

การศึกษาคุณลักษณะการคับปลิงของคู่ความสั้นใยนำแสงชนิดพลาสติกสำหรับ  
การใช้งานการสื่อสารระยะสั้น

A STUDY OF PLASTIC OPTICAL FIBER COUPLERS FOR SHORT  
DISTANCE COMMUNICATION

อรุณภาพ คุณากรบดินทร์  
ARNUPHAP KHUNAKORNBODIN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-472-7

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณลักษณะการคับปลิงของคู่ควบเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกสำหรับ  
การใช้งานการสื่อสารระยะสั้น

A STUDY OF PLASTIC OPTICAL FIBER COUPLERS FOR SHORT  
DISTANCE COMMUNICATION



อานูภาพ คุณากรบดินทร์

ARNUPHAP KHUNAKORNBODIN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....49615  
วัน, เดือน, ปี.....25 ก.พ. 2547

b.....  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-472-7

**A STUDY OF PLASTIC OPTICAL FIBER COUPLERS FOR SHORT  
DISTANCE COMMUNICATION**

**ARNUPHAP KHUNAKORNBODIN**

**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**

**2003**

**ISBN 974-324-472-7**

**COPYRIGHT 2003**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

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



หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณลักษณะการค้ำปลิงของคู่ควบเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกสำหรับการใช้งานการสื่อสารระยะสั้น
นักศึกษา	นายอนุภาพ คุณากรบดินทร์
รหัสประจำตัว	41065011
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการค้ำปลิงแสงของคู่ควบและศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างคู่ควบที่ทำจากเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกโดยเปลี่ยนความยาวของระยะค้ำปลิงด้วยวิธีการขัด โดยงานวิจัยเริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติการลดทอนสัญญาณแสงของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกของบริษัทมิตซูบิชิเรยอนจำกัดรุ่น SuperEska SH4001 โดยใช้เทคนิคการตัดสั้น ผลการศึกษาพบว่าเส้นใยนำแสงมีค่าการลดทอน 0.26 dB/m จากนั้นศึกษาการสร้างคู่ควบด้วยวิธีการขัดโดยเปลี่ยนความยาวระยะค้ำปลิงต่างๆ คือ 9.41, 11.41, 12.38, 13.15 และ 15.35 มิลลิเมตรตามลำดับ เมื่อป้อนแสงเลเซอร์เข้าที่อินพุตของคู่ควบและวัดความเข้มแสงที่ปลายเอาต์พุตต่างๆ พบว่าที่ความยาวระยะค้ำปลิง 12.38 มิลลิเมตรคู่ควบมีอัตราส่วนการค้ำปลิงสูงสุดที่ 53% จากนั้นทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่มีต่อการค้ำปลิง โดยใช้ตัวกลางคือ อากาศ น้ำ และกลีเซอริน จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้กลีเซอรินซึ่งมีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงค่าดัชนีหักเหของคอร์อัตราส่วนการค้ำปลิงเพิ่มขึ้น 1.36 – 6.17 เท่า จากนั้นทำการศึกษาผลของการค้ำปลิงเมื่อเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงที่ความยาวคลื่น 632.8, 670, 785 และ 850 นาโนเมตร ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนการค้ำปลิงมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น

<b>Thesis Title</b>	A Study of Plastic Optical Fiber Couplers for Short Distance Communication
<b>Student</b>	Mr. Arnuphap Khunakornbodin
<b>Student ID.</b>	41061011
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2003
<b>Thesis advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Preecha Yupapin

## ABSTRACT

This paper presents the study of coupling theory and feasibility of using plastic optical coupler produced by polished method with coupling lengths variation. Firstly, the attenuation of Super Eska SH4001 plastic optical fiber from Mitsubishi Rayon Co., Ltd. is measured by using Cut-Back method. Result shows that the attenuation of plastic optical fiber of 0.26 dB/m is achieved. Couplers are produced by polished method with coupling lengths of 9.41, 11.41, 12.38, 13.15 and 15.35 mm respectively. When laser output is launched into the input port of coupler then the output optical power detected, the maximum coupling ratio of 53% at the coupling length of 12.38 mm is noted. The effect of refractive index between coupling fibers are also studied by changing refractive index of 1.00, 1.33, and 1.47 of air, water, and glycerin respectively. Result shows that when the refractive index closes to core value, the coupling ratio increases. The effect of near infrared light source at 632.8, 670, 785 and 850 nanometers are also studied. It is found that the coupling ratio is related to wavelength of light.

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น เนื่องจากได้รับความกรุณาให้ความช่วยเหลือด้วยความเอาใจใส่จาก รศ.ดร.ปรีชา ยูพาพิน ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำเนื้อหาทางด้านหลักการและทฤษฎีต่างๆตลอดจนคอยช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในขณะการทำงานวิจัย ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ในที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ รศ. สุวรรณ คู่อำราญ รศ.ดร. จิตินัย แก้วแดง และผศ.ดร. รัชภักย์ จิตต์อารี ที่คอยให้คำชี้แนะทั้งทางด้านเนื้อหาและการเขียนวิทยานิพนธ์โดยความเอาใจใส่

ขอขอบคุณธีรยุทธ ชาญนุวงศ์ คุณชนะศักดิ์ พิพัฒน์ภิวังศ์ คุณภูเบศร์ พิพิธหิรัญการและเพื่อนๆทุกคนที่ได้คอยช่วยเหลือพร้อมทั้งให้คำแนะนำต่างๆในการทำงานวิจัยนี้ตลอดมา

ประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแต่ บิดา มารดา น้องชายและผู้มีพระคุณทุกท่าน

อานุภาพ คุณากรบดินทร์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 การดำเนินงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 หลักการพื้นฐานทางแสง.....	5
2.1 ความเป็นมาของการศึกษาเรื่องแสง.....	5
2.2 ธรรมชาติของแสง.....	8
2.2.1 ความเร็วของแสง.....	8
2.2.2 ค่าดัชนีหักเห.....	11
2.2.3 กฎการสะท้อน.....	12
2.2.4 กฎการหักเห.....	12
2.2.4.1 ค่าการสะท้อนและค่าการทะลุผ่าน.....	14
2.2.4.2 การสะท้อนกลับหมดภายใน.....	19
2.2.5 การแทรกสอด.....	20
2.2.6 การเลี้ยวเบน.....	22
2.3 สรุป.....	28
บทที่ 3 คู่ควมและทฤษฎี.....	29
3.1 สมการแมกซ์เวลล์และสมการคลื่น.....	29
3.2 สมการคลื่นสำหรับพิกัดทรงกระบอก.....	32

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	คู่มือ.....	37
3.3.1	ชนิดของคู่มือ.....	38
3.3.1.1	คู่มือแบบวาย.....	38
3.3.1.2	คู่มือแบบ 2x2.....	39
3.3.1.3	คู่มือแบบหลายพอร์ต.....	39
3.3.1.3.1	คู่มือแบบดาว.....	39
3.3.1.3.2	คู่มือแบบต้นไม้.....	40
3.3.2	การผลิตคู่มือ.....	40
3.3.2.1	วิธีการให้ความร้อนและดึง.....	40
3.3.2.2	วิธีแกนร่วม.....	41
3.3.2.3	วิธีแกนกรวยแยก.....	42
3.3.2.4	วิธีการใช้เส้นใยนำแสงที่เสื่อมสภาพ.....	42
3.3.2.5	วิธีการขัดและเชื่อมติด.....	43
3.3.3	คุณลักษณะของคู่มือ.....	43
3.3.3.1	ความสูญเสียแบบอินเลิซัน.....	44
3.3.3.2	ความสูญเสียแบบเอ็กเซส.....	44
3.3.3.3	ค่าไคเร็กติวิตี.....	44
3.3.3.4	อัตราส่วนการคัปปลิง.....	44
3.4	ทฤษฎีโหมคคัปปลิงสำหรับคู่มือ.....	45
3.5	ค่าคงที่การเคลื่อนที่และสัมประสิทธิ์การคัปปลิง.....	53
3.4	สรุป.....	55
บทที่ 4	เส้นใยนำแสงและอุปกรณ์แสง.....	56
4.1	เส้นใยนำแสง.....	56
4.1.1	ชนิดของเส้นใยนำแสง.....	57
4.1.1.1	เส้นใยนำแสงชนิดขั้นบันได.....	57
4.1.1.2	เส้นใยนำแสงเกรดอินเด็กซ์แบบหลายโหมค.....	59
4.1.1.3	เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก.....	60

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1.3.1 การผลิตเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก.....	61
4.1.2 ตัวแปรสำคัญของเส้นใยนำแสง.....	63
4.1.2.1 ผลต่างค่าดัชนีหักเหและมุมรับแสง.....	63
4.1.2.2 นิวเมอริคัลอะเพอร์เจอร์.....	64
4.1.2.3 ความถี่นอร์มอลไลซ์.....	65
4.1.2.4 คุณสมบัติการลดทอน.....	65
4.1.2.4.1 กลไกการลดทอนของเส้นใยนำแสง.....	66
4.1.2.4.2 ตัวแปรของค่าความสูญเสียภายในและภายนอก ของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก.....	68
4.2 เลขอร์ไดโอด.....	68
4.2.4 การมอดูเลตเลขอร์ไดโอด.....	70
4.3 พินโฟโตไดโอด.....	73
4.3.1 ความเร็วในการตอบสนอง.....	77
4.4 สรุป.....	78
บทที่ 5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	79
5.1 การสร้างคู่อวจากเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก.....	79
5.1.1 การจัดส่วนปลายของเส้นใยนำแสงสำหรับใช้ในการทดลอง.....	80
5.1.2 การสร้างคู่อวจากเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกโดยวิธีบีดเกลียว.....	82
5.1.3 การสร้างคู่อวจากเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกด้วยวิธีการขัด.....	83
5.2 การศึกษาคุณสมบัติการลดทอนกำลังแสงของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก โดยใช้เทคนิคการตัดสั้น.....	85
5.2.1 การวัดความสูญเสียโดยใช้เทคนิคการตัดสั้น.....	85
5.2.2 วิธีการทดลอง.....	86
5.3 การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสร้างคู่อวโดยวิธีบีดเกลียวกับวิธีขัด.....	87
5.3.1 วิธีการทดลอง.....	87
5.4 การศึกษาคุณลักษณะการคัปปลิงของคู่อวโดยการเปลี่ยน ความยาวระยะคัปปลิง.....	88

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4.1 การเตรียมคู่วบ.....	88
5.4.2 วิธีการทดลอง.....	88
5.5 การศึกษาผลของการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ใช้เชื่อมต่อ ระหว่างเส้นใยนำแสงของคู่วบ.....	89
5.5.1 วิธีการทดลอง.....	91
5.6 การศึกษาผลการตอบสนองของอัตราการคับปลิงต่อแหล่งกำเนิดแสง ที่ความยาวคลื่นย่านใกล้อินฟราเรด.....	91
5.6.1 วิธีการทดลอง.....	94
5.7 สรุป.....	94
บทที่ 6 ผลของงานวิจัย.....	95
6.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติการลดทอนกำลังแสงของเส้นใยนำแสง ชนิดพลาสติกโดยใช้เทคนิคการตัดสั้น.....	95
6.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสร้างคู่วบโดยวิธีบิเคิลีกับวิธีซัด.....	97
6.3 ผลการศึกษาคุณลักษณะการคับปลิงของคู่วบโดยการเปลี่ยน ระยะในการคับปลิง.....	99
6.4 ผลการศึกษาผลของการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ใช้เชื่อมต่อ ระหว่างเส้นใยนำแสงของคู่วบ.....	101
6.5 ผลการศึกษาผลการตอบสนองของอัตราการคับปลิงต่อแหล่งกำเนิดแสง ที่ความยาวคลื่นย่านใกล้อินฟราเรด.....	106
6.6 สรุป.....	114
บทที่ 7 บทสรุปและแนวทางการพัฒนาต่อไป.....	117
7.1 บทสรุป.....	117
7.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น.....	118
7.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป.....	119
เอกสารอ้างอิง.....	122

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. แหล่งกำเนิดแสง.....	125
ภาคผนวก ข. อุปกรณ์รับแสง.....	127
ภาคผนวก ค. วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับอุปกรณ์รับแสง.....	129
ภาคผนวก ง. เครื่องข่ายเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก.....	131
ภาคผนวก จ. ตัวอย่างคำนวณแสดงการนำคู่ควบที่สร้างไปใช้งานในการสื่อสารระยะสั้น.....	140
ภาคผนวก ฉ. ตัวอย่างข้อกำหนดคุณลักษณะของคู่ควบและการทำงาน.....	144
ภาคผนวก ช. รายชื่อผลงานวิจัยและบทความตีพิมพ์.....	149
ประวัติผู้เขียน.....	151

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงความถี่และความยาวคลื่นของสเปกตรัมแสงที่ตาแยกแยะได้.....	9
2.2 แสดงค่าดัชนีหักเหของตัวกลางต่างๆ โดยวัดด้วยแสงความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร.....	11
3.1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในสมการแมกซ์เวลล์.....	30
4.1 แสดงโพลิเมอร์ชนิดต่างๆที่นำมาผลิตเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก.....	60
4.2 แสดงตัวแปรค่าความสูญเสียของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก.....	68
4.3 แสดงความยาวคลื่นที่ได้รับจากสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่ใช้ผลิตเลเซอร์ไดโอด.....	69
5.1 แสดงคู่อควบที่สร้างโดยวิธีขีดสำหรับการทดลองที่ 5.4.....	89
5.2 แสดงค่าดัชนีหักเหของอากาศ น้ำ และกลีเซอรินเมื่อวัดโดยแสงความยาวคลื่น 589 nm.....	90
6.1 แสดงผลการลดทอนสัญญาณแสงที่ป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแสง ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร.....	95
6.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยนำแสง Super Eska 4001.....	96
6.3 แสดงค่าความเข้มแสงที่พอร์ตต่างๆของคู่อควบที่สร้างโดยวิธีบิตเกลียว.....	97
6.4 แสดงค่าความเข้มแสงที่พอร์ตต่างๆของคู่อควบที่สร้างโดยวิธีการขีด.....	98
6.5 แสดงค่าคุณสมบัติต่างๆของคู่อควบจากการคำนวณสมการที่ 3.34 ถึง 3.6.....	98
6.6 แสดงผลการวัดค่ากำลังแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของคู่อควบ C1 ถึง C5.....	99
6.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากการคำนวณของคู่อควบ C1 ถึง C5.....	101
6.8 แสดงผลการวัดค่ากำลังแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของคู่อควบ เมื่อใช้ตัวเชื่อมต่อเป็นน้ำมีค่าดัชนีหักเห 1.33.....	102
6.9 แสดงผลการวัดค่ากำลังแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของคู่อควบ เมื่อใช้ตัวเชื่อมต่อเป็นกลีเซอรินมีค่าดัชนีหักเห 1.47.....	102
6.10 แสดงผลเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอัตราการคัปปลิง.....	104
6.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของคู่อควบเมื่อตัวกลางเป็นน้ำมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.33.....	105
6.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ของคู่อควบเมื่อตัวกลางเป็นกลีเซอรินมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.47.....	105
6.13 แสดงผลการวัดค่ากำลังแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของคู่อควบ C1 ที่มี ความยาวระยะคัปปลิง 9.41 มิลลิเมตร.....	106
6.14 แสดงผลการวัดค่ากำลังแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของคู่อควบ C2 ที่มี ความยาวระยะคัปปลิง 11.41 มิลลิเมตร.....	106

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.15 แสดงผลการวัดค่ากำลังแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของกลุ่มควบ C3 ที่มี ความยาวระยะคัปปลิง 12.38 มิลลิเมตร.....	107
6.16 แสดงผลการวัดค่ากำลังแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของกลุ่มควบ C4 ที่มี ความยาวระยะคัปปลิง 13.15 มิลลิเมตร.....	104
6.17 แสดงผลการวัดค่ากำลังแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของกลุ่มควบ C5 ที่มี ความยาวระยะคัปปลิง 15.35 มิลลิเมตร.....	107
6.18 แสดงผลการคำนวณคุณสมบัติของกลุ่มควบ C1 โดยป้อนแหล่งกำเนิดแสงที่มี ความยาวคลื่น 632.8 670 785 และ 850 นาโนเมตร.....	111
6.19 แสดงผลการคำนวณคุณสมบัติของกลุ่มควบ C2 โดยป้อนแหล่งกำเนิดแสงที่มี ความยาวคลื่น 632.8 670 785 และ 850 นาโนเมตร.....	111
6.20 แสดงผลการคำนวณคุณสมบัติของกลุ่มควบ C3 โดยป้อนแหล่งกำเนิดแสงที่มี ความยาวคลื่น 632.8 670 785 และ 850 นาโนเมตร.....	112
6.21 แสดงผลการคำนวณคุณสมบัติของกลุ่มควบ C4 โดยป้อนแหล่งกำเนิดแสงที่มี ความยาวคลื่น 632.8 670 785 และ 850 นาโนเมตร.....	112
6.22 แสดงผลการคำนวณคุณสมบัติของกลุ่มควบ C5 โดยป้อนแหล่งกำเนิดแสงที่มี ความยาวคลื่น 632.8 670 785 และ 850 นาโนเมตร.....	113

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงคู่ควมเมื่อทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ชนิดต่างๆ.....	2
2.1 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	8
2.2 การทดลองหาค่าความเร็วแสงของอาร์มานด์ พิเชอ.....	10
2.3 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสงที่รอยต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน.....	12
2.4 แสดงการหักเหของแสงเมื่อดัชนีหักเหแสงในแต่ละตัวกลางแตกต่างกัน.....	13
2.5 แสดงการสะท้อนและการทะลุผ่านของลำแสงตกกระทบ.....	14
2.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนและค่าการทะลุผ่านกับมุมตกกระทบ.....	18
2.7 แสดงปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมด.....	19
2.8(ก) แสดงการทดลองการแทรกสอดของโทมัส ยัง.....	21
2.8(ข) แสดงทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตในการทดลองการแทรกสอดของโทมัส ยัง.....	22
2.9 แสดงการวิ่งผ่านรูเล็กๆของกลุ่มอนุภาค.....	23
2.10 แสดงการเปรียบเทียบสมมุติฐานการเคลื่อนผ่านสลิตคู่ของแสง.....	23
2.11 แสดงการสร้างการเลี้ยวเบนแบบเฟราน์โฮเฟอร์.....	24
2.12 แสดงการสร้างการเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนล.....	24
2.13 แสดงการเลี้ยวเบนแบบเฟราน์โฮเฟอร์ของแสงผ่านสลิตเดี่ยว.....	25
2.14 แสดงการกระจายความเข้มแสงจากการเลี้ยวเบนที่สลิต.....	28
3.1 แสดงฟังก์ชันเบสเซลล์อันดับที่ 1.....	36
3.2 แสดงฟังก์ชันเบสเซลล์อันดับที่ 2 ชนิดปรับปรุง.....	37
3.3 แสดงคู่ควม (ก) แบบวาย (ข) แบบรวมแสง.....	38
3.4 แสดงคู่ควมแบบ 2X2.....	39
3.5 แสดงคู่ควมแบบดาวที่มี NXM พอร์ต.....	39
3.6 แสดงคู่ควมแบบต้นไม้ (ก) 1XM (ข) MX1.....	40
3.7 แสดงคู่ควมที่ผลิตโดยวิธีการให้ความร้อนและการดึง.....	41
3.8 แสดงคู่ควมที่ผลิตโดยวิธีแกนร่วม.....	41
3.9 แสดงคู่ควมที่ผลิตโดยวิธีแกนกรวยแยก.....	42
3.10 แสดงคู่ควมที่ผลิตโดยวิธีการใช้เส้นใยนำแสงที่เชื่อม.....	42
3.11 คัปเปิลอร์ที่ทำโดยวิธีการขัดและเชื่อมติด.....	43
3.12 แสดงโครงสร้างของคู่ควมแบบ 2X2.....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 แสดงท่อนำคลื่น A และ B ที่นำมาวางใกล้กันในระยะที่เหมาะสม.....	46
3.14 แสดงผลการรบกวนเล็กน้อยของท่อนำคลื่นที่วางใกล้กัน.....	47
3.15 แสดงระบบคู่ควบบแบบพื้นฐาน.....	50
3.16 แสดงการถ่ายเทพลังงานแสงระหว่างท่อนำคลื่น A และ B ภายใต้เงื่อนไขเฟสเท่ากัน.....	51
3.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังแสงที่ถ่ายเทไปท่อนำคลื่น A เทียบกับเฟสที่ไม่เท่ากันของท่อนำคลื่น.....	51
3.18 แสดงการถ่ายเทพลังงานแสงระหว่างท่อนำคลื่น A และ B ภายใต้เงื่อนไขเฟสไม่เท่ากัน.....	52
3.19 แสดงระบบท่อนำคลื่นแบบคอมโพสิทที่ประกอบด้วยท่อนำคลื่น 1 และ 2.....	53
4.1 แสดงส่วนประกอบของสำคัญของเส้นใยนำแสง.....	57
4.2 แสดงเส้นใยนำแสงขั้นบันไดแบบหลายโหมด.....	58
4.3 แสดงเส้นใยนำแสงขั้นบันไดแบบโหมดเดียว.....	59
4.4 แสดงเส้นใยนำแสงเกรดอินเดคซ์แบบหลายโหมด.....	59
4.5 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพีเอ็มเอ็มเอ.....	60
4.6 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ PS.....	61
4.7 แสดงกระบวนการหลอมวัสดุดิบ.....	62
4.8 แสดงกระบวนการที่ใช้แท่งพรีฟอร์ม.....	62
4.9 แสดงกรวยรับแสงของเส้นใยนำแสง.....	63
4.10 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดชนิดฟาบรีเพโรท์.....	69
4.11 แสดงความสัมพันธ์กระแสที่ป้อนให้แก่เลเซอร์ไดโอดกับกำลังแสงที่ปล่อยออกมา.....	70
4.12 แสดงตำแหน่งของการมอดูเลตสัญญาณให้กับเลเซอร์ไดโอดได้สูงสุด.....	72
4.13 แสดงการไบแอสย้อนกลับของพินโฟโตไดโอด.....	73
4.14 แสดงโครงสร้างของซิติคอนพินโฟโตไดโอด.....	74
4.15 แสดงการเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮลของในพินโฟโตไดโอด.....	75
5.1 แสดงส่วนตรวจจับสร้างโดยใช้เทคนิคการบิดเกลียวของ เอ. สุชาโดลนิก.....	80
5.2 แสดงทิศทางการการขาดปลายเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกโดยหมุนวนมือเป็นเลข 8.....	80

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.3 แสดงชุดอุปกรณ์สำหรับจัดปลายเส้นใยนำแสง.....	81
5.4 แสดงเส้นใยนำแสงที่ปลอกส่วนของแจ็กเก็ตออกเพื่อเตรียมสำหรับการทำคู่ควบ.....	82
5.5 แสดงคู่ควบชนิดบิตเกลียวที่สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับการทดลอง.....	82
5.6 แสดงเครื่องกัดโลหะที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องจัดเส้นใยนำแสง.....	83
5.7 แสดงขั้นตอนการสร้างคู่ควบโดยวิธีการขัด.....	84
5.8 แสดงการวัดความสูญเสียโดยเทคนิคการตัดสั้น.....	85
5.9 แสดงระบบที่ใช้ในการทดลองวัดการลดทอนสัญญาณ โดยใช้เทคนิคการตัดสั้น.....	86
5.10 แสดงระบบที่ใช้ในการวัดกำลังแสงเอาต์พุตของคู่ควบเพื่อเปรียบเทียบวิธีการสร้างคู่ควบ....	87
5.11 แสดงการตกกระทบในแนวเส้นปกติของแสง.....	89
5.12 แสดงระบบทดลองที่ใช้ในการวัดกำลังแสงเอาต์พุตของคู่ควบที่ใช้ตัวกลาง ที่มีค่าดัชนีหักเหแสงต่างๆ.....	91
5.13 แสดงการลดทอนแสงของวัสดุโพลิเมทิลเมตอะไครเลทที่ความยาวคลื่นต่างๆ.....	92
5.14 แสดงระบบทดลองที่ใช้ในการวัดกำลังแสงเอาต์พุตของคู่ควบเมื่อมีการเปลี่ยน แหล่งกำเนิดแสงเป็นแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่างๆ.....	93
6.1 แสดงการลดทอนความเข้มแสงเทียบกับความยาวเส้นใยนำแสง.....	96
6.2 แสดงค่าออร์มัลไลซ์ความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุตที่ความยาวระยะคัปปลิงต่างๆ.....	100
6.3 แสดงอัตราส่วนการคัปปลิงที่ระยะคัปปลิงต่างๆ.....	100
6.4 แสดงค่าออร์มัลไลซ์ความเข้มแสงเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าดัชนีหักเห รอยต่อคัปปลิงเป็นอากาศ น้ำ และกลีเซอริน .....	103
6.5 แสดงแผนภูมิแสดงอัตราส่วนการคัปปลิงที่ค่าต่างๆเมื่อเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง....	104
6.6 แสดงอัตราการคัปปลิงที่ความยาวคลื่นต่างๆของคู่ควบ C1.....	108
6.7 แสดงอัตราการคัปปลิงที่ความยาวคลื่นต่างๆของคู่ควบ C2.....	108
6.8 แสดงอัตราการคัปปลิงที่ความยาวคลื่นต่างๆของคู่ควบ C3.....	109
6.9 แสดงอัตราการคัปปลิงที่ความยาวคลื่นต่างๆของคู่ควบ C4.....	109
6.10 แสดงอัตราการคัปปลิงที่ความยาวคลื่นต่างๆของคู่ควบ C5.....	110
6.11 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่รอยต่อของเส้นใยนำแสงของคู่ควบ.....	115
6.12 แสดงค่าการสะท้อนของแสงที่รอยต่อผิวที่ 1 ที่มุมตกกระทบต่างๆ เมื่อแสงเดินทาง จากคอร์ของพอร์ตอินพุตไปยังตัวกลางในการเชื่อมต่อของคู่ควบ.....	115

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.13 แสดงค่าการสะท้อนของแสงที่รอยต่อผิวที่ 2 ที่มุมตกกระทบต่างๆ เมื่อแสงเดินทาง จากตัวกลางในการเชื่อมต่อของ คู่ควมไปย้งคอร์ของพอร์ตอินพุต.....	116
7.1 แสดงการประกบคู่ควมแบบ 2x2 ที่สร้างโดยวิธีการจัดเป็นคู่ควมแบบ 4x4.....	120

# บทที่ 1

## บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของเส้นใยนาแสงชนิดพลาสติกและสร้างอุปกรณ์คู่ควบจากเส้นใยนาแสงชนิดพลาสติก รวมถึงการศึกษาคุณลักษณะการคัปปลิงของคู่ควบดังกล่าว ซึ่งรายละเอียดในส่วนที่มา วัตถุประสงค์และการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยดังต่อไปนี้

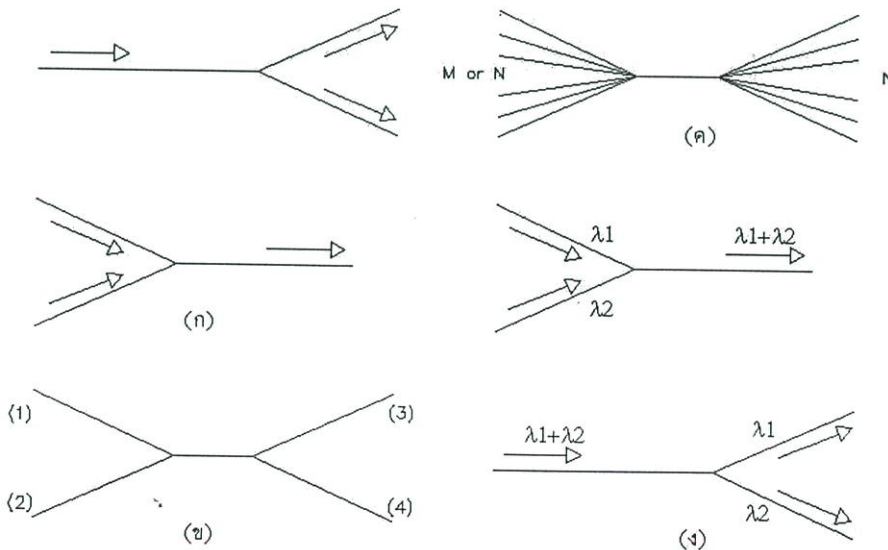
### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

สังคมโลกกำลังอยู่ในช่วงก้าวของคลื่นลูกที่สาม ซึ่งเป็นยุคของสังคมการสื่อสาร ความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ได้ย่อโลกให้เล็กลง เทคโนโลยีด้านสื่อสารที่รวดเร็วจนนั้นได้ส่งผลกระทบต่อทั้งระบบเศรษฐกิจ การเมือง และการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าท่านต้องการซื้อหนังสือเกี่ยวกับทฤษฎีทางแสงที่เพิ่งออกวางตลาดที่นิวยอร์กเมื่อวานท่านก็เพียงเข้าไปสั่งซื้อที่เว็บไซต์ของร้านหนังสือ อีกอาทิตย์ข้างหน้าท่านก็จะได้รับหนังสือที่ท่านต้องการ ขณะที่เรากำลังได้อยู่บนคลื่นลูกที่สามนี้สังคมโลกมีความต้องการระบบสื่อสารที่สามารถรองรับการสื่อสารด้วยข้อมูลจำนวนมากๆในคราวเดียวกัน การสื่อสารด้วยสัญญาณแสงจึงก้าวเข้ามามีบทบาทแทนที่การสื่อสารด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

กุญแจสำคัญอย่างหนึ่งของการนำเทคโนโลยีใหม่ๆมาใช้งานให้ประสบความสำเร็จคือความสามารถในการพัฒนาทางด้านวัสดุศาสตร์ให้สามารถรองรับกับความต้องการของเทคโนโลยีนั้นๆ ซึ่งวัสดุที่พัฒนาขึ้นมานี้ควรมีความเหมาะสมทางโครงสร้างของราคาสำหรับการผลิตในภาคอุตสาหกรรมด้วย ในอดีตที่ผ่านมาเทคโนโลยีวัสดุศาสตร์ได้มอบของขวัญแก่นุษย์เรามากมายของของขวัญชิ้นสำคัญที่ถือเป็นนวัตกรรมที่ได้พลิกโฉมหน้าของโลกเราไปตลอดกาลคือ พลาสติก นับตั้งแต่วันที่ได้ถูกผลิตขึ้นพลาสติกก็ได้มีส่วนสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีอื่นๆมากมายตั้งแต่แปรงสีฟันที่คุ้นแปรงยามเช้าจนถึงสวิทช์ไฟดวงสุดท้ายที่คุณปิดก่อนนอน ตั้งแต่ภายนอกร่างกายมนุษย์จนถึงชิ้นส่วนอวัยวะเทียมภายในร่างกายมนุษย์ ในด้านเทคโนโลยีการสื่อสารเหตุผลที่มีการเลือกใช้งานวัสดุประเภทพลาสติกในช่วงแรกๆเนื่องจากคุณสมบัติความเป็นฉนวนและค่าไดอิเล็กทริกของวัสดุ เมื่อความรู้ทางด้านวัสดุศาสตร์มีการพัฒนาเพิ่มมากขึ้น พลาสติกจึงได้ถูกนำมาใช้งานในหน้าที่อื่นได้แก่ การนำมาสร้างเป็นวัสดุตัวกลางเช่น เลนส์ จากนั้นก็ได้พัฒนาให้ซับซ้อนขึ้นได้แก่ การเป็นตัวกลางการรับส่ง การตรวจจับและรวมสัญญาณแสง เป็นต้น มีการนำวัสดุประเภทพลาสติกชนิดต่างๆ ได้แก่ โพลีเมทิลเมทาไครเลท (polymethyl methacrylate, PMMA) และเฮกซะฟลูออโรไอโซโพรพิลฟลูออโรอะคริเลท (hexafluoroisopropyl 2-fluoroacrylate, HFIP 2-PA)

เป็นต้น มาใช้ในงานวิจัยเพื่อการสร้างอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับระบบการสื่อสารด้วยแสง [1 – 4] ในปี ค.ศ. 1960 บริษัทชาวอเมริกันได้พัฒนาเส้นใยนำแสงจากวัสดุชนิดพลาสติก (Plastic Optical Fibre, POF) และเช่นเดียวกับเส้นใยนำแสงที่ทำจากวัสดุประเภทแก้ว เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกมีข้อได้เปรียบหลายอย่างได้แก่ ความไม่มีผลกระทบจากการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความทนทาน ความสามารถในการส่งข้อมูลจำนวนมากๆสามารถใช้ในช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา และคุณสมบัติในการเชื่อมด้วยสีต่างๆ ลงในเนื้อวัสดุโดยไม่ลดความสามารถของความเร็วแสง อย่างไรก็ตามอุปสรรคใหญ่ในการนำวัสดุประเภทพลาสติกมาใช้งานในด้านการรับส่งสัญญาณแสงคือ ความโปร่งใสของวัสดุ แต่ก็ได้มีการทำวิจัยต่างๆเพื่อสนับสนุนการใช้เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกได้แก่ ลดการลดทอน การเพิ่มความสามารถในการต้านทานอุณหภูมิและการเพิ่มอายุการใช้งาน เป็นต้น

ในระบบแสงนั้นมีอุปกรณ์พื้นฐานทางแสงหลายๆชนิดถือเป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ (Passive devices) นั่นคือ อุปกรณ์เหล่านี้ไม่ต้องการกำลังหรือพลังงานจากแหล่งอื่นๆในการทำงานรับส่งสัญญาณแสง ดังนั้นเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกที่ได้กล่าวข้างต้นถือเป็นอุปกรณ์ชนิดพาสซีฟเช่นกันตามความหมายนี้ อุปกรณ์พื้นฐานทางแสงที่เป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟที่สำคัญสำหรับระบบการสื่อสารด้วยแสงอีกชนิดหนึ่งคือ คู่ควบ (Coupler) โดยหน้าที่ที่สำคัญของคู่ควบในระบบสื่อสารคือ การรวมกำลังแสงจากทุกอินพุตไปแบ่งที่เอาต์พุตต่างๆ โดยการรวมกำลังแสงของคู่ควบสามารถทำได้หลายรูปแบบเมื่อแบ่งตามหน้าที่การรวมและแบ่งกำลังแสงดังแสดงในรูปที่ 1.1



**รูปที่ 1.1** แสดงคู่ควบเมื่อทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ชนิดต่างๆ (ก) อุปกรณ์แยกและรวมแสง (Splitter and Combiner) (ข) คู่ควบแบบ 2x2 (2x2 Coupler) (ค) คู่ควบแบบดาว (Star Coupler) และ (ง) อุปกรณ์มัลติเพลกซ์และดีมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น (Wavelength Multiplexer and Demultiplexer)

ในการสร้างคู่ควบนั้นสำหรับกรณีวัสดุที่ใช้ในการทำคู่ควบเป็นเส้นใยนำแสงชนิดแก้ว การสร้างคู่ควบโดยวิธีการเชื่อมเส้นใยนำแสงสองเส้นด้วยกันโดยใช้ความร้อนเป็นที่นิยมมาก [5 – 8] เนื่องจากสามารถควบคุมขั้นตอนในการผลิตได้อย่างแน่นอน คู่ควบที่สร้างโดยวิธีนี้เรียกว่า คู่ควบเส้นใยนำแสงชนิดหลอมรวม (Fused Optical Fiber Coupler) อย่างไรก็ตามการสร้างคู่ควบจากวิธี การนี้ไม่เหมาะสมสำหรับกรณีของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกเนื่องจากจุดหลอมเหลวของวัสดุ ชนิดพลาสติกค่อนข้างต่ำ(อยู่ในระดับร้อยองศาเซลเซียส) ดังนั้นถ้าต้องการสร้างคู่ควบจากวัสดุ ชนิดพลาสติกสมควรที่จะใช้วิธีการอื่น ในปี ค.ศ. 1978 มร. วาย สุกิโมโตและคณะ (Y. Tsujimoto et. al.) [9] ได้ทำการวิจัยในการสร้างคู่ควบชนิดแก้วโดยใช้วิธีการขัด(Polished Method)โดยขัดส่วน ข้างของเส้นใยนำแสงสองเส้นแล้วนำเส้นใยนำแสงทั้งสองประกบกัน จากผลการทดลองพบว่าคู่ ควบที่สร้างสามารถแสดงตัวเป็นคู่ควบชนิด 3 dB ได้ และในปี ค.ศ. 1997 มร. จี เจียงและคณะ (G. Jiang et. al.) [10] ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติการคับปลิงของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกกับระบบ เลนส์โดยในการเตรียมปลายเส้นใยนำแสงสำหรับการตรวจวัดนั้น คณะวิจัยได้ใช้วิธีการขัดในการ เตรียมเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกเช่นกัน

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นได้แสดงว่า วิธีการขัดเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการ สร้างคู่ควบชนิดแก้ว นอกจากนี้ยังมีการนำเทคนิคนี้มาประยุกต์ในการวัดคุณสมบัติของเส้นใยนำ แสง แนวทางการศึกษาของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการสร้างคู่ควบจากเส้นใยนำแสงชนิด พลาสติกโดยวิธีการขัดที่มีความเหมาะสมเพียงพอสำหรับการสื่อสารในระยะทางสั้นๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการลดทอนของแสงของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกโดยวิธีการตัดสั้น
- 1.2.2 เพื่อศึกษาคูณลักษณะการคับปลิงของคู่ควบที่สร้างขึ้น
- 1.2.3 เพื่อศึกษาเทคนิคการสร้างและพัฒนาคู่ควบเพื่อวางแนวทางสำหรับการสร้างต้นแบบ ของคู่ควบจากเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก
- 1.2.4 เพื่อศึกษาความสำคัญของค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่เชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสง ของคู่ควบ
- 1.2.5 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงกับอัตราส่วนการ คับปลิง

## 1.3 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในเรื่องการศึกษาคูณสมบัติการคับปลิงของอุปกรณ์คู่ควบที่สร้างจาก เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกโดยวิธีการขัด เริ่มต้นด้วยการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีการเดินทางของแสง

ในเส้นใยนำแสงและทฤษฎีการคับปลิงแสงของเส้นใยนำแสงเพื่อเป็นพื้นฐานความเข้าใจสำหรับการศึกษา ต่อจากนั้นจึงเริ่มทดลองด้วยการศึกษาคุณสมบัติในการลดทอนสัญญาณแสงของเส้นใยนำแสงพลาสติกโดยการทดลองวัดการลดทอนสัญญาณได้ใช้เทคนิคการตัดสั้น จากนั้นศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคในการสร้างคู่ควบโดยใช้วิธีบิตเกลียวและวิธีขัด ในการทดลองได้เปรียบเทียบกำลังแสงเอาต์พุตที่ได้จากคู่ควบที่สร้างจากทั้งสองวิธีพบว่า คู่ควบที่สร้างจากวิธีการขัดให้กำลังแสงที่เอาต์พุตสูงกว่าที่ดีกว่าและสามารถควบคุมขั้นตอนการผลิตได้ง่ายกว่าวิธีบิตเกลียว ดังนั้นในการศึกษาขั้นตอนต่อไปจึงเลือกวิธีการขัดเป็นการสร้างคู่ควบโดยสร้างคู่ควบด้วยวิธีขัดให้มีความยาวคับปลิงต่างๆดังนี้ 9.41, 11.41, 12.38, 13.15 และ 15.35 มิลลิเมตร ตามลำดับเพื่อศึกษาคุณลักษณะการคับปลิงของคู่ควบโดยการเปลี่ยนระยะการคับปลิง จากนั้นทำการทดลองศึกษาผลการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่มีต่อคุณลักษณะการคับปลิงโดยใช้ตัวกลางดังนี้ อากาศ น้ำ และ กลีเซอริน ในงานวิจัยได้มีการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของอัตราการคับปลิงการคับปลิงเมื่อได้เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 632.8, 670 และ 785 นาโนเมตร และแอลอีดีที่มีความยาวคลื่น 850 นาโนเมตรตามลำดับ

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

การศึกษางานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางให้ทราบถึงลักษณะการลดทอนสัญญาณแสงในเส้นใยนำแสงโดยวิธีการตัดสั้น คุณลักษณะของคู่ควบซึ่งทำให้สามารถนำไปใช้งานได้ตามความเหมาะสม และสามารถประยุกต์การวัดการลดทอนโดยวิธีตัดสั้นเป็นมาตรฐานในการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเส้นใยนำแสงได้ ทั้งเป็นการสนับสนุนการพัฒนาต้นแบบของอุปกรณ์คู่ควบที่สร้างจากเส้นใยนำแสงพลาสติกโดยใช้เทคนิคการขัดและสามารถนำเทคนิคในการสร้างไปพัฒนาอุปกรณ์แสงอื่นๆ ได้แก่ สวิตช์ ฟิวเตอร์และอุปกรณ์มัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น เป็นต้น ในงานวิจัยยังได้ศึกษาทฤษฎีการคับปลิงแสงซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญซึ่งใช้อธิบายสำหรับการศึกษาสาขาวิชาออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ การป้อนแสงเข้าเส้นใยนำแสง อุปกรณ์คู่ควบ และสวิตช์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ทราบถึงแนวทางในการนำคู่ควบที่สร้างขึ้นไปใช้งานสื่อสารในระยะสั้น

## บทที่ 2

### หลักการพื้นฐานทางแสง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานทางแสงที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยได้แก่ ความเป็นมาของการศึกษาเรื่องแสง ปรัชญาการพื้นฐานทั้ง 4 คือ การสะท้อน การหักเห การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน โดยเนื้อหาที่กล่าวถึงในบทนี้จะได้อธิบายเฉพาะส่วนที่มีความสำคัญเพื่อนำไปอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 ความเป็นมาของการศึกษาเรื่องแสง

คุณสมบัติเด่นอย่างหนึ่งของแสงคือ การเดินทางเป็นเส้นตรงซึ่งคุณสมบัตินี้แสดงด้วยความคมชัดของเงาและลำของแสงที่ส่องสว่างเป็นลำเข้าไปในห้องมืดโดยผ่านทางรูเล็กๆ ในยุคกรีกโบราณนักปราชญ์เชื่อว่าการมองเห็นเกิดจากการที่แหล่งกำเนิดแสงต่างๆ เช่น ดวงอาทิตย์ ปล่อยแสงออกมาและถูกจับได้ด้วยตาของมนุษย์

ในศตวรรษที่ 17 ไอแซค นิวตัน (Isaac Newton) ผู้ค้นพบแรงโน้มถ่วงและเสนอทฤษฎีกลศาสตร์ต่างๆ ได้เสนอทฤษฎีอนุภาค (Particle theory) ของแสงในงานเขียนชื่อ Optics โดยเสนอไว้ว่า แสงเป็นลำของอนุภาคเล็กๆ ที่หลุดออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง สามารถทะลุผ่านวัตถุโปร่งใสและสะท้อนกับผิวที่ทึบแสงได้ โดยทฤษฎีนี้สามารถนำไปอธิบายปรากฏการณ์การสะท้อน (Reflection) และการหักเห (Refraction) ของแสงได้

ในยุคสมัยเดียวกันกับนิวตันในปี ค.ศ. 1687 นักดาราศาสตร์ชาวดัตช์ คริสเตียน ฮอยเกนส์ (Christian Huygens) ได้เสนอแนวความคิด(ในงานเขียนทฤษฎีคลื่นชื่อ Treatise on Light) ว่า แสงมีการเคลื่อนที่เหมือนคลื่นที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดในทุกทิศทุกทางและเดินทางผ่านตัวกลางยืดหยุ่นที่เรียกว่า อีเธอร์ (Ether) จากการทดลองของฮอยเกนส์ พบว่า แสงสองลำสามารถรวมกันโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับกรณีของคลื่นน้ำ โดยทฤษฎีนี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์การสะท้อนและการหักเหได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายปรากฏการณ์การหักเหซ้อน(Double Refraction)ในโครงสร้างของแคลไซต์(Calcite)ได้อีกด้วย แต่ทฤษฎีนี้ไม่เป็นที่ยอมรับด้วยเหตุผลหลายประการเช่น ถ้าแสงเป็นคลื่นต้องสามารถเลี้ยวเบนได้เมื่อพบสิ่งกีดขวาง ซึ่งในขณะนั้นไม่สามารถสังเกตการเลี้ยวเบนของแสงได้ เป็นต้น ต่อมานักวิทยาศาสตร์ชื่อ ฟรานเชสโก กริมาลดี (Francesco Grimaldi) ได้ทำการทดลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าแสงสามารถเลี้ยวเบนได้และได้เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเลี้ยวเบน (Diffraction)

ในปี ค.ศ. 1821 ออกัสติน เฟรสเนล (Augustin Fresnel) ได้ตีพิมพ์ผลการทดลองและการวิเคราะห์ของเขา ที่ยืนยันว่าแสงสามารถเลี้ยวเบนได้เมื่อพบสิ่งกีดขวาง โดยในการทดลองเขาได้จัด

ให้แหล่งกำเนิดแสงวางอยู่ห่างๆจากฉากกันและมีสิ่งกีดขวางวางอยู่ระหว่างกลางเป็นระยะห่างพอสมควร โดยสิ่งกีดขวางมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของแสงนั้น จากการทดลองจะสังเกตเห็นการเลี้ยวเบนของแสงได้ที่ฉาก การเลี้ยวเบนของแสงในลักษณะนี้เรียกว่า การเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนล (Fresnel diffraction) ต่อมาในปี ค.ศ. 1827 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ชื่อ โทมัส ยัง (Thomas Young) ได้ทำการทดลองเรื่องสลิตคู่ โดยจัดให้แสงความยาวคลื่นเดี่ยววิ่งผ่านช่องเล็กๆที่วางอยู่ใกล้ๆกัน รูปแบบของเงาที่ปรากฏบนฉากพบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับที่ปรากฏในคลื่นน้ำ ดังนั้นการทดลองของยังจึงเป็นการสนับสนุนทฤษฎีคลื่นของแสง

จากผลงานวิจัยในแนวไฟฟ้าและแม่เหล็ก ปี ค.ศ. 1862 นักวิทยาศาสตร์ชาวสก็อตชื่อ เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) ได้เสนอทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave theory) ที่ว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กซึ่งมีทิศของการสั่นตั้งฉากกัน มีความเร็วในสุญญากาศเท่ากับความเร็วแสง ซึ่งในทฤษฎีนี้ถือว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปหนึ่ง นอกจากนี้แมกซ์เวลล์ยังได้รวบรวมสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations)

ในปี ค.ศ. 1887 เฮิร์ตซ์(Hertz) ได้ใช้วงจรกำเนิดความถี่สร้างคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นมากเรียกว่าไมโครเวฟ (Microwave) และแสดงให้เห็นว่าคลื่นนี้มีคุณสมบัติของคลื่นแสงครบทุกประการ กล่าวคือสามารถสะท้อนได้ หักเหได้ โฟกัสไปรวมกันที่จุดหนึ่งโดยใช้เลนส์ได้ และมีคุณสมบัติการโพลาไรซ์เช่นเดียวกับคลื่นแสง เฮิร์ตซ์จึงสรุปว่า แสงคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปหนึ่ง

จากการค้นพบของแมกซ์เวลล์และเฮิร์ตซ์ทำให้นักวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่ในขณะนั้นเชื่อกันว่าแสงนอกจากเป็นคลื่นแล้วยังเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอีกด้วย

ปี ค.ศ. 1900 แมกซ์ แพลงค์ (Max Planck) ได้พิสูจน์ว่า การแผ่รังสีของวัตถุดำมีการแผ่พลังงานแบบไม่ต่อเนื่อง พลังงาน E ของควอนตัมหนึ่งๆของการแผ่รังสีจะเป็นสัดส่วนกับความถี่ของการแผ่รังสีดังสมการ

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

โดยที่ h คือค่าคงที่ของพลังค์มีค่า  $6.63 \times 10^{-34}$  J-s

5 ปีต่อมาในปี ค.ศ. 1905 อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ได้อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ว่า อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากผิวของโลหะเมื่อมีแสงมาตกกระทบ จุดที่น่าสนใจของงานนี้คือ การคิดว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่  $\nu$  ที่ตกกระทบบนผิวโลหะ มีลักษณะเป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยกลุ่มพลังงานเล็กๆ ที่เรียกว่า ควอนตัมของพลังงาน (Quantum of energy) หรือ โฟตอน (Photon) ที่มีพลังงานเท่ากับ  $h\nu$  เมื่อโฟตอนตกกระทบบนผิวโลหะและชน

กับอิเล็กตรอน โฟตอนจะคายพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน หากพลังงานนี้มากพอก็จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ

ภายหลังจากงานของแพลงค์และไอน์สไตน์ นักวิทยาศาสตร์เริ่มให้ความสนใจกับปรากฏการณ์ต่างๆ ในระดับจุลภาคมากขึ้น ซึ่งฟิสิกส์ยุคเก่าไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์เหล่านี้ได้ ทำให้เกิดความรู้แขนงใหม่ขึ้นที่เรียกว่า ทฤษฎีควอนตัม (Quantum theory) ซึ่งเน้นที่จะศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคขนาดเล็กในระดับอะตอม

ในปี ค.ศ. 1913 นีล บอร์ ได้เสนอผลงานสนับสนุนเรื่อง ควมตัมของการแผ่รังสีจากการศึกษาการดูดกลืนและคายพลังงานของไฮโดรเจนอะตอม ปี ค.ศ. 1922 อาร์เธอร์ คอมพ์ตัน (Arthur Compton) ได้ทำการทดลองโดยฉายรังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดียวลงบนแท่งกราฟไฟท์ พบว่าจะมีรังสีเอ็กซ์กระเจิงออกมาเป็นมุมต่างๆ เทียบกับแนวตกกระทบ โดยรังสีที่กระเจิงออกมานี้ส่วนหนึ่งมีความยาวคลื่นเท่าเดิมและอีกส่วนหนึ่งมีความยาวคลื่นมากกว่าเดิม ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า ปรากฏการณ์คอมพ์ตัน (Compton effect) หรือปรากฏการณ์การกระเจิงของคอมพ์ตัน (Compton scattering) โดยที่รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นนี้คอมพ์ตันอธิบายว่าเป็นอนุภาคที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วแสงและมีพลังงานเท่ากับ  $h\nu$  การทดลองของคอมพ์ตันแสดงให้เห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแสดงคุณสมบัติเป็นอนุภาคได้

จากการประสบความสำเร็จในการใช้โฟตอนหรือโมเดลของอนุภาคในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ในปี ค.ศ. 1924 หลุยส์ เดอ บรอกลี (Louis De Broglie) ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับทวิภาพของคลื่นและอนุภาค (Wave-Particle duality) นั่นคือ อนุภาคที่มีโมเมนตัม  $p$  จะมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นดังสมการ

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2.2)$$

โดยที่  $h$  คือ ค่าคงที่ของแพลงค์

ทฤษฎีนี้ได้รับการสนับสนุนจากการทดลองในช่วงปี ค.ศ. 1927-1928 ของคลินตัน เดวิสสัน (Clinton Davisson) กับเลสเตอร์ เจอร์เมอร์ (Lester Germer) ชาวสหรัฐอเมริกาและของท่านเซอร์ จอร์จ ทอมสัน (Sir George Thomson) ชาวอังกฤษ

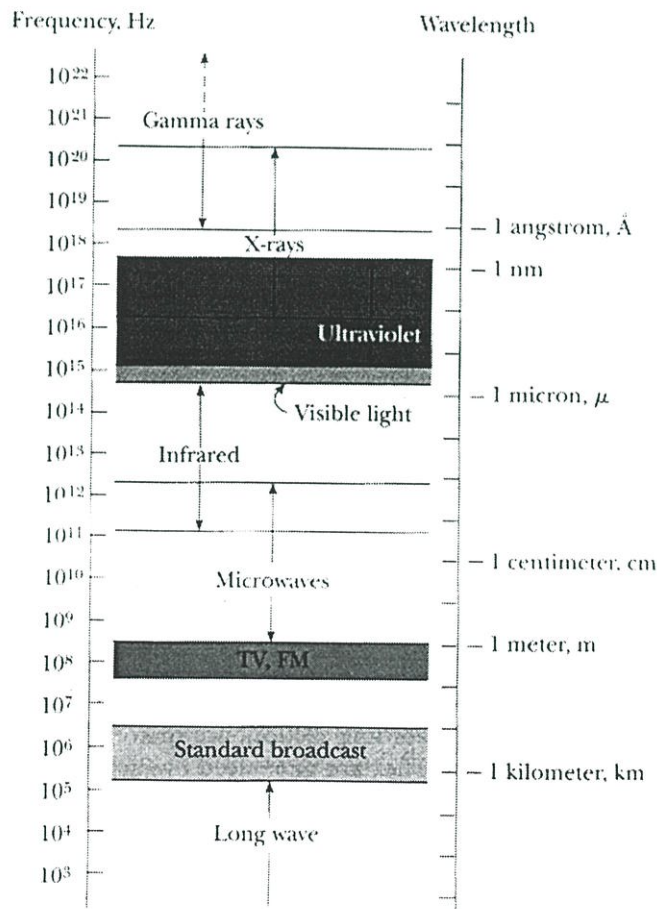
จากที่กล่าวมาทฤษฎีทวิภาพของคลื่นและอนุภาคก็ทำให้แสงสามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ได้ แสงแสดงลักษณะคลื่นในปรากฏการณ์การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน และแสดงลักษณะของอนุภาคในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและปรากฏการณ์คอมพ์ตัน ดังนั้นปัจจุบันถือว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค

## 2.2 ธรรมชาติของแสง (Nature of light)

### 2.2.1 ความเร็วของแสง (The speed of light)

แสงเป็นช่วงแคบๆของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรตินาของดวงตามนุษย์สามารถตรวจจับได้ ความยาวคลื่นของแสงมีค่าอยู่ระหว่าง  $7.8 \times 10^{-7}$  เมตรจนถึง  $3.8 \times 10^{-7}$  เมตรและมีความถี่ในช่วง  $4 \times 10^{14}$  Hz จนถึง  $8 \times 10^{14}$  Hz ความรู้สึกทางประสาทของมนุษย์จะตอบสนองต่อแสงและสามารถแยกแยะแสงเป็นสีต่างๆแตกต่างกันไปตามความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงนั้น

ในการคำนวณค่าความเร็วแสงต้องอาศัยความเฉลียวฉลาดเป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่ากาลิเลโอจะไม่ประสบความสำเร็จในการวัดแต่ก็เป็นที่ยอมรับว่าความเร็วแสงมีค่าแน่นอนคงที่ ในปี ค.ศ. 1675 โอลัส โรเมอร์ (Olus Roemer) ได้ใช้ข้อมูลทางดาราศาสตร์คำนวณค่าความเร็วแสงได้  $2 \times 10^8$  m/s ถึงแม้ว่าค่าที่ได้จะไม่ถูกต้องแต่ก็อยู่ในระดับของกำลังเดียวกับค่าที่ใช้ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.1 แสดงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 แสดงความถี่และความยาวคลื่นของสเปกตรัมแสงที่ตาแยกแยะได้

สี	ความถี่ ( $\times 10^{14}$ Hz.)	ความยาวคลื่น ( $\times 10^{-7}$ m.)
ม่วง	7.69 – 6.59	3.90 – 4.55
น้ำเงิน	6.59 – 6.10	4.55 – 4.92
เขียว	6.10 – 5.20	4.92 – 5.77
เหลือง	5.20 – 5.03	5.77 – 5.97
ส้ม	5.03 – 4.82	5.97 – 6.22
แดง	4.82 – 3.84	6.22 – 7.80

การทดลองที่เชื่อถือได้ถูกทดลองในปี ค.ศ. 1849 โดย อาร์มานด์ เอช แอล ฟิเซอ (Armand H. L. Fizeau) เขาได้จัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 2.2 (ก) เพื่อวัดความเร็วแสงแหล่งกำเนิดแสงจะวางไว้หลังฟันเฟืองที่หมุนได้ด้วยความเร็วสูง แสงจะวิ่งทะลุผ่านกระจกเฉียงและผ่านระหว่างฟันเฟืองที่หมุนดังรูปที่ 2.2 (ข) แสงจะวิ่งตกกระทบกระจกเรียบและสะท้อนกลับเป็นเส้นตรง ถ้าความเร็วแสงมีค่าเร็วมากแสงควรสะท้อนกลับมาระหว่างช่วงฟันที่ 1 และฟันที่ 2 ซึ่งเป็นช่องเดียวกันกับแสงเดินทางไปและเป็นอิสระต่อความเร็วในการหมุนของฟันเฟืองดังภาพที่ 2.2 (ค) แต่แสงเดินทางด้วยความเร็วที่แน่นอนจะสามารถเดินทางกลับช่องเดิมได้ก็ต่อเมื่อความเร็วของฟันเฟืองช้ามากๆ ถ้าฟันเฟืองหมุนเร็วขึ้นและความเร็วแสงมีค่าคงที่  $c$  ดังนั้นที่ค่าความเร็วในการหมุนที่แน่นอนค่าหนึ่ง ฟันเฟืองจะหมุนได้พอดีกับเวลาที่แสงเดินทางไปยังกระจกเรียบและสะท้อนกลับมายังฟันเฟืองซี่ที่ 2 ดังรูปที่ 2.2 (ง) ขณะนี้จะไม่มีการตกกระทบตาผู้สังเกต เมื่อหมุนฟันเฟืองให้เร็วขึ้นแสงจะตกกระทบตาผู้สังเกตอีกครั้งแต่แสงจะวิ่งสะท้อนผ่านที่ฟันซี่ที่ 2 กับซี่ที่ 3 ดังรูปที่ 2.2 (จ) ถ้าให้ความเร็วในการหมุนฟันเฟือง  $v$  ทำให้เกิดเหตุการณ์ดังรูปที่ 2.2 (จ) เป็นครั้งแรกสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของเวลา  $\frac{2D}{c}$  ที่แสงใช้ในการเดินทางไปกระทบกระจกเรียบและสะท้อนกลับกับ

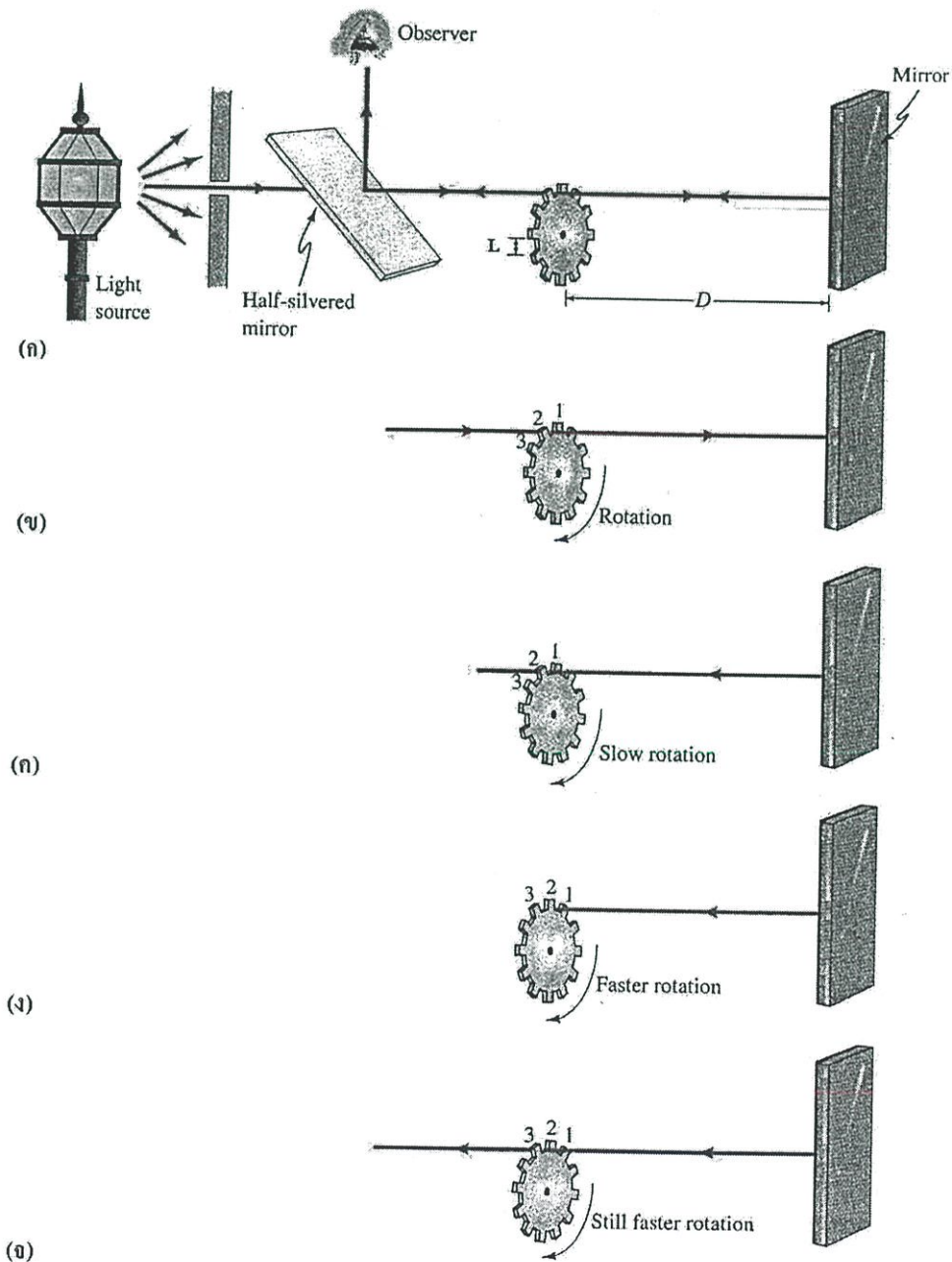
เวลา  $\frac{L}{v}$  ที่ฟันเฟืองใช้ในการหมุนไป 1 ซี่ได้ดังสมการ

$$\frac{L}{v} = \frac{2D}{c} \quad (2.3)$$

โดยที่  $L$  คือ ระยะห่างระหว่างฟันของฟันเฟือง

$D$  คือ ระยะจากล้อฟันเฟืองถึงกระจกเรียบ

ถ้าค่า  $D$  มีค่ามากกว่า  $L$  มาก ๆ ค่า  $v$  จะมีค่าน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับ  $c$  ซึ่งจะทำให้ความเร็วแสงที่คำนวณได้มีค่าแม่นยำมากขึ้นด้วย การที่จะวัดความเร็วแสงให้ได้ดีที่สุด ขึ้นอยู่ที่ความสามารถในการวัดเวลา(ปัจจุบันวัดค่าได้ในระดับ  $(\frac{1}{10^{13}}$ ) และระยะทาง(ปัจจุบันวัดได้ในระดับ  $(\frac{4}{10^9})$ ) ดังนั้นในปัจจุบันเรากำหนดค่าความเร็วแสงในสุญญากาศได้ 299,792,458 m/s แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถใช้ค่า  $3 \times 10^8$  m/s ได้



รูปที่ 2.2 การทดลองหาค่าความเร็วแสงของอาร์มานด์ เอช แอล พิเซอ

### 2.2.2 ค่าดัชนีหักเห (Refractive index)

ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางเอกพันธ์ต่างๆ แสงจะมีความเร็วเท่ากันในทุกๆ จุดและทุกทิศทาง ความเร็วของแสงจะขึ้นอยู่กับตัวกลางที่แสงเดินทางผ่าน การที่ความเร็วแสงเปลี่ยนเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางต่างๆ มีตัวแปรสำคัญคือ ดัชนีหักเหแสง (Refractive index) โดยค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วแสงในสุญญากาศ ( $c$ ) กับความเร็วของแสงในตัวกลางนั้นๆ ( $v$ ) แสดงได้ดังสมการที่ 2.4

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.4)$$

จากสมการนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่างๆ ความเร็วของแสงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าดัชนีหักเหแสงของแต่ละตัวกลาง

ในสุญญากาศค่าดัชนีหักเหมีค่าเท่ากับ 1 แต่สำหรับตัวกลางใดๆ ค่าดัชนีหักเหจะมีค่ามากกว่า 1 เสมอ โดยค่าดัชนีหักเหของตัวกลางนอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางแล้วยังขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางผ่านตัวกลางนั้น สำหรับค่าดัชนีหักเหของตัวกลางต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าดัชนีหักเหของตัวกลางต่างๆ โดยวัดด้วยแสงความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร

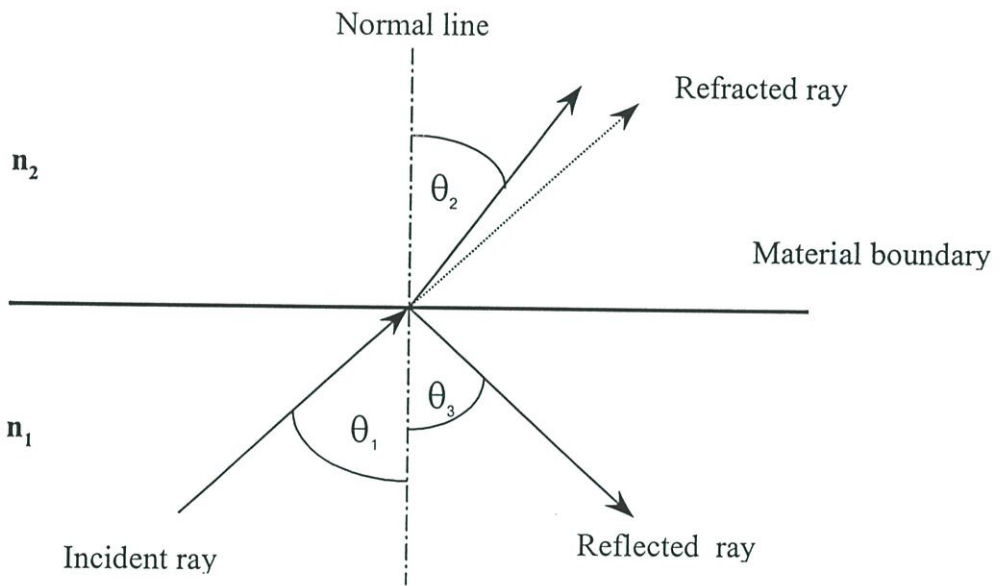
Substance	Refractive index	Substance	Refractive index
Solids at 20° C		Liquids at 20° C	
Diamond	2.419	Benzene	1.501
Fluorite (CaF <sub>2</sub> )	1.434	Carbon disulfide	1.628
Silica (SiO <sub>2</sub> )	1.458	Carbon tetrachloride	1.461
Glass, Crown	1.520	Ethyl alcohol	1.361
Glass, Flint	1.670	Glycerin	1.473
Ice (H <sub>2</sub> O)	1.309	Water	1.333
Polystyrene	1.490	Gases at 0°C, 1 atm	
Sodium chloride	1.544	Air	1.00293
Zircon	1.923	Carbon dioxide	1.00450

ต่อไปจะได้กล่าวถึงปรากฏการณ์ทางแสงที่สำคัญ 4 ปรากฏการณ์ซึ่งจะเป็นการปูพื้นฐานในการศึกษาเรื่องแสงได้แก่ กฎการสะท้อน การหักเห การแทรกสอด และการเลี้ยวเบน ต่อไป

### 2.2.3 กฎการสะท้อน (Law of reflection)

เมื่อแสงเคลื่อนที่ไปตกกระทบขั้วรอยต่อของตัวกลางแสงที่มีดัชนีหักเหแตกต่างกันสองตัวกลาง ( $n_1, n_2$ ) พบว่าบางส่วนของแสงสะท้อนกลับไปในตัวกลางแรก ( $n_1$ ) และแสงส่วนที่เหลือจะหักเหผ่านไปยังตัวกลางแสงที่สอง ( $n_2$ ) จากการสะท้อนของแสงจะพบว่ามุมของแสงที่ตกกระทบ ( $\theta_1$ ) จะมีค่าเท่ากับมุมของแสงที่สะท้อน ( $\theta_3$ ) เสมอ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า กฎการสะท้อน (Law of reflection) นั่นคือ

$$\theta_1 = \theta_3 \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.3 แสดงการสะท้อนและการหักเหของแสงที่รอยต่อของตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกันโดยมุมตกกระทบ  $\theta_1$  เท่ากับมุมสะท้อน  $\theta_3$  และ  $\theta_2$  คือ มุมหักเห (Angle of refraction) โดยมุมเหล่านี้จะวัดจากเส้นปกติ

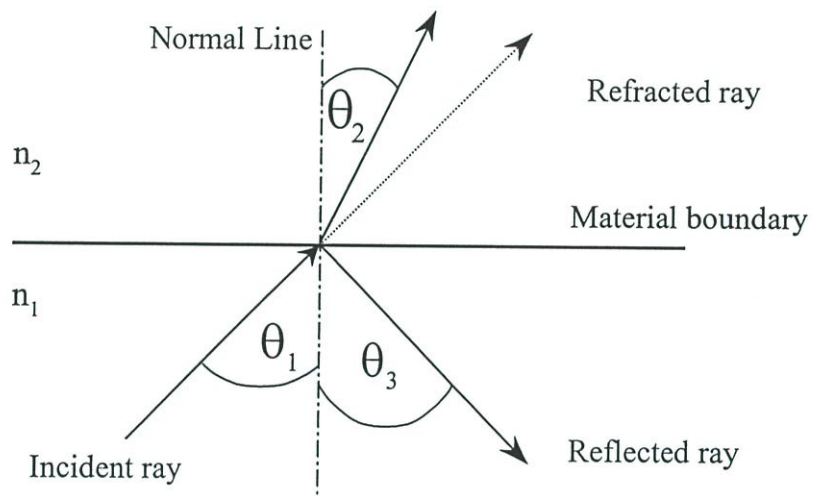
### 2.2.4 กฎการหักเห (Law of refraction)

จากรูปที่ 2.3 แสงที่ทะลุผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 จะมีแนวทางการเดินทางของแสงหักเหไปจากแนวทางการเดินทางเดิม การหักเหของแสงเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลต่างของความเร็วแสงในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกันสองตัวกลาง เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า กฎของสเนลล์ (Snell's Law) ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการหักเหและสะท้อนของแสงกับดัชนีหักเหแสงของตัวกลางทั้งสองดังสมการ

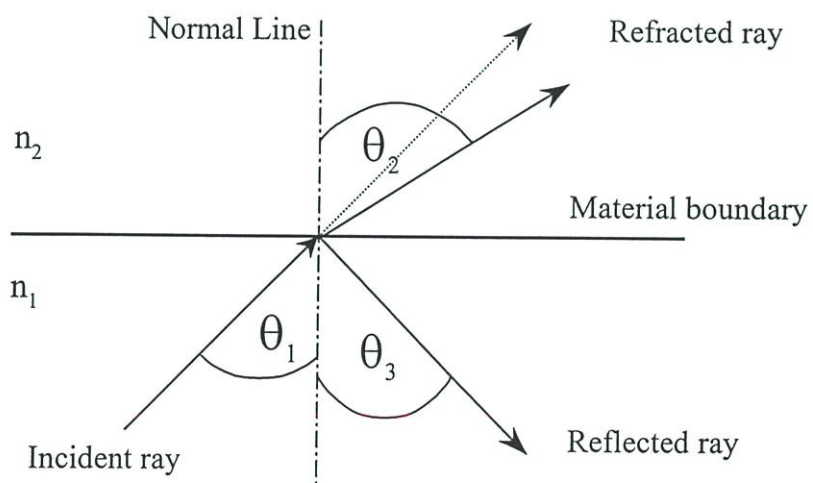
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $n_1$  และ  $n_2$  คือดัชนีหักเหแสงในตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ  $\theta_1$  คือมุมที่แนวทางการเดินทางของแสงตกกระทบเทียบกับแนวตั้งฉากกับรอยต่อตัวกลางทั้งสองและ  $\theta_2$  คือมุมหักเหแสงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของตัวกลาง

จากกฎของสเนลล์ในสมการที่ 2.6 ขนาดของมุมหักเหจะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางทั้งสอง โดยเมื่อกำหนดให้แสงเดินทางมาตกกระทบที่รอยต่อของตัวกลางมีค่าคงที่เป็นมุม  $\theta_1$  ถ้าค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 น้อยกว่าตัวกลางที่ 2 ( $n_1 < n_2$ ) มุมของการหักเหแสงเบนเข้าหาเส้นปกติดังรูปที่ 2.4 (ก) ในทางกลับกันค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 มากกว่าตัวกลางที่ 2 ( $n_1 > n_2$ ) แล้วมุมของการหักเหจะเบนออกจากเส้นปกติ ดังรูปที่ 2.4 (ข)



(ก)

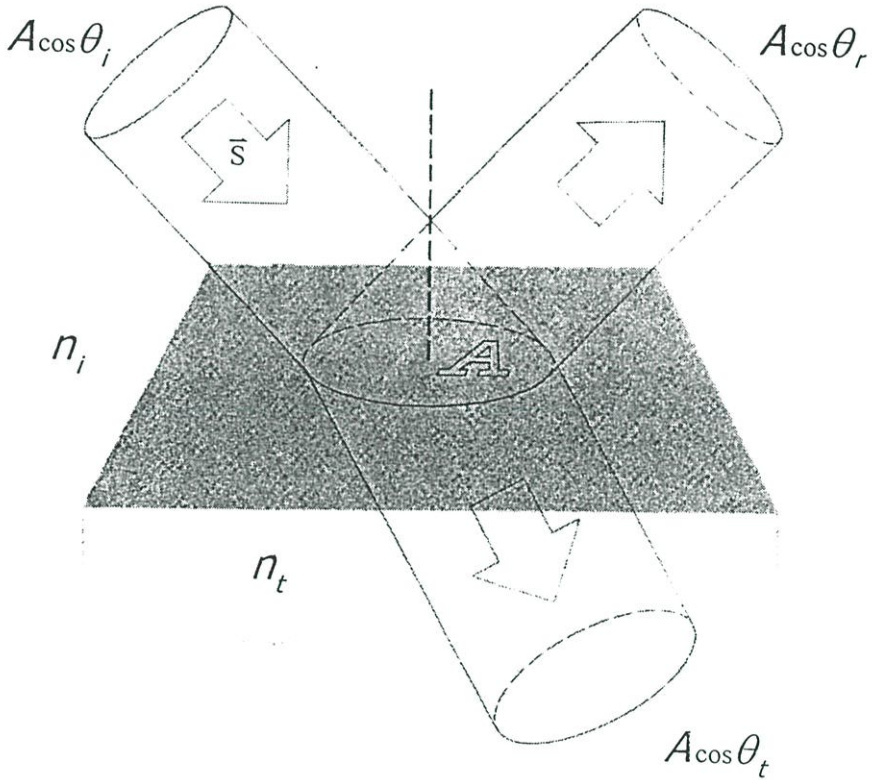


(ข)

รูปที่ 2.4 แสดงการหักเหของแสงเมื่อดัชนีหักเหแสงในแต่ละตัวกลางแตกต่างกัน เมื่อแสงตกกระทบรอยต่อผิวตัวกลางทำมุมตกกระทบคงที่ (ก) เมื่อ  $n_1 < n_2$  (ข) เมื่อ  $n_1 > n_2$

### 2.2.4.1 ค่าการสะท้อนและค่าการทะลุผ่าน (Reflectance and Transmittance)

เมื่อแสงเดินทางไปตกกระทบที่รอยต่อของสองตัวกลางใดๆที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกัน กำลังแสงส่วนหนึ่งจะเกิดการสะท้อนที่ผิวรอยต่อและเดินทางต่อไปในตัวกลางเดิม กำลังแสงส่วนที่เหลือจะเกิดการหักเหที่ผิวรอยต่อและเดินทางไปในตัวกลางที่ 2



รูปที่ 2.5 แสดงการสะท้อนและการทะลุผ่านของลำแสงตกกระทบ

พิจารณาลำแสงวงกลมที่ตกกระทบที่พื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะมีแสงสว่างออกมาเป็นพื้นที่  $A$  กำลังแสงต่อหน่วยพื้นที่ที่มีทิศทางกับเวกเตอร์จุด  $\vec{S}$  (Pointing vector) มีค่า

$$\vec{S} = c^2 \epsilon_0 \vec{E} \times \vec{B} \quad (2.7)$$

และค่าความหนาแน่นของรังสีของแสง (Radiant flux density,  $\text{W/m}^2$ ) หรือค่าการส่องสว่าง (Irradiance,  $I$ ) มีค่าเป็น

$$I = \langle \vec{S} \rangle = \frac{c \epsilon_0}{2} E_0^2 \quad (2.8)$$

ซึ่งเป็นค่าพลังงานเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาของพื้นที่ที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์  $S$  (ในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกันเวกเตอร์  $S$  จะขนานกับเวกเตอร์  $k$ ) จากรูปที่ 2.5 กำหนดให้  $I_i$ ,  $I_r$  และ  $I_t$  แทนค่าความหนาแน่นของลำแสงที่ตกกระทบ สะท้อนกลับ และทะลุผ่าน ตามลำดับ ค่าพื้นที่ตั้งฉากของการตกกระทบ การสะท้อนกลับ และการทะลุผ่านแทนด้วย  $A \cos \theta_i$ ,  $A \cos \theta_r$  และ  $A \cos \theta_t$  ตามลำดับ นั่นคือ กำลังแสงที่ตกกระทบ ( $I_i A \cos \theta_i$ ) เป็นพลังงานต่อหน่วยเวลาที่ไหลอยู่ในลำของแสงที่ตกกระทบรอยต่อบริเวณพื้นที่  $A$  ในทำนองเดียวกันจะได้ว่า กำลังแสงที่สะท้อนกลับจากพื้นที่  $A$  มีค่าเท่ากับ  $I_r A \cos \theta_r$  และกำลังแสงที่ทะลุผ่านพื้นที่  $A$  มีค่าเท่ากับ  $I_t A \cos \theta_t$  และกำหนดให้ค่าการสะท้อน  $R$  (Reflectance,  $R$ ) นิยามว่า อัตราส่วนของกำลัง(ฟลักซ์)แสงที่สะท้อนต่อกำลังแสงที่ตกกระทบ มีค่า

$$R \equiv \frac{I_r \cos \theta_r}{I_i \cos \theta_i} = \frac{I_r}{I_i} \quad (2.9)$$

และให้นิยาม ค่าการทะลุผ่าน  $T$  (Transmittance,  $T$ ) ว่าเป็น อัตราส่วนฟลักซ์ของแสงที่ทะลุผ่านต่อแสงที่ตกกระทบ มีค่า

$$T \equiv \frac{I_t \cos \theta_t}{I_i \cos \theta_i} \quad (2.10)$$

เนื่องจาก  $\frac{I_r}{I_i}$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{(v_r \epsilon_r E_{0r}^2/2)}{(v_i \epsilon_i E_{0i}^2/2)}$  และ แสงที่ตกกระทบและสะท้อนกลับจากรอยต่ออยู่ในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหเดียวกันดังนั้น  $v_r = v_i$ ,  $\epsilon_r = \epsilon_i$  แทนค่าลงในสมการที่ 2.9 จะได้ว่า

$$R = \left( \frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)^2 = r^2 \quad (2.11)$$

เมื่อ  $r$  แทนค่าสัมประสิทธิ์ขนาดการสะท้อน (Amplitude reflection coefficient)

ในทำนองเดียวกัน ถ้ากำหนดให้  $\mu_i = \mu_t = \mu_0$  จะได้ค่าการทะลุผ่านเท่ากับ

$$T = \frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} \left( \frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)^2 = \left( \frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} \right)^2 \quad (2.12)$$

เมื่อ  $t$  แทนค่าสัมประสิทธิ์ขนาดการทะลุผ่าน (Amplitude transmission coefficient)

จากกฎทรงพลังงาน อาจกล่าวได้ว่า พลังงานรวมที่ไหลเข้าสู่พื้นที่  $A$  ต่อหน่วยเวลาเท่ากับ พลังงานรวมที่ไหลออกจากพื้นที่  $A$  ในหน่วยเวลานั้นๆ จะสามารถแสดงได้ว่า

$$I_i A \cos \theta_i = I_r A \cos \theta_r + I_t A \cos \theta_t \quad (2.13)$$

คูณทั้งสองข้างของสมการที่ 2.13 ด้วย  $c$  จะได้ว่า

$$n_i E_{0i}^2 \cos \theta_i = n_i E_{0r}^2 \cos \theta_r + n_t E_{0t}^2 \cos \theta_t \quad (2.14)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายได้ว่า

$$1 = \left( \frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)^2 + \left( \frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} \right) \left( \frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)^2 \quad (2.15)$$

$$R + T = 1 \quad (2.16)$$

เมื่อไม่มีการดูดกลืนพลังงาน อาจแทน  $R$  และ  $T$  ในรูปขององค์ประกอบได้ว่า

$$R_{\perp} = r_{\perp}^2 \quad (2.17)$$

$$R_{\parallel} = r_{\parallel}^2 \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\perp$  แทนองค์ประกอบในแนวตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของแสง  
และ  $\parallel$  แทนองค์ประกอบในแนวขนานกับทิศการเคลื่อนที่ของแสง

$$T_{\perp} = \left( \frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} \right) t_{\perp}^2 \quad (2.19)$$

และ

$$T_{\parallel} = \left( \frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} \right) t_{\parallel}^2 \quad (2.20)$$

โดยที่

$$r_{\perp} = \left( \frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.21)$$

$$r_{\parallel} = \left( \frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{\parallel} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} = +\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.22)$$

$$t_{\perp} = \left( \frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)_{\perp} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} = +\frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.23)$$

$$t_{\parallel} = \left( \frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)_{\parallel} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} = +\frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)} \quad (2.24)$$

ซึ่งสมการที่ 2.17 ถึง 2.20 สามารถเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 (ก) และ 2.6 (ข) ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของ R และ T สามารถเขียนแทนได้ว่า

$$R_{\parallel} + T_{\parallel} = 1 \quad (2.25)$$

และ

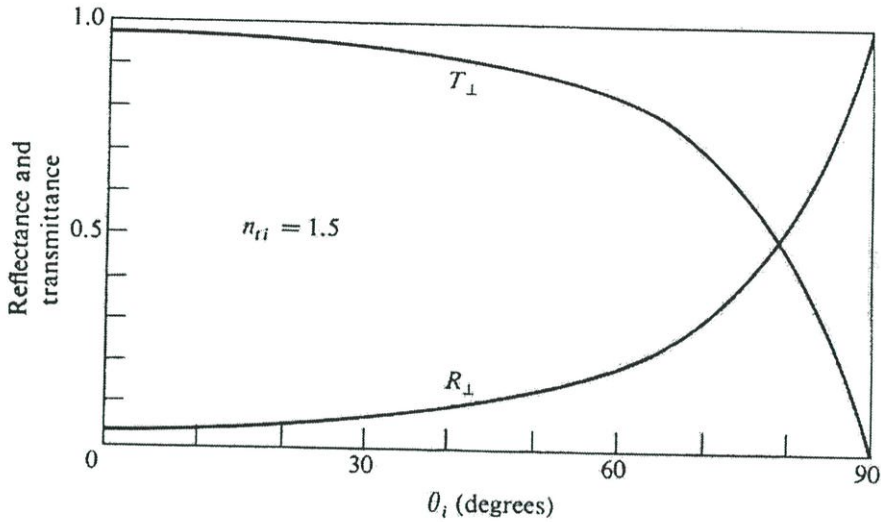
$$R_{\perp} + T_{\perp} = 1 \quad (2.26)$$

พิจารณาเมื่อแสงตกกระทบบนพื้น A ในแนวเส้นปกติ นั่นคือ มุมตกกระทบบน  $\theta_i = 0$  ดังนั้นในกรณีนี้องค์ประกอบในแนวตั้งฉากและในแนวขนานไม่ต้องนำมาพิจารณา สมการที่ 2.17 ถึง สมการที่ 2.20 จะสามารถเขียนแทนได้ว่า

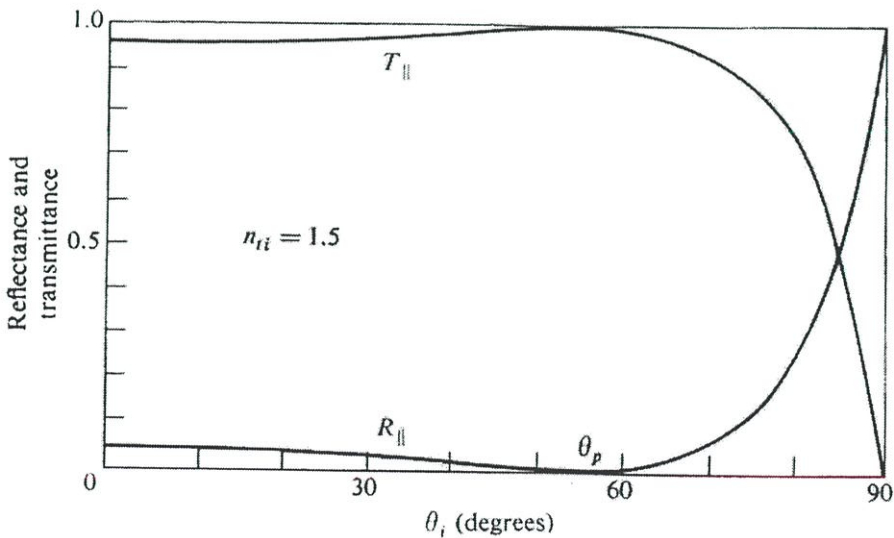
$$R = R_{\parallel} = R_{\perp} = \left( \frac{n_t - n_i}{n_t + n_i} \right)^2 \quad (2.27)$$

และ

$$T = T_{\parallel} = T_{\perp} = \frac{4n_t n_i}{(n_t + n_i)^2} \quad (2.28)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนและค่าการทะลุผ่านกับมุมตกกระทบ

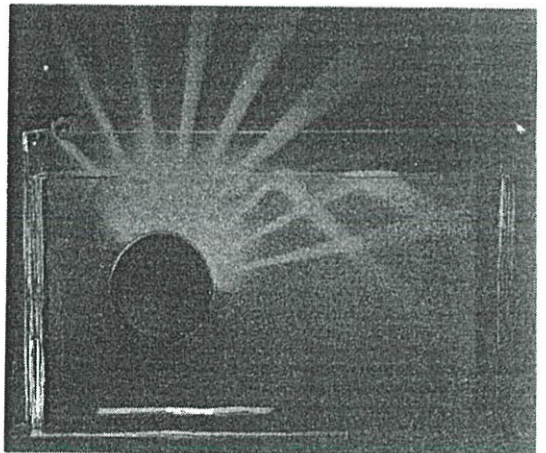
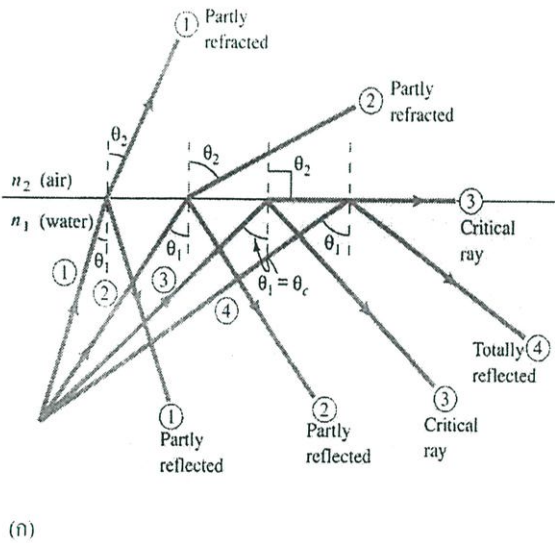
(ก) เมื่อ E ทิศตั้งฉากกับเวกเตอร์หน่วย (ข) เมื่อ E มีทิศขนานกับเวกเตอร์หน่วย

พิจารณาที่รอยต่อของอากาศที่มีค่าดัชนีหักเหเป็น 1.00 กับแก้วซึ่งมีค่าดัชนีหักเหเป็น 1.50 ค่าการสะท้อนที่รอยต่อจะมีค่าเท่ากับ

$$R_{\text{AIR-GLASS}} = \left( \frac{1.5-1}{1.5+1} \right)^2 = 0.04 \text{ หรือ } 4\%$$

นั่นคือ เมื่อกำลังแสง 100 ส่วนเดินทางในอากาศตกกระทบที่รอยต่อของอากาศ-แก้ว แสงจะสะท้อนกลับ 4 % และเดินทางต่อไปในแก้ว 96 % ไม่ว่าจะเป็นกรณีการสะท้อนจากภายใน (Internal reflection),  $n_i > n_t$  หรือกรณีการสะท้อนจากภายนอก (External reflection),  $n_i < n_t$

2.2.4.2 การสะท้อนกลับหมดภายใน (Total internal reflection)



รูปที่ 2.7 แสดงปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมด

พิจารณาเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมากไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห น้อยกว่าดังรูปที่ 2.7 จากกฎของสเนลล์ตามสมการที่ 2.6 ถ้ามุมตกกระทบ  $\theta_1$  เพิ่มขึ้นจนกระทั่ง แนวทางเดินของแสงหักเหขนานไปกับผิวระนาบของตัวกลางที่สองแล้วจะเรียกมุมตกกระทบนี้ว่า มุมวิกฤติ (Critical Angle,  $\theta_c$ ) เมื่อมุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤติจะทำให้แสงเกือบทั้งหมด เกิดการสะท้อนกลับเข้าสู่ภายในตัวกลางเดิมดังรูปที่ 2.7 (ข) ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การ สะท้อนกลับหมดภายใน (Total Internal Reflection) และจากกฎของสเนลล์สามารถหามุมวิกฤติได้ โดยกำหนดให้  $\theta_2 = 90^\circ$  ดังนั้น

$$n_1 \sin \theta_C = n_2 \sin 90^\circ$$

$$\theta_C = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.29)$$

สมการที่ 2.29 นี้แสดงให้เห็นว่ามุมวิกฤตมีความสัมพันธ์กับดัชนีหักเหแสงของตัวกลางทั้งสองหรืออาจกล่าวได้ว่ามุมวิกฤตสัมพันธ์กับความเร็วของแสงในตัวกลางทั้งสองนั่นเอง

### 2.2.5 การแทรกสอด (Interference)

เมื่อคลื่นแสงสองขบวนมาพบกันที่จุดๆหนึ่งจะเกิดการซ้อนทับ (Superposition) ของคลื่นแสงทั้งสองโดยแอมพลิจูดของคลื่นแสงลัพธ์เป็นผลจากแอมพลิจูดของคลื่นแสงทั้งสองเดิม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การแทรกสอด ซึ่งผลของการแทรกสอดของคลื่นแสงอาจเป็นได้ทั้งแบบการแทรกสอดแบบเสริมกัน (Constructive interference) นั่นคือ แอมพลิจูดของคลื่นแสงลัพธ์มีค่ามากกว่าแอมพลิจูดของคลื่นแต่ละขบวน และการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (Destructive interference) ที่มีแอมพลิจูดของคลื่นแสงลัพธ์มีค่าน้อยกว่าแอมพลิจูดของคลื่นแสงแต่ละขบวนแสดง เงื่อนไขที่จำเป็นที่ทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่นแสงมี 3 ประการ คือ

1. แหล่งกำเนิดแสงต้องเป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ (Coherent Light Source) นั่นคือ แสงจากแต่ละแหล่งกำเนิดต้องมีเฟสคงที่เทียบกัน
2. แหล่งกำเนิดต้องเป็นแสงเดี่ยว (Monochromatic Light) นั่นคือ มีความยาวคลื่นเดี่ยว
3. การแทรกสอดต้องเป็นไปตามหลักการซ้อนทับ (Superposition Principle)

การอธิบายหลักการของการแทรกสอดจะได้ทำการอธิบายโดยใช้การทดลองของโทมัส ยัง นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ยังได้สร้างแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์โดยกำหนดให้แสงตกกระทบฉากที่มีสลิตช่องแคบ  $S_0$  แสงจะพุ่งจากช่องนี้ตกกระทบฉากชั้นที่ 2 ที่มีสลิตแคบๆ 2 ช่อง  $S_1$  และ  $S_2$  ซึ่งสลิตทั้งสองจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงใหม่ที่มีคุณสมบัติอาพันธ์กัน เมื่อนำฉากไปวางไว้หลังแหล่งกำเนิดแสง  $S_1$  และ  $S_2$  จะปรากฏเป็นแถบมืดสว่างสลับกัน ซึ่งแถบมืดสว่างที่ปรากฏเป็นผลจากการแทรกสอดแบบหักล้างและแบบเสริมแสดงในรูปที่ 2.8 (ก)

จากรูปที่ 2.8 (ข) ฉากวางห่างจากสลิตทั้งสองเป็นระยะ  $L$  โดยที่สลิตทั้งสองห่างกันเป็นระยะ  $d$  และแหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงสีเดี่ยว จากเงื่อนไขนี้แสงที่ออกจากสลิต  $S_1$  และ  $S_2$  จะมีความถี่ ความยาวคลื่นเท่ากันและมีเฟสตรงกัน ความเข้มของแสงที่จุด  $P$  ใดๆบนฉาก จะเป็นผลรวม

ของแสงที่มาจากสลิตทั้งสอง แสงทั้งสองที่เดินทางมาที่จุด P จะมีระยะทางไม่เท่ากันเรียก ผลต่างทางเดินแสง (Optical path different,  $\Delta$ ) โดยที่

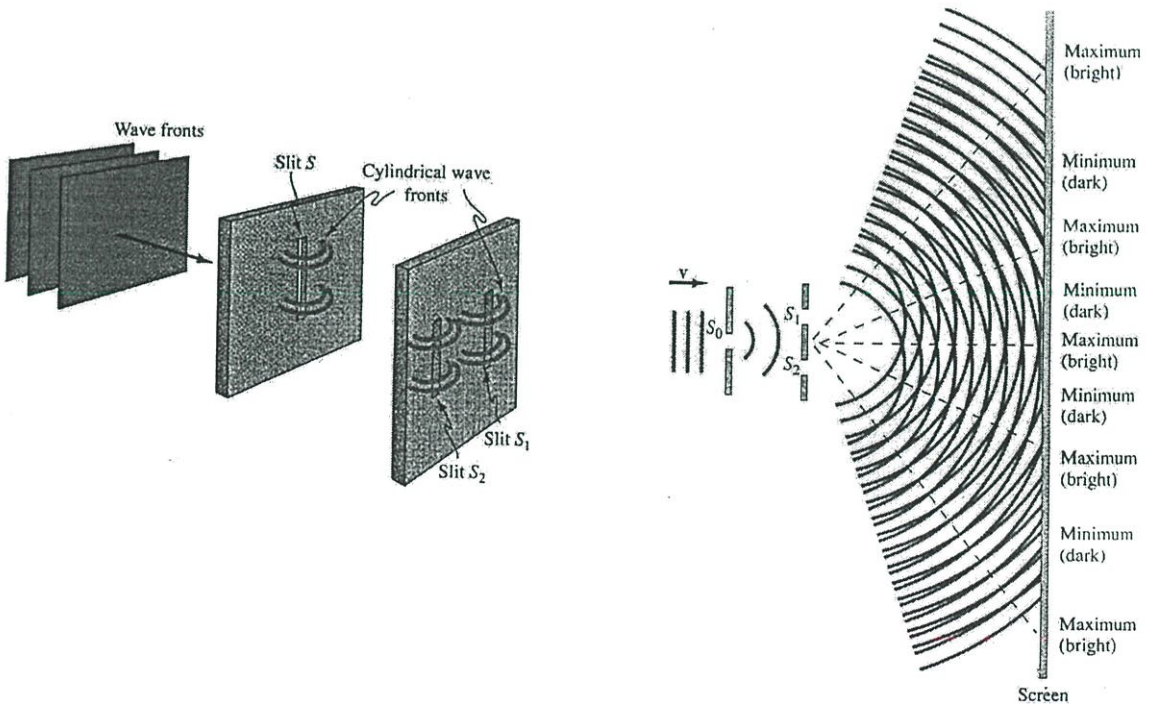
$$\Delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta \quad (2.30)$$

ในที่นี้ให้ถือว่า  $r_1$  และ  $r_2$  ขนานกัน ซึ่งกรณีนี้เป็นจริงเมื่อระยะ  $L$  มากกว่าระยะ  $d$  มากๆ เมื่อแสงตกกระทบบที่จุด P ถ้าผลต่างทางเดินแสงเป็นศูนย์หรือเท่ากับจำนวนเต็มของความยาวคลื่นแสงทั้งสองทางเดินจะมีเฟสตรงกันเกิดการแทรกสอดแบบเสริมดังนั้นเงื่อนไขของแถบสว่างสามารถเขียนได้ว่า

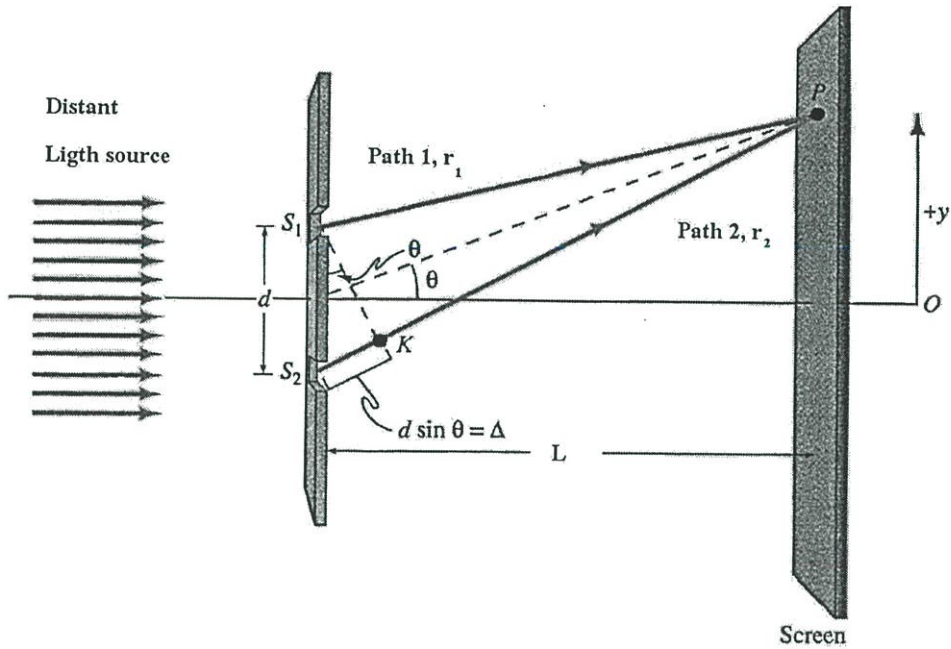
$$d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.31)$$

โดยที่  $\lambda$  คือความยาวคลื่นแสง

$m$  คือเลขจำนวนเต็ม แถบสว่างที่สุดเกิดที่มุม 0 องศา นั่นคือ  $m = 0$  เรียกว่า ค่ามากที่สุดอันดับที่ศูนย์ (Zero Order Maximum)



รูปที่ 2.8 (ก) แสดงการทดลองการแทรกสอดของโทมัส ยัง



รูปที่ 2.8 (ข) แสดงทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตในการทดลองการแทรกสอดของโทมัส ยัง

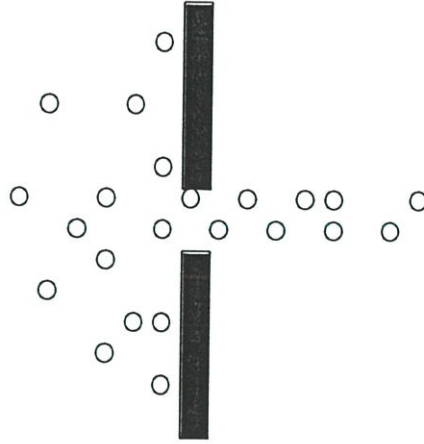
เมื่อความแตกต่างทางเดินมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นของอันดับใดๆ แสงทั้งสองจะเดินทางถึงจุด P โดยมีเฟสต่างกันอยู่ 180 องศา เกิดเป็นการแทรกสอดแบบหักล้างสามารถแสดงด้วยสมการได้ว่า

$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.32)$$

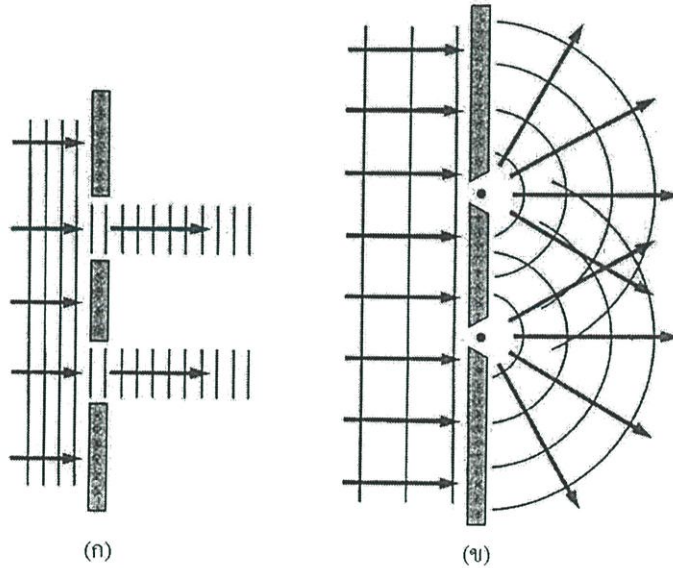
ดังนั้นสมการที่ (2.31) และ (2.32) เป็นสมการที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การแทรกสอดที่เกิดขึ้น

### 2.2.6 การเลี้ยวเบน (Diffraction)

เมื่อกลุ่มอนุภาควิ่งเข้าชนฉากที่มีรูเปิดเล็กๆ ส่วนที่อยู่ตรงกับรูเปิดก็จะผ่านไปและเคลื่อนไปตามเส้นทางเดิมโดยไม่ถูกรบกวน ส่วนอื่นจะถูกปิดกั้นไว้หรือถ้าเอาวัตถุมาขวางทางเดินของอนุภาค วัตถุจะกั้นเฉพาะอนุภาคที่มาชนวัตถุ อนุภาคส่วนอื่นๆจะเคลื่อนที่ไปโดยไม่ถูกรบกวน ดังรูปที่ 2.9 ในทำนองเดียวกันถ้าแสงเดินทางเป็นเส้นตรงจริงเมื่อเดินทางผ่านช่องสลิตคู่แสงจะเดินทางผ่านสลิตไปโดยไม่มีการซ้อนทับและไม่มีการแทรกสอดของแสงดังรูปที่ 2.10 (ก) แต่ในความเป็นจริงแสงมีการเบี่ยงเบนออกจากแนวทางเดินแสงเดิมดังรูปที่ 2.10 (ข) ปรากฏการณ์การเบนออกของแสงนี้เรียกว่า การเลี้ยวเบน (Diffraction) การเลี้ยวเบนจะเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านสิ่งกีดขวางที่มีรูหรือช่องแคบเล็กๆที่ให้แสงผ่าน หรือเป็นวัตถุขนาดเล็กที่กั้นบางส่วนของแสงไม่ให้ผ่านไป

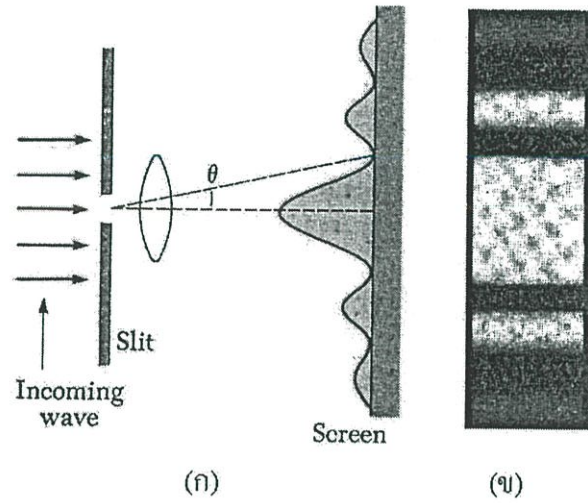


รูปที่ 2.9 แสดงการวิ่งผ่านรูเล็กๆของกลุ่มอนุภาค

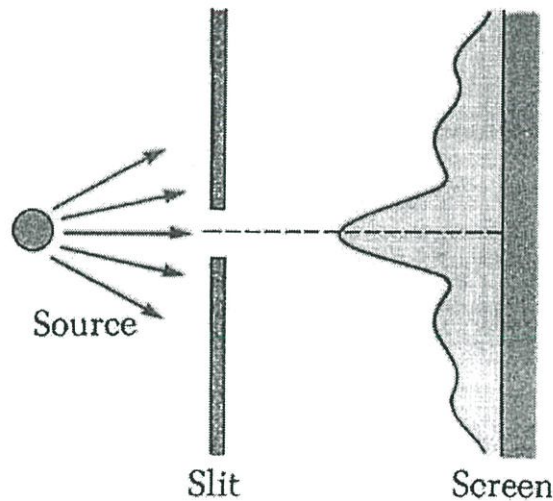


รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบสมมุติฐานการเคลื่อนผ่านสลิตคู่ของแสง  
(ก) เมื่อแสงวิ่งเป็นเส้นตรงจริง (ข) ผลเมื่อแสงวิ่งผ่านสลิตคู่

การเลี้ยวเบนจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ การเลี้ยวเบนแบบเฟราน์โฮเฟอร์ (Fraunhofer Diffraction) เกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางไปยังสลิตเกือบเป็นแสงขนานสามารถทดลองได้โดยวางฉากไกลออกไปจากรูเล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ส่วนการเลี้ยวเบนอีกชนิดหนึ่งคือการเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนล (Fresnel Diffraction) ในกรณีนี้แหล่งกำเนิดแสงจะอยู่ใกล้กับฉากรับภาพมากดังแสดงในรูปที่ 2.12 ในที่นี้จะได้ทำการศึกษาเฉพาะการเลี้ยวเบนแบบเฟราน์โฮเฟอร์



รูปที่ 2.11 แสดงการสร้างการเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์ (ก) รูปแบบการกระจายความเข้มแสงของการเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์ผ่านสลิตเดี่ยว (ข) ผลลัพธ์บนฉากรับภาพ

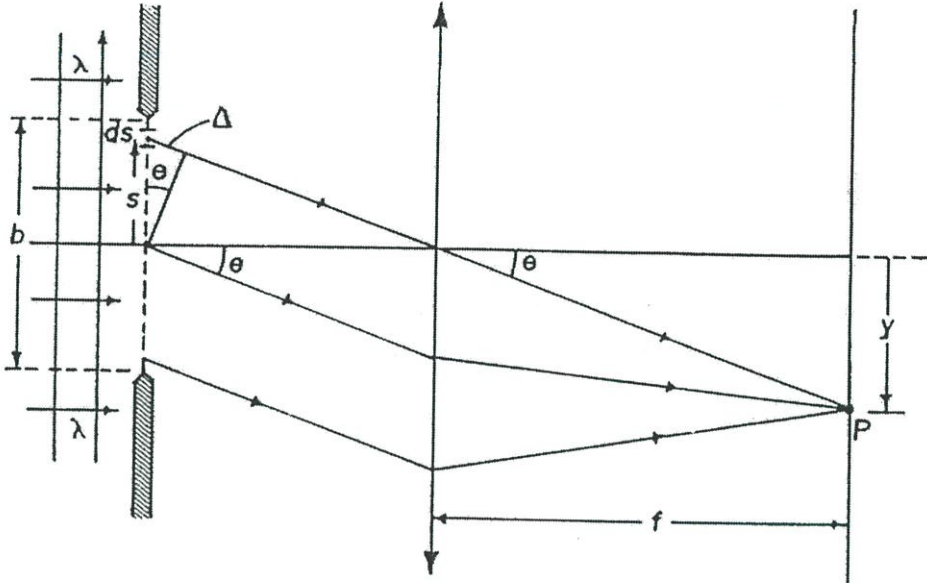


รูปที่ 2.12 แสดงการสร้างการเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนล

#### 2.2.6.1 การเลี้ยวเบนจากสลิตเดี่ยว

การเลี้ยวเบนแบบเฟรานโฮเฟอร์ที่ช่องแคบเดี่ยว เมื่อพิจารณาช่องแคบเดี่ยวที่มีความกว้างน้อยกว่าความยาวคลื่นมากพอ ดังรูปที่ 2.13 เมื่อแสงความยาวคลื่น  $\lambda$  ที่ตกบนช่องแคบให้เป็นการเลี้ยวเบนที่มากกับระยะของช่องแคบ จากหลักของฮอยเกนส์คลื่นระนาบที่มาถึงสลิตจะให้คลื่น

ถูกใหม่ออกมาจากทุกจุดบนหน้าคลื่น กำหนดให้  $\Delta$  เป็นความยาวทางเดินแสง(Optical Path Length)ของ คลื่นที่จากจุดกึ่งกลางสลิตกับจุดที่ห่างขึ้นไปเป็นระยะ  $s$



รูปที่ 2.13 แสดงการเลี้ยวเบนแบบเฟรานีโฮเฟอร์ของแสงผ่านสลิตเดี่ยว

ถ้าให้ช่วงเล็ก  $ds$  กระทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดคั้งนั้นสามารถคำนวณสนามไฟฟ้าลัพธ์ที่ตำแหน่ง  $p$  ได้จากสมการ

$$dE_p = \left( \frac{dE_0}{r} \right) \sin(\omega t - kr) \quad (2.33)$$

โดยที่  $r$  คือ ความยาวทางเดินแสงจากส่วนเล็กๆ  $ds$  ถึงตำแหน่ง  $p$

$dE_0$  คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าจาก  $ds$  ที่ระยะห่าง 1 หน่วยซึ่ง  $dE_0$  มีค่า

$$dE_0 = E_L ds \quad (2.34)$$

โดยที่  $E_L$  คือ แอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าจากสลิตที่มีความกว้าง 1 หน่วยที่ระยะห่างจากสลิต 1 หน่วย

ถ้ากำหนดให้  $r = r_0$  สำหรับคลื่นที่มาจากช่วง  $ds$  ที่จุดกึ่งกลางของสลิตจะได้ว่าคลื่นจาก  $ds$  อื่นๆที่ระยะ  $s$  ให้สนามไฟฟ้าที่จุด  $p$  ดังสมการ

$$dE_p = \left( \frac{E_L ds}{r} \right) \sin\{\omega t - k(r_0 + \Delta)\} \quad (2.35)$$

เนื่องจาก  $\Delta$  มีค่าน้อยกว่า  $r_0$  มากๆ จึงได้  $r$  ในส่วนของแอมพลิจูดเป็น  $r_0$  แต่ในส่วนของเฟสต้องคงเดิมไว้และจากรูปที่ 2.13 จะได้ว่า  $\Delta = s \sin \theta$  จึงเขียนสมการที่ 2.34 ได้ว่า

$$dE_p = \left( \frac{E_L ds}{r_0} \right) \sin\{\omega t - kr_0 - ks \sin \theta\} \quad (2.36)$$

ในกรณีที่  $ds$  อยู่ใต้จุดกึ่งกลางของสลิต ค่า  $s$  จะเป็นค่าลบทำให้ได้ความยาวทางเดินแสงกลายเป็น  $r_0 - \Delta$  และเนื่องจากค่าสนามไฟฟ้าจากจุด  $p$  นี้มาจากทั้งส่วนที่เป็น  $+s$  และ  $-s$  ดังนั้นสามารถเขียนสนามไฟฟ้ารวมดังสมการ

$$dE = dE_{+s} + dE_{-s} \quad (2.37)$$

$$dE = \left( \frac{E_L ds}{r_0} \right) \left[ \sin\{\omega t - kr_0 - ks \sin \theta\} + \sin\{\omega t - kr_0 + ks \sin \theta\} \right] \quad (2.38)$$

จากความสัมพันธ์  $\sin A + \sin B = 2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \cos\left(\frac{A-B}{2}\right)$  เขียนสมการที่ 2.38 ได้ว่า

$$dE = \left( \frac{E_L ds}{r_0} \right) \left[ 2 \cos(-ks \sin \theta) \sin(\omega t - kr_0) \right] \quad (2.39)$$

สนามไฟฟ้ารวมที่จุด  $p$  โดยอินทิเกรตตลอดช่วงความยาว  $b$  สามารถเขียนได้ว่า

$$E = \left( \frac{2E_L}{r_0} \right)^{b/2} \int_0^b \cos(ks \sin \theta) \sin(\omega t - kr_0) ds \quad (2.40)$$

และสามารถจัดรูปได้ว่า

$$E = E_0 \sin(\omega t - kr_0) \quad (2.41)$$

โดยที่  $E_0$  เป็นแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้า  $E$  เมื่อ

$$E_0 = \left( \frac{2E_L}{r_0} \right) \frac{b \sin[(kb/2)\sin\theta]}{2 (kb/2)\sin\theta} \quad (2.42)$$

กำหนดให้  $\beta = \frac{1}{2} kb \sin\theta$  เพื่อให้สมการที่ (2.42) อยู่ในลักษณะที่ง่ายขึ้นได้เป็น

$$E_0 = \frac{E_L b \sin\beta}{r_0 \beta} \quad (2.43)$$

จากสมการนี้แสดงให้เห็นว่าแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $p$  มีการเปลี่ยนแปลงไปกับ  $\beta$  ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่าง  $\beta$  กับความแตกต่างทางเดินแสงคือ  $\beta = k\Delta$  โดยที่  $\Delta = s \sin\theta = \frac{b}{2} \sin\theta$  เป็นที่ทราบกันดีว่าความเข้มแสงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของแอมพลิจูดสนามไฟฟ้า ดังนั้นได้การกระจายความเข้มแสงดังสมการที่ 2.44

$$I = \frac{\epsilon_0 c}{2} E_0^2 = \frac{\epsilon_0 c}{2} \left( \frac{E_L b}{r_0} \right)^2 \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2}$$

หรือ

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \beta}{\beta} = I_0 \text{sinc}^2 \beta \quad (2.44)$$

เมื่อ  $I_0 = \frac{\epsilon_0 c}{2} \left( \frac{E_L b}{r_0} \right)^2$  เป็นแอมพลิจูดการกระจายความเข้มแสงซึ่งเป็นค่าคงที่ทั้งหมด

พิจารณาฟังก์ชัน  $\text{sinc}^2 \beta$  ของสมการที่ 2.44 จะพบว่าเมื่อ  $\beta \rightarrow 0$  จะทำให้  $\sin\beta = 0$  หรือ

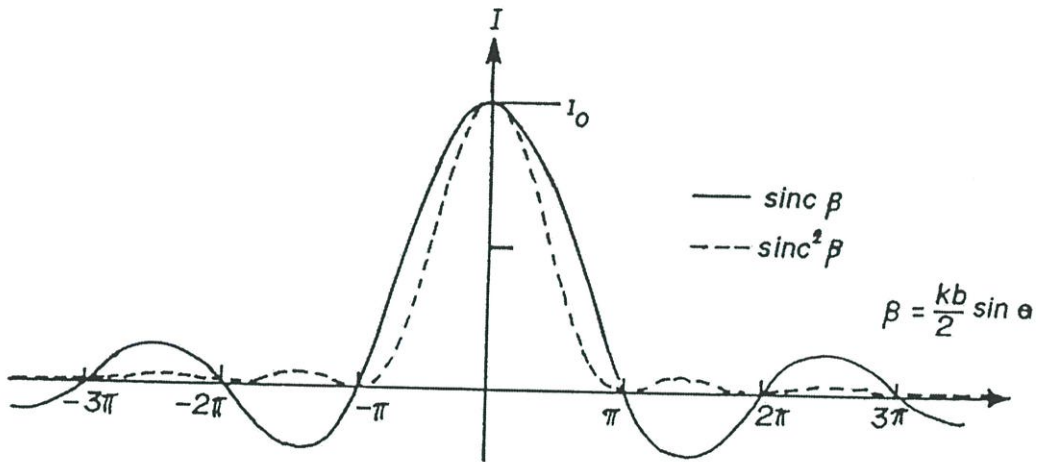
$\lim_{\beta \rightarrow 0} \left( \frac{\sin\beta}{\beta} \right) = 1$  ได้เงื่อนไขอันดับการเลี้ยวเบนที่มีแอมพลิจูดความเข้มแสงเท่ากับศูนย์ดังนี้

$$m\pi = \frac{1}{2}(kb \sin \theta) = \beta \quad \text{เมื่อ } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.45)$$

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

$$b \sin \theta = m\lambda \quad \text{เมื่อ } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.46)$$

จากเงื่อนไขของการเลี้ยวเบนที่มีความเข้มแอมพลิจูดเป็นศูนย์และสมการที่ 2.43 สามารถแสดงลักษณะการกระจายของความเข้มได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงการกระจายความเข้มแสงจากการเลี้ยวเบนที่สอดคล้องตามสมการที่ 2.44 สัมพันธ์กับ  $\beta$

### 2.3 สรุป

ในบทนี้เนื้อหาได้กล่าวถึงธรรมชาติของแสงและปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางไปในตัวกลางทั้งการ สะท้อน การหักเห การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง รวมทั้งได้ศึกษาลงไปรายละเอียดของปรากฏการณ์ที่สำคัญที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของแสงในการเดินทางในเส้นใยนำแสงนั่นคือ ปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมด รวมถึงการทะลุผ่านรอยต่อของสองตัวกลางใดๆของแสง สำหรับขั้นต่อไปเนื้อหาจะลงไปถึงทฤษฎีโหมดคัปปลิงของอุปกรณ์ทางแสงที่ใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาการคัปปลิงของอุปกรณ์แสง

### บทที่ 3

## คู่ควบและทฤษฎี

ในบทนี้ถือได้เป็นส่วนสำคัญของงานวิจัยในการศึกษาคุณลักษณะการคัปปลิงของคู่ควบ โดยในเนื้อหาจะได้กล่าวถึง สมการแมกซ์เวลล์เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาวิเคราะห์ทฤษฎีเกี่ยวกับคู่ควบต่อไป จากนั้นจะกล่าวถึง คู่ควบและทฤษฎีโหมดคัปปลิงสำหรับคู่ควบเพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นภายในคู่ควบ โดยมีรายละเอียดของเนื้อหาดังต่อไปนี้

#### 3.1 สมการแมกซ์เวลล์และสมการคลื่น

สมการแมกซ์เวลล์ถือเป็นการพัฒนาการทางวิทยาศาสตร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งของศตวรรษที่ 19 สมการนี้สามารถใช้อธิบายคลื่นที่แผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดที่ความถี่ตั้งแต่ 0 เฮิร์ตซ์จนถึงความถี่  $10^{18}$  เฮิร์ตซ์และเนื่องจากแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังนั้นสมการแมกซ์เวลล์สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ของแสงได้ สมการแมกซ์เวลล์ทั้ง 4 สามารถที่เขียนได้ทั้งในรูปแบบการหาอนุพันธ์และรูปแบบอินทิกรัลซึ่งทั้งสองรูปแบบแสดงได้ดังสมการ

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \oint_{\text{loop}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{area}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \oint_{\text{loop}} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_{\text{area}} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{area}} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \int_{\text{surface}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad \int_{\text{surface}} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q_{\text{enclosed}} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $S$  เป็นหน่วยที่ตัดฉากกับผิวและพื้นที่ที่ทำการอินทิเกรตจะคิดเฉพาะพื้นที่ที่ปกคลุมในรูป สำหรับตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (3.1) – (3.4) อธิบายไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการแมกซ์เวลล์

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
<b>E</b>	เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า	โวลต์ / เมตร (V/m)
<b>H</b>	เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็ก	แอมแปร์ / เมตร (A/m)
<b>D</b>	ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า	คูลอมป์ / เมตร <sup>2</sup> (C/m <sup>2</sup> )
<b>B</b>	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	เวเบอร์ / เมตร <sup>2</sup> (Wb/m <sup>2</sup> )
<b>J</b>	ความหนาแน่นกระแส	แอมแปร์ / เมตร <sup>2</sup> (A/m <sup>2</sup> )
$\rho$	ความหนาแน่นของประจุ	คูลอมป์ / เมตร <sup>3</sup> (C/m <sup>3</sup> )
<b>Q</b>	ประจุ	คูลอมป์ (C)

นั่นคือ **E** และ **H** เป็นเวกเตอร์ที่ใช้อธิบายความเข้มของสนามที่จุดที่พิจารณาในที่ว่าง  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$  และ  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  โดยที่ตัวแปร  $\epsilon$  คือ สภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้า (Permittivity) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ตัวแปร  $\mu$  คือค่าซึมซาบทางแม่เหล็ก (Permeability) ของตัวกลาง

สำหรับสมการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถคำนวณได้โดยตรงจากสมการแมกซ์เวลล์ เงื่อนไขที่ใช้ในการพิจารณาสมการคลื่น คือ ตัวกลางจะมีคุณลักษณะเชิงเส้น (นั่นคือ  $\epsilon$  และ  $\mu$  จะเป็นอิสระจาก **E** และ **H**) และเป็นไอโซทรอปิก เช่น แก้วและพลาสติก คลื่นที่พิจารณาในตัวกลางมีลักษณะเป็นแบบเป็นอิสระต่อแหล่งกำเนิด (Source Free) ซึ่งทำให้  $\rho = 0$  และ  $\mathbf{J} = 0$  สมการที่ (3.1) – (3.4) จะสามารถจัดรูปใหม่ ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (3.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.5) – (3.8) จะอยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียล อันดับที่ 1 ในการปลดเคิร์ล (curl) ทั้งสองออกจากสมการทำได้โดยการใช้เทคนิคการสร้างเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียล อันดับที่ 2 เริ่มด้วยการใส่ค่าเคิร์ลทั้งสองข้างของสมการที่ (3.5) ได้ว่า

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla \times -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \frac{-\partial \mu \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3.9)$$

กำหนดให้  $\mu(r, t)$  เป็นอิสระต่อเวลาและตำแหน่ง แทนในสมการที่ (3.9) ได้

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \left( \nabla \times \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \right) \quad (3.10)$$

เมื่อฟังก์ชันต่อเนื่องตลอดและอันดับของเกร็ด การหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาสามารถสลับที่ได้ ดังนั้นสมการที่ (3.10) จะได้ว่า

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) \quad (3.11)$$

แทน  $\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  ในสมการที่ (3.11) และกำหนดให้  $\epsilon$  เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \\ &= -\mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3.12)$$

ตัวดำเนินการ  $(\nabla \times \nabla \times)$  สามารถจัดรูปโดยใช้หลักการของเวกเตอร์ไอดีเอ็นตีตี้ (Vector Identity) ให้ง่ายขึ้นได้ว่า

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $\nabla^2$  เป็นตัวดำเนินการเวกเตอร์ลาปลาเซียน (Laplacian operator) ซึ่งกระทำต่อเวกเตอร์ ซึ่งในกรณีนี้ ก็คือ  $\mathbf{E}$

สำหรับ  $\nabla \cdot \mathbf{E}$  สามารถคำนวณได้โดยเริ่มจาก  $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$  ดังนี้

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$$

$$\begin{aligned}
 &= \nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} \\
 &= \nabla \epsilon \cdot \mathbf{E} + \epsilon \nabla \cdot \mathbf{E}
 \end{aligned}$$

แก้สมการเพื่อหาคำตอบ  $\nabla \cdot \mathbf{E}$  ได้ว่า

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -\mathbf{E} \cdot \frac{\nabla \epsilon}{\epsilon} \quad (3.14)$$

แทนสมการที่ (3.12) และ (3.14) ลงในสมการที่ (3.13) ได้สมการเชิงเส้นสำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าว่า

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\nabla \left( \mathbf{E} \cdot \frac{\nabla \epsilon}{\epsilon} \right) \quad (3.15)$$

พิจารณาเทอมขวามือของสมการที่ (3.15) พจน์นี้จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเล็กๆ ของค่าสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ถือเป็นกรณีพิเศษในการพิจารณาในเรื่องการเดินทางของแสงในตัวกลางใด ๆ โดยในลักษณะโครงสร้างส่วนใหญ่ พจน์นี้จะมีค่าน้อยมากๆจนสามารถไม่นำมาคิดได้ ดังนั้นสมการที่ (3.15) สามารถเขียนในรูปสมการคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้าของแสงในตัวกลางได้ ดังสมการ

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.16)$$

ในทำนองเดียวกันกรณีของสนามแม่เหล็ก เมื่อเริ่มต้นด้วยสมการที่ (3.3) และดำเนินการตามขั้นตอนของสนามไฟฟ้าจะได้เขียนสมการคลื่นสำหรับสนามแม่เหล็กของแสงในตัวกลางได้ว่า

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.17)$$

### 3.2 สมการคลื่นสำหรับพิกัดทรงกระบอก

เนื่องจากรูปแบบของค่าดัชนีหักเหของเส้นใยนำแสงส่วนใหญ่จะมีความสมมาตรแบบทรงกระบอก ดังนั้นจึงเป็นการสะดวกที่จะพิจารณาสมการคลื่นของเส้นใยนำแสงให้อยู่ในพิกัดทรงกระบอก องค์ประกอบของสนามในพิกัดนี้เขียนแทนด้วย  $E_r, E_\phi, E_z, H_r, H_\phi$  และ  $H_z$  จากสมการคลื่นที่ (3.16) และ (3.17) ถ้าพิจารณาในสนามฮาร์โมนิกที่ขึ้นกับเวลา และให้  $|k| = \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \omega$  ดังนั้นสมการคลื่นสามารถเขียนในรูป

$$(\nabla^2 + k^2 n^2) \begin{Bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{Bmatrix} = 0 \quad (3.18)$$

กำหนดให้คลื่นเคลื่อนที่ในแนว  $z$  ดังนั้น สามารถพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบในแนว  $z$  ก่อนได้ว่า

$$(\nabla^2 + k^2 n^2) \begin{Bmatrix} E_z \\ H_z \end{Bmatrix} = 0 \quad (3.19)$$

โดยที่  $k = \frac{\omega}{c}$

$\nabla^2$  คือ ตัวดำเนินการลาปลาซเขียน ซึ่งแทนด้วย

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

ในการแก้ปัญหาของการเดินทางของคลื่นใน โครงสร้างทรงกระบอกนิยมแก้ปัญหาของ  $E_z$  และ  $H_z$  เป็นอันดับแรกแล้วจึงแก้ปัญหาของ  $E_r, E_\phi, H_r$  และ  $H_\phi$  ในเทอมของ  $E_z$  และ  $H_z$  เมื่อพิจารณาการเดินทางในท่อนำคลื่นทรงกระบอก กำหนดให้

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}(r, t) \\ \mathbf{H}(r, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}(r, \phi) \\ \mathbf{H}(r, \phi) \end{bmatrix} \exp[i(\omega t - \beta z)] \quad (3.20)$$

นั่นคือ ทุก ๆ องค์ประกอบของสนามเวกเตอร์ กำหนดให้มีค่า  $z$  และ  $t$  ขึ้นกับ  $\exp[(\omega t - \beta z)]$  เดียวกัน สมการที่ (3.19) และ (3.20) สามารถเขียนในรูปขององค์ประกอบในพิกัดทรงกระบอกได้ว่า

$$i\omega\epsilon E_r = i\beta H_\phi + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} H_z \quad (3.21 ก)$$

$$i\omega\epsilon E_\phi = i\beta H_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} H_z \quad (3.21 ข)$$

$$i\omega\mu E_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} H_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rH_\phi) \quad (3.21 ค)$$

และ

$$-i\omega\mu H_r = i\beta E_\phi + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} E_z \quad (3.22 ก)$$

$$-i\omega\mu H_\phi = -i\beta E_r - \frac{\partial}{\partial r} E_z \quad (3.22 ข)$$

$$-i\omega\mu H_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} E_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE_\phi) \quad (3.22 ค)$$

โดยการใช้สมการที่ (3.21 ก), (3.21 ข), (3.22 ก), และ (3.22 ข) สามารถเขียน  $E_r$ ,  $E_\phi$ ,  $H_r$ , และ  $H_\phi$  ในเทอมของ  $E_z$  และ  $H_z$  ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} E_r &= \frac{-i\beta}{\omega^2\mu\epsilon - \beta^2} \left( \frac{\partial}{\partial r} E_z + \frac{\omega\mu}{\beta} \frac{\partial}{r\partial\phi} H_z \right) \\ E_\phi &= \frac{-\beta}{\omega^2\mu\epsilon - \beta^2} \left( \frac{\partial}{r\partial\phi} E_z - \frac{\omega\mu}{\beta} \frac{\partial}{\partial r} H_z \right) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$H_r = \frac{-i\beta}{\omega^2\mu\epsilon - \beta^2} \left( \frac{\partial}{\partial r} H_z - \frac{\omega\epsilon}{\beta} \frac{\partial}{r\partial\phi} E_z \right)$$

$$H_\phi = \frac{-i\beta}{\omega^2\mu\epsilon - \beta^2} \left( \frac{\partial}{r\partial\phi} H_z + \frac{\omega\epsilon}{\beta} \frac{\partial}{\partial r} E_z \right) \quad (3.24)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการแสดงให้ว่า สามารถพิจารณาเฉพาะ  $E_z$  และ  $H_z$  ของสมการคลื่นสำหรับองค์ประกอบอื่นๆสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.23) และ (3.24) เมื่อกำหนดให้สมการที่ (3.20) ขึ้นกับ  $z$  สมการคลื่นที่ (3.19) สามารถเขียนได้ว่า

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + (k^2 n^2 - \beta^2) \right] \begin{bmatrix} E_z \\ H_z \end{bmatrix} = 0 \quad (3.25)$$

ซึ่งคำตอบของสมการเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} E_z \\ H_z \end{bmatrix} = \Psi(r) \exp(\pm i l \phi) \quad (3.26)$$

เมื่อ  $l = 0, 1, 2, 3, \dots$  นั่นคือ  $E_z$  และ  $H_z$  จะเป็นฟังก์ชันค่าเดียวของ  $\phi$  ดังนั้นสมการที่ (3.25) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \Psi + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \left( k^2 n^2 - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) \Psi = 0 \quad (3.27)$$

เมื่อ  $\Psi = E_z, H_z$

สมการที่ (3.27) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในแอมพลิจูดของสนามตามแนวขวางซึ่งเป็นไปตามสมการคลื่น สำหรับเส้นใยนำแสงที่มีดัชนีหักเหแบบขั้นบันได สมการที่ (3.27) สามารถแยกแสดงในส่วนคอรัได้ว่า

$$(ur^2) \frac{d^2 \Psi_z(r)}{d(ur^2)} + (ur) \frac{d\Psi_z(r)}{d(ur)} + [(ur)^2 - l^2] \Psi_z(r) = 0 \quad (3.28)$$

เมื่อ  $u^2 = n_1^2 k^2 - \beta^2$  (3.29)

และในแคลคูลิงได้ว่า

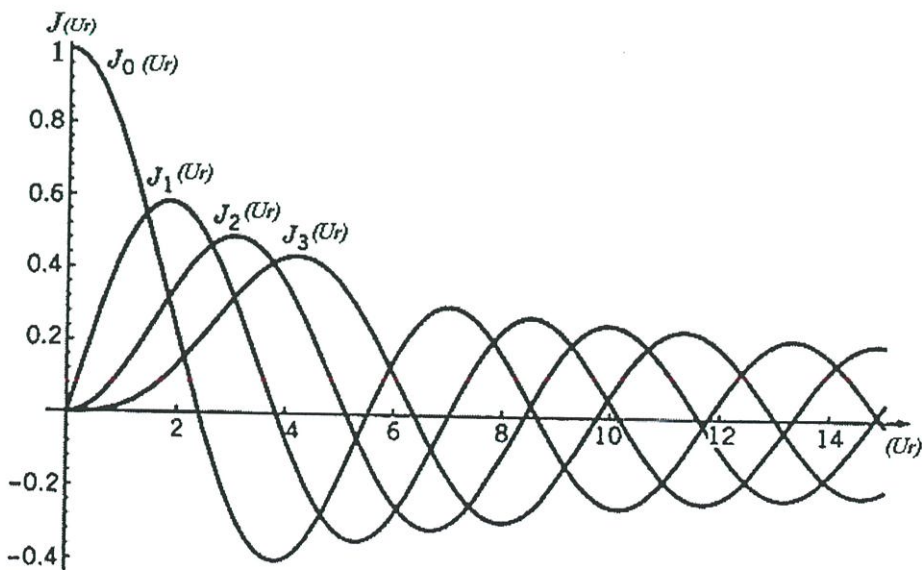
$$(wr)^2 \frac{d^2 \Psi_z(r)}{d(wr)^2} + (wr) \frac{d\Psi_z(r)}{d(wr)} + i[l^2 - (wr)^2] \Psi_z(r) = 0 \quad (3.30)$$

เมื่อ  $w^2 = \beta^2 - n_2^2 k^2$  (3.31)

สมการที่ (3.28) และ (3.30) เป็นรูปแบบของสมการเบสเซลล์และคำตอบของสมการมีค่าที่แน่นอนที่  $r=0$  และมีแนวโน้มเป็นศูนย์เมื่อ  $r$  เข้าใกล้ค่าอินฟินิตี้ ซึ่งค่า  $u$  และ  $w$  จะต้องมีค่าจริงทั้งคู่ ดังนั้นในแกน ( $r < a$ ) คำตอบสมการคือ

$$\Psi_z = \Psi_1 J_l(ur) \cos l\phi \quad (3.32)$$

เมื่อ  $\Psi_1$  เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่คงที่,  $l$  เป็นเลขจำนวนเต็ม และ  $u$  มีค่าดังแสดงในสมการที่ (3.29) ฟังก์ชันเบสเซลล์  $J_l(ur)$  เป็นฟังก์ชันที่ค่าลดลงแบบสั่นตาม ( $ur$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงฟังก์ชันเบสเซลล์อันดับที่หนึ่ง

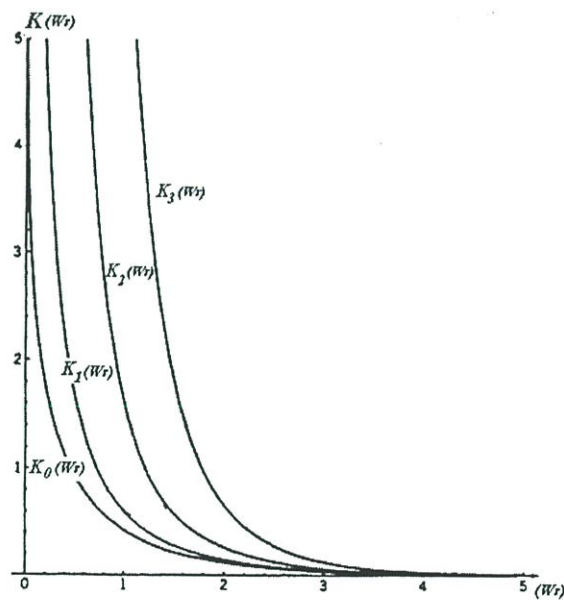
พิจารณาในแกลดคิง ( $r > a$ ) คำตอบของสมการคือ

$$\Psi_z = \Psi_2 K_1(wr) \cos l\phi \quad (3.33)$$

เมื่อ  $\Psi_2$  เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่คงที่  $l$  เป็นเลขจำนวนเต็ม และ  $w$  มีค่าดังแสดงในสมการที่ (3.31) ฟังก์ชันเบสเซลล์ชนิดปรับปรุง  $K_1(wr)$  เป็นฟังก์ชันที่มีค่าลดลงสู่ค่าศูนย์เมื่อ  $wr$  มีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อค่า  $r$  มีค่ามากๆ นั่นคือ  $r > a$  และ  $wr \gg 1$

$$K_1(wr) \propto \frac{\exp(-wr)}{(wr)^{1/2}}$$

นั่นคือ สนามในแกลดคิงจะลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียลที่ระยะไกลจากคอร์่มากๆซึ่งแสดงในรูปของสนามอีวานเนสเซนส์ (Evanescent Field)



รูปที่ 3.2 แสดงฟังก์ชันเบสเซลล์อันดับที่ 2 ชนิดปรับปรุง

### 3.3 คู่ควบ (Coupler)

สำหรับเส้นใยนำแสงนั้นมักใช้ในการเชื่อมต่อสัญญาณแสงแบบจุดต่อจุดระหว่างอุปกรณ์รับและส่งสัญญาณแสง เมื่อต้องการสร้างเครือข่ายเส้นใยนำแสงซึ่งซับซ้อนมากขึ้นได้แก่ เครือข่ายแบบวงแหวน เครือข่ายแบบดาวและเครือข่ายแบบบัส เป็นต้น จึงจำเป็นต้องเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงหรืออุปกรณ์ทางแสงมากกว่าสองชิ้นขึ้นไป อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แบ่งกำลังสัญญาณแสงไปยัง

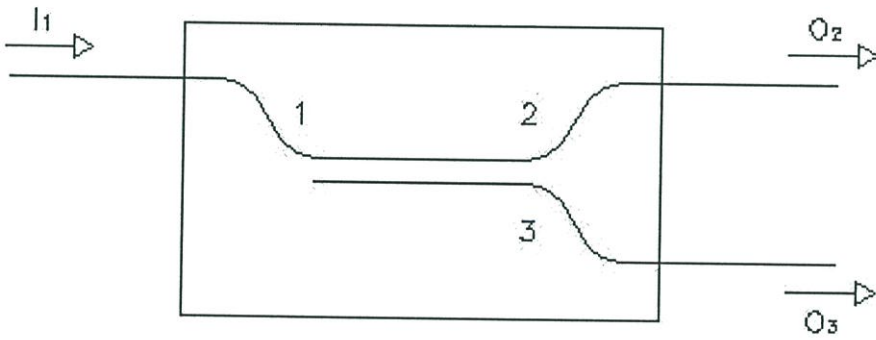
อุปกรณ์แสงต่างๆและการรวมกำลังสัญญาณแสงจากหลายแหล่งอุปกรณ์ไปยังอุปกรณ์แสงเดียว เรียกว่า อุปกรณ์แสงนี้ว่า คู่ควบ

### 3.3.1 ชนิดของคู่ควบ

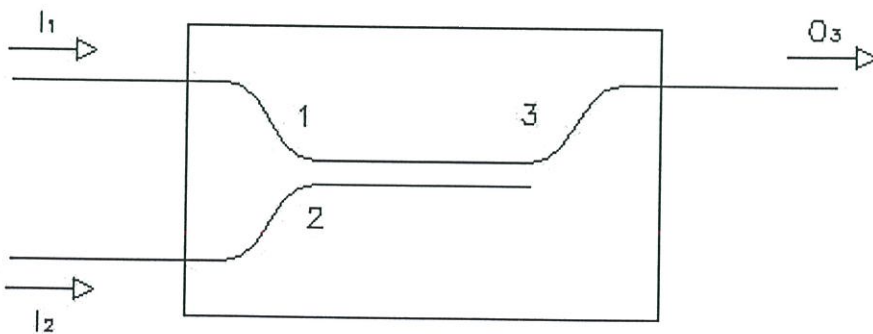
โดยคู่ควบสามารถแบ่งตามการแบ่งและรวมกำลังแสงได้ดังนี้

#### 3.3.1.1. คู่ควบแบบวอย (Y coupler) และคู่ควบแบบรวมแสง (Combiners couple)

คู่ควบทั้งสองทำหน้าที่ในลักษณะที่ตรงกันข้าม นั่นคือ คู่ควบแบบวอยจะทำหน้าที่แบ่งกำลังแสงที่มาจากหนึ่งอุปกรณ์แสงไปยังสองอุปกรณ์แสงดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก) ซึ่งคู่ควบชนิดนี้สามารถเรียกอีกอย่างได้ว่า อุปกรณ์แบ่งกำลังแสง (Splitter) เมื่อคู่ควบแบบวอยแบ่งกำลังแสงไปที่เอาต์พุตพอร์ตที่  $O_2$  น้อยๆเรียกคู่ควบนี้ว่า คู่ควบแบบที (T coupler) สำหรับคู่ควบอีกชนิดที่รวมกำลังแสงที่มาจากสองอุปกรณ์ไปยังหนึ่งอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข) ซึ่งคู่ควบชนิดนี้สามารถเรียกอีกอย่างได้ว่า อุปกรณ์รวมแสง (Optical combiners)



(ก)

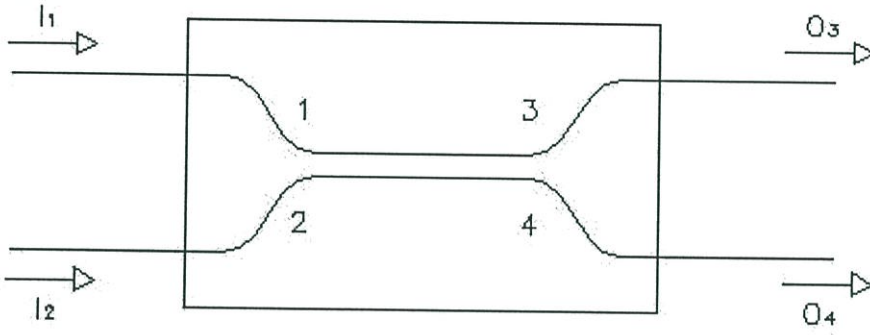


(ข)

รูปที่ 3.3 แสดงคู่ควบ (ก) แบบวอย (ข) แบบรวมแสง

### 3.3.1.2. คู่ควบแบบ 2X2

เป็นคู่ควบที่รวมหน้าที่ของทั้งคู่ควบแบบวายและคู่ควบแบบรวมแสงเข้าไว้ด้วยกันนั่นคือคู่ควบชนิดนี้สามารถทำทั้งหน้าที่รวมและแบ่งกำลังแสงได้ ลักษณะของคู่ควบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



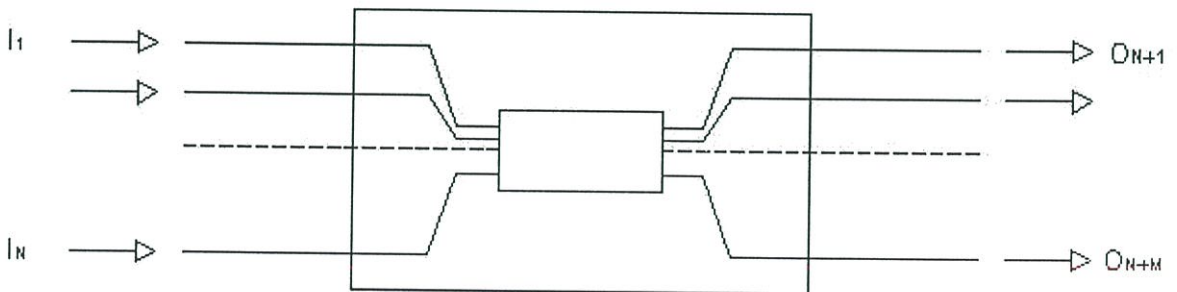
รูปที่ 3.4 แสดงคู่ควบแบบ 2X2

### 3.3.1.3 คู่ควบแบบหลายพอร์ต

คู่ควบชนิดนี้เป็นคู่ควบที่มีหลายพอร์ตอินพุตหรือมีหลายพอร์ตเอาต์พุตหรือมีทั้งหลายพอร์ตอินพุตและมีหลายพอร์ตเอาต์พุต โดยแบ่งย่อยได้เป็น

#### 3.3.1.3.1 คู่ควบแบบดาว (Star coupler)

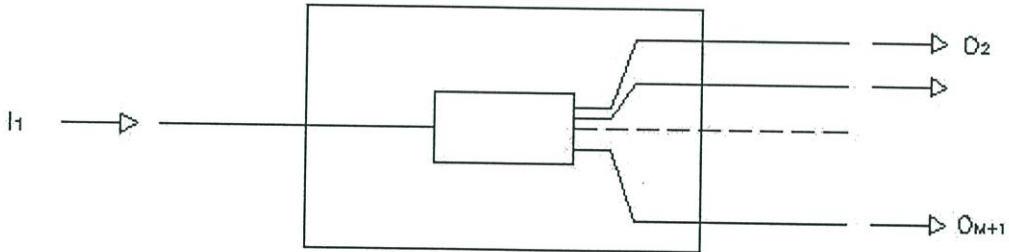
คู่ควบชนิดนี้จะมี  $N$  อินพุตและมี  $M$  เอาต์พุตดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดย  $N$  และ  $M$  มีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่า 2



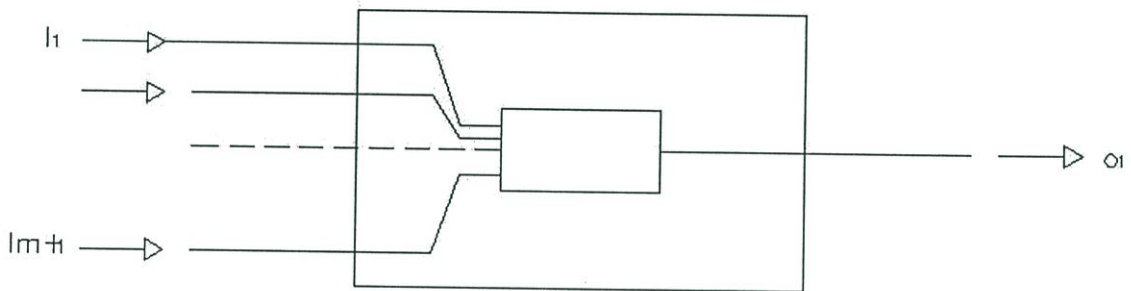
รูปที่ 3.5 แสดงคู่ควบแบบดาวที่มี  $N \times M$  พอร์ต

### 3.3.1.3.2 คู่ควบแบบต้นไม้ (Tree coupler)

เป็นคู่ควบที่มีอินพุตหรือเอาต์พุตแบบ M พอร์ตเพียงด้านเดียว ส่วนด้านที่เหลือจะมี 1 พอร์ต มีลักษณะดังรูปที่ 3.6 โดยที่ M เป็นจำนวนเต็มมีค่ามากกว่า 2



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 แสดงคู่ควบแบบต้นไม้ (ก) 1XM (ข) MX1

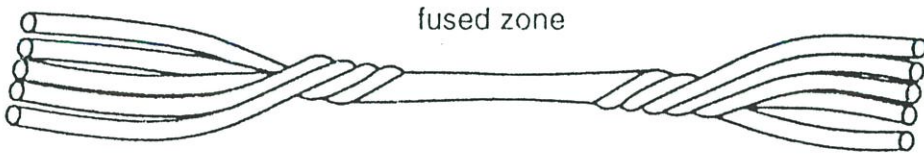
### 3.3.2 การผลิตคู่ควบ

วิธีการที่ใช้ในการผลิตสามารถกระทำได้หลากหลายวิธี ในงานวิจัยจะได้เสนอการผลิตคู่ควบเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น วิธีการเหล่านี้ได้แก่

#### 3.3.2.1 วิธีการให้ความร้อนและการดึง (Fusion-drawing method)

วิธีการนี้ทำโดยเส้นใยนำแสงหลายๆเส้นมารวมกันในการสร้างเป็นบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานแสง (Energy Exchange Zone) หรือบริเวณคัปปลิง ซึ่งเป็นบริเวณที่เส้นใยนำแสงจะถูกบีบรวมเป็นเนื้อเดียวกันขณะที่ให้ความร้อนกับบริเวณที่บิดเป็นเกลียวนั้นและบริเวณนี้จะถูกดึงยืดออกตามยาวเล็กน้อย วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายในการผลิตแต่ถ้าเป็นเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก เส้นใยนำแสงอาจได้รับความเสียหายจากความร้อนที่ให้ เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์คัปปลิงระหว่างเส้น

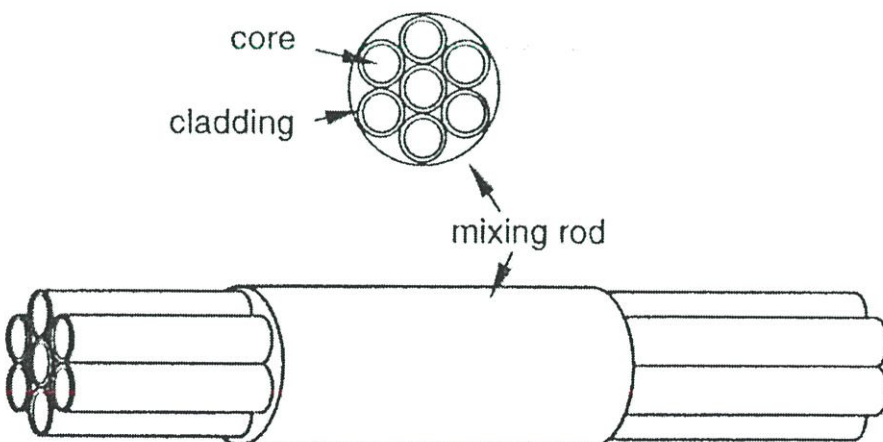
ใยนำแสงมีค่าต่ำ สำหรับความสูญเสียแบบเอ็กเซส (excess loss) ของการผลิตวิธีการนี้ มีค่าอยู่ในช่วง 1 dB - 2.5 dB วิธีการนี้สามารถใช้ในการผลิตคู่ควบแบบ N × N ได้



รูปที่ 3.7 แสดงคู่ควบที่ผลิตโดยวิธีการให้ความร้อนและการดึง

### 3.3.2.2 วิธีแกนร่วม (Mixing Rod Method)

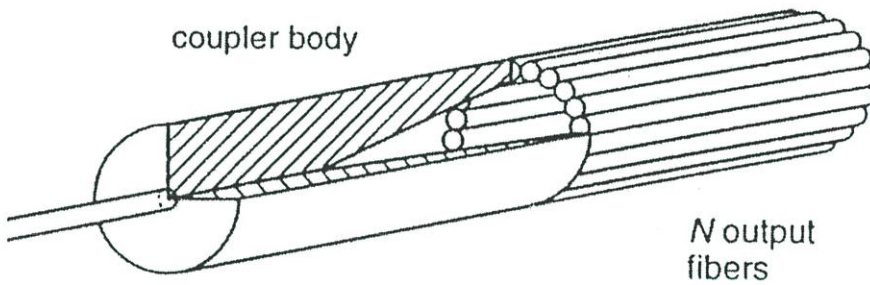
เป็นวิธีการผลิตคู่ควบโดยการใช้แกนร่วมในการเชื่อมต่อระหว่างมัดของเส้นใยนำแสงเข้าด้วยกัน ความสูญเสียแบบอินเสิชัน (Insertion Loss) ของคู่ควบชนิดนี้ขึ้นกับจำนวนของเส้นใยนำแสงและอัตราส่วนระหว่างผลรวมของพื้นที่แกนของเส้นใยนำแสงกับพื้นที่แกนของแกนร่วม ในการลดความสูญเสียแบบอินเสิชันทำได้โดยการจัดเรียงเส้นใยนำแสงแบบเฮกซะโกนอลและกำหนดอัตราส่วนของแกนที่เหมาะสม ดังนั้นภาพตัดขวางของแกนร่วมมักเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือรูปแบบมงกุฎ (crown) เพราะการเรียงตัวของเส้นใยนำแสงมีมีภาพตัดขวางที่เป็นวงกลมไม่ให้เกิดการกระจายของแสงในแต่ละเอาท์พุทไม่สม่ำเสมอ ยกเว้นในกรณีที่เส้นใยนำแสงที่อยู่ตำแหน่งกลางมัดของเส้นใยนำแสงเป็นอินพุท



รูปที่ 3.8 แสดงคู่ควบที่ผลิตโดยวิธีแกนร่วม

### 3.3.2.3 วิธีแกนกรวยแยก (Cylindrical Rod with A Separation Cone Method)

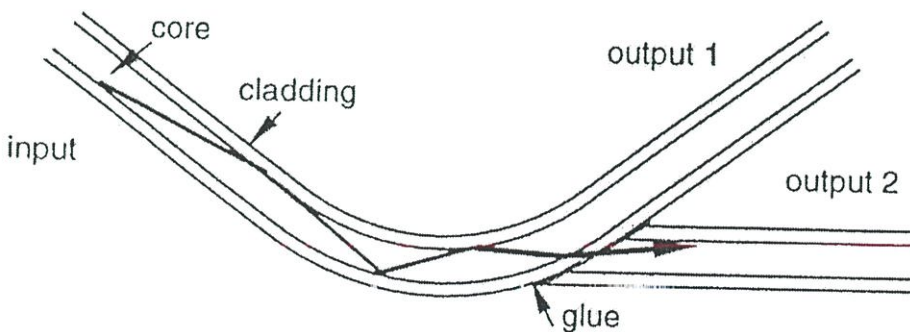
วิธีการนี้ผลิตเป็นคู่ควบโดยใช้แกนกรวยแยกที่ทำจากวัสดุแสงที่มีความโปร่งใสเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสงที่ทำหน้าที่อินพุตกับเส้นใยนำแสงที่ทำหน้าที่เอาต์พุต เมื่อแสงเดินทางเข้าไปในแกนกรวยแยกนี้แสงจะสะท้อนที่ทั้งผิวภายในและภายนอกของอุปกรณ์ด้วยหลักการการสะท้อนกลับหมดไปยังเอาต์พุต เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอก ความยาวและมุมกรวยแยกของแกนกรวยแยกนี้คำนวณจากจำนวนเส้นใยนำแสงที่นำมาใช้เป็นเอาต์พุต



รูปที่ 3.9 แสดงคู่ควบที่ผลิตโดยวิธีแกนกรวยแยก

### 3.3.2.4 วิธีการใช้เส้นใยนำแสงที่เสื่อมสภาพ (Fiber Deformation Method)

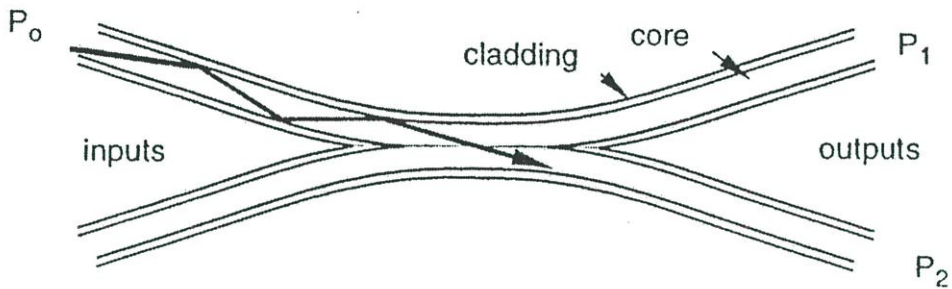
วิธีการนี้เป็นการผลิตคู่ควบโดยการนำเส้นใยนำแสงที่เสื่อมสภาพสามารถทำให้เกิดลำแสงรั่ว (Leaky Ray) จากเส้นใยนำแสงเมื่อนำลำแสงรั่วป้อนเข้าไปในเส้นใยนำแสงอีกเส้นจะสามารถนำไปใช้งานเป็นคู่ควบได้ ความสามารถในการคับปลิงของคู่ควบจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการควบคุมการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงเข้าด้วยกัน วิธีการนี้สามารถนำไปสร้างเป็นคู่ควบแบบที่ได้อีก



รูปที่ 3.10 แสดงคู่ควบที่ผลิตโดยวิธีการใช้เส้นใยนำแสงที่เสื่อม

**3.3.2.5 วิธีการขัดและเชื่อมติด (Polishing and Joining Method)**

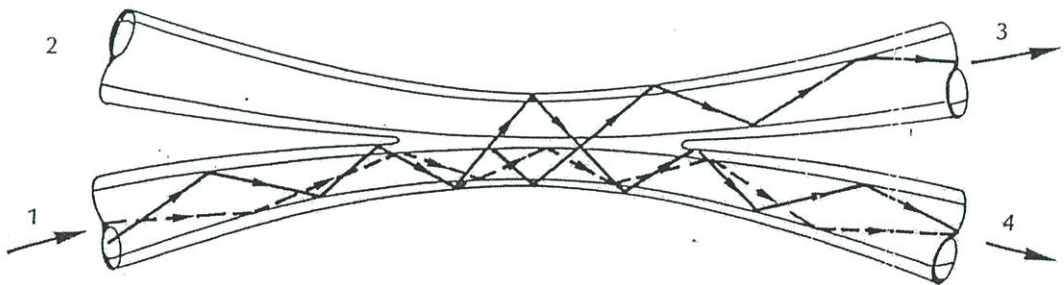
วิธีการผลิตนี้เป็นการผลิตคู่ควบโดยการนำเส้นใยนำแสงตั้งแต่ 2 เส้นขึ้นไปมาขัดที่ผิวข้างตามยาวของเส้นใยนำแสง จากนั้นทำการเชื่อมติดเส้นใยนำแสงทั้งสองเข้าด้วยกันโดยใช้วัสดุเชื่อมติดได้แก่ กาว อีพ็อกซี่(Epoxy) เป็นต้นหรืออาจทำการเชื่อมกันไว้ด้วยวัสดุอินเด็กซ์เมทชิง (Index Matching Materials) วิธีการนี้นิยมใช้ในการสร้างคู่ควบแบบ 2X2 นอกจากนี้วิธีการเช่นนี้ยังสามารถผลิตคู่ควบแบบ N XN ได้ด้วย



รูปที่ 3.11 คัปเปิลอร์ที่ทำโดยวิธีการขัดและเชื่อมติด

**3.3.3 คุณลักษณะของคู่ควบ**

เมื่อมีความต้องการใช้งานคู่ควบ 2X2 จำเป็นต้องมีการพิจารณาลักษณะของ โดยคู่ควบที่เป็นพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษาเรื่องของคู่ควบคือ คู่ควบแบบ 2X2 ซึ่งมีลักษณะการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างของคู่ควบแบบ 2X2

จากรูปที่ 3.12 คุณลักษณะที่สำคัญในการพิจารณาเลือกใช้งานคู่ควบซึ่งมีดังต่อไปนี้

### 3.3.3.1 ความสูญเสียแบบอินเลิซัน (Insertion loss)

เป็นค่าความสูญเสียกำลังของสัญญาณแสงระหว่างอินพุตและเอาต์พุตใดๆที่พิจารณาสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\text{ความสูญเสียแบบอินเลิซัน} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_4} \right) \text{ dB} \quad (3.34)$$

เมื่อพิจารณาอินพุตที่พอร์ต 1 กับเอาต์พุตที่พอร์ต 4

### 3.3.3.2 ความสูญเสียแบบเอ็กเซส (Excess loss)

เป็นค่าความสูญเสียกำลังของสัญญาณแสงจากอินพุตรวมเทียบเอาต์พุตรวมสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\text{ความสูญเสียแบบเอ็กเซส} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_3 + P_4} \right) \text{ dB} \quad (3.35)$$

### 3.3.3.3 ค่าไดเรกทิวิตี (Directivity)

เป็นค่ากำลังของสัญญาณแสงที่สะท้อนกลับยังอีกหนึ่งอินพุตที่เหลือ (ในที่นี้คือ พอร์ต 2) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\text{ค่าไดเรกทิวิตี} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \text{ dB} \quad (3.36)$$

### 3.3.3.4 อัตราส่วนการคัปปลิง (Coupling ratio)

เป็นอัตราส่วนของกำลังแสงที่ออกที่เอาต์พุตใดๆต่อกำลังแสงเอาต์พุตทั้งหมดซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\text{อัตราส่วนการคัปปลิง} = \frac{P_3}{P_3 + P_4} \quad (3.37)$$

เมื่อพิจารณาที่พอร์ตที่ 3

### 3.3 ทฤษฎีโหมดคัปปลิงสำหรับคู่ควบ

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงรายละเอียดทั่วไปของคู่ควบ สำหรับในหัวข้อนี้เราจะได้อธิบายการทำงานของคู่ควบโดยใช้ทฤษฎีโหมดคัปปลิงในการพิจารณาคู่ควบแบบ 2x2

พิจารณาระบบที่มีท่อนำคลื่น A ซึ่งเป็นท่อนำคลื่นแบบโหมดเดี่ยว เพียงท่อนำคลื่นเดี่ยวเมื่อแสงเดินทางในท่อนำคลื่นโดยที่ท่อนำคลื่นไม่ถูกรบกวน (Unperturbed Waveguide) จากภายนอก สนามในท่อนำคลื่นสามารถเขียนแทนด้วย

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \mathbf{e}_A(x, y)e^{-j\beta_{ZA}z} \quad (3.38)$$

$$\mathbf{H}(x, y, z) = \mathbf{h}_A(x, y)e^{-j\beta_{ZA}z} \quad (3.39)$$

เมื่อนำท่อนำคลื่น B ซึ่งเหมือนกับท่อนำคลื่น A ทุกประการมาวางใกล้ท่อนำคลื่น A ในระยะที่ใกล้ที่เหมาะสมดังรูปที่ 3.13 นั่นคือ ระบบจะกลายเป็นระบบท่อนำคลื่นที่มีการรบกวนเล็กน้อยกันต่อกัน (Perturbed Waveguide System) ซึ่งสนาม  $\mathbf{E}'$  และ  $\mathbf{H}'$  ในระบบที่ถูกรบกวนเล็กน้อยนี้สามารถเขียนแทนด้วย

$$\mathbf{E}'(x, y, z) = a_A(z)\mathbf{e}_A(x, y)e^{-j\beta_{ZA}z} + a_B(z)\mathbf{e}_B(x, y)e^{-j\beta_{ZB}z} \quad (3.40)$$

$$\mathbf{H}'(x, y, z) = a_A(z)\mathbf{h}_A(x, y)e^{-j\beta_{ZA}z} + a_B(z)\mathbf{h}_B(x, y)e^{-j\beta_{ZB}z} \quad (3.41)$$

เมื่อ  $\mathbf{e}_A, \mathbf{e}_B, \mathbf{h}_A$  และ  $\mathbf{h}_B$  แทน ฟังก์ชันการกระจายที่นอร์มัลไรซ์ด้วยสนามทั้งหมด

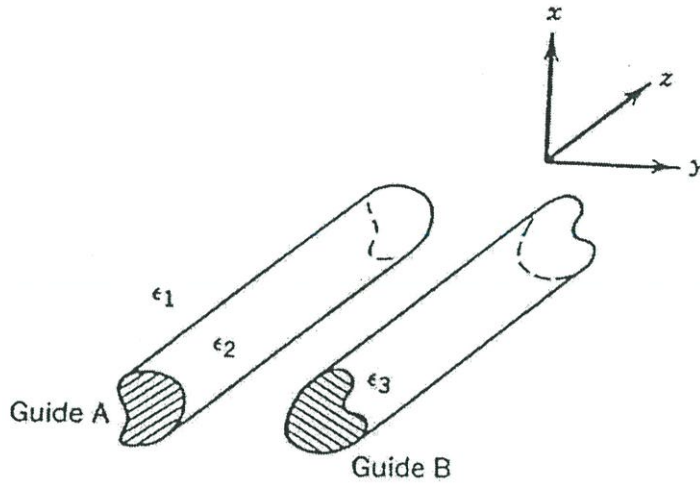
$a_A(z), a_B(z)$  แทน สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ที่จุดใด ๆ ตามแนวแกน Z

$\beta_{ZA, B}$  แทน ค่าคงที่การเคลื่อนที่ของท่อนำคลื่น A และ B

สมการที่ (3.40) และ (3.41) สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ ดังสมการ

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{E}'(x, y, z) \\ \mathbf{H}'(x, y, z) \end{array} \right\} = \sum_m a_m(z) \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{e}_m(x, y) \\ \mathbf{h}_m(x, y) \end{array} \right\} e^{-j\beta_{Zm}z} \quad (3.42)$$

เมื่อ m แทน A, B



รูปที่ 3.13 แสดงท่อนำคลื่น A และ B ที่นำมาวางใกล้กันในระยะที่เหมาะสม

จากสมการที่ (3.40) และ(3.41) เมื่อท่อนำคลื่น A ถูกกระทบเล็กน้อยด้วยท่อนำคลื่น B ดังนั้น  $a_A(z)$  และ  $a_B(z)$  ไม่เป็นค่าคงที่อิสระอีกต่อไป และสมการโหมดคัปปลิงของท่อนำคลื่น A สามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{da_A}{dz} = -jC_{BA}a_B(z)e^{j(\beta_{ZA} - \beta_{ZB})z} \quad (3.43)$$

เมื่อ  $C_{BA}$  เป็น สัมประสิทธิ์การคัปปลิงระหว่างโหมดทั้งสองของท่อนำคลื่น มีค่าเท่ากับ

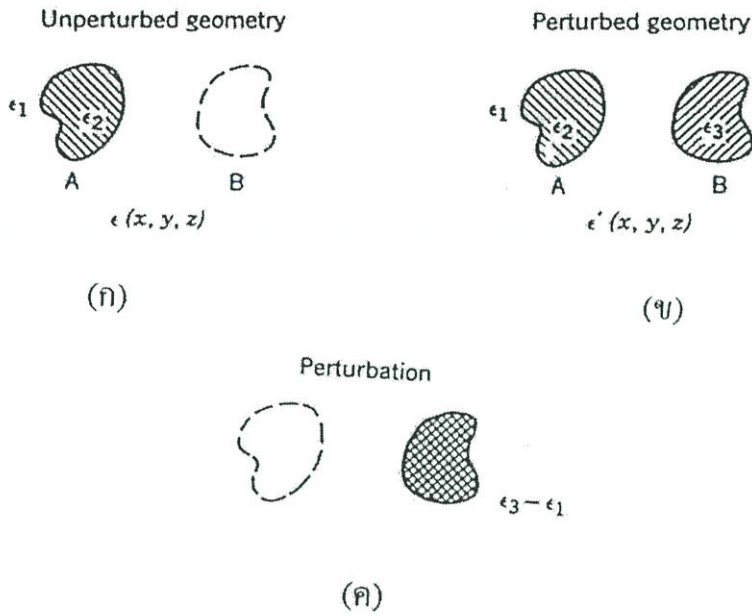
$$C_{BA} = \frac{\omega}{2} \iint_{S_B} (\epsilon_3 - \epsilon_1)(\mathbf{e}_B \cdot \mathbf{e}_A^*) dS \quad (3.44)$$

และการอินทิเกรตกระทำตลอดท่อนำคลื่น B สมการโหมดคัปปลิงของท่อนำคลื่น B สามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{da_B}{dz} = -jC_{AB}a_A(z)e^{-j(\beta_{ZA} - \beta_{ZB})z} \quad (3.45)$$

เมื่อ  $C_{AB}$  เป็นสัมประสิทธิ์การคัปปลิงระหว่างโหมดของท่อนำคลื่น มีค่าเท่ากับ

$$C_{AB} = \frac{\omega}{2} \iint_{S_A} (\epsilon_2 - \epsilon_1)(\mathbf{e}_A \cdot \mathbf{e}_B^*) dS \quad (3.46)$$



รูปที่ 3.14 แสดงผลการรบกวนเล็กน้อยของท่อนำคลื่นที่วางใกล้กัน (ก) โครงสร้างที่ไม่ถูกรบกวน (Unperturbed Geometry) (ข) โครงสร้างที่ถูกรบกวนเล็กน้อย (Perturbed Geometry) (ค) การรบกวนเล็กน้อย (Perturbation)

และการอินทิเกรตกระทำตลอดท่อนำคลื่น A เมื่อ  $\Delta\beta = \beta_{ZA} - \beta_{ZB}$  แทนลงในสมการที่ (3.43) และ (3.45) ได้ว่า

$$\frac{da_A}{dz} = -jC_{BA}e^{j\Delta\beta z}a_B(z) \quad (3.47)$$

$$\frac{da_B}{dz} = -jC_{AB}e^{-j\Delta\beta z}a_A(z) \quad (3.48)$$

พบว่าสมการที่ (3.47) และ (3.48) มีความสัมพันธ์กันในลักษณะ 2 สมการ 2 ตัวแปร ถ้าสมมุติให้  $a_{A,B}(z) = a_{A,B}^0 e^{-j\gamma_{A,B}z}$  เมื่อ  $a_{A,B}^0$  เป็นค่าคงที่อาบีทารี และ  $\gamma_{A,B}$  เป็นตัวแปรไม่ทราบค่า แทนลงในสมการที่ (3.47) และ (3.48) และจัดรูปสมการได้ว่า

$$a_A^0 = \frac{C_{BA}}{\gamma_A} e^{j(\Delta\beta + \gamma_A - \gamma_B)z} a_B^0 \quad (3.49)$$

และ

$$a_B^o = \frac{C_{AB}}{\gamma_B} e^{-j(\Delta\beta + \gamma_A - \gamma_B)z} a_A^o \quad (3.50)$$

ถ้าสมการที่ (3.49) และ (3.50) เป็นจริงสำหรับทุกค่า  $z$  นั่นคือ

$$\gamma_B = \Delta\beta + \gamma_A \quad (3.51)$$

แทน  $a_B^o$  จากสมการที่ (3.50) ลงในสมการที่ (3.49) และใช้เงื่อนไขสมการที่ (3.51) จะได้ว่า

$$\gamma_A (\Delta\beta + \gamma_A) - C_{BA} C_{AB} = 0 \quad (3.52)$$

หรือ

$$\gamma_A = -\frac{\Delta\beta}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2 + C_{BA} C_{AB}} \quad (3.53)$$

และ ดังนั้น

$$\gamma_B = +\frac{\Delta\beta}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2 + C_{BA} C_{AB}} \quad (3.54)$$

กำหนดให้

$$S = \sqrt{\left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2 + C_{BA} C_{AB}} \quad (3.55)$$

จะได้ค่า  $a_A(z)$  ว่า

$$a_A(z) = e^{j(\Delta\beta/2)z} (A_1 e^{jSz} + A_2 e^{-jSz}) \quad (3.56)$$

เมื่อ  $A_1$  และ  $A_2$  เป็นค่าคงที่อาบิทารี

กำหนดให้พลังงานแสงถ่ายเทจากท่อนำคลื่น B ไปท่อนำคลื่น A ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ที่ตำแหน่ง  $z = 0$  พลังงานแสงทั้งหมดอยู่ในท่อนำคลื่น B ซึ่ง  $a_A(z=0) = 0$  และจากสมการที่ (3.56) จะได้  $A_2 = -A_1$  ดังนั้นสามารถเขียน  $a_A(z)$  ได้ว่า

$$a_A(z) = 2jA_1 e^{j(\Delta\beta/2)z} \sin(Sz) \quad (3.57)$$

จากสมการที่ (3.43) สามารถหาค่า  $a_B(z)$  ได้ดังสมการ

$$a_B(z) = \frac{2jA_1}{C_{BA}} e^{-j(\Delta\beta/2)z} \left[ -\frac{\Delta\beta}{2} \sin(Sz) + jS \cos(Sz) \right] \quad (3.58)$$

เนื่องจากกำลังแสงในแต่ละท่อนำคลื่นเท่ากับกำลังสองของขนาดของสัมประสิทธิ์  $a_{A,B}(z)$  ถ้ากำหนดให้กำลังแสงป้อนเข้าท่อนำคลื่น B ที่  $z=0$  มีค่า  $P_0$  ดังนั้น

$$P_0 \propto |a_B(0)|^2 = \frac{(2A_1)^2}{|C_{BA}|^2} S^2$$

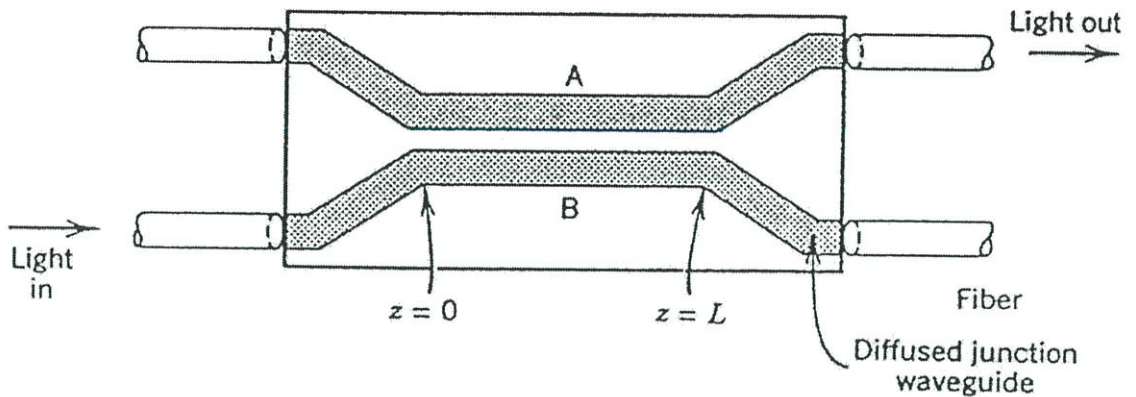
จัดรูปสมการได้ว่า

$$A_1^2 = \frac{P_0 |C_{BA}|^2}{2^2} \quad (3.59)$$

แทนค่าสมการที่ (3.50) ลงในสมการที่ (3.57) และ (3.58) ยกกำลังสองได้ค่ากำลังแสงในแต่ละท่อนำคลื่น ดังสมการ

$$|a_A(z)|^2 = \frac{P_0 |C_{BA}|^2}{S^2} \sin^2(Sz) = P_A(z) \quad (3.60)$$

และ 
$$|a_B(z)|^2 = P_0 \left[ \left( \frac{\Delta\beta}{2S} \right)^2 \sin^2(Sz) + \cos^2(Sz) \right] = P_B(z) \quad (3.61)$$



รูปที่ 3.15 แสดงระบบคู่ความแบบพื้นฐาน

กรณีที่ 1 เงื่อนไขเฟสเท่ากัน ( $\Delta\beta = 0$ )

เมื่อท่อนำคลื่น A และ B มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ กำลังแสงในท่อนำคลื่น A และ B จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขเฟสเท่ากัน ( $k_{ZA} = k_{ZB}$ ) ภายใต้เงื่อนไขนี้  $C_{AB} = C_{BA} = C$  ดังนั้น

$$P_A(z) = P_0 \sin^2(Cz) \quad (3.62 \text{ ก})$$

$$P_B(z) = P_0 \cos^2(Cz) \quad (3.62 \text{ ข})$$

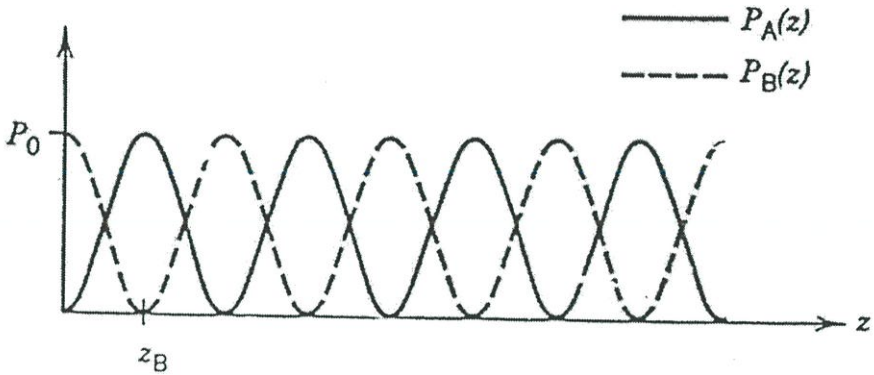
ดังนั้นภายใต้เงื่อนไขเฟสเท่ากัน การถ่ายเทกำลังแสงเกิดขึ้นอย่างเป็นช่วงเทียบกับ  $Z$  ดังแสดงในรูปที่ 3.14 กำลังแสงถ่ายเทจากท่อนำคลื่น B ไปท่อนำคลื่น A หมดที่ระยะ  $Z_B$  จากสมการที่ (3.62 ก)

$$\sin(CZ_B) = 1$$

ดังนั้น

$$Z_B = \frac{\pi}{2C} \quad (3.63)$$

นั่นคือ สัมประสิทธิ์การคับปลิงลดลงระยะในการถ่ายเทพลังงานจากท่อนำคลื่นหนึ่งไปอีกท่อนำคลื่นจนหมด ระยะคับปลิง  $Z_B$  จะต้องระยะยาวขึ้น



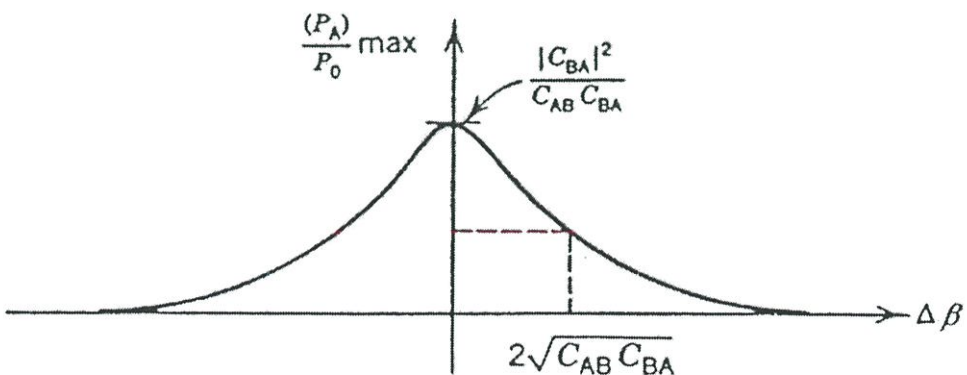
รูปที่ 3.16 แสดงการถ่ายเทพลังงานแสงระหว่างท่อนำคลื่น A และ B ภายใต้เงื่อนไขเฟสเท่ากัน

กรณีที่ 2 เงื่อนไขเฟสไม่เท่ากัน ( $\Delta\beta \neq 0$ )

จากสมการที่ (3.60) และ (3.61) เมื่อ  $\Delta\beta \neq 0$  ค่ากำลังแสงที่สามารถถ่ายเทไปยังท่อนำคลื่น A เกิดขึ้นสูงสุด เมื่อ  $s_z = \pi/2$  นั่นคือ

$$\frac{(P_A)_{\max}}{P_0} = \frac{|C_{BA}|^2}{C_{AB}C_{BA} + \left(\frac{\Delta\beta^2}{4}\right)} \quad (3.64)$$

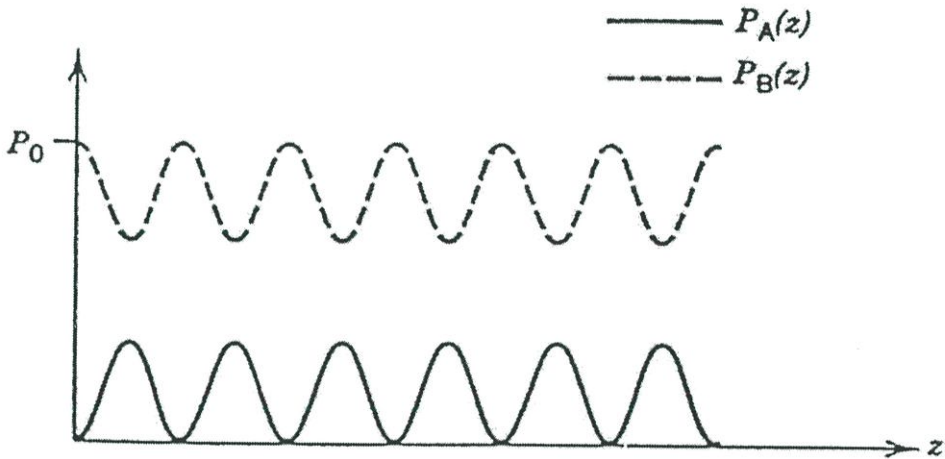
จากรูปที่ 3.17 เมื่อพล็อตค่ากำลังแสงที่ถ่ายเทไปท่อนำคลื่น A กับค่าผลต่างเฟสไม่เท่ากัน ( $\Delta\beta$ )



รูปที่ 3.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงที่ถ่ายเทไปท่อนำคลื่น A เทียบกับเฟสที่ไม่เท่ากัน

เมื่อ  $\Delta\beta \neq 0$  การถ่ายเทพลังงานไม่สามารถเกิดได้สมบูรณ์และกำลังแสงในท่อนำคลื่น A และ B เทียบกับ Z สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13 และจากรูปที่ 3.12 พบว่า เมื่อค่าความต่างเฟสเพิ่มขึ้นจากศูนย์ถึงค่า  $2\sqrt{C_{AB}C_{BA}}$  ค่ากำลังที่ถ่ายเทไปท่อนำคลื่น A จะลดลงด้วยแฟกเตอร์ 2 ดังนั้น ในเงื่อนไขเฟสไม่เท่ากัน ค่ากำลังแสงถ่ายเทเกิดขึ้นเหมาะสมภายในเงื่อนไข

$$|\Delta\beta| < 2\sqrt{C_{AB}C_{BA}} \quad (3.65)$$

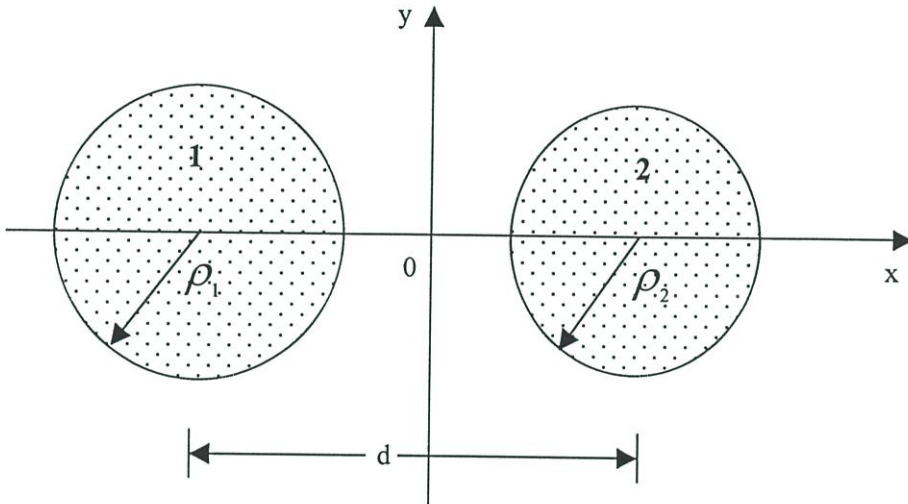


รูปที่ 3.18 แสดงการถ่ายเทพลังงานแสงระหว่างท่อนำคลื่น A และ B ภายใต้เงื่อนไขเฟสไม่เท่ากัน

เนื่องด้วย  $C_{AB}$  และ  $C_{BA}$  เป็นสัมประสิทธิ์การคัปปลิงที่บอกถึงการซ้อนทับของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าท่อนำคลื่น A และ B ในกรณีการรบกวนเล็กน้อยแบบอ่อน (Weak Perturbations) นั้น สัมประสิทธิ์การคัปปลิงจะมีค่าน้อยๆ ดังนั้น พลังงานที่จะมีการคัปปลิงระหว่างท่อนำคลื่นจะเกิดขึ้นเมื่อโหมดสำหรับการถ่ายเทพลังงานมีค่าเฟสใกล้เคียงกัน จากเหตุผลนี้ทำให้ท่อนำคลื่นแต่ละท่อนำคลื่นไม่จำเป็นต้องเป็นท่อนำคลื่นโหมดเดียว นั่นคือ ให้ท่อนำคลื่น B และ A เป็นท่อนำคลื่นหลายโหมด ที่พลังงานทั้งหมดจะอยู่ในโหมดที่  $m_B$  ของท่อนำคลื่น B พลังงานนี้สามารถคัปปลิงได้เฉพาะโหมด  $m_A$  ที่เหมาะสมในท่อนำคลื่น A ( $\beta_{zm_B} = \beta_{zm_A}$ ) สำหรับกำลังแสงที่โหมดอื่น ๆ สามารถตัดทิ้งได้

### 3.4 ค่าคงที่การเคลื่อนที่และสัมประสิทธิ์การคับปลิง

พิจารณาระบบท่อนำคลื่นแบบคอมโพสิต (Composite waveguide) ที่ประกอบด้วยท่อนำคลื่นที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน 2 ท่อและมีความสมมาตรซึ่งกันและกัน หากท่อนำคลื่นทั้งสองวางห่างกันเป็นระยะอนันต์ ค่าตอบโหมดแสงของสมการคลื่นแบบสเกลาร์ของแต่ละท่อนำคลื่นจะมีเพียงท่อนำคลื่นละ 1 โหมดคือโหมด  $\bar{\Psi}_1$  ของท่อนำคลื่น 1 และโหมด  $\bar{\Psi}_2$  ของท่อนำคลื่น 2



รูปที่ 3.19 แสดงระบบท่อนำคลื่นแบบคอมโพสิตที่ประกอบด้วยท่อนำคลื่น 1 และ 2

เมื่อเคลื่อนท่อนำคลื่นทั้งสองเข้ามาวางห่างกันในระยะที่เหมาะสม  $d$  ดังแสดงในรูปที่ 3.19 สนามไฟฟ้าของท่อนำคลื่นทั้งสองจะมีส่วนที่ซ้อนทับกัน โหมดแสงของท่อนำคลื่นจะทำอันตรกิริยาต่อกันเกิดเป็นโหมดแสงที่เป็นคำตอบของระบบท่อนำคลื่นทั้งสองคือ  $\Psi_+$  และ  $\Psi_-$  โดยเรียกโหมดแสงที่เกิดขึ้นใหม่ว่า ซุปเปอร์โพสิชันโหมด (Supersition mode) ซึ่งโหมดแสงใหม่ทั้งสองสามารถเขียนแทนได้ว่า

$$\Psi_+ = \bar{\Psi}_1 + \bar{\Psi}_2 ; \quad \Psi_- = \bar{\Psi}_1 - \bar{\Psi}_2 \quad (3.66)$$

เมื่อ  $\bar{\Psi}_1$  และ  $\bar{\Psi}_2$  คือคำตอบของสมการคลื่นในแต่ละท่อนำคลื่นเมื่อวางอยู่ห่างกันในระยะอนันต์ โดยมีค่าคงที่การเคลื่อนที่เป็น  $\bar{\beta}$

สำหรับกรณีของโหมดแสงซุปเปอร์โพสิชันโหมด  $\Psi_+$  และ  $\Psi_-$  จะมีค่าคงที่การเคลื่อนที่เป็น  $\beta_+$  และ  $\beta_-$  ตามลำดับโดยที่ค่าการเคลื่อนที่ทั้งสองหาค่าได้จากสมการที่ 3.67 ว่า

$$\beta_{\pm} = \bar{\beta} \pm c \quad (3.67)$$

เมื่อ  $C$  คือสัมประสิทธิ์การคับปลิงและมีค่าลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียลกับระยะห่าง  $d$

ค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิงเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างท่อนำคลื่นทั้งสองในระบบท่อนำคลื่นแบบคอมโพสิตโดยสัมประสิทธิ์การคับปลิงคำนวณได้จากการนอร์มอลไลซ์ฟังก์ชันคลื่นที่คาบเกี่ยวกันระหว่างโหมดของท่อนำคลื่นตลอดภาคตัดขวางหารด้วยการนอร์มอลไลซ์ฟังก์ชันคลื่นเริ่มต้นก่อนการคับปลิง ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$C = \frac{(2\Delta)^{1/2} U^3 K_0(wd/\rho)}{\rho v^2 K_1^2(w)} \cong \left\{ \frac{\pi\Delta}{wd\rho} \right\}^{1/2} \frac{U^2 \exp(-wd/\rho)}{v^3 K_1^2(w)} \quad (3.68)$$

เมื่อ

$$\Delta \cong 1 - \frac{n_{cl}}{n_{co}}$$

$$U \text{ คือ คอรัพารามิเตอร์ มีค่าเท่ากับ } U = \rho(k^2 n_{co}^2 - \beta^2)^{1/2}$$

$$W \text{ คือ แคลคคิงพารามิเตอร์ มีค่าเท่ากับ } w = \rho(\beta^2 - k^2 n_{cl}^2)^{1/2}$$

$$V \text{ คือ ความถี่นอร์มัลไลซ์ มีค่าเท่ากับ } v = \rho k(n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$$

$d$  คือ ระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่น

$\rho$  คือ รัศมีของท่อนำคลื่น

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

$K_0$  คือ โมดิไฟด์ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่ง

$K_1$  คือ โมดิไฟด์ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่สอง

จากสมการพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิงของท่อนำคลื่นทั้งสองจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับทั้งค่าดัชนีหักเหของคอร์ ค่าดัชนีหักเหของแคลคคิง และทั้งค่าความยาวคลื่นของแสงซึ่งจะทำการศึกษาต่อไปในบทที่ 5 อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิงตามสมการที่ 3.68 นี้เป็นเพียงค่าที่ตำแหน่งใดๆ หากต้องการทราบค่าสัมประสิทธิ์การคับปลิงรวมจะต้องทำการอินทิเกรตตลอดระยะคับปลิงของท่อนำคลื่น

### 3.5 สรุป

การเดินทางของแสงในตัวกลางใดๆ ได้ถูกอธิบายด้วยสมการของแมกซ์เวลล์ไม่เว้นแม้แต่การเดินทางของแสงในเส้นใยนำแสง ในบทนี้ได้กล่าวถึงอุปกรณ์แสงแบบพาสซีฟซึ่งก็คือคูควบ ตั้งแต่การแบ่งชนิดของคูควบ การวิเคราะห์คุณลักษณะประจำตัวของคูควบ โดยใช้การคำนวณกำลังแสงที่วัดได้จากพอร์ตต่างๆของคูควบ สำหรับการอธิบายพฤติกรรมของแสงที่เกิดขึ้นในคูควบอธิบายไว้ด้วยทฤษฎีโหมดคัปปลิง ซึ่งเมื่อนำท่อนำคลื่นคู่หนึ่งใดๆมาวางห่างกันในระยะที่เหมาะสม เมื่อทำการป้อนแสงให้แก่ท่อนำคลื่นที่หนึ่งพบว่าแสงจะแสดงพฤติกรรมการคัปปลิงไปมาระหว่างท่อนำคลื่นทั้งสองเป็นฟังก์ชันไซน์ไซคอดตามความยาวของระยะที่ท่อนำคลื่นทั้งสองที่พิจารณา อัตราการคัปปลิงของแสงในท่อนำคลื่นทั้งสองอธิบายได้ตามสมการในหัวข้อค่าคงที่การเคลื่อนที่และสัมประสิทธิ์การคัปปลิงซึ่งพบว่า สัมประสิทธิ์การคัปปลิงของคูควบจะสัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพของท่อนำคลื่น แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้งาน ดัชนีหักเหแสงของตัวกลางระหว่างท่อนำคลื่นและตัวแปรอื่นๆหลายตัวแปร สำหรับในบทต่อไปจะได้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่สำคัญๆที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก เลเซอร์ไดโอด เป็นต้น

## บทที่ 4

### หลักการของวัสดุและอุปกรณ์การวิจัย

การที่ผู้วิจัยมีความเข้าใจในหลักการของวัสดุและอุปกรณ์ใดๆที่จะใช้งานจะทำให้สามารถการทำงานวิจัยสำเร็จได้ด้วยความถูกต้องและรวดเร็ว ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยจะประกอบไปด้วย เส้นใยนำแสง เลเซอร์ไดโอดและพินโฟโตไดโอด โดยรายละเอียดต่างๆของอุปกรณ์จะกล่าวต่อไปตามลำดับดังนี้

#### 4.1 เส้นใยนำแสง (Optical Fiber)

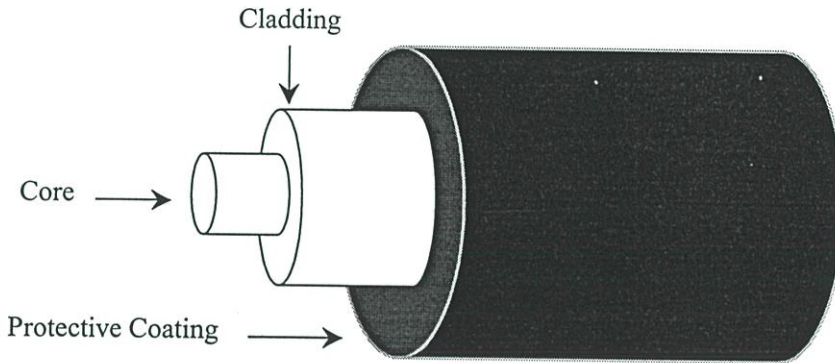
มนุษย์มีความคุ้นเคยกับการสื่อสารโดยใช้แสงตั้งแต่ในยุคโบราณเช่นการใช้แสงจากคบไฟส่งเป็นสัญญาณในเวลากลางคืน การส่งสัญญาณแสงสะท้อนด้วยกระจกจากระยะทางไกลๆ หรือแม้แต่การส่งสัญญาณไฟของประกาศาร ในการส่งสัญญาณแสงที่ผ่านๆมาในอดีตนั้นจะประสบปัญหาการถูกรบกวนจากธรรมชาติได้แก่ ฝน หมอกหรือสิ่งกีดขวาง ต่อมาได้มีการทดลองนำเอาเลนส์มาเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณแสง แต่ก็ประสบปัญหายุ่งยากมากในการใช้งานจริงทั้งในเรื่องตำแหน่งและมุมในการวางเลนส์ ในปี ค.ศ. 1966 เกา (Kao) นักวิจัยจากประเทศอังกฤษได้เสนอบทความเกี่ยวกับการสื่อสารโดยใช้เส้นใยนำแสงชนิดแก้วเป็นครั้งแรก ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาทั้งจากผลของการประดิษฐ์เลเซอร์และการพัฒนาทางวัสดุศาสตร์ การสื่อสารโดยใช้เส้นใยนำแสงก็ได้รับการศึกษาค้นคว้าเพิ่มขึ้นเรื่อยมาจนปัจจุบัน

การสื่อสารโดยใช้เส้นใยนำแสงนั้นมีข้อได้เปรียบมากมายได้แก่

- (ก) มีช่วงกว้างแบนวิดท์กว้างทำให้สามารถส่งข้อมูลได้ครั้งมากๆ
- (ข) ค่าความสูญเสียสัญญาณต่ำ
- (ค) มีความปลอดภัยจากการเหนี่ยวนำจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- (ง) มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา
- (จ) ข้อมูลที่ส่งมีความปลอดภัยเนื่องจากเป็นระบบปิด
- (ฉ) มีต้นทุนต่อข้อมูลต่ำ

โครงสร้างโดยทั่วไปของเส้นใยนำแสงแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ส่วนที่ 1 คือ คอร์ (Core) เป็นส่วนที่อยู่ในสุดของเส้นใยนำแสงทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินแสงของเส้นใยนำแสง ขนาดของคอร์จะขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยนำแสง โดยเส้นใยนำแสงโหมดเดียวจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ประมาณ 2-10  $\mu\text{m}$  ส่วนเส้นใยนำแสงหลายโหมดจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ประมาณ 50  $\mu\text{m}$  ส่วนที่ 2 แคลดดิง (Cladding) เป็นส่วนที่อยู่ถัดออกมาจากคอร์ห่อหุ้มคอร์ไว้ โดยทั่วไปค่าดัชนีหักเหของแคลดดิงจะมีค่าน้อยกว่าของคอร์เล็กน้อยเพื่อทำให้เกิดปรากฏ

การฉีกการสะท้อนกลับหมดภายใน ในกรณีที่เส้นใยนำแสงเปลือยอาจใช้อากาศทำหน้าที่เป็นเคลดดิ้งก็ได้ ส่วนสุดท้าย ส่วนห่อหุ้มชั้นนอก (Protective coating) เป็นส่วนห่อหุ้มเส้นใยนำแสงไม่ให้ได้รับความเสียหายจากสิ่งแวดล้อมภายนอกนอกจากนี้ยังเป็นส่วนที่ป้องกันแสงจากภายนอกเข้าสู่เส้นใยนำแสงและป้องกันแสงจากเส้นใยนำแสงออกสู่ภายนอก เช่นกันถ้าเป็นเส้นใยนำแสงเปลือยก็อาจไม่มีส่วนนี้ได้



รูปที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบของสำคัญของเส้นใยนำแสง 3 ส่วน คือ คอรั คลอดดิ้งและส่วนห่อหุ้มชั้นนอก

#### 4.1.1 ชนิดของเส้นใยนำแสง

การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงสามารถแบ่งตามชนิดของค่าดัชนีหักเหในคอรัและเคลดดิ้งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

##### 4.1.1.1 เส้นใยนำแสงชนิดขั้นบันได (Step - index fiber)

เป็นเส้นใยนำแสงที่มีค่าดัชนีหักเหของคอรัและเคลดดิ้งคงที่ โดยคอรัจะมีค่าดัชนีหักเหมากกว่าเคลดดิ้ง การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหระหว่างคอรักับเคลดดิ้งสามารถเขียนได้สมการ

$$n(r) = \begin{cases} n_1 ; r < a \text{ (Core)} \\ n_2 ; r \geq a \text{ (Cladding)} \end{cases} \quad (4.1)$$

นั่นคือที่รอยต่อของคอรัและเคลดดิ้งค่าดัชนีหักเหจะมีค่าเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได เส้นใยนำแสงขั้นบันไดยังสามารถแบ่งย่อยได้สองแบบย่อย

(ก)เส้นใยนำแสงขั้นบันไดแบบหลายโหมด (Multimode step - index fiber) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอรัตั้งแต่ 50 - 200 $\mu\text{m}$  แสงที่เดินทางในคอรัเส้นใยนำแสงชนิดนี้จะมีได้ 2 ลักษณะอย่าง ที่ 1 คือแสงที่เดินทางตามแนวแกนกลางเรียก รังสีตามแนวแกนกลาง (Axis Ray) อย่างที่ 2 คือแสง

ที่เดินทางซิกแซกในคอร์ด้วยมุมใกล้เคียงกับมุมวิกฤต เรียก รังสีเมริดิเนียนอล (Meridional Ray) ดังในรูปที่ 4.2 โดยรังสีเมริดิเนียนอลจะมีระยะทางเดินมากกว่ารังสีแกนกลางดังสมการ

$$\Delta Z = \frac{Z \cdot (n_{\text{core}} - n_{\text{cladding}})}{n_{\text{cladding}}} \quad \text{meters} \quad (4.2)$$

โดยที่  $\Delta Z$  คือผลต่างทางเดินแสงของรังสีเมริดิเนียนอลกับรังสีแกนกลาง

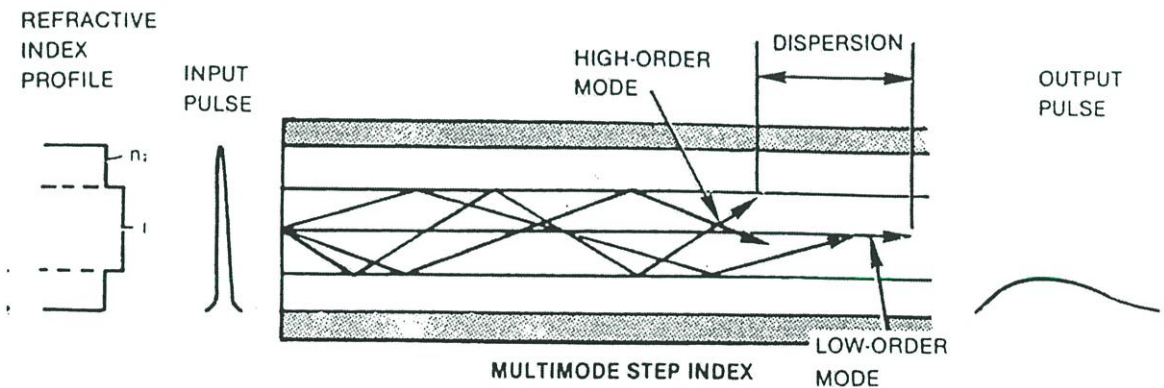
$Z$  คือ ความยาวของเส้นใยนำแสง

และเวลาที่รังสีเมริดิเนียนอลใช้มีค่ามากกว่ารังสีแกนกลางสามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta t = \frac{Z(n_{\text{core}} - n_{\text{cladding}})n_{\text{core}}}{c} \quad \text{seconds} \quad (4.3)$$

โดยที่  $\Delta t$  คือ เวลาที่รังสีเมริดิเนียนอลใช้เพิ่มขึ้น

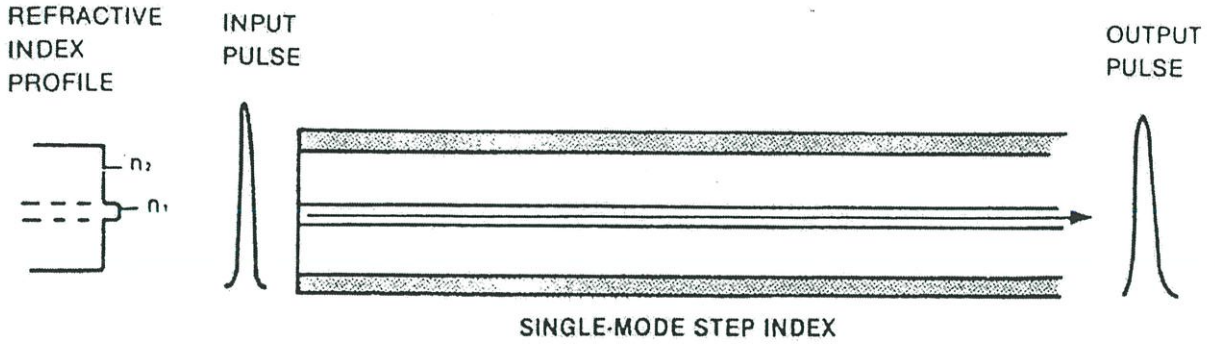
$c$  คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ



รูปที่ 4.2 แสดงเส้นใยนำแสงขั้นบันไดแบบหลายโหมด

เวลาที่รังสีเมริดิเนียนอลใช้เพิ่มขึ้นนี้เรียก การกระจายออกเชิงโหมด (Modal Dispersion) ซึ่งเป็นสาเหตุของการขยายกว้างออกของสัญญาณแสง

(ข)เส้นใยนำแสงขั้นบันไดแบบโหมดเดียว (Single step - index fiber) เส้นใยนำแสงนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ประมาณ 2 -10  $\mu\text{m}$  เนื่องจากคอร์มีขนาดเล็กมากทำให้มีแสงเพียงโหมดเดียวเท่านั้นที่สามารถเดินทางภายในคอร์ได้ ข้อเสียของเส้นใยนำแสงโหมดเดียวคือคอร์มีขนาดเล็กมากทำให้ยากต่อการป้อนแสงเข้าเส้นใยนำแสง



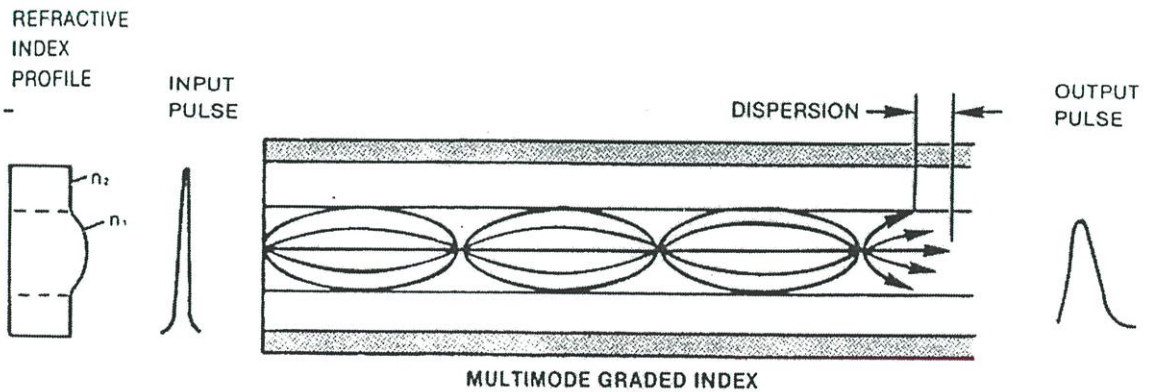
รูปที่ 4.3 แสดงเส้นใยนำแสงขั้นบันไดแบบโหมดเดียว

4.1.1.2 เส้นใยนำแสงเกรดอินเด็กซ์แบบหลายโหมด (Multimode Graded – Index Fiber)

ค่าดัชนีหักเหของคอร์เส้นใยนำแสงชนิดนี้จะไม่เป็นค่าคงที่ แต่จะเป็นฟังก์ชันลดลงตามระยะทางในแนวรัศมีจากจุดกึ่งกลางคอร์ไปถึงรอยต่อของคอร์กับแคลดดิง ซึ่งค่าดัชนีหักเหของคอร์และแคลดดิงของเส้นใยนำแสงชนิดนี้สามารถเขียนได้ว่า

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2} ; r < a \text{ (Core)} \tag{4.4}$$

$$n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = n_2 ; r \geq a \text{ (Cladding)}$$



รูปที่ 4.4 แสดงเส้นใยนำแสงเกรดอินเด็กซ์แบบหลายโหมด

### 4.1.1.3 เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก (Plastic Optical Fibers, POFs)

แม้ว่าเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกจะมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงกว่า มีราคาถูกเส้นใยนำแสงชนิดแก้ว แต่ก็มีการลดทอนทางกำลังแสงสูงกว่าเส้นใยนำแสงชนิดแก้วเช่นกัน จึงยังไม่สามารถที่จะนำมาใช้ในงานด้านสื่อสารได้อย่างเต็มที่ วัสดุที่นำมาผลิตเป็นคอร์ส่วนใหญ่เป็นโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลไม่แน่นอนเรียกว่า อะมอร์ฟัสโพลีเมอร์ (Amorphous Polymer) ตัวอย่างของวัสดุที่นำมาผลิตเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

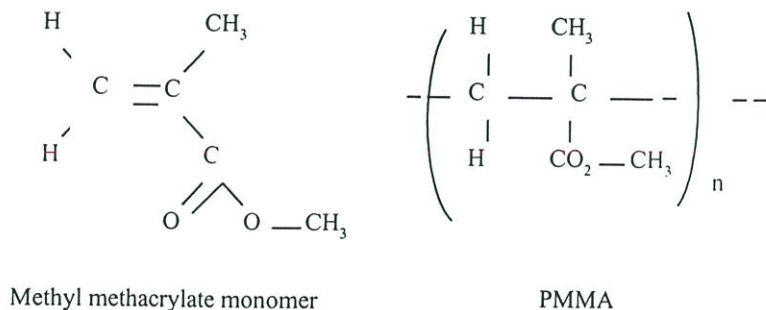
ตารางที่ 4.1 แสดงโพลีเมอร์ชนิดต่างๆที่นำมาผลิตเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก

Material	Index	Material	Index
Amorphous fluoro polymers	1.29 - 1.31	Poly(methyl acrylate)	1.47 - 1.48
Semicrystalline fluoro polymers	1.32	Poly(methyl methacrylate) PMMA	1.492
FEP	1.34	Polycarbonates PC	1.50 - 1.57
PTFE	1.35	Poly(vinyl alcohol)	1.49 - 1.53
PCTFE	1.42 - 1.43	Polyacrylonitrile	1.52
PVDF	1.42	Poly(methyl methacrylimide)	1.53 - 1.54
Poly(dimethyl siloxane)	1.43	Poly(vinyl chloride) PVC	1.54 - 1.55
Poly(trifluoroethyl methacrylate)	1.44	Epoxy resins	1.55 - 1.60
Poly(vinyl acetate)	1.47	Polystyrene PS	1.59

การแบ่งชนิดของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกตามชนิดของวัสดุที่นำมาผลิตคอร์สามารถแบ่งได้ดังนี้

#### 1) คอร์ชนิดโพลีเมทิลเมตาไครเลท (Polymethyl methacrylate, PMMA)

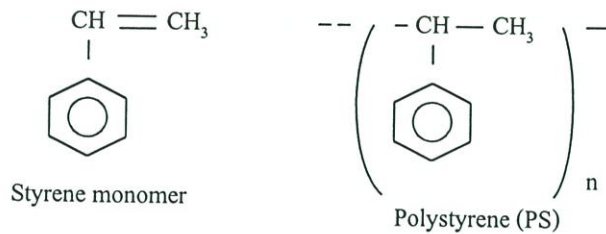
โพลีเมอร์ชนิดนี้จะมีดัชนีหักเหต่ำประมาณ 1.49 ประกอบด้วย โคโพลีเมอร์ของเมตาไครเลท (Copolymers of methacrylate) ฟลูออโร-อัลไคลด์ (Fluoro-alkyl) และไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Vinylidene fluoride) ในการทดลองนี้ก็ใช้เส้นใยนำแสงที่มีคอร์ทำจากวัสดุชนิดนี้



รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพีเอ็มเอ็มเอ

## 2) คอร์ชชนิดโพลีสไตลีน (Polystyrene, PS)

โพลีเมอร์ชนิดนี้มีดัชนีหักเห 1.59 เมื่อนำมาใช้ผลิตเป็นคอร์เส้นใยนำแสงส่วนเคลดคิง มักผลิตจากพีเอ็มเอ็มเอ(1.49)หรือโพลีไวนิลอะซิเตท(1.47) คอร์ของเส้นใยนำแสงชนิดนี้จะมีควมมันวาวมากกว่าคอร์ที่ผลิตจากวัสดุชนิดพีเอ็มเอ็มเอ



### รูปที่ 4.6 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ PS

## 3) คอร์ชชนิดคิวเทอเรทเต็ด (Deuterated)

โพลีเมอร์ชนิดนี้จะมีโครงสร้างเช่นเดียวกับพีเอ็มเอ็มเอ แต่จะแทนที่อะตอมของไฮโดรเจนด้วยอะตอมของคิวเทอเรียม(Dueterium Atom)ซึ่งทำการเลื่อนของช่วงรับแสงให้รับแสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่ากรณีของพีเอ็มเอ็มเอ นอกจากนี้ยังมีความโปร่งใสมากกว่ากรณีพีเอ็มเอ็มเอด้วย

### 4.1.1.3.1 การผลิตเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก

ในการผลิตเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกจะประกอบด้วยหลายขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนการผลิตต้องมีการระมัดระวังไม่ให้เกิดการออกซิเดชันหรือเกิดการสะสมของสารเจือในเนื้อของวัสดุเพราะจะเป็นสาเหตุของการสูญเสียกำลังแสงที่ไม่สามารถแก้ไขได้ในภายหลัง ขั้นตอนการผลิตสามารถแบ่งออก 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

#### 1) การทำวัตถุดิบให้บริสุทธิ์ (Purification of Materials)

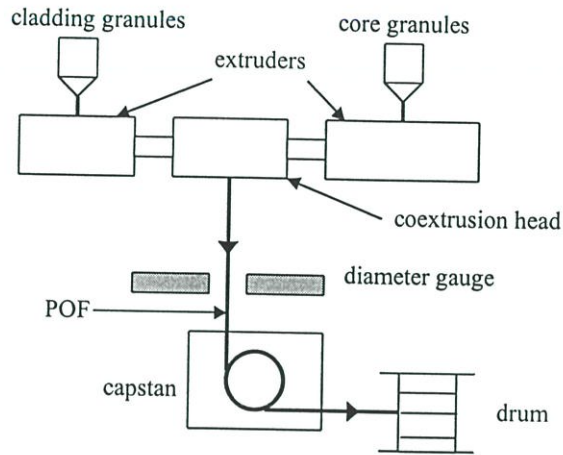
โดยทั่วไปวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเส้นใยนำแสงนั้นยังไม่มี ความบริสุทธิ์ของเนื้อวัสดุเพียงพอ สำหรับการผลิตต้องมีการนำโดยการนำวัสดุ นั้นไปทำการกลั่นตามด้วยการกรองเอาสิ่งเจือปนออก ในระบบสุญญากาศหลายๆครั้งจนถึงระดับความบริสุทธิ์ที่ต้องการ

#### 2) การทำวัตถุดิบของคอร์ให้เป็นโพลีเมอร์ (Polymerization of The Core Materials)

เริ่มแรกวัตถุดิบที่ใช้ทำคอร์เส้นใยนำแสงจะอยู่ในรูปของโมโนเมอร์ ซึ่งเป็นโมเลกุลเดี่ยว โดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีทำการเชื่อมต่อโมเลกุลหลาย ๆ โมเลกุลเข้าด้วยกันเป็นสายของโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งสายของโมเลกุลนี้จะเป็นตัวควบคุมคุณสมบัติบางประการของโพลีเมอร์

3) การดึงเป็นเส้นใยนำแสง (Fiber Drawing) กระบวนการสร้างเส้นใยนำแสงที่สำคัญสามารถแบ่งได้ดังนี้

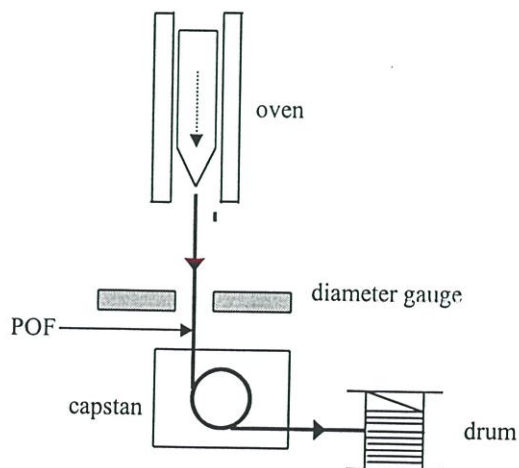
### 3.1) การหลอมและดึงวัตถุดิบ (Coextrusion)



รูปที่ 4.7 แสดงกระบวนการหลอมวัตถุดิบ

ดังแสดงในรูปที่ 4.7 วัตถุดิบที่อยู่ในรูปเม็ดจะถูกหลอมให้ละลายด้วยเตาหลอม จากนั้น วัตถุดิบจะถูกดึงรวมกันออกมาซึ่งในตอนแรกจะกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ก่อน โดยคอร์จะออกมาจากหัวดึงเป็นอันดับแรกจากนั้นคอร์จะถูกเคลือบวัตถุดิบที่ใช้ทำส่วนเคล็ดดึง ซึ่งจะกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกด้วยไดมิเตอร์เกจ(Diameter gauge) ได้เป็นเส้นใยนำแสง ออกมาจากนั้นจะถูกกว้าน (Capstan) ดึงไปเก็บไว้ในม้วน (Drum)

### 3.2) การดึงจากแท่งพรีฟอร์ม (Process Using Preform)



รูปที่ 4.8 แสดงกระบวนการที่ใช้แท่งพรีฟอร์ม

ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ในวิธีการนี้วัตถุดิบจะถูกนำไปผลิตเป็นแท่งพรีฟอร์มก่อน จากนั้นนำแท่งพรีฟอร์มไปใส่ในเตาหลอมที่มีอุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส เพื่อให้หลอมตัวไหลลงตามแรงดึงดูดและดึงเป็นเส้นใย การทำเคลดคิงจะจุ่มเส้นใยลงในวัสดุที่ทำเคลดคิงและผ่านขบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน จากนั้นจะดึงผ่านไดมิเตอร์เกจเพื่อกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกได้เป็นเส้นใยนำแสงมาเก็บเข้าสู่ม้วน

#### 4.1.2 ตัวแปรสำคัญของเส้นใยนำแสง

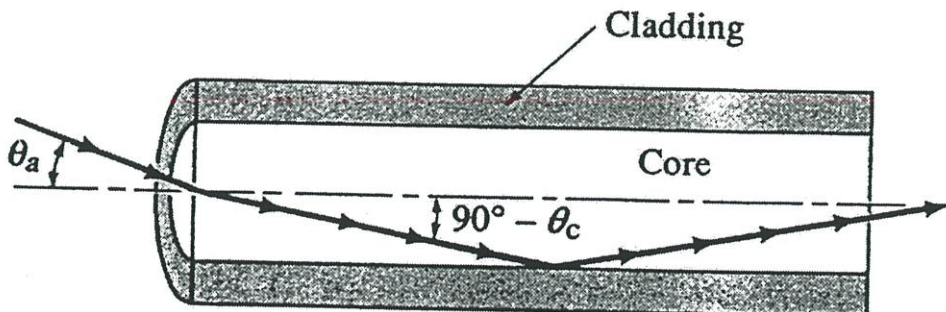
ในหัวข้อต่อไปจะได้ทำการพิจารณาถึงตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยนำแสง

##### 4.1.2.1 ผลต่างค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) และมุมรับแสง (Acceptance Angle)

พิจารณาเส้นใยนำแสงที่ค่าดัชนีหักเหของคอร์และเคลดคิงเป็น  $n_{\text{core}}$  และ  $n_{\text{cladding}}$  ตามลำดับ โดยที่  $n_{\text{core}} > n_{\text{cladding}}$  เมื่อป้อนแสงเข้าไปในคอร์ที่มุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต และเข้าชนที่รอยต่อของคอร์กับเคลดคิง จากกฎของสเนลล์ เมื่อแสงตกกระทบบนที่รอยต่อของสองตัวกลางใดๆ ด้วยมุมมากกว่ามุมวิกฤตแสงจะสะท้อนกลับหมด และจากมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน แสงจะเดินทางตลอดภายในเส้นใยนำแสง ถ้าแสงใดๆชนที่รอยต่อด้วยมุมน้อยกว่ามุมวิกฤตหรือเรียกว่าอยู่ภายนอก กรวยรับแสง (Acceptance Cone) แสงจะถูกดูดกลืนหายไปซึ่งกรวยรับแสงสามารถบอกได้ด้วยค่าความแตกต่างของค่าดัชนีหักเห เรียกว่า สัดส่วนผลต่างค่าดัชนีหักเห (Fractional Refractive Index,  $\Delta$ ) มีค่าดังสมการ

$$\Delta = \frac{n_{\text{Core}} - n_{\text{Cladding}}}{n_{\text{Core}}} \quad (4.5)$$

สัดส่วนผลต่างค่าดัชนีหักเหเป็นอีกปริมาณหนึ่งที่ใช้บอกความสามารถในการป้อนแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสง ถ้าสัดส่วนผลต่างค่าดัชนีหักเหมีค่ามากแสดงว่าสามารถป้อนแสงเข้าสู่คอร์ของเส้นใยนำแสงได้มาก



รูปที่ 4.9 แสดงกรวยรับแสงของเส้นใยนำแสง

แสงที่เดินทางไปในเส้นใยนำแสงต้องหักเหเป็นมุม  $90^\circ - \theta_c$  ดังนั้นมุมที่ใช้ป้อนแสงเข้าคอร์สามารถหาได้จากกฎการหักเหตั้งสมการ

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin(90^\circ - \theta_a)} = \frac{n_{\text{Core}}}{n_{\text{Air}}} \quad (4.6)$$

ค่าดัชนีหักเหของอากาศมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสมการที่ 4.6 เขียนได้ว่า

$$\sin \theta_a = n_{\text{Core}} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} \quad (4.7)$$

แทนค่ามุมวิกฤตเท่ากับ  $\sin \theta_c = \frac{n_{\text{Cladding}}}{n_{\text{Core}}}$  ลงในสมการที่ 4.7 ได้ว่ามุมรองรับแสงของเส้นใยนำแสงสามารถเขียนได้ว่า

$$\sin \theta_a = \sqrt{n_{\text{Core}}^2 - n_{\text{Cladding}}^2} \quad (4.8)$$

โดยที่  $n_{\text{Core}}$  คือ ค่าดัชนีหักเหของคอร์

$n_{\text{Cladding}}$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง

จากสมการที่ (4.8) มุมรองรับแสงจะขึ้นอยู่กับผลต่างของค่าดัชนีหักเหระหว่างคอร์กับแคลดดิ้ง เส้นใยนำแสงที่มีผลต่างของค่าดัชนีหักเหระหว่างคอร์กับแคลดดิ้งมากจะทำให้มีมุมรองรับแสงมากนั่นคือ สามารถป้อนแสงเข้าสู่คอร์ของเส้นใยนำแสงได้มาก มุมรองรับแสงอาจเรียกอีกชื่อว่า มุมครึ่งหนึ่งของกรวยรับแสง (Acceptance Cone Half-Angle)

#### 4.1.2.2 นิเวอริคัลอะเพอร์เจอร์ (Numerical aperture, NA)

เป็นปริมาณที่บอกรถึงความสามารถในการรับแสง (Light - collecting ability) ของเส้นใยนำแสง ซึ่งมีค่าตั้งสมการ

$$NA = n_{\text{Air}} \sin(\theta_a) \quad (4.9)$$

$$= \sqrt{n_{\text{Core}}^2 - n_{\text{Cladding}}^2}$$

ถ้า NA มีค่ามากแสดงว่าเส้นใยนำแสงสามารถรับแสงได้มากหรือมีมุมรองรับแสงมาก ทำให้แสงสามารถเดินทางในคอร์ของเส้นใยนำแสงได้มาก

#### 4.1.2.3 ความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalized frequency) หรือวี - นัมเบอร์ (V - number)

เป็นปริมาณที่บอกถึงจำนวนโหมดของแสงที่สามารถเดินทางในเส้นใยนำแสงได้ ซึ่งมีค่าคงสมการ

$$V = \left( 2\pi \frac{a}{\lambda} \right) NA \quad (4.10)$$

โดยที่  $a$  คือ รัศมีของคอร์

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง

NA คือนิวเมอร์คัลอะเพอร์เจอร์

ถ้าความถี่นอร์มอลไลซ์มีค่าน้อยกว่า 2.405 จะมีเฉพาะแสงโหมดเดียว (Single mode) เท่านั้นที่สามารถเดินทางในคอร์ของเส้นใยนำแสงได้ แต่ถ้าความถี่นอร์มอลไลซ์มีค่ามากกว่า 2.405 แสงที่เดินทางในคอร์ของเส้นใยนำแสงจะมีหลายโหมด (Multimode) หรือหลายเส้นทางเดิน

จำนวนโหมดของแสงที่สามารถเดินทางในเส้นใยนำแสงแบบขั้นบันได (Number of mode in step - index fiber) หาได้จากสมการ

$$N = \frac{V^2}{2} \quad (4.11)$$

จำนวนโหมดของแสงที่สามารถเดินทางในเส้นใยนำแสงชนิดเกรดอินเด็กซ์ (Number of mode in graded index fiber) หาได้จากสมการ

$$N = \frac{V^2}{4} \quad (4.12)$$

#### 4.1.2.4 คุณสมบัติทางการลดทอน (Attenuation properties)

แสงเมื่อเดินทางเข้าสู่เส้นใยนำแสงแล้วจะเกิดการลดทอนกำลังของแสง เมื่อเดินทางเป็นระยะทางไกล ๆ เนื่องด้วยสาเหตุหลายประการ เช่น เกิดการกระเจิงกลับ การรั่วไหลของแสง

ระหว่างคอร์และแคลคิง และคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของตัวกลาง เป็นต้น โดยกำลังแสงที่ลดทอนในเส้นใยนำแสงนั้นจะกำหนดในหน่วยเดซิเบล สามารถหาการลดทอนได้ดังนี้

$$\alpha = 10 \log \left( \frac{P_i}{P_o} \right) \quad \text{dB} \quad (4.13)$$

เมื่อ  $P_i$  และ  $P_o$  คือกำลังแสงอินพุตและเอาต์พุตตามลำดับ ถ้าต้องการหาการลดทอนสำหรับเส้นใยนำแสงใด ๆ โดยวิธีตัดเส้นใยนำแสง (Cut-back) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการหาการลดทอนของเส้นใยนำแสง สามารถหาได้ดังนี้

$$\alpha = \frac{1}{L_1 - L_2} 10 \log \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad \text{dB/Unit Length} \quad (4.14)$$

เมื่อ  $P_1$  และ  $P_2$  คือ กำลังแสงเอาต์พุตก่อนตัดและหลังตัดตามลำดับ  $L_1$  และ  $L_2$  คือ ความยาวเส้นใยนำแสงก่อนตัดและหลัง ตามลำดับ โดยทั่วไปนิยมใช้ค่าเดซิเบลต่อกิโลเมตร

#### 4.1.2.4.1 กลไกการลดทอนของเส้นใยนำแสง

การลดทอนของสัญญาณแสงที่เดินทางไปในเส้นใยนำแสงจะมีความสำคัญต่อระยะห่างในการวางอุปกรณ์ทวนสัญญาณในระบบ สัญญาณแสงจะมีค่าลดลงตามระยะทางที่แสงทางเดินทางผ่านตัวกลางด้วยสาเหตุจากการลดทอนและการขยายกว้างออก (Dispersion) ซึ่งการขยายกว้างออกสามารถชดเชยหรือกำจัดได้ด้วยการออกแบบระบบแสงที่เหมาะสม สำหรับการลดทอนของสัญญาณแสงจะไม่สามารถกำจัดได้หมดเนื่องจากสาเหตุหนึ่งของการลดทอนก็มาจากเส้นใยนำแสงเอง โดยการลดทอนเกิดขึ้นได้จากหลายปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ ได้แก่

- (ก) การดูดกลืนภายใน (Intrinsic Absorption)
- (ข) การกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering)
- (ค) การโค้งงอของตัวนำแสง (Wave guide bending)
- (ง) การโค้งงอระดับไมโคร (Microbending loss)

โดยในกรณีปรากฏการณ์ที่ (ก) และ (ข) เป็นสาเหตุส่วนใหญ่ของการสูญเสียกำลังของระบบสื่อสารด้วยแสงระยะไกล ดังนั้นในที่นี้จะได้ทำการอธิบายเฉพาะ 2 ปรากฏการณ์หลักนี้

##### (ก) ความสูญเสียแบบดูดกลืนภายใน

การลดทอนสัญญาณแสงรวมสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากความสูญเสียแบบดูดกลืนต่างๆ ได้แก่ การดูดกลืนทำให้เกิดการเลื่อนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนทางไฟฟ้าและการเลื่อนระดับพลังงานเนื่องจากอะตอมที่สั่น การลดทอนสามารถที่จะอธิบายได้ด้วยกฎของเบียร์ดังสมการ

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} e^{-\alpha z} \quad (4.15)$$

โดยที่  $P_{\text{out}}$  คือ กำลังแสงเอาต์พุตของคลื่นแสง

$P_{\text{in}}$  คือ กำลังแสงอินพุตของคลื่นแสง

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณแสงในหน่วย  $\frac{1}{\text{ระยะทาง}}$  และค่านี้ขึ้นกับ ความยาวคลื่นของแสงและวัสดุที่ใช้

โดยหลักการนั้นความสูญเสียแบบดูดกลืนจะเกิดจากการกำทอนของอะตอมหรือโมเลกุล การเลื่อนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนนั้นจะดูดกลืนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากสนามที่จ่ายให้ และอิเล็กตรอนจะกระโดดสู่ระดับชั้นพลังงานต้นตัวของอะตอมหรือของแข็ง จากนั้นพลังงานที่ถูกดูดกลืนเข้ามาเหล่านี้จะสูญเสียออกมาในรูปของการปลดปล่อยโฟตอน หรือการทำให้เกิดการสั่นของแลตทิซ (Lattice) และแสดงออกในรูปของความสูญเสียกำลังแม่เหล็กไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบแสง

#### (ข) การกระเจิงแบบเรย์ลี

สำหรับการกระเจิงแบบเรย์ลีมีกลไกในการลดทอนสัญญาณแสงที่แตกต่างออกไปโดย แทนที่จะดูดกลืนแสงและเก็บพลังงานไว้ภายในตัวกลาง ในกระบวนการนี้แสงจะกระเจิงออกจากทิศทางเดิม การกระเจิงนี้มีสาเหตุจากความแตกต่างในด้านความหนาแน่นที่ตำแหน่งต่างๆ ในตัววัสดุนำแสง ซึ่งความแตกต่างนี้ทำให้ค่าดัชนีหักเหของแสงที่ตำแหน่งที่ใด ๆ ต่างกันไปด้วย

ความแตกต่างของความหนาแน่นนั้นสามารถพิจารณาว่าประกอบด้วยอนุภาคไดอิเล็กทริกย่อยที่ถูกกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยค่าไดโพลโมเมนต์ของอนุภาคย่อยนี้สามารถแสดงได้ ดังสมการ

$$\Delta p(t) = \Delta \epsilon E(t) \quad (4.16)$$

เมื่อ  $\Delta \epsilon$  เป็นคุณสมบัติทางโพลาไรซ์ของการเปลี่ยนแปลง โดยไดโพลโมเมนต์หนึ่งๆจะแผ่พลังงานออกมาแบบเอ็กโพเนนเชียล ดังสมการ

$$P_{\text{rad}} = \frac{\omega^4 p^2}{12\pi\epsilon_0 c^3} = \frac{\omega^4 (\Delta \epsilon)^2 E^2}{12\pi\epsilon_0 c^3} \quad (4.17)$$

ถ้าในปริมาตรใด ๆ มีอนุภาคย่อย  $N$  อนุภาคที่ทำให้เกิดการกระเจิงของแสง ดังนั้นพลังงานรวมที่กระเจิงมีค่าเท่ากับ  $N$  เท่าของสมการที่ 4.17 พลังงานส่วนใหญ่ที่เกิดการกระเจิงที่อนุภาคย่อย

จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จากทิศทางการเคลื่อนที่เดิมและแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์กำลังแม่เหล็กไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบแสง

#### 4.1.2.4.2 ตัวแปรของค่าความสูญเสียภายในและภายนอกเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก

กลไกพื้นฐานที่ทำให้เกิดความสูญเสียของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกเป็นกลไกเดียวกันกับที่เกิดในเส้นใยนำแสงชนิดแก้ว แต่มีความแตกต่างในแง่ขนาดของเส้นใยนำแสง ตารางที่ 4.2 แสดงตัวแปรของความสูญเสียของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก

ตารางที่ 4.2 แสดงตัวแปรค่าความสูญเสียของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก

ภายในเส้นใยนำแสง		ภายนอกเส้นใยนำแสง	
การดูดกลืน	การกระเจิง	การดูดกลืน	การกระเจิง
1. ฮาร์มอนิกอันดับสูง ๆ ของการดูดกลืนของ $\text{OH}^-$	1. การกระเจิงแบบเรย์ลี	1. การเลื่อนชั้นของโลหะ	1. ผูุ้่นและรู
2. การเลื่อนชั้นทางไฟฟ้า		2. การปนเปื้อนของสารอินทรีย์	2. การเปลี่ยนแปลงขนาดของคอร์
	3. แนวการวางตัวของไบพรีนเจนซ์		
	4. ความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อคอร์กับแคลคดิง		

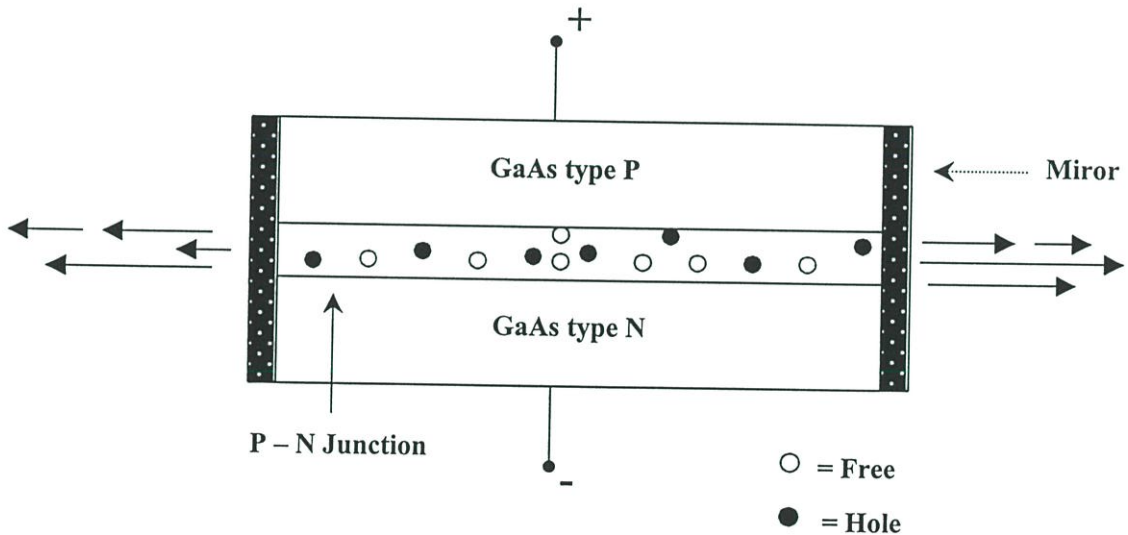
## 4.2 เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode)

ในปัจจุบันอุปกรณ์กำเนิดแสงสารกึ่งตัวนำที่ใช้งานในระบบสื่อสารมี 2 ชนิดนั่นคือ ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode, LED) และเลเซอร์ไดโอด ไดโอดเปล่งแสงเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ทำได้ง่าย แต่มีคุณสมบัติด้อยกว่าเลเซอร์ไดโอดในด้านกำลังส่งและในการทำงานความเร็วสูง เพราะเลเซอร์ไดโอดมีสเปกตรัมแคบกว่าไดโอดเปล่งแสง ดังนั้นจึงมักใช้งานเลเซอร์ไดโอดในระบบสื่อสารที่มีระยะทางไกลๆ อุปกรณ์กำเนิดแสงเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงโดยวิธีที่เรียกว่า การมอดูเลตตามความเข้มของแสง (Intensity Modulation) คุณสมบัติของแสงที่ได้รับจากเลเซอร์ไดโอดมีคุณสมบัติเหมือนแสงเลเซอร์ทั่วไป นั่นคือ มีทิศทางของแสงไปในทางเดียวกันและมีเฟสตรงกันทำให้แสงที่ได้รับมีความเข้มแสงสูงมากๆ สารกึ่งตัวนำที่นำ

มาใช้ทำเลเซอร์ไดโอดมีหลายชนิดได้แก่ แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสเฟอ์(GaAsP) แกลเลียมฟอสเฟอ์(GaP) แกลเลียมอลูมิเนียมอาร์เซไนด์(GaAlAs) หรืออินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสเฟอ์(InGaAsP) โดยการที่จะเลือกสารกึ่งตัวนำใดขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ต้องการ สารกึ่งตัวนำที่เลือกจะถูกนำมาออกแบบเป็นโครงสร้างของรอยต่อพีเอ็นดังแสดงในรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.3 แสดงความยาวคลื่นที่ได้รับจากสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่ใช้ผลิตเลเซอร์ไดโอด

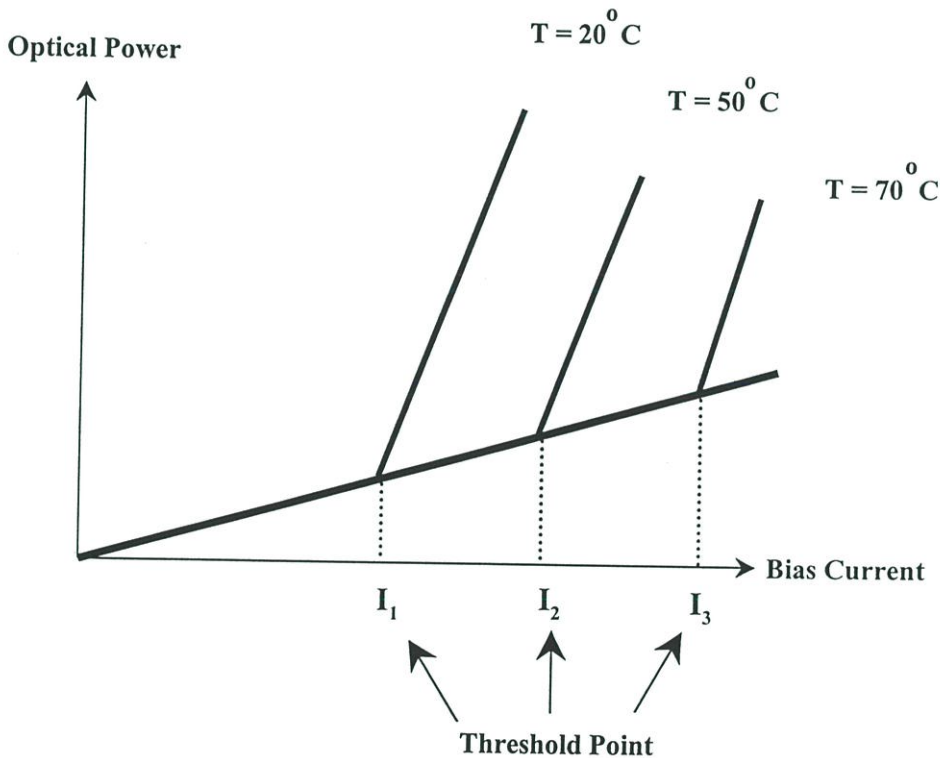
สารกึ่งตัวนำ	ความยาวคลื่นที่ให้ (นาโนเมตร)
แกลเลียมฟอสเฟอ์ (GaP)	520 - 570
แกลเลียมฟอสเฟอ์ (GaP)	630 - 790
แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสเฟอ์(GaAsP)	640 - 700
แกลเลียมอลูมิเนียมอาร์เซไนด์(GaAlAs)	650 - 700
แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs)	920 - 950



รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดชนิดฟาบริเพโรท์ (Fabry-Perot)

จากรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นโครงสร้างของเลเซอร์ไดโอดที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดแกลเลียมอาร์เซไนด์ถูกได้ปเป็นสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดพี (P) และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N) วางต่อกัน โดยที่ปลายทั้งสองข้างจะถูกเคลือบด้วยคริสตัลที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นกระจกเงา(Cleaved Crystal Mirrors) การทำงานของเลเซอร์ไดโอดจะเริ่มจากการจ่ายกระแสไบแอสแบบไปข้างหน้า(Forward Bias) ที่บริเวณรอยต่อพีเอ็นทำให้มีการแตกตัวของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระเกิดขึ้น เมื่อเกิดการ

เคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปรวมตัวกับโฮลที่สารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ในทำนองเดียวกันโฮลจะไปรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่สารกึ่งตัวนำพี การรวมตัวทั้งสองจะมีการปล่อยแสงออกมาแสงบางส่วนจะไปกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวของคู่อิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นอีก บางส่วนจะเดินทางไปในชนที่ผิวสะท้อนที่กระจกสะท้อนด้านข้างไปมาทำให้เกิดการสะสมพลังงานภายในมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อพลังงานมีค่ามากพอจะเปล่งแสงเลเซอร์ออกมา โดยที่การไบแอสเลเซอร์ไดโอดจนทำงานให้แสงเลเซอร์ออกมานั้นจะขึ้นกับกระแสไบแอสที่ป้อนให้ กระแสไบแอสต้องมีค่าสูงกว่ากระแสเทรชโฮลด์ (Threshold Current) ถ้ากระแสไบแอสต่ำกว่ากระแสเทรชโฮลด์เลเซอร์ไดโอดอาจจะแสดงสถานะเป็นเพียง แอลอีดีเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งจะเห็นว่าที่ค่ากระแสไบแอสต่ำกว่าจุดเทรชโฮลด์กำลังแสงของเลเซอร์ไดโอดจะมีค่าน้อยแต่เมื่อผ่านจุดเทรชโฮลด์กำลังแสงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์กระแสที่ป้อนให้แก่เลเซอร์ไดโอดกับกำลังแสงที่ปล่อยออกมา

#### 4.2.1 การมอดูเลตเลเซอร์ไดโอด

การมอดูเลตเลเซอร์ไดโอดโดยการเปลี่ยนความเข้มของแสงจะใช้การมอดูเลตได้สองวิธีด้วยกันคือ พัลส์มอดูเลชัน เพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลแบบดิจิทัล และแอมพลิจูดมอดูเลชันเพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลแบบอนาล็อก อัตราการมอดูเลตเลเซอร์ไดโอดจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของช่วงชีวิตพาหะ(Carrier Lifetime) และช่วงชีวิตของโฟตอน(Photon Lifetime) ในการทำงานของเลเซอร์ไดโอดช่วงชีวิตโดยธรรมชาติ(Spontaneous Lifetime,  $\tau_{sp}$ ) จะเป็นฟังก์ชันโครงสร้างสารกึ่ง

ตัวนำที่อุณหภูมิห้อง ถ้าเลเซอร์ไดโอดผลิตจากแกลเลียมอาร์เซไนค์จะมีช่วงชีวิตของรังสี(Radiation Lifetime,  $\tau_R$ ) ประมาณ 1 นาโนวินาที โดยช่วงชีวิตของพาหะที่ถูกกระตุ้น(Stimulated Carrier Lifetime,  $\tau_{St}$ ) จะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงในช่องว่างพลังงาน และช่วงชีวิตของโฟตอน (Photon Lifetime,  $\tau_{Ph}$ ) เป็นเวลาเฉลี่ยของโฟตอนในแควิตี้ของเลเซอร์ไดโอดโดยจะมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการดูดกลืนพลังงานและการทะลุผ่านผิวหน้าของเลเซอร์ โดยและช่วงชีวิตของโฟตอน ( $\tau_{Ph}^{-1}$ ) จะมีค่าเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$\tau_{Ph}^{-1} = \frac{c}{n} \left( \bar{\alpha} + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right) = \frac{c}{n} g_{Th} \quad (4.18)$$

โดยที่	$R_1 R_2$	เป็นดัชนีการสะท้อนของกระจก
	$L$	คือความยาวของแควิตี้
	$\bar{\alpha}$	คือสัมประสิทธิ์ของปรากฏการณ์ดูดกลืนพลังงาน
	$n$	คือกลุ่มอเล็กตรอนอิสระในสถานะระดับพลังงานสูง
	$c$	คือความเร็วแสงในสุญญากาศ
	$g_{Th}$	คือเกณฑ์สัมประสิทธิ์ของเทรชโฮลด์

พิจารณาการมอดูเลตเลเซอร์ไดโอดด้วยสัญญาณพัลส์ เมื่อช่วงชีวิตของโฟตอนมีค่าน้อยกว่าช่วงชีวิตของพาหะ ถ้าเลเซอร์มีการเปิดปิดแสงอย่างสมบูรณ์ตามสัญญาณพัลส์ที่เข้ามาแล้วช่วงชีวิตของพาหะที่ถูกกระตุ้นจะเป็นตัวกำหนดอัตราการมอดูเลชัน เมื่อสัญญาณพัลส์ที่เข้ามามีค่าเป็น 1 กระแสพัลส์จะมีแอมพลิจูดเป็น  $I_p$  และคาบเวลา ( $t_d$ ) กำหนดโดย

$$t_d = \tau \ln \frac{I_p}{I_p (I_B - I_{Th})} \quad (4.19)$$

โดยที่  $I_B$  เป็นกระแสไบแอส

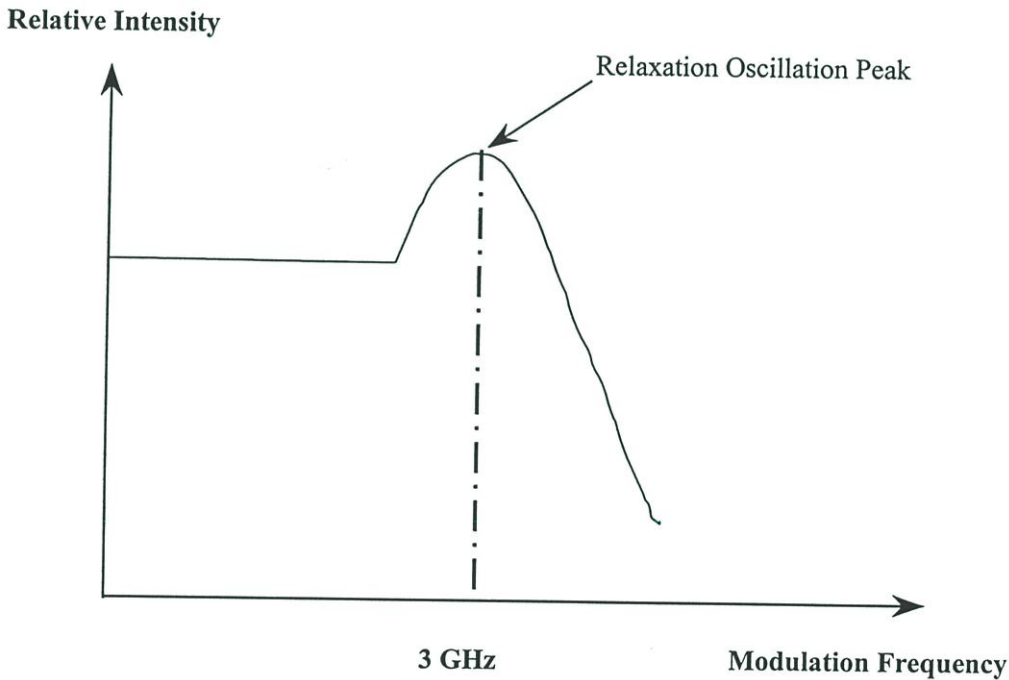
$\tau$  คือช่วงชีวิตเฉลี่ยของพาหะในบริเวณที่กลับมารวมกันใหม่(Average Lifetime of the Carriers in the Recombination Region)

เมื่อใช้เลเซอร์ไดโอดเพื่อใช้ในการสื่อสารความเร็วสูง ความถี่ในการมอดูเลตจะต้องไม่มากกว่าช่วงเวลาก่อนการออสซิลเลต(Relaxation Oscillation) ของเลเซอร์ที่แสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งจะขึ้น

อยู่กับช่วงชีวิตโคจรธรรมชาติ และช่วงชีวิตของโฟตอน สมมติให้อัตราส่วนบนความหนาแน่นของตัวพาหรีเลกเซชันออสซิลเลชันจะมีค่าเป็น

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{(\tau_{SP} \tau_{Ph})^{1/2}} \left( \frac{I}{I_{Th}} - 1 \right)^{1/2} \quad (4.20)$$

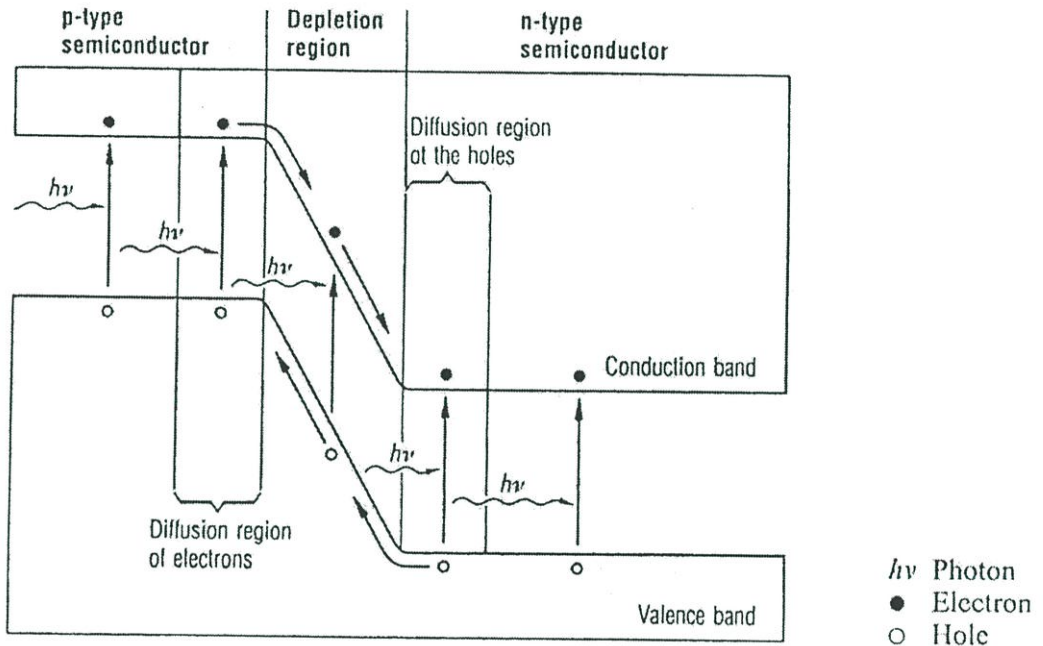
การมอดูเลตเลเซอร์ไดโอดนั้นความถี่ในการมอดูเลตจะต้องมีค่าน้อยกว่ารีเลกเซชันออสซิลเลชัน ยกตัวอย่างเช่น เลเซอร์ไดโอดมีรีเลกเซชันออสซิลเลชันที่ 3 จิกะเฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ถ้ามอดูเลตสัญญาณเกินจากตำแหน่งของรีเลกเซชันออสซิลเลชัน จะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณขึ้นได้



รูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งของการมอดูเลตสัญญาณให้กับเลเซอร์ไดโอดได้สูงสุด

### 4.3 พินโฟโตไดโอด (PIN Photodiode)

อุปกรณ์รับแสงจะใช้ประโยชน์จากหลักการการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำอุปกรณ์ โดยที่โฟตอนของแสงที่มีพลังงานสูงกว่าช่องว่างพลังงาน (Energy Gap,  $E_g$ ) จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ซึ่งสิ่งนี้จะทำให้เกิดกระแสไปใช้งานต่อไป

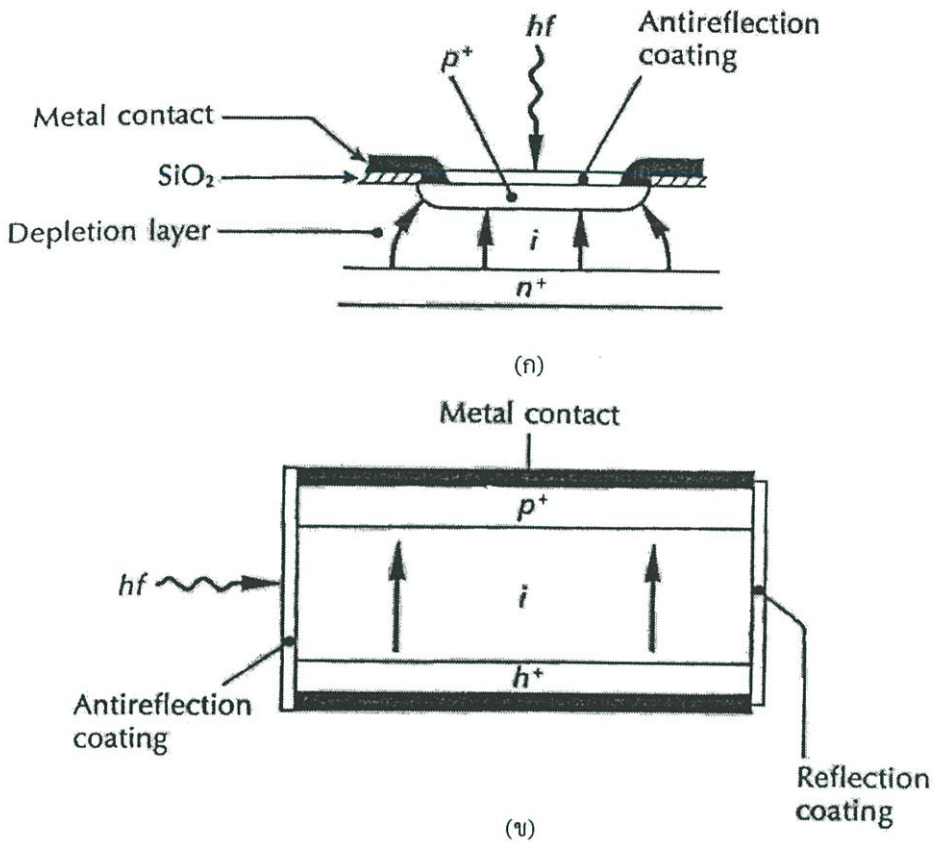


รูปที่ 4.13 แสดงการไบแอสย้อนกลับของพินโฟโตไดโอด

โดยทั่วไปอุปกรณ์รับแสงที่จะนำไปใช้งานในระบบใดๆจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติสำคัญ 3 ประการได้แก่

1. มีความไวในการตอบสนองต่อความยาวคลื่นที่ต้องการเท่านั้น
2. ใช้เวลาในการตอบสนองต่อสัญญาณสั้นมากๆ การที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ไวทำให้สามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง
3. มีค่าสัญญาณรบกวนต่ำ

พินโฟโตไดโอดเป็นโฟโตไดโอดที่ได้รับการพัฒนาจากโฟโตไดโอดแบบธรรมดา โดยได้มีการเพิ่มบริเวณอินทรีนซิกไว้ระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำพีเอ็นในโฟโตไดโอดแบบธรรมดา จุดประสงค์เพื่อให้กระแสที่เกิดจากคู่อิเล็กตรอนและโฮลไหลได้มากกว่ากรณีของโฟโตไดโอดแบบธรรมดาและมีช่วงเวลาคงทนสั้นลงอยู่ในระดับนาโนวินาที โครงสร้างของพินโฟโตไดโอดแสดงในรูปที่ 4.14 (ก) และ 4.14 (ข)



รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างของซิลิกอนพินโฟโตไดโอด (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง

จากรูปที่ 4.14 (ก) พินโฟโตไดโอดประกอบด้วยบริเวณที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกคั่นด้วยบริเวณที่เป็นสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก ที่บริเวณนี้มีการเชื่อมสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นลงไปเล็กน้อยจึงเท่ากับเป็นการเพิ่มโอกาสให้พินโฟโตไดโอดมีกระแสภายนอกไหลมากขึ้นนั่นเอง ในการทำงานโดยทั่วไปต้องไบแอสย้อนกลับให้กับพินโฟโตไดโอด เมื่อมีโฟตอนมาตกกระทบที่บริเวณอินทรินซิกโดยมีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างของพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีผลทำให้อิเล็กตรอนจากวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) ถูกกระตุ้นขึ้นไปสู่คอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) จากขบวนการนี้จะได้คู่ของอิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้นซึ่งเรียกว่าพาหะโฟโตแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยปกติแล้วพาหะโฟโตจะเกิดขึ้นที่บริเวณอินทรินซิกซึ่งเป็นบริเวณที่แสงตกกระทบและใช้ในการดูดกลืนพลังงานโฟตอน ที่บริเวณนี้เองจะมีสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเนื่องมาจากกระแยกกันระหว่างโฮลและอิเล็กตรอนจนทำให้เกิดการสะสมขึ้นและเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการไบแอสย้อนกลับ ทำให้มีกระแสไหลภายนอกซึ่งเรียกว่ากระแสโฟโต (Photo Current) คู่ของอิเล็กตรอนและโฮลเหล่านี้จะเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องภายในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะทางเป็น  $L_n$  และ  $L_p$  สำหรับอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ ระยะทางที่เคลื่อนที่ไปนี้เรียกว่าความยาวการแพร่

(Diffusion Length) โดยมีเวลาที่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นใหม่อีกครั้งนี้เรียกว่าช่วงชีวิตของพาหะ (Carrier Lifetime) เขียนได้เป็น  $\tau_n$  และ  $\tau_p$  ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวการแพร่กับช่วงชีวิตของพาหะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2} \quad \text{และ} \quad L_p = (D_p \tau_p)^{1/2} \quad (4.21)$$

เมื่อ  $D_n$  และ  $D_p$  คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล กำลังของแสงที่ถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำจะมีค่าดังสมการ

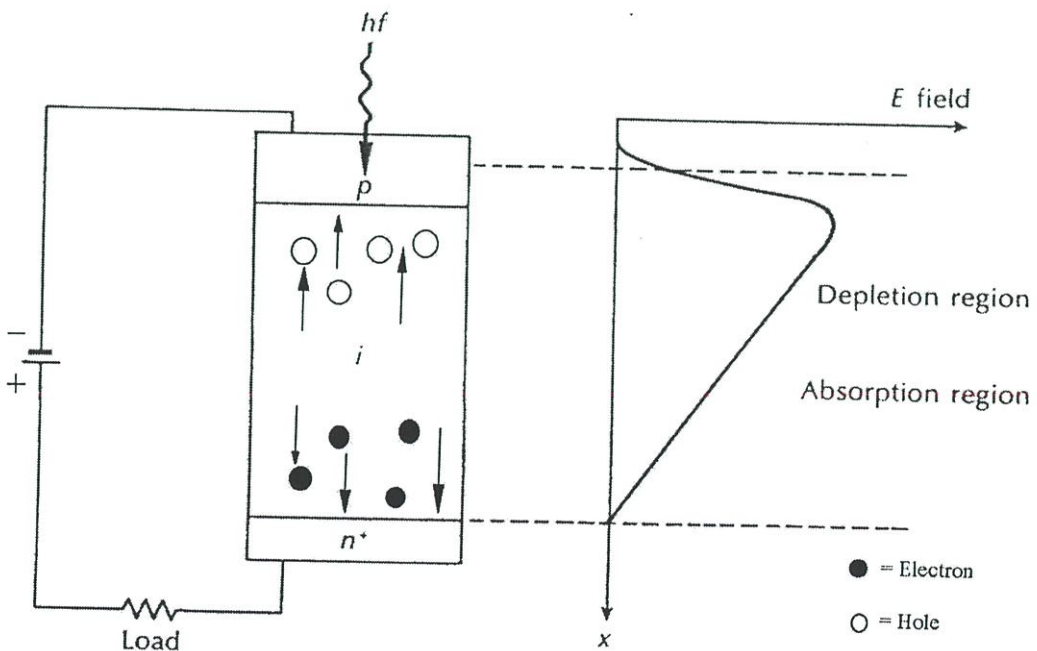
$$P(x) = P_0 (1 - e^{-\alpha_s(\lambda)x}) \quad (4.22)$$

เมื่อ  $\alpha_s(\lambda)$  คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น  $\lambda$

$P_0$  คือกำลังของแสงที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำ

$P(x)$  คือกำลังของแสงที่ถูกดูดกลืนในระยะทาง  $x$

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่นำมาสร้างเป็นโฟโตไดโอดจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งานจำกัดแตกต่างกันออกไปเช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์สามารถใช้งานได้ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 600 ถึง 900 นาโนเมตร ซิลิคอน (Si) ใช้งานได้ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 ถึง 1,000 นาโนเมตร



รูปที่ 4.15 แสดงการเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮลของในพินโฟโตไดโอด

การหาความยาวคลื่นคัทออฟ  $\lambda_c$  ซึ่งก็คือความยาวคลื่นยาวที่สุดที่พินโฟโตไดโอดสามารถใช้งานได้จะถูกกำหนดด้วยช่องว่างพลังงาน  $E_g$  ของสารกึ่งตัวนำ ถ้าช่องว่างพลังงานมีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (ev) ดังนั้น  $\lambda_c$  จะมีหน่วยเป็นไมโครเมตรดังนี้

$$\lambda_c (\mu\text{m}) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (\text{ev})} \quad (4.23)$$

ความยาวคลื่นคัทออฟจะมีค่า 1.06 ไมโครเมตรสำหรับซิลิคอนและ 1.6 ไมโครเมตรสำหรับเจอร์มาเนียม (Ge) ถ้าที่บริเวณการแพร่ของอิเล็กตรอนมีความกว้าง  $w$  ดังนั้นจากสมการที่ 4.22 จะได้กำลังของแสงที่ถูกดูดกลืนดังสมการ

$$P(w) = P_0 (1 - e^{-\alpha_s(\lambda)w}) \quad (4.24)$$

ถ้าให้ความสามารถในการหักเห (Reflectivity,  $R_f$ ) ที่ตกกระทบผิวหน้าของโฟโตไดโอดกระแสโฟโต  $I_p$  จากการดูดกลืนกำลังของแสงตามสมการที่ 4.24 สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$I_p = \frac{q}{h\nu} P_0 (1 - e^{-\alpha_s w}) (1 - R_f) \quad (4.25)$$

เมื่อ  $P_0$  คือกำลังของแสงที่ตกกระทบบนโฟโตไดโอด

$q$  คือประจุของอิเล็กตรอน

$h\nu$  เป็นพลังงานโฟตอน

ดังนั้นการทำงานของโฟโตไดโอดซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโฟโตไดโอดแต่ละตัวสามารถแสดงได้ด้วยค่าการตอบสนองต่อแสง  $\mathcal{R}$  ซึ่งสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ควอนตัม  $\eta$  ดังนี้

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_0} = \frac{\eta q}{h\nu} \quad (4.26)$$

จากสมการนี้แสดงให้เห็นทราบว่าค่าการตอบสนองต่อแสงจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างกระแสโฟโตกับกำลังของแสงที่ตกกระทบ นั่นคือถ้ากำลังของแสงที่ตกกระทบมีขนาดเล็กแต่สามารถทำให้เกิดกระแสโฟโตได้มากจะทำให้ค่าการตอบสนองต่อแสงสูงนั่นเอง

### 4.3.1 ความเร็วในการตอบสนอง (Speed of Response)

ตัวแปรที่เป็นขีดจำกัดความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดมีด้วยกัน 3 ตัวได้แก่

#### 4.3.1.1 เวลาลอยเลื่อน (Drift time) ของพาหะในการเคลื่อนที่ผ่านบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region)

ความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดส่วนใหญ่จะถูกจำกัดด้วยเวลาที่พาหะใช้ในการข้ามบริเวณปลอดพาหะ เมื่อสนามในบริเวณปลอดพาหะมีค่าเกินกว่าค่าอิมิตัว พาหะจะเคลื่อนที่ข้ามด้วยความเร็วคงที่ (มีค่าความเร็วสูงสุด) เรียก ความเร็วลอยเลื่อน (Drift Velocity  $v_d$ ) ดังนั้นเวลาที่นานที่สุดที่พาหะใช้ในการเคลื่อนที่ข้ามบริเวณปลอดพาหะที่มีความยาว  $w$  สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$t_{\text{drift}} = \frac{w}{v_d} \quad (4.27)$$

เช่นถ้าสนามอิมิตัวของซิลิกอนมีค่า  $2 \times 10^4 \text{ Vcm}^{-1}$  ความเร็วของพาหะมีค่า  $10^7 \text{ cms}^{-1}$  ดังนั้นเวลาที่ใช้เคลื่อนที่ข้ามบริเวณปลอดพาหะที่มีความกว้าง  $10 \mu\text{m}$  มีค่า

$$\begin{aligned} t_{\text{drift}} &= \frac{10 \mu\text{m}}{10^7 \text{ cms}^{-1}} \\ &= 0.1 \text{ ns} \end{aligned}$$

#### 4.3.1.2 เวลาที่ใช้ในการแพร่กระจาย (Diffusion time $t_{\text{diff}}$ ) ของพาหะที่สร้าง

ภายนอกบริเวณปลอดพาหะ

การกระจายของพาหะเป็นขบวนการที่ช้าเมื่อเทียบกับขบวนการอื่นที่เกิด เวลา  $t_{\text{diff}}$  ที่พาหะใช้ในการแพร่กระจายผ่านระยะ  $d$  สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$t_{\text{diff}} = \frac{d^2}{2D_c} \quad (4.28)$$

โดยที่  $D_c$  คือ สัมประสิทธิ์ในการแพร่กระจายของพาหะส่วนน้อย

ยกตัวอย่างในกรณีของการแพร่กระจายของโฮลผ่านซิลิกอนยาว  $10\mu\text{m}$  มีค่า  $40\text{ns}$  ขณะที่เวลาของการแพร่กระจายของอิเล็กตรอนในกรณีนี้อยู่ที่  $8\text{ns}$

#### 4.3.1.3 เวลาคงที่ที่ใช้สร้างสนามเป็นผลจากค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดและโหนด

ในการไบแอสย้อนกลับของโฟโตไดโอด สนามที่รอยต่อที่ทำให้พาหะจะมีค่าขึ้นกับค่าความจุไฟฟ้าที่ชาร์จแก่บริเวณรอยต่อ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ  $C_j$  สามารถเขียนได้ว่า

$$C_j = \frac{\epsilon_s A}{w} \quad (4.29)$$

โดยที่  $\epsilon_s$  คือ ค่าสภาพความยอมทางไฟฟ้า (Permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ

$A$  คือ ขนาดของรอยต่อของไดโอด

$w$  คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

## 4.4 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยเริ่มด้วย เส้นใยนำแสง ซึ่งได้แบ่งเป็น เส้นใยนำแสงชั้นบันไดแบบโหมคเดียว เส้นใยนำแสงชั้นบันไดแบบหลายโหมคและเส้นใยนำแสงเกรดอินเด็กซ์แบบหลายโหมค การกระจายของดัชนีหักเหของแสงในเส้นใยนำแสงจะเป็นตัวแปรสำคัญที่บอกพฤติกรรมของแสงในเส้นใยนำแสงนั้นๆ ต่อมาได้กล่าวถึงเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกซึ่งได้เลือกเป็นวัสดุพื้นฐานที่นำมาสร้างเป็นคู่ควมในงานวิจัยนี้ ทั้งในแง่ของวัสดุศาสตร์ การผลิต และตัวแปรที่แสดงคุณสมบัติที่สำคัญๆของเส้นใยนำแสง พบว่าดัชนีหักเหของแสงเป็นตัวแปรที่สำคัญมากในการพิจารณาเส้นใยนำแสงใดๆเนื่องจากดัชนีหักเหของแสงสามารถนำไปคำนวณ กรวยรับแสง ค่านิวเมอรัลรัคัลอะเพอเจอร์ และตัวแปรอื่นๆได้ การลดทอนของแสงในเส้นใยนำแสงเกิดได้ทั้งจากสาเหตุภายในและภายนอกเส้นใยนำแสงซึ่งสาเหตุทั้งสองจะเป็นตัวกำหนดการลดทอนรวมของเส้นใยนำแสงนั้นๆ นอกจากนี้การกำเนิดแสงของเลเซอร์ไดโอด และพฤติกรรมของแสงที่เกิดขึ้นในพินโฟโตไดโอดก็ได้กล่าวถึงในบทนี้ด้วย ในบทต่อไปจะได้แสดงขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยและขอบเขตที่ได้ทำการศึกษา

## บทที่ 5

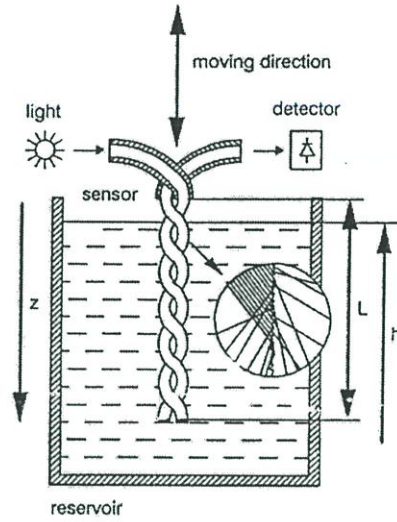
### วิธีดำเนินงานวิจัย

เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกได้ถูกนำมาใช้เพิ่มมากขึ้นทั้งในด้านการสื่อสาร การตรวจจับหรือแม้กระทั่งการประดับตกแต่ง ในระบบแสงใดๆต้องมีการใช้ประโยชน์จากการแยกและรวมกำลังแสงของคู่ควบ ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการทดลองสร้างคู่ควบโดยใช้เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้แบ่งเป็นขั้นตอนย่อย คือ การศึกษาคุณสมบัติการลดทอนกำลังแสงของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกโดยใช้เทคนิคการตัดสั้น การออกแบบการสร้างคู่ควบจากเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกการทดลองสร้างคู่ควบโดยวิธีการบิดเกลียวและวิธีการขัด การศึกษาคุณลักษณะการคับปลิงของคู่ควบโดยการเปลี่ยนความยาวระยะคับปลิง การศึกษาผลของการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสงของคู่ควบ และการศึกษาผลการตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆซึ่งงานวิจัยมีรายละเอียดดังแสดง

#### 5.1 การสร้างคู่ควบจากเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก

การสร้างคู่ควบจากเส้นใยนำแสงชนิดแก้ว นิยมที่จะใช้ความร้อนในการเชื่อมติดระยะคับปลิงของเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นเข้าด้วยกันเรียกวิธีสร้างคู่ควบนี้ว่า การสร้างด้วยวิธีหลอมรวม แต่วิธีการดังกล่าวไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการสร้างคู่ควบโดยใช้เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก เนื่องจากเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกผลิตจากโพลีเมอที่มีจุดหลอมเหลวไม่สูงมากอยู่ในช่วงระดับร้อยของศาเซลเซียสเท่านั้น ในปี ค.ศ. 1978 วาย สุจิโมโต [9] ได้ทำการวิจัยในการสร้างคู่ควบชนิดแก้วโดยใช้วิธีการขัดโดยขัดส่วนข้างของเส้นใยนำแสงสองเส้นแล้วนำเส้นใยนำแสงทั้งสองประกบกันเป็นคู่ควบ คู่ควบที่เขาสร้างขึ้นสามารถให้ผลลัพธ์เป็นคู่ควบแบบ 3dB ได้ ในปี ค.ศ. 1990 เอ. สุฮาโดลนิก (A. Suhadolnik) [11] จากสโลวาเนียได้สร้างอุปกรณ์ตรวจจับระดับความถี่ของของเหลวโดยเขาได้นำเส้นใยนำแสง 2 เส้นมานำส่วนแคลดดิ้งออกแล้วบิดเป็นเกลียวเข้าด้วยกันจากนั้นนำไปจุ่มในของเหลวที่ต้องการวัดความถี่โดยอาศัยความสัมพันธ์ของความถี่กับความเข้มแสงจากงานวิจัยของทั้งสองคณะแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการสร้างคู่ควบด้วยวิธีการอื่น ดังนั้นในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างคู่ควบจากเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกโดยวิธีการบิดเกลียวและโดยวิธีการขัด สำหรับชนิดของคู่ควบที่เลือกสร้างในงานวิจัยนี้ได้เลือก คู่ควบแบบ 2x2 เป็นต้นแบบเนื่องจากคู่ควบแบบ 2x2 เป็นคู่ควบพื้นฐานที่สามารถนำไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อื่นๆและเป็นอุปกรณ์ทางแสงที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจปรากฏการณ์การคับปลิงที่เกิดขึ้น โดยคู่ควบที่จะสร้างมีจุดประสงค์ที่จะสร้างคู่ควบให้เป็นคู่ควบแบบง่ายๆสำหรับใช้เป็นพื้นฐาน

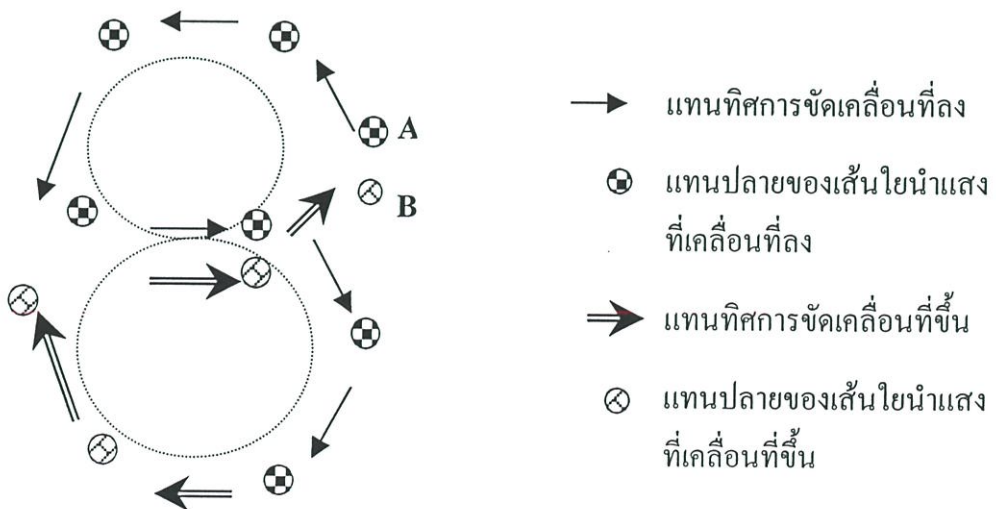
เพื่อพัฒนาเป็นคู่ควมแบบ 3dB เช่นเดียวกับในงานวิจัยคู่ควมจากเส้นใยนำแสงชนิดแก้วของวาย สุจิ โมโต



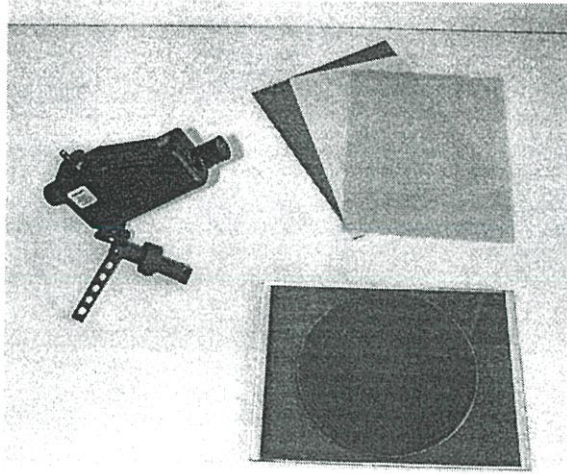
รูปที่ 5.1 แสดงส่วนตรวจจับ (Sensing Unit) สร้างโดยใช้เทคนิคการบิดเกลียวของ เอ. สุชา โคลนิก

5.1.1 การขัดส่วนปลายของเส้นใยนำแสงสำหรับใช้ในการทดลอง

ในการทดลองเกี่ยวกับเส้นใยนำแสงใดๆมีความจำเป็นที่จะต้องกำหนดการเตรียมส่วนปลายใดๆของเส้นใยนำแสงซึ่งเป็นส่วนอินพุตและเอาท์พุตของเส้นใยนำแสงเพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานสำหรับการทดลองในการทดลองนี้ได้กำหนดให้ใช้เส้นใยนำแสงที่ผลิตโดยบริษัท มิตซูบิชิเรยอน จำกัด รุ่น Super Eska SH4001 เป็นเส้นใยนำแสงที่มีค่าดัชนีหักเหแบบชั้นบันได คอรัทำด้วยโพลีเมอของพีเอ็มเอ็มเอ มีค่าดัชนีหักเห 1.492 แคลดคิงทำจากโพลีเมอของสารฟลูออไรซ์มีค่าดัชนีหักเห 1.402 และทั้งสองส่วนถูกหุ้มไว้ด้วยแจ็คเก็ตสีดำ



รูปที่ 5.2 แสดงทิศทางการการขัดปลายเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก โดยหมุนวนมือเป็นเลข 8

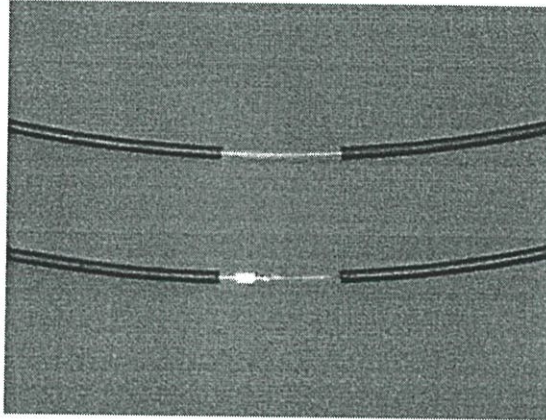


รูปที่ 5.3 แสดงชุดอุปกรณ์สำหรับขยายเส้นใยนำแสงประกอบด้วย กระจกสำหรับตัดเส้นใยนำแสงที่มีความละเอียด 5 ไมครอน(สีเทา) 1 ไมครอน(สีขาว)และ 0.3 ไมครอน(สีเขียว) กล้องสำหรับตรวจสอบปลายเส้นใยนำแสง และฐานก้ำมะหยี่สำหรับรองจัด

การเตรียมเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกสำหรับงานวิจัยนั้นเริ่มจากตัดเส้นใยนำแสงให้มีความยาวตามที่ต้องการ จากนั้นปลอกส่วนของแจ็คเก็ตที่หุ้มส่วนปลายทั้งสองด้านของเส้นใยนำแสงออกประมาณ 5 เซนติเมตร การตัดส่วนปลายด้านที่หนึ่งของเส้นใยนำแสงเริ่มโดยใช้กระจกทรายตั้งแต่หยาบไปจนละเอียดตั้งแต่กระจกทรายหมายเลข 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, และ 2000 ตามลำดับ ในการตัดให้ทำการตัดหมุนวนมือเป็นรูปเลข 8 ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ข) โดยการตัดเริ่มที่จุด A จากนั้นเคลื่อนปลายเส้นใยนำแสงไปตามทิศการเคลื่อนที่ลงและวนกลับมาสิ้นสุดที่จุด B เมื่อสิ้นสุดการเคลื่อนปลายเส้นใยนำแสงตามทิศการเคลื่อนที่ขึ้น ในการตัดให้ตัดที่แต่ละหมายเลขกระจกทรายเป็นเวลา 30 วินาทียกเว้นเมื่อใช้กระจกทรายหมายเลข 1500 และ 2000 ให้เพิ่มเวลาในการตัดเป็นหมายเลขละ 1 นาที จากนั้นให้สวมปลอกส่วนที่ตัดแล้วเข้ากับหัวจับสำหรับตัดและขยายของเส้นใยนำแสงด้วยกระจกสำหรับตัดเส้นใยนำแสงโดยเฉพาะที่มีความละเอียด 5, 1, และ 0.3 ไมโครเมตรตามลำดับ ในการตัดให้ทำการตัดวนเป็นรูปเลข 8 เช่นกันโดยใช้เวลาในการตัดที่แต่ละระดับความละเอียดของกระจกตัดละ 5 นาทีและในระหว่างการตัดให้นำไปส่องกล้องพิจารณาออยรุษระที่ผิวหน้าการตัดเป็นระยะ เมื่อครบตามขั้นตอนใช้ฟู่กันปิดทำความสะอาดสวมปลอกที่ตัดแล้วด้วยปลอกสวมกันกระแทก จากนั้นจึงสลับทำการเตรียมอีกปลายที่เหลือในทำนองเดียวกัน จะได้เส้นใยนำแสงที่พร้อมสำหรับการทดลองขั้นต่อไป

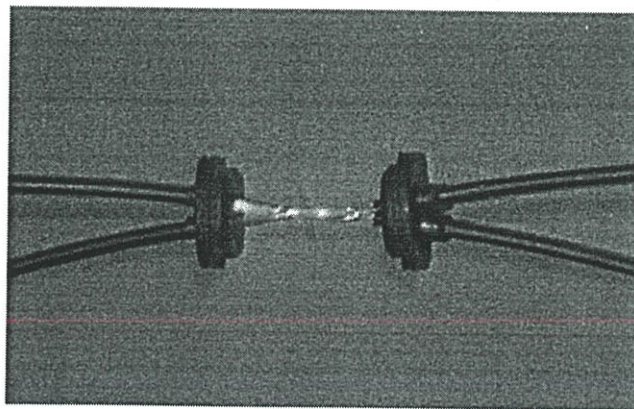
### 5.1.2 การสร้างคู่ควบจากเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกโดยวิธีบีดเกลียว

การสร้างคู่ควบวิธีนี้เริ่มต้นด้วยการนำเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกยาว 50 เซนติเมตร จำนวน 2 เส้นที่ผ่านการเตรียมปลายทั้ง 4 ของเส้นใยนำแสงตามวิธีการขัดในหัวข้อ 5.1.1 แล้ว จากนั้นทำการปลอกแฉีกที่กึ่งกลางของเส้นใยนำแสงออกยาว 20 เซนติเมตรดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงเส้นใยนำแสงที่ปลอกส่วนของแฉีกที่ออกเพื่อเตรียมสำหรับการทำคู่ควบ

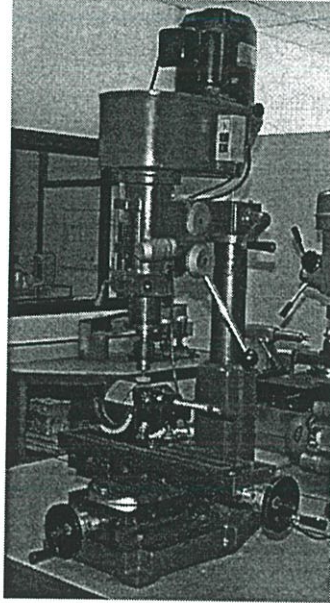
จากนั้นทำการขัดส่วนที่ปลอกแฉีกที่ออกด้วยกระดาษสำหรับขัดเส้นใยนำแสงโดยเฉพาะ ที่ความละเอียด 5, 1, และ 0.3 ไมโครเมตรตามลำดับ โดยกำหนดให้ใช้เวลาในการทำการขัด 30 วินาที 1 นาที และ 2 นาทีตามลำดับ เมื่อขัดเส้นใยนำแสงครบทั้งสองเส้นให้นำเส้นใยนั้นมาบีดเกลียวส่วนที่ขัดเข้าด้วยกันโดยให้มีขนาดของแต่ละเกลียวมีขนาดเท่าๆกัน ได้เป็นคู่ควบที่สร้างจากวิธีบีดเกลียวพร้อมสำหรับทดสอบต่อไป



รูปที่ 5.5 แสดงคู่ควบชนิดบีดเกลียวที่สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับการทดลอง

### 5.1.3 การสร้างคู่ควบจากเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกด้วยวิธีการขัด

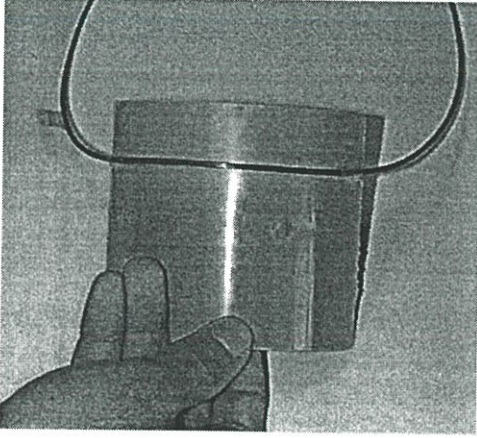
ในการสร้างคู่ควบโดยการขัดสำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเครื่องกัด โลหะสำหรับงานช่างอุตสาหกรรมดังแสดงในรูปที่ 5.6 มาประยุกต์เป็นเครื่องมือสำหรับขัดส่วนของเส้นใยนำแสงออก



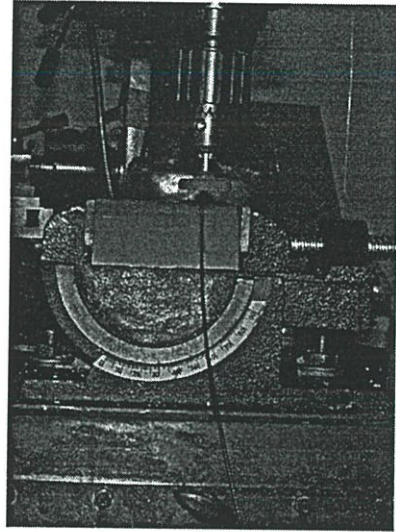
รูปที่ 5.6 แสดงเครื่องกัด โลหะที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องขัดเส้นใยนำแสง

การสร้างคู่ควบวิธีนี้เริ่มต้นด้วยการนำเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกยาว 50 เซนติเมตร จำนวน 2 เส้นทำการเตรียมปลายทั้ง 4 ของเส้นใยนำแสงตามวิธีการขัดในหัวข้อ 5.1.1 จากนั้นนำเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นติดตั้งเข้ากับแป้นจับสำหรับขัดทรงครึ่งวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 5.7 (ก) นำแป้นจับที่ติดตั้งเส้นใยนำแสงแล้วติดตั้งเข้ากับเครื่องขัด ติดตั้งหัวขัดของเครื่องขัดที่ทำจากกระดาษทรายหมายเลข 200 โดยให้หัวขัดสัมผัสกับผิวของแจ็กเก็ตพอดี เริ่มขัดโดยใช้เวลาในการขัด 30 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 5.7 (ข) จากนั้นทำการเปลี่ยนกระดาษทรายที่หัวขัดให้ละเอียดขึ้นเป็นดังนี้ 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, และ 2000 ตามลำดับ โดยในการขัดที่แต่ละหมายเลขหัวขัดให้ทำการขัดหมายเลขละ 30 วินาทีเช่นกันยกเว้นเมื่อใช้กระดาษทรายหมายเลข 1500 และ 2000 ให้ทำการขัดหมายเลขละ 1 นาที เมื่อขัดเส้นใยนำแสงด้วยกระดาษทรายครบทุกหมายเลขให้ติดตั้งหัวขัดของเครื่องขัดด้วยกระดาษสำหรับขัดเส้นใยนำแสง โดยเฉพาะที่มีความละเอียด 5, 1, และ 0.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยทำการขัดที่ความละเอียดละ 5 นาที เมื่อครบตามขั้นตอนจะได้เส้นใยนำแสงที่พร้อมสำหรับการทำคู่ควบ จากนั้นเตรียมเส้นใยนำแสงอีกเส้นในทำนองเดียวกัน เส้นใยนำแสงที่เตรียมทั้งสองมาประกบโดยให้ประกบบริเวณที่ทำการขัดของแต่ละเส้นใยนำแสงเข้าด้วยกันได้เป็น “คู่ควบที่ทำจากเส้นใยนำแสงโดยวิธีการขัด” บริเวณที่ประกบกันนี้เรียกว่า ระยะคัปปลิง (Coupling length) นำคู่ควบที่ได้ไปทดลองต่อไป สำหรับการเตรียมคู่ควบที่มี

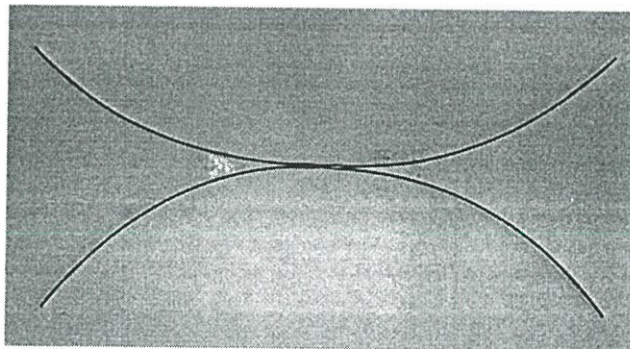
ขนาดความยาวของระยะค้ำปดถึงต่างๆกัน ให้ทำการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแป้นจับให้มีขนาดต่างๆตามต้องการ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.7 แสดงขั้นตอนการสร้างคูควบโดยวิธีการขัด (ก) การติดตั้งเส้นใยนำแสงกับแป้นของขัด (ข) การติดตั้งแป้นรองขึ้นกับเครื่องขัด (ค) คูควบที่สร้างขึ้น

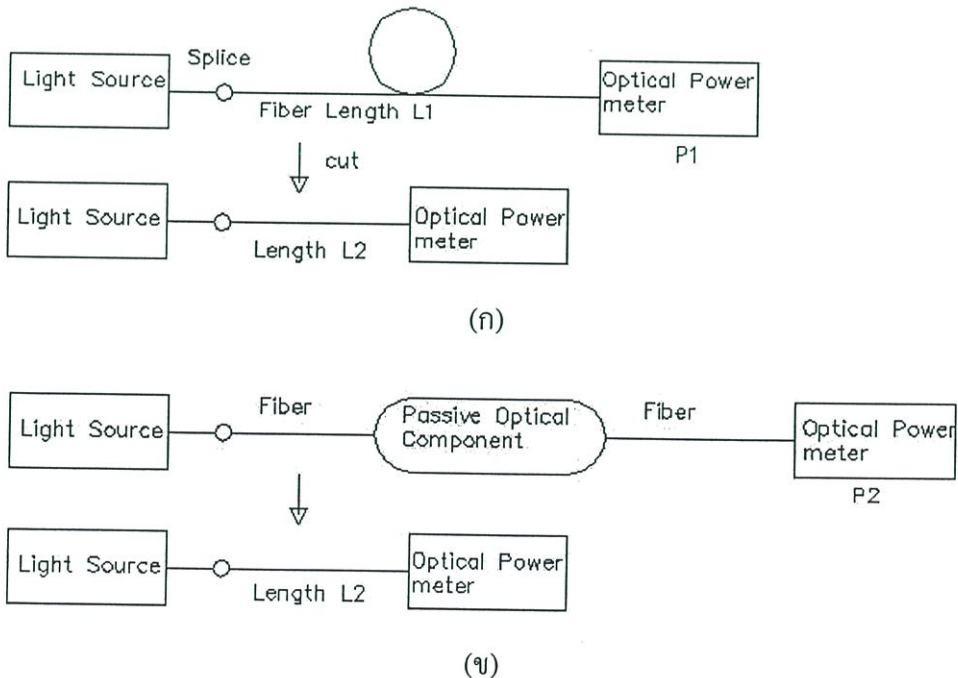
## 5.2 การศึกษาคุณสมบัติการลดทอนกำลังแสงของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกโดยเทคนิคการตัดสั้น

### 5.2.1 การวัดความสูญเสียโดยใช้เทคนิคการตัดสั้น

เทคนิคการตัดสั้นเป็นวิธีการวัดความสูญเสียที่มีความแม่นยำซึ่งใช้ได้ทั้งกับเส้นใยนำแสงและอุปกรณ์ทางแสงแบบพาสซีฟ หลักการวัดโดยเทคนิคนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 (ก) กรณีใช้งานกับเส้นใยนำแสงและ(ข) กรณีใช้งานกับอุปกรณ์ทางแสงแบบพาสซีฟ ในกรณีของเส้นใยนำแสงนั้นการวัดเริ่มด้วยการติดตั้งเส้นใยนำแสงที่มีความยาว  $L_1$  เข้ากับแหล่งกำเนิดแสงที่ด้านอินพุตและต่อเข้ากับอุปกรณ์รับแสง (ในที่นี้คือมิเตอร์วัดกำลังแสง) ที่ปลายด้านเอาต์พุตของเส้นใยนำแสง จากนั้นวัดกำลังแสงที่ปลายเอาต์พุตของเส้นใยนำแสงยาว  $L_1$  บันทึกค่า จากนั้นตัดเส้นใยนำแสงให้สั้นลงเหลือความยาว  $L_2$  โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงการป้อนแสงเข้าสู่เส้นใยนำแสงใดๆที่ด้านอินพุตและทำการวัดกำลังแสงอีกครั้งบันทึกค่ากำลังแสง ค่าความเข้มแสงที่บันทึกสามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน  $\alpha$  (Attenuation Coefficient) ของเส้นใยนำแสงดังกล่าวได้ว่า

$$\alpha = \frac{10}{L_1 - L_2} \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \quad \left( \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right) \quad (5.1)$$

เมื่อ  $P_1$  คือ กำลังแสงที่ระยะความยาวเส้นใยนำแสง  $L_1$   
และ  $P_2$  คือ กำลังแสงที่ระยะความยาวเส้นใยนำแสง  $L_2$

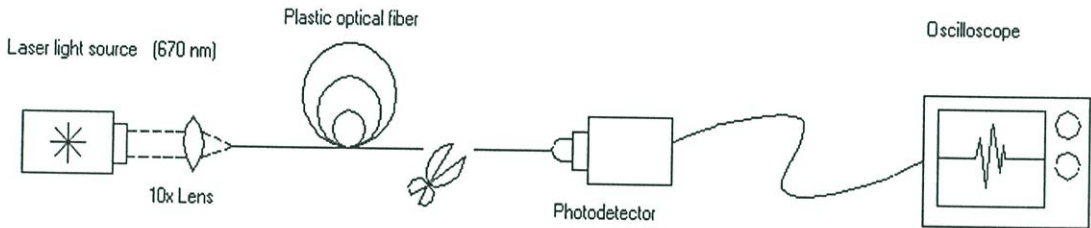


รูปที่ 5.8 แสดงการวัดความสูญเสียโดยเทคนิคการตัดสั้นของ (ก) เส้นใยนำแสง (ข) อุปกรณ์ทางแสงแบบพาสซีฟ

ข้อเสียอย่างเดียวของการวัดด้วยเทคนิคนี้คือ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคการวัดแบบทำลายทำให้ไม่สามารถที่จะทดลองซ้ำได้จากเส้นใยนำแสงเส้นเดียวกัน นอกจากนี้ถึงแม้ว่าเทคนิคนี้จะมี ความแม่นยำสูงแต่ก็ยังคงพบความผิดพลาดจากการวัดได้ซึ่งสาเหตุของความผิดพลาด เกิดได้จากการเปลี่ยนแปลงไปของเงื่อนไขการป้อนแสง ผลกระทบจากโหมดแสงของแคลคดิง ความไม่สมบูรณ์ ในการเตรียมผิวปลายเส้นใยนำแสงภายหลังการตัดเส้นใยนำแสงให้สั้นลง และความไม่สม่ำเสมอ ของความไวของอุปกรณ์รับแสง

### 5.2.2 วิธีการทดลอง

ในการศึกษาคุณสมบัติการลดทอนกำลังแสงของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกนี้ เริ่มต้นด้วยการนำเส้นใยนำแสง 1 เส้นที่มีความยาว 10 เมตร เตรียมปลายทั้งสองของเส้นใยนำแสงด้วยวิธีการ ขัดปลายเส้นใยนำแสงดังในหัวข้อ 5.1.1 จากนั้นติดตั้งเส้นใยนำแสงเข้ากับระบบดังในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงระบบที่ใช้ในการทดลองวัดการลดทอนสัญญาณ โดยใช้เทคนิคการตัดสั้น

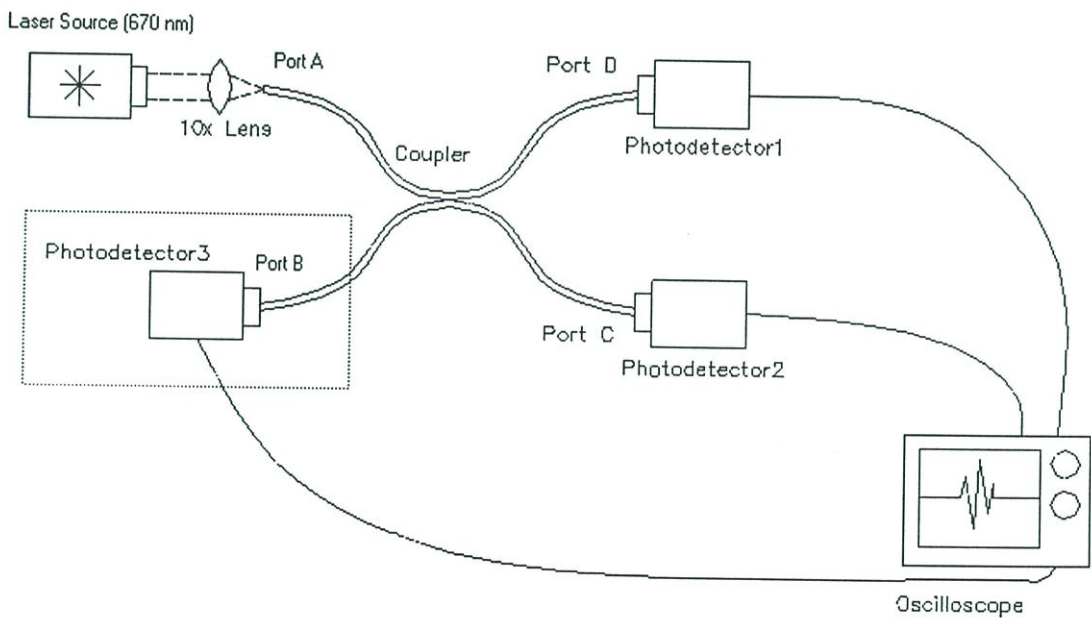
ระบบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรให้กำลังแสง 5 มิลลิวัตต์ แสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดจะถูกส่งเข้าเลนส์รวมแสง กำลังขยาย 10x ที่ติดตั้งอยู่บนชุดไมโครบล็อกสำหรับป้อนแสงเลเซอร์เข้าสู่เส้นใยนำแสงโดยที่ชุด ไมโครบล็อกผู้ทดลองสามารถปรับแกนเลื่อนให้แสงเลเซอร์ป้อนเข้าเส้นใยนำแสงได้เหมาะสมที่ สุดทั้ง 3 มิติ ในการทดลองให้ติดตั้งปลายด้านที่ 1 ของเส้นใยนำแสงเข้ากับชุดไมโครบล็อกนี้และ ปลายอีกด้านให้ทำการติดตั้งหัวเชื่อมต่อกันนั้นจึงติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์รับแสง เมื่อติดตั้งปลายเส้น ใยนำแสงทั้งสองด้านแล้วให้ป้อนแสงเลเซอร์เข้าสู่เส้นใยนำแสงและปรับการรับแสงของเส้นใยนำ แสงโดยปรับแกนเลื่อน 3 มิติของไมโครบล็อกให้ได้ค่าความเข้มแสงที่อ่านจากอุปกรณ์รับแสงมีค่า สูงที่สุด ความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เดินทางผ่านเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกจะมีการลดทอนลงตาม ระยะทางที่แสงเดินทางดังที่อธิบายในหัวข้อที่ 4.1.2.4 บันทึกค่ากำลังแสงที่ลดทอนลงของเส้นใยนำ แสงชนิดพลาสติกที่ยาว 10 เมตร จากนั้นให้ทำการตัดความยาวของเส้นใยนำแสงด้านปลายเอาต์พุต ให้สั้นลง 2 เมตร โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงการป้อนแสงเลเซอร์ที่ชุดไมโครบล็อกเข้าปลายเส้น ใยนำแสงแต่อย่างใด เตรียมปลายของเส้นใยนำแสงที่ตัดตามวิธีการในหัวข้อ 5.1.1 ใส่หัวเชื่อมต่อเข้า

กับปลายเส้นใยนำแสงและติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์รับแสงเช่นเดิม ทำการบันทึกค่ากำลังแสงที่ลดทอนลงอีกครั้ง ทำในทำนองเดียวกันกับเส้นใยนำแสงเมื่อตัดให้ความยาวสั้นลงเป็น 6, 4, 2, และ 1 เมตร ตามลำดับ

### 5.3 การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสร้างคู่ควมโดยวิธีบิตเกลียวกับวิธีขัด

ในการทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบเทคนิคในการสร้างคู่ควมทั้งสองวิธี โดยพิจารณาถึงความยากง่ายในการสร้างคู่ควมและผลลัพธ์ของกำลังแสงเอาต์พุตของคู่ควมที่ได้รับ เพื่อกำหนดเป็นวิธีการสร้างคู่ควมที่นำมาใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของคู่ควมในการศึกษาขั้นต่อไปของงานวิจัย การทดลองนี้เริ่มต้นด้วยสร้างคู่ควมจากวิธีบิตเกลียวตามขั้นตอนในหัวข้อ 5.1.2 จำนวน 3 ตัวอย่างและสร้างคู่ควมจากวิธีการขัดตามขั้นตอนในหัวข้อ 5.1.3 จำนวน 3 ตัวอย่าง นำคู่ควมไปติดตั้งในระบบทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.10

#### 5.3.1 วิธีการทดลอง



รูปที่ 5.10 แสดงระบบที่ใช้ในการวัดกำลังแสงเอาต์พุตของคู่ควมเพื่อเปรียบเทียบวิธีการสร้างคู่ควม

จากรูปที่ 5.10 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำทำงานที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร กำลังแสง 5 มิลลิวัตต์ถูกป้อนเข้าสู่เลนส์รวมแสงที่มีกำลังขยาย 10x ซึ่งติดตั้งบนชุดไมโครบล็อกโดยแกนเลื่อนของชุดไมโครบล็อกสามารถที่จะปรับเลื่อนได้ทั้ง 3 มิติ จากนั้นแสงเลเซอร์จะถูกป้อนเข้าสู่ปลายด้านอินพุตพอร์ต A ของคู่ควม ปรับการป้อนแสงให้ได้ค่าความเข้มแสงเอาต์พุตที่อุปกรณ์รับแสงมีค่าสูงสุด บันทึกค่า ทำการทดลองซ้ำจนครบคู่ควมทั้ง 3 อันในแต่ละวิธีการสร้าง

## 5.4 การศึกษาคุณลักษณะการคับปลิงของคู่ควบโดยการเปลี่ยนความยาวระยะคับปลิง

จากการศึกษาการเดินทางของแสงและการคับปลิงในท่อนำคลื่นในบทที่ 3 พบว่า เมื่อพิจารณาท่อนำคลื่น A ที่มีแสงเดินทางในท่อนำคลื่นโดยที่ท่อนำคลื่นไม่ถูกรบกวนจากภายนอกสนามในท่อนำคลื่น เมื่อนำท่อนำคลื่น B ซึ่งมีความเหมือนกับท่อนำคลื่น A ทุกประการมาวางใกล้ๆ ท่อนำคลื่น A ในระยะที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 3.13 แสงที่เดินทางในท่อนำคลื่น A จะคับปลิงไปยังท่อนำคลื่น B โดยที่กำลังแสงที่คับปลิงระหว่างท่อนำคลื่นทั้งสองจะเป็นดังสมการ

$$\text{ท่อนำคลื่น A} \quad P_A(z) = P_0 \sin^2(Cz) \quad (5.2)$$

$$\text{ท่อนำคลื่น B} \quad P_B(z) = P_0 \cos^2(Cz) \quad (5.3)$$

นั่นคือกำลังแสงในท่อนำคลื่นทั้งสองที่วางห่างกันในระยะที่เหมาะสมใดๆ จะมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างท่อนำคลื่นทั้งสองสลับไปมาเป็นฟังก์ชันของไซน์และโคไซน์ โดยที่กำลังแสงในท่อนำคลื่น B ถ่ายทอดไปยังท่อนำคลื่น A จนหมดที่ระยะ  $Z_B$  ดังสมการ

$$\sin(CZ_B) = 1 \quad (5.4)$$

จะได้ว่า

$$Z_B = \frac{\pi}{2C} \quad (5.5)$$

ในการทดลองนี้ได้นำคู่ควบที่สร้างด้วยวิธีขัดให้มีความยาวระยะคับปลิงต่างๆ มาทดลองในระบบเพื่อศึกษาผลของความยาวระยะคับปลิงที่มีต่อคุณลักษณะการคับปลิงที่สร้างขึ้น

### 5.4.1 การเตรียมคู่ควบ

คู่ควบที่ใช้ในการทดลองนี้ได้จัดเตรียมตามวิธีการในหัวข้อ 5.1.3 โดยการเปลี่ยนความยาวของระยะคับปลิงยาวนั้นทำโดยการเปลี่ยนขนาดของตัวเป็นจับให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

### 5.4.2 วิธีการทดลอง

การทดลองเริ่มโดยนำคู่ควบ C1 ที่เตรียมโดยวิธีการขัดในหัวข้อ 5.4.1 มาติดตั้งในระบบทดลองเช่นเดียวกับในการทดลองที่ 5.3 จากนั้นจึงเริ่มป้อนแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรเข้าสู่อินพุตพอร์ต A ของคู่ควบ C1 ปรับการป้อนเลเซอร์จนค่าความเข้มแสงเอาต์พุตที่อุปกรณ์รับแสงมีค่าสูงสุด บันทึกค่า ถอดคู่ควบออกและทำการติดตั้งคู่ควบเข้ากับไมโครบิลด์อีกครั้งทำ

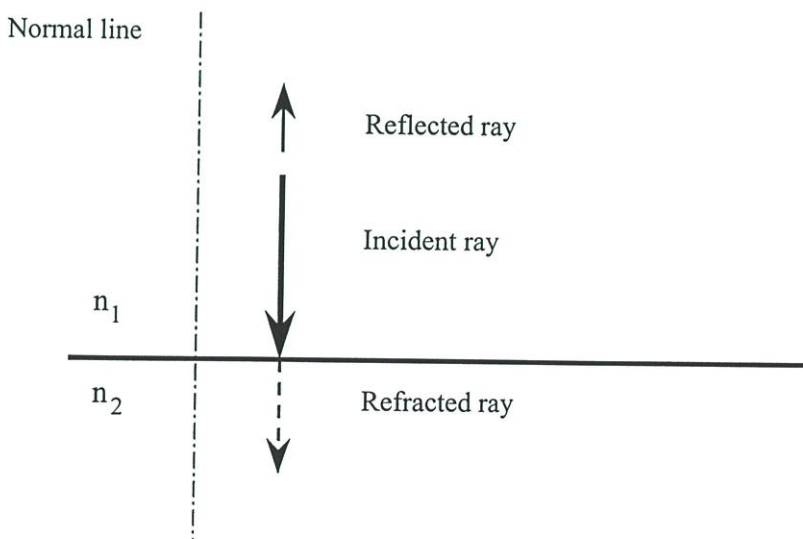
การทดลองฉบับนี้ทำครบ 5 ครั้ง เปลี่ยนคู่ควบเป็นคู่ควบที่มีระยะค้ำปลิงยาวอื่น C2, C3, C4 และ C5 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 แสดงคู่ควบที่สร้างโดยวิธีขีดสำหรับการทดลองที่ 5.4

ลำดับที่	ชื่อคู่ควบ	เส้นผ่านศูนย์กลางเป็นจิบ (นิ้ว)	ระยะค้ำปลิงของคู่ควบ (มม.)
1	C1	1.5	9.41
2	C2	2	11.41
3	C3	2.5	12.38
4	C4	3	13.15
5	C5	4	15.35

### 5.5 การศึกษาผลของการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสงของคู่ควบ

จากการศึกษาเรื่องปรากฏการณ์สะท้อนและการหักเหของแสงในบทที่ 2 พบว่าแสงที่เดินทางตกกระทบบนรอยต่อของตัวกลาง 2 ชนิดที่มีค่าดัชนีหักเหต่างกัน พบว่าแสงส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับและเดินทางต่อไปในตัวกลางเดิมโดยมุมสะท้อนของแสงจะเท่ากับมุมตกกระทบ แสงส่วนที่เหลือจะเดินทางต่อไปในตัวกลางที่ 2 โดยมีแนวทางการเดินทางของแสงเปลี่ยนแปลงไปตามกฎของสเนลล์



รูปที่ 5.11 แสดงการตกกระทบในแนวเส้นปกติของแสง

ในกรณีที่แสงเดินทางตกกระทบบนรอยต่อของตัวกลางทั้งสองในแนวเส้นปกติ นั่นคือ มุมตกกระทบบมีค่าเท่ากับศูนย์  $\theta_i = 0$  ดังแสดงในรูปที่ 5.11 แสงส่วนที่สะท้อนกลับสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5.6

$$R = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (5.6)$$

เมื่อ R แทนกำลังแสงที่สะท้อนกลับ

$n_1$  แทนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 ที่แสงเดินทางมา

$n_2$  แทนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 2 ที่แสงทะลุผ่าน

และจากกฎทรงพลังงาน กำหนดให้แสงที่เดินทางมาตกกระทบบมีพลังงานเท่ากับ 1 หน่วย  
ดังนั้น

$$1 = R + T \quad (5.7)$$

เมื่อ T แทนแสงที่ทะลุผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2

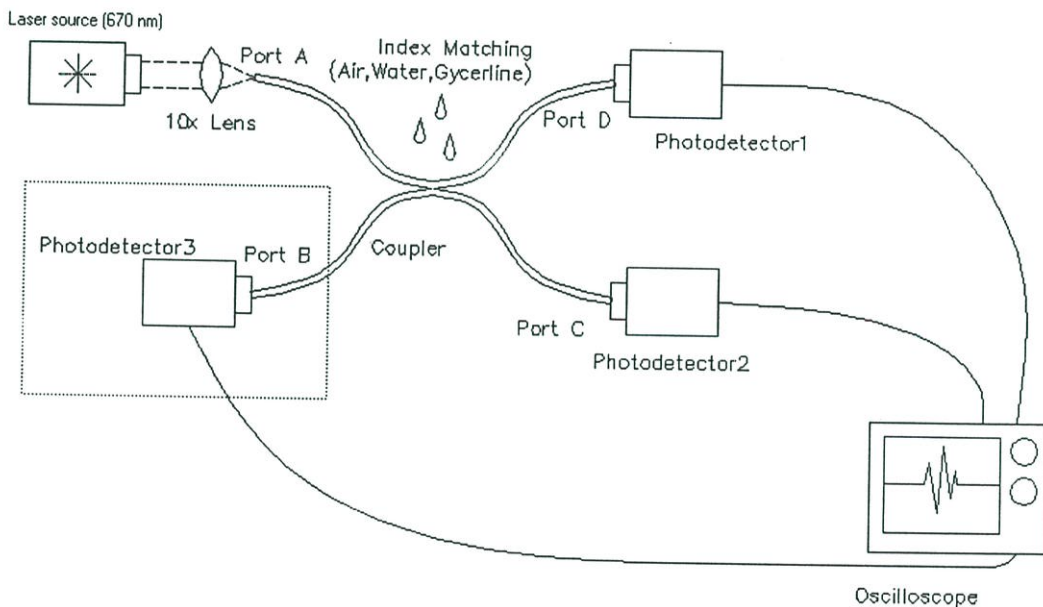
จากสมการที่ 5.6 พบว่า เมื่อค่าดัชนีหักเหของตัวที่ 2 มีค่าเข้าใกล้ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 ค่าการสะท้อนแสงจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ในการงานวิจัยได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงตัวกลางที่เชื่อมรอยต่อการคัปปลิง ได้มีการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหตัวกลางที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสงของกลุ่มควมจากเป็นอากาศ น้ำ และกลีเซอริน ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าดัชนีหักเหของอากาศ น้ำ และกลีเซอรินเมื่อวัดโดยแสงความยาวคลื่น 589 nm.

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลอง	ค่าดัชนีหักเห
1. อากาศ	1.00
2. น้ำ	1.33
3. กลีเซอริน	1.47

### 5.5.1 วิธีการทดลอง

การทดลองเริ่มต้นด้วยแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรจากแหล่งกำเนิดป้อนผ่านเลนส์รวมแสงกำลังขยาย 10x ที่ชุดไมโครบล็อกเพื่อเข้าสู่อินพุตพอร์ต A ของคูควบ C1 โดยคูควบที่ใช้ในการทดลองเป็นคูควบที่มีความยาวระยะคัปปลิงต่างๆกันดังแสดงในตารางที่ 5.1 จากนั้นปรับการรับแสงเข้าอินพุตของคูควบที่ไม่โครบล็อกให้ได้ค่าความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุตสูงสุด บันทึกค่าทำการทดลองจนบันทึกค่าครบ 5 ครั้ง เปลี่ยนคูควบเป็นคูควบที่มีระยะคัปปลิงยาวอื่น C2, C3, C4 และ C5 ตามลำดับ เมื่อทดลองครบทุกคูควบให้นำคูควบ C1 มาติดตั้งในระบบอีกครั้งแต่ครั้งนี้ให้เปลี่ยนตัวกลางที่เชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสงเป็นน้ำทำการทดลองซ้ำเพื่อบันทึกค่าความเข้มแสงทำการทดลองจนครบทุกคูควบ จากนั้นให้เปลี่ยนตัวกลางเป็นกลีเซอรินทำการทดลองซ้ำ



รูปที่ 5.12 แสดงระบบทดลองที่ใช้ในการวัดกำลังแสงเอาต์พุตของคูควบที่ใช้ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแสงต่างๆ

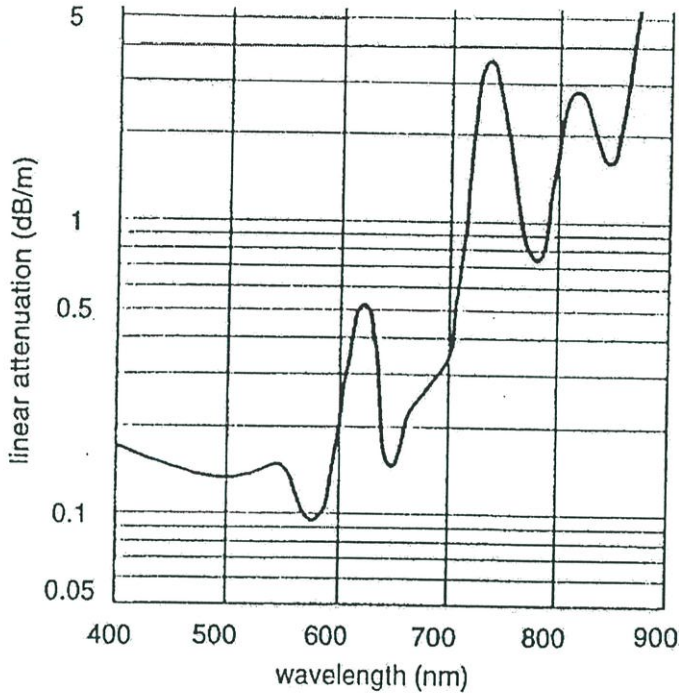
เนื่องจากสารที่นำมาใช้เป็นสารเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสงมีสถานะเป็นของเหลวในการเคลื่อนจึงใช้การหยดใส่บริเวณระยะคัปปลิง จากนั้นจึงทำการซับของเหลวที่เป็นส่วนเกินออกเพื่อลดการสูญเสียความเข้มแสงที่เดินทางมาถึงบริเวณรอยต่อ

## 5.6 ผลการศึกษาผลการตอบสนองของอัตราการคัปปลิงต่อแหล่งกำเนิดแสงที่

### ความยาวคลื่นย่านใกล้อินฟราเรด

วัสดุที่นำมาผลิตคอร์ของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกหลากหลายชนิดเช่น โพลีไวนิลอะซิเตท โพลีไตรฟลูออโรเอททิลเมตะไครเลท เป็นต้น แต่เป็นที่นิยมที่สุดคือ โพลีเมทิลเมตะไครเลท จาก

ความรู้ในบทที่ 4 พบว่า เมื่อแสงเดินทางไปในตัวกลางใตุนั้น แสงจะลดทอนไปตามระยะทางที่แสงเดินไปทั้งจากการดูดกลืนของวัสดุ จากการกระเจิงแบบเรย์ลี และการดูดกลืนของ  $\text{OH}^-$  ซึ่งแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันจะให้ผลการลดทอนของแสงต่างกันไป กรณีของวัสดุโพลีเมทิลเมตะไครเลท ผลของความยาวคลื่นที่มีต่อการลดทอนสามารถที่จะแสดงได้ในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 แสดงการลดทอนแสงของวัสดุโพลีเมทิลเมตะไครเลทที่ความยาวคลื่นต่างๆ

จากศึกษาในหัวข้อ 3.5 พบว่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การคับปลิงโดยผ่านทางตัวแปร  $k$  ที่อยู่ในรูปของคอร์พารามิเตอร์ แคลดดิ้งพารามิเตอร์ และความถี่นอร์มัลไลซ์ ดังแสดงในสมการที่ 5.8

$$c = \frac{(2\Delta)^{1/2} U^3 K_0(wd/\rho)}{\rho V^2 K_1^2(w)} \cong \left\{ \frac{\pi\Delta}{wd\rho} \right\}^{1/2} \frac{U^2 \exp(-wd/\rho)}{V^3 K_1^2(w)} \quad (5.8)$$

เมื่อ  $\Delta \cong 1 - \frac{n_{cl}}{n_{co}}$

$U$  คือ คอร์พารามิเตอร์ มีค่าเท่ากับ  $U = \rho(k^2 n_{co}^2 - \beta^2)^{1/2}$

$w$  คือ แคลดดิ้งพารามิเตอร์ มีค่าเท่ากับ  $w = \rho(\beta^2 - k^2 n_{cl}^2)^{1/2}$

$v$  คือ ความถี่นอร์มัลไลซ์ มีค่าเท่ากับ  $v = \rho k(n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$

d คือ ระยะห่างระหว่างท่อนำคลื่น

$\rho$  คือ รัศมีของท่อนำคลื่น

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

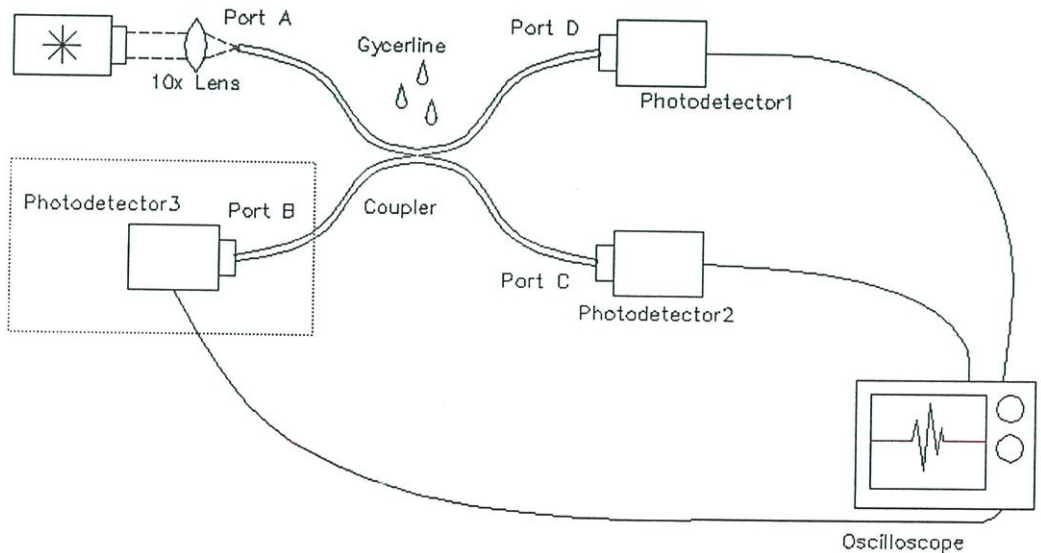
$K_0$  คือ โมดิไฟด์ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่ง

$K_1$  คือ โมดิไฟด์ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่สอง

โดยที่เมื่อแทนค่า  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  ในตัวแปรของ U, W และ V ในสมการข้างต้นก็จะได้ความสัมพันธ์ดังกล่าว ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นต่างๆที่มีต่ออัตราการคับปลิงของคู่ควบที่สร้างโดยวิธีการขัด ระบบในการทดลองได้จัดเตรียมระบบการวัดค่าความเข้มแสงเช่นเดียวกับในการทดลองที่ 5.5 และได้มีการใช้ตัวกลางระหว่างรอยเชื่อมต่อของเส้นใยนำแสงเป็นกลีเซอรินที่มีค่าดัชนีหักเห 1.47 สำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ให้ความยาวคลื่น 632.8 nm. กำลัง 1 mW.
2. แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำที่ให้ความยาวคลื่น 670 nm. กำลัง 5 mW.
3. แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำที่ให้ความยาวคลื่น 785 nm. กำลัง 1 mW.
4. แหล่งกำเนิดแสงแอลอีดีที่ให้ความยาวคลื่น 850 nm. กำลัง 80  $\mu$ W.

Light Source  
Laser (632.8, 670, 785 nm)  
LED (850 nm)



รูปที่ 5.14 แสดงระบบทดลองที่ใช้ในการวัดกำลังแสงเอาต์พุตของคู่ควบเมื่อมีการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่างๆ

### 5.6.1 วิธีการทดลอง

การทดลองเริ่มโดยติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรในระบบเช่นเดียวกับในหัวข้อ 5.5 จากนั้นป้อนแสงเลเซอร์ผ่านเลนส์รวมแสงกำลังขยาย 10x ที่ชุดไมโครบล็อกเพื่อป้อนเข้าสู่อินพุตพอร์ต A ของคูควบ C1 คูควบที่ใช้ในการทดลองเป็นคูควบที่มีความยาวระยะคัปปลิงต่างกันเช่นเดียวกับการศึกษาหัวข้อ 5.4 จากนั้นปรับการรับแสงเข้าอินพุตพอร์ต A ของคูควบที่ไม่โครบล็อกให้ได้ค่าความเข้มแสงเอาต์พุตที่พอร์ต C และ D มีสูงสุดบันทึกค่า ทำการทดลองซ้ำ จากนั้นเปลี่ยนคูควบเป็น C2, C3, C4 และ C5 ทำการทดลองซ้ำจนครบทุกคูควบ จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ 2, 3, และ 4 ตามลำดับ และทำการทดลองซ้ำตั้งแต่เริ่มต้นที่ความยาวคลื่นต่างดังกล่าว

## 5.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการสร้างคูควบโดยได้แบ่งเป็นการสร้างคูควบโดยวิธีบิตเกลียวซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของมร. เอ. สุชาโคลนิก และการสร้างคูควบโดยวิธีการขัดซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของวาย สุจิโมโต รวมทั้งได้กล่าวถึงวิธีการขับปลายเส้นใยนำแสง การทดลองของงานวิจัยเริ่มด้วยการศึกษาคุณสมบัติการลดทอนกำลังแสงของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกโดยใช้เทคนิคการตัดสั้นซึ่งให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจถึงแม้ว่าเป็นการทดลองแบบทำลาย จากนั้นได้ทำการทดลองในส่วนของคูควบโดยเริ่มจากการทดลองเปรียบเทียบวิธีการสร้างคูควบทั้งสองที่ได้กล่าวข้างต้น การทดลองคุณลักษณะการคัปปลิงของคูควบโดยการเปลี่ยนความยาวระยะคัปปลิงเพื่อผลของความยาวระยะคัปปลิงที่มีต่อการคัปปลิงของคูควบ เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสงของคูควบโดยใช้ตัวกลางในการศึกษาเป็นอากาศ น้ำและกลีเซอริน ในการทดลองสุดท้ายได้ศึกษาผลการตอบสนองของอัตราการคัปปลิงต่อแหล่งกำเนิดแสงที่ความยาวคลื่น 632.8, 670, 785 และ 850 นาโนเมตร ผลการทดลองงานวิจัยได้แสดงไว้ในบทต่อไป

## บทที่ 6

### ผลของงานวิจัย

ในบทนี้จะแสดงผลการทดลองจากการศึกษาตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ซึ่งมี 5 ขั้นตอนดังนี้ ผลการศึกษาการลดทอนสัญญาณแสงโดยใช้เทคนิคการตัดสั้น ผลการศึกษาเปรียบเทียบการสร้างคู่ควบด้วยวิธีบิตเกลียวและวิธีขัด ผลการศึกษาคุณลักษณะการคับปลิงของคู่ควบโดยการเปลี่ยนระยะการคับปลิง ผลการศึกษาการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสงของคู่ควบ และผลการศึกษาการตอบสนองของอัตราการคับปลิงต่อแหล่งกำเนิดแสงที่ความยาวคลื่นย่านใกล้อินฟราเรดดังรายละเอียดต่อไปนี้

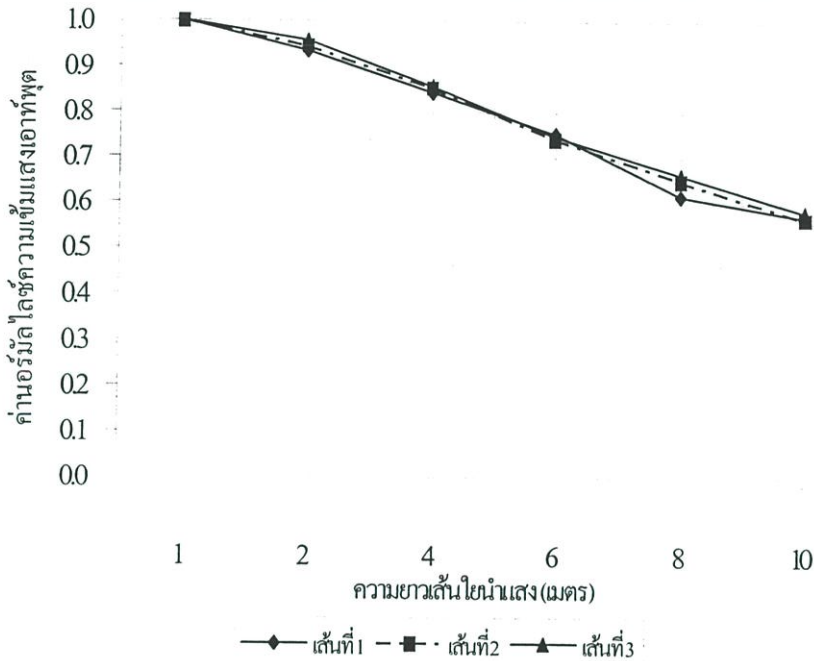
#### 6.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติการลดทอนความเข้มแสงของเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกโดยใช้เทคนิคการตัดสั้น

ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 5.2 เทคนิคการตัดสั้นเป็นวิธีการหนึ่งในการวัดค่าการลดทอนความเข้มแสงของเส้นใยนำแสงที่ได้ผลแม่นยำ ผลของการทดลองตามวิธีการทดลอง 5.2.2 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการลดทอนความเข้มแสงที่ป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร

ความยาวของเส้นใยนำแสง (เมตร)	ค่าความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุต (โวลต์)				ค่าออร์มัลไลซ์ความเข้มแสง			
	เส้นที่ 1	เส้นที่ 2	เส้นที่ 3	เฉลี่ย	เส้นที่ 1	เส้นที่ 2	เส้นที่ 3	เฉลี่ย
1	9.62	9.89	9.58	9.69	1.00	1.00	1.00	1.00
2	8.98	9.33	9.16	9.16	0.93	0.94	0.96	0.94
4	8.10	8.42	8.20	8.24	0.84	0.85	0.86	0.85
6	7.24	7.32	7.15	7.24	0.75	0.74	0.75	0.75
8	5.92	6.42	6.34	6.23	0.62	0.65	0.66	0.64
10	5.47	5.58	5.56	5.54	0.57	0.56	0.58	0.57

จากข้อมูลในตารางที่ 6.1 สามารถแสดงแนวโน้มการลดทอนสัญญาณแสงได้ดังแสดงในรูปที่ 6.1 โดยผลค่าความเข้มของแสงเลเซอร์มีการลดทอนลงตามระยะทางที่แสงเดินทางและสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนความเข้มแสงของเส้นใยนำแสงที่ความยาวต่างได้จากสมการที่ 5.1 และค่าที่คำนวณได้จะแสดงในตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.1 แสดงการลดทอนความเข้มแสงเทียบกับความยาวเส้นใยนำแสง

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยนำแสงรุ่น Super Eska 4001

ความยาวของเส้นใยนำแสง (เมตร)	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (dB/m)		
	เส้นที่ 1	เส้นที่ 2	เส้นที่ 3
1	-	-	-
2	0.30	0.25	0.20
4	0.25	0.23	0.22
6	0.25	0.26	0.25
8	0.30	0.27	0.26
10	0.27	0.28	0.26

ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนพบว่า เมื่อป้อนแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรแก่เส้นใยนำแสงรุ่น Super Eska 4001 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยนำแสงมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.2 – 0.3 dB/m และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.26 dB/m ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสเปคของ บริษัทผู้ผลิต (ภาคผนวก จ) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าของผู้ผลิต (0.18 dB/m) โดยต่างกันอยู่ 0.08 dB/m จากสมการที่ 5.1 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงเริ่มต้น  $P_1$  กับค่าความเข้มแสงหลังการตัดเส้นใยนำแสง  $P_2$  และจากการทดลองจะพบว่าสามารถเขียนสมการทั่วไปเพื่อคำนวณหาค่าความเข้มแสงที่ระยะความยาวต่างๆ ของเส้นใยนำแสงรุ่น Super Eska ที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรได้ดังสมการ

$$P_2 = P_1 * 10^{\left(\frac{(L_1 - L_2) * 0.26}{10}\right)} \quad (6.1)$$

โดยที่  $P_1$  คือค่าความเข้มแสงที่ระยะความยาวเริ่มต้น  $L_1$

$P_2$  คือค่าความเข้มแสงที่ระยะความยาวภายหลังการตัดสั้นต้น  $L_2$

## 6.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสร้างคู่วัดโดยวิธีบีดเกลียวกับวิธีขัด

ในการทดลองเปรียบเทียบวิธีการสร้างคู่วัดเพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานที่จะเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินงานวิจัยตามขั้นตอนการในหัวข้อ 5.3.1 คู่วัดที่สร้างได้กำหนดให้มีระยะความยาวคัปปลิงเท่ากันที่ 20 มิลลิเมตร ในการทดลองเปรียบเทียบได้ป้อนแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรเข้าที่พอร์ต A ของคู่วัดและวัดค่าความเข้มแสงที่พอร์ต B C และ D ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ได้ผลค่าความเข้มแสงเอาต์พุตของคู่วัดแสดงดังตารางที่ 6.3 และ 6.4

ตารางที่ 6.3 แสดงค่าความเข้มแสงที่พอร์ตต่างๆของคู่วัดที่สร้างโดยวิธีบีดเกลียว

ครั้งที่	ค่าความเข้มแสงที่พอร์ตต่างๆ (มิลลิวัตต์)			
	พอร์ต A	พอร์ต B	พอร์ต C	พอร์ต D
1	10290.00	24.20	80.60	130.00
2	10290.00	46.80	68.90	90.40
3	10290.00	18.80	53.40	85.20
เฉลี่ย	10290.00	29.93	67.63	101.87

ตารางที่ 6.4 แสดงค่าความเข้มแสงที่พอร์ตต่างๆของคู่ควบที่สร้างโดยวิธีการขัด

ครั้งที่	ค่าความเข้มแสงที่พอร์ตต่างๆ (มิลลิวัตต์)			
	พอร์ต A	พอร์ต B	พอร์ต C	พอร์ต D
1	10290.00	40.30	304.10	644.20
2	10290.00	63.20	282.50	538.40
3	10290.00	38.20	257.20	614.00
เฉลี่ย	10290.00	47.23	281.27	598.87

จากผลค่าความเข้มในตารางที่ 6.3 และ 6.4 สามารถคำนวณค่าความสูญเสียแบบอินเลิซชัน ค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซส และค่าไคเร็กติวิตี ได้จากสมการที่ 3.34 ถึง 3.36 ซึ่งนำมาแสดงในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าคุณสมบัติต่างๆของคู่ควบจากการคำนวณสมการที่ 3.34 ถึง 3.6

วิธีการสร้างโดย	ครั้งที่	ค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซส (dB)	ค่าความสูญเสียแบบอินเลิซชัน (dB)		ค่าไคเร็กติวิตี (dB)
			พอร์ต A ไป C	พอร์ต A ไป D	
การบิดเกลียว	1	16.89	21.06	18.98	26.29
	2	18.10	21.74	20.56	23.42
	3	18.71	22.85	20.82	27.38
ค่าเฉลี่ย		17.83	21.82	20.04	25.70
การขัด	1	10.36	15.29	12.03	24.07
	2	10.98	15.61	12.81	22.12
	3	10.72	16.02	12.24	24.30
ค่าเฉลี่ย		10.68	15.63	12.35	23.50

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่าการสร้างคู่ควบโดยวิธีการขัดให้ความเข้มแสงเอาต์พุตในระดับที่สูงกว่าการสร้างโดยวิธีการบิดเกลียวโดยพิจารณาได้จากค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซสของคู่ควบที่สร้างโดยวิธีขัดมีค่าความสูญเสียต่ำกว่าอยู่ที่ระดับ 10.36 – 10.98 dB แต่อย่างไรก็ตามคู่ควบที่สร้างโดยวิธีบิดเกลียวมีค่าไคเร็กติวิตีสูงกว่าคู่ควบที่สร้างโดยวิธีการขัดเล็กน้อย นั้นหมายความว่าคู่ควบที่สร้างโดยวิธีดังกล่าวจะมีแสงสะท้อนกลับมารบกวนที่พอร์ตด้านอินพุตน้อย

กว่า นอกจากนี้เมื่อคำนึงถึงความสะดวกในการควบคุมวิธีการสร้างแล้วคู่ควบที่สร้างโดยวิธีการขัดจะสามารถควบคุมได้มากกว่าเนื่องจากการสร้างโดยใช้เครื่องมือเข้ามาช่วยเป็นผลให้มีความสม่ำเสมอในการทำซ้ำมากกว่า ดังนั้นในงานวิจัยจะกำหนดการสร้างคู่ควบโดยวิธีการขัดเป็นมาตรฐานในการทำวิจัย

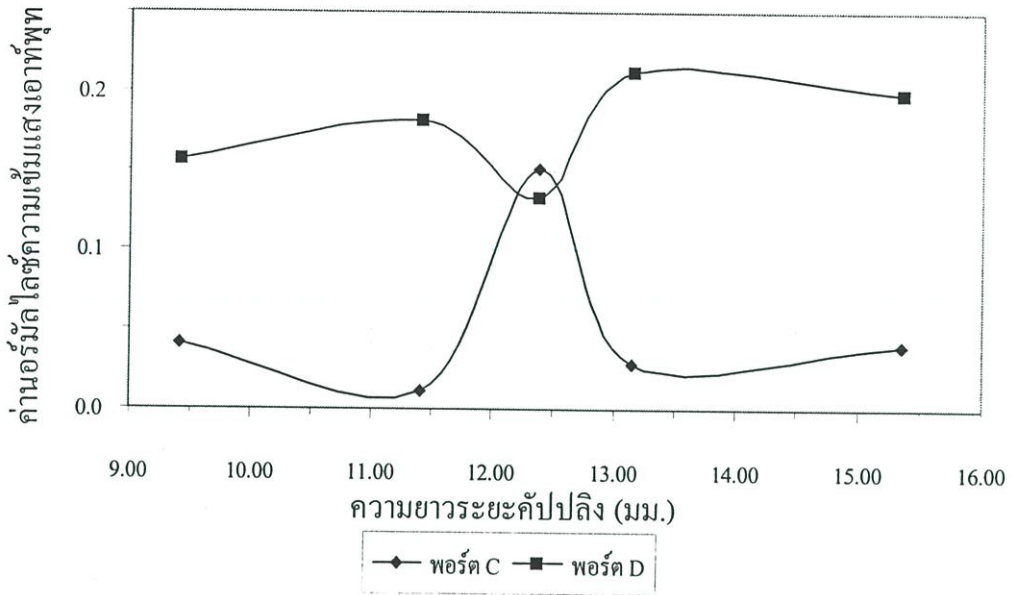
### 6.3 ผลการศึกษาคุณลักษณะการคับปลิงของคู่ควบโดยการเปลี่ยนระยะในการคับปลิง

จากการศึกษาทฤษฎีโหมคคับปลิงของคู่ควบดังได้อธิบายในหัวข้อ 3.4 ทำให้ทราบว่าแสงที่คับปลิงกันระหว่างท่อนำคลื่นของคู่ควบจะมีการออสซิลเลทไปมาตามความยาวของระยะคับปลิงในการทดลองนี้เป็นการศึกษาลักษณะการคับปลิงกันของแสงที่เดินทางในเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกของคู่ควบที่สร้างโดยวิธีการขัด โดยในการสร้างได้กำหนดให้มีระยะคับปลิงต่างๆกันดังกำหนดในหัวข้อ 5.4 ในการศึกษาได้ผลการทดลองการวัดความเข้มแสงเอาต์พุตของคู่ควบทั้ง 5 ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 แสดงผลการวัดค่าความเข้มแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของคู่ควบ C1 ถึง C5

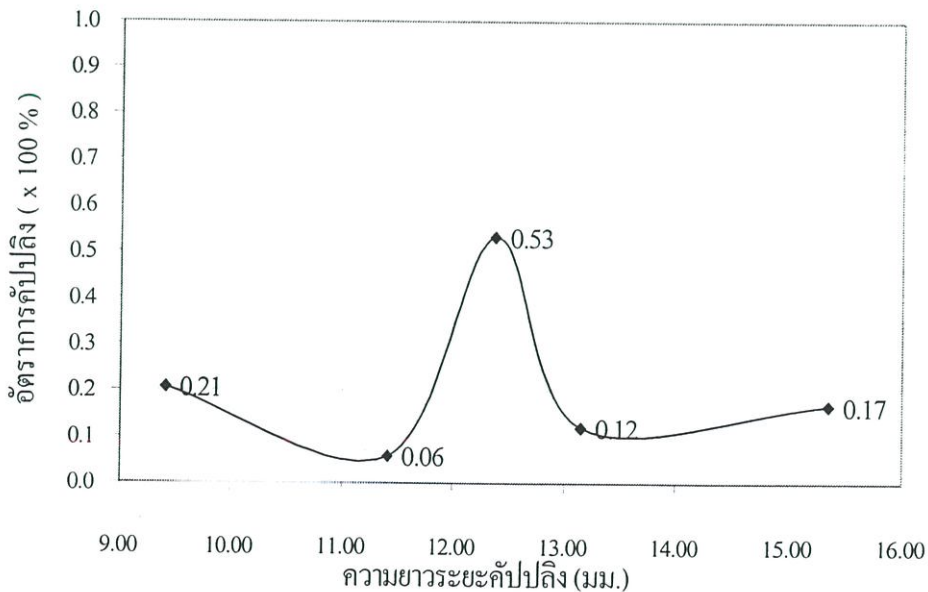
คู่ควบ	ความเข้มแสงที่พอร์ตอินพุต (โวลต์)	ความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุต (มิลลิโวลต์)		
		พอร์ต B	พอร์ต C	พอร์ต D
C1	10.29	6.14	418.20	1610.00
C2	10.29	5.16	114.60	1867.00
C3	10.29	11.80	1551.00	1370.00
C4	10.29	7.96	296.30	2182.00
C5	10.29	9.02	409.10	2044.00

ทำการนอร์มัลไลซ์ค่าความเข้มแสงเอาต์พุตที่พอร์ต C และ D แสดงผลการนอร์มัลไลซ์ความเข้มแสงเทียบกับความยาวของระยะคับปลิงได้ดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดงค่าออร์มัลไลซ์ความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุตที่ความยาวระยะคัปปลิงต่างๆ

จากรูปที่ 6.2 พบว่า ความเข้มแสงเอาต์พุตที่พอร์ต C และ D ของคู่ควมเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกที่ได้สร้างโดยวิธีการขัคนั้นเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงสูงต่ำสลับกันไปมาเมื่อเทียบกับความยาวระยะคัปปลิงซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 5.2 และ 5.3 โดยที่ระยะคัปปลิง 12.38 มิลลิเมตรค่าความเข้มแสงเอาต์พุตที่พอร์ต C และพอร์ต D มีค่าใกล้เคียงกันนั้นหมายความว่า ที่ระยะคัปปลิงเท่ากับ 12.38 มิลลิเมตร คู่ควมจะให้อัตราส่วนการคัปปลิงประมาณ 0.5 หรือ 50% แสดงได้ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แสดงอัตราส่วนการคัปปลิงที่ระยะคัปปลิงต่างๆ

จากความเข้มแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของกลุ่มควบที่แสดงในตารางที่ 6.6 สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของกลุ่มควบได้จากสมการที่ 3.34 ถึง 3.37 แสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากการคำนวณของกลุ่มควบ C1 ถึง C5

กลุ่มควบ	อัตราส่วนการ คัปปลิง	ค่าความสูญเสีย แบบเอ็กเซส (dB)	ค่าความสูญเสีย แบบอินเลิซัน (dB)		ค่าไคเร็กติวิตี (dB)
			พอร์ต A ไป C	พอร์ต A ไป D	
C1	0.21	7.04	13.91	8.06	32.24
C2	0.06	7.14	19.53	7.41	33.00
C3	0.53	5.45	8.22	8.76	29.41
C4	0.12	6.17	15.41	6.74	31.12
C5	0.17	6.22	14.01	7.02	30.57

จากผลการคำนวณในตารางที่ 6.7 แสดงให้เห็นว่า กลุ่มควบที่สร้างขึ้นให้อัตราส่วนการคัปปลิงอยู่ในช่วง 0.06 – 0.53 มีค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซสอยู่ในช่วง 5.45 – 7.14 dB ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูงสำหรับการใช้งาน สำหรับค่าความสูญเสียแบบอินเลิซันระหว่างเอาต์พุตทั้งสองมีค่าอยู่ในช่วง 6.74 – 19.53 dB โดยที่ค่าความสูญเสียแบบอินเลิซันระหว่างเอาต์พุตทั้งสองพอร์ตมีทั้งแบบเท่าๆกันที่ความยาวระยะคัปปลิง 12.38 มิลลิเมตรและแตกต่างกันที่ความยาวระยะคัปปลิงอื่นที่ทดลอง สำหรับค่าไคเร็กติวิตีมีค่าสูงในระดับ 29.41 – 33.00 dB ซึ่งแสดงว่ามีความเข้มแสงสะท้อนกับมารบกวนที่พอร์ตอินพุตต่ำ

#### 6.4 ผลการศึกษาผลของการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างเส้นใยนำแสงของกลุ่มควบ

ในการทดลองที่ 6.3 ที่รอยต่อการคัปปลิงระหว่างเส้นใยนำแสงของกลุ่มควบได้ใช้อากาศซึ่งมีค่าดัชนีหักเห 1.00 เป็นตัวกลางใช้การเชื่อมต่อซึ่งจากผลการทดลองที่ 6.3 ได้แสดงให้เห็นว่ากลุ่มควบดังกล่าวให้ผลการคัปปลิงในระดับที่น่าพึงพอใจในระดับหนึ่ง แต่ยังมีค่าความสูญเสียสัญญาณแสงค่อนข้างสูง จากการศึกษาในหัวข้อที่ 2.2.4.1 ทำให้ทราบว่าสามารถลดการสะท้อนที่รอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิดได้เมื่อค่าดัชนีหักเหของสองตัวกลางมีค่าเข้าใกล้กัน สำหรับในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนตัวกลางที่รอยต่อการคัปปลิงเป็นอากาศ น้ำ และ กลิเซอริน ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหเป็น 1.33 และ 1.47 ตามลำดับ ผลความเข้มแสงที่พอร์ตต่างๆ สามารถแสดงได้ดังในตารางที่ 6.6 6.8 และ 6.9 ตามลำดับ

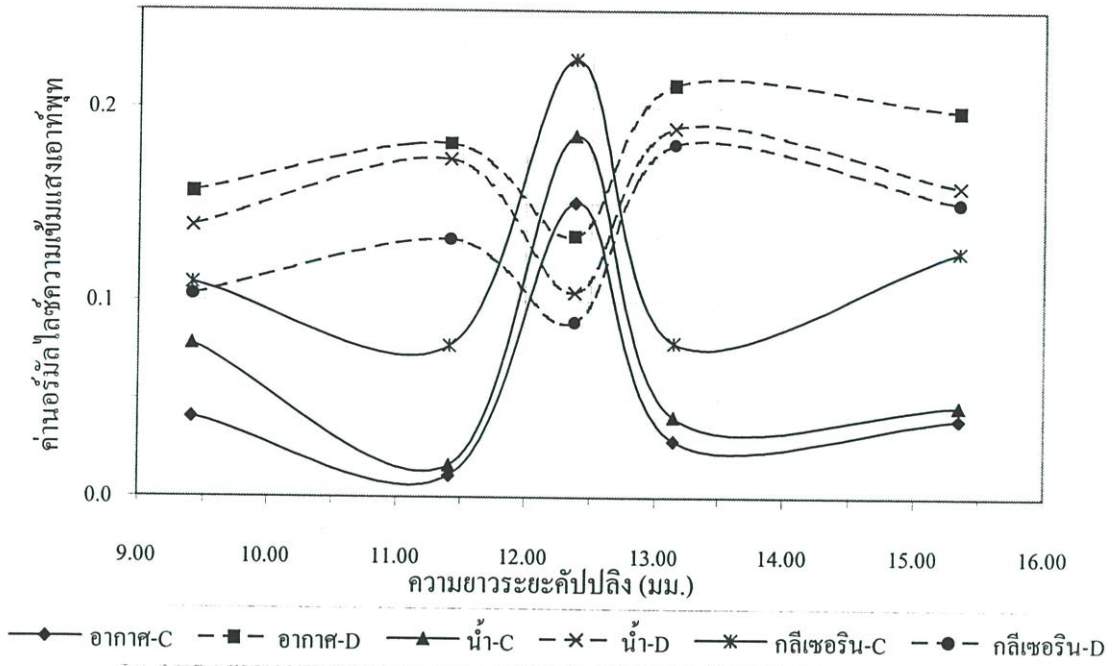
ตารางที่ 6.8 แสดงผลการวัดค่าความเข้มแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของกลุ่มควมเมื่อใช้ตัวเชื่อม  
ต่อเป็นน้ำมีค่าดัชนีหักเห 1.33

กลุ่มควม	ความเข้มแสงที่พอร์ตอินพุต (โวลต์)	ความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุต (มิลลิโวลต์)		
		พอร์ต B	พอร์ต C	พอร์ต D
C1	10.29	5.38	804.50	1426.00
C2	10.29	4.92	168.30	1784.00
C3	10.29	16.20	1908.00	1073.00
C4	10.29	8.00	423.20	1952.00
C5	10.29	5.18	479.70	1640.00

ตารางที่ 6.9 แสดงผลการวัดค่าความเข้มแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของกลุ่มควมเมื่อใช้ตัวเชื่อม  
ต่อเป็นกิลีเซอรินมีค่าดัชนีหักเห 1.47

กลุ่มควม	ความเข้มแสงที่พอร์ตอินพุต (โวลต์)	ความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุต (มิลลิโวลต์)		
		พอร์ต B	พอร์ต C	พอร์ต D
C1	10.29	5.08	1124.00	1062.00
C2	10.29	6.12	796.50	1354.00
C3	10.29	15.40	2316.00	918.20
C4	10.29	7.91	811.20	1863.00
C5	10.29	9.07	1291.00	1552.00

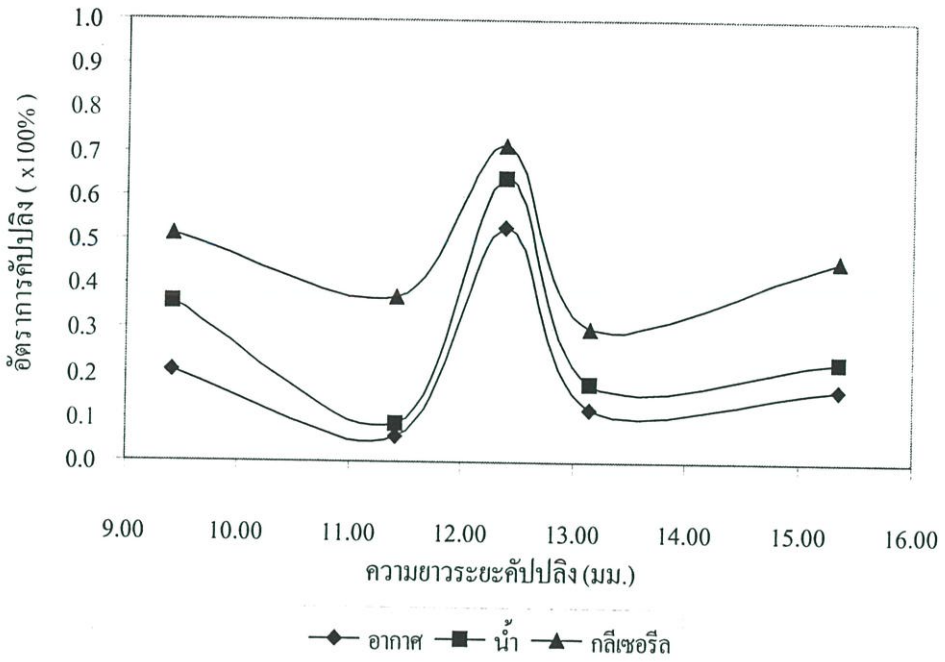
จากตารางที่ 6.6 6.8 และ 6.9 เมื่อนอร์มัลไรซ์ค่าความเข้มแสงเอาต์พุตของกลุ่มควมที่ค่าดัชนีหักเหที่รอยต่อคัปปลิงต่างๆและแสดงผลเทียบกับความยาวระยะคัปปลิงได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แสดงค่าออร์มัลไรซ์ความเข้มแสงเอาต์พุตเมื่อเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลางเป็นอากาศ น้ำ และกลีเซอริน

จากรูปที่ 6.4 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อทำการเปลี่ยนตัวกลางที่รอยต่อคัปปลิงของกลุ่มควบเป็นอากาศ น้ำ และกลีเซอริน ตามลำดับพบว่า ความเข้มแสงระหว่างพอร์ตเอาต์พุตทั้งสองของกลุ่มควบมีการสลับกันไปมาสอดคล้องกับสมการที่ 5.2 และ 5.3 เช่นเดิมแต่มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่ความยาวระยะคัปปลิงเดิม สังเกตว่าที่ความยาวระยะคัปปลิงเท่ากับ 12.38 มิลลิเมตร ความเข้มแสงที่เอาต์พุตพอร์ต C และ D จะสลับจากพอร์ต D ไปยังพอร์ต C เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.6 6.8 และ 6.9 สามารถคำนวณหาอัตราส่วนการคัปปลิงของกลุ่มควบได้ตามสมการที่ 3.37 และแสดงเปรียบเทียบอัตราการคัปปลิงที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวระยะคัปปลิงได้ดังรูปที่ 6.5 นอกจากนี้ยังสามารถแสดงผลการเพิ่มขึ้นของอัตราการคัปปลิงกรณีที่ใช้ น้ำ และกลีเซอรินเป็นตัวกลาง โดยใช้อัตราการคัปปลิงกรณีที่ใช้อากาศเป็นฐานการเปรียบเทียบได้ดังแสดงในตารางที่ 6.10



รูปที่ 6.5 แสดงแผนภูมิแสดงอัตราส่วนการค้ำปลิงที่ค่าต่างๆเมื่อเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง

ตารางที่ 6.10 แสดงผลเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของอัตราการค้ำปลิงเมื่อเปลี่ยนค่าดัชนีหักเห

คู่ควบ	อัตราการค้ำปลิงกรณีใช้ ( x100% )			อัตราการเพิ่มขึ้น (เท่า)		
	อากาศ	น้ำ	กลีเซอริน	อากาศ	น้ำ	กลีเซอริน
C1	0.21	0.36	0.51	1.00	1.71	2.43
C2	0.06	0.09	0.37	1.00	1.50	6.17
C3	0.53	0.64	0.72	1.00	1.21	1.36
C4	0.12	0.18	0.30	1.00	1.5	2.5
C5	0.17	0.23	0.45	1.00	1.35	2.65

พบว่าเมื่อตัวกลางที่รอยต่อค้ำปลิงของกลุ่มเป็นน้ำมีอัตราส่วนการค้ำปลิงเพิ่มขึ้นและมีค่าในช่วง 1.21 – 1.71 เท่าของอากาศ และเมื่อใช้ตัวกลางเป็นกลีเซอรินอัตราการเพิ่มของกลุ่มจะมีค่าเพิ่มสูงถึง 1.36 – 6.17 เท่าของอากาศ โดยอัตราการเพิ่มมีค่าสูงสุด 6.17 เท่าที่ความยาวระยะค้ำปลิงเท่ากับ 11.41 มิลลิเมตร จากตารางที่ 6.8 และ 6.9 สามารถที่จะคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของกลุ่มเพื่อการพิจารณาคุณสมบัติของกลุ่มได้จากสมการที่ 3.34 – 3.37 แสดงได้ดังตารางที่ 6.11 และ 6.12

ตารางที่ 6.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลุ่มควมเมื่อตัวกลางเป็นน้ำมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.33

คู่ควม	อัตราส่วนการค้ำปลิง	ค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซส (dB)	ค่าความสูญเสียแบบอินเลิซชัน (dB)		ค่าไคเร็กติวิตี (dB)
			พอร์ต A ไป C	พอร์ต A ไป D	
C1	0.36	6.63	11.07	8.58	32.82
C2	0.09	7.21	17.86	7.61	33.20
C3	0.64	5.36	7.32	9.82	28.03
C4	0.18	6.35	13.86	7.22	31.09
C5	0.23	6.85	13.31	7.98	32.98

ตารางที่ 6.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลุ่มควมเมื่อตัวกลางเป็นกลีเซอรินมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.47

คู่ควม	อัตราส่วนการค้ำปลิง	ค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซส (dB)	ค่าความสูญเสียแบบอินเลิซชัน (dB)		ค่าไคเร็กติวิตี (dB)
			พอร์ต A ไป C	พอร์ต A ไป D	
C1	0.51	6.72	9.62	9.86	33.07
C2	0.37	6.79	11.11	8.81	32.26
C3	0.72	5.01	6.48	10.49	28.25
C4	0.30	5.84	11.03	7.42	31.14
C5	0.45	5.57	9.01	8.22	30.55

จากผลการคำนวณในตารางที่ 6.7 6.11 และ 6.12 พบว่าค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซสของกลุ่มควมในกรณีใช้ตัวกลางรอยต่อค้ำปลิงเป็น อากาศ น้ำ และกลีเซอริน มีค่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน นั่นคือ กรณีของอากาศ 5.45 – 7.14 dB กรณีของน้ำ 5.36 – 7.21 dB และกรณีของกลีเซอริน 5.01 – 6.79 dB แต่สำหรับค่าความสูญเสียแบบอินเลิซชัน พบว่ากรณีที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางรอยต่อค้ำปลิงค่าความสูญเสียมีค่าอยู่ในช่วง 7.22 – 17.86 dB และไม่มีสองเอาท์พุทใดๆของกลุ่มควมที่มีค่าความสูญเสียใกล้เคียงกัน กรณีที่ใสกลีเซอรินเป็นตัวกลางรอยต่อค้ำปลิงค่าความสูญเสียอยู่ในช่วง 6.48 – 11.12 dB และมีสองความยาวระยะค้ำปลิงคือ C1 ที่ 9.41 มิลลิเมตรและ C2 ที่ 15.35 ที่มีค่าเอาท์พุททั้งสองพอร์ตของกลุ่มควมมีค่าความสูญเสียใกล้เคียงกัน นั่นคือค่าความสูญเสีย 9.62 dB กับ 9.86 dB ของคู่ควม C1 และค่าความสูญเสีย 9.01 dB กับ 8.22 dB ของคู่ควม C2 นอกจากนี้พบว่า เมื่อเปลี่ยนตัวกลางรอยต่อค้ำปลิงเป็นอากาศ น้ำ และกลีเซอริน พบว่าค่าความสูญเสียแบบอินเลิซชันสูงสุดจะมีค่าลดลง สำหรับค่าไคเร็กติวิตีของทั้ง 3 กรณีมีค่าไคเร็กติวิตีอยู่ในระดับเท่าๆกันคือ กรณีของ

อากาศมีค่า 29.41 – 33.00 dB กระจกของน้ำมีค่า 28.03 – 33.20 dB และกระจกของกิลีเซอร์มีค่า 28.25 – 33.07 dB

## 6.5 ผลการศึกษาผลการตอบสนองของอัตรการคับปลิงต่อแหล่งกำเนิดแสงที่

### ความยาวคลื่นย่านใกล้อินฟราเรด

การทดลองนี้เป็นผลการศึกษาการตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดความยาวคลื่นย่านใกล้อินฟราเรดโดยทดลองใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 632.8 670 785 และ 850 นาโนเมตร และทำการทดลองตามหัวข้อ 5.6 ซึ่งผลความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุตแสดงในตารางที่ 6.13- 6.17

ตารางที่ 6.13 แสดงผลการวัดค่าความเข้มแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของกลุ่มควบ C1 ที่มีความยาวระยะคับปลิง 9.41 มิลลิเมตร

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มแสงที่ พอร์ตอินพุต (โวลต์)	ความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุต (มิลลิโวลต์)		
		พอร์ต B	พอร์ต C	พอร์ต D
632.8	10.90	23.80	2836.00	2892.00
670	10.29	5.08	1124.00	1062.00
785	6.02	8.62	1194.00	1354.00
850	1.18	3.26	54.20	154.20

ตารางที่ 6.14 แสดงผลการวัดค่าความเข้มแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของกลุ่มควบ C2 ที่มีความยาวระยะคับปลิง 11.41 มิลลิเมตร

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มแสงที่ พอร์ตอินพุต (โวลต์)	ความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุต (มิลลิโวลต์)		
		พอร์ต B	พอร์ต C	พอร์ต D
632.8	10.90	21.20	1260.00	4412.00
670	10.29	6.12	796.50	1354.00
785	6.02	7.36	622.40	1782.00
850	1.18	3.48	30.60	184.80

ตารางที่ 6.15 แสดงผลการวัดค่าความเข้มแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของกลุ่มควบ C3 ที่มีความยาวระยะคัปปลิง 12.38 มิลลิเมตร

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มแสงที่ พอร์ตอินพุต (วัตต์)	ความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุต (มิลลิวัตต์)		
		พอร์ต B	พอร์ต C	พอร์ต D
632.8	10.90	40.42	6020.00	2668.00
670	10.29	15.40	2316.00	918.20
785	6.02	17.75	2848.00	1054.00
850	1.18	7.11	124.60	179.40

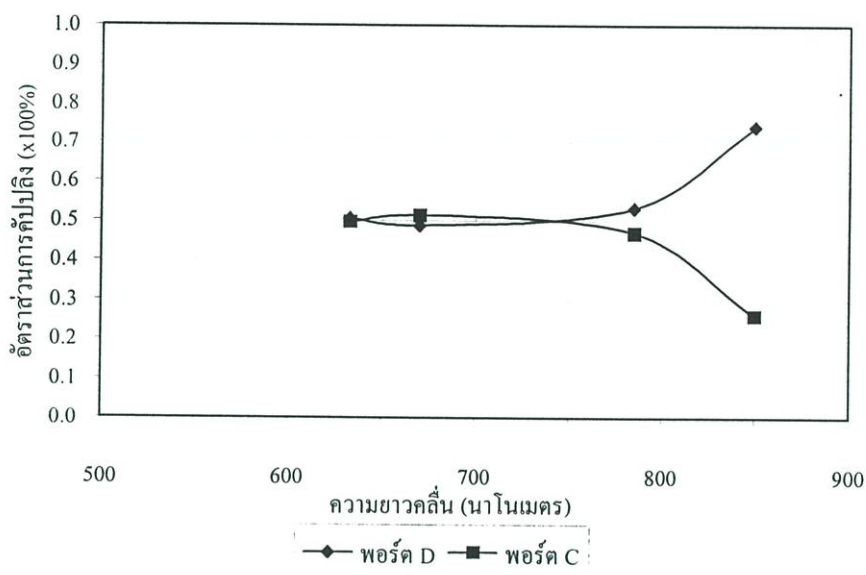
ตารางที่ 6.16 แสดงผลการวัดค่าความเข้มแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของกลุ่มควบ C4 ที่มีความยาวระยะคัปปลิง 13.15 มิลลิเมตร

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มแสงที่ พอร์ตอินพุต (วัตต์)	ความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุต (มิลลิวัตต์)		
		พอร์ต B	พอร์ต C	พอร์ต D
632.8	10.90	33.70	2781.00	5014.00
670	10.29	7.91	811.20	1863.00
785	6.02	13.25	1702.00	1940.00
850	1.18	5.22	72.20	224.20

ตารางที่ 6.17 แสดงผลการวัดค่าความเข้มแสงที่พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตของกลุ่มควบ C5 ที่มีความยาวระยะคัปปลิง 15.35 มิลลิเมตร

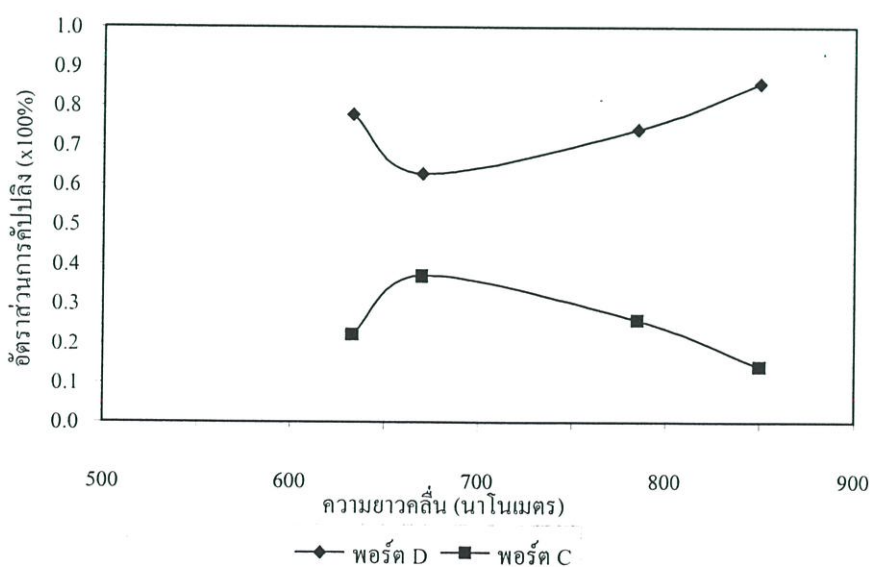
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความเข้มแสงที่ พอร์ตอินพุต (วัตต์)	ความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุต (มิลลิวัตต์)		
		พอร์ต B	พอร์ต C	พอร์ต D
632.8	10.90	29.46	3838.00	4320.00
670	10.29	9.07	1291.00	1552.00
785	6.02	10.45	2065.00	1678.00
850	1.18	6.08	102.40	206.80

จากผลความเข้มแสงในตารางที่ 6.13-6.17 สามารถคำนวณอัตราส่วนการคัปปลิงของคู่ควบ C1 ถึง C5 ได้จากสมการที่ 3.37 และแสดงได้ในรูปที่ 6.6 – 6.10



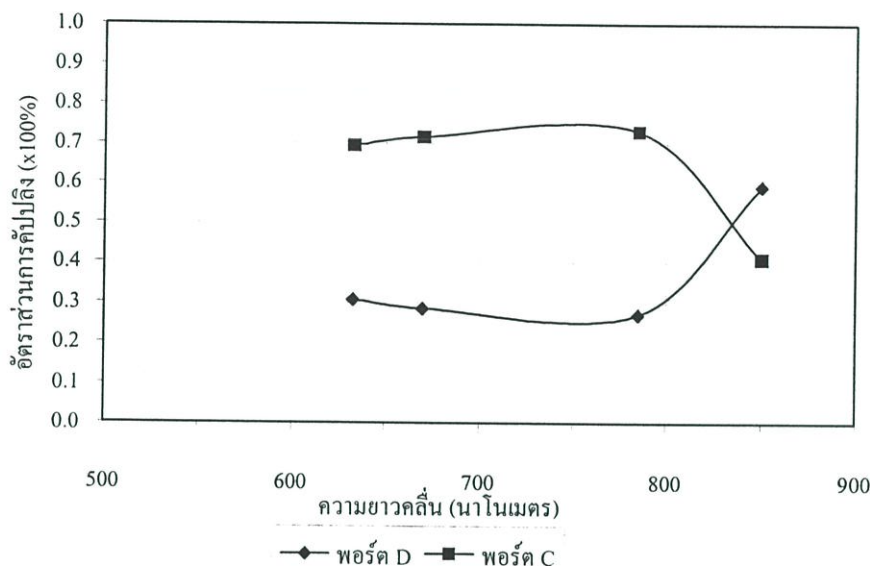
รูปที่ 6.6 แสดงอัตราการคัปปลิงที่ความยาวคลื่นต่างๆของคู่ควบ C1

จากรูปที่ 6.6 พบว่าคู่ควบมีอัตราการคัปปลิงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรมีค่าเท่ากับ 0.51 หรือ 51 เปอร์เซ็นต์และมีอัตราการคัปปลิงต่ำสุดที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตรมีค่าเท่ากับ 0.26 หรือ 26 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความยาวระยะคัปปลิงเท่ากับ 9.41 มิลลิเมตรอัตราการคัปปลิงของคู่ควบมีค่าประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ทั้งที่ความยาวคลื่น 632.8 670 และ 785 นาโนเมตร



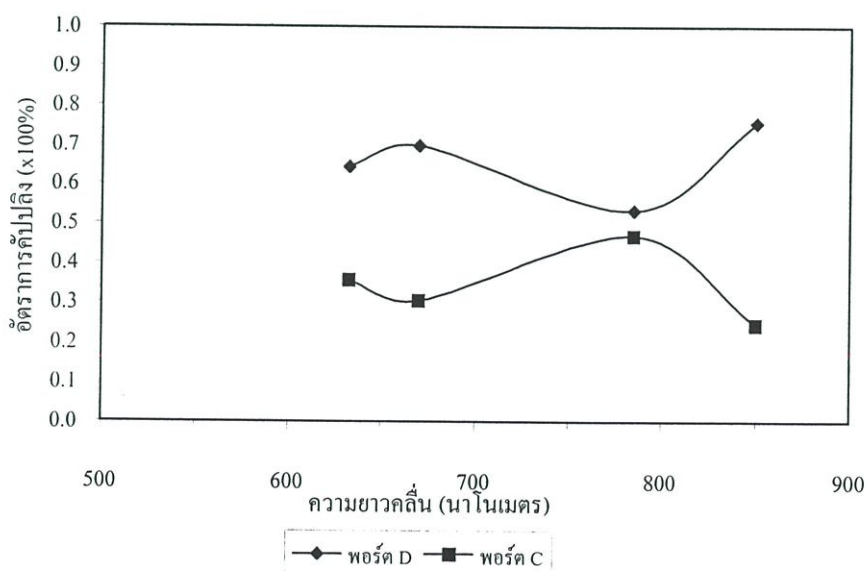
รูปที่ 6.7 แสดงอัตราการคัปปลิงที่ความยาวคลื่นต่างๆของคู่ควบ C2

จากรูปที่ 6.7 พบว่าอัตราการคัปปลิงของกลุ่มควม C2 ที่มีความยาวระยะคัปปลิงเท่ากับ 11.41 มิลลิเมตรมีอัตราการคัปปลิงสูงสุดเมื่อป้อนด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรเท่ากับ 0.37 หรือ 37 เปอร์เซ็นต์และต่ำสุดที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตรเท่ากับ 0.14 หรือ 14 เปอร์เซ็นต์



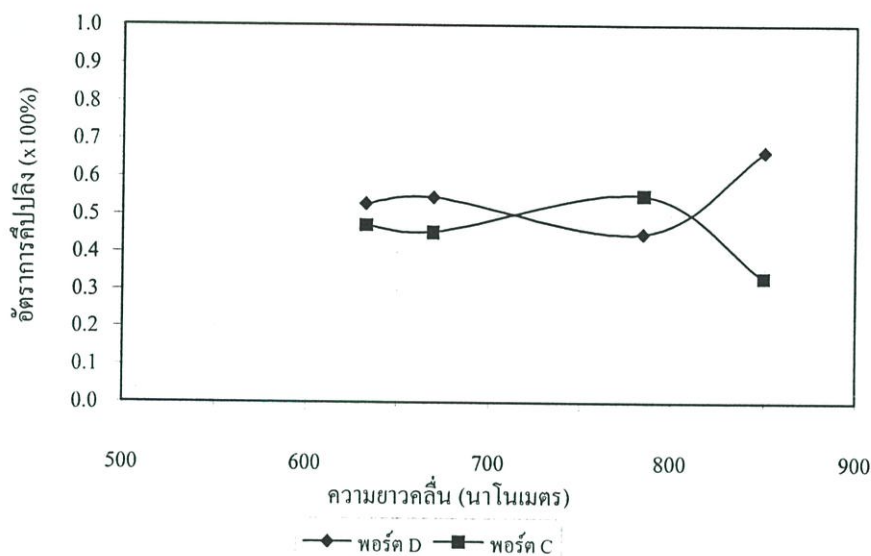
รูปที่ 6.8 แสดงอัตราการคัปปลิงที่ความยาวคลื่นต่างๆของกลุ่มควม C3

จากรูปที่ 6.8 พบว่าที่ความยาวระยะคัปปลิง 12.38 มิลลิเมตร อัตราการคัปปลิงของกลุ่มควมมีค่าค่อนข้างสูงเท่ากับ 0.41 – 0.73 ตลอดช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลองโดยมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น 785 นาโนเมตรเท่ากับ 0.73 หรือ 73 เปอร์เซ็นต์และมีค่าต่ำสุดที่ความยาวคลื่น 850 เท่ากับ 0.41 หรือ 41 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6.9 แสดงอัตราการคัปปลิงที่ความยาวคลื่นต่างๆของกลุ่มควม C4

จากรูปที่ 6.9 พบว่า คู่ควบ C4 ที่มีความยาวระยะคัปปลิงเท่ากับ 13.15 มิลลิเมตรมีอัตราการคัปปลิงสูงสุดเท่า 0.47 หรือ 47 เปอร์เซ็นต์เมื่อป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร และมีอัตราการคัปปลิงต่ำสุดเมื่อป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 850 นาโนเมตรเท่ากับ 0.24 หรือ 24 เปอร์เซ็นต์



### รูปที่ 6.10 แสดงอัตราการคัปปลิงที่ความยาวคลื่นต่างๆของคู่ควบ C5

จากรูปที่ 6.10 พบว่า อัตราการคัปปลิงของคู่ควบ C5 มีอัตราการคัปปลิงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 632.8 670 และ 785 นาโนเมตร นั่นคือมีค่าเท่ากับ 0.47 - 0.55 หรือ 47 - 55 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร อัตราการคัปปลิงต่ำสุดเท่ากับ 0.33 หรือ 33 เปอร์เซ็นต์ที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร

จากรูปที่ 6.6 - 6.10 พบว่าอัตราการคัปปลิงของคู่ควบจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อป้อนคู่ควบด้วยแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆกัน ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 5.8 นั่นคือการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นจะเป็นผลให้ค่าคงที่การเคลื่อนที่เปลี่ยนไปซึ่งเป็นผลให้อัตราการคัปปลิงของคู่ควบเปลี่ยนตาม จากข้อมูลค่าความเข้มแสงที่พอร์ตเอาต์พุตของคู่ควบสามารถคำนวณคุณสมบัติประจำตัวของคู่ควบได้จากสมการที่ 3.34 - 3.37 แสดงดังตารางที่ 6.18 - 6.22

ตารางที่ 6.18 แสดงผลการคำนวณคุณสมบัติของกลุ่มควบ C1 โดยป้อนแหล่งกำเนิดแสงที่มี ความยาวคลื่น 632.8 670 785 และ 850 นาโนเมตร

ความยาวคลื่น	อัตราส่วน การ ค้ำปลิง	ค่าความ สูญเสียแบบ เอ็กเซส (dB)	ค่าความสูญเสียแบบ อินเลิซัน (dB)		ค่าไคเร็ก ติวิตี (dB)
			พอร์ต A ไป C	พอร์ต A ไป D	
632.8	0.50	2.78	5.85	5.76	26.61
670	0.51	6.72	9.62	9.86	33.07
785	0.47	3.72	7.03	6.48	28.44
850	0.26	7.45	13.36	8.82	25.57

พบว่าค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซสมีค่าระหว่าง 2.78 – 7.45 dB และค่าความสูญเสียแบบอินเลิซันระหว่างสองพอร์ตเอาต์พุตมีค่าประมาณใกล้เคียงกันเมื่อป้อนกลุ่มควบด้วยแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 632.8 670 และ 785 นาโนเมตร

ตารางที่ 6.19 แสดงผลการคำนวณคุณสมบัติของกลุ่มควบ C2 โดยป้อนแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 632.8 670 785 และ 850 นาโนเมตร

ความยาวคลื่น	อัตราส่วน การ ค้ำปลิง	ค่าความ สูญเสียแบบ เอ็กเซส (dB)	ค่าความสูญเสียแบบ อินเลิซัน (dB)		ค่าไคเร็ก ติวิตี (dB)
			พอร์ต A ไป C	พอร์ต A ไป D	
632.8	0.22	2.82	9.37	3.93	27.11
670	0.37	6.79	11.11	8.81	32.26
785	0.26	3.97	9.86	5.29	29.13
850	0.14	7.30	15.85	8.04	25.29

พบว่าค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซสมีค่าระหว่าง 2.82 – 7.30 dB และไม่มีกรณีที่ค่าความสูญเสียแบบอินเลิซันระหว่างสองพอร์ตเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากัน

ตารางที่ 6.20 แสดงผลการคำนวณคุณสมบัติของคู่ควบ C3 โดยป้อนแหล่งกำเนิดแสงที่มี  
ความยาวคลื่น 632.8 670 785 และ 850 นาโนเมตร

ความยาวคลื่น	อัตราส่วน การ ค้ำปลิง	ค่าความ สูญเสียแบบ เอ็กเซส (dB)	ค่าความสูญเสียแบบ อินเลิซัน (dB)		ค่าไคเร็ก ติวิตี (dB)
			พอร์ต A ไป C	พอร์ต A ไป D	
632.8	0.69	0.96	2.58	6.11	24.31
670	0.72	5.01	6.48	10.49	28.25
785	0.73	1.86	3.25	7.57	25.30
850	0.41	5.77	9.75	8.17	22.19

พบว่าค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซสมีค่าระหว่าง 0.96 – 5.77 dB และไม่มีค่าความสูญเสียแบบอินเลิซันระหว่างสองพอร์ตเอาต์พุตมีเท่ากันเช่นเดียวกับคู่ควบ C2 ที่มีความยาวระยะค้ำปลิงเท่ากับ 11.41 มิลลิเมตร

ตารางที่ 6.21 แสดงผลการคำนวณคุณสมบัติของคู่ควบ C4 โดยป้อนแหล่งกำเนิดแสงที่มี  
ความยาวคลื่น 632.8 670 785 และ 850 นาโนเมตร

ความยาวคลื่น	อัตราส่วน การ ค้ำปลิง	ค่าความ สูญเสียแบบ เอ็กเซส (dB)	ค่าความสูญเสียแบบ อินเลิซัน (dB)		ค่าไคเร็ก ติวิตี (dB)
			พอร์ต A ไป C	พอร์ต A ไป D	
632.8	0.36	1.44	5.93	3.37	25.10
670	0.30	5.84	11.03	7.42	31.14
785	0.47	2.17	5.49	4.92	26.57
850	0.24	5.91	12.12	7.20	23.53

พบว่าค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซสมีค่าระหว่าง 1.44 – 5.91 dB ค่าความสูญเสียแบบอินเลิซันระหว่างสองพอร์ตเอาต์พุตมีใกล้เคียงกันเมื่อป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 785 นาโนเมตรเท่านั้น

ตารางที่ 6.22 แสดงผลการคำนวณคุณสมบัติของกลุ่มควบ C5 โดยป้อนแหล่งกำเนิดแสงที่มี ความยาวคลื่น 632.8 670 785 และ 850 นาโนเมตร

ความยาวคลื่น	อัตราส่วน การ ค้ำปลิง	ค่าความ สูญเสียแบบ เอ็กเซส (dB)	ค่าความสูญเสียแบบ อินลิชชัน (dB)		ค่าไคเร็ก ติวตี้ (dB)
			พอร์ต A ไป C	พอร์ต A ไป D	
632.8	0.47	1.24	4.53	4.02	25.68
670	0.45	5.57	9.01	8.22	30.55
785	0.55	2.05	4.65	5.55	27.60
850	0.33	5.72	10.60	7.55	22.87

พบว่าค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซสมีค่าระหว่าง 1.24 – 5.72 dB สำหรับค่าความสูญเสียแบบอินลิชชันระหว่างสองพอร์ตเอาต์พุตนั้นในกรณีนี้มี 3 แหล่งกำเนิดแสงที่ให้ค่าความสูญเสียแบบอินลิชชันใกล้เคียงกันนั่นคือแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 632.8 670 และ 785 นาโนเมตร

จากตารางที่ 6.18 – 6.22 พบว่า ความสูญเสียแบบเอ็กเซสของกลุ่มควบทั้ง 5 เมื่อป้อนด้วย แหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 632.8 670 785 และ 850 นาโนเมตรอยู่ในระดับที่ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อพิจารณาแยกตามชนิดแหล่งกำเนิดแสงนั้นคือ

เมื่อป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรมีค่าระหว่าง 0.96–2.82 dB

เมื่อป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรมีค่าระหว่าง 5.01-6.79 dB

เมื่อป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 785 นาโนเมตรมีค่าระหว่าง 1.86-3.97 dB

เมื่อป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 850 นาโนเมตรมีค่าระหว่าง 5.72-7.45dB

ซึ่งจะเห็นว่าค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซสในแต่ละความยาวคลื่นจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สำหรับกรณีของความสูญเสียแบบอินลิชชันจะพบว่าความแตกต่างระหว่างค่าความสูญเสียของสองพอร์ตเอาต์พุตในแต่ละความยาวคลื่นจะมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจนเช่นกรณีป้อนด้วยแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตรค่าความสูญเสียแบบอินลิชชันระหว่างสองพอร์ตเอาต์พุตของ C1 แตกต่างกัน 0.09 dB ในขณะที่ค่าความสูญเสียแบบอินลิชชันระหว่างสองพอร์ตเอาต์พุตของ C2 ต่างกันถึง 5.44 dB ซึ่งนั่นเป็นผลจากที่ค่าความสูญเสียแบบอินลิชชันจะเปลี่ยนแปลงไปกับอัตราการค้ำปลิงของกลุ่มควบนั่นเอง

กรณีที่ความสูญเสียแบบอินลิชชันระหว่างสองพอร์ตเอาต์พุตใดๆของกลุ่มควบมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากันแสดงว่ากลุ่มควบนั่นมีโอกาสที่จะสร้างเป็นกลุ่มควบแบบ 3dB ได้เมื่อสามารถสร้างกลุ่มควบนั่นให้มีค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซสอยู่ในระดับ 0.XX dB

## 6.6 สรุปผลการทดลอง

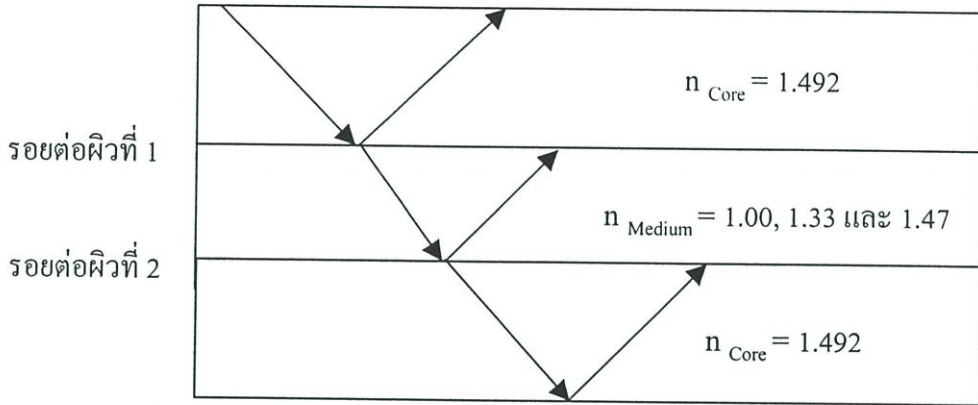
ผลการศึกษาตามวิธีการทดลองในบทที่ 5 สรุปได้ว่า เมื่อป้อนแสงที่มีความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรแก่เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก ความเข้มแสงที่ป้อนให้มีการลดทอนลงตามระยะทางที่แสงเดินทาง โดยมีสัมประสิทธิ์การลดทอนเฉลี่ย  $0.26 \text{ dB / m}$  และจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสามารถสร้างเป็นสมการทั่วไปสำหรับหาค่าความเข้มแสงที่ความยาวระยะต่างๆ ได้

ในการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสร้างคู่วิว โดยวิธีบิตเกลียวกับวิธีขัดพบว่าเมื่อเปรียบเทียบจากผลความเข้มแสงที่ได้รับจากเอาท์พุทและความยากง่ายในการสร้าง การสร้างคู่วิวโดยวิธีการขัดสามารถเป็นวิธีการที่สามารถควบคุมข้อผิดพลาดจากการสร้างได้ง่ายกว่าและสามารถกำหนดวิธีการผลิตให้เป็นมาตรฐานเดียวกันทุกครั้งได้

ในการศึกษาคุณลักษณะการคัปปลิงของคู่วิวพบว่าคู่วิวที่สร้างขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงระหว่างเส้นใยนำแสงทั้งสองของคู่วิวมีลักษณะเป็นฟังก์ชันไซน์ล ไซคอลลกับความยาวระยะคัปปลิง ซึ่งในการทดลองเมื่อมีอากาศเป็นตัวกลางระหว่างคู่วิวอัตราการคัปปลิงมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.53 ที่ความยาวระยะคัปปลิงเท่ากับ 12.38 มิลลิเมตร

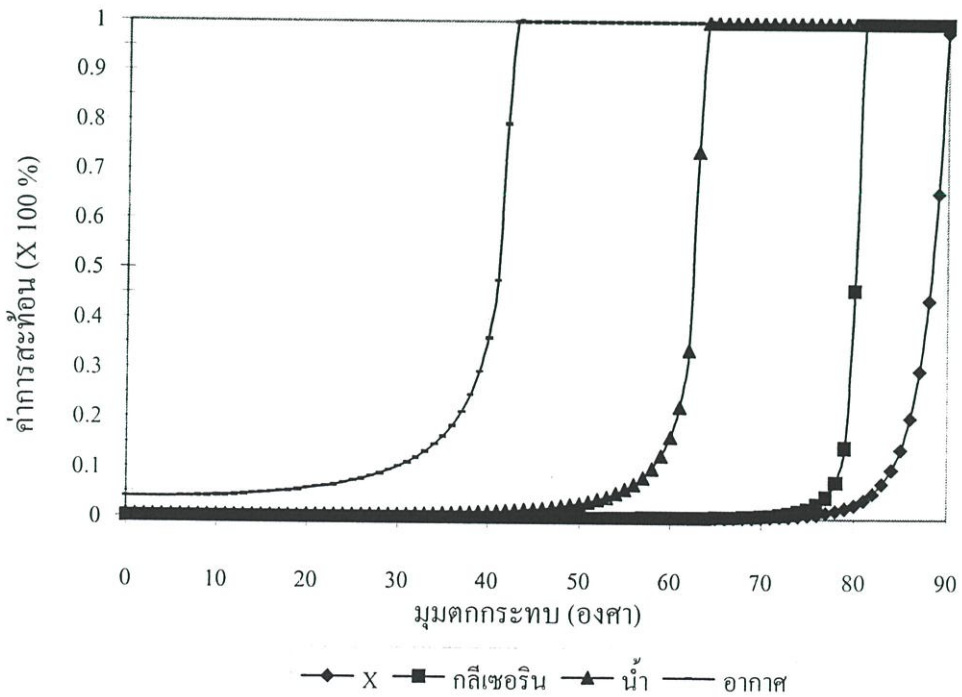
การศึกษารูปการเปลี่ยนตัวกลางเชื่อมต่อรอยต่อของเส้นใยนำแสงให้มีค่าดัชนีหักเหแสง 1.00 1.33 และ 1.47 ของอากาศ น้ำ และกลีเซอรินตามลำดับ พบว่าเมื่อค่าดัชนีหักเหแสงมีค่าเข้าใกล้ 1.492 ของค่าดัชนีหักเหของคอร์ อัตราการคัปปลิงของแสงจะเพิ่มขึ้นซึ่งการเพิ่มขึ้นของอัตราการคัปปลิงได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยนำแสงของคู่วิวดังแสดงในรูปที่ 6.11 และพิจารณาโดยใช้สมการที่ 2.21 และสมการที่ 2.22 สามารถอธิบายสาเหตุการเพิ่มขึ้นของอัตราการคัปปลิงของคู่วิวเมื่อค่าดัชนีหักเหของตัวกลางเชื่อมต่อเข้าใกล้ค่าดัชนีหักเหของคอร์ได้ว่า จากการทดลองเมื่อพิจารณาที่รอยต่อผิวที่ 1 (รอยต่อของคอร์กับตัวกลางในการเชื่อมต่อ) แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห 1.492 ของคอร์ไปยังตัวกลางในการเชื่อมต่อที่มีค่าดัชนีหักเหเป็น 1.00 เมื่อใช้อากาศ, 1.33 เมื่อใช้น้ำ และ 1.47 เมื่อใช้กลีเซอริน ตามลำดับ พบว่าค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 ที่แสงเดินทางมามีค่ามากกว่าค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 2 ดังนั้นการสะท้อนที่รอยต่อผิวที่ 1 เป็นการสะท้อนแบบภายในและมีค่ามุมวิกฤตเท่ากับ 42.09 องศา เมื่อใช้อากาศ, 63.05 องศา เมื่อใช้น้ำ, และ 80.15 องศา เมื่อใช้กลีเซอรินเป็นตัวกลาง ถ้าแสงที่ตกกระทบรอยต่อผิวที่ 1 ด้วยมุมใดๆ พบว่า เมื่อเปลี่ยนตัวกลางที่ใช้เชื่อมต่อเป็น อากาศ น้ำ และกลีเซอริน ตามลำดับ แสงที่ตกกระทบรอยต่อด้วยมุมเดียวกันนั้นจะมีค่าการสะท้อนที่รอยต่อลดลงทำให้แสงสามารถทะลุผ่านไปยังคอร์ที่พอร์ตเอาท์พุทได้เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6.12 นอกจากนี้ถ้ามุมตกกระทบมีค่ามากกว่ามุมวิกฤตแสงจะสะท้อนกลับหมด เป็นต้นว่าเมื่อมุมตกกระทบมีค่ามากกว่า 42.09 องศา แสงจะสะท้อนกลับหมดเมื่อใช้ตัวกลางในการเชื่อมต่อเป็นอากาศ แต่แสงยังคงเดินทางต่อไปในตัวกลางต่อไปเมื่อใช้ตัวกลางในการเชื่อมต่อเป็น น้ำ หรือกลีเซอริน นั่นคือ

เมื่อตัวกลางเชื่อมต้อมีค่าดัชนีหักเหเข้าใกล้ค่าดัชนีหักเหคอร์แสงมีโอกาสทะลุผ่านไปยังตัวกลางต่อไปเพิ่มขึ้น

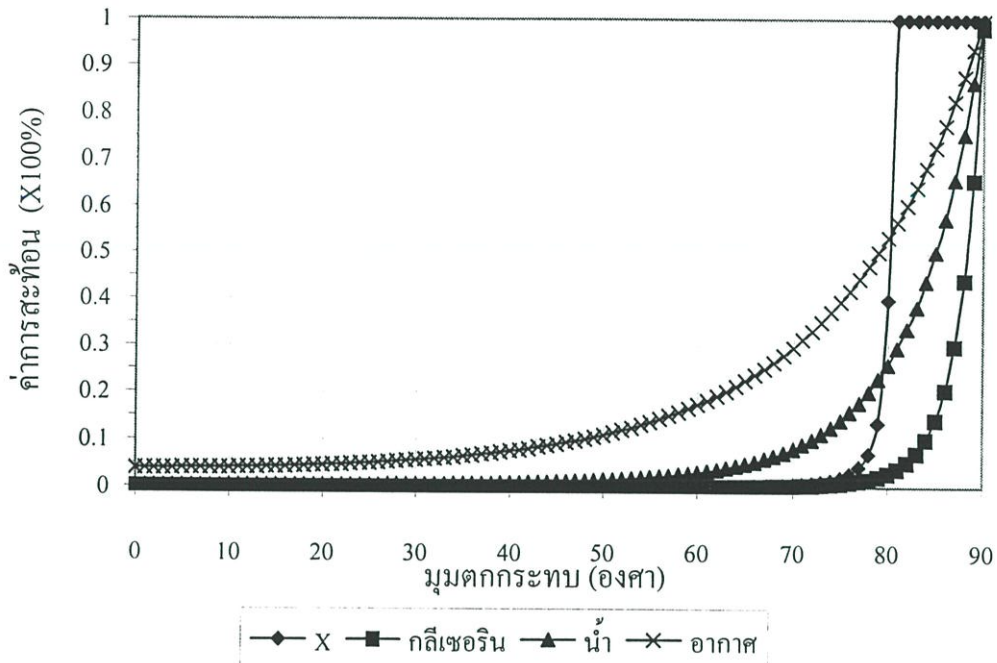


รูปที่ 6.11 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่รอยต่อของเส้นใยนำแสงของกลุ่มควม

พิจารณาที่รอยต่อที่ 2 แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหน้อยกว่าไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่า การสะท้อนที่รอยต่อผิวที่ 2 จะเป็นการสะท้อนแบบภายนอกซึ่งในกรณีนี้จะไม่เกิดปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมด แสงส่วนหนึ่งจะสะท้อนที่ผิวรอยต่อและเดินทางไปในตัวกลางเชื่อมต่อ และแสงส่วนที่เหลือจะทะลุผ่านไปยังคอร์ของพอร์ตเอาต์พุตต่อไป ค่าการสะท้อนของรอยต่อที่ 1 และ 2 ที่มุมตกกระทบต่างๆแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 6.12 และ 6.13 ตามลำดับ



รูปที่ 6.12 แสดงค่าการสะท้อนของแสงที่รอยต่อผิวที่ 1 ที่มุมตกกระทบต่างๆ เมื่อแสงเดินทางจากคอร์ของพอร์ตอินพุตไปยังตัวกลางในการเชื่อมต่อของกลุ่มควม



รูปที่ 6.13 แสดงค่าการสะท้อนของแสงที่รอยต่อผิวที่ 2 ที่มุมตกกระทบต่างๆ เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางในการเชื่อมต่อของ คู่ควบ ไปยังคอร์ของพอร์ตอินพุต

ในกรณีที่ตัวกลางที่ใช้ในการเชื่อมต่อมีค่าดัชนีหักเหมากกว่าค่าดัชนีหักเหของคอร์ปรากฏการณ์การสะท้อนที่ผิวรอยต่อทั้งสองจะเกิดขึ้นสลับกัน เช่นในกรณีใช้ตัวกลาง X ที่มีค่าดัชนีหักเห 1.1514 พบว่าที่รอยต่อผิวที่ 1 แสงจะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนแบบภายนอก และที่รอยต่อผิวที่ 2 แสงเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนแบบภายในที่มีมุมวิกฤตเท่ากับ 80.15 องศา

สำหรับการทดลองผลตอบสนองของอัตราการคับปลิงต่อความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดพบว่า เมื่อป้อนแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆอัตราส่วนการคับปลิงของคู่ควบมีค่าเปลี่ยนแปลงต่างกันไปตามเงื่อนไขการเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงและความยาวระยะคับปลิงซึ่งผลการศึกษาในหัวข้อนี้จากผลการทดลองนี้ทำให้สามารถเลือกสร้างคู่ควบให้มีอัตราการคับปลิงต่างๆกันเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ นอกจากนี้จากผลการศึกษาเรื่องดัชนีหักเหของแสงและแหล่งกำเนิดคลื่นสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการสร้างเป็นอุปกรณ์สวิตช์และฟิลเตอร์สำหรับการสื่อสารได้

## บทที่ 7

# บทสรุปและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

### 7.1 บทสรุป

การดำเนินชีวิตประจำวันของเราจะเกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ทางด้านแสงและวิชาประยุกต์ทางด้านแสงเพิ่มมากขึ้น ทุกๆวินาทีที่ผ่านไปนักวิทยาศาสตร์ วิศวกร และนักพัฒนาเทคโนโลยีที่อยู่ตามห้องทดลองต่าง ๆ ทั่วทุกมุมโลกกำลังวิจัย ทดลอง ปรับปรุงพัฒนาวิทยาการความรู้เพื่อนำพามนุษย์เราเดินไปสู่ระดับของความรู้ที่สูงขึ้นเรื่อย ความรู้เกี่ยวกับเส้นใยนำแก้วได้กำเนิดขึ้นในช่วงประมาณ 30 ปีที่ผ่านมาแต่ทุกวันนี้เครือข่ายเส้นใยนำแสงได้ถูกผ่านได้มหาสมุทรเชื่อมทวีปต่าง ๆ ทั่วโลกเรียบร้อยแล้วและยังมีการวางเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อเป็นการเพิ่มพูนความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเส้นใยนำแสงและอุปกรณ์แสงสำหรับประเทศของเราวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอเสนอตัวเป็นเป็นเพียงเล็ก ๆ ที่จะช่วยผลักดันวงการวิทยาศาสตร์ งานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการสร้างคูควบเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกและได้ศึกษาคุณลักษณะการคัปปลิงของคูควบโดยใช้ทฤษฎีโหมดคัปปลิงซึ่งเป็นพื้นฐานความรู้สำหรับอุปกรณ์แยกแสงที่ใช้ในเครือข่ายแสง

ปัจจัยที่เป็นผลต่อการศึกษาทฤษฎีโหมดคัปปลิงเพื่อนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสงได้เป็นผลสำเร็จคือ

1. การเลือกสร้างอุปกรณ์ทางแสงที่ถือเป็นอุปกรณ์ทางแสงแบบพาสซีฟพื้นฐาน นั่นก็คือคูควบแบบ 2x2 ซึ่งทำให้เป็นการง่ายต่อการทำความเข้าใจในทฤษฎีโหมดคัปปลิง
2. การเลือกแหล่งกำเนิดแสงสำหรับใช้ในการศึกษาเนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงที่เลือกใช้ส่วนมากเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีค่าการลดทอนของเส้นใยนำแสงต่ำทำให้สามารถยังคงสามารถศึกษาคุณลักษณะการคัปปลิงได้ถึงแม้หากจะมีความผิดพลาดจากการกำหนดวิธีการสร้าง
3. การเลือกวิธีในการผลิตคูควบโดยวิธีการขัดทำให้สามารถควบคุมการผลิตได้ในระดับหนึ่งให้ทำซ้ำวิธีการเดิมได้
4. การเลือกวิธีการในการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างเหมาะสมทำให้สามารถจัดชุดอุปกรณ์ทัศนแสงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้บันทึกข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพและสะดวกต่อการจัดเรียงอุปกรณ์ดังกล่าว

พิจารณาจากข้อมูลและการวิเคราะห์ผลงานวิจัยพบว่า ถ้ามีเส้นใยนำแสงใดๆที่ไม่ทราบคุณสมบัติการลดทอนสัญญาณแสง วิธีการวัดการลดทอนสัญญาณแสงโดยวิธีการตัดสั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและแน่นอนสูงมาก แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวก็มีข้อบกพร่องนั้น

คือ วิธีการตัดสินถือว่าเป็นการทดสอบแบบทำลายซึ่งจะไม่เหมาะสมกับกรณีที่มีตัวอย่างสำหรับการทดสอบน้อยๆ ในการศึกษาเรื่องทฤษฎีคัปปลิงโหมดทำให้ทราบได้แน่ชัดจากการทดลองว่าการคัปปลิงระหว่างสองท่อนำคลื่นจะมีการออสซิเลชันของกำลังแสงไปมาระหว่างท่อนำคลื่นดังกล่าวเป็นฟังก์ชันซิงกูลาไรต์คอลไปตลอดความยาวระยะคัปปลิงดังนั้นในการสร้างคู่วบให้มีการแบ่งกำลังแสงที่เอาท์พุทของท่อนำคลื่นตามต้องการต้องมีการกำหนดเลือกความยาวของระยะคัปปลิงของคู่วบที่สร้าง จากการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหแสงที่เชื่อมระหว่างท่อนำคลื่นและผลการตอบสนองต่อความยาวคลื่นทำให้มีความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับการคัปปลิงเพิ่มขึ้น ซึ่งความรู้นี้จะนำไปสู่ความเข้าใจของพฤติกรรมแสงในอุปกรณ์แสงชนิดสวิตช์และฟิลเตอร์เลือกผ่านความยาวคลื่นต่อไป

## 7.2 ปัญหาที่พบจากการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการกำหนดมาตรฐานวิธีการสร้างคู่วบจากเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก ซึ่งในการวิจัยจำเป็นจะต้องตีความหมายของเงื่อนไขในทางทฤษฎีให้ออกมาเป็นวิธีการที่สามารถนำไปปฏิบัติ หากสามารถตีความหมายดังกล่าวให้ออกมาใกล้เคียงกับขีดความสามารถของอุปกรณ์และเครื่องจักรที่ประยุกต์หรือสร้างขึ้นมาเพื่อผลิตคู่วบได้เท่าใด จะทำให้ลดการที่จะต้องลองผิดลองถูกตามวิธีการต่างๆที่กำหนดขึ้นมากเท่านั้น ซึ่งผลสำเร็จของวิธีสร้างคู่วบที่ได้กำหนดขึ้นนั้นอยู่ในระดับพอใช้ เพียงพอสำหรับเป็นแนวทางที่จะนำไปพัฒนาต่อหรือนำไปใช้สร้างคู่วบที่จะนำไปศึกษาในระบบแสงง่ายๆ ไม่ซับซ้อน

ในส่วนของกระบวนการผลิตนั้น จากขีดความสามารถของเครื่องจักรที่ได้นำมาใช้สร้างคู่วบนั้นจะเป็นข้อจำกัดประการสำคัญที่จะสร้างคู่วบให้มีระยะคัปปลิงตามต้องการด้วยระดับความยาวของระยะคัปปลิงอยู่ในระดับไมโครเมตร แต่ขีดความสามารถสูงสุดของเครื่องจักรอยู่ในระดับตั้งแต่ 10 ไมโครเมตรขึ้นไปเป็นสาเหตุเครื่องจักรนี้ยังไม่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างคู่วบให้มีความยาวระยะคัปปลิงได้ทุกๆ ที่ต้องการศึกษา

นอกจากนี้การตรึงแน่นเส้นใยนำแสงทั้งสองเข้าด้วยกันเป็นคู่วบก็อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดไมโครเบนดิงขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซสที่ได้รับมีค่ามากถึงในระดับ 3 – 10 dB ดังนั้นในการผลิตคู่วบควรมีการพัฒนาการสร้างจูดอ้างอิงและใช้เป็นอุปกรณ์ที่จะจับเส้นใยนำแสงมาประกบกันเป็นคู่วบซึ่งควรสามารถที่ปรับตำแหน่งการวางเส้นใยนำแสงที่จะประกบกันเป็นคู่วบได้

สำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในงานวิจัย เดิมมีความต้องการที่ใช้งานแหล่งกำเนิดแสงที่สามารถให้เอาท์พุทได้ในช่วงความยาวคลื่นกว้างเพื่อที่จะสามารถทดลองในหัวข้อผลตอบสนองต่อความยาวคลื่นของอัตรการคัปปลิงได้ในช่วงที่กว้างขึ้น แต่ประสบปัญหาแหล่งกำเนิดแสงดังกล่าวมีราคาสูงเนื่องจากไม่สามารถผลิตในประเทศทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ในงานวิจัยได้ จึงได้ทำการ

ประยุกต์ใช้แหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งมาใช้งานเป็นผลให้ต้องมีการจัดเรียงชุดอุปกรณ์เพื่อทำการป้อนแสงบ่อยครั้ง ดังนั้นในการวิเคราะห์ที่ข้อมูลจึงต้องพิจารณาผลในเทอมการนอร์มอลไลซ์

### 7.3 แนวทางในการพัฒนาในอนาคต

จากปัญหาที่พบในการทำงานวิจัย จึงได้เสนอแนวทางในการปรับปรุงขั้นตอนการทำวิจัย และการทำวิจัยเพิ่มเติมเพื่อศึกษาทฤษฎีคัปปลิงโหมดของคู่ควบไว้ดังนี้

1) พิจารณาหาเครื่องมือที่มีความเหมาะสมสำหรับการจัดเส้นใยนำแสงให้สามารถสร้างความยาวระยะคัปปลิงได้ในระดับไมโครเมตร ซึ่งทำให้สามารถพิจารณาผลของความยาวระยะคัปปลิงได้ถูกต้องแม่นยำขึ้น

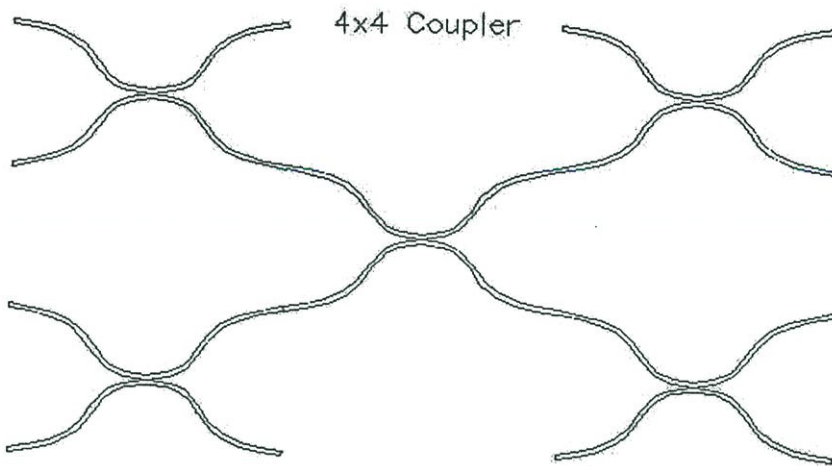
2) ปรับปรุงการประกบเส้นใยนำแสงทั้งสองเข้าเป็นคู่ควบ โดยให้ทำการติดตั้งเส้นใยนำแสงเข้ากับแท่นรองชัดที่เป็นบล็อกแท่งสี่เหลี่ยมเพื่อที่สามารถกำหนดตำแหน่งของการชัดและการนำเส้นใยนำแสงมาประกบกันได้สะดวกจากการใช้บล็อกเป็นการอ้างอิงตำแหน่ง

3) จากการศึกษาในส่วนของทฤษฎีและงานวิจัยอื่นๆเพิ่มเติมทำให้ทราบว่า ระยะห่างของการวางเส้นใยนำแสงประกบกันนั้น มีผลเป็นอย่างมากต่อผลการคัปปลิง ดังนั้นควรมีการวิจัยเพิ่มเติมในส่วนของผลความห่างนี้ที่มีต่อการคัปปลิงของคู่ควบ

4) จากการศึกษาหัวข้อผลของความยาวคลื่นที่มีต่ออัตราการคัปปลิงพบว่า ผลการศึกษามีช่วงในการพิจารณาก่อนข้างแคบ จึงควรรหาแหล่งกำเนิดแสงที่ให้กำเนิดคลื่นได้ในช่วงกว้างเพื่อสนับสนุนผลการศึกษาให้ชัดเจนขึ้น

ความเข้าใจในทฤษฎีโหมดคัปปลิงเป็นพื้นฐานที่ดีและสามารถเป็นพื้นฐานประยุกต์ในความเข้าใจอุปกรณ์ทางแสงต่างๆทั้งที่เป็นแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ สำหรับในส่วนของ การพัฒนาต่อไปที่สามารถนำความรู้ของงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ได้มีดังตัวอย่างต่อไปนี้

1) ในเครือข่ายแสงที่มีการรับ - ส่งข้อมูลในระบบไปหลายโนดซึ่งในกรณีนี้ระบบต้องการอุปกรณ์แสงที่เข้ามาทำหน้าที่นี้ซึ่งก็คือ คู่ควบ NxM คู่ควบชนิดนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 จากความรู้ในการศึกษางานวิจัยพบว่า คู่ควบชนิดนี้สามารถสร้างได้โดยใช้คู่ควบแบบ 2x2 มาต่อกันเป็นระบบของคู่ควบแบบ NxN ได้ซึ่งในที่นี้สามารถแสดงเป็นคู่ควบแบบ 4x4 ดังในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 แสดงการประยุกต์คู่ควบแบบ 2x2 ที่สร้างโดยวิธีการจัดเป็นคู่ควบแบบ 4x4

2) ในการศึกษาหัวข้อค่าดัชนีหักเหที่มีผลต่ออัตราการคัปปลิงนั้นพบว่า เมื่อค่าดัชนีหักเหแสงเข้าใกล้ค่าดัชนีหักเหของคอร์อัตราการคัปปลิงจะเพิ่มขึ้นและจากความสัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหของแสงที่ว่า ค่าดัชนีหักเหของแสงจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่แปรผันไป ดังนั้นจากความรู้ทั้งสองส่วนสามารถนำมาพัฒนาต่อสร้างเป็นสวิตช์แสงโดยพัฒนาจากคู่ควบ 2x2 ได้ซึ่งจะเป็นการพัฒนาอุปกรณ์แสงแบบแอททิฟที่พัฒนาจากอุปกรณ์แสงแบบพาสซีฟ การสร้างเริ่มโดยสร้างคู่ควบและใส่ตัวกลางเชื่อมต่อระหว่างท่อนำคลื่นเพื่อให้แสงสามารถคัปปลิงจากท่อนำคลื่นหนึ่งไปยังอีกท่อนำคลื่นหนึ่งได้มีอัตราส่วนการคัปปลิงค่าหนึ่งจากนั้นให้ติดตั้งหลอดความร้อนแก่บริเวณตัวกลางที่เชื่อมต่อท่อนำคลื่น เมื่อต้องการให้อัตราการคัปปลิงเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็สามารถทำได้การป้อนศักย์ไฟฟ้าให้แก่หลอดความร้อนเพื่อใช้ความร้อนปรับค่าดัชนีหักเหแสง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลให้อัตราส่วนการคัปปลิงเดิมเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่จ่ายให้แก่ตัวกลางเชื่อมต่อท่อนำคลื่น

3) ในการศึกษาหัวข้อผลการตอบสนองต่อความยาวคลื่นพบว่า คู่ควบมีการตอบสนองอัตราการคัปปลิงต่อความยาวคลื่นต่างๆไม่เท่ากัน จากผลการศึกษาสามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อสร้างอุปกรณ์แสงชนิดฟิลเตอร์เลือกความยาวคลื่นได้ โดยอุปกรณ์นี้เมื่อป้อนแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆแก่พอร์ตอินพุตของคู่ควบ แสงที่ออกที่แต่ละปลายเอาท์พุตที่แสงคัปปลิงมาจะมีค่าความเข้มแสงของแสงความยาวคลื่นต่างๆไม่เท่ากัน(ป้อนอินพุตเท่ากัน)ซึ่งสามารถนำแสงแต่ละความยาวคลื่นไปป้อนต่อในเครือข่ายต่อไปได้จำนวน โหนดในเครือข่ายไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถเลือกได้จากการเลือกใช้ความยาวคลื่นที่ป้อนแก่คู่ควบ

ความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกำลังทวีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตประจำวัน  
เพิ่ม การที่เราจะสามารถพัฒนาประเทศให้มีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการที่ภาค  
รัฐและเอกชนต้องร่วมมือกันสร้างสังคมของการเรียนรู้ ส่งเสริมให้มีการวิจัยต่อยอดความรู้อย่างต่อเนื่อง  
เนื่อง ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นพื้นฐานในการส่งเสริมการสร้างสังคม  
แห่งการเรียนรู้ทางวิทยาศาสตร์ของประเทศต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Takato N. and Kurokawa, T. "Polymer Waveguide Star Coupler." *Applied Optics*, vol. 21, no. 11, June 1982. pp. 1940 – 1942.
- [2] Ishigure T., Nihei E., Koike Y., Forbes C. E., LaNieve L., Ftraff R. and Deckers H. A. "Large-Core, High-Bandwidth Polymer Optical Fiber for Near Infrared Use." *IEEE Photonics Technology Letters.*, vol. 7, no. 4, April 1995. pp. 403 – 405.
- [3] Tagaya A., Teramoto S., Yamamoto T., Fujii K., Nihei E., Koihe Y. and Sasaki K., "Theoretical and Experimental Investigation of Rhodamine B-Doped Polymer Optical Fiber Amplifiers." *IEEE J. Quantum Electronics.*, vol. 31, no. 12, December 1995. pp. 2215 – 220.
- [4] Eldada L., Blomquist R., Shacklette L. W. and Mcfarland M.J. "High-Performance Polymeric Componentry for Telecom and Datacom Applications" *Opt.Eng.*, vol. 39, no. 3, March 2000. pp. 596 – 609.
- [5] Ozeki T. and Kawasaki B. S. "Optical Directional Coupler Using Tapered Sections in Multimode Fibers." *Applied Optics.*, vol. 21, no. 11, May 1976. pp. 528 – 529.
- [6] Barnoski M. K. and Friedrich H. R. "Fabrication of An Access with Single-Strand Multimode Fiber Waveguides." *Applied Optics.*, vol. 15, no. 11, November 1976. pp. 2629 – 2630.
- [7] Kawasaki B. S. and Hill K. O. "Low-Loss Access Coupler for Multimode Fiber Distribution Networks." *Applied Optics.*, vol. 16, no. 7, July 1977. pp. 1794 – 1795.
- [8] Rawson E. G. and Nafarrate A. B. "Star Coupler Using Fused Biconically Tapered Multimode Fibers." *Electronics Letters.*, vol. 14, no.9, April 1978. pp. 274 – 275.
- [9] Tsujimoto Y., Serizawa H., Hattori K. and Fukai M. "Fabrication of Low-Loss 3 dB Couplers with Multimode Optical Fibers." *Electronics Letters.*, vol. 14, no.5, March 1978. pp. 157 – 158.
- [10] Jaing G., Shi R. F. and Garito A. F. "Mode Coupling and Equilibrium Mode Distribution Conditions in Plastics Optical Fibers." *IEEE Photonics Technology Letters.*, vol. 8, no. 12, August 1997. pp. 1128 – 1130.
- [11] KVT Grattan. **Sensors VI :Technology, Systems and Applications.** London : IOP Publishing Ltd. 1993. pp. 295 – 298.
- [12] อธิคม ฤกษ์บุตร "การวัดการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วด้วยเทคนิคการตัดสั้น."

Engineering Transactions., vol. 1, no. 2, Mar – Jun 1998. pp. 191 – 194.

- [13] ปรีชา ยูพาพิน. วิศวกรรมใยแก้วนำแสง. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2543.
- [14] สุวรรณ คูสำราญ. ทัศนศาสตร์กายภาพ. กรุงเทพมหานคร : คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2537.
- [15] ภัทรพงศ์ รักน้อย. “อุปกรณ์แบบหาลอมรวมท่อนำแสงและการประยุกต์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [16] John M. Senior. **Optical Fiber Communications Principles and Practice.** New York : Prentice Hall. 1992.
- [17] John Gowar. **Optical Communication Systems.** 2<sup>nd</sup> Ed. New York : Prentice Hall. 1993.
- [18] Donald L. Lee. **Electromadnetic Principles of Integrated Optics.** New York : John Wiley & Sons. 1986.
- [19] Allan W. Snyder, John D. Love. **Optical Waveguide Theory.** New York : Chapman and Hall. 1983.
- [20] Jean Marcou, Editor. **Plastic Optical Fibers Practical Applications.** New York : John Wiley & Sons. 1997.

ภาคผนวก ก.

แหล่งกำเนิดแสง

เนื่องจากในงานวิจัยไม่สามารถหาแหล่งกำเนิดแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นกว้างมาใช้งานจึงทดแทนโดยการเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลายแหล่งกำเนิดแสงแทน ซึ่งแหล่งกำเนิดแสงที่นำมาใช้ประกอบด้วย

### ก.1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอด

แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะต้องคำนึงถึงความเข้มของแสงที่จะต้องมีความถี่ที่เหมาะสมเพื่อสามารถที่จะใช้งานในงานวิจัยนี้ได้ ความยาวของคลื่นแสงที่ให้ออกมา และช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานจะต้องมีช่วงที่กว้าง รวมถึงเสถียรภาพในการใช้งานต้องดีพอสมควร และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

#### ก.1.1 เลเซอร์ไดโอดที่ให้ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร

มีรายละเอียดดังนี้

Laser type:	Laser diode
Class Laser :	IIIa
Wavelength range:	660 - 680 nm
Nominal wavelength :	670 nm
Output power:	5 mW

#### ก.1.2 เลเซอร์ไดโอดที่ให้ความยาวคลื่น 785 นาโนเมตร

มีรายละเอียดดังนี้

Laser type :	Laser diode
Wavelength range :	775 – 795 nm
Nominal wavelength :	785 nm
Output power:	3 mW
Supply voltage :	-8 to -12 V
Supply current :	25 – 50 mA
Divergence (full angle) :	< 0.5 mrad
Spot size (standard types) :	100 mm
Case (front cell) :	5 mrad. (typ.)
MTTF @ 30 °C :	32,000 hrs.
Operating temperature range :	-10 to +50 °C

## ก.2 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน

เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเป็นระบบเลเซอร์ก๊าซระบบแรกของโลก ประดิษฐ์ขึ้นในปี ค.ศ. 1961 โดย เอ. แจแวน (A. Javan) และคณะ เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนจะให้แสงเลเซอร์ความยาวคลื่นเดียวอยู่ในช่วง 3390 1150 และ 632.8 นาโนเมตร รายละเอียดของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่นำมาใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

Laser type :	Helium Neon
Class laser :	II
Minimum output :	0.5 mV
Wavelength :	632.8 nm
Beam diameter :	0.48 mm
Beam divergence :	1.70 mrad
Beam pointing stability :	< 0.1 mrad (25°)
Polarization :	Linear (500:1)
Operating Current :	82 mA

## ก.3 แหล่งกำเนิดแสงแอลอีดี

แอลอีดีเป็นไดโอดที่ออกแบบโครงสร้างให้สามารถแปลงพลังงานแสงออกมาได้เมื่อมีการไบแอสแบบไปข้างหน้า โครงสร้างพื้นฐานของแอลอีดีจะประกอบด้วย สารกึ่งตัวนำอาร์เซไนด์ (GaAs) ซึ่งถูกโด๊ปให้เป็นสารประเภทพี (p - type) และสารประเภทเอ็น (n - type) หลักการทำงานก็คือเมื่อมีการไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมจะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-โฮลที่รอยต่อพีเอ็น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของชั้นอิเล็กตรอนและคายพลังงานออกมาในรูปของแสง โดยแสงที่เปล่งออกมามีลักษณะกระจัดกระจายและมักทำมุมค่อนข้างกว้างทำให้ได้แสงที่ประสิทธิภาพต่ำ สารที่นำมาใช้ทำแอลอีดีอาจเป็นสารประเภทกึ่งตัวนำอาร์เซไนด์ (GaAs) แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสเฟอ (GaAsP) แกลเลียมฟอสเฟอ (GaP) แกลเลียมอลูมิเนียมอาร์เซไนด์ (GaAlAs) หรืออื่นๆก็ได้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ต้องการ รายละเอียดของแอลอีดีที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

Wavelength :	850 nm
Maximun output :	80 $\mu$ W

ภาคผนวก ข.

อุปกรณ์รับแสง

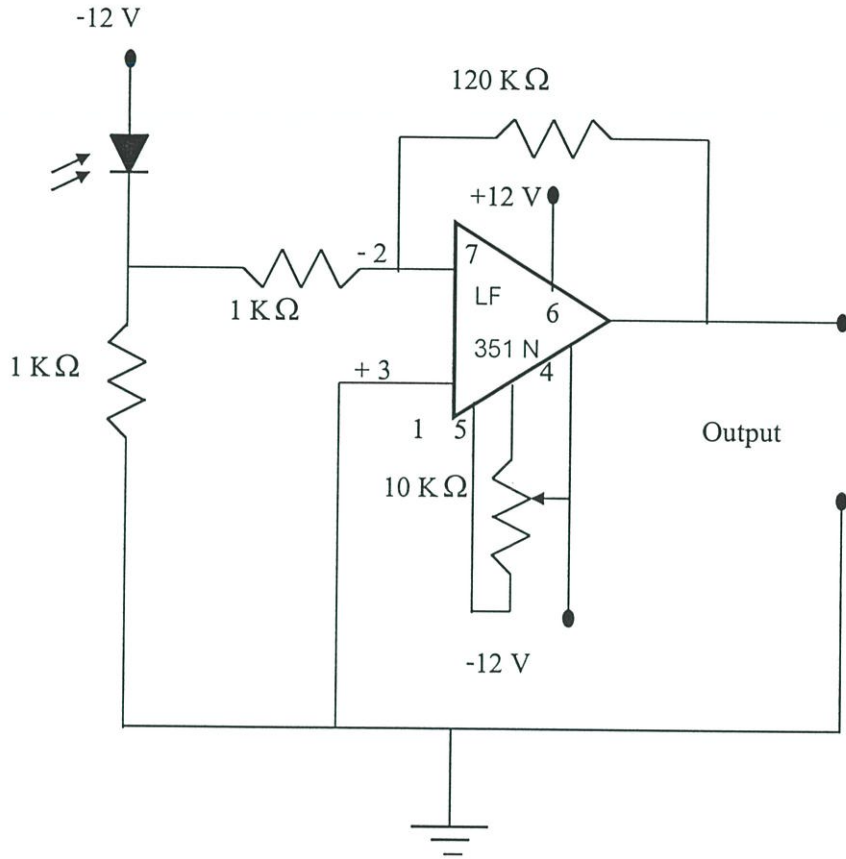
การเลือกใช้พินโฟโตไดโอดสำหรับงานวิจัยนี้จะต้องคำนึงถึงช่วงความยาวคลื่นที่ตอบสนองต่อพินโฟโตไดโอดที่มีความสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดแสงที่นำมาใช้งาน ความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณทางแสงต้องมีการตอบสนองต่อสัญญาณทางแสงที่เข้ามาอย่างรวดเร็ว และช่วงอุณหภูมิที่ต้องใช้งานจะต้องอยู่ในช่วงที่กว้าง ในงานวิจัยได้เลือกใช้โฟโตไดโอดแบบใช้งานทั่วไปติดตั้งบนเคสแบบ TO18 ที่มีรายละเอียดทางเทคนิคดังนี้

Peak spectral response :	750 nm
Wavelength range :	350 – 1100 nm
Change in leakage current : (with incident light)	0.7 $\mu\text{A/nW/crr}$
Dark current (at $-20\text{ V}$ ) :	1.4 nA (typ.)
Temp. coeff. of change in leakage current with illumination :	0.35%/ $^{\circ}\text{C}$
Max. forward current :	100 mA
Max. dissipation :	200 mW at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$
Capacitance ( $-10\text{ V bias}$ ) :	12 pF
Response time :	4ns typ.
Operating temp. :	$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$

ภาคผนวก ค.

**วงจรรีเลย์ทรอนิกส์สำหรับอุปกรณ์รับแสง**

ในภาคผนวก ค นี้จะได้แสดงวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือวงจรรับสัญญาณแสง ซึ่งมีรายละเอียดของวงจรดังนี้



รูปที่ ค.1 แสดงวงจรรับสัญญาณแสง

ภาคผนวก ง

**เครือข่ายเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก**

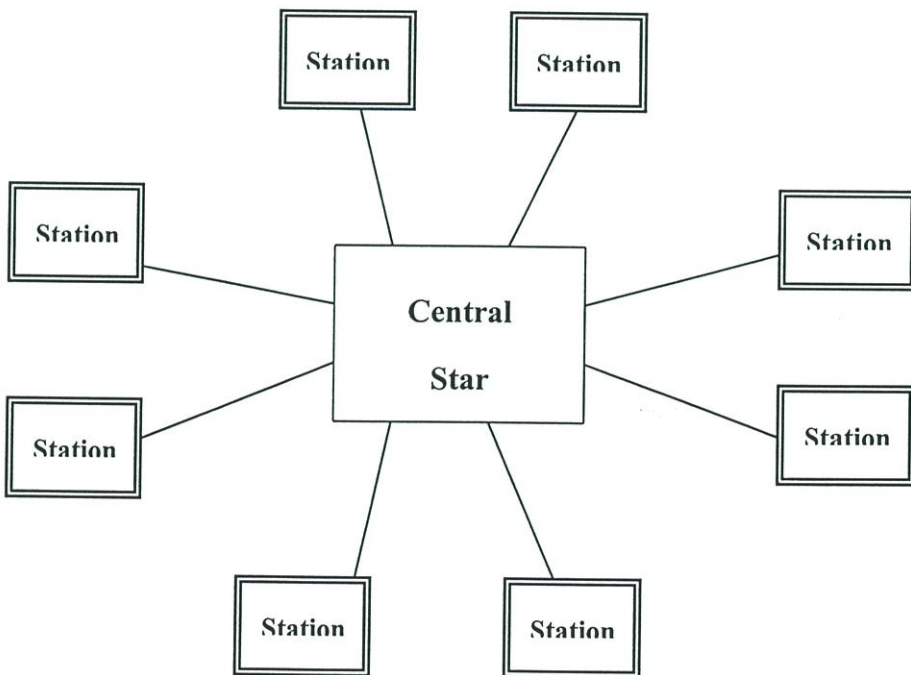
เครือข่ายเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกที่ใช้ในการสื่อสารนั้นจะสร้างเป็นเครือข่ายท้องถิ่น (LAN) โดยสามารถใช้งานได้ทั้งเป็นงานอุตสาหกรรมในโรงงานเกี่ยวกับระบบควบคุมการผลิตและระบบเครือข่ายที่ประยุกต์ใช้งานสื่อสารเช่น งานทางด้านมัลติมีเดีย การส่งข้อมูลข่าวสาร การส่งภาพ และงานทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

ระบบเครือข่ายจะประกอบด้วยสถานีสื่อสารที่ใช้อุปกรณ์ชนิดออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในการเชื่อมต่อโดยมีเคเบิลเส้นใยนำแสงเป็นสื่อกลาง การเชื่อมต่อระหว่างสถานีอาจทำได้ทั้งเป็นแบบจุดต่อจุด หรือจุดต่อหลาย ๆ จุด ซึ่งปกติทิศการสื่อสารข้อมูลโดยเส้นใยนำแสงแบบพลาสติกจะเป็นแบบทิศทางเดียว ถ้าต้องการติดต่อแบบสองทางนั้นต้องใช้เส้นใยนำแสงสองเส้น

## ง.1 รูปแบบของเครือข่าย (Network topologies)

รูปแบบของเครือข่าย ที่ใช้ในการสื่อสารสามารถแบ่งได้ดังนี้

ง.1.1 เครือข่ายแบบสตาร์ (Star networks) เครือข่ายแบบสตาร์นั้น สถานีย่อย (Station) จะเชื่อมต่อกับสถานีกลาง (Central star) แบบจุดต่อจุด ข้อมูลที่ส่งผ่านจากสถานีย่อยใด ๆ จำเป็นต้องผ่านสถานีกลางและกระจายไปสู่สถานีย่อยอื่น ๆ พร้อมกัน แสดงได้ดังรูปที่ ง.1

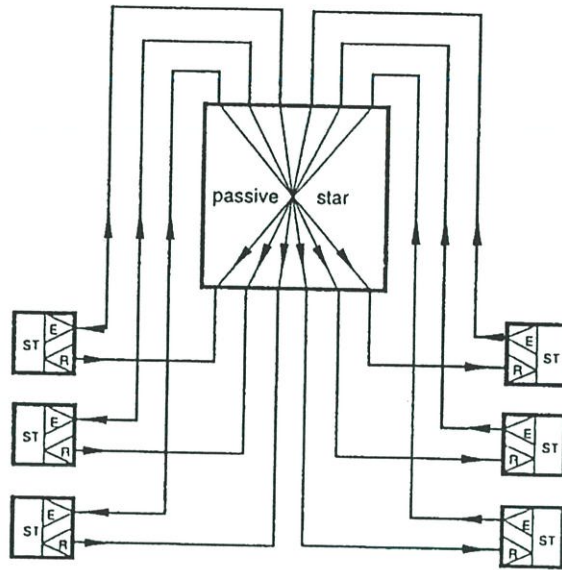


รูปที่ ง.1 แสดงเครือข่ายแบบสตาร์

โดยระบบเครือข่ายแบบสตาร์นี้สามารถแบ่งแยกย่อยได้เป็นสองแบบดังนี้

ง.1.1.1 เครือข่ายสตาร์แบบพาสซีฟ (Passive optical star) เครือข่ายแบบนี้จะประกอบด้วยอุปกรณ์รวมแสง (Optical mixers) เช่นคู่ควบ ทำหน้าที่ส่งข้อมูลจากอินพุตหนึ่งไปยัง

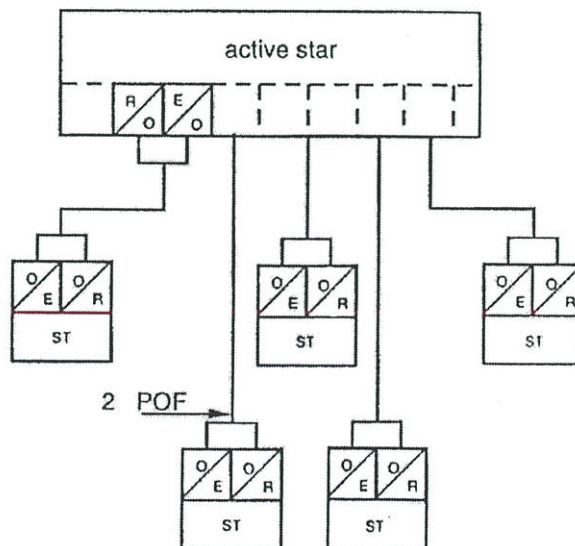
เอาต์พุตใด ๆ การใช้อุปกรณ์แบบพาสซีฟนี้ให้ข้อดีตรงที่มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลสูง แต่จะทำให้มีสถานีย่อยได้ไม่มากนัก แสดงได้ดังรูปที่ ง.2



รูปที่ ง.2 แสดงเครือข่ายสตาร์แบบพาสซีฟ

จากรูป ง.2 เป็นเครือข่ายพาสซีฟสตาร์ชนิด 6x6 เมื่อ ST คือสถานีย่อย เครือข่ายแบบนี้ไม่สามารถสร้างข้อมูลที่สถานีหลักได้

ง.1.1.2 เครือข่ายสตาร์แบบแอคทีฟ (Active optical star) เครือข่ายแบบนี้จะประกอบด้วยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ แสดงได้ดังรูปที่ ง.3

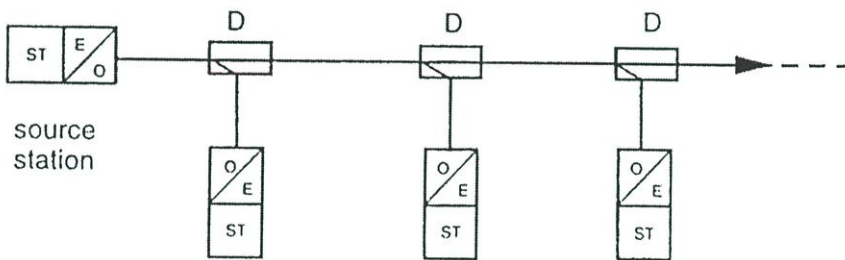


รูปที่ ง.3 แสดงเครือข่ายสตาร์แบบแอคทีฟ

เป็นการเชื่อมต่อแบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์ โดย O/E คือตัวส่งหรืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงและ O/R คือตัวรับหรืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ตัวสถานีหลักสามารถสร้างข้อมูลขึ้นได้และรับส่งให้กับสถานีย่อยโดยจะใช้เส้นใยนำแสงจำนวนสองเส้น เครื่องข่ายนี้จะใช้ในเครือข่ายอีเธอร์เน็ต (ETHERNET) ตามมาตรฐาน IEEE 802.3 มีอัตราการส่งข้อมูลได้ 10 เมกะบิตต่อวินาที และในเครือข่าย FIP ที่อัตรา 10 เมกะบิตต่อวินาที

ง.1.2 เครือข่ายแบบบัส (Bus networks) ในเครือข่ายแบบนี้ทุกสถานีย่อยจะถูกเชื่อมต่อด้วยสายส่งเพียงสายเดียวที่ประกอบด้วยส่วนย่อยหลายๆ ส่วน การเชื่อมต่อจะเป็นแบบจุดต่อจุดหรือจุดต่อหลายจุดด้วยคู่ความแสงหรือแทป (Tap) สามารถแบ่งได้ออกเป็นสองแบบดังนี้

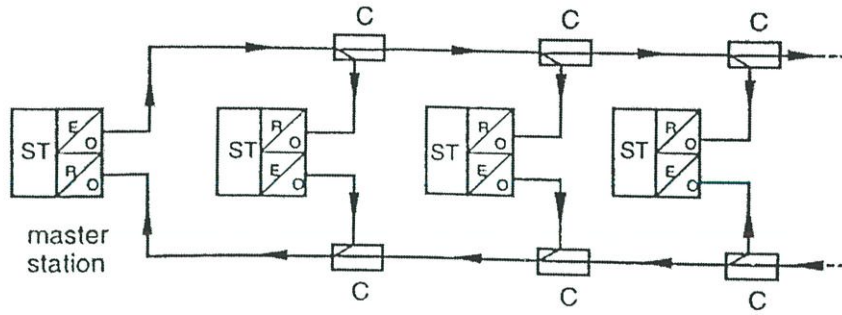
ง.1.2.1 เครือข่ายบัสแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) เครือข่ายแบบนี้ใช้ในการเคลื่อนย้ายข้อมูลจากสถานีข้อมูล (Source station) ซึ่งข้อมูลจะถูกส่งจากสถานีแม่ข่ายไปยังสถานีย่อย แสดงดังรูปที่ ง.4



รูปที่ ง.4 แสดงเครือข่ายบัสแบบทิศทางเดียว

การเชื่อมต่อแบบเป็นแบบง่าย ๆ โดยใช้คู่ความ และการสูญเสียของคู่ความจะเป็นตัวกำหนดจำนวนสถานีย่อย และระบบจะใช้ O/E เป็นทั้งตัวส่งในสถานีหลักและเป็นตัวรับในสถานีย่อย

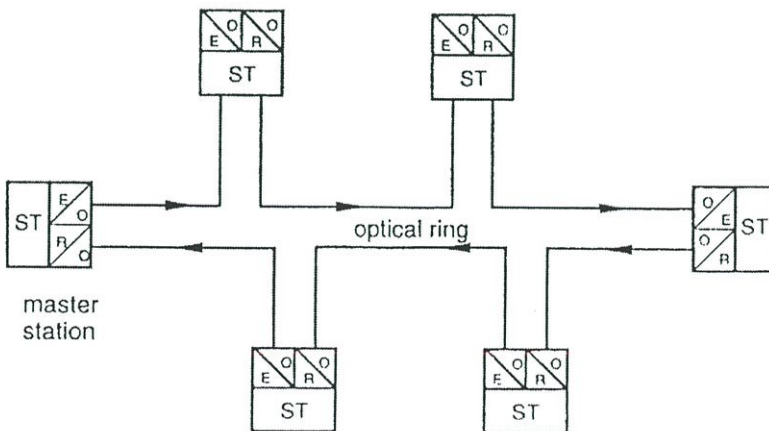
ง.1.2.2 เครือข่ายบัสแบบสองทิศทาง (Bidirectional) เครือข่ายแบบนี้จะมีหลักการเดียวกับแบบทิศทางเดียว แต่จะมีสายส่งและสายรับในการติดต่อ โดยแต่ละสถานีจะมีทั้งตัวรับตัวส่ง ทำให้รับและส่งได้พร้อม ๆ กันแสดงได้ดังรูปที่ ง.5



รูปที่ ง.5 แสดงเครือข่ายบัสแบบสองทิศทาง

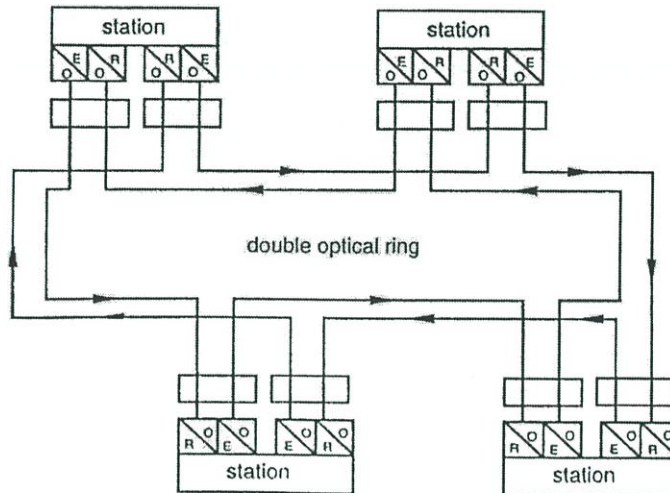
ระบบบัสแบบนี้จะใช้โปรโตคอล (Protocol) เป็นตัวกำหนดการสื่อสาร การส่งผ่านแบบสถานีแม่-สถานีลูก (master-slave) โดยมีสถานีหลัก (Master station) หนึ่งตัวทำการควบคุมการติดต่อ เป็นเครือข่ายที่ติดตั้งง่ายและเชื่อมต่อสถานีด้วยอุปกรณ์พาสซีฟทำให้ระบบสามารถทำงานได้แม้ว่าจะมีสถานีย่อยใดพังลง

ง.1.3 เครือข่ายแบบวงแหวน (Ring networks) สถานีย่อยจะเชื่อมต่อกับสถานีต่อไปแบบจุดต่อจุดสถานีและสถานีสุดท้ายจะเชื่อมต่อกับสถานีแรก การส่งผ่านสัญญาณแสงจะเป็นไปตามทิศทางเดียวกันจนครบรอบตามเส้นทางเดินของแสง (Optical ring) มีโปรโตคอลการสื่อสารที่เรียกว่า โทเคิน (TOKEN) ตามมาตรฐาน IEEE 802.5 การเชื่อมต่อแต่ละสถานีจะใช้เส้นใยนำแสงสองเส้น ถ้าสถานีใดพังลงเครือข่ายจะพังทั้งระบบ แสดงได้ดังรูปที่ ง.6



รูปที่ ง.6 แสดงเครือข่ายแบบวงแหวน

ง.1.4 เครือข่ายแบบวงแหวนที่มีระบบรักษาความปลอดภัย (Ring networks with security) กรณีที่ต้องการความปลอดภัย นั้นทำโดยการใช้ทางเดินแสงวงแหวนคู่ (Double optical ring) หรือเป็นเครือข่ายวงแหวนคู่ แสดงได้ดังรูปที่ ง.7



รูปที่ ง.7 แสดงเครือข่ายแบบวงแหวนที่มีระบบรักษาความปลอดภัย

ข้อมูลจะถูกส่งไปในทิศทางหนึ่งในวงแรก และในทิศทางตรงกันข้ามในวงที่สอง การซ่อมแซมตัวเองของระบบเครือข่ายจะถูกกระทำโดยอัตโนมัติ ในกรณีที่เครือข่ายพังลงเครือข่ายจะเปลี่ยนเป็นระบบวงแหวนเดี่ยว

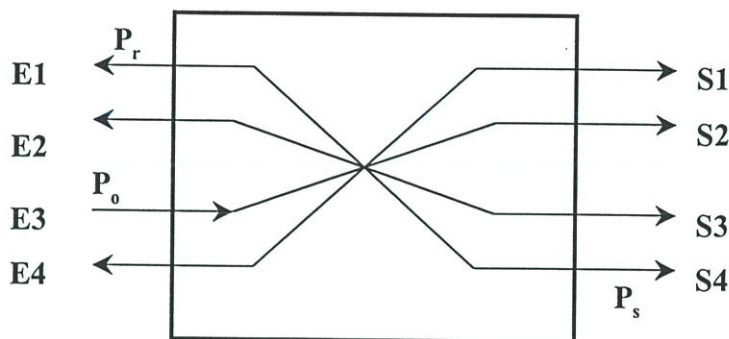
## ง.2 อุปกรณ์สำหรับเครือข่ายเส้นใยนำแสง

### ง.2.1 อุปกรณ์การเชื่อมต่อแบบพาสซีฟ

อุปกรณ์การเชื่อมต่อแบบพาสซีฟเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานใดๆมากระตุ้นเมื่อทำงาน ได้แก่ เส้นใยนำแสงและคู่ควบแสง

ง.2.1.1 คู่ควบแสงเป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟจะใช้ในการสื่อสารทางแสงเพื่อกระจายกำลังแสงไปยังส่วนต่างๆ เครือข่ายส่วนใหญ่ใช้คู่ควบแสงเนื่องจากง่ายในการสร้างและการนำไปใช้งาน

4 inputs



4 outputs

$$P_s = P_o - \eta_i$$

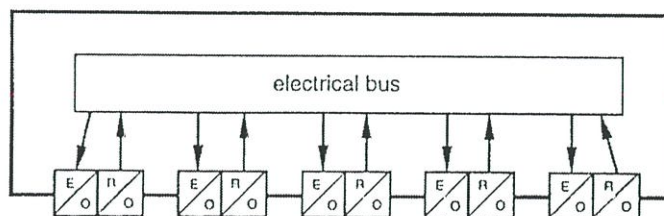
รูปที่ ง.8 แสดงคู่ควบแสงแบบสตาร์ที่มี N เท่ากับ 4

จากรูปเป็นคู่ควบแสงแบบสตาร์ที่มี 4 อินพุตและ 4 เอาต์พุต โดยแสงอินพุต  $P_i$  จากอินพุตช่องหนึ่งสามารถออกไปสู่อเอาต์พุตช่องใด ๆ หรืออินพุตช่องใด ๆ ได้ คู่ควบแสงมีค่าการสูญเสียกำลังแสงหลายอย่างเช่น ค่าการสูญเสียจากการเชื่อมต่อ ค่าสูญเสียขาเข้าต่อขาออก เป็นต้น และมีอัตราส่วนการแบ่งกำลังแสงไปสู่เอาต์พุตแต่ละช่อง ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับขบวนการผลิต

### ง.2.2 อุปกรณ์การเชื่อมต่อแบบแอคทีฟ

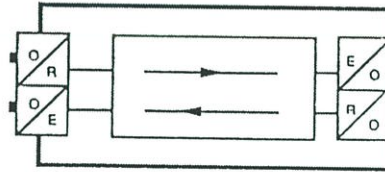
อุปกรณ์นี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายแบบท้องถิ่น เพื่อให้สามารถใช้งานในระยะไกลได้ และประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลข่าวสาร

ง.2.2.1 แอคทีฟสตาร์ (Active stars) อุปกรณ์ชนิดนี้เรียกว่าคอนเซนทราเตอร์ (Concentrator) ทำหน้าที่ทวนสัญญาณและกระจายสัญญาณข้อมูล อุปกรณ์ชนิดนี้จะประกอบด้วย การ์ดอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณทางแสงผ่านทางตัวรับ O/R และตัวส่ง O/E โดยใช้ บัสทางไฟฟ้า (Electrical bus) เป็นตัวเชื่อมสัญญาณทางไฟฟ้า แสดงระบบได้ดังรูปที่ ง.9



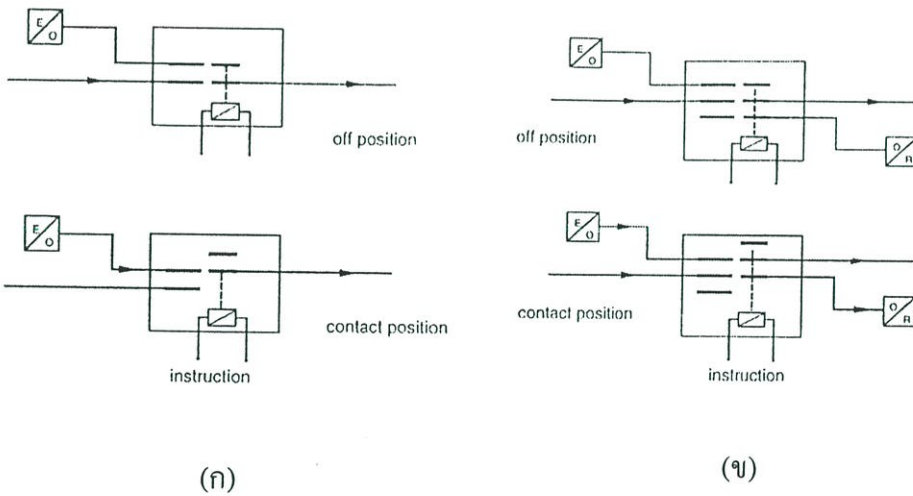
รูปที่ ง.9 แสดงแอคทีฟสตาร์

ง.2.2.2 ตัวทวนสัญญาณ (Repeaters) อุปกรณ์ชนิดนี้จะทำหน้าที่ทวนสัญญาณเพื่อเพิ่มระยะทางในการส่งข้อมูล มีพื้นฐานแบบเดียวกับการ์ดอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยตัวส่ง O/E และตัวรับ O/R อย่างละสองคู่ แสดงได้ดังรูปที่ ง.10



รูปที่ ง.10 แสดงตัวทวนสัญญาณ

ง.2.2.3 รีเลย์เชิงแสง (Optical relays) อุปกรณ์ชนิดนี้ใช้ในการตัดต่อเส้นทางการเดินทางของแสง ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยพัลส์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าให้อยู่ในสถานะเปิด (Off position) หรือติดต่อ(Contact position) ทำให้เกิดการสลับเส้นทางเดินของแสงได้ทั้งแบบเดี่ยวหรือแบบหลายๆ ทางก็ได้ แสดงได้ดังรูปที่ ง.11(ก) และ (ข)



รูปที่ ง.11 แสดง(ก) รีเลย์เชิงแสงทางเดี่ยว (ข) รีเลย์เชิงแสงสองทาง

จากรูปที่ ง.11 นั้นรูปที่ ง.11 (ก) เป็นรีเลย์แบบทางเดี่ยว ทำการสลับสัญญาณอินพุตจากอีกช่องทางหนึ่งไปเป็นอีกช่องทางหนึ่ง ส่วนรูปที่ ง.11(ข) เป็นรีเลย์แบบสองทาง เมื่ออยู่ในสถานะปิดจะมีสัญญาณเอาต์พุตหนึ่งช่องและจะทำการสลับสัญญาณอินพุตทั้งสองช่องเมื่ออยู่ในสถานะติดต่

### ง.3 งบประมาณกำลัง (Power budget)

งบประมาณกำลังคือค่าการสูญเสียทั้งหมดของแสงที่ยอมรับได้ระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์รับแสง โดยค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบนั้น เช่น เกิดจากการสูญเสียกำลังแสงที่จุดเชื่อมต่อต่าง ๆ ของระบบ การลดทอนกำลังแสงของเส้นใยนำแสง การสูญเสียเนื่องจากคู่ควบแสง เป็นต้น โดยปกติในการออกแบบระบบจะต้องมีค่ากำลังเพื่อหรือการเตรียมการของระบบ (Power margin) คือผลต่างระหว่างงบประมาณกำลังและค่าการสูญเสียของระบบ ซึ่งควรมีค่าเป็นบวกและมีความสัมพันธ์กับงบประมาณกำลัง ดังนี้

$$P_i = P_o - C_L + M_a \quad \text{dB} \quad (\text{ง.1})$$

เมื่อ  $P_i$  คือกำลังอินพุตของระบบในหน่วยเดซิเบล  $P_o$  คือความไวของอุปกรณ์รับแสงในหน่วยเดซิเบล  $C_L$  คือค่าการสูญเสียรวมทั้งหมดของระบบในหน่วยเดซิเบล และ  $M_a$  คือ กำลังเผื่อของระบบในหน่วยเดซิเบล โดย  $C_L$  หาได้ดังนี้

$$C_L = \alpha_s + \alpha_p L + \alpha_c \quad \text{dB} \quad (\text{ง.2})$$

เมื่อ  $\alpha_s$  คือการลดทอนกำลังแสงของเส้นใยนำแสงในหน่วยเดซิเบลต่อกิโลเมตร  $\alpha_c$  คือค่าการสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อเส้นใยนำแสงในหน่วยเดซิเบล  $\alpha_c$  คือค่าการสูญเสียเนื่องจากหัวต่อต่าง ๆ ในหน่วยเดซิเบลและ  $L$  คือความยาวของเส้นใยนำแสงในหน่วยกิโลเมตร โดยทั่วไปการออกแบบระบบนั้นจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่าง ๆ ดังนี้

- 1) พิจารณาการลดทอนกำลังแสงของเส้นใยนำแสง การกระจายกำลังแสง และความถี่ใช้งานหรือแบนวิดท์
- 2) พิจารณาข้อจำกัดของเครื่องส่ง เช่น กำลังขยายสูงสุด ความกว้างของสเปกตรัม การตอบสนองความถี่ และความเป็นเชิงเส้น เป็นต้น
- 3) พิจารณาข้อจำกัดของเครื่องรับ เช่น การตอบสนองต่อสเปกตรัม การตอบสนองความถี่ ความไว และความเป็นเชิงเส้น เป็นต้น

เครือข่ายสื่อสารที่เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกนั้น จะมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง มีความง่ายในการผลิตมากกว่าเส้นใยนำแสงชนิดแก้ว โดยปกติเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกจะเป็นชนิดหลายโหมดเนื่องจากมีส่วนแกนที่ใหญ่ในระดับมิลลิเมตร ดังนั้นจึงมีการลดทอนสูง ทำให้เหมาะสมสำหรับการสื่อสารระยะใกล้ ๆ มากกว่าระยะไกล

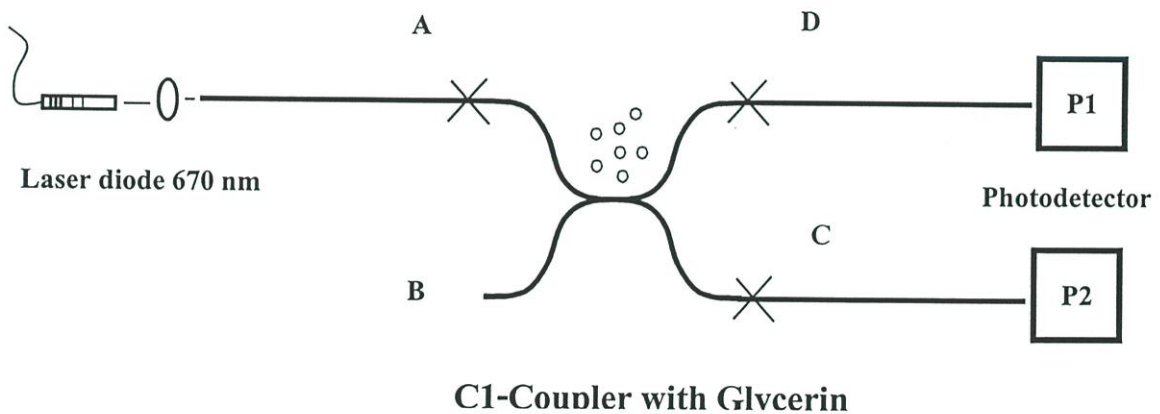
## ภาคผนวก จ

ตัวอย่างคำนวณแสดงการนำคู่ควบที่สร้างไปใช้งานในการสื่อสารระยะสั้น

คู่ควบที่สร้างขึ้นสามารถไปใช้ในระบบสื่อสารแสงในระยะสั้นได้ ในที่นี้ขอแสดงให้เห็นชัดเจนดังนี้ เมื่อเลือกใช้อุปกรณ์แสงดังที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย

1. แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 670 นาโนเมตรกำลังแสงเอาต์พุต 5 มิลลิวัตต์ ที่ให้ความเข้มแสงที่ป้อนเข้าเส้นใยนำแสง 10.29 โวลต์
2. โฟโตดีเทคเตอร์ที่มีช่วงรับแสงช่วงกว้าง ซึ่งเมื่อสร้างเป็นอุปกรณ์รับแสงมีระดับสัญญาณรบกวนเท่ากับ 3.04 มิลลิวัตต์
3. เลือกใช้คู่ควบ C1 ที่มีความยาวระยะคัปปลิง 9.41 มิลลิเมตรและใช้ตัวกลางในการเชื่อมต่อเป็นกลีเซอริน ซึ่งให้ค่าอัตราการคัปปลิงเท่ากับ 0.51 ค่าความสูญเสียแบบเอ็กเซสเท่ากับ 6.73 dB และมีค่าความสูญเสียแบบอินเลิซชันที่พอร์ต C เท่ากับ 9.63 dB และที่พอร์ต D เท่ากับ 9.86 dB
4. เส้นใยนำแสงพลาสติกกรุ่น SH 4001 ของบริษัทมิตซูบิชิที่วัดสัมประสิทธิ์การลดทอนเท่ากับ 0.26 dB/m

นำอุปกรณ์ติดตั้งในระบบสื่อสารระยะสั้นดังแสดงในรูปที่ จ.1



รูปที่ จ.1 แสดงระบบการสื่อสารระยะสั้นที่ใช้ในการคำนวณ

ความเข้มแสงที่ป้อนเข้าอินพุตของเส้นใยนำแสงมีค่าเท่ากับ 10.29 โวลต์ ระยะที่แสงเดินทางไปในเส้นใยนำแสงและทำให้ความเข้มลดทอนไป 3 dB คำนวณได้จากสมการที่ 7.1

$$\text{dB} = \alpha L = -10 \log \left( \frac{V_{\text{output}}}{V_{\text{input}}} \right) \quad (\text{จ.1})$$

แทนค่าในสมการได้ระยะที่แสงเดินทางไปและค่าเข้มลดทอนเหลือ 5.15 โวลต์ มีค่าเท่ากับ

$$3\text{dB} = (0.26)L \quad (\text{จ.2})$$

$$L = 11.5 \text{ เมตร} \quad (\text{จ.3})$$

หลังจากนั้นเส้นใยนำแสงต่อเข้าอินพุตพอร์ต A ของคูควบ C1 ซึ่งโดยทั่วไปมีความสูญเสียในการเชื่อมต่อเท่ากับ 0.2 dB ดังนั้นมีความเข้มแสงป้อนเข้าที่อินพุตของคูควบเท่ากับ

$$0.2\text{dB} = -10\log\left(\frac{V_{\text{input}}}{5.15}\right) \quad (\text{จ.4})$$

$$V_{\text{input}} = 4.92 \text{ โวลต์} \quad (\text{จ.5})$$

นั่นคือมีความเข้มแสงป้อนเข้าที่อินพุตพอร์ตของคูควบเท่ากับ 4.92 โวลต์ หากพิจารณาที่เอาต์พุตพอร์ต C ของคูควบซึ่งมีค่าความสูญเสียแบบอินเลิซชันที่พอร์ตเท่ากับ 9.63 dB ความเข้มแสงที่เอาต์พุตคำนวณได้ว่า

$$9.63\text{dB} = -10\log\left(\frac{V_{\text{outputC}}}{4.92}\right) \quad (\text{จ.6})$$

$$V_{\text{outputC}} = 535.75 \text{ มิลลิโวลต์} \quad (\text{จ.7})$$

ที่เอาต์พุตพอร์ต C มีการต่อเส้นใยนำแสงเพื่อนำไปใช้งานซึ่งมีค่าความสูญเสียในการเชื่อมต่อเท่ากับ 0.2 dB ดังนั้นความเข้มแสงที่ป้อนเข้าเส้นใยนำแสงส่วนนำไปใช้งานนี้มีค่าเท่ากับ

$$0.2\text{dB} = -10\log\left(\frac{V_{\text{input}}}{535.75}\right) \quad (\text{จ.8})$$

$$V_{\text{input}} = 511.64 \text{ โวลต์} \quad (\text{จ.9})$$

ให้แสงเดินทางไปอีก 11.5 เมตรจึงตกกระทบโฟโตดีเทคเตอร์ซึ่งความเข้มแสงลดทอนไปอีก 3 dB เหลือค่าความเข้มที่เอาต์พุตเท่ากับ 255.82 มิลลิวัตต์ ในทำนองเดียวกันพิจารณาที่เอาต์พุตของเส้นใยนำแสงที่ต่อจากพอร์ต D มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ 242.63 มิลลิวัตต์ สำหรับโฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นมีระดับสัญญาณรบกวนเท่ากับ 3.04 มิลลิวัตต์ซึ่งแสงที่เข้ามาตกกระทบเพื่อวัดระดับสัญญาณนั้น สัญญาณควรมีค่ามากกว่าสัญญาณรบกวนอย่างน้อย 10 เท่า นั่นคือ 30.40 มิลลิวัตต์ ดังนั้นเมื่อเทียบระดับความเข้มที่ได้จากเอาต์พุตของเส้นใยนำแสงกับระดับความเข้มแสงที่โฟโตดีเทคเตอร์ต้องการใช้งานพบว่า

พิจารณาที่ปลายเส้นใยนำแสงที่ต่อกับพอร์ต C

$$\text{อัตราส่วนความเข้มแสงเอาต์พุตกับความเข้มแสงที่ต้องการ} = \frac{255.82}{30.40} = 8.42 \text{ เท่า}$$

พิจารณาที่ปลายเส้นใยนำแสงที่ต่อกับพอร์ต D

$$\text{อัตราส่วนความเข้มแสงเอาต์พุตกับความเข้มแสงที่ต้องการ} = \frac{242.63}{30.40} = 7.98 \text{ เท่า}$$

ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระดับความเข้มแสงที่ได้จากเอาต์พุตของเส้นใยนำแสงมีระดับความเข้มสูงการระดับความเข้มแสงที่โฟโตดีเทคเตอร์ต้องการถึง 8.42 เท่าที่ปลายเส้นใยนำแสงที่ต่อกับพอร์ต C และ 7.98 เท่าที่ปลายเส้นใยนำแสงที่ต่อกับพอร์ต D แสดงให้เห็นว่าคู่ควบ C1 ที่สร้างขึ้นมีความสามารถเพียงพอที่ใช้งานระบบสื่อสารแสงในระยะ 10 – 20 เมตรได้

ภาคผนวก ฉ

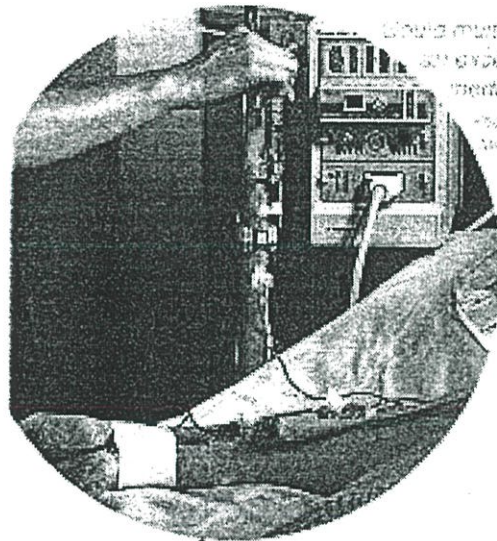
ตัวอย่างข้อกำหนดคุณลักษณะของกลุ่มควบคุมและการใช้งาน

ในการเลือกคู่ควมเพื่อใช้งานในระบบแสงใดๆควรคำนึงถึงคุณลักษณะประจำตัวต่างๆเช่น ค่าความสูญเสียแบบอินเสิชชั่น ค่าไคเร็กติวิตี เป็นต้น เพื่อให้ได้รับค่าความเข้มแสงหรือสัญญาณแสงในจุดต่างๆที่ออกแบบไว้ตามต้องการ การใช้งานคู่ควมในระบบแสงสำหรับงานสื่อสารนั้นมักมีความต้องการใช้งานคู่ควมที่สามารถแบ่งแสงที่พอร์ตเอาต์พุตแต่ละพอร์ตได้เท่าๆกันทั้งด้านคุณสมบัติและปริมาณแสง สำหรับกรณีที่คู่ควมเป็นแบบ 2x2 อาจเรียกแทนคู่ควมลักษณะนี้ว่า 3 dB Coupler เมื่อพิจารณาคุณลักษณะของคู่ควมหลายโหมดแบบหลวมรวม (Multimode Fused Bidirectional Couplers) ในหน้าที่ 144 และคู่ควมแบบไมโครในหน้าที่ 145 ของบริษัทโกลด์ไฟเบอร์ออฟติคจำกัดพบว่าคุณลักษณะที่สำคัญในการเลือกใช้งานของคู่ควมคือ เมื่อใช้อัตราการคัปปลิงเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ที่พอร์ตเอาต์พุต ค่าความสูญเสียแบบอินเสิชชั่นมีค่าในระดับน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3.7 dB และ 4.5 dB สำหรับคู่ควมหลายโหมดแบบหลวมรวมและมีค่าในช่วง 2.8 – 3.4 dB และ 2.5 – 3.6 dB สำหรับคู่ควมแบบไมโคร สำหรับค่าไคเร็กติวิตีมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 40 dB สำหรับคู่ควมหลายโหมดแบบหลวมรวมและมีค่าเท่ากับ 50 และ 40 dB สำหรับคู่ควมแบบไมโคร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะคู่ควมเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติกที่สร้างโดยวิธีการขัดที่สร้างขึ้นพบว่าคู่ควม C3 ที่สร้างขึ้นที่เงื่อนไขใช้อากาศเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อพบว่าคู่ควมที่สร้างขึ้นสามารถให้อัตราการคัปปลิงที่ 53 : 47 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความสูญเสียแบบอินเสิชชั่นเท่ากับ 8.22 และ 8.76 dB และค่าไคเร็กติวิตีมีค่า 29.41 dB แสดงว่าคู่ควมที่สร้างขึ้นสามารถแบ่งกำลังแสงได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์แต่คุณลักษณะความสูญเสียของคู่ควมต่ำกว่ามาตรฐานของสินค้าที่ผลิตขึ้นเพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากค่าความสูญเสียควรมีค่าต่ำกว่า 4.5 dB สำหรับค่าไคเร็กติวิตีควรมีค่ามากเพราะเมื่อมีค่ามากแสดงว่ามีแสงสะท้อนกลับที่พอร์ตอินพุตต่ำ อย่างไรก็ตามคู่ควมที่สร้างขึ้นยังคงสามารถใช้งานได้ในระบบแสงระยะสั้นดังแสดงในภาคผนวก จ

# Multimode & Large Core Couplers

## Multimode Fused Bidirectional Couplers

Capable of operating over a broad wavelength range (i.e. 850nm and 1300nm), Gould multimode fused couplers can be used within fiber optic instrumentation, sensor systems and local area networks. Additionally, Gould multimode and large core couplers are manufactured and tested under fully-filled launch conditions. An underfilled launch may affect coupling ratio.



Gould multimode couplers are an excellent choice for medical systems. High purity, low loss, and high stability.

### 50/50 Multimode Coupler Specifications

	SERIES 2	SERIES 3
Insertion Loss	< 3.7dB	< 4.5dB
Directivity	≥ 40dB (or 2x2)	
Port Configuration	1x2 or 2x2	
Packaging	Comes in package style 11 and can be repackaged into 21, 25, 32 or modular boxes	

### Options:

**Fiber Types:** Graded Index 50/125, Corning 62.5/125, other fiber sizes and types are also available.

### Product Number:

15 - \_\_\_\_\_ 00 - 50 - \_\_\_\_\_ 1

Series	Fiber types	Port configuration	Package style	Connector style
2 or 3	11 - 50/125µm 12 - 62.5/125µm 25 - 100/140µm (step index fiber)	1 - 1x2 2 - 2x2	11, 21, 25 or 32	0 = none see page 23

## Large Core Couplers

These devices deliver high coupled power levels and are insensitive to operating wavelengths. Large core couplers are excellent for sensor applications including: medical application laser delivery, harsh environments and industrial process control. A variety of fiber types are available from 200/230µm and larger. Call our sales engineers for details.



[www.gouldfo.com](http://www.gouldfo.com)

**This is the New Power of Gould!**

1121 Benfield Blvd., Millersville, MD 21108

Toll Free: 800.54.GOULD

VOICE: 410.987.5600 FAX: 410.987.1201

EMAIL: [info@gouldfo.com](mailto:info@gouldfo.com) WEB: [www.gouldfo.com](http://www.gouldfo.com)

## DESCRIPTION

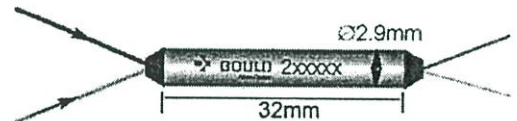
Gould has reduced the package size of a standard FBT coupler by up to 50% to create its newly designed Micro Coupler. This Micro coupler is able to maintain the excellent performance characteristics of other larger, packaged components and makes them the ideal coupler of choice for system designs that are constantly increasing overall package density. Their low insertion loss and PDL, high directivity and low uniformity make them the perfect choice for EDFA products as well as other high-density applications.

## FEATURES:

- Smaller size
- Highly Reliable
- Low Insertion Loss
- High Directivity

## APPLICATIONS:

- DWDM/ Long Haul
- Metro/Access
- PONs
- Amplifiers
- Test/Measurement
- Medical



DATA SHEET  
Micro Coupler

## Optical Parameters for Micro Coupler

	Micro Coupler Single Window Couplers	Dual Window Couplers, includes Micro Coupler
Wavelength (nm)	1310/1550	1310 & 1550
Bandpass (nm)		+/-40
Configuration	Nx2	Nx2
<b>Optical Performance Parameters</b>		
Performance Series	1	1
Coupling Ratio per Output (%)	50%	50%
Max. Insertion Loss (< /=) (dB)	3.4	3.6
Min. Insertion Loss (> /=) (dB)	2.8	2.5
Max. Uniformity (< /=) (dB)	0.6	0.8
Min. Directivity for 1x2 (> /=) (dB)	50	40
Typ. PDL (+/-) (dB)	0.1	0.1
Typ. Thermal Stability over Range (+/-) (dB)	0.1	0.1



[www.gouldfo.com](http://www.gouldfo.com)  
 This is the New Power of Gould!

GOULD FBT TAPS AND C & L BAND OPTIMIZED COUPLERS	TAPS	C & L Band
Wavelength (nm)	1530 to 1565	1530 to 1625
Configuration	Nx2	Nx2
<b>Optical Performance Parameters</b>		
Performance Series	1	1
Coupling Ratio per Output (%)	1%	50%
Max. Insertion Loss (</=) (dB) - Through leg	0.15	3.6
Max. Insertion Loss (</=) (dB) - TAP leg	21	NA
Max. Uniformity (</=) (dB)	NA	0.8
Max. Variation in Tap Port over Range	0.4	NA
Min. Directivity for 1x2 (>/=) (dB)	50	50
Typ. PDL (+/-) (dB)	0.2	0.2
Typ. Thermal Stability over Range (+/-) (dB)	0.2	0.2

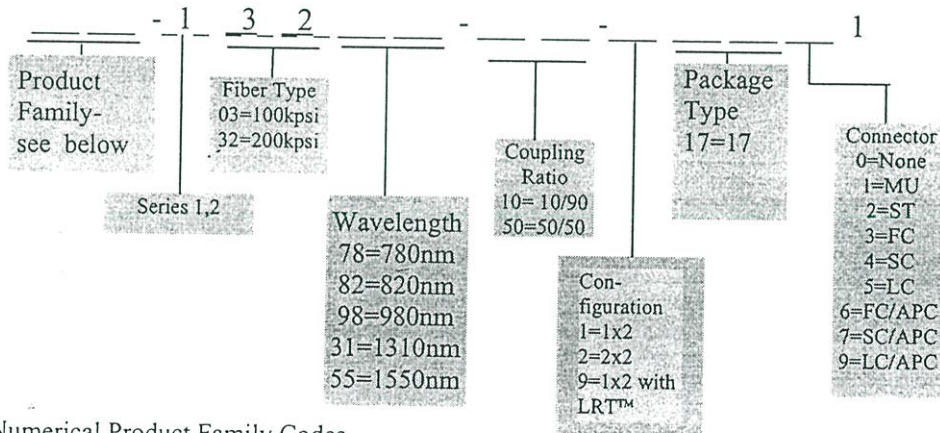
**PACKAGING DIMENSIONS**

	Micro
C/L Band	32 x Ø2.9
Single Window Couplers	32 x Ø2.9
Dual Window Couplers WIC®	32 x Ø2.9
Low Polarization Taps	32 x Ø2.9

**ORDERING INFORMATION**

Micro coupler package- package 17 barefiber - 32mm X Ø 2.9mm

Product Number:



Numerical Product Family Codes

- 38 = C/L Band couplers- micro coupler
- 33 = Low polarization tap couplers- micro coupler
- 36 = Wavelength flattened couplers- micro coupler
- 35 = Wavelength independent couplers -micro coupler
- 37= Singlemode single wavelength coupler- micro coupler

Specialty Fiber types and small bend radius fibers such as 80-micron fiber is available. Please contact a Gould salesperson for assistance.

**For custom options and additional information, please contact us at:**

Phone: 1-410-987-5600

Fax: 1-410-987-1201

Web: [www.gouldfo.com](http://www.gouldfo.com)

All data listed in this data sheet is subjected to change without notice. Gould reserves the right to revise or update the data sheet. Copyright 2002 by Gould Fiber Optics.

ภาคผนวก ข

รายชื่อผลงานวิจัยและบทความตีพิมพ์

## ผลงานวิจัยและบทความตีพิมพ์

1. อานุกาพ คุณกรบดินทร์ และปรีชา ยูพาพิน, การศึกษาคุณสมบัติของเส้นใยนำแสงพลาสติก สำหรับการใช้งานย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, 2542, หน้า 1100-1101.
2. ปรีชา ยูพาพิน และอานุกาพ คุณกรบดินทร์, เส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก, ส่งเสริมเทคโนโลยี, ปีที่ 26, ฉบับที่ 145, มิ.ย. – ก.ค. 2542, หน้า 82 – 89.
3. ปรีชา ยูพาพิน และอานุกาพ คุณกรบดินทร์, เครื่องข่ายเส้นใยนำแสงชนิดพลาสติก, ส่งเสริมเทคโนโลยี, ปีที่ 26, ฉบับที่ 146, ส.ค. – ก.ย. 2542, หน้า 67 – 73.
4. A. Khunakornbodin and P.Yupapin, **A Study of Plastic Fiber Coupler Characteristics for Near Infrared Use**, Chiang Mai J.Sci., vol. 27, no.1, 2000, pp. 32 – 38.
5. A. Khunakornbodin, **A Study of Plastic Fiber Coupler for Short Distance Communication**, Second National Symposium on Graduate Research, Bangkok, 2001, p.145.

## ประวัติผู้เขียน

นาย อานูภาพ คุณากรบดินทร์ เกิดเมื่อวันที่ 12 พฤศจิกายน พ.ศ. 2515 ที่จังหวัดสุโขทัย สำเร็จการศึกษาวិทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ จากภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ในปีการศึกษา 2538

ปี พ.ศ. 2538 – 2541 เข้าทำงานบริษัทสยามมอร์ตาร์ จำกัด อ. แก่งคอย จ.สระบุรี ในตำแหน่งวิศวกรแผนกประกันคุณภาพ มีหน้าที่รับผิดชอบหลักในการวิจัยผลิตภัณฑ์ใหม่ การกำหนดมาตรฐานระบบประกันและควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ ปี พ.ศ. 2541 ลาออกเพื่อศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ณ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง