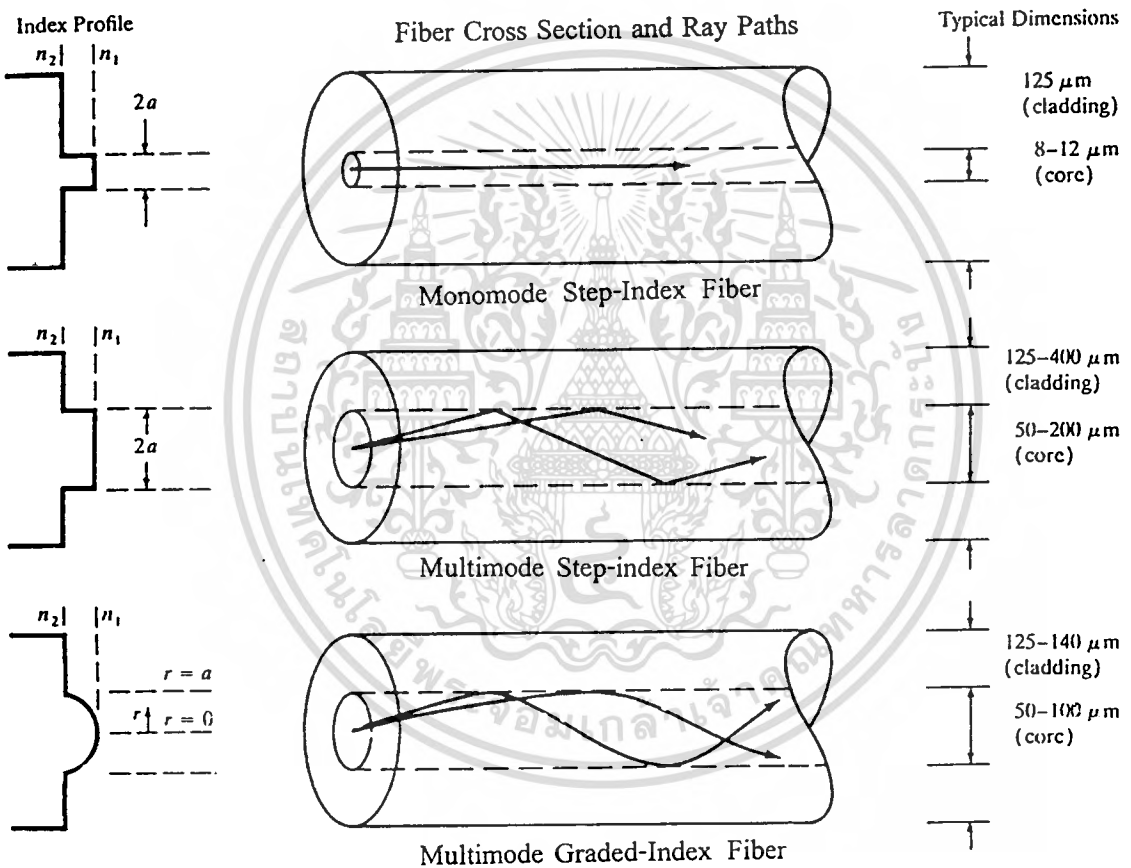
### 2.5.2 ชนิดของใยแก้วนำแสง (Fiber Types)

การแบ่งชนิดของใยแก้วนำแสงนั้นค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากได้มีการแบ่งชนิดของใยแก้วนำแสงออกไปหลากหลายแบบ เช่น แบ่งตามวัสดุที่ทำ แบ่งตามคุณสมบัติการสูญเสียกำลังแสง แบ่งตามองค์ประกอบของแกนใยแก้ว เป็นต้น อย่างไรก็ตามในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการแบ่งชนิดของใยแก้วนำแสงตามคุณสมบัติการสูญเสียความเข้มแสงของตัวกลางที่นำมาสร้างใยแก้วนำแสง และการแบ่งตามองค์ประกอบของแกนใยแก้วนำแสง

การแบ่งชนิดของใยแก้วนำแสงตามการสูญเสียความเข้มแสง ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากตัวกลางแสงที่นำมาทำใยแก้วนำแสง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ ชนิดที่สูญเสียความเข้มแสงต่ำ (Low-Loss) ชนิดที่มีการสูญเสียความเข้มแสงปานกลาง (Medium-Loss) และชนิดที่มีการสูญเสียความเข้มแสงสูง (Higher-Loss) โดยที่สองชนิดแรกมักจะใช้แก้วทำเป็นแกนของใยแก้ว

และใช้แก้วหรือพลาสติกทำเป็นเคลดคิง ส่วนชนิดที่สามมักใช้พลาสติกทำแกนและเคลดคิงของใยแก้วนำแสง

การแบ่งชนิดของใยแก้วนำแสงตามองค์ประกอบของแกนใยแก้วนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Step-Index Fiber) และชนิดเกรดอินเด็กซ์ (Graded-Index Fiber) โดยที่ใยแก้วนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์นั้น ประกอบด้วยแกนของใยแก้วนำแสงที่มีองค์ประกอบเดียวโดยตลอดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางดังรูปที่ 2.8 (บนและกลาง) ส่วนใยแก้วนำแสงแบบเกรดอินเด็กซ์นั้น มีองค์ประกอบของแกนใยแก้วไม่สม่ำเสมอตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางดังรูปที่ 2.8 (ล่าง)



**รูปที่ 2.8** แสดงโครงสร้างของใยแก้วนำแสง โดยที่รูปบนแสดงถึงโครงสร้างใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Monomode Step-Index Fiber) รูปกลางแสดงโครงสร้างใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมดชนิดสเต็ปอินเด็กซ์ (Multimode Step-index Fiber) ส่วนรูปล่างแสดงถึงโครงสร้างท่อนำแสงแบบหลายโหมดชนิดเกรดอินเด็กซ์ (Multimode Graded-Index Fiber) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างภาคตัดขวางของใยแก้วนำแสง และแนวทางเดินของรังสีแสง และแสดงภาพโปรไฟล์ของดัชนีหักเหแสง (Index Profile) โดยที่  $n_1$  แทนดัชนีหักเหแสงของแกนใยแก้ว ส่วน  $n_2$  แทนดัชนีหักเหแสง

ของเคลดคิง  $a$  และแทนขนาดรัศมีของแกนใยแก้วนั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้เรายังแบ่งใยแก้วนำแสงทั้งชนิดสตีปอินเด็คซ์ และเกรคอินเด็คซ์ ได้เป็น 2 แบบ คือ แบบโหมคเดียว (Single-mode หรือ Monomode) และแบบหลายโหมค (Multimode) โดยนิยามว่า ใยแก้วนำแสงแบบโหมคเดียวคือ ใยแก้วนำแสงแบบที่มีเพียงโหมคเดียวเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่ได้ภายในท่อใยแก้วนำแสง ส่วนใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมคคือใยแก้วนำแสงที่มีอย่างน้อยสองโหมคที่สามารถเคลื่อนที่ได้ภายในท่อใยแก้วนำแสง

### 2.5.3 โหมคแสง ( Rays and Modes )

พฤติกรรมของแสงที่เคลื่อนที่ภายในท่อนำแสงนั้นสามารถอธิบายได้โดยซูปเปอร์โพสิชัน (Superposition) ของกลุ่มโหมคแสง โดยที่แต่ละโหมคแสงประกอบด้วยกลุ่มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งรวมตัวกันเป็นคลื่นนิ่ง (Standing Wave) เมื่อพิจารณาแสงที่เป็นแบบโมโนโครมาติก (Monochromatic) ที่มีความถี่  $\omega$  เคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแนวแกน  $+z$  (ตามความยาวของท่อนำแสง) พบว่าที่เวลา  $t$  ฟังก์ชันของโหมคแสงแทนได้ด้วยสมการ ดังนี้

$$\psi(z,t) = e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ ค่าคงที่สำหรับคลื่นเคลื่อนที่ของคลื่น  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม โดยตัวแปรทั้งสองเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการอธิบายโหมคแสงในใยแก้วนำแสง ซึ่งโหมคดังกล่าวจะต้องสอดคล้องกับสมการของแมกซ์เวลล์ และยังรวมทั้งสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตของรอยต่อระหว่างแกนและ แคลดดิ้ง

สมการ (2.34) แสดงถึงพฤติกรรมของโหมคแสง โดยแสดงคุณลักษณะของโหมคแสงผ่านตัวแปร  $\beta$  ซึ่งยากต่อการศึกษาพฤติกรรมของโหมคแสง อย่างไรก็ตามสามารถศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแสงได้โดยใช้หลักเรขาคณิตของแสง (Ray-tracing Approach) วิธีนี้เหมาะสำหรับใยแก้วนำแสงที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกลางมาก ๆ เมื่อเทียบกับขนาดความยาวคลื่น หรืออาจกล่าวได้ว่าวิธีนี้เหมาะกับท่อนำแสงแบบหลายโหมคมากกว่าท่อนำแสงแบบโหมคเดียว ทั้งนี้เนื่องจากแกนของท่อนำแสงแบบหลายโหมคนั้นมีขนาดโตกว่าความยาวคลื่นแสงมาก ๆ ดังนั้นเมื่อพิจารณาท่อนำแสงแบบสตีปอินเด็คซ์ชนิดหลายโหมค พบว่าสามารถใช้หลักเรขาคณิตในการศึกษาการเคลื่อนที่ของแสงภายในท่อนำแสงได้เป็นอย่างดี โดยพิจารณาแนวทางเดินของแสงภายในท่อนำแสงที่สำคัญ ๆ ดังนี้

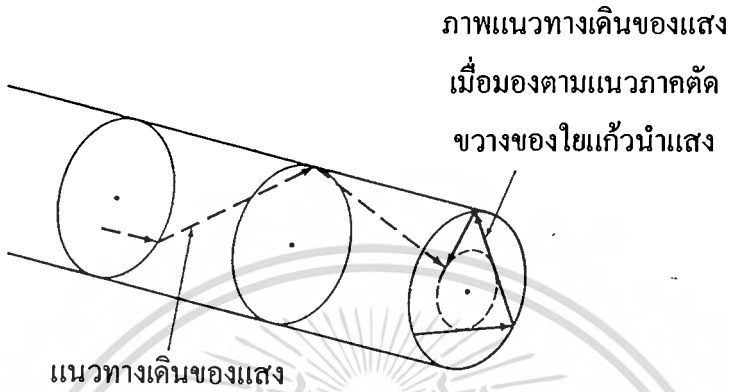
เมอร์ริดิโอนัลเรย์ (Meridional Rays) คือแนวทางเดินของแสงที่เคลื่อนที่โดยผ่านแนวแกนกลางของใยแก้วนำแสง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ เมอร์ริดิโอนัลเรย์ที่สามารถเคลื่อนที่

ได้ภายในแกนของใยแก้วนำแสง และเมอร์ริดิโอนัลเรย์ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่

ได้ภายในแกนของใยแก้วนำแสง (เคลื่อนที่ออกไปสู่แคลดดิ้ง)

งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกีวเรย์ (Skew Rays) คือแนวทางการเดินทางของแสงที่เคลื่อนที่โดยผ่านไปหลาย ๆ ระบายของท่อนำแสง จึงมีแนวเส้นทางเดินของแสงคล้ายกับเป็นเกลียว ดังรูปที่ 2.9 ถ้ามีสกีวเรย์รวมอยู่ในใยแก้วนำแสงในปริมาณที่มากจะเป็นต้นเหตุของการลดทอนกำลังแสง เนื่องจากสกีวเรย์มีบางส่วนเท่านั้นที่เคลื่อนที่ผ่านแกนของใยแก้วนำแสง จึงมักมีกำลังแสงบางส่วนรั่วไหลออกสู่ภายนอกแกนใยแก้วนำแสง บางครั้งอาจเรียกสกีวเรย์ว่า " ลีคกีเรย์ " (Leaky Rays)



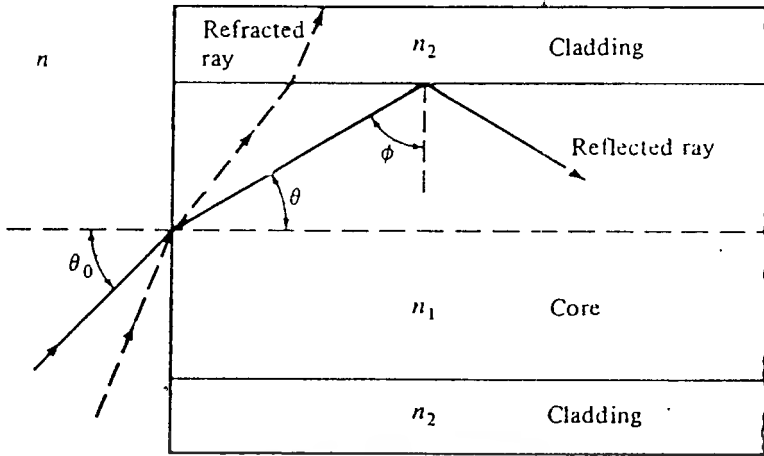
รูปที่ 2.9 แสดงสกีวเรย์ในใยแก้วนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์

เมื่อพิจารณาเมอริดิออลเรย์ที่เคลื่อนที่ผ่านใยแก้วนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์ดังรูปที่ 2.10 จะพบว่าแนวเส้นทางของแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางแสงที่มีดัชนีหักเหแสงเป็น  $n$  เข้าสู่แกนของใยแก้วนำแสงที่มีดัชนีหักเหแสงเป็น  $n_1$  ด้วยมุมที่จะทำกับแนวแกนกลางของใยแก้วนำแสงคือ  $\theta_0$  และเคลื่อนที่ไปตกกระทบกับระนาบรอยต่อระหว่างแกนของใยแก้วนำแสงและเคลดคิงเป็นมุม  $\phi$  ถ้ากำหนดให้มุม  $\phi$  เป็นมุมที่ทำให้เกิดการสะท้อนของแสงแบบกลับหมด และเกิดเส้นทางเดินของแสงเป็นแบบซิกแซก (Zigzag) ไปตามความยาวของแกนใยแก้วนำแสง จากกฎของสเนลจะได้มุม  $\phi$  ที่ต่ำสุดที่จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดสอดคล้องกับสมการดังนี้

$$\sin \phi_{\min} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.35)$$

เมื่อเมอริดิออลเรย์ที่มีมุม  $\phi$  น้อยกว่า  $\phi_{\min}$  จะเกิดการหักเหออกนอกแกนของใยแก้วไปสู่อุเคลดคิง ดังนั้นจึงสามารถหามุม  $\phi_{\max}$  ที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดของแสงได้ด้วยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$n \sin \theta_{0,\max} = n_1 \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.36)$$



รูปที่ 2.10 แสดงเมอริดิอานัลเรย์ของคลื่นเคลื่อนที่ภายในใยแก้วนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์

เมื่อ  $\theta_c$  เป็นค่ามุมวิกฤติ ดังนั้นแนวทางการเดินทางของแสงที่เคลื่อนที่เข้าสู่ใยแก้วนำแสงด้วยมุม  $\theta_0$  ที่น้อยกว่า  $\theta_{0,max}$  จะเกิดการสะท้อนกลับหมดที่รอยต่อของแกนและแคลดดิ้ง ส่วนสมการ (2.36) นิยามว่าเป็นนิวมอริคัลอะเพอเจอร์ (Numerical Aperture : NA) ของใยแก้วนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์ ซึ่งสอดคล้องกับสมการดังนี้

$$NA = n \sin \theta_{0,max} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.37)$$

เนื่องจากนิวมอริคัลอะเพอเจอร์สัมพันธ์โดยตรงกับมุมสูงสุดของการรับแสงจึงถูกนำมาใช้ศึกษาคุณสมบัติของใยแก้วนำแสงและการคำนวณหาค่ากำลังแสงที่ป้อนเข้าสู่ใยแก้วนำแสง ซึ่งนับว่าเป็นตัวแปรสำหรับใยแก้วนำแสงที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่ง

#### 2.5.4 โหมดแสงในท่อนำแสง

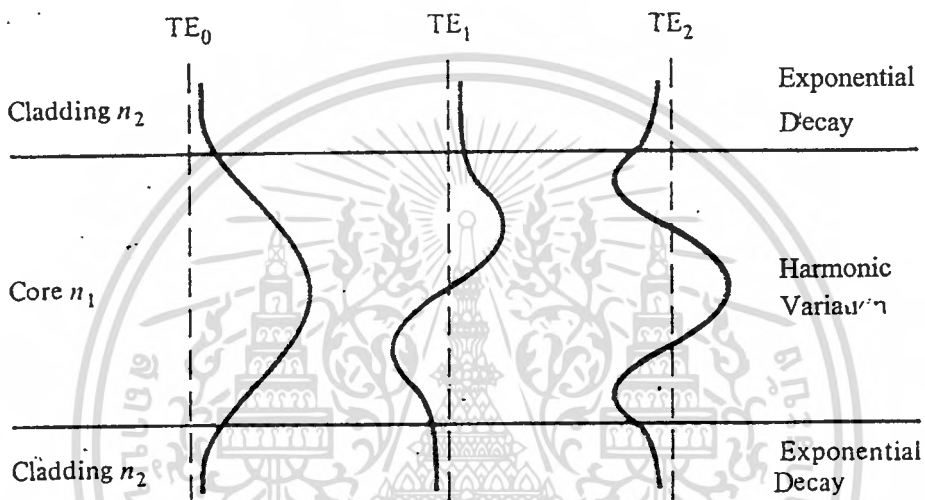
ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของโหมดแสงในใยแก้วนำแสงนั้นจะขอกล่าวถึงรูปแบบของโหมดในท่อนำแสงแบบระนาบเสียก่อน เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจรูปแบบของโหมดแสงในใยแก้วนำแสงต่อไป

พิจารณาท่อนำแสงแบบระนาบที่เป็นแบบไดอิเล็กตริกเป็นแกน และมีดัชนีหักเหแสงเป็น  $n_1$  ถูกประกบติดทั้งสองด้านด้วยวัสดุที่เป็นไดอิเล็กตริกเช่นกัน แต่มีดัชนีหักเหแสงเป็น  $n_2$  ซึ่งเรียกว่า แคลดดิ้ง โดยที่  $n_2 < n_1$  ดังรูปที่ 2.11 จะพบว่ามียูนิฟอร์มโหมดหลายรูปแบบผันแปรไปตามฮาร์โมนิก (Harmonic Variation) ของกลุ่มคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่แต่ละรูปแบบของสนามไฟฟ้าจะแทนลำดับของโหมด ซึ่งจำนวนลำดับของโหมดจะเท่ากับจำนวนครั้งที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามตามแนวขวางของคลื่นแสงมีค่าเป็นศูนย์ นอกจากนี้จำนวนลำดับของโหมดแสงยังสัมพันธ์โดยตรงกับมุมของเส้นทางเดินของแสงที่ตกกระทบบนรอยต่อของแกนและแคลดดิ้ง กล่าวคือถ้ามุมที่ตกกระทบบมากขึ้นจำนวนโหมดจะมากขึ้นตามลำดับ

สังเกตรูปที่ 2.11 นั้นสนามไฟฟ้าของโหมดแสงทั้งหมดมิได้เคลื่อนที่จำกัดอยู่เพียงภายในแกนของท่อนำแสงเท่านั้น ยังมีบางส่วนของสนามไฟฟ้าเคลื่อนที่นอกแกนของท่อนำแสงหรือเคลื่อนที่ภายในแคลดดิ้งตรงบริเวณใกล้รอยต่อของแกนและแคลดดิ้ง โดยที่สนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล



รูปที่ 2.11 แสดงสนามไฟฟ้าต่อเนื่องสำหรับโหมดนำแสงที่ลำดับต่ำ ๆ ภายในท่อนำแสงแบบระนาบ

ในกรณีของใยแก้วนำแสงถ้าพิจารณาโดยมองภาพตามภาคตัดขวางโดยพิจารณาเพียงระนาบเดียวของแกนใยแก้วนำแสง จะได้รูปโครงสร้างที่คล้ายกับท่อนำแสงแบบระนาบ จึงทำให้รูปแบบของโหมดนำแสงบริเวณภาคตัดขวางดังกล่าวนี้จะคล้ายกันกับรูปแบบของโหมดนำแสงในท่อนำแสงแบบระนาบ รวมทั้งส่วนที่เป็นเรดิเอชันโหมด (Radiation Modes) ที่มีอยู่จำนวนมากภายในแคลดดิ้ง ซึ่งเป็นโหมดแสงที่ไม่สามารถเคลื่อนที่อยู่ภายในแกนของท่อนำแสงได้ และเป็นส่วนที่มีกำลังแสงลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ดังรูปที่ 2.11

## 2.6 ใยแก้วนำแสงที่มีขนาดค้อย ๆ เล็กกลง

โดยทั่วไปท่อนำแสงที่มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตรนั้นถูกสร้างขึ้นมาเพื่อจุดประสงค์ในการสร้างอุปกรณ์สำหรับการสื่อสารใยแก้วนำแสง และอุปกรณ์ตรวจวัดเป็นสำคัญ ซึ่งรูปแบบของโครงสร้างของท่อนำแสงแบบนี้มีอยู่มากมาย โดยแต่ละโครงสร้างต่างกันตรงการเปลี่ยนแปลงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสง เช่น คอรัคเก็ตเวฟไกด์ (Corrugated Waveguide) จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นแบบซิงูไลดอล (Sinusoidal) หรือเป็นแบบคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) ส่วนท่อนำแสงแบบที่มีขนาดค่อย ๆ เล็กลง (Slowly Varying Fibers) จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางค่อย ๆ เล็กลงเป็นแบบเส้นตรง หรือแบบพาราโบลา เป็นต้น อย่างไรก็ตามการที่จะกล่าวถึงท่อนำแสงที่มีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอทั้งหมด ในที่นี้ไม่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงจะขอกล่าวถึงเฉพาะใยแก้วนำแสงที่มีขนาดค่อย ๆ เล็กลงเท่านั้น ทั้งนี้เพราะท่อนำแสงแบบนี้จะเป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสง ดังจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป ส่วนใยแก้วนำแสงที่มีขนาดค่อย ๆ เล็กลงนี้มี 2 แบบด้วยกัน คือแบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อย ๆ เล็กลงแบบพาราโบลา และแบบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อย ๆ เล็กลงแบบเส้นตรง ซึ่งทั้งสองแบบนี้ยมนำมาทำอุปกรณ์ป้อนกำลังแสง คัปเปลอร์แสง อุปกรณ์กรองความถี่แสง และอุปกรณ์ตรวจวัด เป็นต้น

การศึกษาโหมดของแสงที่เคลื่อนที่ภายในใยแก้วนำแสงที่มีขนาดค่อย ๆ เล็กลงนั้นไม่สามารถใช้วิธีการเดียวกันกับการศึกษาโหมดในใยแก้วนำแสงทั่วไป เนื่องจากโหมดบางโหมดไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปภายในใยแก้วนำแสงได้ตลอดความยาวของท่อนำแสง ที่เป็นเช่นนี้เพราะโหมดคัทออฟ (Mode Cut-off) ของท่อนำแสงแบบนี้ไม่คงที่ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของใยแก้วนำแสงที่มีขนาดค่อย ๆ เล็กลง ยิ่งไปกว่านั้นทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของโหมดที่เคลื่อนที่ภายในท่อนำแสงนี้ไม่เป็นคำตอบสมการมีรูปแบบแน่นอน (Exact Solutions) ของสมการแมกซ์เวลล์อีกด้วย อย่างไรก็ตามถ้าแบ่งใยแก้วนำแสงที่มีขนาดค่อย ๆ เล็กลงออกเป็นช่วง ๆ ตลอดความยาวของท่อนำแสงโดยให้แต่ละช่วงมีขนาดเล็กลงจนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่วงที่ใกล้เคียงกันหรือแตกต่างกันน้อยมาก ๆ ดังรูปที่ 2.12 ในกรณีนี้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของใยแก้วนำแสงเป็นฟังก์ชันของระยะทางตามแนวแกน  $z$  ถ้ากำหนดให้ดัชนีหักเหแสงเป็น  $n(x, y, z)$  เมื่อเลือกจุดเริ่มต้นการพิจารณาที่จุด  $z = z_0$  ซึ่งมีดัชนีหักเหแสงเป็น  $n(x, y, z_0)$  โดยกำหนดความกว้างของช่วงเล็ก ๆ  $\Delta z$  ให้มีความกว้างมากเท่ากับสนามของโหมดแสง จะพบว่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของโหมดแสงบริเวณช่วงเล็ก ๆ ที่กล่าวถึงนี้มีค่าดังนี้

$$\bar{E}_j = e_j(x, y, \beta_j(z_c)) \exp\{i\beta_j(z_0)z\} \quad (2.38)$$

$$\bar{H}_j = h_j(x, y, \beta_j(z_c)) \exp\{i\beta_j(z_0)z\} \quad (2.39)$$

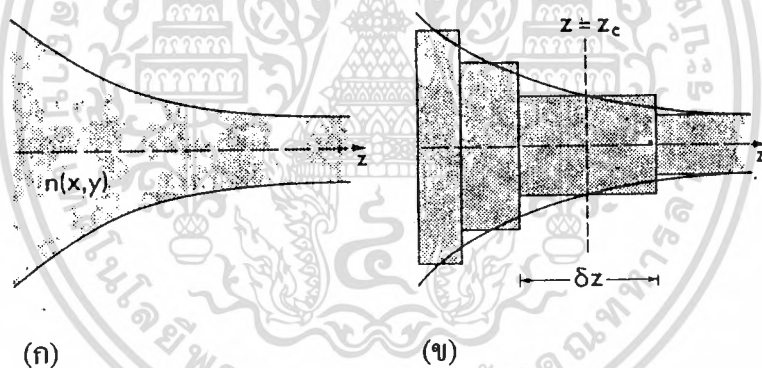
เมื่อ  $x$  และ  $y$  เป็นโคออร์ดิเนตในภาคตัดขวางของใยแก้วนำแสง  $e_j$  และ  $h_j$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย ส่วน  $\beta_j(z_0)$  คือ ค่าคงที่สำหรับคลื่นเคลื่อนที่ ในขณะที่โลคัลโหมด (Local Mode) เคลื่อนที่ไปตามความยาวของใยแก้วนำแสงที่มีขนาดค่อย ๆ เล็กลงนั้นจะมีเฟสเพิ่มขึ้นตามระยะทาง ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงของ  $\beta_j(z_0)$  และความยาวของ  $\delta z$  เนื่องจากถูกกำหนดให้เปลี่ยนแปลงของ  $\beta_j(z_0)$  และ  $\delta z$  มีค่าน้อย ๆ และเป็นขั้นต่อเนื่อง ดังนั้นจึงสามารถประมาณผลรวมของเฟสได้เท่ากับ  $\int_0^z \beta_j(z) dz$  เมื่อหาผลรวมของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $z$  ใด ๆ ภายในท่อนำแสงที่มีขนาดค้อย ๆ เล็กกลงได้ดังนี้

$$\vec{E}_j = \hat{e}_j(x, y, \beta(z)) \exp\left\{i \int_0^z \beta_j(z) dz\right\} \quad (2.40)$$

$$\vec{H}_j = \hat{h}_j(x, y, \beta(z)) \exp\left\{i \int_0^z \beta_j(z) dz\right\} \quad (2.41)$$

สมการ (2.40) และ (2.41) สามารถนำไปใช้ศึกษาโหมดของแสงภายในท่อนำแสงแบบหลอมรวม หรือไบโคนิคัลคัปเปิลเลอร์อื่น ๆ ได้ (Biconical Coupler) ดังจะกล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของใยแก้วนำแสงที่มีขนาดค้อย ๆ เล็กกลง

## 2.7 โหมดแสงในใยแก้วแบบเพอะเทิบ

ในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใยแก้วนำแสงมีความไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยนั้นจะส่งผลกระทบต่อการศึกษาของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และโหมดของแสงในบริเวณนั้น ซึ่งถือว่าการรบกวนโหมดของแสง และเรียกใยแก้วนำแสงแบบนี้ว่า ใยแก้วแบบเพอะเทิบไฟเบอร์ (Perturbed Fibers)

ถ้ากำหนดให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของโหมดแสงภายในใยแก้วนำแสงบริเวณที่โหมดแสงไม่ถูกรบกวนแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$\bar{E}(x, y, z) = \bar{e}(x, y) \exp(i\bar{\beta}z) \quad (2.42)$$

$$\bar{H}(x, y, z) = \bar{h}(x, y) \exp(i\bar{\beta}z) \quad (2.43)$$

ส่วนสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของ โหมดแสงภายในใยแก้วนำแสงบริเวณที่โหมดแสงถูกรบกวนแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$E(x, y, z) = e(x, y) \exp(i\beta z) \quad (2.44)$$

$$H(x, y, z) = \bar{h}(x, y) \exp(i\bar{\beta}z) \quad (2.45)$$

เมื่อ  $\bar{\beta}$  เป็นค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ของ โหมดแสงที่เคลื่อนที่ภายในใยแก้วนำแสง บริเวณที่โหมดแสงไม่ถูกรบกวน  $\beta$  เป็นค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ของ โหมดแสงที่เคลื่อนที่ภายในใยแก้วนำแสงบริเวณที่โหมดแสงถูกรบกวน และมี  $e, h, \bar{e}, \bar{h}$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย

ในกรณีที่ใยแก้วนำแสงสามารถนำแสงได้น้อย ๆ หรือเป็นแบบวิคตีเวฟไกด์ ซึ่ง  $n(x, y)$  และ  $\bar{n}(x, y)$  มีค่าน้อย ๆ และโหมดของแสงสามารถหาได้จากสมการอนุพันธ์ของคลื่น ถ้ากำหนดให้  $\psi$  เป็นฟังก์ชันของโหมดแสง และ  $\beta$  เป็นค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ของโหมดแสงที่ถูกรบกวนการเคลื่อนที่ ดังนั้นสมการอนุพันธ์ของโหมดแสงที่ถูกรบกวนแทนได้ด้วยสมการ ดังนี้

$$\{\nabla_t^2 + k^2 n^2(x, y) - \beta^2\} \psi = 0 \quad (2.46)$$

ส่วนโหมดแสงที่ไม่ถูกรบกวน  $\bar{\psi}$  ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่เป็น  $\bar{\beta}$  จะสามารถสร้างสมการอนุพันธ์สำหรับโหมดแสงได้ดังนี้

$$\{\nabla_t^2 + k^2 \bar{n}^2(x, y) - \bar{\beta}^2\} \bar{\psi} = 0 \quad (2.47)$$

เมื่อ  $\nabla_t^2$  ทรานซเวิร์สลาปลาเชิลโอเปอเรเตอร์  $k = 2\pi/\lambda$  โดยที่  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น การหาคำตอบสมการ (2.46) และ (2.47) ทำให้เราได้ไอเกนฟังก์ชัน (Eigenfunction) คือ  $\psi$  และ  $\bar{\psi}$  และตัวแปรไอเกน (Eigenvalue)  $\beta$  และ  $\bar{\beta}$  ซึ่งสามารถนำไปศึกษาคุณลักษณะของโหมดแสงได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีศึกษาเกี่ยวกับการคัปปลิงแสงมักจะอธิบายคุณลักษณะของโหมดแสงในรูปของ  $\beta, \bar{\beta}, \psi$  และ  $\bar{\psi}$  ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\beta^2 - \bar{\beta}^2 = k^2 \int_A \{n^2 - \bar{n}^2\} \psi \bar{\psi} dA / \int_A \psi \bar{\psi} dA \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $A_\alpha$  เป็นขนาดภาคตัดขวางของใยแก้วนำแสง สมการ (2.48) เป็นการอธิบายคุณลักษณะของโหมดแสงที่ถูกรบกวนการเคลื่อนที่โดยเทียบกับโหมดแสงที่ไม่ถูกรบกวนการเคลื่อนที่ ซึ่งมีความหมายว่าผลต่างของค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ของโหมดแสงที่ถูกรบกวนและโหมดแสงที่ไม่ถูกรบกวนการเคลื่อนที่ สามารถคำนวณหาได้จากการนอร์มัลไลซ์ผลต่างของไอเก็นฟังก์ชันทั้งสองตลอดภาคตัดขวางของใยแก้วนำแสง สมการนี้จะถูกนำมาอธิบายพฤติกรรมการคัปปลิงแสงดังกล่าวถึงในบทต่อไป

## 2.8 สรุป

หลักการสะท้อนกลับหมดนั้นเป็นหลักการพื้นฐานของท่อนำแสงแบบต่าง ๆ ซึ่งผลการสะท้อนภายในท่อนำแสงทำให้เกิดโหมดของแสง ดังนั้นในการศึกษาท่อนำแสงแบบต่าง ๆ จึงศึกษาที่โหมดของแสงและพฤติกรรมของโหมดแสง โดยเฉพาะในบทนี้ แสดงให้เห็นว่าโหมดของแสงภายในท่อนำแสงแบบมีโครงสร้างไม่สม่ำเสมอหรือมีโครงสร้างแบบค้อย ๆ เล็กๆ นั้นเป็นฟังก์ชันของระยะทางและขนาดของแกนท่อนำแสง นอกจากนี้ยังได้แสดงสมการอนุพันธ์สำหรับท่อนำแสงแบบโครงสร้างไม่สม่ำเสมอไว้เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาหลักการคัปปลิงแสงในบทต่อไป

## บทที่ 3

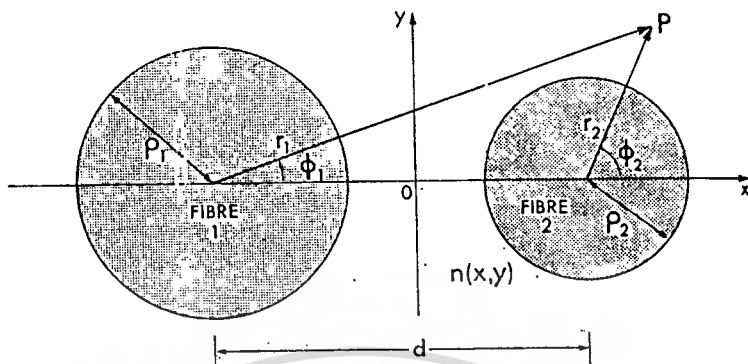
# การคัปปลิงแสงระหว่างท่อนำแสง

ในบทที่ 2 ได้แสดงให้เห็นว่าโหมดของแสงภายในท่อนำแสงแบบต่าง ๆ สามารถศึกษาได้จากสมการค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ของโหมดแสง โดยพิจารณาตามเงื่อนไขขอบเขตของท่อนำแสงนั้น นอกจากนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่าโหมดแสงภายในใยแก้วแบบเพอะเทิบมีขนาดไม่คงที่ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับพื้นที่ภาคตัดขวางของท่อนำแสงนั้น ๆ หลักการดังกล่าวนี้จะเป็นพื้นฐานสำคัญในการศึกษาอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสง ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีโครงสร้างของท่อนำแสงเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือมีขนาดค่อย ๆ เล็กลงแบบพาราโบลา อย่างไรก็ตามโครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวมยังมีบางส่วนที่แตกต่างกับใยแก้วนำแสงแบบเพอะเทิบโดยทั่วไป กล่าวคือท่อนำแสงแบบหลอมรวมมีโครงสร้างเป็นท่อนำแสงคู่ และโหมดของแสงภายในท่อนำแสงคู่นี้มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกัน ส่งผลทำให้เกิดการคัปปลิงกำลังแสงระหว่างท่อนำแสงทั้งสองตามทฤษฎีโหมดคู่ (Couple-mode Theory) ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป เนื่องจากหลักการคัปปลิงแสงนับว่าเป็นหลักการพื้นฐานสำหรับการศึกษาท่อนำแสงแบบหลอมรวม ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานสำหรับการคัปปลิงแสงระหว่างท่อนำแสง โดยจะกล่าวถึงแนวความคิดเบื้องต้นของทฤษฎีโหมดคู่ภายในท่อนำแสงคู่ขนาน และอันตรกิริยาระหว่างโหมดภายในท่อนำแสงคู่ขนานที่มีขนาดค่อย ๆ เล็กลง รวมทั้งคุณสมบัติต่าง ๆ ของสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสง ซึ่งทั้งหมดนี้สามารถนำไปเป็นพื้นฐานในการศึกษาอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงได้เป็นอย่างดี

### 3.1 โหมดแสงภายในท่อนำแสงแบบคู่ขนาน

แนวความคิดเบื้องต้นสำหรับหลักการคัปปลิงระหว่างท่อนำแสง คือการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างโหมดแสงทั้งสองภายในท่อนำแสงคู่ขนานที่เรียกว่า “คอมโพสิตเวฟไกด์” (Composite Waveguide) ซึ่งเป็นท่อนำแสงคู่ที่มีคุณสมบัติคล้ายกันทั้งสองท่อนำแสง โดยจะมีดัชนีหักเหแสงของแกน และเคลดดิ้งของท่อนำแสงทั้งสองเท่ากัน เมื่อถูกนำมาวางตะขิดกันจะทำให้มีโครงสร้างตามภาคตัดขวางของท่อนำแสงแสดงไว้ดังรูปที่ 3.1 โดยที่ท่อนำแสงทั้งสองมีรัศเป็น  $\rho$ , และ  $\rho$  มีดัชนีหักเหแสงเป็น  $n(x,y)$  ส่วนที่จุด  $P$  เป็นจุดใด ๆ ที่อยู่ภายในโคออร์ดิเนตของทรงกระบอก ซึ่งเป็นจุดที่ต้องการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างโหมดทั้งสองและระยะทาง  $d$  เป็นระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของท่อนำแสงทั้งสอง อย่างไรก็ตาม โครงสร้างของคอมโพสิตเวฟไกด์นั้นยังมี

ความซับซ้อนมาก และยังไม่เหมาะสมกับการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างโหมดแสง ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้ท่อนำแสงแบบคอมโพสิตนี้มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการศึกษามากขึ้น



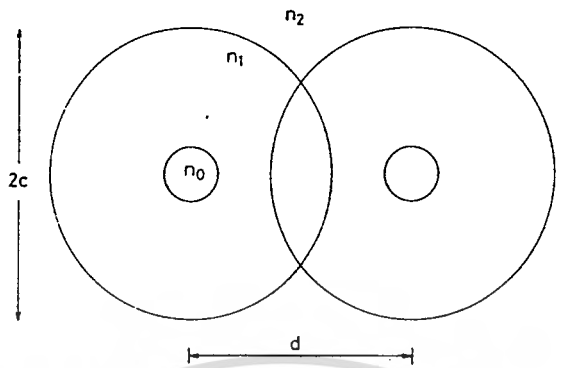
รูปที่ 3.1 แสดงรูปภาพตัดขวางของท่อนำแสงคู่ขนาน

ในกรณีที่กำหนดให้แต่ละแกนของท่อนำแสงที่ประกอบขึ้นเป็นท่อนำแสงคอมโพสิตมีขนาดเล็กมาก ๆ หรือเป็นท่อนำแสงแบบวิคทีโกด์ ซึ่งเป็นท่อนำแสงที่มีโหมดแสงเป็นแบบโหมดเดี่ยว ที่เรียกว่าโลคัลโหมด จึงทำให้มีเพียง 2 โหมดโหมดเท่านั้นที่เคลื่อนที่ผ่านท่อนำแสงแบบคอมโพสิตได้ และเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมดทั้งสองอยู่ชิดกันมากจึงเกิดอันตรกิริยาระหว่างโลคัลโหมดทั้งสอง หรือที่เรียกว่าเกิดการรบกวนข้ามช่องสัญญาณ (Cross-talk) ผลการรบกวนข้ามช่องสัญญาณนี้ทำให้กำลังแสงของโหมดทั้งสองเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กัน อย่างไรก็ตามการที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ชิดกันมากเกินไปอาจทำให้การแยกกันของโหมดไม่ชัดเจน ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้ท่อนำแสงคู่ขนานที่จะศึกษาเป็นแบบออปติคัลดีเวลเซพเรชัน (Optically Well Separation) คือเป็นท่อนำแสงคู่ขนานที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมดแสงในท่อนำแสงแรกซ้อนทับกับจุดศูนย์กลางของท่อนำแสงที่สองน้อย ๆ ซึ่งการกำหนดเช่นนี้จะช่วยให้สามารถพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมดแสงภายในท่อนำแสงคู่ขนานเป็นซูเปอร์โพสิชันของโลคัลโหมดทั้งสองได้ และมีค่าประมาณเท่ากับผลรวมของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโลคัลโหมดทั้งสองที่เฟสใด ๆ ตามระยะความยาวของท่อนำแสงคู่ขนาน

การกำหนดให้ท่อนำแสงที่ประกอบขึ้นเป็นคอมโพสิตเวฟไกด์มีโครงสร้างที่เหมือนกันทุกประการทั้งขนาดของแกนและแคตติง หรือที่เรียกว่าเป็นท่อนำแสงแบบไอเดนติคัล (Pair of Identical Fibers) จะทำให้โหมดแสงภายในท่อนำแสงแบบคอมโพสิตมีความสมมาตรกัน ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาโหมดแสงโหมดใดโหมดหนึ่งแทนโหมดแสงทั้งสองได้ ซึ่งจะทำให้การศึกษาคัปปลิงแสงง่ายมากยิ่งขึ้น

ท่อนำแสงที่ถูกกำหนดให้มีโครงสร้างตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้นแล้วข้างต้น ในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า ท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิต (Identical Composite Waveguide) ซึ่งท่อนำแสงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขอรับการดำเนินการใด ๆ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบนี้สามารถศึกษาสนามไฟฟ้าของโหมดแสงคู่ได้โดยแยกพิจารณาซูเปอร์โพสิชันของ โหมด โหมดคู่ได้โดยตรง



รูปที่ 3.2 แสดงภาพภาคตัดขวางของท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิต

3.1.1 พื้นดาเมนทัลโหมดของใยแก้วแบบไอเดนติคัล

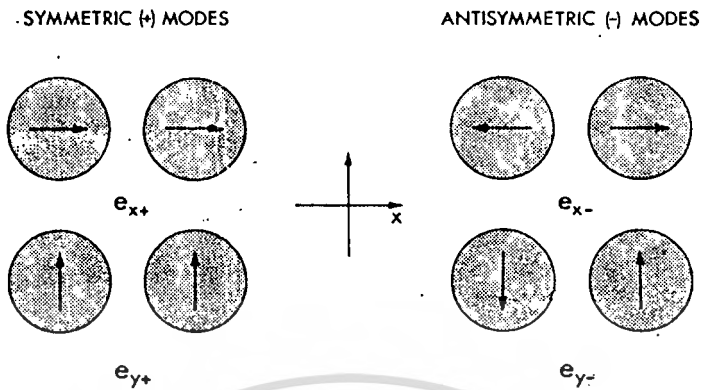
ท่อนำแสงแบบ ไอเดนติคัลคอมโพสิตที่กล่าวมาข้างต้นนี้มีโครงสร้างตามภาคตัดขวาง เป็นแบบวงกลม 2 วงและชิดกัน ดังรูปที่ 3.2 หรืออาจเป็นวงรี ทั้งนี้เนื่องจากมีคุณสมบัติตามท่อนำแสงแบบคอมโพสิต ส่วนแกนทั้งสองของท่อนำแสงมีความสมมาตรซึ่งกันและกัน ตามคุณสมบัติของท่อนำแสงแบบไอเดนติคัล ในกรณีที่แกนของท่อนำแสงอยู่โดดเดี่ยว คือไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันนั้น พบว่าโหมดแสงในแกนดังกล่าวจะมีเพียงหนึ่งโหมด ทั้งนี้เนื่องจากถูกกำหนดให้เป็นท่อนำแสงแบบวิคลีโกลด์ ดังนั้นภายในท่อนำแสงนี้จึงมีเพียงสองพื้นดาเมนทัลโหมดคือ  $\psi_1$  และ  $\psi_2$  เมื่อทำให้แกนทั้งสองชิดกันมาก ๆ ดังรูปที่ 3.2 และมีคุณสมบัติของท่อนำแสงเป็นแบบเวลเซฟพาราเรต จะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ  $\psi_1$  และ  $\psi_2$  ซ้อนทับกันบางส่วน และเกิดอันตรกิริยาซึ่งกันและกัน กำลังแสงของพื้นดาเมนทัลโหมดจึงเปลี่ยนแปลงตามผลของอันตรกิริยา ซึ่งเท่ากับเป็นการเกิดโหมดใหม่ขึ้นซ้อนทับพื้นดาเมนทัลโหมดเดิม โหมดแสงที่เกิดขึ้นใหม่นี้ เรียกว่า ซูเปอร์โพสิชันโหมด โดยหลักความสมมาตรของแกนของท่อนำแสงอาจพิจารณาได้ว่าโหมดที่เกิดขึ้นใหม่นี้มีเพียงสองซูเปอร์โพสิชันโหมดเท่านั้นคือ  $\psi_+$  และ  $\psi_-$

3.1.2 ผลรวมของโหมดแสงอันเนื่องจากโพลาไรเซชัน (Polarization Corrections)

เมื่อพิจารณาท่อนำแสงแบบ ไอเดนติคัลคอมโพสิตที่มีโครงสร้างเป็นแบบเวลเซฟพาราเรต โดยพิจารณาคุณสมบัติทางโพลาไรเซชันของแสงภายในท่อนำแสงนั้นพบว่าเพียงมี 4 โพลาไรซ์พื้นดาเมนทัลโหมดที่เป็นคัทออฟ แต่เนื่องจากแกนทั้งสองของท่อนำแสงมีความสมมาตรกัน จึงทำให้มีเพียง 2 โพลาไรเซชันโหมดที่ขนานกันดังรูปที่ 3.3 และโพลาไรเซชันโหมดที่ตั้งฉากกัน (Orthogonal Polarized Fundamental Modes) มีเพียง 2 โหมด ซึ่งเท่ากับมีเพียงสองพื้นดาเมนทัล

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้โดยไม่หวังกำไร หากมีการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ขออนุญาตจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ จะถือว่าผิดกฎหมาย

(Symmetric Modes) หรือ ออดโหมด (Odd Modes) และ โหมดแสงที่เกิดการหักล้างกัน (Asymmetric Modes) หรือ อีฟเวินโหมด  $\psi$  (Even Modes)



รูปที่ 3.3 แสดงความสมมาตรของโพลาริเซชันโหมดในท่อนำแสงแบบคอมโพสิต

จากหลักความสมมาตรที่แสดงในรูปที่ 3.3 จะพบว่าโพลาริเซชันของสนามไฟฟ้าตามขวางในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ของออดโหมดขนานกันกับอีฟเวินโหมด ดังนั้นโหมดแสงที่แยกออกให้เห็นความแตกต่างกันชัดเจนมีเพียงสองโหมดคือ ออดโหมดและอีฟเวินโหมดเท่านั้นซึ่งแทนได้ด้วยดังสมการดังนี้

$$e_{x+} = e_{y+} = \psi_+ \quad ; \quad e_{x-} = e_{y-} = \psi_- \quad (3.1)$$

เมื่อ  $e_x$  และ  $e_y$  เป็นสนามไฟฟ้าตามแนวขวางในแกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ

### 3.1.3 ค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ของโหมดแสง

เนื่องจากมี 2 โหมดพื้นฐานเท่านั้นที่เป็นคำตอบของสมการอนุพันธ์สำหรับท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิต คือ  $\psi_+$  และ  $\psi_-$  ซึ่งมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\psi_+ = \bar{\psi}_1 + \bar{\psi}_2 \quad ; \quad \psi_- = \bar{\psi}_1 - \bar{\psi}_2 \quad (3.2)$$

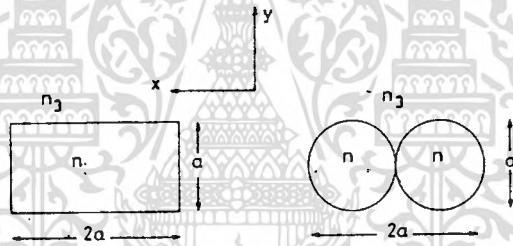
เมื่อ  $\bar{\psi}_1$  และ  $\bar{\psi}_2$  คือฟังก์ชันคอสายสำหรับโหมดแสงในแต่ละแกนของท่อนำแสงคอมโพสิต ซึ่งอยู่ในภาวะที่โหมดแสงทั้งสองไม่เกิดอันตรกิริยาซึ่งกันและกัน โดยที่โหมดทั้งสองมีค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่เป็น  $\bar{\beta}$  เมื่อทำให้แกนทั้งสองของท่อนำแสงอยู่ชิดกันมากๆ ดังรูปที่ 3.4 จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างโหมดทั้งสอง และเกิดซูเปอร์โพลิซันของโหมด  $\psi_+$  และ  $\psi_-$  ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่เป็น  $\beta_+$  และ  $\beta_-$  ตามลำดับ ในกรณีนี้ระยะห่างระหว่างจุดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลางของแกนทั้งสองของท่อนำแสง  $d$  ห่างกันน้อย ๆ พบว่าค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ของซูเปอร์โพสิชันโหมดแสงทั้งสองประมาณเท่ากับ  $\beta_{\pm}$  ซึ่งสอดคล้องกับสมการดังนี้

$$\beta_{\pm} = \bar{\beta}_1 \pm C; C = k \frac{\left\{ \int_{A_{\infty}} (n - \bar{n}_1) \bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2 dA \right\}}{\int_{A_{\infty}} \bar{\psi}_1^2 dA} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $n$  คือ ดัชนีหักเหแสงของท่อนำแสงแบบคอมโพสิต (Composite Profile Reflexive Index)  $\bar{n}_1$  คือ ดัชนีหักเหแสงของแกนของท่อนำแสงในภาวะปกติ (Unperturbed Fibers)  $A$  คือ พื้นที่ภาคตัดขวางรวมของท่อนำแสงแบบคอมโพสิต (Composite Cross-section)  $A_{\infty}$  คือ พื้นที่รวมทั้งหมดตามขอบเขตของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Infinite Cross-section) และ  $C$  คือ สัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงระหว่างโหมดทั้งสอง



**รูปที่ 3.4** แสดงรูปภาคตัดขวางของท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิต เมื่อ  $n$  คือดัชนีหักเหแสงของท่อนำแสง และ  $n_2$  คือดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก ส่วน  $a$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสง

สมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของออกและอีฟเวนโหมดภายในท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิตนั้น สามารถศึกษาได้จากผลการคัปปลิงโหมดกันระหว่างสองพื้นดามนุทลโหมดโดยสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของ  $\beta_{\pm}$  ส่วนตัวแปร  $C$  ในสมการ (3.2) นั้นเป็นสัมประสิทธิ์ของการคัปปลิงระหว่างโหมดทั้งสอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการนอร์มัลไลซ์ฟังก์ชันคลื่นส่วนที่คาบเกี่ยวกันระหว่าง  $\bar{\psi}_1$  และ  $\bar{\psi}_2$  ตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางรวมทั้งหมดของท่อนำแสงคอมโพสิต และหารด้วยผลการนอร์มัลไลซ์ฟังก์ชันคลื่นเริ่มต้นทั้งหมด  $\bar{\psi}_1^2$

### 3.1.4 ครอสทอลล์ระหว่างใยแก้วแบบไอเดนติคัล

ท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิตที่มีคุณสมบัติตามที่กล่าวถึงในหัวข้อ 3.1.1 เมื่อถูกนำมาวางชิดกันจนกระทั่งเกิดอันตรกิริยาระหว่างโหมดดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.1.2 ทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่พิมพ์ในระบบห้องสมุดดิจิทัลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พินดามนทลโหมคของท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิตเป็น  $\psi_{\pm}$  โดยมีค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ของแต่ละโหมคเป็น  $\beta_{\pm}$  ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์ครอสทอล์กทางแสง (Phenomenon of Optical Cross-talk) ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากผลของการแทรกสอดกันระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโหมคแสง  $\psi_{+}$  และ  $\psi_{-}$  เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าตามแนวโพลาริไซซ์ในแกน x (x-polarized) พบว่าขนาดสนามไฟฟ้าทั้งหมดในแนวตามขวางของท่อนำแสงสอดคล้องกับสมการดังต่อไปนี้

$$E = b_{+}\psi_{+} \exp(i\beta_{+}z) + b_{-}\psi_{-} \exp(i\beta_{-}z) \quad (3.4)$$

เมื่อ  $b_{+}$  และ  $b_{-}$  คือขนาดแอมพลิจูดของโหมคแสงของ  $\psi_{+}$  และ  $\psi_{-}$  ตามลำดับ สมมติว่าอันตรกิริยาระหว่างโหมคเกิดขึ้นที่  $z > 0$  ของท่อนำแสงแบบคอมโพสิต ดังนั้นที่  $z=0$  กำลังแสงจากท่อนำแสงจึงไม่มีการรบกวนข้ามไปยังท่อนำแสงที่ 2 และกำลังแสงในท่อนำแสงที่ 2 ยังคงเท่ากับศูนย์ นั่นคือ  $P_2=0$  และ  $E_2=0$  ดังนั้นที่จุดนี้  $\psi_{+} \cong -\psi_{-} \cong \bar{\psi}_2$  เมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.4) ที่  $z=0$  จะได้  $b_{+} \cong b_{-}$  ในกรณีที่  $z > 0$  เมื่อแทนค่า  $b_{+} \cong b_{-}$  ลงสนามไฟฟ้า  $E$  ตามสมการ (3.4) จะได้สนามไฟฟ้าตามแนวขวางของพื้นที่ภาคตัดขวางของท่อนำแสงทั้งสองดังนี้

$$E_2 = 2ib_{+} + \bar{\psi}_2 \exp(i\bar{\beta}_{+}z) \sin(cz) \quad (3.5(ก))$$

$$E_1 = 2ib_{+} + \bar{\psi}_1 \exp(i\bar{\beta}_{+}z) \cos(cz) \quad (3.5(ข))$$

การศึกษาการส่งผ่านกำลังแสงระหว่างโหมคทั้งสองทำได้โดยการนำสนามไฟฟ้า  $E$  และ  $E_2$  ไปคำนวณหา กำลังแสงสัมพัทธ์ของโหมคแสงทั้งสอง  $P_1(z)$  และ  $P_2(z)$  โดยการอินทิเกรตความเข้มของสนามไฟฟ้า  $E_1$  หรือ  $E_2$  ตลอดพื้นที่ภาคตัดขวางของท่อนำแสงแบบคอมโพสิตซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$P_1(z) = \left( \frac{n_{co}}{2} \right) \left( \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} |E_1|^2 \quad (3.6(ก))$$

$$P_2(z) = \left( \frac{n_{co}}{2} \right) \left( \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} |E_2|^2 \quad (3.6(ข))$$

เมื่อแทนค่า  $E_1$  และ  $E_2$  ตามสมการ (3.5) ลงในสมการ (3.6) จากนั้นใช้หลักการอนุกรมเทย์เลอร์ และเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้นที่  $P_1(0)=1$  และ  $P_2(0)=0$  จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$P_1(z) = \cos^2(cz); \quad P_2(z) = \sin^2(cz) \quad (3.7)$$

ความหมายเชิงฟิสิกส์ของสมการ (3.7) คือการออสซิลเลต กำลังแสงจากท่อนำแสงเส้นหนึ่งไปยังอีกเส้นหนึ่งนั้นเกิดขึ้นแบบกลับไปกลับมาระหว่างท่อนำแสงทั้งสอง โดยมีเฟสของการออสซิลเลตสอดคล้องกับผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การคับปลิงแสงกับระยะการคับปลิงแสง

ถ้ากำหนดให้  $z_b$  เป็นระยะบีต (Beat Length) หรือระยะที่การส่งผ่านกำลังแสงจากท่อนำแสงที่หนึ่งไปยังท่อนำแสงที่สองเกิดขึ้นครบรอบของการออสซิลเลตพอดี ซึ่งสามารถคำนวณหา  $z_b$  ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$z_b = \frac{2\pi}{c} = \frac{4\pi}{\beta_+ - \beta_-} \quad (3.8)$$

สมการ (3.8) มีที่มาจากสมการ (3.7) และ (3.8) ซึ่งเมื่อพิจารณาพบว่าถ้าระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของแต่ละแกนในท่อนำแสงนำแสงแบบคอมโพสิต ( $d$ ) เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ระยะบีตเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

### 3.2 ทฤษฎีโหมดคู่

ในหัวข้อนี้จะแสดงการศึกษ้อันตรกิริยาระหว่างโหมดแสงภายในท่อนำแสงคู่ขนานซึ่งใช้ทฤษฎีโหมดคู่ โดยเริ่มต้นพิจารณาที่สนามของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวางของแต่ละแกนในท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิต เมื่ออยู่ในภาวะไม่เกิดอันตรกิริยาซึ่งกันและกันนั้นสามารถแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$E_j = (x, y, z) = e_j^*(x, y)e^{i\beta z}; \quad j = 1, 2 \quad (3.9)$$

เมื่อท่อนำแสงทั้งสองอยู่ในภาวะที่มีอันตรกิริยาระหว่างโหมด จะทำให้กำลังแสงเกิดการคับปลิงจากท่อนำแสงหนึ่งไปยังอีกท่อนำแสงหนึ่งอย่างซ้ำ ๆ และผลของการแทรกสอดกันทำให้มีซูเปอร์โพสิชันโหมดเกิดขึ้นภายในท่อนำแสงนี้ ดังนั้นสนามไฟฟ้าตามแนวภาคตัดขวางของท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิตจึงเท่ากับผลรวมของสนามไฟฟ้าของโหมดและของอีฟเวนโหมดดังนี้

$$E_j^*(x, y, z) = A_1(z)e_j^*(x, y, z)e^{-i\beta z} + A_2(z)e_j^*(x, y, z)e^{-i\beta z} \quad (3.10)$$

เมื่อ  $E_j^*(x, y, z)$  คือสนามไฟฟ้าตามแนวขวางของท่อนำแสงแบบคอมโพสิต ซึ่งเป็นฟังก์ชันของแอมพลิจูด  $A_1(z)$  และ  $A_2(z)$  ออกและอีฟเวนโหมดตามลำดับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดทั้งสองไม่เป็นอิสระต่อกัน กล่าวคือ เมื่อ  $A_1(z)$  ลดลง  $A_2(z)$  จะเพิ่มขึ้น และในทางกลับกันเมื่อ  $A_1(z)$  เพิ่มขึ้น จะทำให้  $A_2(z)$  ลดลง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\frac{dA_1(z)}{dz} + iC(z)A_2 &= 0 \\ \frac{dA_2(z)}{dz} + iC(z)A_1 &= 0\end{aligned}\quad (3.11)$$

เมื่อทำการหาคำตอบสมการ (3.11) โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตที่จุดเริ่มต้นการคับปลิงแสงคือ  $A_1(0)=1$  และ  $A_2(0)=0$  ซึ่งทำให้  $\frac{dA(0)}{dz} = 0$  และได้ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของโหมดแสงกับสัมประสิทธิ์การคับปลิงแสงดังนี้

$$\begin{aligned}A_1(z) &= \cos(C_0 z) \\ A_2(z) &= \sin(C_0 z)\end{aligned}\quad (3.12)$$

เนื่องจาก  $P_1 = |A_1|^2$  และ  $P_2 = |A_2|^2$  ดังนั้นกำลังแสงสัมพันธ์สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}P_1 &= \cos^2(C_0 z) \\ P_2 &= \sin^2(C_0 z)\end{aligned}\quad (3.13)$$

เมื่อ  $C_0$  คือสัมประสิทธิ์การคับปลิงระหว่างโหมดแสง ส่วน  $z$  คือระยะการคับปลิงแสงจากสมการ (3.13) แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการส่งผ่านกำลังแสงระหว่างแกนทั้งสองของท่อนำแสงแบบคอมโพสิตนั้นเป็นการออสซิลเลตกลับไปกลับมา โดยมีเฟสของการออสซิลเลตสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การคับปลิงแสง และระยะการคับปลิงแสง

### 3.3 การคับปลิงแสงระหว่างท่อนำแสงที่มีขนาดค้อย ๆ เล็กลง

#### 3.3.1 ครออสทอลล์

ในกรณีของท่อนำแสงที่มีขนาดค้อย ๆ เล็กลงและเป็นแบบไอเดนติคอลลเวฟไกด์ การส่งผ่านกำลังแสงเกิดขึ้นเนื่องจากการครออสทอลล์ระหว่างท่อนำแสงทั้งสอง และพฤติกรรมการคับปลิงการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงเกิดขึ้นแบบเดียวกันกับกรณีของท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิต แต่ต่างกันตรงกรณีของท่อนำแสงที่มีขนาดค้อย ๆ เล็กลงนี้ มีค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่  $\beta(z)$  และสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสง  $C(z)$  เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ดังนั้นสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงทั้งหมดจึงเท่ากับผลรวมเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงในแต่ละช่วงความยาว  $dz$  และทำให้สามารถแทน  $\int_0^z C(z) dz$  และ  $\int_0^z \beta(z) dz$  ลงในสมการ (3.4) และนำสมการได้ไปคำนวณหากำลังแสงสัมพัทธ์โดยวิธีเดียวกันกับหัวข้อ 3.1.4 จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} P_1(z) &= \cos^2 \left\{ \int_0^z C(z) dz \right\} \\ P_2(z) &= \sin^2 \left\{ \int_0^z C(z) dz \right\} \end{aligned} \quad (3.14)$$

สมการ (3.14) แสดงให้เห็นว่ากำลังแสงสัมพัทธ์ระหว่างแกนทั้งสองของท่อนำแสงเป็นฟังก์ชันไซน์โคไซน์ของผลรวมเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสง

### 3.3.2 ทฤษฎีโหมดคู่สำหรับท่อนำแสงคู่ที่มีขนาดค้อย ๆ เล็กลง

ในหัวข้อนี้จะทำการหาสมการการคัปปลิงกำลังแสงภายในท่อนำแสงคู่ที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางค้อย ๆ เล็กลงโดยใช้ทฤษฎีโหมดคู่ ซึ่งเริ่มต้นจากพิจารณาสมการคัปเปิลโหมดในสมการ (3.11) และกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของแอมพลิจูดของโหมดและอีฟเวนโหมดสัมพันธ์กับสมการดังนี้

$$\rho(z) = \frac{A_2(z)}{A_1(z)} \quad (3.15)$$

$$\frac{d\rho(z)}{dz} = (1 + \rho^2(z))C(z)$$

$$\rho(z) = \tan \int_{-\infty}^z C(z') dz' \quad (3.16)$$

เมื่อ  $z'$  คือระยะทางที่เกิดการคัปปลิงระหว่างโหมดแสง โดยหลักการอนุรักษ์พลังงานและสมการ (3.15) พบว่ากำลังแสงสัมพัทธ์ภายในแกนทั้งสองของท่อนำแสงเป็นฟังก์ชันของ  $\rho(z)$  ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_1(z) = \frac{1}{(1 + \rho^2(z))} \quad (3.17)$$

$$P_2(z) = \frac{\rho^2(z)}{(1 + \rho^2(z))}$$

เมื่อแทนค่า  $\rho(z)$  ลงในสมการ (3.17) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$P_1(z) = \cos^2 \int_{-\infty}^{\infty} C(z') dz' \quad (3.18)$$

$$P_2(z) = \sin^2 \int_{-\infty}^{\infty} C(z') dz'$$

จะเห็นว่าสมการ (3.18) สอดคล้องกันกับสมการ (3.14) เมื่อกำหนดให้จุดเริ่มต้นของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างท่อนำแสงที่  $z' \geq 0$

### 3.4 สัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสง

ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงกำลังระหว่างโหมคแสงในท่อนำแสงแบบคอมโพสิตเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณหากำลังแสงสัมพัทธ์ภายในแกนทั้งสองของท่อนำแสง โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากการการนอร์มัลไลซ์ฟังก์ชันคลื่นที่คาบเกี่ยวกันระหว่างโคมคตลอดพื้นที่ของภาคตัดขวาง ( $dA$ ) ของท่อนำแสง หาด้วยผลการนอร์มัลไลซ์ฟังก์ชันคลื่นเริ่มต้นก่อนการคัปปลิงแสง ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่มีรูปแบบการอินทิเกรตที่ซับซ้อนเมื่อประมาณผลการอินทิเกรต และจัดตัวแปรให้อยู่ในรูปของโมดิไฟด์เบสเซลฟังก์ชัน (Modified Bessel Function) พบว่าสามารถนำไปใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงได้โดยตรงดังนี้

$$C(z) = \frac{\sqrt{\delta}(U(z))^2 K_0(W(z)d(z)/a(z))}{a(z)(V(z))^3 K_1^2(W(z))} \quad (3.19)$$

$$\text{โดยที่} \quad \delta = 1 - (n_{co}/n_{cl})^2$$

$$V(z) = a(z)k(n_{co}^2 - n_{ex}^2)^{1/2}$$

$$U(z) = a(z)k[n_{cl}^2 - (\beta/k)^2]^{1/2}$$

$$W(z) = a(z)k[(\beta/k)^2 - n_{co}^2]^{1/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

เมื่อ  $K_0$  คือ โมดิไฟด์เบสเซลฟังก์ชันชนิดที่หนึ่ง  $K_1$  คือ โมดิไฟด์เบสเซลฟังก์ชันชนิดที่สอง  $a(z)$  คือ รัศมีของวงกลมภาคตัดขวางของท่อนำแสงที่จุด  $z$  ส่วน  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสงในตัวกลางอากาศ  $n_{ex}$  คือ ดัชนีหักเหแสงของตัวกลางสิ่งแวดล้อมภายนอก  $n_{cl}$  คือ ดัชนีหักเหแสงของเคลดดิ้ง  $n_{co}$  คือ ดัชนีหักเหแสงของแกนท่อนำแสง และ  $\beta/k$  คือ โหมดเอฟเฟกทีฟที่พินเด็กซ์ (Mode Effective Index)

ในกรณีที่  $n_{cl} \gg n_{ex}$  เช่น  $n_{cl}=1.67$  และอากาศ  $n_{ex}=1.0$  เป็นต้น กรณีเช่นนี้ทำให้  $V$  มีค่ามาก ๆ ( $V \gg 1$ ) ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่าของ  $U$  ให้เป็นฟังก์ชันของ  $V$  ได้ดังนี้

$$U(z) \approx 2.405 \exp\left[-\left(\frac{1-\delta/2}{V(z)}\right)\right] \quad (3.20)$$

ส่วนเบสเซลฟังก์ชันสามารถกระจายพจน์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$K_0(z) \approx \left(\frac{\pi}{2z}\right)^{1/2} \{(\exp(-z))(1-1/8z)\} \quad (3.21)$$

$$K_1(z) \approx \left(\frac{\pi}{2z}\right)^{1/2} \{(\exp(-z))(1+3/8z)\} \quad (3.22)$$

การกระจายพจน์ต่าง ๆ ของเบสเซลฟังก์ชันนั้นมีจุดประสงค์เพื่อประมาณค่าอัตราส่วนของ  $\frac{K_0(2W)}{K_1^2(W)}$  ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\frac{K_0(2W)}{K_1^2(W)} \approx \left(\frac{W}{\pi}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{13}{16W}\right) \quad (3.23)$$

เนื่องจาก  $V^2 = W^2 + U^2$  ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าของ  $W$  จาก  $V$  และ  $U$  ได้โดยตรง ซึ่งเมื่อแทนค่าของ  $V$ ,  $U$ ,  $W$  และ  $K_0(2W)/K_1^2(W)$  ไปในสมการ (3.19) เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสง อย่างไรก็ตามค่าที่ได้เป็นเพียงสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสง ณ จุดใดจุดหนึ่งในท่อนำแสงคู่ขนานเท่านั้น ดังนั้นการหาสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงทั้งหมดจึงต้องทำการอินทิเกรต  $C(z)$  ตลอดระยะการคัปปลิงแสง ดังจะเห็นได้จากการคำนวณหาค่ากำลังแสงสัมพัทธ์

ในสมการ (3.18) เป็นต้น สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ผลการรบกวนจากตัวแปรภายนอก

ท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิตบางชนิดมีโครงสร้างที่พิเศษกว่าท่อนำแสงแบบอื่น กล่าวคือ มีแกนทั้งสองของท่อนำแสงล้อมรอบด้วยอากาศ หรือสิ่งแวดล้อมภายนอก (Air-glass Boundary) หรืออาจกล่าวได้ว่าท่อนำแสงแบบนี้ มีสิ่งแวดล้อมภายนอกหรืออากาศเป็นเคลดคิง ตัวอย่างเช่น ท่อนำแสงแบบหลอมรวม เป็นต้น ท่อนำแสงแบบนี้อาจถูกรบกวนการคัปปลิงแสงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ง่ายเช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมหรือมีแรงภายนอกมากระทำทำให้ท่อนำแสงโค้งงอเพียงเล็กน้อย จะส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงระหว่างท่อนำแสงเปลี่ยนแปลงไปจากภาวะปกติ เรียกการเปลี่ยนแปลงการคัปปลิงแสงที่เป็นผลมาจากตัวแปรภายนอกนี้ว่า “ ผลการรบกวนจากตัวแปรภายนอก ” (External Effect) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงตัวแปร 2 แบบด้วยกันคือ ดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอกและแรงกระทำจากภายนอก เช่น การโค้งงอ และการบิด เป็นต้น

#### 3.5.1 ผลการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อม (External Refractive Index)

จากการพิจารณาตัวแปร  $U$  และ  $W$  และสมการ (3.23) พบว่าตัวแปรดังกล่าวเป็นตัวแปรที่สัมพันธ์กับความถี่นอร์มัลไลซ์ และเมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.19) ทำให้สัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงเป็นฟังก์ชันของความถี่นอร์มัลไลซ์ ในขณะที่ความถี่นอร์มัลไลซ์เป็นฟังก์ชันของดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอกดังนี้

$$V = ak(n_{co}^2 - n_{ex}^2)^{1/2} \quad (3.24)$$

เมื่อ  $n_c$  คือ ดัชนีหักเหแสงของแกนทั้งสองของท่อนำแสงแบบคอมโพสิต (ซึ่งในที่นี้เป็นท่อนำแสงแบบหลอมรวม  $n_c \cong n_{cl}$ ) ส่วน  $n_{ex}$  คือ ดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อม

เนื่องจาก  $n_c \gg n_{ex}$  ดังนั้น  $W \cong V$  เมื่อแทนค่า  $V$  ลงในสมการ (3.23) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\frac{K_0(2W)}{K_1^2(W)} \approx \left(\frac{V}{\pi}\right)^{1/2} (1 - 13/16V) \quad (3.25)$$

จากนั้นแทนค่าสมการ (3.20) สมการ (3.24) และ (3.25) ลงในสมการ (3.19) โดยประมาณค่า  $d(z)/a(z)=2$  (เนื่องจากเป็นท่อนำแสงคู่ขนาน) และกำหนดให้  $\lambda$  เท่ากับ 1.3 ไมโครเมตร จะได้ผลลัพธ์เป็นสมการของสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงที่สัมพันธ์กับสมการดังต่อไปนี้

$$C(z) \approx \frac{3.26\sqrt{\delta}}{a(z)(a(z)k(n_{co}^2 - n_{ex}^2))^{5/4}} \quad (3.26)$$

จากสมการ (3.26) แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การคับปลิงแสง ณ จุดใด ๆ สัมพันธ์กับดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก อย่างไรก็ตามการตรวจสอบความสัมพันธ์ดังกล่าวโดยการทดลองเปรียบเทียบกับสมการ (3.26) อาจให้ผลไม่ชัดเจนเนื่องจากสมการนี้ได้มาจากการประมาณค่าตัวแปรต่าง ๆ หลายขั้นตอนด้วยกัน ดังนั้นในการทดลองตรวจสอบทฤษฎีในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการจำลองผลการทดลองด้วยแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ขึ้นมา 1 ชุด แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ตรวจวัดได้ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ศึกษากันอย่างแพร่หลาย ดังจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 5

### 3.5.2 ผลการรบกวนเนื่องจากแรงภายนอก (External Force)

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อท่อนำแสงไอเดนติคัลคอมโพสิตจะทำให้เอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์ของท่อนำแสงเปลี่ยนแปลงไปจากภาวะปกติ ทำให้ผลต่างของโหมดแสงภายในแกนทั้งสองของท่อนำแสงเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กัน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การคับปลิงแสงระหว่างโหมดเปลี่ยนแปลงไปจากภาวะปกติ แรงจากภายนอกที่กล่าวถึงนี้ได้แก่ แรงที่ทำให้เกิดการโค้งงอของท่อนำแสง และแรงบิดที่ทำให้เกิดการบิดรอบแกนกลางของท่อนำแสงแบบคอมโพสิต

การศึกษาแรงจากภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้างของท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิตนั้น สามารถทำได้โดยการหาสมการอนุพันธ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับท่อนำแสง ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\alpha^2} + \frac{\partial^2 \bar{E}}{\gamma^2} + (k^2 n_{eff} - \beta^2) \bar{E} = 0. \quad (3.27)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่ของคลื่น  $\beta$  คือ ค่าคงที่ของการเคลื่อนที่ของคลื่น  $n_{eff}$  คือ เอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์ของแกนท่อนำแสงทั้งสอง ส่วน  $\bar{E}$  คือสนามไฟฟ้าของโหมดแสง สิ่งที่ต้องการศึกษาในที่นี้คือการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่เมื่อโครงสร้างของท่อนำแสงถูกรบกวนจากแรงภายนอก ซึ่งตัวแปรดังกล่าวนี้จะสามารถแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงการคับปลิงแสงที่เกิดขึ้นได้ จากสมการ (3.27) เมื่อแก้สมการเพื่อหาคำตอบสมการ คือ ไอเกนฟังก์ชัน จะได้ค่าตัวแปรไอเกนคือ  $\beta$  ดังนั้นเมื่อพิจารณาในกรณีของท่อนำแสงที่ถูกรบกวนจากแรงภายนอก พบว่าสมการอนุพันธ์มีรูปแบบเดียวกับสมการ (3.27) แต่ต่างกันตรงค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ และสนามไฟฟ้าของโหมดแสง ซึ่งในกรณีนี้กำหนดให้เป็น  $\beta_p$  และ  $E_p$  ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ของท่อนำแสงแบบคอมโพสิตที่ถูกรบกวนจากแรงจากภายนอกนี้เป็นฟังก์ชันของเอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์ดังนี้

$$\beta_p^2 = \beta_{p_0}^2 + k \iint E_{p_0}^2 \Delta n_{eff} dx dy \quad (3.28)$$

สมการ (3.28) แสดงให้ทราบว่า เมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำต่อท่อนำแสงแบบหลอรวม จนทำให้เอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์เปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่ของโหมดแสงเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กัน และส่งผลให้การคัปปลิงแสงเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกันด้วย ดังนั้นในการศึกษาผลของแรงจากภายนอกที่มีต่อการคัปปลิงแสงนั้นสามารถทำได้โดยหาฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงเอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์จากแรงภายนอก และนำไปคำนวณหาค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนที่เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงที่เปลี่ยนแปลงไปจากภาวะปกติ

### 3.5.2.1 แรงที่ทำให้เกิดการโค้งงอ

เมื่อมีแรงมากระทำให้ท่อนำแสงแบบคอมโพสิตที่มีโครงสร้างตามหัวข้อ 3.1 เกิดการโค้งงอ โดยมีรัศมีของการโค้งงอเป็น  $R$  จะทำให้เอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์ของท่อนำแสงแบบคอมโพสิตนี้เปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับรัศมีการโค้งงอดังนี้

$$n_{eff} = n_0 \left[ 1 + \frac{r}{R} \cos(\Phi) \right] \quad (3.29)$$

เมื่อ  $n_0$  คือดัชนีหักเหแสงของคอมโพสิตเวฟไกด์ หรือท่อนำแสงคู่ที่มีขนาดค้อยเล็กลง  $r$  คือขนาดรัศมีของท่อนำแสงที่ประกอบขึ้นเป็นคอมโพสิตเวฟไกด์  $R$  คือขนาดรัศมีของการโค้งงอ  $\phi$  คือมุมของการโค้งงอ

ในกรณีที่ท่อนำแสงแบบคอมโพสิตมีโครงสร้างไม่สมมาตร เช่น ท่อนำแสงแบบหลอรวมที่มีโครงสร้างแบบพาราโบลา เป็นต้น การศึกษาท่อนำแสงแบบนี้จะทำได้ยากกว่าท่อนำแสงแบบอื่น ๆ เนื่องจากบริเวณที่เกิดการโค้งงอมากที่สุดของท่อนำแสงแบบนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุดของท่อนำแสง อย่างไรก็ตามจากสมการกล่าวมาข้างต้นสามารถบ่งบอกถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการคัปปลิงแสงอันเนื่องมาจากแรงภายนอก ที่ทำให้เกิดการโค้งงอของท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิตได้เป็นอย่างดี ส่วนการศึกษาผลของแรงที่ทำให้เกิดการโค้งงอนั้นนิยมศึกษาขนาดรัศมีของการโค้งงอเปรียบเทียบกับกำลังแสงที่ตรวจวัดได้ที่ปลายเอาต์พุตทั้งสองของท่อนำแสงโดยตรง

### 3.5.2.2 แรงที่ทำให้เกิดการบิดรอบแกนกลางท่อนำแสงหลอรวม

การบิดแกนของท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิตจะทำให้อัตราส่วนการคัปปลิงกำลังแสงเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับมุมของการบิด ทั้งนี้เนื่องจากเอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์ของท่อนำแสงไอเดนติคัลคอมโพสิตเปลี่ยนแปลงไปตามมุมการบิดรอบแกนกลาง ส่งผลให้ค่าคงที่สำหรับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่และสัมประสิทธิ์การค้ำปลิงแสง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์เปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กัน ถ้ากำหนดให้  $N$  เป็นจำนวนรอบของการบิครอบแกนกลางของท่อนำแสง ดังนั้นจำนวนรอบของการบิครอบแกนกลางกับสัมประสิทธิ์การค้ำปลิงแสงและระยะการค้ำปลิงแสงดังนี้

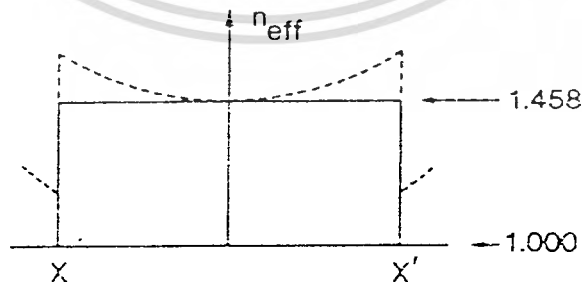
$$N = \frac{C_0 l}{\pi} \quad (3.30)$$

เมื่อ  $C_0$  คือสัมประสิทธิ์การค้ำปลิงแสงของค้ำปลิงแบบหุลอมรวม  $l$  คือระยะการค้ำปลิงแสง การเปลี่ยนแปลงเอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์เนื่องจากการบิครอบแกนกลางของท่อนำแสงแบบไอเคนติคัลคอมโพสิตนั้น หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$n_{eff}^2 = \left[ 1 + \frac{(x^2 + y^2)}{b^2} \right] n_0^2 \quad (3.31)$$

เมื่อ  $b$  คือความยาวครรอบการบิครอบ  $n_0$  คือดัชนีหักเหแสงของท่อนำแสงแบบคอมโพสิต สมการข้างต้นนี้ได้มาจากการแปลงสมการ (3.29) จากโคออร์ดิเนตของ  $r$  และ  $\phi$  ไปยังโคออร์ดิเนตของการบิครอบ  $x, y, z$  ซึ่งผลลัพธ์สุดท้ายคือ ได้กราฟที่แสดงค่าของเอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์ในระนาบ  $x$  และ  $y$  ดังรูปที่ 3.5

จากที่กล่าวมาทั้งหมดให้หัวข้อ 3.5.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีแรงกระทำต่อโครงสร้างของท่อนำแสงหุลอมรวม โดยมีผลทำให้เอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์ของท่อนำแสงเปลี่ยนแปลงการค้ำปลิงแสงจะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กัน ซึ่งในการวิจัยนี้จะได้นำเอาหลักการนี้มาทำเป็นอุปกรณ์การตรวจวัดแรงดังจะกล่าวถึงในบทที่ 5



รูปที่ 3.5 แสดงกราฟของเอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์เมื่อท่อนำแสงแบบไอเคนติคัลถูกบิครอบแกนกลางของท่อนำแสง(ตามเส้นประ)

### 3.6 สรุป

การศึกษาการคับปลิงแสงในท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิตสามารถศึกษาได้โดยพิจารณาการแทรกสอดกันระหว่างโหมดแสงพื้นฐานสองโหมดภายในใยแก้วแบบเพอะเทิบทั้งสอง โดยศึกษาพฤติกรรมของซูเปอร์โพลีซันของโหมด คือออก และอีฟเวนโหมด ซึ่งแสดงถึงปริมาณการครอสคับปลิงของแสงระหว่างแกนทั้งสองของท่อนำแสง และสามารถคำนวณหาสัดส่วนกำลังแสงของแกนทั้งสองได้เป็นฟังก์ชันไซน์โคซอดกำลังสองของสัมประสิทธิ์การคับปลิงแสงคูณกับระยะการคับปลิงแสง ส่วนสัมประสิทธิ์การคับปลิงแสงคือสัดส่วนที่แสดงอันตรกิริยาของโลกัดโหมดทั้งสอง ซึ่งสัมประสิทธิ์การคับปลิงแสงดังกล่าวนี้สัมพันธ์กับตัวแปรหลายตัวแปรด้วยกัน ทั้งตัวแปรของโครงสร้างท่อนำแสงเอง เช่น ขนาดของท่อนำแสง ระยะการคับปลิงแสง ความยาวคลื่นแสง และดัชนีหักเหแสงของท่อนำแสง เป็นต้น และยังรวมถึงตัวแปรจากภายนอก เช่น ดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก และแรงกระทำจากภายนอก เป็นต้น ในส่วนของแรงกระทำจากภายนอกอาจแยกได้เป็นแรงที่ทำให้เกิดการโค้งงอ และแรงที่ทำให้เกิดการบิดรอบแกนการหลอมรวม ซึ่งทั้งสองกรณีส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เอฟเฟกทีฟอินเด็กซ์ทั้งสิ้น จึงทำให้การคับปลิงแสงเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กัน

## บทที่ 4

# อุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงและการประยุกต์ใช้งาน

การคัปปลิงแสงระหว่างโวลต์โคมภายในท่อนำแสงคู่ขนานที่มีขนาดค้อย ๆ เล็กทำ ให้เกิดการแบ่งสัดส่วนกำลังแสงระหว่างท่อนำแสงทั้งสอง ซึ่งกำลังแสงสัมพัทธ์ภายในท่อนำแสง ทั้งสองเป็นฟังก์ชันไซน์ไซคอดอลกำลังสองของสัมประสิทธิ์และระยะของการคัปปลิงแสง ดังได้กล่าว ไว้ในบทที่ 3 หลักการดังกล่าวนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้อธิบายการแบ่งและรวมแสงภายในคัป ปลเลอร์แสงได้อย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคัปเปลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ศึกษาอุปกรณ์สื่อสารทางแสงอื่น ๆ ได้อย่างมากมาย เช่น อุปกรณ์แบบรูป อุปกรณ์แบบ รูปมิลเลอร์ อุปกรณ์กรองความถี่ทางแสง อุปกรณ์มัลติเพลกซ์เชิงแสง สวิตช์ทางแสง (Optical Switch) เป็นต้น ส่วนในบทที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็น การประยุกต์หลักการคัปปลิงแสงเพื่อใช้อธิบายการทำงานของอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสง เช่น อุปกรณ์แบบคัปเปลอร์แสง อุปกรณ์แบบรูป และอุปกรณ์แบบรูปมิลเลอร์ เป็นต้น

### 4.1 คัปเปลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสง (Fused-tapered Couplers)

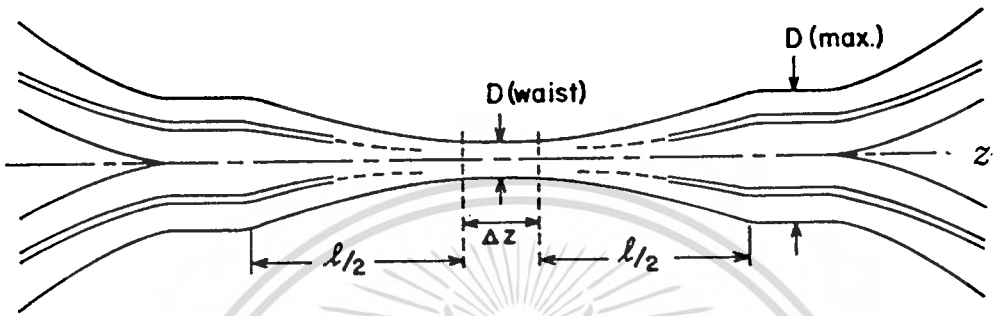
วิธีพื้นฐานในการสร้างคัปเปลอร์ที่ใช้ในงานสื่อสารและการตรวจวัดโดยทั่วไปนั้นมี 2 วิธี คือ วิธีแรกทำได้โดยการขัดผิวบางส่วนของแคลคิงออกและนำมาประกบเข้าด้วยกัน ซึ่งเรียกว่า คัปเปลอร์แบบขัด ส่วนวิธีที่สองทำได้โดยการหลอมรวมท่อนำแสงด้วยความร้อน ซึ่งเรียกว่าคัป เปลอร์แบบหลอมรวม วิธีการที่สองนี้นับว่าเป็นวิธีสร้างคัปเปลอร์ที่นิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจาก สร้างได้ง่ายกว่าวิธีอื่น ๆ และสามารถควบคุมอัตราการสูญเสียความเข้มแสงได้ดีกว่า ทั้งยังเป็นวิธีที่ ประหยัดที่สุด

เมื่อนำใยแก้วนำแสงหลาย ๆ เส้นมาหลอมด้วยความร้อน และดึงปลายทั้งสองด้านของใย แก้วนำแสงทั้งหมดจนกระทั่งขนาดของท่อนำแสงหลอมรวมค้อย ๆ เล็กลง เมื่อป้อนแสงอินพุตเข้า ด้านหนึ่งของอุปกรณ์นี้จะเกิดการแยก-รวมแสงได้ตามหลักการคัปปลิงแสง ซึ่งเรียกอุปกรณ์แบบ นี้ว่า คัปเปลอร์แบบหลายช่องสัญญาณ โดยทั่วไปการสร้างคัปเปลอร์แสงสามารถสร้างคัปเปลอร์ได้ หลายแบบ เช่น แบบ  $2 \times 2$  ช่องสัญญาณ  $3 \times 3$  ช่องสัญญาณ  $4 \times 4$  ช่องสัญญาณ และ  $n \times n$  ช่อง สัญญาณ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม คัปเปลอร์แบบหลายช่องสัญญาณนั้นทำการตรวจสอบคุณสมบัติได้ ค่อนข้างยาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกการสร้างคัปเปลอร์และอุปกรณ์แบบหลอมรวมชนิดที่เป็น แบบ  $2 \times 2$  ช่องสัญญาณ ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 การสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมชนิด $2 \times 2$ ช่องสัญญาณ

การสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมชนิด  $2 \times 2$  ช่องสัญญาณ มีวิธีการเช่นเดียวกันกับการสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมชนิดหลายช่องสัญญาณ ซึ่งทำได้โดยการนำใยแก้วนำแสงสองเส้นมาประกบเข้าด้วยกัน จากนั้นหลอมและดึงปลายทั้งสองด้านของท่อนำแสงคู่ขนานนี้ให้มีขนาดค่อย ๆ เล็กลง ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมชนิด  $2 \times 2$  ช่องสัญญาณ เมื่อ  $D(\text{waist})$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางท่อนำแสงหลอมรวม บริเวณที่เล็กที่สุด ส่วน  $D(\text{max})$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อนำแสงบริเวณที่มีขนาดสูงสุด  $z$  คือ ระยะทางตามแนวแกน  $z$   $l$  คือ ระยะการดึงขณะหลอมรวม ส่วน  $\Delta z$  คือ ขนาดของซอฟต์แวร์

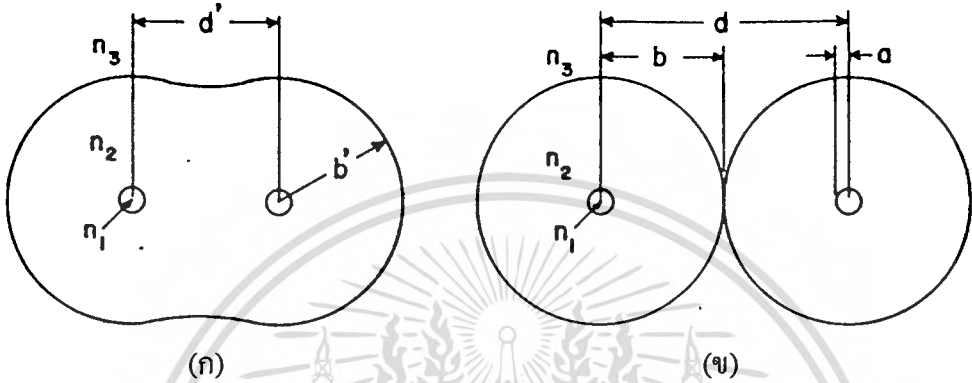
การบิดใยแก้วนำแสงเข้าหากันเล็กน้อยก่อนการหลอมรวมเพื่อประโยชน์สองประการ คือ ประการแรกเพื่อให้ท่อนำแสงหลอมติดกันโดยสมบูรณ์ ประการที่สองเพื่อตรึงท่อนำแสงทั้งสองให้ติดกันไม่หลุดออกจากกันได้ง่าย อย่างไรก็ตามจำนวนรอบของการพันกันก็จะมีผลต่อโครงสร้างและการคัปปลิงแสงด้วยเช่นกัน

การสูญเสียความเข้มแสงตรงบริเวณหลอมรวมนั้น นอกจากจะขึ้นกับความเรียบและความลาดเอียงของท่อนำแสงหลอมรวมแล้ว ยังขึ้นกับโครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวมด้วย เช่น ระยะ ขนาด และรูปแบบโครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวม เป็นต้น รูปแบบโครงสร้างของท่อนำแสงนี้มีความสำคัญมาก เพราะจะมีผลต่อสัดส่วนการคัปปลิงแสง ตัวอย่างแบบโครงสร้างของท่อนำแสง เช่น แบบเส้นตรง แบบพาราโบลา และแบบซิงูไลดอล เป็นต้น

ในปี 1983 แจ็คควิส บูเรส (Jacques Bures) [9] และคณะได้รายงานผลการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมใยแก้วนำแสงแบบโหมคเดี่ยวชนิด  $2 \times 2$  ช่องสัญญาณ โดยมีสัดส่วนของการคัปปลิงแสงกำลังแสงแบบ 50 : 50 เปอร์เซนต์ ที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเดียวกันกับวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งมีโครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวมเป็นแบบพาราโบลา และผลการวิจัยนี้ได้ถูกนำมาเป็นพื้นฐานการศึกษาคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมในปัจจุบัน

### 4.1.2 คัปเปิลอร์แบบหลอมรวมที่มีรูปแบบเป็นพาราโบลา

เมื่อสร้างท่อนำแสงแบบหลอมรวมด้วยการหลอมและดึงปลายใยแก้วนำแสงคู่ขนานออกเป็นระยะทาง  $l$  โดยมีบริเวณที่เกิดการหลอมเหลวของแก้วหรือซอฟต์แวร์ (Softzone) เป็นระยะ  $\Delta z$  จะได้คัปเปิลอร์แสงที่มีโครงสร้างเป็นแบบพาราโบลา ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีโครงสร้างภาคตัดขวางของท่อนำแสงหลอมรวมดังรูปที่ 4.2

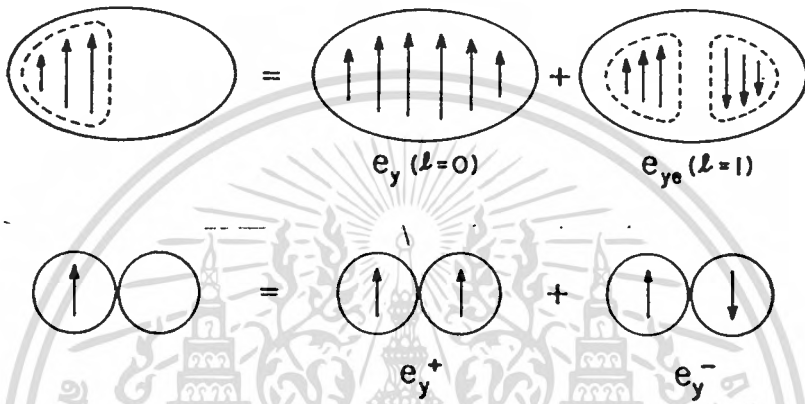


**รูปที่ 4.2** แสดงภาคตัดขวางของท่อนำแสงหลอมรวม เมื่อ  $n_1$  คือ ดัชนีหักเหแสงของแกนใยแก้วนำแสง  $n_2$  คือ ดัชนีหักเหแสงของเคลดคิง ส่วน  $n_3$  คือ ดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอกท่อนำแสงหลอมรวม  $a$  และ  $a'$  คือ ขนาดรัศมีของแกนของใยแก้วนำแสง  $b$  และ  $b'$  คือ ขนาดรัศมีเคลดคิง  $d$  และ  $d'$  คือ ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของท่อนำแสงทั้งสอง

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าขนาดของท่อนำแสงค่อย ๆ เล็กลงเป็นฟังก์ชันแบบพาราโบลา ตรงบริเวณที่เล็กสุดของท่อนำแสงมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น  $D(\text{waist})$  ส่วนบริเวณที่เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสงใหญ่ที่สุดเป็น  $D(\text{max})$  ส่วนภาคตัดขวางของโครงสร้างท่อนำแสงมีลักษณะเป็นรูปคัมเบล (Dumbel) ดังรูปที่ 4.2(ก) และเป็นรูปวงกลมสองวงแตะชิดกันดังรูปที่ 4.2(ข) หรือในกรณีที่มีการหลอมรวมเกิดขึ้นสมบูรณ์มาก ๆ อาจเป็นรูปวงรีได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามแม้ว่าการหลอมรวมท่อนำแสงอาจได้ท่อนำแสงที่มีโครงสร้างต่าง ๆ ก็ตาม แต่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านท่อนำแสงทั้งสามแบบยังคงมีพฤติกรรมเหมือนกัน กล่าวคือ เมื่อมีแสงจากปลายด้านอินพุตเส้นใดเส้นหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านท่อนำแสงหลอมรวม จะเกิดการแยกออกเป็นสองโลคัลโหมด และเคลื่อนที่อยู่ภายในท่อนำแสงคู่ที่มีขนาดค่อย ๆ เล็กลง เนื่องจากโครงสร้างของท่อนำแสงเป็นแบบคอมโพสิตเวฟไกด์ จึงเกิดการแทรกสอดกันระหว่างโลคัลโหมด โดยที่ขนาดของซูเปอร์โพสิชันโหมดจะขึ้นกับผลการรวมกันหรือหักล้างกันของโลคัลโหมด ดังนั้นการศึกษาการคัปปลิงกำลังแสงจึงทำได้โดยศึกษาสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กของซูเปอร์โพสิชันโหมดโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้ซูเปอร์โพสิชันของโหมดเกิดขึ้นได้ 2 โหมด คือ โหมดที่เกิดจากการเสริมกัน (ออดโหมด) แทนด้วย  $e_y^+$  และโหมดที่เกิดการหักล้างกัน (อีฟเวนโหมด) แทนด้วย  $e_y^-$  โดยที่ทั้ง  $e_y^+$  และ  $e_y^-$  เป็นฟังก์ชันของโลคัลโหมดทั้งสอง ถ้าพิจารณาในกรณีโพลาริเซชันของแสงจะพบว่าโครงสร้างภาคตัดขวางทั้งสามแบบจะมีผลของโพลาริเซชันของแสงคล้ายกัน กล่าวคือ จะมีโพลาริเซชันของแสงขนานกันสองแนวดังรูปที่ 4.3 ซึ่งสอดคล้องกับโพลาริเซชันของคอมโพสิตเวฟไกด์ในบทที่ 3



รูปที่ 4.3 แสดงโหมดของการ โพลาริเซชันของแสงภายในท่อนำแสงแบบหลอมรวม

#### 4.1.3 โมเดลของการหลอมรวม

จากรูปที่ 4.2 ถ้ากำหนดให้ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของท่อนำแสงคู่ขนานเป็น  $d$  และกำหนดให้  $b$  เป็นขนาดรัศมีของท่อนำแสงทรงกระบอกที่ประกอบเป็นคัปเปิลเลอร์ ในกรณีที่มีการหลอมรวมเกิดขึ้นน้อย ๆ ตามรูปที่ 4.2(ข) และขนาดของท่อนำแสงทั้งสองค่อย ๆ เล็กลงในทิศทางแกน  $z$  ดังนั้นจึงแทนค่า  $d$  ด้วย  $d(z)$  และ  $b$  แทนด้วย  $b(z)$  ได้โดยตรง เนื่องจาก  $b(z)$  ลดลง  $d(z)$  จะลดลงสัมพันธ์กัน และสามารถหาอัตราส่วนของ  $d(z)$  และ  $b(z)$  ได้เท่ากับ  $2 \left( \frac{d(z)}{b(z)} = 2 \right)$  ในกรณีที่มีการหลอมรวมดีมาก ๆ จะพบว่า  $\frac{d(z)}{b(z)} < 2$  ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวมีประโยชน์ต่อการหาสัมประสิทธิ์ของการหลอมรวม ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.4 เนื่องจากโมเดลที่จะศึกษานี้เป็นแบบพาราโบลาดังนั้นการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสงแต่ละอันที่ประกอบขึ้นเป็นท่อนำแสงหลอมรวมจะเป็นฟังก์ชันพาราโบลาดังนี้

$$D(z) = D_f [1 + \gamma z^2] \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $D(z)$  คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสงที่ระยะทาง  $z$   $D_f$  คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสงตรงบริเวณที่เล็กที่สุดของท่อนำแสงแบบหลอมรวม  $\gamma$  คือ ค่าคงที่สำหรับฟังก์ชันพาราโบลา และ  $z$  คือ ระยะการหลอมรวมตามแนวแกน  $z$

ในการหลอมรวมท่อนำแสงนั้นจะต้องให้ความร้อนกับท่อนำแสงจนกระทั่งบริเวณที่ต้องการหลอมรวมมีความร้อนและเกิดการหลอมละลาย ซึ่งเราเรียกบริเวณนี้ว่า “ ซอฟท์โซน ” เมื่อตั้งปลายด้านอินพุตและเอาต์พุตทั้งสองของท่อนำแสงหลอมรวม จะทำให้บริเวณซอฟท์โซนนี้ยืดออกและเล็กลงดังรูปที่ 4.4 ถ้ากำหนดให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสง ที่ประกอบขึ้นเป็นท่อนำแสงหลอมรวมก่อนการหลอมรวมเป็น  $D_i$  ขณะหลอมรวมมีระยะซอฟท์โซนเป็น  $\Delta z$  และระยะการตั้งท่อนำแสงให้ยืดออกเป็น  $l$  ส่วนระยะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสงหลอมรวมเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมทั้งหมดเป็นระยะทาง  $L$  โดยที่  $L = \Delta z + l$  ดังนั้นเมื่อพิจารณาตามหลักการทรงปริมาตรของแก้ว (Conserves Glass Volume) จะพบว่าปริมาตรของแก้วก่อนและหลังการตั้งให้ยืดออกมีขนาดเท่ากัน และสอดคล้องกับสมการดังนี้

$$\pi \left( \frac{D_i}{2} \right)^2 \Delta z = \int_{-L/2}^{L/2} \pi \left[ \frac{D(z)}{2} \right]^2 dz \quad (4.2)$$

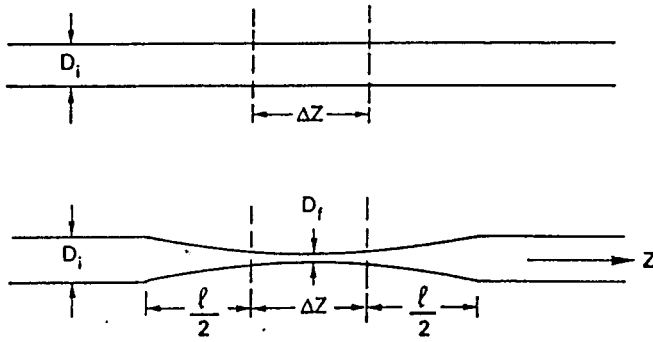
เมื่อ  $D_i$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสงก่อนการหลอมรวม ส่วน  $D(z)$  สอดคล้องกับสมการ (4.1) ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการ (4.1) ลงในสมการ (4.2) จะพบว่า  $\frac{D_f}{D_i}$  และ  $\gamma$  เป็นฟังก์ชันของ  $l/\Delta z$  ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาวิจัยของเบิร์นส (W.K. Burns) และคณะ [14] กล่าวคือ กราฟของ  $\frac{D_f}{D_i}$  และ  $\frac{l}{\Delta z}$  เป็นฟังก์ชันพาราโบลา และเข้าใกล้ศูนย์ที่  $\frac{l}{\Delta z} \approx 4$  ดังรูปที่ 4.5 ส่วนกราฟของ  $\gamma$  และ  $\frac{l}{\Delta z}$  เป็นรูปเอ็กซ์โปเนนเชียลที่มีค่าเป็นอนันต์ เมื่อ  $\frac{l}{\Delta z}$  เข้าใกล้ 4.0 ดังรูปที่ 4.6 นอกจากนี้เบิร์นสยังได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\gamma$  กับ  $\frac{l}{\Delta z}$  ในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$\gamma = \frac{4[\exp(l/2\Delta z) - 1]}{(l + \Delta z)^2} \quad (4.3)$$

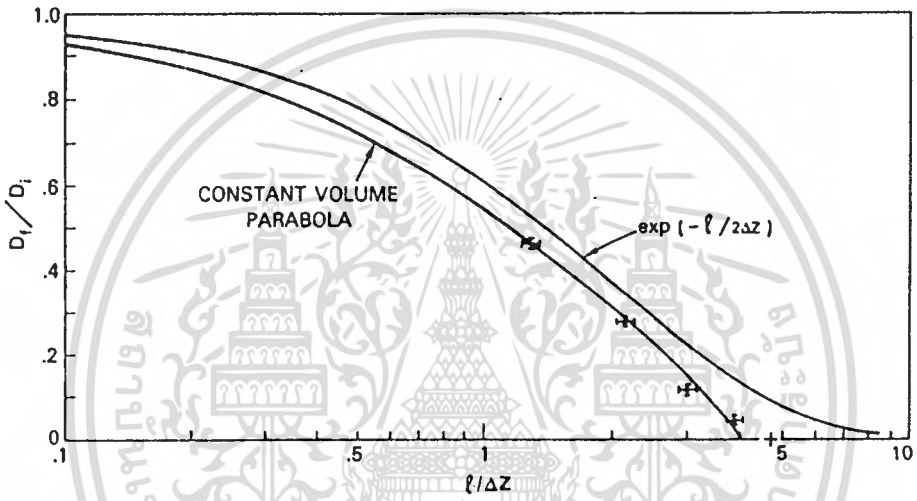
ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดของท่อนำแสงหลอมรวมหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$D_f = D_i \exp(-l/2\Delta z) \quad (4.4)$$

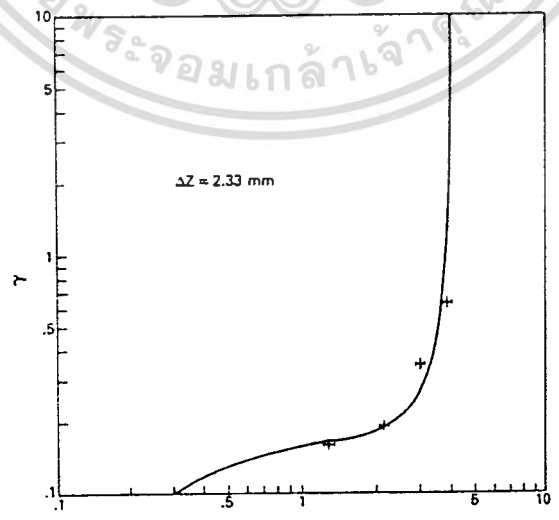
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงโมเดลของการหลอมรวม โดยแยกพิจารณาที่หน้าแสงคู่ขนานเพียงเส้นเดียว โดยที่ รูปบนแสดงโมเดลก่อนการหลอมรวม ส่วนรูปล่างแสดงโมเดลหลังการหลอมรวม



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{D_f}{D_i}$  และ  $\frac{l}{\Delta z}$



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\gamma$  และ  $\frac{l}{\Delta z}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 การคับปลิงแสงภายในคับเปลอร์แบบหลอมรวม

เมื่อพิจารณาใยแก้วนำแสงแบบโหมคเดี่ยว ที่ประกอบเป็นคับเปลอร์แบบหลอมรวม พบว่าในภาวะโคคเดี่ยว (ยังมีได้ประกอบเข้าเป็นคับเปลอร์แสง) นั้นสนามไฟฟ้าในแนวตามขวางของโหมคแสงสอดคล้องกับสมการ (3.9) ในหัวข้อ 3.2 ซึ่งเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลของ  $\beta$  และ  $z$  เมื่อนำใยแก้วนำแสงทั้งสองมาหลอมรวมกันจะพบว่า ท่อนำแสงหลอมรวมที่ได้มีโครงสร้างเป็นท่อนำแสงแบบไอเดนติคัลคอมโพสิต และมีโครงสร้างเป็นแบบออปติคัลลิเวลเซฟพาราเรชัน ทั้งนี้เนื่องจากท่อนำแสงที่นำมาทำคับเปลอร์แบบหลอมรวมนี้ เป็นท่อนำแสงชนิดเดียวกัน ขนาดของโครงสร้างเท่ากัน และเมื่อถูกหลอมรวมและถูกดึงให้ยืดออกด้วยระยะทางเท่ากัน ซึ่งมีหลักการเดียวกันกับโครงสร้างของท่อนำแสงที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 เนื่องจากคับเปลอร์แบบหลอมรวมนี้มีโครงสร้างเป็นแบบพาราโบลา ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำแสงไม่คงที่ตลอดระยะการหลอมรวม ดังนั้นขนาดแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าของโกลด์โหมคจึงเปลี่ยนแปลงตามระยะการหลอมรวม และสนามไฟฟ้าของโกลด์โหมคสัมพันธ์กับแอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลงไปดังสมการ (3.10) เมื่อใช้ทฤษฎีโหมคคู่ศึกษากำลังแสงสัมพัทธ์ของโหมคแสง พบว่าสอดคล้องกับสมการ (3.18) ซึ่งแสดงให้เห็นทรานส์ดักชันกำลังแสงสัมพัทธ์ระหว่างโหมคแสงคู่ภายในคับเปลอร์แบบหลอมรวมเป็นฟังก์ชันไซน์โคซของกำลังสองของผลรวมเชิงเส้นของสัมประสิทธิ์การคับปลิงแสง

ในการตรวจวัดสัดส่วนกำลังแสงสัมพัทธ์ระหว่างโหมคแสงคู่ขนานไม่สามารถทำได้โดยตรง เนื่องจากไม่สามารถตรวจวัดกำลังแสงที่จุดสิ้นสุดของการหลอมรวมได้ อย่างไรก็ตามสามารถตรวจวัดกำลังแสงเอาต์พุตที่ปลายใยแก้วนำแสงที่นำมาสร้างเป็นคับเปลอร์ได้ ซึ่งอาจเป็นค่าที่ไม่ถูกต้องเสียทีเดียว แต่ก็สามารถใช้แทนกันได้กรณีที่ไม่คำนึงถึงตัวแปรบางตัว เช่น ระยะความยาวใยแก้วนำแสงที่ไม่เท่ากัน หรือการสูญเสียความเข้มแสงของปลายทั้งสองไม่เท่ากัน หรือการป้อนแสงเข้าสู่อุปกรณ์รับแสงไม่เท่ากัน เป็นต้น

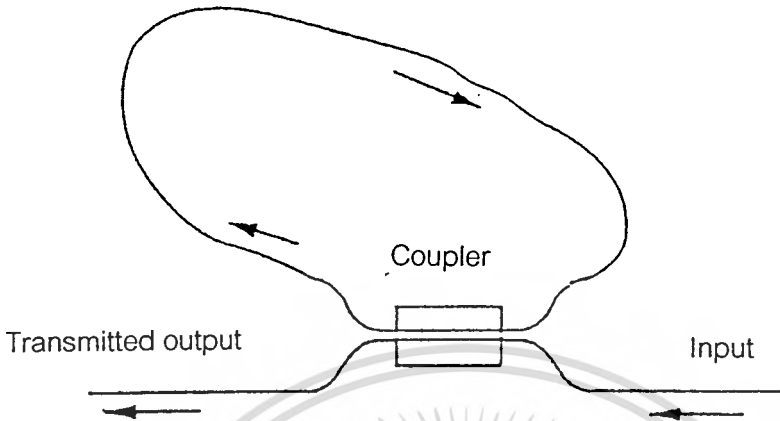
การสร้างคับเปลอร์แบบหลอมรวมมักนิยมออกแบบ โครงสร้างการหลอมรวมด้วยโมเดลคณิตศาสตร์ เพื่อหาขนาดของการดึงขณะหลอมรวมตามคุณสมบัติการใช้งานต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น กรณีการสร้างคับเปลอร์แบบหลอมรวม เพื่อแบ่งแยกกำลังแสงที่สัดส่วนกำลังแสงต่าง ๆ (50:50 หรือ 70:30) ซึ่งต้องได้รับการออกแบบโครงสร้างไว้ก่อนจึงจะได้ค่าที่ถูกต้องหรือใกล้เคียง

## 4.2 อุปกรณ์แบบลูป

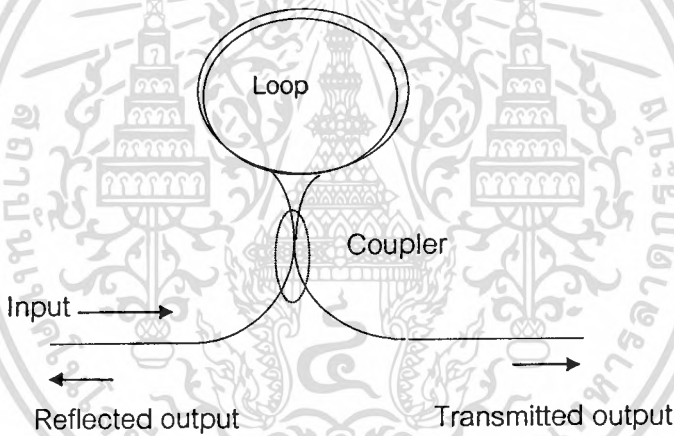
อุปกรณ์แบบลูปเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากการประยุกต์ใช้คับเปลอร์แสงในแบบต่าง ๆ ด้วยการนำปลายทั้ง 4 ของคับเปลอร์มาต่อกันในแบบต่าง ๆ ตัวอย่าง เช่น การนำปลายอินพุตกับเอาต์พุตอย่างละเส้นเชื่อมต่อกันด้วยกันดังรูปที่ 4.7 จะได้อุปกรณ์แบบลูปชนิดที่ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ขึ้นภายในลูป ซึ่งเรียกลูปแบบนี้ว่า " ลูปเรโซเนเตอร์ " ส่วนการนำปลายเอาต์พุตทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมต่อเข้าด้วยกันดังรูปที่ 4.8 จะได้อุปกรณ์แบบลูปชนิดที่ทำให้เกิดการย้อนกลับของกำลังแสงเข้าสู่สู่ปลายอินพุตเดิม เรียกอุปกรณ์แบบนี้ว่า " ลูปมิลเลอร์ "



รูปที่ 4.7 ภาพแสดงโครงสร้างของลูปเรโซเนเตอร์



รูปที่ 4.8 ภาพแสดงโครงสร้างของลูปมิลเลอร์

ในกรณีการสร้างอุปกรณ์แบบลูปด้วยคาร์ลอมรวมท่อนำแสงนั้น อาจทำได้โดยการนำใยแก้วนำแสงเส้นเดียวกันมาขดเป็นรูปแบบต่าง ๆ จากนั้นทำการหลอม และดึงท่อนำแสงทั้งสองปลายให้เกิดการคับปลิงแสงวนกลับภายในลูป ซึ่งการทำแบบนี้จะช่วยลดปัญหาการสูญเสียความเข้มแสงตรงบริเวณจุดเชื่อมต่อปลายของท่อนำแสงดังได้กล่าวแล้วข้างต้น

#### 4.2.1 ลูปมิลเลอร์ (Fiber Loop Mirror)

หลักการของลูปมิลเลอร์ คือ เมื่อมีแสงจากปลายด้านอินพุตเคลื่อนที่ผ่านบริเวณคับปลิงแสง จะเกิดการแยกกำลังแสงออกเป็นสองทาง และเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้ามจนกระทั่งแสงทั้งสองส่วนเคลื่อนที่กลับมายังบริเวณคับปลิงแสงอีกครั้ง และเกิดการแบ่งและรวมแสงอีกครั้งหนึ่ง แล้วเคลื่อนที่ออกไปสู่ปลายด้านอินพุตส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือจะเคลื่อนที่ย้อนกลับเข้าสู่ปลายด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุตเดิม ดังรูปที่ 4.7 ส่วนการหาสัดส่วนของกำลังแสงย้อนกลับสามารถทำได้โดยการแยกพิจารณาฟังก์ชันคลื่นและขนาดของแอมพลิจูดในแต่ละครั้งของการเคลื่อนที่ผ่านคัปเปิลเลอร์ ซึ่งแยกพิจารณาได้เป็นสองกรณีดังนี้

กรณีแรก พิจารณาสัดส่วนของกำลังแสงส่วนที่เคลื่อนที่ผ่านคัปเปิลเลอร์โดยไม่คัปปลิงข้ามไปยังอีกท่อนำแสงหนึ่ง แต่เคลื่อนที่ไปในท่อนำแสงเดิมไปตามทิศตามเข็มนาฬิกา (ทิศทางสมมติ) จนกระทั่งวนกลับมาถึงคัปเปิลเลอร์แสงอีกครั้งหนึ่ง และเกิดการคัปปลิงข้ามท่อนำแสงเดิมกลับเข้าสู่ปลายของอินพุตเดิม ซึ่งกำลังแสงส่วนนี้สอดคล้องกับสมการแอมพลิจูดของโหมดแสง ดังนี้

$$A_{n_1} = [\cos(\bar{C} \cdot L) \exp(-j\phi)] \times (-j \sin(\bar{C} \cdot L)) \quad (4.5)$$

เมื่อ  $\bar{C} \cdot L = \int_0^L C(z) dz$   $L$  คือ ระยะทางหลอมรวมของคัปเปิลเลอร์ และ  $\phi$  คือ มุมที่เกิดจากผลต่างเฟสของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกาและโหมดแสงที่เคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกา พจน์แรกทางซ้ายมือของสมการแสดงถึงสัดส่วนแอมพลิจูดของกำลังแสงที่เคลื่อนที่ผ่านคัปเปิลเลอร์ครั้งแรก โดยไม่คัปปลิงข้ามท่อนำแสง และเคลื่อนที่ไปในแกนเดิมของท่อนำแสง คู่กับผลต่างเฟสของโหมดแสงที่เคลื่อนที่สวนทางกัน ส่วนพจน์ที่สองที่อยู่หลังเครื่องหมายคูณ คือ ส่วนของกำลังแสงที่คัปปลิงข้ามกลับเข้าสู่ปลายด้านอินพุตเดิม

กรณีที่สองพิจารณากำลังแสงที่คัปปลิงข้ามท่อนำแสงขณะที่ผ่านคัปเปิลเลอร์ในครั้งแรก และเคลื่อนที่ไปในทิศทวนเข็มนาฬิกา จนกระทั่งวนกลับมาผ่านคัปเปิลเลอร์ โดยไม่คัปปลิงข้ามไปยังปลายด้านเอาต์พุต ซึ่งสอดคล้องกับสมการแอมพลิจูดของกำลังแสง ดังนี้

$$A_{n_2} = -j \sin(\bar{C} \cdot L) \exp(-j\phi) \cos(\bar{C} \cdot L) \quad (4.6)$$

พจน์ที่เป็นฟังก์ชันไซน์ของสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงแทนแอมพลิจูดของกำลังแสงส่วนที่คัปปลิงข้ามไปยังท่อนำแสงอีกอันหนึ่งในขณะเคลื่อนที่ผ่านคัปเปิลเลอร์ครั้งแรก พจน์ที่เป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลแทนสัดส่วนกำลังแสงที่ลดลงเนื่องจากผลต่างเฟสของโหมดแสงที่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกัน ส่วนพจน์ที่เป็นฟังก์ชันโคไซน์แทนสัดส่วนแอมพลิจูดกำลังแสงส่วนที่ไม่คัปปลิงไปยังปลายด้านเอาต์พุตขณะที่เคลื่อนที่ผ่านคัปเปิลเลอร์ครั้งที่สอง เนื่องจากแอมพลิจูดกำลังแสงย้อนกลับจากคู คือ ผลรวมของ  $A_{n_1}$  และ  $A_{n_2}$  ดังนี้

$$\begin{aligned}
 A_r &= [\cos(\bar{C} \cdot L)\exp(-j\phi)\sin(\bar{C} \cdot L)] - [j\sin(\bar{C} \cdot L)\exp(-j\phi)\cos(\bar{C} \cdot L)] \\
 &= -2\sin(\bar{C} \cdot L)\cos(\bar{C} \cdot L)\exp(-j\phi) \\
 &= -\sin(2\bar{C} \cdot L)\exp(-j\phi)
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

ในกรณีที่โหมดแสงที่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกันภายในลูบมีเฟสตรงกัน จะได้กำลังแสงสัมพัทธ์ที่ย้อนกลับเข้าสู่ปลายของอินพุตมีค่าดังนี้

$$P_r = |A_r|^2 = \sin^2(2\bar{C} \cdot L) = \sin^2\left(2 \int_0^L (C(z))dz\right) \tag{4.8}$$

ส่วนกำลังแสงที่เคลื่อนที่ผ่านลูบไปยังปลายด้านเอาต์พุตของลูบมีลเรออร์สามารถพิจารณาได้แบบเดียวกันกับการหาลำดับแสงย้อนกลับจากลูบ แต่เป็นกรณีที่ตรงข้ามกันทั้งสองกรณี ซึ่งสามารถหาแอมพลิจูดของสัดส่วนกำลังแสงได้ดังนี้

$$A_t = \cos(2\bar{C} \cdot L)\exp(-j\phi) \tag{4.9}$$

ส่วนกำลังแสงสัมพัทธ์หาได้จาก  $P_t = |A_t|^2$

$$P_t = \cos^2(2\bar{C}L) \tag{4.10}$$

#### 4.2.2 ลูบเรโซเนเตอร์ (Fiber Loop Resonator)

อุปกรณ์แบบลูบเรโซเนเตอร์โดยทั่วไปมีโครงสร้างของลูบเป็นแบบวงแหวน ซึ่งมีได้สองแบบดังรูปที่ 4.8 โครงสร้างของลูบเรโซเนเตอร์เป็นโครงสร้างที่ทำให้เกิดการสะสมกำลังแสงภายในลูบ และเกิดการกำทอน (Resonance) ขึ้นภายในลูบเมื่อความยาวของลูบเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นแสง ข้อดีของอุปกรณ์แบบลูบเรโซเนเตอร์ คือ ใช้เป็นอินเตอร์เฟอร์โรมิเตอร์ได้ดี ซึ่งมักนิยมใช้ในการทำเลเซอร์ใยแก้วนำแสง (Fiber Laser) และอุปกรณ์การสื่อสารแบบอื่น ๆ

### 4.3 อุปกรณ์แบบหลอมรวมและการประยุกต์ใช้งานด้านสื่อสาร

อุปกรณ์การหลอมรวมที่นำมาใช้ได้กลายมาเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการใช้งานด้านสื่อสารยุคปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์แบบนี้มีต้นทุนต่ำ ใช้งานได้สะดวก และสามารถเลือกคุณภาพของอุปกรณ์ได้หลากหลายกว่าอุปกรณ์แบบอื่น ๆ จึงมักเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย

#### 4.3.1 คัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม

หน้าที่หลักของคัปเปิลเลอร์ในการสื่อสาร คือการแยกและรวมแสง ซึ่งถือว่ามีมีความสำคัญต่อการสื่อสารเป็นอันมาก อย่างไรก็ตามคัปเปิลเลอร์ที่ใช้ในงานสื่อสารโดยทั่วไปมักต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของการแบ่งและรวมแสง กล่าวคือ มักต้องการสัดส่วนการแบ่งและรวมแสงที่คงที่ ดังนั้นคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมที่สร้างขึ้น จะต้องทำการตรึงและเคลือบด้วยสารที่มีดัชนีหักเหแสงต่ำ เช่น ซิลิโคนเรซินที่มีดัชนีหักเหแสงต่ำ (Low-index Silicone Resin) เป็นต้น

สัดส่วนการคัปปลิงแสงเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการใช้งานด้านสื่อสารมาก ดังนั้นคัปเปิลเลอร์ที่ใช้งานสื่อสารโดยทั่วไปจึงมีสัดส่วนการคัปปลิงแสงอยู่หลายค่า เช่น แบบ 50:50, 40:60, 30:70 และ 20:80 เป็นต้น

การสื่อสารเครือข่ายใยแก้วนำแสงโดยทั่วไปมีรูปแบบของการเชื่อมต่อหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น แบบวงแหวน (Ring) แบบดาว (Star) และแบบบัส (Bus) เป็นต้น ซึ่งการเชื่อมต่อในแต่ละแบบนั้น มีการแยกและรวมกำลังแสงหลายช่องทาง ดังนั้นความจำเป็นของการใช้คัปเปิลเลอร์แบบต่าง ๆ มีมากขึ้น เช่น คัปเปิลเลอร์แบบ Y (Y-Coupler) คัปเปิลเลอร์แบบ X (X-Coupler) คัปเปิลเลอร์แบบสตาร์ (Star Coupler) และคัปเปิลเลอร์แบบต้นไม้ (Tree Coupler) เป็นต้น

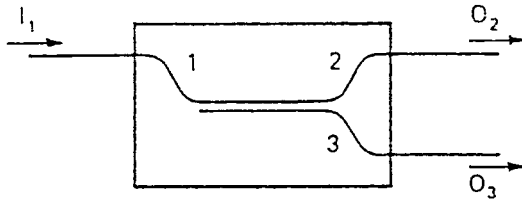
คัปเปิลเลอร์แบบ Y เป็นอุปกรณ์แบ่งกำลังแสงออกเป็นสองช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 4.9(ก) เมื่อสัญญาณอินพุต  $I_1$  จากหนึ่งช่องสัญญาณเคลื่อนที่ผ่านคัปเปิลเลอร์แสง กำลังแสงจะถูกแบ่งแยกออกเป็นสองช่องสัญญาณที่  $O_2$  และ  $O_3$  ในกรณีที่ใช้ Y คัปเปิลเลอร์เป็นอุปกรณ์รวมกำลังแสงจากสองช่องทางเข้าเป็นหนึ่งเดียว ดังรูปที่ 4.9(ข) พบว่ากำลังแสงจากสองช่องทาง  $I_1$  และ  $I_2$  จะเกิดการรวมกันหลังจากผ่านคัปเปิลเลอร์แบบ Y ได้เอาต์พุตที่  $O_3$

คัปเปิลเลอร์แบบ X เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแบ่งและรวมแสงพร้อม ๆ กัน ตัวอย่างเช่น เมื่อต้องการรวมสัญญาณอินพุตสองสัญญาณคือ  $I_1$  และ  $I_2$  เข้าด้วยกัน เพื่อให้สัญญาณทั้งสองแบ่งกำลังแสงออกเป็นสองส่วนที่  $O_3$  และ  $O_4$  ดังรูปที่ 4.9(ค) คัปเปิลเลอร์แบบนี้บางครั้งเรียกว่า ไบไดเรกชันนัลคัปเปิลเลอร์ ( $2 \times 2$  Directional Coupler)

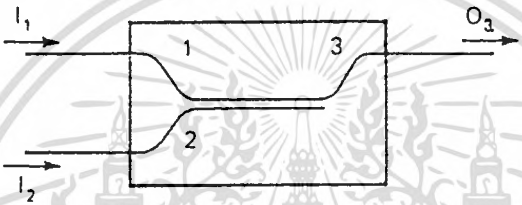
คัปเปิลเลอร์แบบหลายช่องทางที่มีหลายช่องสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ดังรูปที่ 4.9(ง) นั้นในทางสื่อสารมักเรียกว่า " สตาร์คัปเปิลเลอร์ " คัปเปิลเลอร์แบบนี้นิยมใช้ในการสื่อสารแบบเครือข่าย (Communication Network) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสื่อสารแบบเครือข่ายท้องถิ่น (Local-area Network) ซึ่งมักต้องการแบ่งและรวมสัญญาณที่อินพุตและเอาต์พุต คัปเปิลเลอร์แบบสตาร์มักใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

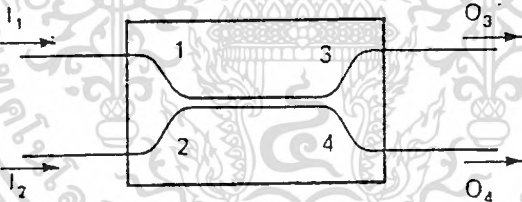
สัญลักษณ์แทนด้วย  $N \times M$  ส่วนคัปเปิลอร์แบบที่มีหนึ่งช่วงสัญญาณอินพุต และมีหลายช่องสัญญาณเอาต์พุต หรือที่เรียกว่า "คัปเปิลอร์แบบ T" มักใช้สัญลักษณ์แทนด้วย  $1 \times M$  ดังรูปที่ 4.9(จ)



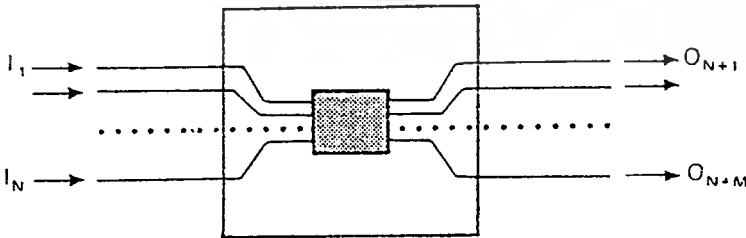
(ก) แสดงโครงสร้างคัปเปิลอร์แบบ Y ที่เป็นอุปกรณ์แยกแสง



(ข) แสดงโครงสร้างคัปเปิลอร์แบบ Y ที่เป็นอุปกรณ์รวมแสง



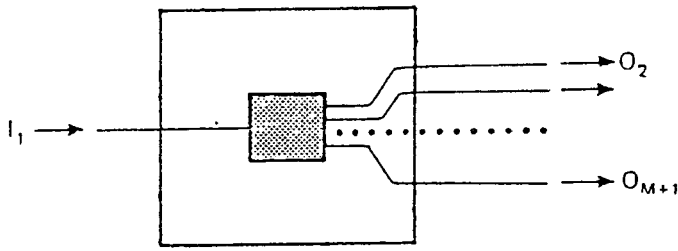
(ค) แสดงโครงสร้างคัปเปิลอร์แบบ X



(ง) แสดงโครงสร้างคัปเปิลอร์แบบสตาร์ (Star)

รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างของคัปเปิลอร์แบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

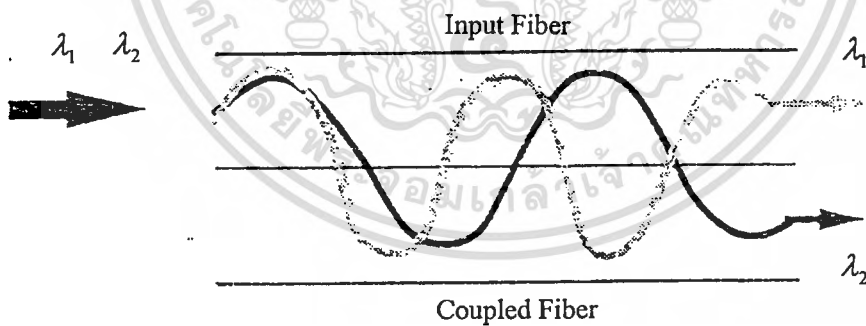


(จ) แสดงโครงสร้างคัปเปิลอร์แบบ T

รูปที่ 4.9 (ต่อ) แสดงโครงสร้างของคัปเปิลอร์แบบต่าง ๆ

#### 4.3.2 การมัลติเพล็กซ์ทางแสงและอุปกรณ์แบบหลอมรวม

จากหลักการคัปปลิงแสงที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จะพบว่าสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น กล่าวคือ สัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงจะมากขึ้นเมื่อความยาวคลื่นแสงเพิ่มขึ้น หลักการดังกล่าวนี้สามารถประยุกต์ใช้ออกแบบอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์เชิงแสงได้เป็นอย่างดี โดยการออกแบบกระบวนการหลอมรวมให้พอเหมาะกับการแยกสัดส่วนกำลังแสงของแสงที่มีความยาวคลื่น  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  ดังรูปที่ 4.10 จะพบว่ามีกำลังแสงที่ปลายเอาต์พุตที่หนึ่งมีกำลังแสง  $\lambda_1$  มากกว่า  $\lambda_2$  และที่ปลายเอาต์พุตที่สองมีกำลังแสงของ  $\lambda_2$  มากกว่า  $\lambda_1$  ซึ่งเรียกอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ว่า อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแสง (Wavelength Division Multiplexer) โดยทั่วไปนิยมเขียนชื่อย่อว่า “ดับบลิวดีเอ็ม” (WDM)



รูป 4.10 แสดงหลักการทำงานของอุปกรณ์ WDM

ในการสร้าง WDM แบบหลอมรวมที่นำแสงนิยมสร้างโดยการหลอมและดึง จนกระทั่งได้กำลังแสง  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  แยกเข้าสู่ปลายอินพุตที่หนึ่งและสองตามลำดับ ส่วนการตรวจวัดกำลังแสงสามารถทำได้โดยตรวจวัดกำลังแสงของ  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  ที่ปลายด้านอินพุตและเอาต์พุต โดยทั่วไปกำลังแสงที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณหลอมรวมมักเกิดการออสซิลเลตหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งการออสซิลเลตแต่ละครั้งจะเท่ากับระยะปิดกั้นของคลื่นแสง  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  ดังนั้นเมื่อระยะการหลอมรวมยาวมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแยกออกจากกันของ  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  จะมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามช่วงห่างระหว่างสองช่องสัญญาณ  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  สอดคล้องกับสมการดังนี้

$$\text{Channel spacing} \propto \frac{1}{\text{No. of beatlengths}} \quad (4.11)$$

ค่าคงที่ในสมการ (4.11) จะเป็นตัวแปรซึ่งสัมพันธ์กับขนาดและโครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวม ดังนั้นในการสร้าง WDM แบบหลอมรวมจึงมักคำนึงถึงขนาดและโครงสร้างควบคู่ไปกับช่องห่างของสัญญาณ โดยทั่วไปช่วงห่างของสัญญาณมักมีขนาดที่ไม่ห่างกันมากนัก ตัวอย่างเช่น WDM ขนาด 60 นาโนเมตร ซึ่งมี  $\lambda_1$  เท่ากับ 1480 นาโนเมตร  $\lambda_2$  เท่ากับ 1540 นาโนเมตร เป็นต้น

### 4.3.3 อุปกรณ์แบบลูบ

อุปกรณ์แบบลูบทั้งแบบลูบเรโซเนเตอร์และลูบมิลเลอร์ที่ใช้ในงานด้านการสื่อสารนั้น โดยทั่วไปนิยมใช้ทำเป็นอุปกรณ์ขยายกำลังแสง และทำเลเซอร์จากใยแก้วนำแสง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์แบบลูบเรโซเนเตอร์นั้น สามารถนำไปทำอุปกรณ์กรองความถี่แสงได้เป็นอย่างดี

## 4.4 อุปกรณ์แบบหลอมรวมกับการใช้งานด้านการตรวจวัด

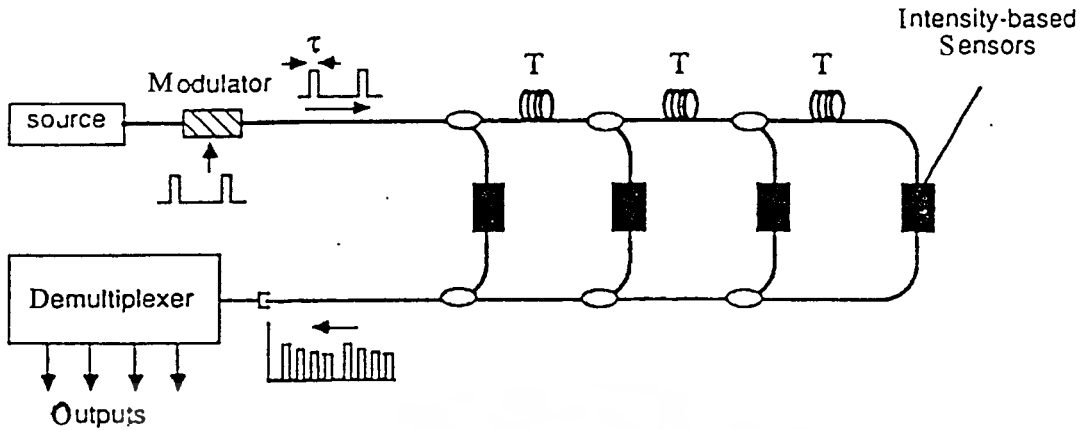
อุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงได้ก้าวเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการตรวจวัด ทั้งในด้านการเป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อ และเป็นตัวอุปกรณ์ตรวจวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งคัปเปิลเลอร์และอุปกรณ์แบบลูบ ได้ถูกนำมาใช้ในงานตรวจวัดอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

### 4.4.1 คัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม

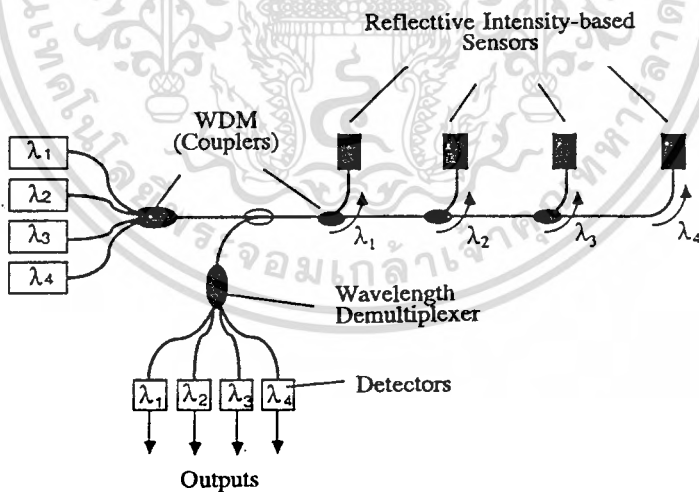
คัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมได้ถูกนำมาใช้ในงานตรวจวัด โดยนำมาทำเป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อและทำอุปกรณ์ตรวจวัดโดยตรง ดังนี้

#### 4.4.1.1 คัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมและการเชื่อมต่ออุปกรณ์ตรวจวัด

ในการตรวจวัดแบบเครือข่ายจำเป็นต้องใช้คัปเปิลเลอร์ในการแยกหรือรวมสัญญาณแสงที่ได้จากการตรวจวัด ดังนั้นคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมจึงนับได้ว่ากำลังจะก้าวเข้ามามีบทบาทสำคัญมาก ทั้งนี้เนื่องจากมีราคาต้นทุนต่ำ สะดวก และรวดเร็วในการเชื่อมต่อ ตัวอย่างของเครือข่ายการตรวจวัด ได้แก่ การมัลติเพลกซ์แบบแบ่งเวลา ดังรูปที่ 4.11 และการมัลติเพลกซ์แบบความยาวคลื่น ดังรูปที่ 4.12 เป็นต้น



**รูปที่ 4.11** แสดงการใช้คัปเปลอร์ในการตรวจวัดระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา โดยอาศัยหลักการมอดูเลตสัญญาณ (Modulate) โดยมอดูเลเตอร์ (Modulator) ผ่านคัปเปลอร์ที่ต่อเรียงกันด้วยปลายเอาต์พุตที่หนึ่ง และต่อกับหัววัดระดับความเข้มแสง (Intensity-based Sensors) โดยผ่านปลายเอาต์พุตของคัปเปลอร์เส้นที่สอง ส่วนสัญญาณแสงจากการตรวจวัดจากหลาย ๆ หัววัด จะผ่านเข้าสู่อุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplexer) ด้วยคัปเปลอร์ที่ต่อเรียงกันอีกชุดหนึ่ง เพื่อรวมสัญญาณก่อนจะถูกนำไปประมวลผล



**รูปที่ 4.12** แสดงการใช้คัปเปลอร์ในการตรวจวัดระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น โดยป้อนแสงอินพุตหลาย ๆ ความยาวคลื่น ผ่านคัปเปลอร์แบบมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นแสง (WDM Couplers) เข้าสู่หัววัดแบบสะท้อนแสง (Reflective intensity-based sensors) ซึ่งแสงสะท้อนกลับที่ได้จากการตรวจวัด จะผ่านคัปเปลอร์เข้าสู่อุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์ (Wavelength Demultiplexer) เพื่อทำการแยกความยาวคลื่นต่าง ๆ เข้าสู่อุปกรณ์รับแสง และแปลงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์

#### 4.4.1.2 อุปกรณ์ตรวจวัดที่ทำจากคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม

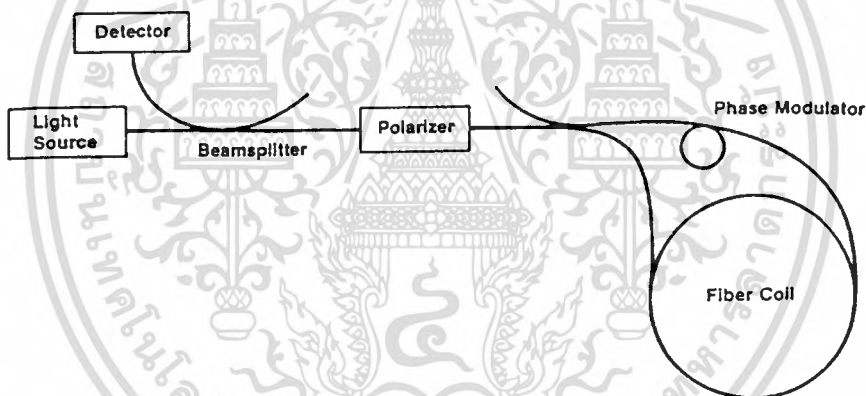
เนื่องจากคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม สามารถนำมาประยุกต์ทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ ได้หลายชนิด ตัวอย่าง เช่น อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ อุปกรณ์ตรวจวัดแรงกด และอุปกรณ์ตรวจจับการรบกวนของสารละลาย เป็นต้น

#### 4.4.2 อุปกรณ์แบบลูป

อุปกรณ์แบบลูปสามารถประยุกต์ใช้ในงานตรวจวัดได้หลายรูปแบบ เช่น ลูปอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ ไซโรสโคปใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Gyroscope) และลูปมิลเลอร์ เป็นต้น

##### 4.4.2.1 ลูปอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่ทำขึ้นจากลูปแบบวงแหวนดังรูปที่ 4.13 โดยอาศัยหลักการหาผลต่างเฟสของพัลส์ของแสงที่เคลื่อนที่วนอยู่ในลูป ซึ่งสามารถประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้หลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ และอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกด เป็นต้น

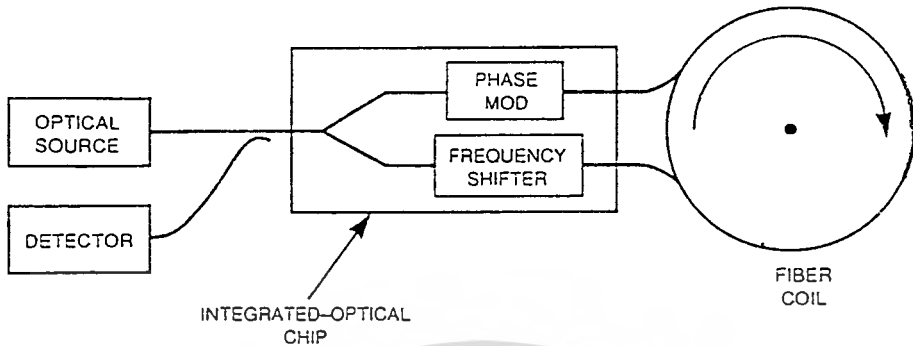


**รูปที่ 4.13** แสดงหลักการของอุปกรณ์แบบลูปอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ โดยอาศัยหลักการป้อนพัลส์แสงผ่านโพลาไรเซอร์ (Polarizer) เพื่อให้เฟสของแสงคงที่ เมื่อพัลส์แสงผ่านคัปเปิลเลอร์แสง จะถูกแยกออกเป็นสองส่วน และเคลื่อนที่สวนทางกัน พัลส์แสงที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางเข็มนาฬิกาจะถูกมอดูเลตให้มีเฟสเปลี่ยนไปโดยเฟสมอดูเลเตอร์ (Phase Modulator) เมื่อแสงที่เคลื่อนที่ผ่านคัปเปิลเลอร์ไปในทิศทางเข็มนาฬิกาเคลื่อนมาถึงคัปเปิลเลอร์อีกครั้งหนึ่ง แสงที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางเข็มนาฬิกาจะเคลื่อนที่เข้าสู่คัปเปิลเลอร์ในเวลาใกล้เคียงกัน โดยมีผลต่างของเฟสเท่ากับเฟสที่ถูกมอดูเลต

##### 4.4.2.2 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบลูปมิลเลอร์

เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์แบบมิลเลอร์ ตัวอย่างเช่น ไซโรสโคปใยแก้วนำแสง ดังรูปที่ 4.14 เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ตรวจวัดดังกล่าวอาศัยหลักการตรวจวัดเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีตัวแปรภายนอกมากระทำกับลูป เพื่อการ ส่วนในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการตรวจวัดผลของการรบกวนไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คัปปลิงแสงเมื่อมีตัวแปรจากภายนอกมากระทำต่อโครงสร้างหลอมรวม โดยใช้เทคนิค โอตีดีอาร์ (OTDR) มาทำการตรวจวัดคงจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 4.5



**รูปที่ 4.14** แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบโวกโรสโคปโยแก้วนำแสง โดยอาศัยหลักการหาผลต่างเฟส เช่นเดียวกับการทำงานของอุปกรณ์ในรูปที่ 4.13 แต่เปลี่ยนจากพัลส์แสงเป็นความถี่ของแสง และสังเกตผลการตรวจวัดได้จากเฟสที่เปลี่ยนไป โดยอาศัยอุปกรณ์เลื่อนความถี่ (Frequency Shifter)

## 4.5 เทคนิคการตรวจวัดแบบโอทีดีอาร์

เทคนิคในการตรวจวัดโยแก้วนำแสงและอุปกรณ์การสื่อสารโยแก้วนำแสงนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมมากในปัจจุบัน คือ การตรวจสอบด้วยเทคนิคการตรวจวัดเวลาการเคลื่อนที่ของแสงหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า " ออปติคัลไทม์โดเมนรีเฟลกโตมิเตอร์ " (Optical Time Domain Reflectometer) หรือเรียกโดยย่อว่า OTDR เทคนิคนี้ได้ถูกนำมาสร้างเป็นเครื่องตรวจวัดเส้นโยแก้วนำแสงที่มีใช้งานแพร่หลายอยู่ในปัจจุบัน

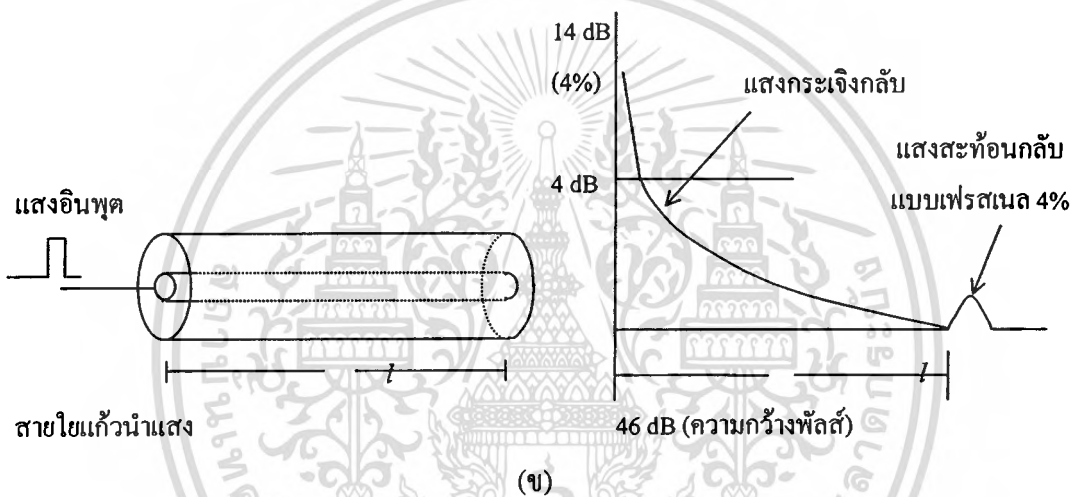
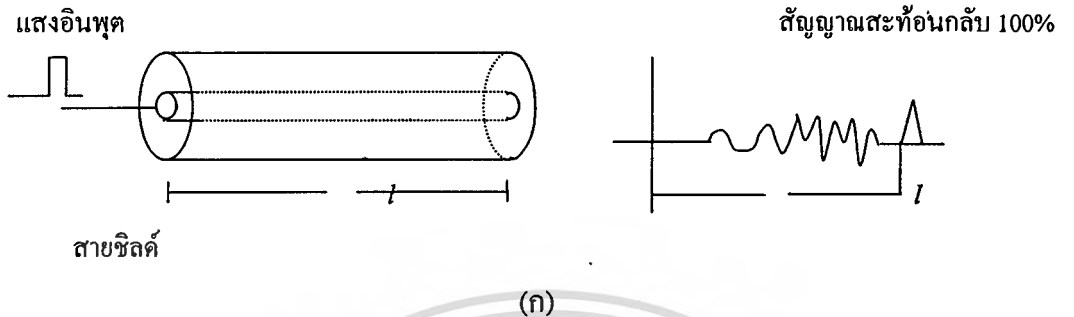
### 4.5.1 หลักการของโอทีดีอาร์

ในการตรวจสอบหาจุดเสียหายในสายเคเบิลชนิดชนิดแกนร่วม (Coaxial Cable) สามารถกระทำได้โดยการส่งสัญญาณในรูปพัลส์ที่ด้านหนึ่งของสายเคเบิล และทำการตรวจวัดสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากรอยจุดเสียหายในสายเคเบิล ซึ่งสัญญาณที่สะท้อนกลับจะมีลักษณะที่ค่อนข้างเด่นชัด โดยในการตรวจวัดจะบันทึกกำลังของสัญญาณเวลานับจากเริ่มมีการส่งสัญญาณไปจนกระทั่งสัญญาณสะท้อนกลับที่ด้านอินพุตเดิม ดังนั้นถ้าทราบความเร็วของสัญญาณที่วิ่งในสายเคเบิลก็จะสามารถคำนวณหาตำแหน่งของจุดเสียได้ ดังรูปที่ 4.15 (ก)

เทคนิคดังกล่าวมีชื่อว่า ไทม์โดเมนรีเฟลกโตมิทรี (Time Domain Reflectometry) หรือเรียกชื่อโดยย่อว่า ทีดีอาร์ (TDR) ซึ่งหมายถึงวิธีการที่ให้สัญญาณเข้าไปทางด้านอินพุตของตัวนำสัญญาณ และทำการวัดสัญญาณที่สะท้อนกลับพร้อมจับเวลาระหว่างการส่งและรับสัญญาณ ซึ่ง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำเวลาที่วัดได้ กับความเร็วของสัญญาณที่วิ่งในตัวกลางมาคำนวณหาระยะทาง ณ ตำแหน่งที่สัญญาณสะท้อนกลับมา ดังนั้น ถ้าสัญญาณสะท้อนกลับมาจากปลายของสายตัวนำสัญญาณระยะทางที่คำนวณได้ก็คือความยาวของตัวนำสัญญาณนั่นเอง



**รูปที่ 4.15** (ก) แสดงหลักการ TDR สำหรับสายซิลด์ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกับ (แกนตั้ง) และระยะทาง (แกนนอน)  
(ข) แสดงหลักการ TDR สำหรับสายใยแก้วนำแสง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับ (แกนตั้ง) และระยะทาง (แกนนอน)

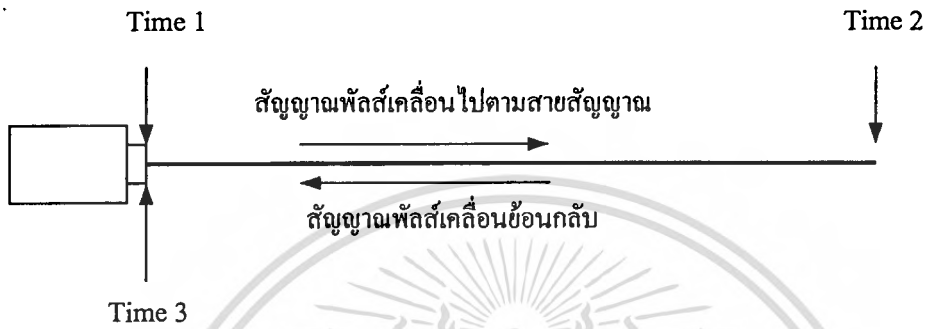
เทคนิคนี้ได้ถูกนำมาใช้กับเส้นใยแก้วนำแสงด้วย และเนื่องจากสัญญาณที่ใช้ในการตรวจสอบเป็นสัญญาณแสง อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบจะทำการส่งสัญญาณแสงในลักษณะเป็นพัลส์เข้าไปยังเส้นใยนำแสงที่ต้องการตรวจสอบ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงถูกเรียกว่า " ออปติคัลไทม์โดเมนรีเฟลกโตมิทรี " ดังรูปที่ 4.15(ข)

เนื่องจากเวลาที่เปลี่ยนไปหรือไทม์ดีเลย์ (Time Delay) ที่วัดโดย OTDR เป็นช่วงเวลาที่สัญญาณใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งไปและกลับ (โดยประมาณ) ในสายเคเบิล ดังนั้นช่วงเวลาที่สัญญาณแสงใช้เคลื่อนที่ไปก็จะเป็นครึ่งหนึ่งของเวลาทั้งหมด ซึ่งก็คือ  $(1/2)(\text{Time 3}-\text{Time 1})$  (รูปที่ 4.16) ดังนั้นความยาวของท่อนำสัญญาณสามารถหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ระยะทาง} = (\text{ความเร็ว} \times (\text{Time 3} - \text{Time 1})) / 2 \quad (4.12)$$

เมื่อ Time 1 คือ เวลาเริ่มปล่อยสัญญาณพัลส์เข้าสู่สายส่งสัญญาณ Time 2 คือ เวลาที่สัญญาณพัลส์สะท้อนจากปลายของสายส่งสัญญาณ Time 3 คือ เวลาที่วัดสัญญาณพัลส์ที่สะท้อนกลับมา



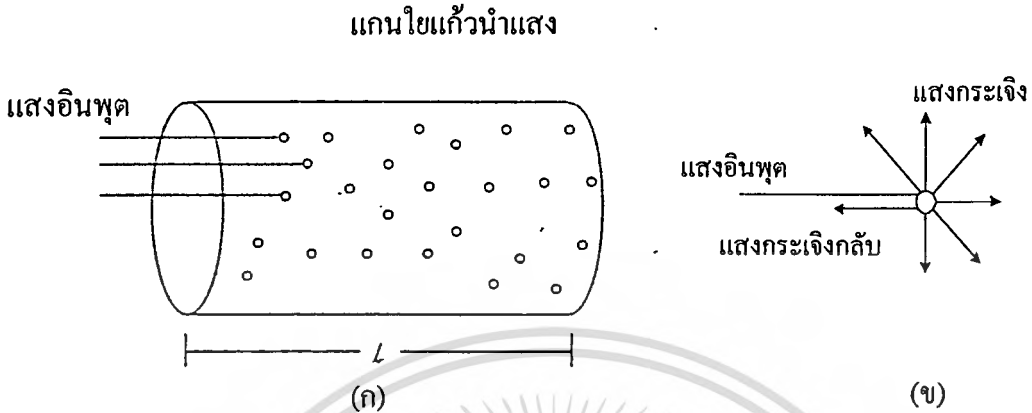
**รูปที่ 4.16** แสดงเวลาต่าง ๆ ซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งของการเดินทางของสัญญาณพัลส์ในสายส่งสัญญาณ

เนื่องจากความเร็วของสัญญาณแสงในตัวกลางจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่แสงเดินทางผ่าน ดังนั้นความเร็วแสงที่ใช้ในการคำนวณจะต้องเป็นความเร็วของแสงที่เคลื่อนที่ภายในใยแก้วนำแสง

นอกจากการตรวจวัดกำลังแสงสะท้อนกลับจากจุดรอยต่อ หรือจุดเสียหายในใยแก้วนำแสงแล้ว OTDR ยังทำการวัดกำลังของแสงที่กระเจิง (Scattering) กลับมาจากภายในเส้นใยนำแสง โดยการกระเจิงของแสงนี้อาจเกิดเนื่องมาจากความหนาแน่นที่ไม่สม่ำเสมอของเนื้อสารที่ใช้ทำเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากขั้นตอนการผลิต กล่าวคือขณะที่กำลังจะดึงเส้นใยนำแสงจากแท่งพรีฟอร์ม (Preform) นั้นบริเวณที่ได้รับความร้อน โมเลกุลของเนื้อสารมีการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นระเบียบ (Random) หลังจากที่ทำภารกิจดึงได้เป็นเส้นใยนำแสงออกมาแล้วเส้นใยนำแสงดังกล่าวก็จะมีอุณหภูมิลดลง ซึ่งทำให้โมเลกุลของเนื้อสารเคลื่อนที่ช้าลงจนกระทั่งหยุดในที่สุด โดยตำแหน่งของโมเลกุลที่หยุดก็เป็นแบบไม่เป็นระเบียบเช่นกัน จึงมีผลทำให้เนื้อสารมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอกันตลอดเส้น หรืออาจกล่าวได้ว่าทำให้มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกันคล้ายกับมีสารเจือปนกระจายอยู่ตลอดความยาวของเส้นใยนำแสง เมื่อมีแสงเดินทางผ่านบริเวณดังกล่าวจึงเกิดการกระเจิงของแสงขึ้น ซึ่งการกระเจิงในลักษณะนี้เรียกว่า เป็นการกระเจิงแบบเรย์ลีห์ (Rayleigh Scattering) พบได้ตลอดความยาวของเส้นใยนำแสง

ทิศทางของแสงที่เกิดจากการกระเจิงแบบเรย์ลีห์มีโอกาสเกิดได้ในทุกทิศทาง ตามรูปที่ 4.17 นี้แต่จะมีแสงบางส่วนที่กระเจิงกลับไปยังภาครับของ OTDR แสงที่สะท้อนกลับในลักษณะดังกล่าวนี้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

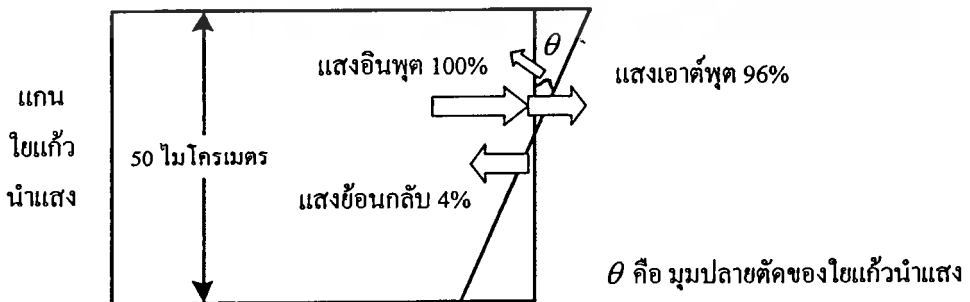
กล่าวเรียกว่า แสงย้อนกลับ (Back Scattering Light) โดยจะมีขนาดของกำลังแสงลดลงเป็นฟังก์ชันแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลเมื่อเทียบกับระยะทาง



รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะของการกระเจิงภายในเส้นใยนำแสง (ก) และแสดงทิศทางของแสงย้อนกลับ (ข)

การกระเจิงแบบเรย์ลีเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณแสงภายในเส้นใยแก้วนำแสง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความยาวคลื่นในช่วง 850 นาโนเมตร โดยการลดทอนที่เกิดขึ้นไม่สามารถกำจัดออกไปได้ด้วยเทคนิคการผลิตเส้นใยนำแสงในปัจจุบัน ทิศทางการกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปได้ทุกทิศทาง จากการศึกษาพบว่าการลดทอนของแสงเนื่องมาจากการกระเจิงแบบเรย์ลีแปรผกผันกับกำลังสี่ของความยาวคลื่นแสง ( $\propto \frac{1}{\lambda^4}$ ) ดังนั้นถ้ายังใช้แสงที่มีความยาวคลื่นมาก ก็จะมีการลดทอนของสัญญาณก็จะลดลง

การสะท้อนอีกลักษณะหนึ่งของแสงภายในเส้นใยนำแสงอาจเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวกลางของแสง เช่น การสะท้อน ณ บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อสารกับอากาศ ตามรูปที่ 4.18

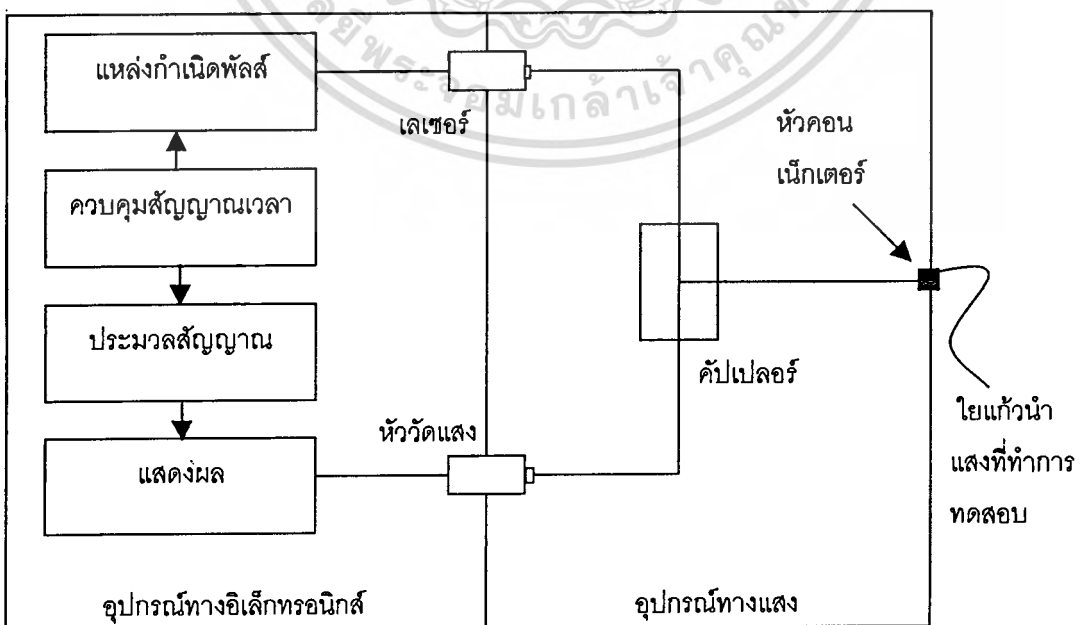


รูปที่ 4.18 แสดงการสะท้อนกลับของแสงที่บริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางแก้วกับอากาศ

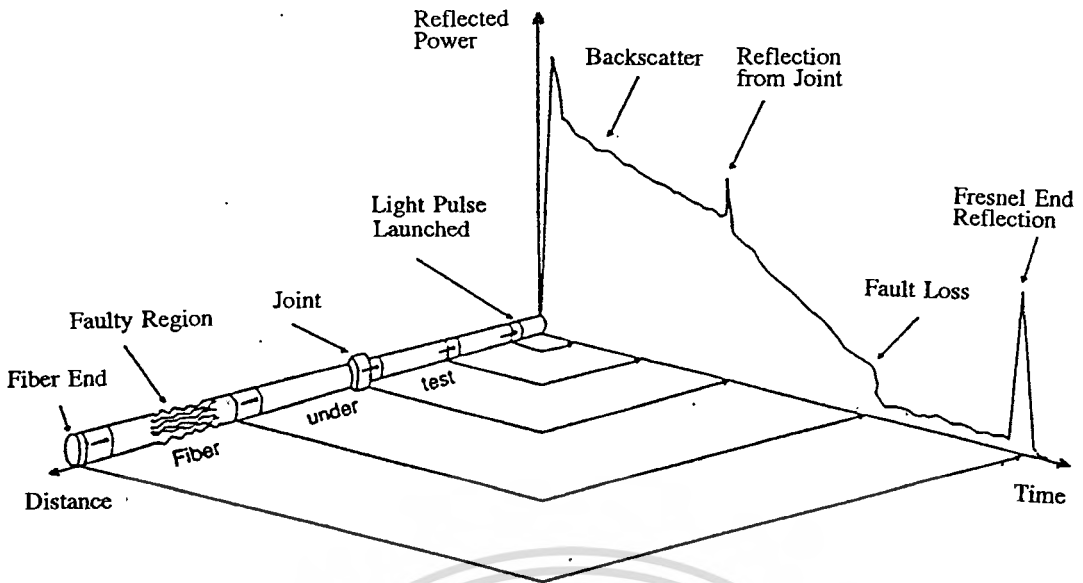
ถ้ารอยต่อตามแนวภาคตัดขวางของเส้นใยนำแสงตั้งฉากกับทางเดินของแสง หรือแกนของเส้นใยนำแสง จะได้สัมประสิทธิ์ของแสงสะท้อนจะไม่เกิน 4% (13.98 dB) ลักษณะการสะท้อนในลักษณะนี้เรียกว่า การสะท้อนแบบเฟรสเนล (Fresnel Reflection) ซึ่งลักษณะการสะท้อนแบบเฟรสเนลสามารถพบได้ที่รอยต่อระหว่างเส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้นที่เชื่อมต่อกันด้วยหัวต่อ รวมทั้งจุดต่อระหว่าง OTDR กับเส้นใยนำแสงและที่ปลายเส้นใยนำแสงอีกด้วย

#### 4.5.2 โครงสร้างของโอทีดีอาร์

จากรูปที่ 4.19 แสดงถึงส่วนประกอบหลักของ OTDR โดยโครงสร้างสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนย่อย คือ ส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electrical Section) และส่วนอุปกรณ์ทางแสง ซึ่งทั้งสองส่วนจะทำงานอย่างสัมพันธ์กัน เริ่มจากในส่วนของตัวกำเนิดพัลส์ (Pulse Generator) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตสัญญาณพัลส์ไปขับไดโอดเลเซอร์ (Laser Diode) ให้ปล่อยสัญญาณแสงออกมาในลักษณะของพัลส์ จากนั้นสัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งเข้าไปยังปลายด้าน เอาต์พุตของคัปเปลอร์ ซึ่งเชื่อมต่อเข้ากับใยนำแสงที่ต้องการทดสอบด้วยคอนเน็คเตอร์ (Front Panel Connector) เมื่อมีกำลังแสงสะท้อนกลับผ่านคอนเน็คเตอร์เข้ามา คัปเปลอร์แสงจะทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงที่สะท้อนกลับมามากกว่าและส่งเข้าสู่หัววัดแสง (Detector) สัญญาณแสงที่สะท้อนกลับมานี้เกิดจากการสะท้อนแบบเฟรสเนล ที่บริเวณจุดต่อระหว่าง OTDR กับเส้นใยนำแสง รวมถึงปลายเส้นใยนำแสง ซึ่งเป็นบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อสารกับอากาศหรือบริเวณจุดต่อต่าง ๆ ส่วนการกระเจิงกลับที่เกิดจากการกระเจิงแบบเรย์ลีจะตลอดเส้นใยนำแสงขณะที่แสงเดินทางตามยาวของเส้นใยนำแสง ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 แสดง โครงสร้างของ OTDR ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.20** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสง ที่สะท้อนกลับมาตามความยาวใยแก้วนำแสง (Reflected Power) เทียบกับเวลา รวมถึงสาเหตุของการเกิดแสงสะท้อนกลับจากจุดต่างๆ เช่น จากจุดเชื่อมต่อ (Reflection from Joint) จากจุดปลายของใยแก้วนำแสง (Fresnel end Reflection) เป็นต้น นอกจากนี้ยังแสดงผลการวัดจุดที่เกิดการสูญเสียความเข้มแสง (Fault Loss) อันเนื่องมาจากบริเวณที่เกิดผิดปกติบนใยแก้วนำแสง (Faulty Region of High Attenuation)

สัญญาณแสงที่วัดได้นี้จะถูกนำมาประมวลผลโดยหน่วยประมวลผล (Signal Acquisition & Processing) ซึ่งอาศัยข้อมูลจากหน่วยควบคุมการตรวจวัดเวลา (Timing & Control) จากนั้น ผลที่ประมวลได้จะแสดงออกมาในรูปของการลดทอนของสัญญาณตามความยาวของเส้นใยนำแสง

#### 4.5.3 ข้อพิจารณาทางปฏิบัติของโอทีดีอาร์

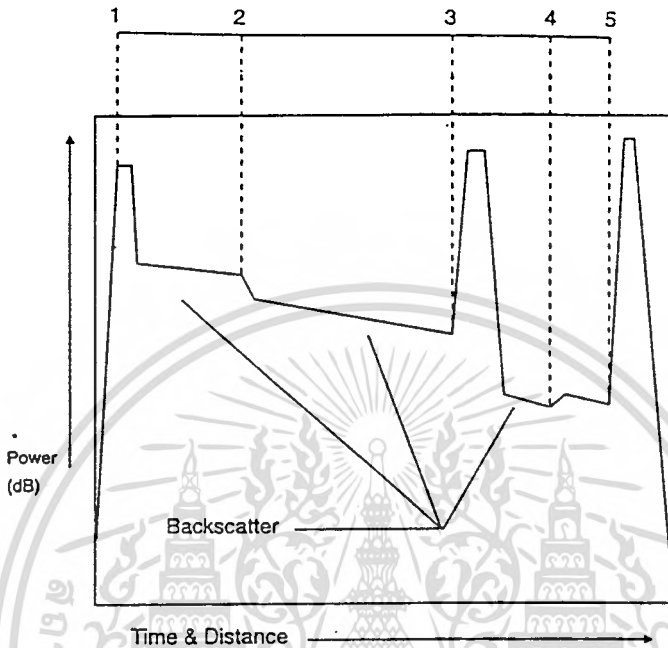
เมื่อพิจารณา รูปที่ 4.21 แสดงสัญญาณที่ได้จากแสงสะท้อนภายในเส้นใยนำแสงเทียบกับเวลา (หรือระยะทาง) ซึ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพของเส้นใยนำแสงได้เป็นอย่างดี โดยในการตรวจวัดเส้นใยนำแสงแต่ละชุดก็จะได้ลักษณะของสัญญาณสะท้อนกลับที่แตกต่างกันไป สัญญาณดังกล่าวจึงเรียกว่า " ไฟเบอร์ซิกเนเจอร์ " (Fiber Signature)

ในรูปที่ 4.21 เป็นตัวอย่างกราฟผลการตรวจวัด ซึ่งเป็นลักษณะของสัญญาณที่วัดได้จาก OTDR ในทางปฏิบัติ จากรูปได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพที่มีบนเส้นใยแก้วนำแสงกับเวลาหรือระยะทาง ลักษณะทางกายภาพบนจุดต่าง ๆ ของเส้นใยแก้วนำแสงประกอบด้วย

1) จุดเชื่อมต่อของหัวต่อระหว่าง OTDR กับเส้นใยแก้วนำแสง

2) จุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้นเข้าด้วยกัน ด้วยวิธีหลอมรวม (Fusion Splice) เป็นต้น การดำเนินการนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) จุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้นเข้าด้วยกัน ด้วยวิธีเชิงกล (Mechanical Splice)
- 4) จุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้นเข้าด้วยกัน ด้วยวิธีหลอมรวม
- 5) จุดปลายของเส้นใยแก้วนำแสง



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงสัญญาณที่สะท้อนกลับจากจุดต่าง ๆ ในใยแก้วนำแสง ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพบนเส้นใยแก้วนำแสงที่แตกต่างกันตลอดเส้น

ลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันไปดังกล่าวมีผลทำให้กำลังของแสงที่สะท้อนกลับมายังหัววัดแสงมีการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะที่แตกต่างกันดังกล่าว จากรูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ณ จุดที่ 1 จุดที่ 3 และจุดที่ 5 เกิดมาจากสาเหตุที่คล้ายคลึงกัน นั่นก็คือ การเปลี่ยนแปลงของชนิดตัวกลางของแสง หรือค่าดัชนีหักเหของตัวกลางมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน บริเวณดังกล่าวจะมีช่องว่างอากาศเล็ก ๆ เกิดขึ้นทำให้ปริมาณแสงที่สะท้อนกลับไปยังหัววัดแสงใน OTDR มีค่ามากเมื่อเทียบกับปริมาณของแสงที่เกิดจากการกระเจิงแบบเรย์ลี ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีการเชื่อมต่อแบบใช้อุปกรณ์หัวเชื่อมต่อหรือคอนเน็กเตอร์ จึงเรียกว่าเป็นการเชื่อมต่อแบบเชิงกล แต่ในบางครั้งก็เรียกว่าเป็นการสะท้อนแสงจากการเชื่อมต่อ (Reflective Splice) ก็เพราะมีการสะท้อนของแสงเกิดขึ้นที่รอยต่อนั่นเอง

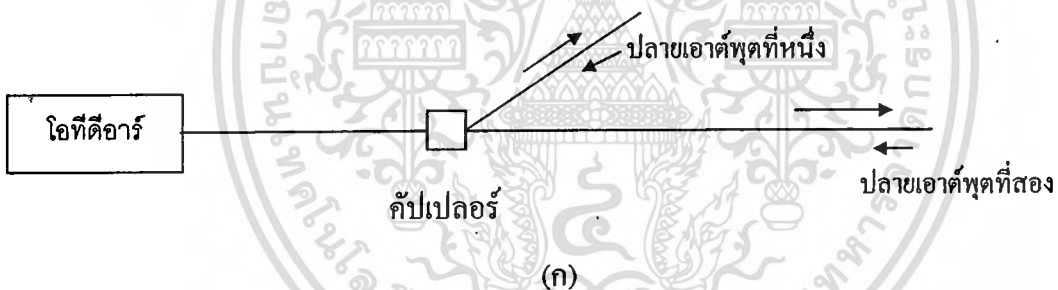
สำหรับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ณ จุดที่ 2 และ 4 ไม่ทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนกลับในรูปแบบพัลส์ตามแบบกรณีข้างต้น เนื่องจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงโดยใช้ความร้อนทำให้เส้นใยแก้วนำแสงเชื่อมติดกันเสมือนเป็นเนื้อเดียว แต่ในทางปฏิบัติ ที่บริเวณจุดที่เชื่อมต่อก็ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง ที่แตกต่างจากค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

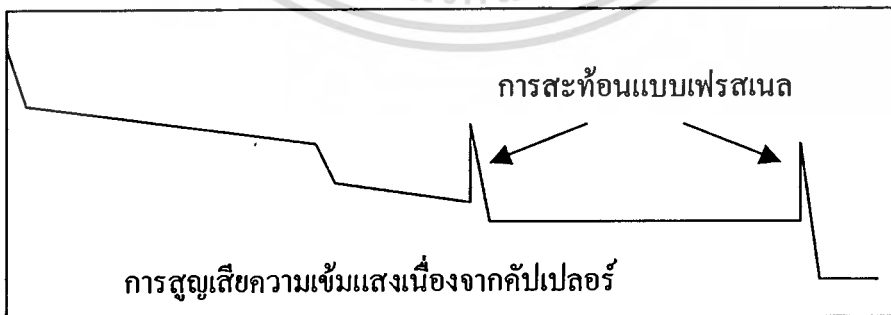
แสงที่นำมาเชื่อมต่ออยู่บ้าง รวมทั้งคุณสมบัติบางอย่างของเส้นใยแก้วนำแสงที่นำมาเชื่อมต่อกัน มีความแตกต่างกัน จึงทำให้สัญญาณที่ส่งเกิดได้อาจมีทั้งลดลง (Loss) และเพิ่มขึ้น (Gainer) จุดเชื่อมต่อในลักษณะนี้ นอกจากจะเรียกว่าการเชื่อมต่อแบบหลอมรวมแล้วอาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการเชื่อมต่อชนิดที่ไม่มีการสะท้อนแสง (Non-reflective Splice)

#### 4.6 การใช้โอทีดีอาร์ตรวจสอบคัปเปิลเลอร์

เนื่องจากโอทีดีอาร์สามารถตรวจสอบกำลังแสงที่สะท้อนกลับจากปลายเอาต์พุตของใยแก้วนำแสงได้ ตามหลักการสะท้อนของเฟรสเนล (Fresnel's Law) ดังนั้นเมื่อใช้โอทีดีอาร์ตรวจวัดกำลังแสงที่สะท้อนกลับจากปลายเอาต์พุตทั้งสองของคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม จึงสามารถทำได้ โดยการทำให้ระยะตามยาวของปลายด้านเอาต์พุตทั้งสองของต่างกันมาก ๆ ดังรูปที่ 4.22(ก) การทำเช่นนี้เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับเข้ามาถึงอุปกรณ์ตรวจรับพร้อม ๆ กัน ซึ่งทำให้การแสดงผลสัญญาณซ้อนทับกัน และไม่สามารถหาความแตกต่างได้ ส่วนผลการตรวจวัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.22(ข) จากที่กล่าวมานี้จะพบว่า สามารถนำโอทีดีอาร์ไปใช้งานด้านการตรวจวัดระยะไกลดังรูปที่ 4.23 และเครือข่ายการตรวจวัดระยะไกลได้เป็นอย่างดี



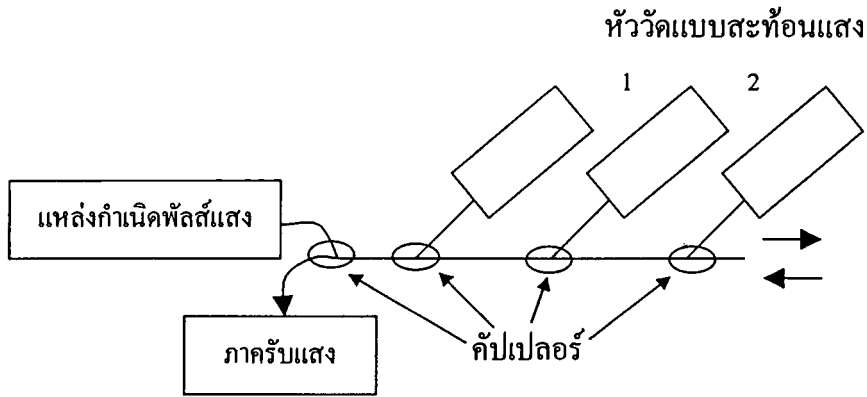
กำลังแสง (dB)



ระยะทาง (กิโลเมตร)

รูปที่ 4.22 แสดงการเชื่อมต่อคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมเข้ากับเครื่อง OTDR (ก) และแสดงผลการตรวจวัดคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวม (ข)

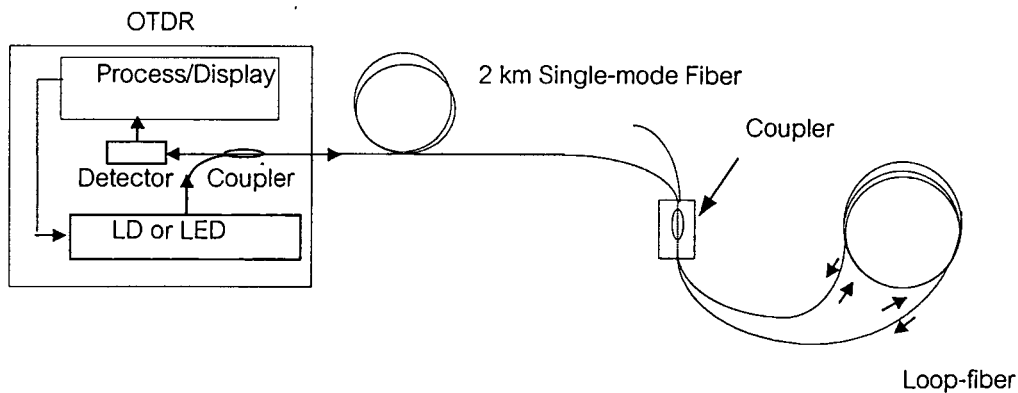
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



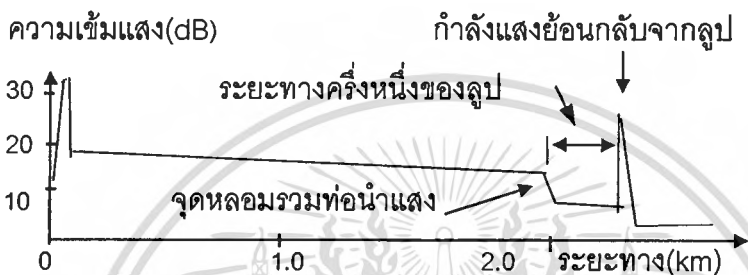
รูปที่ 4.23 แสดงรูปแบบการตรวจวัดแบบเครือข่ายโดยใช้คัปเปิลเลอร์และ OTDR

#### 4.7 การใช้โอทีดีอาร์ตรวจสอบรูปมิลเลอร์

จากหัวข้อ 4.2.1 ได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีกำลังแสงป้อนเข้าสู่ปลายด้านใดด้านหนึ่งของรูปมิลเลอร์ จะพบว่ากำลังแสงบางส่วนย้อนกลับเข้าสู่ปลายด้านอินพุตเดิมดังสมการ (4.8) ดังนั้นเมื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบรูปมิลเลอร์เข้ากับเครื่อง OTDR จะทำให้พัลส์ของแสงเคลื่อนที่ผ่านจุดคัปปลิ้งด้วยพฤติกรรมเดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.1 และทำให้บางส่วนของพัลส์ของแสงเคลื่อนที่ย้อนกลับเข้าสู่ปลายด้านอินพุตของรูปมิลเลอร์ และเคลื่อนที่เข้าสู่ภาครับของ OTDR ทำให้เกิดสัญญาณที่แสดงถึงกำลังแสงย้อนกลับบนกราฟของการตรวจวัดดังรูปที่ 4.24 ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าสัญญาณพัลส์ของกำลังแสงย้อนกลับ จะปรากฏขึ้นที่ระยะทางครึ่งหนึ่งของรูป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการประมวลผลของ OTDR จะทำการนับเวลาการเคลื่อนที่ของแสง ดังนั้นระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ไปและกลับ จึงเท่ากับระยะทางครึ่งหนึ่งของรูปพอดี



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.24 แสดงการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับเนื่องจากลูปมิลเลอร์โดยรูป (ก) แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์เข้ากับ OTDR ส่วนรูป (ข) แสดงผลการตรวจวัดลูปมิลเลอร์ด้วย OTDR

### 4.8 สรุป

อุปกรณ์แบบหลอมรวมที่นำแสงที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 4 นี้ประกอบด้วยคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมและอุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองสามารถนำไปใช้งานในทางการสื่อสารใยแก้วนำแสงและการตรวจวัดได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งคัปเปิลเลอร์แบบ 2x2 ที่มีโครงสร้างแบบพาราโบลา และโมเดลการหลอมรวมสัมพันธ์กับระยะซอฟต์แวร์โซนและระยะการดึงขณะหลอมรวม สามารถสร้างให้มีขนาด และชนิดของคัปเปิลเลอร์ได้หลากหลาย เหมาะสำหรับการใช้งานด้านการสื่อสารและการตรวจวัดในหลายแบบ ส่วนอุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์เป็นอุปกรณ์หลอมรวมที่นำแสงที่สามารถเลือกขนาดของกำลังแสงย้อนกลับได้หลายค่า ตามความเหมาะสมกับงานด้านการสื่อสารและการตรวจวัด เนื่องจากการตรวจวัดทางการสื่อสารใยแก้วนำแสงมักนิยมใช้ OTDR เป็นหลักในการตรวจวัด เพราะ OTDR เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่สามารถแสดงกำลังแสงที่สะท้อนกลับมาจากจุดต่างๆในใยแก้วนำแสงได้เป็นอย่างดี ประกอบกับอุปกรณ์แบบหลอมรวมที่สร้างขึ้นสามารถเชื่อมต่อเข้ากับ OTDR ได้ ดังนั้น จึงสามารถใช้โอทีดีอาร์ตรวจวัดอุปกรณ์แบบหลอมรวมและใช้สร้างเครือข่ายการตรวจวัดได้

## บทที่ 5

# ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 5.1 บทนำ

การสร้างและศึกษาคัปเปลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสงนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีท่อนำแสงที่มีโครงสร้างเล็กมาก ๆ และการคัปปลิงก็อาจแสงถูกรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ดังได้กล่าวถึงแล้วในบทที่ 3 สิ่งสำคัญคือการสูญเสียกำลังแสงบริเวณคัปปลิงแสงเกิดขึ้นได้ง่ายซึ่งไม่สะดวกในการตรวจวัดกำลังแสงที่สูญเสียไป ดังนั้นในการศึกษาอุปกรณ์เหล่านี้จึงต้องอาศัยการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลที่คาดว่าจะได้รับ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น การจำลองความสัมพันธ์ระหว่างระยะการหลอมรวมกับสัดส่วนการคัปปลิงแสง และการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการคัปปลิงกับดัชนีหักเหแสงของตัวกลางแสงสิ่งแวดล้อม และการจำลองขนาดโครงสร้างอุปกรณ์มัลติเพลกซ์เชิงแสง เป็นต้น

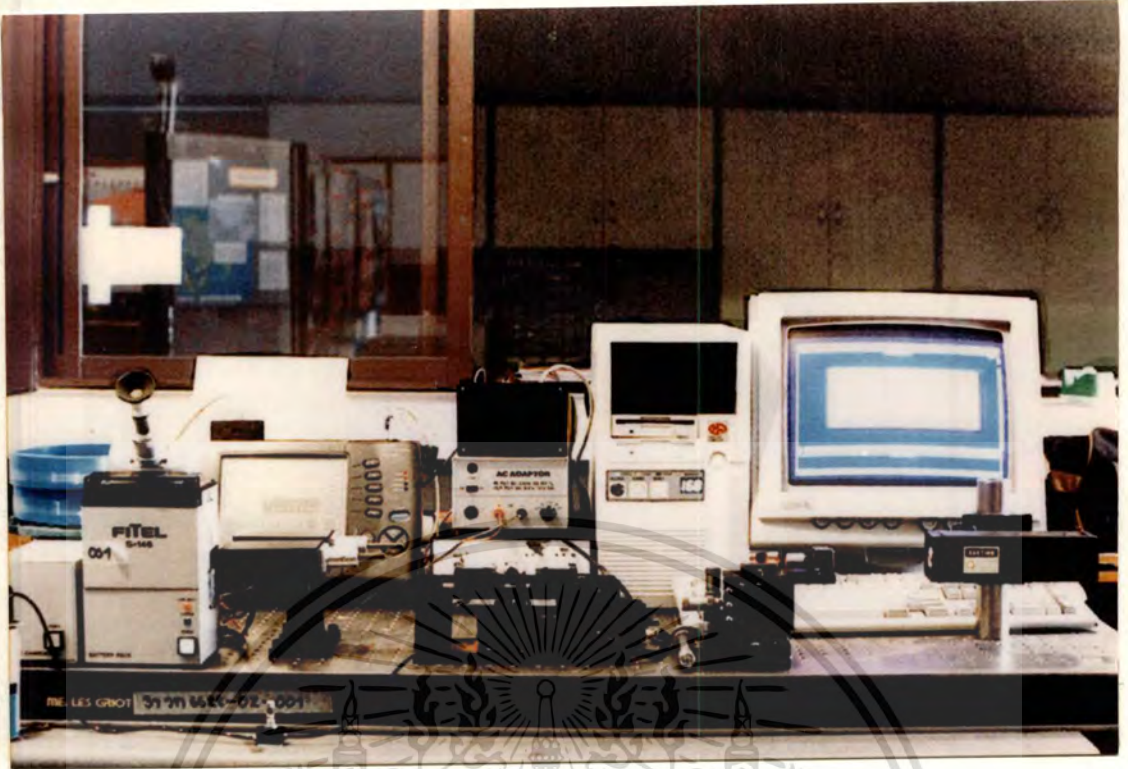
ในการศึกษาวิจัยนี้ได้อาศัยหลักการจำลองเชิงตัวเลขดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยได้วางขั้นตอนการศึกษาวิจัยออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ คือ ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาการสร้างคัปเปลอร์หลอมรวม ซึ่งได้ใช้วิธีการหลอมและดึงท่อนำแสงแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข ในขั้นตอนที่สองเป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการคัปปลิงแสงอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมภายนอก ส่วนขั้นตอนสุดท้ายได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์คัปเปลอร์แบบหลอมรวมเพื่อใช้ทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด

### 5.2 การสร้างคัปเปลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสง

การสร้างคัปเปลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสงนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองคือการทดลองแรกเป็นการสร้างและทดสอบเครื่องหลอมและดึงท่อนำแสง ส่วนการทดลองที่สองเป็นการสร้างคัปเปลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสง ในการทดลองนี้ได้นำเอาคอมพิวเตอร์มาควบคุมการสร้างและการบันทึกผลการทดลอง

#### 5.2.1 การสร้างเครื่องหลอมและดึงคัปเปลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสง

ระบบเครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาและสร้างอุปกรณ์แบบหลอมรวมนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งมีองค์ประกอบที่แบ่งได้ 4 ส่วนคือ



รูปที่ 5.1 แสดงภาพเครื่องมือและอุปกรณ์การสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสง

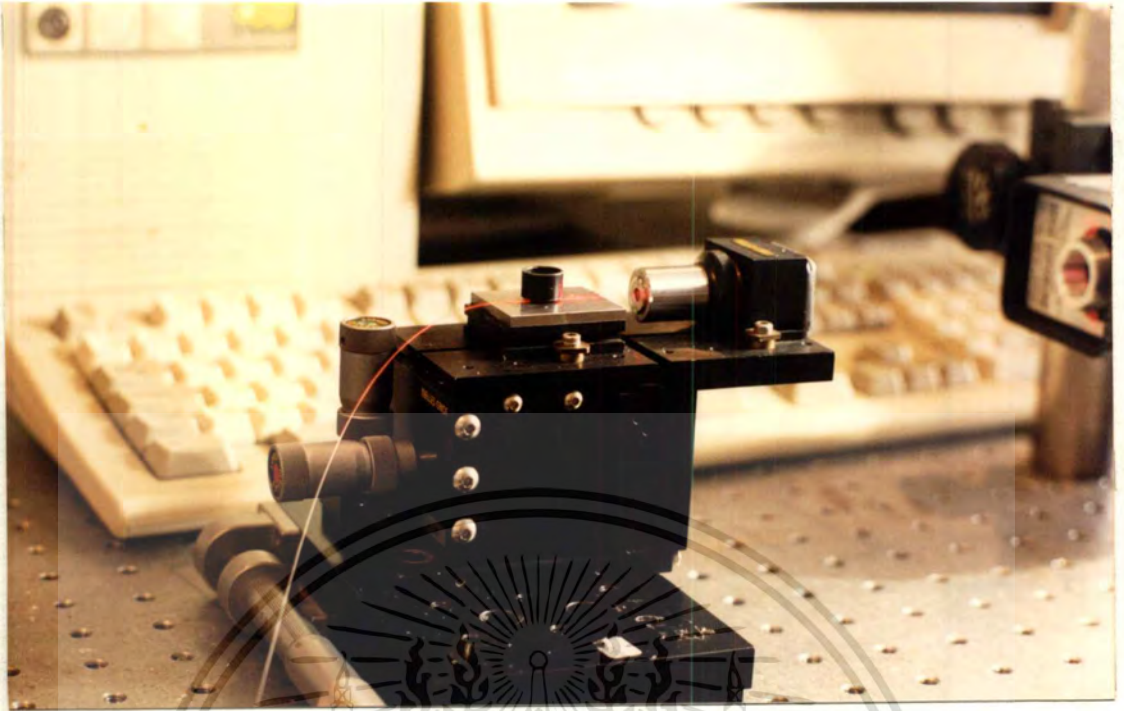
#### 5.2.1.1 ส่วนอินพุต

ส่วนอินพุตนี้ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออน และอุปกรณ์ป้อนแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสง คือเลนส์วัตถุที่มีค่า NA เท่ากับ 0.17 วางอยู่ระหว่างใยแก้วนำแสงและแหล่งกำเนิดแสง คือ เลเซอร์ฮีเลียมนีออน ส่วนในการป้อนลำแสงเข้าสู่ใยแก้วนำแสงได้ใช้ไมโครบิล็อกในการปรับระยะในแนวแกนทั้งสามมิติ จนกระทั่งแสงเกือบทั้งหมดถูกป้อนเข้าสู่ใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดี่ยวขนาด 10/125 ไมโครเมตร ความยาว 1 เมตร ดังรูปที่ 5.2

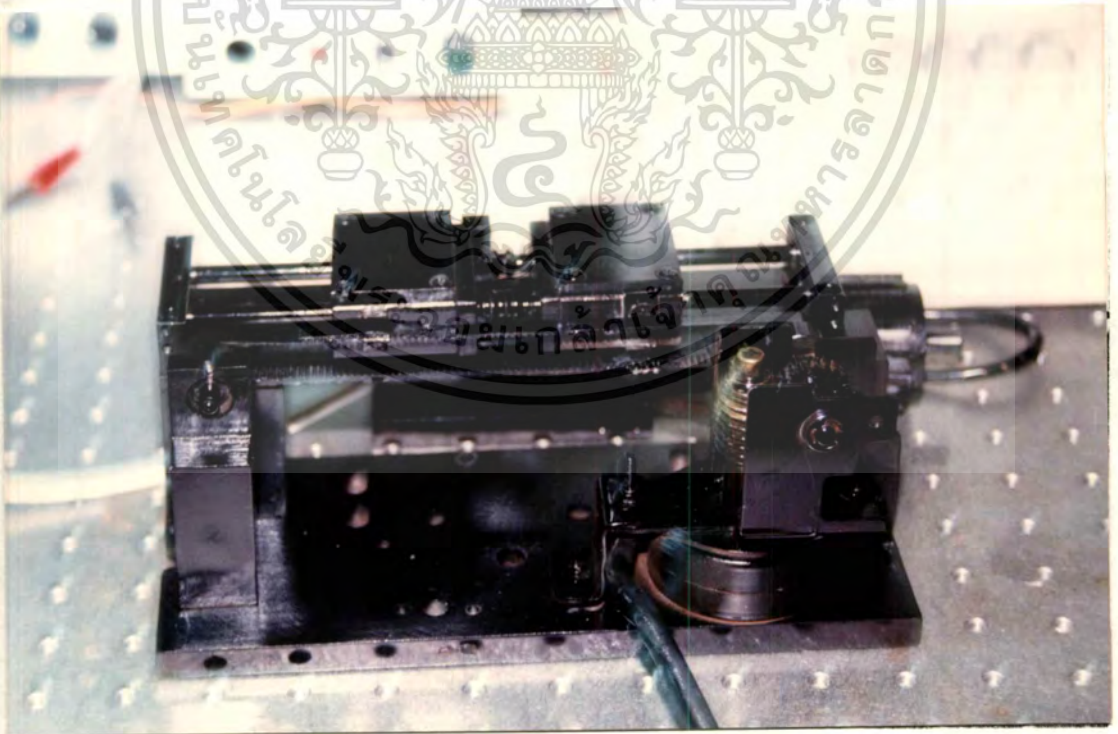
#### 5.2.1.2 ภาคหลอมและดึงท่อนำแสง

ในภาคนี้ประกอบด้วยแท่นยึดท่อนำแสงสองแท่นวางอยู่บนคานคู่ ซึ่งสามารถเลื่อนไปมาได้สะดวก โดยใช้สายพานเป็นตัวเคลื่อนแท่นทั้งสองเข้า-ออก และต่อสายพานเข้ากับสเต็ปปีงมอเตอร์เพื่อทำหน้าที่เลื่อนแท่นทั้งสอง บนแท่นทั้งสองมีแท่งแม่เหล็กทำหน้าที่ดึงปลายทั้งสองด้านของใยแก้วนำแสง ดังรูปที่ 5.3 ส่วนอุปกรณ์หลอมรวมท่อนำแสงประกอบด้วยหัวก๊าซขนาด 2 มิลลิเมตร ต่อเข้ากับสายส่งก๊าซจากถังก๊าซชีวเทนขนาดเล็ก ส่วนหัวก๊าซถูกยึดติดกับแกนโลหะสามารถปรับระยะได้ หน้าที่หลักของอุปกรณ์ภาคนี้ คือการหลอมด้วยความร้อนและดึงปลายท่อนำแสงทั้งสองด้านให้ยืดออกเป็นระยะทางต่าง ๆ ด้วยสเต็ปเท่ากับ 0.025 มิลลิเมตรต่อหนึ่งสเต็ป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แสดงส่วนอินพุตการป้อนลำแสงเลเซอร์เข้าสู่ใยแก้วนำแสง

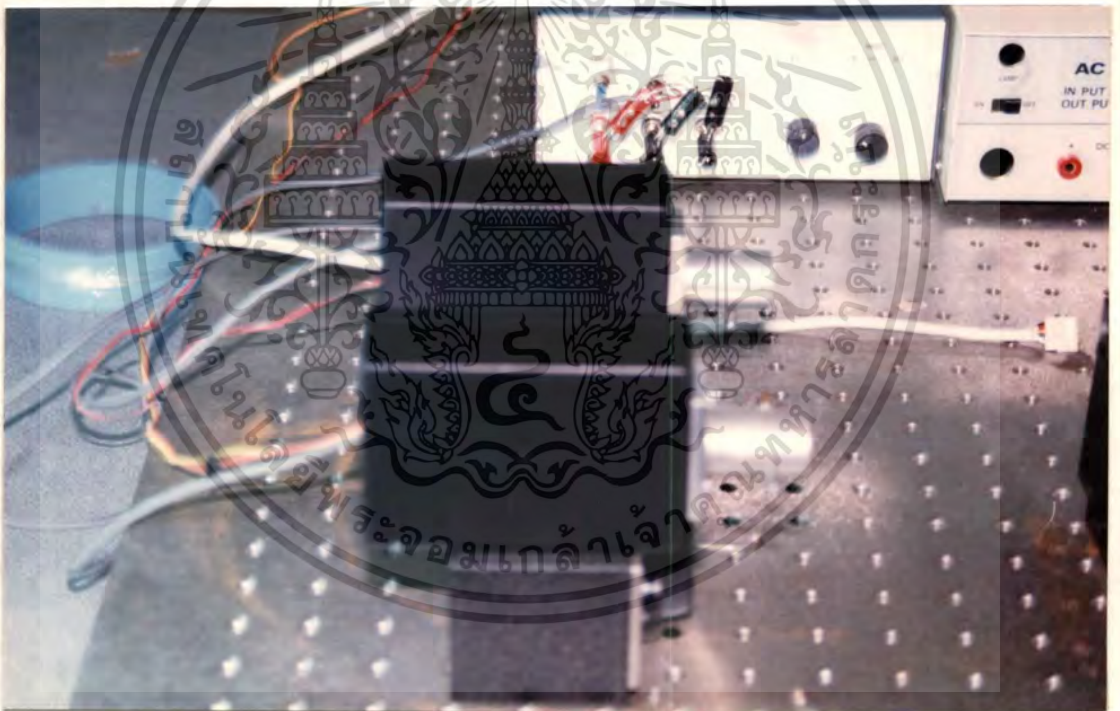


รูปที่ 5.3 แสดงภาพของแท่นตรึงและอุปกรณ์การดึงใยแก้วนำแสงให้ยืดออกเป็นระยะทางต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.1.3 ส่วนรับแสง

ในส่วนนี้ประกอบด้วยวงจรรับแสงและแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า 2 ชุด ดังรูปที่ 5.4 เพื่อทำหน้าที่รับแสงจากปลายเอาต์พุตทั้งสองของคิปเปลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสง เข้าไปแปลงและขยายเป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อนนำไปประมวลผล ในวงจรนี้ได้ใช้โฟโตไดโอดแบบ PIN รุ่น BPW 21 เป็นตัวรับแสง ข้อดีของโฟโตไดโอดนี้คือสามารถตอบสนองต่อแสงสีแคบได้ดี เหมาะกับการวัดกำลังแสงน้อย ๆ และมีพื้นที่รับแสงมากจึงช่วยลดปัญหาเรื่องการป้อนแสงได้ดี โฟโตไดโอดนี้ต่อเข้ากับภาคขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ ที่ประกอบด้วยวงจรขยาย 2 ส่วน และมีวงจรกรองสัญญาณรบกวนประกอบอยู่ในส่วนนี้ด้วย เนื่องจากการใช้งานจะต้องมีการปรับเทียบ อัตราส่วนการขยายสัญญาณของภาครับทั้งสอง ดังนั้นจึงได้จัดให้สามารถปรับเกณฑ์การขยายได้ที่ ภาคลังของวงจรขยายสัญญาณ ส่วนสัญญาณเอาต์พุตของภาคนี้นะนำไปต่อเข้ากับชุดเชื่อมต่อสัญญาณกับคอมพิวเตอร์ เพื่อนำข้อมูลเข้าไปประมวลผล



รูปที่ 5.4 แสดงภาครับแสงของระบบเครื่องมือหลอมรวมท่อนำแสง

### 5.2.1.4 ส่วนควบคุมและประมวลผล

ในการควบคุมการคั่งนี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมสแต็ปการคั่ง โดยได้ส่งสัญญาณควบคุมออกไปผ่านพอร์ตพรีนเตอร์เข้าไปยังวงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เปิดปิดสแต็ปของมอเตอร์ โดยเขียนโปรแกรมภาษาเบสิกควบคุมการหมุนของมอเตอร์ทีละครั้งสแต็ป ส่วนการประมวลผลได้ใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการรับข้อมูล อินพุตเข้ามาประมวลผลด้วย โดยผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นว่าเบ้เซบประเษชณดานการค้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเทอร์เฟซการ์ด (PC-DIO) ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ก่อนที่จะนำเข้าไปประมวลผลโดยผ่านทางพอร์ตอินพุต การใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมนี้มีข้อดีอยู่หลายประการ ทั้งยังสามารถควบคุมการทำงานของภาคหลอมรวมและคิงพร้อมๆ กับการตรวจรับสัญญาณอินพุตไปพร้อม ๆ กันซึ่งสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานได้สะดวกและรวดเร็ว

### 5.2.2 การทดสอบระบบและการทำงานของเครื่องมือ

เนื่องจากหน้าที่หลักของเครื่องมือที่กล่าวถึงนี้คือ การหลอมรวมด้วยความร้อน และคิงปลายทั้งสองด้านของท่อนำแสงหลอมรวมให้ยึดออกเป็นระยะทางต่าง ๆ โดยที่การทำงานของระบบทั้งหมดถูกควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมระบบ ดังนั้นในเบื้องต้นของการทดลองจะต้องทำการตรวจสอบระบบการทำงานและโปรแกรมควบคุมระบบทั้งหมดเสียก่อนเพื่อให้ได้ผลการทดลองในหัวข้ออื่น ๆ ถูกต้องสมบูรณ์มากขึ้น

#### 5.2.2.1 โปรแกรมควบคุมระบบ

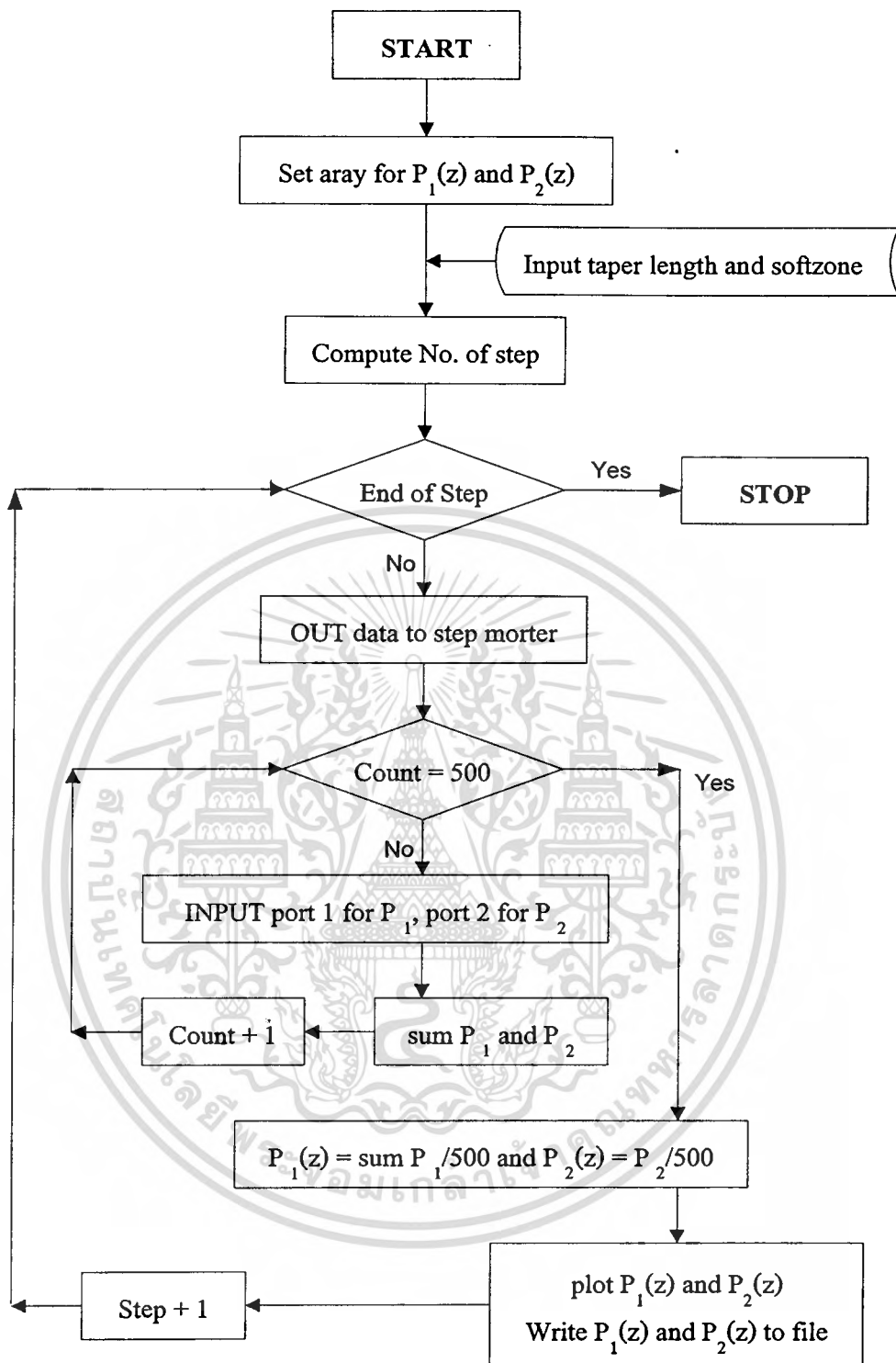
ขั้นตอนต่าง ๆ ในการทำงานของระบบเครื่องมือนี้ถูกควบคุมด้วยโปรแกรมควบคุมระบบ ซึ่งสามารถควบคุมการหลอมด้วยความร้อน ควบคุมระยะการคิงปลายทั้งสองด้านออกเป็นระยะทางต่าง ๆ และควบคุมการตรวจวัดกำลังแสงจากปลายทั้งสองของคัปเปลอร์ โดยจะทำการควบคุมในแต่ละสเต็ปของการคิงท่อนำแสงขณะหลอมรวมให้มีความร้อนสม่ำเสมอ และควบคุมการตรวจวัดกำลังแสงที่ปลายเอาต์พุตทั้งสองในทุกสเต็ป ซึ่งการควบคุมสเต็ปจะทำงานโดยผ่านพอร์ตขนานที่ใช้ติดต่อกับพรีนเตอร์ ส่วนการตรวจวัดจะทำการควบคุมผ่านอินเทอร์เฟซการ์ด โปรแกรมควบคุมการทำงานทั้งหมดจะถูกกำหนดไว้ในโปรแกรมภาษาเบสิกชื่อ MCOUP.BAS โดยมีแผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 5.5

#### 5.2.2.2 การหาระยะต่อสเต็ปการคิง

เนื่องจากในระบบเครื่องมือนี้มีการใช้สเต็ปมอเตอร์ควบคุมการคิงท่อนำแสงให้ยึดออกเป็นระยะทางต่าง ๆ ดังนั้นการตรวจสอบระยะทางต่อ สเต็ปนี้จึงมีความจำเป็นมาก ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้โปรแกรมควบคุมทำการตรวจสอบระยะต่อหนึ่งสเต็ป โดยการควบคุมให้มอเตอร์หมุนไป 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 สเต็ป จากนั้นทำการวัดระยะทางที่แท่นรองรับท่อนำแสงแยกออกจากกัน และนำไปเปรียบเทียบกับการคำนวณ

#### 5.2.2.3 การเปรียบเทียบภาครับแสง

ในการทดลองนี้จำเป็นต้องทำให้ภาครับแสงทั้งสองมีอัตราส่วนการขยายกำลังแสงที่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องปรับเทียบวงจรภาครับทั้งสองวงจรโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเดียวกันมาทำการปรับเทียบ จากนั้นจึงเลือกสัดส่วนการขยายที่เหมาะสมเพื่อทำการทดลองต่อไป



รูปที่ 5.5 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมชื่อ MCOUP.BAS ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมระบบการทำงานต่าง ๆ ของระบบเครื่องหลอมและดึงท่อนำแสง

#### 5.2.2.4 การหาซอฟต์แวร์โซน

ในการหาลอมรวมท่อนำแสงนั้นสิ่งที่สำคัญต่อโครงสร้างของท่อนำแสงหาลอมรวมอย่างมากคือ ระยะเวลาตั้งขณะหาลอมรวม และระยะเวลาซอฟต์แวร์โซน ซึ่งระยะเวลาซอฟต์แวร์โซนนี้ก็คือระยะที่ท่อนำแสงมีการหาลอมจนละลายเป็นของเหลว และสามารถยืดออกได้โดยท่อนำแสงไม่ขาด และสามารถดึงได้เป็นระยะต่าง ๆ ได้ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของซอฟต์แวร์โซนกับระยะเวลาตั้งเพื่อให้ได้โครงสร้างของการหาลอมรวมเป็นแบบพาราโบลามีค่าดังนี้

$$\Delta z \cong \frac{l}{4} \quad (5.1)$$

เมื่อ  $l$  คือระยะเวลาตั้งขณะหาลอมรวมท่อนำแสงและ  $\Delta z$  คือระยะเวลาซอฟต์แวร์โซน จากทฤษฎีในหัวข้อ 4.1.3 พบว่าระยะเวลาตั้งขณะหาลอมรวมที่ยาวที่สุดนั้นประมาณสี่เท่าของระยะเวลาซอฟต์แวร์โซน ดังนั้นในการตรวจสอบหาซอฟต์แวร์โซนจึงสามารถทำได้โดยการตั้งจนกว่าใยแก้วนำแสงจะเลิกลงจนกระทั่งขาดออกจากกันแล้วนำมาคำนวณหาระยะซอฟต์แวร์โซน โดยในการทดลองนี้ได้ทำการตั้งท่อนำแสงหลาย ๆ ค่าและหาค่าเฉลี่ยของระยะเวลาซอฟต์แวร์โซนที่จะนำไปใช้ในการทดลองอื่น ๆ ต่อไป

#### 5.2.3 การสร้างและทดสอบ

จากทฤษฎีในบทที่ 3 ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงสัมพัทธ์  $P_1$  และ  $P_2$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันไซน์โคสของสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสง  $C(z)$  และระยะเวลาหาลอมรวม  $z$  เนื่องจาก  $C(z)$  เป็นฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับโครงสร้างของการหาลอมรวมดังนี้

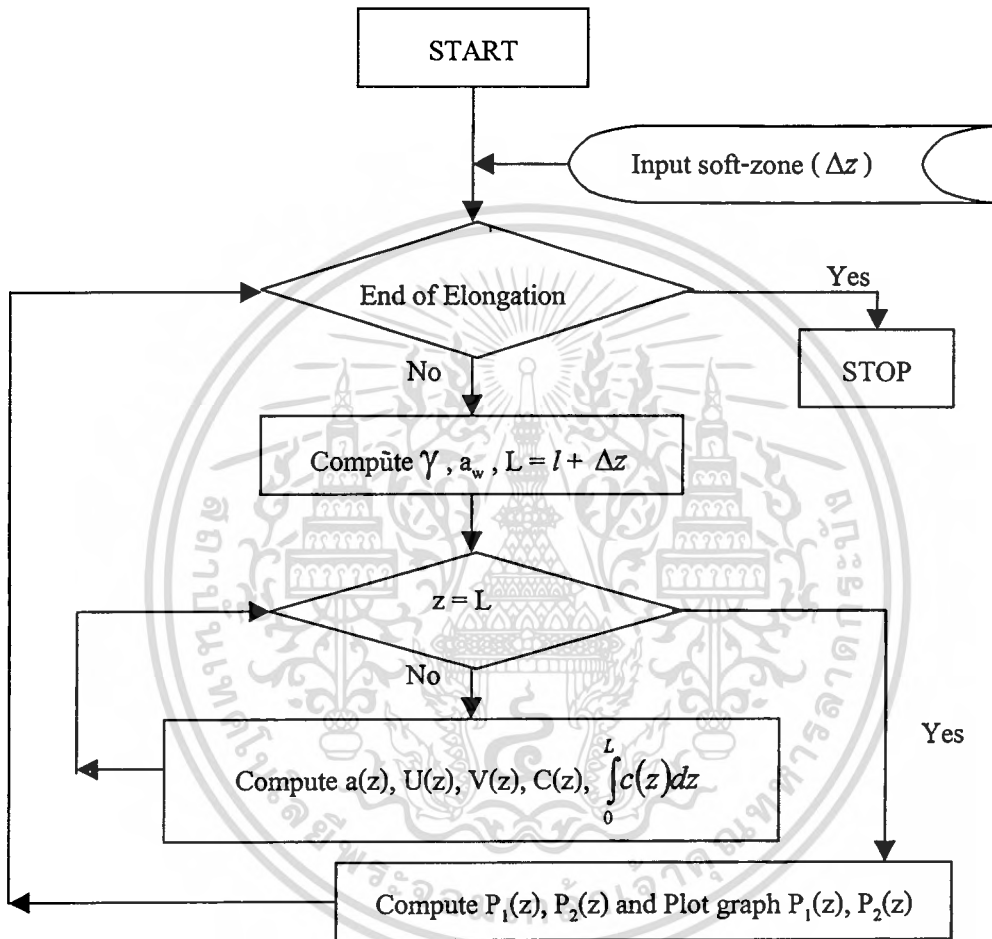
$$C(z) \propto \frac{(U(z))^2 K_0(W(z))}{a(z)(V(z))^3 K_1^2(W(z))} \quad (5.2)$$

ในขณะที่ทำการสร้างคัปเปิลอร์แบบหาลอมรวมท่อนำแสงพบว่า  $U(z)$ ,  $V(z)$ ,  $W(z)$  และ  $a(z)$  ของท่อนำแสงหาลอมรวมมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาตั้งขณะหาลอมรวม ดังนั้นจึงสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่ากำลังแสงสัมพัทธ์  $P_1$  และ  $P_2$  จะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กันตามระยะเวลาตั้งขณะหาลอมรวม อย่างไรก็ตาม ในการสร้างและตรวจคัปเปิลอร์แสงตามทฤษฎีนั้นทำได้ค่อนข้างยาก จึงนิยมจำลองผลเชิงตัวเลขเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาตั้งขณะหาลอมรวมกับกำลังแสงเอาต์พุตทั้งสองของคัปเปิลอร์ เพื่อนำมาตรวจสอบกับผลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการทดลองแยกออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการจำลองเชิงตัวเลข และส่วนที่สองเป็นการทดลองสร้างคัปเปิลอร์แบบหาลอมรวมโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.3.1 การจำลองเชิงตัวเลข

ในการสร้างท่อนำแสงแบบหลอมนรวมนั้นขนาดและโครงสร้างจะสัมพันธ์กับระยะการโค้งของหลอมนรวม (เมื่อระยะซอฟต์แวร์โซนคงที่) เมื่อจำลองผลเชิงตัวเลขเพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการโค้งของหลอมนรวม และกำลังแสงที่เอาต์พุตของคัปเปิลเลอร์แสงโดยใช้โปรแกรมภาษาเบสิกชื่อ BCOUP.BAS โดยมีแผนผังแสดงขั้นตอนของโปรแกรมดังรูปที่ 5.6

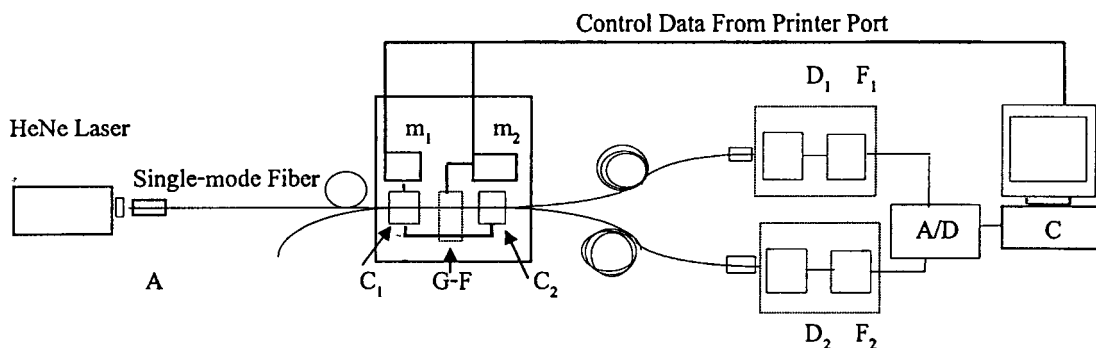


รูปที่ 5.6 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมย่อยใน โปรแกรมชื่อ BCOUP.BAS

### 5.2.3.2 การทดลองสร้างคัปเปิลเลอร์แบบหลอมนรวม

ในการทดลองนี้ได้ทำการหลอมนและโค้งท่อนำแสงเป็นระยะทาง  $l$  ตามรูปที่ 5.7 ซึ่งเป็นแผนภาพแสดงโครงสร้างแบบง่าย ๆ ของระบบเครื่องมือหลอมนและโค้งคัปเปิลเลอร์แสงโดยเลือกค่าซอฟต์แวร์โซนที่เหมาะสม ส่วนขั้นตอนการหลอมนและโค้งนั้นได้ทำการโค้งหลอมนรวมจนกระทั่งท่อนำแสงหลอมนรวมเล็กลงและขาดออกจากกัน จากนั้นหาจุดที่กำลังแสงด้านเอาต์พุตทั้งสอง ( $P_1$  และ  $P_2$ ) ตัดกันครั้งแรก และนำระยะที่ตัดกันของกราฟดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับระยะการโค้งหลอมนรวมท่อนำแสงที่ได้จากการจำลองกราฟเชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงการจับคู่อุปกรณ์การทดลองสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวม

เมื่อ A คืออุปกรณ์ป้อนกำลังแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนเข้าสู่ปลายด้านหนึ่งของใยแก้วนำแสงคู่ ซึ่งถูกยึดปลายทั้งสองด้วยแท่น  $C_1$  และ  $C_2$  และถูกควบคุมการโค้งปลายทั้งสองด้วยมอเตอร์  $m_1$  โดยมีหัวก๊าซให้ความร้อน G-F อยู่ตรงกึ่งกลางของแท่นทั้งสองและถูกควบคุมตำแหน่งหัวก๊าซโดยมอเตอร์  $m_2$  ส่วนภาครับและประมวลสัญญาณประกอบด้วยอุปกรณ์รับแสง  $D_1$  และ  $D_2$  ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าก่อนถูกกรองสัญญาณรบกวนออกโดยวงจรกรองสัญญาณ  $F_1$  และ  $F_2$  จากนั้นจึงถูกแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลโดยอินเทอร์เฟซการ์ด A/D ซึ่งมี C คือคอมพิวเตอร์ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของทั้งระบบ และใช้คำสั่งควบคุมระยะการโค้งท่อ นำแสงขณะหลอมรวมผ่านพอร์ตเอาต์พุตไปยังมอเตอร์  $m_1$  ในขณะเดียวกันก็ทำการควบคุมการบันทึกสัญญาณเอาต์พุตทุก ๆ สเต็ปการโค้งโดยผ่านพอร์ตอินพุต พร้อมทั้งทำการสร้างกราฟของกำลังแสง  $P_1$  และ  $P_2$  ที่วัดได้จากปลายเอาต์พุตของใยแก้วนำแสงทั้งสอง ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ที่แสดงสัดส่วนการคัปปลิงแสงบนจอภาพ และสามารถนำกราฟดังกล่าวนี้ไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองผลเชิงตัวเลข ดังจะกล่าวถึงในบทที่ 6

### 5.3 การศึกษาคุณสมบัติบางประการของคัปเปิลอร์แบบหลอมรวม

การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการคัปปลิงแสงสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายตัวแปร ซึ่งสามารถแบ่งออกได้สองแบบคือการเปลี่ยนแปลงอันเป็นผลมาจากตัวแปรภายในคัปเปิลอร์ และการเปลี่ยนแปลงอันเป็นผลมาจากตัวแปรภายนอก ตัวอย่างของตัวแปรภายในเช่น ระยะการหลอมรวม และโครงสร้างของท่อ นำแสงหลอมรวม เป็นต้น ส่วนตัวอย่างของตัวแปรภายนอกได้แก่ คัดขึ้นหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมและแรงจากภายนอก เป็นต้น

การศึกษาคูณสมบัติของคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมดังกล่าวมาข้างต้นมีประโยชน์มากในงานหลายด้านเช่น ในการสื่อสาร การตรวจวัด การสร้างอุปกรณ์การสื่อสาร การสร้างเลเซอร์ใยแก้ว เป็นต้น ส่วนในการทดลองที่จะกล่าวถึงนี่จะเป็นการศึกษาสัดส่วนการคัปปลิงแสงตามระยะการหลอมรวม และศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการคัปปลิงแสงอันเนื่องจากตัวแปรภายนอก โดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติดังกล่าวกับการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของการค้ำปลิงแสง และนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ดังจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

### 5.3.1 การออสซิลเลตของกำลังแสง

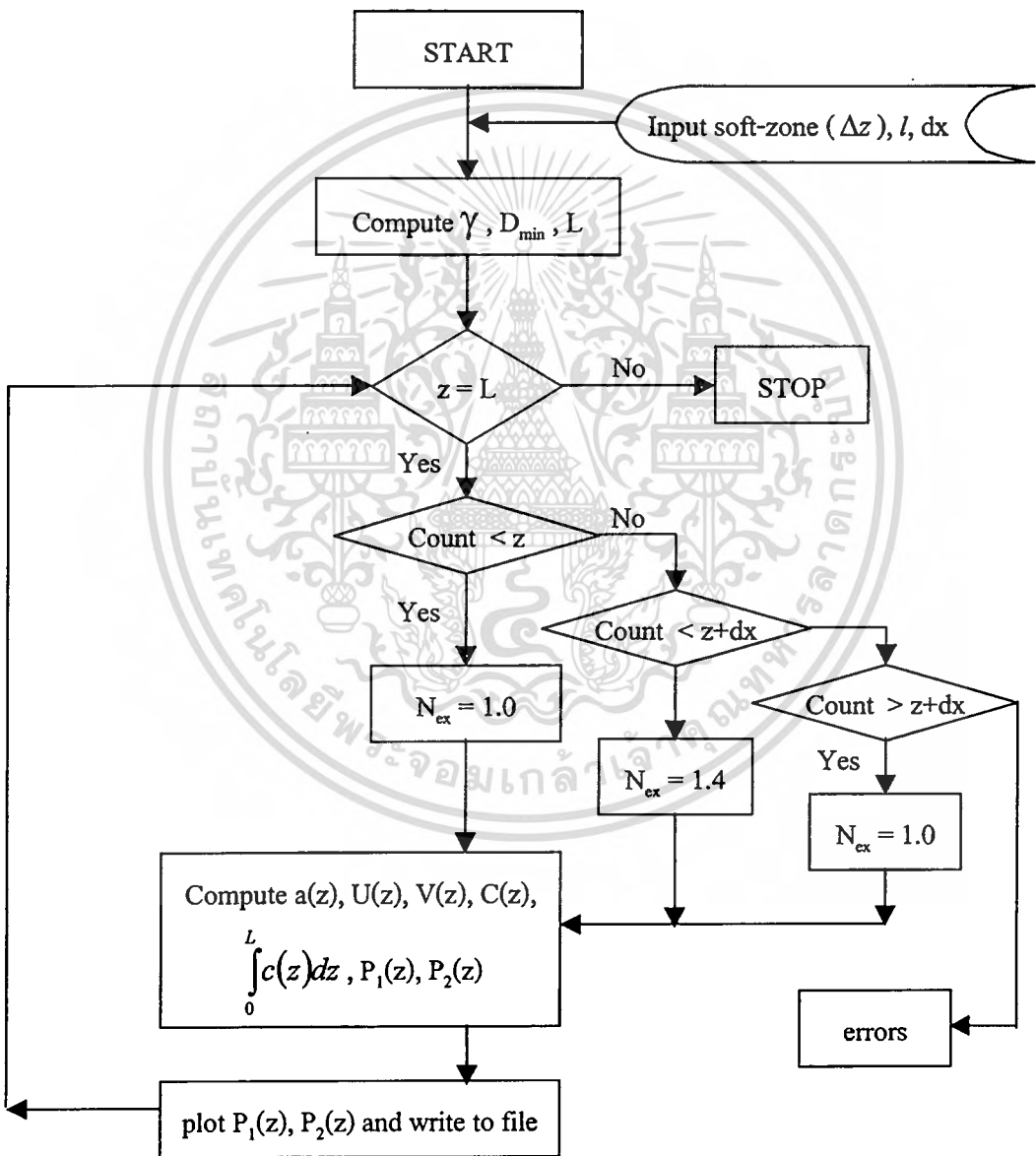
เพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างภายในของท่อนำแสงแบบหลอรวมมีผลต่อสัดส่วนการค้ำปลิงแสง ซึ่งทำได้โดยการรบกวนการค้ำปลิงแสงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการหลอรวมท่อนำแสง ในการทดลองนี้อาจนำมาใช้สำหรับการตรวจสอบจำนวนรอบของการค้ำปลิงแสงได้ด้วยเช่นกัน

จากสมการ (3.7) (3.13) และ (3.18) แสดงให้เห็นว่ากำลังแสง  $P_1$  และ  $P_2$  ที่บริเวณหลอรวมมีค่าแตกต่างกันตามระยะทาง ซึ่งเมื่อพิจารณาความหมายของกำลังแสง  $P_1$  และ  $P_2$  พบว่า  $P_1$  หมายถึงกำลังแสงที่ยังคงเคลื่อนที่ผ่านไปนท่อนำแสงเส้นเดิมโดยไม่ค้ำปลิงข้ามท่อนำแสงที่จุดหลอรวมและเคลื่อนเข้าสู่ปลายเอาต์พุตเส้นที่หนึ่ง ส่วน  $P_2$  นั้นหมายถึงกำลังแสงที่เคลื่อนที่ผ่านจุดหลอรวมและเกิดการค้ำปลิงข้ามไปยังท่อนำแสงอีกเส้นหนึ่งเข้าสู่เอาต์พุตในเส้นที่สอง และเมื่อพิจารณาพจน์ทางซ้ายมือของสมการทั้งสามจะทราบได้ทันทีว่า  $P_1$  และ  $P_2$  มีการออสซิลเลตกลับไปมาตามฟังก์ชันคลื่นของไซน์ และโคไซน์ ตามลำดับ ซึ่งการออสซิลเลตดังกล่าวจะขึ้นกับสัมประสิทธิ์การค้ำปลิงแสงตามระยะเวลาการหลอรวมท่อนำแสง ซึ่งเมื่อระยะเวลาการหลอรวมยาวมากขึ้น ก็จะทำให้จำนวนครั้งของการออสซิลเลตจะมากขึ้นสัมพันธ์กัน ดังนั้นการแบ่งแยกกำลังแสงกันระหว่างเอาต์พุตเส้นที่หนึ่ง และเอาต์พุตเส้นที่สองจึงสัมพันธ์กับระยะเวลาของการหลอรวมด้วย หลักการนี้มีประโยชน์มากสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ทางการสื่อสาร และการออกแบบอุปกรณ์กรองสัญญาณด้วยแสง รวมทั้งการออกแบบอุปกรณ์การตรวจวัดด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามอัตราส่วนการแบ่งกำลังแสงที่นิยมมักเป็นแบบ 50:50 หรือ 60:40 หรือ 70:30 ตามแต่กรณีการใช้งาน และมักนิยมเลือกคาบที่หนึ่งของการออสซิลเลต เพราะจะทำให้มีเสถียรภาพของกำลังแสงมาก และมีการสูญเสียกำลังแสงน้อยกว่าในช่วงคาบการออสซิลเลตอื่น ๆ ส่วนในการทดลองนี้จะเลือกคาบการออสซิลเลตที่หนึ่งและอัตราส่วนการแบ่งแยกกำลังแสงประมาณ 50:50 เนื่องจากว่าในงานวิจัยนี้จะนำไปใช้ในการศึกษาเพื่อสร้างอุปกรณ์การตรวจวัดจึงต้องการเสถียรภาพของกำลังแสงเป็นสิ่งสำคัญ ในการทดลองนี้จะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงกำลังแสงเมื่อถูกรบกวนจากภายนอกจะแตกต่างกันขึ้นกับระยะตามแนวการหลอรวมท่อนำแสง โดยได้ทำการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองดังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

#### 5.3.1.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์

จากสมการ (3.17) เมื่อแทนค่า  $C(z)$  และ  $z$  ลงในสมการจะได้กำลังแสงที่แยกออกจากกัน คือ  $P_1(z)$  และ  $P_2(z)$  ถ้าสมมติว่าที่ระยะ  $z$  มีดัชนีหักเหแสงมากกว่า 1.0 มาก ๆ เป็นระยะทาง  $dx$  จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการค้ำปลิงแสงเกิดขึ้นที่บริเวณนี้ ซึ่งถ้าทำการเคลื่อนบริเวณที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

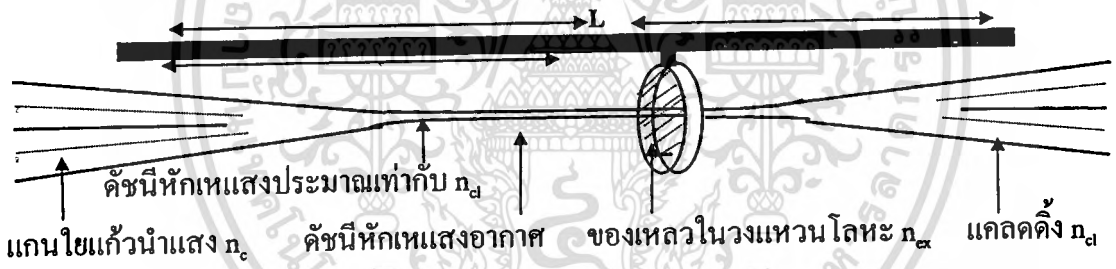
ดัชนีหักเหแสงมากกว่า 1.0 นี้ออกไปเรื่อยๆ ตั้งแต่จุดเริ่มต้นการหลอมรวมที่ 0 ไปจนถึง  $L$  ซึ่งก็คือจุดปลายสุดของการหลอมรวม โดยกำหนดให้การเคลื่อนที่ทุก สเต็ปมีการเก็บบันทึกค่าของ  $P_1(z)$  และ  $P_2(z)$  จากนั้นนำค่า  $P_1(z)$  และ  $P_2(z)$  มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสง และระยะทาง กราฟที่ได้จะต้องสัมพันธ์กับค่าของไซน์และโคไซน์ ทั้งนี้เนื่องจากตามทฤษฎีแล้วกำลังแสงที่ระยะต่าง ๆ ในบริเวณหลอมรวมที่อ่อนแสงมีค่าแตกต่างกันและเป็นฟังก์ชัน และโคไซน์ของระยะการหลอมรวม หลักการดังกล่าวนี้ได้นำไปสู่การจำลองผลการทดลองโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขตามโปรแกรมชื่อ OCOUP.BAS โดยมีแผนภาพแสดงขั้นตอนของโปรแกรม ดังรูปที่ 5.8



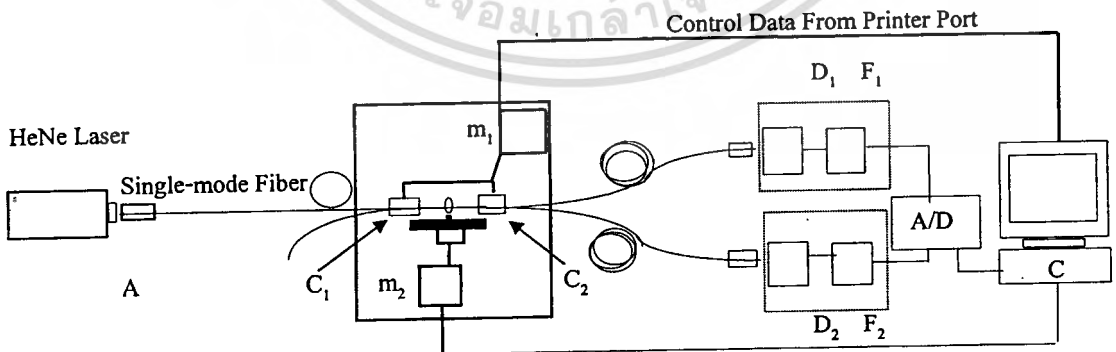
รูปที่ 5.8 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรม OCOUP.BAS

### 5.3.1.2 การทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ใช้คัปเปิลเลอร์แสงที่สร้างขึ้นมามีขนาดต่าง ๆ กัน แล้วนำวงแหวนโลหะขนาด 0.5 มิลลิเมตร ทำเป็นวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ล้อมรอบท่อนำแสงหลอมรวม เพื่อให้ท่อแสงหลอมรวมสัมผัสกับของเหลวเป็นระยะทาง  $dx$  วงแหวนและแผ่นของเหลวนี้ต่อเข้ากับแท่นโลหะที่เคลื่อนที่ได้ โดยการควบคุมของมอเตอร์ ดังรูปที่ 5.9 จากนั้นป้อนแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนความยาวคลื่นแสง 632.8 นาโนเมตรเข้าที่ปลายด้านอินพุตเส้นโคเส้นหนึ่งของคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสง ส่วนปลายด้านเอาต์พุตทั้งสองต่อเข้ากับภากรับแสงดังในรูปที่ 5.10 แสงที่เข้าสู่อินพุตของภากรับแสงจะถูกแปลงเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า และถูกขยายสัญญาณขึ้นมาเพื่อส่งผ่านภาคอินเทอร์เฟซสัญญาณเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล และสร้างกราฟ ส่วนในขณะที่ทำการทดลองจะใช้วิธีการเคลื่อนวงแหวนโลหะให้แผ่นของเหลวที่เกาะติดอยู่ที่วงแหวนเคลื่อนที่ผ่านไปตามความยาวของท่อนำแสงหลอมรวมทีละช่วง โดยแต่ละช่วงห่างประมาณ 0.17 มิลลิเมตร ซึ่งได้มีการบันทึกผลแบบอัตโนมัติทุก ๆ ช่วงจนกระทั่งแผ่นของเหลวผ่านบริเวณจุดหลอมรวมทั้งหมด จากนั้นจึงตรวจสอบกราฟหาช่วงคาบการคัปปลิงแสงแล้วบันทึกผลและเปรียบเทียบกับผลการจำลองเชิงตัวเลข



รูปที่ 5.9 แสดงการทดลองการเคลื่อนที่แผ่นของเหลวผ่านท่อนำแสงแบบหลอมรวม



รูปที่ 5.10 แสดงการทดลองการรบกวนการคัปปลิงแสงโดยการเปลี่ยนดัชนีหักเหแสงของสิ่งแฉดล้อม

### 5.3.2 การเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสง

จุดประสงค์ของการทดลองนี้เพื่อตรวจสอบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การค้ำปลีงแสงเกิดขึ้นขณะทำการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมรอบท่อนำแสงหลอมรวม นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบว่าโครงสร้างของอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงมีความสัมพันธ์กับผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ด้วยอย่างไร

ตามทฤษฎีที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.1 และ 3.2 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงมีรอยต่อระหว่างแก้วกับอากาศ โดยมีอากาศหรือสิ่งแวดล้อมภายนอกทำตัวเสมือนเป็นแคลคูลิงให้กับท่อนำแสงดังกล่าวนี้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอกจึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การค้ำปลีงแสงขึ้น การหาข้อสนับสนุนนี้ทำได้โดยพิจารณาสมการการค้ำปลีงแสงในสมการ (3.19) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ออร์มัลไลซ์ ในขณะที่สมการของความถี่ออร์มัลไลซ์เป็นฟังก์ชันของดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอกตามสมการ (3.24) จะส่งผลให้ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การค้ำปลีงแสงเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์และสอดคล้องกันกับสมการ (3.26) นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างของท่อนำแสงยังส่งผลให้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่กล่าวถึงข้างต้นแตกต่างกันในแต่ละ โครงสร้าง ดังจะเห็นได้จากการจำลองผลเชิงตัวเลข

หลักการนี้มีประโยชน์มากในการใช้สร้างอุปกรณ์การตรวจวัด การออกแบบสารเคลือบค้ำปลีงแบบหลอมรวมท่อนำแสง การสร้างอุปกรณ์แบบสวิตซ์ทางแสง และการสร้างอุปกรณ์การมัลติเพลกซ์เชิงแสง เป็นต้น

#### 5.3.2.1 การจำลองผลเชิงตัวเลข

การจำลองผลเชิงตัวเลขในหัวข้อนี้จะเริ่มต้นที่สมการ (3.19) เพื่อนำไปหากราฟของ  $P_1(z)$  และ  $P_2(z)$  เทียบกับดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก เมื่อท่อนำแสงแบบหลอมรวมถูกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการค้ำปลีงแสงโดยสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น ก๊าซเซอริน และน้ำ จากสมการ (3.23) เป็นสมการสัมพันธ์กันกับค่าของ  $W(z)$  ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า  $W(z)$  สัมพันธ์กันกับ  $V(z)$  และ  $U(z)$  ดังนี้

$$W^2(z) = V^2(z) - U^2(z) \quad (5.3)$$

ดังนั้นจึงสามารถหาค่าของสมการ (3.23) ได้โดยใช้ค่า  $U(z)$  และ  $V(z)$  จากสมการ (3.20) และสมการ (3.24) จากนั้นแทนค่า  $a(z)$ ,  $U(z)$ ,  $V(z)$  และสมการ (3.23) ลงในสมการ (3.19) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การค้ำปลีงแสงที่ระยะการหลอมรวม  $z$  สัมพันธ์กับตัวแปร  $V(z)$  ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C(z) = \frac{\sqrt{\delta} U^2(z) (V^2(z) - U^2(z))^{3/4}}{a(z) V^3(z) \pi^{1/2}} \left( 1 - \frac{13}{16(V^2(z) - U^2(z))^{1/2}} \right) \quad (5.4)$$

เมื่อ  $U(z)$  และ  $V(z)$  มีความสัมพันธ์กับดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอกดังนี้

$$U(z) \cong 2.405 \exp \left[ - \left( \frac{1 - \delta/2}{V(z)} \right) \right]$$

โดยที่  $V(z) = a(z) k (n_{cl}^2 - n_{ex}^2)^2$

เมื่อทราบฟังก์ชันของ  $a(z)$  และนำมาแทนค่าในสมการ  $V(z)$  ที่  $n_{ex}$  คงที่ค่าหนึ่ง จากนั้นหา  $U(z)$  และผลรวมของ  $C(z)$  ตลอดระยะ  $L$  เพื่อนำไปหาค่าของ  $P_1(n_{ex})$  และ  $P_2(n_{ex})$  ซึ่งเมื่อเปลี่ยนค่าของ  $n_{ex}$  ตั้งแต่ 1.0 ถึง 1.459 และคำนวณหาค่า  $P_1(n_{ex})$  และ  $P_2(n_{ex})$  จากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $n_{ex}$  และ  $P_1(n_{ex})$  และ  $P_2(n_{ex})$  อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าต่างๆ ดังกล่าวมาข้างต้นนั้นยุ่งยากและซับซ้อนจึงจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลเชิงตัวเลขเพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงสัมพันธ์กับ  $n_{ex}$  โดยมีแผนผังของขั้นตอนการประมวลผลดัง ดังรูปที่ 5.11

### 5.3.2.2 การทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่า ผลการเปลี่ยนแปลงกำลังแสง  $P_1$  จะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยผลการทดลองที่ได้จะต้องสอดคล้องกับการการจำลองผลเชิงตัวเลข ส่วนขั้นตอนการทดลองนี้เริ่มต้นจากการสร้างคัปเปลอร์แสงที่ขนาดของระยะการหลอมรวม  $L$  เท่ากับ 4.7 มิลลิเมตร แล้วนำสารที่มีดัชนีหักเหแสงต่างกัน 3 ค่ามาเคลือบโดยรอบท่อนำแสงหลอมรวม และทำการตรวจวัดกำลังแสงเอาท์พุท  $P_1$  และบันทึกลงผล

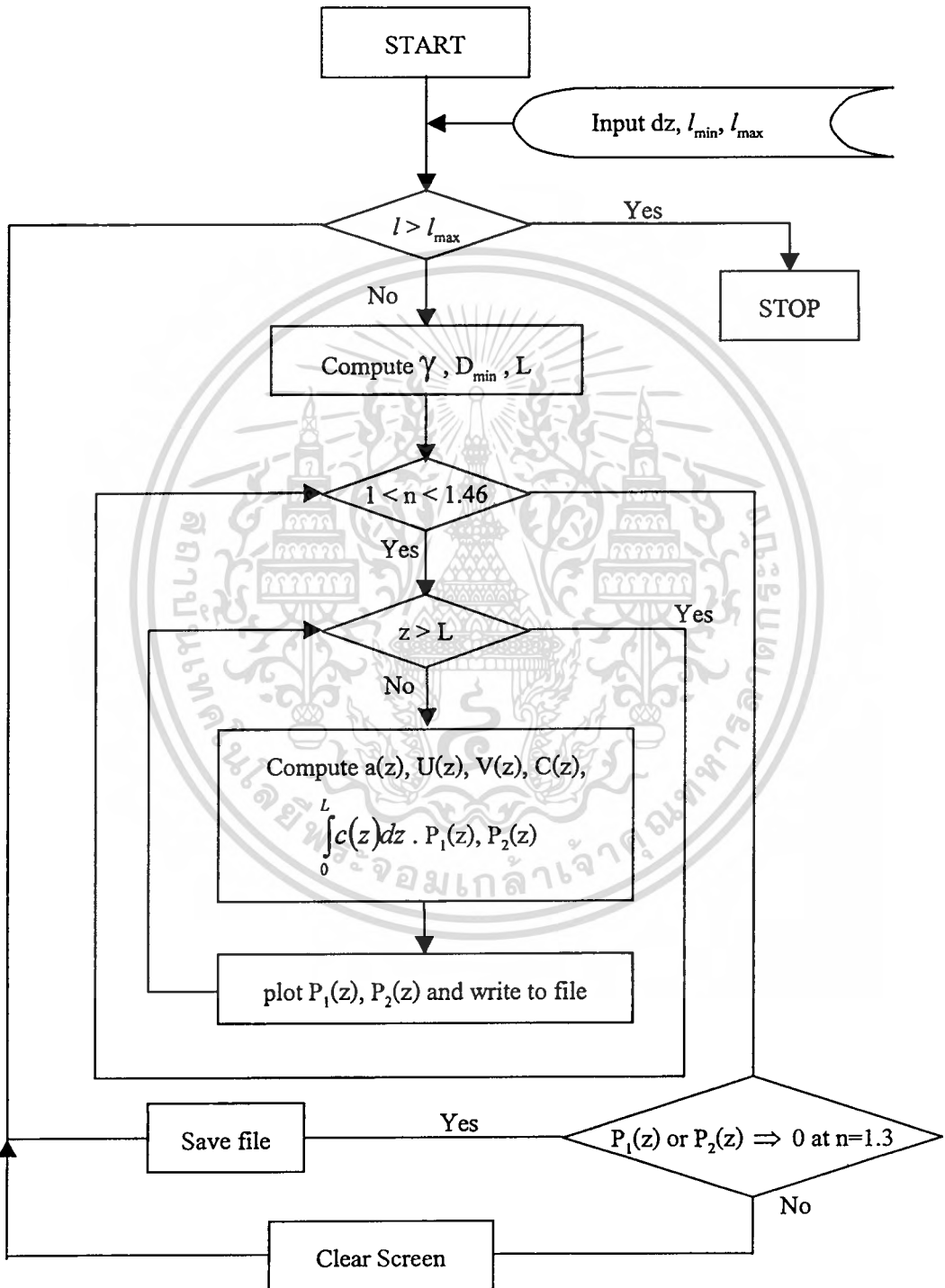
### 5.3.3 ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงการคัปปลิงแสงเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก

ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า โครงสร้างภายในของคัปเปลอร์แบบหลอมรวมนี้มีรอยต่อระหว่างแก้วกับอากาศ จึงไม่ค่อยมีเสถียรภาพในการนำแสงมากนัก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกท่อนำแสงหลอมรวม จะส่งผลให้สัดส่วนการคัปปลิงแสงเปลี่ยนแปลงไปได้ นอกจากนี้เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อโครงสร้างของอุปกรณ์แยกลำแสงแบบนี้ยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการคัปปลิงแสงได้ด้วยเช่นกัน ดังจะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไปนี้

จากสมการ (3.28) ค่าคงที่ของการเคลื่อนที่ของโหมดแสงใด ๆ  $\beta_p$  ที่แยกออกไปจากโหมดลำดับพื้นฐาน  $\beta_{p0}$  ด้วยสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงจากโหมด 0 ไปยังโหมด  $p$  ใด ๆ ซึ่ง

เท่ากับพจน์สุดท้ายของสมการ (3.28) ดังนั้นเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อโครงสร้างของคัป

เพลอร์แบบหลอมรวมจะส่งผลทำให้ดัชนีหักเหเฟกทีฟเปลี่ยนแปลงไปสัมพันธ์กัน ในกรณีที่แรงจากภายนอกดังกล่าวเป็นแรงที่ทำให้เกิดการโค้งงอดัชนีหักเหเฟกทีฟจะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับรัศมีการโค้งงอ ดังสมการ (3.29) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงอันเนื่องมาจากแรงที่ทำให้เกิดการโค้งงอเป็นฟังก์ชันของรัศมีการโค้งงอ

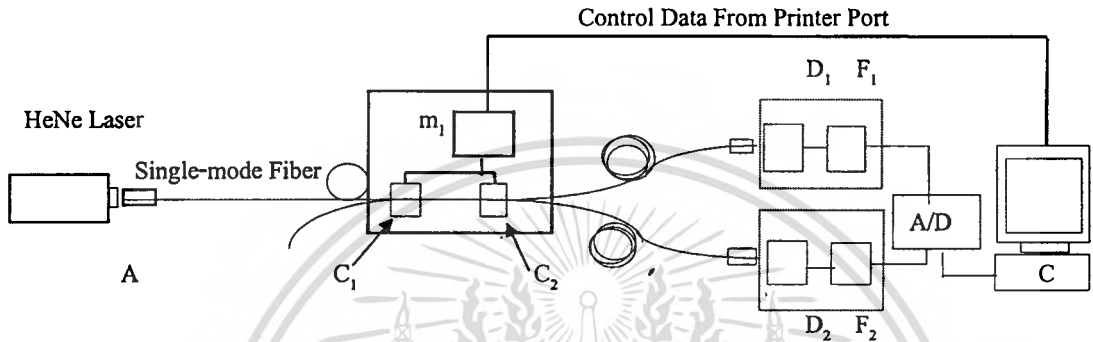


รูปที่ 5.11 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างการคัปปลิงแสง

กับดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองนี้ได้จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 5.12 เพื่อสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวม จากนั้นจึงทำการทดลองโดยเคลื่อนปลายทั้งของคัปเปิลอร์เข้าหากัน โดยควบคุมมอเตอร์ให้เคลื่อน แทนวางคัปเปิลอร์เข้าหากันทีละสเต็ปจนกระทั่งท่อนำแสงหักออกจากกัน โดยในขณะที่มีการเคลื่อนที่แต่ละสเต็ปก็จะทำการวัดกำลังแสงที่ปลายด้านเอาต์พุตทั้งสองและแสดงกราฟออกทาง หน้าจอ ซึ่งคาดว่ากราฟที่ได้จะเปลี่ยนแปลงตามระยะทางการเคลื่อนที่ที่แทนวางคัปเปิลอร์ทั้งสองเข้าหากัน



รูปที่ 5.12 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองตรวจสอบผลของแรงจากภายนอกที่มีต่อการคัปปลิงแสง

## 5.4 การศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบหลอมรวมท่อนำแสง

ในการประยุกต์อุปกรณ์แบบหลอมรวมเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดนั้น ได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการสร้างและศึกษาอุปกรณ์สองแบบด้วยกัน คือแบบที่สร้างจากคัปเปิลอร์แบบหลอมรวม และที่สร้างจากลูปมีลเลอร์ โดยทั้งสองแบบสามารถใช้งานร่วมกันกับ ไอทีดีอาร์ได้โดยตรง

### 5.4.1 การสร้างและศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัดจากคัปเปิลอร์แบบหลอมรวม

คัปเปิลอร์แบบหลอมรวมสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดได้หลากหลายรูปแบบ ซึ่งในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการสะท้อนกลับจากปลายเอาต์พุตของคัปเปิลอร์แบบหลอมรวม โดยใช้หลักการสะท้อนของเฟรสเนล ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์กับดัชนีหักเหแสงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกดังนี้

$$R = \left( \frac{n_1 - n_{ex}}{n_1 + n_{ex}} \right)^2 \quad (5.5)$$

เมื่อ  $R$  คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังแสงสะท้อนกลับต่อกำลังแสงที่เคลื่อนผ่านปลายภาคตัดขวางของท่อนำแสง  $n_1$  คือ ดัชนีหักเหแสงของแกนใยแก้วนำแสง ส่วน  $n_{xx}$  คือ ดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมที่ปลายภาคตัดขวางของท่อนำแสง

ในการทดลองได้สร้างคัปเปิลอร์ที่มีสัดส่วนกำลังแสงแบบ 50 : 50 เปอร์เซ็นต์ และนำไปทดสอบกับสารเคมี 3 ชนิด คือ น้ำ อีทกอสอล และกลีเซอริน โดยจุ่มปลายด้านเอาต์พุตของคัปเปิลอร์เส้นที่ 1 ลงในสารเคมี ส่วนเส้นที่ 2 ใช้เป็นปลายอ้างอิง และบันทึกผลการทดลอง

#### 5.4.2 การสร้างและตรวจสอบอุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์

หลักการของลูปมิลเลอร์คือเมื่อนำปลายด้านเอาต์พุตทั้งสองของอุปกรณ์แบบคัปเปิลอร์เชื่อมเข้าด้วยกันโดยการหลอมรวม ก็จะทำให้กำลังแสงที่แยกออกจากกันแล้ววนกลับมาคัปปลิงข้ามท่อนำแสงอีกครั้งหนึ่งและมีกำลังแสงส่วนหนึ่งย้อนกลับเข้าสู่ใยแก้วนำแสงเส้นอินพุตเดิมดังรูปที่ 4.8 โดยมีกำลังแสงสัมพัทธ์ที่ย้อนกลับเข้าสู่อินพุตสอดคล้องกับสมการ (4.8)

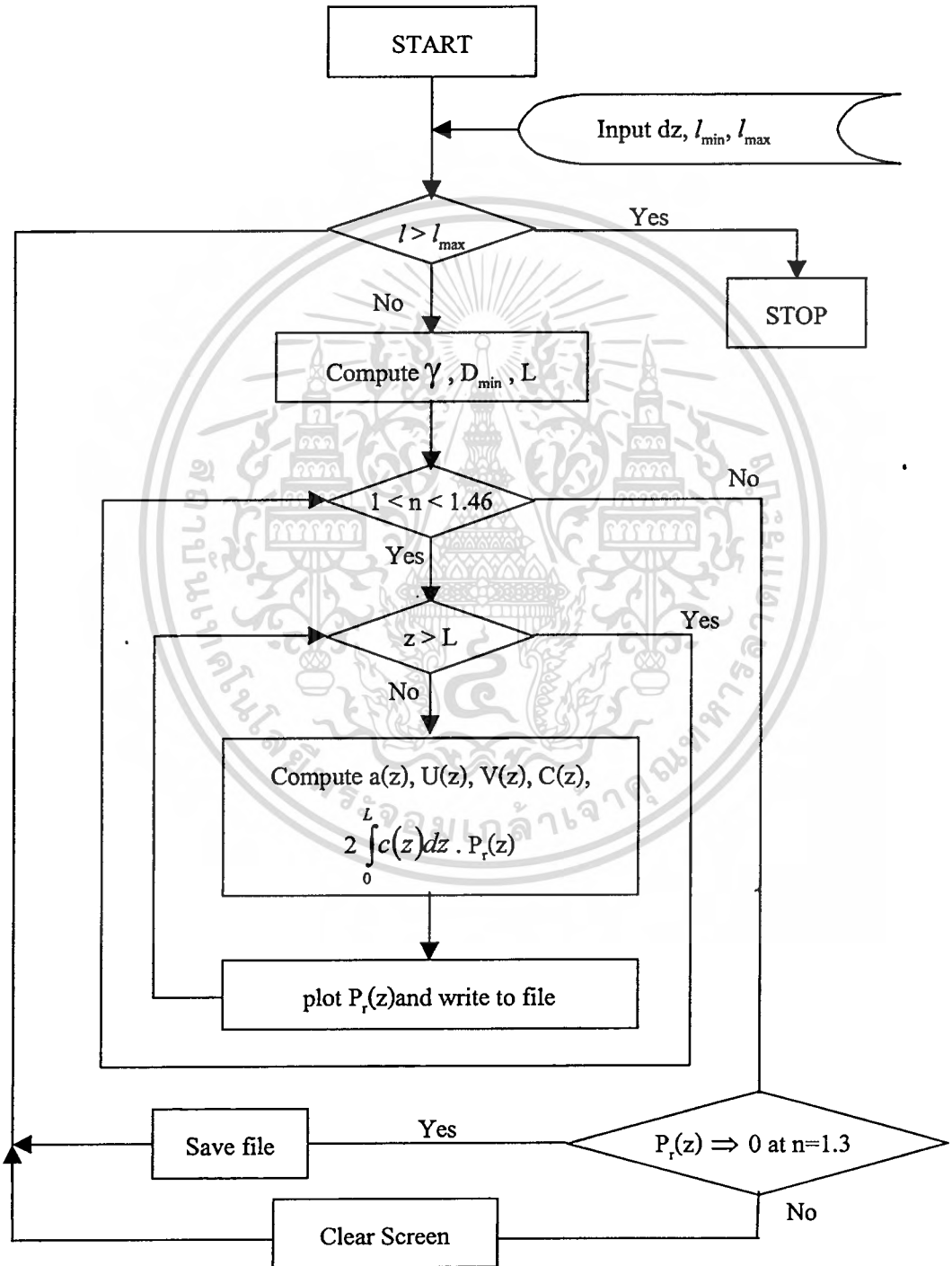
ส่วนในการศึกษาวิจัยนี้จะทำการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการใช้ออกแบบสร้างอุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์ซึ่งมีกำลังแสงย้อนกลับน้อยกว่าและสามารถตรวจรับได้ด้วยเครื่องโอทีดีอาร์ เพื่อที่จะนำมาศึกษาผลการรบกวนกำลังแสงย้อนกลับจากสิ่งแวดล้อมภายนอกและจะนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์กับการตรวจวัด วิธีการก็นำปลายทั้งสองของท่อนำแสงประกบเข้าด้วยกันแล้วทำการหลอมและดึงท่อนำแสงที่ประกบติดกันนั้นจนได้อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 4.8 อุปกรณ์แบบนี้เรียกว่าอุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์ซึ่งให้กำลังแสงย้อนกลับเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงอินพุต ในการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับด้วยเครื่องโอทีดีอาร์ดังรูปที่ 4.24(ก) ซึ่งคาดว่าจะได้ผลการตรวจวัดดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.24(ข) ซึ่งมีกำลังแสงย้อนกลับปรากฏอยู่ตรงตำแหน่งที่ไกลออกไปจากจุดคัปปลิงแสง ซึ่งเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวใยแก้วนำแสงที่ทำลูป ดังนั้นเมื่อมีการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกตรงบริเวณท่อนำแสงหลอมรวมอาจก็ทำให้ค่ากำลังแสงที่ย้อนกลับอ่านได้จากกราฟในจอภาพของโอทีดีอาร์เปลี่ยนแปลง หลักการนี้อาจนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้ซึ่งจะได้รับการทดสอบต่อไป

#### 5.4.3 อุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์และการตรวจวัด

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองประยุกต์ใช้อุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์สร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการคัปปลิงแสงอันเนื่องมาจากตัวแปรภายนอก ซึ่งแบ่งออกเป็นสองการทดลองคือการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงย้อนกลับกับดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก ส่วนการทดลองที่สองคือทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงย้อนกลับกับแรงจากภายนอก

### 5.4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงย้อนกลับจากอุปกับดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงภายนอกกับกำลังแสงย้อนกลับ  $P_r$  ในสมการ (4.8) สามารถศึกษาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขตามโปรแกรมภาษาเบสิกชื่อ SENSOR.BAS ซึ่งมีแผนผังการทำงานของโปรแกรม ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรมการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วน

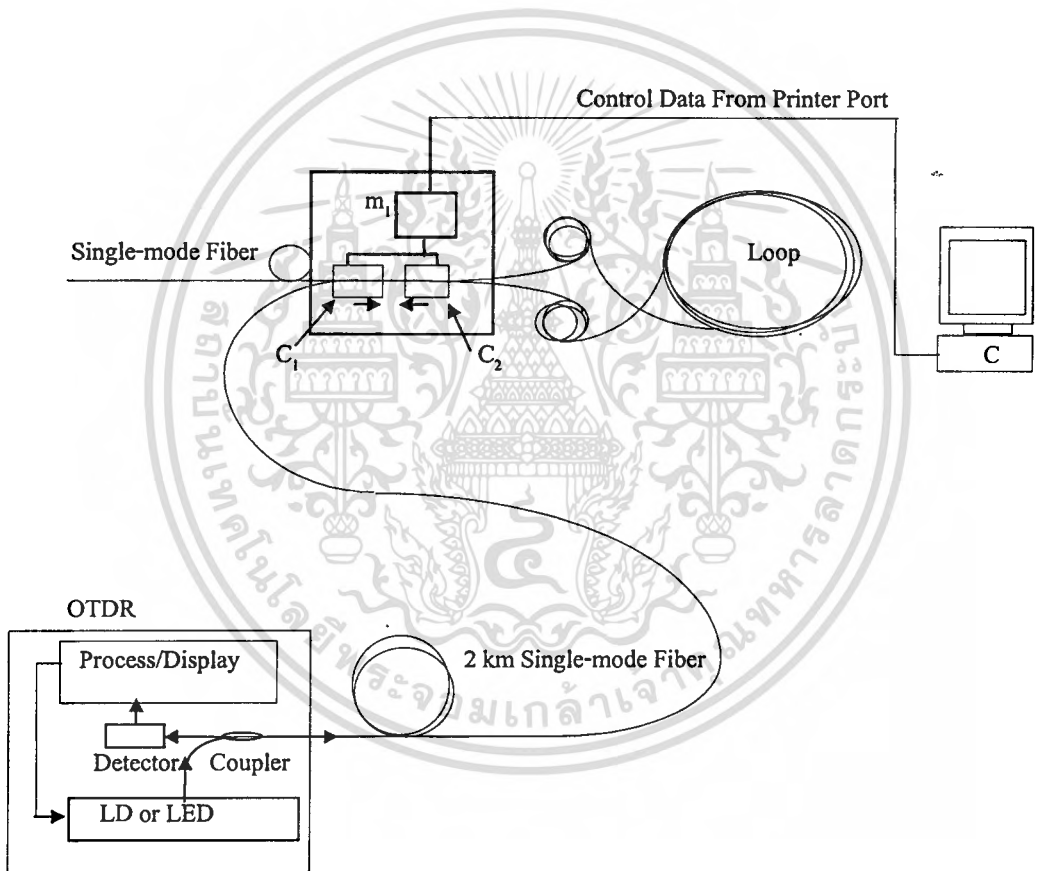
เอกสารนี้เป็น การค้ปปล้ิงแสงกับดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองกราฟดังกล่าวทำให้ทราบว่ากำลังแสงย้อนกลับจะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละค่าของดัชนีหักเหแสงจากภายนอก ดังนั้นเมื่อทำการทดลองโดยจัดอุปกรณ์ตามรูปที่ 4.24(ก) และบันทึกค่ากำลังแสงย้อนกลับจากลูป โดยทดลองเปลี่ยนดัชนีหักเหแสง 3 ค่า และนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข จะพบว่าได้ผลสอดคล้องกันดังจะกล่าวถึงในบทต่อไป

#### 5.4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงย้อนกลับกับแรงจากภายนอก

เนื่องจากแรงจากภายนอกสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงได้ ดังนั้นเมื่อทำการทดลองวัดกำลังแสงย้อนกลับจากลูปในขณะที่มีแรงกระทำจากภายนอก โดยทำต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 5.14 และบันทึกผลกำลังแสงย้อนกลับทุก ๆ สเต็ปของการเคลื่อนแท่นตริงท่อนำแสงเข้าหากัน



รูปที่ 5.14 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากลูปขณะที่ได้รับผลของแรงจากภายนอกมากระทำต่อ โครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวม

## 5.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดลองออกแบบอุปกรณ์แบบหลอมรวมและจำลองผลการทดลองเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การทดลอง ซึ่งการทดลองได้แบ่งออกเป็น 3 ตอน คือ ตอนแรกเป็นการทดสอบเครื่องมือและการสร้างอุปกรณ์แบบหลอมรวมที่นำเสนอ ซึ่งได้ทำการตรวจสอบการทำงานของเครื่องหลอมรวมอุปกรณ์แบบหลอมรวม และตรวจสอบหาซอฟต์แวร์ของเครื่องหลอมรวม เพื่อนำไปใช้ในการสร้างอุปกรณ์แบบหลอมรวม ตอนที่สองคือการตรวจสอบคุณสมบัติบางประการของที่นำเสนอแบบหลอมรวม เช่น การศึกษาการออกสวิตช์เลดกำลังแสงตลอดระยะเวลาการหลอมรวมที่นำเสนอ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมรอบที่นำเสนอหลอมรวมกับสัดส่วนการคัปปลิงแสง และศึกษาเสถียรภาพของการคัปปลิงแสงเมื่อมีแรงกระทำจากภายนอก ส่วนตอนสุดท้ายเป็นการทดลองประยุกต์ใช้อุปกรณ์แบบหลอมรวมที่นำเสนอเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด เช่น การตรวจจับการรั่วไหลของสารละลาย และการตรวจวัดแรงกระทำให้เกิดการโค้งงอ เป็นต้น



## บทที่ 6

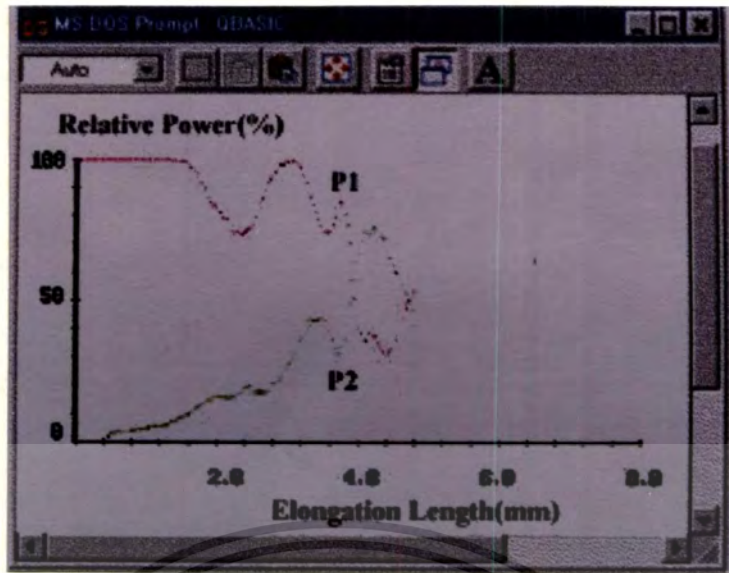
### ผลของงานวิจัย

ในบทนี้จะแสดงผลการศึกษาตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 โดยจะแสดงผลการศึกษาเป็นขั้นตอน ดังนี้ คือผลการศึกษาการสร้างคัปเปิลอร์แสงแบบหลอมรวม ผลการศึกษาคุณสมบัติของคัปเปิลอร์แสงแบบหลอมรวม และผลการศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบหลอมรวม ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

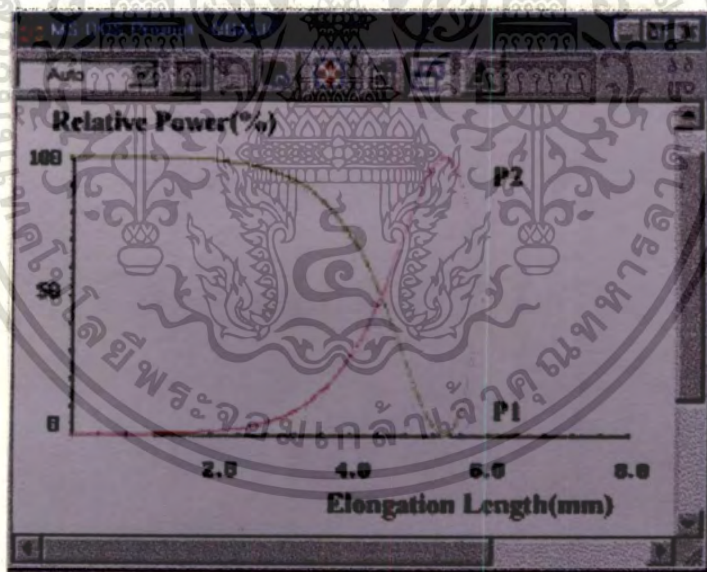
#### 6.1 คัปเปิลอร์แบบหลอมรวม

การทดลองนี้เป็นการศึกษาตามหลักการสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวม โดยการสร้างระบบหลอมและดึงท่อนำแสงหลอมรวม ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งระบบดังกล่าวนี้มีหัวก๊าซบิวเทน-ออกซิเจน (Butane-oxygen) เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนที่มีค่าแสงความร้อนขนาด 2 มิลลิเมตร ให้ความร้อนสูง  $700^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1000^{\circ}\text{C}$  และมีระบบดึงท่อนำแสงให้ขีดออกได้ระยะทางต่อสแต็ปประมาณ 0.025 มิลลิเมตร

เมื่อทำการทดลองหลอมและดึงท่อนำแสงแบบ โหมดเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10/125 สองเส้นที่ความร้อน  $700^{\circ}\text{C}$  –  $1000^{\circ}\text{C}$  และดึงให้ขีดออกทีละสแต็ปแบบต่อเนื่อง จนกระทั่งท่อนำแสงหลอมรวมเล็กกลงและขาดเป็นสองส่วน ในแต่ละสแต็ปจะควบคุมและทำการตรวจวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ปลายทั้งสองของคัปเปิลอร์แบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรมควบคุมระบบหลอมรวม ชื่อ MCOUP.BAS และได้ผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงกับระยะการดึงขณะหลอมรวม ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการคัปปลิงของกำลังแสงระหว่างท่อนำแสงเกิดขึ้น กล่าวคือกราฟของกำลังแสงเอาต์พุตทั้งสองมีแนวโน้มเป็นฟังก์ชันของไซน์ไซคอด ตามระยะการดึงขณะหลอมรวม หรืออาจกล่าวได้ว่าสัดส่วนการคัปปลิงแสงเปลี่ยนแปลงตามขนาดโครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองกราฟเชิงตัวเลขดังรูปที่ 6.2 พบว่าสอดคล้องกัน กล่าวคือ เป็นฟังก์ชันไซน์ไซคอด ที่มีจุดตัดกันของกราฟ  $P_1$  และ  $P_2$  ที่ 50% ของกำลังแสงทั้งหมด จากคุณลักษณะของกราฟทั้งสองนี้สามารถนำมาศึกษาเทคนิคการสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสงได้ดังนี้



รูปที่ 6.1 แสดงผลการทดลองของควมสร้างคัปเปิลอร์แสงแบบหลอมรวม โดยการหลอมและดึง  
 ท่อนำแสงออกเป็นระยะทางต่าง ๆ กัน และบันทึกกำลังแสงเอาต์พุตทั้งสองของคัปเปิลอร์  
 แสง เมื่อกราฟเส้นสีเขียวคือ  $P_2$  และกราฟเส้นสีม่วงคือ  $P_1$



รูปที่ 6.2 แสดงผลการจำลองเชิงตัวเลขของการทดลองดึงท่อนำแสง โดยใช้ซอฟต์แวร์ที่ 1.2  
 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.1.1 ซอฟท์โซน

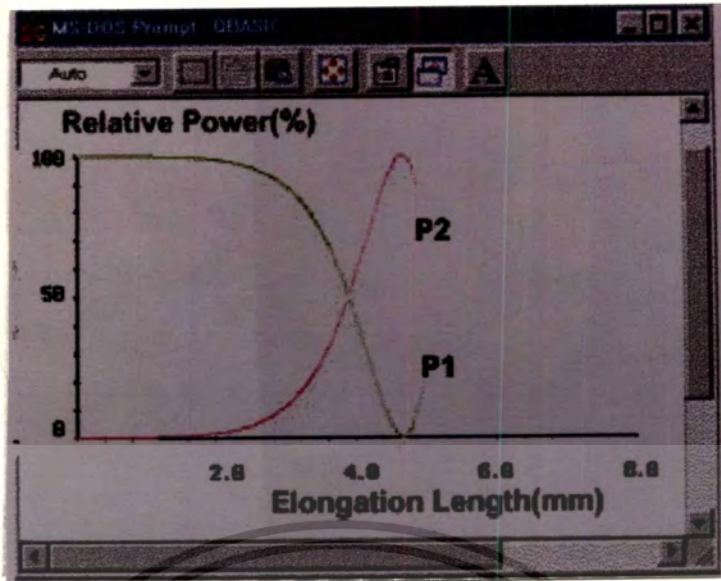
จากผลการทดลองในรูป 6.1 สามารถคำนวณหาขนาดของซอฟท์โซนของคัปเปอเรอร์แบบ หลอมรวมท่อนำแสงได้โดยการทดลองหลอมและดึงท่อนำแสงจนกระทั่งขาดเป็นสองส่วน และหา ความยาวสูงสุดของระยะการดึงขณะหลอมรวม ( $l_{max}$ ) จากนั้นหา  $\frac{l_{max}}{4}$  ซึ่งเท่ากับซอฟท์โซน ( $\Delta z$ ) ของคัปเปอเรอร์แสงโดยประมาณ ซึ่งจากการทดลองหลาย ๆ ครั้ง พบว่า ซอฟท์โซนที่ได้มีค่าดัง ตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการหาขนาดของซอฟท์โซนจากหัวก๊าซร้อนขนาด 2 มิลลิเมตร

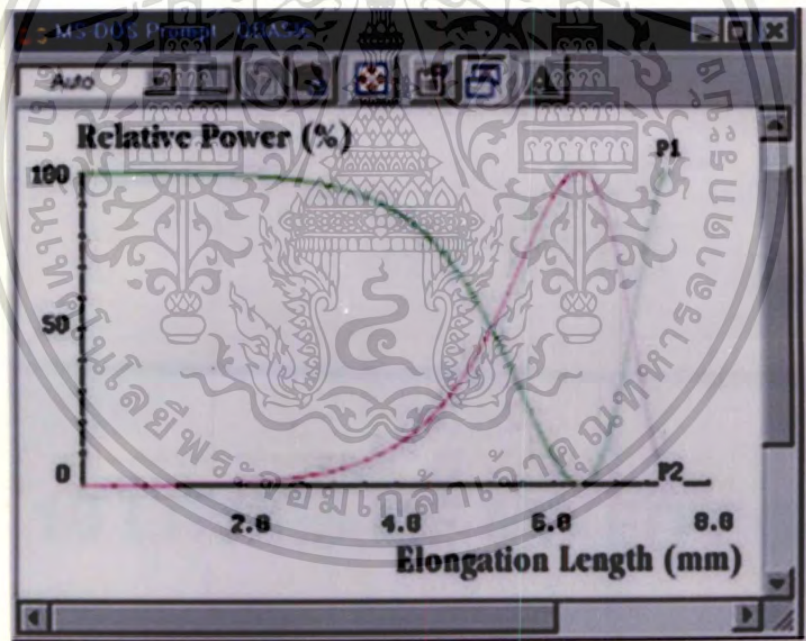
ครั้งที่	ขนาดลำแสงความร้อน (mm.)	$\Delta z$ (mm.)
1	2.0	$1.18 \pm 0.01$
2	2.0	$1.23 \pm 0.01$
3	2.0	$1.25 \pm 0.01$
4	2.0	$1.15 \pm 0.01$
เฉลี่ย	2.0	$1.21 \pm 0.01$

### 6.1.2 ระยะในการดึงขณะหลอมรวม

ผลการทดลองจากรูปที่ 6.1 และ 6.2 แสดงให้เห็นว่าระยะในการดึงขณะหลอมรวมท่อนำ แสงจะมีผลต่อสัดส่วนกำลังแสง โดยที่สัดส่วนกำลังแสงเอาต์พุต  $P_1$  และ  $P_2$  จะเป็นฟังก์ชันซิงู ไชดอลตามระยะการดึงขณะหลอมรวมสอดคล้องกับผลการจำลองเชิงตัวเลขในรูปที่ 6.3 ถึง 6.4 ซึ่ง ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ซอฟท์โซน 1.0 มิลลิเมตร และ 1.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อ พิจารณาผลการจำลองเชิงตัวเลข จะพบว่า  $P_1$  และ  $P_2$  มีจุดตัดกันที่ประมาณ 50% เป็นจุดที่กำลังแสง ของเอาต์พุตทั้งสองข้างมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการบิดกันครั้งแรก และจุดตัดดังกล่าวสอดคล้องกันกับผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลข เมื่อทำการทดลองหลาย ๆ ครั้ง โดยใช้ซอฟท์โซนเท่า กับ 1.2 และบันทึกผลระยะการดึงขณะหลอมรวมที่จุดตัดกันครั้งแรกของ  $P_1$  และ  $P_2$  พบว่าได้ระยะ เฉลี่ยเท่ากับ 4.0 มิลลิเมตร และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขพบว่า เปรอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันประมาณ 10 เปรอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.3 แสดงผลการจำลองเชิงตัวเลขของการทดลองสร้างคัปเปิลอร์แสง โดยใช้ซอฟต์แวร์ชอว์ทซ์โซนเท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.4 แสดงผลการจำลองเชิงตัวเลขของการทดลองสร้างคัปเปิลอร์แสง โดยใช้ซอฟต์แวร์ชอว์ทซ์โซนเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการศึกษาระยะบิตของกำลังแสงภายในท่อนำแสงหลอมรวมของคัปเปิลอร์  
แสงโดยใช้ซอฟต์แวร์ โซนเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร

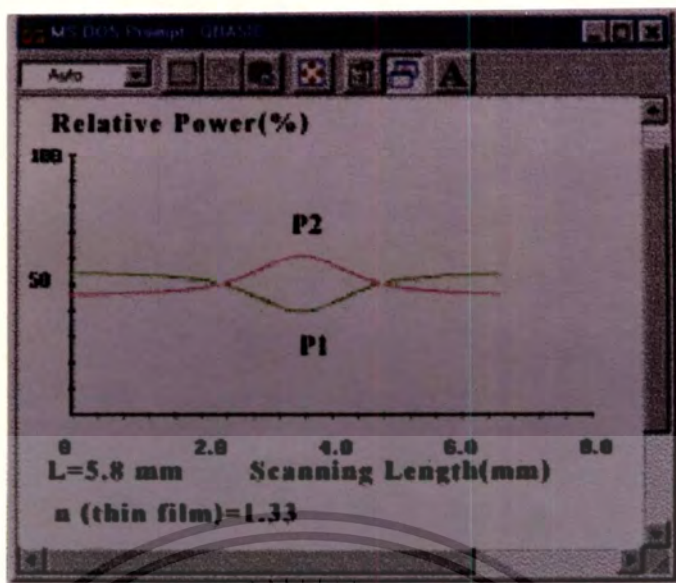
ครั้งที่	จุดตัดกันครั้งแรกของ $P_1$ และ $P_2$ (การจำลองผล)	จุดตัดครั้งแรกของ $P_1$ และ $P_2$ (การทดลอง)	% ของความคลาดเคลื่อน
1	4.45 มิลลิเมตร	4.1 ± 0.1 มิลลิเมตร	7.87
2	4.45 มิลลิเมตร	4.3 ± 0.1 มิลลิเมตร	3.37
3	4.45 มิลลิเมตร	3.8 ± 0.1 มิลลิเมตร	14.61
4	4.45 มิลลิเมตร	3.9 ± 0.1 มิลลิเมตร	12.36
เฉลี่ย	4.45 มิลลิเมตร	4.0 ± 0.1 มิลลิเมตร	9.55

## 6.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติของท่อนำแสงหลอมรวม

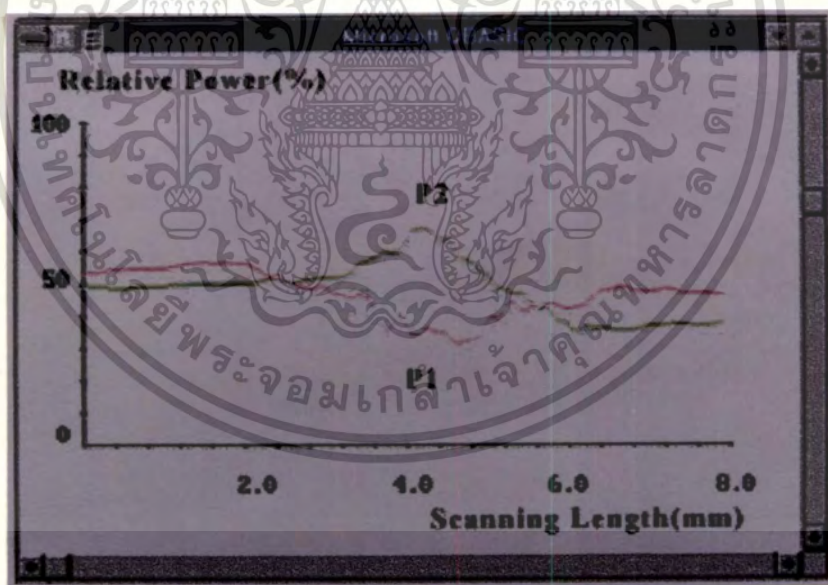
เนื่องจากในหัวข้อ 5.3 ได้แบ่งการศึกษาคุณสมบัติของคัปเปิลอร์แสงออกเป็น 3 หัวข้อ ดังนั้นในหัวข้อ 6.2 นี้จึงจะนำเสนอผลการศึกษาดังกล่าวเป็น 3 หัวข้อดังนี้

### 6.2.1 การออกซิลเลชันของกำลังแสง

จากกราฟที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขในหัวข้อ 5.3.1.1 ตามรูปที่ 6.5 แสดงให้เห็นว่ากำลังแสงสัมพัทธ์  $P_1$  และ  $P_2$  ภายในท่อนำแสงหลอมรวมจะมีค่าไม่เท่ากันตลอดระยะเวลาหลอมรวม ดังจะเห็นได้จาก เมื่อมีการรบกวนการคัปปลิงแสงเป็นระยะทางสั้น ๆ ( $dx$ ) จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของ  $P_1$  และ  $P_2$  เปลี่ยนแปลงไปไม่เท่ากันตลอดระยะเวลาหลอมรวม และมีแนวโน้มเป็นฟังก์ชันไซน์ซูดอล ส่วนผลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 5.3.1.2 ซึ่งเป็นการทดลองเคลื่อนแผ่นของเหลวไปตามยาวของท่อนำแสงหลอมรวมของคัปเปิลอร์แสง โดยใช้แผ่นฟิล์มของน้ำหนาประมาณ 0.5 มิลลิเมตร เคลื่อนผ่านท่อนำแสงหลอมรวมที่ถูกสร้างจากซอฟต์แวร์โซนประมาณ 1.2 มิลลิเมตร ซึ่งถูกตั้งระยะหลอมรวมเป็นระยะทาง 4 มิลลิเมตร โดยเคลื่อนที่ได้ระยะทางครั้งละ 0.17 มิลลิเมตร และผลการบันทึกกำลังแสงที่เอาต์พุต  $P_1$  และ  $P_2$  แบบอัตโนมัติ พบว่าเป็นฟังก์ชันของไซน์ซูดอล ดังรูปที่ 6.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการออกซิลเลชันของกำลังแสงทั้งสองตลอดระยะเวลาหลอมรวมสอดคล้องกับทฤษฎี กล่าวคือกำลังแสงเอาต์พุตของ  $P_1$  และ  $P_2$  มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงกันข้าม และมีแนวโน้มเป็นฟังก์ชันไซน์ซูดอล เช่นเดียวกันกับผลการจำลองเชิงตัวเลข



รูปที่ 6.5 แสดงผลการจำลองเชิงตัวเลข ในการทดลองศึกษาการรบกวนการค้ำปลิงแสง ตลอดระยะการหลอมรวม โดยใช้ท่อนำแสงหลอมรวมที่มีซอฟต์แวร์โฟกัสเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร การตั้งระยะหลอมรวม 4 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.6 แสดงผลการทดลองรบกวนการค้ำปลิงแสงตลอดระยะการหลอมรวม โดยใช้ซอฟต์แวร์โฟกัส 1.2 มิลลิเมตร และระยะการตั้งระยะหลอมรวมเท่ากับ 4 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.2 การเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก

จากการทำการทดลองจำลองเชิงตัวเลขในหัวข้อ 5.3.2.1 แสดงให้เห็นว่า สัมประสิทธิ์การคับปลิงแสงเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับดัชนีหักเหของสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ท่อนำแสงหลอมรวมของคับเพลอร์แสง ดังรูปที่ 6.7 โดยที่กราฟเส้นสีม่วงได้จากการใช้ท่อนำแสงหลอมรวมขนาด 8.2 มิลลิเมตร ส่วนกราฟเส้นสีเขียวได้จากท่อนำแสงหลอมรวมขนาด 4.7 มิลลิเมตร ซึ่งยังพบว่าโครงสร้างของท่อนำแสงแตกต่างกันจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหของสิ่งแวดล้อมภายนอก ในสัดส่วนกำลังแสงที่แตกต่างกัน

ส่วนผลการทดลองในหัวข้อ 5.3.2.2 ซึ่งเป็นการศึกษาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของคับเพลอร์แบบหลอมรวม โดยสร้างคับเพลอร์ที่มีความยาวของระยะการหลอมรวม (L) เท่ากับ 4.7 มิลลิเมตร จากนั้นทดลองใช้ของเหลวที่มีดัชนีหักเหแสง 3 ค่า คือ 1.0, 1.3 และ 1.47 มาเคลือบท่อนำแสงหลอมรวม พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับกราฟที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขในรูปที่ 6.7 กล่าวคือ กำลังแสง  $P_1$  มีค่าแตกต่างกัน เมื่อสัมผัสกับดัชนีหักเหแสงต่าง ๆ กัน ดังตารางที่ 3



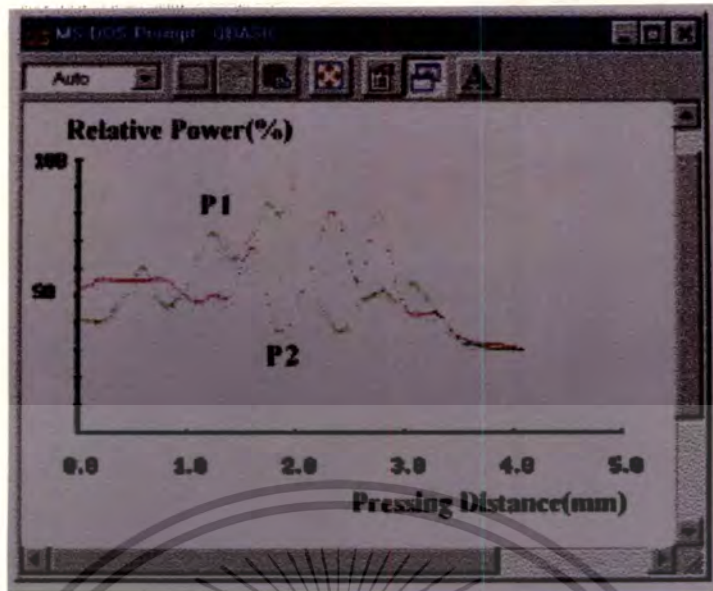
รูปที่ 6.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสง  $P_1$  และการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก ซึ่งได้จากการจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้ค่า  $L1 = 4.7$  และ  $L2 = 8.2$  มิลลิเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงกำลังแสง  $P_1$  เมื่อสัมผัสกับสารชนิดต่าง ๆ

สาร	ดัชนีหักเหแสง	เปอร์เซ็นต์การลดลงของกำลังแสง $P_1$
อากาศ	1.0	0 (อ้างอิง)
น้ำ	1.33	23
อีตากอสอล	1.36	14
กลีเซอริน	1.47	87

### 6.2.3 การศึกษาผลการตอบสนองต่อแรงจากภายนอก

ในหัวข้อ 5.3.3 เป็นการศึกษาผลที่เกิดขึ้นเมื่อท่อนำแสงหลอมรวมของคัปเปิลอร์ได้รับแรงที่ทำให้เกิดการโค้งงอ โดยการสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมด้วยหัวก๊าซความร้อนขนาด 2.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีซอฟต์แวร์ประมาณ 1.2 มิลลิเมตร ระยะการโค้งงอหลอมรวมที่  $l = 4.0$  มิลลิเมตร หลังจากสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงจัดอุปกรณ์การทดลองตามรูปที่ 5.12 และใช้มอเตอร์  $M_1$  ดันท่อนำแสงหลอมรวมของคัปเปิลอร์เข้าหากันทีละสเต็ป ซึ่งผลการตรวจวัดกำลังแสงที่ปลายเอาต์พุต  $P_1$  และ  $P_2$  ในแต่ละสเต็ปที่ปรากฏบนหน้าจอคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า การโค้งงอของท่อนำแสงหลอมรวมจะทำให้การคัปปลิงแสงเปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 6.8 ซึ่งยังไม่สามารถสรุปได้ในที่นี้ว่าเป็นฟังก์ชันไซน์คอสเมื่อเทียบกับรัศมีการโค้งงอ ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองยังไม่สามารถควบคุมขนาดรัศมีการโค้งงอได้โดยตรง ประกอบกับในการศึกษาในหัวข้อนี้ไม่สามารถทำการจำลองเชิงตัวเลขได้ เนื่องจากสมการการคัปปลิงแสงในกรณีการโค้งงอซับซ้อนมาก อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพอสรุปได้ว่า แรงที่ทำให้เกิดการโค้งงอมีผลต่อการคัปปลิงแสงของคัปเปิลอร์แสง ผลการทดลองดังกล่าวมานี้บ่งชี้ว่ามีประโยชน์มากต่อการสร้างคัปเปิลอร์ที่ใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากการในการจะต้องใช้ความเที่ยงตรงทนทานต่อแรงจากภายนอก และลดผลจากการโค้งงอให้มากที่สุด



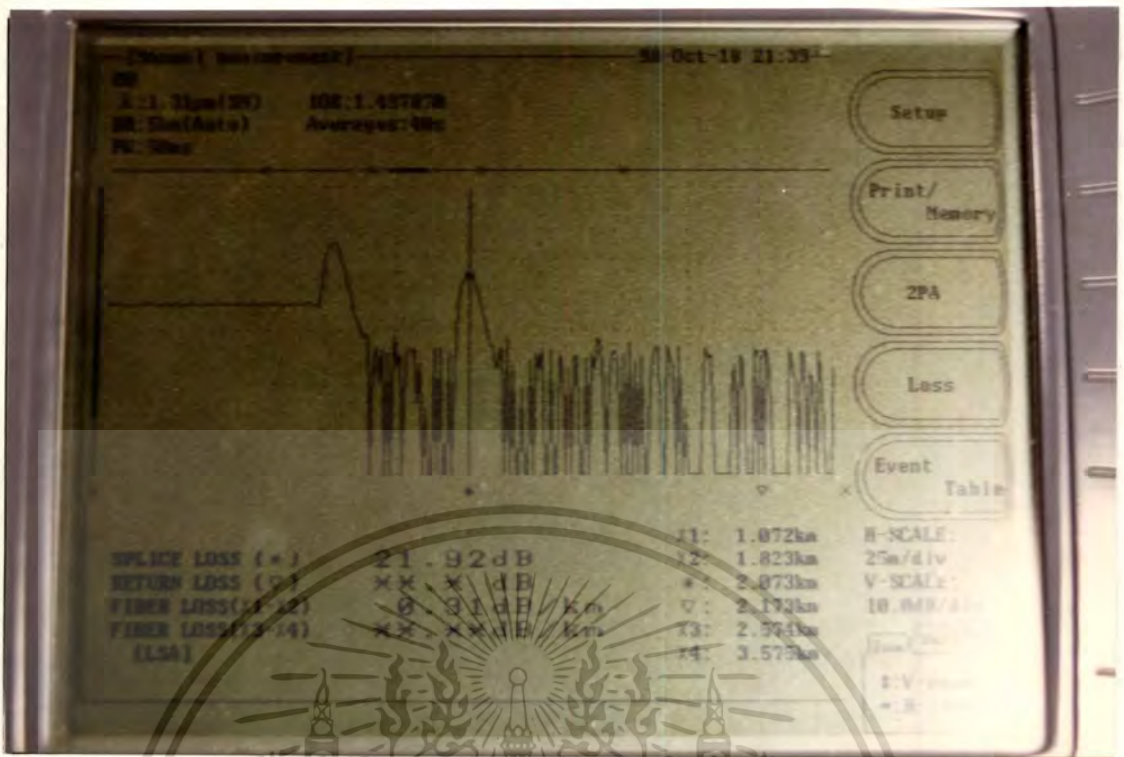
รูปที่ 6.8 แสดงผลการทดลองการตรวจวัดสัดส่วนกำลังแสงเอาต์พุต เทียบกับการโค้งงอท่อ นำแสงเป็นระยะต่างๆ

### 6.3 ผลการศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบหลอมรวมท่อ นำแสง

คุณสมบัติต่าง ๆ ของท่อ นำแสงหลอมรวม นอกจากจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการสร้าง คัปเปิลอร์แสงที่ใช้ในการสื่อสารแล้วยังมีประโยชน์อย่างมากต่อการตรวจวัด และเครื่อง ข่ายการตรวจวัด ตลอดจนการตรวจวัดระยะไกล ดังนั้นในการศึกษาในหัวข้อ 5.4 ซึ่งได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษา แนวโน้มความเป็นไปได้ในการสร้างอุปกรณ์การตรวจวัดจากอุปกรณ์แบบหลอมรวม โดยเน้นการประยุกต์ใช้กับเทคนิค โอทีดีอาร์ จากการศึกษาดังกล่าวพบว่า ได้ผลดังนี้

#### 6.3.1 อุปกรณ์ตรวจวัดโดยคัปเปิลอร์แบบหลอมรวม

จากการทดลองในหัวข้อ 5.4.1 เมื่อสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมและนำมาทำเป็น อุปกรณ์ตรวจวัดโดยอาศัยการสะท้อนกลับแบบเฟรสนเอล และใช้เทคนิคการตรวจวัดด้วยเทคนิค โอทีดีอาร์ พบว่ากำลังแสงสะท้อนกลับจากปลายทั้งสองของคัปเปิลอร์แสงเหมาะสมที่จะนำมาทำ อุปกรณ์ตรวจวัดได้ดังรูปที่ 6.9 กล่าวคือ มีกำลังสะท้อนกลับในสัดส่วนที่เหมาะสม และสามารถ ใช้ปลายด้านใดด้านหนึ่งเป็นปลายอ้างอิง ส่วนปลายด้านที่เหลือสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้



รูปที่ 6.9 แสดงผลการตรวจวัดการสะท้อนกลับของแสง จากปลายด้านเอาต์พุตทั้งสองของคัปเปิลเลอร์แสง ตามหลักการสะท้อนของเฟรสนเนล เมื่อแกนตั้งคือระดับความเข้มแสง (dB) ส่วนแกนนอนคือระยะทาง (km)

จากรูป 6.9 เป็นผลการตรวจวัดคัปเปิลเลอร์แสงด้วยโอทีดีอาร์ โดยใช้ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.31 ไมโครเมตร ความกว้างของพัลส์แสง  $50 \times 10^{-3}$  วินาที และใช้คัปเปิลเลอร์แบบ 50 : 50 ความยาวของทางด้านเอาต์พุต 1 เมตร และ 48 เมตร ตามลำดับ ซึ่งคัปเปิลเลอร์ดังกล่าวถูกเชื่อมต่อเข้ากับของใยแก้วนำแสงยาว 2.025 กิโลเมตร และโอทีดีอาร์ เมื่อพิจารณาจากภาพจะพบว่ามีจุดการสะท้อนของแสงแบบเฟรสนเนล เกิดขึ้น 2 จุดด้วยกัน จุดแรกปรากฏอยู่ใกล้กับคัปเปิลเลอร์แสง ส่วนจุดที่สองอยู่ห่างออกไปประมาณ 48 เมตร ซึ่งเป็นการสะท้อนแบบเฟรสนเนลเนื่องจากปลายของเอาต์พุตที่ยาว 1 เมตร และ 48 เมตร ตามลำดับ ซึ่งสามารถเลือกใช้ปลายด้านใดด้านหนึ่งเป็นจุดอ้างอิงได้ และในการทดลองนี้ได้ใช้ปลายด้าน 1 เมตร เป็นจุดอ้างอิงส่วนปลายอีกทั้งที่เหลือใช้เป็นหัววัด

จากการทดลองตรวจวัดโดยการจุ่มปลายของหัววัดลงในสารชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำ อัลกอฮอล์ และกลีเซอริน เป็นต้น พบว่าการสะท้อนแบบเฟรสนเนลของปลายที่เป็นหัววัดแตกต่างกัน ดังตารางที่ 6.4 และ รูปที่ 6.10 ถึงรูปที่ 6.13 พบว่าความสัมพันธ์ของการสะท้อนแบบเฟรสนเนลของหัววัดดังกล่าวสัมพันธ์กับดัชนีหักเหของสารละลาย ซึ่งสรุปได้ว่าคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมที่สร้างขึ้นนี้มีแนวโน้มที่จะสามารถนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

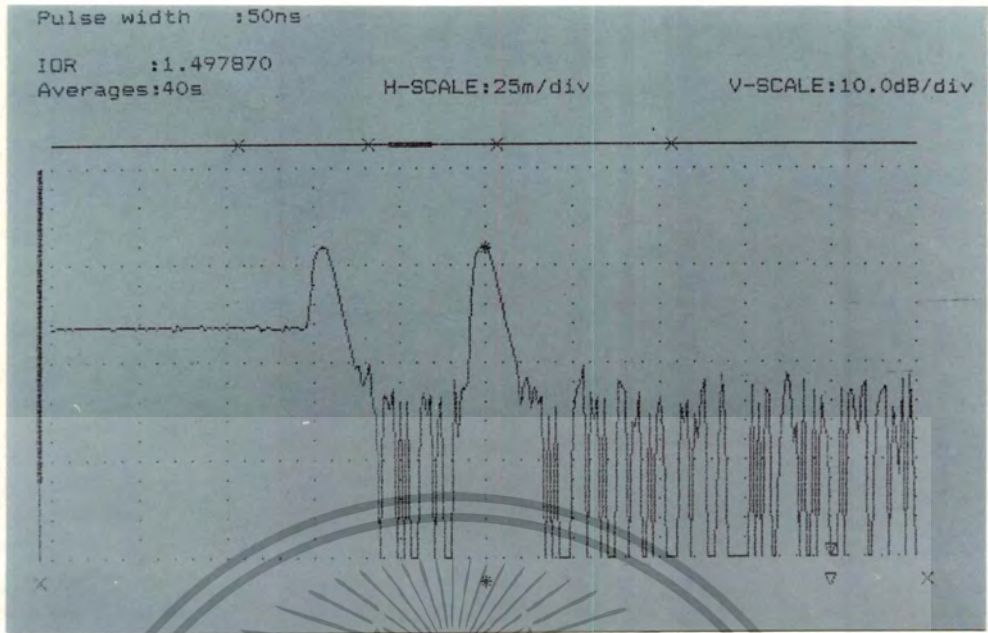
ตารางที่ 6.4 แสดงผลการตรวจวัดการสะท้อนกลับของแสงแบบเฟรสนเนล เมื่อจุ่มปลายของหัววัดแบบใยแก้วนำแสงลงในสารชนิดต่าง ๆ

สาร	ดัชนีหักเหแสง	ผลต่างของกำลังแสงสะท้อนกลับแบบเฟรสนเนล (dB)
อากาศ	1.0	+1.0 ± 0.01 (อ้างอิง)
น้ำ	1.33	0.0 ± 0.01
อัลกอฮอล์	1.36	-0.75 ± 0.01
กลีเซอริน	1.47	-5.0 ± 0.01



รูปที่ 6.10 แสดงผลการตรวจวัดการสะท้อนกลับแบบเฟรสนเนล เมื่อวางหัววัดไว้ในอากาศ เมื่อแกนตั้งคือระดับความเข้มแสง (dB) แกนนอนคือระยะทาง (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

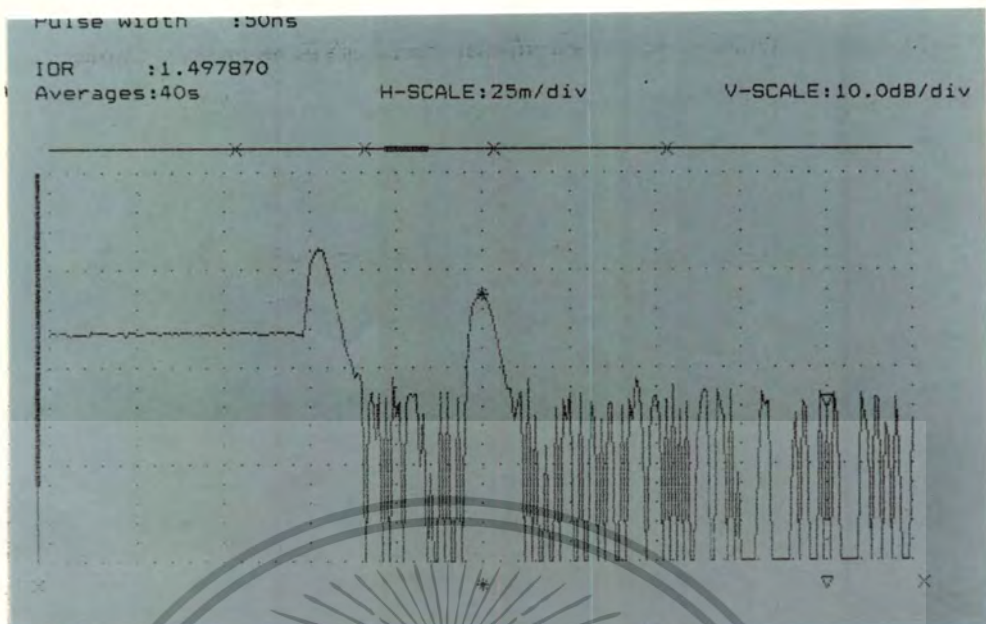


รูปที่ 6.11 แสดงผลการตรวจวัดการสะท้อนกลับแบบเฟรสนเนล เมื่อจุ่มหัววัดลงในอัลกอซอลล์ เมื่อแกนตั้งคือระดับความเข้มแสง (dB) แกนนอนคือระยะทาง (m)



รูปที่ 6.12 แสดงผลการตรวจวัดการสะท้อนกลับแบบเฟรสนเนล เมื่อจุ่มปลายหัววัดลงในน้ำบริสุทธิ์ เมื่อแกนตั้งคือระดับความเข้มแสง (dB) แกนนอนคือระยะทาง (m)

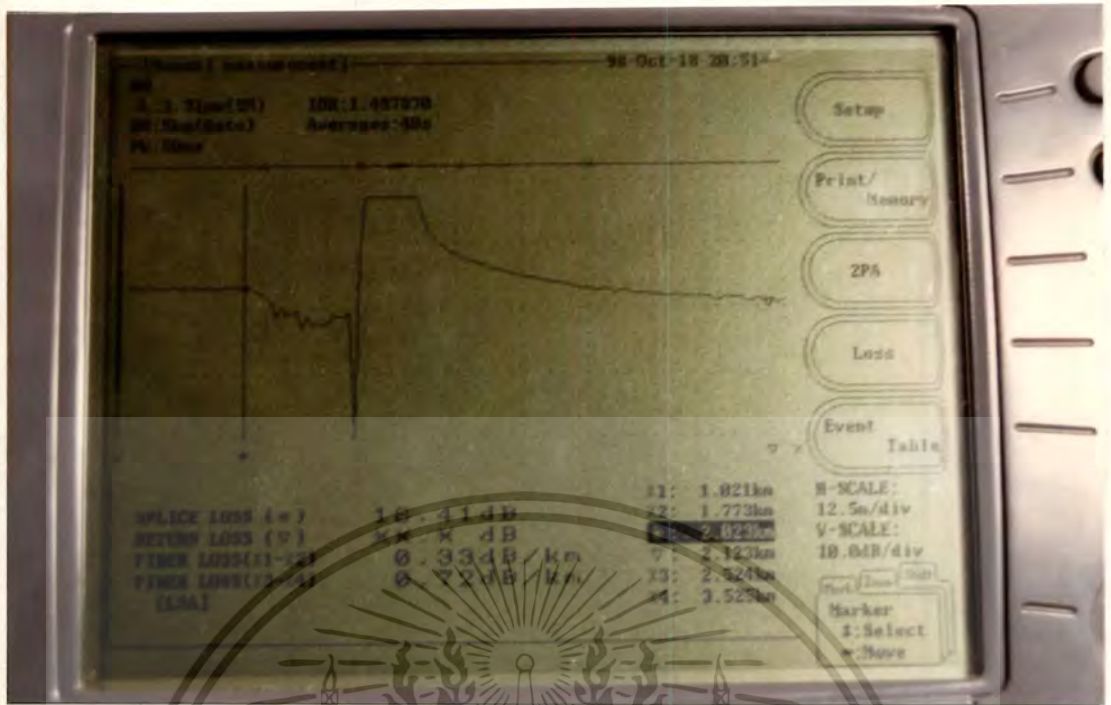
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.13 แสดงผลการตรวจวัดการสะท้อนกลับแบบเฟรสนเนล เมื่อจุ่มปลายหัววัดลงในกลีเซอรินเข้มข้น เมื่อแกนตั้งคือระดับความเข้มแสง (dB) แกนนอนคือระยะทาง (m)

### 6.3.2 อุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์

จากการทดลองสร้างอุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์ตามหัวข้อ 5.4.2 และนำมาเชื่อมต่อเข้ากับขดของใยแก้วนำแสงยาว 2.025 กิโลเมตร ซึ่งปลายด้านอินพุตของใยแก้วนำแสงดังกล่าวต่อเข้ากับโอทีดีอาร์ ดังรูปที่ 5.14 จากนั้นทำการตรวจวัดอุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์ด้วยโอทีดีอาร์ โดยใช้ความยาวคลื่น 1.3 ไมโครเมตร ความกว้างของพัลส์แสง 50 นาโนวินาที ส่วนอุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์สร้างขึ้นนี้ใช้ใยแก้วนำแสงแบบโหมคเดียวเพียงเส้นเดียว ยาวประมาณ 46 เมตร จึงมีความยาวของลูปประมาณ 45 เมตร ผลการตรวจวัดแสดงได้ดังรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 แสดงผลการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากลูปมิลเลอร์ด้วยเทคนิคโอทีดีอาร์ เมื่อแกนตั้งคือระดับความเข้มแสง (dB) แกนนอนคือระยะทาง (m)

จากรูปที่ 6.14 จะพบว่ามีพัลส์ของแสงปรากฏอยู่ที่ระยะห่างจากจุดเชื่อมต่อกับขดใยแก้วนำแสงไปประมาณ 22.5 เมตร สอดคล้องกับที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ในหัวข้อ 5.4.2 และรูป 5.15 กล่าวคือ เวลาที่พัลส์แสงใช้ในการเดินทางผ่านลูป จะถูกโอทีดีอาร์คำนวณเป็นระยะทางเท่ากับครึ่งหนึ่งของลูป ทั้งนี้เนื่องจากตามหลักการของโอทีดีอาร์จะคำนวณระยะทางโดยสมการ (4.12) ในบทที่ 4 ส่วนกำลังแสงที่กระเจิงกลับแบบเรย์ลีภายในลูป จะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านท่อนำแสงหลอมรวมได้ ทั้งนี้เนื่องจากจะมีเพียงโหมดพื้นฐานเท่านั้นที่เคลื่อนที่ผ่านท่อนำแสงหลอมรวมได้ โหมดอื่น ๆ จึงถูกกรองออกไป และไม่สามารถผ่านเข้าภาครับของโอทีดีอาร์ได้

ผลการทดลองตรวจวัดลูปมิลเลอร์ได้แสดงให้เห็นว่า มีกำลังแสงย้อนกลับเข้าสู่ปลายด้านอินพุตได้ เนื่องจากการคับปลิงแสงสอดคล้องกับทฤษฎีและสมการ (4.8) ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยเทคนิคทางโอทีดีอาร์ อย่างไรก็ตามกำลังแสงย้อนกลับที่ได้ยังมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับการนำไปใช้ในการตรวจวัด ดังนั้นอาจต้องสร้างอุปกรณ์แบบลูปที่มีกำลังแสงย้อนกลับในปริมาณที่น้อยลง ซึ่งอาจทำได้โดยสร้างอุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์ที่มีขนาดของท่อนำแสงหลอมรวมเล็กลงและมีขนาดยาวมากขึ้น หรือระยะการคั้งขณะหลอมรวมยาวมากขึ้น เพื่อให้เกิดการคับปลิงแสงแบบ 50 : 50 ที่ลำดับอื่น ๆ ซึ่งมีการสูญเสียกำลังแสงเพิ่มมากขึ้น และมีกำลังแสงย้อนกลับน้อยลง ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.3 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบรูปมิลเลอร์

การศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบรูปมิลเลอร์ได้แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ การทดลองในหัวข้อ 5.4.3.1 ซึ่งเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงย้อนกลับจากลูบกับการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอกที่นำแสงหลอมรวมของรูปมิลเลอร์ และการทดลองในหัวข้อ 5.1.3.2 เป็นการทดลองหาผลการเปลี่ยนแปลงกำลังแสงย้อนกลับจากลูบ เมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำต่อโครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวม ดังนั้นในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอผลการศึกษาดังกล่าว เพื่อแสดงให้เห็นว่าหลักการดังกล่าวนี้สามารถประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงย้อนกลับกับการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงภายนอก ผลการจำลองเชิงตัวเลขในหัวข้อ 5.4.3.1 พบว่ากำลังแสงย้อนกลับจากลูบจะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก ( $n_{ext}$ ) ดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 แสดงผลการศึกษากำลังแสงย้อนกลับจากลูบเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมจากภายนอก โดยการจำลองเชิงตัวเลข

จากรูปที่ 6.15 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมรอบท่อนำแสงหลอมรวมของอุปกรณ์แบบรูปมิลเลอร์จะส่งผลให้กำลังแสงย้อนกลับจากลูบเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กัน นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวด้วย กล่าวคือขนาดความยาวของท่อนำแสงหลอมรวมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอกต่างกันไปด้วย ดังกราฟเส้นสีเขียวและสีม่วงในรูปที่ 6.15 ซึ่งในเส้นสีเขียวแทนผลการจำลองการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอกของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบรูปมิลเลอร์ที่สร้างขึ้นโดยใช้ซอฟต์แวร์ 1.2 และระยะการโค้งงอรวม 3.5 มิลลิเมตร ส่วนกราฟเส้นสีม่วงใช้ซอฟต์แวร์ 1.2 เช่นกันแต่ระยะการโค้งงอรวม 2.5 มิลลิเมตร

จากที่ได้กล่าวถึงข้างต้นแสดงให้เห็นแนวโน้มความเป็นไปได้ในการนำอุปกรณ์แบบรูปมิลเลอร์มาทำการตรวจวัด โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงกำลังแสงย้อนกลับจากอุปกรณ์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสง แต่เนื่องจากขนาดโครงสร้างของท่อนำแสงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมกับการตรวจวัด ตัวอย่างเช่นต้องการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงที่  $n_x = 1.3$  ซึ่งอาจประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับการรั่วไหลของสารละลายได้

จากการทดลองสร้างท่อนำแสงหลอมรวมที่มีความยาวของท่อนำแสงหลอมรวม 6 มิลลิเมตร และให้ท่อนำแสงหลอมรวมของอุปกรณ์แบบรูปมิลเลอร์สัมผัสกับสารละลายชนิดต่าง ๆ และทำการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากอุปกรณ์ด้วยโอทีดีอาร์ พบว่ามีกำลังแสงย้อนกลับจากอุปกรณ์ต่างกันไป สัมพันธ์กับดัชนีหักเหแสงของสารที่นำมาสัมผัสกับท่อนำแสงหลอมรวม ดังตารางที่ 6.5 และรูปที่ 6.16 ถึง รูปที่ 6.20 ซึ่งพบว่ากำลังแสงย้อนกลับจากอุปกรณ์ จะลดลงเมื่อดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอกท่อนำแสงหลอมรวมเพิ่มขึ้น

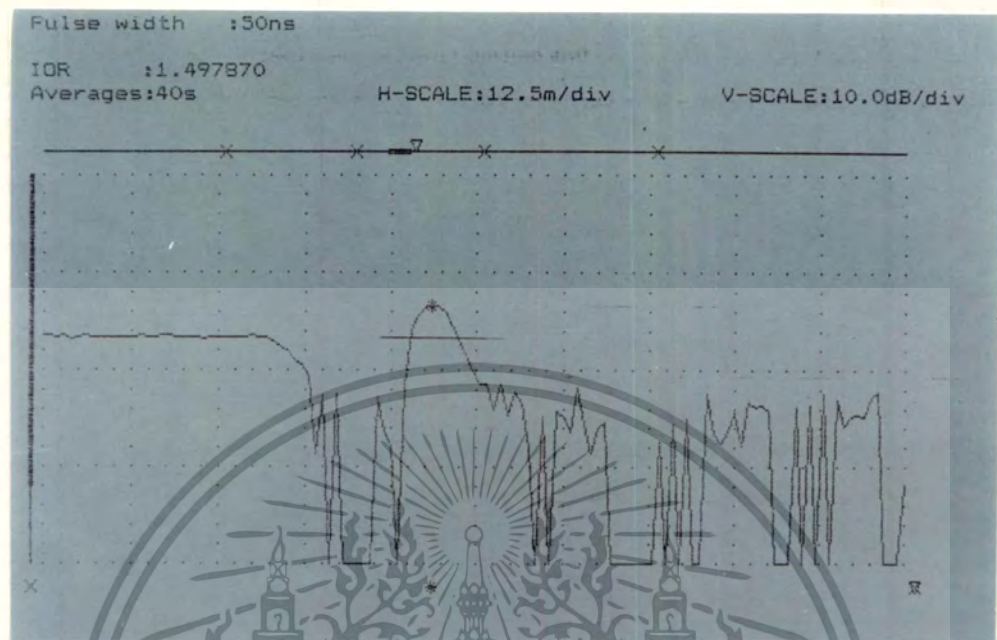
จากตารางแสดงผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์หลอมรวมแบบรูปมิลเลอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับโอทีดีอาร์ เพื่อทำการตรวจสอบสารละลายที่มีดัชนีหักเหแสงต่างกันได้ โดยการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากอุปกรณ์ ซึ่งแปรผันตามกันกับดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอกดังตารางที่ 6.5

**ตารางที่ 6.5** แสดงผลการทดลองใช้อุปกรณ์แบบรูปมิลเลอร์ที่  $L$  เท่ากับ 6 มิลลิเมตร ไปทำการตรวจจับสนสารเคมีชนิดต่าง ๆ

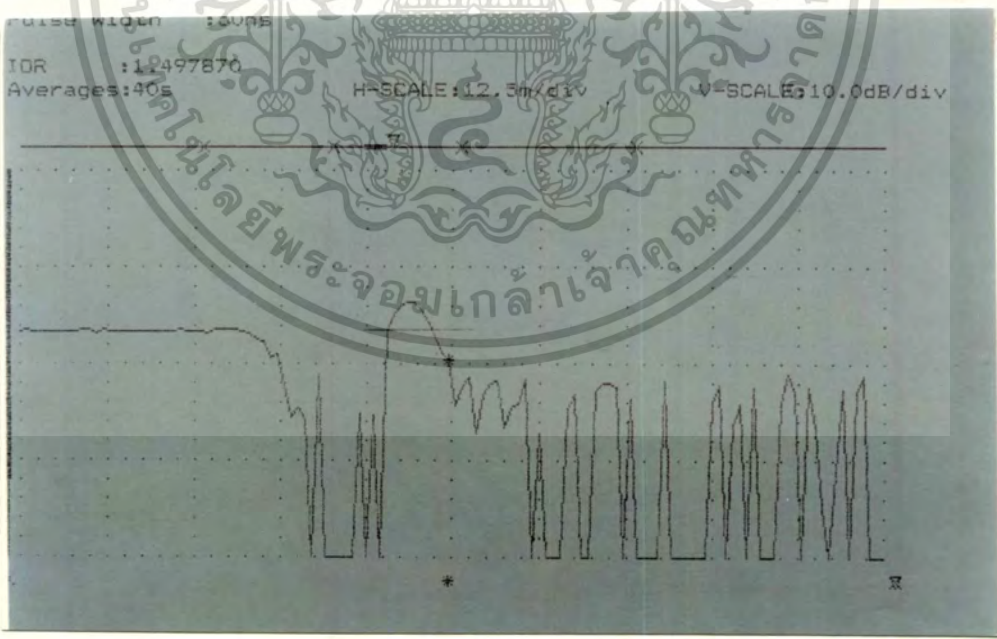
สารละลาย	ดัชนีหักเหแสง	กำลังแสงย้อนกลับ	% การลดลง
อากาศ	1.0	$3.4 \pm 0.1$ dB	0 (อ้างอิง)
น้ำ	1.33	$2.1 \pm 0.1$ dB	38.2
อัลกอฮอล์	1.36	$2.4 \pm 0.1$ dB	29.4
กลีเซอริน	1.47	$1.0 \pm 0.1$ dB	70.6

ส่วนการทดลองตรวจสอบกำลังแสงย้อนกลับอันเนื่องจากแรงภายนอกคือแสงที่ทำให้เกิดการโค้งงอพบว่า การโค้งงอจะทำให้กำลังแสงย้อนกลับเปลี่ยนแปลงไป แต่ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงย้อนกลับและรัศมีการโค้งงอได้ในการทดลองนี้ ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดในการทดลองหลายประการ อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้อาจมีประโยชน์ในการใช้สำหรับการ

ออกแบบอุปกรณ์แบบหลอมรวม ซึ่งต้องคำนึงถึงแรงจากภายนอก และหาวิธีลดการสูญเสียกำลังแสงเนื่องจากแรงจากภายนอก

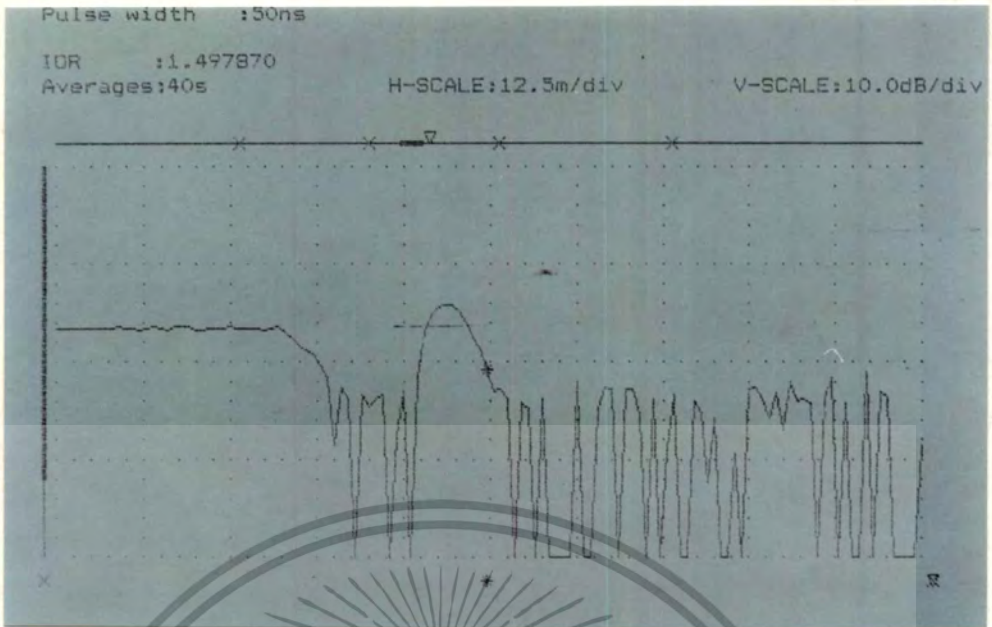


รูปที่ 6.16 แสดงผลการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากอุปกรณ์เมื่อท่อนำแสงหลอมรวมสัมผัสกับอากาศ โดยที่แกนตั้งคือระดับความเข้มแสง (dB) แกนนอนคือระยะทาง (m)



รูปที่ 6.17 แสดงผลการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากอุปกรณ์เมื่อท่อนำแสงหลอมรวมสัมผัสกับอัลกอซอล์ โดยที่แกนตั้งคือระดับความเข้มแสง (dB) แกนนอนคือระยะทาง (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

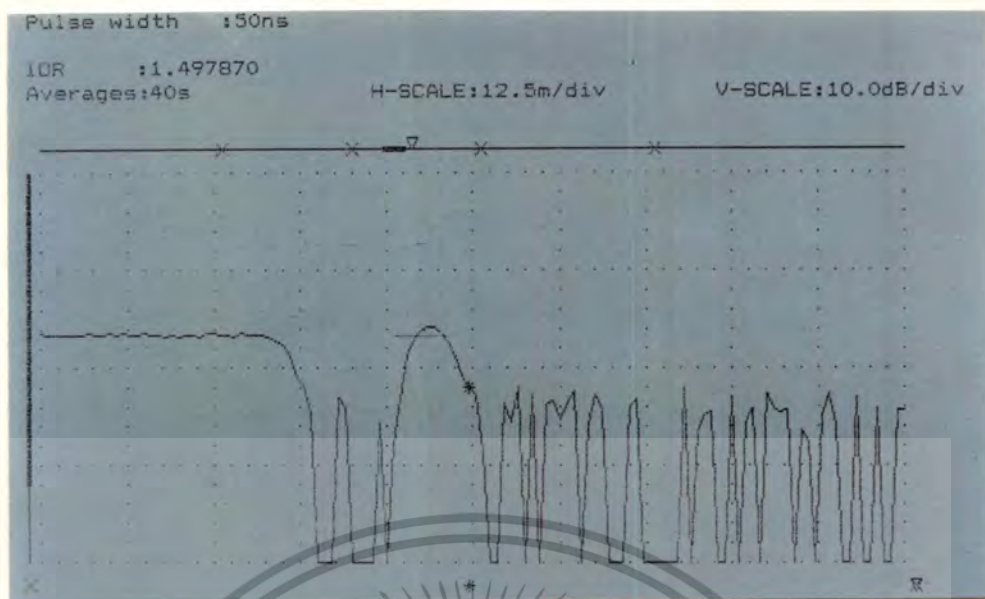


รูปที่ 6.18 แสดงผลการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากเลนส์เมื่อท่อนำแสงสัมผัสกับน้ำบริสุทธิ์ โดยที่แกนตั้งคือระดับความเข้มแสง (dB) แกนนอนคือระยะทาง (m)



รูปที่ 6.19 แสดงผลการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากเลนส์เมื่อท่อนำแสงหลอมรวมสัมผัสกับกลีเซอริน 50% โดยที่แกนตั้งคือระดับความเข้มแสง (dB) แกนนอนคือระยะทาง (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.20 แสดงผลการตรวจวัดกำลังแสงย้อนกลับจากลูบ เมื่อท่อนำแสงหลอมรวมสัมผัสกับ กลิเซอรินเข้มข้น (99%) โดยที่แกนตั้งคือระดับความเข้มแสง (dB) แกนนอนคือระยะทาง (m)

#### 6.4 สรุป

จากผลการทดลองในการศึกษาวิจัยนี้สรุปได้ว่า สัดส่วนการคับปลิงกำลังแสงภายในท่อนำแสงหลอมรวมของคัปเปิลอร์แสงจะเป็นฟังก์ชันไซน์โคสด กล่าวคือ กำลังแสงเอาต์พุตของท่อนำแสงที่หนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงแบบฟังก์ชัน โคไซน์ ในขณะที่กำลังแสงเอาต์พุตของท่อนำแสงหลอมรวมที่สองเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันไซน์ โดยการเปลี่ยนแปลงทั้งสองจะสัมพันธ์กันเสมอ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การคับปลิงแสงและระยะความยาวของการหลอมรวมท่อนำแสง เมื่อทำการสร้างท่อนำแสงโดยการดึงปลายทั้งสองของท่อนำแสงคู่ขนานออกเป็นระยะต่าง ๆ ในขณะที่หลอมด้วยความร้อน จะพบว่ากำลังแสงที่วัดได้ตรงปลายด้านเอาต์พุตทั้งสองเป็นฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ของระยะการดึงขณะหลอมรวม การเปลี่ยนกำลังแสงเอาต์พุตทั้งสองจะมีทิศทางตรงข้ามกันเสมอ และมีจุดตัดกันที่สัดส่วนกำลังแสงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่จุดนี้กำลังแสงจะแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน ภายในท่อนำแสงทั้งสอง ซึ่งมักเรียกจุดนี้ว่าระยะบิต

ระยะบิตที่ได้จากการอ่านกราฟผลการทดลองและกราฟจากการจำลองผลเชิงตัวเลขให้ผลที่แตกต่างกันประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงว่าเทคนิคการสร้างท่อนำแสงหลอมรวมดังกล่าวนี้สามารถนำมาสร้างคัปเปิลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสงที่ใช้ในการศึกษาได้ แต่ยังไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในการสื่อสาร

เมื่อศึกษาคุณสมบัติของท่อนำแสงหลอมรวมของคัปเปิลอร์แสงพบว่าการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอกสามารถกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการคับปลิงแสงเกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลการศึกษานี้มีประโยชน์ในแง่ของการออกแบบสร้างคัปเปลอร์แสงและอุปกรณ์แบบหลอมรวมอื่น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทดลองประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้งานร่วมกับไอทีดีอาร์ โดยสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบสะท้อนกลับจากปลายของคัปเปลอร์ และอุปกรณ์ตรวจวัดแบบลูปมิลเลอร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนกำลังแสงที่สะท้อนกลับแบบเฟรสเนลเปลี่ยนแปลงไป เมื่อปลายเอาต์พุตเส้นโคเส้นหนึ่งของคัปเปลอร์สัมผัสกับสารเคมีชนิดต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหแสงของสารเคมี ส่วนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบลูปแสดงให้เห็นว่ากำลังแสงย้อนกลับจากลูปเปลี่ยนแปลงลดลง เมื่อดัชนีหักเหแสงเพิ่มขึ้น ผลการทดลองดังกล่าวแสดงถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์อุปกรณ์แบบหลอมรวมที่นำแสงไปเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

# บทสรุปและแนวทางในการพัฒนาต่อไป

### 7.1 บทสรุป

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารใยแก้วนำแสงได้มีพัฒนาการอย่างรวดเร็วทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ใยแก้วนำแสงพัฒนาตามไปด้วย การพัฒนาคัปเปลอร์แสงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้การใช้ใยแก้วนำแสงสมบูรณ์แบบมากขึ้น โดยได้มีการพัฒนาเทคนิคการสร้างและรูปแบบ เพื่อให้กระทัดรัดเที่ยงตรง และมีประสิทธิภาพสูงขึ้นตลอดจนมีราคาที่ถูกกลงเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานอย่างกว้างขวาง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเทคนิคการสร้างคัปเปลอร์แสง และอุปกรณ์ใยแก้วอื่น ๆ ด้วยเทคนิคการหลอมรวมท่อนำแสง โดยใช้หลักการคัปปลิงระหว่างท่อนำแสงมาสร้างแบบจำลองของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการแบ่งแยกกำลังแสงกับระยะการโค้งขณะหลอมรวม ซึ่งทำให้ทราบว่าเทคนิคในการโค้งขณะหลอมรวมนั้นจะต้องให้ความสำคัญกับระยะการโค้งขณะหลอมรวม ทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนการแบ่งแยกหรือรวมแสงเป็นฟังก์ชันไซน์ของผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์การคัปปลิงแสงและระยะทาง จากผลการทดลองสร้างโดยการหลอมใยแก้วนำแสงด้วยความร้อน อุณหภูมิ 700-1000 องศาเซลเซียส และดึงใยแก้วนำแสงให้ยืดออกเป็นระยะทางต่าง ๆ จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการจำลองเชิงตัวเลขพบว่าสอดคล้องกัน ในการศึกษาคุณสมบัติการคัปปลิงแสงได้แสดงให้เห็นว่าตัวแปรภายในที่สำคัญของการคัปปลิง คือโครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวม ส่วนตัวแปรภายนอกที่สามารถส่งผลกระทบต่อ การคัปปลิงแสงได้ คือ ดัชนีหักเหแสงของสิ่งแวดล้อมภายนอก และแรงจากภายนอก ผลการทดลองนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบอุปกรณ์การสื่อสาร และอุปกรณ์การตรวจวัดได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์การตรวจวัดที่ใช้งานร่วมกับไอทีดีอาร์ได้ด้วยเช่นกัน

ระบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาเทคนิคการสร้างคัปเปลอร์ และอุปกรณ์แบบหลอมรวมอื่น ๆ ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) คอมพิวเตอร์ควบคุม และโปรแกรมการจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ใช้คอมพิวเตอร์เป็นระบบควบคุมสเต็ปมอเตอร์ที่ใช้ในการโค้งขณะหลอมรวม และควบคุมการบันทึกข้อมูลจากภาครับแสง รวมไปถึงการจำลองเชิงตัวเลข ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องในการทดลอง ซึ่งจากการทดลองพบว่าได้ผลอยู่ในเกณฑ์ดี

2) อุปกรณ์หลอมและดึงท่อนำแสง ประกอบไปด้วยมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนแทนรองรับท่อนำแสงบนคานโลหะคู่ ซึ่งตรงจุดกึ่งกลางระหว่างแท่นรองรับท่อนำแสงทั้งสองจะมีหัวก๊าซความร้อนสูง ขนาด 2 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ให้ความร้อนขณะหลอมและดึงท่อนำแสง

3) อุปกรณ์ทางแสง ประกอบด้วยเลนเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ถูกป้อนผ่านเข้าสู่ปลายอินพุตของคัปเปิลเลอร์แสง ส่วนตรงปลายด้านเอาต์พุตทั้งสองของคัปเปิลเลอร์มีภาครับแสงที่มีตัวรับแสงคือโฟโตไดโอดรุ่น BPW 21 ประกอบอยู่ในวงจร ซึ่งสัญญาณที่วัดได้จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ โดยการ์ดอินเตอร์เฟซ PC-DIO เพื่อนำผลไปประมวลผลเป็นกราฟออกทางจอภาพ

4) โอทีดีอาร์ เป็นเครื่องมือที่นำมาตรวจสอบคัปเปิลเลอร์แสง และอุปกรณ์แบบรูป ตลอดจนตรวจสอบอุปกรณ์ต้นแบบการตรวจวัด โดยโอทีดีอาร์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ โอทีดีอาร์ รุ่น MW 9070 A (ANRITSU) ที่ความยาวคลื่น 1.3 ไมโครเมตร

ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างและศึกษาคัปเปิลเลอร์ และอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงอื่น ๆ เพื่อประยุกต์ไปใช้เป็นอุปกรณ์ต้นแบบการตรวจวัดได้สำเร็จคือ

1) การเลือกใช้การจำลองเชิงตัวเลข เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากสมการคัปปลิงแสงมีความซับซ้อน และไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการคัปปลิงแสงกับระยะการดึงขณะหลอมรวมได้อย่างชัดเจน เมื่อมีการจำลองกราฟเชิงตัวเลขจะช่วยให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นแบบซิโนไซคอด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง และยังสามารถนำผลที่ได้จากการจำลองกราฟไปกำหนดขนาดโครงสร้างของคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของคัปเปิลเลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสงอีกด้วย

2) การเลือกใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการหลอมรวม และการบันทึกผลทำให้ลดความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนต่าง ๆ ลงได้มาก ทั้งยังสามารถบันทึกผลและประมวลผลเป็นกราฟได้อย่างรวดเร็ว สามารถนำผลไปศึกษาเปรียบเทียบได้โดยตรง

3) การออกแบบระบบคานที่เป็นตัวเคลื่อนแทนรองรับท่อนำแสงได้ดีคือ ทำให้การเคลื่อนที่ของแท่นรองรับท่อนำแสงมีความราบเรียบและเป็นเสถียรต่อเนื่อง จึงส่งผลดีต่อผลการทดลอง

4) การเลือกหัวก๊าซให้ความร้อนที่มีขนาดเล็กคือประมาณ 2 มิลลิเมตร ทำให้ระยะซอฟต์แวร์โซนสั้น จึงส่งผลให้ระยะการหลอมรวมยาวประมาณ 5-10 มิลลิเมตร ซึ่งเหมาะสมกับการทดลองดังกล่าวมาก

5) การเลือกใช้อุปกรณ์รับแสงเป็น BPW 21 ซึ่งมีพื้นที่รับแสงกว้างและตอบสนองต่อแสงสีแดงได้ดี ทำให้ลดปัญหาเรื่องการสูญเสียความเข้มแสงขณะทำการป้อนสัญญาณแสงเข้าสู่ภาครับแสง และสามารถป้องกันการรบกวนของสัญญาณแสงจากภายนอกได้เป็นอย่างดี

6) การเลือกใช้เทคนิคโอทีดีอาร์กับการตรวจสอบอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสง ซึ่งสามารถทำได้สะดวก ประหยัดเวลา และศึกษาผลได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์แบบ ทั้งยังสามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์ตรวจวัดต้นแบบได้เป็นอย่างดี

จากการพิจารณาผลการทดลองทั้งหมด สรุปได้ว่าสัดส่วนการคับปลิงแสงของอุปกรณ์คับเปลอร์แบบหลอมรวมขึ้นอยู่กับระยะการคิงขณะทำการหลอมรวมท่อนำแสง เมื่อซอฟต์แวร์ที่ใช้นั้นในการสร้างคับเปลอร์แบบหลอมรวมจะต้องคำนึงถึงการออกแบบ โครงสร้างของคับเปลอร์ให้สัมพันธ์กับความยาวคลื่นที่นำไปใช้งานโดยเลือกซอฟต์แวร์ และคำนวณหาระยะการคิงขณะหลอมรวมให้ถูกต้อง ส่วนการศึกษาคุณสมบัติของคับเปลอร์แสงสรุปได้ว่าโครงสร้างตามความยาวของคับเปลอร์แสงมีผลต่อการส่งผ่านกำลังแสงระหว่างท่อนำแสงคู่ที่ประกอบขึ้นเป็นคับเปลอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าตัวแปรจากภายนอกคือสิ่งแวดล้อมรอบท่อนำแสงหลอมรวม และแรงจากภายนอกสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการคับปลิงแสงของคับเปลอร์แบบหลอมรวมได้ ส่วนการตรวจสอบคับเปลอร์แสงและอุปกรณ์แบบลูปมิลเลอร์ด้วยโอทีดีอาร์แสดงให้เห็นว่าสามารถนำอุปกรณ์ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดร่วมกับโอทีดีอาร์ได้ ซึ่งจากการทดลองพบว่าได้ผลสอดคล้องกับทฤษฎี

## 7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบเครื่องมือสร้างอุปกรณ์การสื่อสารใยแก้วนำแสงและอุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งต้องนำอุปกรณ์ทางแสง และอุปกรณ์อื่น ๆ ประกอบขึ้นเป็นชุดทดลองการสร้างอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสง ซึ่งปัญหาที่พบในส่วนของอุปกรณ์นี้ คืออุปกรณ์ทางแสงมีราคาค่อนข้างสูง เนื่องจากเทคโนโลยีทางการสื่อสารใยแก้วนำแสงภายในประเทศยังมีขอบเขตจำกัด จึงทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ มีราคาแพง จึงทำให้การเลือกใช้อุปกรณ์ในการทดลองยังมีขอบเขตจำกัด ซึ่งต้องใช้ อุปกรณ์อื่น ๆ ที่สามารถใช้ทดแทนกันได้ เช่นการเลือกใช้ช่วงความยาวคลื่นแสงในการศึกษา การสร้างคับเปลอร์แสงแบบหลอมรวมได้เลือกใช้ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร แทนที่จะใช้ความยาวคลื่นที่ 1.3 ไมโครเมตร เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าการออกแบบสร้างระบบการคิงขณะหลอมรวม ยังไม่สามารถควบคุมประสิทธิภาพและความแม่นยำได้ เนื่องจากกลไกที่ใช้เกิดขึ้นจากการประกอบอุปกรณ์จากหลายแหล่งผลิตเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นขอบเขตจำกัดอันเนื่องมาจากไม่สามารถผลิตอุปกรณ์ทั้งหมดได้โดยเทคโนโลยีภายในประเทศ ดังนั้นระบบการคิงขณะหลอมรวมดังกล่าวนี้ จึงใช้ได้สำหรับกรณีของการศึกษาเท่านั้น ยังไม่สามารถนำไปใช้ในการสื่อสารและการตรวจวัดได้ทั้งหมด

ในส่วนของการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์แบบหลอมรวมและการจำลองเชิงตัวเลขนั้น ปัญหาที่พบส่วนมากคือสมการใช้คำนวณมีความซับซ้อนมาก ซึ่งจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วสูง ๆ แต่เนื่องจากขอบเขตจำกัดของอุปกรณ์การศึกษาในการศึกษาวิจัยนี้ได้เลือกไมโครคอมพิวเตอร์ขนาด 64 บิต ความเร็ว 266 MHz หน่วยความจำ 16 เมกะไบต์ ทำการประมวลผล ทำให้การประมวลผลแต่ละครั้งใช้เวลาหลายชั่วโมงต่อการประมวลผล 1 ครั้ง

นอกจากนี้ ยังพบว่าอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงที่สร้างขึ้นมีการสูญเสียความเข้มแสงมาก ทั้งนี้อาจสืบเนื่องมาจากในขั้นตอนการสร้างจำเป็นต้องบิดท่อนำแสงเข้าหากัน เพื่อให้เกิดแรงยึดท่อนำแสงทั้งคู่มิให้หลุดออกจากกันหลังการหลอมรวมสิ้นสุดลง จึงอาจกล่าวได้ว่าอุปกรณ์แบบหลอมรวมที่สร้างขึ้นนี้ยังใช้ได้ในกรณีการศึกษาเท่านั้น ยังไม่สามารถนำไปใช้งานในการสื่อสารและการตรวจวัดได้อย่างสมบูรณ์

### 7.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

ผลงานวิจัยเรื่องอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงและการประยุกต์ที่เสนอไปนี้มีข้อเสนอแนะแนวทาง เพื่อนำไปปรับปรุงและพัฒนาดังต่อไปนี้ คือ

ประการแรก ต้องปรับปรุงระบบการหลอมและดึงท่อนำแสงให้มีประสิทธิภาพและความถูกต้องสูงขึ้นกว่านี้ โดยเพิ่มอุปกรณ์การตรึงท่อนำแสงหลังสิ้นสุดการหลอมรวม และเพิ่มเทคนิคการเคลือบสารหรือทำให้อุปกรณ์แบบหลอมรวมที่สร้างขึ้นให้มีเสถียรภาพสูง ๆ ไม่โค้งงอได้ง่าย ในส่วนของการดึงขณะหลอมรวมควรใช้กลไกที่ละเอียดมากขึ้นกว่านี้ เพื่อให้การดึงแต่ละสเต็ปมีความเรียบและต่อเนื่องมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมโครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวมได้โดยการเขียน โปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่นรองรับท่อนำแสงให้เคลื่อนออกจากกันเป็นฟังก์ชันต่าง ๆ เมื่อเทียบกับระยะทาง ซึ่งจะสามารถควบคุมการสูญเสียกำลังแสงอันเนื่องมาจากโครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวมได้

ประการที่สอง ต้องออกแบบหัวก๊าซให้ความร้อนที่สามารถเลือกขนาดของซอฟต์แวร์ได้ ด้วย เพื่อให้สามารถเลือกขนาด โครงสร้างของท่อนำแสงหลอมรวมได้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานมากขึ้น ตัวอย่างเช่น การสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบลูบควรรใช้ซอฟต์แวร์ที่น้อย ๆ ส่วนการสร้างคัปเปิลเลอร์แสงเพื่อการสื่อสารการใช้ซอฟต์แวร์ที่มาก ๆ เพื่อให้การสูญเสียความเข้มแสงน้อยลง

ประการที่สาม ในการทดลองการใช้ความยาวคลื่นแสง และใยแก้วนำแสงที่เหมาะสม กล่าวคือควรเลือกใช้ความยาวคลื่นที่ 1.3 ไมโครเมตร มากกว่าการใช้ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัด โดยโอทีดีอาร์ได้ด้วย

ประการสุดท้าย ควรเลือกให้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ๆ ในการออกแบบอุปกรณ์แบบหลอมรวมและการจำลองผลเชิงตัวเลข เพื่อจำได้หาแนวทางการศึกษาที่หลากหลายและถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ตัวอย่างแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์แบบหลอมรวมท่อนำแสงไปประยุกต์ใช้ในการศึกษา การสื่อสาร และการตรวจวัดดังนี้

1) นำคัปเปลอร์แสงแบบหลอมรวมที่นำแสงไปใช้เป็นอุปกรณ์เครือข่ายการสื่อสารและการตรวจวัด ซึ่งอาจสร้างคัปเปลอร์แสงที่มีหลายช่องสัญญาณเพื่อใช้งานที่กว้างขวางมากขึ้น และเหมาะสมกับงานเครือข่ายมากขึ้น

2) นำคัปเปลอร์แบบหลอมรวมท่อนำแสงไปใช้เป็นอุปกรณ์กรองความยาวคลื่นแสง โดยใช้หลักการออกแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์กรองความยาวคลื่นแสง

3) นำคัปเปลอร์แสงแบบหลอมรวมไปใช้ในการมัลติเพลกซ์เชิงแสงและดีมัลติเพลกซ์เชิงแสง ซึ่งเหมาะกว่าคัปเปลอร์อื่น ๆ เนื่องจากคัปเปลอร์แบบหลอมรวมสามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นที่จะทำการมัลติเพลกซ์ หรือดีมัลติเพลกซ์ได้ดีกว่าคัปเปลอร์แบบอื่น ๆ

4) นำคัปเปลอร์แบบหลอมรวมไปเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ทางแสงได้ดี คือสามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นสัญญาณแสงได้ตามต้องการ

5) นำคัปเปลอร์แสงไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่นสร้างเป็นอุปกรณ์แบบจีโอโรสโคป สร้างเป็นอุปกรณ์แบบลูปอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ และสร้างเป็นลูปมิลเลอร์ ฯลฯ

6) นำคัปเปลอร์แสงและอุปกรณ์รูปแบบหลอมรวมท่อนำแสงไปประยุกต์ใช้กับการสร้างเลเซอร์จากใยแก้วนำแสง ซึ่งแนวทางการพัฒนาด้านนี้กำลังเป็นที่สนใจศึกษาของนักฟิสิกส์โดยทั่วไป

เทคโนโลยีการสื่อสารใยแก้วนำแสงและอุปกรณ์การสื่อสารใยแก้วนำแสง และการตรวจวัดนับวันจะมีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ดังนั้น จึงต้องมีการพัฒนาและศึกษาค้นคว้าต่อไป รวมทั้งเผยแพร่ความรู้ และเทคโนโลยีนี้ให้เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายและสามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งต้องการมีการส่งเสริมให้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อผลิตขึ้นใช้เองได้ภายในประเทศต่อไป ซึ่งผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะ เป็นแนวทางที่ดีต่อการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวให้เกิดขึ้นภายในประเทศในเวลาอันใกล้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. J. Lagasse and S. Thanyavarn. "Bias-Free High-Dynamic-Range Phase-Modulated Fiber-Optic Link." **IEEE Photonics Technology Letters**, Vol.9, No. 5, 1997, pp. 681-683.
- [2] J. Zhang and J. W. Y. Lit, "Compound fiber ring resonator: theory." **Optical Society of America**, Vol. 11, No. 6, 1994, pp. 1867-1873.
- [3] K. P. Oakley, et. al. "Loss and spectral control in fused tapered couplers." **Optical Engineering**, Vol. 33, No. 12, 1994, pp. 4006-4020.
- [4] M. S. Yataki and D. N. Payne, "All-fiber wavelength filters using concatenated fused-taper couplers." **Electronics Letters**, Vol. 21, No. 6, 1985, pp. 248-249.
- [5] M. J. F. Digonnet and H. J. Shaw, "Analysis of a tunable single mode optical fiber coupler." **IEEE Journal of Quantum Electronics**, Vol. 18, No. 4, 1982, pp. 746-754.
- [6] G. Georgiou and A. C. Boucouvalas, "Low-loss single-mode optical couplers.", **IEE Proceedings**, Vol. 132, No. 5, 1985, pp. 297-302.
- [7] X. H. Zheng and A. W. Snyder, "Fused couplers: condition for insensitivity to external refractive index." **Electronics Letters**, Vol. 23, No. 5, 1987, pp. 183-183.
- [8] J. M. P. Rodrigues., et.al., "Parabolic shape of a tapered fused coupler: comparison with experiment." **Applied Optics**, Vol. 26, No. 9, 1987, pp. 1578-1580.
- [9] J. Bures, et.al., "Some particular properties of monomode fused fiber couplers." **Applied Optics**, Vol. 23, No. 7, 1984, pp. 968-969.
- [10] X. Zheng, "Finite-element analysis for fused couplers." **Electronics Letters**, Vol. 22, No. 15, 1985, pp. 804-805.
- [11] R. G. Lamont, et. al., "Power transfer in fused biconical-taper single-mode fiber couplers: dependence on external refractive index." **Applied Optics**, Vol. 24, No. 3, 1985, pp. 327-332.
- [12] T. A. Birks, "Twist-induced tuning in tapered fiber couplers.", **Applied Optics**, Vol. 28, No. 19, 1989, pp. 4226-4233.
- [13] J. Zhang, Z. Mao and Z. Lin, 1989 "Measurements and analysis of fields in fused tapered single-mode fiber couplers.", **Applied Optics**, Vol. 28, No. 11, pp. 2026-2030.

- [14] W.K. Burns and M. Abebe, 1987, "Coupling model for fused fiber couplers with parabolic taper shape.", **Applied Optics**, Vol. 26, No. 19, pp. 4190-4192.
- [15] J. V. Wright, 1986, "Wavelength dependence of fused couplers.", **Electronics Letters**, Vol. 22, No. 6, pp. 320-321.
- [16] F.P. Payne C.D. Hussey and M.S. Yataki, 1985, "Modeling fused single-mode-fiber couplers.", **Electronics Letters**, Vol. 21, No. 11, pp. 461-462.
- [17] D. C. Johnson and K. O. Hill, 1986, "Control of wavelength selectivity of power transfer in fused biconical monomode directional couplers." **Applied Optics**, Vol. 25, No. 21, pp. 3800-3803.
- [18] D. T. Cassidy, C. Johnson and K. O. Hill, 1985, "Wavelength-dependent transmission of monomode optical fiber tapers.", **Applied Optics**, Vol. 24, No. 7, pp. 945-949.
- [19] D. M. Cooper, T. Finegan and other, 1991, "Components for fiber amplifiers and lasers." **Optical fiber lasers and amplifiers**, Blackie, London, pp. 112-126.
- [20] A.W. Snyder and J.D. Love, 1983, **Optical Waveguide Theory**, Chapman and Hall, London, pp. 414-415.

ภาคผนวก ก.

## แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ฮีเลียมนีออนเลเซอร์

ระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์เป็นระบบก๊าซเลเซอร์ระบบแรกของโลก เลเซอร์ระบบนี้ถูกประดิษฐ์คิดค้น โดยแจแวน (A. Javan) และคณะ ในปี ค.ศ. 1961 ที่ห้องปฏิบัติการของบริษัทเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephone Co. Laboratory) ในครั้งแรกแจแวนสามารถทำให้ก๊าซผสมระหว่างฮีเลียมและนีออนปลดปล่อยแสงเลเซอร์ออกมาที่ช่วงคลื่น 1150 นาโนเมตร (ย่านอินฟราเรด) และต่อมาพบว่าเลเซอร์ระบบนี้สามารถให้แสงเลเซอร์ออกมาได้อีกที่ช่วงคลื่นที่ 3390 นาโนเมตร ต่อมาในปี ค.ศ. 1962 ไวท์ (A.D. White) และคณะ สามารถผลิตแสงเลเซอร์จากระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์ได้ที่ช่วงคลื่น 632.8 นาโนเมตร แต่มีกำลังแสงน้อยมาก และระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่ความยาวคลื่นนี้เป็นระบบเลเซอร์ที่ค่อนข้างละเอียดอ่อน การทำให้เกิดแสงเลเซอร์ออกมานั้นทำได้ยากมาก ชิ้นส่วนประกอบทางแสง (Optical Components) ของระบบเลเซอร์จะต้องดีเยี่ยม เพื่อกำจัดการสูญเสีย (Loss) พลังงานภายในหลอดเลเซอร์ ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ดังกล่าวนี้มีแสงสีแดง ซึ่งเป็นที่นิยมแพร่หลายครบจนปัจจุบันนี้ ปัจจุบันนักฟิสิกส์สามารถผลิตแสงฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่มีลำแสงสีเขียว สีส้ม ได้สำเร็จ ซึ่งสนองความต้องการในการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่บริสุทธิ์ที่ช่วงคลื่นต่าง ๆ กันออกไป

คุณสมบัติของแสงฮีเลียมนีออนเลเซอร์ ระบบฮีเลียมนีออนเลเซอร์ ให้แสงเลเซอร์ช่วงคลื่นเดี่ยว (Monochromatic Light) ที่มีช่วงคลื่นตั้งแต่ 3390 นาโนเมตร 1150 นาโนเมตร และ 632.8 นาโนเมตร ตามลำดับ แสงที่ได้จากฮีเลียมนีออนเลเซอร์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความบริสุทธิ์ทางมาก สามารถส่องเป็นลำขนานได้เป็นระยะทางไกลมากโดยไม่สูญเสียความเข้มของแสงมากนัก คุณสมบัติต่าง ๆ พอสรุปได้ดังนี้คือ

บีมไดเวอร์เจนซ์ (Beam Divergence)	0.2-1.0 m rad.
ไลน์วิดท์ (Line Width)	1,700 MHz
ความยาวคลื่น ( $\lambda$ )	632.8, 1150, 3390 nm
โคฮีเอร์เรนซ์เลงซ์ (Coherent Length)	20-100,000 cm
ไบรเนส (Brightness)	$10^6$ w/cm <sup>2</sup> -Sr
กำลัง (Power)	0.1-100 nW

ภาคผนวก ข.

## อุปกรณ์รับแสงพินโพโตไดโอด

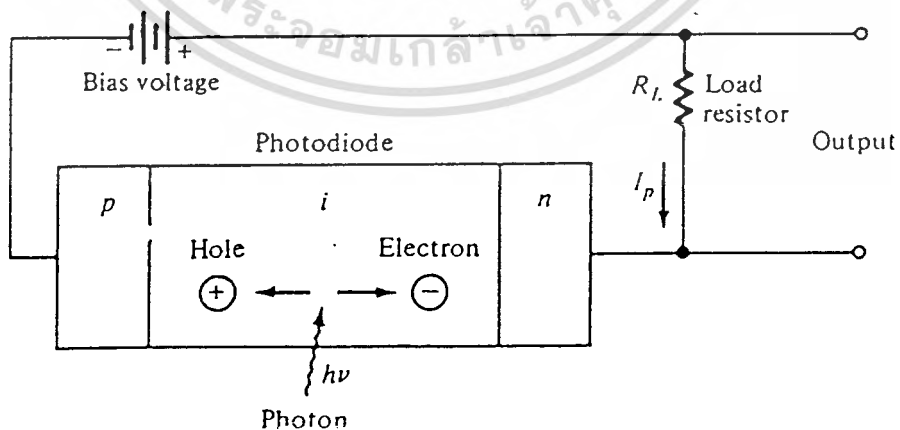


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

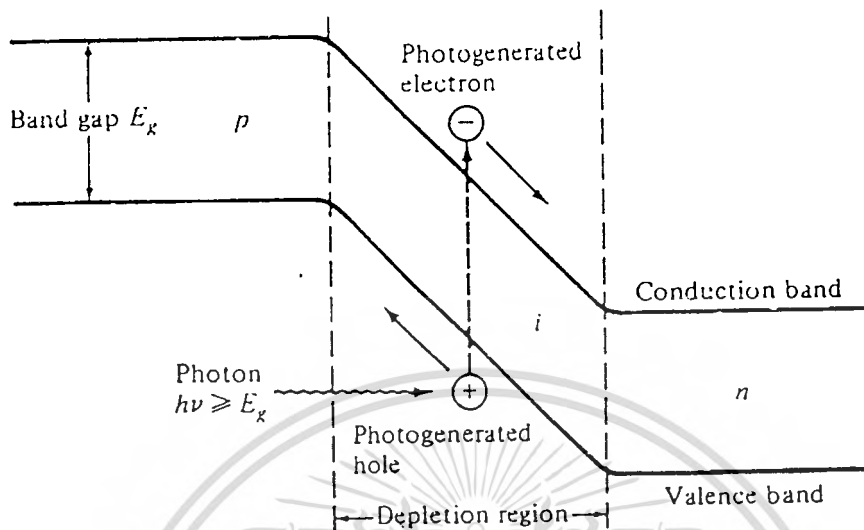
## พินโฟโตไดโอด

รูปแบบโครงสร้างของพินโฟโตไดโอด (PIN-Photodiode) แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น P และ N ของสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ยังมีบริเวณที่เป็นอินทรินซิก (Intrinsic) คั่นอยู่ระหว่างสาร P และ N โดยจะมีการเจือสาร N เข้าไปในเนื้อแท้ของสารนี้ด้วย ในการทำงานปกติจะต้องไบอัสกลับให้กับพินโฟโตไดโอด เมื่อมีโฟตอนมาตกกระทบ โดยมีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานของช่องว่าง (Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะปลดปล่อยพลังงานทำให้อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำเคลื่อนที่ไปสู่ระดับพลังงานสูง การทำงานของโฟตอนที่เพิ่มประจุให้กับตัวกลางแสดงในรูปที่ 2 อุปกรณ์ตรวจรับแสงปกติจะออกแบบให้ตัวกลางการทำงานหลักอยู่ที่บริเวณรอยต่อ (บริเวณรอยต่อคือบริเวณอินทรินซิก) ซึ่งเป็นบริเวณที่แสงตกกระทบและใช้ในการดูดกลืนพลังงานของโฟตอน เมื่อป้อนกระแสให้กับโฟโตไดโอด อิเล็กตรอนจะไหลทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง เมื่ออิเล็กตรอนและโฮล (Hole) มีการเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางซึ่งมีระยะทางเป็น  $L_n$  หรือ  $L_p$  ของอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาที่อิเล็กตรอน หรือโฮลกลับมารวมกันใหม่ เรียกว่าช่วงชีวิตของพาหะ (Carrier Lifetime)  $\tau_n$  และ  $\tau_p$

กำลังแสงที่ถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำนี้เป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และระยะทาง โดยที่สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงดังกล่าว เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น  $\lambda$  ส่วนสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นแสงของสารที่ใช้ทำโฟโตไดโอด มีค่าแตกต่างกันตามความยาวคลื่นคัทออฟ ( $\lambda_c$ ) ซึ่งถูกกำหนดโดยพลังงานช่องว่าง ( $E_g$ ) ของวัสดุ เช่นความยาวคลื่นคัทออฟ สำหรับซิลิกอน (Si) จะมีค่า 1.06 ไมโครเมตร และสำหรับเจอร์มาเนียม (Ge) จะมีค่าประมาณ 1.6 ไมโครเมตร



รูปที่ 1 แสดงการไบอัสให้พินโฟโตไดโอด

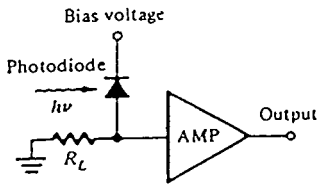


**รูปที่ 2** แสดงการไหลของอิเล็กตรอนในรอยต่อของพินโฟโตไดโอด โดยที่ Photogenerated Electron และ Photogenerated Hole คือ อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากการได้รับพลังงานแสง ส่วน Depletion Region คือ บริเวณที่แถบพลังงานนำไฟฟ้า (Conduction Band) แถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence Band) ถูกทำให้อยู่ชิดกันมากขึ้น โดย Photogenerated Electron และ Photogenerated Hole

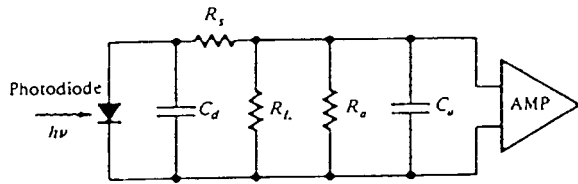
ถ้าที่บริเวณแพร่ของอิเล็กตรอนมีความกว้าง  $w$  เมื่อมีแสงตกบนผิวหน้าของโฟโตไดโอด พบว่ามีกระแสโฟโต้  $I_p$  จะเป็นฟังก์ชันของความกว้าง  $w$ ,  $P_0$ ,  $q$  และ  $h\nu$  โดยที่  $P_0$  กำลังของแสงที่ตกกระทบบนโฟโตดีเทคเตอร์  $q$  คือประจุอิเล็กตรอน และ  $h\nu$  เป็นพลังงานโฟตอน

ส่วนคุณสมบัติของโฟโตไดโอดมักถูกกำหนดในรูปของสัมประสิทธิ์ในการทำงานของโฟโตไดโอด ซึ่งแสดงในรูปของการตอบสนองต่อแสง ( $\mathcal{R}$ ) โดยเป็นความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ทางควันตัม  $\eta$  (Quantum Efficiency) ดังนี้

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_0} = \frac{\eta q}{h\nu} \quad (1)$$



(ก)



(ข)

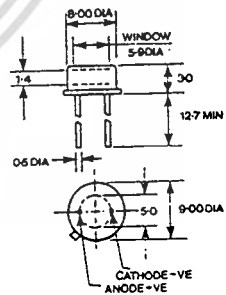
รูปที่ 3 แสดงรูปแบบของการใช้งานของฟิโนโตไดโอด

โดยทั่วไปกระแสบริเวณในฟิโนโตไดโอดจะตรวจรับได้จากกระดบการตรวจรับแสงต่ำสุด ความไวของอุปกรณ์รับแสงในระบบการสื่อสารทางแสงจะแสดงในเทอมของแสงและกำลังของแสงที่ตรวจรับได้ต่ำสุด ส่วนการใช้งานมักต้องวงจรดังรูปที่ 3 ซึ่งจะต้องต่อตัวต้านทานโหลด  $R_L$  เข้ากับวงจร ดังรูปที่ 3(ก) ส่วนรูปที่ 3(ข) จะเป็นวงจรมายในเปรียบเทียบของวงจรในรูปที่ 3(ก)

ข้อมูลจำเพาะของฟิโนโตไดโอด รุ่น BPW 21

Peak spectral response	560 nm
Wavelength range	460-750 nm
Power dissipation	250 mW max.
Sensitivity (short circuit)	7 nA/lux
Open circuit volts (E = 1 k lux)	280 mV
Dark current ( $V_R = 5 V$ )	2 nA
Rise time (I = 100 $\mu A$ , $R_L = 1 k\Omega$ )	3-5 $\mu S$
Junction capacitance ( $V_R = 5 V$ )	170 $\mu F$

BPW 21



ภาคผนวก ค.

## โปรแกรมจำลองเชิงตัวเลข



## โปรแกรม BCOUP.BAS

```

DECLARE SUB POWER2 (p1, p2, x)
DECLARE SUB ocop ()
DECLARE SUB HEAD ()
DECLARE SUB HEADO ()
DECLARE SUB sensor ()
DECLARE SUB init ()
DECLARE SUB reanal ()
DECLARE SUB RADIUS (y1, y2, x)
DECLARE SUB POWER1 (y1!, y2!, x!)
REM DECLARE SUB POWER2 (y3!, y4!, x!)
REM DECLARE SUB POWER3 (y3!, y4!, x!)
DIM y1(500)
DIM y2(500)
DIM az(10000)
CLS
PRINT "*****"
PRINT "* This is the graph simulation program, which is usefull for design *"
PRINT "* fused tapered devices and simulate graph of external perturbation *"
PRINT "* to coupling power.                *"
PRINT "*****"
PRINT " "
PRINT "*****"
PRINT "*           My Menu                       *"
PRINT "* 1. Design a fused tapered devices.         *"
PRINT "* 2. Simmulate graph of external reflective index perterbation.  *"
PRINT "* 3. Reanalyz some graph which was excuted.    *"
PRINT "* 4. Design a fused sensors devices          *"
PRINT "*****"
LOCATE 22, 5: INPUT "Which submenu you want to excute.", m$
IF m$ = "4" THEN sensor
IF m$ = "3" THEN reanal

```

```

IF m$ = "2" THEN ocop
IF m$ <> "1" THEN GOTO 200
CLS
pi = 4# * ATN(1#)
ix = 1
m = 0
HEAD
LOCATE 26, 10: INPUT "Enter the length of soft zone ", iz
FOR jl = .01 TO (5 * iz) STEP .01
dz = 0
dn = 0
az = 0
vz = 0
uz = 0
kz = 0
cz = 0
cdz = 0
sdc = 0
l = 0
lm = 0
l = jl + iz
il = INT(l / 2) + 1
jx = 0
gama = (4 * (EXP(jl / (2 * iz)) - 1)) / ((jl + iz) ^ 2)
Af = .0000625 * (EXP(-jl / (2 * iz)))
dz = (1 - (1 / 1.47) ^ 2) ^ .5
dn = ((1.46 ^ 2) - 1!) ^ .5
g = gama
FOR z = -il TO il STEP .01
az = Af * (1 + (g * (z ^ 2)))
IF az > .0000625 THEN GOTO 100

```



jx = jx + 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

lm = lm + .01
az(jx) = az
vz = (2 * pi * az * dn) / (633 * 10 ^ -9)
uz = 2.405 * EXP((-1) * (1 - (dz / 2)) / vz)
wz = ((vz ^ 2) - (uz ^ 2)) ^ .5
kz = ((wz / pi) ^ 2) * (1 - (13 / (16 * wz)))
cz = dz * kz * (uz ^ 2) / (az * (vz ^ 3))
dcdz = .01 * .001 * cz
sdc = sdc + dcdz

```

```
100 NEXT z
```

```

p1 = (COS(sdc)) ^ 2
p2 = (SIN(sdc)) ^ 2
y1(jl) = p1
y2(jl) = p2
x = INT(jl * 50) + 40
y3 = 270 - (200 * p1)
y4 = 270 - (200 * p2)
CALL POWER2(y3, y4, x)

```

```
NEXT jl
```

```

xa = INT(x / 8) + 1
ya = INT(y3 / 15)
yb = INT(y4 / 15)
LOCATE ya, xa: PRINT "P1"
LOCATE yb, xa: PRINT "P2"

```

```
101 LOCATE 26, 5: INPUT " Do you want to save this model."; sel$
```

```
IF sel$ = "n" THEN GOTO 200
```

```
LOCATE 26, 5: INPUT "Enter the name of file which you want to save(RA*.dat)", na$
```

```
OPEN na$ FOR OUTPUT AS #1
```

```
WRITE #1, jl, iz
```

```
FOR jn1 = 1 TO jx
```

```
  x1 = y1(jn1)
```

```
  x2 = y2(jn1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

WRITE #1, x1, x2
jEOF = jEOF + 1
NEXT jn1
CLOSE #1
200 END

```

### SUB HEAD

CLS

SCREEN 12

LOCATE 4, 6: PRINT "Relative Power(%)"

LOCATE 5, 2: PRINT "100"

LOCATE 11, 3: PRINT "50"

LOCATE 17, 4: PRINT "0"

LINE (40, 70)-(40, 270)

FOR I = 0 TO 9

y = (I \* 20) + 70

LINE (38, y)-(42, y)

NEXT I

LINE (40, 270)-(440, 270)

FOR I = 0 TO 20

x = (I \* 20) + 40

LINE (x, 269)-(x, 271)

NEXT I

LOCATE 18, 14: PRINT TAB(5); " "; TAB(18); "2.0"; TAB(30); "4.0"; TAB(42); "6.0";

TAB(55); "8.0"

REM ; TAB(66); "10.0"

LOCATE 20, 36: PRINT "Elongation Length(mm)"

END SUB

### SUB HEADO

CLS

SCREEN 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LOCATE 4, 6: PRINT "power(%)"
LOCATE 5, 2: PRINT "100"
LOCATE 11, 2: PRINT "50"
LOCATE 17, 3: PRINT " "
LINE (40, 70)-(40, 270)
FOR I = 0 TO 9
    y = (I * 20) + 70
    LINE (38, y)-(42, y)
NEXT I
LINE (40, 270)-(540, 270)
FOR I = 0 TO 25
    x = (I * 20) + 40
    LINE (x, 269)-(x, 271)
NEXT I
LOCATE 18, 14: PRINT TAB(5); "0"; TAB(18); "1.0"; TAB(30); "2.0"; TAB(42); "3.0";
TAB(55); "4.0"; TAB(67); "5.0"
LOCATE 20, 45: PRINT "length of movement(milimeter)"
END SUB

SUB reanal
DIM az(1000)
DIM p2(500)
CLS
PRINT "*****"
PRINT "*"          SUB MENU          "*"
PRINT "* 1. Reanalyz graph of fused tapered devices          *"
PRINT "* 2. Reanalyz graph of external reflective index perturbation  *"
PRINT "*****"
LOCATE 15, 5: INPUT "which item do you want to reanalyz"; m$
IF m$ = "2" THEN ocop
IF m$ <> "1" THEN GOTO 1004
LOCATE 20, 5: INPUT "Name of file you want to test", naf$

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

na$ = "c:\patt\" + naf$
HEAD
OPEN na$ FOR INPUT AS #2
INPUT #2, jx, lm, jol, iz, iol, l, Af, gama
FOR j1 = 1 TO jx STEP 1
  INPUT #2, az
  az(j1) = az
  x = INT(lm * j1) + 40
  y1 = 170 - (1000000!) * az(j1)
  y2 = 170 + (1000000!) * az(j1)
  CALL RADIUS(y1, y2, x)
  IF az(j1) = 0 THEN GOTO 1003
NEXT j1
LOCATE 20, 45: PRINT "length of tapered( "
LOCATE 20, 63: PRINT lm; "x mm )"
1003 CLOSE #2
1004 END SUB

```

### โปรแกรม OCOUP.BAS( หรือ SUB OCOUP ในโปรแกรม BCOUP.BAS)

```

SUB OCOUP
DECLARE SUB POWER2 (y3!, y4!, x!)
DECLARE SUB HEADO ()
CLS
DIM az(2000)
DIM p1(500)
DIM p2(500)
PRINT "This program is designed for study of the external perturbation."
PRINT
INPUT "Enter the length of soft zone ", iz
INPUT "Input length of elongation"; jl
LOCATE 20, 1: INPUT "Input length of thin film(100xmm)."; tf
INPUT "Input external reflective index"; nx

```

```

INPUT "scanning step"; st1

pi = 4# * ATN(1#)
ix = 1, m = 0, dz = 0, dn = 0, az = 0, vz = 0
uz = 0, kz = 0, cz = 0, cdz = 0, sdc = 0, l = 0, lm = 0

l = jl + iz
il = INT(l / 2) + 1
jx = 0
gama = (4 * (EXP(jl / (2 * iz)) - 1)) / ((jl + iz) ^ 2)
Af = .0000625 * (EXP(-jl / (2 * iz)))
dz = (1 - (1 / 1.47) ^ 2) ^ .5
dn = ((1.46 ^ 2) - 1!) ^ .5
g = gama
FOR z = -il TO il STEP .01
  az = Af * (1 + (g * (z ^ 2)))
  IF az > .0000625 THEN GOTO 100
  jx = jx + 1
  lm = lm + .01
  az(jx) = az
  PRINT az
100 NEXT z
HEADO
FOR jzs = -tf TO (jx + tf) STEP st1
  jl = 0, dz = 0, dn = 0, vz = 0, uz = 0, kz = 0,
  cz = 0, cdz = 0, sdc = 0, n = 1, im = 0
  IF jzs = 0 THEN az(0) = .0000625
  IF jzs < 0 THEN az(j2) = .0000625
  IF jzs > jx THEN az(j2) = .0000625
  FOR j2 = 1 TO jx STEP 1
    IF az(j2) >= .0000625 THEN GOTO 1010
    IF j2 < jzs - tf THEN n = 1!
    IF j2 < jzs THEN n = nx
    IF j2 > jzs THEN n = 1!

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

dz = (1 - (1 / 1.47) ^ 2) ^ .5
dn = ((1.46 ^ 2) - (n ^ 2)) ^ .5
vz = 2 * pi * az(j2) * dn / (633 * 10 ^ -9)
uz = 2.405 * EXP((-1) * (1 - (dz / 2))) / vz
wz = ((vz ^ 2) - (uz ^ 2)) ^ .5
kz = ((wz / pi) ^ 2) * (1 - (13 / (16 * wz)))
cz = dz * kz * (uz ^ 2) / (az(j2) * (vz ^ 3))
dcdz = .01 * .001 * cz
sdc = sdc + dcdz

```

```
1010 NEXT j2
```

```

jn = jn + 1
p1 = (COS(sdc)) ^ 2
p2 = (SIN(sdc)) ^ 2
x = INT(jn * st1 / 2) + 40
y3 = 270 - (200 * p1)
y4 = 270 - (200 * p2)
CALL POWER2(y3, y4, x)

```

```
NEXT jzs
```

```

xa = INT(x / 8)
ya = INT(y3 / 15)
yb = INT(y4 / 15)
2010 LINE (50, 330)-(100, 330), 5
LOCATE ya, xa: PRINT "P1"
LOCATE yb, xa: PRINT "P2"
LOCATE 21, 20: PRINT "P1"
LOCATE 22, 20: PRINT "P2"
LINE (50, 345)-(100, 345), 2:

```

```
REM LOCATE 24, 6: PRINT "This graph was simulated by the external effect to coupling ratio,"
```

```
REM LOCATE 25, 6: PRINT "which was perturbed by"
```

```
REM LOCATE 25, 28: PRINT (il / 100)
```

```
REM LOCATE 25, 33: PRINT " "
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

REM IF nx = 1.33 THEN LOCATE 25, 32: PRINT " mm of water thin film and move along"
REM IF nx = 1.45 THEN LOCATE 25, 32: PRINT " mm of glycerol thin film and move along"
REM LOCATE 26, 6: PRINT I
REM LOCATE 26, 14: PRINT " mm of tapered."
END

```

### SUB init

```
dz = 0, dn = 0, az = 0, vz = 0, uz = 0, kz = 0
```

```
cz = 0, cdz = 0, sdc = 0, l = 0
```

```
END SUB
```

### โปรแกรม SENSOR.BAS( หรือ SUB sensor ในโปรแกรม BCOUP.BAS )

```
DECLARE SUB HEAD4 ()
```

```
DECLARE SUB INIT4 ()
```

```
DECLARE SUB POWER4 (y1, y2, x)
```

```
DIM y41(500)
```

```
DIM y42(500)
```

```
DIM x4(500)
```

```
DIM R4(500)
```

```
LOCATE 5, 5: PRINT "This is designed for a fused tapered sensors"
```

```
pi = 4# * ATN(1#)
```

```
CLS
```

```
LOCATE 15, 5: INPUT "Input end of taper length"; l
```

```
LOCATE 16, 5: INPUT "soft zone"; iz
```

```
HEAD4
```

```
FOR j = .1 TO l STEP .1
```

```
gama = (4 * (EXP(j / (2 * iz)) - 1)) / ((j + iz) ^ 2)
```

```
Af = .0000625 * (EXP(-j / (2 * iz)))
```

```
g = gama
```

```
IL = INT((j + iz) / 2) + 1
```

```
sdc = 0
```

```
FOR K = 1 TO 459 STEP 1
```

```

n = 1 + (K / 1000)
FOR z = (-1L) TO (1L) STEP .01
dz = (1 - (n / 1.47) ^ 2) ^ .5
dn = ((1.46 ^ 2) - (n ^ 2)) ^ .5
az = Af * (1 + (g * (z ^ 2)))
IF az > .0000625 THEN GOTO 104
LOCATE 21, 5: PRINT az
vz = 2 * pi * az * dn / (633 * 10 ^ -9)
uz = 2.405 * EXP((-1) * (1 - (dz / 2)) / vz)
wz = ((vz ^ 2) - (uz ^ 2)) ^ .5
kz = ((wz / pi) ^ 2) * (1 - (13 / (16 * wz)))
cz = dz * kz * (uz ^ 2) / (az * (vz ^ 3))
dcdz = .01 * .001 * cz
sdc = sdc + dcdz
104 NEXT z
P1 = P2 = y1 = y2 = x = 0
P1 = (COS(2 * sdc)) ^ 2
P2 = (SIN(2 * sdc)) ^ 2
y41(K) = 270 - (P1 * 200)
y42(K) = 270 - (P2 * 200)
R4(K) = y41(K) / y42(K)
x4(K) = ((n - 1) * 1000) + 40
LOCATE 22, 5: PRINT sdc, y42(K)
114 NEXT K
LOCATE 23, 5: PRINT K, y42(1), y42(330)
IF ABS(R4(330) - R4(1)) < .9 THEN GOTO 204
FOR ik = 1 TO 459
y1 = y41(ik)
y2 = y42(ik)
R = 270 - (50 * (y1 / y2))
x = x4(ik)

```

CALL POWER4(R, y2, x)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

NEXT ik
ixn = INT(x4(459) / 8)
iy1n = INT(y41(459) / 16)
iy2n = INT(y42(459) / 16)
LOCATE iy2n, ixn: PRINT "L="; iz + j; " mm";
LOCATE 20, 5: INPUT "Do you want to save this model.", P$
IF P$ <> "y" THEN GOTO 204
LOCATE 21, 5: INPUT "What the name of file.", name$
LOCATE 22, 5: INPUT "What the number of file.", file#
OPEN name$ FOR OUTPUT AS file#
  FOR i = 1 TO 459 STEP 1
    PRINT #file#, y41(i), y42(i), x4(i)
  NEXT i
  PRINT #file#, 1, DELZ, gama, Af
  PRINT "save already"
  CLOSE file#
  GOTO 205
204 CLS
  HEAD4
205 NEXT j
  GOTO 3004
304 CLS
  LOCATE 16, 5: INPUT "Do you want to rewrite this model", P1$
  IF P1$ <> "y" THEN GOTO 3004
  LOCATE 17, 5: INPUT "What the name of file", name$
  LOCATE 18, 5: INPUT "What the number of file", file#
  OPEN name$ FOR INPUT AS file#
  FOR ix = 1 TO 459 STEP 1
    INPUT #file#, y41(ix), y42(ix), x4(ix)
    y1 = y41(ix)
    y2 = y42(ix)
    x = x4(ix)

```

```

CALL POWER4(y1, y2, x)

NEXT ix

INPUT #file#, l, iz, gama, Af

LOCATE 20, 5: PRINT "length of taperd"; l + iz, "mm"

LOCATE 21, 5: PRINT "soft zone", iz, "mm"

LOCATE 22, 5: PRINT "GAMA", gama,

LOCATE 23, 5: PRINT "minimum of radius", Af, "m"

CLOSE file#

LOCATE 26, 5: INPUT "Do you want to do another model", P2$

REM IF P2$ = "y" THEN GOTO 304

3004 END

SUB HEAD4

CLS

SCREEN 12

LOCATE 4, 4: PRINT "% RERATIVE POWER(Pr)"

LOCATE 5, 2: PRINT "100"

LOCATE 11, 2: PRINT "50"

LINE (40, 70)-(40, 270)

FOR i = 0 TO 9
    y = (i * 20) + 70
    LINE (38, y)-(42, y)
NEXT i

LINE (40, 270)-(540, 270)

FOR i = 0 TO 25
    x = (i * 20) + 40
    LINE (x, 269)-(x, 271)
NEXT i

LOCATE 18, 14: PRINT TAB(5); "1.0"; TAB(18); "1.1"; TAB(30); "1.2"; TAB(42);
"1.3"; TAB(55); "1.4"; TAB(67); "1.5"

LOCATE 20, 45: PRINT "external reflective index"

END SUB

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUB INIT4

dz = 0, dn = 0, az = 0, vz = 0, uz = 0,

kz = 0, cz = 0, cdz = 0, sdc = 0, l = 0

END SUB

SUB POWER4 (R, y2, x)

PSET (x, R), 5

REM PSET (x, y2), 2

END SUB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

## โปรแกรมควบคุมระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรม MCOUP.BAS

```
DECLARE SUB HEAD ()
```

```
DIM pa(5000)
```

```
DIM pb(5000)
```

```
R(1) = 8
```

```
R(2) = 12
```

```
R(3) = 4
```

```
R(4) = 6
```

```
R(5) = 2
```

```
R(6) = 3
```

```
R(7) = 1
```

```
R(8) = 9
```

```
CLS
```

```
HEAD
```

```
ix = 0
```

```
10 LOCATE 24, 5: INPUT "Input the pulling length"; L
```

```
INT(Ds=L/0.025)
```

```
FOR k = 0 TO DS
```

```
FOR i = 1 TO 8
```

```
OUT &H378, R(i)
```

```
A1 = 0, B1 = 0
```

```
FOR j = 1 TO 200
```

```
A1 = A1 + (INP(&H28A) * (5 / 256))
```

```
B1 = B1 + (INP(&H30A) * (5 / 256))
```

```
NEXT j
```

```
Pout1 = 40 * (A1 / 200)
```

```
Pout2 = 40 * (B1 / 200)
```

```
LOCATE 26, 10: INPUT "INPUT DATA(DB)", Y1
```

```
Y2 = INT(Pout2)
```

```
ix = ix + 1
```

```
PSET (ix + 40, 270 - Y1), 5
```

```
PSET (ix + 40, 270 - Y2), 3
```

```

pa(ix) = Y1
pb(ix) = Y2
LOCATE 26, 10: PRINT Y1, Y2, ix
NEXT i
NEXT k
LOCATE 24, 5: INPUT "      Do you want to continue pulling"; sf$
IF sf$ = "y" THEN GOTO 10
LOCATE 24, 5: INPUT "      Do you want to save this file"; sf1$
IF sf1$ = "n" THEN GOTO 50
INPUT "input file name(coup*.dat)", na$
OPEN na$ FOR OUTPUT AS #1
FOR ik = 1 TO 5000
PRINT #1, pa(ik); pb(ik)
NEXT ik
CLOSE #1
50 END

SUB HEAD
SCREEN 12
LOCATE 4, 6: PRINT "Relative Power (%)"
LOCATE 5, 2: PRINT "100"
LOCATE 11, 2: PRINT "50"
LINE (40, 70)-(40, 270)
FOR i = 0 TO 9
y = (i * 20) + 70
LINE (38, y)-(42, y)
NEXT i
LINE (40, 270)-(540, 270)
FOR i = 0 TO 25
x = (i * 20) + 40
LINE (x, 269)-(x, 271)
NEXT i

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
LOCATE 18, 14: PRINT TAB(5); "0.0"; TAB(18); "2.0"; TAB(30); "4.0"; TAB(42); "6.0"; TAB  
(55); "8.0"; TAB(67); "10.0"
```

```
LOCATE 20, 45: PRINT "Elongation Length(mm)"
```

```
END SUB
```

```
SUB OUTSCN
```

```
Y1 = INT(Pout1) + 10
```

```
Y2 = INT(Pout2) + 10
```

```
PSET (4 * k + j, Y1), 2
```

```
PSET (4 * k + j, Y2), 2
```

```
END SUB
```

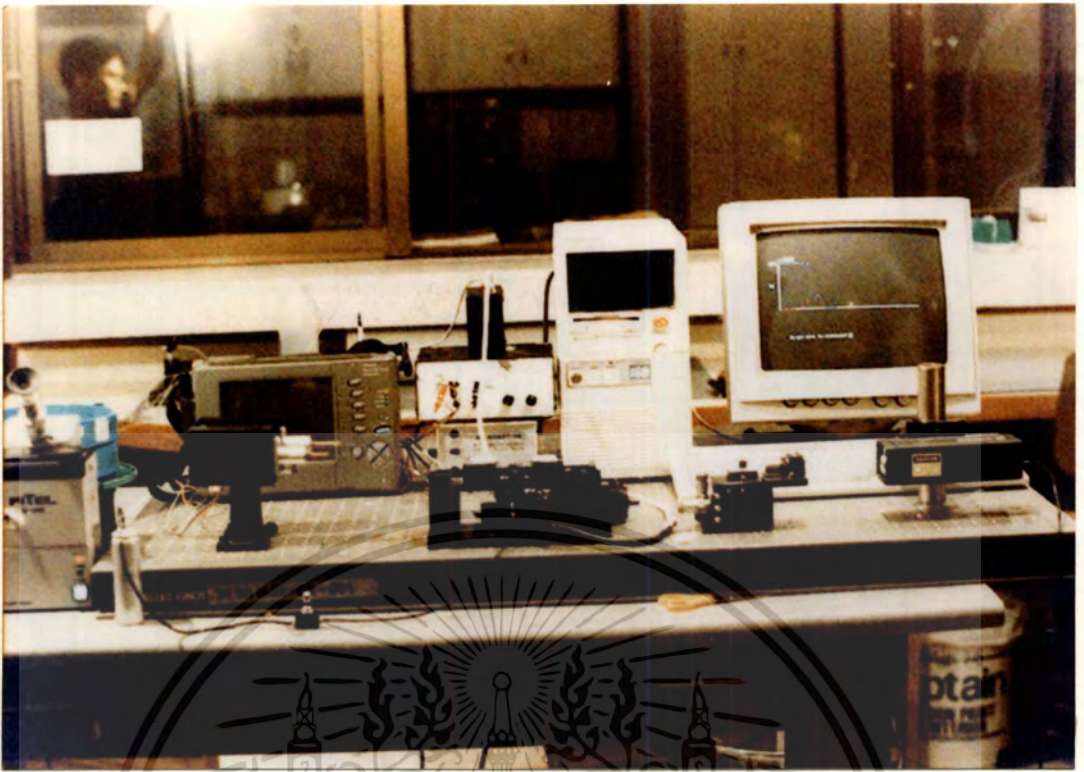


## ภาคผนวก จ.

## อุปกรณ์การทดลองและผลการทดลองอื่น ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

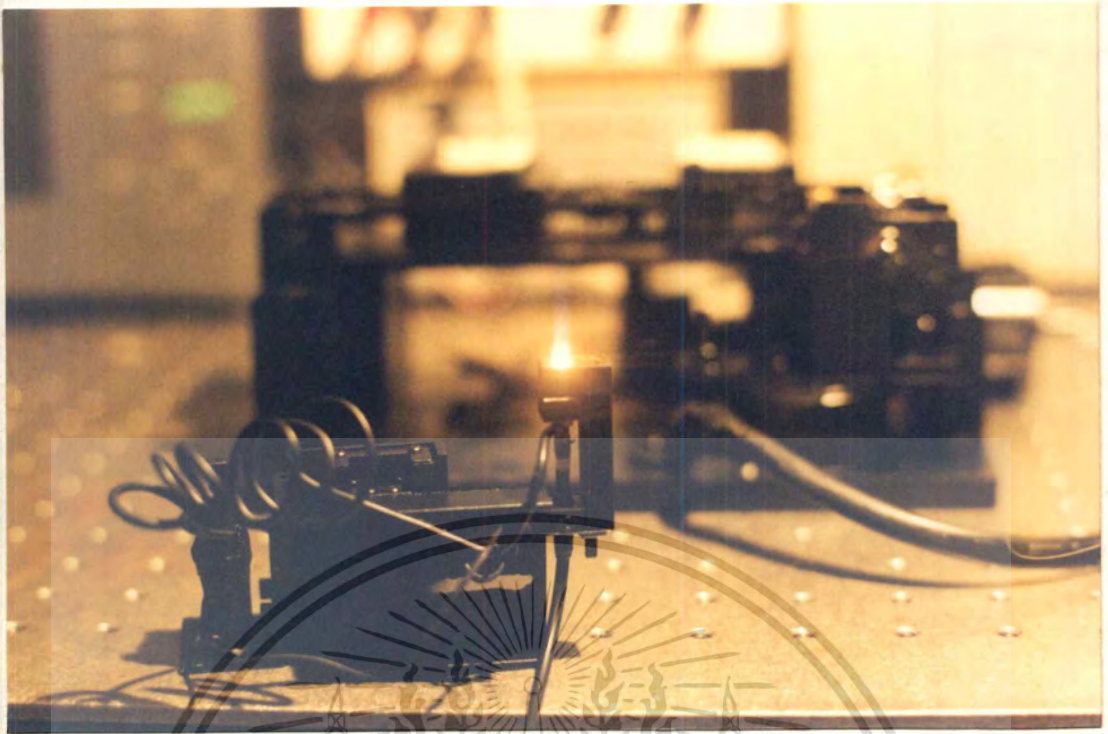


รูปที่ 1 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองสร้างคิปเพลอร์แสงแบบหลอมรวม



รูปที่ 2 แสดงการจัดอุปกรณ์การทดลองตรวจสอบอุปกรณ์ตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

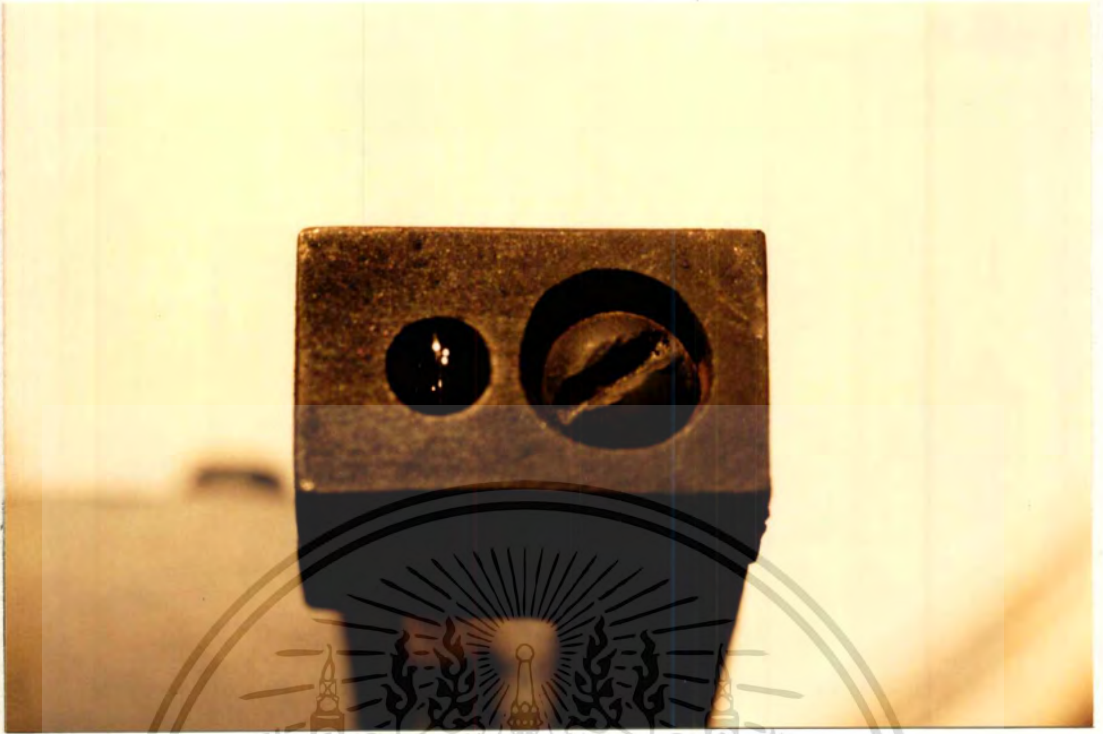


รูปที่ 3 แสดงลำแสงความร้อนจากหัวก้ำชอกซิเจน+บิวเทน ซึ่งใช้ในการหลอมรวมท่อนำแสง



รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างของท่อผสมก้ำชอกซิเจน+บิวเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

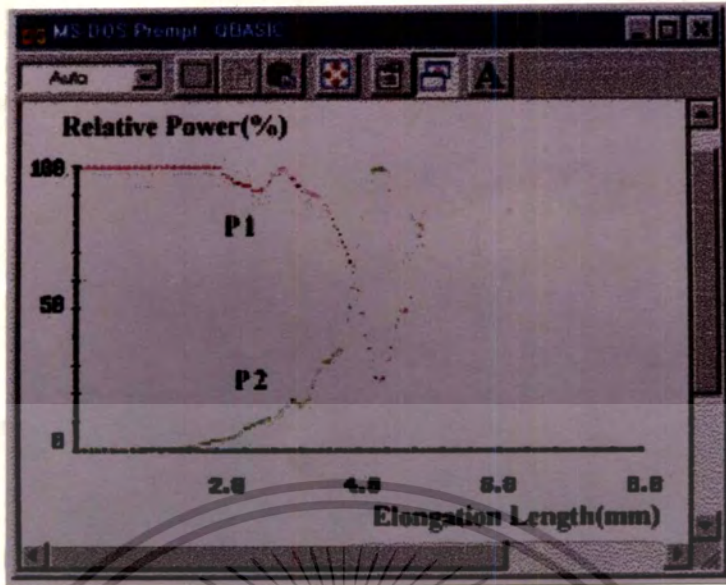


รูปที่ 5 ภาพแสดงขนาดของหัวก๊าซให้ความร้อน

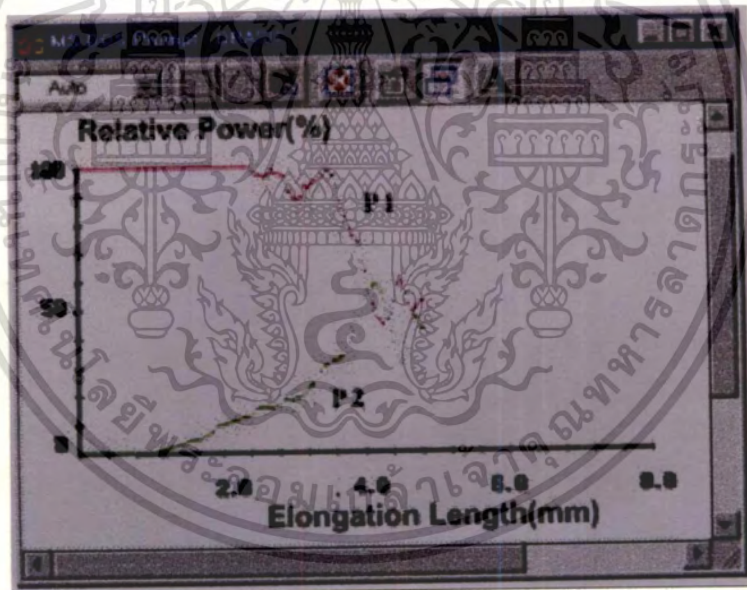


รูปที่ 6 ภาพแสดงท่อนำแสงหลอมรวมที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ภาพแสดงผลการทดลองหาระยะปิดของกำลังแสงเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ.

## รายชื่อผลงานวิจัย

1. P. Raknoi, P.P. Yupapin and S. Kusamran and W. Thechiteera, **Environmental Monitoring Based Fiber Optic Sensor**, *Science and Technology Journal*, Thammasat University, 1996, pp. 72-77.
2. P.P. Yupapin, P. Raknoi, P. Pipithhirankarn and S. Piengbangyang, **Fiber Optic Sensing Applications Using A Highly Coherent Source**, *Rev. Sci. Inst.*, 1999, pp. 25-31.
3. P.P. Yupapin, P. Raknoi, **Fiber Optic Sensing Devices using Fused Single Mode Fiber Couplers**, *Journal of ScienceKU, Khonkaen University*, 1999, pp. 23-30.
4. P.P. Yupapin and P. Raknoi, **Optical Remote Sensing Using Fiber Optic loop-mirrors**, *J. Science Society of Thailand(JSST)*, 1999.
5. P. Raknoi, P.P. Yupapin and S. Kusamran, **Remote Enviromental Sensor Based OTDR Technique**, *Proc. 21st Cong. of Sci. and Technol. of Thailand*, Cholburi, 1995, pp. 644-645.
6. P.P. Yupapin, W. Thechidteera, P. Raknoi and P. Chaiyasit, **Underground Tube Air Quality Monitoring Based Fiber Optic Networks**, *Proc. 3rd AAWM Conference*, Bangkok, 1996.pp. 353-355.
7. P.P. Yupapin, P. Raknoi, R. Chitaree and S. Kusamran, **Fiber Optic Sensing Devices**, *Proc. 1<sup>st</sup> Ubon Ratchathani University Conference*, Ubon Ratchathani, 1997.

.....

## ประวัติผู้เขียน

นายภัทรพงศ์ รักน้อย เกิดเมื่อวันที่ 8 เมษายน 2508 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ เมื่อปี การศึกษา 2531 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2536

ปี พ.ศ. 2532 เข้ารับราชการในตำแหน่งนักอุตุนิยมวิทยา 3 กองพยากรณ์อากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา ปี พ.ศ. 2539 ได้ย้ายมาดำรงตำแหน่งนักวิชาการอุตุนิยมวิทยา 6 กองภูมิอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา จนถึงปัจจุบัน ได้รับแต่งตั้งให้เป็นอาจารย์พิเศษประจำภาควิชาฟิสิกส์ โรงเรียนอุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2533 จนถึงปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้