

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วโดยใช้การ  
ตรวจจับสัญญาณสูญเสีย

MONITORING EQUIPMENT FOR WATER DIFFUSION INTO THE ENCLOSURES  
FOR OPTICAL FIBER NETWORK BY LOSS DETECTION



ฉพ.  
ก659 ค

2553

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน **110594**

วัน,เดือน,ปี - 9 ๗๘ 2553

b..... 1225๖๖80  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL 2010-EN-M-010-070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**MONITORING EQUIPMENT FOR WATER DIFFUSION INTO THE ENCLOSURES  
FOR OPTICAL FIBER NETWORK BY LOSS DETECTION**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2010**

**KMITL 20010-EN-M-010-070**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2010**

**FACULTY OF ENGINEERING**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุปกรณ์ไฟระวังกการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่าย เส้นใยแก้วโดยใช้การตรวจจับสัญญาณสูญเสีย
นักศึกษา	นาย กิจพัฒน์ ศรีอรทัยวรรณ
รหัสประจำตัว	48060947
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิพล สิทธีวีภาค

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเสนออุปกรณ์ไฟระวังกการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วโดยใช้การตรวจจับการสัญญาณสูญเสีย เพื่อที่จะป้องกันผลเสียที่จะเกิดขึ้นกับเส้นใยแก้ว หลักการทำงานของอุปกรณ์ เมื่อมีน้ำซึมผ่านเข้ามายังอุปกรณ์ไฟระวังกน้ำจะทำให้เกิดการโค้งงอของเส้นใยแก้ว ทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณภายในเส้นใยแก้ว และจะต้องมีค่าสูงพอที่จะสามารถตรวจวัดได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการสูญเสียสัญญาณภายในเส้นใยแก้วที่เกิดขึ้นจากในกรณีอื่น โดยที่การตรวจสอบน้ำเข้าหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วนั้นต้องใช้ควบคู่กับ Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) จะทำให้สามารถตรวจสอบตำแหน่งที่มีการแทรกซึมของน้ำที่เข้ามายังหัวต่อได้อย่างชัดเจน

<b>Thesis Title</b>	Monitoring Equipment for Water Diffusion into the Enclosures for Optical Fiber Network by Loss Detection
<b>Student</b>	Mr. Kitjapat Sriorrathaiwan
<b>Student ID.</b>	48060947
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2010
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Suvepon Sittichivapak

### ABSTRACT

This thesis presents the monitoring equipment for water diffusion into the enclosures for optical fiber network by loss detection method. The principle of system considers the matter that the optical fiber will be bended when the water diffuses into enclosures. For this reason, the power loss will generate in the system and it must be high enough for the precision measurement to compare with the other loss. The Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) is used together. Finally, the position of the water diffusion in the system will be detected.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาคือ รศ.ดร.สุวิพล สิทธีชีวภาค ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะต่างๆ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบิดา - มารดาและบุคคลอื่นๆ ในครอบครัว ที่ได้ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในระหว่างการศึกษาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่นฤทธิ์สัมเจริญ สำเภาพล ที่คอยให้คำปรึกษาและคอยชี้แนะแนวทางในการศึกษาค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติม เกี่ยวกับการออกแบบและทดลองอุปกรณ์ไฟระวังกการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วโดยใช้การตรวจจับสัญญาณที่สูง

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

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา - มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนครูบาอาจารย์ ทุกคนที่ได้ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าตลอดมา

กิตติพัฒน์ ศิริอรทัยวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 เส้นใยแก้ว.....	5
2.1 ลักษณะของเส้นใยแก้ว.....	5
2.2 ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสง.....	5
2.2.1 Step Index.....	5
2.2.2 Graded Index.....	6
2.2.3 Multi Mode.....	7
2.2.4 Single Mode.....	8
2.3 Cut-off Wavelength.....	8
2.4 ความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalized Frequency).....	9
2.5 Propagation Mode.....	10
2.6 การสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง.....	11
2.6.1 Fiber Loss.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.1.1 การลดทอนของสัญญาณเกิดจากเส้นใยแก้วนำแสง.....	11
2.6.1.1.1 Absorption losses.....	12
2.6.1.1.1.1 Intrinsic absorption.....	12
2.6.1.1.1.2 Extrinsic absorption.....	12
2.6.1.1.2 Scattering losses.....	13
2.6.1.1.2.1 แบบเรย์เลห์.....	13
2.6.1.1.2.2 แบบมี.....	13
2.6.1.2 การลดทอนของสัญญาณเกิดจากการนำเส้นใยแก้วนำแสงไปใช้งาน....	14
2.6.1.2.1 การสูญเสียจากการโค้งงอ (Bending Loss).....	14
2.6.1.2.1.1 Microbending.....	14
2.6.1.2.1.2 Macrobending.....	14
2.6.1.2.2 Connection loss.....	17
2.6.2 Chromatic Dispersion.....	18
2.6.3 Polarization-mode dispersion (PMD).....	20
2.7 Zero-dispersion.....	22
บทที่ 3 Optical Time Domain Reflectometer.....	26
3.1 คุณสมบัติของ OTDR.....	26
3.2 หลักการทำงานของ OTDR.....	27
3.3 ลักษณะของสัญญาณสะท้อนกลับในเส้นใยแก้ว.....	29
3.4 สัญญาณที่จุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้ว.....	33
3.5 การวัดจุดเชื่อมต่อของเส้นใยแก้ว.....	34
3.6 สมการอย่างง่ายของสัญญาณแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับ.....	36
3.7 ความหมายของคำศัพท์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ OTDR.....	40
3.7.1 Ghosting.....	40
3.7.2 Insertion Loss.....	41
3.7.3 Resolution.....	41
3.7.4 Dynamic Range.....	41
3.7.5 Dead Zone.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.6 Gainers.....	43
3.7.7 Optical Return Loss.....	44
3.8 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องกำหนดก่อนใช้เครื่อง OTDR.....	45
3.9 วิธีวัดหาค่าการสูญเสียสัญญาณในเส้นใยแก้ว.....	47
<b>บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์.....</b>	<b>49</b>
4.1 การออกแบบลักษณะส่วนโค้งของอุปกรณ์.....	49
4.1.1 การทดสอบต้นแบบโดยใช้ Light Source และ Optical Power Meter.....	50
4.1.2 การทดสอบเพื่อหาค่ารัศมีของอุปกรณ์.....	52
4.1.3 การทดสอบเพิ่มจำนวนของการโค้งงอ.....	56
4.2 การออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์.....	59
4.3 อุปกรณ์ต้นแบบ.....	62
4.4 สารโพลีเมอร์.....	63
<b>บทที่ 5 ผลการทดสอบและสรุป.....</b>	<b>67</b>
5.1 ผลการทดสอบ.....	67
5.1.1 การทดสอบอุปกรณ์โดยใช้ Light Source และ Optical Power Meter.....	67
5.1.2 การทดสอบอุปกรณ์โดยใช้ OTDR.....	71
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	72
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>74</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>76</b>
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>83</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การลดทอนจากอิออนโลหะที่เจือปนในเส้นใยแก้วนำแสงที่เกิดจากการหลอมเหลว.....	12
4.1 ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากต้นแบบต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 1310 nm .....	51
4.2 ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากรัศมีต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 1310 nm .....	52
4.3 ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากรัศมีต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 1550 nm .....	52
4.4 ค่าเฉลี่ยการสูญเสียสัญญาณ ที่ความยาวคลื่น 1310 nm และ 1550 nm.....	53
5.1 การสูญเสียสัญญาณที่วัดได้เมื่ออุปกรณ์ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ.....	70
5.2 การสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ เมื่อใช้ความยาวคลื่น 1,310 nm.....	70
5.3 ค่าเฉลี่ยการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ เปรียบเทียบกับ ค่าที่ได้จากการวัดรัศมี 3 มิลลิเมตร ที่มีจำนวนของการ โค้งงอ 4 ครั้ง.....	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ความเสียหายของหัวต่อเคเบิลเส้นใยแก้วที่เกิดจากการแทรกซึมของน้ำ.....	2
2.1 แสดง Index Profile จากคอร์ ไปหาแคลคูลัสคล้ายขั้นบันไดของ SI .....	6
2.2 Index Profile แสดงหักเหที่น้อยกว่าในคอร์ และสะท้อนบริเวณแคลคูลัส ของ GI .....	7
2.3 แสดง Index ของ Multi Mode Optical Fiber .....	7
2.4 แสดง Index ของ Single Mode Optical Fiber .....	8
2.5 แสดงทิศทางของ Propagation Mode ของเส้นใยแก้วนำแสง.....	10
2.6 การกระจายการกระจายแสงแบบเรย์เลห์.....	13
2.7 การลดทอนของสัญญาณเกิดจากการนำเส้นใยแก้วนำแสงไปใช้งาน.....	14
2.8 แสดงทางเดินของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงแนวตรง.....	15
2.9 แสดงทางเดินของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงโค้ง.....	15
2.10 แสดง Index Profile ของเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิด.....	17
2.11 การสูญเสียแสงที่เกิดจากการต่อเส้นใยแก้วนำแสง.....	18
2.12 แสดง Chromatic Dispersion แสงที่มีสีหรือความยาวคลื่นต่างกันเดินทาง ไปถึงปลายทางไม่พร้อมกัน.....	19
2.13 แสดงการเกิด Polarization-mode dispersion ในเส้นใยแก้วนำแสง.....	20
2.14 ลักษณะการเดินทางของคลื่นแสงในเส้นใยแก้วนำแสง.....	21
2.15 Polarization-mode Dispersion ทำให้มีการบานออกของสัญญาณพัลส์.....	21
2.16 เส้นใยแก้วนำแสงที่ผลิตมาเพื่อแก้ปัญหา PMD .....	22
2.17 Wavelength Window และ Zero-dispersion ที่ 1550 nm .....	22
2.18 ความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นในตำแหน่งช่วงสัญญาณเดิม.....	23
2.19 เปรียบเทียบ Pulse Dispersion กับ Zero Dispersion .....	24
2.20 เปรียบเทียบ แถบขยายความยาวคลื่น EDFA กับ DSF และ NZ – DSF .....	25
3.1 ลักษณะของ OTDR.....	26
3.2 หลักการทำงานของ OTDR.....	27
3.3 ลักษณะของ Scattering objects ภายในเส้นใยแก้ว.....	28
3.4 การสะท้อนกลับของแสงบริเวณรอยต่อของตัวกลางที่เป็นแก้วกับอากาศ.....	29
3.5 การกระเจิงย้อนกลับของแสงในเส้นใยแก้ว.....	29
3.6 กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อแบบต่างๆ ของเส้นใยแก้ว.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ลักษณะกราฟทางกายภาพของเส้นใยแก้วที่ต่างกัน.....	32
3.8 กราฟสัญญาณที่จุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้ว.....	33
3.9 กราฟสัญญาณที่เกิดจากเส้นใยแก้ว 2 เส้น เชื่อมต่อกัน.....	34
3.10 กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อแบบต่างๆ.....	36
3.11 การเกิด Ghosting ที่จุดเชื่อมต่อของเส้นใยแก้ว.....	40
3.12 อิทธิพลความกว้างของพัลส์ที่มีต่อ Dead Zone และ Dynamic Range.....	42
3.13 การเกิด Optical Return Loss.....	44
3.14 ลักษณะจอแสดงผลของ OTDR และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ผู้ใช้กำหนด.....	45
3.15 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วยวิธี Two Point Approximation (2PA).....	47
3.16 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วยวิธี Least Square Approximation (LSA).....	47
3.17 ค่า Loss ที่อ่านผิดพลาดเมื่อใช้วิธี LSA เปรียบเทียบกับวิธี 2PA.....	48
3.18 การวัดค่า Loss ที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยวิธี Five Marker.....	48
4.1 แบบส่วนโค้งในลักษณะต่างๆ.....	49
4.2 ลักษณะของต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบ.....	49
4.3 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ Light Source และ Optical Power Meter ทดสอบต้นแบบ.....	50
4.4 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วย Light Source และ Optical Power Meter ที่รวมอยู่ในตัวเดียวกัน.....	50
4.5 การสูญเสียสัญญาณที่ได้จากการวัด ที่ความยาวคลื่น 1310 นาโนเมตร และ 1550 นาโนเมตร ..	53
4.6 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่นต่างๆของ Step-Index Fiber-SM ที่ได้จากการคำนวณ....	55
4.7 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1,310 นาโนเมตร.....	55
4.8 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร.....	56
4.9 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ OTDR ทดสอบแบบที่มีรัศมีความโค้งงอ 5 มิลลิเมตร กับแบบที่มีรัศมีความโค้งงอ 5 มิลลิเมตร 2 ครั้ง.....	57
4.10 แสดงแบบที่มีรัศมีความโค้ง 5 มิลลิเมตร กับแบบที่มีรัศมีความโค้ง 5 มิลลิเมตร 2 ครั้ง.....	57
4.11 กราฟที่ได้จาก OTDR ที่ใส่แบบที่รัศมี 5 มิลลิเมตร.....	58
4.12 กราฟที่ได้จาก OTDR ที่ใส่แบบรัศมี 5 มิลลิเมตร 2 ครั้ง.....	58
4.13 กราฟที่ได้จาก OTDR ที่ใส่อุปกรณ์รัศมี 5 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับ อุปกรณ์รัศมี 5 มิลลิเมตร ที่มีส่วน 2 โค้ง.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 บริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ในภาคของเส้นใยแก้ว.....	59
4.15 ลักษณะการโค้งงอของเส้นใยแก้วที่เกิดจากการโค้งงอ 1 ครั้ง.....	60
4.16 ลักษณะของส่วนโค้งก่อนและหลังจากที่ทำการปรับส่วนโค้ง.....	61
4.17 ขนาดของอุปกรณ์ต้นแบบ.....	62
4.18 ลักษณะของอุปกรณ์ต้นแบบ.....	63
4.19 ลักษณะของโพลีเมอร์.....	64
4.20 ลักษณะของโพลีเมอร์ที่ดูดซับน้ำ.....	65
4.21 การขยายตัวของโพลีเมอร์.....	66
5.1 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ Light Source และ Optical Power Meter ทดสอบอุปกรณ์.....	67
5.2 Light Source และ Optical Power Meter ที่รวมอยู่ในตัวเดียวกัน.....	68
5.3 Fusion Splice.....	68
5.4 อุปกรณ์ไม่ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ.....	69
5.5 อุปกรณ์ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอเต็มที่.....	69
5.6 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ OTDR ทดสอบอุปกรณ์.....	71
5.7 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วย OTDR.....	71
5.8 กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วย OTDR.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

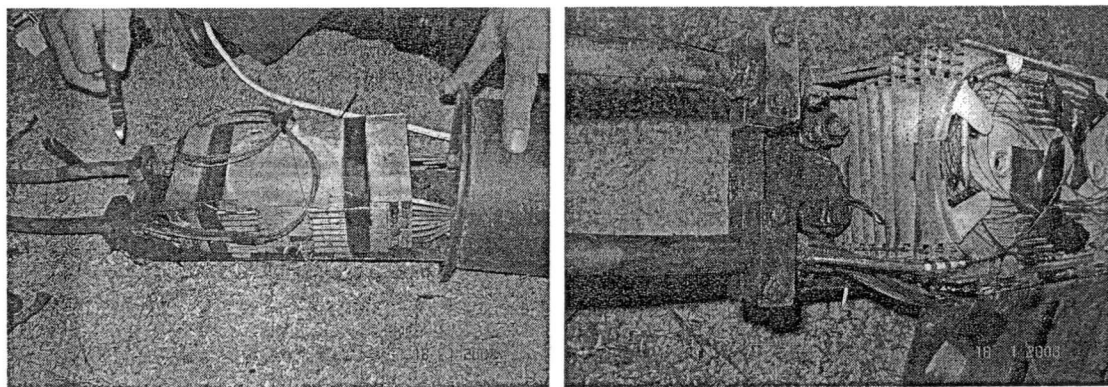
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้ความต้องการในการใช้งานอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง(Hi-Speed internet) นั้นมีมากขึ้น จึงทำให้มีการขยายปริมาณโครงข่ายเส้นใยแก้วมากขึ้น เพราะว่าเส้นใยแก้ว นั้นมีข้อดีคือ มีอัตราการส่งข้อมูลสูงมีการลดทอนสัญญาณต่ำ และไม่ถูกรบกวนโดยสัญญาณทางไฟฟ้า และมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา เป็นต้น เส้นใยแก้วจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างชุมสายย่อยๆกับชุมสายใหญ่ หรือระหว่างชุมสายย่อยด้วยกันเอง หรือระหว่างชุมสายย่อยไปยังบ้านผู้ใช้งาน โดยตรงที่เรียกว่า Fiber To The Home (FTTH) จึงทำให้เห็นว่าถ้าเกิดการเสียหายขึ้นกับเส้นใยแก้วจะทำให้ระบบการสื่อสารนั้นได้รับผลกระทบอย่างรุนแรงเพราะฉะนั้นการที่จะทำให้ระบบการสื่อสารสามารถใช้งานได้ตลอดเวลาจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันดูแลเส้นใยแก้วเป็นอย่างยิ่ง

ภายในหัวต่อของเส้นใยแก้วจะเป็นจุดเชื่อมต่อกันของเส้นใยแก้ว ถ้าเกิดมีน้ำสามารถแทรกซึมผ่านเข้ามายังภายในตัวต่อได้นั้น จะทำให้เกิดความเสียหายกับเส้นใยแก้ว โดยตรงและจะส่งผลกระทบต่อโครงข่ายการสื่อสาร เพราะว่าบริเวณภายในหัวต่อของเส้นใยแก้วจะไม่มีสารที่ใช้ในการป้องกันการแทรกซึมของน้ำ น้ำที่แทรกซึมเข้ามายังหัวต่อของเส้นใยแก้วจะทำให้โค้ตติ้ง(Coating) ซึ่งทำหน้าที่หุ้มเส้นใยแก้วเสื่อมสภาพเร็วขึ้น และจะทำให้เส้นใยแก้วแตกหักได้ [3]

อุปกรณ์การตรวจสอบน้ำเข้าสู่หัวต่อที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้มีค่าการสูญเสียสัญญาณในเส้นใยแก้วที่ไม่สูงพอที่จะทำให้ระบบตรวจจับจะทำการแจ้งเตือน เนื่องจากว่าในพื้นที่แต่ละพื้นที่นั้นมีการตั้งค่าการแจ้งเตือนนั้นไม่เท่ากันในบางพื้นที่มีการตั้งค่าไว้ไม่สูงระบบการแจ้งเตือนก็จะสามารถทำงานได้ แต่ในบางพื้นที่นั้นอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วได้ทำงานแล้ว แต่ว่าค่าการสูญเสียสัญญาณยังไม่ถึงจุดที่ตั้งการแจ้งเตือนไว้ จึงทำให้ต้องมีการออกแบบอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วแบบค่าการสูญเสียสูงขึ้น



รูปที่ 1.1 ความเสียหายของหัวต่อเคเบิลเส้นใยแก้วที่เกิดจากการแทรกซึมของน้ำ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อทำการศึกษาวิธีการออกแบบอุปกรณ์ สำหรับใช้ในการตรวจสอบว่ามีน้ำเข้าแทรกซึมไปยังภายในหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว อุปกรณ์ดังกล่าวจะทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอในลักษณะต่างๆเพื่อที่จะให้เกิดการสูญเสียสัญญาณที่สูงที่สุดขึ้น และสามารถตรวจสอบว่าภายในหัวต่อของเส้นใยแก้วได้มีน้ำแทรกซึมเข้ามาหรือไม่นั้น ก็สามารถใช้เครื่องมือวัดค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ได้ ซึ่งจะช่วยให้การตรวจสอบน้ำที่แทรกซึมเข้ามายังภายในหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วทำได้ง่าย ทำให้สามารถป้องกันเส้นใยแก้วไม่ให้เกิดความเสียหาย และช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายเส้นใยแก้วได้นานยิ่งขึ้น

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

อุปกรณ์เฟื่อระวังการแทรกซึมของน้ำจะทำงาน โดยใช้สาร โพลีเมอร์ที่จะขยายตัว เมื่อสัมผัสกับน้ำไว้ภายในอุปกรณ์ เพื่อที่เวลาที่มีน้ำสัมผัสกับสาร โพลีเมอร์ที่ได้บรรจุอยู่ในอุปกรณ์ สารโพลีเมอร์ก็จะเกิดการขยายตัว ไปดันส่วนโค้ง (ลูกสูบ) ของอุปกรณ์ ทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ เป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียสัญญาณขึ้นภายในเส้นใยแก้ว ค่าการสูญเสียสัญญาณที่มีค่าสูงที่สุด เพื่อให้ระบบการแจ้งเตือนทำงาน และหากต้องการทดสอบว่ามีน้ำแทรกซึมเข้าหัวต่อ ณ ที่ตำแหน่งใด ก็สามารถใช้เครื่องมือวัดที่ชื่อ OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) ในการตรวจสอบ เพื่อหาตำแหน่งที่มีการสูญเสียสัญญาณ ตำแหน่งใดของเส้นใยแก้วที่มีค่าการสูญเสียสัญญาณที่สูงที่สุด ก็อาจสันนิษฐานได้ว่า ณ ตำแหน่งนั้นมีน้ำเข้าไปในหัวต่อ หลังจากนั้นก็ทำการแก้ไขหัวต่อให้อยู่ในสภาพปกติ (ไม่ให้มีน้ำอยู่ในหัวต่อ) การตรวจสอบลักษณะนี้จะสามารถดูแลรักษาโครงข่ายเส้นใยแก้วได้ง่ายกว่าและประหยัดต้นทุนได้มากกว่าการไปเปิดหัวต่อที่ละหัวต่อเพื่อตรวจสอบน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

สารโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ เกิดการขยายตัวและมีแรงดันเกิดขึ้นเมื่อเปียกน้ำ เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ โดยสารโพลีเมอร์ดังกล่าวจะดันส่วนโค้งของอุปกรณ์เพื่อให้ส่วนโค้งของอุปกรณ์ไปดันเส้นใยแก้วให้โค้งงออีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้เพื่อให้การโค้งงอของเส้นใยแก้วมีรัศมีการโค้งตามที่ได้ออกแบบไว้

ลักษณะการโค้งงอ (Macrobending) ของเส้นใยแก้วจะทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณขึ้น นั่นคือ เมื่อแสงเดินทางไปถึงจุดที่เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ แสงจะเดินทางไปกระทบรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้งในลักษณะของมุมตกกระทบที่ทำให้เกิดการสะท้อนและหักเหตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) หากเส้นใยแก้วมีลักษณะความโค้งน้อยๆ หรือมีรัศมีการโค้งมากๆ แสงหักเหที่จุดนี้อาจไม่เกิดขึ้นและปรากฏการสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection : TIR) ยังคงมีอยู่ ทำให้ไม่มีการสูญเสียความเข้มของแสง แต่ถ้าเส้นใยแก้วมีลักษณะความโค้งมากๆ หรือมีรัศมีการโค้งน้อยๆ จนทำให้เกิดการหักเหของแสงเข้าไปในแคลดดิ้ง แสงที่สะท้อนและเดินทางต่อภายในคอร์ของเส้นใยแก้ว จะมีค่าลดลงตามสัดส่วนที่เสียไปกับแสงหักเห ด้วยทฤษฎีดังกล่าวจึงได้นำมาใช้ในการออกแบบความโค้งของอุปกรณ์

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

- การโค้งงอของที่เกิดจากอุปกรณ์จะต้องไม่ทำให้เส้นใยแก้วเสียหาย
- สามารถติดตั้งอุปกรณ์ให้อยู่ภายในหัวต่อ (Closure) ของเส้นใยแก้วได้
- สามารถนำอุปกรณ์ไปใช้ได้กับระยะทางที่ต่ำกว่า 20 km ได้
- สามารถทำให้ระบบการแจ้งเตือนทำงานได้ดี
- สามารถนำหลักการออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์ไปใช้กับเส้นใยแก้วชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (Step-Index Fiber) ซึ่งเป็นสายที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันได้

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของเส้นใยแก้ว
- 1.6.2 ศึกษาเกี่ยวกับการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้ว
- 1.6.3 ทดสอบหาตัวแปรที่ทำให้ได้ค่าสูญเสียสัญญาณที่สูงขึ้น
- 1.6.4 ออกแบบการโค้งงอของเส้นใยแก้ว
- 1.6.5 ออกแบบลักษณะของอุปกรณ์
- 1.6.6 สร้างอุปกรณ์ต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.6.7 ศึกษาเกี่ยวกับสาร โพลีเมอร์ (Polymer) ที่สามารถดูดซับน้ำได้
- 1.6.8 ทดสอบการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแก้วที่เกิดจากการติดตั้งอุปกรณ์
- 1.6.9 สรุปผลการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# เส้นใยแก้ว

### 2.1 ลักษณะของเส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้วนำแสง(Optical Fiber) ผลิตจาก Silica ( $SiO_2$ ) เป็นส่วนใหญ่ มีเส้นใยนำแสงบางแบบทำจากโพลีเมอร์หรือวัสดุสังเคราะห์อื่นๆ แต่ก็ใช้งานสำหรับระยะทางสั้นๆ เท่านั้น เพราะมีการลดทอน (Loss) สูง ส่วนประกอบของเส้นใยแก้วนำแสงประกอบด้วยคอร์ และแคลดดิ้ง มีบัฟเฟอร์หุ้มรอบนอก ตัวอย่างเช่นเคเบิลชนิด Single-mode ขนาด  $9/125 \mu m$  หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์  $9 \mu m$  และเส้นผ่านศูนย์กลางของแคลดดิ้ง  $125 \mu m$  โดยมีบัฟเฟอร์หุ้มรอบเส้นใยแก้วนำแสงมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ  $250 \mu m$

### 2.2 ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสง

เส้นใยแก้วนำแสงแบ่งออกได้ตาม Refractive Index Profile [16] ได้ 2 ชนิด คือ

#### 2.2.1 Step Index

#### 2.2.2 Graded Index

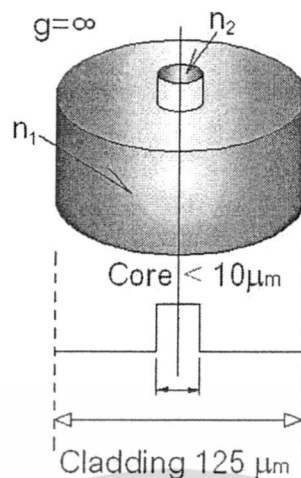
แบ่งตาม Propagation Mode [16] ได้อีก 2 ชนิด คือ

#### 2.2.3 Multi Mode

#### 2.2.4 Single Mode

#### 2.2.1 Step Index (SI)

เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้จะมีค่าดัชนีหักเหของแสงของคอร์ และ แคลดดิ้งที่แตกต่างกัน โดยที่บริเวณคอร์ ( $n_2$ ) จะมีค่าดัชนีหักเหของแสงสูงกว่าแคลดดิ้ง ( $n_1$ ) เล็กน้อย ( $n_1 < n_2$ ) เมื่อพิจารณา Index Profile ของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด “SI” การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของแสงจากคอร์ ไปหาแคลดดิ้ง จะมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดคล้ายขั้นบันได จึงเรียกเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ว่า Step Index Fiber



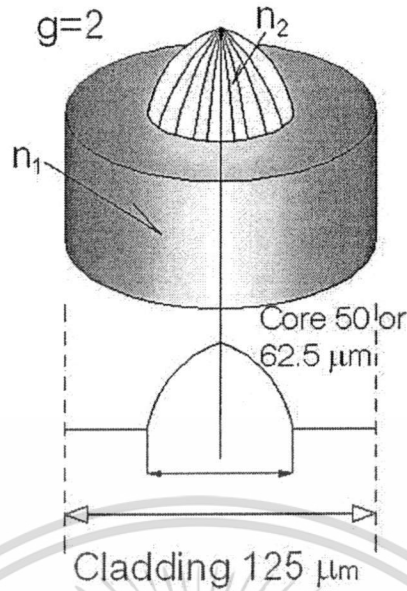
รูปที่ 2.1 แสดง Index Profile จากคอร์ โปหาเคลดคิงคล้ายขั้นบันไดของ SI

Step Index Fiber มีทั้ง Single Mode และ Multi Mode แตกต่างที่เส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ หากเป็น Single Mode จะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ ประมาณ  $10 \mu\text{m}$  แต่หากเป็น Multi Mode เส้นผ่านศูนย์กลางของ Core ประมาณ  $50 \mu\text{m}$  การใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงแบบ Multi Mode มีปัญหาเรื่อง Modal Dispersion จากปัญหาแสงมีการเคลื่อนที่หลายเส้นทาง แต่ละเส้นทางระยะทางไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้สัญญาณไปถึงปลายทางไม่พร้อมกัน เกิดการผิดเพี้ยน (Distortion) ของสัญญาณที่ปลายทาง

### 2.2.2 Graded Index (GI)

เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อลดปัญหา Modal Dispersion โดยทำให้ค่าดัชนีหักเหของแสงบริเวณคอร์สูงกว่าเคลดคิงเล็กน้อย ค่าดัชนีหักเหของแสงจะค่อย ๆ ลดลงจากคอร์ไปหาเคลดคิง เมื่อแสงเดินทางไปในเส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ แสงจะมีการหักเหทีละน้อยภายในคอร์ และมีการสะท้อนบริเวณเคลดคิง การหักเหและสะท้อนดังกล่าวอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของแสงทีละน้อยนั้น จึงทำให้ดูเหมือนว่าแสงเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้ง

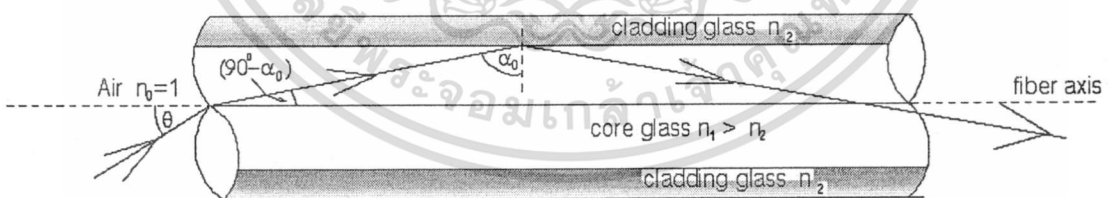
เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ใช้เป็น Multi Mode เท่านั้น การเคลื่อนที่ของแสงแต่ละเส้นทางใช้ระยะเวลาพอ ๆ กัน ถึงแม้ว่าระยะทางจะแตกต่างกันก็ตาม เนื่องจากแสงเดินทางสั้นที่สุดผ่านแกนกลางของคอร์ จะเคลื่อนที่ได้ช้าที่สุด และทำนองกลับกันแสงที่เดินทางไกลที่สุดซึ่งมีการสะท้อนกลับบริเวณเคลดคิง จะเคลื่อนที่ได้เร็วที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของแสงทำให้แสงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่าง ๆ กัน ปัญหาเกี่ยวกับ Modal Dispersion จึงลดลง



รูปที่ 2.2 Index Profile แสงหักเหที่ละน้อยภายในคอร์ และสะท้อนบริเวณเคลดคิง ของ GI

### 2.2.3 Multi Mode (MM)

เส้นใยแก้วนำแสงชนิดนี้ แสงสามารถเคลื่อนที่ไปในเส้นใยแก้วนำแสงได้หลาย Mode เนื่องจากคอร์ มีขนาดโตกว่า มีใช้ทั้งแบบ Step Index และ Graded Index แต่แบบ Graded Index จะได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากสามารถลดปัญหา Dispersion ลงได้ เส้นใยแก้วนำแสงแบบ Multi Mode จะเหมาะสำหรับการสื่อสารระยะไม่ไกลมากนัก หรือกับระบบที่มี Transmission Speed ต่ำๆ เนื่องจากค่าใช้จ่ายถูกกว่า



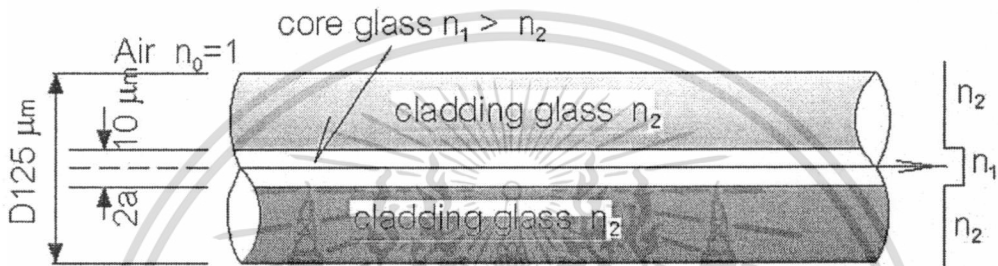
รูปที่ 2.3 แสดง Index ของ Multi Mode Optical Fiber

Dispersion เป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่เราพบได้ในการเดินทางของแสงภายในคอร์ของเส้นใยแก้วนำแสง กล่าวคือรูปของสัญญาณที่ปลายทางเกิดผิดเพี้ยนจากสัญญาณที่ต้นทางโดยจะมีลักษณะกว้างออก Dispersion ที่เกิดกับเส้นใยแก้วนำแสงมีอยู่ 2 ชนิด คือ Modal Dispersion และ Chromatics Dispersion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4 Single Mode (SM)

เส้นใยแก้วนำแสงแบบ โหมดเดียว (Single Mode Optical Fiber Core) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์ ประมาณ  $5-10 \mu\text{m}$  และ Cladding ประมาณ  $125 \mu\text{m}$  ตามลำดับ ส่วนของคอร์และ แคลดดิ้งที่มีดัชนีการหักเห ( $n$ ) ที่ต่างกัน ลักษณะแบบนี้จะอนุญาตให้เฉพาะการแพร่กระจายแบบ Single Mode ผ่านไปได้เท่านั้น เส้นใยแก้วนำแสงแบบนี้จะมีการลดทอนต่ำ มี Dispersion น้อยมาก มีแบนด์วิดท์กว้างจึงไม่เกิดการกว้างขึ้นของพัลส์ (Pulse Broadening) และ ไม่เกิด Transit Time Differences



รูปที่ 2.4 แสดง Index ของ Single Mode Optical Fiber

### 2.3 Cut-off Wavelength

เป็นระดับความยาวคลื่นที่สูงกว่าระดับที่ใยแก้วแบบ Single Mode รองรับ และ ขอมให้แสงกระจายเพียงแต่หนึ่ง Mode เท่านั้น โดยใยแก้วแบบ Single Mode ที่ค่าความยาวคลื่นหนึ่ง อาจจะมีมากกว่าสอง โหมดที่ระดับความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า Cut-off Wavelength

สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงแบบ Single Mode ปัจจัยที่ทำให้เส้นใยแก้วนำแสงมีสภาพเป็น Single Mode ได้ นอกจาก โครงสร้างและคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นอีก เช่น ความยาวคลื่นแสงที่ใช้ ความยาวคลื่นแสงน้อยที่สุดซึ่งยังทำให้เส้นใยแก้วนำแสงคงสภาพเป็น Single Mode [16] เราเรียกความยาวคลื่นแสงนี้ว่า Cut-off Wavelength ( $\lambda_c$ ) หาได้จากสมการ 2.1

$$\lambda_c = \frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2.405} \quad (2.1)$$

หรือ

$$\lambda_c = 3.7 a n_1 \sqrt{\Delta} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $a$  คือ รัศมีของคอร์  
 $n_1$  คือ ดัชนีหักเหของแสงที่คอร์  

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

ทั้งนี้เส้นใยแก้วชนิด Single mode ต้องกำหนดให้  $n_1$  ใกล้เคียงกับ  $n_2$  มากๆ โดยต่างกันไม่เกินร้อยละ 0.3 เช่น  $n_1 = 1.448$ ,  $n_2 = 1.444$  เป็นต้น

## 2.4 ความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalized Frequency)

ความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalized Frequency) หรือ วี-นัมเบอร์ (V-number) เป็นค่าที่สำคัญในการจำแนกชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงในขณะใช้งานว่าเป็นชนิด Single mode หรือ Multi Mode จำนวนโหมดที่มากที่สุดที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสง คำนวณได้จากสมการ 2.3 [5]

$$M = \frac{V^2}{2} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $M$  คือจำนวนโหมดย่อยทั้งหมดของแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสง  
 $V$  คือค่าความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalized Frequency)

สามารถหาค่า V-number ได้จากสมการ 2.4 [5]

$$V = kaNA \quad (2.4)$$

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

เมื่อ

$k$  คือ Wave number ของคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ในอากาศหรือสุญญากาศ ในกรณีที่ตัวกลางไม่มีการสูญเสียสัญญาณ (Lossless medium) ค่าของ  $k$  จะเรียกว่า ค่าคงตัวการเคลื่อนที่ (Propagation constant)

$a$  คือรัศมีของคอร์

$NA$  คือนิวเมอริคอล อะเพอเจอร์ (Numerical Aperture)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่เส้นใยแก้วชนิด Single mode ค่า V-number จะต้องมามีค่า  $V \leq 2.405$  แทนค่าของ  $V$  ลงไปในสมการ

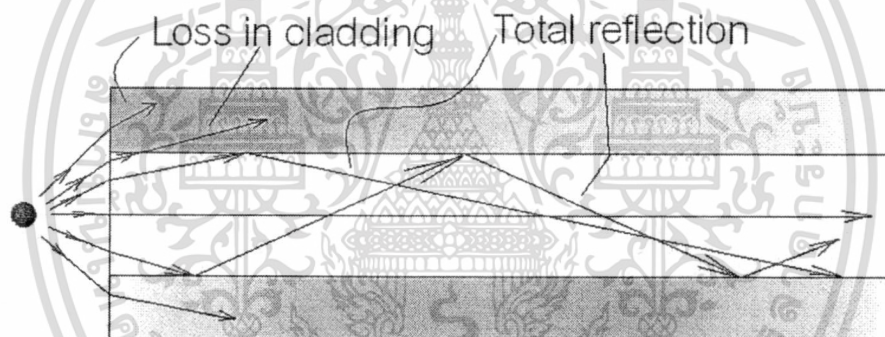
$$\frac{2\pi}{\lambda} aNA \leq 2.405$$

จัดรูปสมการจะได้

$$\lambda \geq \frac{2\pi aNA}{2.405} \quad (2.5)$$

## 2.5 Propagation Mode

Propagation Mode เป็นอีกค่าที่สำคัญในการจำแนกชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงในขณะใช้งานว่าเป็นชนิด Single mode หรือ Multi Mode เหมือนค่า V-number



รูปที่ 2.5 แสดงทิศทางการ Propagation Mode ของเส้นใยแก้วนำแสง

หาจำนวน Propagation Mode ได้จากสมการ

$$M = \frac{\left[ \frac{\pi d}{\lambda} \sqrt{(n_2)^2 - (n_1)^2} \right]^2}{2} \quad (2.6)$$

เมื่อ

$M$  คือ จำนวนโหมดย่อยทั้งหมดของแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสง

$d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของคอร์

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของแสง (m)

$n_1$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงในคอร์

$n_2$  คือ ค่าดัชนีหักเหของแสงในแกลดดิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง

เส้นใยแก้วนำแสงมีการสูญเสียและการขยายกว้างออก (Dispersion) ของสัญญาณส่งผ่านด้วยสาเหตุ ดังนี้

### 2.6.1 Fiber loss

#### 2.6.2 Chromatic dispersion

#### 2.6.3 Polarization-mode dispersion

### 2.6.1 Fiber Loss

#### 2.6.1.1 การลดทอนของสัญญาณเกิดจากเส้นใยแก้วนำแสง

การลดทอนสัญญาณ (Attenuation) การลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด ซึ่งทำให้เส้นใยแก้วนำแสงนิยมนำมาใช้ในระบบการสื่อสารโทรคมนาคม โดยการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงก็จะแสดงอยู่ในหน่วยของเดซิเบลเช่นเดียวกับตัวนำที่เป็นโลหะซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.7)

$$\text{Signal attenuation} = 10 \log \frac{P_i}{P_o} \quad (2.7)$$

แต่เนื่องจากในการสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสงนั้นนิยมบอกค่าการลดทอนสัญญาณในรูปของเดซิเบลต่อหน่วยความยาว เช่น  $dBkm^{-1}$  ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ (2.7) ได้ใหม่ดังนี้

$$\alpha_{dB} L = 10 \log \frac{P_i}{P_o} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\alpha_{dB}$  คือ การลดทอนสัญญาณต่อหน่วยความยาว  
 $L$  คือ ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง

ทั้งนี้การสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber loss) มีสาเหตุสำคัญจาก

#### 2.6.1.1.1 Absorption loss

#### 2.6.1.1.2 Scattering loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1.1.1 Absorption losses

การสูญเสียแสงเนื่องจากการดูดกลืนแสงขององค์ประกอบของการที่ใช้ในการสร้างเส้นใยแก้วนำแสง โดยการสูญเสียนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารที่ใช้สร้าง และกระบวนการในการสร้าง (Fabrication Process) เส้นใยแก้วนำแสง โดยจะทำให้เกิดการกระจายตัวของกำลังงานแสงที่ส่งกลายเป็นความร้อนขึ้นมภายในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งการสูญเสียแสงเนื่องจากการดูดกลืนแสงสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

#### 2.6.1.1.1.1 Intrinsic absorption

การดูดกลืนแสงเนื่องจากสารที่ใช้ทำเส้นใยแสงเนื่องจากแก้ว Silica บริสุทธิ์ที่ใช้ในการสร้างเส้นใยแก้วนำแสงจะมีการดูดกลืนแสง โดยจะดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเลตมากที่สุดที่ความยาวคลื่น  $0.1 \mu\text{m}$  และมีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดมากที่สุดที่ความยาวคลื่น  $10 \mu\text{m}$

#### 2.6.1.1.1.2 Extrinsic absorption

การดูดกลืนแสงเนื่องจากสารที่เจือปนอยู่ในเส้นใยแก้วนำแสง เกิดขึ้นเนื่องจากการเจือปนไอออนของธาตุโลหะในเส้นใยแก้วนำแสงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการหลอมเหลวแก้ว ซึ่งสารที่เจือปนในเส้นใยแก้วนำแสงที่เกิดจากการหลอมเหลวนี้นี้เป็นสาเหตุสำคัญของการลดทอนสัญญาณแสงของไอออนโลหะบางชนิด ในปริมาณ  $1 \text{ ppb}$  (parts per billion) แสดงให้ดูดังตารางที่ 2.1 ซึ่งเราสามารถลดการสูญเสียนี้ได้โดยการใช้วัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์มาก

ตารางที่ 2.1 การลดทอนจากไอออนโลหะที่เจือปนในเส้นใยแก้วนำแสงที่เกิดจากการหลอมเหลว

ไอออนของโลหะ	ความยาวคลื่น (nm) ที่เกิดการสูญเสียสูงสุด	การสูญเสีย ( $\text{dbKm}^{-1}$ )
$\text{Cr} - 3+$	265	1.60
$\text{C} - 2-$	685	0.10
$\text{Cu} - 2+$	850	1.10
$\text{Fe} - 2+$	1100	0.68
$\text{Fe} - 3+$	400	0.15
$\text{Ni} - 2+$	650	0.10
$\text{Mn} - 3+$	460	0.20
$\text{V} - 4+$	725	2.70

### 2.6.1.1.2 Scattering losses

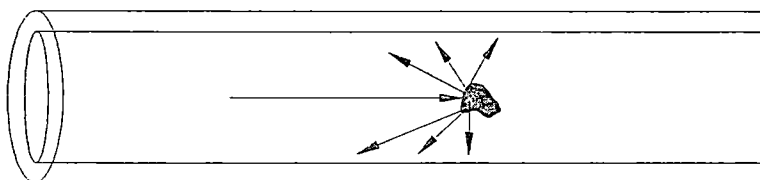
การสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระจายแสง เมื่อเกิดการกระจัดกระจายของแสงจะทำให้แสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสงเกิดการเปลี่ยน Mode ซึ่งจะทำให้แสงที่ส่งและเกิดการเปลี่ยนไปสู่ Mode ที่สามารถแพร่กระจายออกไปภายนอกเส้นใยแก้วนำแสงได้ไม่สามารถเดินทางไปในคอร์ได้ แต่จะแพร่กระจายออกไปภายนอก การสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแสงสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ แบบเรย์เลห์ (Rayleigh scattering) และแบบมี (Mie scattering) ซึ่งทั้ง 2 แบบล้วนมีสาเหตุมาจากคุณลักษณะทางกายภาพที่ไม่สมบูรณ์ของเส้นใยแก้วนำแสงที่เกิดจากกระบวนการผลิตซึ่งยากที่จะกำจัดให้หมดไปได้ในปัจจุบัน

#### 2.6.1.1.2.1 แบบเรย์เลห์

เกิดจากการที่แสงเดินทางไปตกกระทบกับวัตถุที่มีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการส่งสัญญาณทำให้แสงแตกกระจายออกไปในทิศทางต่างๆ ดังภาพประกอบที่ 2.6 โดยวัตถุที่เจือปนอยู่นั้นเกิดขึ้นในขั้นตอน การผลิตเส้นใยแก้วนำแสงคือ ในกระบวนการทำเส้นใยแก้วนำแสงจะต้องให้ความร้อนประมาณ  $2,000^{\circ}C$  แก่แท่งแก้วพรีฟอร์มแล้วดึงแท่งแก้วให้เป็นเส้นใยขนาดเล็ก และลดอุณหภูมิของเส้นใยแก้วนำแสงเหลือ  $20^{\circ}C$  อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นและเกิดเป็นวัตถุขนาดเล็กๆ ขึ้น โดยค่าการสูญเสียเนื่องจากการกระจายแบบเรย์เลห์นี้จะเกิดกับแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตและ อินฟราเรด โดยจะแปรผกผันกับความยาวคลื่นแสงตามสมการ (2.9)

$$\text{Rayleigh Scattering Loss} = \frac{1}{\lambda^4} \quad (2.9)$$

ค่าการสูญเสียแสงที่เกิดจากการกระจัดกระจายแสงแบบเรย์เลห์นี้มีค่าประมาณ  $0.3 \text{ dBkm}^{-1}$  ที่ความยาวคลื่น  $1300 \text{ nm}$  และ  $0.18 \text{ dBkm}^{-1}$  ที่ความยาวคลื่น  $1550 \text{ nm}$



รูปที่ 2.6 การกระจัดกระจายแสงแบบเรย์เลห์

2.6.1.1.2.2 แบบมี หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Ununiformity Loss เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ทางโครงสร้างรูปทรงระบอบของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งมีสาเหตุมาจากความผิดปกติ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดที่จะเผยแพร่หรือใช้เอกสารนี้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของรอยต่อระหว่าง Core กับ Clad ค่าดัชนีการหักเหของ Core - Clad ที่ต่างกันในแต่ละช่วงความยาวของเส้นใยแก้วนำแสง และความผันแปรของเส้นผ่านศูนย์กลางส่งผลให้แสงที่ตกกระทบเกิดการกระจัดกระจายออกการสูญเสียแสงแบบนี้จะแปรผันโดยตรงกับความยาวคลื่นตามสมการ (2.10)

$$\text{Mie scattering loss} = \frac{\lambda}{10} \quad (2.10)$$

## 2.6.1.2 การลดทอนของสัญญาณเกิดจากการนำเส้นใยแก้วนำแสงไปใช้งาน

### 2.6.1.2.1 การสูญเสียจากการโค้งงอ (Bending Loss)

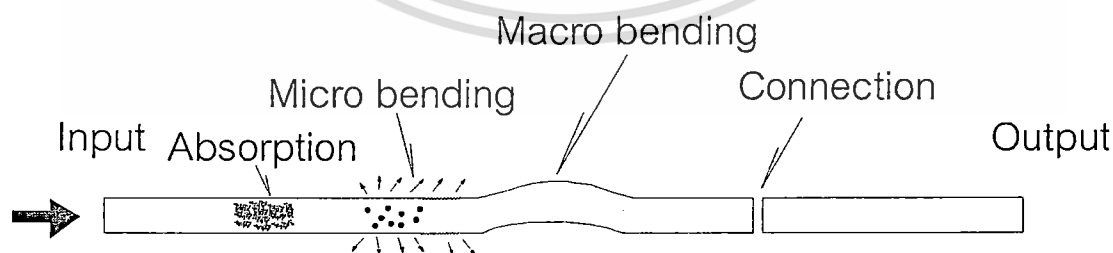
ของเส้นใยแก้วนำแสงแบ่งได้

#### 2.6.1.2.1.1 Microbending

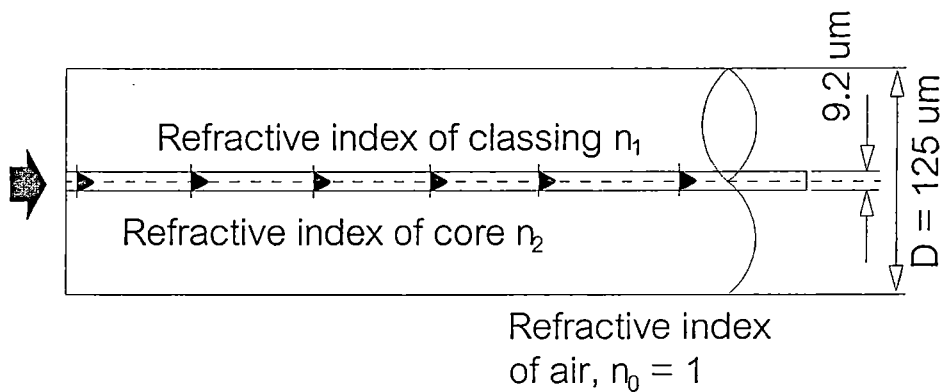
การสูญเสียแสงที่เกิดจากการโค้งงอเส้นใยแก้วนำแสงแบบ Microbending เป็นการสูญเสียสัญญาณแสงที่เกิดจากการมีแรงกดที่ไม่สม่ำเสมอมากระทำต่อด้านข้างของเส้นใยแก้วนำแสง ส่งผลให้แกนของเส้นใยแก้วนำแสงเกิดการบิดงอไปเล็กน้อยรัศมีของส่วนโค้งน้อยกว่า 10 mm ทำให้แสงที่ตกกระทบบริเวณดังกล่าวเกิดการหักเหออกไปภายนอกเส้นใยแก้วนำแสงได้

#### 2.6.1.2.1.2 Macrobending

การสูญเสียเนื่องจากรังสีของแสงตกกระทบตรงรอยต่อระหว่างคอร์ และ แคลดคั้งที่มีค่าน้อยกว่ามุมวิกฤต จึงทำให้แสงกระจายออกไปนอกเส้นใยแก้วนำแสงภาพประกอบที่ 2.8 แสดงทางเดินของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงแนวตรง และภาพประกอบที่ 2.9 แสดงทางเดินของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงโค้งงอ



รูปที่ 2.7 การลดทอนของสัญญาณเกิดจากการนำเส้นใยแก้วนำแสงไปใช้งาน



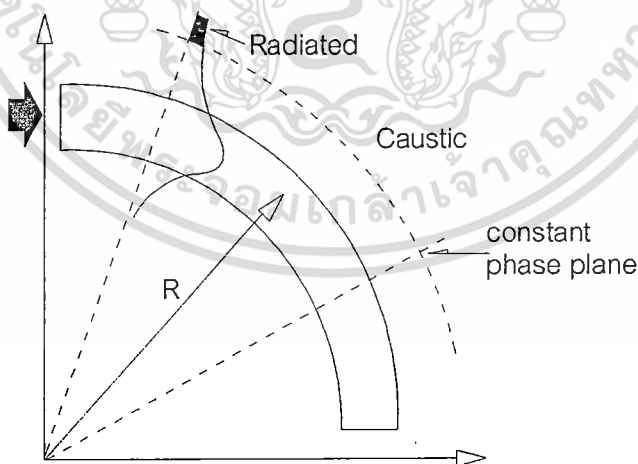
รูปที่ 2.8 แสดงทางเดินของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงแนวตรง

การสูญเสียจาก Macrobending จะแปรผันกับ  $e^{-R/R_c}$

$$R_c = \frac{a}{NA^2} \tag{2.11}$$

เมื่อ

- $R$  คือรัศมีของการโค้งงอ
- $a$  คือรัศมีของแกนใยแก้วนำแสง
- $NA$  คือนิวเมอริกอล อะเพอเจอร์ (Numerical Aperture)



รูปที่ 2.9 แสดงทางเดินของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงโค้งงอ

จาก Index Profile สามารถหาสัญญาณสูญเสียจาก Macrobending ( $p_{loss}$ ) ซึ่งเกิดจากการโค้งงอได้จากสมการ 2.12 [5][18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_{loss} = -10 \text{Log}_{10} \left[ 1 - \left( \frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \right) \left\{ \frac{d}{R} + \left( \frac{3\lambda}{4\pi n_2 R} \right)^{\frac{2}{3}} \right\} \right] \text{ dB} \quad (2.12)$$

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

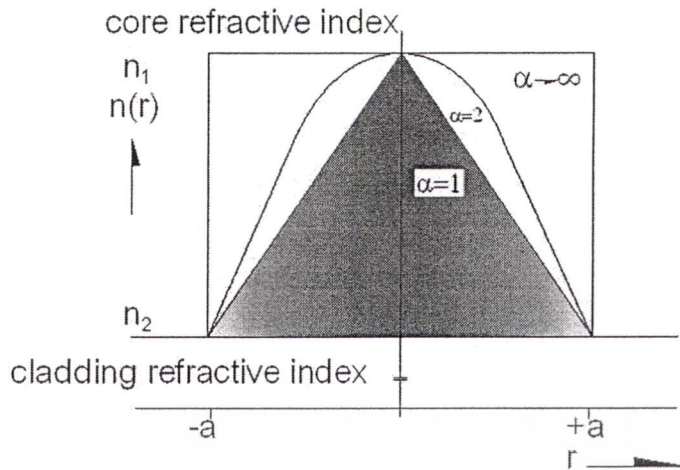
และ  $d = 2a$

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

เมื่อ	$p_{loss}$	คือกำลังงานที่สูญเสียจากการโค้งงอ (dB)
	$n_1$	คือดัชนีหักเหของแสงในคอร์
	$n_2$	คือดัชนีหักเหของแสงในแคลดดิ้ง
	$NA$	คือนิวเมอริคอล อะเพอเจอร์ (Numerical Aperture)
	$\Delta$	คือค่าความแตกต่างของดัชนีหักเห (Refractive index difference) ระหว่างคอร์และแคลดดิ้งของเส้นใยแก้ว
	$d$	คือเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์
	$a$	คือรัศมีของคอร์
	$\lambda$	คือความยาวคลื่น
	$R$	คือรัศมีการโค้งงอของเส้นใยแก้วนำแสง

ตามที่เส้นใยแก้วนำแสงแบ่ง Refractive Index Profile [10] เป็น Step Index และ Graded Index จากสมการ 2.12 สามารถหา Index Profile  $\frac{\alpha + 2}{\alpha}$  จากรูปที่ 2.10

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.10 แสดง Index Profile ของเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละชนิด

จาก Index Profile Step-index Single mode (SI-SM)

แทนค่า  $\alpha$  ในสมการ

จาก Index Profile Graded-index Multimode (GI-MM)

$$\frac{\alpha}{\alpha+2} = 1$$

$$\frac{\alpha+2}{\alpha} = 2$$

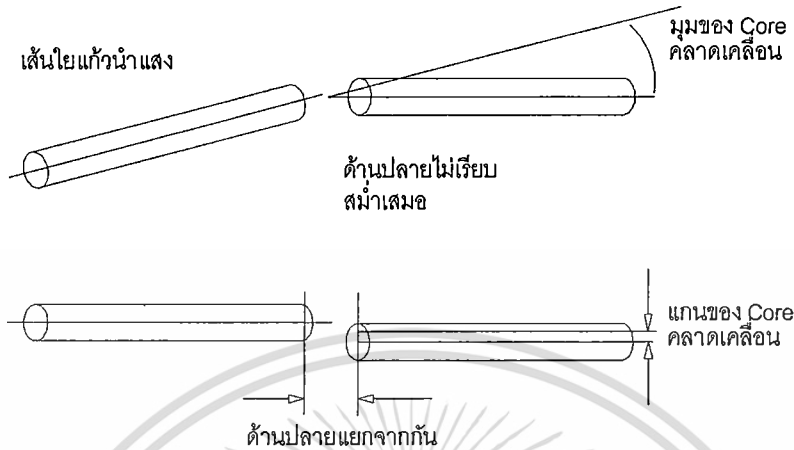
แทนค่า  $\alpha$  ในสมการ  $\frac{2+2}{2} = 2$

2.6.1.2.2 Connection loss

การสูญเสียแสงที่เกิดจากการต่อเส้นใยแก้วนำแสง (Connection loss) จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเชื่อมต่อที่ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้บริเวณรอยต่ออาจเกิดช่องว่างขนาดเล็กซึ่งจะส่งผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดการสูญเสียแสงจากการสะท้อนกลับ ซึ่งเรียกว่า "Fresnel reflection" ทำให้เกิดการสูญเสียที่เรียกว่า "Fresnel Loss" โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.13)



รูปที่ 2.11 การสูญเสียแสงที่เกิดจากการต่อเส้นใยแก้วนำแสง

$$\text{Fresnel loss} = -10 \log(1-r) \quad (2.13)$$

เมื่อ

$$r = \left[ \frac{n_1 - n}{n_1 + n} \right]^2$$

$r$  = ขนาดของ Fresnel reflection

$n_1$  = ดัชนีการหักเหของคอร์

$n$  = ดัชนีการหักเหของตัวกลางที่อยู่ระหว่าง

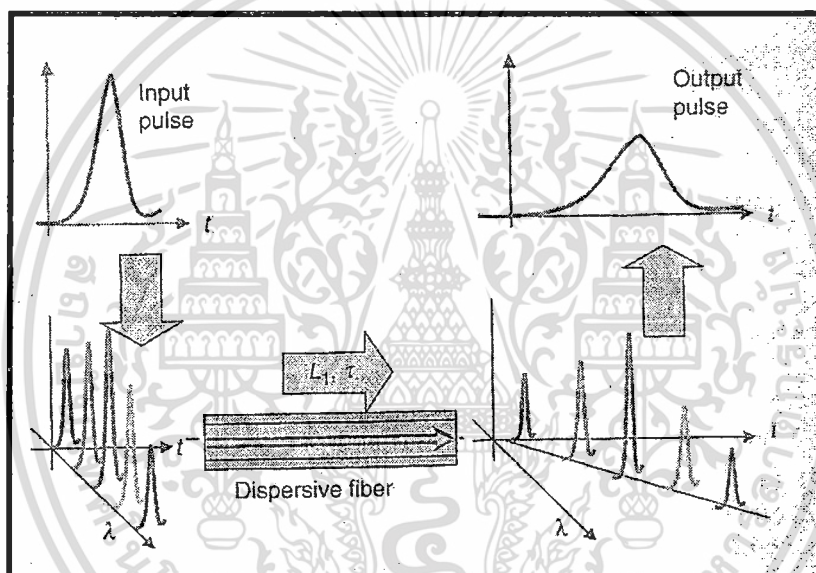
เส้นใยแก้วนำแสงที่ทำการเชื่อมต่อ

## 2.6.2 Chromatic Dispersion

มีสาเหตุมาจากแสงที่มีสี หรือความยาวคลื่นต่างกันเดินทางไปถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ตามภาพประกอบที่ 2.14 Chromatic Dispersion มีผลกระทบต่อ Data Rate เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของคอร์ ขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่นแสง แสงความยาวคลื่นสูงจะมีค่าดัชนีหักเหต่ำ ทำให้แสงความยาวคลื่นสูงเดินทางได้เร็วกว่าแสงความยาวคลื่นสั้น ดังนั้นการส่งสัญญาณหลายคลื่นแสงไปยังเส้นใยแก้วนำแสงจะส่งผลให้สัญญาณของแต่ละคลื่นแสงมีการ Spread ของเวลาที่แตกต่างกัน เป็นผลให้สัญญาณที่ปลายทางมีการ Spread มากกว่าสัญญาณที่ต้นทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น Chromatic Dispersion จึงส่งผลให้สามารถส่งสัญญาณได้ Data Rate ที่ต่ำลง โดยปกติ Chromatic Dispersion ขึ้นกับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ Launch แสงไปยังเส้นใยแก้วนำแสง อาทิเช่น ค่า Spectral line width ของ LED มีค่า 40–100 nm ประกอบไปด้วยหลายความยาวคลื่นแสง ซึ่งความแตกต่างของความยาวคลื่นแสงที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดอยู่ที่ 40–100 nm ส่วนเลเซอร์มีค่า Spectral Line Width เป็น 0.2 สำหรับ Distributed Feedback, DFB, Laser @1300 nm, 4 nm สำหรับ Fabry-Perot Laser @1300 nm และน้อยกว่า 1 nm สำหรับ Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL, @850 nm ดังนั้น LED จึงทำให้เกิด Chromatic dispersion ได้มากกว่าเลเซอร์ หรือกล่าวได้อีกทางหนึ่งว่าสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดเดียวกัน เมื่อใช้ LED จะสามารถส่งสัญญาณได้ที่ Bit Rate ต่ำกว่าเลเซอร์



รูปที่ 2.12 แสดง Chromatic Dispersion แสงที่มีสีหรือความยาวคลื่นต่างกันเดินทางไปถึงปลายทางไม่พร้อมกัน

นอกจากนี้ LED ยังให้ค่า Modal dispersion ที่สูง เนื่องจากคุณสมบัติของแสงและวิธีการส่งลำแสงเข้าไปยังเส้นใยแก้วนำแสง LED มีค่าการบานปลายหรือการกระจายของแสงมาก (High Beam Divergence) การส่งลำแสงเข้าไปยังเส้นใยแก้วนำแสงจะทำโดยให้ลำแสงครอบคลุมทั่วทั้งบริเวณ Core ของ เส้นใยแก้วนำแสงซึ่งเรียกวิธีการส่งลำแสงแบบนี้ว่า Overfilled Launch (OFL) จำนวน Mode ที่ถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงจึงสูง หรืออาจกล่าวได้ว่าแสงสามารถเดินทางได้ในทุกเส้นทางเดินของแสงในเส้นใยแก้วนำแสง

ผลกระทบของ Chromatic Dispersion และ Modal Dispersion ทำให้ LED ไม่สามารถนำมาใช้ส่งสัญญาณในระดับ Gigabit ได้ ในขณะเดียวกันแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์หรือ VCSEL มีค่า Spectral Line Width ที่ต่ำและการกระจายของแสงที่น้อยกว่า แสงเลเซอร์จึงลดข้อ

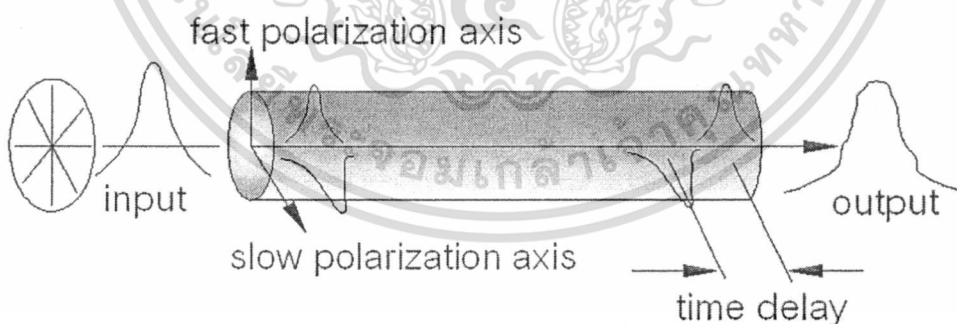
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ของการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลุมเพียงส่วนหนึ่งของคอร์เท่านั้น ดังนั้นจำนวน Mode ที่ถูกส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงจึงมีจำนวนจำกัด เรียกวิธีการส่งลำแสงแบบนี้ว่า Limited Core Launch เลเซอร์ให้ Modal Dispersion ที่น้อยกว่า ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงถูกนำมาใช้ในการส่งสัญญาณที่มากกว่า  $1 \text{ Gb/s}$

Chromatic Dispersion ประกอบด้วย Dispersion สองแบบ ได้แก่ Material Dispersion คือพัลส์ที่แผ่ออกเนื่องจากส่วนประกอบเฉพาะของแก้ว และ Waveguide Dispersion เป็นผลมาจากแสงเคลื่อนที่ในคอร์ และ Inner Cladding ของแก้ว ณ เวลาเดียวกัน ด้วยความเร็วต่างกันเล็กน้อย Dispersion ทั้งสองชนิดสามารถทำให้เท่าๆ กัน เพื่อสร้างให้ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง  $1310 \text{ nm}$  ถึง  $1650 \text{ nm}$  (Operating Window) มี Dispersion เท่ากับศูนย์

### 2.6.3 Polarization-mode dispersion (PMD)

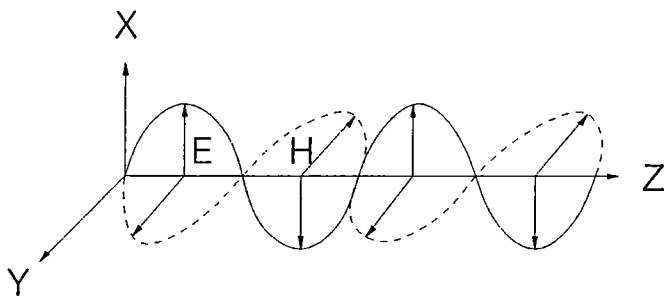
เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเส้นใยแก้วชนิด Single mode (ในเส้นใยแก้วชนิด Multimode เกิดขึ้นได้น้อยจนสามารถละเลยได้) PMD เกิดจากการบานออกของสัญญาณพัลส์ ที่เป็นผลมาจาก การโพลาไรซ์เซชันของแสงที่เดินทางภายในเส้นใยแก้วต่างกัน จึงทำให้เกิดการเลื่อมล้ำกันทางด้านเวลา ที่เรียกว่า Differential Group Delay (DGD) โดยหน่วยของ PMD คือ  $PS/\text{square}(km.)$  สาเหตุของการเกิด PMD อาจมีสาเหตุมาจากการโค้งงอของเส้นใยแก้ว การกดทับเส้นใยแก้ว อุณหภูมิ หรืออาจเป็นผลจากการผลิตเส้นใยแก้วเนื่องจากสารที่เคลือบเส้นใยแก้วเอง จึงทำให้ดัชนีการหักเหของแสงภายในเส้นใยแก้วต่างกัน หรือเรียกว่า ไบรีฟรินเจนต์



รูปที่ 2.13 แสดงการเกิด Polarization-mode dispersion ในเส้นใยแก้วนำแสง

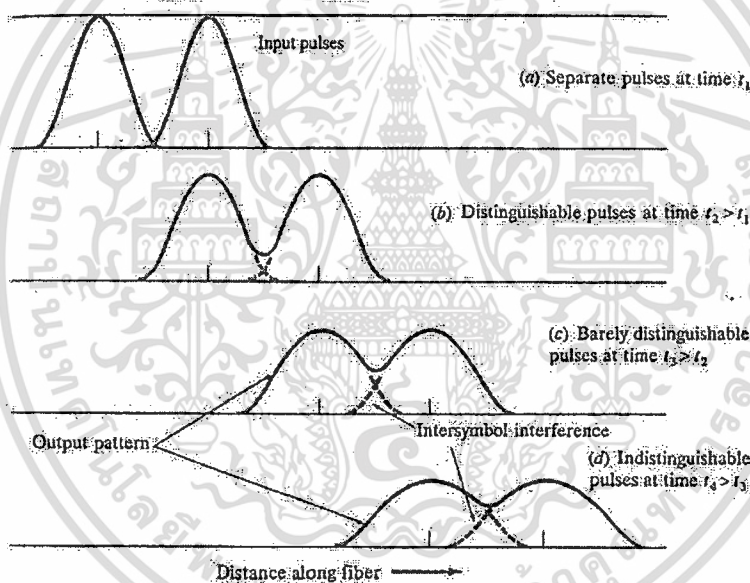
กฎการกระจายของแสงกล่าวว่า "แสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันจะเดินทางด้วยความเร็วที่ต่างกันในตัวกลางเดียวกัน" และแสงจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ชนิดหนึ่ง ดังนั้นคลื่นแสงจะมีการเปลี่ยนแปลงตามขวาง (Transverse Wave) เราสามารถสรุปได้ว่าคลื่นแสงเป็นคลื่น TEM มีลักษณะการเดินทางของแสงตามภาพประกอบที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ลักษณะการเดินทางของคลื่นแสงในเส้นใยแก้วนำแสง

ปรากฏการณ์ *PMD* เป็นสาเหตุให้เกิดจากการบานออกของสัญญาณ Pulses ตัวอย่างตามภาพประกอบที่ 2.17 สัญญาณ Input Pulses ณ เวลา  $t_1$  เปรียบเทียบกับ Output Pulses ณ เวลา  $t_3$  หรือ  $t_4$  สัญญาณ Pulses บานออกเกิด Intersymbol Interference

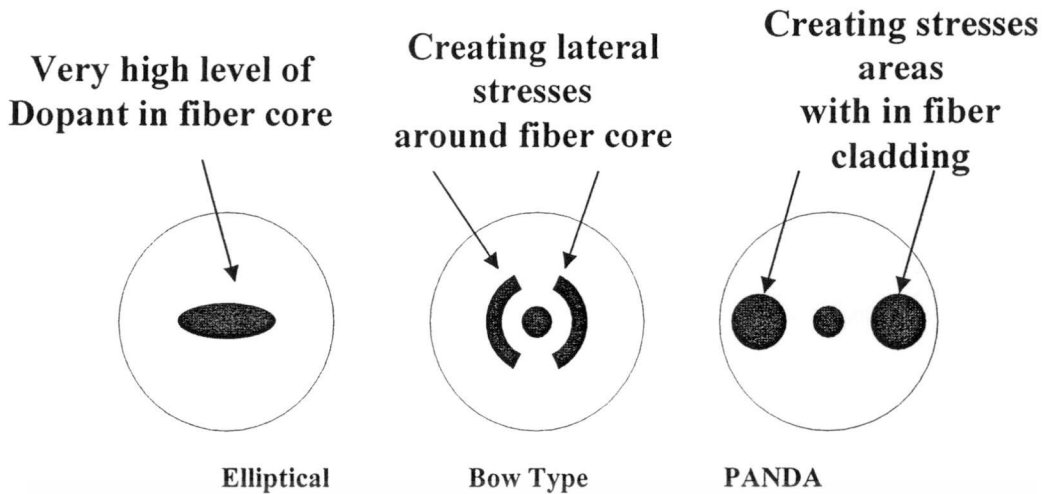


รูปที่ 2.15 Polarization-mode Dispersion ทำให้มีการบานออกของสัญญาณพัลส์

ปัญหา *PMD* สามารถแก้ไขโดยเลือกใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดแกนไม่สมมาตร (Non-Axisymmetrical Optical Fiber) ใช้เฉพาะ Single Mode ในการรักษาทิศทางของ *PMD* แบ่งเป็น

- 1) ชนิด Stress-Induced Birefringence ประกอบด้วยเส้นใยแก้วนำแสงที่มี Cladding เป็นวงรี (Elliptical) เส้นใยแก้วนำแสงชนิดแพนด้า (Panda) และเส้นใยแก้วชนิดหูกระต่าย (Bow-Type) ตามภาพประกอบที่ 2.18
- 2) ชนิด Geometrically Birefringent ประกอบด้วยเส้นใยแก้วนำแสงที่มีช่องว่างอยู่ด้านข้าง (Tunnel) และเส้นใยแก้วนำแสงที่มี Core เป็นรูป “คัมเบล”

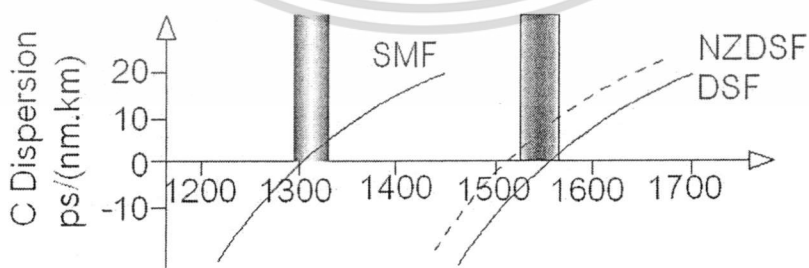
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 เส้นใยแก้วนำแสงที่ผลิตมาเพื่อแก้ปัญหา PMD

## 2.7 Zero-dispersion

ความต้องการส่งข้อมูลหลายช่อง (Multiple Channels) ในเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว ตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยีของเครื่องส่งและเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาของอุปกรณ์ขยายแสง (Optical Amplifier) นับตั้งแต่ปี 1953 เส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้กันโดยทั่วไปจะเป็นเส้นใยแก้วนำแสงแบบ Un-shifted Single Mode ใช้งานที่ความยาวคลื่น 1310 nm ความเร็วในการรับส่งข้อมูลอยู่ในช่วง 100 Mbit/sec แต่มาในวันนี้ระบบมีการอัปเดตที่จะส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงถึง 10 Gbit/sec แต่ยังคงใช้เส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดิมก่อให้เกิดปัญหาคอขวดขึ้นสำหรับผู้บริการรายใหม่ที่ไม่มีเส้นใยแก้วนำแสงเพียงพอในบางเส้นทาง ทำให้มีความพยายามหาหนทางเพิ่ม Capacity ให้มากขึ้นด้วยการเพิ่มเคเบิลเส้นใหม่ แต่ต้นทุนในการดำเนินงานสูงมาก

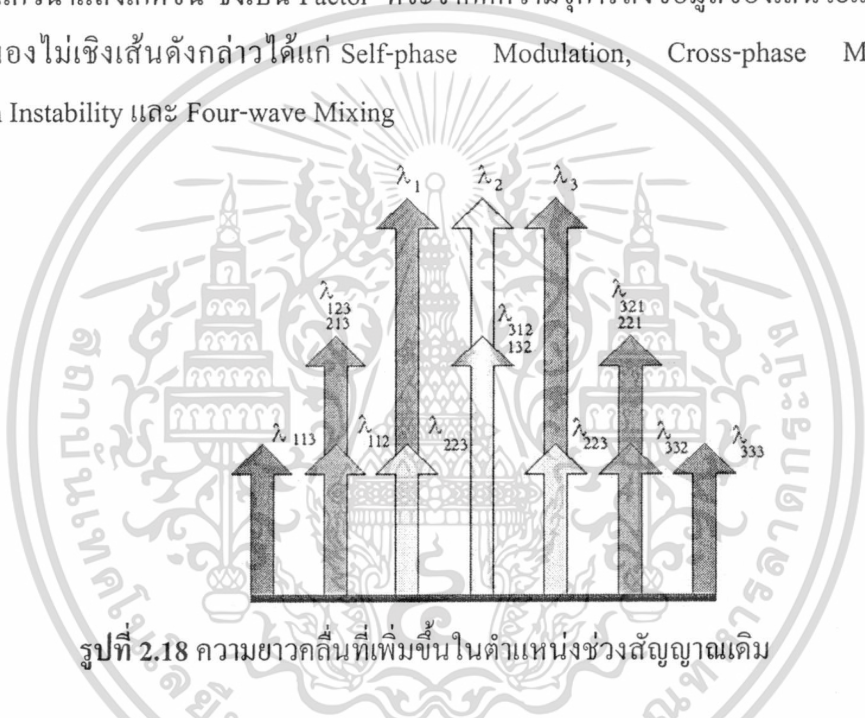


รูปที่ 2.17 Wavelength Window และ Zero-dispersion ที่ 1550 nm

ในช่วงเดียวกันมีการพัฒนาอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงที่เรียกว่า EDFA (Erbium-doped Optical Fiber Amplifier) สามารถเพิ่มความจุในการส่งสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดิม แถบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนเห็นภาพประกอบนี้โปรดอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นของ EDFA จะกว้างขึ้น สามารถส่งหลายความยาวคลื่น( $\lambda$ ) พร้อมกันเป็นการเพิ่มแบนด์วิดท์ให้มากขึ้นอาจเป็น 8 16 32 เท่า หรือมากกว่า เนื่องจาก EDFA นำมาใช้งานในช่วง Wavelength Window 1550 nm จึงเหมาะที่จะใช้กันเส้นใยแก้วนำแสงแบบ DSF (Dispersion Shifted Fiber) ซึ่งมี Zero-dispersion ที่ 1550 nm และให้การลดทอนของสัญญาณต่ำ จากเหตุผลข้างต้นเส้นใยแก้วนำแสง DSF เหมาะที่จะใช้งานกับระยะทางไกลและมีอัตราเร็วของการส่งข้อมูลสูง

อย่างไรก็ตามกำลัง Out put ที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ Optical Amplifier รวมทั้งการส่งสัญญาณหลายความยาวคลื่นพร้อมกัน ทำให้เกิดการตอบสนองไม่เชิงเส้น (Non-linear Response) ของเส้นใยแก้วนำแสงเกิดขึ้น ซึ่งเป็น Factor ที่จะจำกัดความจุการส่งข้อมูลของเส้นใยแก้วนำแสง ผลตอบสนองไม่เชิงเส้นดังกล่าวได้แก่ Self-phase Modulation, Cross-phase Modulation, Modulation Instability และ Four-wave Mixing



รูปที่ 2.18 ความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นในตำแหน่งช่วงสัญญาณเดิม

Factor หนึ่งที่สำคัญของผลไม่เชิงเส้นคือ Four-wave Mixing เมื่อหลายสัญญาณมีการแพร่เดินทางไปด้วยกัน ก็จะเกิดการ Mix กัน ทำให้เกิดช่องสัญญาณใหม่เพิ่มขึ้นมา ซึ่งอาจจะไปซ้อนทับหรือดึงเอากำลังงานเดิมตามภาพประกอบที่ 2.20 แสดงขบวนการของ Four-wave Mixing จากการส่ง 3 ช่องสัญญาณที่ห่างเท่าๆ กัน ( $L_1, L_2$  และ  $L_3$ ) สัญญาณย่อยจากการ Mixing นี้จะเกิดขึ้นที่  $L_{XYZ} = L_X + L_Y - L_Z$  เนื่องจากความยาวคลื่นของสัญญาณเดิมมีระยะห่างเท่าๆ กัน ทำให้บางสัญญาณที่เกิดขึ้นใหม่อยู่ตำแหน่งช่องสัญญาณเดิมด้วย

จำนวนองค์ประกอบของสัญญาณย่อยทั้งหมด ( $m$ ) ที่เกิดขึ้นใหม่จากการ Mixing นี้สามารถคำนวณโดยสมการ 2.13

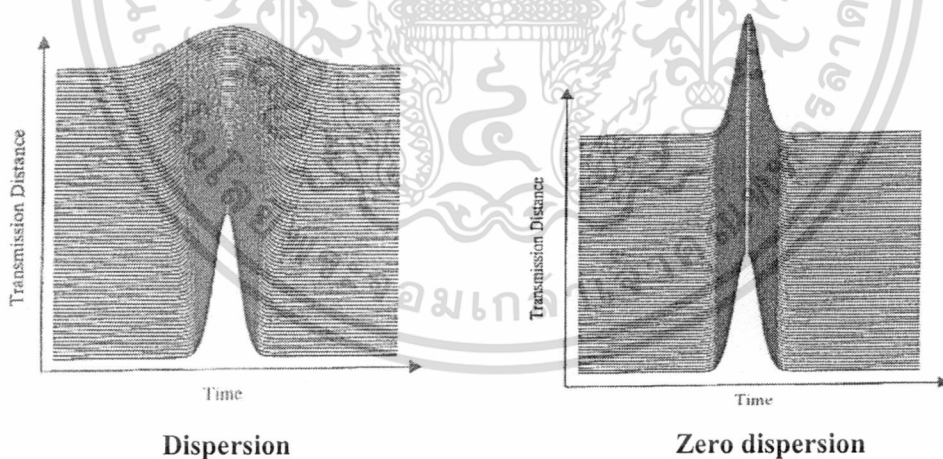
$$m = \frac{1}{2}(N^3 - N^2) \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $N =$  จำนวนช่องสัญญาณเดิม

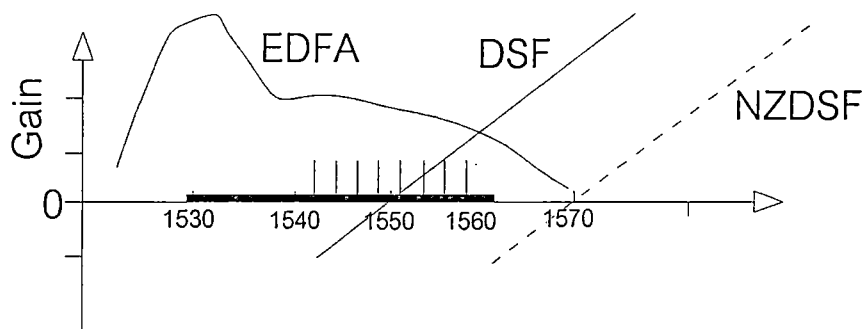
ถ้าเป็นระบบแบบ 3 ช่องสัญญาณ ก็จะมีสัญญาณย่อยเกิดขึ้น 9 สัญญาณ(ภาพประกอบที่ 2.20) ถ้าเป็นระบบแบบ 8 ช่องสัญญาณ จำนวนสัญญาณย่อยก็จะเพิ่มขึ้นเป็น 224 ช่องสัญญาณ วิธีหนึ่งของการลดผลของ Four-wave Mixing ให้เหลือน้อยที่สุด ก็คือการจัดระยะช่องสัญญาณให้ห่างไม่เท่ากัน ซึ่งง่ายสำหรับระบบแบบ 3 ช่องสัญญาณ แต่จะยุ่งยากซับซ้อนสำหรับระบบแบบ 32 ช่องสัญญาณที่มีสัญญาณย่อยเกิดขึ้นมากถึง 15,872 สัญญาณ

กระบวนการ Four-wave Mixing จะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น Zero-dispersion ซึ่งขัดแย้งโดยตรงกับความต้องการที่จะให้ Dispersion ของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าน้อยที่สุด เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลได้มากๆ ระยะทางไกลๆ เนื่องจากเส้นใยแก้วนำแสง Dispersion-shifted ตามมาตรฐานจะมีความยาวคลื่น Zero-dispersion อยู่ภายในแถบความยาวคลื่นที่ใช้งานของ EDFA ดังนั้นความต้องการที่ขัดแย้งกันเหล่านี้จะจำกัดความสามารถของเส้นใยแก้วนำแสง DSF ที่จะใช้ในเครือข่ายข้อมูลความเร็วสูงภายใต้เทคโนโลยี WDM (Wavelength Division Multiplexing) ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการพัฒนาเส้นใยแก้วนำแสงแบบใหม่ขึ้นมาเรียกว่า NZ-DSF (Non-zero Dispersion Shifted Fiber)



รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบ Pulse Dispersion กับ Zero Dispersion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 เปรียบเทียบ แถบขยายความยาวคลื่น *EDFA* กับ *DSF* และ *NZ-DSF*

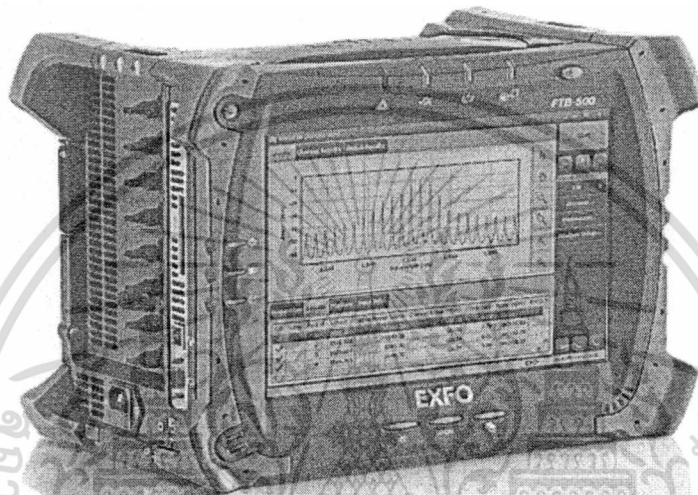
แนวความคิดของ *NZ-DSF* นั้นจะง่าย คือความยาวคลื่นของ Zero-dispersion ของ *DSF* จะถูกเคลื่อนย้ายออกไปสู่ภายนอกแถบความยาวคลื่นใช้งานของ *EDFA* เป็นการทำให้มี Dispersion ส่วนหนึ่งที่สามารถควบคุมได้เกิดขึ้นในระบบตามภาพประกอบที่ 2.22 ซึ่งเปรียบเทียบ เส้นโค้ง Dispersion ของเส้นใยแก้วนำแสง *NZ-DSF* และ *DSF* ค่า Dispersion ที่เกิดขึ้นของเส้นใยแก้วนำแสง *NZ-DSF* จะต่ำเพียงพอที่จะใช้งานระยะทางไกลๆ ได้ แต่จะยังไม่ต่ำจนกระทั่งผลของ Four-wave Mixing มีมากเกินไป ได้มีการทดลองสาธิตการใช้งานเส้นใยแก้วนำแสง Four-wave Mixing สามารถส่งข้อมูลความเร็ว  $10 \text{ Gbit/sec}$  จำนวน 8 ช่องสัญญาณพร้อมกันระยะทาง  $360 \text{ Km.}$  ได้โดยไม่ต้องมีการชดเชยใดๆ

การรวมส่งช่องสัญญาณจำนวนหลายช่องเข้าไปพร้อมกันทางเส้นใยแก้วนำแสง *NZ-DSF* ที่มีค่า Loss ต่ำและ Dispersion ที่ต่ำด้วย จะให้ประโยชน์ที่จะประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่าการใช้เส้นใยแก้วนำแสง Single Mode ตามมาตรฐานเพราะว่าระยะห่างระหว่าง Regenerator /Amplifier สามารถไกลขึ้น และไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มอุปกรณ์เพื่อชดเชย Dispersion ในระบบ ประมาณการกันไว้ว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายการติดตั้งเคเบิลเส้นใยแก้วนำแสงได้มากถึงร้อยละ 30 - 50

## บทที่ 3

### Optical Time Domain Reflectometer

Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบเส้นใยแก้ว เพราะสามารถวัดค่ารายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวกับเส้นใยแก้วได้ [6], [7]



รูปที่ 3.1 ลักษณะของ OTDR

#### 3.1 คุณสมบัติของ OTDR

OTDR สามารถวัดค่าสิ่งต่างๆของเส้นใยแก้ว ได้ดังต่อไปนี้

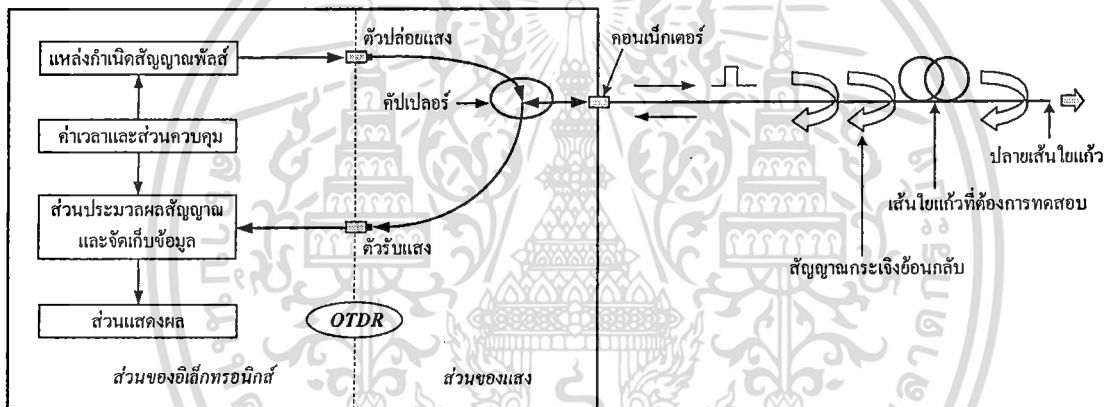
- แสดงตำแหน่งหรือจุดบกพร่องของเส้นใยแก้ว
- วัดค่าการลดทอนสัญญาณของแสงในเส้นใยแก้ว (แต่ละเส้นในระบบพร้อมกัน)
- วัดความยาวของเส้นใยแก้วทั้งหมดที่ใช้งาน
- วัดหาความยาวของเส้นใยแก้วแต่ละเส้นที่นำมาต่อในระบบ
- แสดงจำนวนของเส้นใยแก้วที่ใช้ในการเชื่อมโยงระหว่างสถานี
- วัดค่าการสูญเสียสัญญาณของจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วในลักษณะต่างๆ

นอกจากนี้ เครื่อง OTDR จะสามารถวิเคราะห์รูปแบบสัญญาณของจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วเพื่อคาดคะเนได้ว่า จุดเชื่อมต่อที่นั้นเกิดจากการสปไลซ์ (Splice) หรือใช้คอนเน็กเตอร์ (Connector) รวมทั้งอาจจะรู้ว่าตำแหน่งที่เกิดความบกพร่องของเส้นใยแก้วเกิดจากอะไร เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 หลักการทำงานของ OTDR

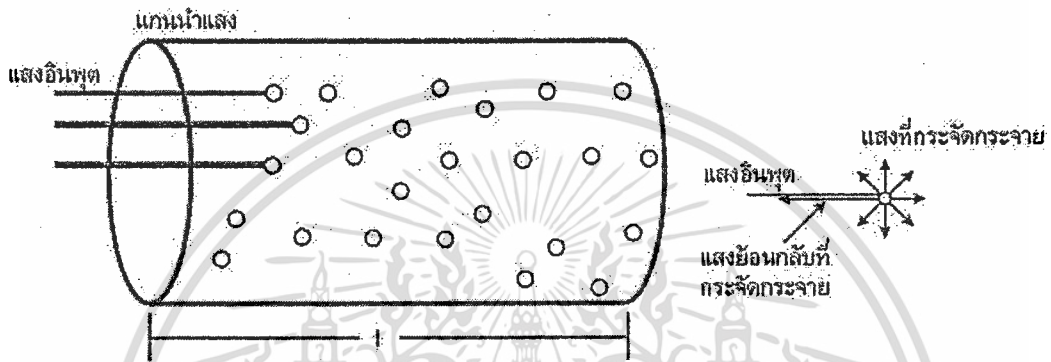
OTDR ทำงานโดยอาศัยหลักการวัดสัญญาณกระเจิงย้อนกลับ (Back Scattering) ที่เกิดขึ้นขณะป้อนสัญญาณแสงเข้าไปในเส้นใยแก้ว รูปที่ 3.2 แสดงหลักการทำงานพื้นฐานของ OTDR ภายในตัวเครื่องจะมีแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่เปล่งออกมาด้วยความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว (เช่น 1,310 นาโนเมตร หรือ 1,550 นาโนเมตร) ในลักษณะพัลส์ที่ห่างกันด้วยคาบเวลาที่แน่นอน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



รูปที่ 3.2 หลักการทำงานของ OTDR

สัญญาณแสงที่เดินทางเข้าสู่ระบบเส้นใยแก้ว จะเดินทางเข้าไปตามแนวของเส้นใยแก้วด้วยความเร็ว  $v = c/n_1$  เมื่อ  $c$  คือความเร็วแสงในอากาศ ( $c = 3 \times 10^8$  m/s) และ  $n_1$  คือค่าดัชนีหักเหแสงของคอร์ ในขณะที่แสงเดินทางอยู่ภายในคอร์ของเส้นใยแก้วจะเกิดการกระเจิง (Scattering) ทุกครั้งที่แสงกระทบกับโมเลกุลของเนื้อสาร การกระเจิงหรือการกระจายของแสงนี้จะเกิดขึ้นทุกทิศทุกทางโดยรอบโมเลกุลของเนื้อสาร ดังรูปที่ 3.3 ทิศทางของแสงที่เกิดจากการกระเจิงหรือการกระจายแบบ Rayleigh นี้มีโอกาสเกิดได้ในทุกทิศทาง แต่จะมีแสงบางส่วนที่กระจัดกระจายย้อนกลับไปยัง OTDR แสงที่สะท้อนกลับไปในลักษณะดังกล่าวเรียกว่า Back scattering light โดยจะมีขนาดของกำลังแสงลดลงเป็นฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล เมื่อเทียบกับระยะทางที่สัญญาณแสงใช้ในการเดินทางไปและกลับ โดยทั่วไปขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับเทียบกับขนาดของสัญญาณที่ OTDR ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วจะอยู่ในช่วง 45-60 เดซิเบล เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณแสงที่เกิดจากการกระเจิงย้อนกลับนี้ เดินทางย้อนกลับมายัง OTDR ผ่านคัปเปิลอร์ สัญญาณจะถูกกำหนดให้เดินทางเข้าสู่ส่วนประมวลผลสัญญาณและจัดเก็บข้อมูล เพื่อวัดหาค่าความเข้มแสงที่เดินทางกลับมา อย่างไรก็ตามแสงที่เกิดจากการกระเจิงย้อนกลับจะมีค่าความเข้มแสงน้อยมาก ทำให้โฟโต ดีเทคเตอร์ (Photo Detector) ของส่วนประมวลผลสัญญาณและจัดเก็บข้อมูล จะต้องมีความไวในการรับสัญญาณแสง (Optical Sensitivity) สูงๆ (หรือสามารถรับสัญญาณความเข้มของแสงน้อย ๆ ได้ดี)

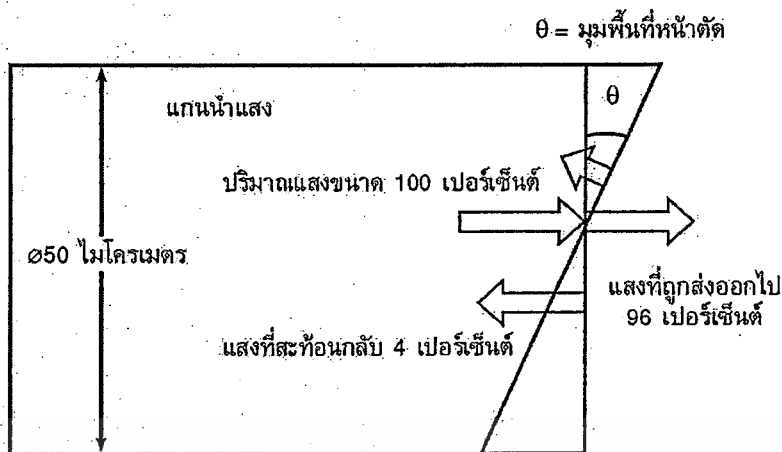


รูปที่ 3.3 ลักษณะของ Scattering objects ภายในเส้นใยแก้ว

Rayleigh scattering เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณแสงภายในเส้นใยแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความยาวคลื่นในช่วง 850 นาโนเมตร สาเหตุของ Rayleigh scattering นั้นเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของค่าดัชนีหักเหของแสงในตัวกลาง (Refractive index fluctuation) ขณะที่เส้นใยแก้วเย็นตัวลง การลดทอนที่เกิดขึ้นจากสาเหตุดังกล่าวยังไม่สามารถกำจัดออกไปได้ด้วยเทคนิคการผลิตเส้นใยแก้วในปัจจุบัน ทิศทางการกระจัดกระจายของแสงที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปได้ทุกทิศทาง จากการศึกษาค้นคว้า การลดทอนของแสงเนื่องจาก Rayleigh scattering จะแปรผกผันกับกำลังสี่ของความยาวคลื่นแสง ( $\alpha/\lambda^4$ ) 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

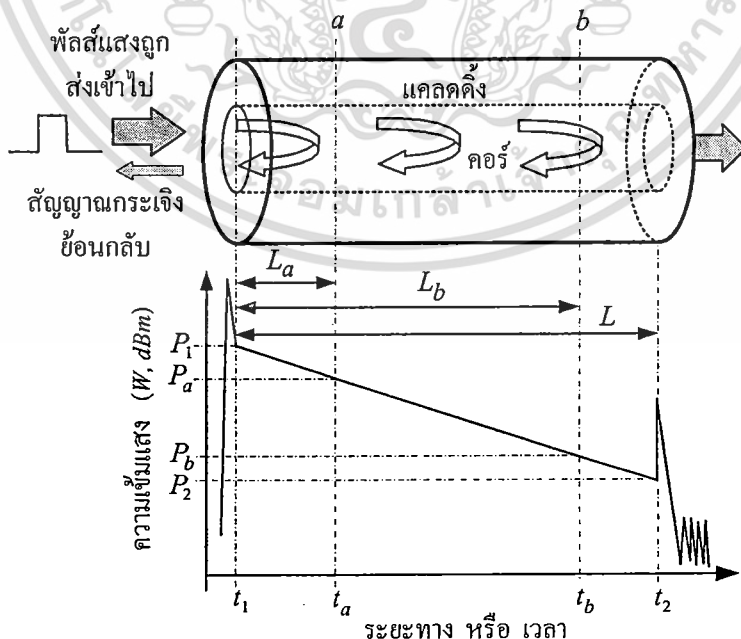
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การสะท้อนกลับของแสงบริเวณรอยต่อของตัวกลางที่เป็นแก้วกับอากาศ

### 3.3 ลักษณะของสัญญาณสะท้อนกลับในเส้นใยแก้ว

เมื่อสัญญาณพัลส์ของแสงเดินทางเข้าไปในเส้นใยแก้ว แต่ละตำแหน่งที่แสงเดินทางผ่าน จะเกิดสัญญาณแสงส่วนน้อยเดินทางย้อนกลับมายัง OTDR ในขณะที่แสงส่วนใหญ่ยังคงเดินทางต่อไปข้างหน้า สัญญาณแสงย้อนกลับที่รับได้จะเสมือนเป็นสัญญาณต่อเนื่อง แม้จะเกิดจากแสงที่เป็นพัลส์ก็ตาม โดยแสงที่สะท้อนกลับมาก่อนจะมีความเข้มแสงมากกว่าแสงที่สะท้อนกลับมาจากจุดที่อยู่ห่างออกไป เนื่องจากแสงใช้ระยะทางในการเดินทางสั้นกว่า



รูปที่ 3.5 การกระเจิงย้อนกลับของแสงในเส้นใยแก้ว [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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  $t = t_2 - t_1$

จากกราฟในรูปที่ 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)

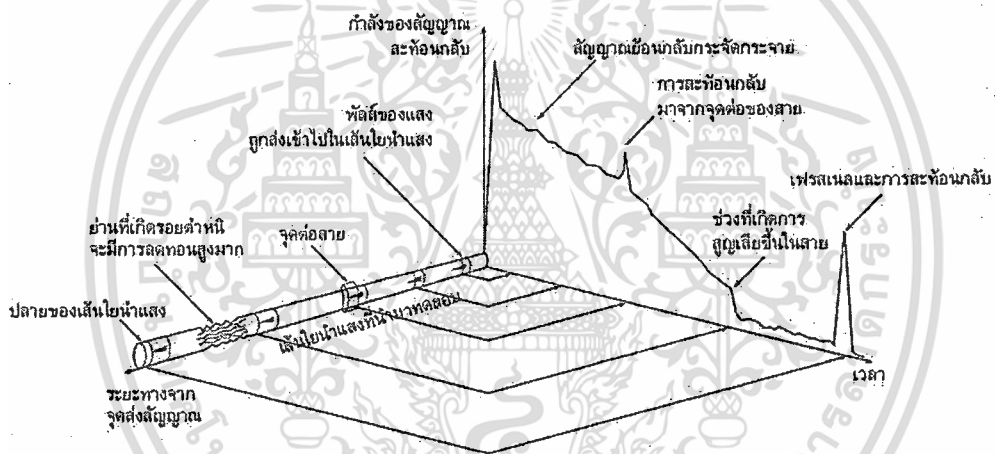
$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_2}{P_1} \text{ dB/km} \quad (3.2)$$

เมื่อเป็นเอกรูปที่แสดงคือความยาวของเส้นใยแก้วทั้งเส้นหรือในช่วงเวลา  $t_1$  ถึง  $t_2$  ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ในลักษณะการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าการสูญเสียสัญญาณกับระยะทางของเส้นใยแก้ว ซึ่งสามารถบอกถึงลักษณะทางกายภาพของเส้นใยแก้วได้เป็นอย่างดี ในการตรวจวัดเส้นใยแก้วแต่ละเส้นทางจะได้ลักษณะของสัญญาณสะท้อนกลับที่แตกต่างกันไป สัญญาณดังกล่าวจึงเรียกว่า Fiber Signature



รูปที่ 3.6 กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อแบบต่างๆ ของเส้นใยแก้ว [5]

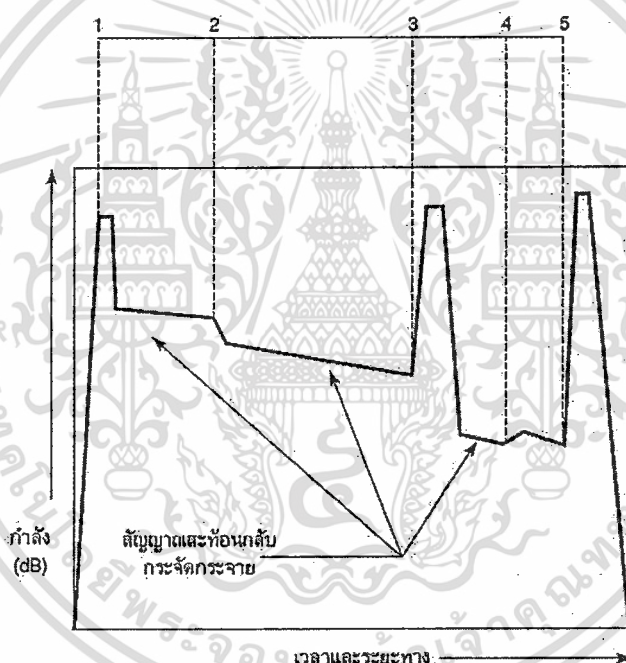
จากกราฟจะพบว่าความชันของเส้นกราฟที่วัดได้ จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้ว กล่าวคือ หากเส้นกราฟมีความชันมากแสดงว่าเส้นใยแก้วมีค่าการลดทอนสัญญาณมาก หรือถ้าเส้นใยแก้วมีค่าการลดทอนสัญญาณต่ำ ก็จะได้กราฟที่มีความชันน้อย เป็นต้น

สำหรับบริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของสัญญาณนั้น มีการสะท้อนของแสงเช่นกัน แต่กลไกของการสะท้อนเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตัวกลางของสัญญาณ หรืออาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง 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



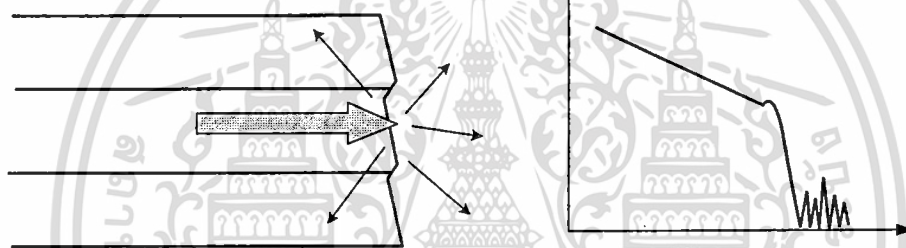
รูปที่ 3.7 ลักษณะกราฟทางกายภาพของเส้นใยแก้วที่ต่างกัน

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

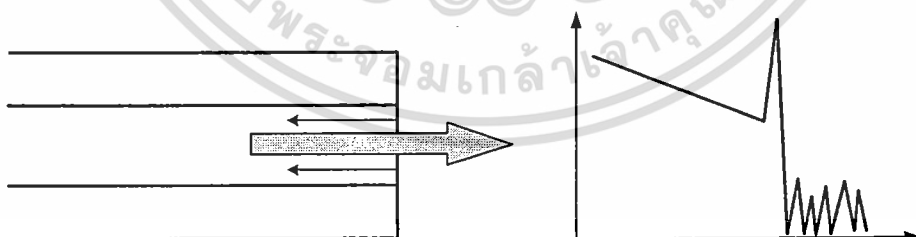
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 สัญญาณที่จุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้ว



(ก) กราฟสัญญาณแบบกระเจิง เพราะจุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้วผิวไม่เรียบ



(ข) กราฟสัญญาณแบบสะท้อน เพราะจุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้วผิวเรียบตั้งฉาก

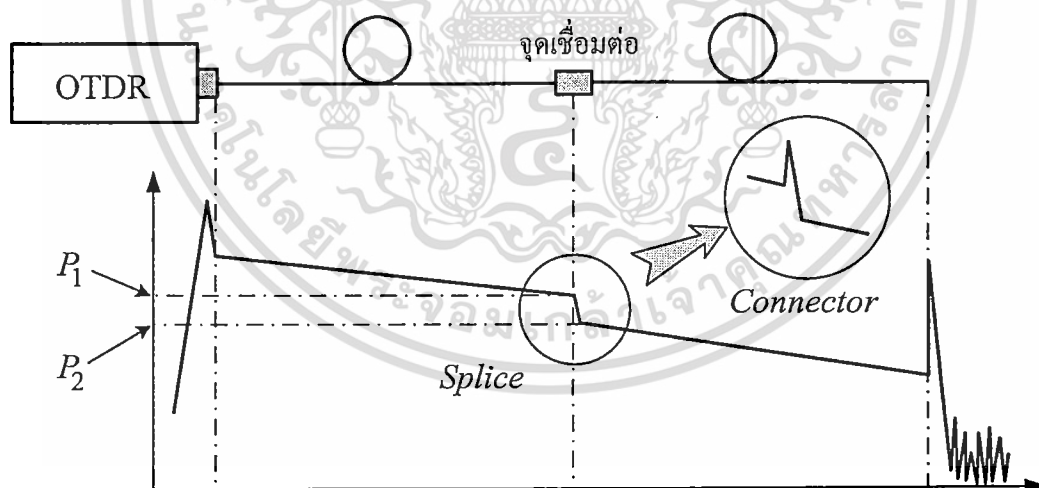
รูปที่ 3.8 กราฟสัญญาณที่จุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้ว [5]

สัญญาณที่แสดงจุดสิ้นสุดของเส้นใยแก้วจาก OTDR อาจมีลักษณะที่แตกต่างกัน 2 แบบดังรูปที่ 3.8 หากปลายของเส้นใยแก้วไม่ราบเรียบ เช่น อาจเกิดจากการแตกหัก จะทำให้แสงที่ส่งออกไปกระเจาย อกสู่ทุกทิศทาง ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกทุกทิศทุกทาง และจะมีแสงสะท้อนกลับมามากน้อยหรือไม่มีเลย สัญญาณที่ได้จึงมีลักษณะดังรูป (ก) กราฟสัญญาณที่ระยะต่อจากปลายเส้นใยแก้ว ไม่ว่าจะเป็กรณีใด จะมีสัญญาณเป็นลักษณะของสัญญาณรบกวน มักมีค่าขึ้นอยู่กับระดับพื้นสัญญาณรบกวน (Noise Floor) ทางไฟฟ้าของเครื่อง OTDR นั้น ในทางตรงกันข้าม หากปลายเส้นใยแก้วเป็นระนาบเรียบจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของแสงได้ง่าย สัญญาณที่วัดได้จะมีลักษณะเป็นยอดแหลมดังรูป (ข) โดยขนาดของยอดสัญญาณจะขึ้นอยู่กับความเรียบของปลายเส้นใยแก้วกับมุมระนาบตอนปลายว่าตั้งฉากกับแนวแกนของเส้นใยแก้วเพียงไร

### 3.5 การวัดจุดเชื่อมต่อของเส้นใยแก้ว

รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างสัญญาณความเข้มแสงที่วัดได้จาก OTDR เมื่อเส้นใยแก้วสองเส้นต่อเชื่อมกัน ตรงตำแหน่งที่มีการเชื่อมต่อ ย่อมต้องเกิดการสูญเสียสัญญาณ ซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจนจากกราฟ ค่าการสูญเสียสัญญาณตรงจุดเชื่อมต่อนี้เรียกว่า Insertion Loss สามารถคำนวณได้ในทำนองเดียวกันกับสมการ (3.2) และ (3.3) ดังนั้นหากค่าความชันของกราฟสัญญาณมีค่าความชันของกราฟไม่เท่ากัน จะทำให้เราทราบได้ทันทีว่า เส้นใยแก้วที่ต่อเชื่อมกันนี้เป็นเส้นใยแก้วคนละเส้นกัน มีการต่อเชื่อมเข้าหากันโดยวิธี Splice หรือเชื่อมต่อโดยใช้ Connector ดังรูป



รูปที่ 3.9 กราฟสัญญาณที่เกิดจากเส้นใยแก้ว 2 เส้น เชื่อมต่อกัน [5]

ข้อสังเกตสำคัญในการตีความหมายจากรูปกราฟสัญญาณ โดยทั่วไปตรงรอยต่อนี้มี 2 ลักษณะคือ

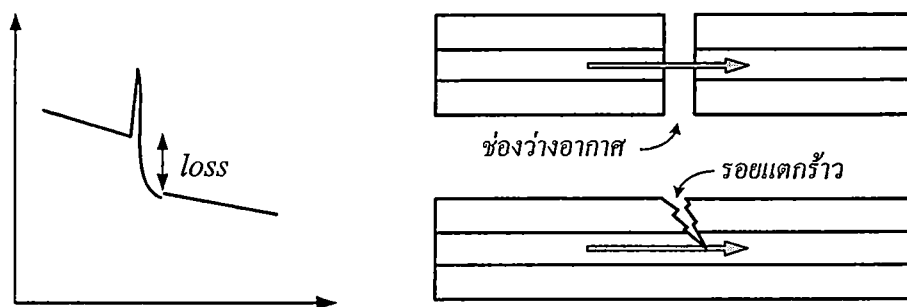
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. หากจุดเชื่อมต่อเกิดจากการสไปลซ์ (Splice) ซึ่งเป็นการทำให้เส้นใยแก้ว 2 เส้นมีเนื้อเดียวกัน จะสังเกตกราฟค่าการสูญเสียสัญญาณได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 3.9

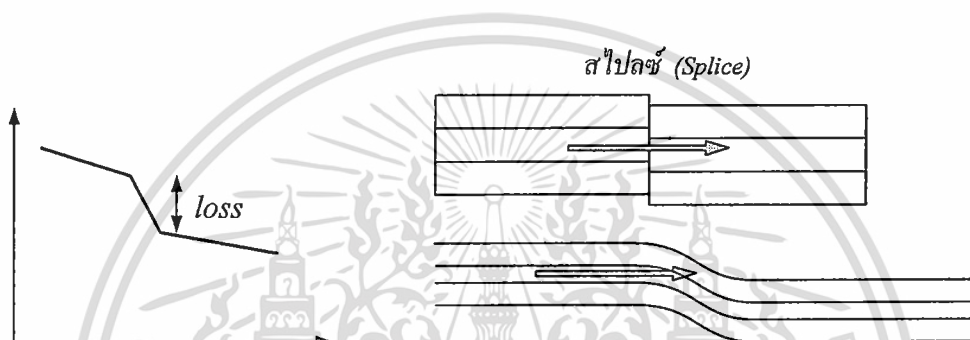
2. หากจุดเชื่อมต่อเกิดจากการใช้คอนเน็กเตอร์ (Connector) ซึ่งจะทำให้เกิดช่องว่างอากาศเล็กๆ ระหว่างปลายเส้นใยแก้วทั้งสองที่ต่อเชื่อมกัน ส่งผลทำให้เกิดแสงสะท้อนที่ปลายเส้นใยแก้วกลับมาและรวมกับสัญญาณกระเจิงย้อนกลับเดิม ทำให้มีค่าความเข้มแสงที่จุดนี้เพิ่มขึ้น กราฟสัญญาณที่ได้จึงมีลักษณะเป็นยอดแหลมขึ้น ดังรูปที่แสดงในกรอบวงกลม การคำนวณหาค่าการสูญเสียสัญญาณของจุดต่อนี้ ยังคงใช้สมการเดิมโดยไม่ต้องสนใจยอดแหลมนี้ก็ได้ อย่างไรก็ตาม ขนาดของยอดสัญญาณที่เกิดขึ้น สามารถบ่งบอกค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ของรอยต่อ ซึ่งถือเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ควรควบคุมให้มีค่ามากที่สุด เพราะหากค่าการสูญเสียย้อนกลับมีค่าน้อย จะทำให้ยอดสัญญาณมีค่าสูง นั่นคือ พลังงานแสงสะท้อนกลับจะมีค่ามาก และอาจทำความเสียหายให้กับแหล่งกำเนิดแสงได้

รูปสัญญาณที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อเส้นใยแก้วแบบต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ แสดงดังรูปที่ 3.10 ในรูป (ก) และรูป (ข) เป็นลักษณะที่พบเห็นได้ทั่วไป ซึ่งลักษณะของกราฟในรูป (ก) นอกจากจะบอกลถึงการใช้คอนเน็กเตอร์ในการเชื่อมต่อแล้ว ยังอาจเกิดจากการแตกร้าวของเส้นใยแก้วได้อีกด้วย ซึ่งในการตีความหมายในทางปฏิบัติต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญพอสมควร สำหรับกราฟในรูป (ค) เป็นลักษณะที่ไม่ค่อยพบเห็นได้บ่อยนัก คือมีลักษณะเหมือนมีการขยายสัญญาณแสงขึ้น จึงมักเรียกรูปแบบนี้ว่า อัตราขยาย (Gain) ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว มิได้เกิดการขยายสัญญาณแสง ณ ตำแหน่งนี้เลย โดยสัญญาณยังคงเกิดการสูญเสียเช่นเดิม แต่สาเหตุที่ทำให้ได้รูปกราฟแบบนี้มักเกิดจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วที่ไม่สมบูรณ์ หรืออาจเกิดจากการใช้เส้นใยแก้วต่างชนิดกัน เช่น เส้นใยแก้วที่ส่งแสง (ด้านซ้ายของรูป) มีขนาดของคอร์ใหญ่กว่าเส้นใยแก้วด้านรับ (ด้านขวาของรูป) ทำให้สัญญาณแสงบางส่วนเกิดการสะท้อนในช่วงของคอร์ด้านส่งต่อเข้ากับส่วนแคลดดิ้งของเส้นใยแก้วด้านรับ เกิดจากความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหของแสงนั่นเอง

ในทางปฏิบัติการใช้ OTDR วัดกราฟสัญญาณแสงกระเจิงย้อนกลับ เพื่อนำมาวิเคราะห์ ควรทำการวัดจากจุดปลายของเส้นใยแก้วทั้งสองด้านสลับกัน แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย ซึ่งวิธีการเช่นนี้ไม่เพียงแต่จะทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องแล้ว รูปสัญญาณที่เรียกว่า เกน ในรูปที่ 3.10 (ค) จะกลับมีลักษณะตามปกติเหมือนรูปที่ 3.10 (ข) เมื่อเราทำการต่อ OTDR เข้าที่ปลายอีกด้านหนึ่งสลับจากเดิม ทั้งนี้เพื่อให้สัญญาณแสงเดินทางสวนกลับจากเส้นทางเดิม



(ก) กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อแบบสะท้อน



(ข) กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อแบบไม่สะท้อน



(ค) กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อเป็นเส้นใยแก้วต่างชนิดกัน ทำให้เกิดเกน (Gain)

รูปที่ 3.10 กราฟสัญญาณที่จุดเชื่อมต่อแบบต่างๆ [5]

### 3.6 สมการอย่างง่ายของสัญญาณแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับ

เมื่อพัลส์ของแสงถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้ว ขนาดของพัลส์จะลดลงตามขนาดความยาวของเส้นใยแก้ว ถ้าพิจารณาว่ากำลังของสัญญาณที่ส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วมีขนาด  $P(0)$  ดังนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังของสัญญาณแสงดังกล่าวที่ระยะทาง  $L$  (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)  
 $\alpha_s$  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  $NA$  คืออะเปอร์เจอร์เชิงตัวเลขของเส้นใยแก้ว  
 $n_1$  คือค่าดัชนีหักเหของแกนกลางเส้นใยแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ตัวอย่างเช่น ถ้าเส้นใยแก้วที่ต้องการตรวจสอบเป็นชนิด Step-index Multimode มีคุณสมบัติดังนี้

1. อะเปอร์เจอร์เชิงตัวเลขของเส้นใยแก้ว ( $NA$ ) = 0.2
2. ดัชนีหักเหของแกนกลางเส้นใยแก้ว ( $n_1$ ) = 1.5
3. สัมประสิทธิ์ของการกระจัดกระจายแบบ Rayleigh ( $\alpha_s$ ) = 0.7 mm
4. ความกว้างพัลส์ของแสง ( $W$ ) = 50 ns
5. ความเร็วของแสง ( $c$ ) =  $2.998 \times 10^8$  m/s

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

เนื่องจากตำแหน่งที่ต้องการหา  $P_B$  คือตำแหน่งด้านอินพุตของเส้นใยแก้ว 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

$$P_B(0) = \frac{P(0)(NA)^2 \alpha_s c W}{8n_1^3} \quad (3.9)$$

$$\frac{P_B(0)}{P(0)} = \frac{(NA)^2 \alpha_s c W}{8n_1^3}$$

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

หรือหากคิดในหน่วยของเดซิเบล (dB) จะได้

$$\frac{P_B(0)}{P(0)} \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \left[ \frac{(NA)^2 \alpha_s c W}{8n_1^3} \right]$$

$$\begin{aligned} \frac{P_B(0)}{P(0)} \text{ (dB)} &= 10 \log_{10} (1.55 \times 10^{-5}) \\ &= -48.1 \text{ dB} \end{aligned}$$

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

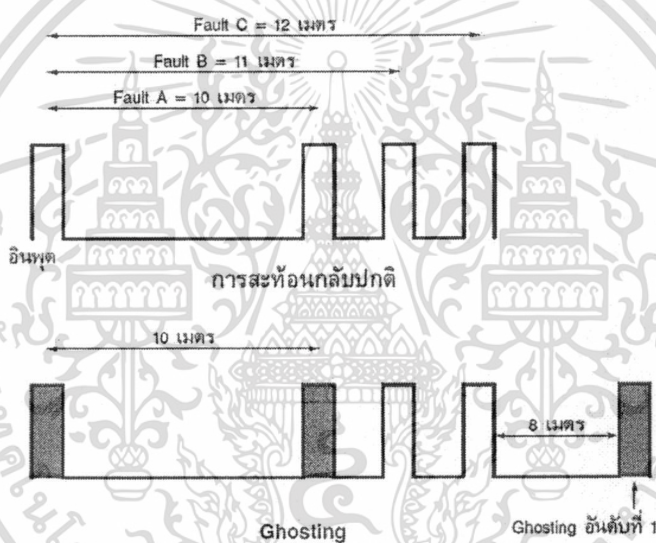
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

### 3.7 ความหมายของคำศัพท์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ OTDR

#### 3.7.1 Ghosting

ปรากฏการณ์ Ghosting เกิดขึ้นเนื่องจากจุดเชื่อมต่อมีสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนที่สูง และมีการตั้งค่า Fiber Range ที่ยาวเกินกว่าความยาวของเส้นใยแก้วที่นำมาตรวจสอบมากเกินไป



รูปที่ 3.11 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 ในขณะที่ปริมาณแสงอีกส่วนหนึ่งก็จะมีกระสะท้อนออกมาจากจุดเชื่อมต่อดังกล่าว กลับไปยังจุดเชื่อมต่อที่ระยะทาง 10 เมตรอีกครั้งหนึ่ง และทำให้เกิดการสะท้อนกลับของแสง ณ จุดเชื่อมต่อนี้ไปยัง OTDR อีกครั้งหนึ่ง ถ้าปริมาณของแสงสะท้อนครั้งที่ 2 นี้มีมากพอ ผู้ใช้ก็จะสามารถเห็นได้บน Fiber Signature ที่ระยะทาง 2 เท่าของระยะทางจริง (ในที่นี้คือ ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะทาง 20 เมตรจาก OTDR หรือ 8 เมตรจากปลายสายเส้นใยแก้ว) ปรากฏการณ์ของการเกิดสัญญาณพัลส์ ณ บริเวณที่ไม่มีรอยต่อหรือต้นเหตุของการเกิดแสงสะท้อนอยู่เลยตามตัวอย่างที่แสดงมาเรียกว่า Ghosting และสำหรับ Ghosting ที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อ ณ ความยาวที่ 11 เมตร และปลายเส้นใยแก้วที่ตำแหน่ง 12 เมตร ก็สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการเดียวกันนี้

### 3.7.2 Insertion Loss

Insertion Loss คือค่าการสูญเสียสัญญาณของแสงในเส้นใยแก้ว เนื่องมาจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วด้วยคอนเน็กเตอร์ (Connector) หรือการเชื่อมต่อด้วยวิธีการ Splice

### 3.7.3 Resolution

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

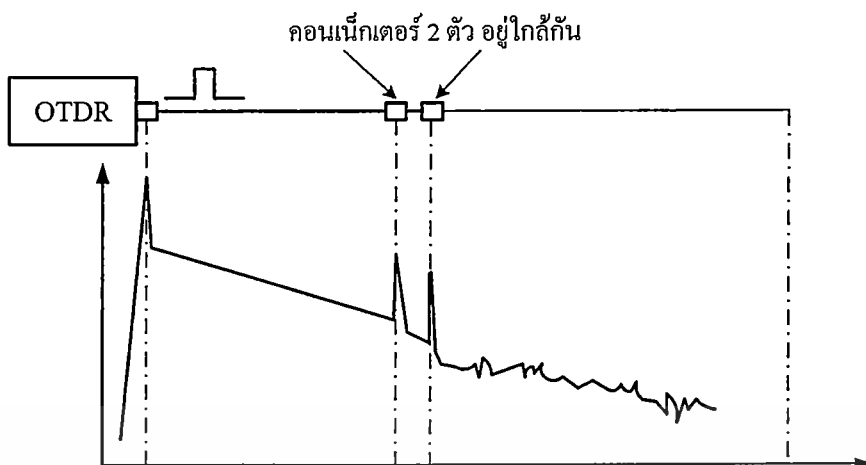
### 3.7.4 Dynamic Range

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

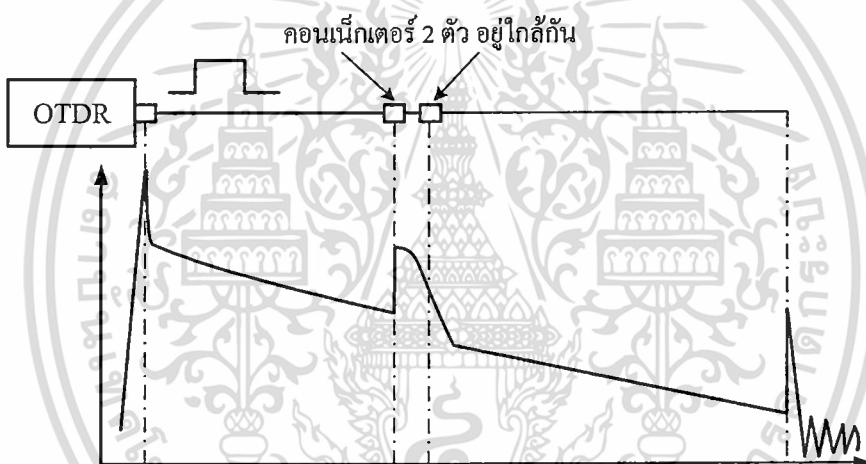
### 3.7.5 Dead Zone

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) พัลส์แคบ



(ข) พัลส์กว้าง

รูปที่ 3.12 อิทธิพลความกว้างของพัลส์ที่มีต่อ Dead Zone และ Dynamic Range [5]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีเอส เทคโนโลยี จำกัด (มหาชน) ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะใกล้ๆ เช่น ตำแหน่งของคอนเน็กเตอร์ 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 จะไม่สามารถแสดงรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อได้อีก ต้องปรับ OTDR ให้มีค่า Dead Zone ต่ำลง เป็นต้น

### 3.7.6 Gainers

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

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

2. ความแตกต่างระหว่างขนาดของแกนกลางเส้นใยแก้วที่นำมาเชื่อมต่อกัน การลดทอนสัญญาณแสง (Loss) ที่เกิดจากความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลางเส้นใยแก้วสามารถเขียนได้เป็น

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

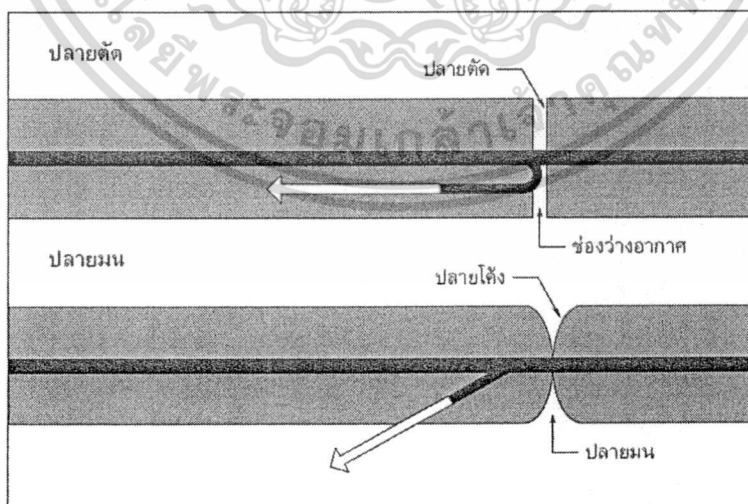
โดยที่  $D_r$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลางเส้นใยแก้วที่ทำหน้าที่รับแสง  
 $D_t$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลางเส้นใยแก้วที่ทำหน้าที่ส่งแสง

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

โดยปกติแล้ว ถ้า  $D_r > D_i$  ค่า Loss ที่ได้จะน้อยกว่าศูนย์มาก ซึ่งหมายความว่า การส่งผ่านกำลังแสงจากเส้นใยแก้วด้านส่งไปยังเส้นใยแก้วด้านรับมีค่าสูงมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการสะท้อนกลับของแสงที่จุดเชื่อมต่อระหว่างเส้นใยแก้วทั้งสองมีค่าน้อยนั่นเอง แต่สำหรับในกรณีที่กำลังพิจารณาอยู่ขณะนี้คือ  $D_r < D_i$  จะทำให้ได้ค่า Loss เป็นบวก ซึ่งก็จะหมายความว่า การส่งผ่านแสงจากเส้นใยแก้วด้านส่งไปยังเส้นใยแก้วด้านรับมีค่าต่ำ นั่นคือ กำลังของแสงที่สะท้อนกลับ ณ บริเวณจุดเชื่อมต่อมีค่าสูง หรือเกิด Gainer นั่นเอง ในกรณีที่พบปรากฏการณ์ Gainer ดังกล่าวข้างต้น การวัดค่าการลดทอนสัญญาณแสงของเส้นใยแก้ว จะต้องดำเนินการวัดจากทั้งสองทิศทางของเส้นใยแก้ว จากนั้นจึงนำค่าที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ย ก็จะได้เป็นค่าการลดทอนที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อต่างๆ ดังรูปที่ 3.10 (ก)

### 3.7.7 Optical Return Loss

Optical Return Loss (ORL) เป็นการสูญเสียสัญญาณแสงในลักษณะที่เกิดจากการสะท้อนกลับของแสงบางส่วนเมื่อผ่านรอยต่อระหว่างเส้นใยแก้วกลับไปยังแหล่งกำเนิดแสง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.13 ถ้าปริมาณแสงที่สะท้อนกลับ ณ จุดรอยต่อนี้มีค่ามาก อาจจะมีผลทำให้ไปรบกวนการทำงานของแหล่งกำเนิดแสง เช่น เลเซอร์ไดโอดได้ วิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดการสูญเสียสัญญาณแสงพร้อมทั้งลดการสะท้อนกลับของแสงไปยังแหล่งกำเนิด คือ การทำให้ปลายเส้นใยแก้วมีลักษณะโค้งมน ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ด้วยการจัดทำให้ปลายของเส้นใยแก้วทั้งสองเส้นสามารถสัมผัสกันได้ ทำให้สามารถลด Return loss ลงได้ นอกจากนี้ลักษณะของปลายเส้นใยแก้วที่โค้งมนยังทำให้แสงสะท้อนที่รอยต่อเปลี่ยนแนวไป และจะไม่เดินทางกลับไปรบกวนแหล่งกำเนิดแสงอีก

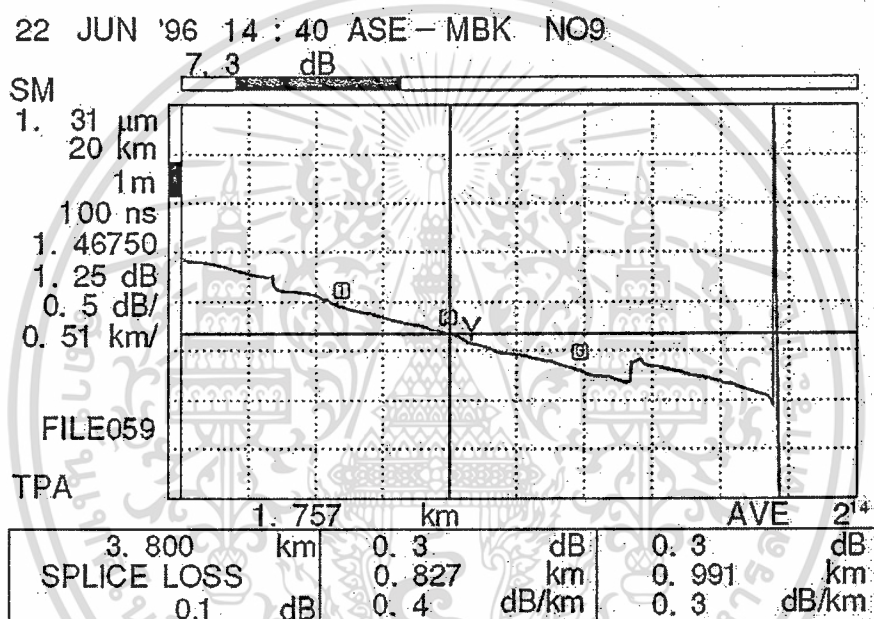


รูปที่ 3.13 การเกิด Optical Return Loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 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 3.14 ลักษณะจอแสดงผลของ OTDR และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ผู้ใช้กำหนด

อย่างไรก็ตามค่าต่างๆ ที่ผู้ใช้ต้องกำหนดก่อนจะทำการวัด อาจมีความแตกต่างไปบ้างจากตัวอย่างที่ยกมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเครื่อง OTDR ที่กำลังใช้งานอยู่ ดังในรูปที่ 3.14 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ผู้ใช้กำหนด ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ควรรู้มีดังนี้

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

**Pulse width** สามารถเลือกได้จากเครื่อง OTDR โดยมีหลักการเลือกขึ้นอยู่กับ Resolution และความยาวของเส้นใยแก้วที่ทำการตรวจวัด ในกรณีที่เลือก Pulse width กว้างจะมีผลทำให้กำลังของพัลส์แสงมีค่ามาก เป็นการเพิ่มความสามารถของ OTDR ให้วัดเส้นใยแก้วที่มีความยาวมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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)

**Refractive index** โดยทั่วไปค่าดัชนีหักเหจะได้จากผู้ผลิตเส้นใยแก้วซึ่งค่าดังกล่าวมีผลต่อความแม่นยำในการวัดระยะทางของ OTDR เป็นอย่างมาก

**Fiber range** ควรจะเลือกให้ยาวกว่าความยาวของเส้นใยแก้วที่กำลังตรวจสอบเพียงเล็กน้อย ตัวอย่างเช่น ถ้าเส้นใยแก้วที่กำลังทำการวัดมีความยาว 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 ช่วงเวลาที่ตัววัดแสงเปิดรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาก็จะสั้นลงด้วย จึงเป็นเหตุให้สัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากปลายเส้นใยแก้วซึ่งใช้เวลาในการเดินทางมากกว่าช่วงเวลาดังกล่าว ไม่อาจถูกตรวจวัดได้ในกรอบเวลาที่ถูกต้อง ในทางตรงกันข้าม ถ้าทำการเลือก Fiber range ให้ยาวเกินไป จะทำให้ช่วงเวลาที่ตัววัดแสงเปิดรับแสงที่สะท้อนกลับมามีเวลานาน เป็นผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ Ghosting ได้และมีผลเสียอีกประการหนึ่งที่เราเห็นได้ชัดเจน คือการวัดในแต่ละครั้งจะใช้เวลามากขึ้น

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

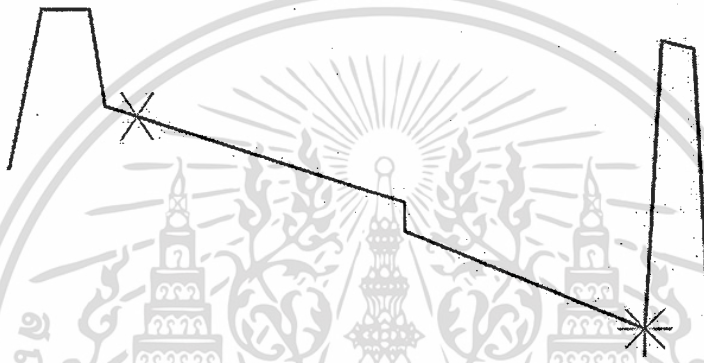
**Unit** สำหรับ OTDR บางเครื่องการแสดงผลหน่วยของความยาว สามารถเลือกได้ตามความต้องการ เช่น เมตร, กิโลเมตร หรือ ไมล์ เป็นต้น

**Back scatter coefficient** คือค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ เป็นอีกค่าหนึ่งที่ได้จากผู้ผลิตเส้นใยแก้ว ซึ่งค่าดังกล่าวจะนำมาใช้ในการคำนวณกำลังของสัญญาณแสงที่กระจัดกระจายย้อนกลับ (ตามสมการ (3.5))

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

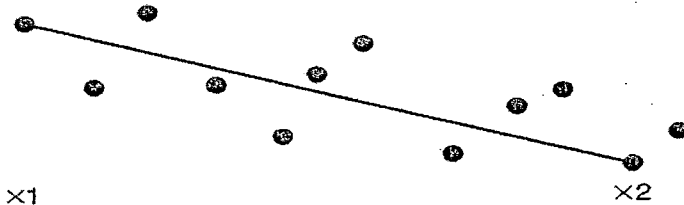
### 3.9 วิธีวัดค่าการสูญเสียสัญญาณในเส้นใยแก้ว

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



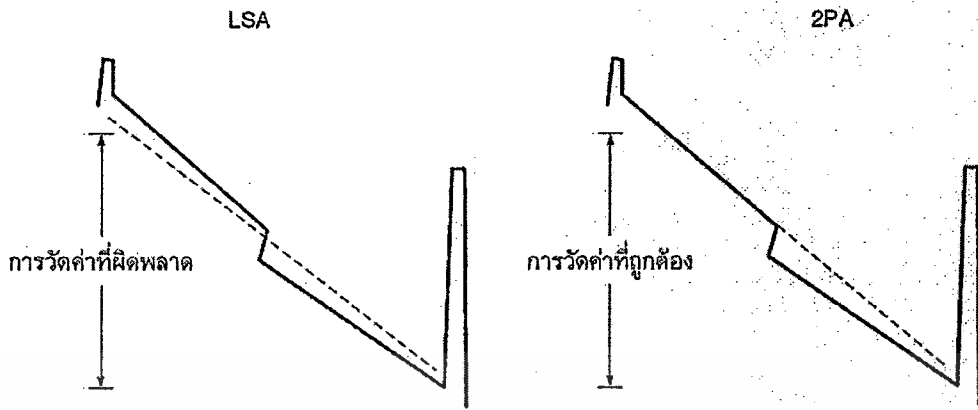
รูปที่ 3.15 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วยวิธี Two Point Approximation (2PA)

อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้มีโอกาสให้ค่าที่ผิดพลาดได้ หากมีสัญญาณรบกวนหรือริบเปิดบน Fiber Signature ดังนั้นเพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว ผู้ใช้สามารถเลือกใช้เทคนิคแบบ Least Square Approximation (LSA) สำหรับการวัดค่าการสูญเสียก็ได้ เมื่อใช้เทคนิคนี้เครื่อง OTDR จะทำการคำนวณหาเส้นตรงที่เหมาะสมเพื่อที่จะลากผ่านกลุ่มข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ค่าความชันของเส้นตรงดังกล่าวก็คือ ค่าการสูญเสีย (dB/km) ของเส้นใยแก้วนั่นเอง เทคนิคนี้จะให้ค่าที่เชื่อถือได้ หากทำการวัดการสูญเสียของเส้น ใยแก้วที่ไม่มีจุดเชื่อมต่อเลย เพราะว่าจุดเชื่อมต่อที่มีอยู่สามารถทำให้ค่าการสูญเสียที่อ่านได้จากเทคนิคนี้ผิดพลาดไป ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.17



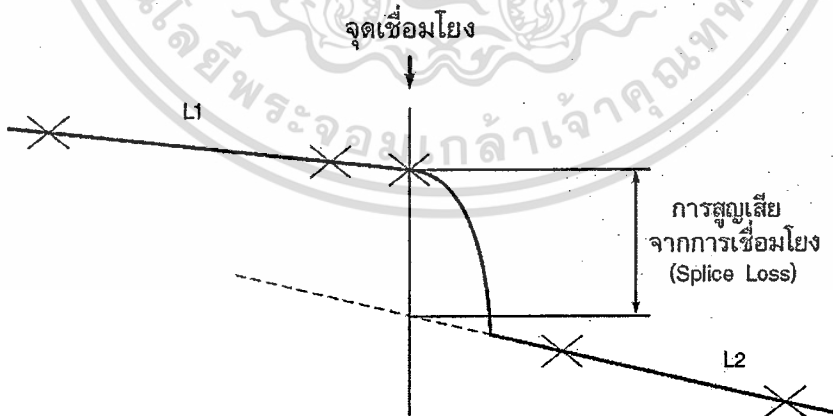
รูปที่ 3.16 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วยวิธี Least Square Approximation (LSA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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 (กิโลบาท) จากนั้นเครื่อง OTDR จะกำหนดจุดขึ้นมาอีก 2 จุด โดยอัลกอริทึมที่อยู่คนละด้านของจุดตรงกลางที่ผู้ใช้กำหนด จุด 2 จุดที่ OTDR กำหนดให้อัลกอริทึมนี้จะเป็นเส้นตรง 2 เส้นที่แสดงถึงระดับกำลังแสงที่แตกต่างกัน ความแตกต่างของระดับกำลังแสงนี้จะแสดงถึงค่า Splice loss หรือ Connector loss แล้วแต่กรณี



รูปที่ 3.18 การวัดค่า Loss ที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยวิธี Five Marker

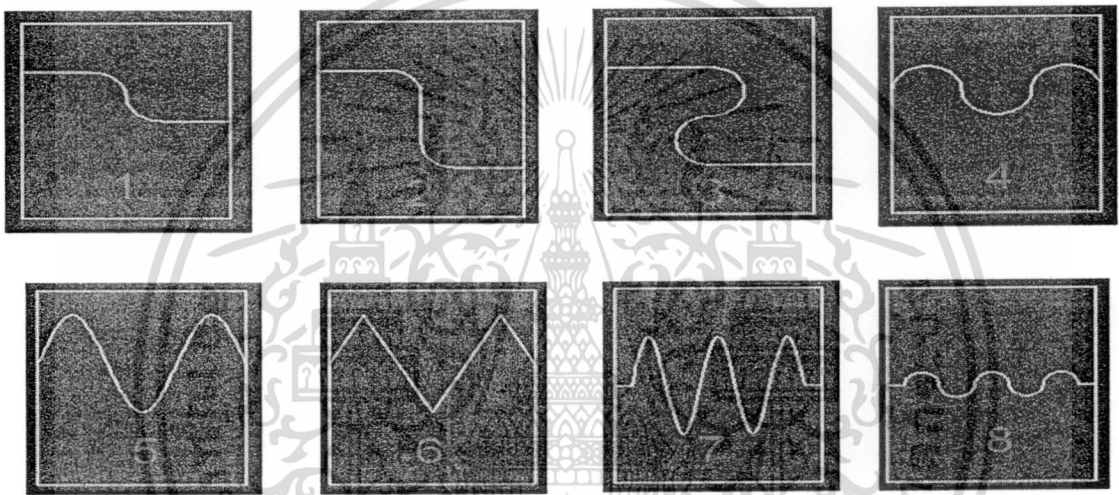
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

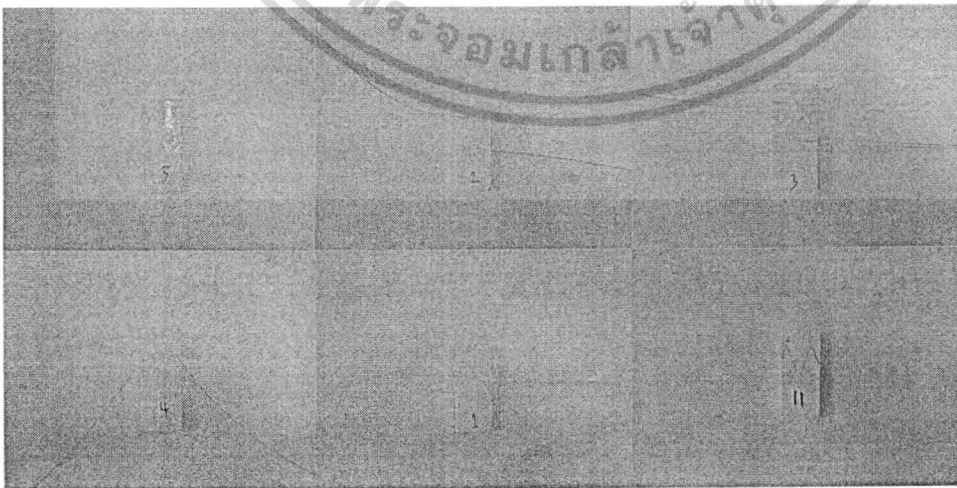
# การออกแบบอุปกรณ์

### 4.1 การออกแบบลักษณะส่วนโค้งของอุปกรณ์

การออกแบบลักษณะส่วนโค้งของอุปกรณ์เพื่อที่จะทำให้ได้ค่าการสูญเสียสัญญาณมากที่สุด โดยที่จะไม่ทำให้เส้นใยแก้วได้รับความเสียหายหรือแตกหัก จึงได้ทำการออกแบบส่วนโค้งในลักษณะต่างๆ เพื่อที่ว่าตัวแปรใดที่ส่งผลทำให้ได้ค่าการสูญเสียสัญญาณที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.1 แบบส่วนโค้งในลักษณะต่างๆที่ได้ทำการออกแบบ

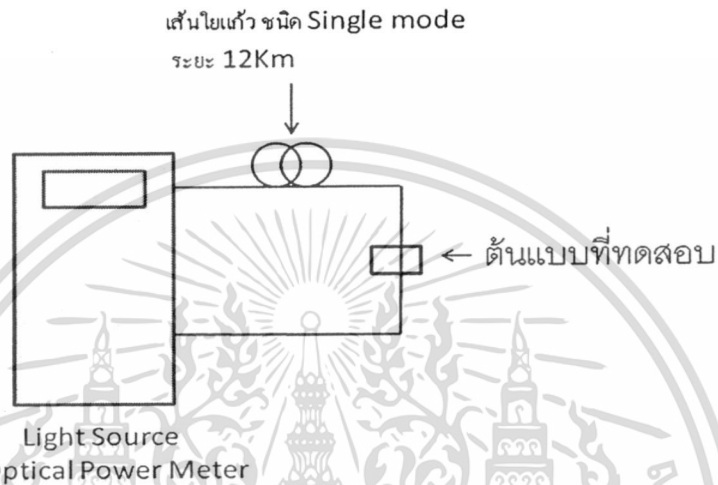


รูปที่ 4.2 ลักษณะของต้นแบบที่ได้ทำการออกแบบ

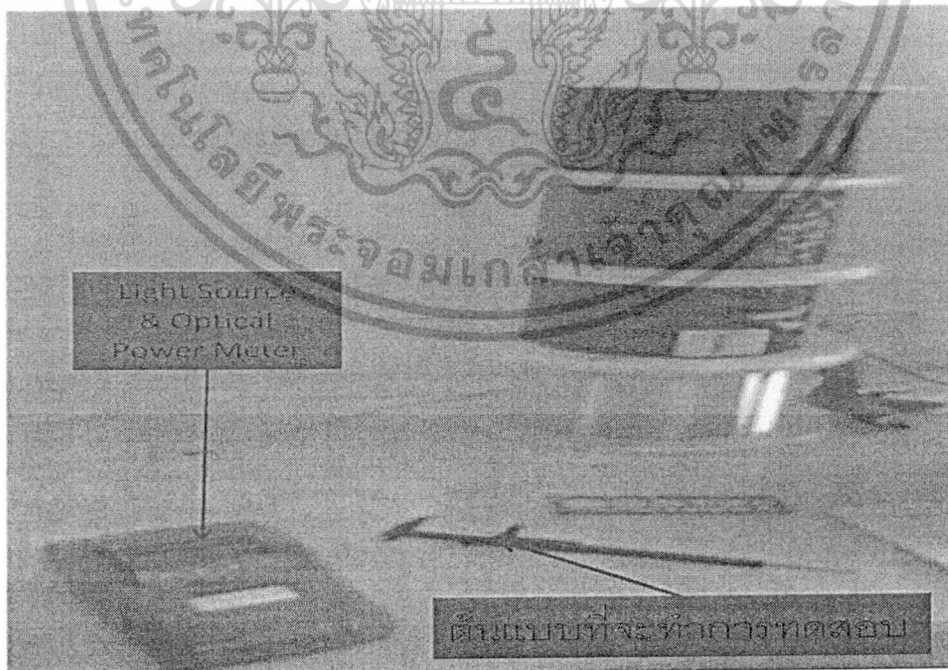
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 การทดสอบต้นแบบโดยใช้ Light Source และ Optical Power Meter

การทดสอบต้นแบบเพื่อวัดค่าการสูญเสียสัญญาณ จะทำการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วชนิด Single mode รวมระยะทางทั้งหมด 12 กิโลเมตร จากนั้นจะใช้ Light Source และ Optical Power Meter เพื่อวัดค่าการสูญเสียพลังงานแสงของเส้นใยแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ Light Source และ Optical Power Meter ทดสอบต้นแบบ



รูปที่ 4.4 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วย Light Source และ Optical Power Meter ที่รวมอยู่ในตัว

เดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะทำการวัดค่ากับเส้นใยแก้วชนิด single mode ที่ความยาวคลื่น 1310 นาโนเมตร และตั้งค่าหน่วยวัดของเครื่องวัดเป็นหน่วย dB แล้วทำการเชื่อมต่ออ้างอิงในขณะที่เส้นใยแก้วอยู่ในแนวตรงให้มีค่าเป็นศูนย์ เพราะเมื่อทำการค่าวัดค่าออกมาได้จะเป็นค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากต้นแบบโดยตรง จะแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากต้นแบบต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 1310 nm

แบบ ที่	ค่าการสูญเสียสัญญาณ(dB)							
	ครั้งที่					ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
	1	2	3	4	5			
1	2.62	2.83	2.78	2.67	2.80	2.74	2.83	2.62
2	2.95	3.17	3.01	2.98	3.04	3.03	2.95	3.17
3	6.94	6.86	7.07	6.89	6.84	6.92	6.84	7.07
4	10.48	10.41	10.27	10.31	10.28	10.35	10.27	10.48
5	34.95						34.95	
6	ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากเส้นใยแก้วเกิดความเสียหาย							
7								
8								

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากต้นแบบที่ 5 มีค่าการสูญเสียสัญญาณที่สูงที่สุดจะสังเกตได้ว่ารัศมีมีค่าน้อย และมีจำนวนครั้งของการโค้งงอมาก แต่เมื่อได้ทำการทดลองซ้ำเส้นใยแก้วเกิดแตกหักทำให้ไม่สามารถที่จะวัดค่าได้ อาจจะเป็นเพราะว่ามีความชื้นมีความเกินและอาจจะมีค่ารัศมีของการโค้งงอที่น้อยเกินไปจึงอาจเป็นผลที่ทำให้เมื่อทำการวัดค่าซ้ำแล้วทำให้เส้นใยแก้วเกิดความเสียหายได้ ซึ่งเป็นเหตุผลให้ไม่สามารถวัดค่าต้นแบบที่ 6-8 เนื่องจากเมื่อทำการวัดแล้วเส้นใยแก้วเกิดความเสียหาย เพราะฉะนั้นเพื่อความปลอดภัยของเส้นใยแก้วจึงควรออกแบบให้มีลักษณะของการโค้งงอตามต้นแบบที่ 4 ซึ่งมีค่าการสูญเสียสัญญาณที่มีค่าสูงรองลงมาจากต้นแบบที่ 5 เพราะฉะนั้นถ้าต้องการค่าการสูญเสียสัญญาณที่มากที่สุดลักษณะส่วนโค้งงอของอุปกรณ์ควรมีรัศมีที่มีค่าน้อย และจำนวนครั้งของการโค้งงอที่มาก

#### 4.1.2 การทดสอบเพื่อหาค่ารัศมีของอุปกรณ์

จากที่ได้ทำการศึกษาสเปคของเส้นใยแก้วที่นำมาทดสอบ และที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันนั้น จะมีค่ารัศมีของการโค้งงอที่น้อยที่สุดที่จะไม่ทำให้เส้นใยแก้วเกิดความเสียหาย มีค่ารัศมีประมาณ 2.5 มิลลิเมตร [13] ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยของเส้นใยแก้วจึงได้ทำการวัดที่ค่ารัศมีต่ำที่สุด 3 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากรัศมีต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 1310 nm

รัศมี	ค่าการสูญเสียสัญญาณ(dB)									
	ครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7.5	1.39	1.45	1.51	1.41	1.54	1.49	1.38	1.47	1.53	1.53
7	1.59	1.68	1.54	1.62	1.49	1.56	1.52	1.5	1.53	1.77
6.5	1.68	1.65	1.78	1.72	1.87	1.73	1.69	1.81	1.76	1.71
6	2.15	2.12	1.96	2.11	1.99	2.05	1.97	2.08	2.01	2.26
5.5	2.27	2.38	2.3	2.42	2.36	2.41	2.32	2.29	2.28	2.37
5	2.67	2.71	2.79	2.83	2.81	2.75	2.77	2.69	2.76	2.62
4.5	2.95	2.87	3.05	3.09	2.84	2.86	2.82	2.93	2.89	2.8
4	3.41	3.35	3.39	3.52	3.56	3.38	3.45	3.48	3.34	3.32
3.5	3.95	4.06	3.93	4.09	3.85	3.92	3.91	4.08	3.97	4.04
3	4.53	4.59	4.76	4.69	4.62	4.71	4.74	4.67	4.58	4.51

ตารางที่ 4.3 ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากรัศมีต่างๆ ที่ความยาวคลื่น 1550 nm

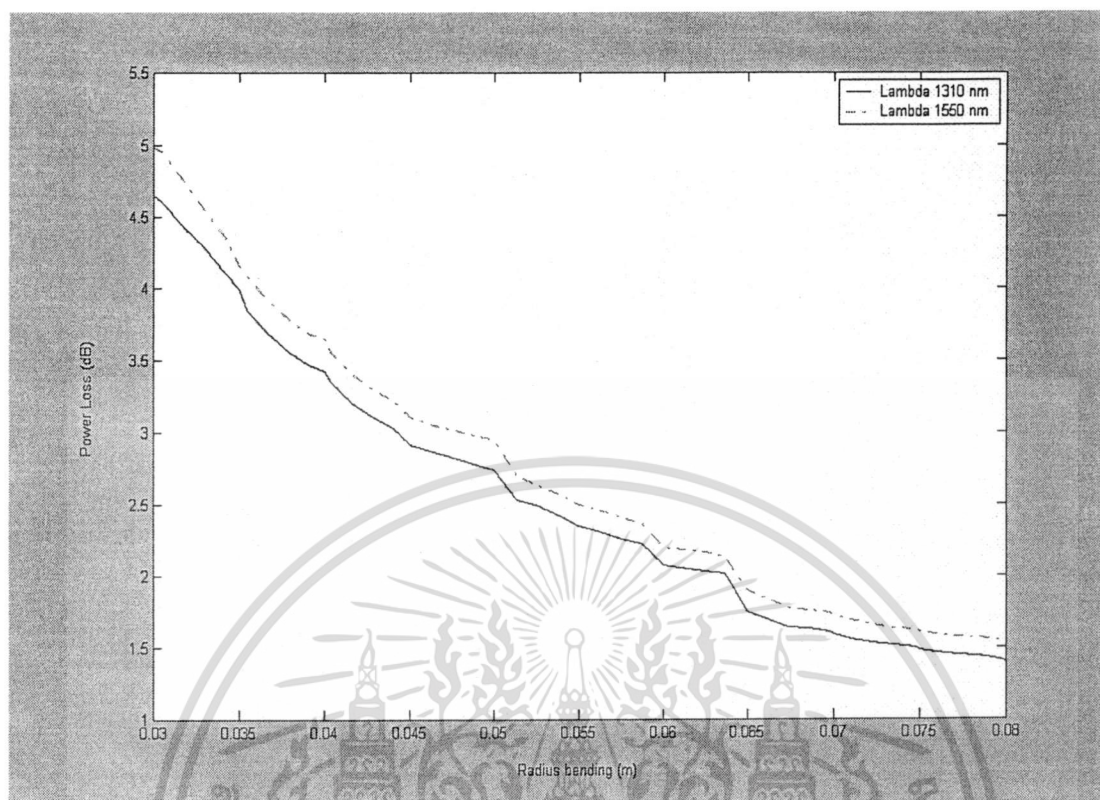
รัศมี	ค่าการสูญเสียสัญญาณ(dB)									
	ครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7.5	1.57	1.59	1.63	1.66	1.58	1.69	1.64	1.62	1.61	1.51
7	1.65	1.71	1.76	1.79	1.68	1.73	1.75	1.67	1.72	1.74
6.5	1.79	1.83	1.88	1.95	1.84	1.91	1.83	1.82	1.87	1.98
6	2.07	2.29	2.15	2.24	2.18	2.11	2.22	2.25	2.16	2.23
5.5	2.55	2.37	2.58	2.52	2.44	2.39	2.46	2.53	2.46	2.6
5	3.02	3.04	2.83	2.97	2.92	2.85	2.95	2.89	2.99	2.94
4.5	3.06	3.13	3.18	3.04	3.14	3.16	3.09	3.07	3.2	3.03
4	3.75	3.54	3.58	3.72	3.64	3.69	3.56	3.71	3.66	3.55
3.5	4.13	4.15	4.08	4.25	4.22	4.07	4.18	4.2	4.11	4.11
3	5.11	5.03	4.87	4.88	4.93	4.99	5.01	4.85	4.91	5.22

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยการสูญเสียสัญญาณ ที่ความยาวคลื่น 1310 nm และ 1550 nm

รัศมี	ค่าการสูญเสียสัญญาณ(dB)					
	1310			1550		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
7.5	1.47	1.54	1.38	1.61	1.69	1.51
7	1.58	1.77	1.5	1.72	1.79	1.65
6.5	1.74	1.87	1.65	1.89	1.98	1.79
6	2.07	2.26	1.96	2.19	2.29	2.07
5.5	2.34	2.42	2.27	2.49	2.6	2.37
5	2.74	2.83	2.62	2.94	2.83	3.04
4.5	2.91	3.09	2.8	3.1	3.2	3.03
4	3.42	3.56	3.32	3.64	3.75	3.54
3.5	3.98	4.09	3.85	4.15	4.2	4.07
3	4.64	4.76	4.51	4.98	5.22	4.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การสูญเสียสัญญาณที่ได้จากการวัด ที่ความยาวคลื่น 1310 นาโนเมตร และ 1550 นาโนเมตร

เพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัด จึงทำการคำนวณหาค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากการทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ สามารถหาค่าได้จากสมการ (4.1) และสมการ (4.2) [11]

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 - \left( \frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \right) \left[ \frac{d}{R} + \left( \frac{3\lambda}{4\pi n_2 R} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (4.1)$$

$$P_{loss} = -10 \text{Log}_{10} \left[ 1 - \left( \frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \right) \left\{ \frac{d}{R} + \left( \frac{3\lambda}{4\pi n_2 R} \right)^{\frac{2}{3}} \right\} \right] \quad (4.2)$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$P_2$	คือค่าพลังงานแสงด้านรับ	( $mW$ )
	$P_1$	คือค่าพลังงานแสงด้านส่ง	( $mW$ )
	$\alpha$	คือค่าแฟกเตอร์ความลาดเอียงของกราฟที่เกี่ยวข้องกับค่าดัชนีหักเหของแสง	
	$\Delta$	คือค่าความแตกต่างของดัชนีหักเห (Refractive index difference) ระหว่างคอร์และแคลดคิงของเส้นใยแก้ว	
	$d$	คือเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของคอร์	
	$R$	คือรัศมีความโค้งของเส้นใยแก้ว	
	$\lambda$	คือความยาวคลื่นของแสง	
	$n_1$	คือค่าดัชนีหักเหของแสงในคอร์	
	$n_2$	คือค่าดัชนีหักเหของแสงในแคลดคิง	

กรณีเส้นใยแก้วเป็นชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (Stepped-Index Fiber) ค่าของ  $\alpha = \infty$  (จากรูปที่ 2.) ทำให้  $(\alpha + 2)/\alpha = 1$  ดังนั้นในเทอมของ  $(\alpha + 2)/(2\alpha\Delta) = 1/2\Delta$  เมื่อนำไปใส่ในสมการ(4.1) และสมการ(4.2) จะสามารถหาค่าการสูญเสียสัญญาณ ( $P_{loss}$ ) ที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วได้จากสมการ (4.4)

$$P_{loss} = -10 \log \left\{ 1 - \left( \frac{1}{2\Delta} \right) \left[ \frac{d}{R} + \left( \frac{3\lambda}{4\pi n_2 R} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.4)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้

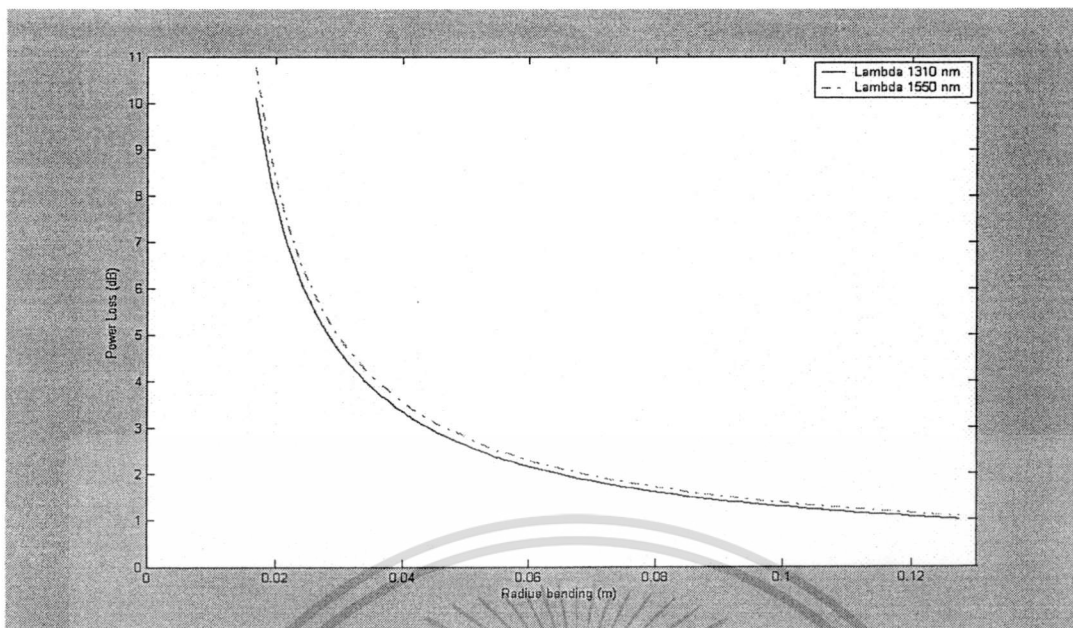
- กรณีเป็นเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดี่ยว (Single-mode Fiber)

$$d = 9.5 \mu m$$

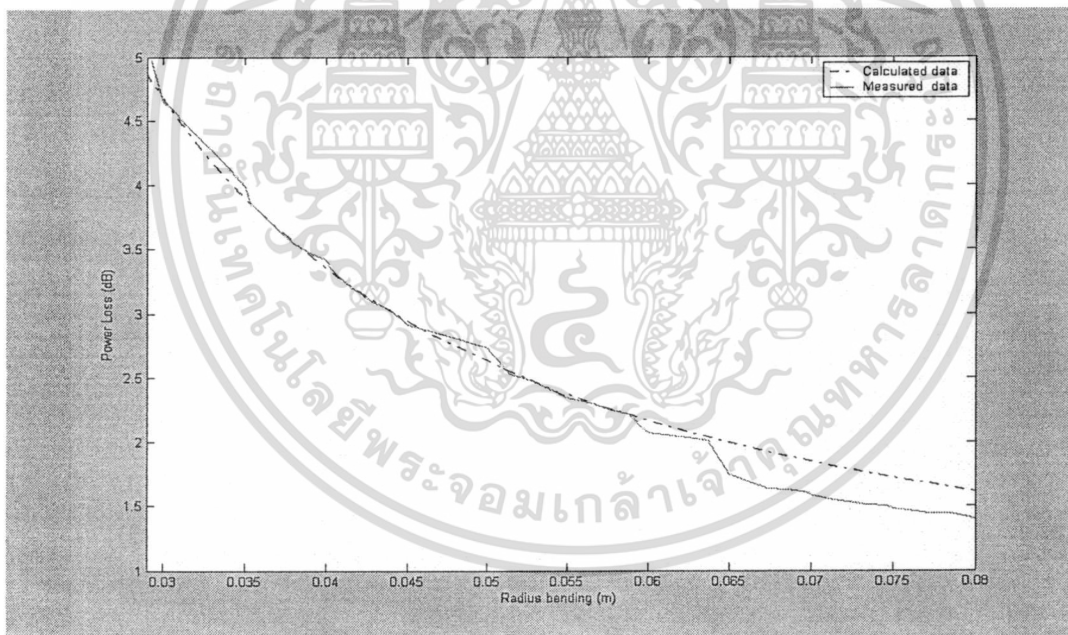
$$n_1 = 1.467$$

$$n_2 = 1.462$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

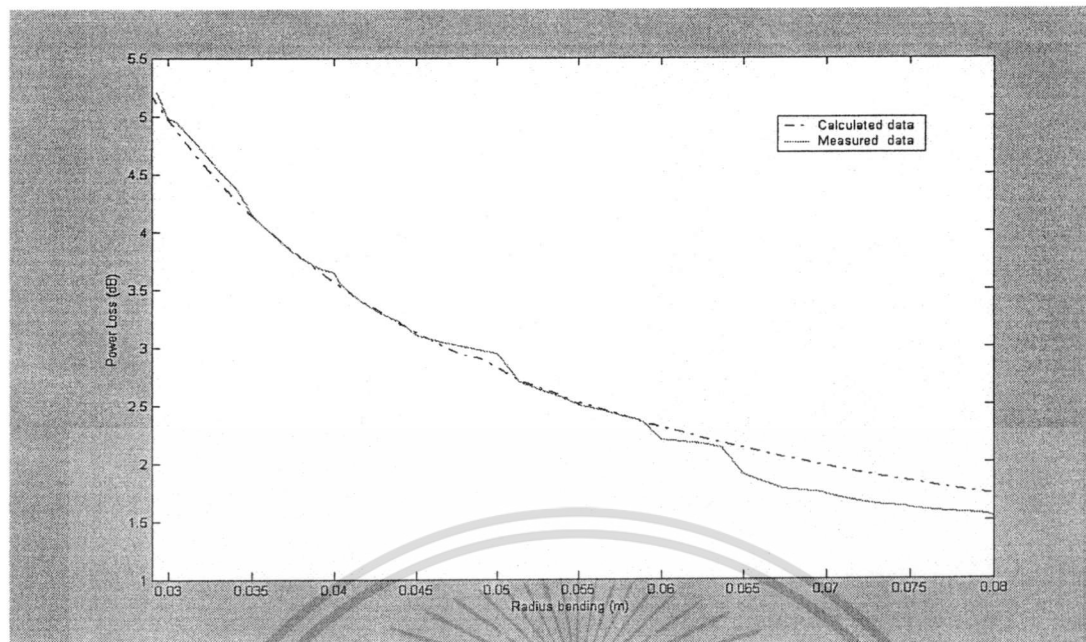


รูปที่ 4.6 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่นต่างๆของ Step-Index Fiber-SM ที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 4.7 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1,310 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



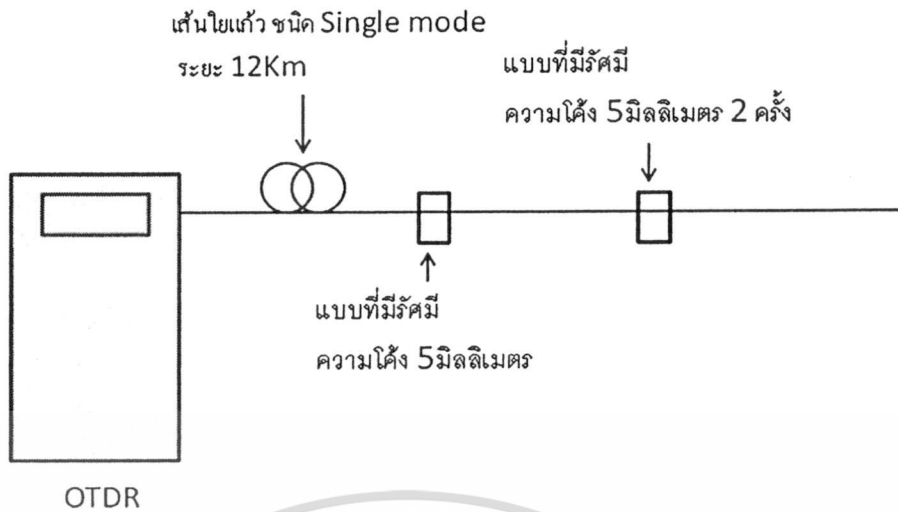
รูปที่ 4.8 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร

จากรูปที่ 4.6 ค่าที่ได้จากการคำนวณ แนวเส้นกราฟ จะสูงขึ้นเมื่อเส้นใยแก้วนำแสงโค้งงอมากขึ้นอย่างเป็นสัดส่วน แต่จากรูปที่ 4.5 ค่าที่ได้จากการเฉลี่ยที่ได้จากการวัด จะพบว่ามีค่าการสูญเสียสัญญาณ เพิ่มขึ้นเป็นลักษณะ Log

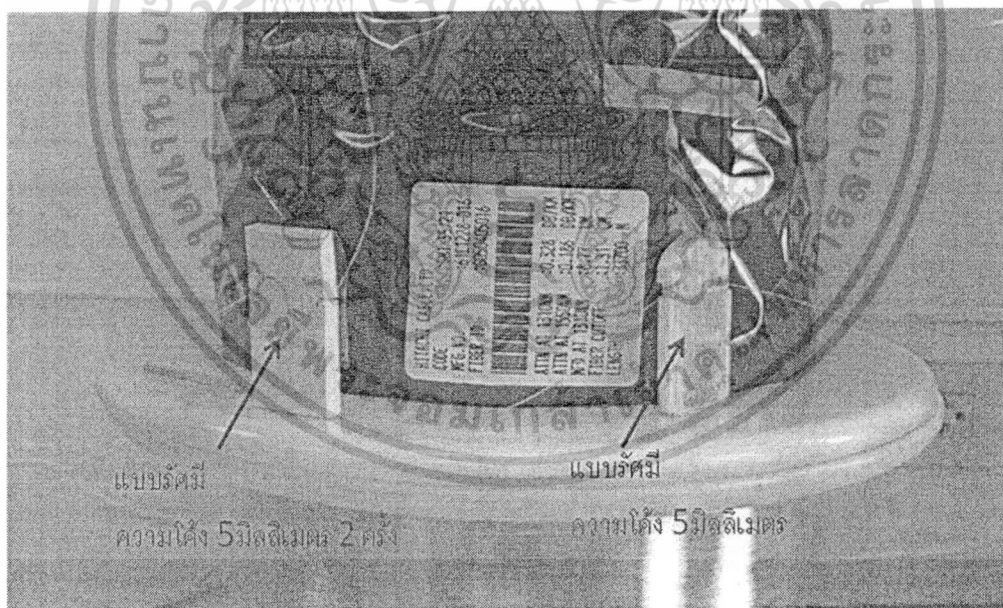
จากรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 จะเห็นว่าช่วงแรกที่รัศมีมีค่ามาก ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากการวัดจะมีค่าต่ำกว่าค่าการสูญเสียสัญญาณที่ได้จากการคำนวณ และเมื่อรัศมีมีค่าน้อยลง จะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากการวัดจะมีแนวโน้มค่าสูงขึ้นเร็วกว่าค่าการสูญเสียสัญญาณที่ได้จากการคำนวณ แต่ก็ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากการวัดมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าการสูญเสียที่ได้จากการคำนวณ

#### 4.1.3 การทดสอบเพิ่มจำนวนของการโค้งงอ

เพื่อที่จะศึกษาผลของการเพิ่มจำนวนของการโค้งงอว่า ถ้าเพิ่มจำนวนของการโค้งงอมาก จะส่งผลต่อค่าการสูญเสียสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้น และดูลักษณะกราฟที่ได้จาก OTDR ว่าจะมีลักษณะออกมาในรูปแบบใด จึงทำการทดสอบโดยการเพิ่มจำนวนของการโค้งงอ ดังนี้

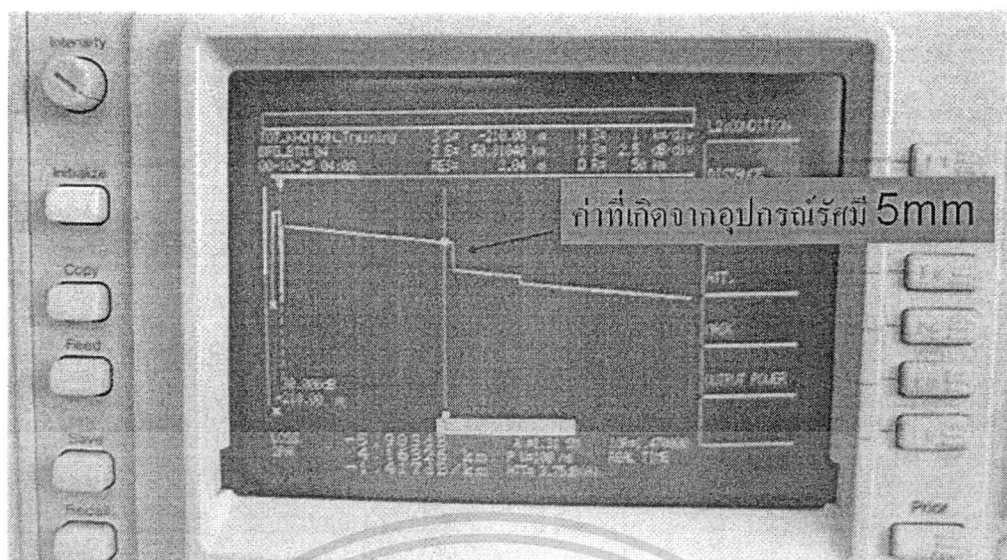


รูปที่ 4.9 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ OTDR ทดสอบแบบที่มีรัศมีความโค้งงอ 5 มิลลิเมตร กับแบบที่มีรัศมีความโค้งงอ 5 มิลลิเมตร 2 ครั้ง

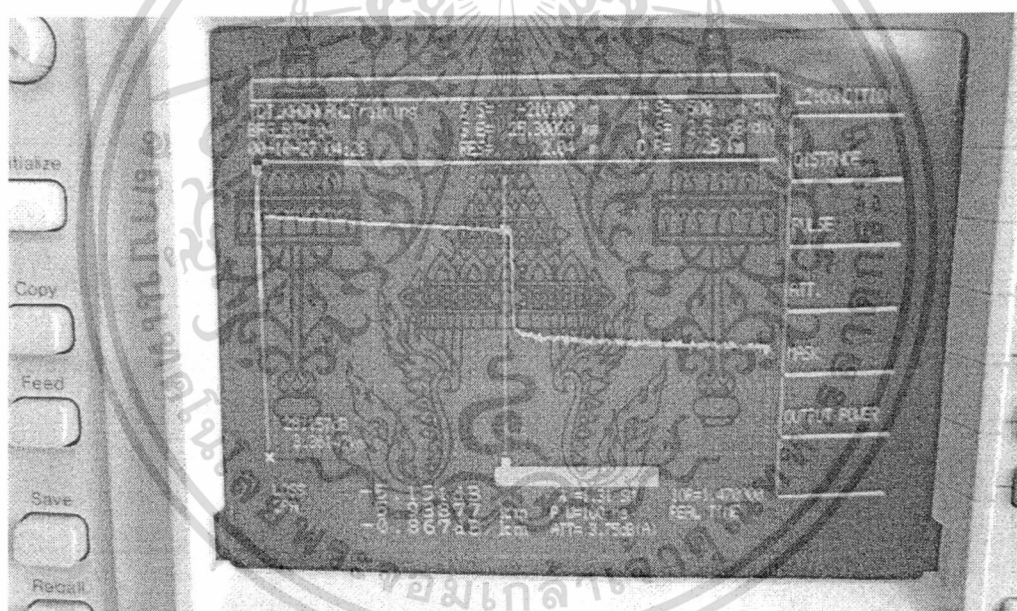


รูปที่ 4.10 แสดงแบบที่มีรัศมีความโค้ง 5 มิลลิเมตร กับแบบที่มีรัศมีความโค้ง 5 มิลลิเมตร 2 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



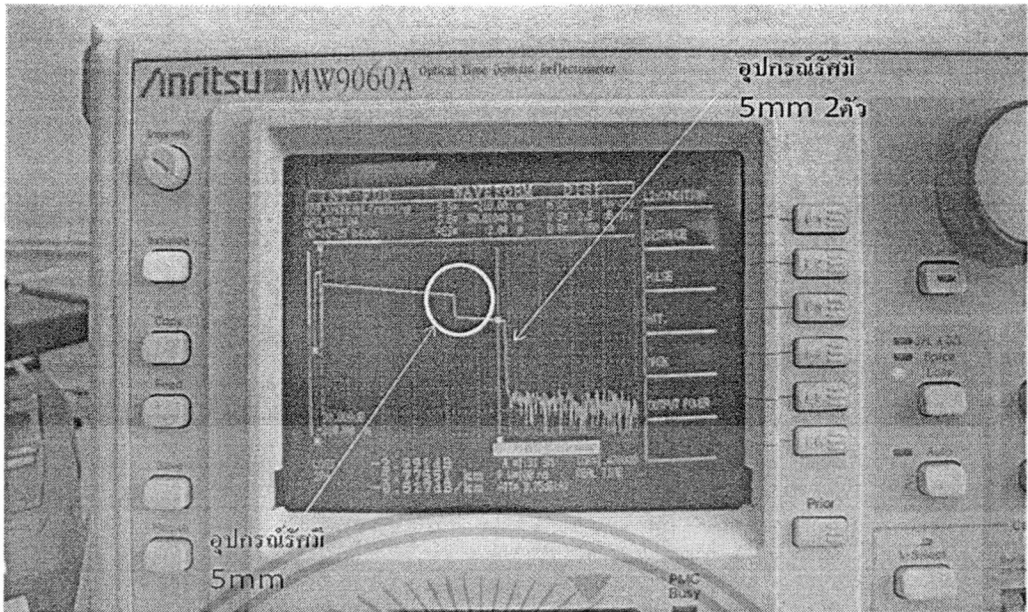
รูปที่ 4.11 กราฟที่ได้จาก OTDR ที่ใส่แบบที่รัศมี 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.12 กราฟที่ได้จาก OTDR ที่ใส่แบบรัศมี 5 มิลลิเมตร 2 ครั้ง

จากรูปที่ 4.12 กราฟที่ได้จาก OTDR นั้นมีความสูงมากขึ้นและยังเป็น เส้นความชันเดียว เพราะฉะนั้น แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มจำนวนของการ โค้งงอเข้ามาจะมีผลทำให้มีค่าการสูญเสีย สัญญาณที่สูงขึ้น โดยที่ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าเท่ากับการนำค่าการสูญเสีย สัญญาณของ 2 ส่วน โค้งนั้นมารวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟที่ได้จาก OTDR ที่ใส่อุปกรณ์รัศมี 5 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับ อุปกรณ์รัศมี 5 มิลลิเมตร ที่มีส่วน 2 โคง

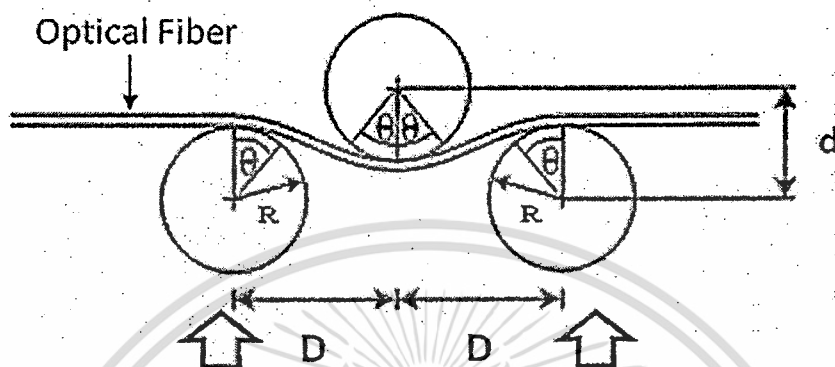
#### 4.2 การออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์

จากที่ได้ทำการทดลองมา ทำให้ทราบการที่ทำให้ได้ค่าการสูญเสียสัญญาณที่มากที่สุด คือ มีค่ารัศมีการ โค้งงอเท่ากับ 3 มิลลิเมตร และก็มีจำนวนครั้งของการ โค้งงอให้มากที่สุด และรูปที่ 4.14 จะแสดงให้เห็นบริเวณพื้นที่ในภาคของเส้นใยแก้ว[12] ที่จะใช้ในการติดตั้ง อุปกรณ์การแทรกซึมน้ำ เข้าหัว โดยพื้นที่มีขนาดจำกัดดังนี้ มีความกว้าง 26 mm ความยาว 43.5 mm ความหนา 6mm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 4.14 บริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ในภาคของเส้นใยแก้วนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากพื้นที่ในถาดของเส้นใยแก้ว(Fiber Tray)นั้นมีอยู่จำกัด คือมีความกว้างเท่ากับ 26 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้นแบบอุปกรณ์ที่มีค่าการสูญเสียสัญญาณที่มากที่สุด คือให้มีรัศมีของการโค้งงอ 3 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 4 ครั้ง



รูปที่ 4.15 ลักษณะการโค้งงอของเส้นใยแก้วที่เกิดจากการโค้งงอ 1 ครั้ง

จากรูปที่ 4.15 แสดงลักษณะการโค้งงอของเส้นใยแก้ว ซึ่งมีส่วนที่ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ 3 ส่วน คือส่วนที่อยู่ด้านข้าง 2 ส่วน ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่เคลื่อนที่โดยที่จะเคลื่อนที่ขึ้นไปหาส่วนที่อยู่ตรงกลาง ซึ่งส่วนที่อยู่ตรงกลางจะเป็นส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ จะทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ 1 ครั้ง

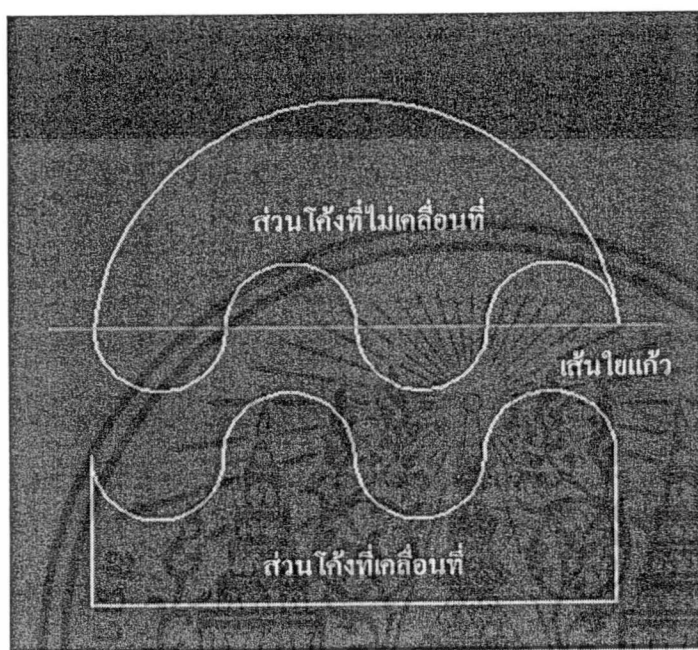
จากรูปที่ 4.15 สามารถหาค่าผลรวมของมุม ( $\Sigma\theta$ ) ที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้ว ได้ดังสมการ (4.5)[17]

$$\Sigma\theta = 4\theta = 4 * \left\{ \left( \pi/2 \right) - \cos^{-1} \left[ R / \left( \sqrt{(D^2 + d^2)} / 2 \right) \right] - \tan^{-1} (d/D) \right\} \quad (4.5)$$

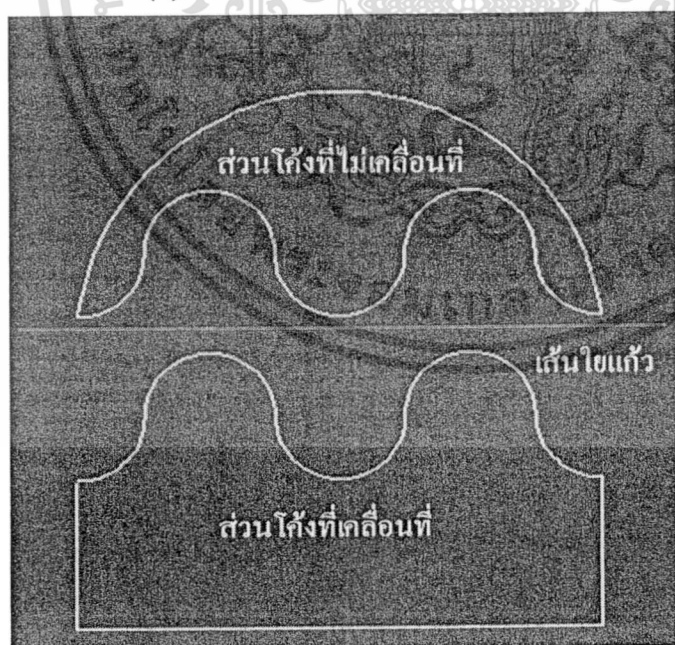
เมื่อ	$\Sigma\theta$	คือผลรวมของมุม
	$R$	คือรัศมีการโค้งงอของเส้นใยแก้ว
	$D$	คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางความโค้งด้านแนวนอน
	$d$	คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางความโค้งด้านแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของอุปกรณ์จะทำงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนล่างจะเป็นส่วนเคลื่อนที่ขึ้นไปข้างบนเพื่อที่จะให้ได้การโค้งงอตามที่ได้ออกแบบไว้ดังนั้น จึงต้องคำนึงถึงจุดทางเข้า และทางออกของเส้นใยแก้ว ให้เส้นใยแก้วเป็นเส้นตรง ไม่เกิดการโค้งงอก่อนที่อุปกรณ์จะเริ่มทำงาน ดังนั้นจึงได้ทำการปรับลักษณะการโค้งงอ จากรูปที่ 4.16 (ก) ให้เป็นดังรูปที่ 4.16 (ข)



(ก) ก่อนที่จะทำการปรับส่วนโค้ง

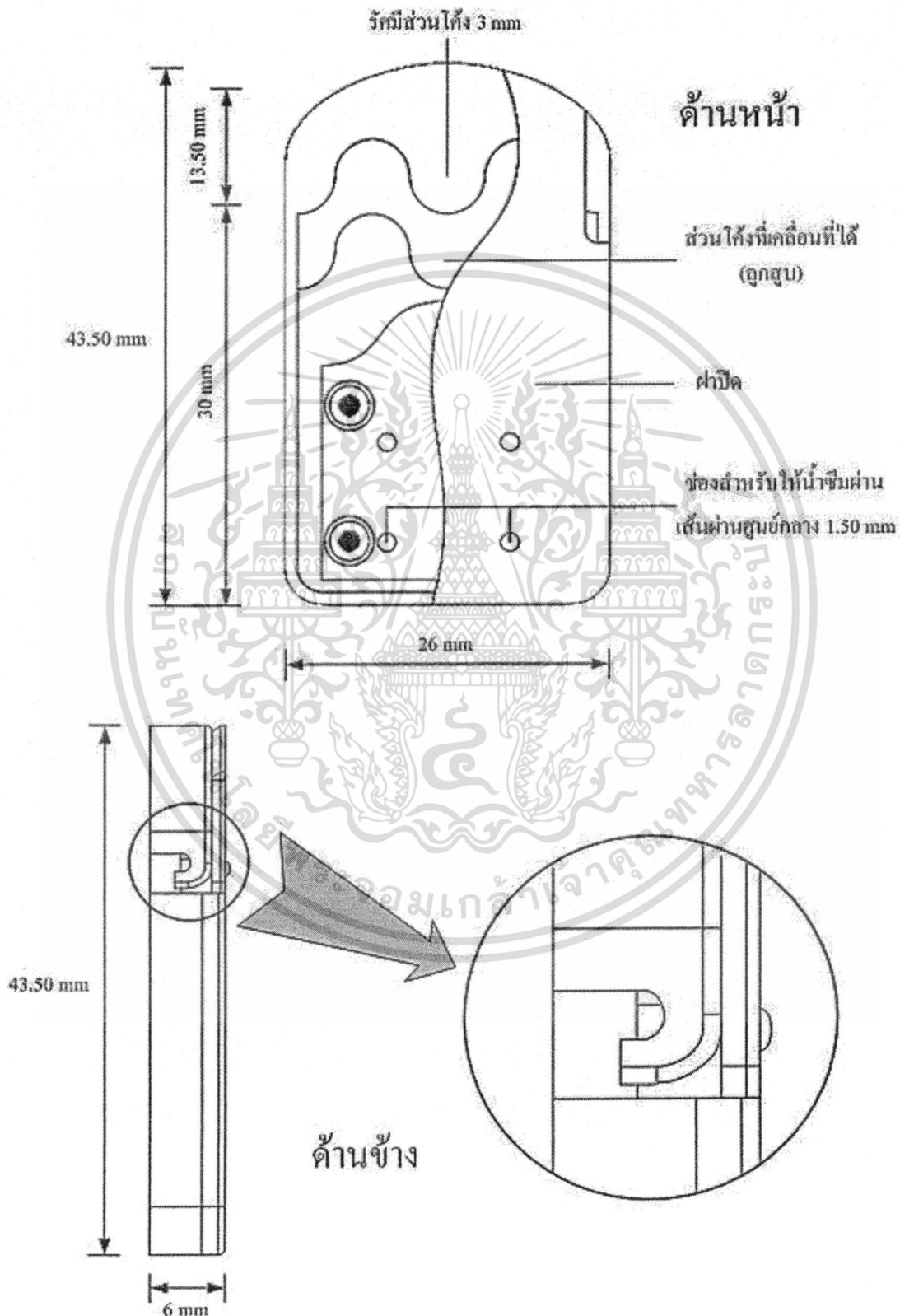


(ข) หลังจากทำการปรับส่วนโค้ง

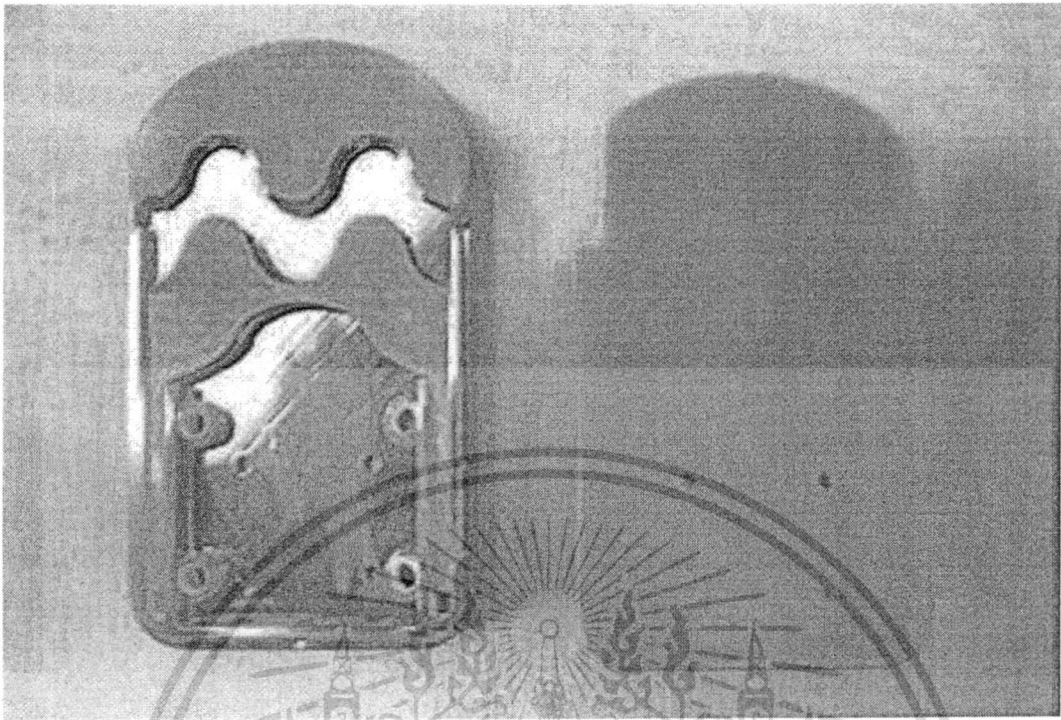
#### รูปที่ 4.16 ลักษณะของส่วนโค้งก่อนและหลังจากทำการปรับส่วนโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3 อุปกรณ์ต้นแบบ



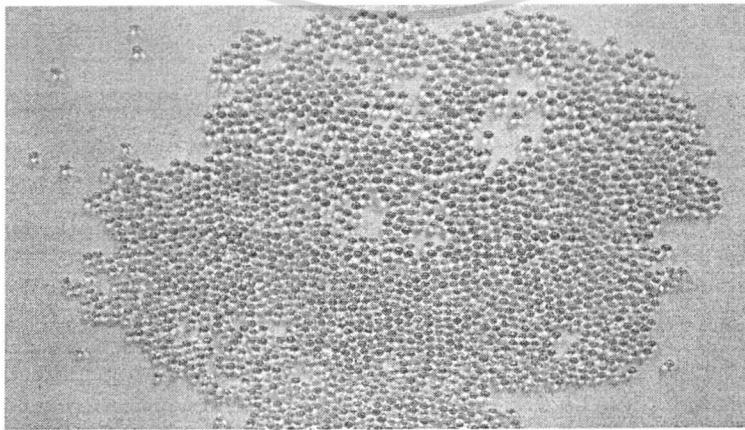
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.17 ขนาดของอุปกรณ์ต้นแบบ นุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



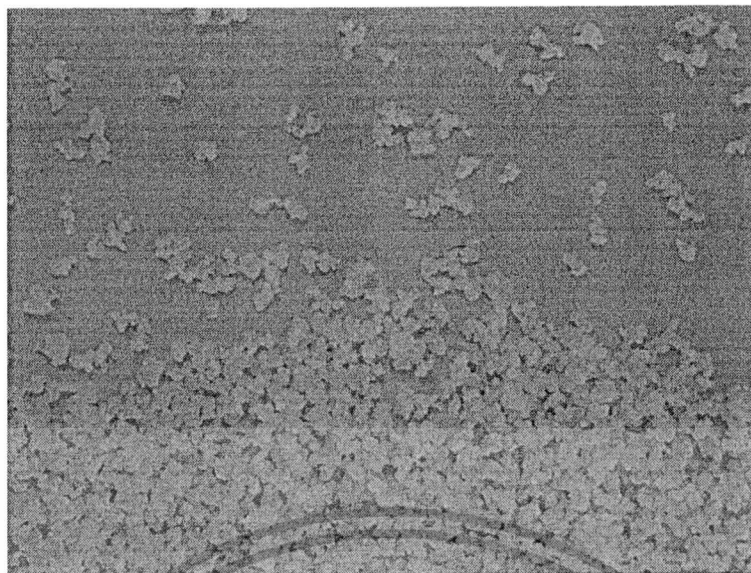
รูปที่ 4.18 ลักษณะของอุปกรณ์ต้นแบบ

#### 4.4 สารโพลีเมอร์

โพลีเมอร์เป็นสารที่เกิดจากการสังเคราะห์ มีลักษณะโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) สำหรับโพลีเมอร์ที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ใฝ่รางวัลการแทรกซึมของน้ำ เรียกว่า ครอส-ลิงค์ โพลีเอครีลาไมด์ โคลิโพลีเมอร์ (Cross-linked Polyacrylamide Copolymer) มีลักษณะแข็งเป็นเม็ดเล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในห้องเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ) สารโพลีเอไมด์ที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน

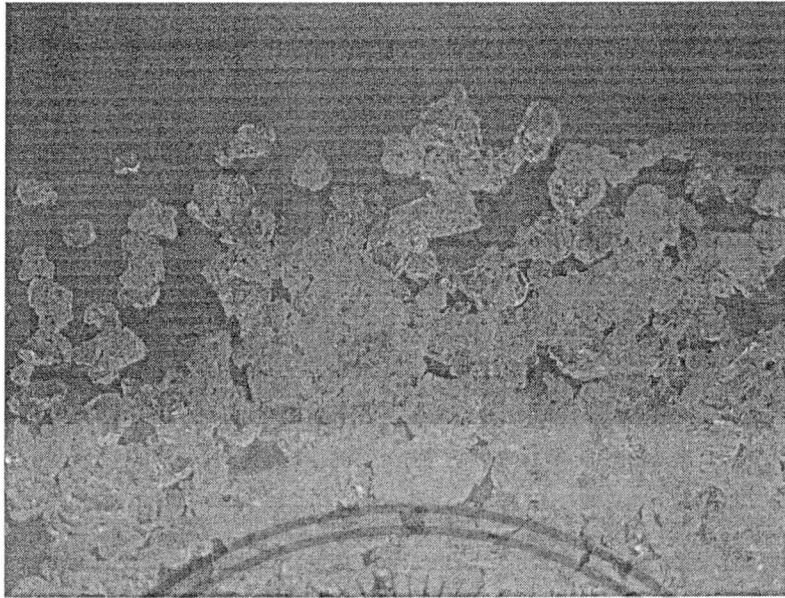
รูปที่ 4.19 ลักษณะของโพลีเอไมด์

เมื่อโพลีเอไมด์สัมผัสกับน้ำจะทำให้โมเลกุลของน้ำซึมผ่านเข้าไปในโพลีเอไมด์ได้ และสามารถดูดซับน้ำไว้ได้ เกิดการขยายตัวของโพลีเอไมด์ตามปริมาณของน้ำที่ซึมผ่านเข้าไปอยู่ภายใน โพลีเอไมด์ที่ดูดซับน้ำไว้จะมีลักษณะนุ่มคล้ายวุ้นหรือเยลลี่ (Jelly) ดังแสดงในรูปที่ 4.20



(ก) สารโพลีเอไมด์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



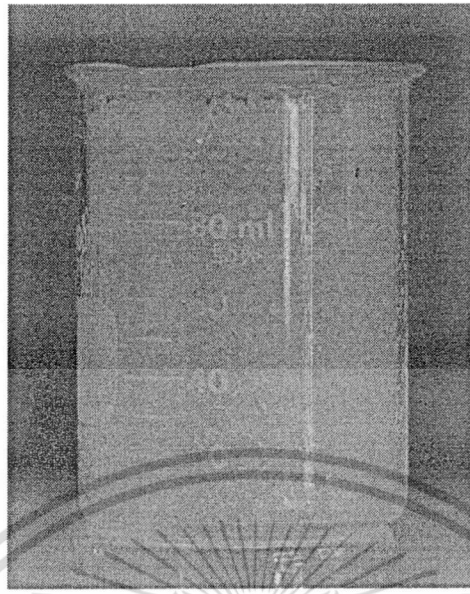
(ข) สารโพลีเมอร์ที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน

รูปที่ 4.20 ลักษณะของโพลีเมอร์ที่ดูดซับน้ำ

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาค (ก) เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง

รูปที่ 4.21 การขยายตัวของโพลีเมอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

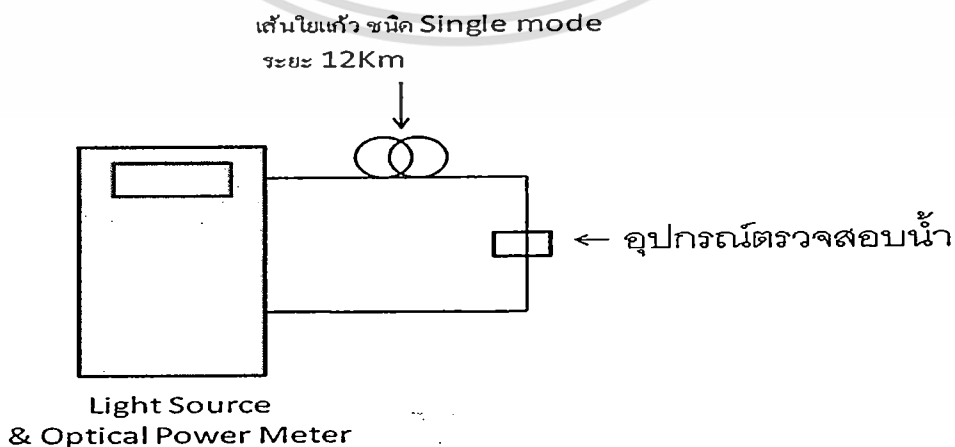
### ผลการทดสอบและสรุป

ปัจจุบันนี้ความต้องการในการใช้งานอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง(Hi-Speed internet) นั้นมีมากขึ้น จึงทำให้มีการขยายปริมาณโครงข่ายเส้นใยแก้วมากขึ้น เพราะเส้นใยแก้ว นั้นมีข้อดีคือ มีอัตราการส่งข้อมูลสูงมีการลดทอนสัญญาณต่ำ และไม่ถูกรบกวนโดยสัญญาณทางไฟฟ้า และมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา เป็นต้น เส้นใยแก้วจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างชุมสายย่อยๆกับชุมสายใหญ่หรือระหว่างชุมสายย่อยด้วยกันเอง หรือระหว่างชุมสายย่อยไปยังบ้านผู้ใช้งานโดยตรงที่เรียกว่า Fiber To The Home (FTTH) จึงทำให้เห็นว่าถ้าเกิดการเสียหายขึ้นกับเส้นใยแก้วจะทำให้ระบบการสื่อสารนั้นได้รับผลกระทบอย่างรุนแรงเพราะฉะนั้นการที่จะทำให้ระบบการสื่อสารสามารถใช้งานได้ตลอดเวลาจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันดูแลเส้นใยแก้วเป็นอย่างยิ่ง ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจสอบน้ำในหัวต่อของเส้นใยแก้ว เพื่อการดูแลบำรุงรักษาโครงข่ายให้สามารถกระทำได้ง่าย 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 ที่อยู่ในตัวเดียวกัน เพื่อวัดค่าการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 5.1

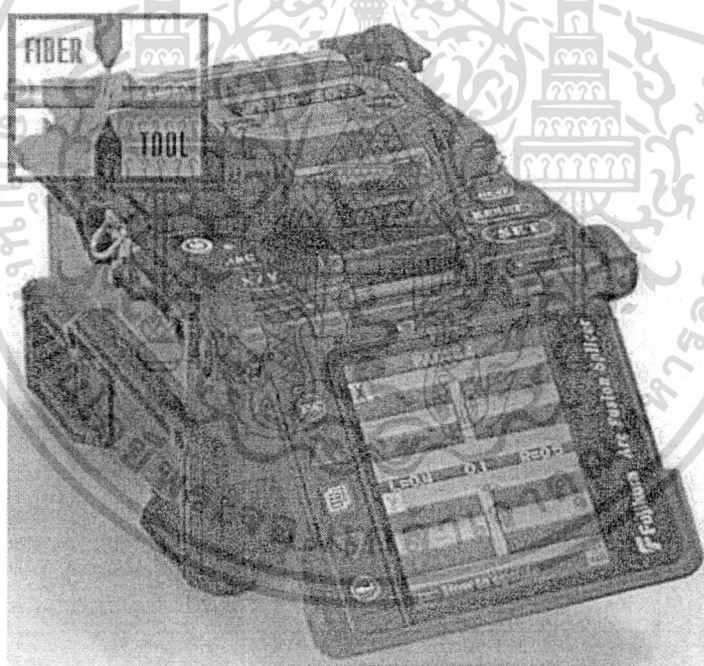


รูปที่ 5.1 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ Light Source และ Optical Power Meter ทดสอบอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์เป็นการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

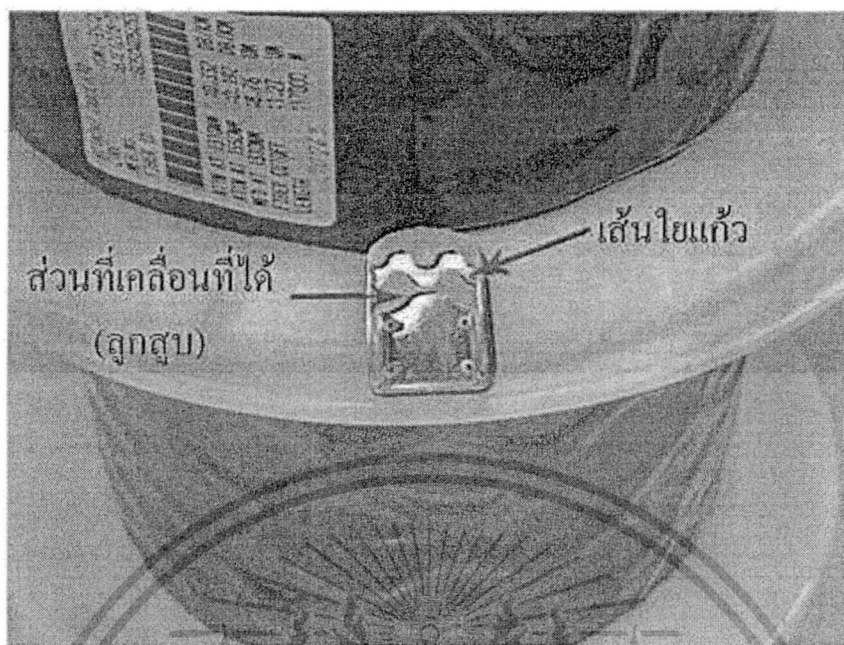


รูปที่ 5.2 Light Source และ Optical Power Meter ที่รวมอยู่ในตัวเดียวกัน



รูปที่ 5.3 Fusion Splice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 อุปกรณ์ไม่ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ



รูปที่ 5.5 อุปกรณ์ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอเต็มที่

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (ลูกสูบ) ของอุปกรณ์ ที่ความยาวคลื่น 1,310 nm ทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ ได้ค่าการสูญเสียสัญญาณดังแสดงในตารางที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 การสูญเสียสัญญาณที่วัดได้เมื่ออุปกรณ์ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ

ระยะการเคลื่อนที่ของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (ลูกสูบ) : (mm)	ค่าการสูญเสียสัญญาณ : (dB)
0 (เส้นใยแก้วไม่โค้งงอ)	0
2	0.43
4	2.68
6	7.22
8	13.36
10 (เส้นใยแก้วโค้งงอเต็มที่)	18.78

เป็นการทดสอบอุปกรณ์กับเส้นใยแก้วชนิด Single mode ที่ความยาวคลื่น 1,310 nm และที่ความยาวคลื่น 1,550 nm ซึ่งอุปกรณ์ตรวจสอบนี้ ได้ค่าการสูญเสียสัญญาณ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 การสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ เมื่อใช้ความยาวคลื่น 1,310 nm

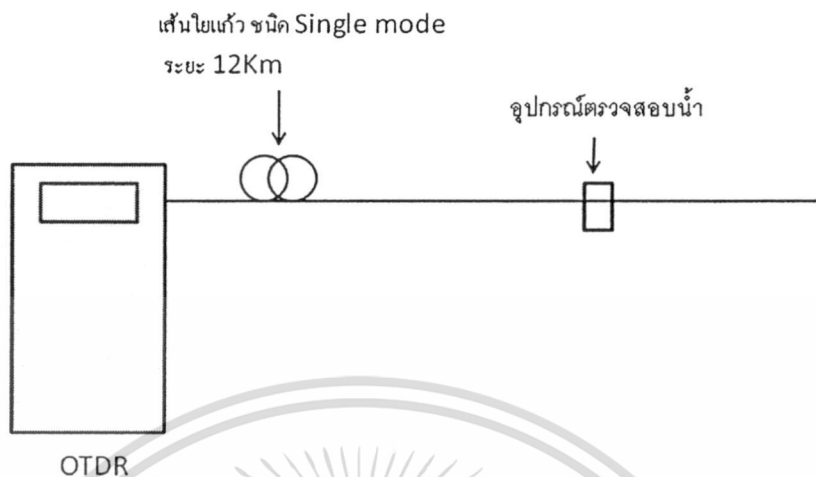
	ค่าการสูญเสียสัญญาณ(dB)									
	ครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์	18.44	18.68	18.93	18.72	18.79	18.87	18.90	18.63	18.81	19.13

ตารางที่ 5.3 ค่าเฉลี่ยการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ เปรียบเทียบกับ ค่าที่ได้จากการวัดรัศมี 3 มิลลิเมตร ที่มีจำนวนของการ โค้งงอ 4 ครั้ง

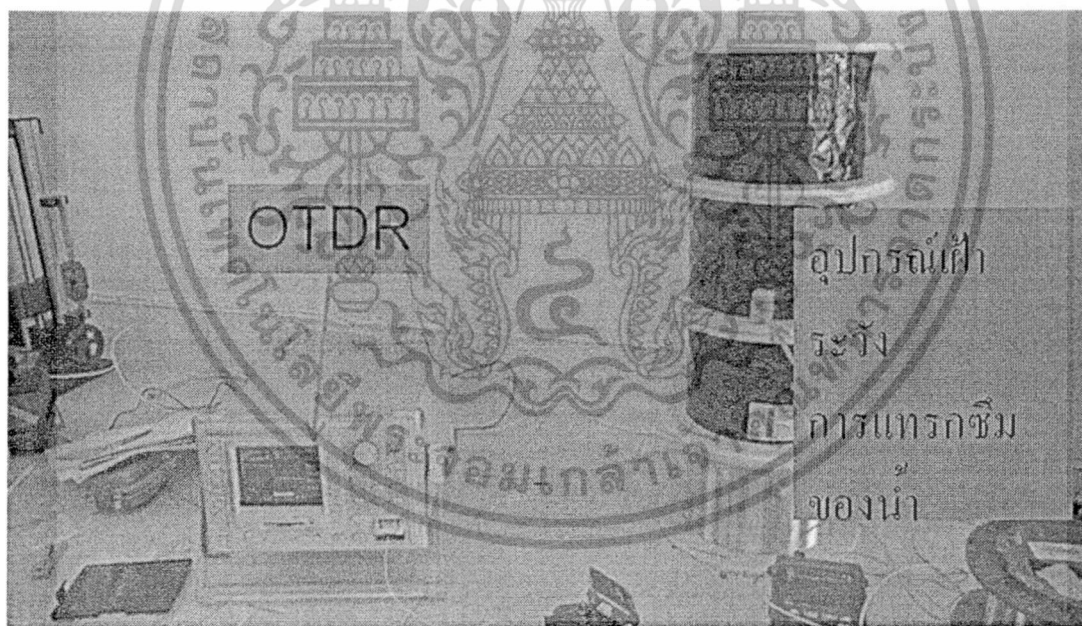
	ค่าการสูญเสียสัญญาณ(dB)
ค่าที่ได้จากการวัดรัศมี 3mm รวมกัน 4 ครั้ง(ก่อนที่ทำการปรับส่วนโค้ง)	18.56
ค่าที่ได้จากการวัดจากอุปกรณ์	ค่าสูงสุด 19.13
	ค่าเฉลี่ย 18.79
	ค่าต่ำสุด 18.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2 การทดสอบอุปกรณ์โดยใช้ OTDR



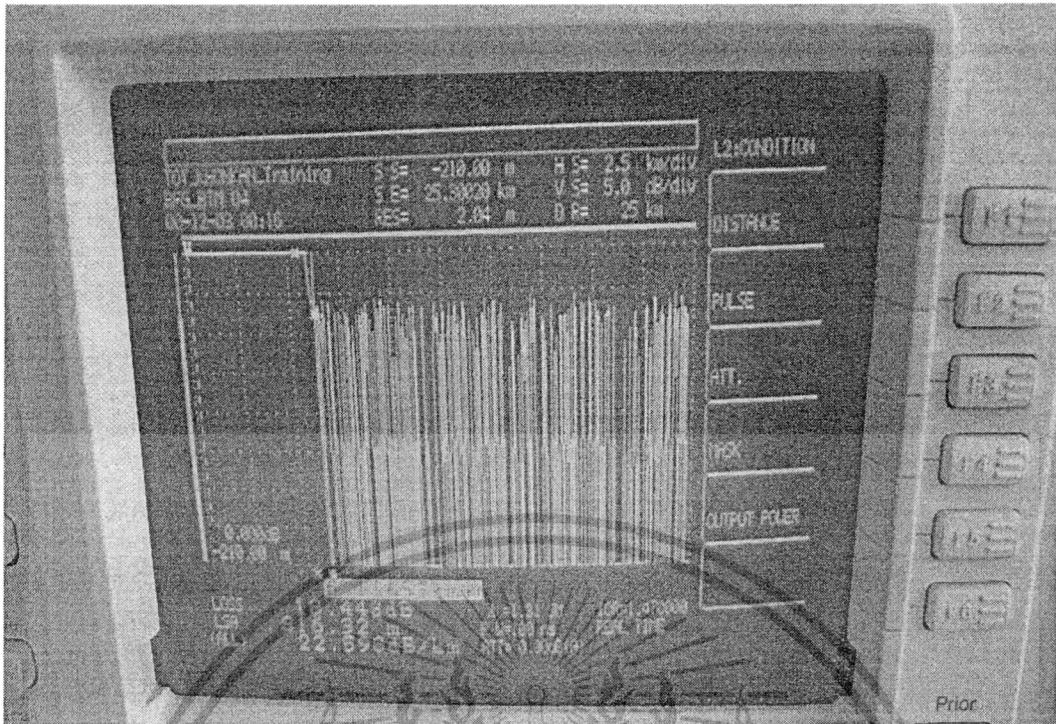
รูปที่ 5.6 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว โดยใช้ OTDR ทดสอบอุปกรณ์



รูปที่ 5.7 การวัดค่าการสูญเสียสัญญาณด้วย OTDR

จากรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 เป็นการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วโดยใช้ OTDR เพื่อตรวจสอบลักษณะของกราฟการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วย OTDR

## 5.2 สรุปผลการวิจัย

จากการออกแบบอุปกรณ์สามารถสรุปสิ่งต่างๆ ได้ดังนี้

1. จากรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยแก้วที่มีรัศมี ความโค้งเท่ากัน แสงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีค่าการสูญเสียสัญญาณมากกว่าแสงที่มีความยาว คลื่นน้อย
2. จากการทดสอบโพลีเมอร์ทำให้สังเกตได้ว่า โพลีเมอร์จะขยายตัวได้อย่างรวดเร็วใน ช่วงเวลา 5-10 นาทีแรกที่สัมผัสกับน้ำ
3. จากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ ค่าการสูญเสียสัญญาณ ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น
4. จากการทดสอบอุปกรณ์ ทั้งหมด 10 ครั้งต่อความยาวคลื่น 1310 nm ในตารางที่ 5.3 จะ สังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ค่าที่ได้จากการวัดรัศมี 3mm รวมกัน 4 ครั้ง(ก่อนที่ทำการ ปรับส่วนโค้ง)
5. จากรูปที่ 5.8 กราฟที่ได้จาก OTDR สามารถแสดงค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจาก อุปกรณ์ได้อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากการทดสอบทั้งหมด แสดงให้เห็นได้ว่าอุปกรณ์สามารถที่จะทำให้เส้นใยแก้ว  
โค้งงอได้ และการโค้งงอที่เกิดจากอุปกรณ์ก็สามารถทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณขึ้นในเส้นใยแก้ว  
ได้ และมีค่าการสูญเสียสัญญาณที่สูงพอที่จะทำให้ระบบการแจ้งเตือนทำงานได้ดี สามารถนำ  
เครื่องมือวัดหาค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 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", **8<sup>th</sup> 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] 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.
- [5] อธิคม ฤกษ์บุตร, "เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น", พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2546.
- [6] พงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพบูลย์, "อุปกรณ์ตรวจสอบเส้นใยนำแสง OTDR ตอน 1", **เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์**, ฉบับที่ 190, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, พฤศจิกายน 2541, หน้า 164 – 171.
- [7] พงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพบูลย์, "อุปกรณ์ตรวจสอบเส้นใยนำแสง OTDR ตอนจบ", **เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์**, ฉบับที่ 191, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, ธันวาคม 2541, หน้า 170 – 175.
- [8] 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.
- [9] M. Koshiha, "Optical Waveguide Analysis in Advanced Science and Technology Series", McGraw-Hill Inc., Ch. 1, 1992.
- [10] L. D. Green, "Fiber Optic Communication", USA : CRC Press, 1993, pp. 93 - 107.
- [11] 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\\_note09186a00800e6eeb.shtml](http://www.cisco.com/en/US/products/hw/optical/ps2006/products_tech_note09186a00800e6eeb.shtml), 2008.
- [12] นฤทธิ์สมเจริญ สำเภพล, "วิเคราะห์และแก้ไขปัญหาไฟเบอร์ออฟติคเคลื่อนตัวในสายเคเบิลไฟเบอร์ออฟติคชนิดหลอดหลอดเดี่ยว", การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสาร : ครั้งที่ 44 ระหว่างวันที่ 30 มกราคม – 2 กุมภาพันธ์ 2550 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] มอก. 2052-2548 เคเบิลเส้นใยนำแสง เล่ม 3 : ข้อกำหนดคุณลักษณะเคเบิลภายนอกอาคาร
- [14] ดิพร้อม ไชยวงศ์เกียรติ, “โพลีเมอร์และข้อต่อเต็ม การใช้ทางการเกษตร”, กรุงเทพฯ : อักษรสยามการพิมพ์, 2538, หน้า 1 - 5.
- [15] ทวีศักดิ์ กรีโส, “การเผ่าระวังการแทรกซึมของน้ำที่จะผ่านเข้าไปยังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว”, วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง : ปีที่16 ฉบับที่ 1 เดือนเมษายน 2551
- [16] **Characteristics of a Single-Mode Fiber Optic and Cable International Telecommunication Union(ITU-T) Recommendation G.652 (03/2003), pp.6-11**
- [17] SHIGERU TOMITA, HIROYUKI TACHINO, AND NOBUYUKI KASAHARA, “Water Sensor with Optical Fiber”, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL.8, NO. 12, DECEMBER 1990
- [18] **Fiber Optic Fundamentals Vol.17 ABC of the Telephone. Published by ABC Tleltraning, Inc.**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

กิจพัฒน์ ศรีอรทัยวรรณ, สุวิพล สิทธีชีวะภาค, นฤฤทธิ์สมเจริญ สำเภพล. “อุปกรณเฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วโดยใช้การตรวจจับสัญญาณที่สูง”. วิศวกรรมลาดกระบัง. ปีที่ 27, ฉบับที่ 2, มีนาคม 2553.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# อุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่าย เส้นใยแก้วโดยใช้การตรวจจับสัญญาณที่สูง

monitoring of water diffusion into the enclosures optical fiber  
network by high loss detection

กิตพัฒน ศรีอรทัยวรรณ\* นฤทธิ์สมเจริญ สำเภากล\*\* สุวิพล สิทธิชีวะภาค\*

\* ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
\*\* ส่วนนวัตกรรมระบบคอนน็อกและระบบป้องกันสถาบันนวัตกรรม ทีโอที บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน)

## บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนออุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำเข้ายังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วโดยใช้การตรวจจับการสูญเสียสัญญาณที่สูง เพื่อที่จะป้องกันผลเสียที่จะเกิดขึ้นกับเส้นใยแก้ว หลักการทำงานของอุปกรณ์ เมื่อมีน้ำซึมผ่านเข้ามายังอุปกรณ์เฝ้าระวังน้ำจะทำให้เกิดการโค้งงอของเส้นใยแก้ว ทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณภายในเส้นใยแก้ว และจะต้องมีค่าสูงพอที่จะสามารถตรวจวัดได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการสูญเสียสัญญาณภายในเส้นใยแก้วที่เกิดขึ้นจากในกรณีอื่น โดยที่การตรวจสอบน้ำเข้าหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วนั้นต้องใช้ควบคู่กับ optical Time Domain Reflectometer (OTDR) จะทำให้สามารถตรวจสอบตำแหน่งที่มีการแทรกซึมของน้ำที่เข้ามายังหัวต่อได้อย่างชัดเจน  
คำสำคัญ: ความโค้งงอความใหญ่, OTDR, หัวต่อ

## Abstract

In this paper, we present the monitoring of water diffusion into the enclosures optical fiber network by high loss detection. The principle of system considers the matter that the optical fiber will be bended when the water diffuses into enclosures. For this reason, the power loss will generate in the system and it must be high enough for the precision measurement to compare with the other loss. Then, the optical time domain reflectometer (OTDR) must be used together. Finally, the position of the water diffusion in the system will be detected.

Key Words: Macrobending, OTDR, Closure

## 1. บทนำ

ปัจจุบันนี้ความต้องการในการใช้งานอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง(Hi-Speed internet) นั้นมีมากขึ้น จึงทำให้มีการขยายปริมาณโครงข่ายเส้นใยแก้วมากขึ้น เพราะว่าเส้นใยแก้ว นั้นมีข้อดีคือ มีอัตราการส่งข้อมูลสูงมีการลดทอน

สัญญาณต่ำ และไม่ถูกรบกวนโดยสัญญาณทางไฟฟ้า และมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา เป็นต้น เส้นใยแก้วจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยกระหว่างชุมสายย่อยๆกับชุมสายใหญ่ หรือระหว่างชุมสายย่อยด้วยกันเอง หรือระหว่างชุมสายย่อยไปยังบ้านผู้ใช้งาน โดยตรงที่เรียกว่า Fiber To The Home (FTTH) จึง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เห็นว่าถ้าเกิดการเสียหายขึ้นกับเส้นใยแก้วจะทำให้ระบบการสื่อสารนั้นได้รับผลกระทบอย่างรุนแรง เพราะฉะนั้นการที่จะทำให้ระบบการสื่อสารสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องจำเป็นต้องมีการป้องกันดูแลเส้นใยแก้วเป็นอย่างดี

ภายในหัวต่อของเส้นใยแก้วจะเป็นจุดเชื่อมต่อกันของเส้นใยแก้ว ถ้าเกิดมีน้ำสามารถแทรกซึมผ่านเข้ามาภายในตัวต่อได้นั้น จะทำให้เกิดความเสียหายกับเส้นใยแก้วโดยตรงและจะส่งผลกระทบต่อโครงข่ายการสื่อสาร เพราะว่าบริเวณภายในหัวต่อของเส้นใยแก้วจะไม่มีสารที่ใช้ในการป้องกันการแทรกซึมของน้ำ น้ำที่แทรกซึมเข้ามาภายในหัวต่อของเส้นใยแก้วจะทำให้ไคโตดิ่ง ซึ่งทำหน้าที่หุ้มเส้นใยแก้วเสื่อมสภาพเร็วขึ้น และจะทำให้เส้นใยแก้วแตกหักได้ [4]

อุปกรณ์การตรวจสอบน้ำเข้าสู่หัวต่อที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้มีค่าการสูญเสียสัญญาณในเส้นใยแก้วที่ไม่สูงพอที่จะทำให้ระบบตรวจจับจะทำการแจ้งเตือน เนื่องจากว่าในพื้นที่แต่ละพื้นที่นั้นมีการตั้งค่าการแจ้งเตือนนั้นไม่เท่ากันในบางพื้นที่มีการตั้งค่าไว้ไม่สูงระบบการแจ้งเตือนก็จะสามารถทำงานได้ แต่ในบางพื้นที่นั้นอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำเข้าสู่หัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วได้ทำงานแล้ว แต่ว่าค่าการสูญเสียสัญญาณยังไม่ถึงจุดที่แจ้งเตือนไว้ จึงทำให้ต้องมีการออกแบบอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำเข้าสู่หัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้วแบบ high loss ขึ้น

## 2. การสูญเสียพลังงานแสงในเส้นใยแก้ว

การสูญเสียพลังงานแสงที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วมี 2 ลักษณะคือ

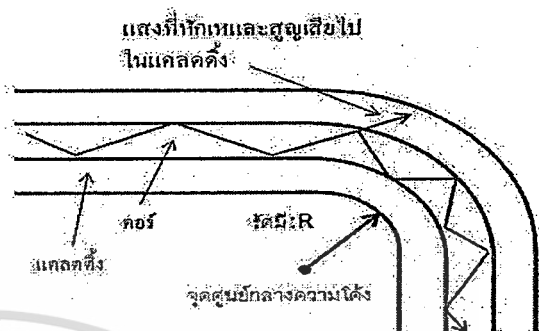
### 2.1 ความโค้งขนาดเล็ก (Microbending)

ลักษณะความโค้งของเส้นใยแก้วแบบนี้เกิดขึ้นในขบวนการผลิตเส้นใยแก้ว ความโค้งขนาดเล็กไม่สามารถสังเกตได้จากภายนอกของเส้นใยแก้ว

### 2.2 ความโค้งขนาดใหญ่ (Macrobending)

ความโค้งขนาดใหญ่เกิดจากการจัดวางเส้นใยแก้วไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรง อาจจำเป็นต้องจัดเส้นใยแก้วให้

โค้งงอไปมา เช่น การม้วนเคเบิลภายในบ่อพักสาย ซึ่งถือเป็นสิ่งจำเป็นที่อาจจะหลีกเลี่ยงในทางปฏิบัติ ความโค้งขนาดใหญ่สามารถสังเกตได้จากภายนอกของเส้นใยแก้ว



รูปที่ 1 การกระจายพลังงานแสงออกจากความโค้งขนาดใหญ่ของเส้นใยแก้ว

ในบทความนี้จะพิจารณา ความโค้งขนาดใหญ่ ที่มีรัศมีความโค้งมีค่าน้อย

จากรูปที่ 1 เมื่อแสงเดินทางไปถึงจุดที่เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ แสงจะเดินทางไปกระทบรอยต่อระหว่างคอร์กับแคลดดิ้ง ในลักษณะของมุมตกกระทบที่ทำให้เกิดการสะท้อนและหักเหตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) หากเส้นใยแก้วมีลักษณะความโค้งมีค่าน้อย หรือมีรัศมีความโค้งมาก แสงหักเหที่จุดนี้อาจไม่เกิดขึ้นและปรากฏการสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection : TIR) ยังคงมีอยู่ ทำให้ไม่มีการสูญเสียความเข้มของแสง แต่ถ้าเส้นใยแก้วมีรัศมีความโค้งมีค่าน้อย จนทำให้เกิดการหักเหของแสงเข้าไปในแคลดดิ้ง แสงที่สะท้อนและเดินทางต่อภายในคอร์ของเส้นใยแก้ว จะมีค่าลดลงตามสัดส่วนที่เสียไปกับแสงหักเห

ค่าการสูญเสียพลังงานแสง (Power Loss) ในเส้นใยแก้วที่เกิดจากความโค้งขนาดใหญ่ สามารถคำนวณค่าโดยประมาณได้จากสมการ (1) [1] และเมื่อแสงเดินทางผ่านเส้นใยแก้วที่มีลักษณะความโค้งเช่นเดียวกัน แสงที่มีความยาวคลื่นมากจะมีค่าการสูญเสียสัญญาณมากกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นน้อย [2]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ  $P_2$  คือค่าพลังงานแสงด้านรับ ( $mW$ )

$P_1$  คือค่าพลังงานแสงด้านส่ง ( $mW$ )

$\alpha$  คือค่าเฟคเตอร์ความลาดเอียงของกราฟที่เกี่ยวข้องกับค่าดัชนีหักเหของแสง

$\Delta$  คือค่าความแตกต่างของดัชนีหักเห (Refractive index difference) ระหว่าง คอร์และแคลดดิ้งของเส้นใยแก้ว

$d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของคอร์

$R$  คือรัศมีความโค้งของเส้นใยแก้ว

$\lambda$  คือความยาวคลื่นของแสง

$n_1$  คือค่าดัชนีหักเหของแสงในคอร์

$n_2$  คือค่าดัชนีหักเหของแสงในแคลดดิ้ง

$NA$  คือนิวเมอริคัล อะเพอเจอร์ (Numerical Aperture)

และสามารถหาค่าการสูญเสียพลังงานแสง (Power loss) ในหน่วยของ dB ได้จากสมการ (3)

$$P_{lost} = -10 \log \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (3)$$

การสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์เนื่องจากการทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอสามารถหาค่าได้จากสมการ(1)และสมการ(3)

กรณีเส้นใยแก้วเป็นชนิดสเต็ป-อินเด็กซ์ (Stepped-Index Fiber) ค่าของ  $\alpha = \infty$  (จากรูปที่ 2) ทำให้  $(\alpha + 2)/\alpha = 1$  ดังนั้น ในเทอมของ  $(\alpha + 2)/(2\alpha \Delta) = 1/2\Delta$  [3] เพราะฉะนั้นสามารถหาค่าการสูญเสียสัญญาณ ( $P_{loss}$ ) ที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วได้จากสมการ (4)

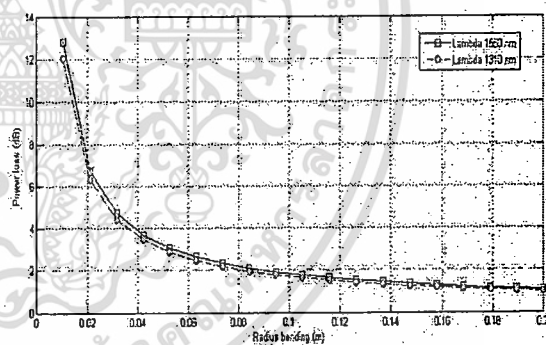
$$P_{loss} = -10 \log \left\{ 1 - \left( \frac{1}{2\Delta} \right) \left[ \frac{d}{R} + \left( \frac{3\lambda}{4\pi n_2 R} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \right\} \quad (4)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้  
กรณีเป็นเส้นใยแก้วชนิดโหมดเดียว (Single-mode Fiber)

$$d = 9.5 \mu m$$

$$n_1 = 1.467$$

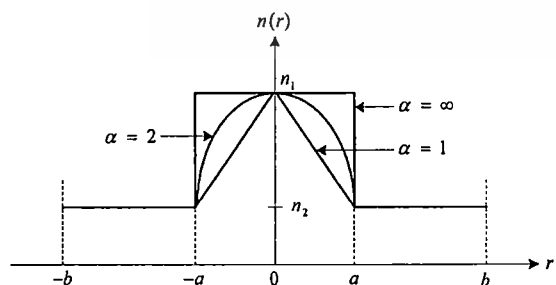
$$n_2 = 1.462$$



รูปที่ 3 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่นต่างๆของ Step-Index Fiber-SM ที่ได้จากการคำนวณ

### 3. การออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์

การออกแบบส่วนโค้งของอุปกรณ์ที่จะทำให้ได้ค่าการสูญเสียสัญญาณที่สูงนั้น จะต้องให้มีค่ารัศมีความโค้งของอุปกรณ์ที่มีค่าน้อย แต่จะต้องไม่สร้างความเสียหายให้กับเส้นใยแก้ว



รูปที่ 2 รูปร่างของกราฟที่แสดงค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วที่มีค่าของ  $\alpha$  ต่างๆ

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล กิจพัฒน์ ศรีอรทัยวรรณ

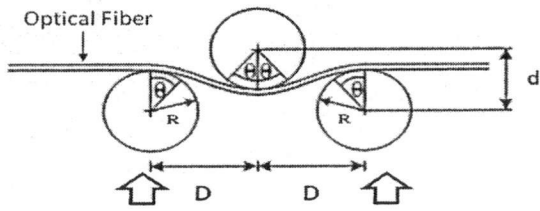
วัน เดือน ปีเกิด 18 กันยายน 2524

ที่อยู่ 25/1849 ซ.นวมินทร์ 111 แยก 5  
แขวงคลองกุ่ม เขตบึงกุ่ม กรุงเทพฯ 10230

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2545 สำเร็จการศึกษาจากคณะวิทยาศาสตร์บัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 ลักษณะการโค้งงอของเส้นใยแก้วที่เกิดจากอุปกรณ์

จากรูปที่ 4 แสดงลักษณะการโค้งงอของเส้นใยแก้ว ซึ่งมี ส่วนที่ทำให้เส้นใยแก้วโค้งงอ 3 ส่วน คือส่วนที่อยู่ด้านข้าง 2 ส่วน ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้จะเป็นส่วนที่เคลื่อนที่โดยที่จะเคลื่อนที่ขึ้นไปหาส่วนที่อยู่ตรงกลาง ซึ่งส่วนที่อยู่ตรงกลางจะเป็นส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ จะทำให้เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอตามความโค้งงอของอุปกรณ์ที่ได้ออกแบบไว้

จากรูปที่ 4 สามารถหาค่าผลรวมของมุม ( $\sum \theta$ ) ที่เกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้ว ได้ดังสมการ (5)

$$\sum \theta = 4\theta = 4 * \left\{ (\pi/2) - \cos^{-1} \left[ \frac{R}{\sqrt{(D^2 + d^2)/2}} \right] - \tan^{-1} (d/D) \right\} \quad (5)$$

เมื่อ  $\sum \theta$  คือผลรวมของมุม

$R$  คือรัศมีการโค้งงอของเส้นใยแก้ว

$D$  คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางความโค้ง

ด้านแนวนอน

$d$  คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางความโค้ง

ด้านแนวตั้ง

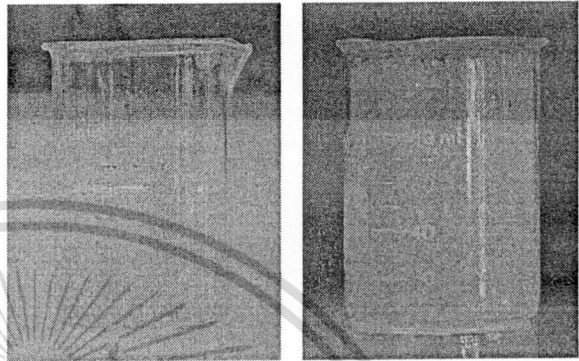
#### 4. สารโพลีเมอร์

โพลีเมอร์เป็นสารที่เกิดจากการสังเคราะห์ มีลักษณะโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) สำหรับโพลีเมอร์ที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์เฝ้าระวังการแทรกซึมของน้ำ เรียกว่า คอส-ลิงค์ โพลีเอครีลาไมด์ โคโพลีเมอร์ (Cross-linked Polyacrylamide Copolymer)

ถ้ามีปริมาณของน้ำมากพอมาสัมผัสกับโพลีเมอร์จะทำให้โพลีเมอร์สามารถขยายตัวหรืออูมน้ำได้ประมาณ 300-  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500 เท่าของน้ำหนักโพลีเมอร์แห้ง [5] โพลีเมอร์ที่มีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอนจะดูดซึมน้ำได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลา 5 นาทีแรก หลังจากนั้นการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และจะหยุดดูดซึมน้ำเมื่อถึงจุดอิ่มตัวใช้เวลาประมาณ 2-3 วัน



(1) เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที (2) เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง

รูปที่ 5 การขยายตัวของโพลีเมอร์เมื่อสัมผัสกับน้ำ

#### 5. อุปกรณ์การแทรกซึมน้ำเข้าหัวต่อ

จากรูปที่ 6 จะแสดงให้เห็นบริเวณพื้นที่ในภาคของเส้นใยแก้ว [6] ที่จะใช้ในการติดตั้ง อุปกรณ์การแทรกซึมน้ำเข้าหัว โดยพื้นที่ที่มีขนาดจำกัดดังนี้ มีความกว้าง 26 mm ความยาว 43.5 mm ความหนา 6mm [8]

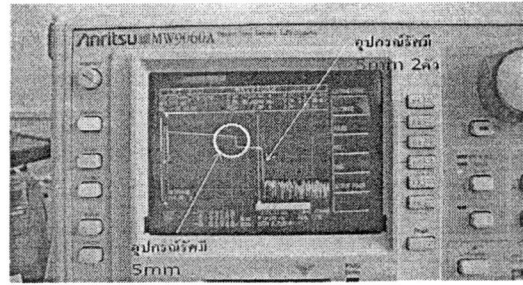


รูปที่ 6 บริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ในภาคของเส้นใยแก้ว

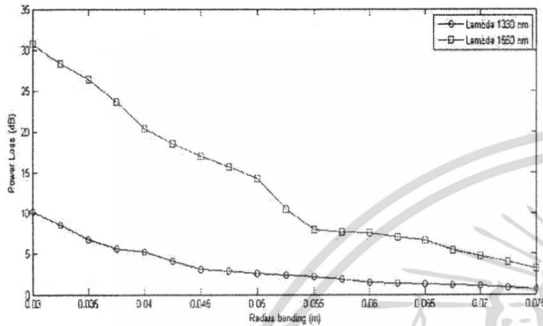
#### 5.1 การออกแบบส่วนโค้ง

จะทำการพิจารณาในกรณีที่เป็น เส้นใยแก้ว ชนิด single mode เนื่องจาก เป็นสายที่ใช้งานอยู่ใน

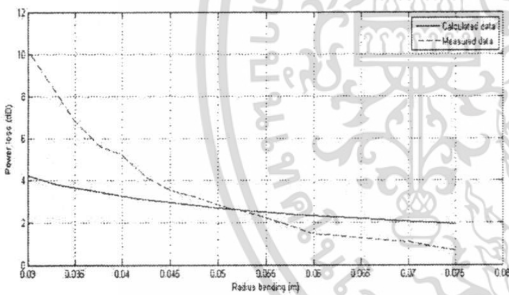
เพื่อที่จะหาค่าการสูญเสียสัญญาณภายในสายเส้นใยแก้วที่มีค่ามากที่สุดนั้น จึงได้ทำการทดลองวัดค่ารัศมีที่ไม่ส่งผลกระทบต่อเส้นใยแก้วจนเกิดความเสียหายหรือแตกหัก โดยที่สเปคของเส้นใยแก้วที่ใช้ในการทดลองนี้ มีค่ารัศมีต่ำสุดประมาณ 2.5 mm[7] แต่เพื่อความปลอดภัยจึงได้ ทำการทดลอง ที่ค่ารัศมีต่ำสุดที่ 3 mm



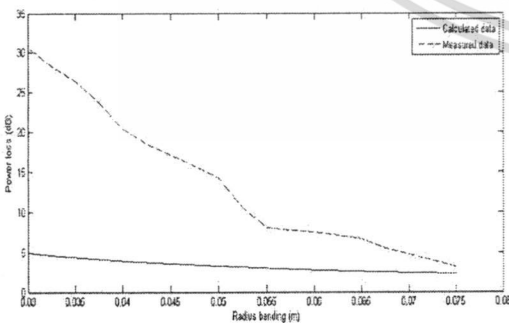
รูปที่ 10 กราฟที่ได้จาก OTDR ที่ใส่อุปกรณ์รัศมี 5 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับ อุปกรณ์รัศมี 5 มิลลิเมตร ที่มีส่วนโค้ง



รูปที่ 7 การสูญเสียสัญญาณที่ได้จากการวัด ที่ความยาวคลื่นต่างๆ



รูปที่ 8 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1,310 นาโนเมตร



รูปที่ 9 การสูญเสียสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1,550 นาโนเมตร

เพื่อที่จะหาค่าการสูญเสียสัญญาณที่สูงที่สุด จึงได้ทำการทดลอง โดยการที่เพิ่มจำนวนของการโค้งงอเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการสวนโค้งเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

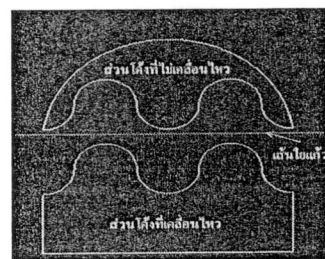
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ได้จาก OTDR นั้นมีความสูงที่มากขึ้นและยังเป็น เส้นความชันเดียว เพราะฉะนั้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนของการโค้งงอเข้ามาจะมีผลทำให้มีค่าการสูญเสียสัญญาณที่สูงขึ้น โดยที่ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าเท่ากับการรวมกันของ 2 ส่วน โค้ง

5.2 ลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์

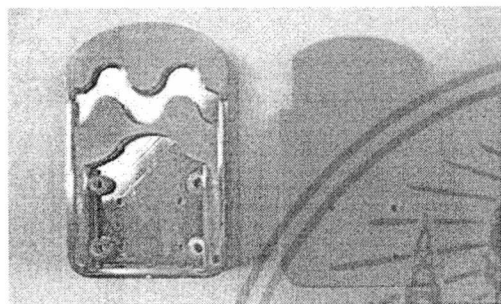
เนื่องจากพื้นที่ในถาดของเส้นใยแก้ว(Fiber Tray)นั้น มีอยู่จำกัด จึงสามารถที่จะออกแบบอุปกรณ์ที่มีค่าการสูญเสียสัญญาณที่มากที่สุด คือให้มีรัศมีของการโค้งงอ 3 มิลลิเมตร เป็นจำนวน 4 ครั้ง

หลักการทำงานของอุปกรณ์นั้นคือจะมีส่วนโค้งที่ไม่เคลื่อนที่ กับ ส่วน โค้งที่เคลื่อนที่แยกเป็น 2 ส่วน ดังนั้นการที่จะออกแบบลักษณะของโครงสร้างส่วน โค้งของอุปกรณ์ จะต้องคำนึงถึงระดับจุดสูงสุดของส่วน โค้งให้มีระดับเดียวกับทางเข้าและทางออกเส้นใยแก้ว เพื่อที่จะทำให้อุปกรณ์ไม่มีการ โค้งงอ ก่อนที่อุปกรณ์จะทำงาน



รูปที่ 11 รูปแบบของอุปกรณ์ที่มีรัศมี 3 มิลลิเมตร และมีจำนวนของการโค้งงอ 4 ครั้ง ที่ได้ทำการปรับ

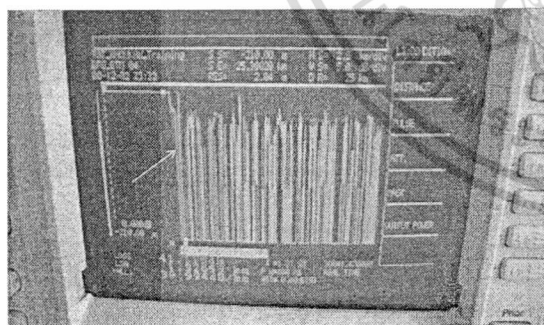
	ค่าการสูญเสีย สัญญาณ(dB)
ค่าที่ได้จากการวัดรีสมิ 3mm รวมกัน 4 ครั้ง(ก่อนที่ทำการปรับ ส่วนโค้ง)	40.88
ค่าที่ได้จากการวัดจากอุปกรณ์	max. 42.71
	ave. 41.12
	min. 39.53



รูปที่ 12 ต้นแบบอุปกรณ์

## 6.ผลการทดสอบ

การทดสอบอุปกรณ์เฟื่อระวังการแทรกซึมของน้ำเข้าไปยังหัวต่อกับเส้นใยแก้ว ชนิด single mode ที่ความยาวคลื่น 1310 nm



รูปที่ 13 กราฟที่ได้จากการทดสอบ OTDR ที่ ความยาวคลื่น 1310nm

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าการสูญเสียสัญญาณ

## 7.สรุป

จะเห็นได้ว่าเมื่อโพลีเมอร์ มีการขยายตัวดันลูกสูบจนทำให้เกิดการโค้งงอเต็มที่ จะทำให้เกิดการสูญเสียเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ และค่าเฉลี่ยที่วัดได้จากอุปกรณ์จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดรีสมิ 3mm รวมกัน 4 ครั้งก่อนที่จะทำการปรับส่วนโค้งซึ่งค่าการสูญเสียสัญญาณที่ได้นั้นมีค่าสูงพอที่จะทำให้ระบบการแจ้งเตือนทำงานได้ดี และ กราฟที่ได้จาก OTDR สามารถแสดงค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถที่จะตรวจสอบตำแหน่งที่เกิดการแทรกซึมของน้ำได้ง่าย

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. D. Green, "Fiber Optic Communication", USA : CRC Press, 1993, pp. 93 - 107.
- [2] อธิคม ฤกษ์บุตร, "เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น", พิมพ์ครั้งที่ 2 , กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2546.
- [3] D. J. H. Maclean, "Optical Line Systems", New York : John Wiley & Sons, 1996, pp. 83 - 87.
- [4] สถาบันวิชาการ ทีโอที, "Optical Fiber Overview", กรุงเทพฯ : ม.ป.ป.
- [5] ดิพร้อม ไชยวงศ์เกียรติ, "โพลีเมอร์และคอตเด็มการใช้ทางการเกษตร", กรุงเทพฯ : อักษรสยามการพิมพ์, 2538, หน้า 1 - 5.
- [6] นฤทธิสมเจริญ ตำภาพล, "วิเคราะห์และแก้ไขปัญหาไฟเบอร์ออฟติกเคลื่อนตัวในสายเคเบิลไฟเบอร์ออฟติกชนิดหลอดกลมเดี่ยว", การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ : ครั้งที่ 44 ระหว่างวันที่ 30 มกราคม - 2 กุมภาพันธ์
- [7] มอก. 2052-2548 เคเบิลเส้นใยนำแสง เล่ม 3 : ข้อกำหนดคุณลักษณะเคเบิลภายนอกอาคาร
- [8] ทวีศักดิ์ กริโส, "การเฟื่อระวังการแทรกซึมของน้ำที่จะผ่านเข้าไปยังหัวต่อของโครงข่ายเส้นใยแก้ว", วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง : ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือนเมษายน 2551