

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์ค่าโอเอสเอ็นอาร์ในโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็ม  
ระดับ 10 Gbps

OSNR Analysis of 10 Gbps WDM Network



กท.  
0399ก  
2551

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 87893  
วัน,เดือน,ปี..... 19 ส.ค. 2552

b.12025 231  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณี KMUTL-2008-EN-M-010-185 มอนูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# OSNR ANALYSIS OF 10 GBPS WDM NETWORK



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

**2008**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
KMUTL-2008-EN-M-010-185  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2008**

**FACULTY OF ENGINEERING**

เอก**KING MONGKUT'S INSTITUTE TECHNOLOGY LADKRABANG** ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ค่าโอเอสเอ็นอาร์ในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็ม ระดับ 10 Gbps
ชื่อนักศึกษา	นายวัฒนา วิเชียรสรณ์
รหัสประจำตัว	46064111
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. กอบชัย เดชหาญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ค่ากำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน หรือค่าโอเอสเอ็นอาร์ (OSNR) ของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม (WDM) ที่ระดับ 10 Gbps โดยใช้ตัวอย่างจริง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางที่ใช้เชื่อมโยงโครงข่ายหลักที่ให้บริการอยู่จากสถิติการวัด โดยทำการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์ของโครงข่ายที่จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้งานอยู่ตามจริง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าโอเอสเอ็นอาร์ในกรณีบวกค่าการลดทอนเข้าไปในระบบ เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์เพื่อเป็นวิธีการหาค่า OSNR ที่เหมาะสม จากนั้นได้จัดข้อมูลให้อยู่ในรูปของกราฟและตาราง ทำที่สุดได้ทำการเปรียบเทียบค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัดและจากการคำนวณตามสมการใน ITU-T G.692 เพื่อสรุปผลและนำเสนอแนวทางการบำรุงรักษาอย่างรวดเร็ว การวิเคราะห์และปรับปรุงโครงข่ายให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

<b>Thesis Title</b>	OSNR Analysis of 10 Gbps WDM Network
<b>Student</b>	Mr. Wattana Vichiensan
<b>Student ID.</b>	46064111
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2008
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Kobchai Dejhan

### ABSTRACT

This research studies and analyzes the optical signal to noise ratio (OSNR) of 10 Gbps WDM network by using the real sites which is one of backbone network section by measuring OSNR for the real wavelengths in use and OSNR of network with attenuation and number of wavelengths added. The objective is to test and study the effects when the number of wavelengths are increased while the attenuation of cables in the existing system. Then, the results are presented in graphs and tables. Finally, the OSNR is compared between the measured value and the calculated value from the equation of ITU-T G.692. The results of this study are concluded and will be used as guideline for network maintenance, analysis and effective network improvement.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยคำปรึกษาจาก รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ตลอดจนข้อคิดต่างๆ อันก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าและเป็นแนวทางในการจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณ บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) ที่ให้โอกาสด้านการศึกษา และข้อมูลในการจัดทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนการศึกษา

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาและทุนสนับสนุนการทำวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วัฒนา วิเชียรสรรค์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 การสื่อสารของระบบดับเบิลยูดีเอ็มผ่านเส้นใยแก้วนำแสง.....	4
2.1 หลักการเบื้องต้นของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม.....	4
2.2 ชนิดของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น.....	8
2.2.1 เทคนิคการเลือกความยาวคลื่น.....	8
2.2.2 เทคนิคแบบการกระจายและการเลือก.....	9
2.3 การมัลติเพล็กซ์.....	10
2.3.1 อุปกรณ์กระจายมุม.....	10
2.3.2 อุปกรณ์กรองแสง.....	12
2.4 แหล่งกำเนิดแสง.....	14
2.4.1 LED (Light Emitting Diode).....	14
2.4.2 Fabry-perot Diode Laser:.....	15
2.4.3 DFB Diode laser:.....	15
2.4.4 Frequency-Locked Laser:.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 โอเอสเอ็นอาร์ในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น.....	16
2.5.1 การออกแบบ Point-to-Point Link โดยใช้ค่า Q-Factor และ OSNR .....	16
2.5.2 การคำนวณ Q-factor จากโอเอสเอ็นอาร์ .....	18
2.5.3 การคำนวณโอเอสเอ็นอาร์สำหรับการเชื่อมโยงจุดต่อจุด.....	19
2.5.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับ Margin .....	21
<b>บทที่ 3 โครงสร้างของโครงข่ายหลัก.....</b>	<b>24</b>
3.1 โครงข่ายหลัก .....	24
3.2 อุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็มและเครื่องมือที่ทดสอบ.....	25
3.2.1 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ (MUX) และดีมัลติเพล็กซ์ (DMUX).....	25
3.2.2 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความยาวคลื่น.....	26
3.2.3 Optical amplifier, In-line/ Pre-amplifier/ Booster.....	28
3.2.4 Optical spectrum analyzer.....	31
3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ เครื่องวัดและขั้นตอนการทดสอบ.....	32
3.3.1 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด.....	32
<b>บทที่ 4 ผลการวัดและการวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์.....</b>	<b>35</b>
4.1 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานกับระยะทางจริง. ....	35
4.2 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานกับระยะทาง ที่เพิ่มค่าการลดทอน .....	41
4.3 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดเปรียบเทียบกับการคำนวณ .....	43
4.3.1 การคำนวณ OSNR จากสมการ ITU G.692 .....	43
4.3.2 การวิเคราะห์ผลโอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดเปรียบเทียบกับการคำนวณ.....	44
4.4 ผลการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์จากเครื่องมือวัด Optical Spectrum Analyzer (OSA)....	48
4.4.1 ตารางบันทึกผลการวัด.....	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 ผลการวัดสเปกตรัมจากเครื่องมือ Optical Spectrum Analyzer (OSA).....	51
4.4.2.1 ผลการวัดสเปกตรัมเส้นทางสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา และเส้นทางนครราชสีมาถึงสถานีพระโขนง (Route_1) .....	52
4.4.2.2 ผลการวัดสเปกตรัมเส้นทางสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีพิษณุโลก และเส้นทางสถานีพิษณุโลกถึงสถานีเชียงใหม่ (Route_2) .....	53
4.4.2.3 ผลการวัดสเปกตรัมเส้นทางสถานีพิษณุโลกถึงสถานีขอนแก่น และเส้นทางสถานีขอนแก่นถึงสถานีพิษณุโลก (Route_3).....	55
4.4.2.4 ผลการวัดสเปกตรัมเส้นทางสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา และเส้นทางนครราชสีมาถึงสถานีพระโขนงแบบเพิ่มการลดทอน 5 dB ในสายใยแก้วนำแสง (Route_1).....	57
4.5 คุณลักษณะ โอเอสเอ็นอาร์ในส่วนต่างๆ ของระบบดับเบิลยูดีเอ็มที่ใช้ทดสอบ .....	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	62
5.1 สรุปผล.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	77

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณสำหรับเทคนิคการกรองแบบต่างๆ.....	13
2.2 ความกว้างของสเปคตรัมสำหรับแหล่งกำเนิดต่างๆ .....	15
2.3 Insertion loss และ loss อื่นๆสำหรับการใช้งานที่ 1550 nm .....	22
2.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับ margin .....	23
3.1 รายละเอียดการเชื่อมโยงและค่าการลดทอนของแต่ละส่วน.....	25
3.2 แถบความถี่และช่องสัญญาณ .....	27
3.3 ตารางการบันทึกผลการวัดเส้นทางสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา.....	34
3.4 ตารางการบันทึกผลการวัดเส้นทางสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีพิษณุโลก .....	34
3.5 ตารางการบันทึกผลการวัดเส้นทางสถานีพิษณุโลกถึงสถานีขอนแก่น.....	34
4.1 ค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานใน Route 1.....	36
4.2 ค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานใน Route 2.....	37
4.3 ค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานใน Route 3 .....	39
4.4 ผลการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่เพิ่มค่าการลดทอนในเส้นทาง Route 1 .....	42
4.5 ผลการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ในเส้นทาง Route 1.....	45
4.6 การเปรียบเทียบ โอเอสเอ็นอาร์ระหว่างผลการคำนวณและผลการวัด .....	45
4.7 ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์เส้นทางสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา .....	48
4.8 ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์เส้นทางสถานีนครราชสีมาถึงสถานีพระโขนง .....	48
4.9 ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์เส้นทางสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีพิษณุโลก.....	49
4.10 ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์เส้นทางสถานีพิษณุโลกถึงสถานีเชียงใหม่.....	49
4.11 ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์เส้นทางสถานีพิษณุโลกถึงสถานีขอนแก่น .....	50
4.12 ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์เส้นทางสถานีขอนแก่นถึงสถานีพิษณุโลก .....	50
4.13 ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์แบบเพิ่มค่าการลดทอน 5 dB เส้นทางพระโขนง-นครราชสีมา....	51
4.14 ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์แบบเพิ่มค่าการลดทอน 5 dB เส้นทางนครราชสีมา-พระโขนง....	51
4.15 ค่าความแตกต่างระหว่างการวัดกับการคำนวณ .....	60
4.16 แสดงค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ปรับแต่งค่าชดเชย โอเอสเอ็นอาร์ .....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น .....	5
2.2 ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบ Bidirectional .....	7
2.3 ย่านการใช้งานสเปกตรัมในเส้นใยแก้วนำแสงแบบชนิด โหมดเดี่ยว.....	8
2.4 (ก) Wavelength routed multiplexing. (ข) Broadcast and select multiplexing.....	9
2.5 การแยกความยาวคลื่นที่ใช้การกระจายของมุมและเลนส์.....	11
2.6 เรขาคณิตสำหรับการสะท้อนของ grating ที่ด้านรับของ การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น	12
2.7 (ก) Distributed-feedback (DFB) amplifier, (ข) Distributed reflector (DFR) amplifier.....	14
2.8 ความสัมพันธ์ของ Q-Factor กับ BER .....	17
2.9 Q-Factor Penalty.....	17
2.10 ระบบ DWDM ที่มีการขยายแบบหลายขั้นที่นำมาใช้ใน Point-to-Point topology .....	19
3.1 โครงข่ายหลักที่ใช้ในการทดสอบ .....	24
3.2 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ (MUX) และดีมัลติเพล็กซ์ (DEMUX).....	26
3.3 อุปกรณ์ Line Optical Fiber Amplifier.....	29
3.4 Optical Spectrum Analyzer (OSA) (JDSU) รุ่น MTS8000 .....	31
3.5 Optical Spectrum Analyzer (OSA) ขณะทำการวัด.....	31
3.6 เส้นทางเชื่อมโยงระหว่างสถานีพระ โขนงถึงสถานีนครราชสีมา.....	32
3.7 เส้นทางเชื่อมโยงระหว่างสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีพิษณุโลก .....	32
3.8 เส้นทางเชื่อมโยงระหว่างสถานีพิษณุโลกถึงสถานีขอนแก่น.....	33
4.1 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานสถานีพระ โขนง .....	36
4.2 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานสถานีนครราชสีมา.....	37
4.3 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานสถานีเชียงใหม่ .....	38
4.4 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานสถานีพิษณุโลก (Route 2).....	38
4.5 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานสถานีพิษณุโลก (Route 3).....	39
4.6 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานสถานีขอนแก่น .....	40
4.7 กราฟแสดงค่าโอเอสเอ็นอาร์เทียบกับระยะทางสะสมใน Route 1 .....	40
4.8 ผลการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่เพิ่มค่าการลดทอนในเส้นทาง Route 1 .....	42
4.9 กราฟโอเอสเอ็นอาร์เปรียบเทียบการวัดกับการคำนวณ .....	46
4.10 แสดงค่าการวัดของ Channel margin ที่สถานีนครราชสีมา.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่ให้ผู้อื่นใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งที่สถานีพระโขนง .....	52
4.12 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านรับที่สถานีนครราชสีมา.....	52
4.13 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งที่สถานีนครราชสีมา.....	53
4.14 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านรับที่สถานีพระโขนง.....	53
4.15 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งที่สถานีเชียงใหม่.....	54
4.16 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านรับที่สถานีพิษณุโลก.....	54
4.17 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งที่สถานีพิษณุโลก.....	54
4.18 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านรับที่สถานีเชียงใหม่.....	55
4.19 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งที่สถานีพิษณุโลก.....	55
4.20 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านรับที่สถานีขอนแก่น.....	56
4.21 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งที่สถานีขอนแก่น.....	56
4.22 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านรับที่สถานีพิษณุโลก.....	57
4.23 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งแบบเพิ่มค่าลดทอน 5 dB ที่สถานีพระโขนง.....	57
4.24 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านรับแบบเพิ่มค่าลดทอน 5 dB ที่สถานีนครราชสีมา.....	58
4.25 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งแบบเพิ่มค่าลดทอน 5 dB ที่สถานีนครราชสีมา.....	58
4.26 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านรับแบบเพิ่มค่าลดทอน 5 dB ที่สถานีพระโขนง.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปริมาณความต้องการในการติดต่อสื่อสารข้อมูลในประเทศไทยได้มีอัตราการเจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นโครงข่ายของระบบการสื่อสารสัญญาณจะต้องมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้การรับส่งสัญญาณที่มีความเร็วที่สูง และมีระยะทางในการส่งสัญญาณที่ไกลขึ้นเพื่อสามารถรองรับการเจริญเติบโตที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ได้โดยมีประสิทธิภาพ ซึ่งระบบหนึ่งที่ได้นำมาใช้ก็คือเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น(Wavelength Division Multiplexing: WDM)บนโครงข่ายใยแก้วนำแสง ในทางปฏิบัติโครงข่าย WDM ยังเป็นโครงข่ายที่เชื่อมโยงกันด้วยเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง ทั้งยังมีเรื่องของค่าการสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นให้ต้องพิจารณาร่วมด้วย ในทางปฏิบัติค่าที่เป็นเครื่องบ่งชี้ว่าระบบดับเบิลยูดีเอ็มทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหนก็คือค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(Optical Signal to Noise Ratio: OSNR)ค่าของโอเอสเอ็นอาร์นี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายส่วนประกอบกันเช่น ระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสง ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสง Noise figure ของระบบ ขนาดของแอมพลิไฟเออร์เป็นต้น ผลของปัจจัยต่างๆเหล่านี้จะทำให้ระดับกำลังงานของโอเอสเอ็นอาร์ลดลง คุณสมบัติและความเชื่อถือได้ในการเชื่อมโยงการสื่อสารลดลง ดังนั้นในระบบดับเบิลยูดีเอ็มการออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ การปรับปรุง และการบำรุงรักษาอุปกรณ์ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลค่าโอเอสเอ็นอาร์ เป็นสิ่งจำเป็นที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบได้เป็นอย่างดี โดยได้นำสมการหาค่าโอเอสเอ็นอาร์จาก ITU-T G.692 มาพิจารณาในส่วนของการคำนวณ และค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการวัดค่าจริง นำมาเปรียบเทียบกับค่าคุณลักษณะของแต่ละช่วง เพื่อนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประมาณค่าโอเอสเอ็นอาร์เมื่อเกิดเหตุขึ้นกับระบบ หรือเพื่อการบำรุงรักษาโครงข่ายหลักให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาค่าโอเอสเอ็นอาร์ของระบบดับเบิลยูดีเอ็มบนโครงข่ายหลักที่มีการขยายเส้นทางเพิ่มขึ้นเพื่อให้โครงข่ายมีเสถียรภาพมากขึ้นพร้อมทั้งมีการขยายแพทพฟีกเพื่อรองรับกับการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น โดยการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการใช้งานความยาวคลื่นจริงกับค่าการลดทอนในเส้นใยแก้วตามระยะทาง กับการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่การใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความยาวคลื่นจริงกับค่าการลดทอนที่เพิ่มขึ้น ทำการบันทึกผลการวัดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่วัดได้จริง ออกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการคำนวณ และนำข้อมูลที่ได้อามาทำปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงกับการวัดค่าด้วยเครื่องมือวัด Optical Spectrum Analyzer: OSA นำข้อมูลเหล่านั้นมาวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ของระบบเพื่อการบำรุงรักษาโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

### 1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ระบบโครงข่ายดับเบิลยูติเอ็มเป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นบนโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงในทางปฏิบัติค่าที่เป็นเครื่องบ่งชี้ว่าระบบดับเบิลยูติเอ็มทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหนก็คือค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Optical Signal to Noise Ratio : OSNR) ค่าของโอเอสเอ็นอาร์นี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายส่วนประกอบกันเช่น จำนวนความยาวคลื่นในระบบ ระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสง ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสง Noise figure ของระบบ ขนาดของแอมพลิไฟเออร์เป็นต้น ผลของปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะทำให้ระดับกำลังงานของโอเอสเอ็นอาร์ลดลง คุณสมบัตินี้และความเชื่อถือได้ในการเชื่อมโยงการสื่อสารลดลง โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวัดค่า OSNR บนโครงข่ายหลักใน 3 เส้นทาง และคำนวณค่า OSNR จากค่าพารามิเตอร์ในแต่ละเส้นทาง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดกับค่าจากการคำนวณ ได้เป็นค่าคุณลักษณะในแต่ละเส้นทางซึ่งค่าคุณลักษณะนี้จะนำมาทำการปรับค่าพารามิเตอร์ให้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงในแต่ละเส้นทางเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณต่อไป

### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ดำเนินการวัดโอเอสเอ็นอาร์ใน 3 เส้นทาง (Route) ของระบบดับเบิลยูติเอ็มที่ใช้ในโครงข่ายหลักทั้งที่ความยาวคลื่นใช้งานจริงกับระยะทางการลดทอนในเคเบิล และที่ความยาวคลื่นใช้งานจริงกับระยะทางที่เพิ่มการลดทอน เพื่อทดสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโอเอสเอ็นอาร์ของระบบ จากผลการทดสอบพบว่าโอเอสเอ็นอาร์จะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าการลดทอนหรือระยะทางในการเชื่อมต่อของแต่ละ Route โดยในแต่ละ Route จะมีคุณลักษณะของโอเอสเอ็นอาร์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับระยะทางในช่วง (span) ของแต่ละ Route บันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแต่ละ span ของ Route นั้นเพื่อนำมาคำนวณประมาณการค่าโอเอสเอ็นอาร์จากคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละ Route เพื่อใช้ในการบำรุงรักษาโครงข่ายหลัก

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ปัญหาที่น่าสนใจ การเสนอหลักการใหม่

บทที่ 2 การสื่อสารของระบบดับเบิลยูดีเอ็มผ่านเส้นใยแก้วนำแสง กล่าวถึงหลักการสื่อสารของระบบดับเบิลยูดีเอ็มผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

บทที่ 3 โครงสร้างของโครงข่ายหลัก เสนอโครงสร้างของโครงข่ายหลักที่ใช้ในการทดสอบ การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ รวมทั้งโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ และขั้นตอนในการทดสอบ

บทที่ 4 ผลการวัดและการวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ เสนอผลการวัดและวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการทดสอบ รวมทั้งการวิเคราะห์คุณลักษณะโอเอสเอ็นอาร์ในส่วนต่างๆของระบบที่ใช้ทดสอบ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการกล่าวสรุปผลของการวิจัยและนำเสนอข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# การสื่อสารของระบบดับเบิลยูดีเอ็มผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและพื้นฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับระบบดับเบิลยูดีเอ็มเป็นความรู้พื้นฐานของการวิจัย เพื่อง่ายต่อการศึกษาในบทต่อไป เนื้อหาเริ่มจากทฤษฎีเบื้องต้นของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม การใช้ระบบดับเบิลยูดีเอ็มในโครงข่ายสื่อสารสัญญาณ โอเอสเอ็นอาร์ในระบบดับเบิลยูดีเอ็ม ซึ่งระบบดับเบิลยูดีเอ็มเป็นระบบที่นำมาใช้กันมากในปัจจุบันสำหรับการเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารสัญญาณที่มีขนาดใหญ่และระยะทางไกล โดยแสดงเป็นลำดับหัวข้อดังต่อไปนี้

### 2.1 หลักการเบื้องต้นของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม

คุณลักษณะเด่นที่สำคัญของโครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง ก็คือความยาวคลื่นค่าต่างกันจำนวนมากสามารถที่จะถูกส่งไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียวพร้อมกันในแถบสเปกตรัม 1300-1600 nm ได้ เทคโนโลยีของการรวมค่าความยาวคลื่นจำนวนมากแล้วส่งไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเพียงคู่เดียวถูกเรียกว่า การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งแยกเชิงความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing หรือ WDM) กล่าวคือในโครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงที่อาศัยเทคนิค WDM (โครงข่าย WDM) นั้นค่าความยาวคลื่นแสงต้องมีค่าห่างกันอย่างเหมาะสมเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการแทรกสอดระหว่างช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้กัน แต่ในการใช้งานของระบบนั้นจะพิจารณาค่าความยาวคลื่นในการรับส่งข้อมูลระหว่างกันแทนที่จะพิจารณาค่าความถี่ คุณลักษณะที่สำคัญของการมัลติเพล็กซ์แบบ WDM คือ

1. สามารถเพิ่มความจุในการส่งข้อมูลให้แก่โครงข่ายได้ จุดประสงค์หลักของการใช้งานเทคนิค WDM ในปัจจุบันนี้ยังคงเป็นการเพิ่มความจุให้แก่โครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงแบบจุดต่อจุด โดยแต่ละความยาวคลื่นแสงสามารถรองรับ 1 ช่องสัญญาณที่มีอัตราการส่งข้อมูลอย่างน้อยเท่ากับ 2-3 Gbps ได้หรืออย่างน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับอัตราการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ปลายทาง เทคนิค WDM นี้เป็นวิธีการที่สามารถเพิ่มความจุของโครงข่ายการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงได้สูงมากเนื่องจากแบนด์วิธของเส้นใยแก้วมีขนาดหลายร้อย THz แต่ไม่สามารถใช้ความจุของเส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากข้อจำกัดของความเร็วในการทำงาน และอัตราการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ปลายทาง เรียกข้อจำกัดนี้ว่า “Electronic Bottleneck”

2. มีความโปร่งใสในการส่งข้อมูล ประเด็นที่สำคัญของเทคนิค WDM คือแต่ละช่องสัญญาณแสงสามารถส่งผ่านข้อมูลที่มีรูปแบบการเข้ารหัสชนิดใดก็ได้ เนื่องจากมีการใช้ค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันหรือกล่าวได้ว่ามีความโปร่งใสในการส่งข้อมูล (transparency) โดย

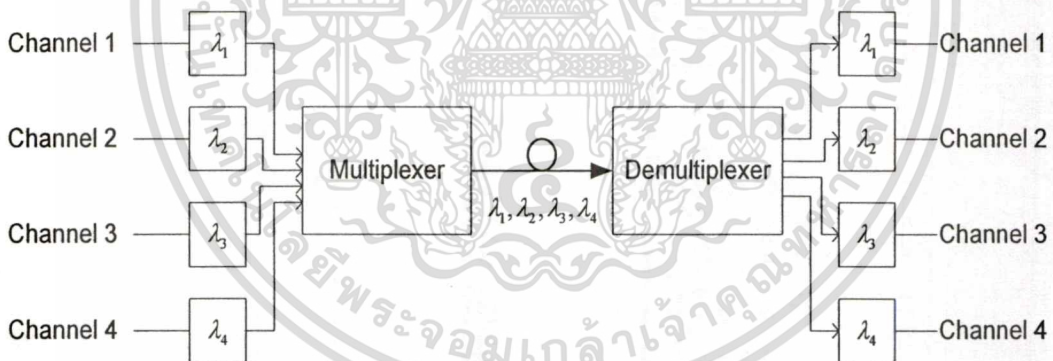
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการกระทำที่ผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลดิจิทัลหรือสัญญาณแอนะล็อกชนิดต่าง ๆ สามารถถูกส่งไปพร้อมๆ กันและอิสระต่อกันไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเพียงคู่เดียวได้โดยไม่สนใจโครงสร้างของข้อมูลที่แตกต่างกัน

3. สามารถกำหนดเส้นทางในการส่งข้อมูลโดยใช้ค่าความยาวคลื่นที่เป็นแบบไดนามิก และมีความยืดหยุ่นสูง นอกเหนือจากการใช้ค่าความยาวคลื่นจำนวนมากในการเพิ่มความจุและเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่ระบบแล้ว การใช้อุปกรณ์ในการกำหนดเส้นทาง (routing) โดยใช้ค่าความยาวคลื่นนั้นก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ดีและเหมาะสมในการใช้งาน นอกเหนือจากการใช้เวลา (time division multiplexing) และสเปซ (Space division multiplexing) ในการรับส่งข้อมูลในโครงข่าย [1]

ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นเป็นระบบมัลติเพล็กซ์ที่ใช้คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันเป็นคลื่นพาห้สำหรับนำข้อมูล โดยแสงทั้งหมดจะถูกรวมกันก่อนส่งออกไปในเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวกันด้วยออปติคอลลิตซ์เบิลอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งจะสามารถบรรจุข้อมูลได้หนึ่งชุดและข้อมูลแต่ละชุดนี้อาจเป็นข้อมูลเดี่ยวของหนึ่งช่องสัญญาณหรืออาจเป็นข้อมูลจำนวนมากที่มาจากหลายช่องสัญญาณที่ได้จากการจัดระบบข้อมูลด้วยเทคนิคของ TDM (Time Division Multiplexing) หรือ SCM (Sub-carrier Multiplexing) มาแล้วก็ได้ [2]



รูปที่ 2.1 เทคนิคการรับส่งสัญญาณในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

ที่ภากรับข้อมูลแสงจะถูกแยกออกในแต่ละช่วงของความยาวคลื่นด้วยระบบกรองแสง สัญญาณแสงที่ถูกแยกแล้วจะถูกคีมอดูเลตด้วยวิธีการที่เหมาะสมกับขบวนการทางอินพุท

ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นหรือดับเบิลยูดีเอ็มเป็นเทคนิคที่ใช้เฉพาะระบบการสื่อสารข้อมูลทางแสง สามารถส่งข้อมูลได้เป็นจำนวนมากมหาศาล อย่างไรก็ตามการส่งแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันหลายค่าเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวจะมีผลเสียในทางปฏิบัติอยู่สองประการใหญ่ ๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ระยะระหว่างสถานีทวนสัญญาณของข้อมูลแต่ละช่องหรือแต่ละความยาวคลื่นแสงจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสง ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการกำหนดตำแหน่งของสถานีทวนสัญญาณ

2. การออกแบบระบบขยายสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์อาจมีความซับซ้อนเพราะจำนวนช่องสัญญาณมีจำนวนมาก เช่นเดียวกับกรณีของสถานีทวนสัญญาณทางแสงที่ต้องทำการขยายสัญญาณทุกค่าความยาวคลื่นไปพร้อมกัน

เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ในระบบจริงจึงใช้แสงที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกันมากในย่านความยาวคลื่น 1550 nm โดยแต่ละช่องสัญญาณอาจใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 1510 1530 1550 และ 1570 nm สำหรับการส่งข้อมูล 4 ช่องสัญญาณไปพร้อม ๆ กัน นอกจากนี้การเลือกใช้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 1550 nm จะทำให้การลดทอนสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนำแสงของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าเกือบเท่ากัน อีกทั้งยังสามารถใช้สถานีทวนสัญญาณแสงที่เป็นอุปกรณ์ EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) เพียงตัวเดียวเพื่อขยายสัญญาณทุกช่องสัญญาณไปพร้อมกันได้

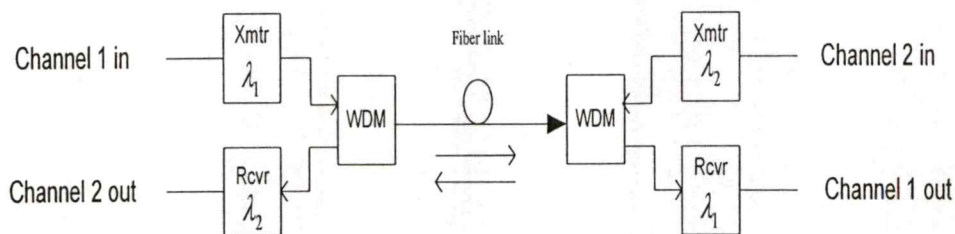
ค่าการลดทอนต่ำ ๆ นั้นสามารถรองรับการทำงานได้มากกว่าหนึ่งความยาวคลื่น การควบคุมการทำงานของความยาวคลื่น โดยใช้วัสดุผสมหรือโดยใช้ grating spacing ในเลเซอร์แบบ Distribution-Feedback (DFB) หรือเลเซอร์แบบ Distribution Bragg Reflector (DBR) ซึ่งทำหน้าที่เป็นออปติคอลลัมเพลอร์จะทำให้สามารถใช้ความยาวคลื่นหลาย ๆ ความยาวคลื่นในการเชื่อมโยงเดียวกันได้ ดังอธิบายในรูปที่ 2.1 ส่วนที่ด้านรับจะใช้อุปกรณ์กรองแสงหรืออุปกรณ์ที่มีความไวต่อความยาวคลื่น เช่น grating เพื่อที่จะแยกความยาวคลื่นแต่ละความยาวคลื่นออกจากคลื่นพาหะเดิม ระยะห่างระหว่างความยาวคลื่นจะมีระยะประมาณ 10 nm ปัจจุบันสามารถแยกช่องสัญญาณให้มีระยะห่างระหว่างความยาวคลื่นประมาณ 1 nm เรียกเทคนิคแบบนี้ว่า Dense WDM (DWDM)

อุปกรณ์ที่เป็นกุญแจสำคัญก็คืออุปกรณ์ที่รวมแสงจากหลาย ๆ แหล่งกำเนิดแสงที่ด้านส่ง (Couplers or multiplexers) และอุปกรณ์ที่ใช้แยกช่องสัญญาณออกจากกัน (Demultiplexers) ที่ด้านรับ นอกจากนี้ยังต้องการเทคนิคในการคงไว้ซึ่งความยาวคลื่นเดิมจากแหล่งกำเนิดที่มีการรวมความยาวคลื่นกันอีกด้วย [3]

การส่งสัญญาณแสงแบบสองทิศทาง (Bidirectional) สามารถใช้ในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นได้ด้วยการรวมแหล่งกำเนิดแสงและภาครับไว้ที่ปลายด้านเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.2 เส้นใยแก้วนำแสงมีย่านความยาวคลื่นใช้งานอยู่ประมาณ 800 nm ถึง 1600 nm (มีค่าการลดทอนที่เกี่ยวข้องกับ OH<sup>-</sup> ion ที่ความยาวคลื่น 1400 nm และ 1250 nm ค่าการลดทอนเหล่านี้จะไม่มีผลสำคัญสำหรับการเชื่อมโยงที่มีระยะทางสั้น ๆ แต่ค่าการลดทอนเหล่านี้จะเพิ่มความสำคัญขึ้นตามระยะทางของการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น) การส่งสัญญาณในเส้นใยแก้วมีการระบุ

แยกการเป็นของแสงในช่วงความยาวคลื่นใช้งานเพื่อลดการรบกวนกัน ไปออกนอกหน้าต่างไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

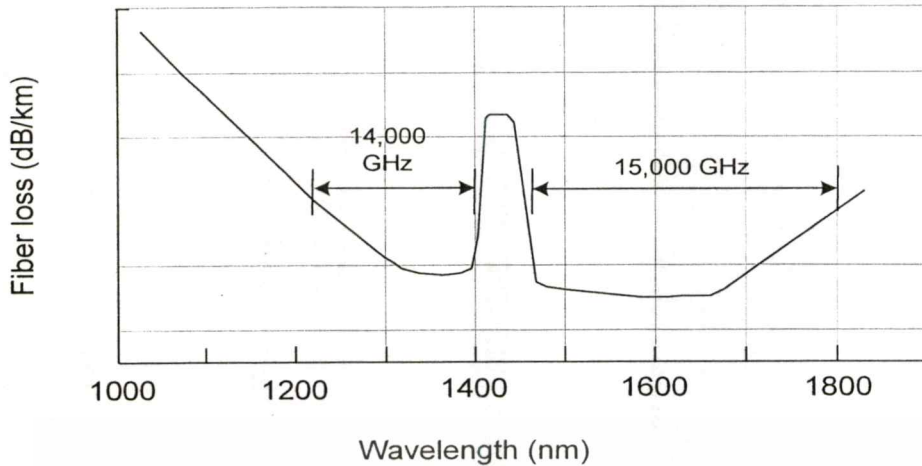
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบ Bidirectional

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าย่านการทำงานของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (single-mode fiber) ที่มีค่าการสูญเสียของแบนด์วิดท์ (bandwidth loss) ต่ำ จะอยู่ที่ย่านความยาวคลื่น 1300 nm มีความถี่ประมาณ 14000 GHz มีค่าสูญเสียต่อระยะทางประมาณ 0.4 dB/km ค่าการแพร่กระจายแสง (Dispersion) ซึ่งหมายถึงลักษณะของการขยายออกของสเปกตรัมแสงที่ส่งผ่านไปนในเส้นใยแก้วนำแสง มีหน่วยเป็น  $\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  และด้วยแกนของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด single-mode ที่มีขนาด 10  $\mu\text{m}$  จะมีค่าการแพร่กระจายแสงที่ย่านความยาวคลื่น 1260 - 1360 nm ประมาณ  $4 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  (ผลของ dispersion จะเห็นได้ชัดเมื่อค่าเกินกว่า 20% ของ bit period) และจากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าที่ความยาวคลื่น 1550 nm ย่านการทำงานของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวที่มีค่าการสูญเสียของแบนด์วิดท์ต่ำจะมีความถี่ประมาณ 15000 GHz มีค่าสูญเสียต่อระยะทางประมาณ 0.2 dB/km ด้วยค่าการแพร่กระจายแสงประมาณ  $18 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  ค่าการแพร่กระจายแสงนี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยใช้เทคนิค dispersion shifting คือลักษณะการนำใยแก้วนำแสงที่เรียกว่า dispersion-shifted fiber (DSF) ที่มีการดูดซับกำลังงานน้อยที่สุดสำหรับใยแก้วซิลิกา มาประยุกต์ใช้เพื่อทำให้ค่าการแพร่กระจายแสงมีค่าต่ำสุดในย่านความยาวคลื่น 1550 nm หรือโดยการลดระดับพลังงานของแหล่งกำเนิดพลังงานของไลน์วิดท์ (Line width)

สำหรับการเชื่อมโยงที่มีระยะทางไกล ๆ และมีอัตราการส่งข้อมูลสูง สามารถใช้ย่านความยาวคลื่นจาก 1250 ถึง 1350 nm และ 1450 nm ถึง 1600 nm โดยเมื่อรวมช่วงความยาวคลื่นใช้งานทั้งสองย่านเข้าด้วยกันจะมีผลรวมของความยาวคลื่นเป็น 250 nm



รูปที่ 2.3 ย่านการใช้งานสเปกตรัมในเส้นใยแก้วนำแสงแบบชนิดโหมคเดี่ยว

ขอบเขตของการส่งสัญญาณสามารถใช้ประโยชน์ได้สูงสุดด้วยวิธีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing: WDM) โดยการรวมความยาวคลื่นที่มีหลากหลายแหล่งกำเนิดความยาวคลื่นที่ด้านส่งและแยกความยาวคลื่นเหล่านี้ที่ด้านรับ หลักที่สำคัญก็คือการที่สามารถนำสัญญาณที่เป็นทั้งสมมาตรและไม่สมมาตร (synchronous and asynchronous) และสัญญาณอานาล็อกส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการใช้ประโยชน์แบนด์วิดท์ของเส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างสูงสุด [3]

## 2.2 ชนิดของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ เทคนิคการเลือกความยาวคลื่น (wavelength – selective techniques) และเทคนิคการกระจาย (broadcast techniques)

### 2.2.1 เทคนิคการเลือกความยาวคลื่น (Wavelength – selective WDM)

กำลังงานทั้งหมดจะให้แก่ความยาวคลื่นใดคลื่นหนึ่งเพียงหนึ่งส่วนและกำลังงานที่เหลือก็จะถูกใช้ในความยาวคลื่นอื่น ๆ ที่ถูกแยกออกไป ถ้าไม่คิดรวมการสูญเสียที่เพิ่มขึ้น (Insertion loss) สามารถเชื่อมโยงได้ดังนี้

$$P_{out}(\lambda_j) = P_{in}(\lambda_j) \quad (2.1)$$

จำนวนของแสงที่รั่วไหลจากช่องสัญญาณหนึ่งไปยังอีกช่องสัญญาณอื่น ๆ เรียกว่าการแทรกสอดหรือการไขว้แทรก (Crosstalk) ในระบบที่ไม่มีการเชื่อมโยงกันสามารถอธิบายได้จากช่องสัญญาณ  $j$  เข้าสู่ช่องสัญญาณ  $i$  ในหน่วย dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

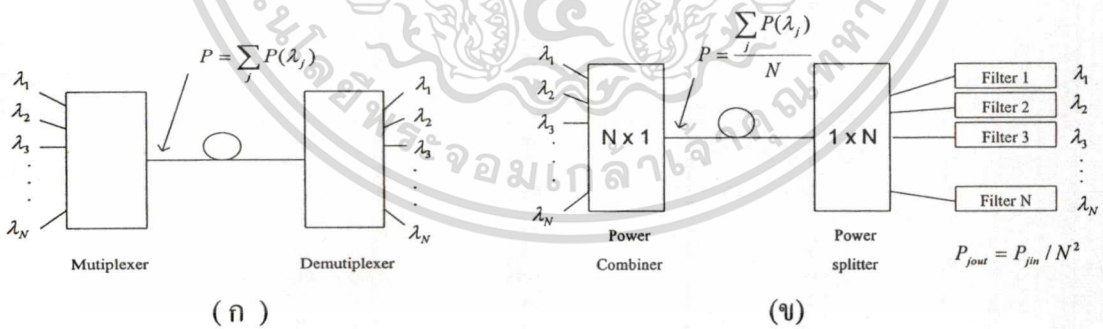
$$CT_{ij} = 10 \log (P_{ij} / P_{ii}) \tag{2.2}$$

เมื่อ  $P_{ij}$  คือกำลังงานที่วัดได้ที่ช่องสัญญาณ  $i$  ในขณะที่มีแสงผ่านช่องสัญญาณ  $j$  และมีการรบกวนเข้ามาในช่องสัญญาณ  $i$  ขณะเดียวกัน  $P_{ii}$  เป็นกำลังงานที่วัดที่ช่องสัญญาณ  $i$  และเป็นช่องสัญญาณที่มีแสงผ่าน

เทคนิค wavelength – routed WDM อธิบายในรูปที่ 2.4 ก แหล่งกำเนิดความยาวคลื่นที่แยกจากกันจะถูกกำหนดความยาวคลื่นของแต่ละแหล่งกำเนิด กำลังงานของแต่ละแหล่งกำเนิดทั้งหมดจะรวมกัน โดยปราศจากการสูญเสีย (ในอุดมคติ) ดีมัลติเพล็กซ์ที่ด้านรับปลายทางจะมีความไวต่อความยาวคลื่น ดีมัลติเพล็กซ์จะทำการแยกความยาวคลื่นแต่ละความยาวคลื่นออกจากกันและส่งไปยังเส้นทางที่แตกต่างกันที่ด้านรับ โดยแต่ละเส้นทางจะมีความยาวคลื่นที่ไม่เหมือนกัน (เป็นการแยกออกทางอุดมคติที่ไม่มีการสูญเสีย) การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์จะมีประสิทธิภาพถ้าค่าการสูญเสียที่แทรกเข้ามา (insertion loss) มีค่าต่ำ จากช่องสัญญาณ  $i$  ในขณะที่ช่องสัญญาณ  $j$  เท่านั้นที่มีแสงผ่าน  $P_{ij}$  คือกำลังงานในช่องสัญญาณ  $i$  เมื่อมีเพียงช่องสัญญาณ  $i$  เท่านั้นที่มีแสงผ่าน crosstalk สามารถหาได้ด้วยการแยกออกเป็นคู่ ๆ หรือหาจากผลรวมคือ

$$CT_{Total} = 10 \log (\sum_j P_{ij} / P_{ii}) \tag{2.3}$$

เมื่อ  $\sum_j$  คือ ผลรวมของพลังงานจากทุกช่องสัญญาณที่วัดได้จากช่องสัญญาณ  $i$



รูปที่ 2.4 (ก) Wavelength – routed multiplexing. (ข) Broadcast- and – select multiplexing

2.2.2 เทคนิคแบบการกระจายและการเลือก

เทคนิคแบบการกระจายและการเลือก (Broadcast- and -select Techniques) (รูปที่ 2.4 ข) เป็นการรวมกำลังงานของแหล่งกำเนิดที่ด้านส่งและแบ่งผลรวมของกำลังงานที่ถูกรวมนี้นี้ด้วยจำนวนของแหล่งกำเนิดทั้งหมด โดยที่ด้านรับจะรวมสัญญาณที่ถูกแบ่งกำลังงานที่เท่า ๆ กันนี้ให้ได้ผลรวม

ของกำลังงานดั้งเดิม อย่างไรก็ตามวิธีสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นแต่ละส่วนของด้านส่งจะถูกกำหนดไว้ก่อนอย่างแน่นอน ความยาวคลื่นทั้งหมดจะถูกส่งไปพร้อม ๆ กันไปยังด้านรับ ที่ด้านรับจะมีตัวกรองเป็นตัวแยกช่องสัญญาณ โดยกำลังงานที่ถูกแบ่งนี้จะไปถึงภาครับแต่ละตัวโดยผ่านการกรองให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการ

ระบบเทคนิคแบบการกระจายและการเลือกนี้ เป็นระบบที่ทำงานด้วยการแยกและรวมสัญญาณที่ไม่สลับซับซ้อนที่มีการสูญเสียที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์แต่ละส่วนเป็น  $1/N$  และมีค่าสูญเสียทั้งหมดเป็น  $1/N^2$  ดังนั้นจะสามารถหาค่ากำลังสูญเสียที่แต่ละช่องสัญญาณได้ คือ (ไม่รวม insertion loss)

$$P_{out}(\lambda_j) = P_{in}(\lambda_j) / N^2 \quad (2.4)$$

ค่าการสูญเสียที่ถูกแยกออกจากกันคือ  $1/N$  หรือ  $10 \log N$  dB (ไม่คิดรวมค่าสูญเสียอื่นที่เข้ามา) เมื่อตัดค่าสูญเสียนี้ออกไปก็สามารถทำการส่งสัญญาณได้โดยไม่ต้องใช้ตัวขยายแสง (Optical amplifier) ข้อได้เปรียบของระบบบรอดแบนด์เทคนิคคือแหล่งกำเนิดต้องการเพียงการปรับแต่งภายในพาสแบนด์ของสเปคตรัมฟิลเตอร์ให้มีการแบ่งความกว้างของสเปคตรัมอย่างเท่าเทียมกันและสม่ำเสมอ ระยะช่องว่างต่ำสุดของช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับคุณลักษณะความสูงชัน (steepness) ของคุณลักษณะของวงจรถองผ่านแสง (Passband filter) และจำนวนของการไขว้แทรก (crosstalk) ซึ่งตัวกรองที่เหมาะสมคือ Fabry-Perot laser amplifier ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำที่สามารถปรับค่าได้ integrated filter และ heterodyne receivers ดังนั้นจึงควรที่จะพิจารณาในเรื่องของส่วนประกอบทางแสงที่ใช้กับระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

## 2.3 การมัลติเพล็กซ์

ระบบบรอดแบนด์ดับเบิลยูดีเอ็ม (Broadband WDM) ใช้แบบของการแยกกำลังงาน (power splitter) และการรวม (combiners) ซึ่งแบนด์วิธของความยาวคลื่นที่สม่ำเสมอสามารถรวมและแยกกันได้มีมากถึง 400 nm ซึ่งเพียงพอที่จะใช้ย่านความยาวคลื่นที่ขยายงานการทำงานได้จาก 1250 nm ถึง 1600 nm

ระบบ Wavelength-selective WDM จะต้องมีมัลติเพล็กซ์ (Multiplex) และดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplex) ซึ่งมีเทคนิคที่สามารถใช้ได้หลายวิธีได้แก่การใช้ Diffraction grating Spectral filter หรือ Directional couplers โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแยกความยาวคลื่น 2 ชนิดคือ อุปกรณ์แพร่กระจายมุม (angular dispersion) และตัวกรอง (filter)

### 2.3.1 อุปกรณ์กระจายมุม

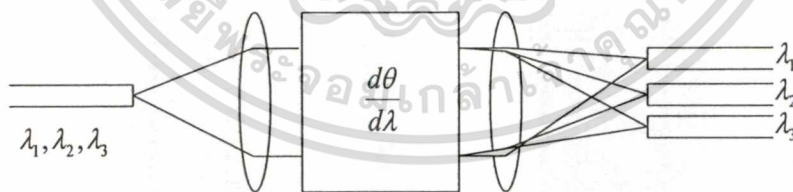
อุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายของมุม (Angular Dispersion Devices) (ตัวอย่างเช่น ปริซึม และ Gratings) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งแสงหรือสะท้อนแสงที่มุมต่าง ๆ เพื่อกำหนดความยาวคลื่นไม่วากรรณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแสงที่ปรากฏ (เช่น การหักเหของแสงที่อินพุท) ปัจจัยหลักที่กำหนดการทำงานของอุปกรณ์คือ ค่าการสูญเสียที่มากเกินไป (excess loss) และการแพร่กระจายมุมของอุปกรณ์ ค่า excess loss คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการที่แสงผ่านอุปกรณ์เกินกว่า  $1/N$  ของ splitting loss ซึ่งค่าการสูญเสียเหล่านี้เกิดจากธรรมชาติของอุปกรณ์ แถบความถี่กว้าง (wideband) ของอุปกรณ์ ซึ่งควรมีการกำหนดค่า excess loss ที่มีผลต่อการทำงานของความยาวคลื่น

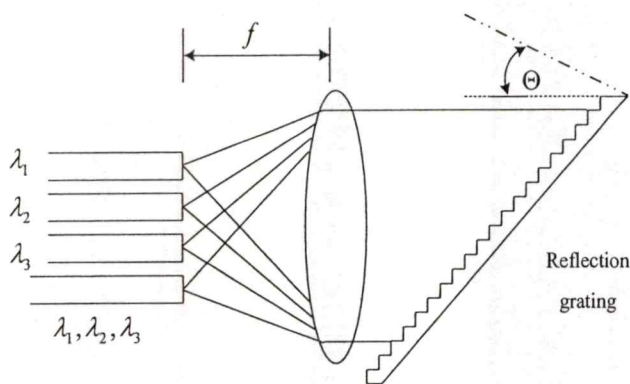
มุมการกระจายแสงของอุปกรณ์ (Angular dispersion) คือการวัดมุมเอียง  $d\theta$  ของลำแสงสองลำแสงที่เกิดขึ้นพร้อมกันที่อินพุทโดยแยกความยาวคลื่นด้วย  $d\lambda$  โดยจะได้มุมกระจายของแสงคือ  $d\theta/d\lambda$  การกระจายของมุมสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงมุมได้ด้วยการเพิ่มเลนส์เข้าไปดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการกระจายของมุมจะถูกวางหันหน้าไปในแนวจุดรวมแสงของเลนส์ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับแสงที่เข้ามาจะวางอยู่ในด้านหลังของเลนส์ในแนวจุดรวมแสง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายมุมของแสงจะต้องมีการหักเหของลำแสงในตัวของมันเอง รูปที่ 2.5 แสดงเลนส์ที่ใช้ในการหักเหแสงจะวางกั้นลำแสงที่มาจากอินพุทของเส้นใยแก้วนำแสงปลายของเส้นใยแก้วนำแสงจะถูกวางหันหน้าไปในแนวจุดรวมแสงของเลนส์ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายของมุมจะอยู่ในด้านหลังของเลนส์ในแนวจุดรวมแสง

ในระบบส่วนมากที่ใช้ในแบบการกระจายของมุม Grating จะเป็นอุปกรณ์ที่ถูกรวมอยู่กับเลนส์ (รูปที่ 2.6) grating คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสะท้อนหรือส่งแสงด้วยการใช้แผ่นเพลทที่วางเรียงไว้ใกล้ ๆ กันในแนวขนานกันหรือใช้เป็นแผ่นเพลทที่พื้นผิวของ grating โดยทั่วไปค่าการสูญเสียของอุปกรณ์ชนิดนี้จะต้องไม่มากกว่า 1-3 dB และระยะห่างของช่องสัญญาณที่แยกออกจากกัน 1-10 nm



รูปที่ 2.5 การแยกความยาวคลื่นที่ใช้การกระจายของมุมและเลนส์



รูปที่ 2.6 เรขาคณิตสำหรับการสะท้อนของ grating ที่คำนวณรับการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

### 2.3.2 อุปกรณ์กรองแสง

อุปกรณ์กรองแสง (Filtering Devices) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสะท้อนแสงหรือส่งแสง โดยขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ต้องการกรอง อุปกรณ์กรองแสงที่สามารถใช้ในการแยกความยาวคลื่นมีหลายชนิด ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของอุปกรณ์กรองแสงและแบนด์วิดท์ที่สามารถใช้งานได้ของอุปกรณ์กรองแสงแต่ละชนิด

1. Interference filters อุปกรณ์กรองแสงแบบนี้ส่วนมากใช้ฉนวน (Dielectric) ที่มีหลายชั้นรวมกันเป็นชุดเดียวกัน (เหมือนกับการใช้ตัวกรองแสงที่คูคคลื่นแสงของการถ่ายภาพ) ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาดในการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นที่ต้องการและมีค่า insertion loss ต่ำสุด อุปกรณ์กรองแสงแบบนี้จะยอมให้แสงผ่านเพียงความยาวคลื่นเดียว (ด้วยการตอบสนองความถี่) และสะท้อนแสงทุกความยาวคลื่นที่เหลือ ซึ่งความยาวคลื่นอื่นๆ โดยทั่วไปจะอยู่ห่างออกไปจากความยาวคลื่นศูนย์กลางของตัวกรองแสงมากกว่า 10% ของความยาวคลื่นศูนย์กลาง (ด้วยการออกแบบที่สลับซับซ้อนระยะห่างของความยาวคลื่นสามารถทำให้มีระยะห่างกันได้ 1% หรือที่ทุก ๆ 0.1% ของความยาวคลื่นศูนย์กลาง) สำหรับการทำงานที่มีช่องสัญญาณมากกว่าสองช่องสัญญาณ จำเป็นต้องมีการใช้อุปกรณ์กรองแสงจัดเรียงกันหลาย ๆ อุปกรณ์กรองแสงในรูปแบบอนุกรม ซึ่งจะเป็นการเพิ่ม insertion loss สำหรับการรวมอุปกรณ์กรองแสงแบบนี้จะเป็นเพียงการวางเรียงอุปกรณ์กรองแสงอนุกรมกันแบบขั้นบันไดสองหรือสามอุปกรณ์กรองแสง ในทางปฏิบัติจะมีความสัมพันธ์กับค่า insertion loss ที่สูงมาก ขอบเขตในการทำงานของระบบบรอดแบนด์จะสามารถทำงานแยกความยาวคลื่นได้ห้าหรือหกช่องสัญญาณ

ตารางที่ 2.1 แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณสำหรับเทคนิคการกรองแบบต่าง ๆ

Method	Typical channel bandwidth
Interface filters	5 nm
Fabry-Perot filter	0.1-10 nm
Tuned semiconductor amplifier	1-10 GHz
Heterodyne	1-10 GHz

2. Fabry-Perot resonator filter คือตัวกรองชนิด bandpass filter โดยจะส่งผ่านความยาวคลื่นแคบ ๆ และสะท้อนความยาวคลื่นอื่น ความถี่ในการกรองของ filter จะเกิดขึ้นที่ทุก ๆ  $c/2L$  เมื่อ  $c$  คือความเร็วแสงในอากาศ และ  $L$  คือระยะห่างระหว่าง mirror ของ resonator ช่วงเวลาที่เกิดการส่งผ่านนี้เรียกว่า free spectral rang (FSR) ของ interferometer ความถี่ของความกว้างของ filter bandpass มีค่า 3 dB (ต.ย. ความหนาแน่นสเปกตรัมของแสงที่ครึ่งหนึ่งของจุดสูงสุด) คือ  $\Delta f$  และมีความสัมพันธ์กับ FSR ด้วยการหาค่าจากค่า  $F$  ของ filter โดย

$$\Delta f = \text{FSR} / F \quad (2.5)$$

เมื่อ  $F = \pi \sqrt{R} / (1 - R)$  และ  $R$  คือค่าการสะท้อนแสงของ resonator mirror (สมมติว่า mirror ทั้งสองข้างของ resonator filter เหมือนกันทั้งสองด้าน) ค่าของการส่งต่ำสุดระหว่างจุดสูงสุดคือ  $(\pi / 2F)^2$

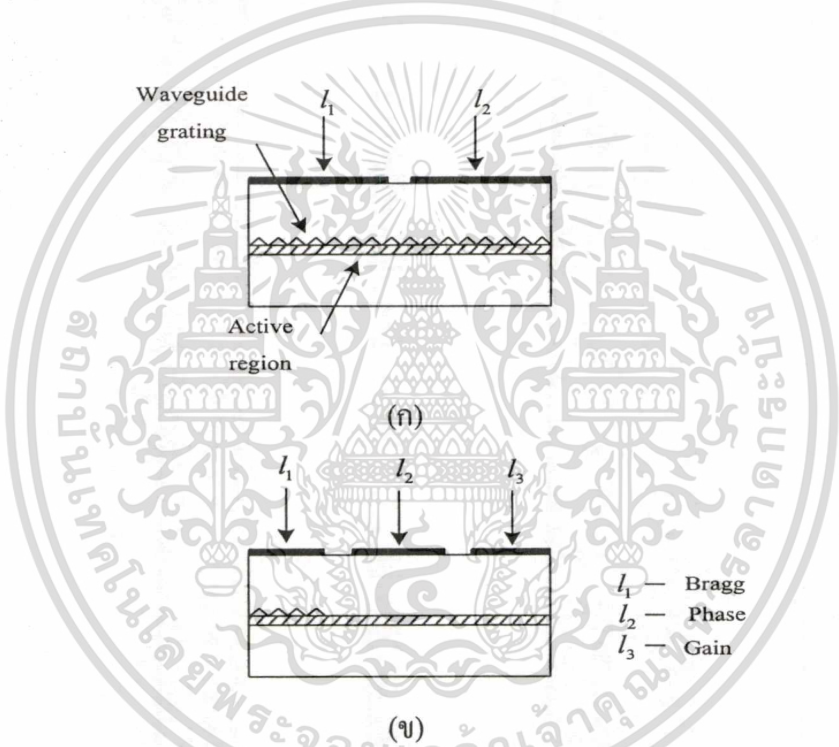
3. Semiconductor amplifier filter เป็นเลเซอร์ไดโอดที่มีการ pump ที่ต่ำกว่าค่า threshold และปรับแต่งการขยายแบนด์พาสด้วยพาสแบนด์แคบ ๆ ความถี่ศูนย์กลางกำหนดด้วยส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้ทำเลเซอร์ การใช้ distributed-feedback reflector (DFR) หรือ distributed-feedback reflector (DFR) เลเซอร์กับหลาย ๆ อิเล็กโทรด (แสดงในรูปที่ 2.7 ก) ซึ่งยินยอมให้สามารถปรับแต่งการขยายความยาวคลื่นได้ ในแบบ DFR (รูป 2.7 ข) กระแส  $I_1$  จะแปรผันตามช่วงเวลาการสะท้อนของเส้นใยแก้ว (และแปรผันตามความยาวคลื่นศูนย์กลางของการขยาย) กระแส  $I_2$  ควบคุมเฟสของการขยาย และ  $I_3$  ควบคุมกำลังงานในการ pump หรืออัตราการขยาย

4. Coherent detector with electronic filter coherent detection เป็นเทคนิคที่ใช้แหล่งกำเนิดที่มี linewidth ที่เล็กกว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณ เทคนิคแบบนี้สัญญาณจะถูกผสมกับสัญญาณอ้างอิงที่มีความถี่เคลื่อนไปจากเดิม (frequency-shifted reference signal) ที่มาจาก (frequency-locked local laser) การผสมสัญญาณที่รวมกลุ่มกันจะกำเนิดความถี่ที่แตกต่างกันขึ้น (เรียกว่า intermediate frequency) ระยะห่างของช่องสัญญาณกำหนดด้วยแบนด์วิดท์ของสัญญาณ

ที่ใช้วิธีการตรวจจับแสงจะยอมให้ใช้ช่องสัญญาณแคบ ๆ ได้ ซึ่งถูกแยกออกจากกันด้วยขบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ของภาครับ โดยใช้ตัวกรองอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความแม่นยำเที่ยงตรง ซึ่งจะดีกว่าการใช้ตัวกรองในรูปแบบแสง

## 2.4 แหล่งกำเนิดแสง

การสร้างระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นในทางอุดมคติจะต้องมีกำลังในการส่งที่เพียงพอมีเสถียรภาพและสามารถปรับแต่งความยาวคลื่นที่ต้องการได้รวดเร็วและแม่นยำ ตารางที่ 2.2 แสดงความกว้างของสเปกตรัมกับแหล่งกำเนิดที่เลือกมาใช้



รูปที่ 2.7 (ก) distributed-feedback (DFB) amplifier (ข) distributed- reflector (DFR) amplifier

### 2.4.1 LED (Light Emitting Diode)

โดยปกติการที่ Bandwidth ของ LED กว้างจะถือว่าเป็นข้อเสีย เนื่องจากผลของการแพร่กระจายของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งอาจเกิดขึ้น โดยการให้ความกว้างของสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดผ่านออกจากสเปกตรัมฟิลเตอร์ให้ได้ความกว้างที่แคบ ๆ เรียกเทคนิคแบบนี้ว่า สเปกตรัมสไลซิง (Spectral slicing) ด้วยวิธีนี้มีข้อได้เปรียบคือยินยอมให้ใช้แอลอีดีที่มีความสัมพันธ์ที่เหมือนกันได้หลากหลายมีราคาไม่แพง และใช้ตัวกรองที่แตกต่างกันในการเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการ การเลือกการกรองแบบนี้จะทำให้ระดับกำลังงานที่สามารถใช้สอยได้ของแหล่งกำเนิดของ

แอลอีดีมีไม่เพียงพอ ดังนั้นการลดลงของกำลังงานจะเป็นสัดส่วนกับการลดลงของแบนด์วิดท์ ทำให้ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เทคนิคแบบนี้เป็นเพียงการศึกษาที่ระยะทางเส้นใยแก้วสั้น ๆ และมีอัตราการส่งข้อมูลในการเชื่อมต่อ

ตารางที่ 2.2 ความกว้างของสเปกตรัมสำหรับแหล่งกำเนิดต่าง ๆ

Type	Typical spectral width	Typical spectral width
LED	50-100 nm (or more)	5000-10000 GHz
Fabry-Perot laser	3-6 nm	300-600 GHz
DFB laser	<0.01 nm	10-100 MHz
External cavity laser		<1 MHz

#### 2.4.2 Fabry-perot Diode Laser

Fabry-perot (FP) เลเซอร์โดยทั่วไปมี 6-8 วิธีในการ oscillating ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเป็น  $c / 2L$  Hz (โดยที่  $c$  คือความเร็วแสงในอากาศ และ  $L$  คือระยะห่างระหว่าง mirror ของ resonator) สำหรับเลเซอร์เหล่านี้โดยปกติจะมีความผิดพลาดเป็น  $\pm 3$  nm และมีความยาวคลื่นของ linewidth เป็น 6 nm การมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ (Multiplex and demultiplex) มีความผิดพลาดเป็น  $\pm 1$  nm และระยะช่องสัญญาณประมาณ 14 nm จะดีที่สุด (เลเซอร์ต้องการควบคุมอุณหภูมิซึ่งศูนย์กลางความยาวคลื่นมีสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิประมาณ  $0.4 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ ) และระหว่างช่องสัญญาณจะมีแถบป้องกัน (guard band) ที่มีระยะห่างเท่ากับความกว้างของช่องสัญญาณ นั่นคือระยะที่ใช้จริงจะต้องเป็น 28 nm/ ช่องสัญญาณ และถ้าความกว้างของ window เป็น 100 nm และ 150 nm ก็จะเหมาะสมกับการใช้งาน 3 และ 5 ช่องสัญญาณ ถ้ารวม 2 window เข้าด้วยกันก็จะเป็น 8 ช่องสัญญาณ

#### 2.4.3 DFB Diode Laser

Distributed-Feedback (DFB) laser เป็น diode laser ที่มีการทำงานเป็นชนิดโหมดเดี่ยว (single-mode) และมีความไวต่ออุณหภูมิต่ำประมาณ  $0.08 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  โดยทั่วไปความกว้างสเปกตรัมของเอาต์พุตคือ 10 ถึง 100 MHz ซึ่งความกว้างนี้เล็กกว่าความกว้าง spectral ของสัญญาณมาก (สำหรับอัตราข้อมูลสูง) หรือเล็กกว่าความยาวคลื่น "chirp" (การเปลี่ยนแปลงในความถี่ของผลลัพธ์แสงของเลเซอร์ ซึ่งเกิดจากการที่ความถี่เรโซแนนซ์ของ optical cavity มีการเลื่อนไป อันสืบเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ป้อนเข้าไปในเลเซอร์) ซึ่งถูกส่งมาพร้อมกับ output ของเลเซอร์ที่เป็น pulse ออกมา (ความยาวคลื่น chirp นี้สามารถขจัดออกได้ด้วยการใช้ continuous wave (CW) เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดและใช้การ modulator จากภายนอกทำการ modulator ข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์กลางผิดพลาดได้  $\pm 0.5$  nm (ตั้งสมมุติฐานว่ามีการควบคุมอุณหภูมิเลเซอร์) ความผิดพลาดของ chirp เป็น  $\pm 0.2$  nm และความผิดพลาดของ filter เป็น  $\pm 1$  nm ความกว้างช่องสัญญาณที่แท้จริงประมาณ 3.5 nm และการเพิ่ม guard band เท่ากับความกว้างช่องสัญญาณซึ่งความกว้างช่องสัญญาณมีค่าประมาณ 7 nm. ดังนั้นสามารถมีช่องสัญญาณได้ 14 และ 21 ช่องสัญญาณตามลำดับ ในการส่งสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสง

#### 2.4.4 Frequency-Locked Laser:

เลเซอร์สามารถทำงานได้ด้วย Automatic Resonance และด้วยอุณหภูมิและกระแสควบคุมป้อนกลับสามารถทำให้ได้ linewidth เล็ก ๆ ประมาณ 5 MHz ไลน์วิคท์ขนาดเล็ก ๆ นี้จึงทำให้กำหนด channel bandwidth ได้จาก signal bandwidth เท่านั้นโดยไม่ขึ้นกับ source linewidth ในกรณีนี้การคิมัลติเพล็กซ์เซอร์ไม่สามารถทำได้ด้วยตัวกรอง (filter) ที่ไม่สามารถปรับแต่งได้แต่จำเป็นต้องมีการปรับแต่งให้ bandwidth แคบเพื่อให้เหมาะสมกับ passband ของตัวกรองที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแต่เมื่อเป็น frequency-locked ก็ไม่สามารถจะทำการปรับแต่งเลเซอร์ได้ง่ายนัก แต่สามารถใช้เทคนิคอื่น คือ การชดเชยโดยใช้เลเซอร์ตัวที่สองจาก reference-locked laser มาทำการปรับแต่งแทน (หรือก็คือการกำหนดค่าเตรียมไว้ล่วงหน้า)

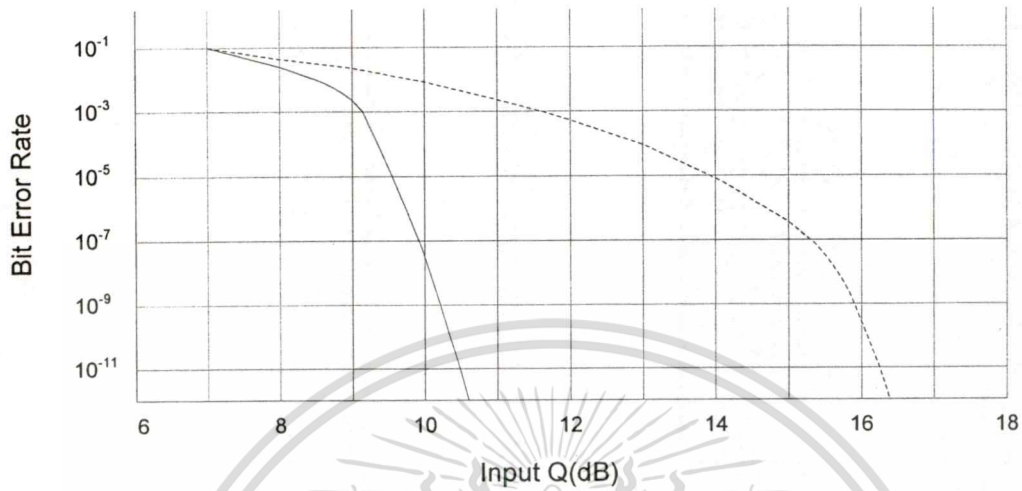
## 2.5 โอเอสเอ็นอาร์ในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

ในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นการวัดคุณภาพและประสิทธิภาพของสัญญาณในระบบค่าโอเอสเอ็นอาร์ (OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio) จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ชี้ว่าระบบมีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหน เนื่องจากค่าของโอเอสเอ็นอาร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า BER (Bit Error Rate) และ Q-Factor ซึ่ง Q-Factor เป็นตัวชี้ในเชิงคุณภาพของระบบแต่ค่าโอเอสเอ็นอาร์สามารถทำการวัดและทดสอบได้ง่ายกว่า ดังนั้นในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ การวัดและประมาณการค่าโอเอสเอ็นอาร์เพื่อการออกแบบหรือบำรุงรักษาระบบจึงทำได้สะดวกกว่าการหาค่า Q-Factor หรือ BER ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสามแบบนี้และสมการในการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ [9]

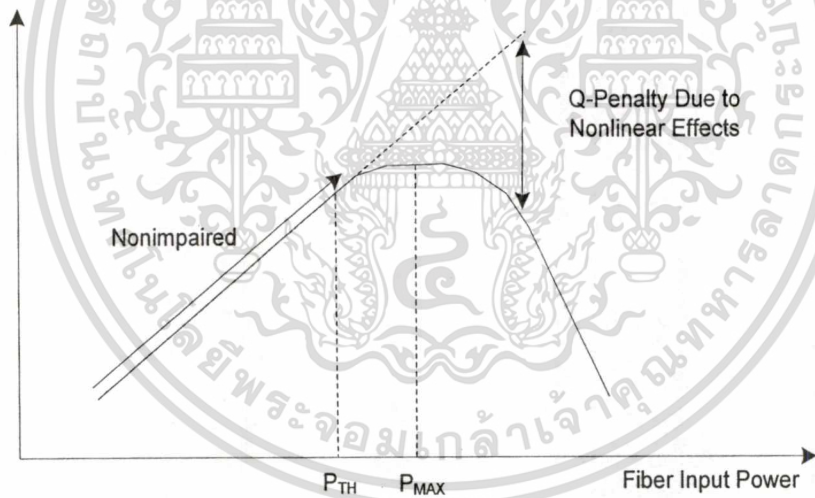
#### 2.5.1 การออกแบบ Point-to-Point Link โดยใช้ค่า Q-Factor และ โอเอสเอ็นอาร์

ในการออกแบบโครงข่ายนั้นเป็นเรื่องหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องให้การออกแบบระบบเป็นไปตามข้อกำหนด BER ของโครงข่าย การคำนวณ BER เป็นงานที่น่าสนใจถ้าหากว่าผู้ออกแบบมีเครื่องมือเช่นตารางการคำนวณและเครื่องคิดเลข โดยที่ Q-factor นั้นเป็นการอธิบายเชิงคุณภาพของสมรรถนะของเครื่องรับเนื่องจากเป็นฟังก์ชันของ SNR (optical) ดังนั้น Q-factor จะเป็นตัวบอกถึง SNR ต่ำสุดที่ต้องการเพื่อให้ได้ค่า BER เฉพาะค่าหนึ่งสำหรับสัญญาณที่ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ รูป 2.8 แสดงความสัมพันธ์ของ Q-factor กับ BER จะเห็นได้ว่ายิ่งค่าของ Q สูงขึ้น จะแสดงค่าเป็นเส้นประจะทำให้ค่า BER ก็จะมีค่าน้อยลง [11]



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของ Q-Factor กับ BER



รูปที่ 2.9 Q-Factor Penalty

สมการ 2.7 ใช้หาค่า Q-factor ของสัญญาณแสง

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.7)$$

ในสมการ 2.7 ตัวแปร  $I_1$  คือค่าของกระแสบิต 1 ตัวแปร  $I_0$  คือ ค่าของกระแสบิต 0 ตัวแปร  $\sigma_1$  คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระแสบิต 1 และตัวแปร  $\sigma_0$  คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระแสบิต 0 ความสัมพันธ์ของ Q-factor กับ BER นั้นแสดงในสมการ 2.8

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.8)$$

สำหรับการออกแบบที่ BER ค่าหนึ่ง (เช่น  $10^{-12}$  และความเร็วระดับ 155 Mbps) โคร่งข่ายจะมีความผิดพลาดอย่างหนึ่งในเวลาโดยประมาณคือสัปดาห์ อาจจะต้องใช้เวลา 1000 วันเพื่อบันทึกค่าสถานะคงที่ (Steady State BER) จึงเป็นการยากที่จะคำนวณค่า BER แต่อีกนัยหนึ่งการวิเคราะห์ Q-factor นั้นง่ายเมื่อเทียบกับอย่างอื่น Q-Factor นั้นมักจะวัดในหน่วย dB ซึ่งสามารถหาได้จากโอเอสเอ็นอาร์

### 2.5.2 การคำนวณ Q-factor จากโอเอสเอ็นอาร์

โอเอสเอ็นอาร์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงที่กำหนดให้เป็นปริมาณที่วัดได้ (ในทางปฏิบัติ) สำหรับ โคร่งข่ายที่กำหนดให้และสามารถคำนวณได้จากพารามิเตอร์ของระบบที่กำหนดให้ หัวข้อต่อไปนี้จะแสดงวิธีคำนวณโอเอสเอ็นอาร์และอธิบายถึงความสัมพันธ์ของ โอเอสเอ็นอาร์กับ Q-factor

ค่าอัลกลอริทึมของ Q (หน่วย dB) นั้นมีความสัมพันธ์กับ โอเอสเอ็นอาร์ตามสมการ 2.9

$$Q_{dB} = 20 \log \sqrt{OSNR} \sqrt{\frac{B_0}{B_c}} \quad (2.9)$$

ในสมการ  $B_0$  คือ Optical bandwidth ของอุปกรณ์ปลายทาง (photodetector) และ  $B_c$  คือ Electrical bandwidth ของ Receiver filter

ดังนั้น  $Q$ (dB) จะแสดงได้ดังในสมการ 2.10

$$Q_{dB} = OSNR + 10 \log \frac{B_0}{B_c} \quad (2.10)$$

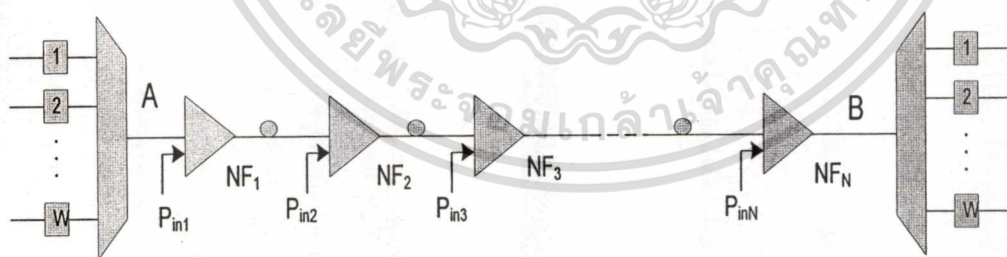
อาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า  $Q$  ก่อนข้างจะเป็นสัดส่วนกับ โอเอสเอ็นอาร์ โดยทั่วไปแล้ว การคำนวณสัญญาณรบกวน (noise) จะใช้เครื่อง Optical spectrum analyzer (OSAs) หรือ Sampling oscilloscope และการวัดเหล่านี้จะถูกกระทำในช่วงการวัดเฉพาะของ  $B_m$  โดยแท้จริงแล้ว  $B_m$  มีค่าประมาณ 0.1 nm หรือ 12.5 GHz สำหรับ OSA ที่กำหนด จากสมการ 2.10 แสดงให้เห็น  $Q$  มีหน่วยเป็น dB ในเทอมของโอเอสเอ็นอาร์จะเห็นได้ว่าถ้า  $B_0 < B_c$  แล้ว  $OSNR$ (dB)  $>$   $Q$ (dB) สำหรับไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบในทางปฏิบัตินั้น โอเอสเอ็นอาร์(dB) > Q(dB) อย่างน้อยที่สุด 1-2 dB ในขณะที่การออกแบบระบบที่มีบิตเรตสูงในทางปฏิบัตินั้นค่า margin หรือค่าขอบเขตของการชดเชยของเครื่องรับจะมีค่าประมาณ 2 dB เพื่อให้ Q มีค่าน้อยกว่าโอเอสเอ็นอาร์(dB) ประมาณ 2 dB

### 2.5.3 การคำนวณโอเอสเอ็นอาร์สำหรับ Point-to-Point Link

พิจารณา physical link AB ดังแสดงในรูป 2.10 สมมติว่าเป็น เส้นทางการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นที่ใช้ในระยะทางไกล แอมพลิฟายเออร์ถูกวางเป็นระยะ ๆ โดยมีระยะห่างเท่า ๆ กันเพื่อขยายกำลังของสัญญาณ ดังนั้นจะทำให้สัญญาณสามารถไปได้ไกลกว่าค่าการสูญเสียสะสมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของเส้นใยแก้วนำแสง อย่างไรก็ตามในการจะทำเช่นนี้ว่าแอมพลิฟายเออร์แต่ละชั้นจะต้องเพิ่มองค์ประกอบของ Amplified Spontaneous Emission (ASE) สัญญาณรบกวน (noise) และทำให้การลดทอน โอเอสเอ็นอาร์มากขึ้นไปอีก ยิ่งไปกว่านั้นแอมพลิฟายเออร์ทุกตัวขยายสัญญาณรบกวนที่ปรากฏอยู่แล้วด้วย ให้สังเกตว่าสัญญาณรบกวนนี้แทรกแซงอยู่ทั่วไปตลอดทั้งสเปกตรัมและแทบจะเป็นไปไม่ได้ที่จะเอาออกไป ดังนั้นจึงเป็นเรื่องหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะคิดหาวิธีที่จะคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ (output) ที่จุดปลายของระบบที่มีการขยายสัญญาณ  $N$  ชั้นและหาว่ามีค่า  $N$  ที่สมเหตุสมผลหรือไม่

ในการออกแบบโดยใช้โอเอสเอ็นอาร์นั้นต้องให้แน่ใจว่า โอเอสเอ็นอาร์ของชั้นสุดท้ายนั้นตรงกันกับข้อกำหนดโอเอสเอ็นอาร์ของระบบและทำให้เป็นไปตามข้อกำหนด BER ด้วย ในการทำให้ระบบได้ BER ค่าที่ต้องการจึงเป็นเรื่องจำเป็นที่จะต้องออกแบบระบบโอเอสเอ็นอาร์ให้ตรงตามข้อกำหนด



รูปที่ 2.10 ระบบ DWDM ที่มีการขยายแบบหลายชั้นที่นำมาใช้ใน Point-to-Point topology

โอเอสเอ็นอาร์ ของแต่ละชั้นแสดงในสมการ 2.11

$$OSNR = \frac{P_{in}}{NF_{stage} h\nu\Delta f} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการ 2.11  $P_{in}$  คือค่าของกำลังงานที่ส่งเข้าไปในแอมพลิฟายเออร์ของแต่ละชั้น  $NF_{stage}$  คือ Noise Figure ของชั้นนั้น ๆ  $h$  คือ ค่าคงที่ของ Plank ( $6.6260 \times 10^{-34}$ )  $\nu$  คือความถี่แสง 193 THz และ  $\Delta f$  คือแบนด์วิดท์ที่วัด NF (โดยปกติแล้วมีค่า 0.1 nm)

โอเอสเอ็นอาร์ ทั้งหมดของระบบสามารถพิจารณาได้จากวิธีเศษส่วนกลับและแสดงในสมการ 2.12

$$\frac{1}{OSNR_{final}} = \frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \frac{1}{OSNR_3} + \dots + \frac{1}{OSNR_N} \quad (2.12)$$

สำหรับระบบที่มี N ชั้น ผลรวมจะเป็นไปตามสมการ 2.12

$$\frac{1}{OSNR_{final}} = \sum_i \frac{1}{OSNR_i} \quad (2.13)$$

การวิเคราะห์ในรายละเอียดเล็กน้อยทำให้ได้สมการของโอเอสเอ็นอาร์ที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้นสำหรับ gain ของแอมพลิฟายเออร์ตัวเดียวโอเอสเอ็นอาร์จะแสดงได้ในสมการ 2.14

$$\frac{1}{OSNR_{final}} = \frac{P_{in}}{P_{ASE}} = \frac{P_{in}}{2n_{sp}(G-1)h\nu\Delta f} \quad (2.14)$$

ในสมการ 2.14  $n_{sp}$  คือ population inversion parameter ที่แสดงในสมการ 2.15 และเป็นอัตราส่วนของอิเล็กตรอนในสถานะที่สูงกว่าและต่ำกว่า

$$n_{sp} = N_2 / N_2 - N_1 \quad (2.15)$$

ในสมการ 2.15  $N_2$  คือจำนวนของอิเล็กตรอนในสถานะที่สูงกว่าและ  $N_1$  คือจำนวนของอิเล็กตรอนในสถานะต่ำกว่า

Population inversion parameter ยังแสดงในสมการ 2.16 อีกด้วย

$$n_{sp} = 0.5 \times 10^{\frac{NF}{10}} \quad (2.16)$$

สำหรับระบบที่มีการขยาย N ชั้น โดยมีแอมพลิฟายเออร์แต่ละตัวทำการชดเชยการสูญเสียของช่วง span ก่อนหน้าซึ่งค่า span loss ในหน่วย dB มีค่า  $\Gamma$  ความสัมพันธ์ของโอเอสเอ็นอาร์ขั้นสุดท้ายจะเป็นดังแสดงในสมการ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $OSNR_{final} = \frac{P_{in}}{NF\Gamma h\nu\Delta f \cdot N}$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (2.17) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าล็อกการริฐฐาน 10 เราจะได้สมการ 2.18

$$OSNR_{db} = 158.93 + P_{in} - \Gamma(db) - NF_{db} - 10 \log N - 10 \log \nabla f \quad (2.18)$$

จากหัวข้อก่อนหน้า เราได้  $\nabla f = 0.1 \text{ nm}$  หรือ  $12.5 \text{ GHz}$  แทนค่าลงไป จะได้สมการ 2.19

$$OSNR_{db} = 58 + P_{in} - \Gamma(db) - NF_{db} - 10 \log N \quad (2.19)$$

มีข้อสมมติดังต่อไปนี้

1.  $NF$  ของแอมพลิฟายเออร์ทุกตัวมีค่าเท่ากัน (สมมติให้ผลิตภัณฑ์เหมือนกันดังนั้น  $NF$  จึงมีค่าเหมือนกันในแอมพลิฟายเออร์แต่ละตัว)
2.  $\Gamma$  คือ span loss และมีค่าเท่ากัน (เป็นข้อสมมติทั่วไปและสามารถเปลี่ยนได้)
3. สัญญาณรบกวนถูกรวมเข้าด้วยกันทั้งสองสถานะของโพลาไรซ์กล่าวอย่างสั้น ๆ คือ เป็นสัญญาณรบกวนที่ไม่เป็นโพลาไรซ์ (unpolarized noise)

#### 2.5.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับ Margin

ในการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบโหมคร่วม องค์ประกอบหลักของการสูญเสียในระบบไม่ใช่การลดทอนอันเนื่องมาจากสื่อสัญญาณ แต่เป็นการสูญเสียที่เกี่ยวข้องกับระบบย่อยที่แตกต่างกัน โดยปกติแล้วเส้นทางหนึ่งจะประกอบด้วยหลาย ๆ โหนด ซึ่งแต่ละโหนดนั้นติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ หลายชนิด การสูญเสียเนื่องมาจากส่วนประกอบแต่ละตัวนั้นมีค่าสูง ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นจริง ๆ แล้วอาจมี Optical Multiplex Section (OMS) ครบสมบูรณ์ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศแบบอาร์เรย์ (AWGs) และ switching matrix, grating-based AWG โดยทั่วไปแล้วมีค่าการสูญเสีย 5 dB สัญญาณแสงที่ผ่านโหนดที่มี AWGs สองตัวดังกล่าว (ส่วนที่เป็นมัลติเพล็กซ์กับดีมัลติเพล็กซ์) นั้นมีค่าการสูญเสีย 10 dB นอกเหนือไปจาก switching fabric loss การประมาณค่าการสูญเสียนั้นสามารถเข้าใจได้ตามการพิสูจน์ต่อไปนี้ [8]

พิจารณาโหนดสองโหนดแต่ละโหนดนั้นติดตั้ง AWGs (loss = 5dB) และ switching fabric (loss = 3 dB) นอกเหนือไปจากอุปกรณ์เชื่อมต่อ [connector loss (2 dB)] ถ้าระยะห่างมีค่าเท่ากับ 50 กิโลเมตรและเป็นโหนด ( $\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$ ) การสูญเสียรวมเนื่องจากสื่อสัญญาณมีค่าเท่ากับ 10 dB ( $2 \times 50$ ) อย่างไรก็ตามที่แต่ละโหนดค่าการสูญเสียเท่ากับ  $5+5+3+2$  หรือ 15 dB กล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าการสูญเสียที่โหนดนั้นสามารถมีค่าสูงกว่าได้เมื่อเทียบกับการสูญเสียในสื่อสัญญาณ สิ่งนี้กระทบต่อการออกแบบระบบและค่าโอเอสเอ็นอาร์เช่นกัน ผลกระทบนั้นเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางอ้อมในลักษณะที่ว่ากำลังขาออกจากโหนดถูกระทบเนื่องมาจากการสูญเสียดังกล่าวซึ่งมีผลต่อไอเอสเอ็นอาร์ต่อไปอีกเนื่องจากสมการ 2.19

ตารางที่ 2.4 แสดง insertion loss เนื่องจากองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ต้อง quantize ค่า การสูญเสียที่เกิดจากการสูญเสียในสื่อสัญญาณตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อบทนำของบทนี้ dispersion สามารถแสดงเป็นค่า penalty ได้ในหน่วย dB การปฏิบัติคล้าย ๆ กันนี้สามารถทำได้กับลักษณะอื่น ๆ เช่น polarization และ nonlinearity และเรื่องอื่น ๆ อีก

ตาราง 2.3 Insertion loss และ loss อื่น ๆ สำหรับการใช้งานที่ 1550nm

Component	Insertion Loss	Wavelength-Dependent Loss	Polarization-Dependent Loss	Cross-Talk NF
Multiplexer	5 dB	< 1 dB	0.1 dB	-40 dB
Demultiplexer (AWG)				
Optical 2×2 add-drop switch	1.2 dB	< 0.2 dB	0.1 dB	-40 dBm
Coupler (2×2) passive	3 dB	-	-	-
Filter-Thin-film	1 dB	0.1 dB	-	-40 dBm
Filter- AOTF/MZI	1 dB	0.1 dB	-	-35 dBm
Interleaver	2-3 dB	-	-	-
Optical cross-connect (OXC)	3 dB โดยปกติ	< 0.4 dB	0.1 dB	-40 dBm
Port to port	ปราศจาก AWG loss			

ตาราง 2.5 แสดงข้อกำหนดเกี่ยวกับ margin สำหรับการออกแบบที่ดี ค่า margin เหล่านี้ยึดติดกับการเปลี่ยนแปลง optical signal budgeting โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับ dynamic โดยปกติจะเลือก margin โดยการหาค่าชุดของการอ่านที่แสดงจำนวนเหตุการณ์แบบ discrete ที่ครอบคลุม sample space ทั้งหมดของการออกแบบสัญญาณแสง

ตาราง 2.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับ margin

Symptom	Loss Margin
Fiber dispersion	1 dB
SPM (Self-Phase Modulation) margin	0.5 dB
XPM (Cross-Phase Modulation) margin	0.5 dB
DCU compensation	6 dB
FWM	0.5 dB
SRS/SBS	0.5 dB
PDL (Polarization Dependent Loss)	0.3 dB
PMD (Polarization Mode Dispersion)	0.5 dB
Amplifier gain tilt (Dute to nonflat gain spectra)	3.0 dB
Receiver sensitivity tilt (wavelength dependence of PMD)	0.5 dB
Transmission chirp	0.5 dB
AWG cross-talk	0.2 dB
Fiber connectors	0.5 dB

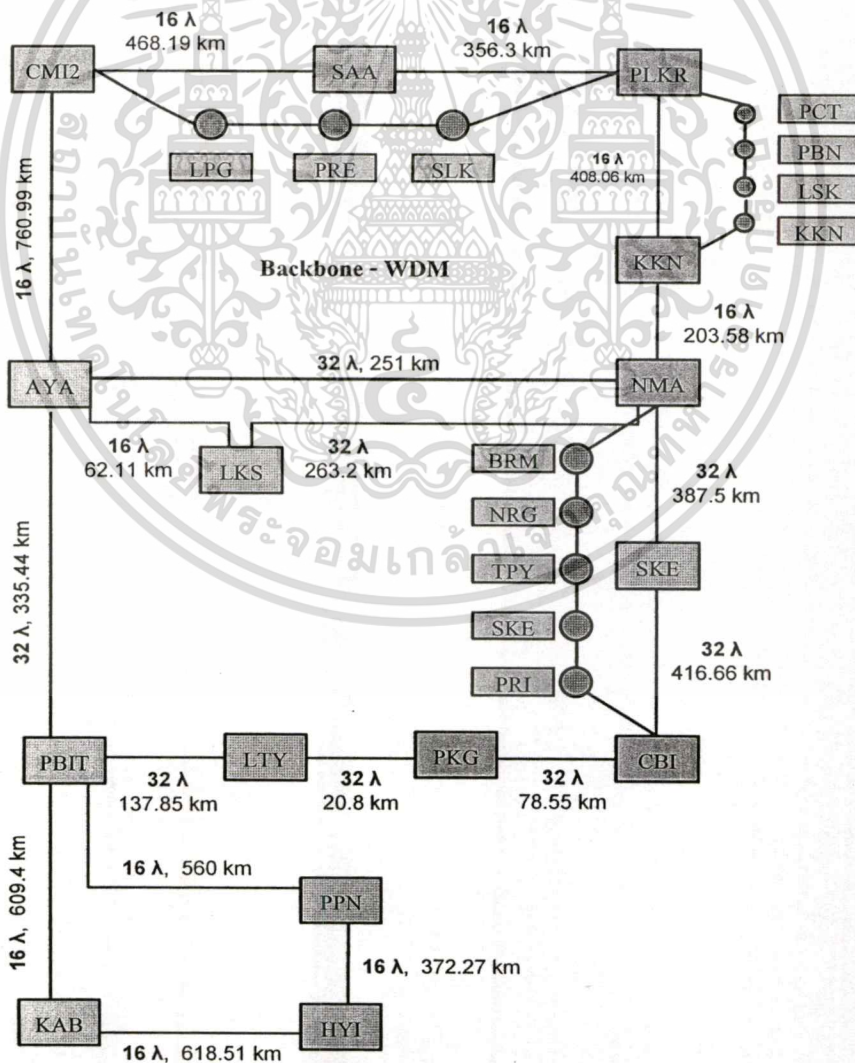
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## โครงสร้างของโครงข่ายหลัก

### 3.1 โครงข่ายหลัก

โครงข่ายนี้ออกแบบให้ครอบคลุมทั่วทุกภาคของประเทศไทย โดยทำการเชื่อมต่อกับส่วนโครงข่ายย่อย (Provincial Loop) เพื่อรองรับกับปริมาณทราฟฟิก โดยใช้ระบบดับเบิลยูดีเอ็มของอัลคาเทลรุ่น 1686 WM และ 1626 LM เป็นอุปกรณ์ในการเชื่อมต่อโดยที่ 1686 WM เป็นอุปกรณ์รุ่นก่อนหน้านี้ที่รองรับกับความเร็ว 2.5 Gbps (STM-16) ส่วนรุ่น 1626 LM เป็นอุปกรณ์ WDM ที่รองรับกับความเร็ว 10 Gbps (STM-64) นำมาใช้ร่วมกันบนสายเคเบิลเส้นเดิม โดยจะรองรับทราฟฟิกที่มากกว่า ซึ่งจะนำมาพิจารณาในการวิจัยในส่วนของโครงข่ายที่เพิ่มเข้าไปบนโครงข่ายหลักมีอยู่ด้วยกัน 3 เส้นทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.1 โครงข่ายหลักที่ใช้ในการทดสอบ ตั้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นทางของโครงข่ายหลักที่มีการเพิ่มเข้าไปทั้ง 3 เส้นทางจะถูกแสดงด้วยสัญลักษณ์วงกลมดังแสดงในรูปที่ 3.1 รายละเอียดของสถานีที่ติดตั้งอุปกรณ์ ระยะทางระหว่างสถานี ค่าการลดทอนของแต่ละช่วง (Span) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยทั้ง 3 เส้นทางโหนดที่เป็นอุปกรณ์ WDM มีชื่อย่อในแต่ละโหนดแสดงที่ภาคผนวก ข.

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการเชื่อมโยงและค่าการลดทอนของแต่ละส่วน

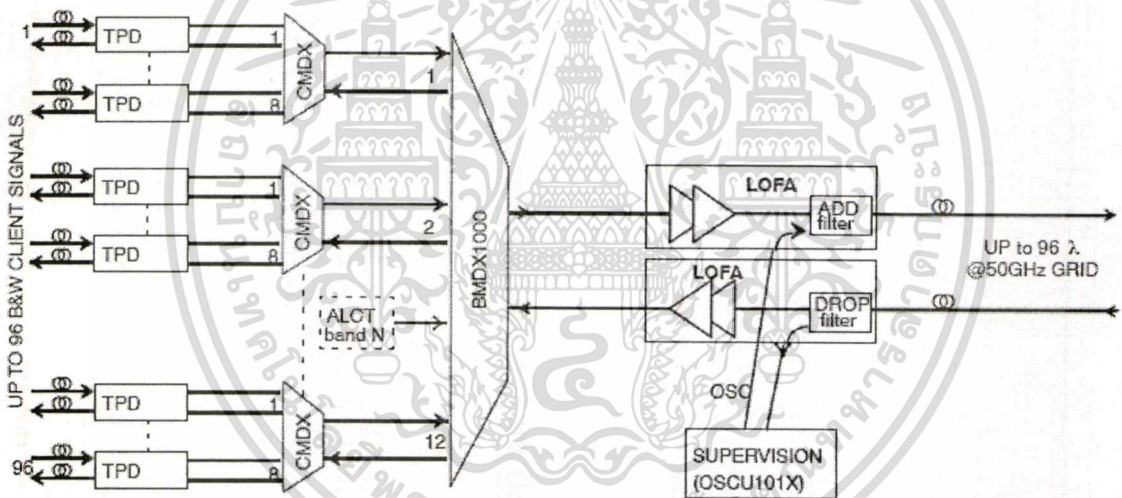
Route No.	Station	Distance(km.)	Attenuation(dB)
Route 1	PKG-CBI	78.55	21.85
	CBI-PRI	128.44	34.42
	PRI-SKE	105.5	28.26
	SKE-TPY	102.59	27.92
	TPY-NRG	93.13	25.50
	NRG-BRM	60	17.15
	BRM-NMA	132.28	35.40
Route No.	Station	Distance(km.)	Attenuation(dB)
Route 2	CMI2-LPG	106	25.56
	LPG-PRE	104.01	23.90
	PRE-SLK	115	23.80
	SLK-PLKR	90.7	20.55
Route No.	Station	Distance(km.)	Attenuation(dB)
Route 3	PLKR-PCT	71.5	18.31
	PCT-PBN	95.3	20.22
	PBN-LSK	55	12.08
	LSK-KKN	190	36.97
	KKN-KKN(TOT)	13	4.82

### 3.2 อุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็มและเครื่องมือที่ทดสอบ

#### 3.2.1 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ (MUX) และดีมัลติเพล็กซ์ (DEMUX)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการรวมและแยกความยาวคลื่น โดยใช้อุปกรณ์ชนิด passive wavelength sensitive device เป็นอุปกรณ์พื้นฐานในการทำหน้าที่เลือกความยาวคลื่นที่ใช้ในการรับ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และส่งสัญญาณ และทำหน้าที่ในการบล็อกความยาวคลื่นเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนซึ่งกันและกันของความยาวคลื่น อุปกรณ์ Band MUX/DEMUX ที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบ 12 แถบความถี่ (Band) โดยอุปกรณ์สามารถทำการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นได้ 96 ความยาวคลื่น โดยที่ 8 ความยาวคลื่นมีการรวมกันก่อนที่อุปกรณ์ CMUX ซึ่งสามารถรวมกันได้ 8 ช่องสัญญาณ ต่อ 1 แถบความถี่ ในส่วนนี้จะทำการใส่ความยาวคลื่นที่ทำหน้าที่ในการควบคุมความสมดุลระดับกำลังงานของทุก ๆ แถบความถี่เรียกว่า Automatic Level Control: ALC หลังจากนั้นสัญญาณที่ออกจาก Band MUX/DEMUX จะถูกส่งไปที่ booster amplifier เพื่อทำการใส่สัญญาณที่ใช้ในการควบคุม (Optical Supervision Channel: OSC) และทำการขยายสัญญาณในการส่งออกไปยังสถานีปลายทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสงและในทิศทางกลับกันสัญญาณจะถูกรับจากไลน์ผ่าน preamplifier และเข้าสู่ Band MUX/DEMUX ซึ่งจะแยกความถี่ออกมาแต่ละแถบความถี่เพื่อส่งต่อไปให้กับส่วนของ CMUX เพื่อแยกเอาช่องสัญญาณออกมาเพื่อนำไปใช้ต่อไปดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ (MUX) และดีมัลติเพล็กซ์ (DEMUX)

### 3.2.2 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความยาวคลื่น (Tributary Concentrator: TRBC)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนความยาวคลื่นจากแถบความยาวคลื่น 1310 nm หรือ 1550 nm (Black and white) ให้เป็นความยาวคลื่นต่างๆ ตามที่ต้องการในสเปกตรัมของแสง ตามมาตรฐาน ITU-T G.692 ซึ่งเป็นการแนะนำการใช้ colored aggregate หรือการใช้ wavelength adaptation (Transponders) โดยมีระยะห่างระหว่างความยาวคลื่น (Wavelength spacing) เท่ากับ 50 GHz สำหรับอุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็ม 96 channel และ 100 GHz สำหรับอุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็มชนิด 32 channel และ 200 GHz สำหรับอุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็ม ชนิด 16 channel (ที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบมีระยะห่าง 50 GHz) ในตารางที่ 3.2 เป็นการแสดงค่าความยาวคลื่น ความถี่และระยะห่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างความยาวคลื่นของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบโดยในการทดสอบนี้จะใช้อุปกรณ์ TRBC ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนความยาวคลื่น หรือสัญญาณ B&W จากอุปกรณ์ STM-16 จำนวน 4 port (2.5Gbps\*4) เข้ามาและออกไปเป็น 1 ช่องสัญญาณคลื่นเลเซอร์ขนาด 10 Gbps และอุปกรณ์ TRBD (Tributary Direct) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนความยาวคลื่น หรือสัญญาณ B&W จากอุปกรณ์ STM-64 จำนวน 1 port เข้ามาและออกไปเป็น 1 ช่องสัญญาณคลื่นเลเซอร์ขนาด 10 Gbps

ตารางที่ 3.2 แถบความถี่และช่องสัญญาณ

Band	Ch.	(THz)	(nm)	Band	Ch.	(THz)	(nm)
Band 1	1	195.90	1530.33	Band 7	49	193.50	1549.32
	2	195.85	1530.73		50	193.45	1549.72
	3	195.80	1531.12		51	193.40	1550.12
	4	195.75	1531.51		52	193.35	1550.52
	5	195.70	1531.90		53	193.30	1550.92
	6	195.65	1532.29		54	193.25	1551.32
	7	195.60	1532.68		55	193.20	1551.72
	8	195.55	1533.08		56	193.15	1552.12
Band 2	9	195.50	1533.47	Band 8	57	193.10	1552.52
	10	195.45	1533.86		58	193.05	1552.93
	11	195.40	1534.25		59	193.00	1553.33
	12	195.35	1534.65		60	192.95	1553.73
	13	195.30	1535.04		61	192.90	1554.13
	14	195.25	1535.43		62	192.85	1554.54
	15	195.20	1535.82		63	192.80	1554.94
	16	195.15	1536.21		64	192.75	1555.35
Band 3	17	195.10	1536.61	Band 9	65	192.70	1555.75
	18	195.05	1537.01		66	192.65	1556.15
	19	195.00	1537.40		67	192.60	1556.55
	20	194.95	1537.80		68	192.55	1556.96
	21	194.90	1538.19		69	192.50	1557.36
	22	194.85	1538.59		70	192.45	1557.77
	23	194.80	1538.98		71	192.40	1558.17
	24	194.75	1539.38		72	192.35	1558.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

Band	Ch.	(THz)	(nm)	Band	Ch.	(THz)	(nm)
Band 4	25	194.70	1539.77	Band 10	73	192.30	1558.98
	26	194.65	1540.17		74	192.25	1559.39
	27	194.60	1540.56		75	192.20	1559.79
	28	194.55	1540.96		76	192.15	1560.20
	29	194.50	1541.35		77	192.10	1560.61
	30	194.45	1541.75		78	192.05	1561.02
	31	194.40	1542.14		79	192.00	1561.42
	32	194.35	1542.54		80	191.95	1561.83
Band 5	33	194.30	1542.94	Band 11	81	191.90	1562.23
	34	194.25	1543.34		82	191.85	1562.64
	35	194.20	1543.73		83	191.80	1563.04
	36	194.15	1544.15		84	191.75	1563.45
	37	194.10	1544.53		85	191.70	1563.86
	38	194.05	1544.93		86	191.65	1564.27
	39	194.00	1545.32		87	191.60	1564.68
	40	193.95	1545.72		88	191.55	1565.08
Band 6	41	193.90	1546.12	Band 12	89	191.50	1565.43
	42	193.85	1546.52		90	191.45	1565.90
	43	193.80	1546.92		91	191.40	1566.31
	44	193.75	1547.32		92	191.35	1566.72
	45	193.70	1547.72		93	191.30	1567.13
	46	193.65	1548.12		94	191.25	1567.54
	47	193.60	1548.51		95	191.20	1567.95
	48	193.55	1548.92		96	191.15	1568.36

### 3.2.3 อุปกรณ์ Optical amplifier, In-line/ Pre-amplifier/ Booster

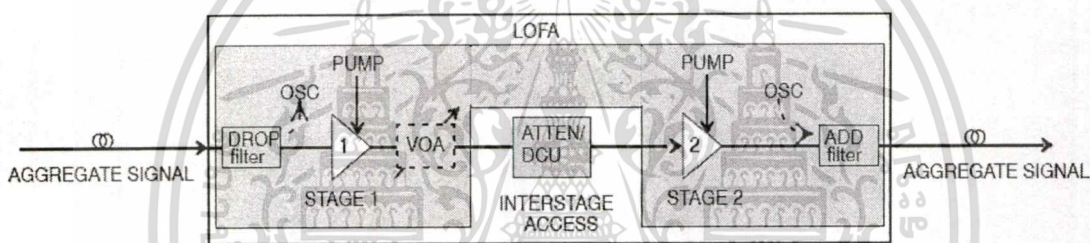
เป็นอุปกรณ์ออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ใช้ในการส่งสัญญาณ โดยไม่ต้องใช้การทวนสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical regeneration) ในการส่งสัญญาณไปบนเส้นใยแก้วที่มีระยะทางไกล โดยอุปกรณ์ทั้ง 3 แบบ มีความแตกต่างกันในการใช้งานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Booster จะใช้ในส่วนที่เป็นเทอร์มินัล
- Pre-amplifier จะใช้ในส่วนที่เป็นเทอร์มินัล
- In-line amplifier จะใช้ในส่วนที่เป็นสถานีทวนสัญญาณ

ออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ใช้ในการทดสอบนี้จะเป็นชนิด Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) แบบ Double-stage optical amplifier มีคุณลักษณะที่สำคัญดังนี้

1. Double-stage optical amplifier with mid-stage access แบ่งออกเป็น 2 ส่วนในส่วนแรกเรียกว่า first-stage ถูกออกแบบให้มีหน้าที่ขยายสัญญาณโดยให้มีการขยายสัญญาณรบกวน(Noise)ให้น้อยที่สุด โดยทำการ pump ที่ความยาวคลื่น 980 nm สามารถปรับปรุงค่าของ first-stage noise figure ให้ดีขึ้น 2 dB ในส่วนที่สองเรียกว่า Second-stage ออกแบบให้มีการ pump ที่ความยาวคลื่น 1489 nm ซึ่งผลจากการขยายนี้ทำให้สามารถจัดเตรียมกำลังส่งออกในย่านจาก +6 dBm ถึง +23 dBm ด้วย noise figure ที่น้อยกว่า 7.3 dB



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ Line Optical Fiber Amplifier

2. คุณลักษณะทางเทคนิคของ In-line amplifier / preamplifier / booster ของระบบดับเบิลยูดีเอ็มที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

- แอมพลิฟายเออร์ที่ใช้เป็นชนิด EDFA (Erbium – Doped Fiber Amplifier)
- กำลังงานขาออก (Output power) ของอุปกรณ์ที่ใช้มีหลายระดับคือ +6 dBm ถึง +23 dBm โดยค่ากำลังงานต่อช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับจำนวนของช่องสัญญาณที่ใช้
- ย่านความยาวคลื่นที่ใช้คือ 1530 – 1560 nm
- ค่าของ Polarization Mode Dispersion (PMD) : 0.5 dB
- ค่าของ Polarization Dependent Loss (PDL) : 0.5 dB
- ย่านกำลังงานขาเข้า (Input power range): -35 ถึง +2 dBm สำหรับแอมพลิฟายเออร์

ชนิด Double-stage

- ค่าของ Noise figure : 7.3 dB สำหรับแอมพลิฟายเออร์ชนิด Double-stage
- ค่าของ Max accommodated loss (ในกรณีที่ใช้อุปกรณ์ชนิด Double-stage) : 9 dB
- ชนิดของอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Connector) ที่ใช้ได้แก่ FC/PC และ MU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำให้การส่งสัญญาณของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ มีความราบเรียบสม่ำเสมอทำได้โดยใช้เทคโนโลยีหลายแบบในเวลาเดียวกัน โดยวิธีการออกแบบที่เหมาะสมของ Erbium doped fiber ให้ออปติคัลแอมพลิฟายเออร์สามารถขยายสเปกตรัมให้มีการเบี่ยงเบนที่น้อยกว่า 1.5 dB ความเหมาะสมของการออกแบบ double-stage design และการออกแบบที่เหมาะสมของ passive optical filtering นอกจากนั้นกำลังงานขาเข้ารวมของ booster amplifier สามารถรักษาระดับสัญญาณให้มีความคงที่ได้โดยวิธีการใช้ Automatic level control ในการควบคุมและปรับเปลี่ยนระดับกำลังงานของสัญญาณให้มีระดับกำลังงานขาเข้าที่ booster คงที่อัตโนมัติโดยไม่คำนึงถึงจำนวนของช่องสัญญาณที่ถูกใส่เข้ามาในระบบ

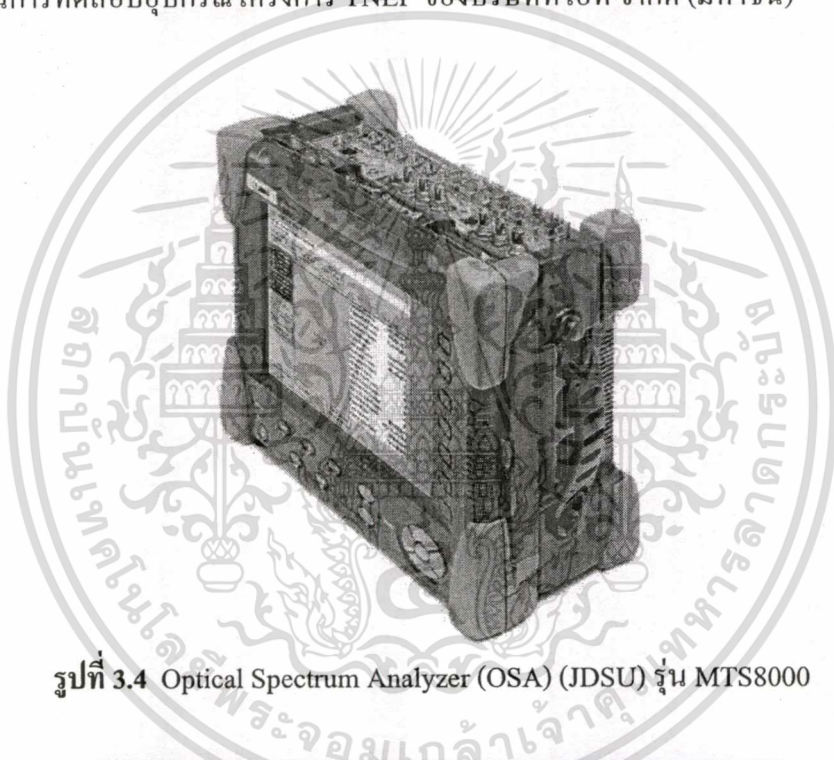
3. Automatic level control คุณลักษณะของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์อาจจะขึ้นอยู่กับผลรวมของอัตราการส่งบิต (Bit rate) สาเหตุเนื่องมาจากผลรวมของ power optical จะขึ้นอยู่กับจำนวนช่องสัญญาณในการส่ง ตัวอย่างเช่น กำลังงานขาออก (Output power) ของ multiplexing stage มีการเปลี่ยนแปลงของระดับกำลังงาน 3 dB ทุกครั้งที่มีจำนวนของความยาวคลื่นเป็นเท่าตัว ดังนั้นถ้ากำลังงานขาเข้า (Input power) ของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการขยายสัญญาณจะทำให้ gain flatness และกำลังงานต่อช่องสัญญาณที่เอาต์พุตของแอมพลิฟายเออร์มีการเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์สำหรับออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ใช้การควบคุมการขยาย (Gain-controller) นั้นกำลังงานขาออกของแอมพลิฟายเออร์จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้น และสำหรับออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ใช้การควบคุมกำลังงานส่ง (Output power control) อัตราการขยายจะถูกลดลงเนื่องจากจำนวนของช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นและทำให้กำลังงานต่อช่องสัญญาณลดลงด้วยซึ่งสาเหตุเหล่านี้อาจจะทำให้คุณภาพในการส่งสัญญาณลดลงได้ ดังนั้นระบบดับเบิ้ลยูดีเอ็มจำเป็นจะต้องมีการวางแผนการใช้อุปกรณ์อย่างมีประสิทธิภาพที่สามารถควบคุมการเปลี่ยนของ optical power ที่อาจเกิดขึ้นเหล่านี้ได้ การใช้ Automatic level control เป็นวิธีการในการควบคุมและจัดการกับการเปลี่ยนแปลงของ optical power ในไลน์อินเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนความยาวคลื่น ลักษณะเฉพาะของ Automatic level control ก็คือคุณสมบัติที่เรียกว่า optical tank ซึ่งจะช่วยชดเชยทุกๆ การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานที่แปรผันตามความยาวคลื่น ในกรณีถ้าจำนวนช่องสัญญาณมีการเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว อย่างทันทีทันใดกำลังงานขาออกของ Automatic level control จะลดลง 3 dB เพื่อรักษากำลังงานขาออกของ multiplexing stage ให้คงที่ดังนั้นกำลังงานขาออกของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ จะมีค่าคงที่ถึงแม้ว่าจำนวนของความยาวคลื่นที่เข้ามาและ operating point จะมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องมาจากการควบคุมกำลังงานขาออกซึ่งจะเป็นผลให้การขยายยังคงมีค่าคงที่และ optical power ต่อช่องสัญญาณยังคงมีค่าคงที่อีกด้วย การใช้ Automatic level control จะทำให้การทำงานมีความสะดวกขึ้น รวดเร็วขึ้นและมีความน่าเชื่อถือในการ upgrade ช่องสัญญาณ

โดยที่ผู้ใช้งานสามารถทำงานได้ที่สถานีที่เป็นเทอร์มินัลและใส่ช่องสัญญาณใหม่โดยปราศจากทุกๆ ค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

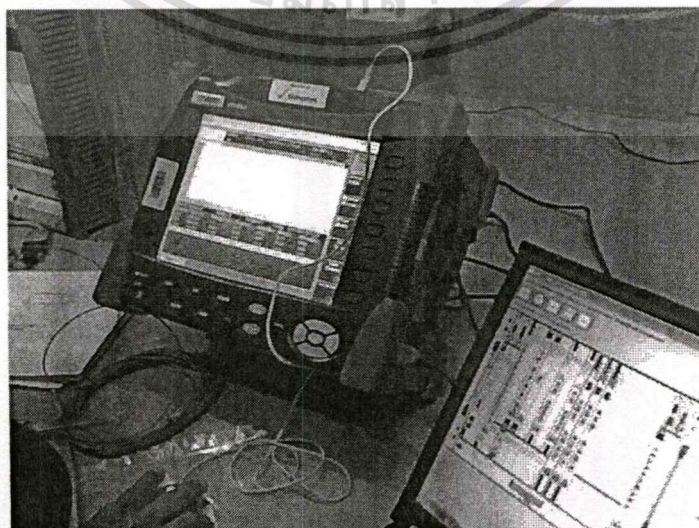
สาเหตุที่ไปรบกวนกราฟฟิคที่มีอยู่ก่อนแล้ว Automatic level control จะทำงานอยู่ที่ย่านแถบความยาวคลื่น Band 5

### 3.2.4 Optical Spectrum Analyzer (OSA)

Optical Spectrum Analyzer (OSA) ที่ใช้ในการทดสอบเป็นของเจดีเอสยู (JDSU) รุ่น MTS8000 ดังรูปที่ 3.4 สามารถวัดระดับสัญญาณ optical ในย่านความยาวคลื่น 850-1310 nm และ 1550 nm มีความแม่นยำในการวัด (Accuracy)  $\pm 10$  pm ขั้นตอนการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานการรับรองระเบียบการทดสอบ (Acceptance Test Procedures) ของบริษัทอัลคาเทล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์โครงการ TNEP ของบริษัททีโอที จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 3.4 Optical Spectrum Analyzer (OSA) (JDSU) รุ่น MTS8000



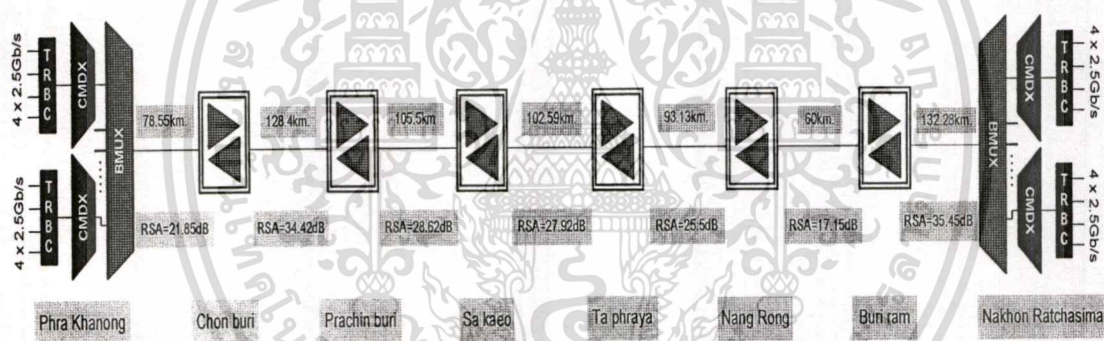
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 3.5 Optical Spectrum Analyzer (OSA) ขณะทำการวัด ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ เครื่องมือวัดและขั้นตอนการทดสอบ

#### 3.3.1 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด

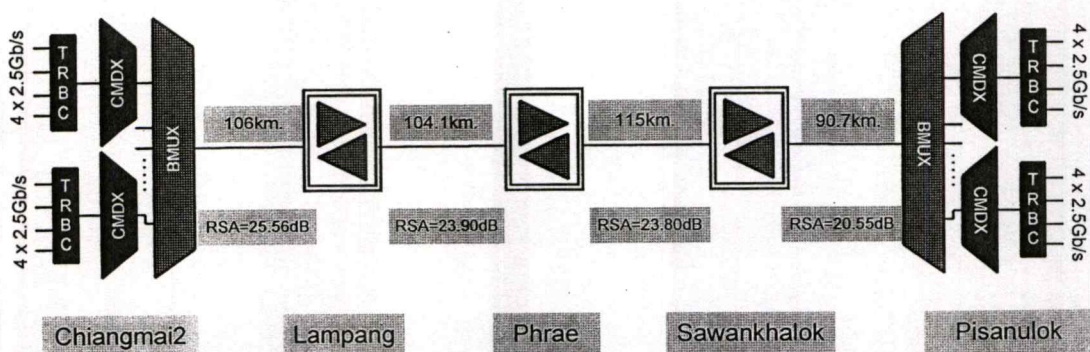
อุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็มที่ใช้ในการเชื่อมโยงโครงข่ายหลักการทดสอบนี้จะใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (Single mode fiber) ตามมาตรฐานของ ITU-T Recommendation G.652 [13] ในการเชื่อมต่อโดยมีระยะทางระหว่างสถานีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 สถานีต้นทาง-ปลายทางที่ทำการติดตั้งเครื่องมือวัด โดยสามารถพิจารณาได้ตามรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นรูปเส้นทางเชื่อมโยงระหว่างสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา รูปที่ 3.7 แสดงการเชื่อมโยงเส้นทางระหว่างสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีพิษณุโลก รูปที่ 3.8 แสดงการเชื่อมโยงเส้นทางระหว่างสถานีพิษณุโลกถึงสถานีขอนแก่น ตามลำดับ

Route 1: PKG – NMA



รูปที่ 3.6 เส้นทางเชื่อมโยงระหว่างสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา

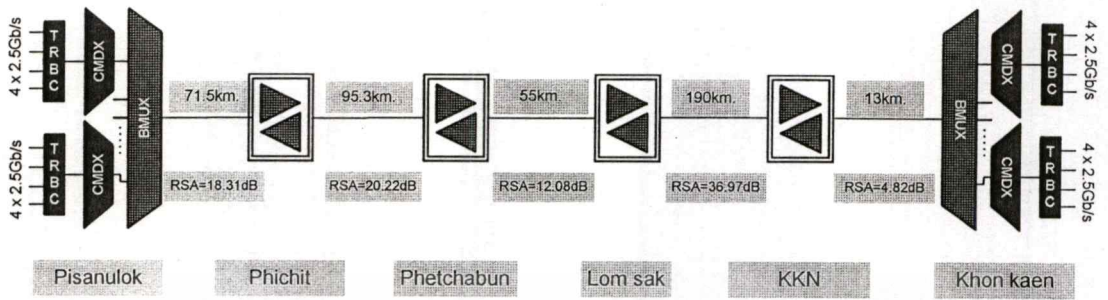
Route 2: CMI2-PLKR



รูปที่ 3.7 เส้นทางเชื่อมโยงระหว่างสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีพิษณุโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Route 3: PLKR-KKN



รูปที่ 3.8 เส้นทางเชื่อมโยงระหว่างสถานีพินัญโลกถึงสถานีขอนแก่น

การคำนวณค่าสูญเสีย (Loss) ระหว่าง span จะอ้างอิงจาก ITU-T Recommendation G.652 โดยกำหนดให้มิต่ำสูญเสียในส่วนของการเชื่อมต่อเคเบิล splicing = 0.05 dB/ point ค่าของการลดทอนของเคเบิล line attenuation = 0.25 dB/ km ค่าสูญเสียจากจุดเชื่อมต่อ connector loss = 0.5 dB/ connector และมีระยะทางของเคเบิลต่อ roll = 4 km โดยมีสมการในการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\text{Line attenuation} = [D/4 * A] + [D*B] + [2*C] \tag{3.1}$$

- D = Cable length ; km
- A = Splicing attenuation ; dB/point
- B = Line attenuation ; dB/km
- C = Connector loss ; dB/connector

ค่าของ 4 ในเทอมของ D/4\*A คือระยะทางของเคเบิลในหนึ่ง roll ซึ่งมีความยาว 4 km/roll และค่าของเทอม [2\*C] จะไม่นำมาคิดในการทดสอบนี้เนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์จะใช้การ splicing แทนการใช้ connector เชื่อมต่อจึงไม่ต้องคิดค่าสูญเสียที่เกิดจาก connector และได้มีการเผื่อค่าการลดทอน (margin) ไว้แล้ว 5 dB ต่อระยะทางระหว่างอุปกรณ์ เมื่อทำการคำนวณค่าต่างๆ แล้วจึงนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์

จากการติดตั้งอุปกรณ์ และทำการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์ใน Route1, Route2 และ Route3 บันทึกตามตารางที่ 3.3, 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 ตารางการบันทึกผลการวัดเส้นทางสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา

Location	Distance (km.)	Span	Attenuation (dB)	Freq. 193.45THz	Freq. 193.05THz	Freq. 193.00THz
PKG-CBI	78.55	1	21.61	32.08	30.05	29.24
CBI-PRI	128.40	2	34.70	25.35	24.52	23.72
PRI-SKE	105.50	3	28.69	24.43	24.84	24.09
SKE-TPY	102.59	4	27.92	23.83	23.28	22.71
TPY-NRG	93.13	5	25.44	23.59	23.27	23.06
NRG-BRM	60	6	16.75	23.92	22.28	21.44
BRM-NMA	132.28	7	35.72	21.24	19.75	19.50

ตารางที่ 3.4 ตารางการบันทึกผลการวัดเส้นทางสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีพิษณุโลก

Location	Distance (km.)	Span	Attenuation (dB)	Freq. 193.45THz	Freq. 193.50THz
CMI2-LPG	106.00	1	28.83	23.79	23.96
LPG-PRE	104.01	2	28.30	22.95	22.65
PRE-SLK	115.00	3	31.19	21.08	21.35
SLK-PLKR	90.70	4	24.81	19.37	19.40

ตารางที่ 3.5 ตารางการบันทึกผลการวัดเส้นทางสถานีพิษณุโลกถึงสถานีขอนแก่น

Location	Distance (km.)	Span	Attenuation (dB)	Freq. 193.45THz	Freq. 193.50THz
PLKR-PCT	71.5	1	19.76	25.90	26.86
PCT-PBN	95.3	2	26.01	25.07	26.16
PBN-LSK	55.0	3	15.43	24.95	25.93
LSK-KKN	190.0	4	50.87	22.94	23.21
KKN-KKN(TOT)	13.0	5	4.41	23.78	23.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนวสสำหรับกรใชงนเพื่อกรศกษทเทนน ไมอนุญาตใหนำไปใช้ประโยชน์ด้านกรค้ำ

ไม่ว่ากรณใดทงสิ้น อีกรั้งท้ำมมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# ผลการวัดและการวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์

ในบทนี้จะนำเสนอผลการวัดและการวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการทดลอง 3 เส้นทางโดยใช้การเก็บผลในรูปแบบของตารางและนำมาพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่ทำให้ค่าโอเอสเอ็นอาร์เปลี่ยนแปลง จากนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาทำการกำหนดคุณลักษณะของโอเอสเอ็นอาร์ของดับเบิลยูดีเอ็มในแต่ละเส้นทาง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ค่าสูญเสีย (Loss) ระหว่างช่วง (Span) ให้มีค่าสูญเสียในส่วนของการเชื่อมต่อของเส้นใยแก้วนำแสง (Splicing) = 0.05 dB/ point ค่าการลดทอนของเคเบิลใยแก้วนำแสง (Line attenuation) ของแต่ละเส้นทางอาจจะมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับคุณภาพของสายเคเบิล ณ ปัจจุบันมีค่า 0.25 dB/km. ค่าสูญเสียจากอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Connector loss) = 0.5 dB/connector ตามคำแนะนำใน ITU-T Recommendation G.652 [13] และมีระยะทางของเคเบิลต่อ roll = 4 km และใช้ระยะทางจริงจากการออกแบบติดตั้งเส้นใยแก้วที่ใช้ในการเชื่อมโยงระบบ โดยได้แบ่งการวิเคราะห์ดังนี้

1. วิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานกับระยะทางจริง
2. วิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานกับระยะทางที่เพิ่มค่าการลดทอน
3. วิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดเปรียบเทียบกับกรคำนวณ
4. วิเคราะห์คุณลักษณะ โอเอสเอ็นอาร์ในส่วนต่างๆของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม

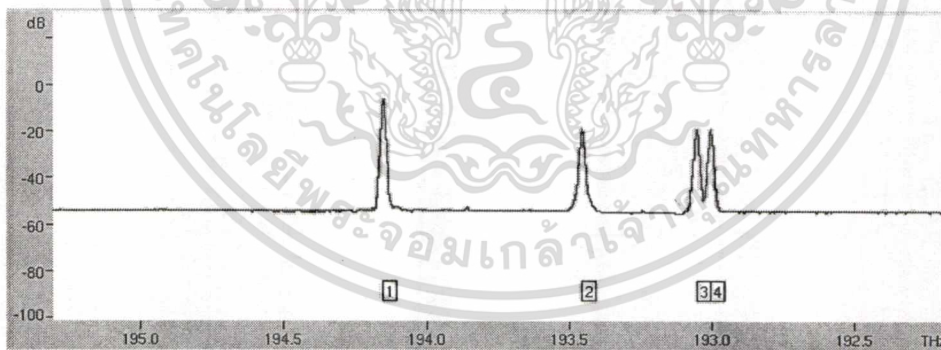
### 4.1 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานกับระยะทางจริง

ในหัวข้อนี้เป็นผลการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์แต่ละเส้นทาง ที่ความยาวคลื่นใช้งานจริง โดยในแต่ละเส้นทางจำนวนของช่องสัญญาณที่ทำการวัดจะมีค่าความเร็ว 10 Gbps โดยที่เป็นการใช้งานของช่องสัญญาณที่ความเร็ว 2.5 Gbps จากการใช้งานในส่วนขอโครงข่ายภูมิภาคซึ่งเป็นระบบ STM-16 ผ่านอุปกรณ์รวมสัญญาณ TRBC (Tributary Concentrator) ตารางที่ 4.1 แสดงค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานของแต่ละช่วง (span) บนเส้นทางพระโขงจนถึงนครราชสีมา (Route1) มีความยาวคลื่นใช้งานอยู่ 3 ความยาวคลื่น (Channel 50, 58 และ 59) ระยะทางรวมตลอดเส้นทาง 700.45 กิโลเมตร

ตารางที่ 4.1 ค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานใน Route 1

Location	Distance (km.)	Total distance(km.)	Span	OSNR Measurement		
				Freq. 193.45(THz)	Freq. 193.05(THz)	Freq. 193.00(THz)
PKG	0	0	0	33.47	31.44	30.65
CBI	78.55	78.55	1	32.08	30.05	29.24
PRI	128.4	206.95	2	25.35	24.52	23.72
SKE	105.5	312.45	3	24.43	24.84	24.09
TPY	102.59	415.04	4	23.83	23.28	22.71
NRG	93.13	508.17	5	23.59	23.27	23.06
BRM	60	568.17	6	23.92	22.28	21.44
NMA	132.28	700.45	7	21.24	19.75	19.5

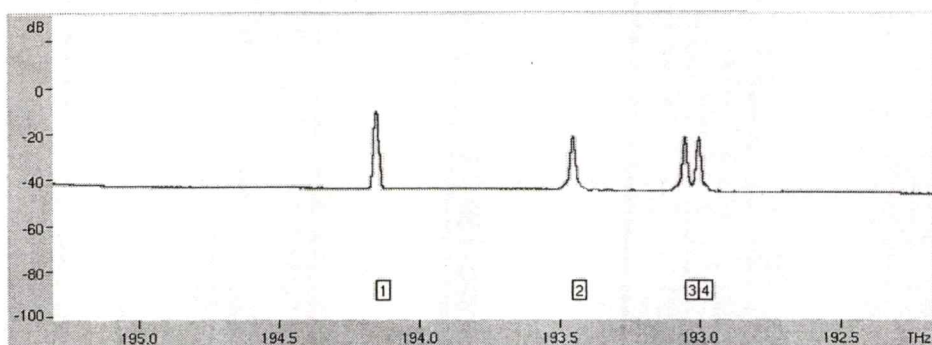
จากการใช้เครื่องมือวัด Optical Spectrum Analyzer (OSA) จะได้รูปสเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ ที่ความยาวคลื่นใช้งานที่สถานีพระ โขนงและสถานีนครราชสีมาดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



Channel	Freq.(THz)	Spacing(THz)	Level(dBm)	Noise(dBm)	SNR(dB)	P/Pcomp(%)
001	194.1498	----	-6.54	-53.34	46.80	84.53
002	193.4528	0.6970	-18.43	-50.88	33.47	5.03
003	193.0527	0.4001	-18.36	-48.56	31.44	5.38
004	193.0026	0.0501	-18.66	-48.09	30.65	4.97

รูปที่ 4.1 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานสถานีพระ โขนง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Channel	Freq.(THz)	Spacing(THz)	Level(dBm)	Noise(dBm)	SNR(dB)	P/Pcomp(%)
001	194.1516	----	-10.53	-42.69	32.15	79.40
002	193.4526	0.6990	-20.67	-41.91	21.24	7.69
003	193.0529	0.3997	-21.66	-41.41	19.75	6.12
004	193.0027	0.0502	-21.80	-41.30	19.50	5.93

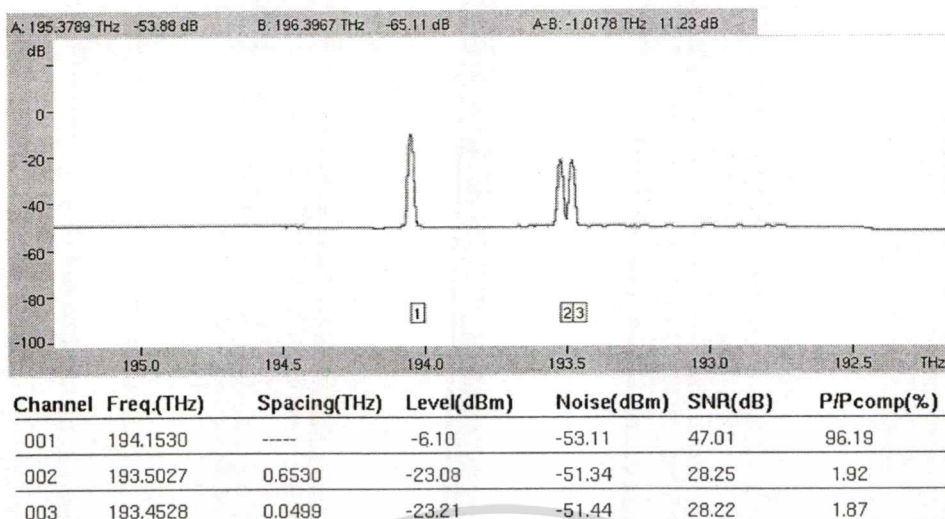
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานสถานีนครราชสีมา

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัดในแต่ละช่วงของเส้นทางระหว่างสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีพิษณุโลก (Route2) โดยมีความยาวคลื่นใช้งานอยู่ 2 ความยาวคลื่น (Channel 49 และ 50) ระยะทางรวมตลอดเส้นทาง 415.71 กิโลเมตร

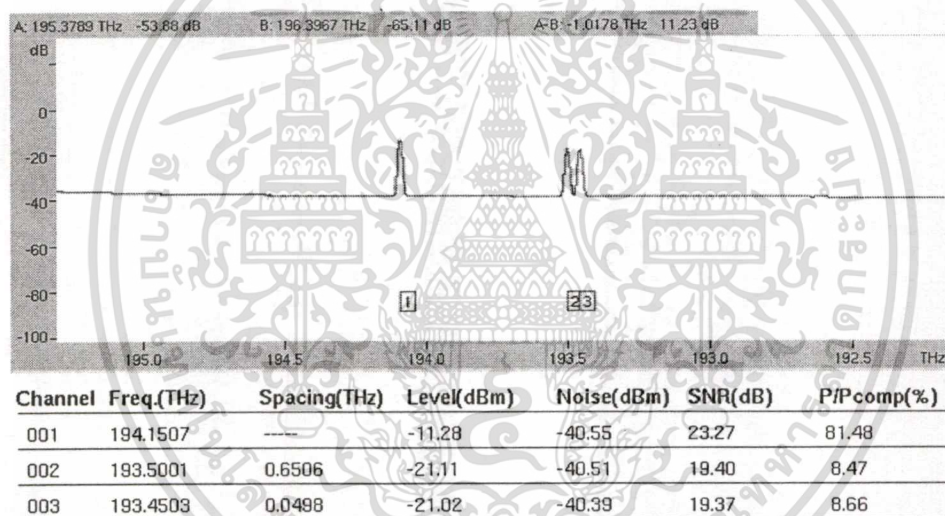
ตารางที่ 4.2 ค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานใน Route 2

Location	Distance (km.)	Total distance(km.)	Span	OSNR Measurement	
				Freq. 193.45(THz)	Freq. 193.50(THz)
CMI2	0	0	0	28.22	28.25
LPG	106	106	1	23.79	23.96
PRE	104.01	210.01	2	22.95	22.65
SLK	115	325.01	3	21.08	21.35
PLKR1	90.7	415.71	4	19.37	19.4

จากผลการวัดใน Route 2 ระหว่างสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีพิษณุโลกด้วยเครื่องมือวัด Optical Spectrum Analyzer (OSA) จะได้รูปสเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานที่สถานีเชียงใหม่และสถานีพิษณุโลกดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานสถานีเชียงใหม่



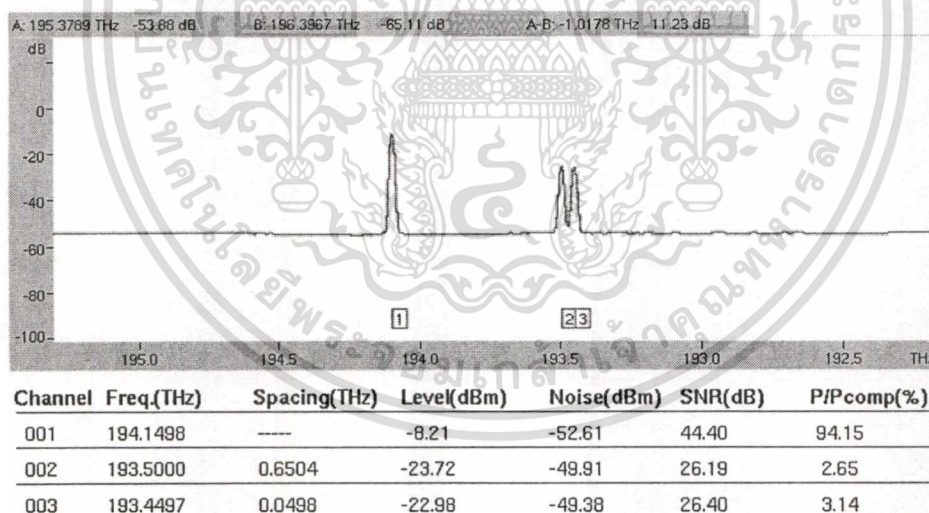
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานสถานีพิษณุโลก (Route 2)

และในเส้นทางระหว่างสถานีพิษณุโลกถึงสถานีขอนแก่น (Route 3) มีความยาวคลื่นใช้งานอยู่ 2 ความยาวคลื่น (Channel 49 และ 50) ระยะทางรวมตลอดเส้นทาง 424.8 กิโลเมตร ค่าไอเอสเอ็นอาร์จากการวัดของแต่ละช่วงใน Route 3 ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานใน Route 3

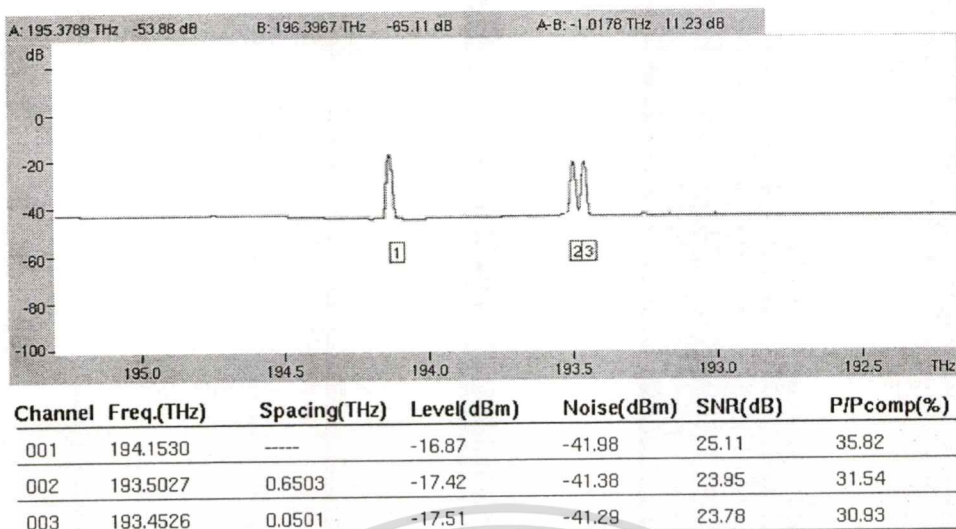
Location	Distance (km.)	Total distance(km.)	Span	OSNR Measurement	
				Freq. 193.45(THz)	Freq. 193.50(THz)
PLKR2	0	0	0	26.40	26.19
PCT	71.5	71.5	1	25.90	26.86
PBN	95.3	166.8	2	25.07	26.16
LSK	55	221.8	3	24.95	25.93
KKN	190	411.8	4	22.94	23.21
KKN_TOT	13	424.8	5	23.78	23.95

จากผลการวัดใน Route 3 ระหว่างสถานีพิษณุโลกถึงสถานีขอนแก่นด้วยเครื่องมือวัด Optical Spectrum Analyzer (OSA) จะได้รูปสเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานที่สถานีพิษณุโลกและสถานีขอนแก่นดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



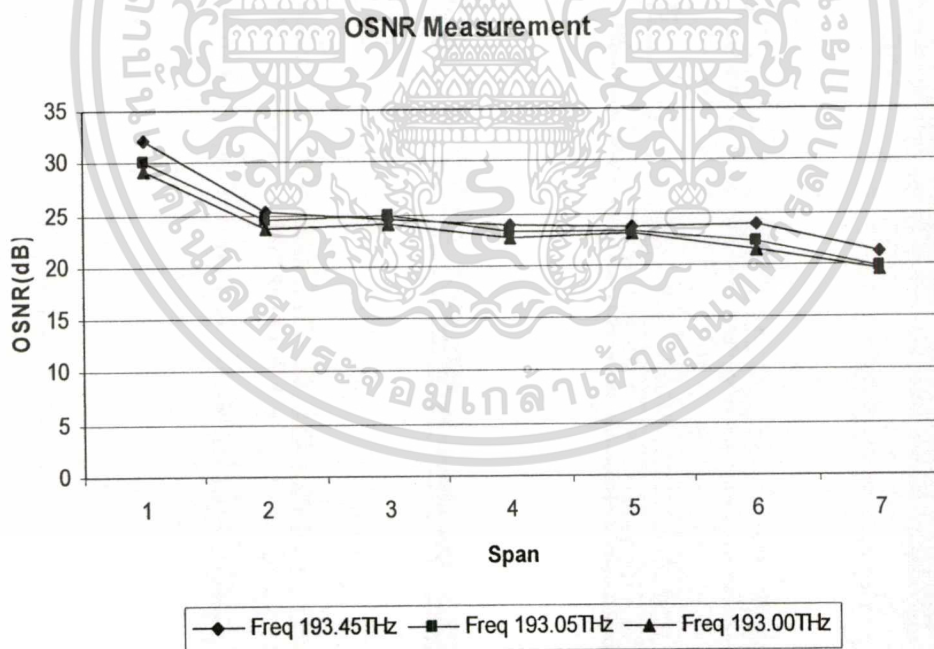
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานสถานีพิษณุโลก (Route 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ความยาวคลื่นใช้งานสถานีขอนแก่น

จากผลการวัดที่ได้ข้างต้นสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงค่าโอเอสเอ็นอาร์เทียบกับระยะทางสะสม ในที่นี้ขอแสดงเส้นทางระหว่างสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา (Route 1) ได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าโอเอสเอ็นอาร์เทียบกับระยะทางสะสมใน Route 1

จากกราฟในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าค่าโอเอสเอ็นอาร์จะมีความสัมพันธ์กับระยะทาง เมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าโอเอสเอ็นอาร์มีค่าลดลง แต่ค่าที่ลดลงจะไม่เท่ากันในทุก แอ็ก Span เนื่องจากระยะทางที่ไม่เท่ากันและระยะทางจะมีผลกับค่าโอเอสเอ็นอาร์ ตั้งแต่ Span ที่ 1 กับ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Span ที่ 2 ใน span ที่ 1 มีระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสง 78.55 กม. ใน span ที่ 2 มีระยะทางของเส้นใยแก้ว 128.4 กม. ระยะทางทั้ง 2 ช่วงมีค่าต่างกันอยู่ 49.85 กม. จึงทำให้ค่าของโอเอสเอ็นอาร์ในช่วงที่ 2 ลดลงอย่างมากเทียบกับใน span ที่ 1 ในส่วนของ span ที่ 3, 4 และ 5 มีระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสง 105.5 กม. 102.59 กม. และ 93.13 กม. ตามลำดับ ซึ่งระยะทางมีค่าใกล้เคียงกันทำให้ค่าของโอเอสเอ็นอาร์ลดลงตามลำดับ แต่ใน span ที่ 6 และ 7 ค่าระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงมีความแตกต่างกัน ใน span ที่ 6 มีระยะ 60 กม. ส่วนใน span ที่ 7 มีระยะทาง 132.28 กม. ซึ่งต่างกัน 72.28 กม. ทำให้ใน span ที่ 6 ค่าของโอเอสเอ็นอาร์จึงมีลักษณะลดลงไม่มากและในบางความถี่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ span ที่ 5 นั้นเป็นผลมาจากระยะทางกับกำลังงานที่ส่งออกมาส่วนใน span ที่ 7 ระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงมีระยะทางไกลสุดทำให้ค่าโอเอสเอ็นอาร์ลดลงมากกว่า span อื่นๆ

#### 4.2 การวิเคราะห์โอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดที่ความยาวคลื่นใช้งานกับระยะทางที่เพิ่มการลดทอน

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการวัดและการวิเคราะห์ค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัดที่แต่ละช่องสัญญาณต่อระยะทางที่การลดทอนเพิ่มมากขึ้นต่อช่วง (span) เท่ากับ 5 dB ในที่นี้จะทำการวิเคราะห์เส้นทางใน Route 1 ตั้งแต่สถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา เนื่องจากมีการใช้งานความยาวคลื่นมากกว่า Route 2 และ Route 3 ในการเพิ่มค่าการลดทอนจะใช้ตัวลดทอนแบบคงที่ (Fix attenuator) มีค่าเท่ากับ 5 dB ซึ่งผลที่ได้จากการวัดด้วย OSA จะแสดงในตารางที่ 4.4 ที่ความยาวคลื่นใช้งานเท่ากัน ค่าของโอเอสเอ็นอาร์จะลดลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นเหมือนกับการวัดที่ระยะทางไม่รวมค่าลดทอน การเพิ่มค่าการลดทอน 5 dB ในการทดสอบนี้เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าโอเอสเอ็นอาร์ในกรณีที่ค่าการลดทอนในเส้นใยแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้งานสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง การซ่อมหรือปรับปรุงเส้นใยแก้วที่มีผลทำให้ค่าการลดทอนในเส้นใยแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น และจากการเพิ่มค่าลดทอน 5 dB ทำให้ค่าโอเอสเอ็นอาร์ลดลงจากเดิมซึ่งบางช่วงที่ระยะทางไกลเพิ่มขึ้น 5.86 dB โดยที่กำลังงานด้านส่งยังคงค่าเดิม ทั้งนี้ถ้าเพิ่มความยาวคลื่นก็อาจจะส่งผลให้ค่าการลดทอนเพิ่มตาม ซึ่งถ้าเพิ่มความยาวคลื่นเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นเดิมจะทำให้เกิดการลดทอน 3 dB



ระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าที่ออกมาจึงมีลักษณะลดลงเหมือนกับก่อนการเพิ่มค่าลดทอน 5 dB โอเอสเอ็นอาร์ลดลงไม่มากประมาณ 1-2 dB ซึ่งเป็นผลมาจากค่ากำลังงานกับระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะทางไม่มาก ในส่วนของ span ที่ 7 ซึ่งมีระยะทางของเส้นใยแก้ว 132.28 กม. ไกลกว่า span อื่นๆ และค่ากำลังงานที่ส่งผ่านยังไม่มีการปรับเพิ่มทำให้ค่าโอเอสเอ็นอาร์ในส่วนนี้ลดลงมากอาจจะเกิด Error ขึ้นได้เนื่องจากค่าโอเอสเอ็นอาร์ต่ำสุดของอุปกรณ์ ดับเบิลยูดีเอ็มที่ใช้ทดสอบนี้มีค่าอยู่ที่ 16 dB ซึ่งจากค่าที่วัดได้ถ้านำไปใช้งานอาจจะเกิด Error ขึ้นได้

### 4.3 การวิเคราะห์ผลโอเอสเอ็นอาร์จากการวัดเปรียบเทียบกับกรคำนวณ

#### 4.3.1 การคำนวณ OSNR จากสมการ ITU G.692

ในงานวิจัยนี้ได้คำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์โดยอาศัยสมการของ ITU-T Rec. G.692 Optical interface for multichannel systems with optical amplifiers จากสมการที่ I-3 หน้า 17 [14]

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10\log N - 10\log [h\nu\Delta\nu_0] \quad \text{dB} \quad (4.1)$$

จากสมการ (4.1) สูตรคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์มีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

1.  $P_{out}$  กำลังงานของด้านขาออก จากคุณสมบัติของอุปกรณ์ หน่วย dB [12]
2. ค่า Noise figure:  $NF$  ของ Amplifier มีค่า 7.3 dB [12]
3.  $10\log [h\nu\Delta\nu_0]$  มีค่า -58 dB ในความยาวคลื่น 1.550 nm ที่ resolution bandwidth 0.1 nm
4. ค่า  $L$  คือค่าการลดทอนในสายใยแก้วนำแสง หน่วย dB

ค่าของ  $L$  ซึ่งเป็นค่าการลดทอนในสายใยแก้วนำแสงคำนวณได้จากสมการของ ITU-T Rec. G 652 Characteristics of a single-mode optical fiber cable

$$L = \alpha D + \alpha_s x + \alpha_c y \quad \text{dB} \quad (4.2)$$

โดยที่

1. ค่าของ  $L$  คือค่าการลดทอนของสายใยแก้วนำแสง dB
2.  $\alpha$  คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสาย (dB)
3.  $\alpha_s$  คือค่าการสูญเสียจากการเชื่อมต่อ (Splice Loss) (dB)
4.  $\alpha_c$  คือค่าการสูญเสียการเชื่อมต่อ โยง (Connection Loss) (dB)

5.  $x$  คือจำนวนครั้งของการ Splice (point)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.  $y$  คือจำนวนของ connector ใน link (point)

7.  $D$  คือระยะทางของเคเบิล (km)

จากสมการ 4.2 ในส่วนของจำนวนครั้งของการเชื่อมต่อ (Splice) คัดจากความยาวของสายที่อยู่ใน roll มีความยาว 4 กิโลเมตร ดังนั้นจำนวนครั้งของการ splice คือ  $\frac{D}{4}$  จึงจะได้ค่าจำนวนครั้งของการ splice

ในสมการที่ (4.1) ค่า  $P_{out}$  เป็นค่าที่ได้จากคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ  $P_{out}$  หมายถึง กำลังงานขาออกต่อช่องสัญญาณ ในหน่วย dB  $NF$  หมายถึง External Noise figure ในหน่วย dB [15]  $L$  หมายถึงการลดทอนของ span ระหว่าง Amplifier ในหน่วย dB  $\Delta\nu_0$  หมายถึง Optical Bandwidth  $N$  หมายถึง จำนวนของ span ในช่วงระหว่างเทอร์มินัลถึงเทอร์มินัล  $\nu$  หมายถึง optical frequency 193 THz  $h$  หมายถึง Plank' constant ( $6.6260 \times 10^{-34}$ ) โดยใน ITU-T G.692 สมมติให้ทุกๆ span มีค่าเท่าๆ กันและกำหนดไว้ว่าในความยาวคลื่น 1550 nm ที่ optical bandwidth 0.1 nm ให้ค่าของ  $10 \text{ Log } [h\nu \Delta\nu_0]$  มีค่า  $-58$  dB ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า  $L$  ที่ได้จากการคำนวณจากระยะทางที่ได้มาจากแบบการติดตั้งเคเบิลโดยใช้สมการที่ (4.2) ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหา  $L$  เราได้มาจากคำแนะนำใน ITU-T G.652 ซึ่งจะเห็นว่าค่าการลดทอนของแต่ละ span จะมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสถานีที่ติดตั้งอุปกรณ์เมื่อได้ค่าของ  $L$  แล้วจึงนำมาใช้ในการคำนวณค่าของโอเอสเอ็นอาร์ในสมการที่ (4.1) ในงานวิจัยนี้จะทำการคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์ใน Route 1 เส้นทางพระโขนงถึงนครราชสีมาทั้ง 3 ช่องสัญญาณ (ความถี่ 193.45 THz ความถี่ 193.05 THz และความถี่ 193.00 THz) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดตารางในการคำนวณแสดงในหัวข้อ 4.5

#### 4.3.2 การวิเคราะห์ผลโอเอสเอ็นอาร์จากผลการวัดเปรียบเทียบกับกรคำนวณ

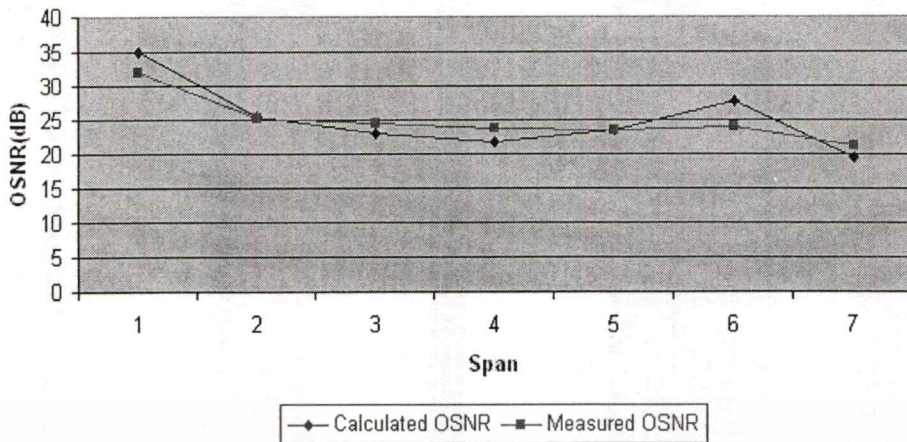
การคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์จะคำนวณในเส้นทางสถานีพระ โขนงถึงสถานีนครราชสีมา โดยการวิเคราะห์จะพิจารณาความยาวคลื่นที่ความถี่ 193.45 THz ตามสมการ ITU-T G. 692 โดยจะทำการคำนวณในทุกช่วงของตัวอุปกรณ์ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวัด โดยในการวัดจะเป็นการวัดที่ใช้งานความยาวคลื่นจริงกับระยะทางจริง และในส่วนการคำนวณจะใช้ค่าของพารามิเตอร์ที่เป็นแบบเดียวกันกับการวัด

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณโอเอสเอ็นอาร์ในเส้นทาง Route 1

Station	Distance (km)	Total distance (km)	$P_{out}$	L	NF	N	10 Log N	10 Log [hvAv <sub>0</sub> ]	OSNR (dB)
PKG-CBI	78.55	78.55	6	21.61	7.3	1	0	-58	35.09
CBI-PRI	128.4	206.95	12.39	34.70	7.3	2	3.0103	-58	25.38
PRI-SKE	105.5	312.45	5.69	28.60	7.3	3	4.77121	-58	23.02
SKE-TPY	102.59	415.04	5	27.90	7.3	4	6.0206	-58	21.78
TPY-NRG	93.13	508.17	5.08	25.40	7.3	5	6.9897	-58	23.39
NRG-BRM	60	568.17	1.64	16.70	7.3	6	7.7815	-58	27.86
BRM-NMA	132.28	700.45	12.89	35.70	7.3	7	8.4509	-58	19.44

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบโอเอสเอ็นอาร์ระหว่างผลการคำนวณและผลการวัด

Station	Distance (km)	Total distance (km)	OSNR Calculated	OSNR Measured
PKG-CBI	78.55	78.55	35.09	32.08
CBI-PRI	128.4	206.95	25.38	25.35
PRI-SKE	105.5	312.45	23.02	24.43
SKE-TPY	102.59	415.04	21.78	23.83
TPY-NRG	93.13	508.17	23.39	23.59
NRG-BRM	60	568.17	27.86	26.92
BRM-NMA	132.28	700.45	19.44	21.24



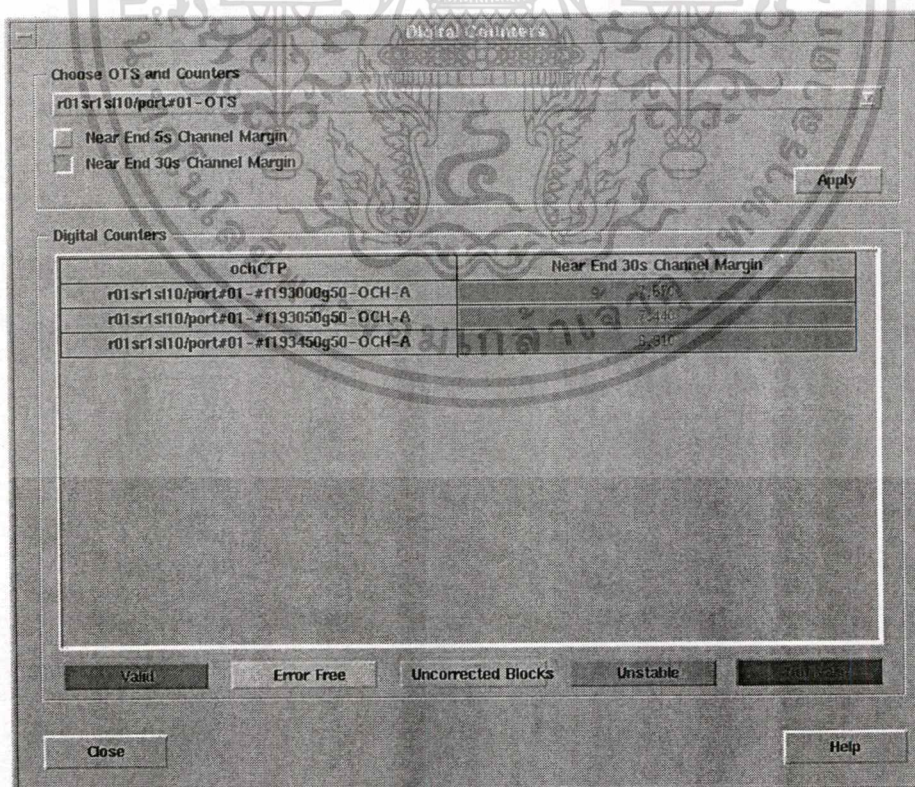
รูปที่ 4.9 กราฟโอเอสเอ็นอาร์เปรียบเทียบการวัดกับการคำนวณ

ค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการวัดของเส้นทางสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา ในแต่ละช่วงสังเกตได้ว่ามีค่าต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้มาจากหลายตัวแปร ในการติดตั้งอุปกรณ์ใช้งานจริงไม่สามารถระบุระยะทางให้เท่ากันได้ทุกช่วงของสถานี เนื่องจากต้องติดตั้งอุปกรณ์ตามสถานีที่มีอยู่เดิม ดังนั้นในการคำนวณค่าของการลดทอน  $L$  เป็นค่าที่คำนวณมาจากระยะทางตามแบบการติดตั้งสายใยแก้วจริงซึ่งในการติดตั้งอาจมีหลายตัวแปรที่ทำให้ค่าของการลดทอนเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่นค่าของการเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว (Splicing Attenuation) อาจจะมีจุดที่เชื่อมต่อมากกว่าที่ใช้ในการคำนวณ หรือค่าของการลดทอนในเส้นใยแก้วนำแสง (Line Attenuation) จากการคำนวณกำหนดไว้ที่  $0.25\text{dB/km}$  ซึ่งค่านี้ อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับคุณภาพในการผลิตของผู้ผลิต หรือค่าของตัวเชื่อมต่อ (Connector Loss) ก็อาจจะมีค่าที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ เนื่องจากสายใยแก้วนำแสงที่มาจากขั้วสายตอนนอกเมื่อมาเชื่อมต่อกับสายใยแก้วที่ต่อเข้าสู่อาคารอาจจะมีจุดต่อมากกว่าที่กำหนดไว้ในสมการ ตัวแปรเหล่านี้จะทำให้ค่าของ  $L$  ที่ใช้ในการคำนวณเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลทำให้ค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่คำนวณได้เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองโดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนไว้ที่  $5\text{ dB}$  ที่ทุกๆ ช่วงของเส้นทางสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา จากผลของค่าการลดทอนของสายใยแก้วแล้วยังมีค่าของอัตราขยาย (Gain) ที่ไม่เท่ากันของแต่ละช่วง เนื่องจากตัวอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ (Optical Amplifier) ในการติดตั้งตัวอุปกรณ์ขยายสัญญาณนั้นต้องคำนึงถึงระยะทางที่ตัวอุปกรณ์นั้นจะส่งออกไป เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกัน โดยที่การคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์ในแต่ละช่วงได้ใช้ค่าอัตราขยายที่ถูกกำหนดโดยตัวอุปกรณ์มีสองค่า คือที่อัตราขยาย  $22\text{ dB}$  กับ  $28\text{ dB}$  [12] แต่ในส่วนของ การวัดจริงค่าอัตราขยายสามารถเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าขึ้นอยู่กับค่าสัญญาณที่แสดงบนเครื่องวัด Optical Spectrum Analyzer:

OSA เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับการใช้งาน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟโอเอสเอ็นอาร์เปรียบเทียบการวัดกับการคำนวณ สังเกตได้ว่าค่าโอเอสเอ็นอาร์ใน span ที่ 6 ผลจากการคำนวณ จะมีค่ามากกว่าการวัดอยู่ 0.92 dB ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณที่สำคัญที่มีผลกับโอเอสเอ็นอาร์คือค่าของการลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสง ( $L$ ) ค่ากำลังงานด้านส่ง ( $P_{out}$ ) และอัตราขยายของอุปกรณ์ (Optical Amplifier: OA) ซึ่งค่าของการลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงใน span ที่ 6 นั้นมีค่าน้อยกว่า span อื่นๆ อีกทั้งค่ากำลังงานด้านส่งและอุปกรณ์ OA ที่สถานี NRG ส่งไปให้กับสถานี BRM นั้นจะต้องส่งด้วยค่าที่จะทำให้อุปกรณ์ OA ที่สถานี BRM มีอัตราขยายพอที่จะส่งกำลังงานผ่านไปยังสถานี NMA ที่มีระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงที่ระยะ 132.28 กม.ได้ โดยที่ค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้านสถานี NMA ยังสามารถรับได้โดยไม่เกิด Error ดังนั้นผลการคำนวณใน span ที่ 6 ค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่สถานี BRM จึงมีค่าสูงกว่าผลการวัด 0.92 dB

จากผลที่ได้กับการทดลองนี้สามารถประมาณการณได้ว่าในเส้นทางสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา ควรจะทำการปรับปรุงค่าโอเอสเอ็นอาร์เมื่อใดพิจารณาจากค่าของ Channel margin: CM ค่าที่สามารถทำงานได้ BER PREFEC ระหว่าง  $7 \cdot 10^{-5}$  ถึง  $10^{-12}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เป็นการวัดค่า CM ที่สถานีปลายทางนครราชสีมาโดยที่สามารถวัดได้ที่ Network Management System ค่าที่วัดออกมาจะอยู่ในลักษณะค่าของการนับบิตผิดพลาด โดยเทียบกับค่าของเวลา [12]



รูปที่ 4.10 แสดงค่าการวัดของ Channel margin ที่สถานีนครราชสีมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์จากเครื่องมือวัด Optical Spectrum Analyzer (OSA)

##### 4.4.1 ตารางบันทึกผลการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์ ทั้ง 3 Route

จากการใช้เครื่องมือวัด Optical Spectrum Analyzer (OSA) ใน Route 1 นำผลที่ได้มาบันทึกลงตารางจากสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมาและสถานีนครราชสีมาถึงสถานีพระโขนง ดังตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์เส้นทางสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา

Location	Distance (km.)	Span	Attenuation (dB)	Freq.		
				193.45THz	193.05THz	193.00THz
PKG-CBI	78.55	1	21.61	32.08	30.05	29.24
CBI-PRI	128.40	2	34.70	25.35	24.52	23.72
PRI-SKE	105.50	3	28.69	24.43	24.84	24.09
SKE-TPY	102.59	4	27.92	23.83	23.28	22.71
TPY-NRG	93.13	5	25.44	23.59	23.27	23.06
NRG-BRM	60	6	16.75	23.92	22.28	21.44
BRM-NMA	132.28	7	35.72	21.24	19.75	19.50

ตารางที่ 4.8 ผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์เส้นทางสถานีนครราชสีมาถึงสถานีพระโขนง

Location	Distance (km.)	Span	Attenuation (dB)	Freq.		
				193.45THz	193.05THz	193.00THz
NMA-BRM	132.28	1	35.72	23.85	20.46	20.46
BRM-NRG	60	2	16.75	22.92	20.51	20.25
NRG-TPY	93.13	3	25.44	21.26	19.35	19.15
TPY-SKE	102.59	4	27.92	21.06	19.20	19.37
SKE-PRI	105.50	5	28.69	20.97	19.26	19.38
PRI-CBI	128.40	6	34.70	30.30	27.70	27.81
CBI-PKG	78.55	7	21.61	26.19	25.86	25.98

จากการใช้เครื่องมือวัด Optical Spectrum Analyzer (OSA) ใน Route 2 นำผลที่ได้มาบันทึกลงตารางจากสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีพิษณุโลกและสถานีพิษณุโลกถึงสถานีเชียงใหม่ดังตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.9** ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์เส้นทางสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีพิษณุโลก

Location	Distance (km.)	Span	Attenuation (dB)	Freq. 193.45THz	Freq. 193.50THz
CMI2-LPG	106.00	1	28.83	23.79	23.96
LPG-PRE	104.01	2	28.30	22.95	22.65
PRE-SLK	115.00	3	31.19	21.08	21.35
SLK-PLKR	90.70	4	24.81	19.37	19.40

**ตารางที่ 4.10** ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์เส้นทางสถานีพิษณุโลกถึงสถานีเชียงใหม่

Location	Distance (km.)	Span	Attenuation (dB)	Freq. 193.45THz	Freq. 193.50THz
PLKR-SLK	90.70	1	24.81	22.32	21.94
SLK-PRE	115.00	2	31.19	22.37	22.09
PRE-LPG	104.01	3	28.3	21.89	21.61
LPG-CMI2	106.00	4	28.83	21.74	21.21

จากการใช้เครื่องมือวัด Optical Spectrum Analyzer (OSA) ใน Route 3 นำผลที่ได้มาบันทึกลงตารางจากสถานีพิษณุโลกถึงสถานีขอนแก่นและสถานีขอนแก่นถึงสถานีพิษณุโลกดังตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์เส้นทางสถานีพิษณุโลกถึงสถานีขอนแก่น

Location	Distance (km.)	Span	Attenuation (dB)	Freq. 193.45THz	Freq. 193.50THz
PLKR-PCT	71.5	1	19.76	25.90	26.86
PCT-PBN	95.3	2	26.01	25.07	26.16
PBN-LSK	55.0	3	15.43	24.95	25.93
LSK-KKN	190.0	4	50.87	22.94	23.21
KKN-KKN(TOT)	13.0	5	4.41	23.78	23.95

ตารางที่ 4.12 ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์เส้นทางสถานีขอนแก่นถึงสถานีพิษณุโลก

Location	Distance (km.)	Span	Attenuation (dB)	Freq. 193.45THz	Freq. 193.50THz
KKN(TOT)-KKN	13.0	1	4.41	31.97	31.97
KKN-LSK	190.0	2	50.87	20.34	20.74
LSK-PBN	55.0	3	15.43	23.81	24.20
PBN-PCT	95.3	4	26.01	24.14	23.91
PCT-PLKR	71.5	5	19.76	23.85	23.80

การวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้วยเครื่องมือวัด OSA ในกรณีที่เพิ่มค่าการลดทอน 5 dB ของยกตัวอย่างการบันทึกผลใน Route 1 ซึ่งมีการใช้งานความยาวคลื่นมากกว่า Route 2 และ Route 3

ผลการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์ด้วยเครื่องมือวัด Optical Spectrum Analyzer (OSA) ใน Route 1 นำผลที่ได้มาบันทึกลงตารางจากสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมาและสถานีนครราชสีมาถึงสถานีพระโขนง ดังตารางที่ 4.13 และตารางที่ 4.14 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.13** ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์แบบเพิ่มค่าการลดทอน 5 dB เส้นทางสถานีพระโขนงถึง  
สถานีนครราชสีมา

Location	Distance (km.)	Span	Attenuation (dB)	Freq. 193.45THz	Freq. 193.05THz	Freq. 193.00THz
PKG-CBI	78.55	1	26.61	26.87	26.28	26.16
CBI-PRI	128.40	2	39.70	19.49	19.44	19.00
PRI-SKE	105.50	3	33.60	23.68	23.86	23.37
SKE-TPY	102.59	4	32.90	22.53	22.09	21.82
TPY-NRG	93.13	5	30.40	22.57	22.71	22.36
NRG-BRM	60	6	21.70	21.63	21.88	21.13
BRM-NMA	132.28	7	40.70	17.20	16.47	16.76

**ตารางที่ 4.14** ผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์แบบเพิ่มค่าการลดทอน 5 dB เส้นทางสถานีนครราชสีมาถึง  
สถานีพระโขนง

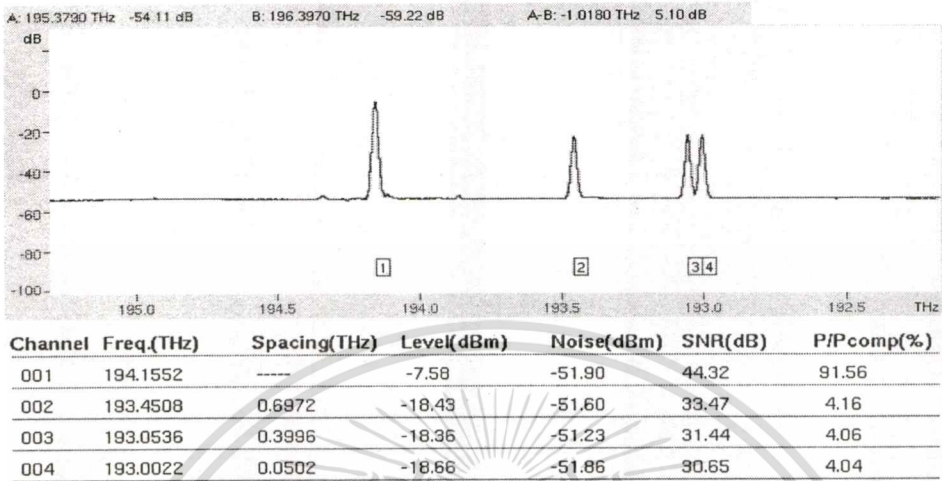
Location	Distance (km.)	Span	Attenuation (dB)	Freq. 193.45THz	Freq. 193.05THz	Freq. 193.00THz
NMA-BRM	132.28	1	40.7	20.62	17.07	16.88
BRM-NRG	60	2	21.7	20.26	19.35	19.24
NRG-TPY	93.13	3	30.4	19.4	18.33	18.12
TPY-SKE	102.59	4	32.9	20.63	19.23	19.14
SKE-PRI	105.50	5	33.60	20.73	18.83	18.74
PRI-CBI	128.40	6	39.70	27.07	26.84	26.88
CBI-PKG	78.55	7	26.61	22.15	22.58	23.24

#### 4.4.2 ผลการวัดสเปกตรัมจากเครื่องมือ Optical Spectrum Analyzer (OSA)

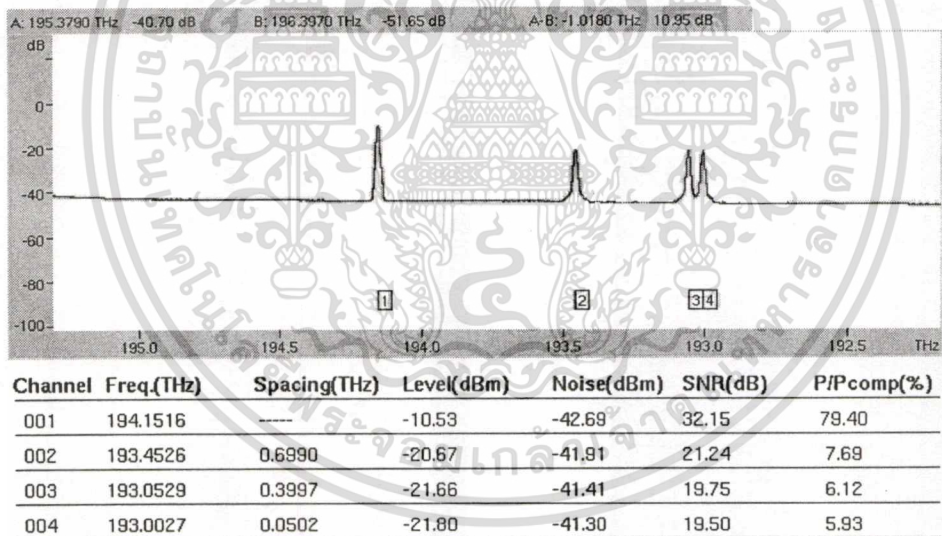
การวัดสเปกตรัมในแต่ละเส้นทาง (Route) จะทำการวัดที่ด้านส่งและด้านรับของแต่ละ Route ดังนั้นการวัดใน 1 Route จะแสดงผลของสเปกตรัม 4 รูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

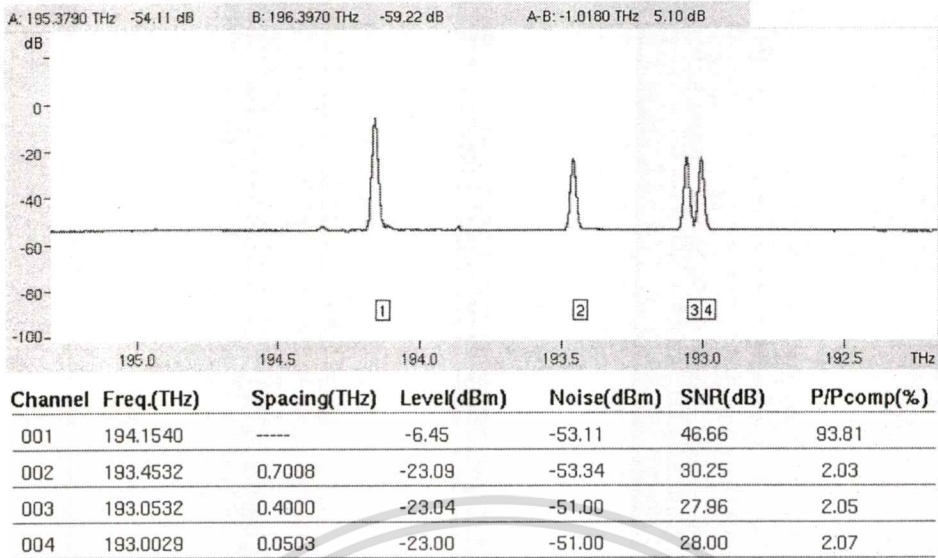
#### 4.4.2.1 ผลการวัดสเปกตรัมที่เส้นทางสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมาและเส้นทางนครราชสีมาถึงสถานีพระโขนง (Route 1)



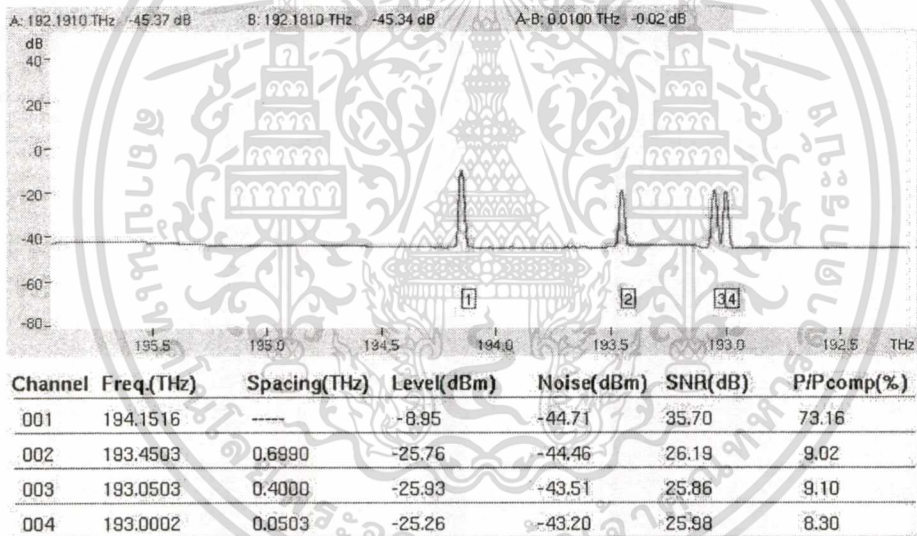
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งที่สถานีพระโขนง



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านรับที่สถานีนครราชสีมา



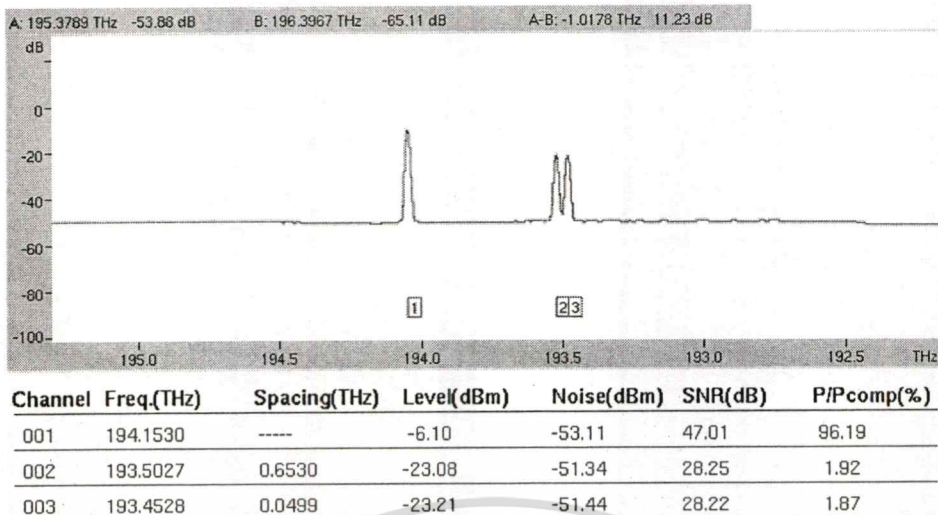
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งที่สถานีนครราชสีมา



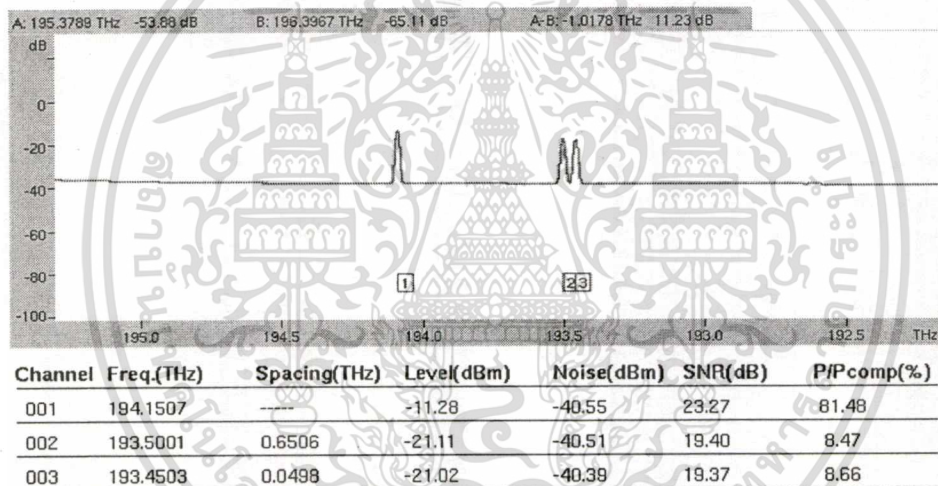
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านรับที่สถานีพระโขนง

#### 4.4.2.2 ผลการวัดสเปกตรัมที่เส้นทางสถานีเชียงใหม่ถึงสถานีพิษณุโลกและ เส้นทางสถานีพิษณุโลกถึงสถานีเชียงใหม่ (Route 2)

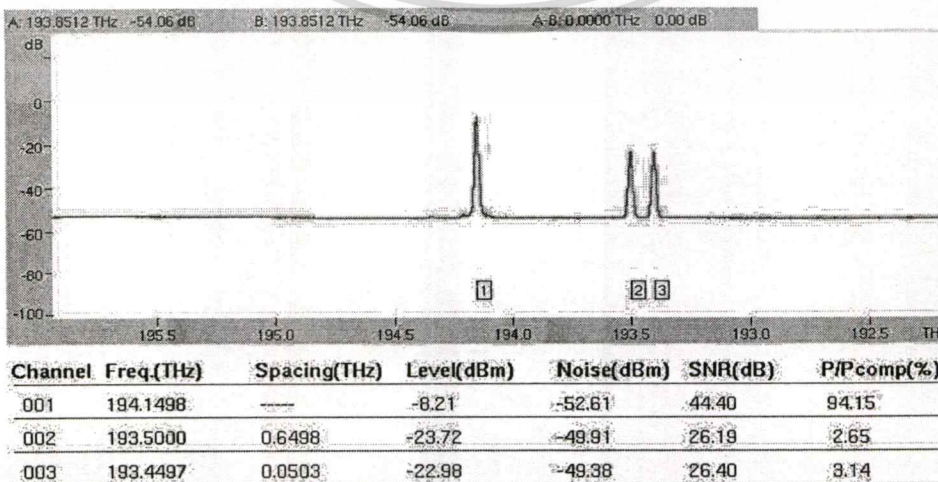
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งที่สถานีเชียงใหม่

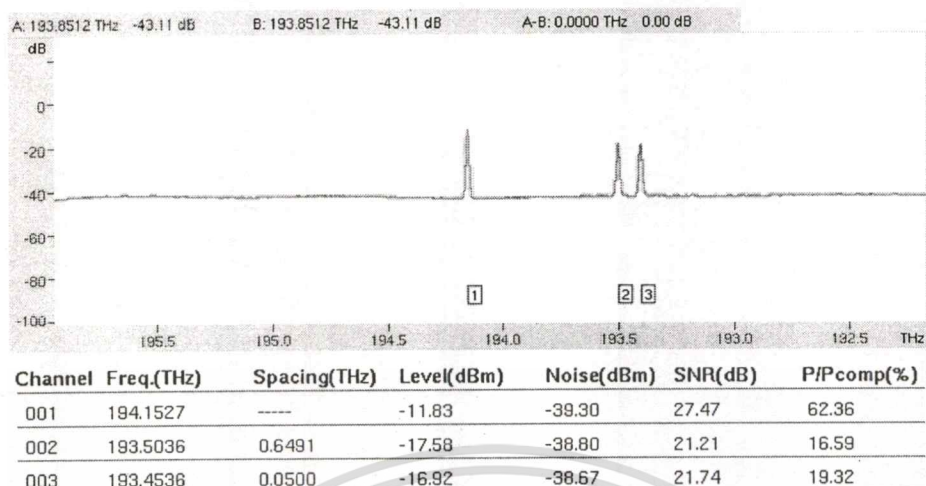


รูปที่ 4.16 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านรับที่สถานีพิษณุโลก



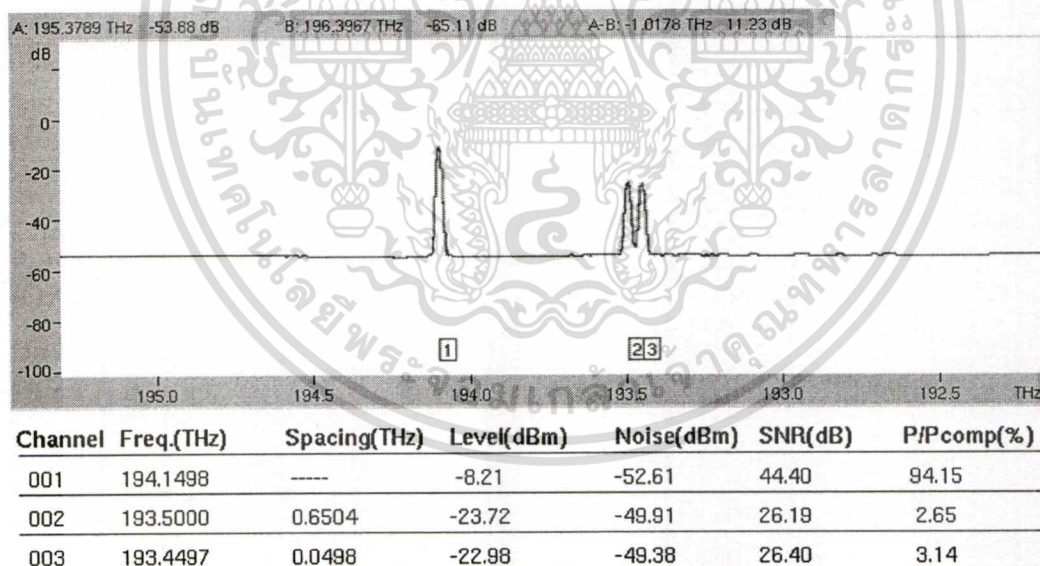
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งที่สถานีพิษณุโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้ส่วนที่ควรใช้ภายใต้การพิจารณาของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



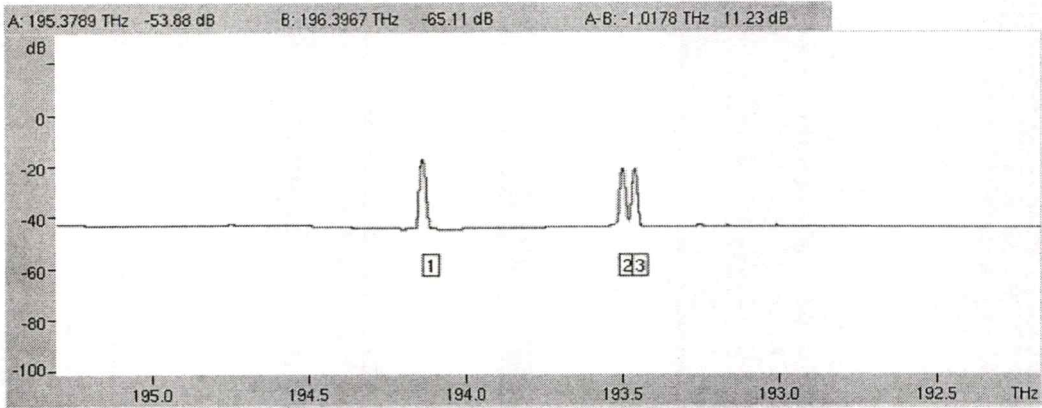
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านรับที่สถานีเชียงใหม่

4.4.2.3 ผลการวัดสเปกตรัมที่เส้นทางสถานีพิษณุโลกถึงสถานีขอนแก่นและ  
เส้นทางสถานีขอนแก่นถึงสถานีพิษณุโลก (Route 3)



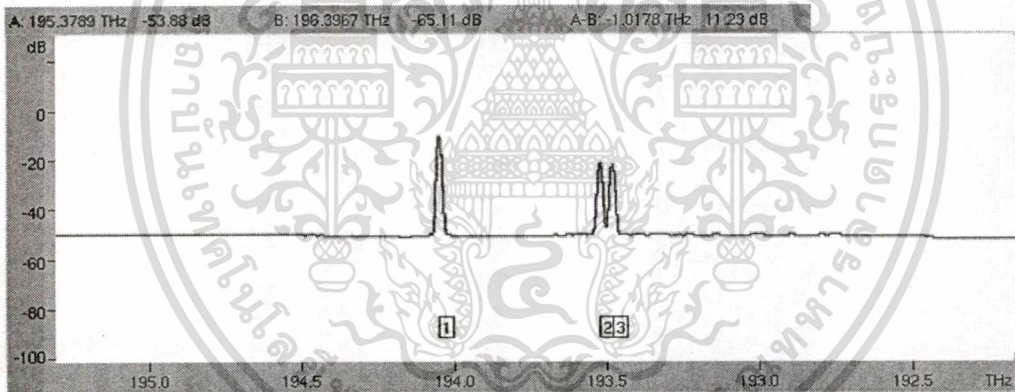
รูปที่ 4.19 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งที่สถานีพิษณุโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Channel	Freq.(THz)	Spacing(THz)	Level(dBm)	Noise(dBm)	SNR(dB)	P/Pcomp(%)
001	194.1530	----	-16.87	-41.98	25.11	35.82
002	193.5027	0.6503	-17.42	-41.38	23.95	31.54
003	193.4526	0.0501	-17.51	-41.29	23.78	30.93

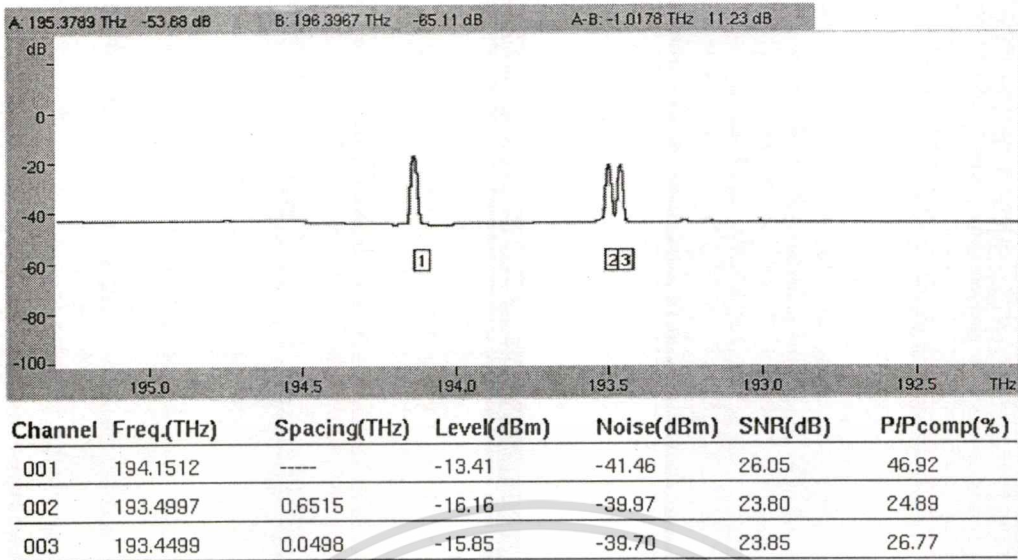
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านรับที่สถานีขอนแก่น



Channel	Freq.(THz)	Spacing(THz)	Level(dBm)	Noise(dBm)	SNR(dB)	P/Pcomp(%)
001	194.1542	----	-9.98	-55.10	45.12	88.73
002	193.5027	0.6515	-21.84	-53.26	31.42	5.78
003	193.4529	0.0498	-22.11	-52.91	30.79	5.44

รูปที่ 4.21 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งที่สถานีขอนแก่น

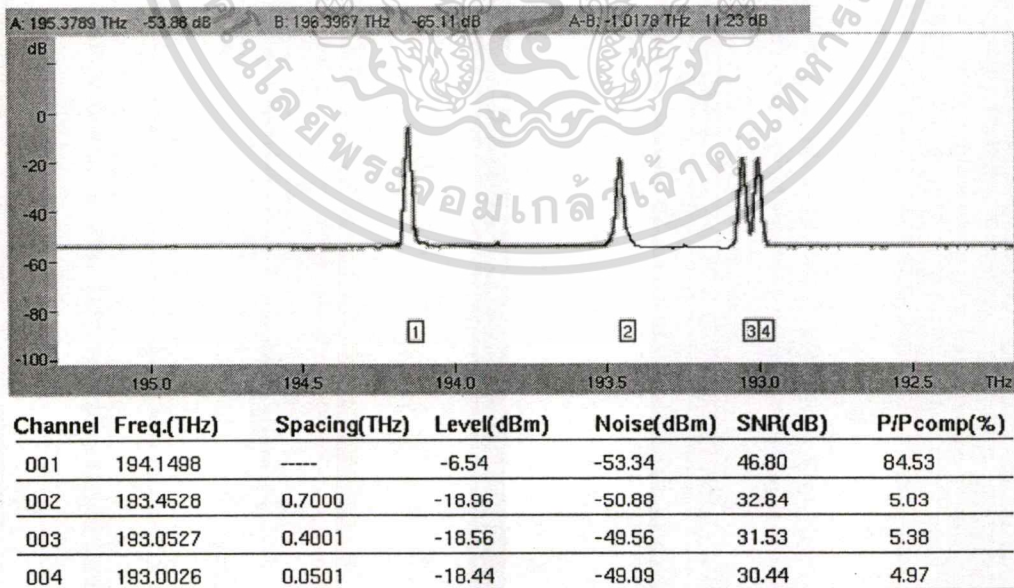
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านรับที่สถานีพิษณุโลก

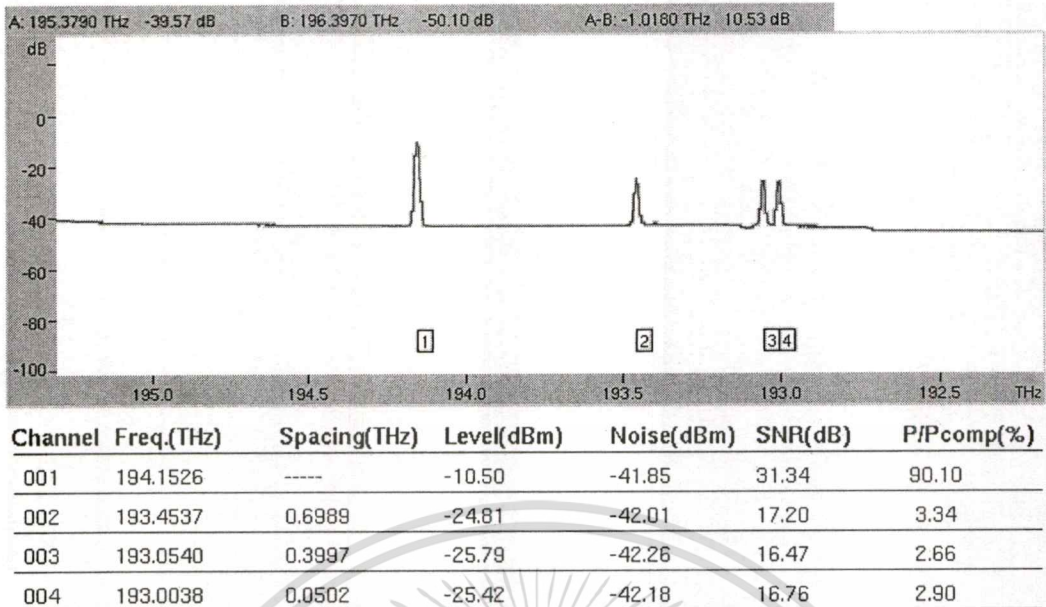
การวัดค่าสเปกตรัมจากเครื่องมือวัด Optical Spectrum Analyzer (OSA) ในกรณีที่เพิ่มค่าการลดทอน 5 dB ขอยกตัวอย่างการบันทึกผลใน Route 1 ซึ่งมีการใช้งานความยาวคลื่นมากกว่า Route 2 และ Route 3

4.4.2.4 ผลการวัดสเปกตรัมเส้นทางสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมาและเส้นทางนครราชสีมาถึงสถานีพระโขนงแบบเพิ่มการลดทอน 5 dB ในสายใยแก้วนำแสง (Route 1)

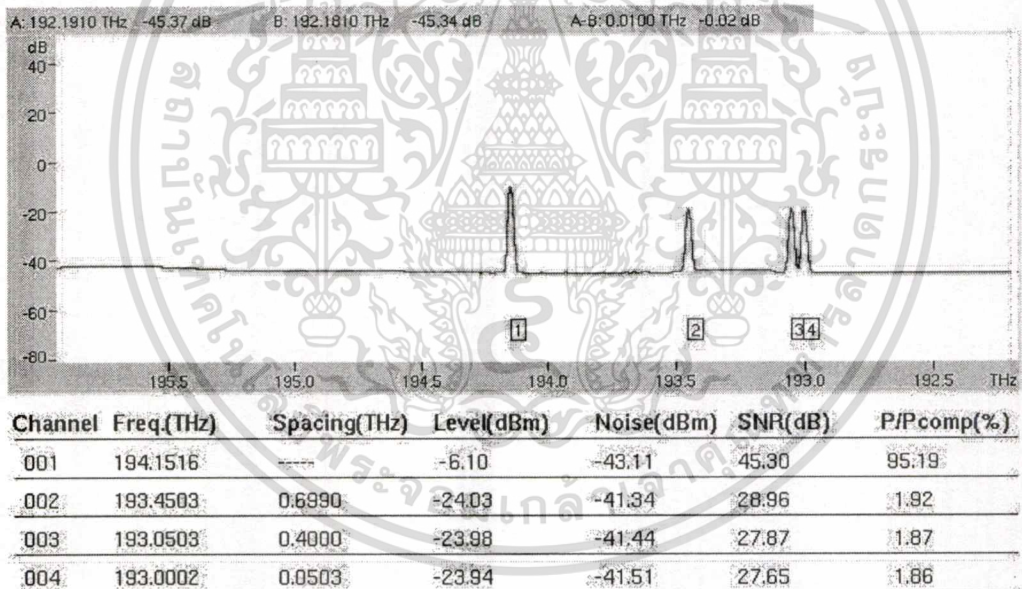


รูปที่ 4.23 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งแบบเพิ่มค่าลดทอน 5 dB ที่สถานีพระโขนง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

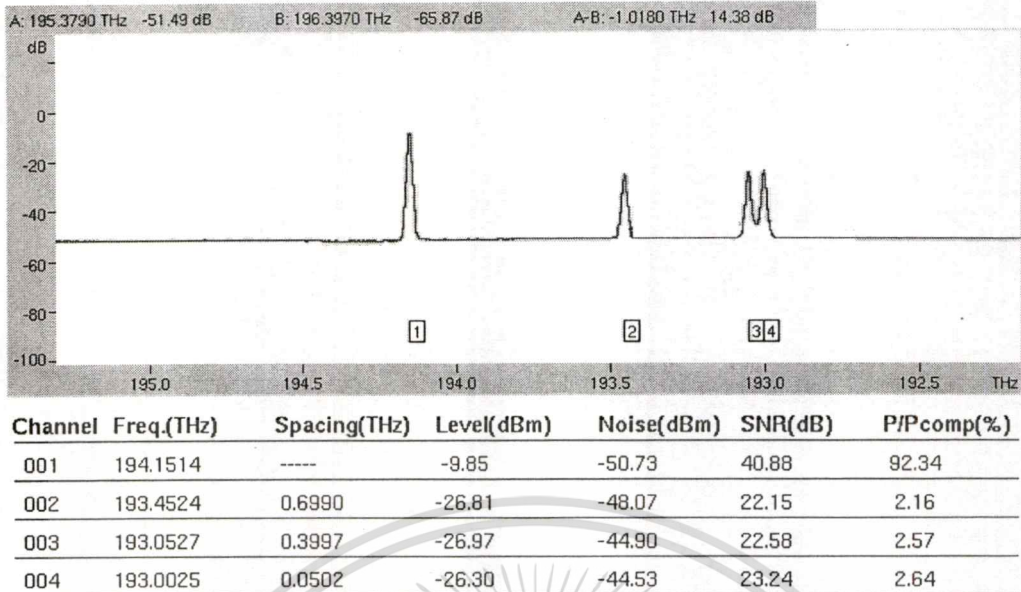


รูปที่ 4.24 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านรับแบบเพิ่มค่าลดทอน 5 dB ที่สถานีนครราชสีมา



รูปที่ 4.25 สเปกตรัมและค่าไอเอสเอ็นอาร์ด้านส่งแบบเพิ่มค่าลดทอน 5 dB ที่สถานีนครราชสีมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมและค่าโอเอสเอ็นอาร์ค่านับแบบเพิ่มค่าลดทอน 5 dB ที่สถานีพระโขนง

#### 4.5 คุณลักษณะโอเอสเอ็นอาร์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบดับเบิ้ลยูดีเอ็มที่ใช้ทดสอบ

คุณลักษณะ โอเอสเอ็นอาร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นการนำผลการวิเคราะห์จากผลการวัดและการคำนวณมาทำการวิเคราะห์หาค่าลักษณะเฉพาะของแต่ละช่วง (span) เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประมาณหาค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่เหมาะสมเพื่อการบำรุงรักษาระบบโครงข่าย ผลของการเปรียบเทียบการวัดและการคำนวณมีลักษณะที่แตกต่างกันของแต่ละ Span ซึ่งนั่นเป็นผลมาจากหลายตัวแปรโดยแต่ละช่วงระยะทางก็มีค่าไม่เท่ากันส่งผลให้ค่าการลดทอนในสายเส้นใยแก้วไม่เท่ากัน ค่าของอัตราขยายหรือค่า Gain ก็ไม่เท่ากัน ซึ่งการปรับแต่งค่านั้นจะต้องใช้เครื่องวัด OSA เพราะจะต้องพิจารณาจากสเปกตรัมของสัญญาณด้วย ลักษณะของสัญญาณควรมีค่าเท่ากันทำให้อัตราขยายของอุปกรณ์ในแต่ละช่วง ขยายสัญญาณไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดค่าความแตกต่างระหว่างผลของการวัดกับผลของการคำนวณ ดังนั้นจากผลของค่าความแตกต่างของผลลัพธ์ทั้งสองจึงต้องมีการชดเชยค่าในส่วนที่ขาด ในที่นี้จะคงค่าของผลการวัดไว้เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับเส้นทางนั้น ๆ แล้วโดยผ่านขั้นตอนในการทดสอบค่าบัพผิดพลาด (Error) มาแล้ว

ค่าความแตกต่างคือค่าของผลการวัด โอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการคำนวณกับค่าของผลการวัดโอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากเครื่องวัด OSA จากผลการทดสอบพบว่าในแต่ละ span ค่าความแตกต่างของช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากค่าจากการวัดจะมีระดับสัญญาณไม่เท่ากันทุกช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแสงแต่ละความยาวคลื่น แต่ค่าจากการคำนวณจะใช้ค่าเท่ากันในทุกช่องสัญญาณ ค่าลักษณะโอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการทดสอบนี้สามารถ

เปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพการใช้งานของโครงข่ายก็ เนื่องจาก การเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นได้ ถ้าการคำนวณไม่ถูกต้องทุกคลื่น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นเท่าตัวค่าโอเอสเอ็นอาร์จะลดลง 3 dB หรือค่าการลดทอนในเส้นใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการซ่อมบำรุง การย้ายเส้นทางของเส้นใยแก้วที่เพิ่มขึ้นจากเดิม หรือค่ากำลังงานของเลเซอร์และอุปกรณ์ที่เสื่อมคุณภาพตามระยะเวลาการใช้งานเป็นต้น

ตารางที่ 4.15 ค่าความแตกต่างระหว่างการวัดกับการคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ Route 1

Location	Freq. 193.45THz	Calculated	Diff	Freq. 193.05THz	Calculated	Diff	Freq. 193.00THz	Calculated	Diff
PKG-CBI	32.08	35.09	-3.01	30.05	35.09	-5.04	29.24	35.09	-5.85
CBI-PRI	25.35	25.38	-0.03	24.52	25.38	-0.86	23.72	25.38	-1.66
PRI-SKE	24.43	23.02	1.41	24.84	23.02	1.82	24.09	23.02	1.07
SKE-TPY	23.83	21.78	2.05	23.28	21.78	1.5	22.71	21.78	0.93
TPY-NRG	23.59	23.39	0.2	23.27	23.39	-0.12	23.06	23.39	-0.33
NRG-BRM	26.92	27.86	-0.98	22.28	23.86	-1.58	21.44	23.86	-2.42
BRM-NMA	21.24	19.44	1.8	19.75	19.44	0.31	19.50	19.44	0.06

ตารางที่ 4.15 เป็นการเปรียบเทียบค่าของโอเอสเอ็นอาร์ที่เป็นผลจากการวัดกับการคำนวณ ซึ่งค่าที่แตกต่างกันในการคำนวณโอเอสเอ็นอาร์จะต้องคำนึงถึงตัวแปรในแต่ละช่วงเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งจากการคำนวณค่าที่มีผลกับโอเอสเอ็นอาร์เป็นค่าการลดทอนสัญญาณในสาย อีกทั้งค่าของอัตราขยายสัญญาณก็มีผลกับค่าโอเอสเอ็นอาร์เช่นกันเนื่องจากในส่วนของ การคำนวณจะใช้พารามิเตอร์กำลังงานด้านส่งด้วย โดยที่ค่ากำลังงานด้านส่งจะมีค่ามากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับการปรับแต่งค่าอัตราขยายของอุปกรณ์ Line optical fiber amplifier

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ปรับแต่งค่าชดเชยโอเอสเอ็นอาร์

Station	Distance (km)	Total distance (km)	Pout	L	NF	N	10 Log N	Measured OSNR	Calculated OSNR
PKG-CBI	78.55	78.55	6.00	21.61	7.3	1	0	32.08	35.09
CBI-PRI	128.4	206.95	12.39	34.70	7.3	2	3.0103	25.35	25.38
PRI-SKE	105.5	312.45	6.69	28.60	7.3	3	4.7712	24.43	24.02
SKE-TPY	102.59	415.04	6.09	27.90	7.3	4	6.0206	23.83	22.87
TPY-NRG	93.13	508.17	5.17	25.40	7.3	5	6.9897	23.59	23.48
NRG-BRM	60	568.17	0.77	16.70	7.3	6	7.7815	26.92	26.99
BRM-NMA	132.28	700.45	15.07	35.70	7.3	7	8.4509	21.24	21.62

ค่าของโอเอสเอ็นอาร์ที่มีค่าความแตกต่างกันระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณกับการวัดจริงนั้น ตารางที่ 4.16 ได้ทำการชดเชยค่าอัตราขยายในแต่ละช่วงโดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยทำการปรับที่ค่าของกำลังงานด้านส่งตามอัตราขยายที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าโอเอสเอ็นอาร์ใกล้เคียงกับการวัดจริง ในส่วนของ span ที่ 6 ค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการคำนวณจะมีค่ามากกว่าการวัดจริงอยู่ 0.98 dB ค่าที่มากกว่านี้เป็นผลมาจากค่าของกำลังงานด้านส่ง ( $P_{out}$ ) ที่ส่งออกมาสูงเมื่อเทียบกับระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสงที่ระยะสั้นกว่า span อื่น แต่เมื่อทำการปรับลดค่าอัตราขยายกับกำลังงานด้านส่งลงทำให้ค่าโอเอสเอ็นอาร์มีค่าใกล้เคียงกับการวัดจริง การปรับแต่งค่ากำลังงานและอัตราขยายต้องคำนึงถึงค่าสูงสุดของอุปกรณ์ OA เพราะเมื่อทำการปรับค่าการขยายไว้สูงกำลังงานด้านส่งสูงเพื่อต้องการส่งให้ไกลขึ้นคุณภาพของตัวอุปกรณ์ก็จะเสื่อมสภาพเร็ว ฉะนั้นการปรับควรจะต้องลดตลอดทั้งเส้นทางโดยพิจารณาจากสเปคตรัมที่เครื่องมือวัด OSA ดังนั้นค่าในส่วนต่างๆที่ได้จากการคำนวณนี้จะนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำมาวิเคราะห์ใช้งานต่อไป

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 บทสรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาค่าของโอเอสเอ็นอาร์ของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม ซึ่งเป็นการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นผ่านเส้นใยแก้วนำแสง โดยที่โครงข่ายที่ใช้ทดสอบเป็นโครงข่ายหลักของบริษัท ทีโอที จำกัดมหาชน ที่ใช้เชื่อมโยงกับโครงข่ายท้องถิ่นทั่วประเทศในการรองรับความต้องการใช้งานที่มีเพิ่มมากขึ้น โดยระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงมีข้อดีตรงที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสามารถนำไปใช้งานเชื่อมโยงโครงข่ายที่ต้องการแบนด์วิดท์สูง ระยะทางไกลและมีการใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างคุ้มค่า วัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาผลกระทบที่มีผลโดยตรงกับค่าของโอเอสเอ็นอาร์ในระบบการเชื่อมโยงโครงข่ายหลักสำหรับการพิจารณาค่าโอเอสเอ็นอาร์ของโครงข่ายได้พิจารณาค่าของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในแต่ละช่วง ระยะทางระหว่างโหนด ค่าการลดทอนในเส้นใยแก้วนำแสง ค่าของกำลังงานแสงที่ส่งในเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละช่วง อัตราการขยายของตัวอุปกรณ์ในแต่ละโหนด ซึ่งโครงข่ายที่ใช้ทดสอบสร้างมาเพื่อรองรับกับปริมาณแทรฟฟิกที่ขยายเพิ่มจากของเดิมที่ใช้งานอยู่ดังนั้นค่าของความยาวคลื่นที่ใช้ทดสอบจึงเป็นค่าความยาวคลื่นที่ใช้งานจริง การศึกษาจะทำการวัดและทดสอบค่าโอเอสเอ็นอาร์ของระบบในแต่ละช่วง (span) ของแต่ละเส้นทางซึ่งมี 3 เส้นทางที่ใช้ทดสอบ โดยทำการทดสอบ 2 แบบ คือการวัดและทดสอบที่ความยาวคลื่นใช้งานจริงกับระยะทางจริง แบบที่สองเป็นการวัดและทดสอบที่ความยาวคลื่นใช้งานจริงที่เพิ่มค่าการลดทอนของเส้นใยแก้วนำแสงจากนั้นนำผลที่ได้จากการวัดและทดสอบมาทำการเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากสมการใน ITU-T G.692 ทำการหาคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละช่วงแต่ละเส้นทาง และสร้างตารางคำนวณโอเอสเอ็นอาร์จากค่าที่ทำการหาคุณลักษณะของแต่ละช่วงแต่ละเส้นทาง เพื่อใช้ในการเป็นข้อมูลพื้นฐานในการบำรุงรักษาระบบโครงข่าย โดยที่ไม่ต้องออกไปทำภาคสนาม

ผลการทดสอบในแบบที่ใช้ความยาวคลื่นจริงกับระยะทางจริง สังเกตได้ว่าค่าโอเอสเอ็นอาร์จะมีผลกระทบโดยตรงกับระยะทาง

ผลการทดสอบในแบบที่ใช้ความยาวคลื่นจริงกับระยะทางที่เพิ่มการลดทอนในเส้นใยแก้ว สังเกตได้ว่าที่ระยะทางเท่าเดิมค่าการลดทอนที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลกับค่าโอเอสเอ็นอาร์ในระยะทางที่สะสมมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าโอเอสเอ็นอาร์ตามคำแนะนำใน ITU-T G.692 เราพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าผลลัพธ์ที่แตกต่างจากค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการวัดในบางช่วง ซึ่งค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการวัดจะมีค่าใกล้เคียงกันระหว่างช่วงที่มีระยะทาง 95-100 กิโลเมตร และที่ระยะทางรวมตลอดเส้นทางมากกว่า 200 กิโลเมตร ค่าของโอเอสเอ็นอาร์จะมีค่าที่แตกต่างกันในบางช่วงของสถานี สาเหตุเนื่องมาจากระยะทางของการติดตั้งอุปกรณ์ที่สถานีนั้นไม่สามารถกำหนดระยะทางให้เท่ากันได้ในทุกช่วงของสถานี เช่น เส้นทางใน Route 1 คือสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา ระยะทางรวมประมาณ 700.45 กิโลเมตร แต่บางช่วงของสถานีที่มีระยะทางห่างกันมากที่สุดของเส้นทางนี้คือ 132.28 กิโลเมตร แต่ระยะทางก่อนหน้านี้มีระยะทาง 60 กิโลเมตร ซึ่งถ้าพิจารณาในส่วนของการสูญเสีย (Gain) การขยายสัญญาณก็ไม่สัมพันธ์กันเนื่องจากระยะทางค่อนข้างแตกต่างกันมากใน 2 ช่วงของสถานี รวมทั้งค่าการลดทอนในสายใยแก้วนำแสงที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าที่คำนวณมาจากระยะทางตามแบบการติดตั้งสายใยแก้ว ทำให้ค่าของโอเอสเอ็นอาร์ลดลงไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในความเป็นจริงการติดตั้งสายใยแก้ว อาจจะมีตัวแปรหลายตัวที่อาจมีค่าเปลี่ยนแปลงไปได้ เช่น ค่าการลดทอนจากการเชื่อมต่อของเส้นใยแก้วนำแสง (Splice Attenuation) อาจจะมีการซ่อมแซมในส่วนของสายใยแก้วทำให้ค่าในส่วนนี้อาจจะมีค่ามากกว่าที่คำนวณเนื่องจากจุด splice มีมากกว่าที่คำนวณ หรือค่าการสูญเสียจากอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Connection loss) อาจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากที่กำหนดไว้ในสมการหาค่าการลดทอน (L) เนื่องจากจุดต่อเชื่อมที่เป็นหัวเชื่อมต่อแบบ FC ที่ใช้กันในสถานีเชื่อมต่อระหว่างสายใยแก้วที่มาจากข่ายสายตอนนอกมาเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อาจมีการเชื่อมต่อกันมากกว่า 2 จุด หรือค่าของการลดทอนของสายใยแก้วนำแสง (Line Attenuation) ก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพในการผลิต ฉะนั้นนอกจากค่าการลดทอนของสายแล้วที่เป็นพารามิเตอร์สำคัญ ยังมีค่ากำลังงานในส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ที่เป็นพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการคำนวณเพื่อให้ได้ค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น

จากข้อมูลและผลของโอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการวัดกับการคำนวณ เมื่อนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าลักษณะเฉพาะของแต่ละช่วงในแต่ละเส้นทาง ทำให้ได้ข้อมูลในบางช่วงที่ต้องการปรับแต่งเพื่อให้ค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการคำนวณมีความใกล้เคียงกับค่าโอเอสเอ็นอาร์ที่ได้จากการวัดมากขึ้น และสามารถนำไปสร้างตารางค่าโอเอสเอ็นอาร์ของเส้นทางที่ต้องการได้เพื่อใช้ในการประมาณการค่าโอเอสเอ็นอาร์ของระบบได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือวัดจริง เพื่อการขยายหรือบำรุงรักษาโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

งานวิจัยในขั้นต่อไปที่น่าสนใจ การเพิ่มความยาวคลื่นโดยเฉลี่ยให้กระจายอยู่ในทุกแถบความถี่ (Band) เพื่อดูค่าของโอเอสเอ็นอาร์ใน Band อื่นเปรียบเทียบกับค่าสัญญาณต่างๆ ว่ามีค่าใกล้เคียงกันหรือมี Band ใดที่มีค่าน้อยต่างกัน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ความยาวคลื่นในการทดสอบไม่ได้มีระบบ การวิเคราะห์ค่าและหาคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละช่วงในเส้นทางอาจจะได้ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณไม่ยืดหยุ่นพอ ถ้ามีการเพิ่มความยาวคลื่นมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ปุณยวีร์ จามจรีกุล 2550. ระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้ว. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] อธิคม ฤกษ์บุตร. 2546. เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [3] J.P. LAUDE. **Wavelength Division Multiplexing**. Paris: Simon & Schuster International Group. 1993.
- [4] GOVIND P.AGRAWAL, **Fiber-Optic Communication System**. Thrid Edition. NY, John. Wiley & Son, Inc. 2002
- [5] A.R.Chraplyvy. "Limitations on lightwave communications laser for optical communication." **J. Lightwave Technology**., vol.8, no.10, 1991. pp. 1548-1557.
- [6] G.R.Waarts, A.Friesem, E.Lichtman, H.H.Yaffe, and R.P. Braum. "Nonlinear effects in coherent multichannel transmission through optical fibers." **J. Lightwave Technology**., vol.78, no.8, 1990. pp. 1344-1368.
- [7] A.E Wilner and S. Hwang. "Transmission of many WDM channel through a cascade op EDFA's in long-distance link and ring network." **J. Lightwave Technology**., vol.13, no.5, 1995. pp. 841-849.
- [8] G.R.Hill. "Wavelength domain optical network technique." **Proc. IEEE**., vol.77, no.1, 1990. pp. 121-132.
- [9] T. Antony, A. Gumaste. **DWDM Network Designs and Engineering Solution**. Cissco Press, 2003.
- [10] A.Ehrhardt and Gladisch. "Test For WDM Field Trials Over 750 Km With Full Compensation of Chromatic Dispersion." **The Institution of Electrical Engineering, IEE Savoy Place**., London WC2R OBL, 1999. pp. 5/1-5/5
- [11] F.Pope, K. Wellington, G Keiser, GTE Government Systems Coperation. "BIT ERROR-RATE MEASUREMENTS IN A WDM NETWORK." **IEEE**., 1995. pp. 1284-1287.
- [12] Alcatel University. **Alcatel 1686 WM R3.3 Operation and Maintenance**. Italy, 2000.
- [13] ITU-T rec.G.652. **Characteristics of a single-mode optical fiber cable**, ITU-T G series, 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] ITU-T rec. G.692 . **Optical interfaces for mutichannel systems with optical amplifiers.**, ITU-T G series, 2002.
- [15] ITU-T rec. G.661. **Definition and test methods for the relevant generic parameter of optical amplifier devices and sunsystem.**, ITU-T G series, 2002



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก ก.

## คำย่อ

ASE	Amplifier Spontaneous Emission
APD	Avalanche Photo diode
AWG	Arrayed waveguide
BER	Bit error rate
CT	Crosstalk
DBR	Distribution Bragg Reflector
DCU	Dispersion Compensation Unit
DFB	Distribution-Feedback
DEMUX	Demultiplexer
DRA	Distribution Raman Amplifier
DWDM	Dense WDM
EDFA	Erbium-Dope Fiber Amplifier
FP	Fabry-perot
FSR	Free Spectral Rang
FWM	Four Wave Mixing
LOFA	Line Optical Fiber Amplifier
LED	Light Emitting Diode
OA	Optical Amplifier
OSNR	Optical signal to Noise Ratio
WDM	Wavelength Division Multiplexing
Terminal	end station
Section	terminal to terminal
Span	station to station

## ภาคผนวก ข.

## ตัวย่อ

PKG	หมายถึง พระโขนง
CBI	หมายถึง ชลบุรี
PRI	หมายถึง ปราจีนบุรี
SKE	หมายถึง สระแก้ว
TPY	หมายถึง ตาพระยา
NRG	หมายถึง นางรอง
BRM	หมายถึง บุรีรัมย์
NMA	หมายถึง นครราชสีมา
CMI2	หมายถึง เชียงใหม่
LPG	หมายถึง ลำปาง
PRE	หมายถึง แพร่
SLK	หมายถึง สวรรคโลก
PLKR	หมายถึง พิษณุโลก
PCT	หมายถึง พิจิตร
PBN	หมายถึง เพชรบูรณ์
LSK	หมายถึง หล่มสัก
KKN	หมายถึง ขอนแก่น



## ภาคผนวก ก.

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

- [1] วัฒนา วิเชียรสรณ์ กอบชัย เดชหาญ. 2551. “การวิเคราะห์ค่าไอเอสเอ็นอาร์บนโครงข่าย  
ดับเบิลยูดีเอ็มระดับ 10 Gbps.” วิศวกรรมลาดกระบังปีที่ 25 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2551.  
หน้าที่ 1 – 6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การวิเคราะห์ค่าโอเอสเอ็นอาร์บนโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็ม ระดับ 10 Gbps

## OSNR Analysis of 10 Gbps over WDM Network

วัฒนา วิเชียรสรรค์ กอบชัย เดชหาญ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ค่ากำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน หรือค่าโอเอสเอ็นอาร์ (OSNR) ของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม (DWDM) ที่ระดับ 10 Gbps โดยใช้ตัวอย่างจริงซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางที่ใช้เชื่อมโยงโครงข่ายหลักที่ให้บริการอยู่ จากสถิติการวัด โดยทำการวัดค่าโอเอสเอ็นอาร์ของโครงข่ายที่จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้งานอยู่ตามจริง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าโอเอสเอ็นอาร์ในกรณีบวกค่าการลดทอนเข้าไปในระบบ เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์เพื่อเป็นวิธีการหาค่า OSNR ที่เหมาะสม จากนั้นได้จัดข้อมูลให้อยู่ในรูปของกราฟและตารางท้ายสุดได้ทำการเปรียบเทียบค่าโอเอสเอ็นอาร์จากการวัดและจากการคำนวณตามสมการใน ITU-T G.692 เพื่อสรุปผลที่ได้ในการนำเสนอแนวทางในการบำรุงรักษาอย่างรวดเร็ว การวิเคราะห์และปรับปรุงโครงข่ายให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### Abstract

This research studies and analyzes the optical signal to noise ratio (OSNR) of 10 Gbps WDM network by using the real sites which is one of backbone network section by measuring OSNR for the real wavelengths in use and OSNR of network with attenuation and number of wavelengths added. The objective is to test and study the effects when the number of wavelengths is increased while the attenuation of cables in the system exists. Then, the results are presented in graphs and tables. Finally, the OSNR is compared between the measured value and the calculated value from the equation of ITU-T G.692. The results of this study are concluded and will be used as guideline for network maintenance, analysis and effective network improvement.

**Keywords:** OSNR, DWDM

### 1. คำนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารโทรคมนาคม มีความจำเป็นและมีความต้องการในการใช้งานเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้นโครงข่ายของระบบสื่อสารจำเป็นต้องมีการขยายเพื่อรองรับกับปริมาณกราฟฟิคที่เพิ่มขึ้นและความจุที่มากกว่าเดิม ซึ่งเทคนิคที่นำมาใช้ก็คือเทคนิคการส่ง

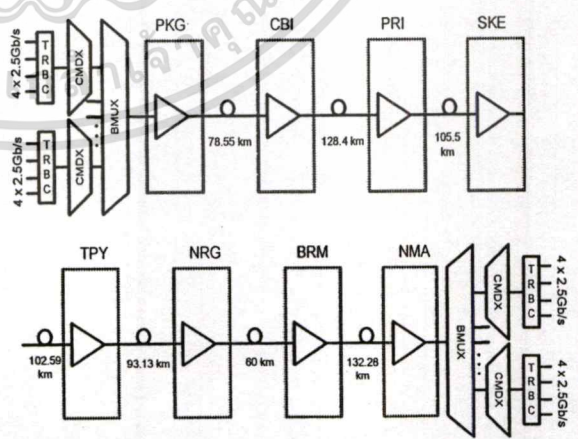
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณแบบมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น หรือดีคิบบิลยูติเอ็ม โดยใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโมคเดี่ยว (Standard Single Mode Fiber: SSMF) ในการเชื่อมโยงโครงข่ายดังกล่าว ระบบสื่อสารสัญญาณเดิมมีความจุที่ระดับ 2.5 Gbps ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งานในปัจจุบัน ฉะนั้นจึงมีการปรับเปลี่ยนโดยการขยายความจุให้มากขึ้นเป็นระดับ 10 Gbps โดยปรับเปลี่ยนเฉพาะอุปกรณ์ในการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นในขณะที่ยังอาศัยเส้นใยแก้วนำแสงที่มีอยู่เดิม วัตถุประสงค์สำคัญของการศึกษาในครั้งนี้คือผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปรับเปลี่ยนความเร็วต่อระบบดีคิบบิลยูติเอ็ม หรือเปลี่ยนไปใช้เส้นใยแก้วนำแสงแบบใหม่เพื่อให้ได้ตามค่า แต่ต้องเปลี่ยนระบบข่ายสายทั่วประเทศแล้วราคาจะสูงกว่า

ปัจจัยหลักที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นนั้นคือ ค่าอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน (Optical Signal to Noise Ratio : OSNR) ค่า OSNR นี้จะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรประกอบกัน เช่น ระยะทางของเส้นใยแก้วนำแสง ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสง ค่า Noise Figure ภายในส่วนขยาย (Amplifier) ของระบบ การขยายสัญญาณของ amplifier (Gain) และจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้งาน เป็นต้น ผลของตัวแปรดังกล่าวจะส่งผลทำให้ค่า OSNR ลดลง ประสิทธิภาพและความเชื่อถือได้ของโครงข่ายก็ลดลงไปด้วย ดังนั้นการศึกษานี้เพื่อจะพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของการคำนวณค่า OSNR เพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้ใช้งานหรือในการบำรุงรักษาโครงข่ายได้อย่างรวดเร็วขึ้น ทั้งนี้สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศหรือ International Telecommunication Union (ITU) ได้กำหนดสมการในการคำนวณค่า OSNR ไว้ในมาตรฐาน ITU-T G.692 [1] ในการศึกษานี้ได้ทำการวัดค่า OSNR ในส่วนต่างๆ ของระบบในแต่ละช่วง (span) ในกรณีตัวอย่างทดสอบจากสถานีพระโขนงถึงสถานีนครราชสีมา การวัดจะใช้ความถี่ 193.45THz ทำการเปรียบเทียบค่า OSNR ระหว่างค่าจากผลการวัด และค่าจากผลการคำนวณตามสมการ ITU-T G.692 ดังกล่าวในรูปแบบของกราฟและตาราง

## 2. โครงข่ายที่ทำการศึกษา

โครงข่ายที่ใช้ในการศึกษาเป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางโครงข่ายหลักที่ใช้เชื่อมโยงแบบจุดถึงจุด (Point-to-Point) ระหว่างต้นทางคือสถานีพระโขนงจนถึงสถานีนครราชสีมาซึ่งถือเป็นสถานีปลายทาง โดยในเส้นทางดังกล่าวมีสถานีทวนสัญญาณ 6 สถานี เชื่อมต่อกับด้วยเส้นใยแก้วนำแสงชนิด single mode ตามมาตรฐาน ITU-T G.652 [2] โดยในด้านสถานีต้นทางและปลายทาง (Terminal) จะประกอบด้วยอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความยาวคลื่น (Transponder) อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์แบบ 12 แถบความถี่ (Band MUX / DEMUX) ในส่วนของสถานีทวนสัญญาณจะประกอบด้วยอุปกรณ์ Line optical fiber amplifier ชนิดเออร์เบียมโดปไฟเบอร์ (Erbium Doped Fiber Amplifier) โดยทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังกล่าวตามรูปที่ 1 ด้วยเส้นใยแก้วนำแสง (SSMF) ผ่านสถานีทั้งหมด 6 สถานี เริ่มต้นจากสถานีพระโขนง (PKG) ไปยังสถานีชลบุรี (CBI) สถานีปราจีนบุรี (PRI) สถานีสระแก้ว (SKE) สถานีนางรอง (NRG) สถานีบุรีรัมย์ (BRM) และปลายทางที่สถานีนครราชสีมา (NMA) ตามลำดับ และทำการวัดค่า OSNR ที่สภาวะปกติ และในสภาวะที่มีการบวกค่าการลดทอน (Attenuation) สูงสุด



รูปที่ 1 การเชื่อมโยงอุปกรณ์ DWDM และ Line optical fiber amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การคำนวณหาค่าโอเอสเอ็นอาร์

สมการหาค่าโอเอสเอ็นอาร์ (OSNR) ตามสมการของ ITU-T G.692 [1.4] หาได้จาก

$$OSNR = P_{out} - L - NF - 10 \log N - 10 \log [h\nu\Delta\nu_0] \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

โดยที่

$P_{out}$  คือกำลังงานด้านออกในหน่วย dBm

L คือค่าการลดทอนระหว่าง amplifiers ในหน่วย dB

NF คือ External noise figure ในหน่วย dB

N คือ จำนวนของ span

ITU ได้กำหนดไว้ว่าที่ความยาวคลื่น 1.55  $\mu\text{m}$  ที่ optical bandwidth 0.1 nm มีค่า  $10 \log [h\nu\Delta\nu_0]$  เท่ากับ -58 dBm ในส่วนค่าของการลดทอนระหว่าง amplifier หรือค่า L ในสมการ (1) หาได้จาก ITU-T G.652 [2]

$$L = \alpha D + \alpha_s x + \alpha_c y \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

โดย  $\alpha$  คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสาย (dB)

$\alpha_s$  คือค่าการสูญเสียจากการเชื่อมต่อ (Splice Loss) (dB)

$\alpha_c$  คือค่าการสูญเสียการเชื่อมโยง (Connection Loss) (dB)

x คือจำนวนครั้งของการ Splice (point)

y คือจำนวนของ connector ใน link (point)

D คือระยะทางของเคเบิล (km.)

ในสมการที่ (1)  $P_{out}$  เป็นกำลังงานด้าน output จากคุณสมบัติของอุปกรณ์มีค่าเท่ากับ 6 dBm [3] ค่า NF คือ Noise Figure ของ Amplifier มีค่าเท่ากับ 7.3 dB และค่า  $10 \log [h\nu\Delta\nu_0]$  มีค่าเท่ากับ -58 dBm ที่ความยาวคลื่น 1.55  $\mu\text{m}$  และ optical bandwidth เท่ากับ 0.1 nm จากสมการที่ (1) จะได้ [4,5]

$$OSNR = 58 + P_{out} - L - 10 \log N \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

โดยในการศึกษาครั้งนี้กำหนดค่าการลดทอนสัญญาณ (L) ดังต่อไปนี้

1. ค่าของ Splicing attenuation  $\alpha_s = 0.05$  dB/point
2. ค่าของ Line attenuation  $\alpha = 0.25$  dB/km
3. ค่าของ Connection Loss  $\alpha_c = 0.5$  dB/ connection
4. ความยาวของเคเบิลใยแก้วนำแสง D หน่วย km

ในการคำนวณค่า L นี้จะพิจารณาจากค่าต่างๆ ข้างต้น แทนลงในสมการที่ (2) จะได้

$$L = \alpha D + \frac{D\alpha_s}{4} + 2\alpha_c \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) ค่า L ที่ใช้ในการคำนวณจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้งานจริง ตามแบบการติดตั้งเคเบิล ดังนั้นระยะทางของเคเบิลจะเปลี่ยนแปลงตามสถานที่ติดตั้งอุปกรณ์ ค่าของ Splicing Attenuation ( $\alpha_s$ ) อาจจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ใน การคำนวณซึ่งค่าที่ใช้ในการคำนวณ Splicing attenuation จะคิดจากค่าของเคเบิล 1 roll เท่ากับ 4 km. แต่ในความเป็นจริงค่า Splicing attenuation อาจจะมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด หรือค่าของ Line attenuation ( $\alpha$ ) ในแต่ละ span ก็อาจจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับคุณภาพของเคเบิลในแต่ละ span หรือค่าของ connector loss ( $\alpha_c$ ) ก็อาจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่กำหนดในสมการ ซึ่งค่าของตัวแปรเหล่านี้ จะทำให้ค่าของ L เปลี่ยนแปลง เป็นผลให้การคำนวณค่า OSNR เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

### 4. ผลการทดลอง

ค่า OSNR จากวิธีการวัดด้วยเครื่องมือวัดที่เรียกว่า Optical Spectrum Analyzer (OSA) JDSU Model MTS8000 จะเป็นค่าที่ได้จากการพิจารณาให้มีสัญญาณขาเข้าทางด้านสถานีต้นทางพระ โจนง (PKG) ด้วยระบบ SDH ที่ระดับ STM-16 หรือ 2.5 Gbps จำนวน 8 ช่องสัญญาณต่อเข้ากับอุปกรณ์เปลี่ยนความยาวคลื่น (Transponder) เป็นการมัลติเพล็กซ์ให้ออกมาเป็น 2

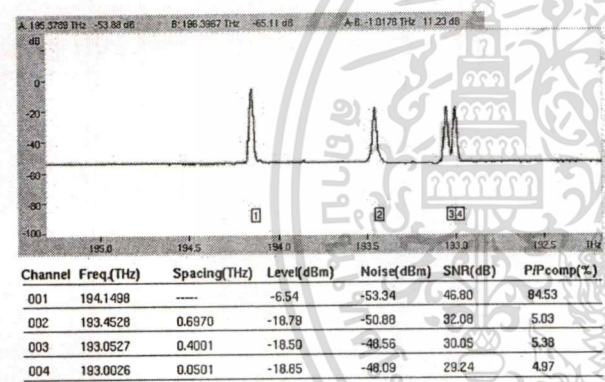
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อของสัญญาณแสง (wavelength) ที่ระดับ 10 Gbps และที่ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับSTM-64 หรือ10Gbps จำนวน1ช่องสัญญาณต่อเข้ากับอุปกรณ์ Transponder ออกมาเป็น1ช่องสัญญาณแสงต่อเข้าที่อุปกรณ์ (Band MUX/ DEMUX: BMDX) รวมทั้งหมดจำนวน 3 ความยาวคลื่น แล้วส่งผ่านไปยังสถานีทวนสัญญาณโดยทำการวัดค่า OSNR ในทุกๆ ช่วงระหว่างสถานีทวนสัญญาณ (span) ตลอดทั้งเส้นทางที่พิจารณาจนถึงสถานีปลายทางที่นครราชสีมา

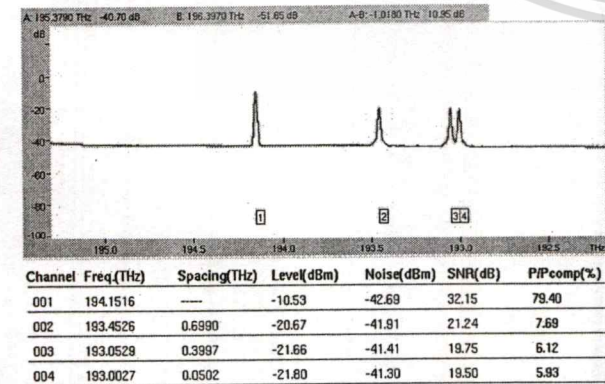
ค่า OSNR ที่ทำการวัดนี้จะเริ่มพิจารณาที่สถานีชลบุรี (CBI) เนื่องจากที่สถานีพระ โขนงเป็นสถานีต้นทางมีระยะทางเป็นศูนย์ จะพบว่าค่าOSNRที่สถานีชลบุรีมีค่าคงรูปที่ 2 และที่สถานีนครราชสีมามีค่า คงรูปที่ 3 จากผลการวัดค่า OSNR ในทุกspan ทำการบันทึกผลตามตารางที่1 และ ค่าOSNR เทียบกับspan แสดงในรูปที่ 4

ตารางที่1 ค่าOSNRที่ได้จากเครื่องวัด OSA JDSU Model MTS8000

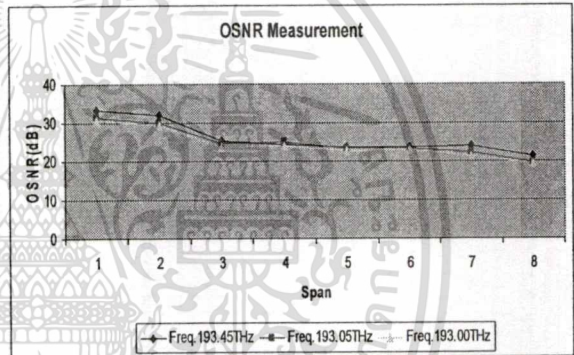
Location	Freq.	Freq.	Freq.
	193.45THz	193.05THz	193.00THz
PKG-CBI	32.08	30.05	29.24
CBI-PRI	25.35	24.52	23.72
PRI-SKE	24.43	24.84	24.09
SKE-TPY	23.83	23.28	22.71
TPY-NRG	23.59	23.27	23.06
NRG-BRM	23.92	22.28	21.44
BRM-NMA	21.24	19.75	19.50



รูปที่ 2 ค่า OSNR และ Spectrum ของสัญญาณที่สถานีชลบุรี



รูปที่ 3 ค่า OSNR และ Spectrum ของสัญญาณที่สถานีนครราชสีมา



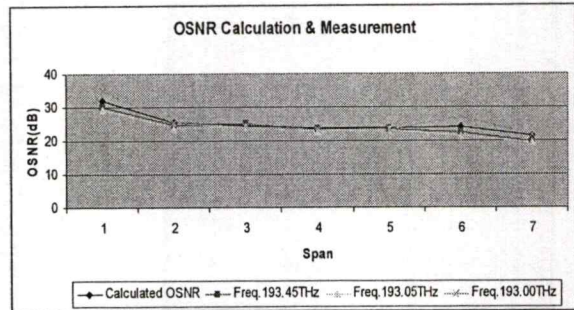
รูปที่ 4 ค่า OSNR จากการวัดในแต่ละช่วง span

จากสมการที่ (4) พบว่าค่าการลดทอนของแต่ละ Span จะมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสถานีที่ติดตั้งอุปกรณ์ สำหรับค่า OSNR จากสมการที่ (3) ในการศึกษานี้ใช้ค่าพารามิเตอร์ของ แบนด์ที่ 7 ที่ความถี่ 193.45 THz เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าOSNR ค่าการคำนวณตามตารางที่2 ค่าที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับการวัดตามตารางที่ 3 จากค่าในตารางที่3นำมาแสดงกราฟได้ดังรูปที่5 จะสังเกตได้ว่าค่า OSNR จะมีค่าใกล้เคียงกันในบางช่วงของสถานี เช่น ช่วงที่ 3 ช่วงที่ 4 และช่วงที่ 5 ซึ่งเป็นช่วงของสถานี PRI SKE TPY และ NRG ตามลำดับ โดยทั้ง 3 ช่วงของสถานีมีระยะทางโดยเฉลี่ยที่ 100 km. แต่ในช่วงของสถานีอื่นค่าของระยะทางมีความต่างกันค่อนข้างมาก นั่นเป็นผลมาจากการติดตั้งอุปกรณ์ซึ่งเป็นการติดตั้งอุปกรณ์ตามสถานีที่มีใช้งานอยู่เดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ค่าการคำนวณ OSNR

Station	distance (km)	L	OSNR Calculated
PKG-CBI	78.55	21.61	35.09
CBI-PRI	206.95	34.70	25.38
PRI-SKE	312.45	28.60	23.02
SKE-TPY	415.04	27.90	21.78
TPY-NRG	508.17	25.40	23.39
NRG-BRM	568.17	16.70	27.86
BRM-NMA	700.45	35.70	19.44



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบค่า OSNR จากการวัดและการคำนวณ

เพื่อดูสถานะของโครงข่ายว่าจะยังมีเสถียรภาพของการใช้งานได้หรือไม่ ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่า OSNR จากการวัดและการคำนวณ

Location	Freq. 193.45 THz	Freq. 193.05 THz	Freq. 193.00 THz	Cal.
PKG-CBI	32.08	30.05	29.24	35.09
CBI-PRI	25.35	24.52	23.72	25.38
PRI-SKE	24.43	24.84	24.09	24.02
SKE-TPY	23.83	23.28	22.71	22.87
TPY-NRG	23.59	23.27	23.06	23.48
NRG-BRM	23.92	22.28	21.44	26.99
BRM-NMA	21.24	19.75	19.50	21.62

ตารางที่ 4 ค่าการวัดและคำนวณ OSNR ที่เพิ่มการลดทอน

Location	Freq. 193.45 THz	Freq. 193.05 THz	Freq. 193.00 THz	Cal.
PKG-CBI	26.87	26.28	26.16	30.09
CBI-PRI	19.49	19.44	19.00	20.38
PRI-SKE	23.68	23.86	23.37	18.01
SKE-TPY	22.53	22.09	21.82	16.86
TPY-NRG	22.57	22.71	22.36	18.48
NRG-BRM	21.63	21.88	21.13	22.89
BRM-NMA	17.20	16.47	16.76	14.43

จึงทำให้ไม่สามารถกำหนดระยะทางให้เท่ากันได้ตลอด [4,6] อีกทั้งยังมีปัจจัยอื่นที่สามารถทำให้ค่า OSNR มีความคลาดเคลื่อน เช่นค่าของ Splicing Attenuation ซึ่งในการติดตั้งจริงค่าที่ได้ อาจจะมีค่าที่มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ใน การคำนวณ ค่าของ Line Attenuation ของสายก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพในการผลิต หรือค่าของ Connector Loss ก็อาจมีค่าที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในสมการ ตัวแปรเหล่านี้ทำให้ค่าของ L ที่ใช้ในการคำนวณเปลี่ยนแปลงไป [7,8] เป็นผลทำให้ค่า OSNR ที่คำนวณได้ ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากค่าที่วัดจริง และการคำนวณกับค่าสัมประสิทธิ์ของใยแก้วนำแสงค่าที่ใช้จริงซึ่งยังไม่ได้เพิ่มค่า Margin (+5dB) ของการลดทอนในสายใยแก้ว

เมื่อเพิ่ม margin +5dB เข้าไปในระบบทำให้ค่า OSNR บางช่วงของ span มีค่าต่ำ เช่น span ของ CBI กับ PRI ซึ่งมีระยะทางของเคเบิล 128.4 km. ค่าของ OSNR มีค่าค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้ระดับสัญญาณลดลงดังนั้นที่สถานี CBI จะต้องเพิ่ม Gain การขยายกำลังงานด้านส่ง เพื่อรักษาระดับของสัญญาณ OSNR และปัญหาของระบบในกรณีที่เกิด Error ขึ้นในการส่งสัญญาณผ่านระบบ DWDM ได้

จากค่าของ OSNR ที่ได้จากการวัดและการคำนวณนำมาเปรียบเทียบดังตารางที่ 7 เพื่อหาค่าคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละ span ตลอดเส้นทางเพื่อปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ในแต่ละ span ให้มีค่าใกล้เคียงกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบค่าความแตกต่างของOSNR

Location	Freq. 193.45THz	Calculated	Different
PKG-CBI	32.08	35.09	-3.01
CBI-PRI	25.35	25.38	-0.03
PRI-SKE	24.43	24.02	0.41
SKE-TPY	23.83	22.87	0.96
TPY-NRG	23.59	23.48	0.11
NRG-BRM	23.92	26.99	-3.07
BRM-NMA	21.24	21.62	-0.38

ค่าที่วัดเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณให้มีความใกล้เคียงมากขึ้น

## 5. สรุป

การวิเคราะห์ค่าโอเอสเอ็นอาร์ในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มระดับ 10 Gbps ได้นำเสนอรายละเอียดของการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากระยะทางซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการลดทอนค่า OSNR จากการศึกษาพบว่าเมื่อระยะทางสะสมเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าสะสมจากการลดทอนสัญญาณมากตามไปด้วย ส่งผลให้ค่า OSNR ลดลง จากการวิเคราะห์วิธีการคำนวณโดยสมการของ ITU-T G.692 พบว่าค่า OSNR ที่ได้มีความต่างกันในช่วง ซึ่งค่าที่ใกล้เคียงกันจากการวัดและการคำนวณอยู่ที่ระยะ 100 กม. ค่า OSNR โดยเฉลี่ยในแต่ละช่วงประมาณ 22-24dB การที่จะทำให้อัตราการคำนวณมีความถูกต้องยิ่งขึ้นจะต้องมีแหล่งข้อมูลที่มีรายละเอียดที่มากขึ้น เช่นค่า  $P_{out}$  ค่า Gain หรือค่าการลดทอน (L) สังเกตได้ว่าในช่วงที่ 2 และ ช่วงที่ 7 ระยะทางมีค่ามากส่งผลให้ค่าการลดทอนสูง ดังนั้นในการปรับแต่งจะต้องเพิ่มค่าอัตราขยายส่งผลให้ค่า  $P_{out}$  สูงขึ้นเพื่อรักษาระดับของสัญญาณให้มีประสิทธิภาพสังเกตได้จากในspanที่6 กำลังที่ส่งออกมาที่ระยะทางที่สั้นกว่าspanอื่น ส่งผลให้ค่า OSNR ในบาง wavelength มีค่าสูงกว่า wavelength อื่น 1-2dB แต่เมื่อเพิ่ม

อุปกรณ์ในช่วงอื่น ดังนั้นในการปรับค่าของพารามิเตอร์ต้องคำนึงในส่วนนี้ด้วย การแก้ไขอาจทำได้ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณเพิ่ม เพื่อรักษาระดับสัญญาณ OSNR ให้มีเสถียรภาพ และทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพมากขึ้น

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ITU-T Rec.G.692, "Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers", ITU-T G series, 2002.
- [2] ITU-T Rec.G.652, "Characteristics of a single-mode optical fiber cable", ITU-T G series, 2002.
- [3] Alcatel University "Alcatel 1626 LM REL3.0 Technical Handbook", 2006.
- [4] A. Gumate and T. Antoy, "DWDM Network Designs and Engineering Solutions : Design of a Point to point Link Base on Q-Factor and OSNR" Cisco Press, pp 117-139, 2002
- [5] G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication System", Third Edition, NewYork, John Wiley & Sons, 2002.
- [6] H. Taga, "Long Distance Transmission Experiments Using the WDM Technology", IEEE Journal of light wave technology, Vol.14, no.6, June 1996, pp. 1287-1298.
- [7] M. Rasztoivits-Wiech, M. Danner, and W. R. Leeb, "Optical signal-to-noise ratio measurement in WDM networks using polarization extinction," in *Proc. Eur. Conf. Optical Communication (ECOC'98)*, Sept 1998, pp. 549-550.
- [8] C.-L. Yang and S.-L. Lee, "Novel technique for simultaneous channel and OSNR monitoring", in *Proc. Optical Fiber Communications (OFC 2003)*, Mar. 2003, pp. 756-758.

## ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายวัฒนา วิเชียรสรรค์
- วัน เดือน ปีเกิด 12 พฤศจิกายน 2518 ที่กรุงเทพมหานคร
- ที่อยู่ 21 ซอยจัดสรรสุนทรที่ 8 แขวงหนองบอน  
เขตประเวศ กรุงเทพฯ 10250
- ประวัติการศึกษา 2542 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร  
2551 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ประสบการณ์การทำงาน  
พ.ศ. 2543 - ปัจจุบัน ตำแหน่งวิศวกร 5 บริษัทไอที จำกัด (มหาชน) สำนักงานใหญ่ แจ้งวัฒนะ

