

การเผ่าระวังการแทรกซึมของน้ำที่จะผ่านเข้าไปยังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว

WATER PENETRATION INSPECTION INTO THE JOINTS OF THE
OPTICAL FIBER NETWORK

ทวีสักดี กรีส

THAWEESAK KREESO

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2003-EN-M-010-288

การเฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำที่จะผ่านเข้าไปยังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว

**WATER PENETRATION INSPECTION INTO THE JOINTS OF THE
OPTICAL FIBER NETWORK**

ทวีศักดิ์ กรีโธ

THAWEESAK KREESO

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **82901**
วัน,เดือน,ปี..... **25 ก.ค. 2551**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-010-288

**WATER PENETRATION INSPECTION INTO THE JOINTS OF THE
OPTICAL FIBER NETWORK**

THAWEESAK KREESO

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2008

KMITL-2008-EN-M-010-288

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำที่จะผ่านเข้าไปยังหัวต่อของ โครงข่ายเส้นใยแก้ว
นักศึกษา	ว่าที่ร.ต.ทวีศักดิ์ กริโส
รหัสประจำตัว	46061247
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิพล สัทธีชัชวภาค

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้เสนอการปรับปรุงการวางโครงข่ายเส้นใยแก้ว โดยให้มีการติดตั้งอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำ อุปกรณ์ดังกล่าวจะติดตั้งเข้าไปในหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว เพราะหากภายในหัวต่อของเส้นใยแก้วมีน้ำขังจะส่งผลเสียตลอดอายุการใช้งานของเส้นใยแก้ว ดังนั้นจึงเสนอให้มีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเข้าไปภายในหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว ในกรณีที่มีน้ำซึมผ่านหัวต่อ อุปกรณ์เฝ้าระวังน้ำจะทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ เป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณภายในเส้นใยแก้วขึ้น ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์สามารถใช้เครื่องมือวัดหาค่าได้อย่างชัดเจน การโค้งงอของเส้นใยแก้วที่เกิดจากการออกแบบอุปกรณ์ จะต้องไม่ทำให้เส้นใยแก้วเกิดความเสียหาย ในขณะที่เส้นใยแก้วติดตั้งอุปกรณ์เฝ้าระวังน้ำ เส้นใยแก้วยังคงสามารถใช้งานได้ตามปกติ อุปกรณ์นี้สามารถใช้ได้กับเส้นใยแก้วที่ความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 800 - 1,700 นาโนเมตร การตรวจสอบน้ำเข้าหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วนั้นต้องใช้ควบคู่กับ Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) เพื่อตรวจสอบตำแหน่งที่น้ำเข้าหัวต่อ โดยสังเกตได้จากค่าการสูญเสียสัญญาณแสงภายในเส้นใยแก้วที่เกิดจากอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำ

Thesis Title	Water Penetration Inspection into the Joints of the Optical Fiber Network
Student	Acting 2 Lt. Thaweesak Kreeso
Student ID.	46061247
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunication Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Suvepon Sittichivapak

ABSTRACT

This thesis presents the improvement of optical fiber network by installing the water penetration device. The device is installed into the joints of the optical fiber network. Since water penetration inside the closure will adversely affect to the optical fiber lifetime. Thus, the installation of the additional device within the joints of the optical fiber is proposed. In case of the water penetrates into the joints, this device will cause the bending of the optical fiber and the power loss to occur which can be measured certainly. The curvature of this designed device does not damage the optical fiber. Meanwhile, the optical fiber which installed the device can operate normally. This device can be used for optical fiber that has wavelength in the range of 800 - 1,700 nanometers. Checking up on water penetration in the closure has to be used together with Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) to detect the position that water percolate to the closure by observing from power loss in the optical fiber.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษาคือ รศ.ดร.สุวิพล สิทธีชีว-
ภาค ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะต่างๆ จนในที่สุดทำให้
วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบิดา - มารดาและบุคคลอื่นๆ ในครอบครัว ที่ได้ให้กำลังใจและความช่วยเหลือ
ในระหว่างการศึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่นฤทธิ์สมเจริญ สำเภาพล (พี่เอก) ที่ได้ให้คำปรึกษาและคอยชี้แนะแนวทาง
ในการศึกษาค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติม เกี่ยวกับการออกแบบและทดลองอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรก
ซึมของน้ำที่จะผ่านเข้าไปยังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว

ขอขอบคุณ บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้การสนับสนุนการวิจัย รวมทั้งพี่ๆ จาก
บมจ. ทีโอที ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในครั้งนี้

สุดท้ายต้องขอขอบคุณภรรยาของข้าพเจ้า คุณจิตรลดา บุญเรือง ที่เป็นเสมือนคู่คิดและเป็น
กำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา - มารดา
ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนครูบาอาจารย์ ทุกคนที่ได้ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชา
ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าตลอดมา

ทวีศักดิ์ กรีโส

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 แสงกับเส้นใยแก้ว.....	5
2.1 ฟิสิกส์ของแสง.....	5
2.2 คุณสมบัติของแสง.....	7
2.3 ลักษณะของเส้นใยแก้ว.....	11
2.4 วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว.....	14
2.4.1 เส้นใยแก้วชนิดแก้ว.....	15
2.4.2 เส้นใยแก้วชนิดพลาสติก.....	16
2.4.3 เส้นใยแก้วชนิดอื่นๆ.....	16
2.5 พารามิเตอร์พื้นฐานของเส้นใยแก้ว.....	17
2.5.1 ค่าดัชนีหักเหของสารที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว.....	17
2.5.2 Numerical Aperture.....	18
2.5.3 ค่าการลดทอนสัญญาณ.....	20
2.5.4 ผลคูณระหว่างแบนด์วิดท์กับระยะทาง (Bandwidth-Distance Product).....	20
2.6 ชนิดของเส้นใยแก้ว.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.1 การจำแนกเส้นใยแก้วตามโครงสร้างของเส้นใยแก้ว.....	21
2.6.1.1 เส้นใยแก้วชนิดแกนสมมาตร.....	21
2.6.1.2 เส้นใยแก้วชนิดแกนไม่สมมาตร.....	25
2.6.2 การจำแนกเส้นใยแก้วตามโหมดการเดินทางของแสง.....	27
2.6.2.1 เส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว.....	28
2.6.2.2 เส้นใยแก้วชนิดโหมดร่วม.....	29
2.7 ความถี่ออร์มอลไลซ์หรือวินัมเบอร์.....	34
2.8 เส้นผ่านศูนย์กลางของโหมดสนามและขนาดจุด.....	36
2.9 การสูญเสียสัญญาณในเส้นใยแก้ว.....	37
2.9.1 การดูดซับพลังงานจากวัสดุตัวกลาง.....	38
2.9.2 การกระเจิงของแสง.....	38
2.9.3 ความโค้งขนาดเล็ก.....	39
2.9.4 ความโค้งขนาดใหญ่.....	40
2.10 การสูญเสียสัญญาณสูงสุดในระบบ.....	42
2.11 ดิสเพอร์ชัน.....	45
2.11.1 Intermodal Dispersion.....	45
2.11.2 Intramodal Dispersion.....	46
2.11.2.1 Material Dispersion.....	47
2.11.2.2 Waveguide Dispersion.....	48
2.12 การทดสอบสายเคเบิลใยแก้ว.....	48
2.12.1 การทดสอบเส้นใยแก้ว.....	49
2.12.2 การทดสอบสายเคเบิลเส้นใยแก้ว.....	49
2.13 การจัดแบ่งสายเคเบิลใยแก้วตามประเภทการใช้งาน.....	51
2.13.1 สายเคเบิลภายในอาคาร.....	51
2.13.2 สายเคเบิลระหว่างอาคาร.....	51
2.13.3 สายเคเบิลภายนอกอาคาร.....	52
2.13.4 สายเคเบิลแบบลูกผสม.....	53
2.13.5 สายเคเบิลใต้น้ำ.....	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 Optical Time Domain Reflectometer.....	55
3.1 ประโยชน์ของ OTDR.....	55
3.2 หลักการทำงานของ OTDR.....	56
3.3 ลักษณะของสัญญาณสะท้อนกลับในเส้นใยแก้ว.....	58
3.4 การวัดจุดเชื่อมต่อของเส้นใยแก้ว.....	62
3.5 สัญญาณที่จุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้ว.....	65
3.6 สมการอย่างง่ายของสัญญาณแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับ.....	66
3.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องกำหนดก่อนใช้เครื่อง OTDR.....	69
3.8 ความหมายของคำศัพท์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ OTDR.....	71
3.8.1 Dynamic Range.....	71
3.8.2 Dead Zone.....	71
3.8.3 Ghosting.....	73
3.8.4 Gainers.....	74
3.8.5 Optical Return Loss.....	75
3.8.6 Resolution.....	76
3.8.7 Insertion Loss.....	76
3.9 วิธีวัดหาค่าการสูญเสียสัญญาณในเส้นใยแก้ว.....	76
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์.....	79
4.1 การออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์.....	79
4.2 การสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์.....	80
4.3 สารโพลีเมอร์.....	85
4.4 การทำงานและโครงสร้างของอุปกรณ์.....	91
4.5 อุปกรณ์ต้นแบบ.....	92

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดสอบและสรุป.....	94
5.1 ผลการทดสอบ.....	94
5.1.1 การทดสอบอุปกรณ์โดยใช้ Light Source และ Optical Power Meter.....	94
5.1.2 การทดสอบอุปกรณ์โดยใช้ OTDR.....	99
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	102
เอกสารอ้างอิง.....	103
ภาคผนวก.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	112

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความยาวคลื่นและความถี่ของแสงในย่านที่ตาของคนเรามองเห็น.....	7
2.2 ค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางต่างๆ.....	8
2.3 ขนาดของโหนดสนามหรือ MFD ของเส้นใยแก้วชนิด SM ที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ.....	37
2.4 การสูญเสียสัญญาณสำหรับความยาวคลื่น 1,310 nm.....	42
2.5 การสูญเสียสัญญาณสำหรับความยาวคลื่น 1,550 nm.....	43
4.1 ค่า pH ของน้ำที่มีผลต่อการดูดซึมของโพลีเมอร์.....	88
5.1 การสูญเสียพลังงานงานแสงเมื่ออุปกรณ์ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ.....	97
5.2 การสูญเสียพลังงานแสงที่เกิดจากอุปกรณ์ เมื่อใช้ความยาวคลื่น 1,310 nm.....	98
5.3 การสูญเสียพลังงานแสงที่เกิดจากอุปกรณ์ เมื่อใช้ความยาวคลื่น 1,550 nm.....	98

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ความเสียหายของหัวต่อเคเบิลเส้นใยแก้วที่เกิดจากการแทรกซึมของน้ำ.....	2
2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นแสง.....	6
2.2 ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการสื่อสาร.....	7
2.3 การเกิดรังสีสะท้อนและรังสีหักเหจากรังสีตกกระทบ.....	9
2.4 การเกิดมุมวิกฤตระหว่าง 2 ตัวกลางเมื่อ $n_1 > n_2$	10
2.5 โครงสร้างของเส้นใยแก้วหรือเส้นใยนำแสง (Optical Fiber).....	11
2.6 หลักการใช้งานเส้นใยแก้ว.....	13
2.7 ผลของสารเจือกับค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เปลี่ยนไป.....	15
2.8 เปรียบเทียบลักษณะความหมายของ Numerical Aperture.....	18
2.9 มุมสูงสุด (ϕ_m) ที่รองรับแสงสำหรับการเดินทางของแสงตลอดความยาวเส้นใยแก้ว.....	19
2.10 เส้นใยแก้วมีมุมรองรับแสงต่างกันขึ้นอยู่กับค่าของ NA	20
2.11 เส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ แบบต่างๆ.....	22
2.12 รูปร่างของกราฟที่แสดงค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วที่มีค่าของ α ต่างๆ.....	23
2.13 เส้นใยแก้วชนิดเกรดเดด-อินเด็กซ์ในรูปแบบต่างๆ.....	24
2.14 เส้นใยแก้วที่ถูกออกแบบให้มีความโค้งเพื่อสร้างคุณสมบัติไปรีฟรินเจนต์.....	25
2.15 เส้นใยแก้วชนิด Geometrical Birefringent.....	26
2.16 แนวการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้วที่โหมดต่างๆ.....	27
2.17 แนวการเดินทางของแสงโหมดพื้นฐาน ไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นตรง.....	28
2.18 ลักษณะการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้วแบบต่างๆ.....	29
2.19 แสงเข้าสู่เส้นใยแก้วด้วยมุมรับแสงสูงสุด.....	30
2.20 รูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่ใช้ช่วยในการคำนวณหาค่า NA	30
2.21 การเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งของแสงในเส้นใยแก้วชนิด GI-MM.....	32
2.22 การเคลื่อนที่ของรังสีซิกแซกและรังสีเบี่ยงเบน.....	33
2.23 การแจกแจงแบบเกาส์ของความเข้มแสง.....	36
2.24 กำลังงานของแสงหรือความเข้มของแสงในระบบเส้นใยแก้ว.....	37
2.25 การลดทอนสัญญาณแสงของเส้นใยแก้ว.....	39
2.26 ลักษณะความโค้งขนาดเล็กบริเวณรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลคดิ่ง.....	39
2.27 การกระจายพลังงานแสงออกจากความโค้งขนาดใหญ่ของเส้นใยแก้ว.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วในระบบหรือใน 1 เส้นทาง.....	43
2.29 การบานออกของสัญญาณพัลส์ในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้ว.....	45
2.30 สเปกตรัมที่แสดง Line width หรือ Spectral width ของแหล่งกำเนิดแสง.....	46
2.31 การทดสอบการรั่วซึมของน้ำเข้าสู่สายเคเบิลใยแก้ว.....	50
2.32 โครงสร้างของสายเคเบิลแบบท่อแน่นและท่อหลวม.....	51
2.33 โครงสร้างของสายเคเบิลชนิด Figure-8 ที่มี 1 ท่อหลอม.....	52
2.34 โครงสร้างของสายเคเบิลชนิด Figure-8 ที่มีหลายๆ ท่อหลอม.....	52
2.35 โครงสร้างของเคเบิลนอกอาคาร.....	53
2.36 ตัวอย่างสายเคเบิลเส้นใยแก้วแบบต่างๆ.....	54
3.1 ลักษณะของ OTDR.....	55
3.2 หลักการทำงานของ OTDR.....	56
3.3 ลักษณะของ Scattering objects ภายในเส้นใยแก้ว.....	57
3.4 การสะท้อนกลับของแสงบริเวณรอยต่อของตัวกลางที่เป็นแก้วกับอากาศ.....	58
3.5 การกระเจิงย้อนกลับของแสงในเส้นใยแก้ว.....	58
3.6 กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อแบบต่างๆ ของเส้นใยแก้ว.....	60
3.7 ลักษณะกราฟทางกายภาพของเส้นใยแก้วที่ต่างกัน.....	61
3.8 กราฟสัญญาณที่เกิดจากเส้นใยแก้ว 2 เส้น เชื่อมต่อกัน.....	62
3.9 กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อแบบต่างๆ.....	64
3.10 กราฟสัญญาณที่จุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้ว.....	65
3.11 ลักษณะจอแสดงผลของ OTDR และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ผู้ใช้กำหนด.....	69
3.12 อิทธิพลความกว้างของพัลส์ที่มีต่อ Dead Zone และ Dynamic Range.....	72
3.13 การเกิด Ghosting ที่จุดเชื่อมต่อของเส้นใยแก้ว.....	73
3.14 การเกิด Optical Return Loss.....	75
3.15 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วยวิธี Two Point Approximation (2PA).....	76
3.16 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วยวิธี Least Square Approximation (LSA).....	77
3.17 ค่า Loss ที่อ่านผิดพลาดเมื่อใช้วิธี LSA เปรียบเทียบกับวิธี 2PA.....	77
3.18 การวัดค่า Loss ที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยวิธี Five Marker.....	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ลักษณะการโค้งงอของเส้นใยแก้วที่เกิดจากอุปกรณ์.....	79
4.2 การสูญเสียพลังงานแสงที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร.....	82
4.3 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ Step-Index Fiber – MM.....	83
4.4 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ Graded-index Fiber – MM.....	83
4.5 การสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแก้วชนิด Step-Index MM.....	84
4.6 การสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแก้วชนิด Graded-Index MM.....	84
4.7 ลักษณะของโพลีเมอร์.....	85
4.8 ลักษณะของโพลีเมอร์ที่ดูดซับน้ำ.....	86
4.9 การขยายตัวของโพลีเมอร์.....	87
4.10 กระดาษพีเอช (pH paper).....	88
4.11 ใช้โพลีเมอร์แทนดินสำหรับปลูกต้นไม้.....	89
4.12 ใช้โพลีเมอร์เป็นวัสดุทำผ้าอ้อม.....	89
4.13 ใช้โพลีเมอร์ทำ Water Blocking Tape สำหรับเคเบิลอากาศ.....	90
4.14 โครงสร้างของอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำ.....	91
4.15 ขนาดของอุปกรณ์ต้นแบบ.....	92
4.16 ลักษณะของอุปกรณ์ต้นแบบ.....	93
5.1 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ Light Source และ Optical Power Meter ทดสอบอุปกรณ์.....	94
5.2 Fusion Splice.....	95
5.3 Light Source และ Optical Power Meter ที่รวมอยู่ในตัวเดียวกัน.....	95
5.4 อุปกรณ์ไม่ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ.....	96
5.5 อุปกรณ์ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอเต็มที่.....	96
5.6 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วย Light Source และ Optical Power Meter.....	97
5.7 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ OTDR ทดสอบอุปกรณ์.....	99
5.8 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วย OTDR.....	99
5.9 กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วย OTDR.....	100
5.10 กราฟที่ได้จาก OTDR ก่อนใส่อุปกรณ์.....	101
5.11 กราฟที่ได้จาก OTDR หลังใส่อุปกรณ์.....	101

บทที่ 1

บทนำ

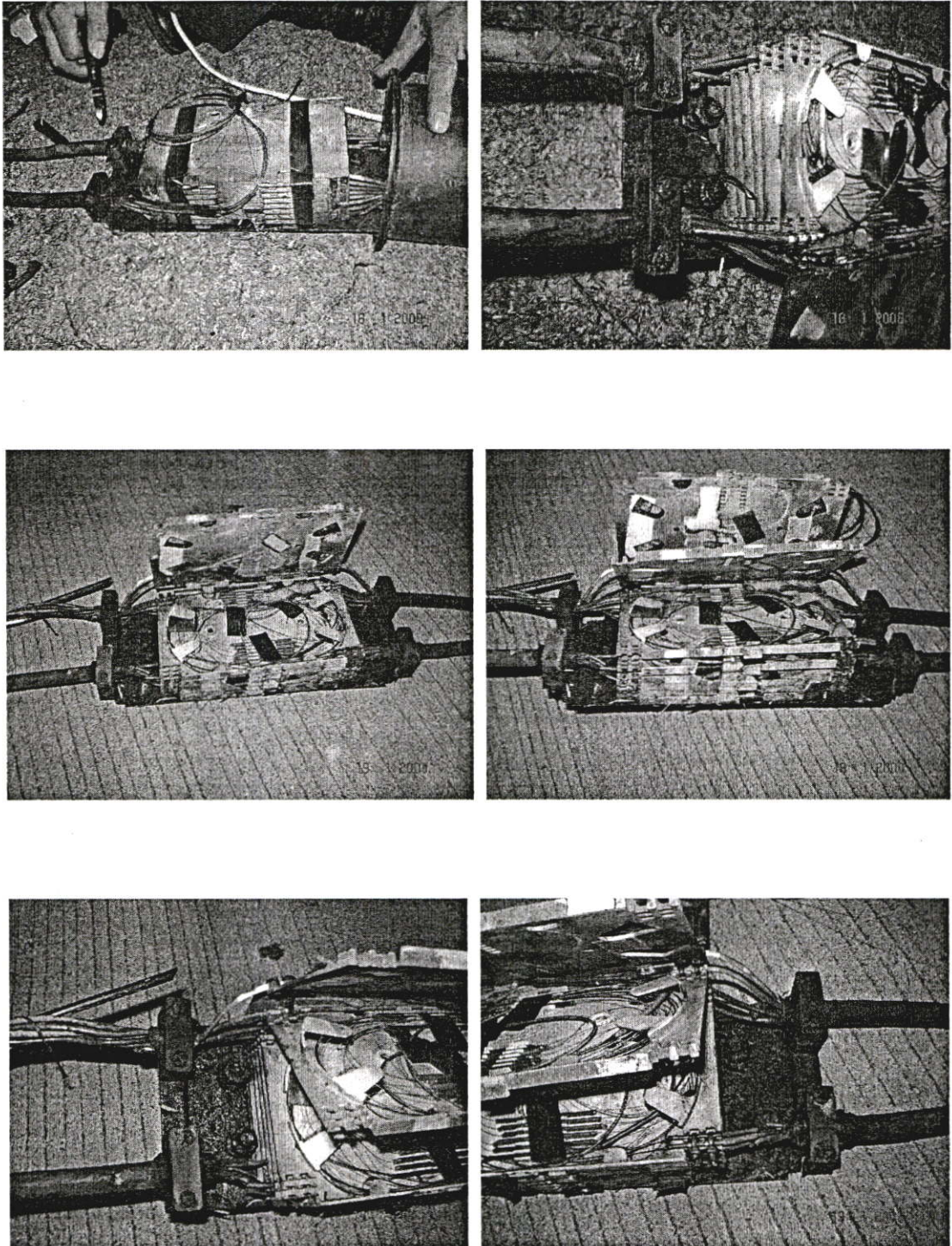
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้การติดต่อสื่อสารผ่านอินเทอร์เน็ต (Internet) นับวันจะมีความสำคัญมากยิ่งขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดความต้องการแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในการส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งโครงข่ายเส้นใยแก้ว (Optical Fiber Network) สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้เป็นอย่างดี เส้นใยแก้ว 1 เส้น สามารถรองรับความยาวคลื่นได้ถึง 1,000 ความยาวคลื่น โดยเฉพาะเทคโนโลยี DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) และมีอัตราการรับส่งข้อมูล (Bit-rate) สูงถึง 3.2 Tbps [1-2] นอกจากนี้เส้นใยแก้วยังมีข้อดีอื่นๆ อีก เช่น มีขนาดเล็กน้ำหนักเบา มีค่าการลดทอนสัญญาณต่ำ ปราศจากสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ข้อมูลมีความปลอดภัยสูง อายุการใช้งานยาวนาน เป็นต้น ในระบบสื่อสารได้มีการนำเส้นใยแก้วไปเชื่อมโยงระหว่างชุมสายใหญ่กับชุมสายย่อยๆ หรือระหว่างชุมสายย่อยด้วยกันเอง เพื่อใช้งานในระบบสื่อสารความเร็วสูง หรือ SDH/SONET (Synchronous Digital Hierarchy / Synchronous Optical Network) มีการใช้เส้นใยแก้วเชื่อมต่อระหว่างชุมสายไปยังบ้านผู้เช่าหรือที่เรียกว่า Fiber To The Home (FTTH) มากขึ้นเรื่อยๆ นั้นแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายเส้นใยแก้วมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะหากเส้นใยแก้วเสียหายก็จะส่งผลเสียต่อระบบการสื่อสารเป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพของโครงข่ายและเพื่อรองรับการขยายตัวของโครงข่ายเส้นใยแก้ว การดูแลบำรุงรักษาโครงข่ายให้สามารถใช้งานได้ตลอดเวลาจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องกระทำ

ภายในหัวต่อ (Closure) ของเคเบิลเส้นใยแก้วจะต่างจากหัวต่อของเคเบิลทองแดง คือจะไม่มีสารที่ใช้ในการป้องกันการแทรกซึมของน้ำ (Filling Compound) ทำให้น้ำสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปยังภายในหัวต่อได้ ด้วยเหตุนี้หัวต่อของเส้นใยแก้วจึงเป็นส่วนหนึ่งที่จะสร้างความเสียหายให้กับโครงข่าย เพราะภายในหัวต่อจะเป็นจุดรวมของการต่อเส้นใยแก้ว (Splicing Point) หากมีน้ำขังในหัวต่อก็จะส่งผลเสียต่อเส้นใยแก้วตลอดอายุการใช้งาน เช่น น้ำจะทำให้โค้ตติ้ง (Coating) ที่หุ้มเส้นใยแก้วเสื่อมสภาพเร็วขึ้น เป็นสาเหตุให้เส้นใยแก้วแตกหักได้ง่าย อีกทั้งน้ำจะทำให้ชิ้นส่วนของหัวต่อ เช่น นีต พลาสติก เสื่อมสภาพเร็วกว่าการใช้งานปกติ [3]

สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีอุปกรณ์ใดที่ใช้ในการตรวจสอบน้ำที่อยู่ภายในหัวต่อของเส้นใยแก้ว หากต้องการจะตรวจสอบน้ำก็จะใช้วิธีการเปิดหัวต่อ ทำให้เสียเวลาในการตรวจสอบ และต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงเสนอให้มีการติดตั้งอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำภายในหัวต่อของเส้นใยแก้ว เพื่อใช้ตรวจสอบน้ำเข้าหัวต่อ เมื่ออุปกรณ์เปียกน้ำ อุปกรณ์ดังกล่าวจะทำให้

เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ ทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณขึ้น ณ ตำแหน่งที่มีการโค้งงอของเส้นใยแก้ว จากนั้นใช้ OTDR ตรวจสอบเส้นใยแก้ว ก็จะทราบได้ว่ามีน้ำแทรกซึมผ่านเข้าไปในหัวต่อหรือไม่ ทำให้ง่ายต่อการบำรุงรักษาโครงข่าย ช่วยยืดอายุการใช้งานของเส้นใยแก้วและหัวต่อ ส่งผลให้โครงข่ายเส้นใยแก้วมีประสิทธิภาพการใช้งานมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 1.1 ความเสียหายของหัวต่อเคเบิลเส้นใยแก้วที่เกิดจากการแทรกซึมของน้ำ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อทำการศึกษาวិธีการออกแบบอุปกรณ์ สำหรับใช้ในการตรวจสอบน้ำที่อยู่ภายใน หัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว อุปกรณ์ดังกล่าวจะทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอและเกิดการสูญเสียสัญญาณขึ้น หากต้องการตรวจสอบว่าภายในหัวต่อของเส้นใยแก้วมีน้ำอยู่หรือไม่ นั้น ก็สามารถใช้เครื่องมือวัดค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ได้ ซึ่งจะช่วยให้การตรวจสอบน้ำที่อยู่ภายในหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วทำได้ง่าย ประหยัดทั้งเวลาและงบประมาณ ช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายเส้นใยแก้วได้นานยิ่งขึ้น

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เมื่อน้ำแทรกซึมผ่านหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว ซึ่งภายในหัวต่อได้ติดตั้งอุปกรณ์ เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำที่ได้ศึกษาวิธีไว้ ขณะน้ำสัมผัสกับสารโพลิเมอร์ที่ได้บรรจุอยู่ใน อุปกรณ์ สารโพลิเมอร์ก็จะเกิดการขยายตัว ไปดันส่วนโค้ง (ลูกสูบ) ของอุปกรณ์ ทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ เป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียสัญญาณขึ้นภายในเส้นใยแก้ว ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์จะมีค่าประมาณ 4-8 dB เพื่อให้การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณสามารถแยกแยะได้ง่าย หากต้องการทดสอบว่ามีน้ำเข้าหัวต่อของโครงข่ายหรือไม่ ก็สามารถใช้เครื่องมือวัดที่ชื่อ OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) ในการตรวจสอบ เพื่อหาตำแหน่งที่มีการสูญเสียสัญญาณ ตำแหน่งใดของเส้นใยแก้วที่มีค่าการสูญเสียสัญญาณประมาณ 4-8 dB ก็อาจสันนิษฐานได้ว่า ณ ตำแหน่งนั้นมีน้ำเข้าไปในหัวต่อ หลังจากนั้นก็ปรับปรุงแก้ไขหัวต่อให้อยู่ในสภาพปกติ (ไม่ให้มีน้ำอยู่ในหัวต่อ) การตรวจสอบลักษณะนี้จะสามารถดูแลรักษาโครงข่ายเส้นใยแก้วได้ง่ายกว่าและประหยัดต้นทุนได้มากกว่าการ ไปเปิดหัวต่อทีละหัวต่อ เพื่อตรวจสอบน้ำ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ลักษณะการ โค้งงอ (Macrobending) ของเส้นใยแก้วจะทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณขึ้น นั่นคือ เมื่อแสงเดินทางไปถึงจุดที่เส้นใยแก้วเกิดการ โค้งงอ แสงจะเดินทางไปกระทบรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดคิงในลักษณะของมุมตกกระทบที่ทำให้เกิดการสะท้อนและหักเหตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) หากเส้นใยแก้วมีลักษณะความโค้งน้อยๆ หรือมีรัศมีความโค้งมากๆ แสงหักเหที่จุดนี้อาจไม่เกิดขึ้นและปรากฏการสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection : TIR) ยังคงมีอยู่ ทำให้ไม่มีการสูญเสียความเข้มของแสง แต่ถ้าเส้นใยแก้วมีลักษณะความโค้งมากๆ หรือมีรัศมีความโค้งน้อยๆ จนทำให้เกิดการหักเหของแสงเข้าไปในแคลดคิง แสงที่สะท้อนและเดินทางต่อภายในคอร์ของเส้นใยแก้ว จะมีค่าลดลงตามสัดส่วนที่เสียไปกับแสงหักเห ด้วยทฤษฎีดังกล่าวจึงได้

นำมาใช้ในการออกแบบความโค้งของอุปกรณ์ เพื่อใช้ในการบังคับให้เส้นใยแก้วโค้งงอตาม

สารโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ เกิดการขยายตัวและมีแรงดันเกิดขึ้นเมื่อเปียกน้ำ เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ โดยสารโพลีเมอร์ดังกล่าวจะดันส่วนโค้งของอุปกรณ์เพื่อให้ส่วนโค้งของอุปกรณ์ไปดันเส้นใยแก้วให้โค้งงออีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้เพื่อให้การโค้งงอของเส้นใยแก้วมีรัศมีการ โค้งตามที่ได้ออกแบบไว้ สารโพลีเมอร์ที่นำมาบรรจุในอุปกรณ์เฟื่อะวังการแทรกซึมของน้ำสามารถพบเห็นได้ทั่วไป เช่น ด้านเกษตรใช้สำหรับปลูกพืชแทนการใช้ดินหรือที่รู้จักกันในชื่อ “ดินวิทยาศาสตร์” ด้านอุตสาหกรรมใช้เป็นวัสดุทำผ้าอ้อม ผ้าอนามัย หรือ ด้านสื่อสารใช้เป็นวัสดุกันน้ำ (Water Blocking Tape) ในเคเบิลใยแก้ว เป็นต้น

1.5 ขอบเขตการวิจัย

- การโค้งงอของเส้นใยแก้วที่เกิดจากอุปกรณ์เฟื่อะวังการแทรกซึมของน้ำจะต้องไม่ทำให้เส้นใยแก้วเสียหาย
- สามารถติดตั้งอุปกรณ์ให้อยู่ภายในหัวต่อ (Closure) ของเส้นใยแก้วได้
- สามารถนำอุปกรณ์ไปใช้ได้กับความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 800-1,700 นาโนเมตรได้
- สามารถนำหลักการออกแบบส่วน โค้งของอุปกรณ์ไปใช้กับเส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (Step-Index Fiber) และเส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็กซ์ (Graded-Index Fiber) ได้

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของเส้นใยแก้ว
- 1.6.2 ศึกษาเกี่ยวกับการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากการ โค้งงอของเส้นใยแก้ว
- 1.6.3 ออกแบบการ โค้งงอของเส้นใยแก้ว
- 1.6.4 ทดสอบการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากการ โค้งงอของเส้นใยแก้ว
- 1.6.5 ศึกษาเกี่ยวกับสาร โพลีเมอร์ (Polymer) ที่สามารถดูดซับน้ำได้
- 1.6.6 ทดสอบการขยายตัวของโพลีเมอร์เมื่อเปียกน้ำ
- 1.6.7 ศึกษาเกี่ยวกับ โครงสร้างหัวต่อ (Closure) ของเส้นใยแก้ว
- 1.6.8 ออกแบบลักษณะของอุปกรณ์เฟื่อะวังการแทรกซึมของน้ำ
- 1.6.9 สร้างอุปกรณ์ต้นแบบ
- 1.6.10 ทดสอบการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแก้วที่เกิดจากการติดตั้งอุปกรณ์
- 1.6.11 สรุปผลการทดสอบ

บทที่ 2

แสงกับเส้นใยแก้ว

2.1 ฟิสิกส์ของแสง

ในการที่จะเข้าใจหลักการการทำงานของเส้นใยแก้วให้ได้เป็นอย่างดีนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความเข้าใจทฤษฎีทางฟิสิกส์ของแสงพอสมควร ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีทางแสงที่สำคัญ ซึ่งถือเป็นความรู้พื้นฐานเบื้องต้นในการทำความเข้าใจกับเทคโนโลยีของเส้นใยแก้ว

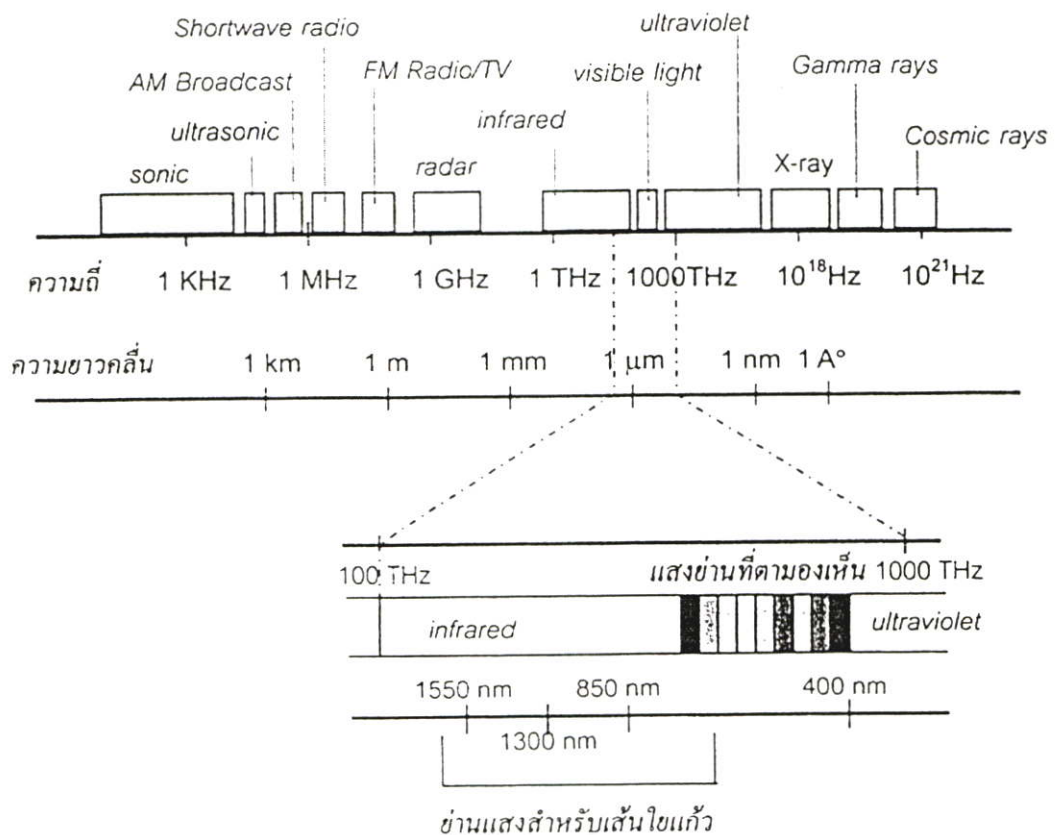
แสงสามารถแสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ได้ 2 ลักษณะ คือในลักษณะของ อนุภาค (Particle) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ในการอธิบายปรากฏการณ์ทางแสงบางอย่าง เช่น การกระเจิง (Scattering) ของแสงและการสูญเสีย (Attenuation หรือ Loss) พลังงานแสงในตัวกลาง เป็นต้น อาจใช้คุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งมาอธิบายก็ถือว่าเพียงพอแล้ว แต่บางครั้งก็จำเป็นต้องอาศัยคุณสมบัติทั้งสองของแสงมาอธิบายร่วมกัน อนุภาคของแสงมีชื่อเรียกว่า โฟตอน (Photon) จะมีความหมายแตกต่างจากนิยามของอนุภาคทั่วไปที่เราเข้าใจกันอยู่บ้าง โดยอนุภาคของแสงจะมีความสัมพันธ์กับพลังงานของแสงที่เปล่งออกหรือถูกดูดกลืนในรูปของพลังงาน ควอนตัม (Quantum) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นแสง ในอะตอมของสารหรือวัสดุที่สามารถเปล่งแสงได้ อิเล็กตรอนของมันจะเรียงตัวกันเป็นวง รอบนิวเคลียสตามระดับชั้นพลังงานที่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับ โครงสร้างอะตอมของสารทั่วไป เมื่ออะตอมได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก อิเล็กตรอนของมันก็จะได้รับการถ่ายทอดพลังงาน จนสามารถเปลี่ยนตำแหน่งไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานอื่นได้ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนไม่สามารถคงอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่แตกต่างไปจากที่เคยอยู่ได้ จึงต้องหาทางคายพลังงานส่วนที่เกินออก เพื่อให้ตัวเองกลับมาอยู่ที่ระดับชั้นพลังงานเดิม พลังงานที่คายออกจะอยู่ในรูปของโฟตอนซึ่งสามารถเปล่งเป็นแสงออกมา ขนาดของพลังงานที่คายออกมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานในสาร (ซึ่งมีค่าไม่เท่ากันในสารต่างชนิดกัน) อีกทั้งเป็นตัวกำหนดสีของแสงที่ปรากฏหรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง เป็นตัวกำหนดความถี่ของคลื่นแสง (Optical frequency) และความยาวคลื่นแสง (Wavelength) ตามความสัมพันธ์ของสมการ (2.1)

$$\Delta E = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

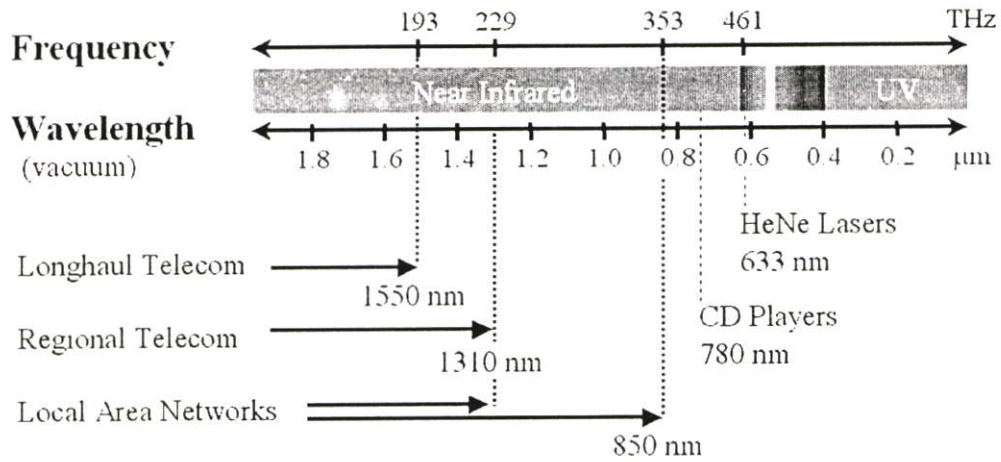
โดยที่ $f = \frac{c}{\lambda}$

- เมื่อ ΔE คือขนาดของพลังงานที่แตกต่างกันในระดับชั้นพลังงาน (พลังงานของโฟตอน)
- h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.625×10^{-34} จูล (Joule)
- c คือความเร็วแสงในอากาศหรือสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที (m/s)
- f คือความถี่ของคลื่นแสงที่เปล่งออกมา มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)
- λ คือความยาวคลื่นของคลื่นแสง มีหน่วยเป็น เมตร (m)

โฟตอนที่เปล่งออกมาในรูปของแสงมีทั้งส่วนที่ตาของมนุษย์มองเห็นและมองไม่เห็น ในส่วนที่ตาของเรามองเห็น จะมีสีแตกต่างกันตามค่าของความถี่หรือความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมา ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 เนื่องจากพลังงานของโฟตอนมีความสัมพันธ์กับค่าของความถี่แสง ดังสมการที่ (2.1) แสดงว่าจำเป็นต้องมีเรื่องของคลื่นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ด้วยเหตุนี้จึงถือเป็นเหตุผลเบื้องต้นที่สามารถอธิบายได้ว่า แสงจะมีทั้งคุณสมบัติการเคลื่อนที่ของอนุภาคเล็กๆ จำนวนมากที่เรียกว่า โฟตอน และคุณสมบัติความเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเวลาเดียวกัน แต่คุณสมบัติความเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง จะมีความสัมพันธ์กับทฤษฎีการทำงานของเส้นใยแก้วมากกว่าคุณสมบัติการเคลื่อนที่ของโฟตอน



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นแสง



รูปที่ 2.2 ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการสื่อสาร

ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นและความถี่ของแสงในย่านที่ตาของคนเรามองเห็น [4], [5]

สีของแสง	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความถี่ (เทอราเฮิรตซ์)
ม่วง	390 – 455	769 – 659
น้ำเงิน	455 – 492	659 – 610
เขียว	492 – 577	610 – 520
เหลือง	577 – 597	520 – 503
ส้ม	597 – 622	503 – 482
แดง	622 – 780	482 – 384

หมายเหตุ : 1 nm (nanometer) = 10^{-9} m, 1 THz (terahertz) = 10^{12} Hz

2.2 คุณสมบัติของแสง

เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางที่เป็นอากาศหรือสุญญากาศ ความเร็วของแสงจะมีค่าคงที่ประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที (300,000 km/s) แต่ถ้าตัวกลางของแสงเปลี่ยนไป แสงที่เดินทางผ่านไปในตัวกลางอื่นจะมีค่าความเร็วลดลง เนื่องจากคุณสมบัติของตัวกลางนั้นๆ ที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวต้านความเร็วของแสง โดยที่อัตราส่วนระหว่างความเร็วปกติของแสงในอากาศ (หรือสุญญากาศ) กับความเร็วของแสงในตัวกลางอื่น เป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอกให้ทราบถึงความสามารถของตัวกลางนั้นๆ ที่ทำให้แสงมีขนาดความเร็วลดลง ตามสมการที่ (2.2)

$$v = \frac{c}{n} \quad \text{หรือ} \quad n = \frac{c}{v} \quad (2.2)$$

- เมื่อ v คือความเร็วของแสงในตัวกลาง
 c คือความเร็วแสงในอากาศหรือสุญญากาศ (3×10^8 m/s)
 n คือดัชนีหักเหของแสง (Refractive index of light) ในตัวกลางที่แสงเดินทางผ่าน

เนื่องจากแสงเดินทางในตัวกลางอากาศหรือสุญญากาศได้เร็วที่สุด ดังนั้นขนาดของความถี่แสงในตัวกลางอื่น จึงมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับความเร็วแสงในอากาศหรือสุญญากาศเสมอ ($v \leq c$) ดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางใดๆ (n) จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 เสมอ ($n \geq 1$: เนื่องจากดัชนีหักเหของแสงในอากาศหรือสุญญากาศมีค่าเท่ากับหนึ่ง) ตัวกลางหรือวัตถุที่มีค่าดัชนีหักเหมากๆ แสดงว่า ความเร็วของแสงในตัวกลางนั้นจะมีค่าน้อยกว่าความเร็วแสงในสุญญากาศมาก ตัวอย่างค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

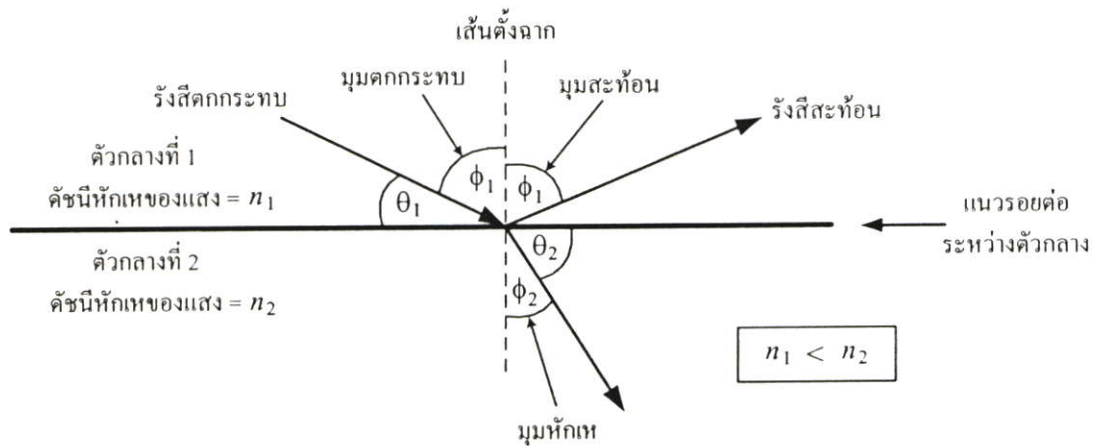
ตารางที่ 2.2 ค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลางต่างๆ [3]

ตัวกลางที่แสงเดินทางผ่าน	ค่าดัชนีหักเหของแสง
สุญญากาศ (Vacuum)	1.00
อากาศ (Air)	1.0003 (~ 1)
น้ำ (Water)	1.33
เอทิล แอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol)	1.36
ฟลูออไรด์ (Fluoride)	1.43
ซิลิกา (Silica) *	1.44-1.48 *
ควอตเหลว (Fused Quartz)	1.46
แก้ว (Glass)	1.50
โซเดียม คลอไรด์ (Sodium Chloride)	1.53
เพชร (Diamond)	2.0

คุณสมบัติเบื้องต้นที่สำคัญของแสงและเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ทฤษฎีของเส้นใยแก้ว ได้แก่ คุณสมบัติการสะท้อน (Reflection) และคุณสมบัติการหักเห (Refraction) ดังนั้นจึงจะกล่าวถึงคุณสมบัติทั้ง 2 เท่านั้น

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลาง (โปร่งแสง) หนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งที่มีค่าดัชนีหักเหแสงแตกต่างกัน แสงส่วนหนึ่งจะสะท้อน (Reflect) จากผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองกลับมายังตัวกลางเดิม ในขณะที่แสงอีกส่วนหนึ่งจะพุ่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สองและเกิดการหักเห (Refract) ทำให้ทิศทางหรือแนวการเดินทางของแสงเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ลำแสงที่สะท้อนเรียกว่า รังสีสะท้อน (Reflected ray) และลำแสงที่หักเห เรียกว่า รังสีหักเห (Refracted ray) หากเรา

จินตนาการลากเส้นสมมติเชื่อมต่อดั้วกลางทั้งสอง โดยกำหนดให้ทำมุมตั้งฉากกับเส้น หรือระนาบรอยต่อระหว่างดั้วกลาง และลากผ่านตำแหน่งที่แสงตกกระทบบตรงบริเวณรอยต่อระหว่างดั้วกลาง เส้นสมมตินี้จะใช้ในการอ้างอิงเพื่อการคำนวณ และจะมีชื่อเรียกว่า เส้นตั้งฉาก (Normal line) มุมที่เกิดจากเส้นตั้งฉากกระทำกับรังสีตกกระทบบเรียกว่ามุมตกกระทบบ (Incident angle) ในทำนองเดียวกันมุมที่เกิดจากเส้นตั้งฉากกระทำกับรังสีสะท้อน เราจะเรียกว่า มุมสะท้อน (Reflected angle) และมุมที่เกิดจากเส้นตั้งฉากกระทำกับรังสีหักเห เราจะเรียกว่า มุมหักเห (refracted angle)



รูปที่ 2.3 การเกิดรังสีสะท้อนและรังสีหักเหจากรังสีตกกระทบบ

จากการสะท้อนของแสง เราทราบว่า มุมตกกระทบบต้องเท่ากับมุมสะท้อน นั่นคือ จากรูปที่ 2.3 จะได้ มุมตกกระทบบ (θ_1) = มุมสะท้อน (ϕ_1) ในขณะที่มุมหักเหจะมีความสัมพันธ์กับมุมตกกระทบบตามกฎของสเนลล์ (Snell's law) ดังนี้ [6]

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2.3)$$

เมื่อ n_1 คือค่าดัชนีหักเหของดั้วกลางที่ 1

n_2 คือค่าดัชนีหักเหของดั้วกลางที่ 2

ในสมการที่ (2.3) สามารถแสดงในรูปตรีโกณมิติของโคซายน์ได้โดยที่ยังคงคุณสมบัติตามกฎของสเนลล์ได้ทุกประการคือ

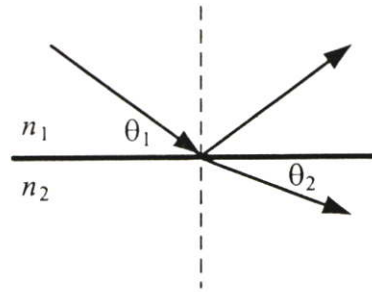
$$n_1 \cos \theta_1 = n_2 \cos \theta_2 \quad (2.4)$$

เมื่อ

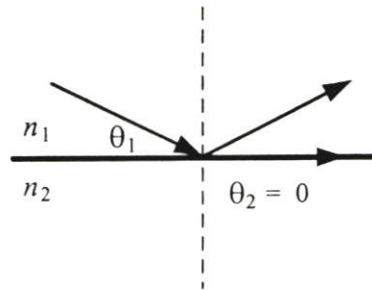
θ_1 คือค่าของมุมตกกระทบที่เกิดจากรังสีตกกระทบกระทำกับแนวรอยต่อระหว่าง 2 ตัวกลาง

θ_2 คือค่าของมุมหักเหที่เกิดจากรังสีหักเหกระทำกับแนวรอยต่อระหว่าง 2 ตัวกลาง

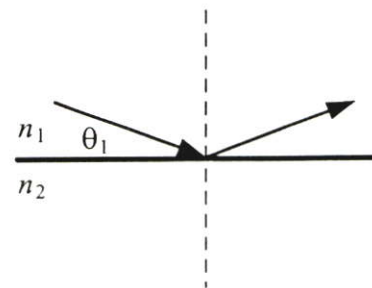
จากกฎของสเนลล์ หากดัชนีหักเหแสงของตัวกลางที่ 1 มีค่ามากกว่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางที่ 2 ($n_1 > n_2$) มุมหักเหจะกว้างกว่ามุมตกกระทบ นั่นคือ รังสีหักเหจะเปลี่ยนแนวการเดินทางออกจากแนวของรังสีตกกระทบในลักษณะที่เบนห่างออกจากเส้นตั้งฉาก ดังรูปที่ 2.4 (ก) ในทางกลับกันหากดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 มีค่าน้อยกว่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 2 ($n_1 < n_2$) รังสีหักเหจะเบนเข้าหาเส้นตั้งฉากดังรูปที่ 2.3



(ก) ($\theta_1 > \theta_c$), $\theta_c =$ มุมวิกฤต (Critical angle)



(ข) ($\theta_1 = \theta_c$), $\theta_c =$ มุมวิกฤต (Critical angle)



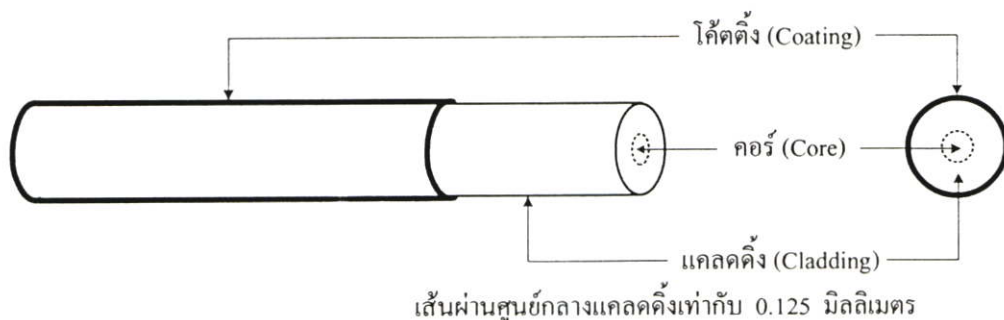
(ค) ($\theta_1 < \theta_c$), $\theta_c =$ มุมวิกฤต (Critical angle)

รูปที่ 2.4 การเกิดมุมวิกฤตระหว่าง 2 ตัวกลางเมื่อ $n_1 > n_2$

ในการเดินทางของแสงจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงมากกว่า ไปยังตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงน้อยกว่า ($n_1 > n_2$) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทิศทางของรังสีหักเหจะถูกกำหนดโดยค่าของมุมตกกระทบตามกฎของสเนลล์ จากรูปที่ 2.4 (ก) จะเห็นว่าหากค่าของมุมตกกระทบ (θ_1) มีค่าลดลงเรื่อยๆ รังสีหักเหจะเบี่ยงเบนออกจากแนวทางเดิม เข้าหาแนวระนาบหรือเส้นรอยต่อระหว่างตัวกลางมากขึ้น เมื่อ θ_1 มีค่าลดลงถึงค่าหนึ่งซึ่งเท่ากับ θ_c รังสีหักเหจะเคลื่อนที่ไปในแนวของระนาบรอยต่อระหว่างตัวกลางดังรูปที่ 2.4 (ข) เหตุการณ์เช่นนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นของปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมด หรือ TIR (Total Internal Reflection) นั้นแสดงว่าจะไม่มีแสงเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 เลย โดยที่มุม θ_c กำหนดนิยามว่าเป็น มุมวิกฤต (Critical angle) ดังนั้น หากค่าของมุม θ_1 มีค่าน้อยกว่าค่าของมุมวิกฤต ($\theta_1 < \theta_c$) แสงจะเกิดการสะท้อนกลับเข้าไปในตัวกลางเดิมเพียงอย่างเดียว โดยจะไม่เกิดการหักเหของแสงเลย

2.3 ลักษณะของเส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้ว หมายถึง เส้นใยโปร่งแสงทรงกระบอกตันขนาดเล็ก มีเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยทั้งเส้นประมาณ 1.25 ไมครอน (ไมโครเมตร) หรือ 0.125 มิลลิเมตร (ขนาดเล็กกว่าเส้นผมเล็กน้อย) โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้วมักเป็นสารประกอบประเภท ซิลิกา หรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งก็คือแก้วบริสุทธิ์ เนื้อแก้วอาจถูกเจือ (Doped) ด้วยสารหรือวัสดุบางอย่าง ที่สามารถควบคุมอัตราการเจือได้ เพื่อให้แก้วมีค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractive index) ตามต้องการ โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยแก้วประกอบด้วยวัสดุโปร่งแสงสองชั้น โดยในแนวแกนกลางของเส้นใยแก้วซึ่งเรียกทับศัพท์ว่า คอร์ (Core) จะมีค่าดัชนีหักเหสูงกว่าส่วนที่อยู่โดยรอบที่ห่างจากแกนกลางออกไป ซึ่งส่วนหลังนี้เรียกว่า แคลดดิ้ง (Cladding) หรือบางคนอาจเรียกสั้นๆ ว่า แคลด (Clad) ทั้งสองส่วนนี้ถ้ามองด้วยตาเปล่าหรือใช้แว่นขยายธรรมดาส่องดู จะแยกไม่ออกเลย โดยจะเห็นเสมือนเป็นเนื้อแก้วชนิดเดียวกัน



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเส้นใยแก้วหรือเส้นใยนำแสง (Optical Fiber)

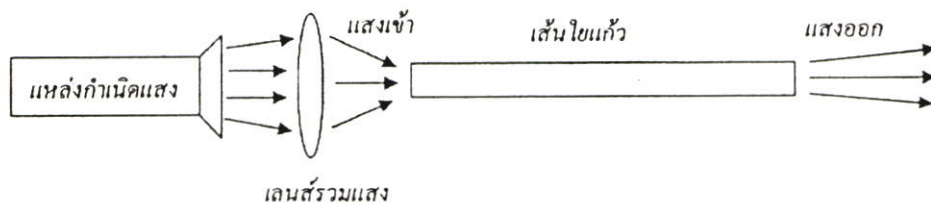
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์จะมีค่าประมาณอยู่ระหว่าง 3 - 62.5 ไมครอน (ไมโครเมตร) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลคดิ่ง ซึ่งมักใช้เป็นตัวกำหนดขนาดของเส้นใยแก้วทั้งเส้นมีค่าประมาณ 80 - 400 ไมครอน ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยแก้ว โดยทั่วไปเส้นใยแก้วที่ใช้ในระบบสื่อสารส่วนใหญ่จะมีขนาดมาตรฐานคือ 125 ไมครอน (0.125 มิลลิเมตร) ในการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วจะกำหนดขนาดของคอร์และของแคลคดิ่งไปพร้อมกัน เช่น 10/125 หมายถึง เส้นใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์เท่ากับ 10 ไมครอน (ระบุโดยตัวเลขด้านหน้า) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลคดิ่งเท่ากับ 125 ไมครอน (ระบุโดยตัวเลขด้านหลัง) โดยปกติจะมีการระบุหน่วยลงไปหลังตัวเลข แต่การที่ไม่ได้ระบุหน่วยลงไปดังตัวอย่างนี้ ถือเป็นที่เข้าใจกันว่า มีหน่วยเป็นไมครอน ข้อสังเกตคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์จะมีส่วนช่วยในการพิจารณาชนิดของเส้นใยแก้ว ตัวอย่าง เช่น เส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว (Single-mode Fiber) จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์เล็ก ประมาณ 3 - 10 ไมครอน ในขณะที่เส้นใยแก้วชนิดโหมดรวม (Multimode Fiber) จะมีขนาดของคอร์ใหญ่กว่า ประมาณ 16 - 65 ไมครอน เป็นต้น

ส่วนของเส้นใยที่เป็นเนื้อแก้วนี้เรียกว่า เส้นใยแก้วเปลือย (Bare Fiber) จะมีความเปราะบางมากเนื่องจากมีขนาดเล็กเท่าเส้นผม จึงต้องทำการเคลือบผิวของมันด้วยสารประกอบซิลิโคน โพลีเมอร์ หรือพลาสติกบางๆ ซึ่งส่วนนี้มักเรียกทับศัพท์ว่า โค้ดดิ้ง (Coating) หรือ แจ็กเก็ต (Jacket) เส้นใยแก้วที่เคลือบผิวด้วยโค้ดดิ้งนี้จะมีความแข็งแรงมาก สามารถรับน้ำหนักและแรงกระแทกธรรมดาได้พอสมควร กล่าวคือ สามารถจับโยนและคัดโค้งงอเป็นวงเล็กๆ ได้ โดยไม่ทำให้เส้นใยแก้วแตกหรือหัก ในการนำเส้นใยแก้วมาใช้งาน จะต้องทำให้เส้นใยแก้วมีความแข็งแรงมากกว่านี้ โดยบรรจุเส้นใยแก้วไว้ภายในส่วนที่ป้องกันแรงกระแทก แล้วจัดโครงสร้างให้มีลักษณะเป็นสายเคเบิลเหมือนสายไฟฟ้า ซึ่งในส่วนนี้ก็จะใช้เทคโนโลยีของสายไฟฟ้าทั่วไป หากต้องการรวบรวมเส้นใยแก้วหลายๆ เส้นเข้าด้วยกัน ก็ทำเป็นลักษณะของสายเคเบิลเส้นใหญ่ๆ ซึ่งสายเคเบิลเส้นหนึ่ง อาจมีเส้นใยแก้วตั้งแต่หลายสิบเส้น จนถึงหลายร้อยเส้นเลยก็ได้ โดยสีของโค้ดดิ้งจะบอกให้ทราบถึงลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันของเส้นใยแก้วแต่ละเส้นที่อยู่ภายในเคเบิลเส้นเดียวกัน ดังนั้นเราจึงเห็นเส้นใยแก้วมีสีต่างๆ เช่น ฟ้ำ ส้ม เขียว น้ำตาล ขาว ฯลฯ ซึ่งก็คือสีของโค้ดดิ้งนั่นเอง ซึ่งโดยปกติแล้ว ตัวเส้นใยแก้วเองจะใส ไม่มีสี ทั้งนี้ก็เพื่อต้องการให้มีความบริสุทธิ์ในเนื้อสารที่ใช้ทำเส้นใยแก้วนั่นเอง

การที่เส้นใยแก้วสามารถนำสัญญาณแสงได้ดี ไม่เพียงเพราะว่าตัวมันเองมีคุณสมบัติโปร่งแสงเท่านั้น แต่ยังเกิดจากโครงสร้างของเส้นใยแก้ว ที่มักกำหนดให้เส้นใยแก้วมีค่าดัชนีหักเหแสงของคอร์มากกว่าค่าดัชนีหักเหแสงของแคลคดิ่งเล็กน้อย ทำให้เกิดปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมด (TIR : Total Internal Reflection) ของแสงที่เดินทางอยู่ภายในส่วนของคอร์ ส่งผลให้แสงทั้งหมดสามารถเดินทางอยู่ภายในเส้นใยแก้วโดยไม่สะท้อนออกไปนอกเส้นทาง และเมื่อแก้วที่ใช้เป็นแก้วบริสุทธิ์ จึงมีผลทำให้แสงส่วนใหญ่เดินทางผ่านไปได้อย่างดีและเดินทางได้ระยะทางไกล

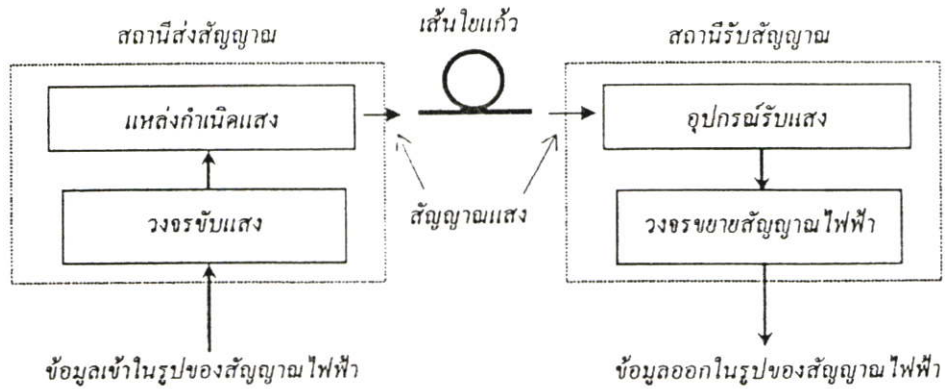
ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเส้นใยแก้ว การที่เส้นใยแก้วแสดงพฤติกรรมของการเป็นท่อนำสัญญาณแสงได้ดีมาก เนื่องจากมีค่าการลดทอนสัญญาณแสงต่ำ (Low Attenuation) ในปัจจุบันสามารถผลิตเส้นใยแก้วให้มีค่าการลดทอนสัญญาณแสงต่ำๆ ได้ โดยมีค่าน้อยกว่า 0.01 dB/km (0.01 ดีบีต่อกิโลเมตร หมายความว่า เมื่อแสงเดินทางไปในเส้นใยแก้วที่มีระยะทาง 1 กิโลเมตร จะสูญเสียกำลังงานไปประมาณ 0.23%) ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับแสงได้อย่างมีประโยชน์มากมาย อย่างไรก็ตาม ค่าการลดทอนสัญญาณแสงของเส้นใยแก้วจะมีค่าขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงหรือสีของแสงที่เดินทางผ่านเนื้อแก้วนั้นด้วย โดยที่ค่าความยาวคลื่นที่ 1,310 และ 1,550 นาโนเมตร จะเกิดการสูญเสียสัญญาณน้อย ทำให้แสงเดินทางไปได้ไกล ดังนั้นระบบสื่อสารจึงนิยมใช้ความยาวคลื่นแสงเหล่านี้

เนื่องจากเส้นใยแก้วมีคุณสมบัติในการนำสัญญาณแสงได้ดี การนำเส้นใยแก้วมาประยุกต์ใช้งานจึงเกี่ยวข้องกับแสงโดยตรง ในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการใช้งานเส้นใยแก้วพื้นฐาน อาจพิจารณาได้จากรูปที่ 2.6 (ก) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงใดๆ (เช่น แสงจากหลอดไฟ) ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้ว เนื่องจากเส้นใยแก้วมีขนาดเล็กมาก ทำให้แสงที่เปล่งออกมาจากแหล่งกำเนิดที่มีขนาดใหญ่กว่าตัวมันมากๆ แสงจะไม่สามารถเข้าไปในเส้นใยแก้วได้หมด จึงอาจใช้เลนส์รวมแสง (เช่น เลนส์นูน) เพื่อให้แสงส่วนใหญ่หรือทั้งหมดเข้าไปในเส้นใยแก้ว แสงที่เดินทางอยู่ภายในเส้นใยแก้วจะมีแนวการเดินทางตามลักษณะทางกายภาพของเส้นใยแก้ว ไม่ว่าเส้นใยแก้วจะโค้งงอในลักษณะใดก็ตาม แสงก็จะถูกส่งออกไปจนกระทั่งถึงปลายทางอีกด้านหนึ่งของเส้นใยแก้ว



(ก) หลักการพื้นฐานทั่วไป

รูปที่ 2.6 หลักการใช้งานเส้นใยแก้ว



(ข) ระบบสื่อสารที่ใช้เส้นใยแก้วเป็นตัวกลาง ส่งข้อมูลไปพร้อมกับสัญญาณแสง

รูปที่ 2.6 หลักการใช้งานเส้นใยแก้ว (ต่อ)

รูปที่ 2.6 (ข) เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งในการนำเส้นใยแก้วมาใช้ร่วมกับระบบการสื่อสารข้อมูล จะเห็นว่ารูปแบบการใช้งานมีการเพิ่มเติมจากรูปที่ 2.6 (ก) คือแหล่งกำเนิดแสงจะถูกควบคุมด้วยวงจรขับแสง ให้มีค่าความสว่างหรือความเข้มของแสง ที่มีรูปแบบแน่นอนตามสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามา สัญญาณไฟฟ้านี้มักเป็นข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสารในระบบสื่อสารทางไฟฟ้าทั่วไป การกระทำเช่นนี้เรียกว่า การมอดูเลต (Modulate) ซึ่งก็คือการทำให้ข้อมูลสามารถเดินทางร่วมกับสัญญาณแสงได้ตลอดเวลาที่แสงเดินทาง สัญญาณแสงที่บรรจุข้อมูลทางไฟฟ้า (หรือเรียกว่า ข้อมูลแสง) ที่ออกจากเส้นใยแก้ว จะถูกตรวจจับและแปลงรูปกลับให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับแสง ก่อนถูกส่งผ่านวงจรขยาย เพื่อให้ได้สัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าที่พร้อมใช้งานต่อไป จากตัวอย่างในรูปที่ 2.6 (ข) จะเห็นว่าระบบสื่อสารด้วยแสงมีหลักการทำงานคล้ายกับระบบสายเคเบิลทางไฟฟ้าที่ใช้กันมานานแล้ว เพียงแต่เปลี่ยนส่วนของตัวนำข้อมูลไฟฟ้าจากสายเคเบิลทองแดง เปลี่ยนให้เป็นระบบของเส้นใยแก้วเท่านั้น

2.4 วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว

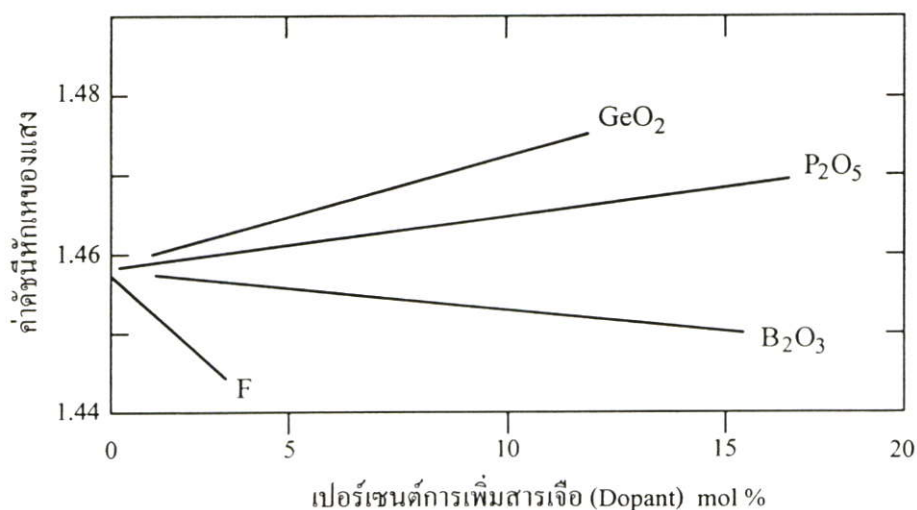
เนื่องจากเส้นใยแก้วมีคุณสมบัติในการนำสัญญาณแสงได้ดี วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว จึงต้องเป็นวัสดุโปร่งแสงที่มีความบริสุทธิ์ของเนื้อสาร การเลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกันย่อมมีผลต่อคุณสมบัติการนำแสงของเส้นใยแก้วด้วย สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม นอกเหนือจากการเป็นวัสดุโปร่งแสงแล้ว ต้องมีผลทำให้เส้นใยแก้วมีความแข็งแรงพอที่จะทำให้เป็นเส้นกลมเล็กๆ ที่มีความยาวมากๆ ได้ โดยไม่แตกหักง่าย ตัววัสดุต้องมีส่วนทำให้ค่าการลดทอนสัญญาณ (Attenuation) ของแสงมีค่าน้อย และต้องสามารถผสมสารอื่นหรือได้ไปสารอื่นเพิ่มเติม เพื่อทำให้ค่าดัชนีหักเหของแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ก็เพื่อต้องการให้

เส้นใยแก้วมีคุณสมบัติในการนำสัญญาณแสงได้ดีที่สุดในบางครั้งวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้วยังใช้ในการกำหนดชนิดของเส้นใยแก้วอีกด้วย ดังต่อไปนี้

2.4.1 เส้นใยแก้วชนิดแก้ว

เส้นใยแก้วที่ใช้กันทั่วไปมักทำมาจากแก้วใสโปร่งแสง ที่ประกอบด้วยวัสดุประเภทซิลิกา (SiO_2) เป็นสำคัญ ค่าดัชนีหักเหของแก้วมักมีค่าประมาณ 1.458 ที่ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของแก้ว ทำได้โดยการเจือปนสารอื่นหรือโด๊ป (Doping) สารอื่นเพิ่มเติม เช่น หากทำการเจือปนสารประกอบประเภทเจอร์เมเนียม (GeO_2) หรือฟอสฟอรัส (P_2O_5) เข้าไป จะช่วยเพิ่มค่าดัชนีหักเหของแก้วให้สูงขึ้น ในกรณีที่ต้องการทำให้ค่าดัชนีหักเหของแก้วลดลง จะเจือด้วยสารประกอบประเภทฟลูออไรด์ (F) หรือ โบรอน (B_2O_3) เข้าไป ค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เปลี่ยนไปเนื่องจากเจือปนสาร จะมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณของสารเจือปนที่เพิ่มเข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จากเหตุผลดังกล่าว วัสดุที่เป็นส่วนประกอบของคอร์ อาจประกอบด้วยสารประกอบประเภทเจอร์เมเนียมหรือฟอสฟอรัส เพื่อทำให้ค่าดัชนีหักเหของคอร์มีค่าสูงกว่าดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง ที่อาจเป็นซิลิกาเพียงอย่างเดียวหรือถูกเจือด้วยสารโบรอน ในทำนองเดียวกัน วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบของคอร์ อาจเป็นวัสดุประเภทซิลิกาธรรมดา ในขณะที่ส่วนของแคลดดิ้งอาจถูกเจือด้วยสาร โบรอน เป็นต้น

โครงสร้างทางโมเลกุลของแก้วมีผลทำให้จุดหลอมเหลวมีค่าสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งถือเป็นข้อดีของการทนทานต่ออุณหภูมิสูง แต่ก็ถือเป็นข้อเสียในการผลิต อย่างไรก็ตาม ปัญหาดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงได้ เมื่อใช้เทคนิคการผลิตชนิดเคลือบไอระเหย (Vapour deposition) นอกจากนี้ แก้วยังมีคุณสมบัติทนทานต่อสารเคมี อีกทั้งสามารถนำแสงได้ดีตลอดย่านที่ตามองเห็น ไปจนถึงย่านแสงอินฟราเรดที่ตามองไม่เห็น



รูปที่ 2.7 ผลของสารเจือกับค่าดัชนีหักเหของแก้วที่เปลี่ยนไป [5], [7]

2.4.2 เส้นใยแก้วชนิดพลาสติก

การใช้พลาสติกโปร่งใสเป็นวัสดุในการทำเส้นใยแก้ว ช่วยลดต้นทุนการผลิต ทำให้เส้นใยแก้วมีราคาถูกลง แต่ก็มีข้อเสียตรงที่ค่าการลดทอนสัญญาณแสงสูง โดยทั่วไปพลาสติกจะมีความยืดหยุ่นสูงกว่าแก้ว ทำให้ไม่สามารถสร้างคอร์ให้มีขนาดเล็กมากๆ เหมือนกับแก้วได้ ประกอบกับการกำหนดค่าความแตกต่างของดัชนีหักเหของแสงระหว่างคอร์กับแคลดดิ้ง มักจะมีค่ามากกว่าวัสดุประเภทแก้ว ค่าของ NA ของเส้นใยแก้วชนิดพลาสติกจึงมีค่าสูง นั่นหมายถึง มุมในการรับแสงของเส้นใยแก้วชนิดพลาสติกจะเปิดกว้าง ทำให้สามารถใช้ร่วมกับตัวส่งสัญญาณแสงราคาถูกลงที่มีพื้นที่เปล่งแสงกว้างได้ดี ดังนั้นเส้นใยแก้วชนิดพลาสติกจึงมักเป็นชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ แบบโหมดร่วม ตัวอย่างวัสดุของเส้นใยแก้วชนิดพลาสติก อาจประกอบด้วย

1. โพลีสเตอร์ริน (Polysterene) เป็นส่วนของคอร์ ($n_1 = 1.6$) โดยมีเมตทาครีเลต (Methacrylate) เป็นส่วนของแคลดดิ้ง ($n_2 = 1.49$) หรือ
2. โพลีเมททิล (Polymetmethy) เป็นส่วนของคอร์ ($n_1 = 1.49$) โดยมีโคโพลิเมอร์ (Copolymer) เป็นส่วนของแคลดดิ้ง ($n_2 = 1.40$) เป็นต้น

แม้ว่าเส้นใยแก้วชนิดพลาสติกจะมีคุณสมบัติการนำสัญญาณแสงได้ไม่ด้นัก แต่ก็เหมาะสมสำหรับงานสื่อสารในระยะทางสั้นๆ (ไม่กี่ร้อยเมตร) เพราะมีต้นทุนต่ำ และค่าการลดทอนสัญญาณยังไม่มีผลต่อระบบมากนัก การเพิ่มประสิทธิภาพของเส้นใยแก้วชนิดนี้ให้สูงขึ้น อาจทำได้โดยการออกแบบใช้โครงสร้างร่วมกันระหว่างแก้วกับพลาสติก กล่าวคือ ใช้แก้วเป็นส่วนของคอร์ และใช้พลาสติกพวกสาร โพลีเมอร์ (Polymer) เป็นส่วนของแคลดดิ้ง ซึ่งเส้นใยแก้วประเภทนี้ มีชื่อเรียกว่า Plastic-Clad-Silica หรือเรียกย่อๆ ว่า PCS

ในอดีตที่ผ่านมาเส้นใยแก้วชนิดพลาสติกมิได้มีบทบาทในการนำมาใช้งานที่เป็นสายส่งสัญญาณในระบบสื่อสารมากนัก เนื่องจากมีค่าการลดทอนสัญญาณสูงตามที่กล่าวมาแล้ว แต่ในปัจจุบัน เส้นใยแก้วชนิดโพลีเมอร์ซึ่งเป็นสารประกอบของพลาสติกกลับได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น และกำลังอยู่ในระหว่างการวิจัยและพัฒนา เพื่อนำมาใช้เป็นอุปกรณ์เฉพาะทางในงานด้านระบบสวิตช์และสื่อข้อมูลแสง แม้ว่าเส้นใยแก้วชนิดโพลีเมอร์ จะแสดงคุณสมบัติเด่นบางประการ แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่พอสมควร โดยเฉพาะการนำวัสดุประเภทโพลีเมอร์มาร่วมขบวนการผลิต ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ประกอบการและสภาพแวดล้อมอย่างมาก เพราะในระหว่างขั้นตอนดังกล่าวจะทำให้เกิดสารพิษที่เป็นอันตรายขึ้นมาได้ง่าย

2.4.3 เส้นใยแก้วชนิดอื่นๆ

นอกเหนือจากแก้วและพลาสติกที่มักนิยมใช้เป็นวัสดุหลัก สำหรับทำเส้นใยแก้วแล้ว การนำสารประกอบอื่นของแก้วเข้ามาใช้ ก็กำลังเริ่มมีบทบาทในวงการเส้นใยแก้วมากขึ้น [7] เส้นใยแก้วที่ทำมาจากวัสดุประเภทแก้วฟลูออไรด์ (Fluoride glass) ที่มีฟลูออไรด์เป็นสารประกอบหลัก

เช่น ZrF_4 , BaF_2 , LaF_3 , AlF_3 และ NaF ต่างก็ช่วยให้เส้นใยแก้วชนิดฟลูออไรด์มีคุณสมบัติที่มีค่าการลดทอนสัญญาณต่ำ คือ ประมาณ 0.001 - 0.01 ดิบต่อกิโลเมตร (0.01 dB/km ที่ความยาวคลื่น 2.5 ไมครอน) แต่ก็มีข้อเสียตรงที่ขั้นตอนการผลิตเส้นใยแก้วที่มีความยาวมากๆ ไม่สามารถกระทำได้ง่ายเหมือนเส้นใยแก้วทั่วไป เส้นใยแก้วชนิดนี้จึงมักถูกใช้ในงานวิจัย ที่ต้องการใช้งานเส้นใยแก้วในช่วงความยาวสั้นๆ เท่านั้น

เส้นใยแก้วชนิดที่ทำมาจากหมู่ธาตุหายาก (Rare – earth elements) 2 ชนิด คือ เออร์เบียม (Erbium) และนีโอดีเมียม (Neodmium) โดยการได้ปสารแต่ละชนิดเข้าไปกับแก้วบริสุทธิ์ มีประโยชน์มากในการใช้งานเส้นใยแก้วที่เกี่ยวกับการขยายสัญญาณแสงภายในเส้นใยแก้ว ในรูปของสัญญาณแสงโดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องแปลงสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อน ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่กำลังถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นมาจากเส้นใยแก้วชนิดนี้ ได้แก่ เส้นใยแก้วเลเซอร์ (Fiber laser) และอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงหรือออปติคอลแอมพลิฟายเออร์ (Optical Amplifier) เป็นต้น

2.5 พารามิเตอร์พื้นฐานของเส้นใยแก้ว

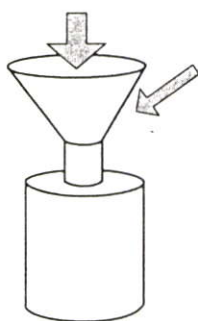
ในการศึกษาเกี่ยวกับเส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งาน จำเป็นที่จะต้องทราบถึงพารามิเตอร์พื้นฐานของเส้นใยแก้ว เพื่อประโยชน์ในการออกแบบเส้นใยแก้วและระบบสื่อสารเชิงแสงที่ใช้เส้นใยแก้วเป็นสายส่งสัญญาณ พารามิเตอร์เบื้องต้นที่สำคัญของเส้นใยแก้ว มีดังนี้

2.5.1 ค่าดัชนีหักเหของสารที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว

ในกรณีของเส้นใยแก้วโดยทั่วไป ค่าดัชนีหักเหของคอร์ จะมีค่าประมาณ 1.479 ซึ่งถือเป็นค่าดัชนีหักเหของแก้วบริสุทธิ์หรือซิลิกา (SiO_2) ในขณะที่ค่าดัชนีหักเหของแคลดดิ้ง มักจะมีค่าต่ำกว่าอยู่เล็กน้อยคือมีค่าประมาณ 1.457 อันเป็นผลมาจากการเจือหรือโด๊ป (Doped) สารอื่นปนเข้าไปในเนื้อแก้วบริสุทธิ์ ในขณะที่เส้นใยแก้วบางชนิดอาจใช้เนื้อแก้วบริสุทธิ์เป็นแคลดดิ้ง แล้วทำการเติมสารเจือ (Doped) เข้าไปในส่วนของแก้วที่เป็นคอร์ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหเพิ่มขึ้น การที่ค่าดัชนีหักเหของคอร์และแคลดดิ้งเป็นไปในลักษณะเช่นนี้ ก็เพื่อต้องการให้เกิดปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมด (TIR) ของแสงในเส้นใยแก้ว นอกจากนี้ยังช่วยกำหนดมุมในการรับแสงเข้าสู่เส้นใยแก้วอีกด้วย

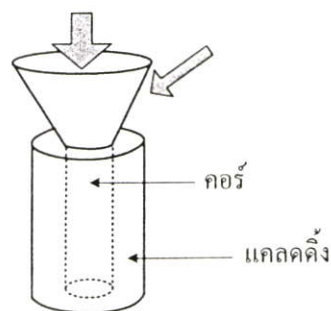
2.5.2 Numerical Aperture

หน้าลงไปในขวดผ่านกรวย



(ก) ขวดน้ำ

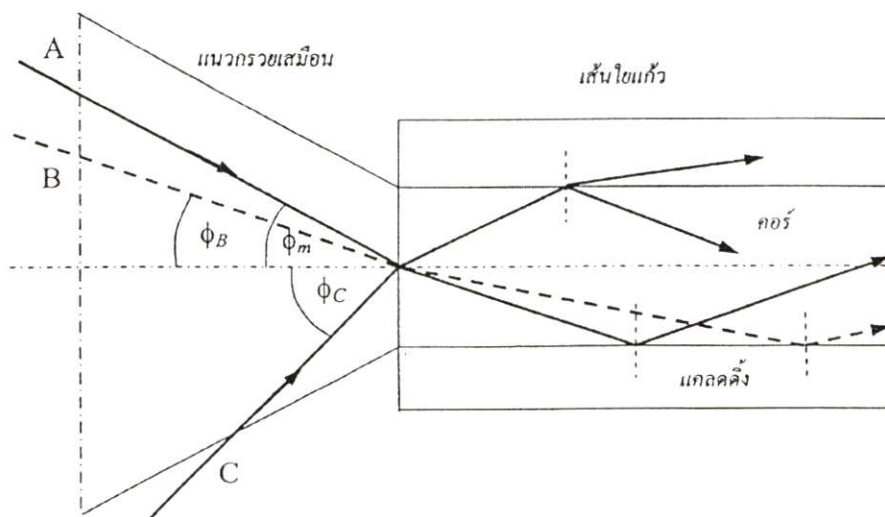
ส่งแสงเข้าไปในเส้นใยแก้ว



(ข) เส้นใยแก้ว

รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบลักษณะความหมายของ Numerical Aperture

ค่าของนิวเมอริคอลอะเพอเจอร์ (Numerical Aperture) หรือ NA เป็นพารามิเตอร์ที่บอกขอบเขตหรืออาณาบริเวณที่ปลายเส้นใยแก้ว สำหรับรับแสงเข้าไปในเส้นใยแก้วหรือปล่อยแสงออกจากเส้นใยแก้ว ทั้งนี้ให้ลองจินตนาการเปรียบเทียบตอนปลายเส้นใยแก้วเสมือนเป็นปากขวดใส่น้ำที่มีกรวยสอดอยู่ ดังรูปที่ 2.8 เมื่อต้องการกรอกน้ำใส่ขวด จะต้องควบคุมให้น้ำเข้าไปในกรวยเท่านั้น หากน้ำที่เทลงไปอยู่ในทิศทางหรือมุมที่กรวยรับไม่ได้ น้ำก็ไม่สามารถจะไหลเข้าขวดได้ ในทำนองเดียวกันลำแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วแล้วสามารถเดินทางอยู่ในคอร์ตลอดระยะทาง จะต้องทำมุมกับปลายเส้นใยแก้วให้อยู่ภายในขอบเขตของกรวยเสมือนดังรูปที่ 2.8 (ข) หากแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วทำมุมมากกว่าความกว้างของปากกรวย ดังเช่น แสงในแนว C ของรูปที่ 2.9 แสงอาจเดินทางเข้าไปในส่วนของคอร์ได้ แต่เมื่อแสงไปกระทบรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลคคิง แสงบางส่วนจะทะลุออกไปในส่วนของแคลคคิง และเมื่อแสงกระทบรอยต่อระหว่างคอร์และแคลคคิงไปเรื่อยๆ พลังงานก็จะสูญเสียเพิ่มขึ้นและหมดไปในที่สุดเพียงช่วงระยะทางสั้นๆ ของการเดินทางในเส้นใยแก้วเท่านั้น



รูปที่ 2.9 มุมสูงสุด (ϕ_m) ที่รองรับแสงสำหรับการเดินทางของแสงตลอดความยาวเส้นใยแก้ว

ขนาดความกว้างของปากกรวยสมมติด้วยค่าของมุม ϕ_m ที่ทำกับแกนกลางของเส้นใยแก้ว ซึ่งถือเป็นค่ามุมสูงสุดในการรับแสง (Acceptance angle) เพื่อให้แสงเดินทางอยู่ภายในคอร์ได้ตลอดการเดินทางจากปลายด้านหนึ่งสู่ปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นใยแก้ว โดยไม่มีการสูญเสียกำลังงานแสงเข้าสู่แคลดดิ้ง ซึ่งสัมพันธ์กับค่าของ NA ตามสมการ $NA = \sin(\phi_m)$ เมื่อ ϕ_m คือค่ามุมสูงสุดของการรับแสง และเมื่อพิจารณาปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสงในเส้นใยแก้ว จากรูปที่ 2.9 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า NA กับค่าดัชนีหักเหของคอร์และแคลดดิ้ง ดังนี้

$$NA = \sin(\phi_m) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.5)$$

นอกจากนี้ ค่าของ NA ยังสามารถแสดงได้ในเทอมของ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าดัชนีหักเหของคอร์กับแคลดดิ้ง (Refractive index difference) ซึ่งค่าความแตกต่างนี้แทนด้วยสัญลักษณ์ Δ และมีค่าเป็นดังสมการที่ (2.6) [8]

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{NA^2}{2n_1^2} \quad (2.6)$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการที่ (2.5) ให้ประกอบด้วยเทอมของสมการที่ (2.6) จะได้

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.7)$$

เส้นใยแก้วที่มีค่าของ NA มากจะมีมุมรองรับแสง (ϕ_m) กว้าง หรือเสมือนกับมีปากกรวยรับแสงกว้าง ในขณะที่เมื่อ NA มีค่าน้อยก็จะมีมุมรองรับแสง (ϕ_m) ของเส้นใยแก้วก็จะเล็ก หรือมีปากกรวยรับแสงเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เส้นใยแก้วที่มีมุมรองรับแสงต่างกันขึ้นอยู่กับค่าของ NA

ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งก็คือ การที่เส้นใยแก้วที่มีมุมรองรับแสงมาก (NA มีค่ามาก) ทำให้สามารถส่งแสงเข้าไปในเส้นใยแก้วได้มากกว่าเส้นใยแก้วที่มีค่า NA น้อยๆ ในทำนองเดียวกัน จำนวนโหมดของแสงที่เดินทางอยู่ภายในเส้นใยแก้วก็จะมีจำนวนมากกว่าด้วย ดังนั้นในบางครั้งเราอาจบอกได้ทันทีว่า เส้นใยแก้วที่มีค่า NA มากมักจะเป็นชนิดโหมดร่วม (Multimode Fiber) ในขณะที่เส้นใยแก้วที่มีค่า NA น้อยๆ มักจะเป็นชนิดโหมดเดี่ยว (Single-mode Fiber)

2.5.3 ค่าการลดทอนสัญญาณ

ค่าการลดทอนสัญญาณของแสงในเส้นใยแก้ว (Fiber Attenuation หรือ Fiber Loss) หรือเรียกสั้นๆ ว่า การลดทอนสัญญาณ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ที่ทำให้แสงซึ่งเดินทางในเส้นใยแก้วสูญเสียกำลังงาน ส่งผลให้มีค่าความเข้มแสงลดลงไปตามระยะทาง การที่เส้นใยแก้วมีการลดทอนสัญญาณต่ำจะทำให้แสงสามารถเดินทางไปได้ไกล โดยปกติเส้นใยแก้วแต่ละชนิดจะมีความการลดทอนสัญญาณไม่เท่ากัน อีกทั้งเส้นใยแก้วเส้นเดียวกัน ก็มีค่าการลดทอนสัญญาณไม่เท่ากัน เมื่อแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วนั้นมีค่าความยาวคลื่นแตกต่างกัน

2.5.4 ผลคูณระหว่างแบนด์วิธกับระยะทาง

ผลคูณระหว่างแบนด์วิธกับระยะทางหรือ Bandwidth-Distance Product เป็นพารามิเตอร์ที่บอกให้ทราบค่าของแบนด์วิธสูงสุดหรือปริมาณข้อมูลมากที่สุด ที่สามารถส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วเส้นนั้นได้ โดยข้อมูลไม่มีการบกร่องสูญหาย ปกติแล้วเส้นใยแก้วที่มีระยะทางไกลจะรับส่งปริมาณของข้อมูลได้มากกว่าเส้นใยแก้วชนิดเดียวกัน แต่มีระยะทางไกลออกไป ดังนั้นเพื่อไม่ให้ต้องมากังวลเกี่ยวกับระยะทางในแต่ละกรณีที่มีการใช้งานเส้นใยแก้ว จึงได้มีการกำหนดพารามิเตอร์นี้ขึ้นมา เพื่อใช้แสดงค่าของแบนด์วิธต่อหน่วยความยาว ตัวอย่างเช่น เส้นใยแก้วเส้นหนึ่งมีค่า Bandwidth-Distance Product เท่ากับ 100 MHz-Km หมายความว่า หากใช้เส้นใยแก้วชนิด

นี้เชื่อมต่อระหว่างสถานีเป็นระยะทาง 1 กิโลเมตร (Km) จะรับส่งปริมาณข้อมูลได้สูงสุดไม่เกิน 100 MHz แต่ถ้าระยะห่างระหว่างสถานีเป็น 10 กิโลเมตร จะรับส่งปริมาณข้อมูลได้ลดลง โดยสูงสุดไม่เกิน 10 MHz เป็นต้น จากตัวอย่างนี้ สามารถสร้างสมการเพื่อคำนวณค่าของแบนด์วิดท์สูงสุด (B) ได้ดังนี้

$$B = \frac{B_L}{L} \quad (2.8)$$

เมื่อ B_L คือค่า Bandwidth-Distance Product

L คือระยะทางที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล

จากสมการ (2.8) จะเห็นว่าหน่วยของระยะทางจะถูกลบออกไป เหลือเพียงแต่หน่วยของแบนด์วิดท์เท่านั้น สำหรับหน่วยของ Bandwidth-Distance Product เมื่อคำนึงถึงระบบแอนะล็อก (Analog) จะมีหน่วยเป็น ความถี่-ระยะทาง หรือ ทิศในเทอมของระบบดิจิทัลจะมีหน่วยเป็น อัตราการส่งข้อมูล (Bit-rate) - ระยะทาง

2.6 ชนิดของเส้นใยแก้ว

การจำแนกเส้นใยแก้วเป็นชนิดต่างๆ สามารถกำหนดได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้สิ่งใดในการพิจารณา โดยทั่วไปที่นิยมจำแนกเส้นใยแก้วจะพิจารณาอยู่ 2 ประการ คือ

1. จำแนกตามโครงสร้างของเส้นใยแก้ว
2. จำแนกตามโหมดการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้ว

2.6.1 การจำแนกเส้นใยแก้วตามโครงสร้างของเส้นใยแก้ว

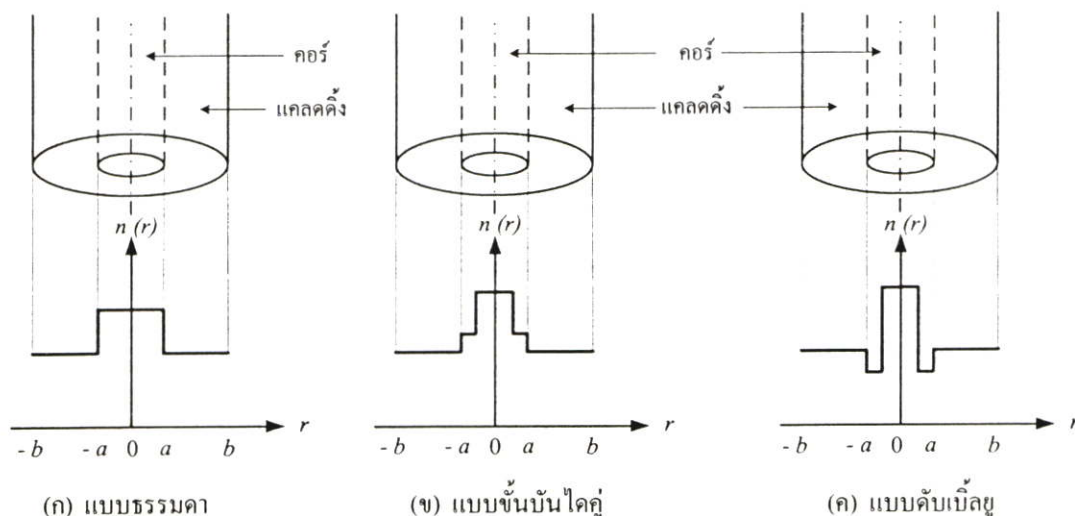
2.6.1.1 เส้นใยแก้วชนิดแกนสมมาตร (Axisymmetrical Optical Fiber)

เส้นใยแก้วที่เห็นกันอยู่ทั่วไป มักมีโครงสร้างเป็นแบบแกนสมมาตร (Axisymmetry) กล่าวคือ รูปร่างของกราฟที่แสดงค่าดัชนี (Refractive index profile) ในทิศทางที่ออกจากแกนกลางของเส้นใยแก้ว (Fiber axis) หรือจุดศูนย์กลางของเส้นใยแก้วในแนวรัศมี (r) จะมีลักษณะที่สมมาตรกัน ซึ่งสามารถจำแนกย่อยออกไปได้อีก คือ

1. เส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (Stepped-Index Fiber)

เส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (มักใช้สัญลักษณ์ย่อว่า SI) หมายถึงเส้นใยแก้วที่ค่าดัชนีหักเหของคอร์และของแคลดดิ้งมีค่าคงที่ ในการแสดงค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้ว มักแสดงด้วยลักษณะของกราฟในแนวภาคตัดขวางหรือแนวหน้าตัดของเส้นใยแก้ว เรียกว่า Refractive index profile โดยค่าดัชนีหักเหจะเป็นฟังก์ชันของรัศมี (r) เส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์นี้ จะมี

กราฟเป็นลักษณะของชั้นบันได ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าดัชนีหักเหที่มีค่าคงที่ในช่วงระยะหนึ่งของแนวรัศมีดังรูปที่ 2.11 ค่าของดัชนีหักเหจากกราฟในแนวแกนตั้งแทนด้วยสัญลักษณ์ $n(r)$ เนื่องจากเป็นฟังก์ชันของรัศมี r



รูปที่ 2.11 เส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ แบบต่างๆ

รูปที่ 2.11 (ก) เป็นตัวอย่างของเส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์แบบธรรมดา โดยที่คอร์จะมีค่าดัชนีหักเหที่ตลอดเนื้อสาร (Uniform-core Optical Fiber) ซึ่งสามารถแสดงสมการของ $n(r)$ ได้ดังนี้

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & 0 \leq r \leq a \\ n_2 = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta}, & a \leq r \leq b \end{cases} \quad (2.9)$$

- เมื่อ r คือระยะในแนวรัศมีที่พุ่งออกจากแกนกลาง (หรือจุดศูนย์กลาง) ของเส้นใยแก้ว
 a คือรัศมีของคอร์
 b คือรัศมีของแคลดดิ้ง (หรือรัศมีของเส้นใยแก้วนั่นเอง)
 Δ คือพารามิเตอร์ที่แสดงค่าความแตกต่างของดัชนีหักเห (Refractive index difference) ระหว่างคอร์และแคลดดิ้งของเส้นใยแก้ว ที่มีค่าตามสมการ (2.6)

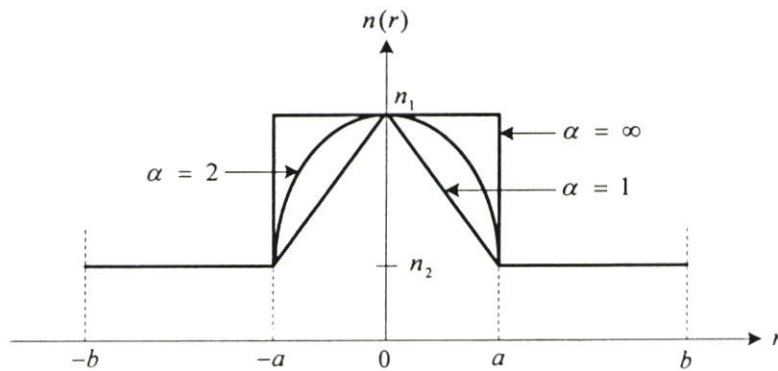
สำหรับรูปที่ 2.11 (ข) เป็นตัวอย่างของเส้นใยแก้วแบบชั้นบันไดคู่ที่มีค่าดัชนีหักเหของคอร์คงที่อยู่สองค่า (Dual-shape-core Optical Fiber) และรูปที่ 2.11 (ค) เป็นตัวอย่างของเส้นใยแก้วที่มีค่าดัชนีหักเหของคอร์คงที่อยู่สองค่าเช่นกัน แต่รูปร่างของกราฟมีลักษณะคล้ายตัวดับเบิลยูในภาษาอังกฤษ (W-type Optical Fiber)

2. เส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็กซ์ (Graded-Index Fiber)

เส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็กซ์ (ใช้สัญลักษณ์ย่อคือ GRIN หรือ GI) หรือบางคนจะเรียกว่าเป็นชนิดดัชนีลาด หมายถึง เส้นใยแก้วที่มีค่าดัชนีหักเหของคอร์เปลี่ยนแปลงไปตามแนวรัศมีที่พุ่งออกจากแกนกลางของเส้นใยแก้ว โดยทั่วไปที่ตำแหน่งศูนย์กลางของเส้นใยแก้วมักมีค่าดัชนีหักเหสูงสุด จากนั้นค่าดัชนีหักเหจะค่อยๆ ลดลงไปตามระยะทางที่ห่างออกจากแนวศูนย์กลางตามลำดับ จนมีค่าเท่ากับค่าดัชนีหักเหของแคลดดิ้งในตำแหน่งที่คอร์ต่อกับแคลดดิ้งพอดี ในขณะที่ค่าดัชนีหักเหของแคลดดิ้งจะมีค่าคงที่ตลอดเนื้อสาร ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็กซ์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของคอร์อย่างค่อนเนื่อง สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ขึ้นกับค่ารัศมีหรือ $n(r)$ ดังนี้

$$n^2(r) = \begin{cases} n_1^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right], & 0 \leq r \leq a \\ n_1^2 (1 - 2\Delta) = n_2^2, & a \leq r \leq b \end{cases} \quad (2.10)$$

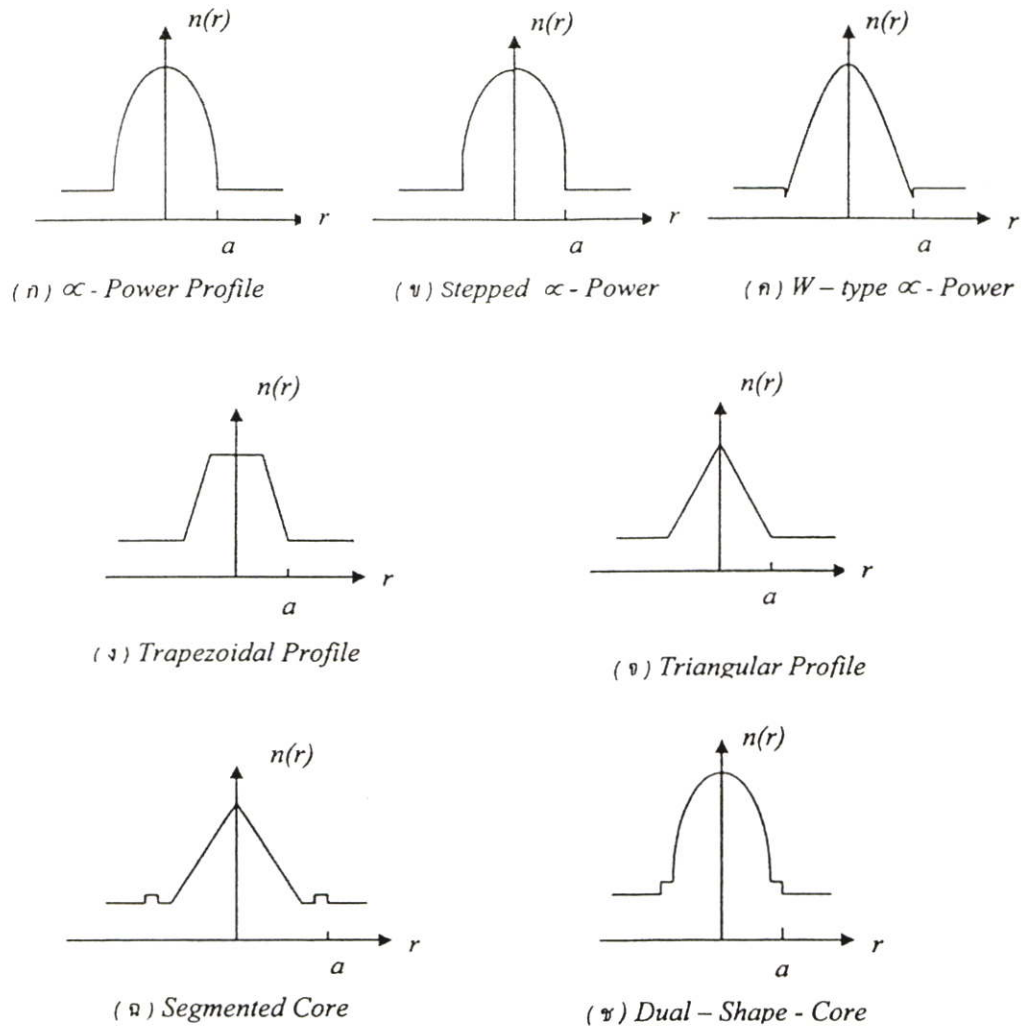
เมื่อ r , a , b และ Δ เป็นตัวแปรที่ได้แสดงนิยามไว้แล้วในตอนต้น α หรือ ตัวเลขยกกำลัง (Power-law) คือพารามิเตอร์ที่กำหนดรูปร่างของกราฟที่แสดงค่าดัชนีหักเห (Refractive index profile)



รูปที่ 2.12 รูปร่างของกราฟที่แสดงค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วที่มีค่าของ α ต่างๆ

จากรูปที่ 2.12 ถ้า $\alpha = 1$ รูปร่างของกราฟที่แสดงค่าดัชนีหักเหของคอร์หรือค่าของ $n(r)$ ในช่วงของ $0 \leq r \leq a$ จะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular profile) ในขณะที่ถ้า $\alpha = 2$ เส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็กซ์จะมีรูปร่างของกราฟในช่วงเดียวกันนี้เป็นรูปพาราโบลาเรียกว่า Parabolic profile fiber และถ้า α มีค่ามากขึ้นไปเรื่อยๆ รูปกราฟจะมีลักษณะโค้งออกมากขึ้นตามค่าของ α จนในที่สุดเมื่อ α มีค่าเป็นอนันต์หรือ $\alpha = \infty$ (Infinity) สมการ

ที่แสดงค่าของ $n(r)$ จะมีรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.9) และเส้นใยแก้วจะจัดอยู่ในประเภทสตีป-อินเด็กซ์แบบธรรมดา [5], [10]



รูปที่ 2.13 เส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็กซ์ในรูปแบบต่างๆ

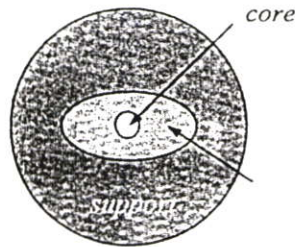
รูปร่างของกราฟที่แสดงค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็กซ์สามารถดัดแปลงให้มีรูปร่างแตกต่างไปจากของเดิมได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้ดีขึ้น [8] ลักษณะของเส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็กซ์รูปแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) โดยที่รูป 2.13 (ก), (ข) และ (ค) ถูกออกแบบเพื่อลดการกระเจิงของสัญญาณแสงที่เป็นโหมดร่วม (Multimode dispersion) เส้นใยแก้วในรูปที่ 2.13 (ง), (จ), (ฉ) และ (ช) เป็นเส้นใยแก้วชนิด ดิสเพอร์ชันชิฟต์เค็ด (DSF : Dispersion Shifted Fiber) แต่เส้นใยแก้วชนิด เช็กเมนต์เค็ดเคอร์ในรูป (ฉ) และชนิด คูอัลเซป

คอร์ ในรูป (ข) จะมีคุณสมบัติการใช้งานดีกว่า โดยเฉพาะเมื่อต้องมีการต่อเชื่อมเส้นใยแก้วหรือทำการโค้งงอเส้นใยแก้วในขณะที่เดินสายเพื่อติดตั้งใช้งาน

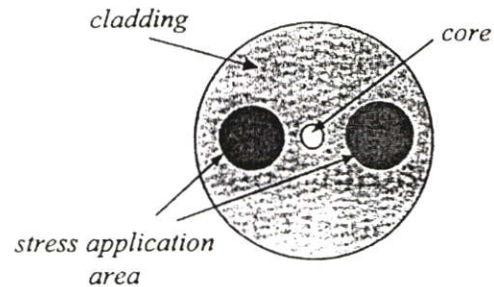
2.6.1.2 เส้นใยแก้วชนิดแกนไม่สมมาตร (Non-Axisymmetrical Optical Fiber)

เส้นใยแก้วชนิดแกนไม่สมมาตร (Non-axisymmetry) มักถูกออกแบบเพื่อการใช้งานแบบโหมดเดี่ยว มีความสามารถในการรักษาทิศทางของโพลาไรเซชันให้คงเดิมได้ตลอดระยะทางที่แสงเดินทางในเส้นใยแก้ว [9] ซึ่งถือว่ามีเหมาะสมมากกับระบบสื่อสารด้วยแสงชนิดโคฮีเรนต์ (Coherent optical communication) เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติเช่นนี้เรียกว่า PMF (Polarization Maintaining Fiber) ซึ่งสามารถจำแนกย่อยได้ดังนี้

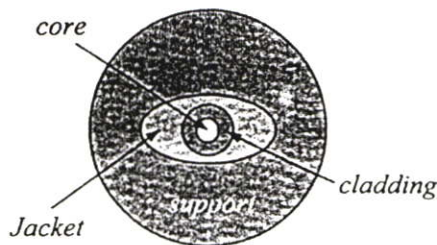
1. ชนิด Stress-Induced Birefringence



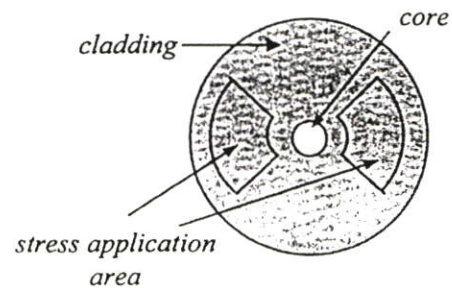
(ก) เส้นใยแก้วที่มีเคลดคิงเป็นวงรี



(ข) เส้นใยแก้วชนิดแพนด้า (PANDA)



(ค) เส้นใยแก้วที่มีแจ็กเก็ตเป็นวงรี



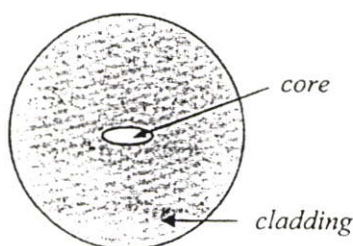
(ง) เส้นใยแก้วชนิดหูกกระต่าย (Bow-Type)

รูปที่ 2.14 เส้นใยแก้วที่ถูกออกแบบให้มีความเค้นเพื่อสร้างคุณสมบัติไบริฟรินเจนต์

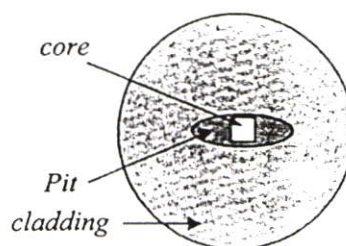
เส้นใยแก้วชนิดนี้ถูกออกแบบให้เคลดคิงเกิดความเค้น (Stress) มากกระทำในลักษณะใดลักษณะหนึ่ง อันจะส่งผลให้เกิดความเค้นต่อไปยังคอร์อีกต่อหนึ่ง ผลของการเกิดความเค้นในตำแหน่งที่เหมาะสม จะทำให้ค่าดัชนีหักเหของคอร์ในแต่ละแนวมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ ไบริฟรินเจนต์ (Birefringent) เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติในทำนองนี้ สามารถแสดงด้วยภาพในแนวตัดขวางดังรูปที่ 2.14 ซึ่งในรูปที่ 2.14 (ก) เคลดคิงจะถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นวงรี ส่วนรูป

ที่ 2.14 (ข) บางส่วนของแคลคคิ่งถูกกำหนดให้มีค่าความเค้น (ที่มีลักษณะวงกลม 2 ข้าง ขนาดอยู่ข้างคอร์) แตกต่างออกไปจากส่วนอื่น ซึ่งเมื่อมองจากรูปจะเห็นว่า มีรูปร่างคล้ายกับหน้าตาของหมีแพนด้า จึงเรียกเส้นใยแก้วแบบนี้ว่าชนิดแพนด้า (PANDA) สำหรับรูปที่ 2.14 (ค) แคลคคิ่งยังคงมีลักษณะเดียวกับเส้นใยแก้วทั่วไป แต่เปลือกหุ้มเส้นใยแก้วหรือโค้ตติ้ง (Coating) มีลักษณะเป็นวง ส่วนรูปที่ 2.14 (ง) ใช้หลักการเดียวกันกับรูปที่ 2.14 (ข) เพียงแต่พื้นที่ที่เกิดความเค้นมีรูปร่างแตกต่างกัน โดยมีลักษณะเป็นรูปหูกระต่าย จึงถูกเรียกว่า แบบหูกระต่าย (Bow-Tie)

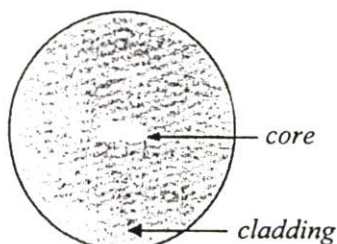
2. ชนิด Geometrical Birefringent



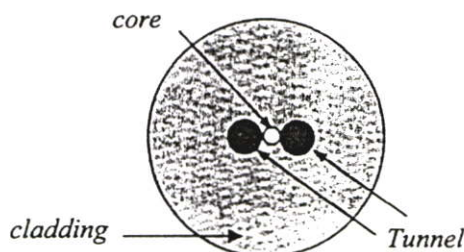
(ก) เส้นใยแก้วที่มีคอร์เป็นวงรี



(ข) เส้นใยแก้วชนิด Side-Pit



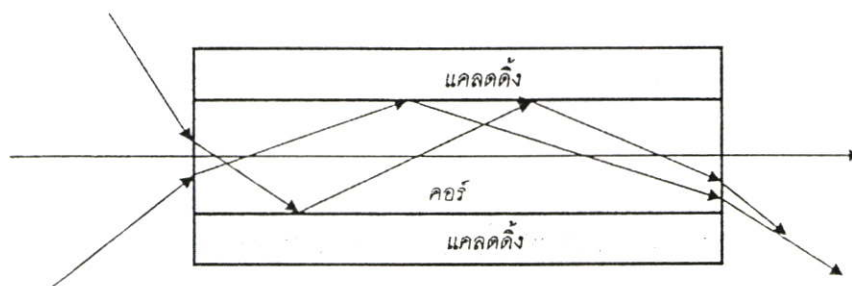
(ค) เส้นใยแก้วที่มีคอร์เป็นรูปดัมเบล (ง) เส้นใยแก้วที่มีช่อง(tunnel)อยู่ด้านข้าง



รูปที่ 2.15 เส้นใยแก้วชนิด Geometrical Birefringent

เส้นใยแก้วชนิด Geometrical Birefringent เป็นเส้นใยแก้วที่ถูกออกแบบให้มีความเค้น (Stress) หรือเกิดแรงกระทำกับส่วนของคอร์โดยตรง โดยการออกแบบรูปร่างของคอร์ ให้มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่สมมาตร เช่น ทำให้คอร์มีรูปร่างเป็นวงรี ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) หรืออาจทำให้เป็นรูปดัมเบลดังรูปที่ 2.15 (ค) หรืออาจทำการปรับปรุงโครงสร้างในส่วนของแคลคคิ่งที่อยู่ติดกับคอร์ ให้มีลักษณะแตกต่างออกไป โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของคอร์มากนัก ดังเช่นรูปที่ 2.15 (ข) และ (ง) เหตุผลของการออกแบบเส้นใยแก้วดังกล่าว ก็เพื่อสร้างคุณสมบัติการเป็นไบรีฟรินเจนต์ (Birefringent) ให้กับเส้นใยแก้ว

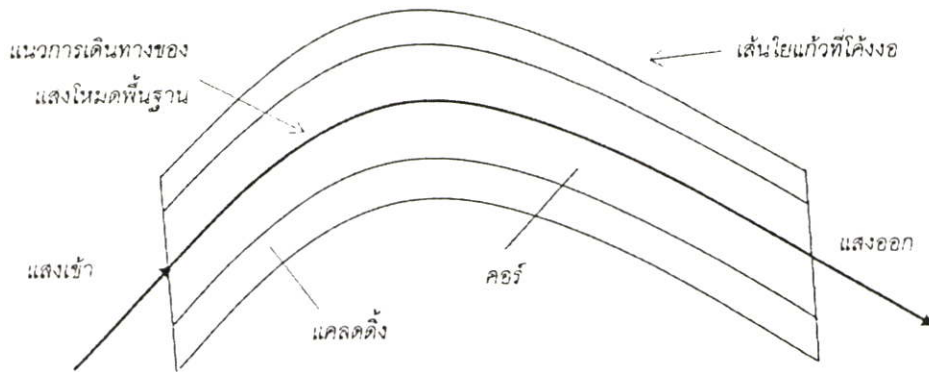
2.6.2 การจำแนกเส้นใยแก้วตามโหมดการเดินทางของแสง



รูปที่ 2.16 แนวการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้วที่โหมดต่างๆ

โหมดการเดินทาง (Mode of propagation) ของแสงในเส้นใยแก้ว หมายถึง รูปแบบของพลังงานแสงที่ถ่ายทอดจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นใยแก้ว หรือ ลักษณะการเดินทางของแสงแต่ละรูปแบบในเส้นใยแก้ว เพื่อเป็นการทำความเข้าใจให้ดีขึ้น สามารถอธิบายโหมดการเดินทางได้ด้วยเส้นที่แสดงแนวการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้ว ซึ่งอาจมีได้เพียงแนวเดียวหรือหลายแนว ขึ้นอยู่กับชนิดและ โครงสร้างของเส้นใยแก้ว ในรูปที่ 2.16 แสดงโหมดหรือแนวการเดินทางของแสงที่เป็นไปได้ภายในเส้นใยแก้ว โดยแต่ละเส้นจะแทนแต่ละโหมด เมื่อพิจารณาลำแสงที่ตกกระทบกับเส้นใยแก้วในลักษณะตั้งฉากกับผิวหน้าตัด จะได้แนวการเดินทางของแสงที่สั้นที่สุด ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกับแกนกลางของเส้นใยแก้วและไม่มีการสะท้อนของแสงภายในเส้นใยแก้วเกิดขึ้นเลย เรียกว่า โหมดการเดินทางพื้นฐาน (Fundamental mode) หรือเรียกสั้นๆ ว่า โหมดพื้นฐาน โหมดการเดินทางนี้ถือเป็นโหมดต่ำสุดของแสง (Lowest order mode) ซึ่งจะใช้เวลาในการเดินทางภายในเส้นใยแก้วน้อยที่สุดเพราะมีระยะทางสั้นที่สุด โหมดพื้นฐานจะเกิดขึ้นเสมอทุกครั้งเมื่อมีการส่งผ่านแสงเข้าไปในเส้นใยแก้ว ไม่ว่าเส้นใยแก้วจะเป็นชนิดใดก็ตาม

หากลำแสงตกกระทบกับผิวหน้าของเส้นใยแก้วในลักษณะมุมที่แตกต่างออกไป แนวการเดินทางของแสงจะเปลี่ยนไปจากแนวเดิม และอาจเดินทางในลักษณะของการสะท้อนกลับไปกลับมาระหว่างผนังของคอร์ เกิดเป็นโหมดการเดินทางอื่น ซึ่งถือเป็นโหมดที่มีอันดับสูงขึ้น (Higher order mode) โหมดที่สูงขึ้นนี้จะทำให้ระยะทางการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้วมากขึ้นด้วย ยิ่งจำนวนครั้งของการสะท้อนที่ผนังของคอร์มีมากเท่าไร ระยะทางของแสงที่เกิดขึ้นก็จะมากขึ้นเท่านั้น แม้ว่าแสงจะเดินทางในเส้นใยแก้วเส้นเดียวกันก็ตาม กล่าวโดยสรุป แนวการเดินทางของแสงแต่ละแนวที่เป็นไปได้ในเส้นใยแก้ว อันเนื่องมาจากลำแสงตกกระทบทำมุมกับผิวหน้าของเส้นใยแก้วต่างกัน ถือว่าเป็นโหมดการเดินทางที่ต่างกันทั้งสิ้น



รูปที่ 2.17 แนวการเดินทางของแสงโหมดพื้นฐาน ไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นตรง

การที่เราแทนโหมดการเดินทางของแสงด้วยแนวเส้นตรงดังรูปที่ 2.16 ก็เพื่อความสะดวกในการอธิบาย เนื่องจากแสงมีคุณสมบัติในการเดินทางเป็นเส้นตรง แต่ในความเป็นจริงแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้ว จะมีลักษณะเป็นกลุ่มพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะมีทิศทางและแนวทางถูกกำหนดโดยท่อนำแสงที่เป็นเส้นใยแก้วและไม่จำเป็นต้องเป็นแนวเส้นตรงเสมอไป ตัวอย่างเช่น แสงในโหมดพื้นฐานจะมีพลังงานส่วนใหญ่อยู่ในช่วงแกนกลางของเส้นใยแก้วเสมอ ทำให้แนวการเดินทางของแสงในโหมดพื้นฐานจะอยู่ในแนวแกนกลางของเส้นใยแก้วตลอดเวลาด้วย แม้ว่าเส้นใยแก้วจะมีลักษณะโค้งงอเป็นแบบใดก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 2.17 การแบ่งชนิดของเส้นใยแก้วตามโหมดการเดินทางของแสง สามารถแบ่งได้ดังนี้

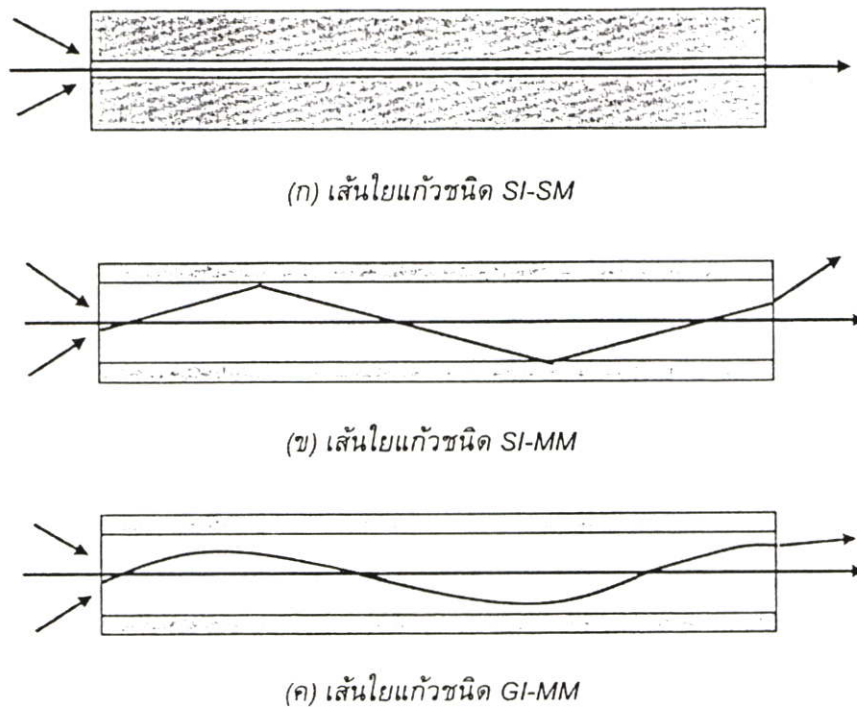
2.6.2.1 เส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว

เส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว (Single-mode Fiber หรือ Mono-mode Fiber ใช้สัญลักษณ์ย่อคือ SM) เป็นเส้นใยแก้วที่ข้อมให้มีโหมดการเดินทางของแสงได้เพียงโหมดเดียว คือ โหมดพื้นฐานเท่านั้น โครงสร้างของเส้นใยแก้วชนิดนี้มักเป็นชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (SI) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์เล็กมาก ประมาณ 3 - 9 ไมโครเมตร ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลดดิ้งจะมีค่าประมาณ 80 - 125 ไมโครเมตร

ในอดีตเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยวแบบสเต็ป-อินเด็กซ์ (SM-SI) มักมีราคาค่อนข้างแพง เพราะในกระบวนการผลิตต้องควบคุมให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ที่เล็กมาก การรับพลังงานแสงเข้าไปในเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยวจะรับได้น้อยเพราะมุมรับแสงสูงสุด (ϕ_{max}) มีขนาดเล็ก จึงต้องใช้ควบคู่กับแหล่งกำเนิดแสงที่มีมุมกระจายแสงน้อยๆ และมีทิศทางที่แน่นอน เช่น ลำแสงเลเซอร์ เป็นต้น ข้อดีของเส้นใยแก้วประเภทนี้คือ มีค่าการขยายตัวของสัญญาณหรือ ดิสเพอร์ชัน (Dispersion) ต่ำ ทำให้สามารถส่งข้อมูลที่มีปริมาณมากๆ หรือค่าแบนด์วิดท์สูงๆ ไปได้เป็นระยะทางไกล จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแก้ว

2.6.2.2 เส้นใยแก้วชนิดโหมคร่วม

เส้นใยแก้วชนิดโหมคร่วม (Multimode Fiber ใช้สัญลักษณ์ย่อคือ MM) หมายถึงเส้นใยแก้วที่อนุญาตให้มีโหมคการเดินทางของแสงเกิดขึ้นได้หลายโหมคตามลักษณะของแสงที่ส่งเข้าไป แม้ว่าแสงที่พุ่งเข้าสู่เส้นใยแก้ว จะเกิดจากแหล่งกำเนิดแสงตัวเดียวกันก็ตาม แสงที่เปล่งออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงทั่วไป จะมีทิศทางสะเปะสะปะและสามารถเดินทางเข้าสู่เส้นใยแก้วในมุมที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดโหมคการเดินทางได้หลายโหมค โครงสร้างของเส้นใยแก้วชนิดนี้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ประมาณ 62.5 ไมครอน และอาจเป็นได้ทั้งชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (SI) และเกรดเค็ด-อินเด็กซ์ (GRIN หรือ GI) ในกรณีของเส้นใยแก้วชนิดโหมคร่วมแบบสเต็ป-อินเด็กซ์ (SI-MM) โหมคการเดินทางของแสงจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงสะท้อนกลับไปกลับมาระหว่างแนวสัมผัสของคอร์กับแคลคคิง ดังรูปที่ 2.18 (ข) เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของคอร์มีค่าคงที่ตลอดเนื้อสาร ในขณะที่แสงโหมคอันดับสูงที่เดินทางในเส้นใยแก้วชนิดโหมคร่วมแบบเกรดเค็ด-อินเด็กซ์ (GI-MM) จะเดินทางเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.18 (ค)

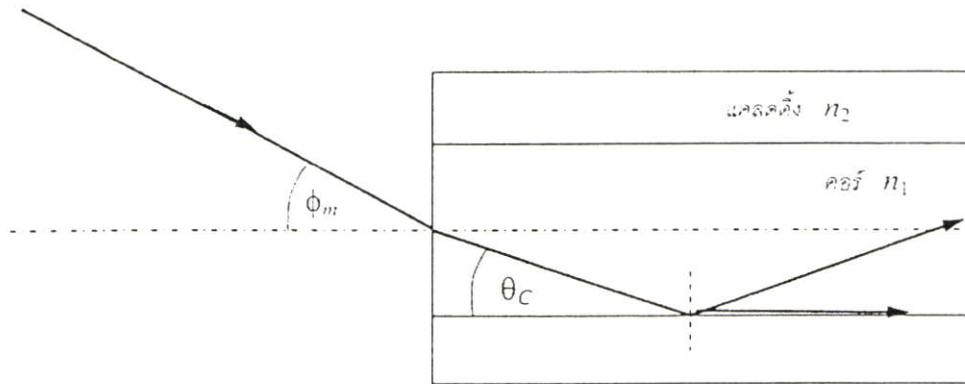


รูปที่ 2.18 ลักษณะการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้วแบบต่างๆ

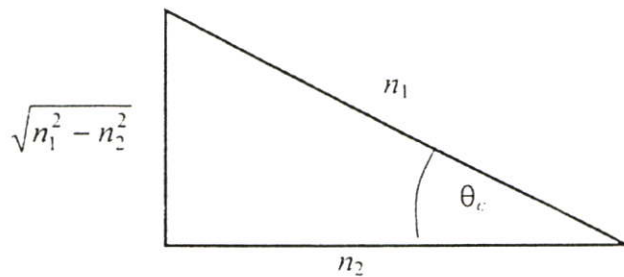
การควบคุมให้พลังงานของแสงแต่ละโหมคถูกจำกัดขอบเขตให้อยู่ภายในส่วนของคอร์ตลอดระยะเวลาการเดินทาง กำหนดได้จากมุมตกกระทบของลำแสงกับผิวหน้าเส้นใยแก้ว ซึ่งต้องสอดคล้องกับการเกิดเงื่อนไขการสะท้อนกลับหมดของแสง (TIR) ในคอร์ ค่าของมุมตกกระทบ

ที่มากที่สุดนี้เป็นค่าของมุม ϕ_{\max} ที่แสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งทำให้เกิดมุมวิกฤต θ_c ในเส้นใยแก้ว โดยปกติค่าพารามิเตอร์ที่แสดงค่าของมุม ϕ_{\max} จะแสดงในเทอมของนิวเมอริคอล อะเพอเจอร์ (Numerical Aperture) หรือค่าเอ็นเอ (NA) เมื่อ $n = 1$ สำหรับอากาศคือ

$$NA = n \sin(\phi_{\max}) = \sin(\phi_{\max})$$



รูปที่ 2.19 แสงเข้าสู่เส้นใยแก้วด้วยมุมรับแสงสูงสุด



รูปที่ 2.20 รูปสามเหลี่ยมมุมฉากที่ใช้ช่วยในการคำนวณหาค่า NA

เมื่อพิจารณาที่ผิวด้านหน้าของเส้นใยแก้ว โดยใช้กฎของสเนลล์ จะได้ว่า

$$n \sin \phi_{\max} = n_1 \sin \theta_c$$

หรือนั่นคือ

$$NA = n_1 \sin \theta_c$$

แต่เนื่องจาก $\cos \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$ ดังนั้นเมื่อนำสมการนี้ไปจำลองกับรูปของสามเหลี่ยมมุมฉากตาม

ทฤษฎีตรีโกณมิติดังรูปที่ 2.20 แล้วทำการเทียบหาค่าของ $\sin \theta_c$ ออกมา จะได้

$$\sin \theta_c = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1}$$

เมื่อแทนค่าของเข้าไป $\sin \theta_c$ จะได้สมการของ NA เป็น

$$NA = n_1 \left(\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} \right) \quad \text{หรือ} \quad NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

ค่าของพารามิเตอร์ NA ยังสามารถแสดงต่อในเทอมของ ค่าความแตกต่างของดัชนีหักเหระหว่างคอร์และแคลดคิง (Refractive index difference : Δ) เมื่อ

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

ย้ายข้างสมการ จะได้

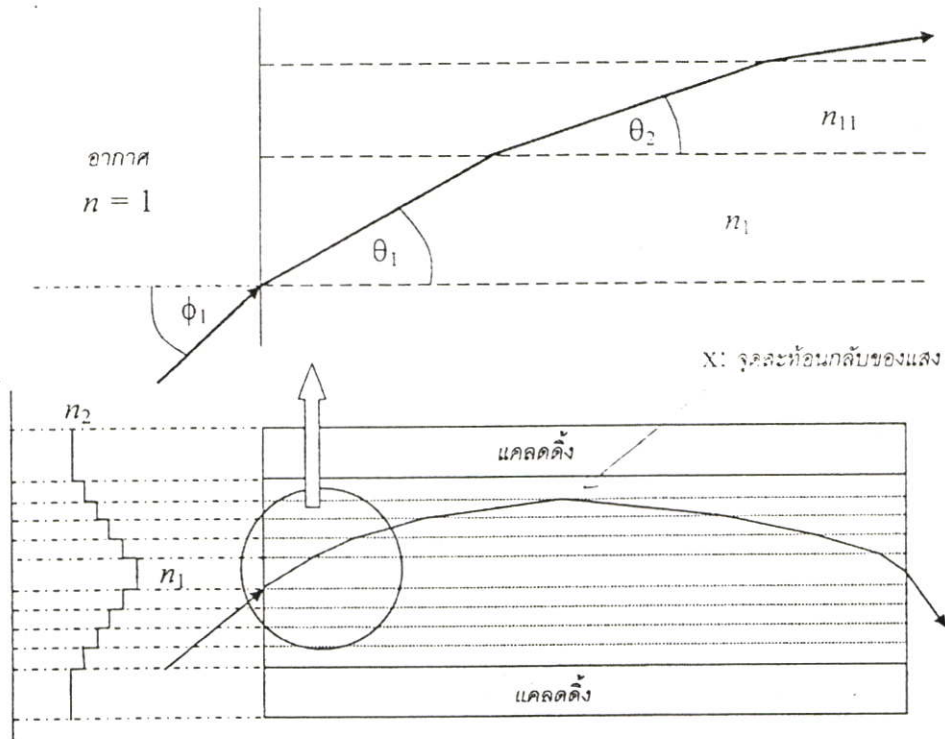
$$n_1^2 - n_2^2 = 2\Delta n_1^2 \quad \text{หรือ} \quad \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

นั่นคือค่าของ NA อาจแสดงได้ด้วยสมการ

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.11)$$

จากรูปที่ 2.19 อาณาเขตที่กว้างสุด ที่จะให้แสงส่งผ่านเข้าไปในเส้นใยแก้ว จะมีลักษณะเป็นรูปกรวยในระนาบ 3 มิติ ที่มีมุมของยอดกรวยเท่ากับ $2\phi_{\max}$ นั้นแสดงให้เห็นว่า เส้นใยแก้วที่มีค่าของ NA มากๆ จะมีจำนวนโหมดการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้วมากขึ้นด้วย ค่าของ NA อาจบอกเป็นค่าของตัวเลขธรรมดาที่ไม่มีหน่วยหรือเป็นเปอร์เซ็นต์ก็ได้ เช่น 0.14 หรือ 14% เป็นต้น

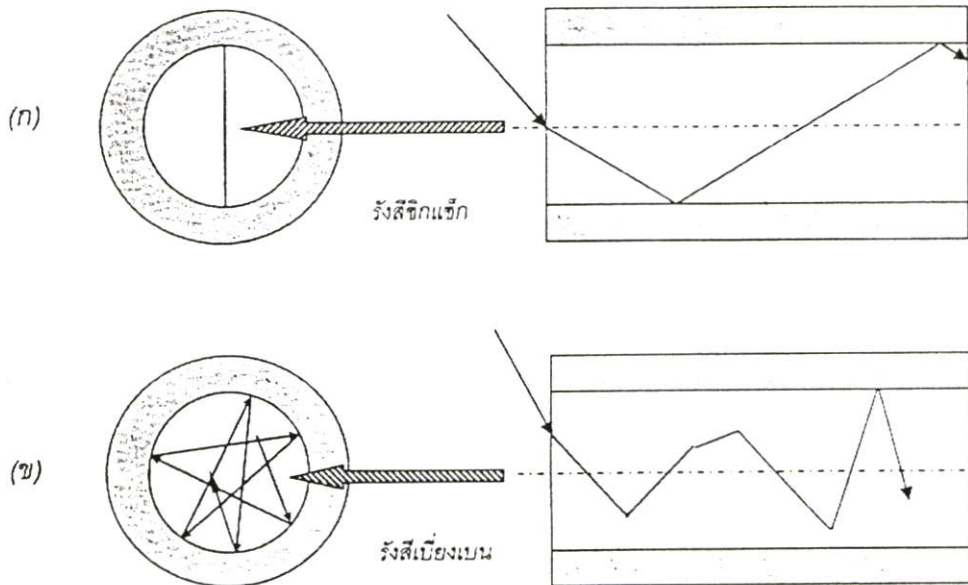
ในกรณีของเส้นใยแก้วชนิดโหมคร่วมแบบเกรดเด็ค-อินเด็คซ์ (GI-MM) การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ยังคงมีรูปแบบสมการดั้งเดิม โดยค่าดัชนีหักเหของคอร์จะแทนด้วยค่าสูงสุดในแนวศูนย์กลางเพียงค่าเดียว ส่วนลักษณะการเดินทางของแสงที่สะท้อนกลับไปกลับมา จะเปลี่ยนจากเส้นตรงมาเป็นเส้นโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) การวิเคราะห์แนวทางการเดินทางของแสงดังกล่าว อาจพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของคอร์ที่ค่อยๆ ลดลงมาในลักษณะขั้นบันไดที่มีหลายขั้นดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งของแสงในเส้นใยแก้วชนิด GI-MM

จากรูปที่ 2.21 สมมติแสงตกกระทบเส้นใยแก้วในแนวแกนกลาง โดยทำมุมกับเส้นตั้งฉากเท่ากับ ϕ_1 แสงที่เดินทางเข้าสู่เส้นใยแก้วจะเป็นแสงหักเหที่ทำมุมกับเส้นตั้งฉากเท่ากับ θ_1 จากกฎของสเนลล์จะได้ว่า $n \sin \phi_1 = n_1 \sin \theta_1$ หรือ $\sin \phi_1 = n_1 \sin \theta_1$ เมื่อ $n=1$ ซึ่งเป็นค่าดัชนีหักเหของอากาศแต่เนื่องจาก $n_1 > 1$ ดังนั้นจะได้ $\sin \theta_1 < \sin \phi_1$ หรือนั่นคือ ค่าของมุมหักเหจะมีค่าน้อยกว่ามุมตกกระทบ $\theta_1 < \phi_1$ ทำให้ลำแสงหักเหเบี่ยงเบนออกจากแนวเดิมของลำแสงตกกระทบ ในลักษณะเลี้ยวเข้าหาแกนกลางของเส้นใยแก้ว ลำแสงหักเหนี้จะมีพฤติกรรมเสมือนเป็นลำแสงตกกระทบไปยังส่วนของคอร์ที่มีค่าดัชนีหักเห n_{11} ที่มีค่าลดลงจาก n_1 ในทำนองเดียวกัน จะได้ค่าของ $\theta_2 < \theta_1$ เพราะว่า $n_{11} < n_1$ และจากหลักการเดียวกันนี้ แสงที่เดินทางในแต่ละชั้นของคอร์จะมีการเบี่ยงเบนเข้าหาแกนกลางของเส้นใยมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากค่าของมุม θ_i ($i=1,2,3,\dots$) มีค่าลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤตในช่วงรอยต่อที่จุด X ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด แสงจะเดินทางพุ่งลงมา แต่คราวนี้แสงที่เดินทางผ่านแต่ละชั้นของคอร์จะมีค่าของมุม θ_i เพิ่มมากขึ้น เพราะแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำเข้าหาตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหมากกว่า จนกระทั่งแสงเดินทางผ่านแนวกึ่งกลางของเส้นใย ค่าของมุม θ_i จึงจะมีค่าลดลงอีกครั้งหนึ่ง เหมือนที่พิจารณาในตอนแรก เช่นนี้ไปเรื่อยๆ ตลอดแนวการเดินทางของแสงในเส้นใยแก้ว

หากค่าดัชนีหักเหของคอร์ที่เปลี่ยนแปลงมีจำนวนการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ซึ่งหมายถึงความหนาของแต่ละชั้นมีขนาดลดลง แนวการเดินทางของแสงก็จะมีจุดหักเหมากขึ้น จนดูใกล้เคียงเส้นโค้งมากขึ้น และเมื่อค่าดัชนีหักเหของคอร์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ก็จะได้แนวการเดินทางของแสงเป็นเส้นโค้ง ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 (ค) นั่นเอง



รูปที่ 2.22 การเคลื่อนที่ของรังสีซิกแซ็กและรังสีเฉียงเบน

แนวการเดินทางของแสงที่สะท้อนกลับไปกลับมาในเส้นใยแก้วชนิด SI-MM หรือแนวของแสงที่เคลื่อนที่ขึ้นลงแบบโค้งในเส้นใยแก้วชนิด GI-MM หากจินตนาการว่ามองจากด้านหน้าหรือแนวภาคตัดขวางของเส้นใยแก้วเข้าไปภายใน จะมีรูปแบบที่แตกต่างกัน 2 แบบ เรียกว่า รังสีซิกแซ็ก (Meridional rays) และรังสีเฉียงเบน (Skew rays) โดยที่

รังสีซิกแซ็ก (Meridional rays) จะมีลักษณะการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเป็นเส้นตรงเส้นเดียว ในแนวที่ลากผ่านเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ก) ลักษณะเช่นนี้ เกิดจากรังสีตกกระทบพุ่งเข้าสู่เส้นใยแก้วในแนวแกนกลาง และเมื่อมองจากภาคตัดขวางเข้าไป จะพบว่าแนวของรังสีตกกระทบจะขนานกับเส้นที่ลากผ่านจุดศูนย์กลางของเส้นใยแก้ว

รังสีเฉียงเบน (Skew rays) มีลักษณะการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาระหว่างขอบของคอร์ได้หลายแนว เมื่อมองจากภาคตัดขวางเข้าไป ดังรูปที่ 2.22 (ข) การเกิดรังสีเฉียงเบนเกิดจากการตกกระทบของลำแสงที่พุ่งเข้าสู่เส้นใยแก้วในลักษณะอื่นทั่วไปที่แตกต่างจากเงื่อนไขการเกิดรังสีซิกแซ็ก เช่น จุดตกกระทบของแสงที่เข้าสู่เส้นใยแก้วมิใช่จุดศูนย์กลางของเส้นใยแก้ว เป็นต้น

2.7 ความถี่นอร์มอลไลซ์หรือวี้นัมเบอร์

เส้นใยแก้วแต่ละชนิดจะมีจำนวนของโหมดการเดินทางของแสง เกิดขึ้นเป็นจำนวนที่อาจไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของตัวเส้นใยแก้วเอง จำนวน โหมดที่มากที่สุดที่เดินทางในเส้นใยแก้วสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$M = \frac{V^2}{2} \quad (2.12)$$

เมื่อ M คือจำนวนโหมดย่อยทั้งหมดของแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้ว
 V คือค่าความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalized Frequency) ซึ่งโดยทั่วไปมักเรียกว่า ค่าวี้นัมเบอร์ (V-number) มีค่าดังสมการที่ (2.13) นั่นคือ

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a(NA) \quad \text{หรือ} \quad V = k a(NA) \quad (2.13)$$

เมื่อ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ คือค่าตัวเลขคลื่นหรือเวฟนัมเบอร์ (Wave Number) ของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น λ ในอากาศหรือสุญญากาศ ค่าของ k นี้ในบางครั้งจะเรียกว่า ค่าคงตัวการเคลื่อนที่ (Propagation Constant) เมื่อพิจารณาถึงตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียสัญญาณ (Lossless Medium)

a คือค่ารัศมีของคอร์

$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ คือค่านิวเมอร์ริคอล อะเพอเจอร์ของเส้นใยแก้ว

ค่าของวี้นัมเบอร์เป็นค่าที่สำคัญในการจำแนกชนิดของเส้นใยแก้วในขณะใช้งานว่าเป็นชนิดโหมดเดี่ยวหรือโหมดรวม ในกรณีของเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว ค่าของวี้นัมเบอร์ ต้องมีค่าสอดคล้องกับสมการ (2.14)

$$V = \leq 2.405 \quad (2.14)$$

ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่หาได้จากสมการค่านอร์มอลไลซ์ของค่าคงตัวการเคลื่อนที่ของคลื่น เงื่อนไขในสมการที่ (2.14) สามารถใช้แสดงคุณสมบัติที่สำคัญเกี่ยวกับเส้นใยแก้วและการใช้งานในลักษณะต่างๆ ได้ ตัวอย่างเช่น เมื่อแทนค่าของ V ลงไปจะได้

$$\frac{2\pi}{\lambda} a (NA) \leq 2.405 \quad (2.15)$$

เมื่อทำการจัดรูปสมการ จะได้

$$\lambda \geq \frac{2\pi a NA}{2.405} \quad (2.16)$$

นั่นหมายความว่า เส้นใยแก้วที่มีขนาดรัศมีของคอร์เท่ากับ a จะมีคุณสมบัติเป็นเส้นใยแก้วชนิด โหมดเดี่ยว ก็ต่อเมื่อมีการใช้งาน โดยการส่งแสงที่มีความยาวคลื่นตามเงื่อนไขของสมการที่ (2.16) เข้าไปในเส้นใยแก้ว

ค่าของความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดสำหรับการใช้งานเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว เรียกว่า ความยาวคลื่นคัทออฟ (Cut-off wavelength) แทนด้วยสัญลักษณ์ ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการ (2.17)

$$\lambda_c = \frac{2\pi a NA}{2.405} = \frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2.405} \quad (2.17)$$

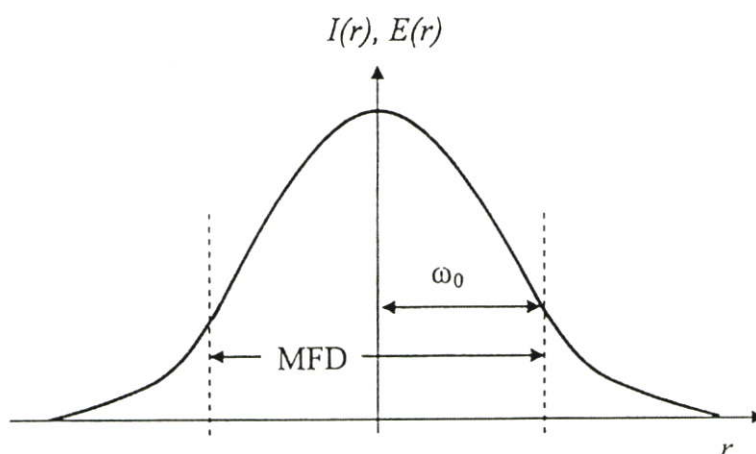
ดังนั้นการนำเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยวมาใช้งาน จำเป็นต้องทราบค่าของความยาวคลื่นคัทออฟ λ_c ด้วย เพราะหากใช้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า λ_c ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วที่ ออกแบบให้เป็นชนิดโหมดเดี่ยวก็จะมีพฤติกรรมเป็นเส้นใยแก้วชนิด โหมดร่วมไปทันที คือจะมี โหมดการเดินทางของแสงที่มีอันดับสูงเกิดเพิ่มขึ้นนอกเหนือจาก โหมดพื้นฐาน ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อ พิจารณาสมการ (2.15) จะพบว่าค่าของความยาวคลื่นแสง (λ), ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ ($2a$), ค่าดัชนีหักเหของคอร์ (n_1) และของแคลดดิ้ง (n_2) ล้วนเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติในการใช้งานของเส้นใยแก้วว่าเป็นชนิดโหมดเดี่ยวหรือโหมดร่วมทั้งสิ้น

จากสมการที่ (2.12) ซึ่งเป็นการคำนวณหาจำนวนโหมดในเส้นใยแก้ว หากสมมติให้เส้นใยแก้วโหมดเดี่ยวมีค่าวีเนมเบอร์ V เท่ากับ 2.405 พอดี จำนวนโหมดที่เดินทางในเส้นใยแก้วจะมีค่าเท่ากับ $M = 2.405^2/2 \approx 2$ ก็มีจำนวนโหมดเกิดขึ้น 2 โหมด (ใช้ค่าของเลขจำนวนนับ โดยการปิดเศษทศนิยมทั้งหมดออกไป) ถึงตรงนี้อาจสงสัยว่า เส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยวควรจะมีโหมดเกิดขึ้นเพียงโหมดเดียว แต่ทำไมจึงคำนวณออกมาได้ถึงสองโหมด ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า โหมดพื้นฐาน HE_{11} ที่เดินทางในเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว ถือเป็นเพียงโหมดเดียว ซึ่งเกิดจากโหมดย่อยของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ารวมกัน จึงสามารถแยกออกเป็น 2 โหมดย่อยตามที่คำนวณได้นั่นเอง ในทำนองเดียวกัน โหมดการเดินทางของแสงที่เกิดจากสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก

ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งเท่านั้น เช่น โหมด TE และ TM ถือว่ามี โหมดย่อยประกอบอยู่เพียงโหมดเดียวเท่านั้น

2.8 เส้นผ่านศูนย์กลางของโหมดสนามและขนาดจุด

ลำแสงของโหมดพื้นฐานที่เดินทางในเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว ทั้งชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์และเกรดเค็ด-อินเด็กซ์ จะมีการกระจายพลังงานในลักษณะ การแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian distribution) หรือรูปแบบของระฆังคว่ำ คือจะมีค่าความเข้มแสง (หรือสนามไฟฟ้า) สูงสุดในแนวแกนกลางของเส้นใยแก้ว จากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่องตามระยะรัศมี (r) ที่ห่างออกไป จนมีค่าเป็นศูนย์ โดยอาณาเขตที่มีการแจกแจงพลังงานแสงจะครอบคลุมตลอดส่วนของคอร์และบางส่วนของแคลคดิ่งตามสมการของสนามไฟฟ้าของคอร์และแคลคดิ่งที่มีค่าต่อเนื่องกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การแจกแจงแบบเกาส์ของความเข้มแสง

ระยะรัศมีที่ทำให้ค่าความเข้มแสงลดลงเหลือ $1/e^2 = 0.135$ (หรือค่าสนามไฟฟ้าลดลงเหลือเพียง $1/e = 0.37$) ของค่าสูงสุด จะเรียกระยะรัศมีนี้ว่า ขนาดจุด (Spot size) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ ω_0 ในรูปที่ 2.23 โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโหมดสนาม หรือ MFD (Mode Field Diameter) จะมีค่าเท่ากับสองเท่าของขนาดจุด ($2\omega_0$) นั่นคือ

$$MFD = 2\omega_0 \quad (2.18)$$

ค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของโหมดสนาม (MFD) ถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของเส้นใยแก้วที่มักจะกล่าวถึงในกรณีของเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยวทั่วไป เพราะมีประโยชน์ในการช่วย

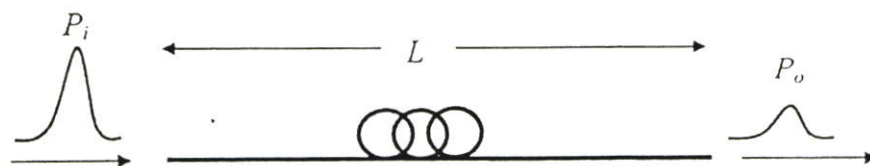
ทำนายค่าการสูญเสียสัญญาณในการส่งแสงเข้าสู่เส้นใยแก้วรวมทั้งจุดเชื่อมต่อต่างๆ ของเส้นใยแก้ว เส้นผ่านศูนย์กลางของโหมดสนาม (MFD) สามารถวัดได้จากลำแสงที่พุ่งออกจากปลายของเส้นใยแก้วเมื่อนำจากมาวางกัน ในกรณีที่ทำการวัดค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของโหมดสนาม (MFD) ที่ตำแหน่งตอนปลายขาออกของเส้นใยแก้วโดยตรง จะถือเป็นค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของโหมดสนามระยะใกล้ (Near Field MFD) แต่ถ้าหากทำการวัดที่ระยะห่างออกไป แม้เพียงไม่กี่มิลิเมตรก็จะถือเป็นค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของโหมดสนามในระยะไกล (Far Field MFD) [9]

โดยทั่วไป การบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว มักกล่าวถึงขนาดของโหมดสนามแทน เนื่องจากเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยวที่นำมาต่อกันควรมีขนาดของโหมดสนาม (MFD) เท่ากัน เพื่อการส่งผ่านกำลังงานระหว่างกันมากที่สุด ตารางที่ 2.3 เป็นตัวอย่างขนาดของ MFD สำหรับเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว เมื่อใช้งานกับความยาวคลื่นแสงที่ค่าต่าง ๆ

ตารางที่ 2.3 ขนาดของโหมดสนามหรือ MFD ของเส้นใยแก้วชนิด SM ที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ขนาดของโหมดสนาม (ไมโครเมตร)
630	3.7
850	5.0
1,060	6.2
1,300	9.3
1,550	10.5

2.9 การสูญเสียสัญญาณในเส้นใยแก้ว



รูปที่ 2.24 กำลังงานของแสงหรือความเข้มของแสงในระบบเส้นใยแก้ว

การส่งสัญญาณแสงเข้าไปในเส้นใยแก้วในรูปที่ 2.24 เมื่อ P_i คือค่าความเข้มแสงที่ถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วด้านขาเข้า มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt : W) P_o คือความเข้มแสงที่ออกจากเส้นใยแก้วที่ปลายทาง มีหน่วยเป็นวัตต์ และ L คือความยาวของเส้นใยแก้วที่แสงเดินทาง มีหน่วยเป็นกิโลเมตร (Km) ค่าการสูญเสียสัญญาณ (Loss) หรือการลดทอนสัญญาณ (Attenuation) ในเส้นใย

แก้วต่อหน่วยความยาว มักแทนด้วยสัญลักษณ์ α (อัลฟา) และมีหน่วยเป็นเดซิเบลต่อกิโลเมตร (dB/Km) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.19)

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_o}{P_i} \right) \quad \text{dB/km} \quad (2.19)$$

ค่าการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้ว เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่จะช่วยกำหนดระยะห่างระหว่างสถานีส่งและสถานีรับในระบบสื่อสาร และใช้พิจารณาในการเลือกชนิดของเส้นใยแก้วที่จะใช้ในระบบสื่อสาร เช่น หากเส้นใยแก้วมีค่าการลดทอนสัญญาณน้อย ก็จะสามารถใช้กับสถานีที่ห่างไกลมากได้ เป็นต้น นอกจากนี้ค่าการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้ว ยังมีค่าขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในระบบอีกด้วย ดังนั้นในการบอกค่าการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้ว ต้องบอกด้วยว่าเป็นค่าสำหรับความยาวคลื่นแสงเท่าไร เพราะถ้าเลือกใช้แสงที่มีความยาวคลื่นแสงเปลี่ยนไป ก็จะทำให้ค่าการลดทอนสัญญาณเปลี่ยนไปด้วย แม้ว่าจะเป็นเส้นใยแก้วเส้นเดียวกันก็ตาม กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณ มีดังนี้

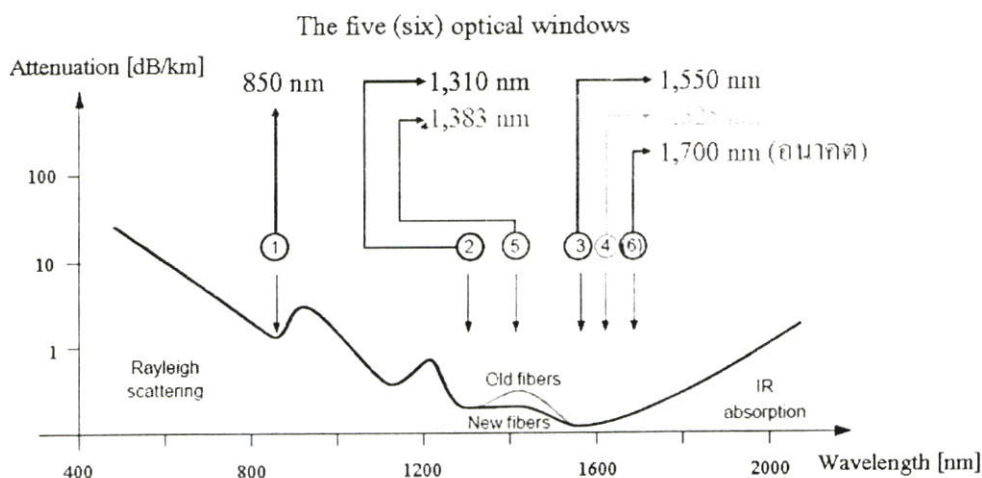
2.9.1 การดูดซับพลังงานจากวัสดุตัวกลาง (Absorption)

เป็นการลดทอนสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้ว เนื่องจากการดูดซับพลังงานแสงจากโมเลกุลของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานแสงจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางโมเลกุลและความบริสุทธิ์ของเนื้อสารที่นำมาใช้ทำเส้นใยแก้วนำแสง

2.9.2 การกระเจิงของแสง (Scattering)

เมื่อแสงเดินทางกระทบกับโมเลกุลของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว พลังงานของแสงบางส่วนที่มีค่าน้อย ๆ จะเกิดการกระเจิง หรือ การกระจายออกไปทุกทิศทาง ทำให้พลังงานหรือความเข้มของแสงที่เดินทางต่อไปข้างหน้ามีค่าลดลง ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การกระเจิงแบบเรย์ลีย์ (Rayleigh Scattering) แสงที่มีความยาวคลื่นยาวจะมีค่าการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากการกระเจิงของแสงน้อยกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น

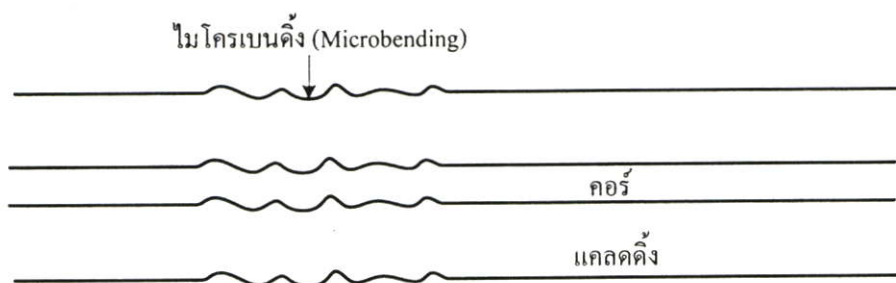
ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในระบบการสื่อสารจะอยู่ในย่าน Infrared คือ ประมาณ 800-1,700 นาโนเมตร [3] โดยทั่วไปค่าการลดทอนสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การลดทอนสัญญาณแสงของเส้นใยแก้ว

การกระจายพลังงานออก (Radiation losses) เป็นการสูญเสียสัญญาณแสงอีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งเกิดจากโครงสร้างหรือลักษณะการจัดวางของเส้นใยแก้วเองทำให้พลังงานแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วเล็ดลอดออกมาในส่วนของแคลคคิงและไม่สามารถกลับคืนสู่คอร์ได้ เหมือนกับการแผ่รังสี (Radiation) ของแสงออกนอกเส้นทาง ลักษณะของเส้นใยแก้วที่ทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณในรูปแบบนี้ มักจะเกิดจากการโค้งงอ (Bending) ของเส้นใยแก้ว

2.9.3 ความโค้งขนาดเล็ก (Microbending)



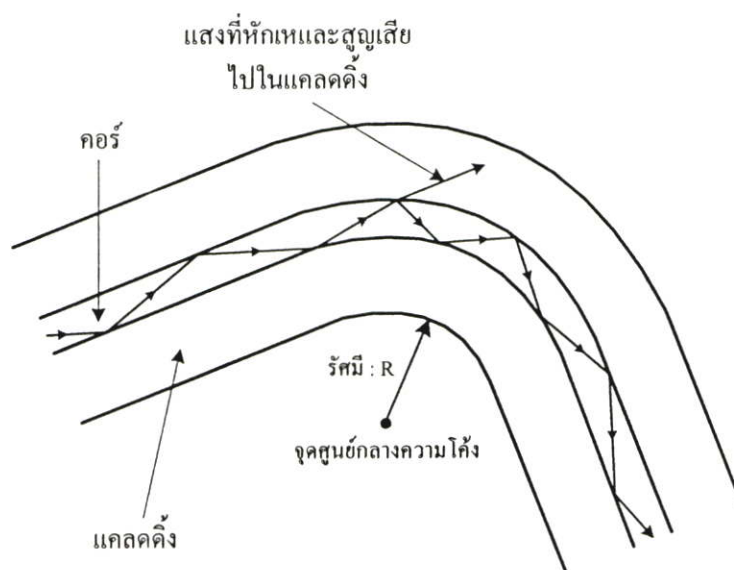
รูปที่ 2.26 ลักษณะความโค้งขนาดเล็กบริเวณรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลคคิง

ลักษณะความโค้งของเส้นใยแก้วแบบนี้ เกิดขึ้นในขบวนการผลิตเส้นใยแก้ว เช่น ความเร็วในการดึงเส้นใยแก้วไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการเคลือบโค้ตติ้งที่มีความหนาเพิ่มขึ้น หรือเกิดขึ้นจากค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัสดุที่ใช้ทำคอร์และวัสดุที่ใช้ทำแคลคคิง ที่แตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นในขณะที่ปล่อยให้เส้นใยแก้วเย็นตัวลง การหดตัวที่ไม่เท่ากันจะเป็นสาเหตุทำให้ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลคคิงซึ่งควรจะเรียบเป็นแนวเส้นตรง แต่กลับมีลักษณะไม่เรียบ ความบกพร่องของเส้นใยแก้วในลักษณะนี้มักจะเกิดจากกระบวนการดึงเส้นใย

แก้ว ทำให้คอร์เกิดการโค้งงอเล็กน้อย หรืออาจเกิดจากแรงภายนอกมากระทำต่อเส้นใยแก้ว เช่น ขณะม้วนเคเบิลลงในระวิงก่อนการขนส่ง อาจมีแรงภายนอกมากระทำต่อเส้นใยแก้วทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอได้เช่นกัน การสูญเสียสัญญาณเกิดจากแสงส่วนหนึ่งหักเหเข้าไปในแคลดดิ้ง ทำให้แสงเดินทางในส่วนแคลดดิ้งด้วย แต่ก็ยังเป็นระยะทางสั้นๆ เพราะจะสูญเสียสัญญาณหมดไปในที่สุด เมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้น ค่าการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากความโค้งขนาดเล็ก (Microbending) นี้จะแปรผันตามขนาดความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วและมีค่าผกผันกับค่านิวเมอริกอล อะเพอร์เจอร์ (NA) ของเส้นใยแก้ว

การลดทอนสัญญาณในเส้นใยแก้วที่กล่าวมาส่วนใหญ่เกิดจากขบวนการผลิตเส้นใยแก้ว จึงเป็นการยากที่ผู้ใช้งานจะควบคุม การลดทอนสัญญาณเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะลดลง เนื่องจากการพัฒนาขบวนการผลิตให้ทันสมัยยิ่งขึ้น

2.9.4 ความโค้งขนาดใหญ่ (Macro bending)



รูปที่ 2.27 การกระจายพลังงานแสงออกจากความโค้งขนาดใหญ่ของเส้นใยแก้ว

ความโค้งขนาดใหญ่เกิดจากการจัดวางเส้นใยแก้วไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรง อาจจำเป็นต้องจัดเส้นใยแก้วให้โค้งงอไปมา เช่น จัดเคเบิลให้โค้งงอตามลักษณะมุมของอาคาร การม้วนเคเบิลภายในบ่อพักสาย ซึ่งถือเป็นสิ่งจำเป็นที่อาจจะหลีกเลี่ยงในทางปฏิบัติ ความโค้งขนาดใหญ่สามารถสังเกตได้จากภายนอกของเส้นใยแก้ว จากรูปที่ 2.27 แทนแนวการเดินทางของแสงด้วยเส้นตรง เมื่อแสงเดินทางไปถึงจุดที่เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ แสงจะเดินทางไปกระทบรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้งในลักษณะของมุมตกกระทบที่ทำให้เกิดการสะท้อนและหักเหตามกฎ

ของสเนลล์ (Snell's Law) หากเส้นใยแก้วมีลักษณะความโค้งน้อยๆ หรือมีรัศมีความโค้งมากๆ แสงหักเหที่จุดนี้อาจไม่เกิดขึ้นและปรากฏการสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection : TIR) ยังคงมีอยู่ ทำให้ไม่มีการสูญเสียความเข้มของแสง แต่ถ้าเส้นใยแก้วมีลักษณะความโค้งมากๆ หรือมีรัศมีความโค้งน้อยๆ จนทำให้เกิดการหักเหของแสงเข้าไปในแคลดดิ้ง แสงที่สะท้อนและเดินทางต่อภายในคอร์ของเส้นใยแก้ว จะมีค่าลดลงตามสัดส่วนที่เสียไปกับแสงหักเห

ค่าการสูญเสียพลังงานแสง (Power Loss) ในเส้นใยแก้วที่เกิดจากความโค้งขนาดใหญ่ สามารถคำนวณค่าโดยประมาณได้จากสมการ (2.20) [11] ในกรณีของเส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็กซ์ (Graded-Index Fiber) การสูญเสียพลังงานแสงเนื่องมาจากการโค้งขนาดใหญ่จะมีค่ามากกว่าเส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (Step-Index Fiber) [11] และเมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยแก้วที่มีลักษณะความโค้งเช่นเดียวกัน แสงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีค่าการสูญเสียสัญญาณมากกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นน้อย [5]

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 - \left(\frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \right) \left[\frac{d}{R} + \left(\frac{3\lambda}{4\pi n_2 R} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (2.20)$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{NA^2}{2n_1^2} \quad (2.21)$$

เมื่อ	P_2	คือค่าพลังงานแสงด้านรับ	(mW)
	P_1	คือค่าพลังงานแสงด้านส่ง	(mW)
	α	คือค่าเฟคเตอร์ความลาดเอียงของกราฟที่เกี่ยวข้องกับค่าดัชนีหักเหของแสง	
	Δ	คือค่าความแตกต่างของดัชนีหักเห (Refractive index difference) ระหว่างคอร์และแคลดดิ้งของเส้นใยแก้ว	
	d	คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของคอร์	
	R	คือรัศมีความโค้งของเส้นใยแก้ว	
	λ	คือความยาวคลื่นของแสง	
	n_1	คือค่าดัชนีหักเหของแสงในคอร์	
	n_2	คือค่าดัชนีหักเหของแสงในแคลดดิ้ง	
	NA	คือนิวเมอริกอล อะเพอเจอร์ (Numerical Aperture)	

และสามารถหาค่าการสูญเสียพลังงานแสง (Power loss) ในหน่วยของ dB ได้จากสมการ (2.22)

$$P_{lost} = -10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (2.22)$$

2.10 การสูญเสียสัญญาณสูงสุดในระบบ

ในระบบหรือใน 1 เส้นทางที่มีการเชื่อมต่อด้วยเส้นใยแก้ว สามารถประมาณค่าการสูญเสียสัญญาณสูงสุดได้จากสมการ (2.23), [12]

$$TA = n_c \alpha_c + n_s \alpha_s + \alpha L + M \quad (2.23)$$

เมื่อ	TA	คือการสูญเสียสัญญาณทั้งหมด (dB)
	n_c	คือจำนวนของคอนเน็กเตอร์ (Connector) ทั้งหมดที่เชื่อมต่อ
	α_c	คือการสูญเสียสัญญาณของคอนเน็กเตอร์แต่ละตัว (dB)
	n_s	คือจำนวนของจุดเชื่อมต่อ (Splice) ทั้งหมดในเส้นทาง
	α_s	คือการสูญเสียสัญญาณของจุดเชื่อมต่อแต่ละจุด (dB)
	α	คือการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแก้ว (dB / Km)
	L	คือความยาวทั้งหมดของเส้นใยแก้ว (Km)
	M	คือการสูญเสียสัญญาณที่เผื่อไว้ในระบบ เช่น การสูญเสียสัญญาณจากสาย

Patch-cord เป็นต้น (System Margin : $M = 3 \text{ dB}$)

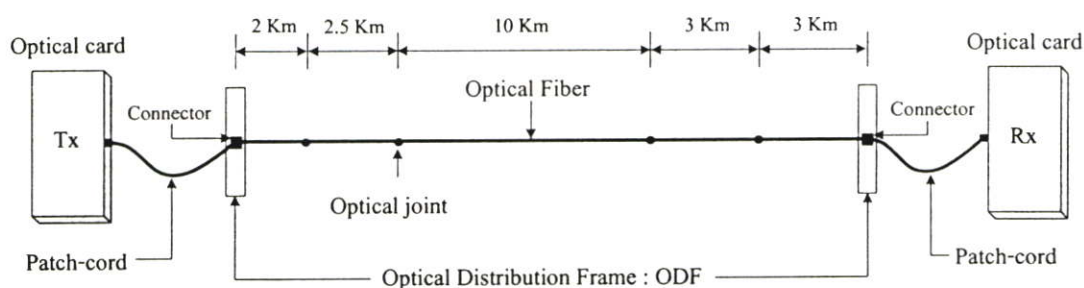
ระบบที่มีการเชื่อมต่อด้วยเส้นใยแก้วจะมีค่าการสูญเสียสัญญาณในส่วนต่างๆ ของระบบ แสดงดังในตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 การสูญเสียสัญญาณสำหรับความยาวคลื่น 1,310 nm

	การสูญเสียสัญญาณ ของเส้นใยแก้ว (dB / Km)	การสูญเสีย สัญญาณของคอน- เน็กเตอร์ (dB)	การสูญเสีย สัญญาณของจุด เชื่อมต่อ (dB)	
ค่าต่ำสุด	0.3	0.4	0.02	สภาวะดีที่สุด
ค่าเฉลี่ย	0.38	0.6	0.1	สภาวะปกติ
ค่าสูงสุด	0.5	1	0.2	สภาวะเลวร้ายที่สุด

ตารางที่ 2.5 การสูญเสียสัญญาณสำหรับความยาวคลื่น 1,550 nm

	การสูญเสียสัญญาณ ของเส้นใยแก้ว (dB/Km)	การสูญเสีย สัญญาณของคอน- เน็กเตอร์ (dB)	การสูญเสีย สัญญาณของจุด เชื่อมต่อ (dB)	
ค่าต่ำสุด	0.17	0.2	0.01	สภาวะดีที่สุด
ค่าเฉลี่ย	0.22	0.35	0.05	สภาวะปกติ
ค่าสูงสุด	0.4	0.7	0.1	สภาวะเลวร้ายที่สุด



รูปที่ 2.28 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วในระบบหรือใน 1 เส้นทาง

จากรูปที่ 2.28 แสดงถึงลักษณะการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วในระบบที่มีการใช้งานจริงสามารถประมาณค่าการสูญเสียสัญญาณทั้งหมดได้จากสมการ (2.23) ดังนี้

- ในสภาวะปกติ สำหรับความยาวคลื่น 1,310 nm

$$\begin{aligned} TA &= (2 * 0.6 \text{ dB}) + (4 * 0.1 \text{ dB}) + (0.38 \text{ dB/Km} * 20.5 \text{ Km}) + (3 \text{ dB}) \\ &= 12.39 \text{ dB} \end{aligned}$$

- ในสภาวะเลวร้ายที่สุด สำหรับความยาวคลื่น 1,310 nm

$$\begin{aligned} TA &= (2 * 1 \text{ dB}) + (4 * 0.2 \text{ dB}) + (0.5 \text{ dB/Km} * 20.5 \text{ Km}) + (3 \text{ dB}) \\ &= 16.05 \text{ dB} \end{aligned}$$

- ในสภาวะปกติ สำหรับความยาวคลื่น 1,550 nm

$$\begin{aligned} TA &= (2 * 0.35 \text{ dB}) + (4 * 0.05 \text{ dB}) + (0.22 \text{ dB/Km} * 20.5 \text{ Km}) + (3 \text{ dB}) \\ &= 8.41 \text{ dB} \end{aligned}$$

- ในสภาวะเลวร้ายที่สุด สำหรับความยาวคลื่น 1,550 nm

$$\begin{aligned} TA &= (2 * 0.7 \text{ dB}) + (4 * 0.1 \text{ dB}) + (0.4 \text{ dB/Km} * 20.5 \text{ Km}) + (3 \text{ dB}) \\ &= 13 \text{ dB} \end{aligned}$$

ค่าการสูญเสียสัญญาณสูงสุดที่ยังคงทำให้ระบบทำงานได้ หรือ Power budget : P_B คือค่าการสูญเสียสัญญาณสูงสุดที่ Optical card ยอมให้เกิดขึ้นได้ในระบบ และยังคงสามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ตามปกติ มีค่าดังสมการที่ (2.24)

$$P_B = P_t - P_r \quad (2.24)$$

เมื่อ P_B คือค่าการสูญเสียสัญญาณสูงสุดที่ยังคงทำให้ระบบทำงานได้ (dB)
 P_t คือกำลังงานของ Optical card ด้านส่ง (dB)
 P_r คือกำลังงานของ Optical card ด้านรับ (dB)

ตัวอย่างคุณสมบัติกำลังงานของ Optical card ที่สามารถยอมรับได้ เช่น

ด้านส่ง (Tx) = 0 dB ถึง -3 dB ที่ความยาวคลื่น 1,310 nm

ด้านรับ (Rx) = -27 dB ถึง -20 dB ที่ความยาวคลื่น 1,310 nm

สำหรับในกรณีนี้ ค่าการสูญเสียสัญญาณสูงสุดที่ยังคงทำให้ระบบทำงานได้ (Power budget) มีค่าดังนี้

- ในสภาวะดีที่สุด : ระบบสามารถรองรับการสูญเสียสัญญาณได้มากที่สุด

$$P_B = P_t - P_r$$

$$P_B = 0 - (-27)$$

$$P_B = 27 \text{ dB}$$

นั่นหมายความว่า ทรายใดที่การสูญเสียสัญญาณยังไม่เกิน 27 dB ระบบการสื่อสารที่เชื่อมต่อด้วยเส้นใยแก้วก็ยังสามารถทำงานได้ตามปกติ แต่หากการสูญเสียสัญญาณเกินกว่า 27 dB ระบบก็จะไม่สามารถทำงานได้

- ในสภาวะเลวร้ายที่สุด : ระบบสามารถรองรับการสูญเสียสัญญาณได้น้อยสุด

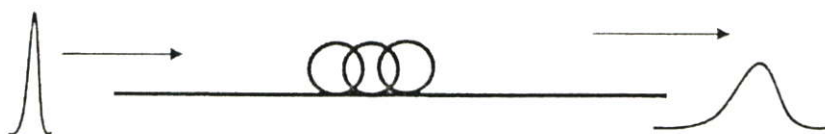
$$P_B = P_t - P_r$$

$$P_B = -3 - (-20)$$

$$P_B = 17 \text{ dB}$$

นั่นหมายความว่า ทรานสไมต์การสูญเสียสัญญาณยังไม่เกิน 17 dB ระบบการสื่อสารที่เชื่อมต่อกับสายใยแก้วก็ยังคงสามารถทำงานได้ตามปกติ แต่หากการสูญเสียสัญญาณเกินกว่า 17 dB ระบบก็จะไม่สามารถทำงานได้

2.11 ดิสเพอร์ชัน



รูปที่ 2.29 การบานออกของสัญญาณพัลส์ในระบบสื่อสารด้วยสายใยแก้ว

ในการสื่อสารข้อมูลแบบดิจิทัล สัญญาณพัลส์ของแสงที่เดินทางไปในสายใยแก้ว นอกจากจะถูกลดทอนค่าความเข้มแสงลงแล้ว ลักษณะของสัญญาณพัลส์ยังเกิดการผิดรูปไปด้วย โดยทั่วไปมักเกิดจากการบานออกในโดเมนเวลาหรือที่เรียกว่า ดิสเพอร์ชัน (Dispersion) ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันนี้ถือเป็นสิ่งที่สำคัญในสายใยแก้ว เพราะส่งผลโดยตรงกับขนาดของปริมาณข้อมูลที่ใช้สื่อสารกัน ดิสเพอร์ชันสามารถเกิดขึ้นได้กับสายใยแก้วทุกชนิด โดยไม่ขึ้นกับรูปลักษณะของสัญญาณพัลส์เลย ดิสเพอร์ชันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่คือ Intermodal Dispersion (อินเตอร์โมดอล ดิสเพอร์ชัน) และ Intramodal Dispersion (อินทราโมดอล ดิสเพอร์ชัน) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.11.1 Intermodal Dispersion

Intermodal Dispersion เป็นการบานออกของสัญญาณพัลส์ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเดินทางของแสงแต่ละโหมดมีค่าไม่เท่ากัน (แม้ว่าความเร็วจะเท่ากันก็ตาม) Intermodal Dispersion จึงเกิดขึ้นเฉพาะสายใยแก้วชนิดโหมคร่วมเท่านั้น

ค่าความกว้างพัลส์แบบอาร์เอ็มเอสที่บานออก (σ_{int}) ในกรณีของ Intermodal Dispersion นี้ จะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของสายใยแก้ว ตัวอย่างเช่นในกรณีของสายใยแก้วชนิด SI-MM จะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.25)

$$\sigma_{\text{int}} = \frac{n_1 L \Delta}{\sqrt{12} c} \quad (2.25)$$

และในกรณีของเส้นใยแก้วชนิด GI-MM ชนิดที่มีดัชนีหักเหเปลี่ยนไปในลักษณะพาราโบลา จะมีค่าความกว้างพัลส์แบบอาร์เอ็มเอสที่บานออกดังสมการที่ (2.26)

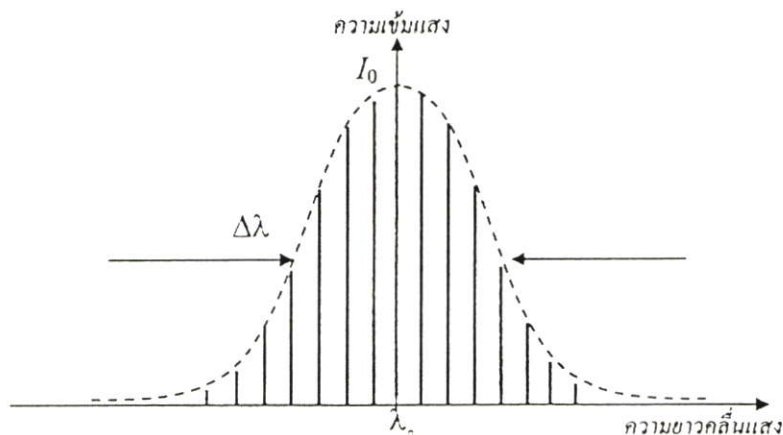
$$\sigma_{\text{int}} = \frac{n_1 L \Delta^2}{\sqrt{48c}} \quad (2.26)$$

ดิสเพอร์ชันชนิด Intermodal นี้จะเกิดเฉพาะในเส้นใยแก้วชนิดโหมดร่วม บางครั้งจึงเรียกว่า Multimode dispersion ส่วนในกรณีของเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยวจะไม่เกิดกลไกของการเกิดดิสเพอร์ชันแบบนี้ ดังนั้นค่าความกว้างพัลส์แบบอาร์เอ็มเอสที่บานออก (σ_{int}) ในกรณีของเส้นใยแก้วชนิด SM จึงมีค่าเป็นศูนย์ ($\sigma_{\text{int}} = 0$)

2.11.2 Intramodal Dispersion

Intramodal Dispersion เป็นการบานออกของสัญญาณพัลส์ ที่เกิดจากคลื่นแสงแต่ละความยาวคลื่นใช้เวลาในการเดินทางไม่เท่ากัน (เมื่อระยะทางเท่ากัน แต่ความยาวคลื่นต่างกันทำให้ความเร็วในการเดินของคลื่นแสงไม่เท่ากัน) ในความหมายของความยาวคลื่นแสงแต่ละค่าย่อมหมายถึงแสงที่มีสีแตกต่างกัน ดังนั้นอาจเรียกปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันแบบนี้ว่า Chromatic Dispersion (Chromatic แปลว่า เกี่ยวกับสี) ก็ได้

ในทางปฏิบัติ แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ ไม่ว่าจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงชนิดใดก็ตามจะไม่สามารถผลิตแสงที่มีความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 2.30 ที่แสดงค่าสเปกตรัมของกลุ่มความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง



รูปที่ 2.30 สเปกตรัมที่แสดง Line width หรือ Spectral width ของแหล่งกำเนิดแสง

ค่าความยาวคลื่นแสงที่ถือว่าแหล่งกำเนิดแสงผลิตออกมา หรือที่มักกำหนดไว้ในคุณสมบัติของตัวกำเนิดแสงจะเป็นค่าความยาวคลื่นกลาง (Center wavelength, λ_0) ซึ่งจะมีค่ากำลังงานหรือความเข้มแสงสูงสุดเป็น I_0 ดังรูปที่ 2.30 เส้นโค้งแสดงถึงค่าความเข้มแสงสูงสุดของความยาวคลื่นต่างๆ ที่แหล่งกำเนิดแสงผลิตออกมาพร้อมกัน ถือเป็นเส้นสมมติ เพื่อแสดงขอบเขตของความยาวคลื่นในการกำเนิดแสง ในช่วงของความยาวคลื่นที่มีความเข้มแสงมากกว่าค่าครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดขึ้นไป หรือที่เรียกว่าช่วงของ FWHM (Full-Width at Half Maximum) โดยจะนิยามว่าเป็น แถบความกว้างสเปกตรัม (Spectral width) ของแหล่งกำเนิดแสง และแทนด้วยสัญลักษณ์ $\Delta\lambda$, σ_λ หรือ σ_s , S_λ ในบางครั้ง คำนี้อาจมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันออกไป เช่น ไลน์ วิดท์ (Line width) เป็นต้น

ค่าของแถบความกว้างสเปกตรัม ($\Delta\lambda$) ของแหล่งกำเนิดแสงเป็นตัวบอกคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงว่า มีความสามารถในการผลิตแสงสีเดียวหรือแสงโมโนโครม (Monochrome) ออกมาได้ดีเพียงไร ถ้าแหล่งกำเนิดแสงมีค่า $\Delta\lambda$ น้อยๆ จะถือว่า แสงที่ได้มีความเป็นโมโนโครมสูง เช่น เลเซอร์ไดโอด ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งผลิตแสงที่มีความเป็นโมโนโครมสูง จะมีค่า $\Delta\lambda$ น้อยประมาณ 1 - 5 nm ในขณะที่แอลอีดีมีค่า $\Delta\lambda$ ประมาณ 20 - 100 nm เป็นต้น

Intramodal Dispersion สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.11.2.1 Material Dispersion

Material Dispersion เกิดจากแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันมีความเร็วต่างกัน แม้จะเดินทางในตัวกลางเดียวกัน เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของตัวกลางเกิดการเปลี่ยนแปลงตามค่าความยาวคลื่นของแสงที่เดินทาง ซึ่งมีผลทำให้ความเร็วของแสงเปลี่ยนแปลงไปด้วย (จาก $v = c/n$) ในทางปฏิบัติมีแสงหลายความยาวคลื่น (แต่มีค่าใกล้กันรวมเป็นกลุ่ม) ที่เดินทางในเส้นใยแก้ว ทำให้แสงแต่ละโหมดเดินทางไปถึงปลายทางไม่พร้อมกัน สัญญาณพัลส์ด้านขาเข้า จึงบานออกมากขึ้นเมื่อไปถึงด้านขาออก ค่าของความกว้างพัลส์แบบอาร์เอ็มเอสที่ขาออก (σ_{mat}) สำหรับเส้นใยแก้วทุกชนิดที่เกิดปรากฏการณ์นี้สามารถแสดงได้ด้วยสมการ (2.27)

$$\sigma_{mat} = \sigma_\lambda L D_{mat} \quad (2.27)$$

เมื่อ L คือระยะทางหรือความยาวของเส้นใยแก้วที่แสงเดินทาง
 D_{mat} คือพารามิเตอร์ของการเกิดดิสเพอร์ชัน (Material Dispersion Parameter) อันเนื่องมาจากวัสดุตัวกลางที่แสงเดินทาง มีค่าแตกต่างกันตามชนิดของเนื้อสาร

$$D_{mat} = \left(\frac{\lambda}{c}\right)\left(\frac{d^2n}{d\lambda^2}\right) \quad (2.28)$$

เมื่อ	n	คือค่าดัชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว
	c	คือความเร็วของแสงในสุญญากาศ ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)
	λ	คือความยาวคลื่นของแสง
	d	คือเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์

2.11.2.2 Waveguide Dispersion

Waveguide Dispersion เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจาก โครงสร้างของท่อนำสัญญาณแสง (Optical waveguide) หรือเส้นใยแก้วนั่นเอง ซึ่งมีค่าแปรผกผันกับขนาดของคอร์ จึงสังเกตได้ในเส้นใยแก้วชนิดโหมคเดี่ยว ที่มีขนาดของคอร์เล็ก ค่าความกว้างพัลส์แบบอาร์เอ็มเอสของแสงที่ออกจากเส้นใยแก้ว อันเนื่องมาจาก Waveguide Dispersion สามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการ (2.29)

$$\sigma_w = \sigma_\lambda L D_w \quad (2.29)$$

เมื่อ	L	คือความยาวของเส้นใยแก้วที่แสงเดินทาง
	D_w	คือพารามิเตอร์ของการเกิดดิสเพอร์ชันจากโครงสร้างของท่อนำคลื่นแสง (Waveguide Dispersion Parameter) ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับ โครงสร้างและขนาดของเส้นใยแก้ว

ในกรณีของเส้นใยแก้วชนิดโหมคร่วม ผลของ Waveguide Dispersion จะเกิดขึ้นน้อยมาก จนสามารถละเลยได้ นั่นคือ $\sigma_w = 0$

2.12 การทดสอบสายเคเบิลใยแก้ว

สายเคเบิลที่ผลิตเสร็จสมบูรณ์แล้ว จะต้องผ่านการทดสอบว่ามีคุณภาพได้มาตรฐานหรือไม่ ถ้าไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดก็ต้องสำรวจหาข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต แล้วทำการปรับปรุงใหม่ ถ้าสายเคเบิลใยแก้วมีคุณภาพได้มาตรฐานตามที่ลูกค้าต้องการก็จัดส่งให้ลูกค้าได้ทันที ในบางครั้งการทดสอบคุณสมบัติของสายเคเบิลใยแก้วไม่เพียงแต่จะกระทำกันเองภายใน

โรงงานผู้ผลิตเท่านั้น แต่ยังคงมีเจ้าหน้าที่จากหน่วยงานของลูกค้าเข้ามาร่วมทดสอบด้วย เพื่อให้เกิดความมั่นใจสูงสุด

การทดสอบคุณสมบัติของสายเคเบิลใยแก้ว สามารถทำตามรูปแบบมาตรฐานที่กำหนด โดยองค์กรสากลต่างๆ เช่น

- สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ หรือ ITU (International Telecommunication Union)
- หน่วยงาน IEC (International Electrotechnical Commission)
- หน่วยงาน ASTM (American Society for Testing and Materials)
- สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม (สมอ. หรือ TIS : Thai Industrial Standard)

การทดสอบมาตรฐานของสายเคเบิลใยแก้ว พอลจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ การทดสอบเส้นใยแก้ว และการทดสอบสายเคเบิล ดังรายละเอียดพอสรุปได้ดังนี้

2.12.1 การทดสอบเส้นใยแก้ว ได้แก่ การตรวจสอบคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของเส้นใยแก้วให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ ตัวอย่างเช่น

- เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของโหมคแสง (MFD) ที่ค่าความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแคลคดิ่ง (หรือของเส้นใยแก้วทั้งเส้น)
- ความกลมของเส้นใยแก้ว
- ค่าการลดทอนสัญญาณแสงในช่วงของความยาวคลื่นที่ใช้งาน เช่น 1,310 และ 1,550

นาโนเมตร เป็นต้น

- ความยาวคลื่นตัดหรือความยาวคลื่นกัทออฟ (Cut-off wavelength)
- ค่าดิสเพอร์ชันแบบโครเมติก (Chromatic Dispersion) ในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน

อย่างไรก็ตามกระบวนการทดสอบเส้นใยแก้วเหล่านี้ มักจะทดสอบมาแล้วจากโรงงานที่ผลิตเส้นใยแก้ว ดังนั้น โรงงานผู้ผลิตสายเคเบิลอาจทำการทดสอบเฉพาะสิ่งที่ตนต้องทำงานเกี่ยวข้องกับเท่านั้น เพื่อให้เกิดความแน่ใจอีกครั้งหนึ่ง

2.12.2 การทดสอบสายเคเบิลเส้นใยแก้ว จะเน้นเฉพาะสายเคเบิลเป็นหลัก ซึ่งมักกระทำในลักษณะย่อได้ดังนี้

การทดสอบของกายภาพ ได้แก่ การตรวจสอบขนาดของส่วนประกอบของสายเคเบิลว่าเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ เช่น

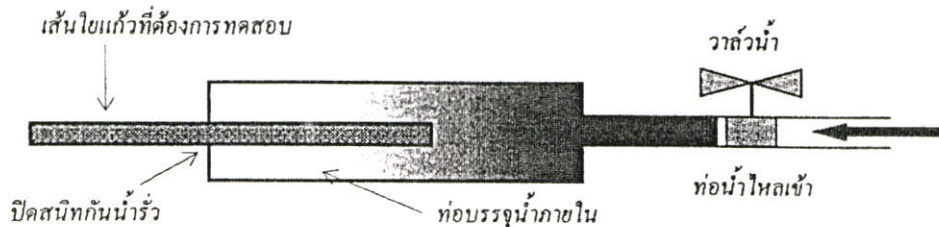
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อหลวม (Loose Tube) แท่งเสริม (Filler rod) แกนรับแรงดึง (Tension member) ของสายเคเบิลทั้งเส้น เป็นต้น

- ค่าความยาวส่วนเกิน (Excess length) เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกของท่อหลวม และแกนรับแรงดึง

การทดสอบความแข็งแรงและทนทานต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น

- การทดสอบความทนทานต่อแรงกระแทก โดยการนำเคเบิลใยแก้วทั้งเส้นไปวางยึดไว้บนแท่น จากนั้นจะปล่อยวัสดุหนักให้ตกลงมาจากที่สูงประมาณ 1 เมตร สายเคเบิลใยแก้วที่ผ่านการทดสอบจะต้องมีสภาพทางกายภาพ และคุณสมบัติทางแสงปกติทุกประการ

- ความยืดหยุ่นของสายเคเบิลใยแก้ว
- การบิดตัวของสายเคเบิลใยแก้ว
- ค่าแรงดึงสูงสุดที่สายเคเบิลใยแก้วทนได้ โดยไม่เกิดอันตรายต่อเส้นใยแก้วภายใน
- ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ไม่คงที่



รูปที่ 2.31 การทดสอบการรั่วซึมของน้ำเข้าสู่สายเคเบิลใยแก้ว

- ค่ารัศมีความโค้งสูงสุดของสายเคเบิลใยแก้ว ที่ไม่ทำให้คุณสมบัติทางแสงของเส้นใยแก้วเปลี่ยนแปลงไป

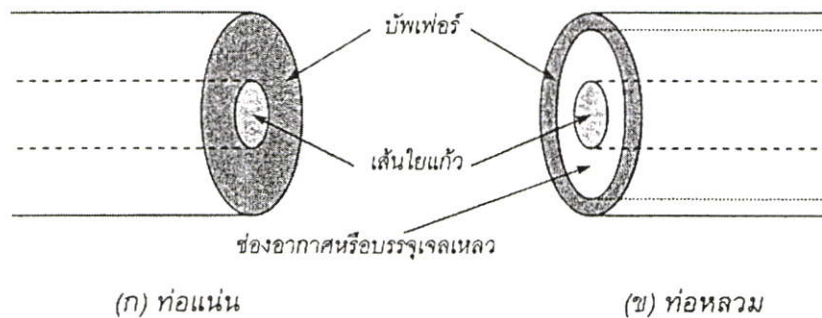
- อัตราการรั่วซึมของน้ำที่ไหลเข้าไปในสายเคเบิลใยแก้ว ทั้งจากผนังโดยรอบเมื่อเกิดการฉีกขาด และจากปลายเปิดของปลายสายเคเบิลใยแก้ว ซึ่งการทดสอบแบบนี้อาจแสดงดังรูปที่ 2.31 โดยการอัดน้ำเข้าไปที่ปลายเปิดของสายเคเบิล แล้วปล่อยทิ้งไว้ สายเคเบิลใยแก้วที่ดีจะอนุญาตให้น้ำซึมเข้าไปภายในสายเคเบิลไม่เกิน 1.2-1.5 เมตร เท่านั้น ทั้งนี้เทปพันกันน้ำ (Water Blocking Tape) ภายในสายเคเบิลจะขยายตัวออกเมื่อเปียกน้ำ จนเสมือนพองตัวปิดช่องอากาศภายในและซึมซับน้ำไว้ไม่ให้น้ำรั่วซึมผ่านต่อไปได้อีก ในกรณีที่ต้องการทดสอบการรั่วซึมที่ผนังเคเบิล ก็อาจทดสอบได้ด้วยวิธีเดียวกัน เพียงแต่ปิดปลายของสายเคเบิลใยแก้ว มิให้น้ำเข้าทางปลายสายเคเบิลเท่านั้น

2.13 การจัดแบ่งสายเคเบิลใยแก้วตามประเภทการใช้งาน

การแบ่งชนิดของสายเคเบิลตามประเภทการใช้งาน อาจจำแนกออกได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งานในแต่ละรูปแบบ โดยทั่วไปพอจะแบ่งออกคร่าวๆ ได้ดังนี้

2.13.1 สายเคเบิลภายในอาคาร (Indoor Cables)

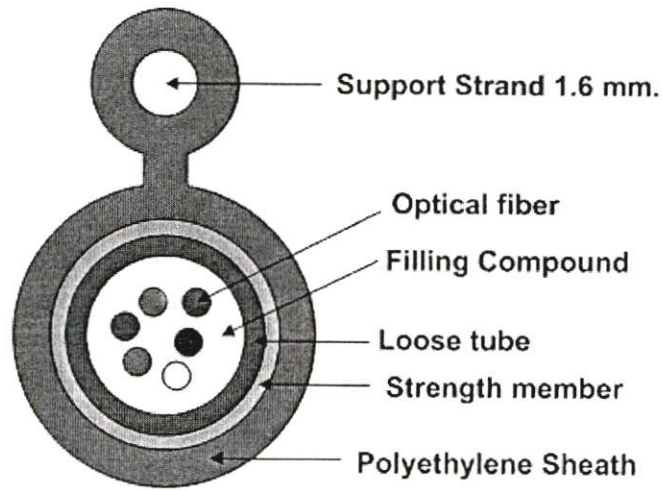
สายเคเบิลใยแก้วที่ใช้ภายในอาคาร โดยทั่วไปมักมีขนาดเล็ก มีปริมาณของเส้นใยแก้วบรรจุอยู่ภายในไม่มากนัก โครงสร้างของสายเคเบิลประเภทนี้มักเป็นแบบท่อแน่นหรือแบบผสมระหว่างท่อแน่นกับท่อหลวม และมักจะไม่มีส่วนประกอบของโลหะอยู่เลย นิยมใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ (LAN) และอุปกรณ์ประเภทเครื่องมือวัดทั้งหลาย เป็นต้น



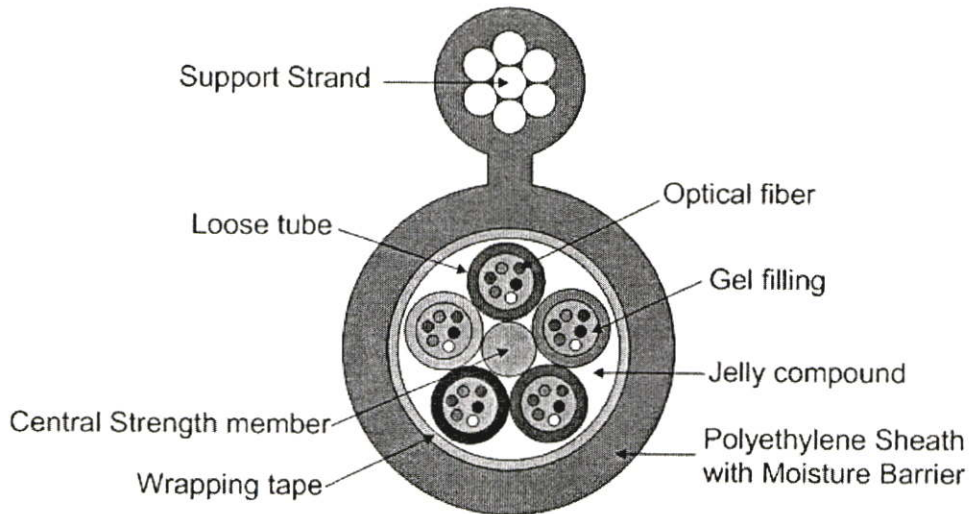
รูปที่ 2.32 โครงสร้างของสายเคเบิลแบบท่อแน่นและท่อหลวม

2.13.2 สายเคเบิลระหว่างอาคาร (Intrabuilding, Aerial Cables)

เคเบิลเส้นใยแก้วระหว่างอาคารจะมีโครงสร้างแบบท่อหลวม เพราะสามารถรับแรงดึงได้ดี ภายในท่อหลวมหนึ่งท่ออาจบรรจุเส้นใยแก้วหลายเส้นรวมกัน เรียกว่า MFPT (Multifiber per tube) บางครั้งต้องทำการแขวนโยงเคเบิลประเภทนี้ระหว่างเสา จึงอาจเรียกว่า เคเบิลอากาศ (Aerial Cables) สายเคเบิลที่ใช้แขวนโยงระหว่างเสาจะมีรูปร่างในภาคตัดขวางคล้ายรูปเลขแปด จึงเรียกว่า แบบฟิกเกอร์-เอท (Figure-8 cable) สายเคเบิลนี้จำเป็นต้องมีแกนรับแรงดึงอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.33 และรูปที่ 2.34



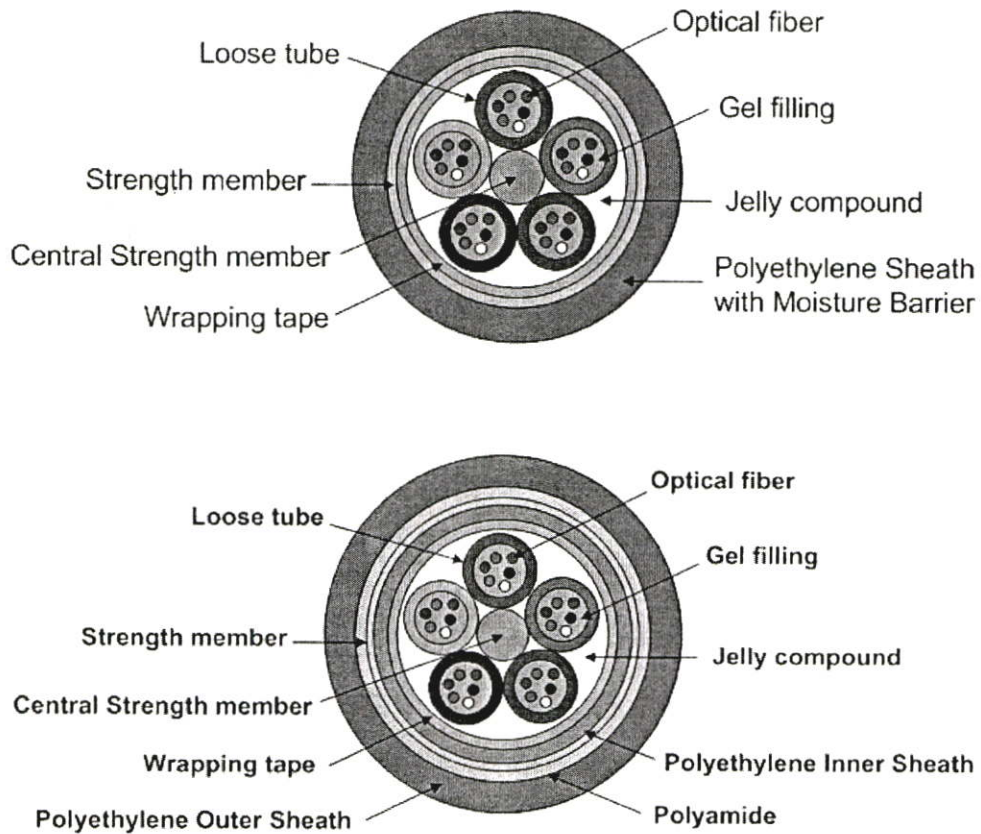
รูปที่ 2.33 โครงสร้างของสายเคเบิลชนิด Figure-8 ที่มี 1 ท่อหลวม



รูปที่ 2.34 โครงสร้างของสายเคเบิลชนิด Figure-8 ที่มีหลายๆ ท่อหลวม

2.12.3 สายเคเบิลนอกอาคาร (Outdoor Cables)

สายเคเบิลนอกอาคารจะใช้ต่อจากสายเคเบิลภายในอาคารหรือเคเบิลระหว่างอาคาร โครงสร้างของสายเคเบิลแบบนี้มักเป็นแบบท่อแน่น ห่อหุ้มด้วยผนังที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้สูง ใช้สำหรับการรับ-ส่งข้อมูลที่มีปริมาณมาก ในเคเบิลแต่ละเส้นจะมีเส้นใยแก้วจำนวนมาก เช่น 48, 96, 120 เป็นต้น การเชื่อมโยงสายเคเบิลภายนอกอาคาร อาจใช้วิธีการฝัง ทั้งการฝังโดยตรง (Direct buried cable) หรือแบบร้อยท่อ (Duct cable) เพื่อสร้างความ เป็นระเบียบและทัศนียภาพที่ดี บางคนจึงเรียกสายเคเบิลแบบนี้ว่าแบบใต้ดิน (Underground Cables)



รูปที่ 2.35 โครงสร้างของเคเบิลนอกอาคาร

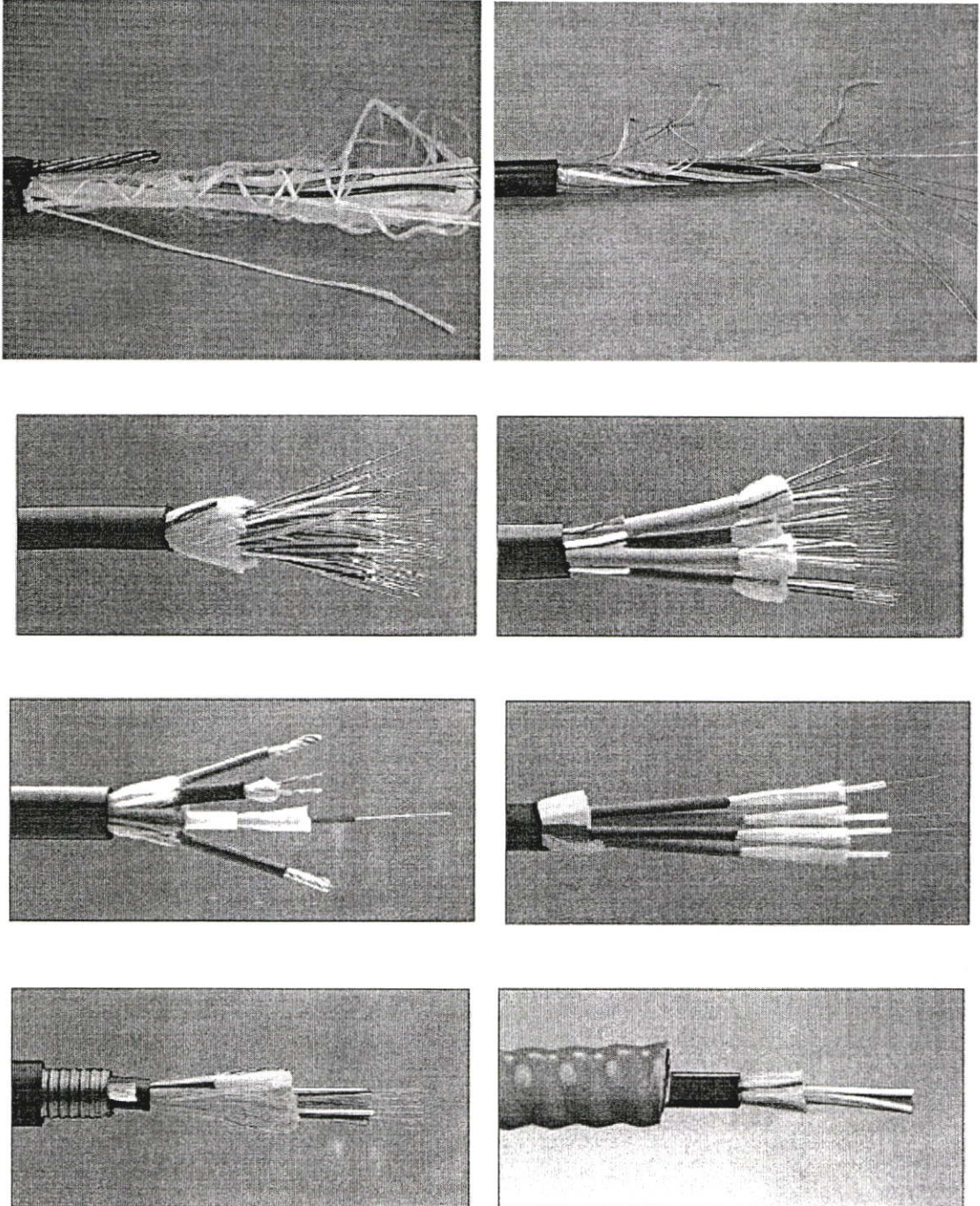
2.12.4 สายเคเบิลแบบลูกผสม (Hybrid cables)

สายเคเบิลแบบลูกผสมหรือแบบไฮบริด เป็นสายเคเบิลที่มีเส้นใยแก้วและสายไฟทองแดงอยู่รวมกัน โดยเส้นใยแก้วมักใช้สำหรับการใช้งานสื่อสารข้อมูล ในขณะที่สายไฟทองแดงใช้เป็นสื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปสู่จุดหมาย เสมือนเป็นสายไฟฟ้ากำลังต่ำๆ ไปในตัว ทำให้ประหยัดในการเลือกใช้สายเคเบิล ในบางครั้งตัวนำทองแดงอาจถูกใช้สำหรับเป็นสายดินหรือสายกราวด์ เส้นใยแก้วแบบนี้เรียกว่าแบบ OFWG (Optical Fiber with Ground Wire) ซึ่งในเมืองไทยก็มีใช้งานอยู่บ้างเหมือนกัน โดยเฉพาะหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการส่งระบบไฟฟ้ากำลัง

2.12.5 สายเคเบิลใต้น้ำ (Submarine Cables)

การสื่อสารข้อมูลระหว่างประเทศหรือระหว่างภูมิภาคใหญ่ๆ จำเป็นต้องวางเคเบิลผ่านมหาสมุทร สายเคเบิลประเภทนี้มักประกอบด้วยโครงสร้างของท่อหลวมหลายๆ ท่อรวมกันอยู่ในสายเคเบิลเส้นเดียว สายเคเบิลหนึ่งเส้นอาจมีเส้นใยแก้วมากถึง 144 เส้น จึงทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างใหญ่กว่าสายเคเบิลประเภทอื่น แต่ก็ไม่ได้ถือว่าใหญ่มากเมื่อเทียบกับสายเคเบิลทองแดงทั่วไป สายเคเบิลประเภทนี้อาจมีลักษณะเป็นแบบลูกผสมหรือไฮบริด เนื่องจากต้องใช้

ตัวนำทองแดงส่งกำลังไฟฟ้าไปยังสถานีทวนสัญญาณที่อยู่ใต้ทะเล ที่สำคัญโครงสร้างของสายเคเบิลใต้น้ำจะซับซ้อนกว่าสายเคเบิลอื่น เพราะต้องทนต่อแรงกดของน้ำมากๆ ได้เป็นเวลานานๆ อีกทั้งต้องมีส่วนประกอบที่สามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำได้เป็นอย่างดี

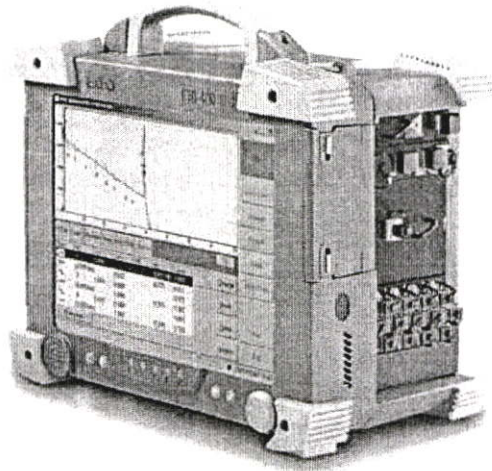


รูปที่ 2.36 ตัวอย่างสายเคเบิลเส้นใยแก้วแบบต่างๆ

บทที่ 3

Optical Time Domain Reflectometer

Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายสำหรับงานทางด้าน การตรวจสอบเส้นใยแก้ว เพราะสามารถวัดหาค่ารายละเอียดต่างๆเกี่ยวกับเส้นใยแก้วได้เป็นอย่างดี [12], [13]



รูปที่ 3.1 ลักษณะของ OTDR

3.1 ประโยชน์ของ OTDR

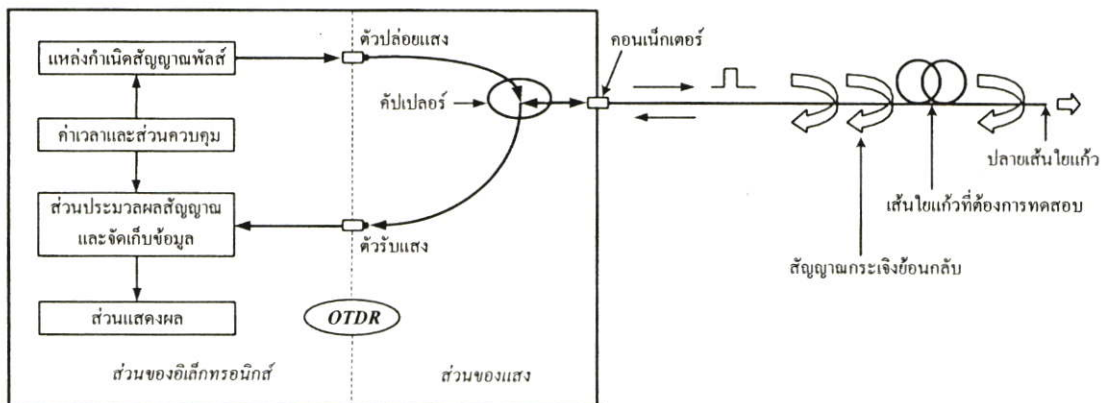
เมื่อใช้ OTDR ทดสอบเส้นใยแก้ว ผู้ใช้สามารถวัดหาค่าสิ่งต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- วัดความยาวของเส้นใยแก้วทั้งหมดที่ใช้งาน
- วัดหาความยาวของเส้นใยแก้วแต่ละเส้นที่นำมาต่อในระบบ
- วัดค่าการลดทอนสัญญาณของแสงในเส้นใยแก้ว (แต่ละเส้นในระบบพร้อมกัน)
- วัดค่าการสูญเสียสัญญาณของจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วในลักษณะต่างๆ
- แสดงจำนวนของเส้นใยแก้วที่ใช้ในการเชื่อมโยงระหว่างสถานี
- แสดงตำแหน่งหรือจุดบกพร่องของเส้นใยแก้ว

นอกจากนี้ หากผู้ใช้เครื่อง OTDR มีประสบการณ์เพียงพอ จะสามารถวิเคราะห์รูปแบบสัญญาณของจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วเพื่อคาดคะเนได้ว่า จุดเชื่อมต่อที่นั้นเกิดจากการสปไลซ์ (Splice) หรือใช้คอนเน็กเตอร์ (Connector) รวมทั้งอาจจะระบุได้ว่าตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องของเส้นใยแก้วเกิดจากอะไร เช่น เส้นใยแก้วแตกหักหรือเกิดรอยร้าว เป็นต้น

3.2 หลักการทำงานของ OTDR

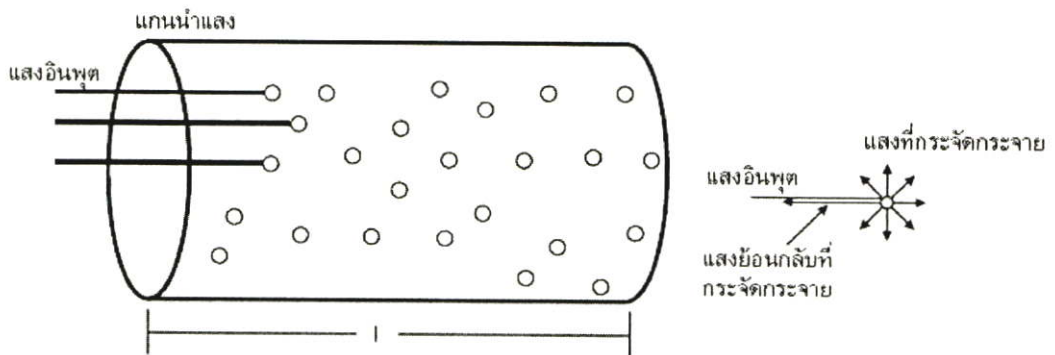
OTDR ทำงานโดยอาศัยหลักการวัดสัญญาณกระเจิงย้อนกลับ (Back Scattering) ที่เกิดขึ้นขณะป้อนสัญญาณแสงเข้าไปในเส้นใยแก้ว รูปที่ 3.2 แสดงหลักการทำงานพื้นฐานของ OTDR ภายในตัวเครื่องจะมีแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่เปล่งออกมาด้วยค่าความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว (เช่น 1,310 นาโนเมตร หรือ 1,550 นาโนเมตร) ในลักษณะพัลส์ที่ห่างกันด้วยคาบเวลาที่แน่นอน สัญญาณพัลส์แสงนี้จะถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้ว ผ่านคัปเปลอร์ แล้วเข้าสู่เส้นใยแก้วที่ต้องการทดสอบ ซึ่งต่อเข้ากับ OTDR ด้วยคอนเน็กเตอร์ (Connector) ในขณะที่สัญญาณพัลส์ของแสงเริ่มส่งสัญญาณเข้าไปในเส้นใยแก้ว จะมีสัญญาณจากส่วนควบคุมมาทริก (Trig) แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์และส่วนประมวลผลสัญญาณ เพื่อให้การแสดงผลของ OTDR สัมพันธ์กับสัญญาณพัลส์ที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้ว



รูปที่ 3.2 หลักการทำงานของ OTDR

สัญญาณแสงที่เดินทางเข้าสู่ระบบเส้นใยแก้ว จะเดินทางเข้าไปตามแนวของเส้นใยแก้ว ด้วยความเร็ว $v = c/n_1$ เมื่อ c คือความเร็วแสงในอากาศ ($c = 3 \times 10^8$ m/s) และ n_1 คือค่าดัชนีหักเหแสงของคอร์ ในขณะที่แสงเดินทางอยู่ภายในคอร์ของเส้นใยแก้วจะเกิดการกระเจิง (Scattering) ทุกครั้งที่แสงกระทบกับ โมเลกุลของเนื้อสาร การกระเจิงหรือการกระจายของแสงนี้จะเกิดขึ้นทุกทิศทุกทาง โดยรอบ โมเลกุลของเนื้อสาร ดังรูปที่ 3.3 ทิศทางของแสงที่เกิดจากการกระเจิงหรือการกระจายแบบ Rayleigh นี้มีโอกาสเกิดได้ในทุกทิศทาง แต่จะมีแสงบางส่วนที่กระจัดกระจายย้อนกลับไปยัง OTDR แสงที่สะท้อนกลับไปในลักษณะดังกล่าวเรียกว่า Back scattering light โดยจะมีขนาดของกำลังแสงลดลงเป็นฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล เมื่อเทียบกับระยะทางที่สัญญาณแสงใช้ในการเดินทางไปและกลับ โดยทั่วไปขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับเทียบกับขนาดของสัญญาณที่ OTDR ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วจะอยู่ในช่วง 45-60 เดซิเบล เมื่อ

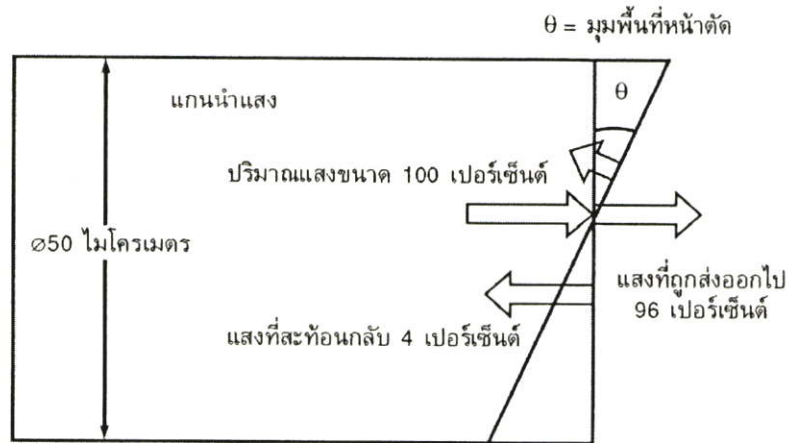
สัญญาณแสงที่เกิดจากการกระเจิงย้อนกลับนี้ เดินทางย้อนกลับมายัง OTDR ผ่านคัปเปิลเลอร์ สัญญาณจะถูกกำหนดให้เดินทางเข้าสู่ส่วนประมวลผลสัญญาณและจัดเก็บข้อมูล เพื่อวัดหาค่าความเข้มแสงที่เดินทางกลับมา อย่างไรก็ตามแสงที่เกิดจากการกระเจิงย้อนกลับจะมีค่าความเข้มแสงน้อยมาก ทำให้โฟโต ดีเทคเตอร์ (Photo Detector) ของส่วนประมวลผลสัญญาณและจัดเก็บข้อมูล จะต้องมีความไวในการรับสัญญาณแสง (Optical Sensitivity) สูงๆ (หรือสามารถรับสัญญาณความเข้มของแสงน้อยๆ ได้ดี)



รูปที่ 3.3 ลักษณะของ Scattering objects ภายในเส้นใยแก้ว

Rayleigh scattering เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณแสงภายในเส้นใยแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความยาวคลื่นในช่วง 850 นาโนเมตร สาเหตุของ Rayleigh scattering นั้นเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลาง (Refractive index fluctuation) ขณะที่เส้นใยแก้วเย็นตัวลง การลดทอนที่เกิดขึ้นจากสาเหตุดังกล่าวยังไม่สามารถกำจัดออกไปได้ด้วยเทคนิคการผลิตเส้นใยแก้วในปัจจุบัน ทิศทางการกระจัดกระจายของแสงที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปได้ทุกทิศทาง จากการศึกษพบว่า การลดทอนของแสงเนื่องมาจาก Rayleigh scattering จะแปรผกผันกับกำลังสี่ของความยาวคลื่นแสง (α/λ^4) ที่ใช้ ดังนั้นถ้ายังใช้แสงที่มีความยาวคลื่นยาวมาก การลดทอนของสัญญาณก็จะลดลง

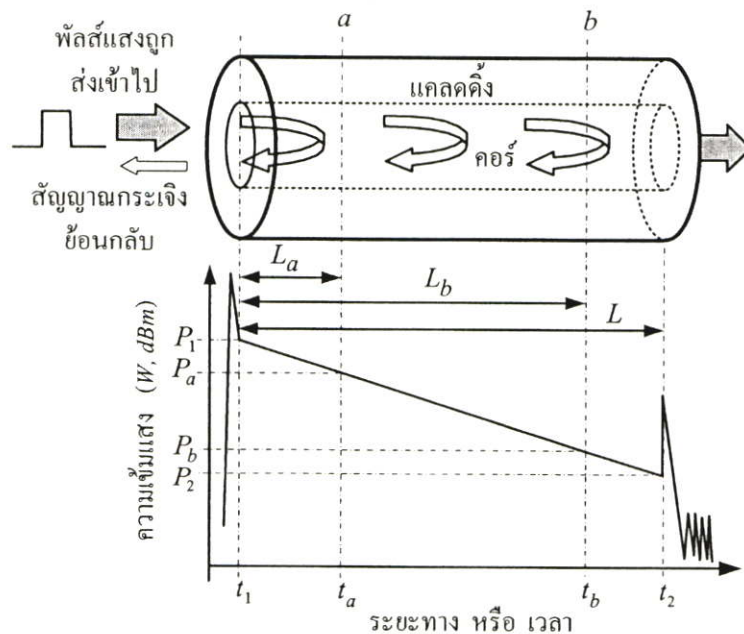
การสะท้อนอีกลักษณะหนึ่งของแสงภายในเส้นใยแก้วสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวกลางของแสง เช่น การสะท้อน ณ บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อสารกับอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ถ้าหน้าตัดของเส้นใยแก้วตั้งฉากกับทางเดินของแสง (หรือแกนของเส้นใยแก้ว) สัมประสิทธิ์ของแสงสะท้อนจะไม่เกิน 4% (13.98 dB) ลักษณะการสะท้อนในลักษณะนี้เรียกว่า การสะท้อนแบบเฟรสเนล (Fresnel reflection) ซึ่งลักษณะการสะท้อนแบบเฟรสเนลสามารถพบได้ที่รอยต่อระหว่างเส้นใยแก้ว 2 เส้นที่เชื่อมต่อกันด้วยหัวต่อ (Connector) รวมทั้งจุดต่อระหว่าง OTDR กับเส้นใยแก้วและที่ปลายสุดของเส้นใยแก้ว



รูปที่ 3.4 การสะท้อนกลับของแสงบริเวณรอยต่อของตัวกลางที่เป็นแก้วกับอากาศ

3.3 ลักษณะของสัญญาณสะท้อนกลับในเส้นใยแก้ว

เมื่อสัญญาณพัลส์ของแสงเดินทางเข้าไปในเส้นใยแก้ว แต่ละตำแหน่งที่แสงเดินทางผ่าน จะเกิดสัญญาณแสงส่วนน้อยเดินทางย้อนกลับมายัง OTDR ในขณะที่แสงส่วนใหญ่ยังคงเดินทางต่อไปข้างหน้า สัญญาณแสงย้อนกลับที่รับได้จะเสมือนเป็นสัญญาณต่อเนื่อง แม้จะเกิดจากแสงที่เป็นพัลส์ก็ตาม โดยแสงที่สะท้อนกลับมาก่อนจะมีความเข้มแสงมากกว่าแสงที่สะท้อนกลับมาจากจุดที่อยู่ห่างออกไป เนื่องจากแสงใช้ระยะทางในการเดินทางสั้นกว่า



รูปที่ 3.5 การกระเจิงย้อนกลับของแสงในเส้นใยแก้ว

จากรูปที่ 3.5 สัญญาณแสงที่กระเจิงย้อนกลับมาจากตำแหน่ง a จะเดินทางเป็นระยะทาง $2L_a$ (ไปและกลับ) เพื่อย้อนกลับเข้ามาสู่ OTDR (ในทางปฏิบัติจะถือว่าระยะทางที่แสงเดินทางใน OTDR มีค่าน้อยมาก) ในขณะที่แสงกระเจิงย้อนกลับจากตำแหน่ง b จะเดินทางเป็นระยะทางที่มากกว่า และใช้เวลานานกว่า ทำให้ค่าความเข้มแสงมีค่าน้อยกว่าการกระเจิงในตำแหน่ง a อันเนื่องมาจากค่าการลดทอนสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนั่นเอง และเนื่องจากแสงเกิดกระเจิงทุกตำแหน่งในเส้นใยแก้ว สัญญาณแสงที่ OTDR วัดได้ จึงมีค่าความเข้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ตามเวลาและระยะทางของการเดินทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ที่กำหนดให้แกนตั้งแสดงค่าความเข้มแสงที่วัดได้ และแกนนอนแสดงระยะทาง (L) ของเส้นใยแก้ว ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าที่แน่นอนได้จากสมการ (3.1)

$$2L = \frac{v}{t} = \frac{ct}{n_1} \quad (3.1)$$

เมื่อ t คือช่วงเวลาที่พัลส์ของแสงเดินทางไปและกลับมายัง OTDR
 n_1 คือค่าดัชนีหักเหแสงของคอร์

แนวแกนนอนของกราฟในรูปที่ 3.5 ปกติจะวัดออกมาได้เป็นค่าของเวลา แต่เครื่อง OTDR จะนำมาคำนวณเพื่อหาค่าระยะทางที่สอดคล้องกับตำแหน่งของเวลาได้จากสมการที่ (3.1) แล้วแสดงออกมาบนจอแสดงผล ตัวอย่างเช่น ในการคำนวณหาความยาวของเส้นใยแก้วทั้งเส้น จะทำได้ด้วยสมการ $L = \frac{ct}{2n_1}$ เมื่อ $t = t_2 - t_1$

จากรูปในรูปที่ 3.5 สัญญาณเริ่มต้นจะมีลักษณะเป็นยอดขึ้นไป เนื่องจากการสะท้อนของแสงที่ปลายขาเข้าเส้นใยแก้วนอกเหนือจากการกระเจิง ทำให้มีปริมาณความเข้มแสงมากกว่าที่ควร จากจุดนี้ถือเป็นจุดเริ่มต้นของเส้นใยแก้วซึ่งแสดงด้วยเวลา t_1 ในรูป สัญญาณแสงที่วัดได้จาก OTDR จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามค่าการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้ว จนกระทั่งแสงเดินทางออกจากเส้นใยแก้วที่เวลา t_2 ซึ่งที่ตอนปลายของเส้นใยแก้วมักจะเป็นอากาศ ทำให้เกิดการสะท้อนแสงกลับมามากเช่นเดียวกับตอนส่งแสงเข้าไปในเส้นใยแก้ว ลักษณะของกราฟจึงเป็นยอดแหลมเช่นเดียวกัน หากค่าความเข้มแสงที่วัดได้ที่เวลา t_1 มีค่าเป็น P_1 (วัตต์) และความเข้มแสงที่เวลา t_2 มีค่าเป็น P_2 (วัตต์) ทำให้สามารถคำนวณหาค่าการลดทอนสัญญาณแสงของเส้นใยแก้วได้จากสมการที่ (3.2)

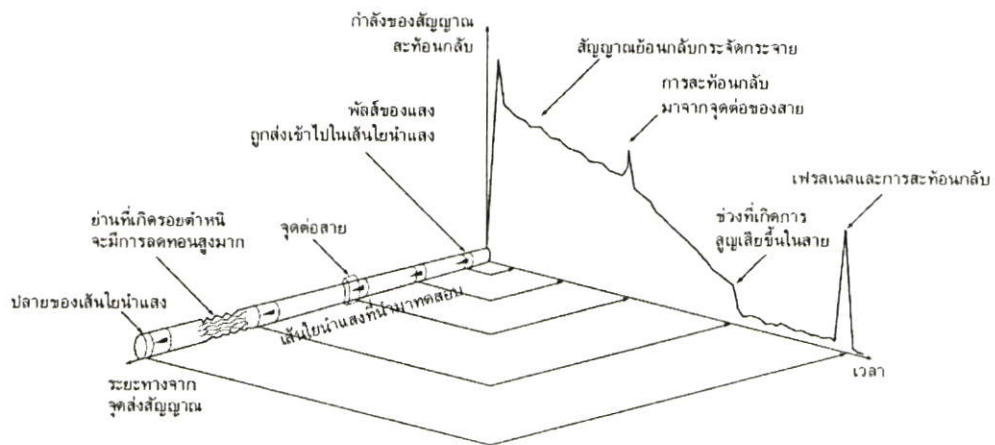
$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_2}{P_1} \text{ dB/km} \quad (3.2)$$

เมื่อ L คือความยาวของเส้นใยแก้วทั้งเส้นหรือในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2

กรณีที่ทราบค่าความเข้มแสงที่วัดได้ที่ขาเข้า P_1 และที่ขาออก P_2 ของเส้นใยแก้ว ในหน่วยของ dBm ก็จะสามารถคำนวณหาค่าการลดทอนสัญญาณแสงได้ง่ายขึ้น ด้วยสมการ (3.3)

$$\alpha = \frac{P_1 - P_2}{L} \quad \text{dB/km} \quad (3.3)$$

จากรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นลักษณะของกราฟที่แสดงโดย OTDR ในลักษณะการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณกับระยะทางของเส้นใยแก้ว ซึ่งสามารถบอกถึงลักษณะทางกายภาพของเส้นใยแก้วได้เป็นอย่างดี ในการตรวจวัดเส้นใยแก้วแต่ละเส้นทางจะได้ลักษณะของสัญญาณสะท้อนกลับที่แตกต่างกันไป สัญญาณดังกล่าวจึงเรียกว่า Fiber Signature



รูปที่ 3.6 กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อแบบต่างๆ ของเส้นใยแก้ว

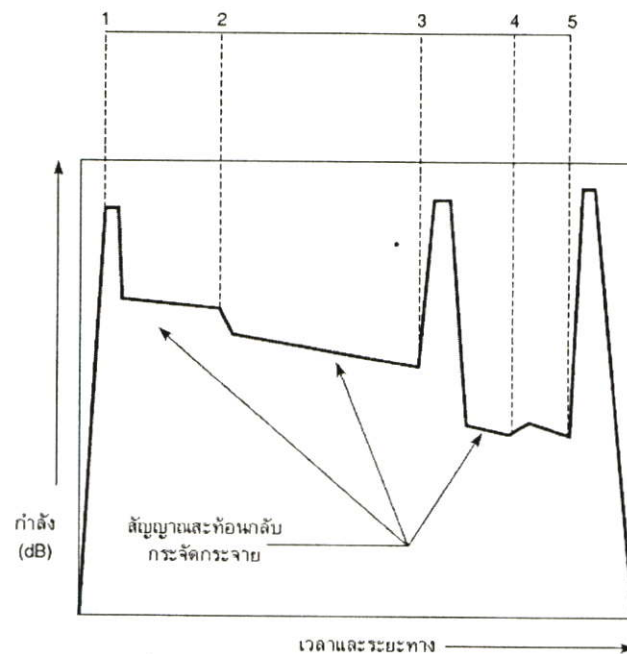
จากกราฟจะพบว่าความชันของเส้นกราฟที่วัดได้ จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้ว กล่าวคือ หากเส้นกราฟมีความชันมากแสดงว่าเส้นใยแก้วมีค่าการลดทอนสัญญาณมาก หรือถ้าเส้นใยแก้วมีค่าการลดทอนสัญญาณต่ำ ก็จะได้กราฟที่มีความชันน้อย เป็นต้น

สำหรับบริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณนั้น มีการสะท้อนของแสงเช่นกัน แต่กลไกของการสะท้อนเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตัวกลางของสัญญาณ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง ทำให้ปริมาณของแสงสะท้อนเกิดขึ้นมากกว่าการสะท้อนกลับของแสงในแบบข้างต้น ในรูปที่ 3.7 เป็นตัวอย่างของ Fiber Signature ซึ่งจะมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณที่วัดได้จาก OTDR ในทางปฏิบัติ จากรูปได้แสดงให้เห็นถึง

ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพที่มีบนเส้นใยแก้วกับเวลาหรือระยะทาง ลักษณะทางกายภาพบนตำแหน่งต่างๆ ของเส้นใยแก้วประกอบด้วย

1. จุดเชื่อมต่อของหัวต่อระหว่าง OTDR กับเส้นใยแก้ว
2. จุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว 2 เส้นเข้าด้วยกัน โดยการใช้ความร้อน (Fusion splicing)
3. จุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว 2 เส้นเข้าด้วยกัน โดยการใช้หัวต่อหรือ mechanical splice
4. จุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว 2 เส้นเข้าด้วยกันโดยการใช้ความร้อน
5. จุดปลายของเส้นใยแก้ว

ลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ไปดังกล่าว มีผลทำให้กำลังของแสงที่สะท้อนกลับมายังตัววัดแสงมีการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะที่แตกต่างกันด้วย



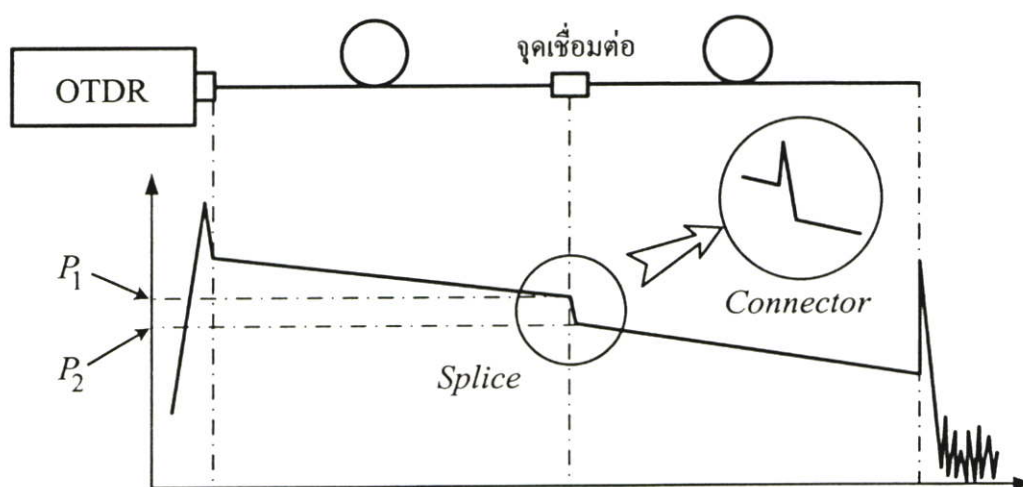
รูปที่ 3.7 ลักษณะกราฟทางกายภาพของเส้นใยแก้วที่ต่างกัน

จากรูปที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ณ ตำแหน่งที่ 1, 3 และ 5 เกิดมาจากสาเหตุที่คล้ายคลึงกัน นั่นก็คือ การเปลี่ยนแปลงของชนิดตัวกลางของแสง (หรือค่าดัชนีหักเหของตัวกลางมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน) บริเวณดังกล่าวจะมีช่องว่างอากาศเล็กๆ เกิดขึ้น ทำให้ปริมาณแสงที่สะท้อนกลับไปยังตัววัดแสงใน OTDR มีค่ามากเมื่อเทียบกับปริมาณแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh บริเวณดังกล่าวมีการเชื่อมต่อแบบใช้อุปกรณ์ช่วย เช่น หัวต่อ จึงเรียกว่าเป็นการเชื่อมต่อแบบ Mechanical แต่ในบางครั้งก็เรียกว่าเป็น Reflective splice ก็เพราะมีการสะท้อนของแสงเกิดขึ้นที่รอยต่อนั่นเอง

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ณ ตำแหน่งที่ 2 และ 4 ไม่ทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนกลับในรูปของพัลส์ตามแบบกรณีข้างต้น เนื่องจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วด้วยวิธี Fusion splicing โดยใช้ความร้อน ทำให้เส้นใยแก้วเชื่อมติดกันเสมือนเป็นเนื้อเดียว แต่ในทางปฏิบัติ ณ ตำแหน่งที่เชื่อมต่อก็ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง (ตำแหน่งรอยต่อ) ที่แตกต่างจากค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วที่นำมาเชื่อมต่ออยู่บ้าง รวมทั้งคุณสมบัติบางอย่างของเส้นใยแก้วที่นำมาเชื่อมต่อกัน มีความแตกต่างกันจึงทำให้สัญญาณที่สังเกตได้อาจมีทั้งลดลง (Loss) และเพิ่มขึ้น (Gainer) จุดเชื่อมต่อในลักษณะนี้ นอกจากจะเรียกว่า Fusion splice แล้ว อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Non - Reflective splice

3.4 การวัดจุดเชื่อมต่อของเส้นใยแก้ว

รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างสัญญาณความเข้มแสงที่วัดได้จาก OTDR เมื่อเส้นใยแก้วสองเส้นต่อเชื่อมกัน ตรงตำแหน่งที่มีการเชื่อมต่อ ย่อมต้องเกิดการสูญเสียสัญญาณ ซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจนจากกราฟ ค่าการสูญเสียสัญญาณตรงจุดเชื่อมต่อนี้เรียกว่า Insertion Loss สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกันกับสมการ (3.2) และ (3.3) ดังนั้นหากค่าความชันของกราฟสัญญาณมีค่าความชันของกราฟไม่เท่ากัน จะทำให้เราทราบได้ทันทีว่า เส้นใยแก้วที่ต่อเชื่อมกันนี้เป็นเส้นใยแก้วคนละเส้นกัน มีการต่อเชื่อมเข้าหากันโดยวิธี Splice หรือเชื่อมต่อโดยใช้ Connector ดังรูป



รูปที่ 3.8 กราฟสัญญาณที่เกิดจากเส้นใยแก้ว 2 เส้น เชื่อมต่อกัน

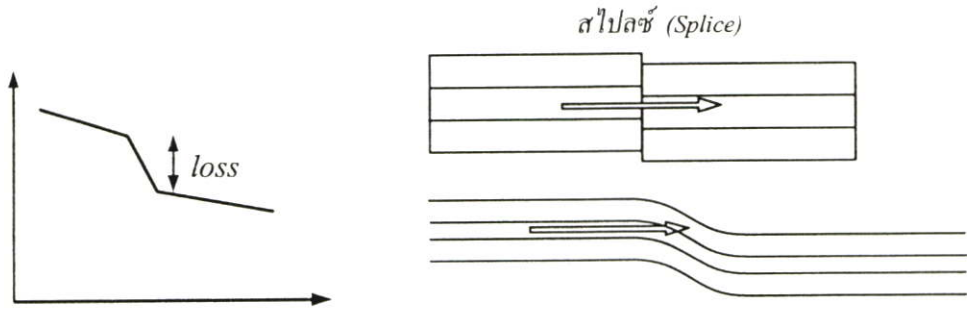
ข้อสังเกตสำคัญในการตีความหมายจากรูปกราฟสัญญาณ โดยทั่วไปตรงรอยต่อนี้มี 2 ลักษณะคือ

1. หากจุดเชื่อมต่อเกิดจากการสไปลซ์ (Splice) ซึ่งเป็นการทำให้เส้นใยแก้ว 2 เส้นมีเนื้อเดียวกัน จะสังเกตกราฟค่าการสูญเสียสัญญาณได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 3.8
2. หากจุดเชื่อมต่อเกิดจากการใช้คอนเน็กเตอร์ (Connector) ซึ่งจะทำให้เกิดช่องว่างอากาศเล็กๆ ระหว่างปลายเส้นใยแก้วทั้งสองที่ต่อเชื่อมกัน ส่งผลทำให้เกิดแสงสะท้อนที่ปลายเส้นใยแก้วกลับมาและรวมกับสัญญาณกระเจิงย้อนกลับเดิม ทำให้มีค่าความเข้มแสงที่จุดนี้เพิ่มขึ้น กราฟสัญญาณที่ได้จึงมีลักษณะเป็นยอดแหลมขึ้น ดังรูปที่แสดงในกรอบวงกลม การคำนวณหาค่าการสูญเสียสัญญาณของจุดต่อนี้ ยังคงใช้สมการเดิมโดยไม่ต้องสนใจยอดแหลมนี้ก็ได้ อย่างไรก็ตาม ขนาดของยอดสัญญาณที่เกิดขึ้น สามารถบ่งบอกค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ของรอยต่อ ซึ่งถือเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ควรควบคุมให้มีค่ามากที่สุด เพราะหากค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าน้อย จะทำให้ยอดสัญญาณมีค่าสูง นั่นคือ พลังงานแสงสะท้อนกลับจะมีค่ามาก และอาจทำความเสียหายให้กับแหล่งกำเนิดแสงได้

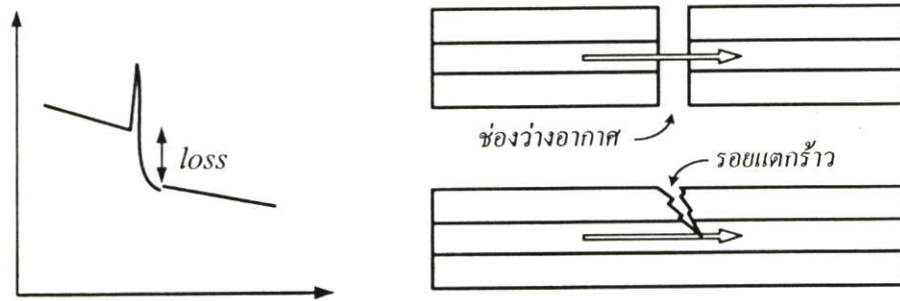
รูปสัญญาณที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วแบบต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ แสดงดังรูปที่ 3.9 ในรูป (ก) และรูป (ข) เป็นลักษณะที่พบเห็นได้ทั่วไป ซึ่งลักษณะของกราฟในรูป (ข) นอกจากจะบอกถึงการใช้คอนเน็กเตอร์ในการเชื่อมต่อแล้ว ยังอาจเกิดจากการแตกร้าวของเส้นใยแก้วได้อีกด้วย ซึ่งในการตีความหมายในทางปฏิบัติต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญพอสมควร สำหรับกราฟในรูป (ก) เป็นลักษณะที่ไม่ค่อยพบเห็นได้บ่อยนัก คือมีลักษณะเหมือนมีการขยายสัญญาณแสงขึ้น จึงมักเรียกรูปแบบนี้ว่า อัตราขยาย (Gain) ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว มิได้เกิดการขยายสัญญาณแสง ณ ตำแหน่งนี้เลย โดยสัญญาณยังคงเกิดการสูญเสียเช่นเดิม แต่สาเหตุที่ทำให้ได้รูปกราฟแบบนี้มักเกิดจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วที่ไม่สมบูรณ์ หรืออาจเกิดจากการใช้เส้นใยแก้วต่างชนิดกัน เช่น เส้นใยแก้วที่ส่งแสง (ด้านซ้ายของรูป) มีขนาดของคอร์ใหญ่กว่าเส้นใยแก้วด้านรับ (ด้านขวาของรูป) ทำให้สัญญาณแสงบางส่วนเกิดการสะท้อนในช่วงของคอร์ด้านส่งต่อเข้ากับส่วนเคลดคิงของเส้นใยแก้วด้านรับ เกิดจากความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหของแสงนั่นเอง

ในทางปฏิบัติการใช้ OTDR วัดกราฟสัญญาณแสงกระเจิงย้อนกลับ เพื่อนำมาวิเคราะห์ ควรทำการวัดจากจุดปลายของเส้นใยแก้วทั้งสองด้านสลับกัน แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย ซึ่งวิธีการเช่นนี้ไม่เพียงแต่จะทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องแล้ว รูปสัญญาณที่เรียกว่า เกน ในรูปที่ 3.9 (ก) จะกลับมี

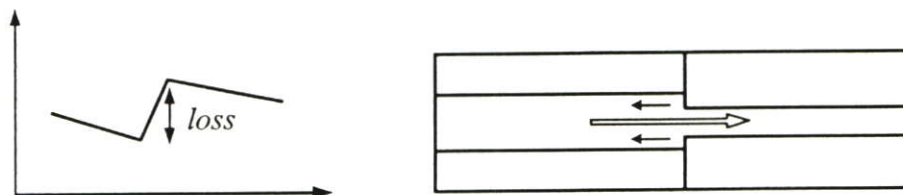
ลักษณะตามปกติเหมือนรูปที่ 3.9 (ก) เมื่อเราทำการต่อ OTDR เข้าที่ปลายอีกด้านหนึ่งสลับจากเดิม ทั้งนี้เพื่อให้สัญญาณแสงเดินทางสวนกลับจากเส้นทางเดิม



(ก) กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อแบบไม่สะท้อน



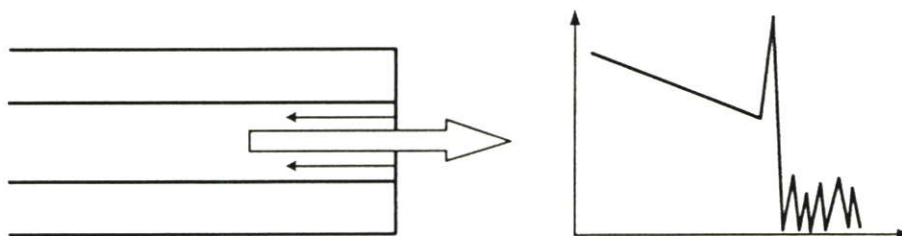
(ข) กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อแบบสะท้อน



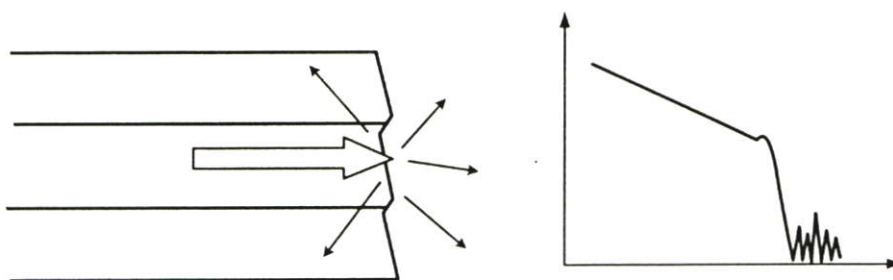
(ค) กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อเป็นเส้นใยแก้วต่างชนิดกัน ทำให้เกิดเกน (Gain)

รูปที่ 3.9 กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อแบบต่างๆ

3.5 สัญญาณที่จุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้ว



(ก) กราฟสัญญาณแบบสะท้อน เพราะจุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้วผิวเรียบตั้งฉาก



(ข) กราฟสัญญาณแบบกระเจิง เพราะจุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้วผิวไม่เรียบ

รูปที่ 3.10 กราฟสัญญาณที่จุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้ว

สัญญาณที่แสดงจุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้วจาก OTDR อาจมีลักษณะที่แตกต่างกัน 2 แบบ ดังรูปที่ 3.10 หากปลายเส้นใยแก้วเป็นระนาบเรียบจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของแสงได้ง่าย สัญญาณที่วัดได้จะมีลักษณะเป็นยอดแหลมดังรูป (ก) โดยขนาดของยอดสัญญาณจะขึ้นอยู่กับความเรียบของปลายเส้นใยแก้วกับมุมระนาบตอนปลายว่าตั้งฉากกับแนวแกนของเส้นใยแก้วเพียงไร ในทางตรงกันข้าม หากปลายของเส้นใยแก้วไม่ราบเรียบ เช่น อาจเกิดจากการแตกหัก จะทำให้แสงที่ส่งออกไปกระจายออกทุกทิศทุกทาง และจะมีแสงสะท้อนกลับมามีน้อยหรือไม่มีเลย สัญญาณที่ได้จึงมีลักษณะดังรูป (ข) กราฟสัญญาณที่ระยะต่อจากปลายเส้นใยแก้ว ไม่ว่าจะป็นกรณีใด จะมีสัญญาณเป็นลักษณะของสัญญาณรบกวน มักมีค่าขึ้นอยู่กับระดับพื้นสัญญาณรบกวน (Noise Floor) ทางไฟฟ้าของเครื่อง OTDR นั้นๆ

3.6 สมการอย่างง่ายของสัญญาณแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับ

เมื่อพัลส์ของแสงถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้ว ขนาดของพัลส์จะลดลงตามขนาดความยาวของเส้นใยแก้ว ถ้าพิจารณาว่ากำลังของสัญญาณที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วมีขนาด $P(0)$ ดังนั้นกำลังของสัญญาณแสงดังกล่าวที่ระยะทาง L (วัดจากปลายของเส้นใยแก้วที่เชื่อมต่อกับ OTDR) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.4)

$$P(L) = P(0)\exp(-\alpha, L) \quad (3.4)$$

โดยที่ $\alpha,$ คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนต่อหน่วยความยาว

เมื่อพิจารณากำลังของแสง $P(L)$ ที่กระจัดกระจายย้อนกลับมายังตัววัดแสงของ OTDR กำลังของแสงที่ตรวจวัดได้จะเป็นไปตามสมการ (3.5)

$$P_B(L) = \frac{P(0) S \alpha_s V_g W \exp(-2\alpha, L)}{2} \quad (3.5)$$

เมื่อ $P_B(L)$ คือกำลังของแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับ
 $P(0)$ คือกำลังของแสงที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้ว
 S คือแฟกเตอร์ของการกระจัดกระจายย้อนกลับ (มีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยแก้วที่ใช้)
 α_s คือสัมประสิทธิ์ของการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh
 V_g คือความเร็วของกลุ่มคลื่นแสง (Group velocity)
 W คือความกว้างของพัลส์แสง (Pulse width)
 $\alpha,$ คือสัมประสิทธิ์การลดทอนต่อหน่วยความยาว
 L คือความยาวของเส้นใยแก้ว

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจัดกระจายย้อนกลับของเส้นใยแก้วแบบ Step-index Multimode สามารถเขียนได้ดังนี้

$$S = \frac{\pi (NA)^2}{4\pi n_1^2} = \frac{(NA)^2}{4n_1^2} \quad (3.6)$$

โดยที่ NA คืออะเพอร์เจอร์เชิงตัวเลขของเส้นใยแก้ว
 n_1 คือค่าดัชนีหักเหของแกนกลางเส้นใยแก้ว

ความหมายของสมการ (3.4) คือ ณ ตำแหน่งใดๆ บนเส้นใยแก้ว เช่น ที่ตำแหน่งห่างจากจุดต่อระหว่างเส้นใยแก้วกับ OTDR มาเป็นระยะทางความยาว L จะเกิดการกระจัดกระจายของแสงขึ้นเนื่องมาจากการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh โดยปริมาณของแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับจากจุดนั้นจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ของการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh (α_s) แสงสามารถกระจัดกระจายได้หลายทิศทาง แต่จะมีบางส่วนที่กระจัดกระจายย้อนกลับทิศทางมายังตัววัดแสงของ OTDR กำลังของแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับมานั้นจะมีปริมาณที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแฟกเตอร์ของการกระจัดกระจายย้อนกลับ (S) กำลังของแสงมีการลดทอนตามเส้นใยแก้วทั้งขาไปและขากลับ ทำให้ลดลงด้วย $\exp(-2\alpha_s L)$

ตัวอย่างเช่น ถ้าเส้นใยแก้วที่ต้องการตรวจสอบเป็นชนิด Step-index Multimode มีคุณสมบัติดังนี้

- | | |
|--|---------------------------|
| 1. อะเพอร์เจอร์เชิงตัวเลขของเส้นใยแก้ว (NA) | = 0.2 |
| 2. ดัชนีหักเหของแกนกลางเส้นใยแก้ว (n_1) | = 1.5 |
| 3. สัมประสิทธิ์ของการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh (α_s) | = 0.7 mm |
| 4. ความกว้างพัลส์ของแสง (W) | = 50 ns |
| 5. ความเร็วของแสง (c) | = 2.998×10^8 m/s |

จะสามารถหากำลังของแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับ $P_B(L)$ เทียบกับกำลังของแสงที่ส่งเข้าไป $P(0)$ ในเส้นใยแก้วได้ดังนี้

เนื่องจากตำแหน่งที่ต้องการหา P_B ก็คือตำแหน่งด้านอินพุตของเส้นใยแก้ว ดังนั้น $L = 0$ แทนค่า $L = 0$ ในสมการ (3.5) จะได้

$$P_B(0) = \frac{P(0) S \alpha_s V_g W}{2} \quad (3.7)$$

เนื่องจากเส้นใยแก้วที่พิจารณาเป็นชนิด Step-index Multimode จึงสามารถแทนค่า S ในสมการที่ (3.6) ลงในสมการที่ (3.7) ได้ดังนี้

$$P_B(0) = \frac{P(0)(NA)^2 \alpha_s V_g W}{8n_1^2} \quad (3.8)$$

และเนื่องจาก $V_g \approx \frac{c}{n_1}$ ดังนั้นแทน V_g ในสมการที่ (3.8) จะได้

$$\begin{aligned}
 P_B(0) &= \frac{P(0)(NA)^2 \alpha_s c W}{8n_1^3} & (3.9) \\
 \frac{P_B(0)}{P(0)} &= \frac{(NA)^2 \alpha_s c W}{8n_1^3} \\
 \frac{P_B(0)}{P(0)} &= \frac{(0.2)^2 \times (0.7 \times 10^{-3}) \times (2.998 \times 10^8) \times (50 \times 10^{-9})}{8 \times (1.5)^3} \\
 &= 1.55 \times 10^{-5}
 \end{aligned}$$

หรือหากคิดในหน่วยของเดซิเบล (dB) จะได้

$$\begin{aligned}
 \frac{P_B(0)}{P(0)} \text{ (dB)} &= 10 \log_{10} \left[\frac{(NA)^2 \alpha_s c W}{8n_1^3} \right] \\
 \frac{P_B(0)}{P(0)} \text{ (dB)} &= 10 \log_{10} (1.55 \times 10^{-5}) \\
 &= -48.1 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่า ที่จุดอินพุตของเส้นใยแก้ว จะมีกำลังของแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับมาน้อยมาก เมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณที่ป้อนเข้าไป อย่างไรก็ตามอย่าสับสนกับปริมาณแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับแบบเฟรสเนลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง ตัวอย่างเช่น ถ้าพิจารณาทางด้านอินพุตของเส้นใยแก้ว กำลังของแสงที่สะท้อนกลับ (ในแนวตั้งฉากกับผิวรอยต่อ) เทียบกับกำลังของสัญญาณที่ป้อนเข้าไปจะหาได้จากสมการ

$$\frac{P_r(0)}{P(0)} = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2 \quad (3.10)$$

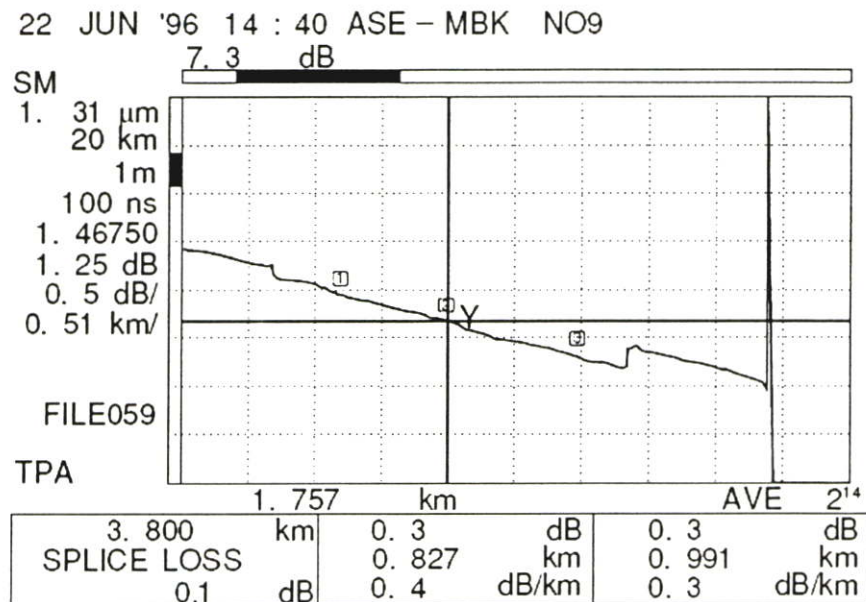
โดยที่ $P_r(0)$ คือกำลังของแสงสะท้อน
 n_1 คือค่าดัชนีหักเหของอากาศ = 1.00
 n_2 คือค่าดัชนีหักเหของแกนกลางเส้นใยแก้ว = 1.50

จะได้
$$\frac{P_r(0)}{P(0)} = \left[\frac{1-1.5}{1+1.5} \right]^2 = 0.04 \text{ หรือ } 4 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

ผลลัพธ์ที่ได้หมายความว่า ถ้ามีแสงตกกระทบที่ผิวรอยต่อ 100 เปอร์เซ็นต์จะมีปริมาณแสงประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์สะท้อนกลับหรือคิดในหน่วยเดซิเบลจะได้เป็น -13.97 เดซิเบล ซึ่งจากค่าเดซิเบลทั้งสองที่ได้ จะเห็นว่ากำลังของแสงที่ได้จากการสะท้อนกลับแบบเฟรสเนล มีค่ามากกว่ากำลังที่ได้จากการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh

3.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องกำหนดก่อนใช้เครื่อง OTDR

เมื่อต้องการตรวจสอบเส้นใยแก้วด้วย OTDR ทุกๆ ครั้ง ผู้ใช้เครื่องจะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์บางตัวให้เหมาะสมกับระบบที่กำลังจะทำการวัด ค่าดังกล่าวประกอบด้วย Wavelength (ความยาวคลื่นแสงที่ใช้), Refractive index (ค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้ว), Pulse width (ความกว้างของพัลส์แสงที่ใช้), Fiber range (ช่วงความยาวของเส้นใยแก้วที่กำลังตรวจสอบ), Averaging (จำนวนครั้งของการเฉลี่ยค่าที่วัดได้), Back scatter coefficient (สัมประสิทธิ์ของการกระจัดกระจายย้อนกลับ), Unit (หน่วยของการวัดความยาว) และ Scale (สเกลของการวัด)



รูปที่ 3.11 ลักษณะจอแสดงผลของ OTDR และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ผู้ใช้กำหนด

อย่างไรก็ตามค่าต่างๆ ที่ผู้ใช้ต้องกำหนดก่อนจะทำการวัด อาจมีความแตกต่างไปบ้างจากตัวอย่างที่ยกมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเครื่อง OTDR ที่กำลังใช้งานอยู่ ดังในรูปที่ 3.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ผู้ใช้กำหนด ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ควรรู้อย่างนี้

Wavelength เนื่องจากในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วอาจมีการใช้แสงซึ่งมีความยาวคลื่น 1,310 หรือ 1,550 นาโนเมตร ดังนั้นในการตรวจสอบเส้นใยแก้วด้วย OTDR จึงจำเป็นต้องเลือกความยาวคลื่นแสงที่ใช้ให้เหมาะสมด้วย

Refractive index โดยทั่วไปค่าดัชนีหักเหจะได้จากผู้ผลิตเส้นใยแก้วซึ่งค่าดังกล่าวมีผลต่อความแม่นยำในการวัดระยะทางของ OTDR เป็นอย่างมาก

Pulse width สามารถเลือกได้จากเครื่อง OTDR โดยมีหลักการเลือกขึ้นอยู่กับ Resolution และความยาวของเส้นใยแก้วที่ทำการตรวจวัด ในกรณี que เลือก Pulse width กว้างจะมีผลทำให้กำลังของพัลส์แสงมีค่ามาก เป็นการเพิ่มความสามารถของ OTDR ให้วัดเส้นใยแก้วที่มีความยาวมากๆ ได้ แต่ผลเสียก็คือ ทำให้ขนาดของ Dead zone กว้างขึ้นและยากที่จะแยกความแตกต่างระหว่างรอยตำหนิ (Faults) ของเส้นใยแก้วที่อยู่ใกล้ๆ กันได้ (Resolution ไม่ดี) ในกรณี que เลือก Pulse width แคบ จะทำให้ OTDR วัดเส้นใยแก้วได้สั้นลง แต่ Dead zone จะแคบและสามารถแยกความแตกต่างของจุดบกพร่องที่อยู่ใกล้ๆ กันได้ดี (Resolution ดีขึ้น)

Fiber range ควรจะเลือกให้ยาวกว่าความยาวของเส้นใยแก้วที่ กำลังตรวจสอบเพียงเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น ถ้าเส้นใยแก้วที่ กำลังทำการวัดมีความยาว 80 กิโลเมตร ผู้ใช้ควรตั้งค่า Fiber range ไว้ที่ 100 กิโลเมตร เนื่องจากว่าถ้าป้อนค่า Fiber range ที่สั้นเกินไป จะทำให้สัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากปลายของเส้นใยแก้วปรากฏอยู่ ณ ตำแหน่งที่ไม่ถูกต้องเพราะว่าโดยหลักการของ OTDR แล้ว ช่วงเวลาที่ตัววัดแสงทำการวัดแสงที่สะท้อนกลับมาจากภายในเส้นใยแก้ว จะสัมพันธ์กับ Fiber range ที่ตั้งไว้ ดังนั้นถ้าตั้งค่า Fiber range สั้นกว่าความยาวของเส้นใยแก้วที่แท้จริง ช่วงเวลาที่ตัววัดแสงเปิดรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมา ก็จะสั้นลงด้วย จึงเป็นเหตุให้สัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากปลายเส้นใยแก้วซึ่งใช้เวลาในการเดินทางมากกว่าช่วงเวลาดังกล่าว ไม่อาจถูกตรวจวัดได้ในกรอบเวลาที่ถูกต้อง ในทางตรงกันข้าม ถ้าทำการเลือก Fiber range ให้ยาวเกินไป จะทำให้ช่วงเวลาที่ตัววัดแสงเปิดรับแสงที่สะท้อนกลับมา มีเวลานาน เป็นผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ Ghosting ได้และมีผลเสียอีกประการหนึ่ง que เห็นได้ชัดเจน คือการวัดในแต่ละครั้งจะใช้เวลามากขึ้น

Averaging เนื่องจากการวัดแต่ละครั้ง ค่าความเข้มของสัญญาณที่สะท้อนกลับ อาจมีค่าที่วัดได้กระจัดกระจายอยู่รอบค่าๆ หนึ่ง ดังนั้นเครื่อง OTDR จึงมีฟังก์ชันที่จะใช้หาค่าเฉลี่ยดังกล่าวเพื่อให้สัญญาณที่ปรากฏมีความเรียบขึ้น OTDR บางเครื่องสามารถเลือกเฉลี่ยค่าที่วัดได้ภายในช่วงเวลา (Time period) หรือตามจำนวนครั้งในการวัด (Sweeping number)

Back scatter coefficient คือค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ เป็นอีกค่าหนึ่งที่ได้จากผู้ผลิตเส้นใยแก้ว ซึ่งค่าดังกล่าวจะนำมาใช้ในการคำนวณกำลังของสัญญาณแสงที่กระจกระบายย้อนกลับ (ตามสมการ (3.5))

Unit สำหรับ OTDR บางเครื่องการแสดงผลหน่วยของความยาว สามารถเลือกได้ตามความต้องการ เช่น เมตร, กิโลเมตร หรือไมล์ เป็นต้น

Scale ผู้ใช้สามารถเลือก Scale ที่เหมาะสมในการแสดง Fiber signature ได้ โดยทั่วไปแกนตั้งจะแสดงถึงกำลังของแสงที่ตัววัดแสงวัดได้ เทียบกับกำลังของแสงอินพุต เป็นหน่วยเดซิเบลและจะมี Scale เป็น dB/div ส่วนแกนนอนจะแสดงถึงความยาวของเส้นใยแก้ว มีหน่วยเป็นกิโลเมตร และจะมี Scale เป็น km/div

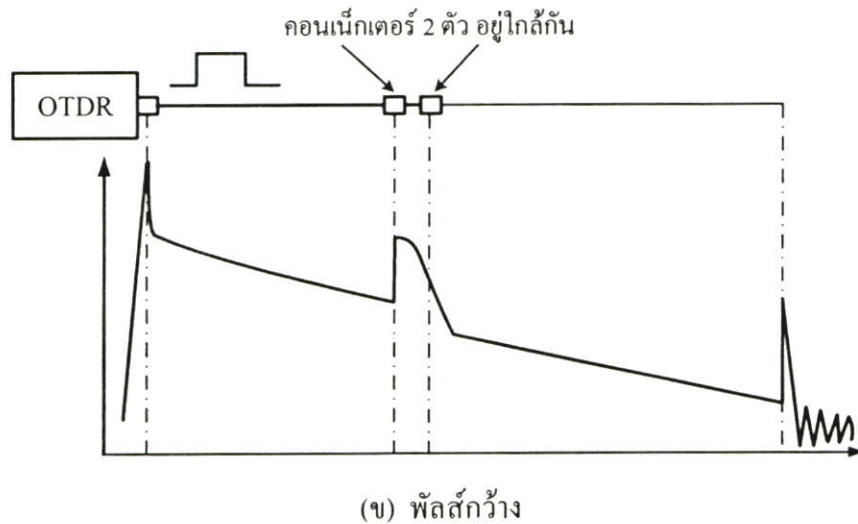
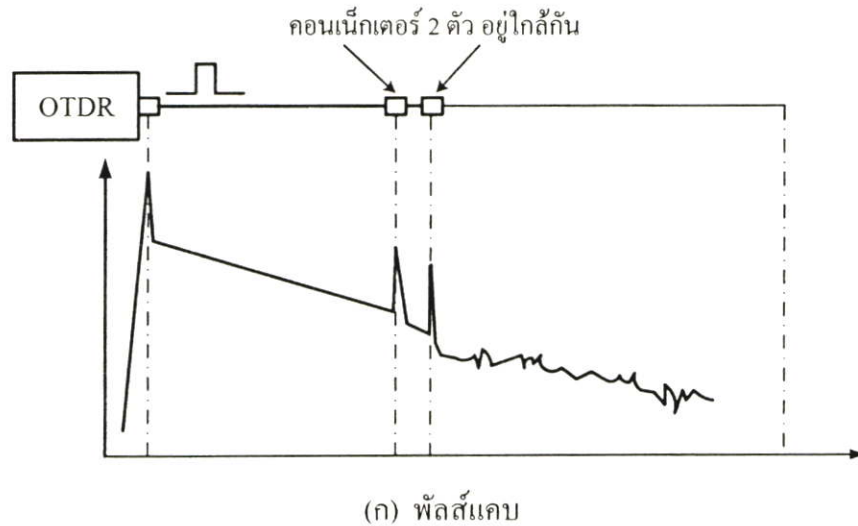
3.8 ความหมายของคำศัพท์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ OTDR

3.8.1 Dynamic Range

Dynamic Range หมายถึง ช่วงระหว่างค่าความเข้มของแสงสูงสุดและต่ำสุดที่เครื่อง OTDR สามารถวัดสัญญาณแสงได้ ตัวอย่างเช่น หากค่าของ Dynamic Range มีค่ามาก (หรือค่าของ $|P_1 - P_2|$ ในรูปที่ 3.5 เมื่อ OTDR รับแสงได้มากที่สุดเป็น P_1 และน้อยสุดเป็น P_2) แสดงว่าเครื่อง OTDR นั้นสามารถวัดเส้นใยแก้วที่มีความยาวมากหรือมีระยะทางไกลๆ ได้ เป็นต้น เครื่อง OTDR ที่มีค่า Dynamic Range มาก มักจะมีราคาแพงกว่าเครื่องที่มี Dynamic Range น้อย ค่าของ Dynamic Range นี้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่อง โดยเฉพาะค่าความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่ผลิตขึ้น และค่าความกว้างพัลส์ที่ใช้ หากพัลส์มีลักษณะแคบจะทำให้ Dynamic Range มีค่าลดลงด้วย

3.8.2 Dead Zone

Dead Zone เป็นพารามิเตอร์ที่บอกประสิทธิภาพการทำงานของ OTDR ค่าของ Dead Zone หมายถึง ระยะทางสั้นๆ ที่เครื่อง OTDR ไม่สามารถแสดงรายละเอียดในการวัดได้อย่างถูกต้องแน่นอน ค่าของ Dead Zone ขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะค่าความกว้างของพัลส์ ซึ่งเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาในการสะท้อนกลับของแสง หากค่าความกว้างของพัลส์มีค่าน้อยๆ (พัลส์แคบ) จะทำให้ Dead Zone มีค่าน้อยด้วย การที่ Dead Zone มีค่าน้อยนั้น มีข้อดีคือ จะทำให้สามารถวัดระบบเส้นใยแก้วแต่ละช่วงได้ละเอียดขึ้น แต่ก็มีข้อเสียคือ จะทำให้วัดระยะทางของเส้นใยแก้วได้สั้นลงหรือทำให้ Dynamic Range ลดลง



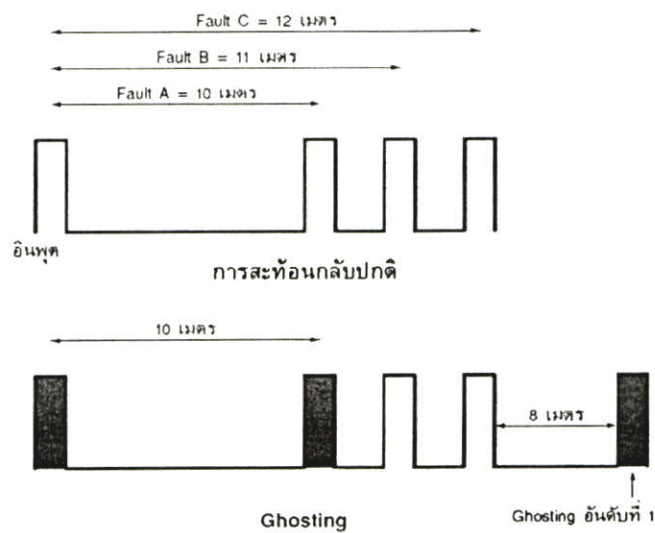
รูปที่ 3.12 อิทธิพลความกว้างของพัลส์ที่มีต่อ Dead Zone และ Dynamic Range

ในรูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างความกว้างของพัลส์ใน OTDR ที่มีอิทธิพลต่อ Dead Zone และ Dynamic Range สมมติเมื่อนำ OTDR มาใช้วัดระบบเส้นใยแก้วที่บริเวณตรงกลางมีคอนเน็กเตอร์เชื่อมต่อกันอยู่ 2 ตำแหน่งที่ใกล้กันมาก (เช่น ไม่กี่สิบลเมตร) หากตั้งสัญญาณพัลส์ที่ใช้ใน OTDR ให้มีความกว้างพัลส์แคบ ๆ จะได้กราฟที่แสดงผลการวัดตำแหน่งของคอนเน็กเตอร์ทั้งสองได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 3.12 (ก) แต่ในขณะเดียวกันก็อาจส่งผลให้ Dynamic Range ลดลงจนไม่สามารถวัดค่าของเส้นใยแก้วได้ตลอดความยาวของระบบ แต่หากทำการปรับความกว้างพัลส์ให้กว้างมากขึ้น ดังรูปที่ 3.12 (ข) จะทำให้ OTDR มีค่า Dynamic Range เพิ่มขึ้นจนสามารถแสดงผลการวัดสัญญาณของเส้นใยแก้วได้ตลอดความยาวของระบบ แต่อาจไม่สามารถแสดงรายละเอียดใน

ระยะใกล้ๆ เช่น ตำแหน่งของคอนเน็คเตอร์ 2 ตัวที่อยู่ใกล้กันได้ ซึ่งช่วงระยะนี้เรียกว่า Dead Zone นั้นเอง อีกตัวอย่างหนึ่ง ได้แก่ หากเครื่อง OTDR มีค่า Dead Zone ที่ 30 เมตร แสดงว่า กราฟสัญญาณบนจอของ OTDR จะสามารถแสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อหลายๆ จุดที่เกิดขึ้นในช่วงระยะทางที่มากกว่า 30 เมตรได้ แต่ถ้าจุดเชื่อมต่ออยู่ใกล้กันมากกว่า 30 เมตร เครื่อง OTDR จะไม่สามารถแสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อได้นั้นได้ ต้องปรับ OTDR ให้มีค่า Dead Zone ต่ำลง เป็นต้น

3.8.3 Ghosting

ปรากฏการณ์ Ghosting เกิดขึ้นเนื่องจากจุดเชื่อมต่อมีสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนที่สูง และมีการตั้งค่า Fiber Range ที่ยาวเกินกว่าความยาวของเส้นใยแก้วที่นำมาตรวจสอบมากเกินไป



รูปที่ 3.13 การเกิด Ghosting ที่จุดเชื่อมต่อของเส้นใยแก้ว

ตัวอย่างเช่น ถ้าเส้นใยแก้วที่นำมาตรวจสอบมีความยาว 12 เมตร และมีจุดเชื่อมต่ออยู่ ณ ความยาว 10 และ 11 เมตร ตามรูปที่ 3.13 เมื่อมีแสงเดินทางผ่านจุดเชื่อมต่อแรกที่ระยะทาง 10 เมตร จะมีปริมาณแสงบางส่วนสะท้อนกลับไปยังตัววัดแสงของ OTDR ก่อนที่แสงสะท้อนกลับนี้จะมาถึงตัววัดแสง จะต้องผ่านจุดเชื่อมต่อระหว่างตัววัดแสงกับอินพุตของเส้นใยแก้วก่อน ปริมาณแสงส่วนหนึ่งจะสามารถทะลุผ่านจุดเชื่อมต่อนี้ไปยังตัววัดแสงได้ และจะปรากฏให้เห็นที่ตำแหน่ง 10 เมตรบน Fiber Signature ในขณะที่ปริมาณแสงอีกส่วนหนึ่งก็จะมี การสะท้อนออกมาจากจุดเชื่อมต่อดังกล่าว กลับไปยังจุดเชื่อมต่อที่ระยะทาง 10 เมตรอีกครั้งหนึ่ง และทำให้เกิดการสะท้อนกลับของแสง ณ จุดเชื่อมต่อนี้ไปยัง OTDR อีกครั้งหนึ่ง ถ้าปริมาณของแสงสะท้อนครั้งที่ 2 นี้มีมากพอ ผู้ใช้ก็จะสามารถเห็นได้บน Fiber Signature ที่ระยะทาง 2 เท่าของระยะทางจริง (ในที่นี้คือ ที่ระยะทาง 20 เมตรจาก OTDR หรือ 8 เมตรจากปลายสายเส้นใยแก้ว) ปรากฏการณ์ของการเกิด

สัญญาณพัลส์ ณ บริเวณที่ไม่มีรอยต่อหรือต้นเหตของการเกิดแสงสะท้อนอยู่เลยตามตัวอย่างที่แสดงมาเรียกว่า Ghosting และสำหรับ Ghosting ที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อ ณ ความยาวที่ 11 เมตร และปลายเส้นใยแก้วที่ตำแหน่ง 12 เมตร ก็สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการเดียวกันนี้

3.8.4 Gainers

โดยทั่วไปแล้วปรากฏการณ์ Gainers นี้สามารถสังเกตได้จาก Fiber Signature ณ บริเวณที่มีการทำ Fusion Splice ระหว่างเส้นใยแก้ว 2 เส้น ปรากฏการณ์นี้เป็นที่น่าสนใจก็เพราะว่า โดยปกติแล้ว ณ ตำแหน่งที่มี Fusion Splice ควรจะมีกำลังของแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับมายัง OTDR ลดลง แต่ในกรณีนี้กลับมีปริมาณของแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับเพิ่มมากขึ้น จากการศึกษพบว่ามีส่วนอยู่ 2 ประการที่สามารถทำให้เกิด Gainers ขึ้นได้ ดังนี้

1. ความแตกต่างระหว่างค่าแฟกเตอร์การกระจายของแกนกลางเส้นใยแก้วที่นำมาเชื่อมต่อกัน โดยในที่นี้แกนกลางของเส้นใยแก้วที่ทำหน้าที่รับแสงจะมีค่าแฟกเตอร์การกระจายสูงกว่าแกนกลางของเส้นใยแก้วที่ทำหน้าที่ส่งแสง ดังนั้นจึงทำให้เกิดมีปริมาณแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับไปยัง OTDR มากขึ้น เมื่อ OTDR ตรวจวัดสัญญาณแสงที่สะท้อนกลับมาได้ก็จะแสดงผลออกมาในรูปของ Fiber Signature ที่มีระดับของกำลังแสงสะท้อนกลับต่อกำลังแสงที่ป้อนเข้าไป มีค่าสูงขึ้นเริ่มตั้งแต่จุดเชื่อมต่อเป็นต้นไป

2. ความแตกต่างระหว่างขนาดของแกนกลางเส้นใยแก้วที่นำมาเชื่อมต่อกัน การลดทอนสัญญาณแสง (Loss) ที่เกิดจากความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลางเส้นใยแก้วสามารถเขียนได้เป็น

$$Loss = -10 \log \left(\frac{D_r}{D_t} \right) \quad (3.11)$$

โดยที่ D_r คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลางเส้นใยแก้วที่ทำหน้าที่รับแสง
 D_t คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลางเส้นใยแก้วที่ทำหน้าที่ส่งแสง

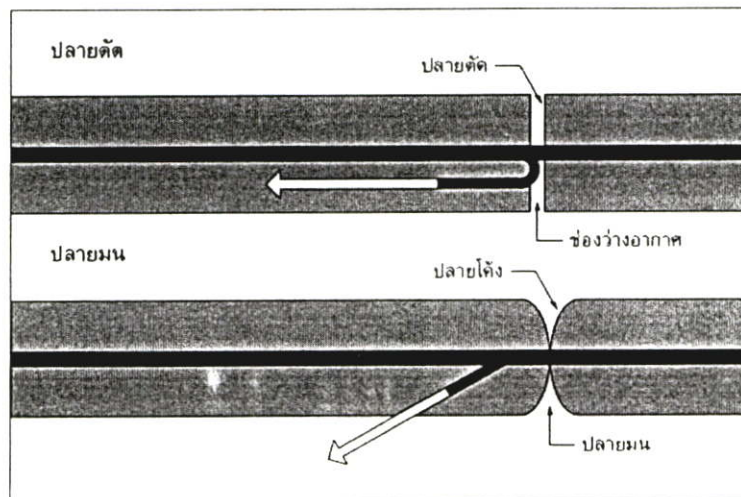
ตัวอย่างเช่น ถ้า $D_r = 8 \mu m$ และ $D_t = 10 \mu m$ จะได้ $Loss = 1.938 \text{ dB}$

โดยปกติแล้ว ถ้า $D_r > D_t$ ค่า Loss ที่ได้จะน้อยกว่าศูนย์มาก ซึ่งหมายความว่า การส่งผ่านกำลังแสงจากเส้นใยแก้วด้านส่งไปยังเส้นใยแก้วด้านรับมีค่าสูงมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการสะท้อนกลับของแสงที่จุดเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแก้วทั้งสองมีค่าน้อยนั่นเอง แต่สำหรับใน

กรณีที่กำลังพิจารณาอยู่ขณะนี้คือ $D_r < D_s$ จะทำให้ได้ค่า Loss เป็นบวก ซึ่งก็จะหมายความว่า การส่งผ่านแสงจากเส้นใยแก้วด้านส่งไปยังเส้นใยแก้วด้านรับมีค่าต่ำ นั่นคือ กำลังของแสงที่สะท้อนกลับ ณ บริเวณจุดเชื่อมต้อมีค่าสูง หรือเกิด Gainer นั้นเอง ในกรณีที่พบปรากฏการณ์ Gainer ดังกล่าวข้างต้น การวัดค่าการลดทอนสัญญาณแสงของเส้นใยแก้ว จะต้องดำเนินการวัดจากทั้งสองทิศทางของเส้นใยแก้ว จากนั้นจึงนำค่าที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ย ก็จะได้เป็นค่าการลดทอนที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อนั้นๆ ดังรูปที่ 3.9 (ก)

3.8.5 Optical Return Loss

Optical Return Loss (ORL) เป็นการสูญเสียสัญญาณแสงในลักษณะที่เกิดจากการสะท้อนกลับของแสงบางส่วนเมื่อผ่านรอยต่อระหว่างเส้นใยแก้วกลับไปยังแหล่งกำเนิดแสง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.14 ถ้าปริมาณแสงที่สะท้อนกลับ ณ จุดรอยต่อนี้มีค่ามาก อาจจะมีผลทำให้ไปรบกวนการทำงานของแหล่งกำเนิดแสง เช่น เลเซอร์ไดโอดได้ วิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดการสูญเสียสัญญาณแสงพร้อมทั้งลดการสะท้อนกลับของแสงไปยังแหล่งกำเนิด คือ การทำให้ปลายเส้นใยแก้วมีลักษณะโค้งมน ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ด้วยการจัดทำให้ปลายของเส้นใยแก้วทั้งสองเส้นสามารถสัมผัสกันได้ ทำให้สามารถลด Return loss ลงได้ นอกจากนี้ลักษณะของปลายเส้นใยแก้วที่โค้งมนยังทำให้แสงสะท้อนที่รอยต่อเปลี่ยนแนวไป และจะไม่เดินทางกลับไปรบกวนแหล่งกำเนิดแสงอีก



รูปที่ 3.14 การเกิด Optical Return Loss

3.8.6 Resolution

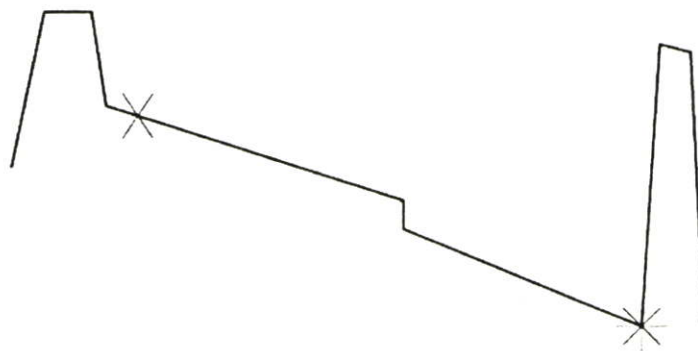
Resolution ของ OTDR คือระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดที่น้อยที่สุดในเส้นใยแก้ว ที่ OTDR สามารถแยกแยะความแตกต่างของสัญญาณได้อย่างถูกต้อง ค่า Resolution นี้จะขึ้นอยู่กับความกว้างของพัลส์ คือถ้าความกว้างของพัลส์แคบ ค่า Resolution ก็จะมีค่าน้อย ทำให้ OTDR สามารถวัดเส้นใยแก้วได้ละเอียด แต่จะวัดเส้นใยแก้วได้ระยะทางสั้นลง

3.8.7 Insertion Loss

Insertion Loss คือค่าการสูญเสียสัญญาณของแสงในเส้นใยแก้ว เนื่องมาจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วด้วยคอนเน็กเตอร์ (Connector) หรือการเชื่อมต่อด้วยวิธีการ Splice

3.9 วิธีวัดค่าการสูญเสียสัญญาณในเส้นใยแก้ว

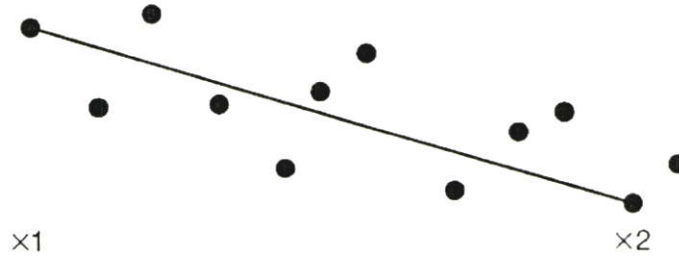
การวัดค่าการสูญเสีย (Loss) สัญญาณประเภทต่างๆ ของเส้นใยแก้ว ด้วยเครื่อง OTDR นั้น มีหลายเทคนิคให้เลือกใช้ เทคนิคแรกที่จะกล่าวถึงคือ Two-Marker Technique หรือ Two Point Approximation (2PA) เทคนิคนี้สามารถนำมาใช้วัดค่าการสูญเสียของเส้นใยแก้วได้ โดยการกำหนดจุด 2 จุดบน Fiber Signature ดังรูปที่ 3.15 การสูญเสียที่วัดได้จะอยู่ในหน่วยของกำลังของแสงที่สูญเสียต่อหน่วยความยาวของเส้นใยแก้ว (dB/km)



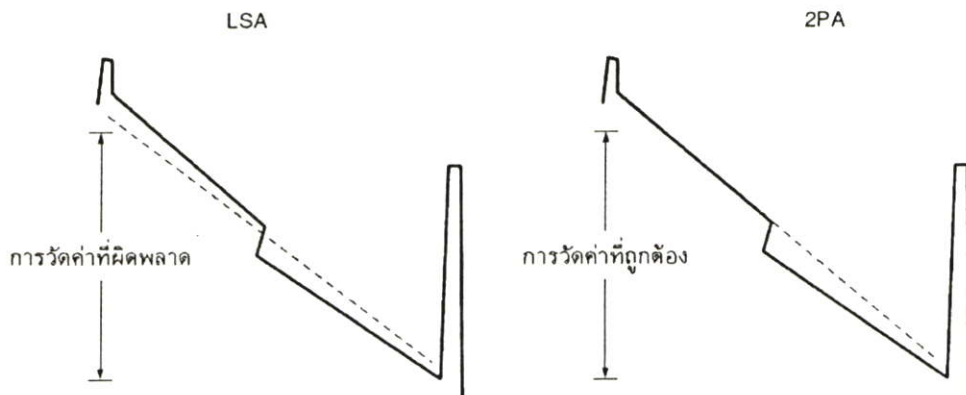
รูปที่ 3.15 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วยวิธี Two Point Approximation (2PA)

อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้มีโอกาสให้ค่าที่ผิดพลาดได้ หากมีสัญญาณรบกวนหรือริบเปิดบน Fiber Signature ดังนั้นเพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว ผู้ใช้สามารถเลือกใช้เทคนิคแบบ Least Square Approximation (LSA) สำหรับการวัดค่าการสูญเสียก็ได้ เมื่อใช้เทคนิคนี้เครื่อง OTDR จะทำการคำนวณหาเส้นตรงที่เหมาะสมเพื่อที่จะลากผ่านกลุ่มข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ค่าความชันของเส้นตรงดังกล่าวก็คือ ค่าการสูญเสีย (dB/km) ของเส้นใยแก้วนั่นเอง เทคนิคนี้จะให้ค่าที่เชื่อถือได้

หากทำการวัดการสูญเสียของเส้นใยแก้วที่ไม่มีจุดเชื่อมต่อเลย เพราะว่าจุดเชื่อมต่อที่มีอยู่สามารถทำให้ค่าการสูญเสียที่อ่านได้จากเทคนิคนี้ผิดพลาดไป ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.17

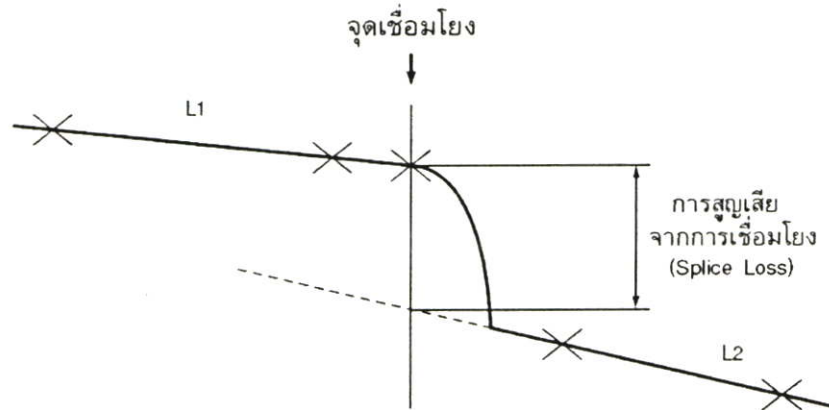


รูปที่ 3.16 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วยวิธี Least Square Approximation (LSA)



รูปที่ 3.17 ค่า Loss ที่อ่านผิดพลาดเมื่อใช้วิธี LSA เปรียบเทียบกับวิธี 2PA

ในกรณีของการหาค่า Splice loss และ Connector loss เทคนิคที่ใช้จะต้องเป็นแบบ Five marker technique ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ผู้ใช้ OTDR จะต้องกำหนดจุดไว้ตรงตำแหน่งที่เริ่มมีการเปลี่ยนระดับสัญญาณ จุดแรกที่ใช้กำหนดคือ x (กาคบาท) จากนั้นเครื่อง OTDR จะกำหนดจุดขึ้นมาอีก 2 จุด โดยอัตโนมัติอยู่คนละด้านของจุดตรงกลางที่ใช้กำหนด จุด 2 จุดที่ OTDR กำหนดให้อัตโนมัตินี้จะเป็นเส้นตรง 2 เส้นที่แสดงถึงระดับกำลังแสงที่แตกต่างกัน ความแตกต่างของระดับกำลังแสงนี้จะแสดงถึงค่า Splice loss หรือ Connector loss แล้วแต่กรณี



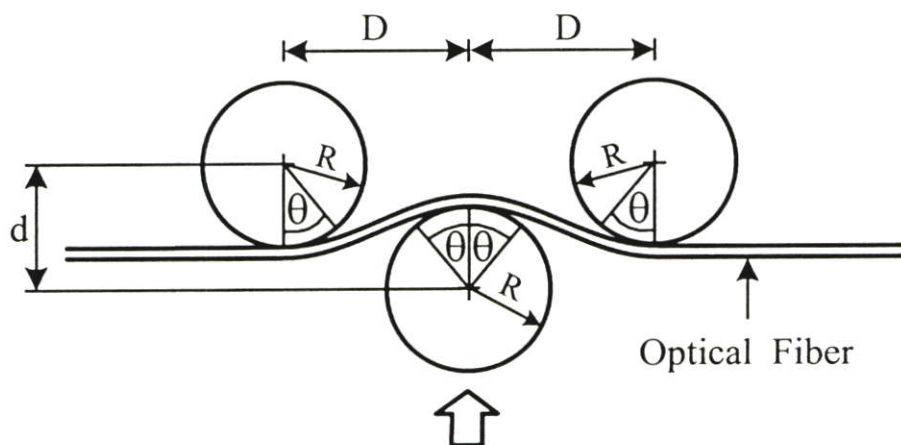
รูปที่ 3.18 การวัดค่า Loss ที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยวิธี Five Marker

บทที่ 4

การออกแบบอุปกรณ์

4.1 การออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์

การออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์เป็นสิ่งสำคัญมาก เนื่องจากเส้นใยแก้วต้องโค้งตามลักษณะการโค้งของอุปกรณ์ ถ้าออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์ให้มีรัศมีความโค้งมากเกินไป เมื่อเส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ จะทำให้ค่าการสูญเสียสัญญาณภายในเส้นใยแก้วมีค่าน้อย หากต้องการตรวจสอบค่าการสูญเสียสัญญาณโดยใช้ OTDR ก็จะได้ค่าที่ต่ำกว่าค่าจริง เนื่องจากจะไม่สามารถแน่ใจได้ว่า ค่าการสูญเสียสัญญาณที่แสดงใน OTDR คือค่าที่เกิดจากอุปกรณ์หรือไม่ เพราะค่าการสูญเสียสัญญาณน้อยๆ อาจเกิดจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วก็เป็นไปได้ แต่ถ้าออกแบบความโค้งของอุปกรณ์ให้มีรัศมีความโค้งน้อยเกินไป ก็อาจจะทำให้เกิดค่าการสูญเสียสัญญาณมาก จนทำให้ระบบการสื่อสารไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ หรืออาจจะทำให้เส้นใยแก้วได้รับความเสียหาย เช่น อาจทำให้เส้นใยแก้วแตกหรือหักได้



รูปที่ 4.1 ลักษณะการโค้งของเส้นใยแก้วที่เกิดจากอุปกรณ์

จากรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการโค้งของเส้นใยแก้ว ซึ่งมีส่วนที่ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ 3 ส่วน คือส่วนที่อยู่ด้านข้าง 2 ส่วน ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้จะไม่เคลื่อนที่ และส่วนที่อยู่ตรงกลาง ซึ่งส่วนนี้จะเคลื่อนที่ตามขนาดแรงดันของโพลีเมอร์ที่ดูดซับน้ำไว้ คือเมื่อโพลีเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก ก็จะสามารถขยายตัวและเกิดแรงดันได้มากเช่นกัน ส่งผลให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอตามความโค้งของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้

จากรูปที่ 4.1 สามารถหาค่าผลรวมของมุม ($\Sigma\theta$) ที่เกิดจากการโค้งของเส้นใยแก้ว ได้ดังสมการ (4.1)

$$\Sigma\theta = 4\theta = 4 * \left\{ (\pi/2) - \cos^{-1} \left[R / \left(\sqrt{(D^2 + d^2)} / 2 \right) \right] - \tan^{-1} (d/D) \right\} \quad (4.1)$$

เมื่อ	$\Sigma\theta$	คือผลรวมของมุม
	R	คือรัศมีการโค้งของเส้นใยแก้ว
	D	คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางความโค้งด้านแนวนอน
	d	คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางความโค้งด้านแนวตั้ง

4.2 การสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์

ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ เนื่องจากการทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ สามารถหาค่าได้จากสมการ (4.2) และสมการ (4.3) [11]

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 - \left(\frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \right) \left[\frac{d}{R} + \left(\frac{3\lambda}{4\pi n_2 R} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (4.2)$$

$$P_{\text{lost}} = -10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (4.3)$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (4.4)$$

เมื่อ	P_2	คือค่าพลังงานแสงด้านรับ	(mW)
	P_1	คือค่าพลังงานแสงด้านส่ง	(mW)
	α	คือค่าเฟคเตอร์ความลาดเอียงของกราฟที่เกี่ยวข้องกับค่าดัชนีหักเหของแสง	
	Δ	คือค่าความแตกต่างของดัชนีหักเห (Refractive index difference) ระหว่างคอร์และแคลดดิ้งของเส้นใยแก้ว	
	d	คือเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์	
	R	คือรัศมีความโค้งของเส้นใยแก้ว	

λ	คือความยาวคลื่นของแสง
n_1	คือค่าดัชนีหักเหของแสงในคอร์
n_2	คือค่าดัชนีหักเหของแสงในแคลดดิ้ง

กรณีเส้นใยแก้วเป็นชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (Stepped-Index Fiber) ค่าของ $\alpha = \infty$ (จากรูปที่ 2.12) ทำให้ $(\alpha+2)/\alpha = 1$ ดังนั้นในเทอมของ $(\alpha+2)/(2\alpha\Delta) = 1/2\Delta$ เพราะฉะนั้นสามารถหาค่าการสูญเสียสัญญาณ (P_{loss}) ที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วได้จากสมการ (4.5)

$$P_{loss} = -10 \log \left\{ 1 - \left(\frac{1}{2\Delta} \right) \left[\frac{d}{R} + \left(\frac{3\lambda}{4\pi n_2 R} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \right\} \quad (4.5)$$

และในกรณีเส้นใยแก้วเป็นชนิดเกรดเค็ด-อินเด็กซ์ (Graded-Index Fiber) ค่าของ $\alpha = 2$ (จากรูปที่ 2.12) ทำให้ $(\alpha+2)/\alpha = 2$ ดังนั้นในเทอมของ $(\alpha+2)/(2\alpha\Delta) = 2/2\Delta$ เพราะฉะนั้นสามารถหาค่าการสูญเสียสัญญาณ (P_{loss}) ที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วได้จากสมการ (4.6)

$$P_{loss} = -10 \log \left\{ 1 - \left(\frac{2}{2\Delta} \right) \left[\frac{d}{R} + \left(\frac{3\lambda}{4\pi n_2 R} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \right\} \quad (4.6)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้

- กรณีเป็นเส้นใยแก้วชนิดโหมคเดี่ยว (Single-mode Fiber)

$$d = 9.5 \mu m$$

$$n_1 = 1.467$$

$$n_2 = 1.462$$

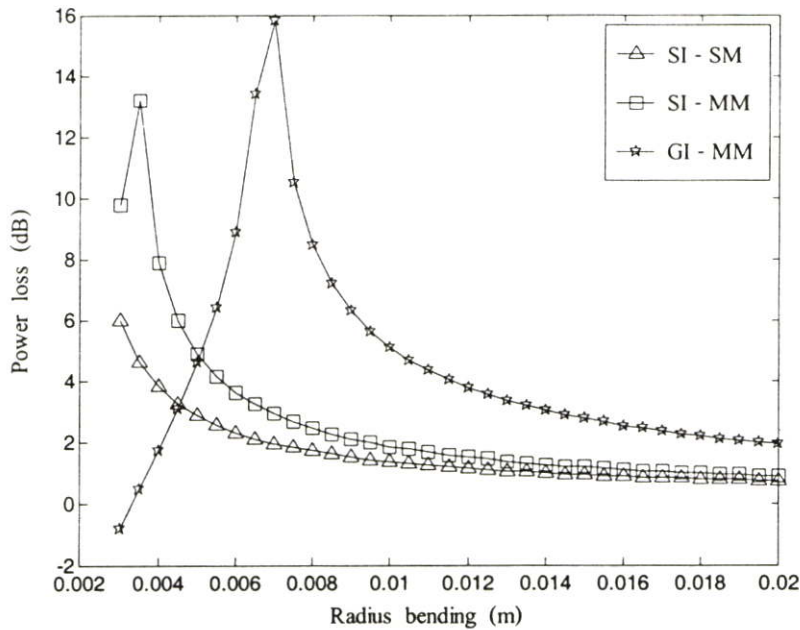
- กรณีเป็นเส้นใยแก้วชนิดโหมคร่วม (Multimode Fiber)

$$d = 62.5 \mu m$$

$$n_1 = 1.448$$

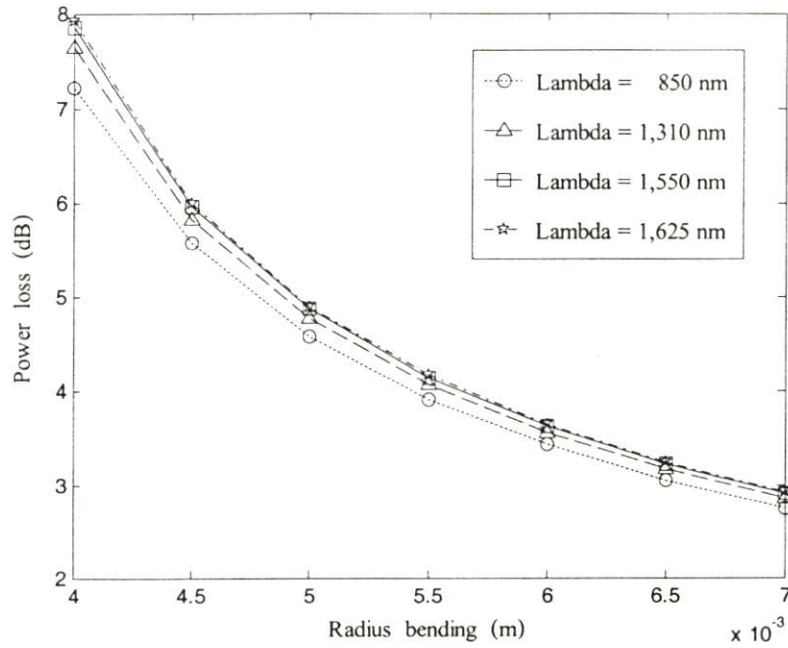
$$n_2 = 1.433$$

การสูญเสียพลังงานแสงเนื่องมาจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (Step-Index Fiber : SI) ที่ความยาวคลื่นและรัศมีการโค้งงอเดียวกันจะมีค่าน้อยกว่าเส้นใยแก้วชนิดเกรด-อินเด็กซ์ (Graded-Index Fiber : GI) [11] ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จะสังเกตได้ว่าการสูญเสียพลังงานแสงของเส้นใยแก้วชนิด สเต็ป-อินเด็กซ์ มีค่าแตกต่างกับเส้นใยแก้วชนิดเกรด-อินเด็กซ์ มากเมื่อรัศมีการโค้งงอน้อยๆ ดังนั้นการออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์จึงจำเป็นต้องออกแบบให้มีรัศมีการโค้งต่างกัน

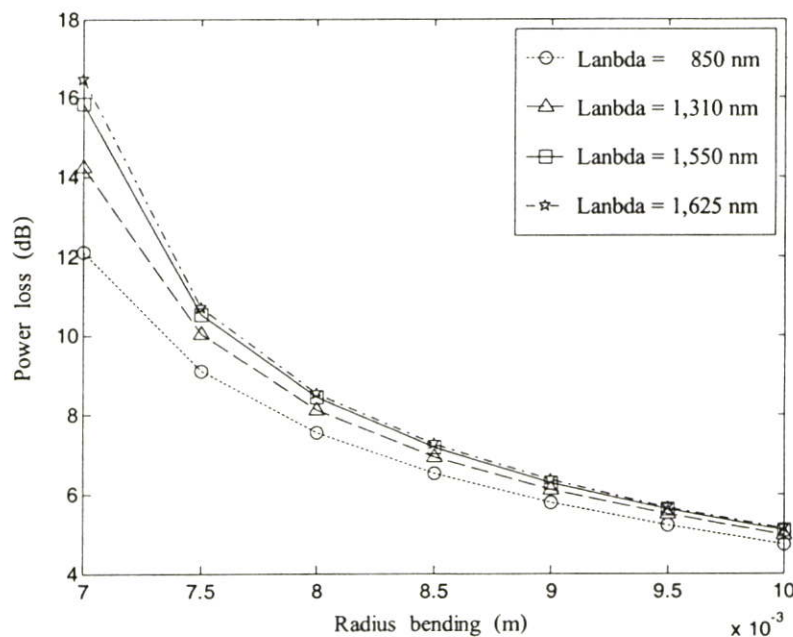


รูปที่ 4.2 การสูญเสียพลังงานแสงที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร

และเมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยแก้วที่มีลักษณะความโค้งเช่นเดียวกัน แสงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีค่าการสูญเสียสัญญาณมากกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นน้อย [5] ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 แต่จะสังเกตได้ว่าที่ความยาวคลื่นต่างกัน ค่าการสูญเสียสัญญาณจะต่างกันเพียงเล็กน้อย เพราะฉะนั้นการออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์ สำหรับใช้กับความยาวคลื่นแสงที่ต่างกัน สามารถออกแบบส่วนโค้งให้มีรัศมีการโค้งที่เท่ากันได้

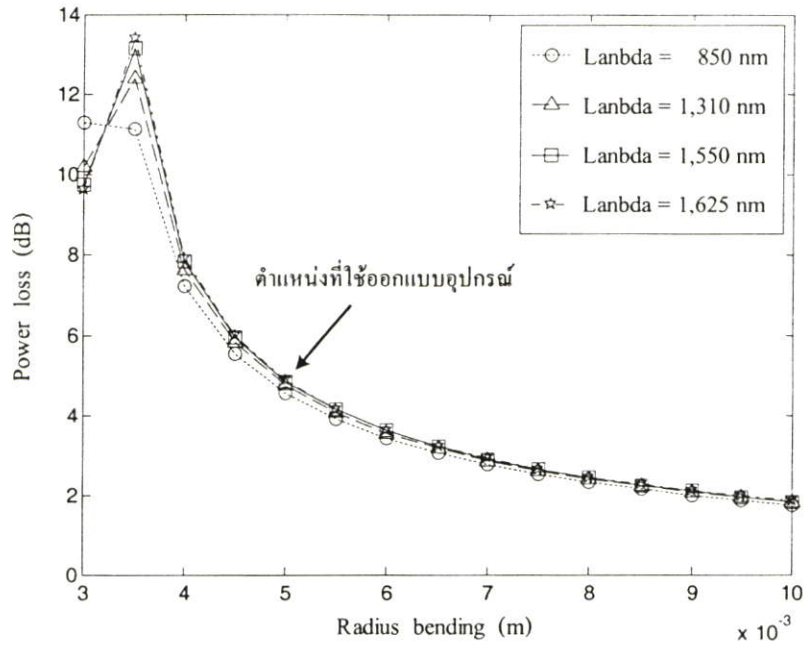


รูปที่ 4.3 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ Step-Index Fiber – MM



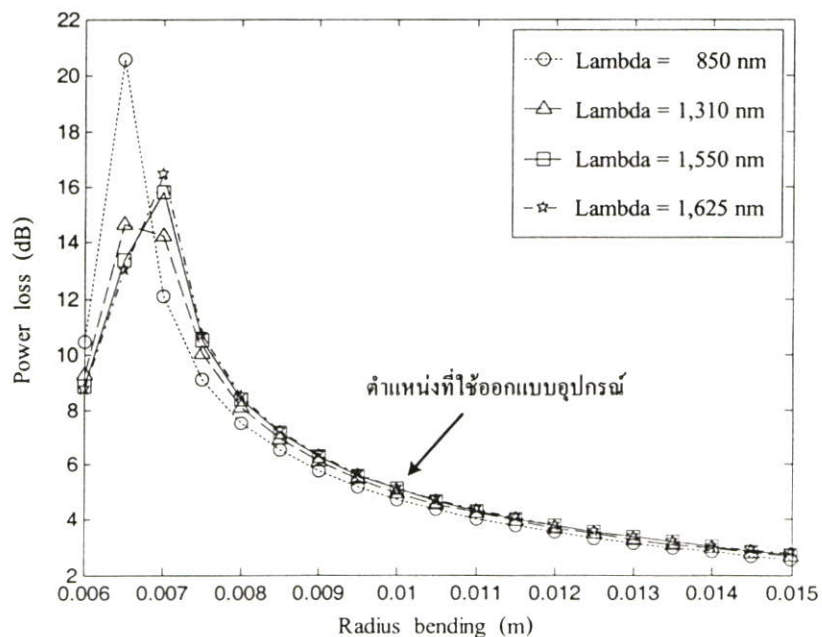
รูปที่ 4.4 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ Graded-index Fiber – MM

การออกแบบรัศมีมีความโค้งของอุปกรณ์ สำหรับเส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (Step-Index Fiber) จะให้รัศมีมีความโค้ง (R) มีค่าเท่ากับ 5 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานแสง ประมาณ 4–8 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.5 สาเหตุที่ต้องให้เกิดการสูญเสียสัญญาณ 4–8 dB นั้น เนื่องมาจากการวัดตรวจสอบนำเข้าหัวต่อโดยใช้ OTDR จะสามารถแยกแยะกราฟการสูญเสียสัญญาณได้ง่าย



รูปที่ 4.5 การสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแก้วชนิด Step-Index MM

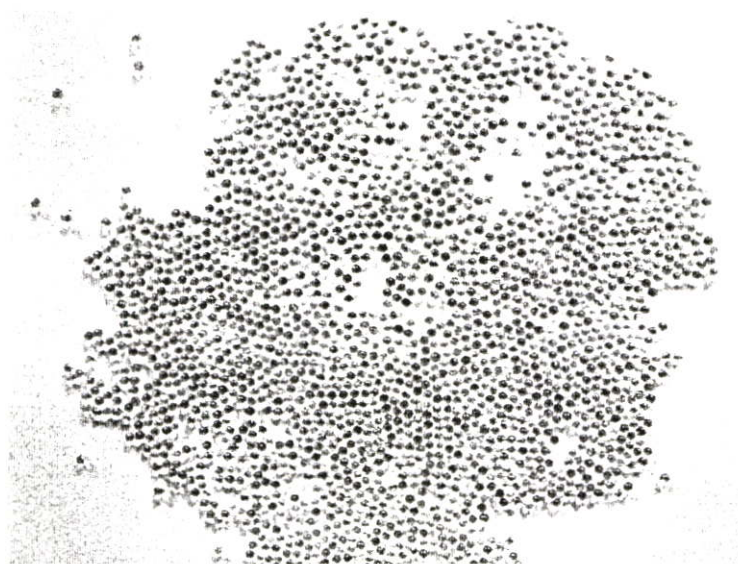
ส่วนรัศมีความโค้งของอุปกรณ์ สำหรับเส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็กซ์ (Graded-Index Fiber) จะกำหนดให้รัศมีความโค้ง (R) มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานแสงประมาณ 4-8 dB เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 หากออกแบบให้รัศมีความโค้งเท่ากับเส้นใยแก้วชนิดสตีป-อินเด็กซ์ ($R = 5$ mm) ก็จะทำให้เส้นใยแก้วเกิดการสูญเสียสัญญาณสูงจนไม่สามารถใช้งานได้ตามปกติ



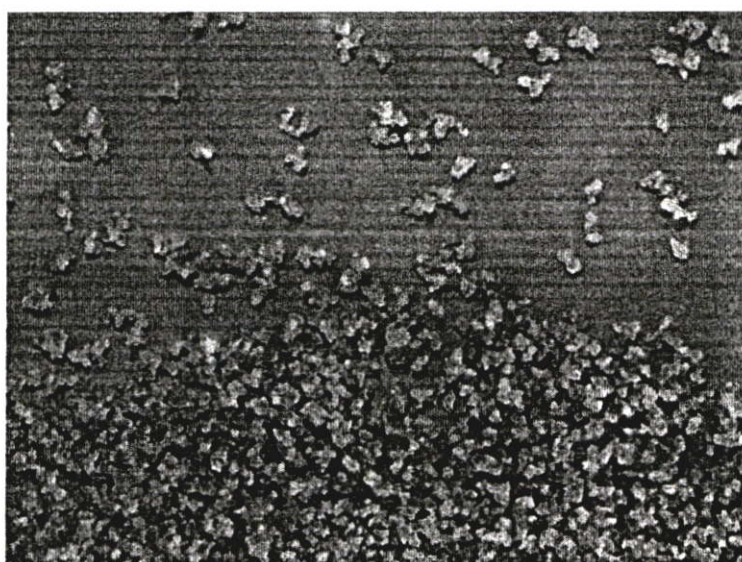
รูปที่ 4.6 การสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแก้วชนิด Graded-Index MM

4.3 สารโพลีเมอร์

โพลีเมอร์เป็นสารที่เกิดจากการสังเคราะห์ มีลักษณะโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) สำหรับโพลีเมอร์ที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำ เรียกว่า ครอส-ลิงค์ โพลีเอคริลาไมด์ โคโพลีเมอร์ (Cross-linked Polyacrylamide Copolymer) มีลักษณะแข็งเป็นเม็ดเล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



(ก) สารโพลีเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม



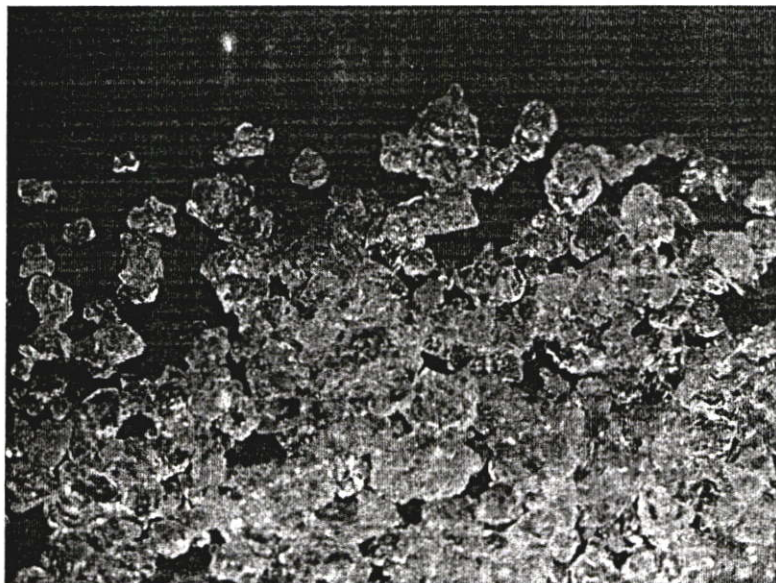
(ข) สารโพลีเมอร์ที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน

รูปที่ 4.7 ลักษณะของโพลีเมอร์

เมื่อโพลีเมอร์สัมผัสกับน้ำจะทำให้โมเลกุลของน้ำซึมผ่านเข้าไปในโพลีเมอร์ได้ และสามารถดูดซับน้ำไว้ได้ เกิดการขยายตัวของโพลีเมอร์ตามปริมาณของน้ำที่ซึมผ่านเข้าไปอยู่ภายใน โพลีเมอร์ที่ดูดซับน้ำไว้จะมีลักษณะนุ่มคล้ายวุ้นหรือเยลลี่ (Jelly) ดังแสดงในรูปที่ 4.8



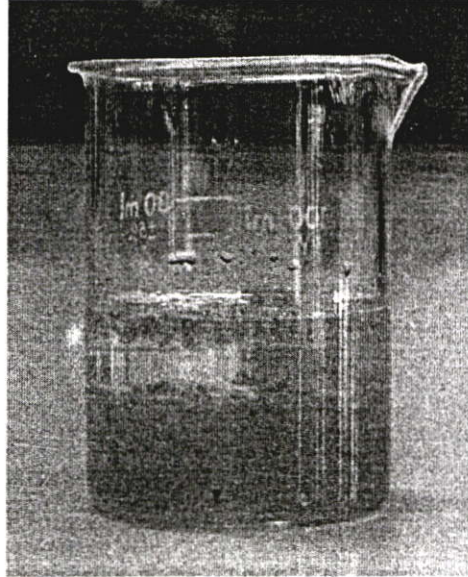
(ก) สารโพลีเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม



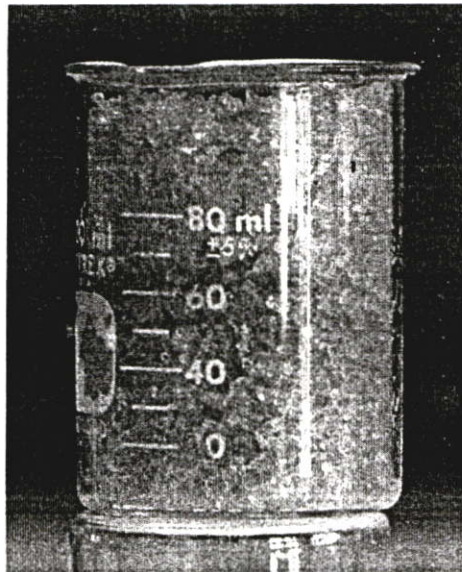
(ข) สารโพลีเมอร์ที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน

รูปที่ 4.8 ลักษณะของโพลีเมอร์ที่ดูดซับน้ำ

ถ้ามีปริมาณของน้ำมากพอมาสัมผัสกับโพลีเมอร์จะทำให้โพลีเมอร์สามารถขยายตัวหรือ
 อิ่มน้ำได้ประมาณ 300-500 เท่าของน้ำหนักโพลีเมอร์แห้ง [15] สำหรับโพลีเมอร์ที่มีลักษณะเป็น
 เม็ดกลมจะดูดซึมน้ำได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลา 30 นาทีแรก ส่วนโพลีเมอร์ที่มีลักษณะรูปร่างไม่
 แน่นอนจะดูดซึมน้ำได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลา 5 นาทีแรก หลังจากนั้นการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้น
 อย่างช้าๆ และจะหยุดดูดซึมน้ำเมื่อถึงจุดอิ่มตัวใช้เวลาประมาณ 2-3 วัน



(ก) เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที



(ข) เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง

รูปที่ 4.9 การขยายตัวของโพลีเมอร์

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าโพลีเมอร์สามารถดูดซับน้ำได้ดี เมื่อน้ำมีคุณสมบัติเป็นกลาง (pH = 7) ส่วนน้ำที่มีคุณสมบัติเป็นกรด (pH = 1 - 6) และคุณสมบัติเป็นเบส (pH = 8 - 14) นั้น จะดูดซับน้ำได้น้อยลง (การทดสอบความเป็นกรด - เบสของสารจะใช้กระดาษพีเอช ดังรูปที่ 4.10)

ตารางที่ 4.1 ค่า pH ของน้ำที่มีผลต่อการดูดซึมของโพลีเมอร์

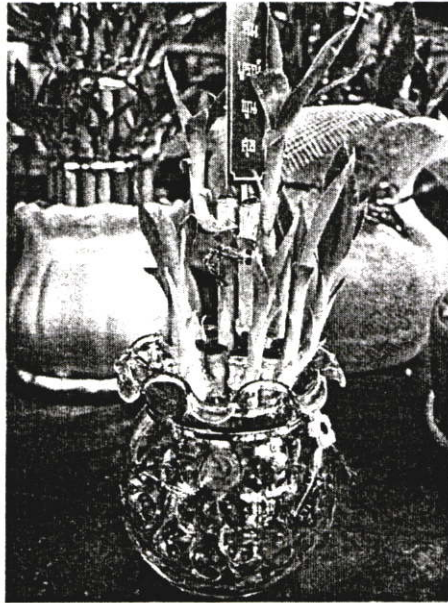
ค่า pH ของน้ำ	การดูดซับน้ำได้ (กรัมต่อโพลีเมอร์แห้ง 1 กรัม)
4	310
5	330
6	400
7	430
8	410



รูปที่ 4.10 กระดาษพีเอช (pH paper)

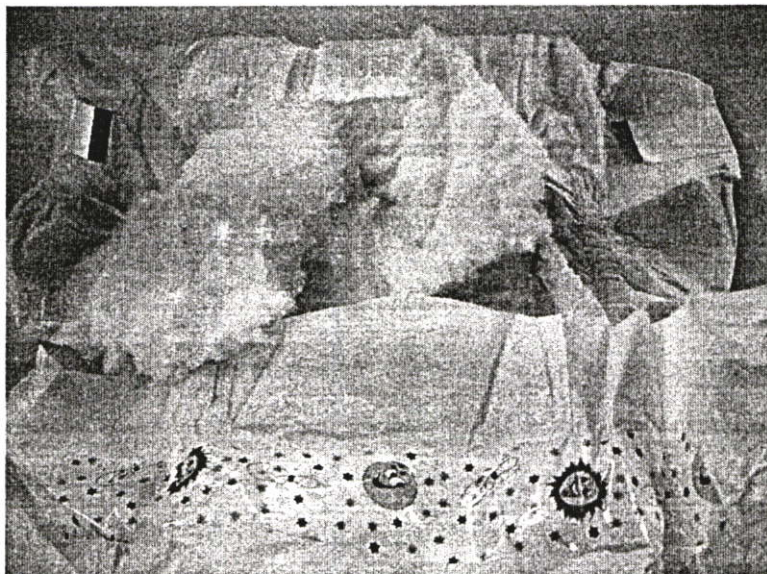
การใช้โพลีเมอร์ประเภทนี้ที่พบส่วนใหญ่ในปัจจุบัน ได้แก่

1. **ด้านการเกษตร** เช่น นำโพลีเมอร์ที่ดูดซึมน้ำไว้จนอิ่มตัวไปรองก้นหลุมเพื่อปลูกต้นไม้ในพื้นที่แห้งแล้ง บริเวณที่สภาพดินเป็นดินทรายหรือใช้แทนดินสำหรับปลูกต้นไม้ตกแต่งบ้าน ส่วนใหญ่จะเรียกว่าดินวิทยาศาสตร์



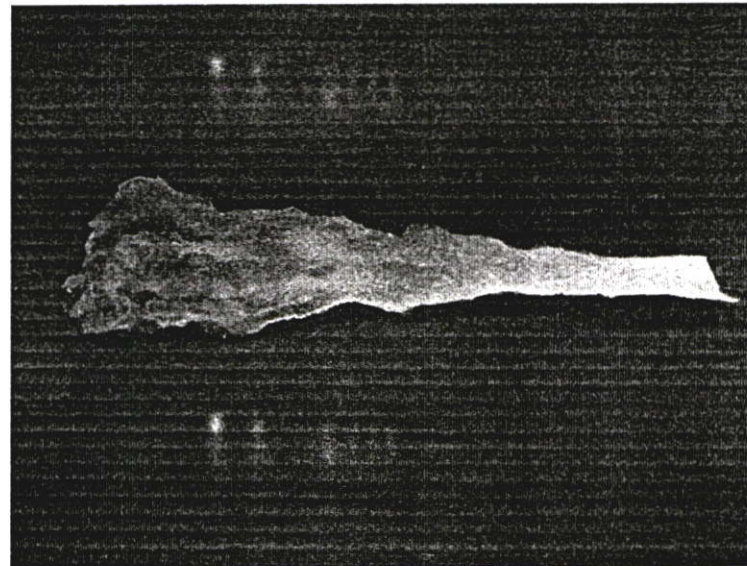
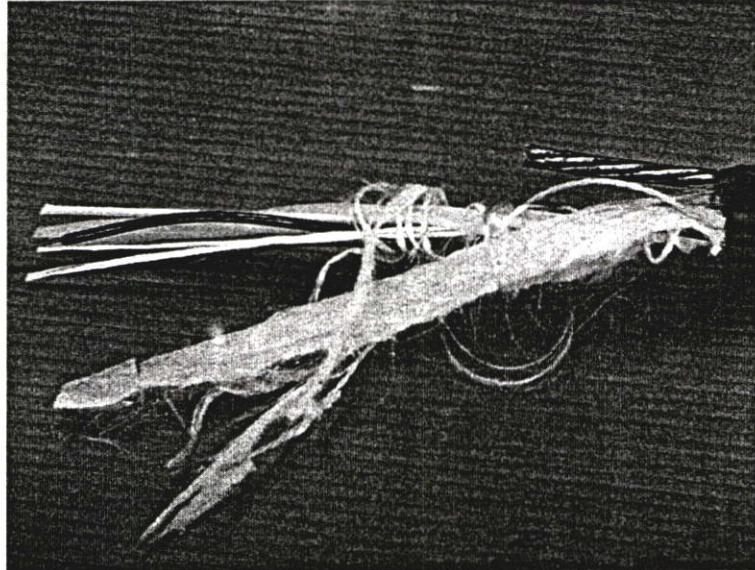
รูปที่ 4.11 ใช้โพลีเมอร์แทนดินสำหรับปลูกต้นไม้

2. **ด้านอุตสาหกรรม** เช่น ใช้เป็นวัสดุทำเป็นผ้าอ้อม, ผ้าอนามัย เพื่อช่วยในการดูดซับ



รูปที่ 4.12 ใช้โพลีเมอร์เป็นวัสดุทำผ้าอ้อม

3. **ด้านการสื่อสาร** เช่น ทำเป็นวัสดุกันน้ำ (Water Blocking Tape) สำหรับเคเบิลอากาศ (Aerial Cable) หรือฟิกเกอร์-เอท เคเบิล (Figure-8 Cable) เป็นเคเบิลเส้นใยแก้วที่ใช้แขวนระหว่างเสา เคเบิลประเภทนี้จะไม่สัมผัสกับน้ำตลอดเวลา ส่วนใหญ่จะเปียกน้ำเนื่องมาจากฝนตกเท่านั้น

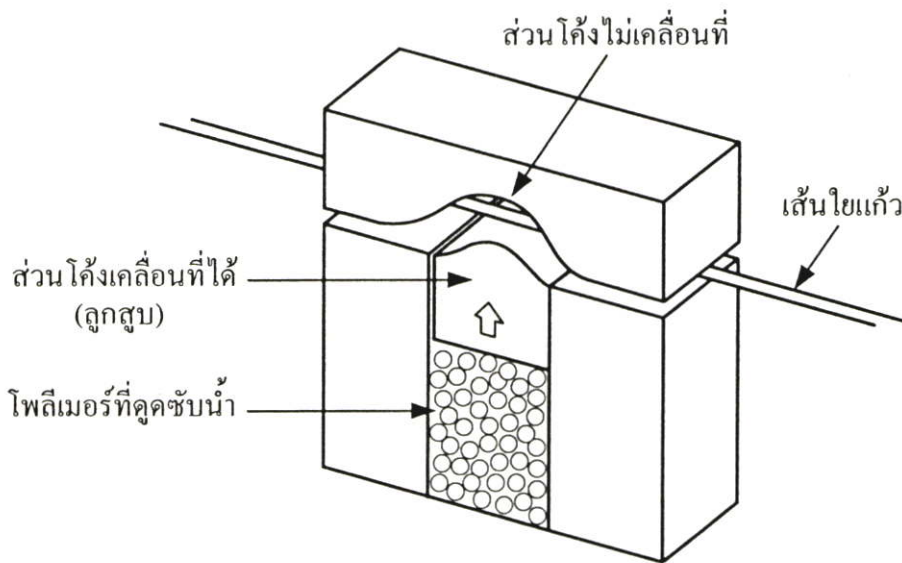


รูปที่ 4.13 ใช้โพลีเมอร์ทำ Water Blocking Tape สำหรับเคเบิลอากาศ

ส่วนเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable) ทั้งที่ฝังดินโดยตรง (Direct Buried Cable) หรือแบบร้อยท่อ (Duct Cable) จะใช้ Jelly Compound เป็นวัสดุในการป้องกันน้ำเข้าเคเบิล ซึ่งจะสามารถป้องกันน้ำได้ดีกว่า Water Blocking Tape เนื่องจากเคเบิลใต้ดินจะสัมผัสกับน้ำตลอดเวลา

4.4 การทำงานและโครงสร้างของอุปกรณ์

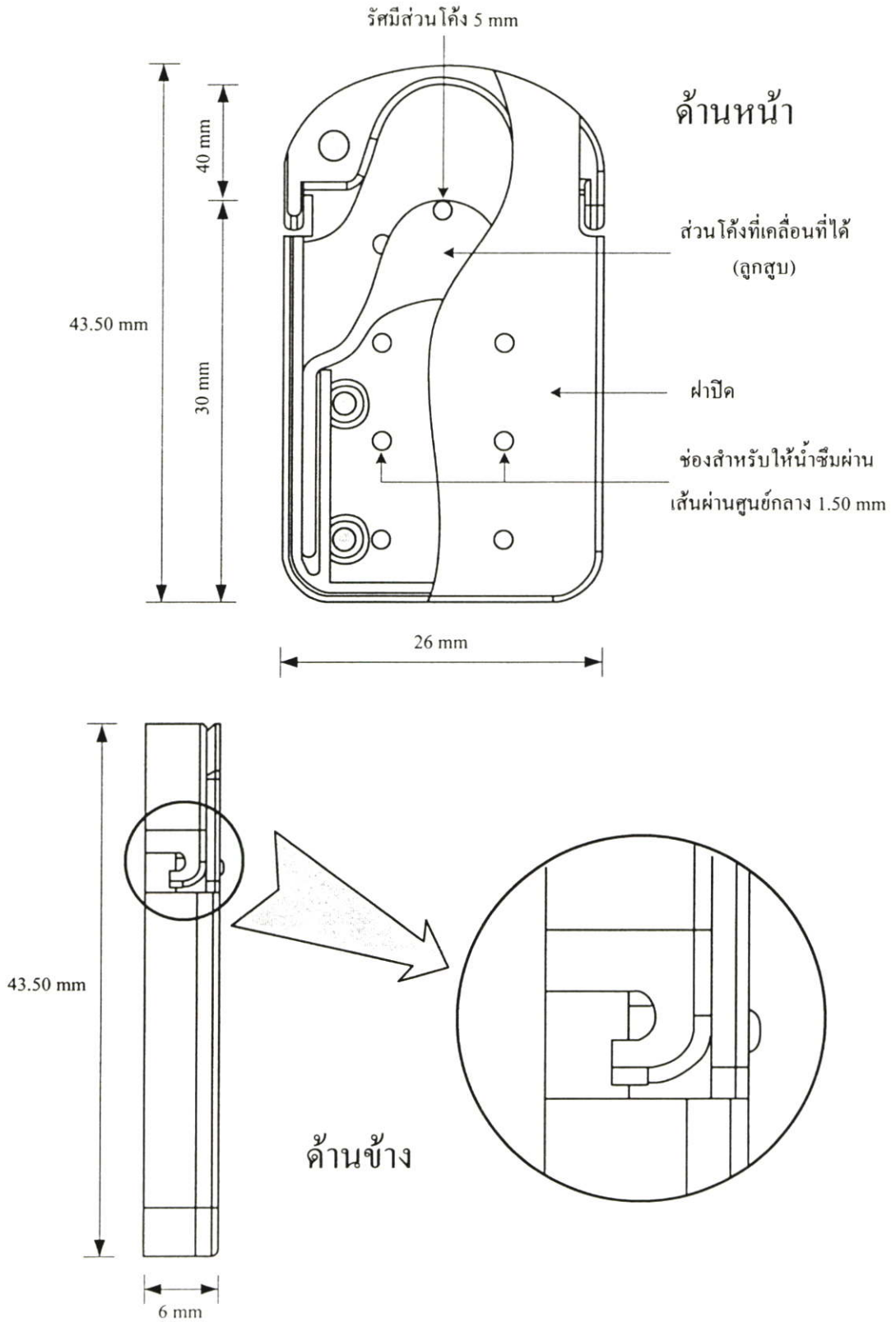
ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ คือ เมื่อน้ำอยู่บริเวณรอบๆ อุปกรณ์ น้ำจะถูกดูดซึมโดยโพลีเมอร์ที่บรรจุอยู่ในอุปกรณ์ ทำให้โพลีเมอร์เกิดการขยายตัวและมีแรงดันเกิดขึ้น โพลีเมอร์จะดันส่วนโค้งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (ลูกสูบ) ซึ่งส่วนโค้งที่เคลื่อนที่ได้นี้จะจะไปดันเส้นใยแก้วให้เกิดการโค้งงอตามรัศมีความโค้งของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้ ด้วยเหตุนี้เองทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณขึ้นภายในเส้นใยแก้ว



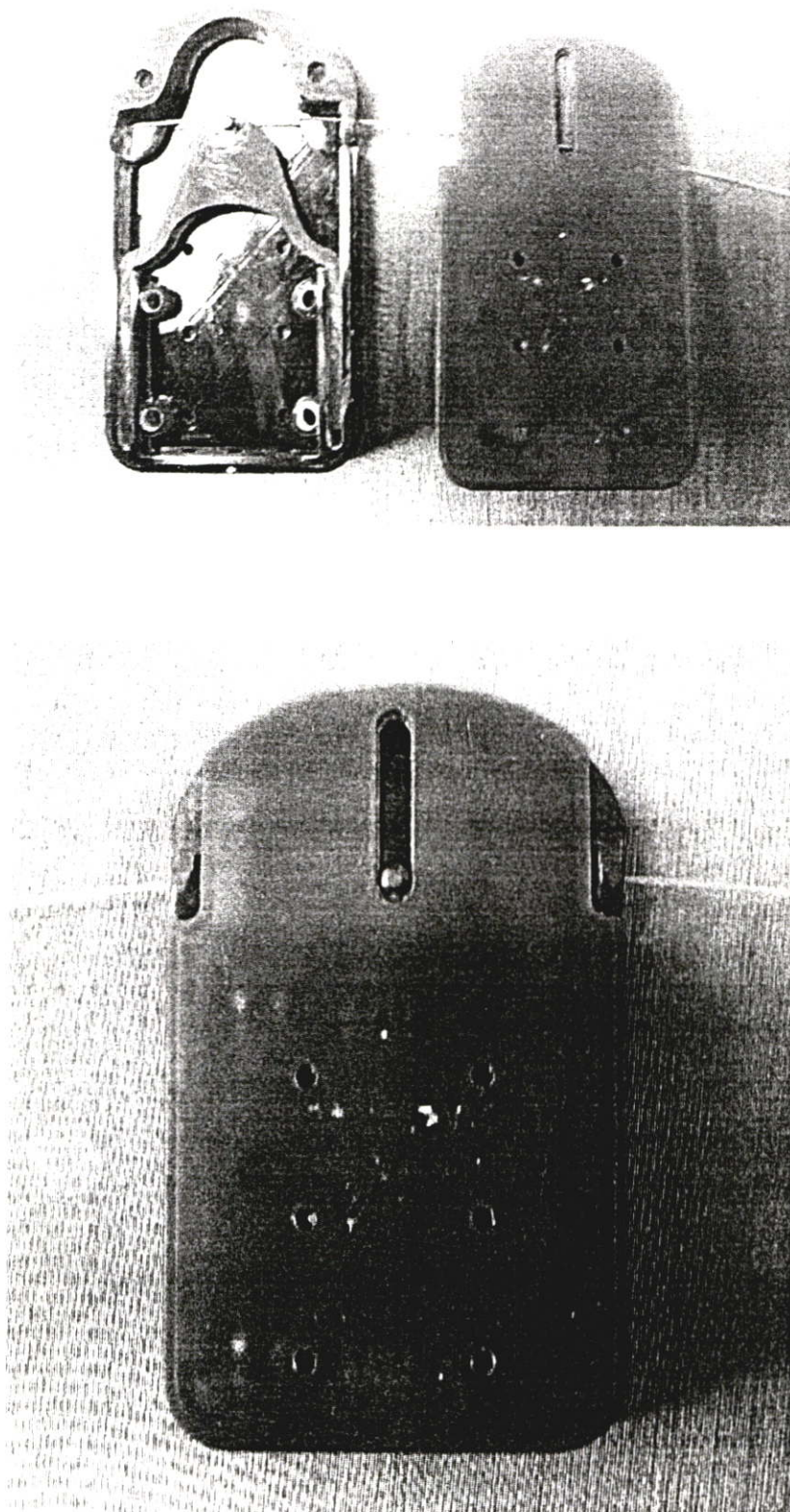
รูปที่ 4.14 โครงสร้างของอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำ

จากรูปที่ 4.14 โครงสร้างของอุปกรณ์จะผลิตจากพลาสติกแข็ง เพื่อป้องกันการบิดงอของพลาสติก ป้องกันสนิม และเพื่อให้สามารถติดตั้งภายในถาดของเส้นใยแก้ว (Fiber Tray) ในหัวต่อเคเบิลได้ อุปกรณ์จึงควรมีขนาดเล็ก สำหรับโพลีเมอร์ที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำจะมีลักษณะแข็งเป็นเม็ดเล็กๆ เช่นเดียวกับที่ใช้งานด้านการเกษตร เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก (ประมาณกิโลกรัมละ 300 - 400 บาท) และเมื่อโพลีเมอร์สัมผัสกับน้ำจะสามารถขยายตัวได้อย่างรวดเร็ว อุปกรณ์ที่ได้ออกแบบควรมีราคาต้นทุนต่ำสำหรับการผลิตจำนวนมากๆ

4.5 อุปกรณ์ต้นแบบ



รูปที่ 4.15 ขนาดของอุปกรณ์ต้นแบบ



รูปที่ 4.16 ลักษณะของอุปกรณ์ต้นแบบ

บทที่ 5

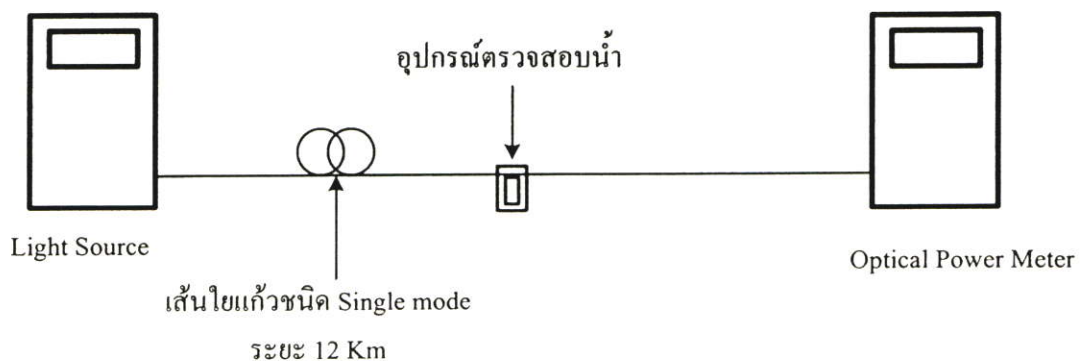
ผลการทดสอบและสรุป

จากความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีระบบสื่อสาร ทำให้ปัจจุบันมีความต้องการระบบที่สามารถรับส่งข้อมูลที่มีปริมาณมากๆ ให้ได้ในเวลาอันรวดเร็ว นั่นคือ โครงข่ายทางแสงถือเป็นโครงข่ายที่สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้เป็นอย่างดี ด้วยคุณสมบัติที่ดีของเส้นใยแก้ว เช่น มีอัตราการรับ-ส่งข้อมูล (Bit-rate) สูง มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีค่าการลดทอนสัญญาณต่ำ ปราศจากสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ข้อมูลมีความปลอดภัยสูง อายุการใช้งานยาวนาน เป็นต้น ดังนั้นการดูแลบำรุงรักษาโครงข่ายเส้นใยแก้วให้สามารถใช้งานได้ตลอดเวลาจึงเป็นสิ่งสำคัญ ในหัวข้อ (Closure) ของเส้นใยแก้วหากมีน้ำขังก็จะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของเส้นใยแก้ว เช่น ทำให้เส้นใยแก้วแตกหักได้ง่ายขึ้น เนื่องจากน้ำจะทำให้โค้ตติ้ง (Coating) ซึ่งหุ้มเส้นใยแก้วเสื่อมสภาพเร็วขึ้น น้ำจะทำให้ชิ้นส่วนของหัวข้อ เช่น นี้อต พลาสติก เสื่อมสภาพเร็วกว่าการใช้งานปกติ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจสอบน้ำในหัวข้อของเส้นใยแก้ว เพื่อการดูแลบำรุงรักษาโครงข่ายให้สามารถกระทำได้ง่าย ประหยัดทั้งเวลาและงบประมาณ ทำให้โครงข่ายของเส้นใยแก้วมีประสิทธิภาพในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

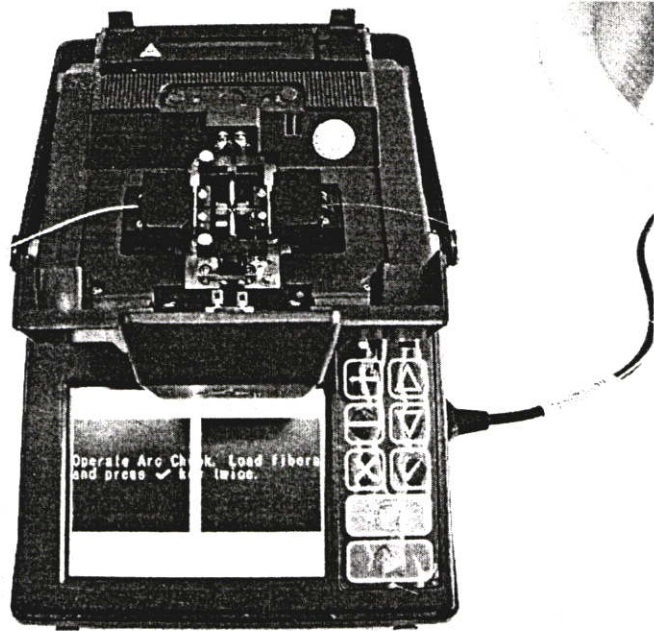
5.1 ผลการทดสอบ

5.1.1 การทดสอบอุปกรณ์โดยใช้ Light Source และ Optical Power Meter

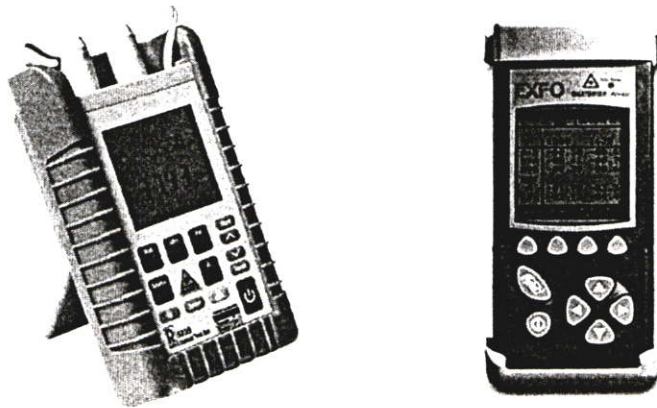
การทดสอบอุปกรณ์จะทำการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วชนิด Single mode ด้วยเครื่อง Fusion Splice รวมระยะทางทั้งหมด 12 กิโลเมตร จากนั้นจะใช้ Light Source และ Optical Power Meter เพื่อวัดค่าการสูญเสียพลังงานแสงของเส้นใยแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 5.1



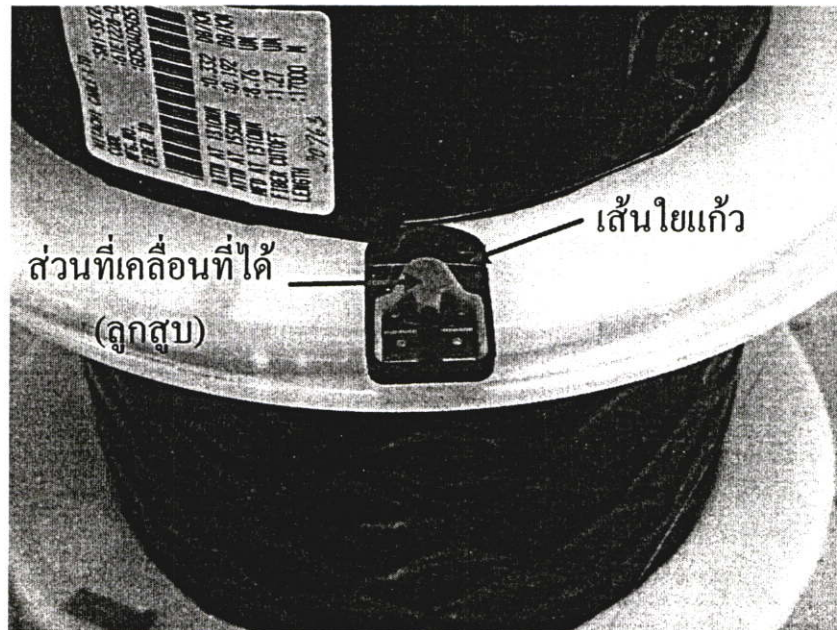
รูปที่ 5.1 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ Light Source และ Optical Power Meter ทดสอบอุปกรณ์



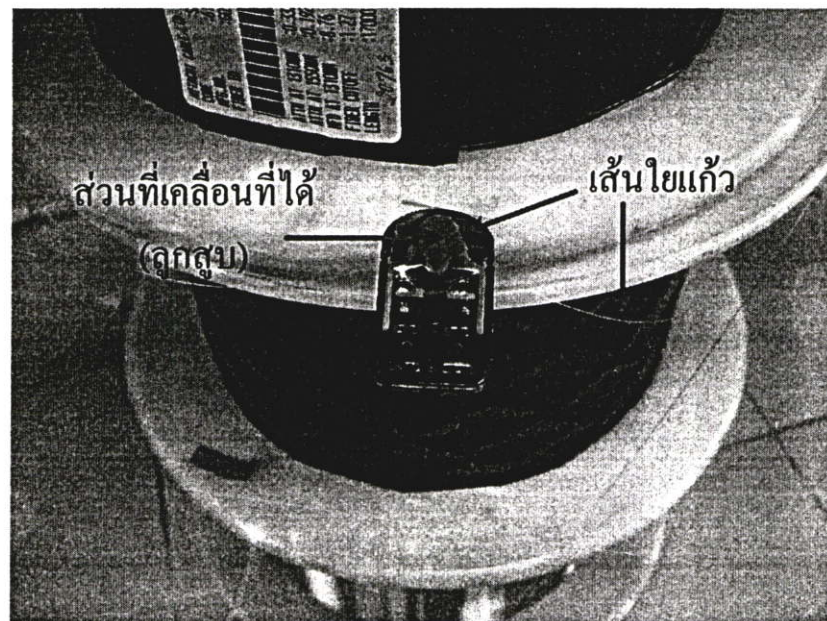
รูปที่ 5.2 Fusion Splice



รูปที่ 5.3 Light Source และ Optical Power Meter ที่รวมอยู่ในตัวเดียวกัน



รูปที่ 5.4 อุปกรณ์ไม่ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ

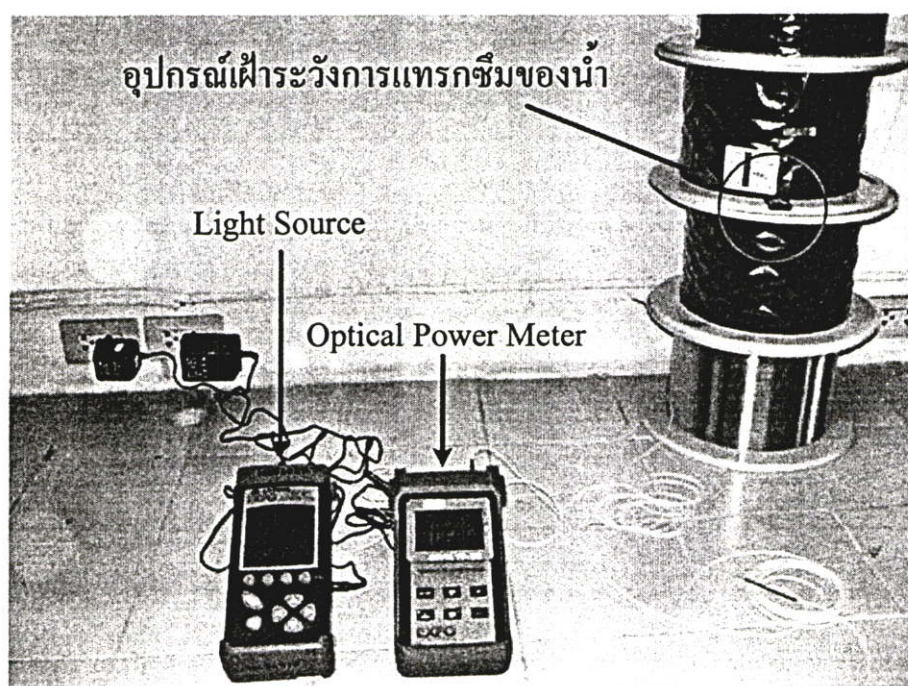


รูปที่ 5.5 อุปกรณ์ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอเต็มที่

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (ลูกสูบ) ของอุปกรณ์ ที่ความยาวคลื่น 1,310 nm ทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ ได้ค่าการสูญเสียพลังงานแสงดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งผลต่างของค่าการสูญเสียพลังงานแสงระหว่าง เส้นใยแก้วไม่โค้งงอกับเส้นใยแก้วโค้งงอเต็มทีนั้น จะมีค่าเท่ากับ $6.84 - 4.02 = 2.82$ dB นั่นแสดงว่าอุปกรณ์ทำให้เส้นใยแก้วเกิดการสูญเสียพลังงานแสงเท่ากับ 2.82 dB

ตารางที่ 5.1 การสูญเสียพลังงานงานแสงเมื่ออุปกรณ์ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ

ระยะการเคลื่อนที่ของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (ลูกสูบ) : (mm)	ค่าการสูญเสียพลังงานแสง : (dB)
0 (เส้นใยแก้วไม่โค้งงอ)	4.02 (Loss ในระบบ)
2	4.37
4	4.82
6	5.41
8	6.06
10 (เส้นใยแก้วโค้งงอเต็มที)	6.84



รูปที่ 5.6 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วย Light Source และ Optical Power Meter

จากรูปที่ 5.6 เป็นการทดสอบอุปกรณ์กับเส้นใยแก้วชนิด Single mode ที่ความยาวคลื่น 1,310 nm และที่ความยาวคลื่น 1,550 nm ซึ่งอุปกรณ์มีรัศมีความโค้ง 5 mm ได้ค่าการสูญเสียพลังงานแสง ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3

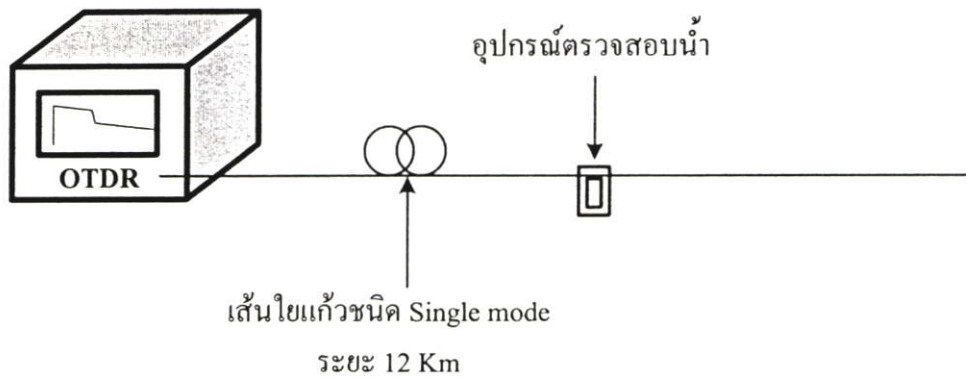
ตารางที่ 5.2 การสูญเสียพลังงานแสงที่เกิดจากอุปกรณ์ เมื่อใช้ความยาวคลื่น 1,310 nm

	ค่าการสูญเสียพลังงานแสง (dB)									
ค่าที่ได้จากการคำนวณ	2.6677									
ค่าที่ได้จากการวัด	2.84	2.88	3.17	2.81	2.80	2.78	2.81	2.76	2.79	2.76

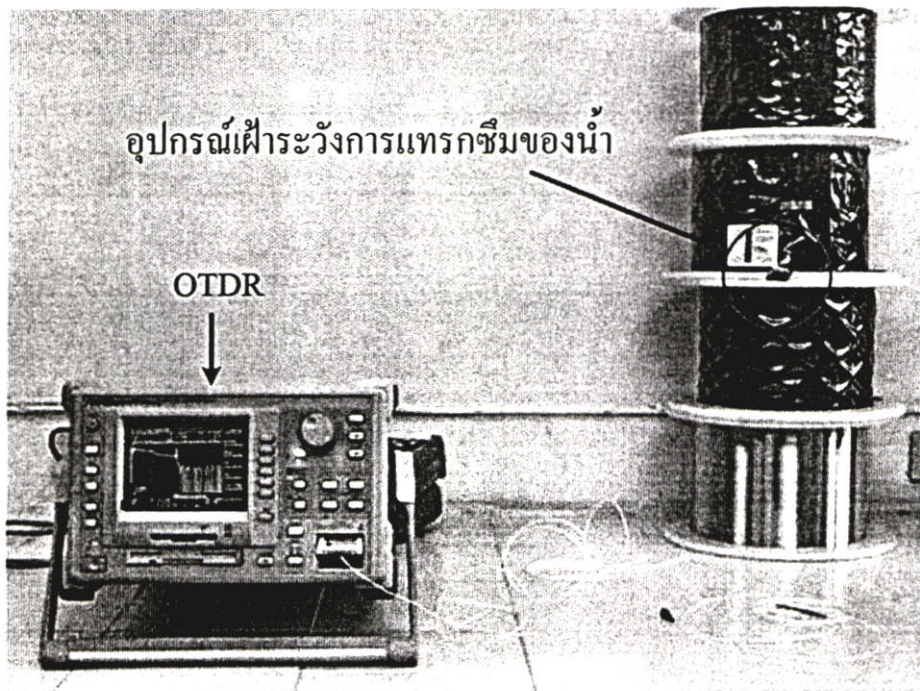
ตารางที่ 5.3 การสูญเสียพลังงานแสงที่เกิดจากอุปกรณ์ เมื่อใช้ความยาวคลื่น 1,550 nm

	ค่าการสูญเสียพลังงานแสง (dB)									
ค่าที่ได้จากการคำนวณ	2.8424									
ค่าที่ได้จากการวัด	3.24	3.26	3.05	2.99	2.72	2.85	3.22	3.19	3.21	2.87

5.1.2 การทดสอบอุปกรณ์โดยใช้ OTDR

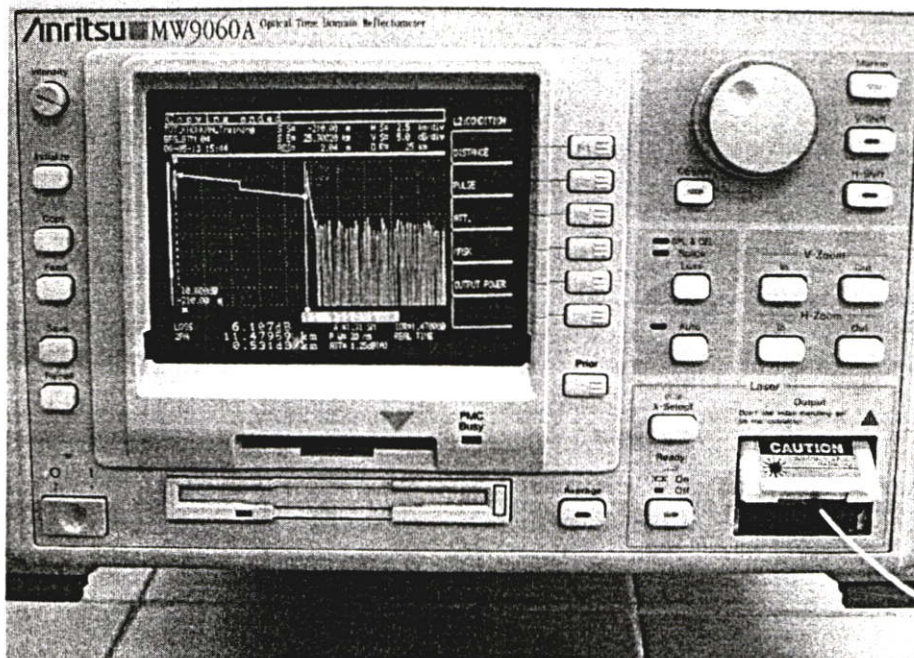


รูปที่ 5.7 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ OTDR ทดสอบอุปกรณ์

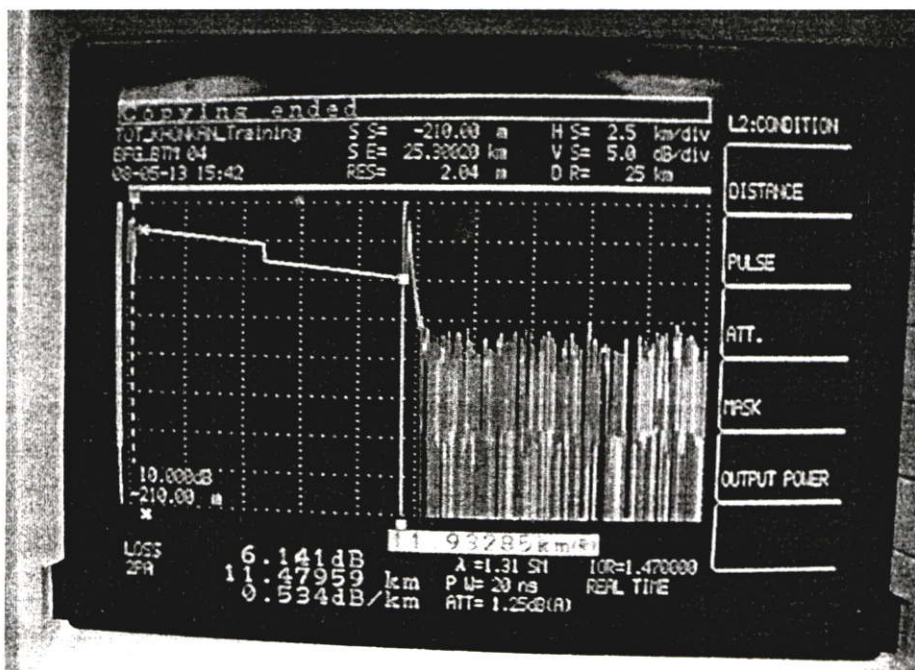


รูปที่ 5.8 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วย OTDR

จากรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 เป็นการเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ OTDR เพื่อตรวจสอบลักษณะของกราฟการสูญเสียพลังงานแสงที่เกิดจากอุปกรณ์

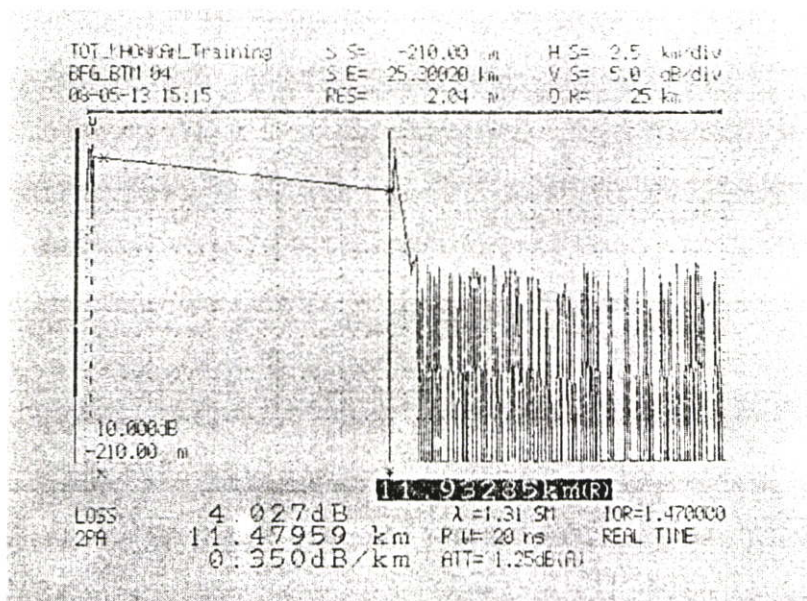


(ก)

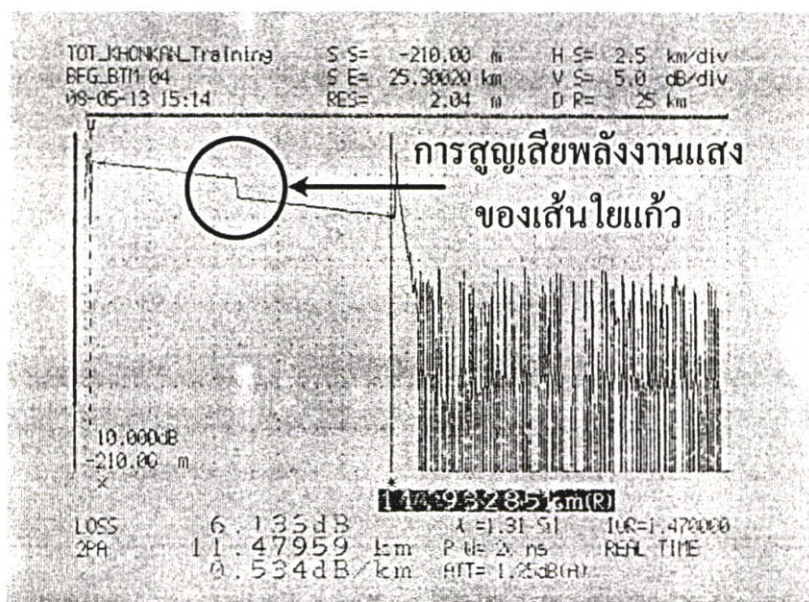


(ข)

รูปที่ 5.9 กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วย OTDR



รูปที่ 5.10 กราฟที่ได้จาก OTDR ก่อนใส่อุปกรณ์



รูปที่ 5.11 กราฟที่ได้จาก OTDR หลังใส่อุปกรณ์

5.2 สรุปผลการวิจัย

จากการออกแบบอุปกรณ์สามารถสรุปสิ่งต่างๆ ได้ดังนี้

1. จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ที่ความยาวคลื่นเดียวกัน (1,550 นาโนเมตร) การสูญเสียพลังงานแสงเนื่องมาจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (Step-Index Fiber : SI) จะมีค่าน้อยกว่าเส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็กซ์ (Graded-Index Fiber : GI) นั่นคือที่รัศมีความโค้งเท่ากัน ใช้ความยาวคลื่นเดียวกันแต่ใช้เส้นใยแก้วต่างชนิดกัน จะมีค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากการโค้งงอต่างกัน

2. จากการทดสอบโพลีเมอร์ทำให้สังเกตได้ว่า โพลีเมอร์จะขยายตัวได้อย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 5-10 นาทีแรกที่สัมผัสกับน้ำ โพลีเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมจะขยายตัวได้ช้ากว่าโพลีเมอร์ที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน แต่โพลีเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมจะมีแรงดัน สามารถดันวัตถุได้ดีกว่าโพลีเมอร์ที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน

3. จากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ ค่าการสูญเสียสัญญาณก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น

4. จากตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยแก้วที่มีรัศมีความโค้งเท่ากัน (5 mm) แสงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีค่าการสูญเสียสัญญาณมากกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นน้อย

5. จากการทดสอบอุปกรณ์ที่มีรัศมีการโค้งงอเท่ากับ 5 mm ทั้งหมด 10 ครั้งต่อความยาวคลื่น ในตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3 จะสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้

6. จากรูปที่ 5.11 กราฟที่ได้จาก OTDR สามารถแสดงค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ได้อย่างชัดเจน

ดังนั้นจากการทดสอบทั้งหมด แสดงให้เห็นได้ว่าอุปกรณ์สามารถที่จะทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอได้ และการโค้งงอที่เกิดจากอุปกรณ์ก็สามารถทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณขึ้นในเส้นใยแก้วได้เช่นกัน สามารถนำเครื่องมือวัดหาค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ได้ แต่หากจะนำอุปกรณ์ไปใช้งานจริงๆ ในระบบโครงข่ายเส้นใยแก้ว ควรจะมีการสร้างต้นแบบของอุปกรณ์หลายๆ รูปแบบ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (ลูกสูบ) ว่าสามารถเคลื่อนที่ได้ดีหรือไม่ เปรียบเทียบการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์แต่ละแบบ หรือการทดสอบอายุการใช้งานของโพลีเมอร์ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. P. Chen, W. S. Hwang, and C. C. Li, "A Packet Pre-classification CSMA/CA MAC Protocol for IP over WDM Ring Network", 8th **IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS 2002)**, pp. 1222-1226, 2002.
- [2] K. S. Kim, H. Okagawa, K. Shrikhande and L. G. Kazovsky, "Unslotted Optical CSMA/CA MAC Protocol with Fairness Control in Metro WDM Ring Network", **Proc. of GLOBECOM 2002**, Taipei, Taiwan, Nov 2002.
- [3] สถาบันวิชาการ ทีโอที, "Optical Fiber Overview", กรุงเทพฯ : ม.ป.ป.
- [4] M. Minnaert, "Light and colour in the open air", G. Bell and Sons Ltd., 1940.
- [5] อธิคม ฤกษ์บุตร, "เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น", พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2546.
- [6] M. Born and E. Wolf, "Principles of optics", 6th Edition, Pergamon Press, 1980.
- [7] K. J. Beales and C. R. Day, "A review of glass fibers for optical communications", **Physics and Chemical of glass**, vol. 21, no. 1, pp. 5 – 21, 1980.
- [8] M. Koshiba, "Optical Waveguide Analysis in Advanced Science and Technology Series", McGraw-Hill Inc., Ch. 1, 1992.
- [9] M. Artiglia, G. Coppa, P. DiVita, M. Potenza, and A. Sharma, "Mode field diameter measurements in single-mode optical fibers", **Journal of Lightwave Technology**, vol. 7, no. 8, pp. 1139 – 1152, 1989.
- [10] D. J. H. Maclean, "Optical Line Systems", New York : John Wiley & Sons, 1996, pp. 83 - 87.
- [11] L. D. Green, "Fiber Optic Communication", USA : CRC Press, 1993, pp. 93 - 107.
- [12] Cisco Systems Inc., "Calculating the Maximum Attenuation for Optical Fiber Links", [Online], Available : http://www.cisco.com/en/US/products/hw/optical/ps2006/products_tech_note09186a00800e6ceb.shtml, 2008.
- [13] พงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพบุลย์, "อุปกรณ์ตรวจสอบเส้นใยนำแสง OTDR ตอน 1", **เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์**, ฉบับที่ 190, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, พฤศจิกายน 2541, หน้า 164 – 171.

- [14] พงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพบูลย์, “อุปกรณ์ตรวจสอบเส้นใยนำแสง OTDR ตอนจบ”, **เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์**, ฉบับที่ 191, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, ธันวาคม 2541, หน้า 170 – 175.
- [15] ดีพร้อม ไชยวงศ์เกียรติ, “**โพลีเมอร์และคอตเตอร์ การใช้ทางการเกษตร**”, กรุงเทพฯ : อักษรสยามการพิมพ์, 2538, หน้า 1 - 5.
- [16] Hitachi Bangkok Cable Co. Ltd., “**Specification for single mode optical fiber aerial cable 24c**”, Spec. No. SPO-06-011, January 2006, pp. 1-12.
- [17] Thai Fiber Optical Co. Ltd., “**Loose Tube Fiber Optic Cable**”, Bangkok, pp. 1-24.
- [18] Furukawa Electric North America Inc., “**AllWave Fiber Zero Water Peak**”, [Online], Available : <http://www.ofsoptics.com/fiber/>, 2008.
- [19] S. Tomita, H. Tachino and N. Kasahara, “Water sensor with Optical fiber”, **Journal of Lightwave Technology**, Vol. 8, No. 12, Dec. 1990, pp. 1829 - 1832.
- [20] S. Song and Z. Wu, “A broadband integrated services network architecture based on DWDM”, **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**, Vol. 1, May 2001, pp. 347 - 352.
- [21] S. N. Gistvik, “**Optical Theory for Communication Networks**”, Sweden : Ericsson Network Technologies, 2002.

ภาคผนวก

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

ทวีศักดิ์ กริโส, สุวิพล สิทธีชีวะภาค. “การเผื่อระวังการแทรกซึมของน้ำที่จะผ่านเข้าไปยังหัวต่อของ
โครงข่ายเส้นใยแก้ว”. **วิศวกรรมอาคาร** ฉบับที่ 25, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2551.

การเฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำที่จะผ่านเข้าไปยังหัวต่อของ โครงข่ายเส้นใยแก้ว

Water Penetration Inspection into the Joints of the Optical Fiber Network

ทวีศักดิ์ กริโธ

สุวิพล สิริชีวะภาค

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ ได้เสนอการปรับปรุงการวางโครงข่ายเส้นใยแก้ว โดยให้มีการติดตั้งอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำ อุปกรณ์ดังกล่าวจะติดตั้งเข้าไปในหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว เพราะหากภายในหัวต่อของเส้นใยแก้วมีน้ำขัง จะส่งผลเสียตลอดอายุการใช้งานของเส้นใยแก้ว ดังนั้นจึงเสนอให้มีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเข้าไปภายในหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว ในกรณีที่มีน้ำซึมผ่านหัวต่อ อุปกรณ์เฝ้าระวังน้ำจะทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ เป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณภายในเส้นใยแก้วขึ้น ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์สามารถใช้เครื่องมือวัดหาค่าได้อย่างชัดเจน การโค้งงอของเส้นใยแก้วที่เกิดจากการออกแบบอุปกรณ์ จะต้องไม่ทำให้เส้นใยแก้วเกิดความเสียหาย ในขณะที่เส้นใยแก้วติดตั้งอุปกรณ์เฝ้าระวังน้ำ เส้นใยแก้วยังคงสามารถใช้งานได้ตามปกติ อุปกรณ์นี้สามารถใช้ได้กับเส้นใยแก้วที่มีความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 800 - 1,700 นาโนเมตร การตรวจสอบน้ำเข้าหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วนั้นต้องใช้ควบคู่กับ Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) เพื่อตรวจสอบตำแหน่งที่น้ำเข้าหัวต่อ โดยสังเกตได้จากค่าการสูญเสียสัญญาณแสงภายในเส้นใยแก้วที่เกิดจากอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำ

Abstract

This paper presents the improvement of optical fiber network by installing the water penetration device. The device is installed into the joints of the optical fiber network. Since water penetration inside the closure will adversely affect to the optical fiber lifetime. Thus, the installation of the additional device within the joints of the optical fiber is proposed. In case of the water penetrates into the joints, this device will cause the bending of the optical fiber and the power loss to occur which can be measured certainly. The curvature of this designed device does not damage the optical fiber. Meanwhile, the optical fiber which installed the device can operate normally. This device can be used for optical fiber that has wavelength in the range of 800 - 1,700 nm. Checking up on water penetration in the closure has to be used together with Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) to detect the position that water percolate to the closure by observing from power loss in the optical fiber.

1. บทนำ

เส้นใยแก้วเป็นสื่อสัญญาณที่ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เช่น การนำเส้นใยแก้วไปเชื่อมโยงระหว่างชุมสายใหญ่กับชุมสายย่อยๆ หรือระหว่างชุมสายย่อยด้วยกันเอง การเจริญเติบโตของโครงข่าย Fiber to the home (FTTH) ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อดีของเส้นใยแก้ว คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา อัตราการส่งข้อมูลสูง เป็นต้น นั่นแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายเส้นใยแก้วมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะหากเส้นใยแก้วเสียหายก็จะส่งผลกระทบต่อระบบการสื่อสารเป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นการดูแลบำรุงรักษาโครงข่ายให้สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องกระทำ

ภายในหัวต่อ (Closure) ของเคเบิลเส้นใยแก้วจะต่างจากหัวต่อของเคเบิลทองแดง คือจะไม่มีสารที่ใช้ในการป้องกันการแทรกซึมของน้ำ (Filling Compound) ทำให้น้ำสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปยังภายในหัวต่อได้ ด้วยเหตุนี้หัวต่อของเส้นใยแก้วจึงเป็นส่วนหนึ่งที่จะสร้างความเสียหายให้กับโครงข่าย เพราะภายในหัวต่อจะเป็นจุดรวมของการต่อเส้นใยแก้ว (Splicing Point) หากมีน้ำข้างในหัวต่อก็จะส่งผลกระทบต่อเส้นใยแก้วตลอดอายุการใช้งาน เช่น น้ำจะทำให้โค้ดคิง (Coating) ที่หุ้มเส้นใยแก้วเสื่อมสภาพเร็วขึ้น เป็นสาเหตุให้เส้นใยแก้วแตกหักได้ง่าย อีกทั้งน้ำจะทำให้ชิ้นส่วนของหัวต่อ เช่น นีโอค พลาสติกเสื่อมสภาพเร็วกว่าการใช้งานปกติ [1]

สำหรับในประเทศไทยยังไม่มีอุปกรณ์ใดที่ใช้ในการตรวจสอบน้ำที่อยู่ภายในหัวต่อของเส้นใยแก้ว หากต้องการจะตรวจสอบน้ำก็จะใช้วิธีการเปิดหัวต่อ ทำให้เสียเวลาในการตรวจสอบและต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงเสนอให้มีการคิดตั้งอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำภายในหัวต่อของเส้นใยแก้ว เพื่อใช้ตรวจสอบน้ำเข้าหัวต่อ เมื่ออุปกรณ์เปียกน้ำ อุปกรณ์ดังกล่าวจะทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ ทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณขึ้น ณ ตำแหน่งที่มีการโค้งงอของเส้นใยแก้ว จากนั้นใช้ OTDR ตรวจสอบเส้นใยแก้ว ก็จะทราบได้ว่ามีน้ำแทรกซึมผ่านเข้าไปในหัวต่อหรือไม่ ทำให้ง่ายต่อการบำรุงรักษาโครงข่าย ช่วยยืดอายุการใช้งานของเส้นใยแก้วและหัวต่อ ส่งผลให้โครงข่ายเส้นใยแก้วมีประสิทธิภาพการใช้งานมากยิ่งขึ้น

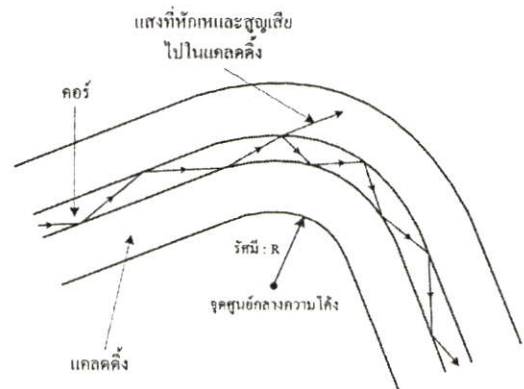
2. การสูญเสียพลังงานแสงที่เกิดจากความโค้ง

การสูญเสียพลังงานแสงที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วมี 2 ลักษณะคือ

2.1 ความโค้งขนาดใหญ่ (Macrobending) เกิดจากการจัดวางเส้นใยแก้วที่ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรง เช่น จัดเคเบิลให้โค้งงอตามลักษณะมุมของอาคาร การม้วนเคเบิลภายในบ่อพักสาย ซึ่งถือเป็นสิ่งจำเป็นที่อยากจะหลีกเลี่ยงในทางปฏิบัติ ความโค้งขนาดใหญ่จะสามารถสังเกตได้จากภายนอกของเส้นใยแก้ว

2.2 ความโค้งขนาดเล็ก (Microbending) เกิดจากขั้นตอนการผลิตของเส้นใยแก้ว ความโค้งขนาดเล็กจะไม่สามารถสังเกตได้จากภายนอกของเส้นใยแก้ว

ในบทความนี้ความโค้งที่นำมาพิจารณา คือ ความโค้งขนาดใหญ่ ที่มีรัศมีความโค้งน้อยๆ



รูปที่ 1 การกระจายพลังงานแสงออกจากความโค้งขนาดใหญ่ (Macrobending) ของเส้นใยแก้ว

จากรูปที่ 1 เมื่อแสงเดินทางไปถึงจุดที่เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ แสงจะเดินทางไปกระทบรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลคคิง ในลักษณะของมุมตกกระทบที่ทำให้เกิดการสะท้อน และหักเหตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) หากเส้นใยแก้วมีรัศมีความโค้งมากๆ แสงหักเหที่จุดนี้จะไม่เกิดขึ้นหรือเกิดปรากฏการสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection : TIR) นั่นคือไม่มีการสูญเสียพลังงานแสง แต่ถ้าเส้นใยแก้วมีรัศมีความโค้งน้อยๆ จะทำให้แสงที่เดินทางภายในคอร์เกิดการหักเหเข้าไปในแคลคคิง ส่งผล

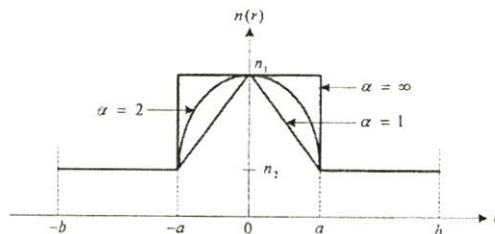
ให้แสงภายในคอร์ของเส้นใยแก้ว มีค่าลดลงตามสัดส่วนที่
 เสียไปกับการหักเหของแสงในแคลคูลัส

ค่าการสูญเสียพลังงานแสง (Power Loss) ในเส้น
 ใยแก้วที่เกิดจากความโค้งขนาดใหญ่ สามารถคำนวณหาค่า
 โดยประมาณได้จากสมการ (1), [2]

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 - \left(\frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \right) \left[\frac{d}{R} + \left(\frac{3\lambda}{4\pi n_2 R} \right)^2 \right] \quad (1)$$

และสามารถหาค่าการสูญเสียพลังงานแสง (Power loss)
 ในหน่วยของ dB ได้จากสมการ (2)

$$P_{lost} = -10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (2)$$

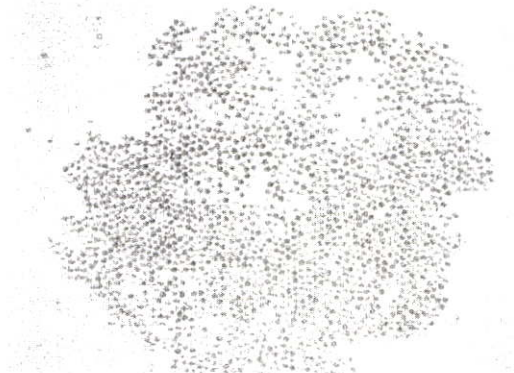


รูปที่ 2 รูปร่างของกราฟที่แสดงค่าดัชนีหักเหของแสงในเส้นใยแก้ว
 ที่ค่าของ α ต่างๆ

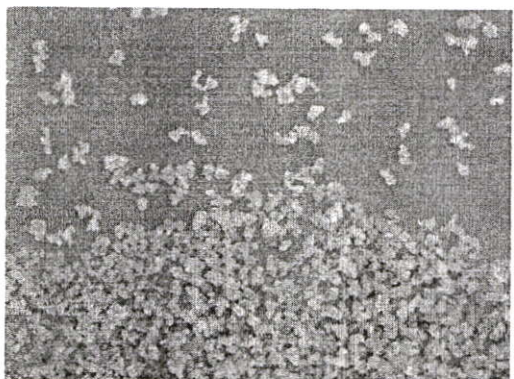
จากรูปที่ 2 เมื่อ $(\alpha + 2)/\alpha = 1$ รูปร่างของกราฟ
 จะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular profile)
 ในขณะที่ $\alpha = 2$ กราฟจะมีลักษณะเป็นรูปพาราโบลา
 (Parabolic profile) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของเส้นใยแก้วชนิด
 เกรดเด็ค-อินเด็กซ์ (Graded - Index Fiber) เมื่อแทนค่า
 $\alpha = 2$ ในสมการ (1) จะได้ $(\alpha + 2)/\alpha = 2$ ดังนั้น
 $(\alpha + 2)/(2\alpha\Delta) = (2/2\Delta)$ และถ้า α มีค่ามากขึ้นไป
 เรื่อยๆ รูปร่างจะมีลักษณะโค้งออกมากขึ้นตามค่าของ
 α จนในที่สุดเมื่อ α มีค่าเป็นอนันต์หรือ $\alpha = \infty$ ก็
 เป็นคุณสมบัติของเส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (Step -
 Index Fiber) เมื่อแทนค่า $\alpha = \infty$ ในสมการ (1) จะได้
 $(\alpha + 2)/\alpha = 1$ ดังนั้น $(\alpha + 2)/(2\alpha\Delta) = (1/2\Delta)$, [3]

3. โพลีเมอร์

โพลีเมอร์เป็นสารที่เกิดจากการสังเคราะห์ มี
 ลักษณะโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรท
 (Carbohydrate) สำหรับโพลีเมอร์ที่นำมาใช้เป็น
 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟเบอร์ออปติกการแทรกซึมของน้ำ
 เรียกว่า ครอส-ลิงค์ โพลีเอคริลามิค โคลิโพลีเมอร์ (Cross-
 linked Polyacrylamide Copolymer) มีลักษณะแข็งเป็นเม็ด
 เล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 3



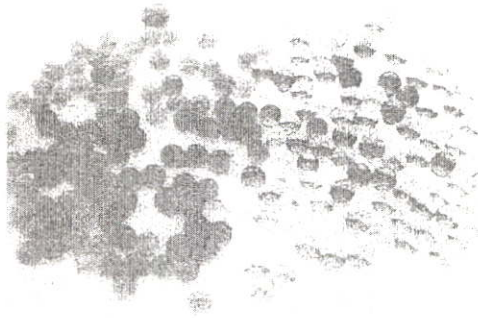
(A) โพลีเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม



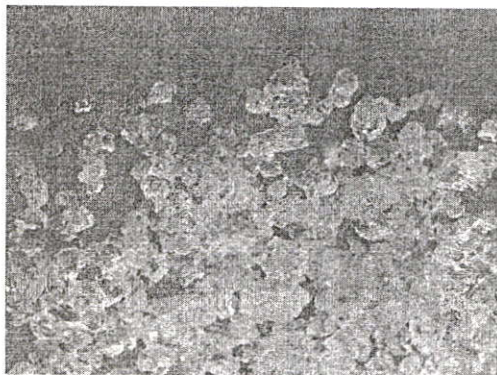
(B) โพลีเมอร์ที่มีรูปร่างไม่แน่นอน

รูปที่ 3 ลักษณะของโพลีเมอร์

เมื่อโพลีเมอร์สัมผัสกับน้ำจะทำให้โมเลกุลของ
 น้ำซึมผ่านเข้าไปในโพลีเมอร์ได้ และสามารถดูดซับน้ำไว้
 ได้ เกิดการขยายตัวของโพลีเมอร์ตามปริมาณของน้ำที่ซึม
 ผ่านเข้าไปอยู่ภายใน โพลีเมอร์ที่ดูดซับน้ำไว้จะมีลักษณะ
 นิ่มคล้ายวุ้นหรือเจลลี่ (Jelly) ดังแสดงในรูปที่ 4



(A) โพลีเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม



(B) โพลีเมอร์ที่มีรูปร่างไม่แน่นอน

รูปที่ 4 ลักษณะของโพลีเมอร์ที่ดูดซับน้ำ

ถ้ามีปริมาณของน้ำมากพอมาสัมผัสกับโพลีเมอร์ จะทำให้โพลีเมอร์สามารถขยายตัวหรืออุ้มน้ำได้ประมาณ 300-500 เท่าของน้ำหนักโพลีเมอร์แห้ง [4] การดูดซับน้ำของโพลีเมอร์จะดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลา 5 นาทีแรก หลังจากนั้นการดูดซับน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และจะหยุดดูดซับน้ำเมื่อถึงจุดอิ่มตัวใช้เวลาประมาณ 2 วัน

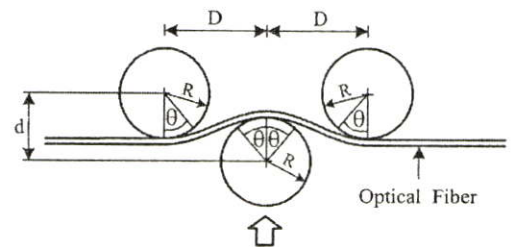
ตารางที่ 1 ค่า pH ของน้ำที่มีผลต่อการดูดซับของโพลีเมอร์

ค่า pH ของน้ำ	การดูดซับน้ำได้ (กรัมต่อโพลีเมอร์แห้ง 1 กรัม)
4	310
5	330
6	400
7	430
8	410

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าโพลีเมอร์สามารถดูดซับน้ำได้ปริมาณที่น้ำมีคุณสมบัติเป็นกลาง (pH = 7) ส่วนน้ำที่มีคุณสมบัติเป็นกรด (pH = 1 - 6) และคุณสมบัติเป็นเบส (pH = 8 - 14) นั้นจะดูดซับน้ำได้น้อยลง

4. การออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์

การออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์เป็นสิ่งสำคัญมาก เนื่องจากเส้นใยแก้วต้องโค้งตามชิ้นส่วนของอุปกรณ์ ถ้าออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์ให้มีรัศมีความโค้งมากๆ จะทำให้ค่าการสูญเสียสัญญาณภายในเส้นใยแก้วมีค่าน้อย เมื่อใช้ OTDR ตรวจสอบก็จะแยกแยะค่าการสูญเสียสัญญาณได้ยาก แต่ถ้าออกแบบความโค้งของอุปกรณ์ให้มีรัศมีความโค้งน้อยๆ ก็อาจจะทำให้เส้นใยแก้วได้รับความเสียหายได้เมื่อเส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ



รูปที่ 5 การโค้งงอของเส้นใยแก้วที่เกิดจากอุปกรณ์

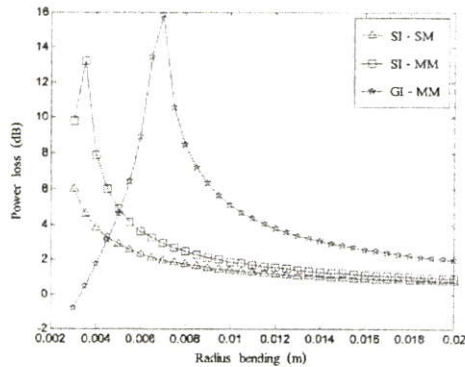
จากรูปที่ 5 แสดงการโค้งงอของเส้นใยแก้ว โดยมีส่วนที่ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ 3 ส่วน คือส่วนที่อยู่ด้านข้าง 2 ส่วน ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้จะไม่เคลื่อนที่ และส่วนที่อยู่ตรงกลาง ซึ่งส่วนนี้จะเคลื่อนที่ตามขนาดแรงดันของโพลีเมอร์ที่ดูดซับน้ำไว้ คือเมื่อโพลีเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก ก็จะสามารถขยายตัวและเกิดแรงดันได้มากเช่นกัน ส่งผลให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอตามความโค้งของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้

สามารถหาค่าผลรวมของมุม ($\sum\theta$) ที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วได้จากสมการ (3)

$$\sum\theta = 4 * \left\{ \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left[\frac{R}{\left(\sqrt{(D^2 + d^2)} / 2 \right)} \right] - \tan^{-1} \left(\frac{d}{D} \right) \right\} \quad (3)$$

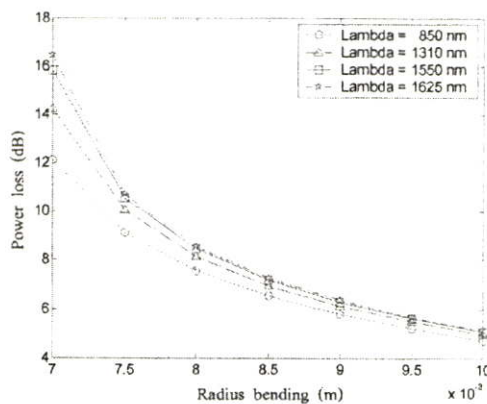
5. อุปกรณ์ใฝ่ระวังการแทรกซึมของน้ำ

5.1 การออกแบบรัศมีการโค้งของอุปกรณ์



รูปที่ 6 การสูญเสียพลังงานแสงที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร

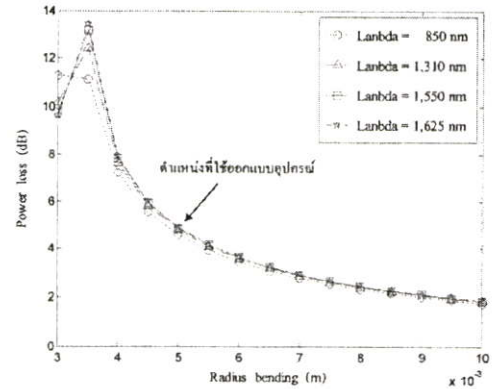
จากรูปที่ 6 เมื่อเส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ ที่ความยาวคลื่นแสงเดียวกันการสูญเสียพลังงานแสงของเส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็คซ์ (Graded-Index Fiber : GI) จะมีค่ามากกว่าเส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็คซ์ (Step-Index Fiber : SI) [2] และเมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยแก้วที่มีลักษณะความโค้งเช่นเดียวกัน แสงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีค่าการสูญเสียสัญญาณมากกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นน้อย [5] ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 เปรียบเทียบการสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ Graded-index Fiber

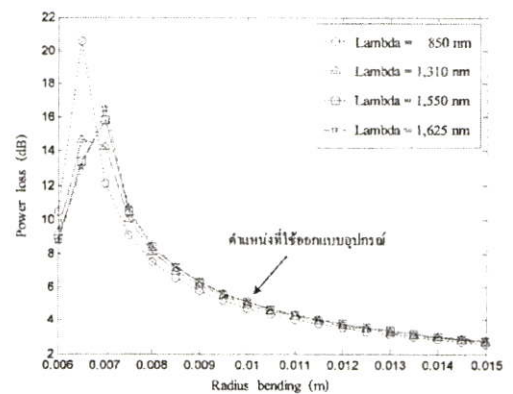
การออกแบบรัศมีการโค้งของอุปกรณ์ สำหรับเส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็คซ์ (Step-Index Fiber) จะให้รัศมีการโค้ง (R) มีค่าเท่ากับ 5 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดการ

สูญเสียพลังงานแสงประมาณ 4-8 dB ดังแสดงในรูปที่ 8 สาเหตุที่ต้องให้เกิดการสูญเสียสัญญาณ 4-8 dB นั้นเนื่องมาจากการวัดตรวจสอบน้ำเข้าหัวต่อโดยใช้ OTDR จะสามารถแยกแยะกราฟการสูญเสียสัญญาณได้ง่าย



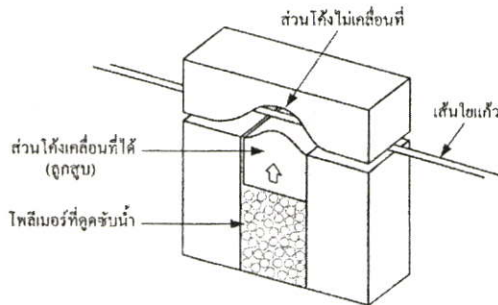
รูปที่ 8 การสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็คซ์ (Step-Index Fiber)

ส่วนการออกแบบรัศมีการโค้งของอุปกรณ์ สำหรับเส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็คซ์ (Graded-Index Fiber) จะให้รัศมีการโค้ง (R) มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานแสงประมาณ 4-8 dB เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 9 หากออกแบบให้รัศมีการโค้งเท่ากับเส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็คซ์ จะทำให้เส้นใยแก้วได้รับความเสียหาย ไม่สามารถใช้งานได้ตามปกติ



รูปที่ 9 การสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแก้วชนิดเกรดเค็ด-อินเด็คซ์ (Graded-Index Fiber)

5.2 ลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์



รูปที่ 10 โครงสร้างของอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำที่จะผ่านเข้าไปยังหัวต่อของเส้นใยแก้ว

จากรูปที่ 10 เมื่อมีน้ำอยู่บริเวณรอบๆ อุปกรณ์ น้ำจะถูกดูดซึมโดยโพลีเมอร์ ซึ่งบรรจุอยู่ในอุปกรณ์ เมื่อโพลีเมอร์ดูดซับน้ำก็จะเกิดการขยายตัวและมีแรงดันเกิดขึ้น ทำให้โพลีเมอร์ดันส่วนโค้งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (ลูกสูบ) ซึ่งส่วนโค้งที่เคลื่อนที่ได้นี้จะไปดันเส้นใยแก้วให้เกิดการโค้งงอตามรัศมีความโค้งของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้อีกครั้งหนึ่ง ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณขึ้นภายในเส้นใยแก้ว การติดตั้งอุปกรณ์จะติดตั้งให้อยู่ภายในถาดของเส้นใยแก้ว (Fiber Tray) ในหัวต่อของเคเบิล

6. ผลการทดสอบ

การทดสอบอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำได้ทำการทดสอบกับเส้นใยแก้วชนิด Single mode ที่ความยาวคลื่น 1,310 nm และที่ความยาวคลื่น 1,550 nm ทดสอบกับอุปกรณ์ที่มีรัศมีความโค้ง 5 mm ค่าการสูญเสียพลังงานแสงดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าการสูญเสียพลังงานแสงที่เกิดจากอุปกรณ์

ความยาวคลื่นที่ใช้ทดสอบ (nm)	1,310	1,550
	ค่าการสูญเสียพลังงานแสง (dB)	
ค่าที่ได้จากการคำนวณ	2.6677	2.8424
ค่าที่ได้จากการวัด	Max. 3.17	Max. 3.26
	Ave. 2.84	Ave. 3.06
	Min. 2.76	Min. 2.72

7. สรุป

จากการทดสอบการขยายตัวของโพลีเมอร์พบว่าโพลีเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมจะขยายตัวได้ช้ากว่าโพลีเมอร์ที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน แต่โพลีเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลมจะสามารถดันส่วนโค้งที่เคลื่อนที่ได้ (ลูกสูบ) ของอุปกรณ์ได้ดีกว่าโพลีเมอร์ที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน และจากตารางที่ 2 เป็นผลของการทดสอบอุปกรณ์ซึ่งใช้ทดสอบกับเส้นใยแก้วชนิด Single mode เพื่อหาผลการสูญเสียพลังงานแสง จากการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้งต่อ 1 ความยาวคลื่น ได้ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ยและค่าต่ำสุดดังตารางที่ 2 นั้น จะสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยของการสูญเสียพลังงานแสงจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้


8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณณฤทธิ์สมเจริญ สำนภาพรวมทั้งผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณ บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบอุปกรณ์ในครั้งนี้ด้วย

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันวิชาการ ทีโอที. "Optical Fiber Overview". กรุงเทพฯ : ม.ป.ป.
- [2] L. D. Green. "Fiber Optic Communication". USA : CRC Press, 1993. pp. 93 - 107.
- [3] D.J.H. Maclean. "Optical Line Systems". New York : John Wiley & Sons, 1996. pp. 83 - 87.
- [4] ดีพร้อม ไชยวงศ์เกียรติ. "โพลีเมอร์และก๊อตเต็ม การใช้งานทางเกษตร". กรุงเทพฯ : อักษรสยามการพิมพ์, 2538. หน้า 1 - 5.
- [5] อธิคม อุทมนบุตร. "เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น". พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2546.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ว่าที่ร.ต.ทวีศักดิ์ กริโส
วัน เดือน ปีเกิด	25 มิถุนายน 2520 ที่อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา
ที่อยู่	25/1849 ซ.ลาดพร้าว 101 ซอย 36 (กาญจนวาส) แขวงคลองจั่น เขตบางกะปิ กรุงเทพฯ 10240
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2544 สำเร็จการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2544-ปัจจุบัน  บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) 