

การวิเคราะห์และออกแบบระบบ FTTx ซึ่งใช้สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่น ร่วมกับ การจัดสรรความยาวคลื่นแบบพลวัต



นางสาวพิจิตรา กาญจนภาส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR) เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS AND DESIGN OF FTTX SYSTEM USING A WAVELENGTH SELECTIVE SWITCH (WSS) INCORPORATED WITH A DYNAMIC WAVELENGTH AND BANDWIDTH ALLOCATION (DWBA)

Miss Pichitra Kanjanopas



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering  
Department of Electrical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2014  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์และออกแบบระบบ FTTx ซึ่งใช้สวิตช์แบบ เลือกความยาวคลื่น ร่วมกับ การจัดสรรความยาวคลื่น แบบพลวัต
โดย	นางสาวพิจิตรา กาญจนภาส
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสีทธิกุลกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

พิจิตรา กาญจนภาส : การวิเคราะห์และออกแบบระบบ FTTx ซึ่งใช้สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่น ร่วมกับ การจัดสรรความยาวคลื่นแบบพลวัต (ANALYSIS AND DESIGN OF FTTX SYSTEM USING A WAVELENGTH SELECTIVE SWITCH (WSS) INCORPORATED WITH A DYNAMIC WAVELENGTH AND BANDWIDTH ALLOCATION (DWBA)) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 106 หน้า.

โครงข่าย FTTx เป็นโครงข่ายที่เชื่อมโยงผู้ใช้บริการเข้ากับโครงข่ายหลักด้วยเส้นใยแสงความเร็วสูง โดยมีอัตราข้อมูลสูงถึง 10 Gbps ในอนาคตอันใกล้ผู้ใช้บริการมีแนวโน้มใช้อัตราแบนด์วิดท์มากขึ้นเรื่อยๆ ก่อให้เกิดปัญหาแบนด์วิดท์ที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานของผู้บริโภค วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่น (WSS) ร่วมกับ ตัวควบคุมการจัดสรรความยาวคลื่นแบบพลวัต (DWBA) โดยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในขั้นต้นไม่คิดผลกระทบของ switching characteristic เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อการจัดสรรของระบบ รวมไปถึงวิเคราะห์ระยะทางในการส่งสัญญาณได้สูงสุด

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า ระบบนี้สามารถส่งอัตราการส่งข้อมูลได้สูงสุดถึง 160 Gbps ต่อผู้ใช้บริการหนึ่งราย ซึ่งมีระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุดเท่ากับ 55.2 km ในกรณีที่มี FEC (BER =  $10^{-4}$ ) และปัจจัยสำคัญของระบบคือ การลดทอนของสัญญาณ จะมีผลกระทบมากกว่า การดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง

อย่างไรก็ตาม WSS ทุกชนิดจะมีผลของ switching characteristic ด้วย ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้ จึงนำเสนอระบบ FTTx ซึ่งใช้ WSS ร่วมกับ DWBA โดยคิดผลกระทบ switching characteristic โดยมี WSS ทั้งหมด 6 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่มีจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมด 4 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลได้มากที่สุด 10 ราย ซึ่งเหมาะกับสถานที่ที่มีผู้ใช้บริการมากแต่ต้องการใช้อัตราข้อมูลน้อย ระบบนี้ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการหนึ่งรายได้มากถึง 40 Gbps และกรณีที่มีจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมด 8 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลได้มากที่สุด 5 ราย ซึ่งเหมาะกับสถานที่ที่มีผู้ใช้บริการน้อยแต่ต้องการใช้อัตราข้อมูลมาก ระบบนี้ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการหนึ่งรายได้มากถึง 80 Gbps จากนั้นคำนวณหาค่า power budget ที่แท้จริงของระบบและค่า power penalty ใน WSS ชนิดต่างๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการ และสามารถใช้งานได้จริงในปัจจุบันและในอนาคต

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5670306521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: FIBER-TO-THE-HOME / WAVELENGTH SELECTIVE SWITCH / DYNAMIC WAVELENGTH AND BANDWIDTH ALLOCATION / SWITCHING CHARACTERISTIC / ATENUATION / FIBER DISPERSION / POWER BUDGET / POWER PENALTY

PICHITTRA KANJANOPAS: ANALYSIS AND DESIGN OF FTTX SYSTEM USING A WAVELENGTH SELECTIVE SWITCH (WSS) INCORPORATED WITH A DYNAMIC WAVELENGTH AND BANDWIDTH ALLOCATION (DWBA). ADVISOR: ASST. PROF. PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 106 pp.

FTTx network is the system that connects users and the main network with the high speed fiber which can transfer the data rate up to 10 Gbps. In the near future, There is high tendency that the bandwidth usage will be increased. As a result, there would not be enough bandwidth available for every one. This thesis presents the FTTx system using Wavelength Selective Switch (WSS) incorporated with Dynamic Wavelength and Bandwidth Allocation (DWBA) by simulating in a computer program. Preliminary, switching characteristic effects are ignored in order to analyze the essential factors which limit the system capacity as well as to find the furthest distance the signal can transmit

The results from the analysis indicate that this system can transmit the data up to 160 Gbps per one user in which the furthest distance to transmit the signal are up to 55.2 km. When there is forward error correction (FEC) at bit error rate (BER) equal to  $10^{-4}$  and the important factor of the system is the signal attenuation, which affects the system

Nevertheless, as every WSS is influenced by switching characteristic, this thesis also presents the FTTx using WSS incorporated with DWBA regarding switching characteristic effects. There are 6 WSS used, each of them is divided into 2 cases. First, with 4 wavelengths transmitting data up to 10 users, this case is apt for the place where high number of users demand low data rate. This system can transmit data rate to each user up to 40 Gbps. Second, with 8 wavelengths transmitting data up to 5 users, this case is apt for the place where few number of users demand high data rate. This system can transmit data rate to each user up to 80 Gbps. Thereafter, Calculate for the true power budget in the system and also power penalty in each WSS to respond users' demand and be practical in the present and from now on.

Department: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Electrical Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเกื้อกูล ให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำตลอดการวิจัยนี้ จนกระทั่งจบวิทยานิพนธ์อย่างสมบูรณ์ ผู้จัดทำการวิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ และ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่เป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนการศึกษา ศิษย์ก้นกุฎิ ในหลักสูตรต่อเนื่อง และทุนสนับสนุนสำหรับการนำเสนอผลงานที่งานประชุมวิชาการ The International Conference on Information Networking 2014 (ICOIN 2014) ที่จังหวัดภูเก็ต

ขอขอบพระคุณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และสถานที่ใช้ทำวิจัย โดยเฉพาะโปรแกรมคอมพิวเตอร์ OptiSystem 10.0 ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการทำวิจัย

ขอขอบคุณนายรชฏ มณีชาติ รุ่นพี่นิสิตชั้นปริญญาเอกที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณพี่ เพื่อนและน้องทุกคน ในห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคม ชั้น 13 ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้จัดทำการวิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	8
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	9
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน .....	11
2.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx.....	11
2.2 ปัจจัยที่จำกัดสมรรถนะในการส่งสัญญาณ .....	12
2.2.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (attenuation loss).....	12
2.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (fiber dispersion).....	14
2.2.3 ปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์ (polarization mode dispersion: PMD).....	17
2.3 การมัลติเพล็กซ์สัญญาณ.....	18
2.3.1 Time Division Multiplexing (TDM).....	18
2.3.2 Wavelength Division Multiplexing (WDM) .....	19
2.3.2 Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM) .....	20

2.4 การมอดูเลตความเข้มแสง .....	20
2.5 SMF ITU-T G.652.....	21
2.6 โครงสร้างและการทำงานของ WSS.....	24
2.7 การคำนวณ power budget และการออกแบบระบบ .....	28
บทที่ 3 ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA เมื่อไม่คิดผลของ switching characteristic.....	32
3.1 ระบบโครงสร้างและการทำงานของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA .....	32
3.2 การจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA.....	33
3.3 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการจัดสรรถนนในการส่งสัญญาณในระบบ .....	35
3.4 การวิเคราะห์ผลของ fiber dispersion และ attenuation จาก Eye-diagram.....	37
3.5 การวิเคราะห์หาระยะทางการให้บริการสูงสุด .....	38
3.6 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของจำนวนความยาวคลื่นและระยะทางให้บริการ .....	39
3.7 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ที่มีค่า time constant = 0s ร่วมกับ DWBA.....	42
3.7.1 ระบบ 4 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 10 ราย .....	42
3.7.2 ระบบ 8 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 5 ราย .....	43
บทที่ 4 ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 10 ราย โดยคิดผลของ switching characteristic .....	44
4.1 โครงสร้างของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ที่มี 4 ความยาวคลื่นจัดสรรให้ผู้ใช้บริการได้ถึง 10 ราย.....	44
4.2 WSS ที่ใช้ในระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA.....	45
4.3 การจำลองระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 10 ราย .....	46
4.4 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 10 ราย เมื่อใช้ WSS ชนิดต่างๆ.....	47
4.4.1 Photonic crystal switch ที่มี $\tau = 0.5$ ps.....	48



4.4.2 Photonic crystal switch ที่มี $\tau = 1$ ps.....	51
4.4.3 GaAs photonic crystal cavities switch ที่มี $\tau = 15$ ps.....	53
4.4.4 GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่มี $\tau = 100$ ps.....	56
4.4.5 Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ที่มี $\tau = 1$ ns .....	58
4.4.6 Electro-optic switch ที่มี $\tau = 5$ ns.....	61
บทที่ 5 ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 5 ราย โดยคิดผลของ switching characteristic .....	64
5.1 โครงสร้างของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ที่มี 8 ความยาวคลื่นจัดสรรให้ผู้ใช้บริการได้ถึง 5 ราย .....	64
5.2 การจำลองระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 5 ราย.....	65
5.3 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 5 ราย เมื่อใช้ WSS ชนิดต่างๆ.....	66
5.3.1 Photonic crystal switch ที่มี $\tau = 0.5$ ps.....	67
5.3.2 Photonic crystal switch ที่มี $\tau = 1$ ps.....	69
5.3.3 GaAs photonic crystal cavities switch ที่มี $\tau = 15$ ps .....	72
5.3.4 GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่มี $\tau = 100$ ps .....	74
5.3.5 Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ที่มี $\tau = 1$ ns .....	77
5.3.6 Electro-optic switch ที่มี $\tau = 5$ ns.....	79
บทที่ 6 อภิปรายผลการทดลองของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ชนิดต่างๆ ร่วมกับ DWBA โดยคิดผลของ switching characteristic.....	83
6.1 ผลจากการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ชนิดต่างๆ ร่วมกับ DWBA.....	83
6.2 ความสัมพันธ์ของ power penalty และ time constant ของ WSS ชนิดต่างๆ .....	85
6.3 ความสัมพันธ์ของ power budget ที่แท้จริงของระบบและ time constant ของ WSS ชนิดต่างๆ .....	86

6.4 วิเคราะห์ผลกระทบของ time constant จาก time domain และ eye diagram .....	88
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	91
ข้อเสนอแนะ .....	93
รายการอ้างอิง .....	94
ภาคผนวก.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	106



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2. 1 ความยาวคลื่นที่นำไปใช้ในแต่ละยุคของการส่งสัญญาณ [16] .....	13
ตารางที่ 2. 2 มาตรฐาน G.652.D [22] .....	23
ตารางที่ 3. 1 ค่า attenuation และ dispersion ของ SMF ITU-T G.652.D แต่ละความยาวคลื่น CWDM.....	34
ตารางที่ 3. 2 ระยะทางที่ส่งสัญญาณได้ สำหรับทุกความยาวคลื่น 16 CWDM.....	38
ตารางที่ 3. 3 จำนวนความยาวคลื่น การจัดสรรอัตราข้อมูล และระยะทางการให้บริการ .....	40
ตารางที่ 4. 1 ชนิดของ WSS และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ.....	45
ตารางที่ 4. 2 ค่า attenuation และ dispersion ของความยาวคลื่นที่ 1471-1531 nm .....	46
ตารางที่ 4. 3 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและsubscriber 10 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5ps$ ).....	48
ตารางที่ 4. 4 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและsubscriber 10 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ photonic crystal ( $\tau = 1ps$ ).....	52
ตารางที่ 4. 5 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและsubscriber 10 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15ps$ ).....	54
ตารางที่ 4. 6 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและsubscriber 10 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ MQW ( $\tau = 100ps$ ).....	56
ตารางที่ 4. 7 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและsubscriber 10 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ SOA ( $\tau = 1 ns$ ).....	59
ตารางที่ 4. 8 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและsubscriber 10 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ Electro-optic ( $\tau = 5 ns$ ).....	61
ตารางที่ 5. 1 ค่า attenuation และ dispersion ของความยาวคลื่นที่ 1431-1571 nm.....	66
ตารางที่ 5. 2 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและsubscriber 5 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ Photonic crystal ( $\tau = 0.5ps$ ).....	67
ตารางที่ 5. 3 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและsubscriber 5 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ Photonic crystal ( $\tau = 1 ps$ ).....	70
ตารางที่ 5. 4 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและsubscriber 5 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15 ps$ ).....	72

ตารางที่ 5. 5 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและsubscriber 5 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps)..... 75

ตารางที่ 5. 6 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและsubscriber 5 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns)..... 77

ตารางที่ 5. 7 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและsubscriber 5 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) ..... 80

ตารางที่ 6. 1 ค่ากำลังสัญญาณขารับ ( $P_{Rx}$ ) ของ WSS แต่ละชนิด เมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง.....83

ตารางที่ 6. 2 ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการ ( $L$ ) ของระบบที่ใช้ WSS ชนิดต่างๆ..... 84

ตารางที่ 6. 3 ค่ากำลังสัญญาณขารับ ( $P_{Rx2}$ ) ของ WSS แต่ละชนิด เมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ..... 84

ตารางที่ 6. 4 ค่า time constant และ power penalty ของสวิตช์แต่ละชนิด..... 85

ตารางที่ 6. 5 ค่า time constant และ power budget ที่แท้จริงของระบบที่ใช้ WSS แต่ละชนิด.....87



## สารบัญรูปร่างภาพ

หน้า

รูปที่ 1. 2 อัตราการใช้แบนด์วิดท์ของผู้ใช้บริการในกิจกรรมต่างๆ [2].....	2
รูปที่ 1. 3 อัตราการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลของปริมาณการใช้อัตราข้อมูลของผู้ใช้บริการ [2].....	2
รูปที่ 1. 4 ประเภทของระบบ FTTx .....	4
รูปที่ 1. 5 ระบบ TDM-PON [5] .....	6
รูปที่ 1. 6 ระบบ WDM-PON [5].....	7
รูปที่ 1. 7 การจัดสรรช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU G.652.D [5].....	7
รูปที่ 2. 1 โครงสร้างพื้นฐาน FTTx แบบ PON [12] .....	11
รูปที่ 2. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น [15].....	13
รูปที่ 2. 3 การเกิด inter-symbol interference (ISI) [15].....	14
รูปที่ 2. 4 ความสัมพันธ์ของ group velocity และ GVD เทียบกับค่าความยาวคลื่น [15].....	15
รูปที่ 2. 5 ผลของการกระจายโหมดโพลาไรซ์ PMD [15].....	17
รูปที่ 2. 6 TDM [18].....	18
รูปที่ 2. 7 WDM [18].....	19
รูปที่ 2. 8 ผลที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ในโดเมนเวลา.....	21
รูปที่ 2. 9 สัญญาณแบบ NRZ และ RZ.....	21
รูปที่ 2. 10 spectrum ของสัญญาณ OOK แบบ (a) NRZ (b) RZ .....	21
รูปที่ 2. 11 ค่าอัตราการลดทอนกำลังของสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของเส้นใยแสงชนิด G.652.C [5] .....	22
รูปที่ 2. 12 ค่า dispersion ของสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของเส้นใยแสงชนิด G.652C [5].....	22
รูปที่ 2. 13 โครงสร้างและการทำงานของ WSS.....	25
รูปที่ 2. 14 switching characteristic ที่พอร์ตขาออกใดๆ ในการสวิตช์ 1 ครั้ง.....	26
รูปที่ 2. 15 WSS กรณี time constant มากกว่า switching time.....	27
รูปที่ 2. 16 WSS กรณี time constant น้อยกว่าหรือเท่ากับ switching time.....	28
รูปที่ 2. 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังสัญญาณขารับ เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b).....	30
รูปที่ 2. 18 การเปรียบเทียบระหว่างระบบ FTTx ที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) และที่ผ่านเส้นใยแสง..	30

รูปที่ 3. 1 โครงสร้างและการทำงานของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA .....	32
รูปที่ 3. 2 การจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA .....	34
รูปที่ 3. 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ ระยะทางการส่งสัญญาณ ทั้ง 16 ความยาวคลื่น, eye-diagrams ของสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1271 nm a) มี FEC ที่ BER = $10^{-4}$ b) ไม่มี FEC ที่ BER = $10^{-9}$ .....	36
รูปที่ 3. 4 eye diagram ของสัญญาณความเร็ว 10 Gbps เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (back to back) ที่ความยาวคลื่น (a) 1271 nm และ (b) 1571 nm .....	37
รูปที่ 3. 5 eye diagram ของสัญญาณความเร็ว 10 Gbps ที่ความยาวคลื่น 1271 nm เมื่อ BER เท่ากับ (a) $10^{-4}$ และ (b) $10^{-9}$ .....	37
รูปที่ 3. 6 eye diagram ของสัญญาณความเร็ว 10 Gbps ที่ความยาวคลื่น 1571 nm เมื่อ BER เท่ากับ (a) $10^{-4}$ และ (b) $10^{-9}$ .....	38
รูปที่ 3. 7 ระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุดโดยใช้จำนวนความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เมื่ออัตรา ข้อมูลต่อความยาวคลื่นเท่ากับ 10 Gbps .....	40
รูปที่ 3. 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\text{BER})$ และ receive power ของระบบ FTTx ที่มี 4 ความ ยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย .....	42
รูปที่ 3. 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\text{BER})$ และ receive power ของระบบ FTTx ที่มี 8 ความ ยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย .....	43
รูปที่ 4. 1 โครงสร้าง FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและ subscriber 10 ราย.....	44
รูปที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้ สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$ ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย.....	48
รูปที่ 4. 3 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx1}}$ ) และผ่าน เส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx2}}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$ ps) ที่มี 4 ความยาว คลื่น และ subscriber 10 ราย .....	50
รูปที่ 4. 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้ สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$ ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย.....	51
รูปที่ 4. 5 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx1}}$ ) และผ่าน เส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx2}}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$ ps) ที่มี 4 ความยาว คลื่น และ subscriber 10 ราย .....	52

รูปที่ 4. 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้ สวิตช์แบบ GaAS photonic crystal ( $\tau = 15$ ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย.....	54
รูปที่ 4. 7 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx1}}$ ) และผ่าน เส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx2}}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ GaAS photonic crystal ( $\tau = 15$ ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย.....	55
รูปที่ 4. 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้ สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$ ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย.....	56
รูปที่ 4. 9 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx1}}$ ) และผ่าน เส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx2}}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$ ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย.....	57
รูปที่ 4. 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้ สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$ ns) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย.....	58
รูปที่ 4. 11 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx1}}$ ) และผ่าน เส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx2}}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$ ns) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย.....	60
รูปที่ 4. 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้ สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$ ns) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย.....	61
รูปที่ 4. 13 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx1}}$ ) และผ่าน เส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx2}}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$ ns) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย.....	62
รูปที่ 5. 1 โครงสร้าง FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและ subscriber 10 ราย.....	64
รูปที่ 5. 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\text{BER})$ และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้ สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$ ps) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย.....	67
รูปที่ 5. 3 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx1}}$ ) และผ่าน เส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx2}}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$ ps) ที่มี 8 ความยาว คลื่น และ subscriber 5 ราย.....	68

รูปที่ 5. 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้  
 สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$  ps) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5  
 ราย ..... 70

รูปที่ 5. 5 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx1}}$ ) และผ่าน  
 เส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx2}}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$  ps) ที่มี 8 ความยาว  
 คลื่น และ subscriber 5 ราย..... 71

รูปที่ 5. 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้  
 สวิตช์แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15$  ps) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ  
 subscriber 5 ราย ..... 72

รูปที่ 5. 7 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx1}}$ ) และผ่าน  
 เส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx2}}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15$  ps) ที่มี 8  
 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย..... 73

รูปที่ 5. 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้  
 สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย..... 75

รูปที่ 5. 9 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx1}}$ ) และผ่าน  
 เส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx2}}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ  
 subscriber 5 ราย ..... 76

รูปที่ 5. 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้  
 สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย..... 77

รูปที่ 5. 11 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx1}}$ ) และผ่าน  
 เส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx2}}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ  
 subscriber 5 ราย ..... 78

รูปที่ 5. 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้  
 สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5  
 ราย ..... 80

รูปที่ 5. 13 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx1}}$ ) และผ่าน  
 เส้นใยแสง ( $P_{\text{Rx2}}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) ที่มี 8 ความยาวคลื่น  
 และ subscriber 5 ราย ..... 81

รูปที่ 6. 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง time constant และ power penalty ของสวิตช์แต่ละชนิด.....86

รูปที่ 6. 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง time constant และ power budget ที่แท้จริงของระบบ..... 87



รูปที่ 6. 3 time domain ของ WSS ที่มีค่า $\tau$ ต่างกัน (a), (b) $\tau = 0.5$ ps และ (c), (d) $\tau = 5$ ns .....	88
รูปที่ 6. 4 eye diagram ของ WSS ที่มีค่า $\tau = 0.5$ ps (a) ไม่ผ่านเส้นใยแสง (b) ผ่านเส้นใยแสง และ $\tau = 5$ ns (c) ไม่ผ่านเส้นใยแสง (d) ผ่านเส้นใยแสง.....	89
รูปที่ ก. 1 ค่า global parameter ที่กำหนดในระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA.....	98
รูปที่ ก. 2 การส่งสัญญาณผ่านระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ในส่วนของ OLT (a) 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย (b) 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย.....	99
รูปที่ ก. 3 การส่งสัญญาณผ่านระบบ FTTx ในส่วนของ OLT ภายใน Ext. Mod.....	100
รูปที่ ก. 4 แบบจำลองการส่งสัญญาณผ่านระบบ FTTx ในส่วนของเส้นใยแสง.....	100
รูปที่ ก. 5 แบบจำลองระบบ FTTx ในส่วนของ WSS บนโปรแกรม optisys (a) 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย และ (b) 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย.....	101
รูปที่ ก. 6 การประกาศตัวแปรของ WSS ใน matlab (a) 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย และ (b) 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย.....	102
รูปที่ ก. 7 การคำนวณของ WSS ใน matlab.....	102
รูปที่ ก. 8 การคำนวณของ WSS ใน matlab (a) 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย และ (b) 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย.....	103
รูปที่ ก. 9 การเขียน matlab เพื่อเชื่อมต่อกับ optisys ในส่วนปิดท้าย (a) 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย และ (b) 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย.....	104
รูปที่ ก. 10 ค่า parameter ต่างๆ ของ WSS ในโปรแกรม optisys.....	105
รูปที่ ก. 11 แบบจำลองภาครับของการส่งสัญญาณในส่วนของ ONU.....	105

# บทที่ 1

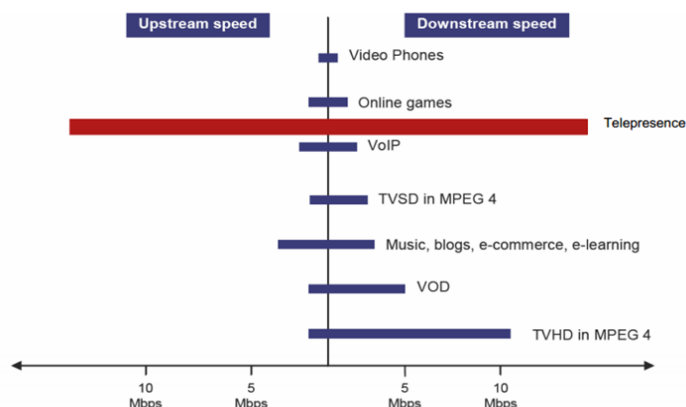
## บทนำ

ในยุคปัจจุบัน เป็นยุคที่มีการนำเทคโนโลยีมาใช้ตอบสนองความต้องการมากมายของผู้บริโภค โดยเฉพาะ การติดต่อสื่อสารระหว่างกัน ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ ตั้งแต่ระดับบุคคลจนไปถึงระดับองค์กรใหญ่ๆ อีกทั้งยังช่วยพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม การเมือง การศึกษา รวมไปถึงการพัฒนาประเทศให้ทันสมัยทัดเทียมนานาประเทศได้ การติดต่อสื่อสารระหว่างกัน ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารทางเสียงหรือการส่งข้อมูล การสื่อสารผ่านทางอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง การสื่อสารในรูปแบบ multimedia ต่างๆ ซึ่งก่อให้เกิดอัตราการใช้แบนด์วิดท์อย่างมากมาย และมีแนวโน้มการใช้แบนด์วิดท์มากขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่อดีตไปสู่อุปัจจุบันและไปถึงอนาคต ดังนั้นจึงมีการคิดค้นเพิ่มแบนด์วิดท์ให้เพียงพอต่อความต้องการใช้งานของผู้บริโภค และการเพิ่มแบนด์วิดท์มีแนวโน้มจะถูกพัฒนาไปเรื่อยๆ ให้เหมาะสมต่อการใช้งานในแต่ละยุค

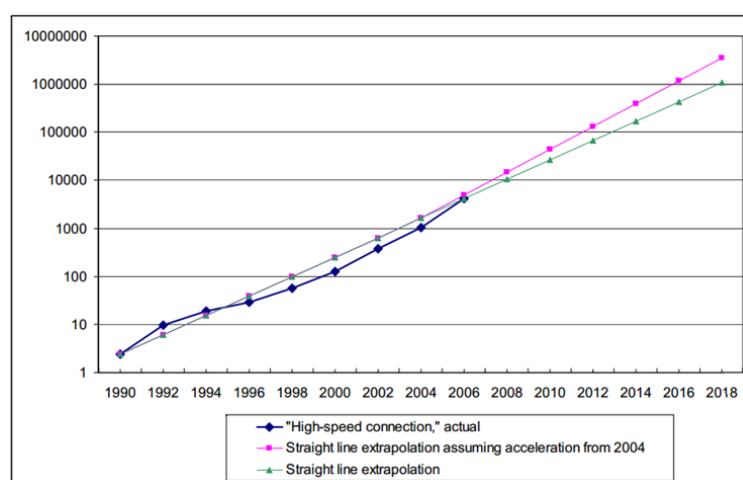
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอระบบที่มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณสูงระบบหนึ่ง เพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้แบนด์วิดท์ของผู้บริโภค โดยการจัดสรรอัตราข้อมูลให้เหมาะสมกับการใช้งาน เมื่อผู้บริโภคใช้อัตราข้อมูลเสร็จสิ้น ระบบนี้สามารถนำอัตราข้อมูลกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง บทนี้กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารในปัจจุบันไม่ได้หยุดอยู่ที่การสื่อสารทางเสียงและข้อมูลเท่านั้น แต่มุ่งเน้นไปที่การสื่อสารในรูปแบบ multimedia มากขึ้น โดยเฉพาะการสื่อสารผ่านทางอินเทอร์เน็ต ในปัจจุบันมีผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ตเพิ่มสูงขึ้น ก่อให้เกิดอัตราการใช้แบนด์วิดท์อย่างมหาศาล ในแต่ละปีจะมีผู้บริโภคเทคโนโลยีสื่อสารผ่านทางอินเทอร์เน็ตจำนวนมาก เพื่อใช้ในกิจกรรมในรูปแบบต่างๆ ในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็น การสื่อสารทางเสียงผ่านอินเทอร์เน็ต (VoIP) การเล่นเกมออนไลน์ video phones video on demand (VOD) เทคโนโลยีความคมชัดของภาพหน้าจอระดับ SD และ HD music on demand blogs e-commerce e-learning เป็นต้น [1] อัตราการใช้แบนด์วิดท์ในกิจกรรมต่างๆ แสดงในรูปที่ 1.1 ผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ตมีแนวโน้มการใช้แบนด์วิดท์มากขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่อดีตไปสู่อุปัจจุบันและไปถึงอนาคต สามารถสังเกตได้จากรูปที่ 1.2 แสดงให้เห็นอัตราการเพิ่มของปริมาณการใช้อัตราข้อมูลของผู้ใช้บริการเพิ่มสูงขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 1. 1 อัตราการใช้แบนด์วิดท์ของผู้ใช้บริการในกิจกรรมต่างๆ [2]



รูปที่ 1. 2 อัตราการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลของปริมาณการใช้อัตราข้อมูลของผู้ใช้บริการ [2]

แนวโน้มของเทคโนโลยีที่จะเกิดขึ้นในอนาคตจะเกิดการหลอมรวมทางเทคโนโลยี ได้แก่ ด้าน telecommunications information, computer/IT และ broadcasting ตัวอย่างเช่น เทคโนโลยีความคมชัดของจอภาพขนาด high definition หรือที่เรียกย่อๆ ว่า HD เป็นเทคโนโลยีมาตรฐานสำหรับการส่งสัญญาณทางจอภาพที่มีความละเอียดสูงกว่าวีดีโอทั่วไป เทคโนโลยี HD จะถูกพัฒนาให้มีความคมชัดของจอภาพมากขึ้นด้วยมาตรฐานใหม่ที่เรียกว่า “ 4K ultra high definition ” ที่มีความละเอียด 3840 x 2160 พิกเซล ซึ่งมีความละเอียดของจอภาพมากกว่า full HD ถึง 4 เท่า ในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยี 4K มาใช้ในอุตสาหกรรมภาพยนตร์แล้ว เช่น โรงภาพยนตร์ IMAX ตลอดจนสินค้าทีวีและโฮมเอนเตอร์เทนเมนต์ และในอนาคตอันใกล้เทคโนโลยีนี้สามารถพัฒนาขึ้นไปถึง “ 8K ultra high definition ” หรือ 7680 x 4320 พิกเซล [3] นอกจากนี้มีเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องจักร ที่เรียกกันว่า machine-to-machine (M2M) เป็นเทคโนโลยีที่ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ สามารถส่งข้อมูลหากันเองได้ โดยจะใช้ได้ทั้งอุปกรณ์แบบมีสายและไร้สาย แต่ในปัจจุบันจะใช้อุปกรณ์

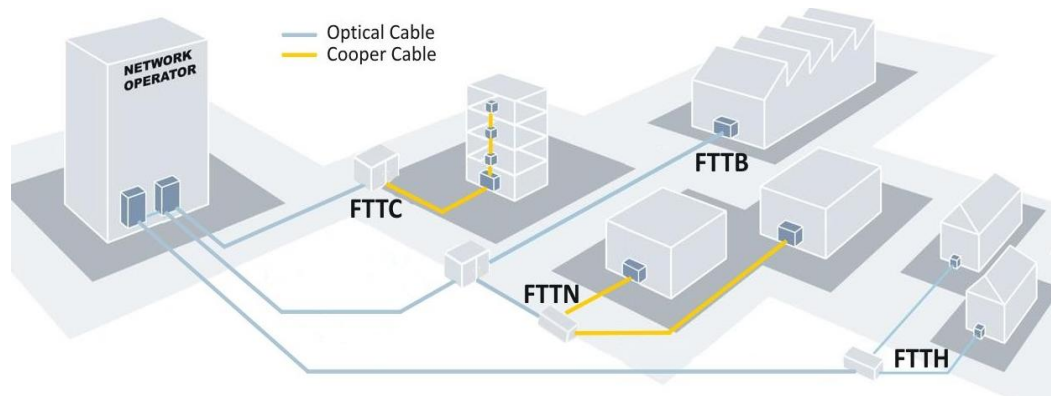
แบบไร้สายมากกว่า ซึ่งทำให้เกิดอุปกรณ์สื่อสารข้อมูลไร้สายผ่านเครือข่ายได้มากมาย เช่น การสื่อสารระหว่างรถยนต์กับรถยนต์ที่ช่วยลดอุบัติเหตุ, อุปกรณ์มาตรวัดระดับน้ำแบบไร้สาย, การเก็บข้อมูลแบบไร้สายต่างๆ, อุปกรณ์ควบคุมเครื่องจักรแบบไร้สาย, ระบบติดตามรถ GPS, การควบคุมป้ายไฟจราจร เป็นต้น [4] ทั้งเทคโนโลยี ultra high definition และ M2M จะมีบทบาทสำคัญต่อการสื่อสารในยุคปัจจุบันเป็นอย่างมาก

เนื่องจากผู้ใช้บริการมีการใช้แบนด์วิดท์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ผู้ให้บริการเพิ่มความสามารถในการให้บริการแก่ลูกค้ามากขึ้นโดยการเพิ่มแบนด์วิดท์เพื่อตอบสนองความต้องการแก่ผู้บริโภคในการสื่อสารข้อมูลต่างๆ นอกจากการตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคแล้ว การพัฒนาเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการส่งสัญญาณจะช่วยพัฒนาประเทศในด้านการศึกษา สังคม และช่วยพัฒนาเศรษฐกิจให้ดีขึ้นอีกด้วย ทำให้ผู้บริโภคสะดวกในการสื่อสารและเข้าถึงบริการเหล่านั้นได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีผู้ใช้บริการแบนด์วิดท์จำนวนมาก จะมีปริมาณข้อมูลมหาศาลที่จะต้องถูกส่งและรับ หรือกระจายในโครงข่ายสื่อสาร [5] ย่อมมีการแย่งใช้แบนด์วิดท์กันบ้าง ทำให้ต้องมีการพัฒนาโครงข่ายที่ใช้ในการสื่อสารให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม เพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้แบนด์วิดท์ของผู้บริโภค

สำหรับโครงข่ายระดับ access ระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ระบบ asynchronous digital subscriber line (ADSL) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงบนสายทองแดง ซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยในการสื่อสารข้อมูลสูงสุดเพียง 6-16 Mbps แต่อัตราข้อมูลของ ADSL ยังไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานในปัจจุบัน ก่อให้เกิดปัญหาแบนด์วิดท์ไม่พอใช้กับผู้ใช้บริการ ข้อเสียอีกประการหนึ่งของ ADSL คือ ADSL จะส่งข้อมูลผ่านทางสายส่งทองแดง ทำให้อัตราข้อมูลแปรผันกับระยะทาง เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นอัตราข้อมูลจะมีค่าลดลง ไม่เหมาะสมต่อการตอบสนองผู้ใช้บริการที่ใช้การสื่อสารข้อมูลอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะข้อมูลที่เป็นภาพต่อเนื่อง ระบบ fiber-to-the-x (FTTx) เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ให้บริการสื่อสารข้อมูลโดยส่งให้ถึงบ้านผู้ใช้บริการ ระบบ FTTx สามารถให้บริการสื่อสารข้อมูลในชีวิตประจำวันได้ทุกรูปแบบ เช่น การส่งไฟล์หรือดาวโหลดไฟล์ขนาดใหญ่ สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากการเชื่อมโยงเส้นใยแสงเข้าถึงที่พักอาศัยของผู้ใช้บริการโดยตรง [5], [6]

โครงข่ายแบบ FTTx เป็นโครงข่ายระดับ access network ที่สามารถให้บริการแก่ผู้บริโภคได้ทุกที่ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ fiber-to-the-node (FTTN) , fiber-to-the-curb (FTTC) , fiber-to-the-building (FTTB) และ fiber-to-the-home (FTTH) โดยที่ FTTN และ FTTC จะเชื่อมต่อเส้นใยแสงจากผู้ให้บริการไปยังตู้ที่ใช้กระจายสัญญาณ (cabinet) และส่งไปยังที่พักอาศัยของ

ผู้ให้บริการอีกที่ ส่วน FTTB จะเชื่อมต่อเส้นใยแสงจากผู้ให้บริการไปยังอาคารของผู้ให้บริการ และ FTTH จะเชื่อมต่อเส้นใยแสงจากผู้ให้บริการไปยังจุดที่ผู้ให้บริการใช้งานโดยตรง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ประเภทของระบบ FTTx

ระบบ FTTx อยู่ภายใต้มาตรฐานโครงข่ายแบบ passive optical network (PON) ที่อยู่นอกอาคารซึ่งเชื่อมโยงผู้ให้บริการเข้ากับบ้านของผู้ใช้บริการแต่ละรายด้วยเส้นใยแสง และ อุปกรณ์ที่ใช้กระจายสัญญาณที่เรียกว่า passive optical splitter ซึ่งอุปกรณ์นี้จะแยกสัญญาณให้ผู้ให้บริการแต่ละรายเท่าๆกัน ข้อดีของระบบ PON คือ ระบบ PON ไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้ามาใช้งานในระบบ เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์แบบ active ที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า ทำให้ช่วยลดต้นทุนของอุปกรณ์ในโครงข่ายลดต้นทุนในส่วน operation administration & maintenance (OAM) ลดต้นทุนในการดูแลบำรุงรักษาระบบ ลดต้นทุนในส่วนพลังงานไฟฟ้าของระบบ และต้นทุนในส่วนซ่อมแซมอุปกรณ์สนาม (outside-plant equipment) นอกจากนี้ระบบ FTTx สามารถให้บริการสื่อสารข้อมูลด้วยความเร็วสูงแก่ผู้ให้บริการได้ในราคาค่อนข้างต่ำแล้ว ระบบ FTTx ยังช่วยให้ไม่มีสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นอีกด้วย เนื่องจากระบบใช้เพียงเส้นใยแสงและ splitter เท่านั้น การส่งสัญญาณจะสูญเสียกำลังสัญญาณน้อย สามารถเพิ่มหรือเปลี่ยนแปลงข้อมูลการส่งสัญญาณได้ [5]

การสื่อสารผ่านระบบ FTTx จะมีสองโปรโตคอลคือ asynchronous transfer mode (ATM) ของ ITU และ Ethernet ของฝ่าย IEEE ซึ่งทั้ง 2 ฝ่าย มีมาตรฐานที่สำคัญอยู่ 5 มาตรฐาน ดังนี้ [5], [7], [8]

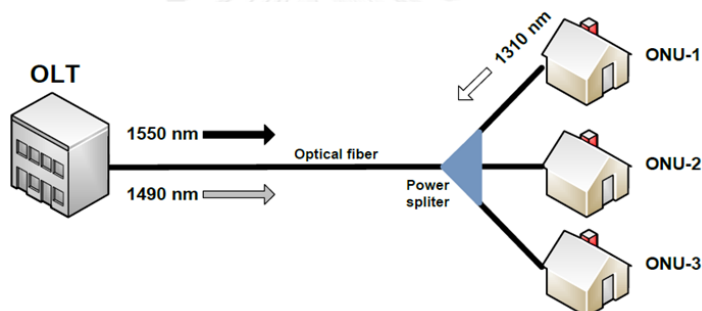
1. Broadband PON (BPON: ITU-T G.983) ใช้โปรโตคอล ATM ในการส่งสัญญาณ มีความเร็วในการส่งสัญญาณสูงสุดในส่วนการ downlink เท่ากับ 622 Mbps และส่วนการ uplink เท่ากับ 155 Mbps โดยมีระยะทางให้บริการมากที่สุดถึง 20 km และอัตราการกระจายสัญญาณผ่าน splitter คือ 1:16 และมากที่สุดถึง 1:32 ที่ระยะทางให้บริการ 5 km ซึ่งเป็นระยะการให้บริการโดยทั่วไปของโครงข่ายระดับ access network [5]

2. Gigabit PON (GPON: ITU-T G.984) เป็นมาตรฐานที่พัฒนาต่อจาก BPON โดยจะมีความเร็วในการส่งสัญญาณสูงสุดในส่วนการ downlink และ uplink สูงสุดถึง 2.5 Gbps โดยมีระยะทางให้บริการมากที่สุดถึง 20 km และอัตราการกระจายสัญญาณผ่าน splitter ให้กับผู้ใช้บริการได้สูงสุดเท่ากับ 1:64 ที่ระยะการให้บริการสั้นกว่า 20 km GPON ยังคงใช้โปรโตคอล ATM ในการส่งสัญญาณ [5]
3. Gigabit-Ethernet PON (GEPON: IEEE 802.3ah) หรือเรียกอีกอย่างว่า EPON เป็นมาตรฐาน FTTx อันแรกที่เป็นของ IEEE โดยจะมีความเร็วในการส่งสัญญาณสูงสุดในส่วนการ downlink และ uplink เท่ากันคือ 1.25 Gbps และอัตราการกระจายสัญญาณผ่าน splitter ให้กับผู้ใช้บริการเท่ากับ 1:16 ถึงแม้ว่าอัตราข้อมูลในการรับส่งสัญญาณจะน้อยกว่า GPON แต่เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ภายใต้มาตรฐาน GEAPON มีราคาถูกจึงใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน [5]
4. 10 Gigabit-Ethernet PON (10GE-PON: IEEE 802.3av) มีความเร็วในการส่งสัญญาณสูงสุดทั้ง downlink และ uplink ถึง 10 Gbps และยังคงใช้โปรโตคอล Ethernet ในการส่งข้อมูล โดยมาตรฐานนี้สามารถทำงานร่วมกับ GEAPON เดิมได้ โดยมีระยะทางให้บริการมากที่สุดถึง 20 km และมีอัตราการกระจายสัญญาณผ่าน splitter สูงสุดถึง 1:64 [5]
5. 10 Gigabit PON (XG-PON: ITU -T G.987) หรือเรียกอีกอย่างว่า 10G-PON โดยใช้โปรโตคอล GPON encapsulation method (GEM) ในการรับส่งข้อมูล ตามมาตรฐานที่ออกมา คือ XG-PON1 มีอัตราข้อมูลสูงสุดในส่วนการ downlink เท่ากับ 10 Gbps และ uplink เท่ากับ 2.5 Gbps และมาตรฐานนี้สามารถทำงานร่วมกับ GPON เดิมได้ [9]

ระบบ FTTx เป็นระบบที่เชื่อมโยงผู้ใช้บริการเข้ากับโครงข่ายหลักด้วยเส้นใยแสงความเร็วสูง ซึ่งในปัจจุบันจะมีอัตราข้อมูลสูงสุดถึง 10 Gbps ทั้ง uplink และ downlink อยู่ภายใต้มาตรฐาน 10GE-PON (IEEE 802.3av) [10] และมาตรฐาน ITU-T G.987 XG-PON [11] ในขณะนี้มาตรฐาน 10GE-PON ได้ให้บริการในการสื่อสารข้อมูลในหลายประเทศทั้งในแถบเอเชียและยุโรป ไม่ว่าจะเป็นบริการแบบ triple play ที่ให้บริการในการโทรศัพท์ การรับชมวิดีโอที่มีความคมชัดระดับ HD และการสื่อสารข้อมูลผ่านทางอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง เป็นต้น อัตราข้อมูล 10 Gbps ดังกล่าว ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการในการใช้แบนด์วิดท์ของผู้บริโภค เพราะยังต้องถูกแบ่งด้วยจำนวนบ้านผู้ใช้บริการ 16 ถึง 64 บ้าน ในอนาคตอันใกล้ระบบ FTTx ถูกพัฒนาโดยการเพิ่มอัตราข้อมูลได้สูงขึ้นถึง 10 Gbps ต่อบ้านผู้ใช้บริการ 1 บ้าน และมากที่สุดถึงระดับ 40 Gbps ต่อบ้านผู้ใช้บริการ 1 บ้าน หลังจากนั้นเทคโนโลยี wavelength- division multiplexed PON (WDM-PON) จะเข้ามาแทนที่ time-division multiplexed PON (TDM-PON) เพื่อช่วยให้ผู้ใช้บริการได้รับอัตราการส่งข้อมูลเต็ม

โดยไม่ต้องแบ่งกับผู้ใช้บริการบ้านอื่น และยังช่วงเพิ่มการให้บริการข้อมูลที่หลากหลายผ่านความยาวคลื่นที่ต่างกันได้อีกด้วย เพื่อตอบสนองความต้องการในการบริโภคอัตราข้อมูลของผู้ใช้บริการ เช่น การดูโทรทัศน์หรือวิดีโอที่มีจอภาพคมชัดระดับ 4K และ 8K high definition หรือ ช่วยในการสนับสนุนใน M2Ms

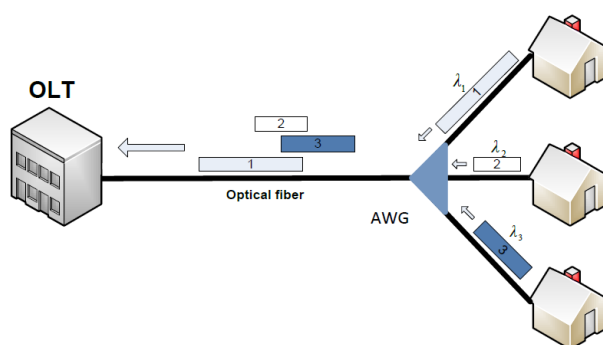
ระบบ TDM-PON เป็นระบบที่ผู้ใช้บริการแชร์อัตราข้อมูลกันทางเวลา คือ แต่ละบ้านของผู้ใช้บริการใช้อัตราข้อมูลพร้อมกัน แต่อัตราข้อมูลรวมต้องแชร์กันด้วยจำนวนผู้ใช้บริการพร้อมกันในขณะนั้น ระบบนี้เป็นแบบ passive คือ ไม่ต้องใช้กำลังไฟฟ้าในระบบ ช่วยประหยัดต้นทุนในส่วน OAM ได้ในอีกทางหนึ่ง สำหรับวิธี duplexing ในโครงข่าย PON นั้น โดยปกติแล้ว โครงข่ายเส้นใยแสงในการสื่อสารที่เชื่อมโยงระหว่างองค์กร หรือในระดับ metropolitan-area network (MAN) การส่งสัญญาณข้อมูลจะต้องใช้เส้นใยแสง 2 เส้น เพื่อแยกแยะระหว่างสัญญาณที่ส่งไปและกลับ เนื่องจากสัญญาณจะเดินทางอยู่บนเส้นใยแสงเพียงทิศทางเดียว แต่สำหรับโครงข่ายในระบบ PON จะใช้การ duplexing ต่างความยาวคลื่น และใช้เส้นใยแสงเส้นเดียวกันในการส่งสัญญาณไปและกลับ [5]



รูปที่ 1. 4 ระบบ TDM-PON [5]

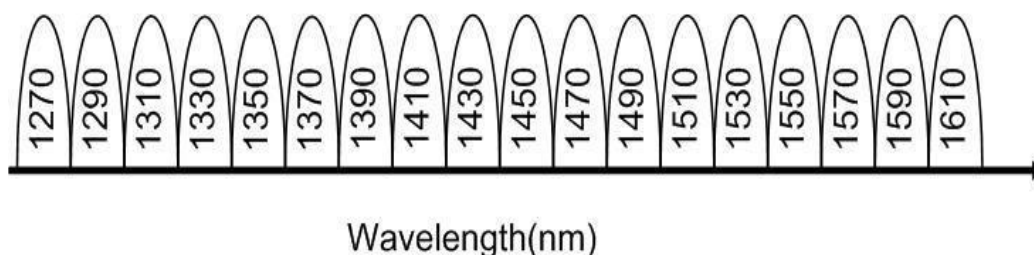
เนื่องจากมาตรฐานของ TDM-PON อาศัยการส่งสัญญาณไปสู่ผู้ใช้บริการโดยวิธีแบ่งเวลา จากรูปที่ 1.4 จะเห็นว่าในส่วนของ การ downlink สัญญาณที่ถูกส่งออกมาจาก optical line terminal (OLT) จะถูกแบ่งโดยอุปกรณ์ passive optical splitter โดยกระจายสัญญาณออกด้วยกำลังเท่ากันไปยัง optical network unit (ONU) ทุกตัว แต่กำลังของสัญญาณที่ ONU แต่ละตัวได้รับจะถูกแบ่งเท่ากันด้วยจำนวน ONU หรือผู้ใช้บริการอยู่ทั้งหมด และในส่วนของ การ uplink ONU แต่ละตัวจะต้องร้องขอติดต่อการใช้สัญญาณจาก OLT ซึ่งอยู่ภายใต้การจัดการใช้สัญญาณแบบ พลวัต (dynamic bandwidth allocation: DBA) เพื่อเป็นการป้องกันการชนกันของบิตข้อมูลของแต่ละ ONU และส่งอัตราข้อมูลได้ตามความต้องการของผู้ใช้งานแต่ละรายโดยไม่เกิดการชนกันของชุดข้อมูล ในปัจจุบันลักษณะการใช้บริการสื่อสารข้อมูลของแต่ละผู้ใช้บริการไม่เหมือนกัน ระบบ TDM-PON เป็นระบบที่ต้องแชร์อัตราข้อมูลระหว่างผู้ใช้บริการทางเวลา และยังคงถูกจำกัดให้ใช้กำลังสัญญาณต่อผู้ใช้บริการได้ต่ำลงตามจำนวนผู้บริการทั้งหมด เป็นผลทำให้ไม่สามารถใช้อัตราข้อมูลสูงสุดที่ได้จาก OLT ได้ ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นระบบที่แก้ปัญหาให้สามารถใช้อัตราข้อมูลสูงสุดจาก

OLT ได้ นั่นคือ ระบบ WDM-PON ซึ่งใช้วิธีการจัดสรรความยาวคลื่นต่างกันให้กับ ONU แต่ละตัว ระบบ WDM-PON เป็นระบบที่ไม่ต้องแบ่งอัตราข้อมูลระหว่างผู้ใช้บริการทางเวลา ซึ่งผู้ใช้บริการจะได้รับอัตราข้อมูลสูงสุดจาก OLT และเป็นระบบที่ง่ายต่อการขยายจำนวนผู้ใช้บริการ เพราะสามารถเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณได้ในโครงข่ายเดิมเพื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการ โดยไม่มีการแบ่งกำลังแบ่งอัตราข้อมูลระหว่างผู้ใช้บริการ ทำให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายสามารถใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างเต็มที่ ระบบ WDM-PON แสดงดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 ระบบ WDM-PON [5]

ระบบ WDM-PON จะใช้ array waveguide grating (AWG) ที่ทำหน้าที่แยกความยาวคลื่นที่ต่างกันส่งไปยัง subscriber แต่ละราย แทนที่ splitter ในระบบ TDM-PON ซึ่งอุปกรณ์ AWG เป็นแบบ passive ไม่ใช้กำลังไฟฟ้าเช่นเดียวกับ passive optical splitter ในระบบ TDM-PON อุปกรณ์ AWG นั้นเป็นอุปกรณ์ชนิด passive ซึ่งสามารถแยกความยาวคลื่นและสามารถ demultiplexing (DEMUX) สัญญาณที่ความยาวคลื่นแตกต่างกันออกมาได้ [5] ทำให้สามารถจัดสรรความยาวคลื่นที่ต่างกันให้ผู้ใช้บริการแต่ละราย เป็นผลทำให้ไม่เกิดโอกาสชนกันของข้อมูล การจัดสรรความยาวคลื่นเป็นไปตามมาตรฐานการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ coarse wavelength division multiplexing (CWDM) ตามมาตรฐาน ITU-T G.652.D ซึ่งจะมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1271 nm จนถึงความยาวคลื่น 1611 nm โดยมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ 20 nm ที่แสดงดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 การจัดสรรช่องสัญญาณตามมาตรฐาน ITU G.652.D [5]

อย่างไรก็ตาม ระบบ WDM-PON ยังมีข้อเสียอยู่ คือ WDM-PON จะส่งสัญญาณในรูปแบบความยาวคลื่น โดยจะส่งหนึ่งความยาวคลื่นที่แตกต่างกันให้ผู้ใช้บริการแต่ละราย เมื่อผู้ใช้บริการใช้



อัตราข้อมูลไม่ครบหนึ่งความยาวคลื่นที่ถูกส่งไป ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองอัตราข้อมูล นอกจากนี้ ผู้ใช้บริการแต่ละรายนั้นมีความต้องการใช้อัตราข้อมูลที่ไม่เท่ากัน เช่น ผู้ใช้บริการรายแรกต้องการดาวน์โหลดไฟล์ข้อมูลขนาดใหญ่ ส่วนผู้บริการรายที่สองต้องการใช้โทรศัพท์ผ่านระบบ WDM-PON ความต้องการนี้ยังแปรเปลี่ยนไปตามเวลา ในบางครั้งการส่งสัญญาณผ่านระบบ WDM-PON อาจไม่เพียงพอต่อการใช้งานของผู้บริโภค จึงต้องหาระบบใหม่ที่สามารถจัดสรรอัตราข้อมูลให้ผู้บริโภคใช้ได้เพียงพอต่อความต้องการ และใช้ในเวลาใดๆได้อย่างไม่จำกัด

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์นำเสนอวิธีปรับปรุงแก้ไขข้อจำกัดของ WDM-PON ดังกล่าวโดย ออกแบบระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่น (wavelength selective switch : WSS) ร่วมกับ ตัวควบคุมการจัดสรรความยาวคลื่นแบบพลวัต (dynamic wavelength and bandwidth allocation : DWBA) เพื่อผู้บริการได้ใช้งานได้หลากหลายตรงกับความต้องการ

ถึงแม้ว่าโครงข่ายระดับ core network จะมี อุปกรณ์สวิตช์ความยาวคลื่นใช้งานอยู่ในระดับที่สามารถรองรับอัตราส่งข้อมูล 40 Gbps ขึ้นไป แต่อุปกรณ์ใน core network นั้นมีความซับซ้อนสูงและมีราคาสูง ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ใน access network งานวิจัยนี้จะ นำเสนอแนวทางการออกแบบของระบบ FTTx ซึ่งใช้สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่น (WSS) ร่วมกับ DWBA โดยอาศัยการส่งสัญญาณแบบอนออฟคีย์อิงชนิดไม่กลับสู่ศูนย์ (non-return-to-zero on-off keying: NRZ-OOK) ที่อัตราข้อมูลเป็น 10 Gbps ให้มีสมรรถนะในการส่งสัญญาณสูงสุด , วิเคราะห์ผลกระทบของ switching characteristic ใน active WSS และ switching time ที่ผู้บริการอัตราข้อมูลร้องขอต่อสมรรถนะในการส่งสัญญาณของระบบ นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ผลกระทบของ dispersion และ attenuation ซึ่งจำกัดประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ และจำลองหาระยะทางการให้บริการอัตราข้อมูลสูงสุด เพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้อัตราข้อมูลของผู้บริโภคมากที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 นำเสนอระบบ FTTx ซึ่งใช้สวิตช์แบบเลือกความยาวคลื่น ร่วมกับ การจัดสรรความยาวคลื่นแบบพลวัต เป็นครั้งแรก
- 1.2.2 นำเสนอแนวทางการออกแบบของระบบ FTTx ซึ่งใช้ WSS ร่วมกับตัวควบคุมแบบ DWBA โดยอาศัยการส่งสัญญาณแบบ NRZ-OOK ที่อัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps ให้มีสมรรถนะสูงสุด
- 1.2.3 วิเคราะห์ผลกระทบของ switching characteristic และ time constant ของ WSS แต่ละชนิด ต่อสมรรถนะในการส่งสัญญาณของระบบ

1.2.4 วิเคราะห์ผลกระทบของ dispersion และ attenuation ซึ่งจำกัดประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ

### 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1.3.1 ออกแบบโครงสร้างระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS มาใช้ร่วมกับ ตัวควบคุมแบบ DWBA โดยการจำลองบนโปรแกรม Optisystem software version 10.0 โดยไม่มีการทดลองจริง

1.3.2 ในโครงข่ายระบบ FTTx เมื่อนำ WSS ใช้ร่วมกับ DWBA การส่งผ่านสัญญาณจะใช้เส้นใยชนิด SMF ITU-T G.652.D เท่านั้น

1.3.3 นำเสนอการจำลองระบบโดยใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK

1.3.4 ใช้อัตราข้อมูล 10 Gbps ต่อความยาวคลื่นเท่านั้น

1.3.5 ออกแบบ WSS ให้มีประสิทธิภาพตรงกับความต้องการใช้งานของระบบ FTTx ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับระบบ FTTx และ WSS ที่ใช้งานร่วมกับ DWBA

1.4.2 ศึกษาหลักการส่งผ่านเส้นใยแสงโดยใช้ SMF ITU-T G.652.D

1.4.3 ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อการจำกัดสมรรถนะในการส่งสัญญาณเส้นใยแสงที่มีอัตราข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps ต่อหนึ่งความยาวคลื่น เช่น การลดทอนกำลังของสัญญาณ (attenuation) การดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (fiber dispersion) เป็นต้น

1.4.4 ศึกษาการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK ในการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

1.4.5 ออกแบบ และจำลองระบบ FTTx ซึ่งใช้ WSS ร่วมกับ DWBA โดยไม่คิดผลของ switching characteristic เปรียบเสมือนสวิตช์ที่ใช้เป็นแบบอุดมคติ ใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK และอัตราการส่งข้อมูลเป็น 10 Gbps ด้วยโปรแกรม OptiSystem software version 10.0 ซึ่งจำลองในช่วงความยาวคลื่น 1271-1571 nm โดยระยะห่างของช่องสัญญาณเท่ากับ 20 nm และระบบนี้สามารถส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการได้มากที่สุดถึง 160 Gbps ต่อผู้ใช้บริการ 1 คน

- 1.4.6 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ โดยการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อการจำกัดสมรรถนะในการสื่อสารสัญญาณ รวมถึงวิเคราะห์หาระยะทางที่สามารถส่งสัญญาณได้สูงสุด
- 1.4.7 ศึกษาหาข้อมูลของ WSS ที่มีในตลาดโทรคมนาคมปัจจุบัน
- 1.4.8 ออกแบบ WSS ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานกับระบบ FTTx ที่นำเสนอ
- 1.4.9 จำลองระบบ FTTx ซึ่งใช้สวิตช์แบบ WSS ที่ออกแบบ ร่วมกับ DWBA โดยคิดผลของ switching characteristic ด้วยโปรแกรม OptiSystem จากนั้นวิเคราะห์หาปัจจัยที่จำกัดสมรรถนะของระบบ และวิเคราะห์หาระยะทางที่สามารถส่งสัญญาณได้สูงสุด
- 1.4.10 วิเคราะห์ข้อจำกัดของระบบ FTTx ที่นำเสนอ เมื่อใช้ WSS ซึ่งมี time constant และ switching time ที่ต่างกัน และนำเสนอแนวทางในการออกแบบระบบ FTTx ที่นำเสนอ ให้มีสมรรถนะสูงสุด เมื่อกำหนดความต้องการอัตราข้อมูลต่อผู้ใช้บริการ และ switching time จากนั้น ทดสอบแนวทางการออกแบบระบบ ด้วยการจำลองระบบด้วยโปรแกรม OptiSystem
- 1.4.11 เรียบเรียงวิทยานิพนธ์

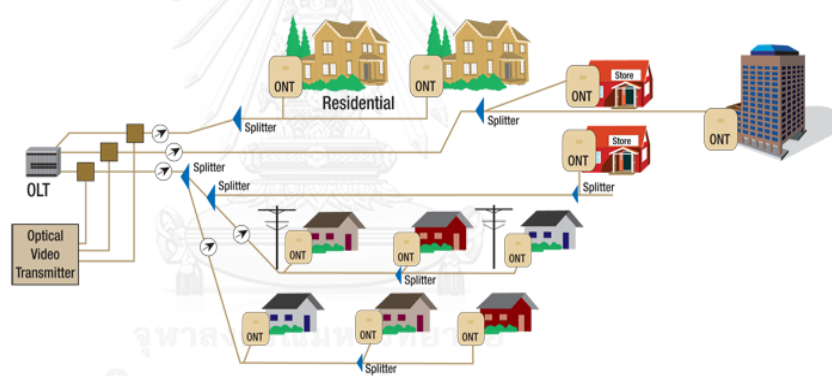
## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้รับความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง FTTx, หลักการทำงานของ WSS เมื่อใช้งานร่วมกับตัวควบคุมแบบ DWBA
- 1.5.2 ได้รับความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อการจำกัดสมรรถนะในการส่งสัญญาณของระบบ เช่น attenuation และ dispersion เมื่ออัตราการส่งข้อมูลเป็น 10 Gbps ต่อความยาวคลื่น
- 1.5.3 ได้รับความรู้เกี่ยวกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK และการประยุกต์การมอดูเลตสัญญาณเข้ากับโครงข่าย FTTx
- 1.5.4 ได้ออกแบบระบบ FTTx ซึ่งใช้สวิตช์แบบ WSS ร่วมกับ DWBA ให้มีสมรรถนะในการส่งสัญญาณสูงสุด เพื่อสร้างประโยชน์ต่อผู้ใช้บริการส่งสัญญาณในอนาคต
- 1.5.5 ได้ออกแบบ WSS ที่เหมาะสมกับการใช้งานกับระบบ FTTx ที่นำเสนอ
- 1.5.6 ได้รับความรู้เกี่ยวกับผลกระทบของ switching characteristic ใน WSS และ switching time ที่ผู้ใช้บริการร้องขอ ต่อสมรรถนะในการส่งสัญญาณของระบบ
- 1.5.7 มีผลงานนำเสนอในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ

## บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน

ทฤษฎีพื้นฐานในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 7 ส่วนด้วยกัน ซึ่งส่วนแรกจะกล่าวถึง โครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx และประเภทของระบบ FTTx ส่วนที่ 2 กล่าวถึง ปัจจัยที่จำกัดสมรรถนะในการส่งสัญญาณ เช่น attenuation, fiber dispersion และ polarization mode dispersion (PMD) ส่วนที่ 3 กล่าวถึง การมัลติเพล็กซ์สัญญาณในรูปแบบต่างๆ เช่น Time Division Multiplexing (TDM), Wavelength Division Multiplexing (WDM) และ Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM) ส่วนที่ 4 กล่าวถึง การมอดูเลตความเข้มแสงแบบ on-off keying (OOK) ส่วนที่ 5 กล่าวถึง มาตรฐานของเส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652 ส่วนที่ 6 กล่าวถึง โครงสร้างและการทำงานของ WSS และส่วนสุดท้าย ได้กล่าวถึง การคำนวณ Power Budget ของระบบ FTTx

### 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ FTTx



รูปที่ 2. 1 โครงสร้างพื้นฐาน FTTx แบบ PON [12]

โครงข่าย FTTx เป็นโครงข่ายที่เชื่อมโยงผู้ใช้บริการเข้ากับโครงข่ายหลักด้วยเส้นใยแสง (optical fiber) ความเร็วสูง และเป็นโครงข่ายเข้าถึง (access network) ที่สามารถให้บริการส่งสัญญาณแก่ผู้ใช้บริการได้ทุกที่ ซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐานโครงข่ายแบบ PON ที่อยู่นอกอาคารซึ่งเชื่อมโยง เส้นใยแสงจากอุปกรณ์ OLT เป็นอุปกรณ์รับสายเส้นใยแสงในฝั่งโครงข่ายที่จะติดตั้งในตู้ชุมสายไปยังบ้านผู้ใช้ในชุมสายจะประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่สำหรับการประมวลสัญญาณ เช่น ตัดต่อหรือสลับสาย (switching) จัดหาเส้นทางการเดินทางของข้อมูล (routing) และอื่นๆ ตามที่จำเป็น สำหรับช่วงเส้นทางระหว่างชุมสายกับบ้านผู้ใช้บริการ เป็นงานข่ายสายตอนนอกระหว่างทางจาก OLT ไปสู่ optical network terminal (ONT) หรือ ONU ซึ่งติดตั้งอยู่ที่บ้านที่อยู่อาศัยของผู้ใช้บริการ มีอุปกรณ์แยกสัญญาณ คือ passive optical splitter โดยกระจายสัญญาณ

ออกด้วยกำลังเท่ากันไปยัง ONU ทุกตัว แต่กำลังของสัญญาณที่ ONU แต่ละตัวได้รับจะถูกแบ่งเท่ากัน ด้วยจำนวน ONU หรือผู้ใช้บริการอยู่ทั้งหมด และอุปกรณ์ splitter จะแบ่งกระจายสัญญาณได้เป็นจำนวนกำลังของ 2 คือ 4 8 16 32 64 หรือมากกว่านั้น ดังนั้นทุกบ้านของผู้ใช้บริการจะได้รับสัญญาณที่เหมือนกัน แต่กำลังของสัญญาณก็จะลดลงเป็นจำนวนเท่าตามจำนวนขาออกของ splitter เช่น 4 8 16 32 หรือ 64 เท่าเส้นทางระหว่างชุมสายกับบ้านผู้ใช้บริการ ประกอบด้วยเส้นใยนำแสง เชื่อมโยงไปยังกลุ่มบ้านผู้ใช้บริการในลักษณะของการกระจาย (distribution) ไปยังชุมชนเข้าสู่บ้านผู้ใช้ตามลำดับ ส่วนปลายของเส้นใยนำแสงที่อยู่ภายในบ้านของผู้ใช้ จะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ ONU ทำหน้าที่กระจายสัญญาณทั้งในรูปแบบของสัญญาณแสงและไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ใช้งาน ภายในบ้าน เช่น โทรศัพท์ โทรทัศน์ โทรสารหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ทั้งนี้จำนวนอุปกรณ์ใช้งานในบ้านของผู้ใช้อาจมีได้มากกว่าหนึ่งอุปกรณ์ขึ้น อยู่กับกับปริมาณข้อมูล (ความเร็ว) ความต้องการใช้บริการ และรูปแบบการให้บริการของผู้ให้บริการ (Operator) นอกจากนี้ ยังมีกรณีโครงข่ายที่ไม่ใช่ splitter เลย เรียกว่าโครงข่ายแบบ homerun topology โดยโครงข่ายนี้จะให้ความเร็วในการส่งสัญญาณข้อมูล สูงสุด แต่ต้องใช้เส้นใยแสงและ OLT จำนวนมาก เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ splitter คอยแยกสัญญาณ อยู่ [5]

## 2.2 ปัจจัยที่จำกัดสมรรถนะในการส่งสัญญาณ

### 2.2.1 การลดทอนกำลังสัญญาณ (attenuation loss)

attenuation เป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่จำกัดสมรรถนะในการส่งสัญญาณบนเส้นใยแสง เมื่อสัญญาณเดินทางผ่านเส้นใยแสงย่อมมีการสูญเสียกำลังของสัญญาณขณะส่งสัญญาณอยู่ ดังนั้น การลดทอนกำลังสัญญาณจึงเป็นส่วนสำคัญที่กำหนดขอบเขตในการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแสง และเป็นปัจจัยที่กำหนดระยะทางสูงสุดระหว่างตัวรับและตัวส่ง ซึ่งสาเหตุหลักของการลดทอนกำลังสัญญาณในเส้นใยแสงมีอยู่ 3 สาเหตุ คือ การดูดซึม (absorption) ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของวัสดุ, การกระเจิง (scattering) ที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของท่อนำคลื่นจากกระบวนการผลิต และการแผ่รังสี (radiation) ที่เกิดจากรูปทรงของเส้นใยแสง และเมื่อระยะทางในการส่งสัญญาณบนเส้นใยแสงเป็นเท่าใด จะเกิดกำลังของการลดทอนของสัญญาณดังในสมการที่ (2-1) [13]

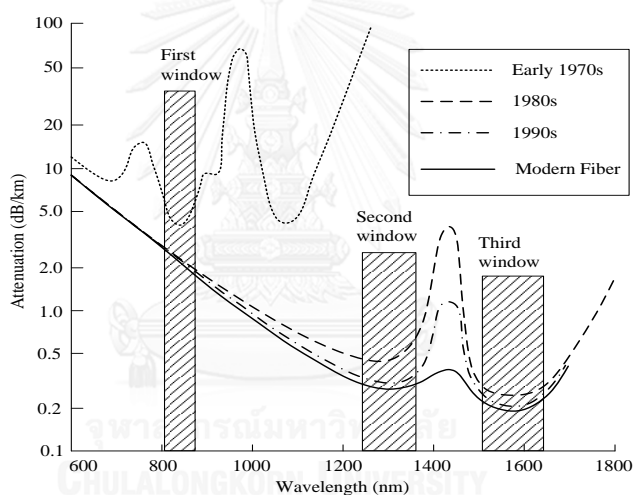
$$P(L) = P(0) - \alpha L \quad (2-1)$$

โดยที่  $P(L)$  คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่ระยะ  $L$  กิโลเมตรจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

$P(0)$  คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

$\alpha$  คือ ค่าคงตัวของการลดทอน [dB/km]

จากสมการที่ (2-1) จะพบว่ากำลังของการลดทอนสัญญาณจะแปรผกผันกับระยะทางที่เพิ่มขึ้น และค่าคงตัวการลดทอน ( $\alpha$ ) ในแต่ละความยาวคลื่นจะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2 แสดงถึงเส้นโค้ง 3 เส้นโดยแบ่งตามยุคของการสื่อสาร คือ ยุค first window จะทำงานในช่วงความยาวคลื่น 850 nm และเส้นใยแสงทำจากซิลิกาที่มีความชื้นสูงและเกิดผลของการกระเจิงแบบเรย์ลี (rayleigh scattering) ทำให้เกิดอัตราการลดทอนสัญญาณสูง ยุค second window มีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ในช่วงความยาวคลื่น 1310 nm และยุค third window ได้พัฒนาระบบเส้นใยแสงที่ความยาวคลื่น 1550 nm และมีอัตราการลดทอนสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km [14]



รูปที่ 2. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น [15]

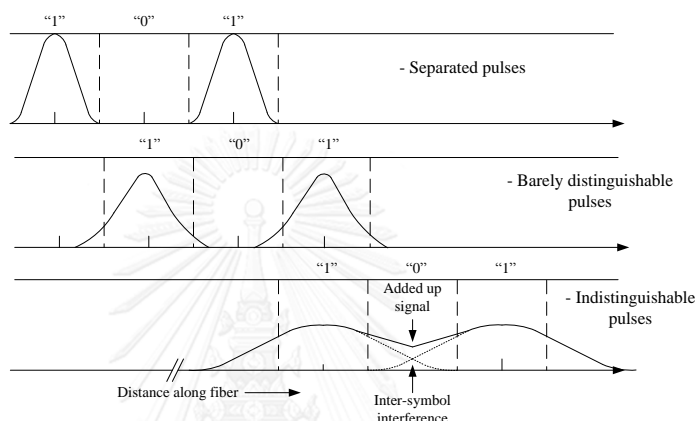
ความยาวคลื่นที่ 850 nm, 1310 nm และ 1550 nm เป็นความยาวคลื่นในช่วงอินฟราเรดส่วนใหญ่ มักจะใช้ทำอุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสง (optical source) ในการส่งสัญญาณ, ไดโอดเปล่งแสง (LED) และเลเซอร์ไดโอด (LD) เป็นต้น จากรูปที่ 2.2 สามารถนำมาสรุปความยาวคลื่นที่นำไปใช้ในยุคการสื่อสารต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2. 1 ความยาวคลื่นที่นำไปใช้ในแต่ละยุคของการส่งสัญญาณ [16]

window	window range	operating wavelength
first window	800-900 nm	850 nm
second window	1260-1360 nm	1310 nm
third window	1500-1600 nm	1550 nm

## 2.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (fiber dispersion)

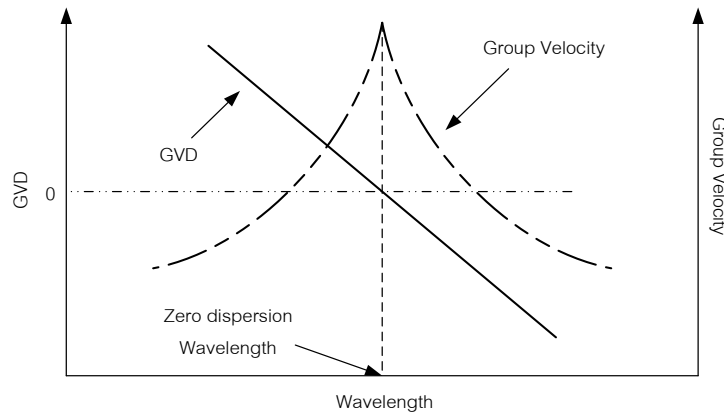
เมื่อมีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง จะเกิดปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง ที่ทำให้เกิดการขยายกว้างตัวของพัลส์ และไปทับกับพัลส์ที่อยู่ข้างเคียง หรือเรียกอีกอย่างว่า การเกิดการแทรกสอดระหว่างบิต (inter-symbol interference : ISI) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการผิดเพี้ยนทั้งในกรณีที่เป็นการส่งสัญญาณแบบแอนะล็อกและดิจิทัล และทางภาครับไม่สามารถแยกสัญญาณออกจากกันได้ ซึ่งผลของการรับสัญญาณจะผิดพลาดจากบิต “1” เป็น บิต “0” และผิดพลาดจากบิต “0” เป็น บิต “1” แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2. 3 การเกิด inter-symbol interference (ISI) [15]

ดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสง มีสองประเภทด้วยกันคือ ดิสเพอร์ชันภายนอกแผนคลื่น (inter-modal dispersion) สำหรับเส้นใยแสงแบบหลายโหมด (multimode fiber : MMF) และดิสเพอร์ชันภายในแผนคลื่น (intra-modal dispersion) หรือโครมาติกดิสเพอร์ชัน (chromatic dispersion) สำหรับเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (single-mode fiber : SMF) เมื่อสัญญาณเดินทางผ่านเส้นใยแสง สัญญาณจะประกอบด้วยหลายความถี่ แต่ละความถี่จะมีค่าของดัชนีหักเหที่ต่างกัน ทำให้สัญญาณแสงแต่ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้พัลส์จะขยายตัวออก (broadening) เมื่อถึงปลายทาง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ดิสเพอร์ชันเส้นใยแสง

เมื่อสัญญาณแสงเดินทางระยะทางไกลส่งผลให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณแสง (distortion) ซึ่งเป็นผลมาจาก chromatic dispersion และผลการประวิงระหว่งโหมด (intramodal delay effect) สามารถตรวจสอบได้ด้วยการตรวจสอบความเร็วกลุ่ม (group velocity) ของโหมดการเดินทาง (guided modes) ซึ่งความเร็วกลุ่มคือความเร็วของพลังงานแต่ละโหมดที่เดินทางในเส้นใยแสง GVD



รูปที่ 2. 4 ความสัมพันธ์ของ group velocity และ GVD เทียบกับค่าความยาวคลื่น [15]

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าที่ค่าความยาวคลื่นแตกต่างกันจะมีค่าความเร็วกลุ่มต่างกันช่วงของดิสเพอร์ชันแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ ช่วงดิสเพอร์ชันปกติ (normal dispersion) ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่า  $\beta_2 > 0$  โดยในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมีความเร็วกลุ่มมากกว่า ช่วงดิสเพอร์ชันผิดปกติ (anomalous dispersion) เป็นช่วงที่มีค่า  $\beta_2 < 0$  ในช่วงนี้สัญญาณที่มีความยาวคลื่นน้อยจะมี  $\beta_2$  ความเร็วกลุ่มน้อยกว่าและดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (zero dispersion) เป็นช่วงที่มีค่า  $\beta_2 = 0$  โดยสัญญาณที่มีความยาวคลื่นนี้จะมีค่าความเร็วกลุ่มสูงที่สุด

เราสามารถคำนวณการขยายตัวของสัญญาณพัลส์ (broadening) เนื่องจาก chromatic dispersion ได้ตั้งสมการที่ (2-2) โดยพิจารณาให้  $\tau$  แทนการประวิงแพร่กระจาย (propagation delay) ที่ความถี่  $\omega$

$$\tau = \frac{L}{v_g} = L \frac{\delta\beta}{\delta\omega} = \frac{L}{C} \frac{\delta\beta}{\delta K} \quad (2-2)$$

โดย  $L$  คือ ความยาวของเส้นใยแสงหน่วยกิโลเมตร [km]

$v_g$  คือ ความเร็วกลุ่ม (group velocity) ตรงกันที่ความถี่  $\omega$  เท่ากับ  $v_g = \frac{1}{\beta_1} = \frac{\partial\omega}{\partial\beta}$

$\beta$  คือค่าคงที่การแพร่กระจาย (propagation constant)  $\beta_1 = \frac{\partial\omega}{\partial\beta}$  ,  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$

จากสมการที่ (2-2) สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial\tau}{\partial\omega} = L \frac{\partial}{\partial\omega} \left( \frac{1}{v_g} \right) = L \frac{\partial^2\beta}{\partial\omega^2} = L\beta_2 \quad (2-3)$$

โดยที่  $\beta_2$  คือ group velocity dispersion : GVD parameter



เมื่อ  $\beta_2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = \frac{\delta \beta_1}{\delta \omega} = \frac{\delta \left( \frac{1}{v_g} \right)}{\delta \omega}$  ถ้าสัญญาณมีความกว้างสเปกตรัมความถี่เท่ากับ  $\Delta \omega$  ดังนั้นความแตกต่างการประวิงแพร่กระจายในแต่ละส่วนประกอบของสเปกตรัมสามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (2-4)

$$\Delta \tau = \left| \frac{\partial \tau}{\partial \omega} \right| \Delta \omega = \left| \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right| L \Delta \omega = |\beta_2| L \Delta \omega \quad (2-4)$$

เมื่อเขียนในรูปความยาวคลื่น

$$\Delta \tau = \frac{\delta \left( \frac{1}{v_g} \right)}{\delta \lambda} \Delta \lambda = D L \Delta \lambda \quad , \quad (2-5)$$

$$D = \frac{\delta \left( \frac{1}{v_g} \right)}{\delta \lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2-6)$$

โดยที่  $D$  คือ dispersion (ps/nm/km)

$$\tau_{GVD} = D L \sigma_\lambda \quad (2-7)$$

โดยที่  $\tau_{GVD}$  คือ เวลาของ group velocity dispersion,  $D$  คือ ดิสเพอร์ชันของเสี้ยวแสง,  $L$  คือความยาวของเส้นใยแสง และ  $\sigma_\lambda$  คือ ความกว้างของสเปกตรัมของเลเซอร์ตามลำดับ ทั้งนี้ในการออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงแบบ RZ ค่าของ  $\tau_{GVD}$  ในสมการที่ (2-7) ควรจะน้อยกว่า 35% ของความกว้างของช่วงคาบิต (bit period) คำนวณได้จากสมการที่ (2-8) [15]

$$D L \sigma_\lambda = 0.35 T \quad (2-8)$$

เมื่อ  $T$  คือ bit period ของสัญญาณ RZ

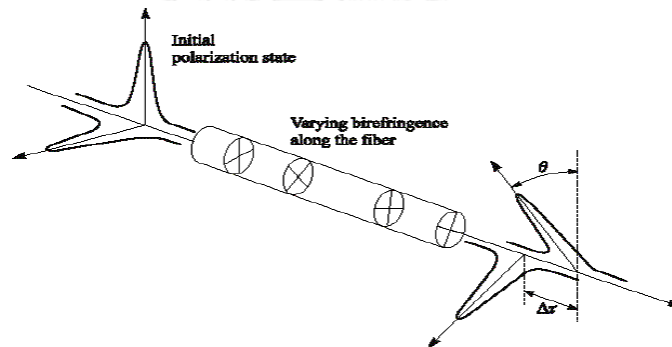
ในการออกแบบระบบสื่อสารสัญญาณทางแสงแบบ NRZ ค่าของ  $\tau_{GVD}$  ในสมการที่ (2-7) ควรจะน้อยกว่า 70% ของความกว้างของช่วงคาบิต (bit period) คำนวณได้จากสมการที่ (2-9) [15]

$$D L \sigma_\lambda = 0.70 T \quad (2-9)$$

เมื่อ  $T$  คือ bit period ของสัญญาณ NRZ

### 2.2.3 ปัญหาการกระจายโหมดโพลาไรซ์ (polarization mode dispersion: PMD)

PMD เป็นปัจจัยหนึ่งที่จำกัดประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณ ซึ่งผลกระทบของ PMD จะทำให้พัลส์ของสัญญาณขยายตัวกว้างขึ้น โดยปกติการส่งสัญญาณออกจากอุปกรณ์ก่อนเข้าเส้นใยแสง จะส่งในแกนเดียว (linear polarize) แต่เมื่อเดินทางผ่านเส้นใยแสงจะทำให้เกิดองค์ประกอบของแสง 2 โหมดโพลาไรซ์ซึ่งตั้งฉากกัน (orthogonal) สาเหตุที่ทำให้เกิด 2 โหมดตั้งฉากกันเนื่องจากคุณสมบัติของเส้นใยแสง ที่เรียกว่า birefringence เป็นคุณสมบัติที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของเส้นใยแสง เช่น บริเวณแกน core ไม่เรียบเสมอกัน เกิดความเครียดภายในเส้นใยแสง (internal stresses) เกิดผลกระทบจากภายนอกเส้นใยแสง เช่น การโค้งงอ (bending) และการบิดเกลียว (twisting) ของเส้นใยแสง บิดเบี้ยวเป็นรูปวงกลม วงรี เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบ 2 โหมดนี้จะเดินทางผ่านเส้นใยแสงด้วยความเร็วที่ต่างกันเล็กน้อย โดยเวลาที่เดินทางด้วยความเร็วต่างกันเท่ากับ  $\Delta\tau$  หรือเรียกว่า differential group delay (DGD) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.5 ส่วนใหญ่จะส่งผลกระทบต่อโครงข่ายที่ส่งไปในระยะทางไกล ที่มีอัตราการส่งข้อมูลมากกว่า 10 Gbps สามารถคำนวณความเร็วที่ต่างกัน DGD ได้จากสมการ (2-10) และสมการที่ (2-11) [15]



รูปที่ 2.5 ผลของการกระจายโหมดโพลาไรซ์ PMD [15]

$$\Delta\tau = \left| \frac{L}{v_{gx}} - \frac{L}{v_{gy}} \right| \quad (2-10)$$

โดยที่  $\Delta\tau$  คือ differential time delay [ps]

$L$  คือ ความยาวของเส้นใยแสง [km]

$v_{gx}, v_{gy}$  คือ ความเร็วกลุ่มของแต่ละโหมดโพลาไรซ์เซชันซึ่งตั้งฉากกัน [m/s]

เนื่องจากคุณสมบัติตามธรรมชาติของเส้นใยแสง ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ทำให้ผลกระทบ PMD ระหว่างการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเปลี่ยนแปลงไปแบบสุ่ม (random) จึงทำให้ไม่สามารถใช้ค่า  $\Delta\tau$  จากสมการที่ (2-10) ได้โดยตรง เราจึงประมาณค่า  $\Delta\tau$  ได้ดังสมการที่ (2-11)

$$\langle \Delta\tau \rangle = D_{PMD} \sqrt{L} \quad (2-11)$$

โดยที่  $\langle \Delta\tau \rangle$  คือ ค่าเฉลี่ย (mean) ของ differential time delay [ps]

$D_{PMD}$  คือ ค่าเฉลี่ย (average) ของพารามิเตอร์ PMD [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]

เมื่อส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงจะเกิดโหมดโพลาริซชันของแสงตั้งฉากกันทั้ง 2 แขนงเดินทางไปถึงปลายทางไม่พร้อมกันและบิดไปจากแกนเดิมอย่างไม่มีแบบแผน (random) ส่งผลให้พัลส์ของสัญญาณขยายตัวกว้างขึ้น เกิดเป็นความผิดเพี้ยนของสัญญาณ เมื่อไปถึงภาครับจึงไม่สามารถตรวจจับสัญญาณที่ถูกต้องได้ ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งหมดถูกเรียกว่า PMD [15]

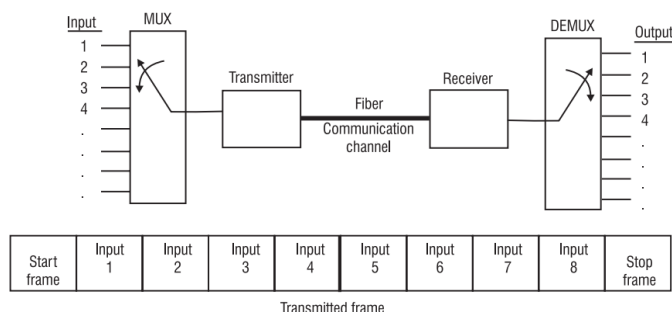
## 2.3 การมัลติเพล็กซ์สัญญาณ

การมัลติเพล็กซ์สัญญาณ (multiplexing) เป็นการรวมเอาสัญญาณที่มากกว่าหนึ่งสัญญาณให้รวมเป็นสัญญาณเดียวกัน เพื่อส่งในช่องสัญญาณเดียวกันได้ และส่วนการดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณ (demultiplexing) คือ การแยกสัญญาณออกจากกันเมื่อถึงปลายทางที่จะส่งสัญญาณ ซึ่งการมัลติเพล็กซ์ที่ใช้อยู่กันในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธี คือ

1. time-division multiplexing (TDM) คือ การแชร์แบนด์วิดท์แบบช่องเวลา
2. wavelength-division multiplexing (WDM) คือ การแชร์แบนด์วิดท์แบบความยาวคลื่น
3. coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM)

### 2.3.1 Time Division Multiplexing (TDM)

การมัลติเพล็กซ์แบบ TDM จะแบ่งการใช้แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณแชร์กันทางเวลากล่าวคือ ผู้ใช้บริการแบนด์วิดท์ที่ใช้บริการพร้อมกัน แต่อัตราข้อมูลจะถูกแบ่งด้วยจำนวนผู้ให้บริการพร้อมกันทั้งหมด ซึ่งการมัลติเพล็กซ์แบบ TDM นี้ สถานีที่แชร์ช่องสัญญาณแต่ละสถานีจะสลับการส่งอัตราข้อมูลโดยส่งให้ได้ยาวนานสุดในช่วงเวลาที่กำหนด [17]



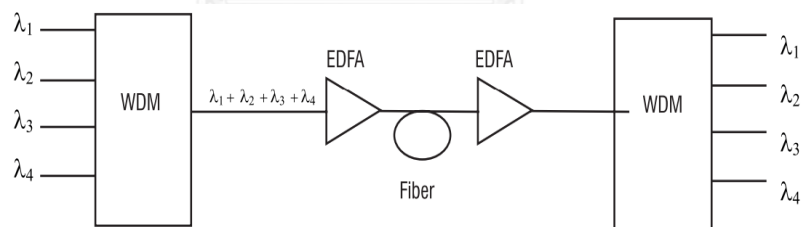
รูปที่ 2. 6 TDM [18]

อย่างไรก็ตามการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ TDM ต้องมีตัวที่คอยควบคุมการการมัลติเพล็กซ์สัญญาณและส่งแบนด์วิดท์ให้ตามความต้องการของผู้ใช้บริการ ในภาค downlink สัญญาณที่ถูกส่ง

จาก OLT จะถูกแบ่งโดยอุปกรณ์ power splitter ไปยัง ONU ทุกตัว และ ในภาค uplink แต่ละ ONU จะเข้าใช้ช่องสัญญาณโดยการขอติดต่อขอใช้ช่วงเวลา (time-slot) จาก OLT เพื่อป้องกันการชนกันของบิตข้อมูลของแต่ละ ONU โดยอาศัยโปรโตคอล media access control (MAC) โดย OLT จะ ทำการจัดสรรช่องสัญญาณสำหรับแต่ละ ONU ที่ร้องขอการใช้ช่องสัญญาณเข้ามาแบบพลวัต (dynamic bandwidth allocation: DBA) ตามความต้องการของแต่ละผู้ใช้บริการ ทำให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายสามารถส่งข้อมูลผ่านสัญญาณแสงความยาวคลื่นเดียวกันลงไปใยแสงเส้นเดียวกันได้ โดยไม่เกิดกันชนกันของบิตข้อมูล แต่เนื่องจากระบบ TDM-PON นั้นเป็นการแบ่งสัญญาณโดยผ่านอุปกรณ์ power splitter ซึ่งส่งผลให้จำนวนของ ONU นั้นถูกจำกัดโดยกำลังสัญญาณที่ลดลง เนื่องจากสัญญาณถูกแบ่งไปให้ ONU ตัวอื่นๆด้วย [5], [17]

### 2.3.2 Wavelength Division Multiplexing (WDM)

การสื่อสารที่ใช้ใยแสงในปัจจุบันมักนิยมใช้การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ WDM ซึ่งเป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์สัญญาณที่ใช้ความยาวคลื่นหลายๆความยาวคลื่นส่งในใยแสงเส้นเดียวกัน เป็นการมัลติเพล็กซ์ที่ง่ายต่อการขยายจำนวนผู้ใช้บริการ เพราะสามารถเพิ่มความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณได้ในโครงข่ายเดิมเพื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้งาน โดยไม่มีการแบ่งกำลังของสัญญาณ ทำให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายสามารถใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างเต็มที่ และไม่มีโอกาสการชนกันของข้อมูล และทำให้การสื่อสารสองทางทำได้บนใยแสงเส้นเดียวกัน [5], [17]



รูปที่ 2. 7 WDM [18]

การมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ WDM จะรวมสัญญาณด้วย multiplexer แล้วส่งสัญญาณผ่านใยแสง ทางฝั่งด้านรับจะมี demultiplexer คอยแยกสัญญาณอยู่ นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ที่ใช้แยกและรวมสัญญาณในตัวเดียวกัน เรียกว่า add-drop multiplexing (ADM) ซึ่งเทคโนโลยี ADM ในปัจจุบันสามารถรวมสัญญาณได้มากที่สุดถึง 160 สัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณสามารถส่งอัตราข้อมูลได้ถึง 10 Gbps ดังนั้นการใช้ ADM จะทำให้ระบบสามารถส่งข้อมูลได้สูงที่สุดถึง 1.6 Tpbs (1 Tera = 1000 Giga) ซึ่งการส่งสัญญาณจะส่งลงบนใยแสงเส้นเดียวกัน

WDM สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ประเภทคือ dense wavelength-division multiplexing (DWDM) พัฒนามาจากเทคโนโลยี WDM ซึ่งเดิมสามารถรองรับการส่งข้อมูลที่อัตรา

2.5 Gbps ถึง 10 Gbps ที่ 32 ถึง 64 ช่องสัญญาณ โดยการเพิ่มจำนวน ช่องสัญญาณเป็น 160 ช่องสัญญาณ โดยที่กำหนดให้ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณถี่ขึ้น คืออยู่คืออยู่ที่ 25 ถึง 50 GHz [17] และ coarse wavelength-division multiplexing (CWDM) ซึ่งอธิบายในหัวข้อถัดไป

### 2.3.2 Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM)

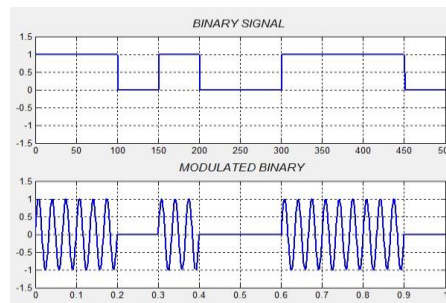
coarse wavelength-division multiplexing (CWDM) เป็นเทคโนโลยีที่ส่งข้อมูลบนเส้นใยแสงโดยใช้วิธีส่งข้อมูลไปบนความยาวคลื่นที่ค่อนข้างห่างกันมากบนเส้นใยแสงเส้นเดียว ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.2 ความยาวคลื่นทั้งหลายนั้น ถูกจัดเรียงโดยจะเริ่มจากความยาวคลื่นที่ 1271 nm และมีระยะระหว่างช่องสัญญาณช่องสัญญาณละ 20 nm ทุกช่องสัญญาณต่อเนื่องกันไปจนถึงช่องสัญญาณสุดท้ายที่ความยาวคลื่น 1611 nm การที่แต่ละความยาวคลื่นจะห่างกันถึง 20 nm นั้น เพื่อให้การเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่จะมาใช้ นั้น ไม่ต้องเคร่งครัดเรื่องการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้เกิดความเสถียรของความยาวคลื่นกลาง และความกว้างของสเปกตรัมมาก แหล่งกำเนิดแสงจึงไม่ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ทำให้มีราคาถูกลง จึงเหมาะสำหรับใช้กับ access network แบบ FTTx [5]

ในอดีตเทคโนโลยี CWDM จะรวมสัญญาณแสงแค่สองความยาวคลื่นเท่านั้น ได้แก่ ความยาวคลื่นที่ 1550 nm และ 1310 nm ในไม่นานนี้ ITU ได้กำหนดมาตรฐานใหม่โดยให้ใช้ความยาวคลื่นที่อยู่ระหว่าง 1310-1610 nm แต่ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 1470 nm ไม่สามารถใช้ได้กับเส้นใยแสง G.652 ได้ เนื่องจากการลดทอนของสัญญาณในช่วงความยาวคลื่น 1310-1470 nm มีมากเกินไป เส้นใยแสง G.652.C และ G.652.D สามารถกำจัดการลดทอนสัญญาณ water peak ได้ และสามารถรองรับช่องสัญญาณได้ทั้งหมด 20 ช่องสัญญาณที่กำหนดในมาตรฐาน ITU-T G.694.2 ซึ่งแต่ละความยาวคลื่น ห่างกัน 20 nm [17]

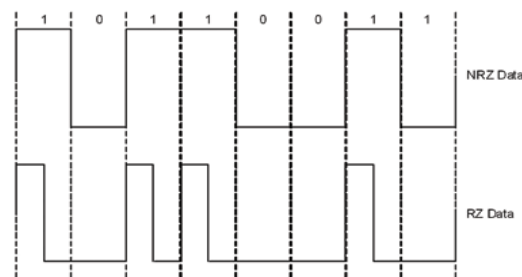
## 2.4 การมอดูเลตความเข้มแสง

การมอดูเลตความเข้มแสงที่นิยมใช้ในการส่งสัญญาณแสงคือ on-off keying (OOK) โดยกำลังส่งของแสงแบ่งเป็นสองระดับ ตามบิต “1” และบิต “0” ซึ่งจะมีค่าของกำลังส่งของสัญญาณที่ต่างกันตามอัตราส่วนที่เรียกว่า extinction ratio ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 2.8 นั้น การส่งสัญญาณแบบ OOK ยังแบ่งตามรูปแบบการส่งสัญญาณได้เป็นการส่งแบบ NRZ ซึ่งกำลังส่งสัญญาณของบิต “1” จะมีค่าคงที่ตลอดช่วงบิต (bit period) และ RZ ข้อมูลที่เป็นบิต “1” จะกลับลงมาเป็นบิต “0” ในระหว่างคาบสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณแบบ NRZ จำเป็นต้องใช้กำลังงานเฉลี่ยที่สูงกว่า RZ เนื่องจากการส่งสัญญาณแบบ NRZ ต้องส่งกำลังของสัญญาณตลอดทั้งคาบของบิต

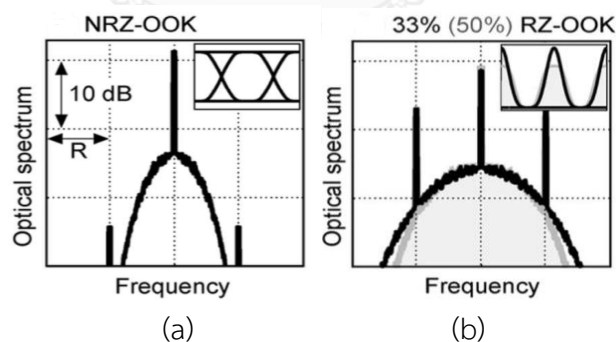
นั่น แต่การส่งสัญญาณแบบ RZ ส่งกำลังของสัญญาณเพียงส่วนหนึ่งของคาบ แต่สัญญาณแบบ NRZ ใช้แบนด์วิดท์ที่ต่ำกว่าสัญญาณแบบ RZ ทำให้สเปกตรัมของสัญญาณ NRZ จะแคบกว่า RZ ซึ่งเห็นได้จากสเปกตรัมของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยรูปที่ 2.10 (a) เป็นสเปกตรัมของสัญญาณแบบ NRZ และรูปที่ 2.10 (b) เป็นสเปกตรัมของสัญญาณแบบ NRZ [19], [20], [21]



รูปที่ 2. 8 ผลที่ได้จากการมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK ในโดเมนเวลา



รูปที่ 2. 9 สัญญาณแบบ NRZ และ RZ

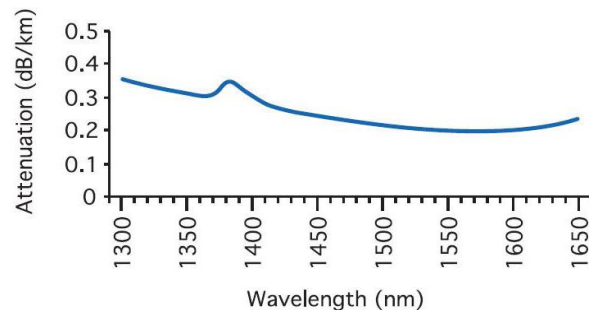


รูปที่ 2. 10 spectrum ของสัญญาณ OOK แบบ (a) NRZ (b) RZ

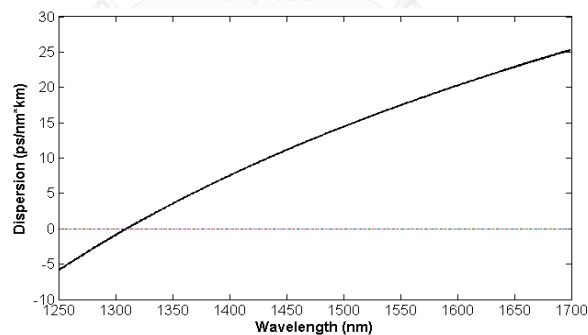
## 2.5 SMF ITU-T G.652

เส้นใยแสงที่ใช้ในระบบ FTTH นั้นเป็นชนิด SMF ในมาตรฐาน ITU-T G.652C ขึ้นไป นั่นก็หมายความว่า G.652D ก็สามารถนำมาใช้ในระบบ FTTH ได้ด้วย ทั้ง G.652C และ G.652D นั้น เป็นเส้นใยแสงที่อยู่ใน series ของ ITU-T G.652 ซึ่งเป็นมาตรฐานของ SMF ที่มีความยาวคลื่นซึ่งมีค่า dispersion เป็นศูนย์ (zero-dispersion wavelength) ที่ความยาวคลื่น 1310 nm ใน series ของ

G.652 นี้ จะมีมาตรฐานย่อยต่างๆ คือ G.652A G.652B G.652C และ G.652D สำหรับระบบ FTTH นั้นแนะนำให้ใช้ G.652C และ G.652D ซึ่งคุณสมบัติของเส้นใยแสง G.652C นั้นจะถูกปรับปรุงการผลิตให้ลดการดูดกลืนแสงช่วง 1450 nm อย่างรุนแรงจากการเจือปนของ OH อีออนในขบวนการผลิต เราเรียกช่วงที่ถูกดูดกลืนกำลังงานนี้ว่า water peak ทำให้ G.652C สามารถนำมาใช้ส่งสัญญาณแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1260 nm จนกว่า 1620 nm ครอบคลุมเขตตั้งแต่ S- C- และ L-band เนื่องจากความยาวคลื่น downlink ใช้ที่ 1490 nm รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างค่าอัตราการสูญเสียต่อความยาวคลื่นของเส้นใยแสงชนิด G.652C หากไม่ใช้ G.652C ที่ไม่มี water peak แล้ว จะทำให้ไม่สามารถส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่นดังกล่าวผ่านเส้นใยแสงไปได้ รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างค่า dispersion ของเส้นใยแสงชนิด G.652C ซึ่งมี dispersion เป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่น 1,310 nm



รูปที่ 2. 11 ค่าอัตราการลดทอนกำลังของสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของเส้นใยแสงชนิด G.652.C [5]



รูปที่ 2. 12 ค่า dispersion ของสัญญาณแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของเส้นใยแสงชนิด G.652C [5]

ส่วน SMF แบบ G.652.D ถูกออกแบบให้มีการสูญเสียเนื่องจาก attenuation น้อยที่ความยาวคลื่นของ water absorption (ประมาณ 1382nm) ซึ่งทำให้ช่วงของความยาวคลื่นที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการส่งสัญญาณกว้างขึ้น โดยเริ่มตั้งแต่ 1310 nm ถึง 1550 nm ซึ่งความยาวคลื่นช่วงนี้มี attenuation ต่ำ มีประสิทธิภาพและคุณภาพของสัญญาณมีความเชื่อถือได้สูง คุณสมบัติของเส้นใยแสง G.652.D นั้นคล้ายกันกับคุณสมบัติของเส้นใยแสง G.652.B ที่ใช้สำหรับอัตราการรับส่งข้อมูลที่เร็วขึ้นถึงระดับของ STM-64 เช่น ITU-T Recs G.691 and G.692 หรือ STM-256 สำหรับบางแอปพลิเคชันใน ITU-T Recs G.693 and G.959.1 ที่ซึ่งจะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากค่า chromatic

dispersion ด้วย ทั้งนี้มาตรฐานดังกล่าวสามารถส่งสัญญาณแสงได้เพิ่มขึ้นได้ในช่วงความยาวคลื่น 1360 nm ถึง 1530 nm ซึ่งตารางที่ 2.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเส้นใยแสงตามมาตรฐาน G.652.D

ตารางที่ 2. 2 มาตรฐาน G.652.D [22]

Fiber attribute		
Attribute	Detail	Value
Mode field diameter	Wavelength	1310 nm
	Range of nominal values	8.6-9.5 $\mu$ m
	Tolerance	$\pm 0.6 \mu$ m
Cladding Diameter	Nominal	125.0 $\mu$ m
	Tolerance	$\pm 1 \mu$ m
Core Concentricity error	Maximum	0.6 $\mu$ m
Cladding noncircularity	Maximum	1.0%
Cable cut-off wavelength	Maximum	1260 nm
Macrobend loss	Radius	30 mm
	Number of turns	100
	Maximum at 1550 nm	0.1 dB
Proof stress	Minimum	0.69 GPa
Chromatic dispersion coefficient	$\lambda_{0\min}$	1300 nm
	$\lambda_{0\max}$	1324 nm
	$S_{0\max}$	0.092 ps/nm <sup>2</sup> x km
Cable attributes		
Attribute	Detail	Value
Attenuation coefficient	Maximum from 1310 nm to 1625 nm (Note 2)	0.4 dB/km
	Maximum at 1383 nm $\pm 3$ nm	(Note 3)
	Maximum at 1550	0.3 dB/km
PMD coefficient	M	20 cables
	Q	0.01%



	Maximum PMD	$0.20 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
<p>NOTE 1 – According to 6.2, a maximum PMD<sub>o</sub> value on uncabled is specified in order to support the primary requirement on cable PMD<sub>o</sub>.</p> <p>NOTE 2 - This wavelength region can be extended to 1260 nm by adding 0.07 dB/km induced Rayleigh scattering loss to the attenuation value at 1310 nm. In this case, the cable cut-off wavelength should not exceed 1250 nm.</p> <p>NOTE 3 - The sampled attenuation average at this wavelength shall be less than or equal to the maximum value specified for the range, 1310 nm to 1625 nm, after hydrogen ageing according to IEC 60793-2-50 regarding the B1.3 fiber category.</p>		

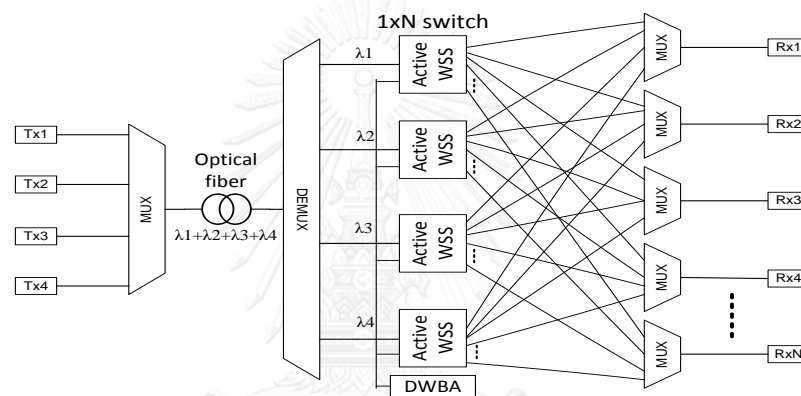
## 2.6 โครงสร้างและการทำงานของ WSS

WSS เป็นสวิตช์ที่สามารถเลือกรับหรือส่งความยาวคลื่นได้ตามความต้องการที่ผู้ใช้บริการร้องขอ และเหมาะสมกับโครงสร้างของระบบ FTTx ที่ใช้ในวิธานิพนธ์นี้ WSS เป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถเลือกความยาวคลื่นต่างๆที่ต้องการ add หรือ drop ได้ โดยการสื่อสารที่ใช้สวิตช์ความยาวคลื่น (WSS) จะเป็นประเภทแบบไม่ fixed ซึ่งจะต้องร้องขอกับผู้ให้บริการว่าต้องการ drop Wavelength ที่ความยาวคลื่นเท่าไร และสามารถรองรับความยาวคลื่นหลายๆความยาวคลื่นได้ อุปกรณ์ WSS นี้จะมีคุณสมบัติพิเศษอยู่ 4 ชนิด คือ

1. Colourless คือ ความยาวคลื่นที่ drop ออกมาแต่ละช่องสัญญาณ ซึ่งความยาวคลื่นที่ออกมาเป็นความยาวคลื่นใดในโครงข่ายก็ได้ จะไม่ fixed ความยาวคลื่นตามแบบช่องสัญญาณแบบในสมัยก่อน ทำให้สามารถเลือกใช้ความยาวคลื่นที่ drop ไปในแต่ละช่องสัญญาณได้อย่างเต็มที่
2. Directionless คือ แต่ละช่องสัญญาณที่จะ drop ความยาวคลื่นออกมา สามารถ drop ความยาวคลื่นออกจากทิศทางไหนก็ได้
3. Contentionless คือ แต่ละกลุ่มของช่องสัญญาณที่ drop ความยาวคลื่นออกมา สามารถเป็นความยาวคลื่นเดียวกันได้ การ add/drop ความยาวคลื่นออกไปคนละทิศทาง จะไม่ถูกจำกัดด้วยข้อจำกัดทาง architecture ของ WSS ที่ห้ามมีความยาวคลื่นเดียวกันเข้าไป add/drop ความยาวคลื่นพร้อมกันได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบจะใช้ optical cross-connect (OXC) มาช่วยในการ drop ความยาวคลื่น ทำให้ add/drop ความยาวคลื่นเดียวกันได้ แม้จะไม่อยู่ในทิศทางเดียวกัน

4. Gridless คือ สามารถใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างคล่องตัว และไม่ถูกจำกัดด้วย ITU Grid ในกรณีที่ใช้กับอัตราข้อมูลสูงมาก เช่น 40 Gbps หรือ 100 Gbps อาจจะต้องใช้หลายช่องสัญญาณมารวมกัน

วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบโครงสร้างของระบบ FTTx ที่ใช้ WSS ร่วมกับ ตัวควบคุมแบบ DWBA ให้เหมาะสมต่อการใช้ต่อรูปแบบการใช้งานที่หลากหลายของผู้ใช้บริการ ซึ่งผู้ให้บริการแต่ละรายต้องการใช้ data rate ความต่อเนื่องในการใช้สัญญาณที่ไม่เท่ากัน ส่งผลให้ใช้เวลาในการสับสวิตซ์ (switching time) ไปให้ผู้ให้บริการแต่ละรายไม่เท่ากันด้วย จึงควรรออกแบบและเลือกใช้ WSS ที่มี time constant ให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งานของผู้ให้บริการ ซึ่งโครงสร้าง FTTx แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2. 13 โครงสร้างและการทำงานของ WSS

จากรูปที่ 2.13 แสดงถึงโครงสร้างและการทำงานของ WSS อุปกรณ์ WSS มีหน้าที่เลือกความยาวคลื่นและจัดสรรให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้บริการ อุปกรณ์นี้ทำงานแบบพลวัต (dynamic) อยู่ภายใต้การควบคุมของ DWBA ซึ่งจัดสรรอยู่สองอย่าง คือ จัดสรรอัตราข้อมูลให้ผู้ให้บริการในรูปแบบของความยาวคลื่น และ จัดสรรให้ตรงกับเวลาที่ผู้ให้บริการร้องขอ (switching time) โดยทั่วไปแล้ว WSS จะมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิด จะต่างกันว่า switching characteristic และ time constant

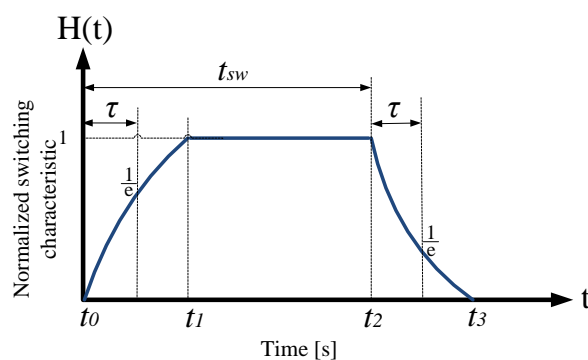
ในการทำงานของ WSS 1 ครั้ง switching characteristic ณ พอร์ตขาออกใดๆที่พิจารณา นั้น สามารถประมาณได้จากสมการที่ (2-12) [23]

$$H(t) = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \right]_{t_0 < t \leq t_1} + \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \right]_{t_1 < t \leq t_2} + \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right) \right]_{t_2 < t \leq t_3} \exp(j\theta) \quad (2-12)$$

โดยที่  $H(t)$  คือ switching transfer function

- $\tau$  คือ time constant [s]
- $t_0$  คือ เวลาที่สวิตช์เริ่มสลับจากพอร์ตขาออกเดิม ไปยังพอร์ตขาออกที่พิจารณา [s]
- $t_1$  คือ เวลาที่การตอบสนองของสวิตช์ต่อสัญญาณเข้าที่พอร์ตขาออกที่พิจารณาเป็น 100% [s]
- $t_2$  คือ เวลาที่สวิตช์เริ่มสลับจากพอร์ตขาออกที่พิจารณา ไปยังพอร์ตขาออกอื่น [s]
- $t_3$  คือ เวลาที่กำลังแสงซึ่งถูกสวิตช์ไปยังพอร์ตขาออกที่พิจารณา ถูกถ่ายทอดออกจากสวิตช์จนสมบูรณ์ [s]
- $t_{sw}$  คือ switching time [s]

สมการ switching characteristic ดังสมการที่ (2-12) สามารถนำมาเขียนเป็น switching characteristic ดังรูปที่ 2.14 แสดงถึง ในการสวิตช์ 1 ครั้ง โดยแบ่ง switching characteristic ออกเป็นสามช่วง คือ ช่วง  $t_0 < t \leq t_1$  เป็นช่วงเวลาที่สวิตช์เริ่มสลับจากพอร์ตขาออกเดิม ไปยังพอร์ตขาออกที่พิจารณา จนถึงเวลาที่การตอบสนองของสวิตช์ต่อสัญญาณเข้าที่พอร์ตขาออกที่พิจารณาเป็น 100% นั่นคือ วงจรเริ่มทำงานที่กำลังสัญญาณเริ่มจาก 0 ไปจนถึงจุดที่กำลังสัญญาณสูงสุดคือ 1 ที่เวลา  $t_1$  ต่อมาช่วง  $t_1 < t \leq t_2$  เป็นช่วงเวลาที่การตอบสนองของสวิตช์ต่อสัญญาณเข้าที่พอร์ตขาออกที่พิจารณาเป็น 100% จนถึงเวลาที่สวิตช์เริ่มสลับจากพอร์ตขาออกที่พิจารณา ไปยังพอร์ตขาออกอื่น นั่นคือ วงจรยังใช้งานได้อยู่โดยที่กำลังสัญญาณยังคงเป็น 1 ไปจนถึงจุดที่เวลา  $t_2$  สุดท้ายช่วง  $t_2 < t \leq t_3$  ช่วงเวลาที่สวิตช์เริ่มสลับจากพอร์ตขาออกที่พิจารณา ไปยังพอร์ตขาออกอื่น จนถึงเวลาที่กำลังแสงซึ่งถูกสวิตช์ไปยังพอร์ตขาออกที่พิจารณา ถูกถ่ายทอดออกจากสวิตช์จนสมบูรณ์ ดังนั้น วงจรจะหยุดทำงาน ทำให้กำลังสัญญาณตกจากกำลังสัญญาณสูงสุดคือ 1 แล้วตกลงมาเรื่อยๆ จนใกล้เคียง 0 [23], [24]



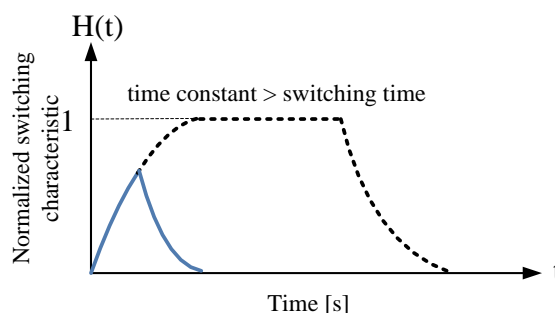
รูปที่ 2. 14 switching characteristic ที่พอร์ตขาออกใดๆ ในการสวิตช์ 1 ครั้ง

สมการ switching characteristic ที่ได้มานั้น ต้องเอาไปคูณกับสัญญาณขาเข้า  $E_{in}$  หน่วย Gbps เพื่อที่จะได้สัญญาณขาออก  $E_{out}$  หน่วย Gbps ดังสมการที่ (2-13)

$$E_{out} = E_{in} \times H(t) \quad (2-13)$$

ในความเป็นจริงแล้ว กราฟในรูปที่ 20 กำลังสัญญาณสูงสุดไม่ควรมีค่าเป็น 1 แต่เนื่องจากแกน y เป็นกราฟ normalized switching characteristic ซึ่งไม่คิดผลของ loss ที่เกิดจากสวิตช์ (insertion loss) ทำให้ค่ากำลังของสัญญาณเป็น 1 กราฟ switching characteristic ของอุปกรณ์ WSS แต่ละตัว จะมีค่า time constant ( $\tau$ ) ไม่เท่ากัน ซึ่ง time constant คือ ช่วงเวลาที่สวิตช์เริ่มปิด วงจรเริ่มทำงานโดยที่กำลังสัญญาณเริ่มจาก 0 ไปถึง  $\frac{1}{e}$  หรือ ช่วงเวลาที่สวิตช์กำลังจะเปิด วงจรจะหยุดทำงาน ทำให้กำลังสัญญาณตกจากกำลังสัญญาณสูงสุด คือ 1 แล้วตกลงมาถึง  $\frac{1}{e}$  ถ้าไม่คิดผลของ time constant กราฟ switching characteristic ที่ได้จะเป็นรูปสี่เหลี่ยม นั่นหมายถึง สวิตช์สามารถสลับเปลี่ยนพอร์ตขาออกได้ทันที (instantaneous) โดยไม่มีการ delay โดยปกติแล้วทุกสวิตช์จะมีผลของ time constant เสมอ ถ้า time constant มีค่ามาก จะส่งผลให้สวิตช์สัญญาณไปสู่ผู้ใช้บริการได้ช้า แต่ถ้า time constant มีค่าน้อย จะส่งผลให้สวิตช์สัญญาณไปสู่ผู้ใช้บริการได้เร็ว ดังนั้นสามารถแบ่ง time constant ในสวิตช์ กับ switching time ที่ผู้ใช้บริการร้องขอ ออกเป็น 2 กรณี คือ [23], [24]

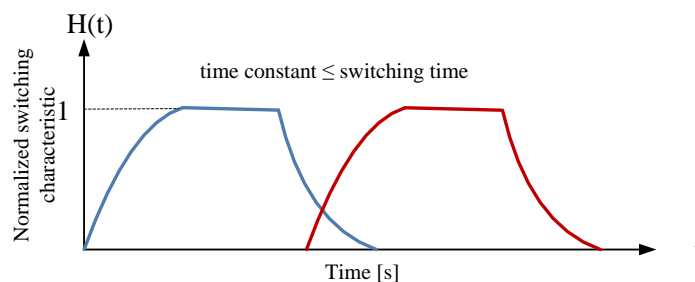
1. กรณี time constant มากกว่า switching time ที่ผู้ใช้บริการร้องขอ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.15 สัญญาณที่ขาออกที่ได้จะเป็นสัญญาณที่ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ เนื่องจากในช่วงเวลาที่สวิตช์เริ่มสลับจากพอร์ตขาออกเดิม ไปยังพอร์ตขาออกที่พิจารณา ( $t_0$ ) วงจรเริ่มทำงาน ในขณะที่กำลังสัญญาณยังไม่ไปถึงจุดสูงสุด แต่ต้องสับสวิตช์ให้ผู้ใช้บริการรายอื่นแล้ว ทำให้กำลังสัญญาณที่ได้ไม่มีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2. 15 WSS กรณี time constant มากกว่า switching time

2. กรณี time constant น้อยกว่าหรือเท่ากับ switching time ที่ผู้ใช้บริการร้องขอ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.16 สัญญาณที่ขาออกที่ได้จะเป็นสัญญาณที่มีประสิทธิภาพ แต่สัญญาณจะผิดเพี้ยนในช่วงเวลาแรกๆ เนื่องจากเมื่อเวลาที่กำลังแสงซึ่งถูกสวิตช์ไปยังพอร์ตขาออกที่พิจารณา ถูกถ่ายทอดออกจากสวิตช์จนสมบูรณ์ ( $t_3$ ) วงจรจะหยุดทำงาน ถึงจุดที่กำลังสัญญาณใกล้เคียง

ศูนย์แล้ว แต่มีการสับสวิตช์ให้ผู้ใช้บริการอีกราย นอกจากผู้ใช้บริการจะได้สัญญาณที่ต้องการแล้ว ยังได้รับสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้บริการรายแรกอีกด้วย หรือเรียกอีกอย่างว่า สัญญาณไขว้แทรก (crosstalk) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ผู้ใช้บริการรายที่สองไม่ต้องการ ทำให้เกิดสัญญาณผิดเพี้ยนในช่วงแรกๆ ที่เกิดการทับกันของสัญญาณ



รูปที่ 2. 16 WSS กรณี time constant น้อยกว่าหรือเท่ากับ switching time

โดยปกติแล้วการสับสวิตช์ควรมีเวลาในการสับสวิตช์ (switching time) ไม่ควรเกินค่า time constant ของสวิตช์แต่ละชนิด เพราะจะทำให้สัญญาณที่ออกมาไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ซึ่งเกิดจากกำลังสัญญาณยังไม่ถึงจุดสูงสุด แต่ต้องสับสวิตช์ให้ผู้ใช้บริการรายอื่นแล้ว นอกจากนี้ ผู้ใช้บริการมีความต้องการใช้สัญญาณในรูปแบบที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการใช้อัตราข้อมูลมากหรือน้อย ความต่อเนื่องในการใช้สัญญาณ เวลาในการใช้สัญญาณ เช่น กรณีแรกผู้ใช้บริการต้องการใช้โทรศัพท์ผ่านระบบนี้ อาจจะใช้อัตราข้อมูลที่ไม่สูงมากนัก แต่ต้องการความต่อเนื่องของสัญญาณ กรณีที่สองผู้ใช้บริการต้องการส่งไฟล์ข้อมูลขนาดใหญ่ผ่านระบบนี้ อาจจะต้องใช้อัตราข้อมูลสูงพอสมควร แต่ไม่ต้องใช้ความต่อเนื่องของสัญญาณมากนัก เป็นต้น การใช้งานในรูปแบบหลากหลายของผู้ใช้บริการนี้ ทำให้ไม่สามารถทราบถึงความถี่ในการใช้สัญญาณ เวลาการใช้สัญญาณ เวลาในการสับสวิตช์ไปให้ผู้ใช้บริการรายอื่น และมีผู้ใช้บริการอยู่ทั้งหมดเท่าไรในเวลาใดเวลาหนึ่ง วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ออกแบบ WSS หลายชนิดที่มี time constant แตกต่างกันไป เพื่อนำมาใช้ให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งานของผู้ใช้บริการ เช่น time constant น้อยๆ จะเหมาะกับการสัญญาณที่มีความต่อเนื่องสูง เพราะเวลาในการสับสวิตช์ให้ผู้ใช้บริการรายอื่นและกลับมาหาเราได้เร็วมากจนเหมือนระบบได้ส่งสัญญาณให้เราต่อเนื่องไม่ขาดหาย เป็นต้น

## 2.7 การคำนวณ power budget และการออกแบบระบบ

การคำนวณ power budget เป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการออกแบบระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์ความยาวคลื่น WSS ร่วมกับตัวควบคุมแบบ DWBA และใช้ในการหาระยะทางการให้บริการสูงสุดของระบบ FTTx โดยหาได้จากค่าอัตราการสูญเสียกำลังของสัญญาณแสงทั้งหมดที่สามารถยอมรับได้ ตั้งแต่ตัวส่งสัญญาณไปจนถึงตัวรับสัญญาณ เราจะเรียกค่าอัตราการสูญเสียกำลังนี้ว่า power budget

ซึ่งในการออกแบบระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA นี้จะต้องออกแบบให้ค่าการสูญเสียกำลังของสัญญาณทั้งหมดมีค่าไม่เกิน power budget ซึ่งสามารถคำนวณ power budget ได้จากสมการที่ (2-14)

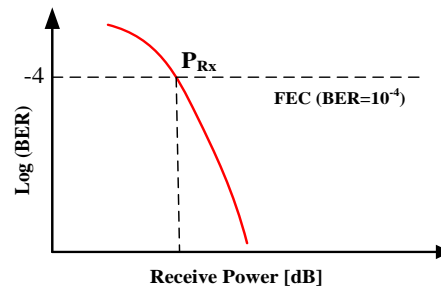
$$P_T = P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (2-14)$$

เมื่อ	$P_T$	คือ ค่า power budget ทั้งหมด [dB]
	$P_{Tx}$	คือ ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่งสัญญาณแสง [dBm]
	$P_{Rx}$	คือ ค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวรับสัญญาณแสง [dBm]
	$P_{wss}$	คือ ค่า insertion loss ที่ WSS [dB]
	$P_{insertion}$	คือ ค่า insertion loss ของตัวมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์สัญญาณ [dB]
	$\alpha$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของเส้นใยแสง [dB/km]
	$L$	คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ [km]
	$G_{margin}$	คือ ค่า system margin ที่เผื่อไว้สำหรับระบบ [dB]

มาตรฐานของ GE-PON หรือ IEEE 802.3ah ได้กำหนดขีดจำกัดค่า power budget ในระบบ FTTx จาก OLT ไปสู่ ONU ไว้เท่ากับ 24 dB ส่วนมาตรฐานของ 10GE-PON หรือ IEEE 802.3av ได้กำหนดขีดจำกัดค่า power budget ในระบบ FTTx จาก OLT ไปสู่ ONU ไว้เท่ากับ 29 dB [25]

การคำนวณ power budget จากสมการที่ (13) ได้เพิ่มค่า system margin เข้าไปในระบบเพื่อชดเชยกำลังสัญญาณแสง เมื่อมีการขยายขนาดโครงข่าย FTTx ในอนาคต ซึ่งปกติการเพิ่มค่า system margin ไม่ได้มีกฎที่แน่นอน แต่อย่างน้อยที่สุดค่า system margin ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2 dB หรืออาจมีค่าได้มากถึง 8-10 dB ขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบ [26], [27]

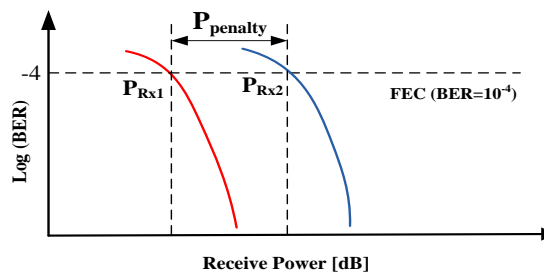
ในการออกแบบระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ในวิทยานิพนธ์นี้จำเป็นต้องคำนวณหาความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้สูงสุดก่อน โดยการจำลองระบบ FTTx นี้บนโปรแกรม optisystem software version 10.0 ซึ่งในตอนแรกจะจำลองระบบ FTTx โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (back to back) เพื่อหาค่ากำลังสัญญาณขารับ (receive power) จากระบบนี้ก่อน จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังสัญญาณขารับ เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังสัญญาณขารับ เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) ดังรูปที่ 2.17 จะสามารถหาค่ากำลังสัญญาณขารับ (receive power:  $P_{Rx}$ ) ซึ่งพิจารณาค่า BER ให้ไม่เกินขีดจำกัดที่ยอมรับได้ ซึ่งถูกกำหนดด้วย forward error correction (FEC) ที่  $BER = 10^{-4}$  เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณขารับ  $P_{Rx}$  ออกมา จากนั้นนำค่า  $P_{Rx}$  ไปคำนวณในสมการที่ (13) เพื่อหาความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการสูงสุด (distance:  $L$ )

เมื่อได้ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการสูงสุด  $L$  เราจะนำความยาวของเส้นใยแสงนี้ไปจำลองในระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA แล้วจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง BER และกำลังสัญญาณขารับ เมื่อผ่านเส้นใยแสงออกมาอีกเส้น เพื่อนำไปเทียบกับกราฟเส้นเดิมที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบระหว่างระบบ FTTx ที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) และที่ผ่านเส้นใยแสง

เมื่อเปรียบเทียบกำลังสัญญาณขารับระหว่างระบบ FTTx ที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง  $P_{Rx1}$  และที่ผ่านเส้นใยแสง  $P_{Rx2}$  จะสามารถหาค่าความต่างระหว่างกำลังสัญญาณขารับเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสงและผ่านเส้นใยแสงได้ หรือที่เรียกว่า power penalty ( $P_{penalty}$ ) ถ้ามีค่ามากจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพต่ำลง ในกรณีที่ดีที่สุด (best case) คือกรณีที่มีความแตกต่างระหว่าง  $P_{Rx1}$  และ  $P_{Rx2}$  น้อยที่สุด ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 2.18 กราฟทั้งสองอยู่ใกล้กันมากที่สุด เปรียบเสมือนไม่มีผลกระทบของเส้นใยแสงเลย ซึ่งสามารถคำนวณค่า power penalty ( $P_{penalty}$ ) ที่ได้จากการจำลองระบบดังสมการต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (2-15)$$

เมื่อ	$P_{Rx1}$	คือ	กำลังสัญญาณขารับเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสงที่ BER = $10^{-4}$ [dBm]
	$P_{Rx2}$	คือ	กำลังสัญญาณขารับเมื่อผ่านเส้นใยแสงที่ BER = $10^{-4}$ [dBm]
	$P_{penalty}$	คือ	ค่าความต่างระหว่างกำลังสัญญาณขารับเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง และผ่านเส้นใยแสง [dB]

เมื่อได้ค่า  $P_{Rx2}$  แล้วเราสามารถหา power budget ที่ได้จากการคำนวณเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสงได้ ตามสมการที่ (2-16)

$$P_{Tcal} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (2-16)$$

โดยที่	$P_{Tcal}$	คือ	ค่า power budget ที่ได้จากการคำนวณของระบบเมื่อผ่านเส้นใยแสง [dB]
	$P_{Tx2}$	คือ	ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวส่งเมื่อผ่านเส้นใยแสง [dBm]
	$P_{Rx2}$	คือ	ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อผ่านเส้นใยแสง [dBm]

เมื่อเราจะได้ค่า power budget จากการคำนวณ ( $P_{Tcal}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า power budget ที่แท้จริงเพื่อใช้ในการออกแบบระบบ FTTx ของ WSS แต่ละชนิดร่วมกับ DWBA ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{Treal} = P_{Tcal} - P_{penalty} \quad (2-17)$$

โดยที่	$P_{Treal}$	คือ	ค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ [dB]
	$P_{Tcal}$	คือ	ค่า power budget ที่ได้จากการคำนวณของระบบเมื่อผ่านเส้นใยแสง [dB]
	$P_{penalty}$	คือ	ค่าความต่างระหว่างกำลังสัญญาณขารับเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง และผ่านเส้นใยแสง [dB]

การคำนวณค่า power budget ที่แท้จริงของระบบที่ใช้ WSS แต่ละชนิด เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เลือกใช้สวิตช์ได้อย่างเหมาะสมตรงตามความต้องการของผู้ใช้บริการ โดยการออกแบบระบบ FTTx จะต้องออกแบบให้ค่าการสูญเสียกำลังของสัญญาณทั้งหมดมีค่าไม่เกิน power budget ที่แท้จริงของระบบ

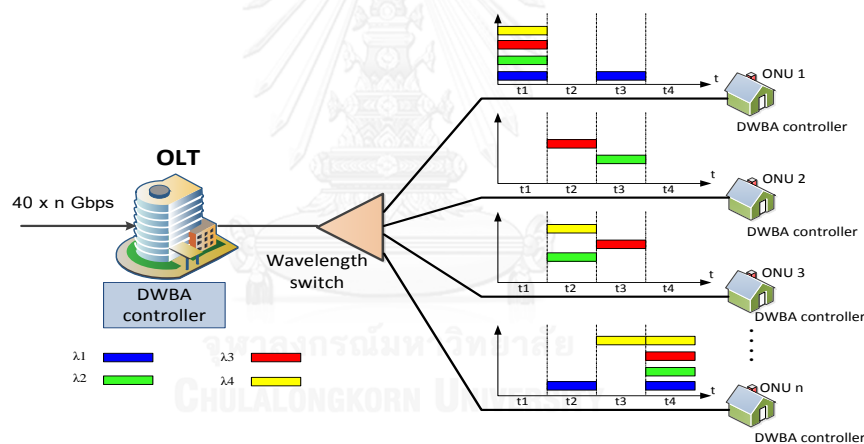


### บทที่ 3

#### ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA เมื่อไม่คิดผลของ switching characteristic

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างและการทำงานของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA เมื่อไม่คิดผลของ switching characteristic เปรียบเสมือนสวิตช์ความยาวคลื่น WSS ที่ใช้เป็นสวิตช์แบบอุดมคติ ซึ่งสามารถจัดสรรความยาวคลื่นได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว WSS ทุกชนิดจะมีผลกระทบของ switching characteristic เสมอ แต่ในบทนี้ไม่คิดผลของ switching characteristic เพื่อที่จะวิเคราะห์หาปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อการจัดสรรคลื่นในการส่งสัญญาณของระบบ การวิเคราะห์หาระยะทางที่สามารถส่งสัญญาณได้สูงสุด รวมไปถึงแนวทางการออกแบบ ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ให้มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณได้สูงสุด

#### 3.1 ระบบโครงสร้างและการทำงานของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA



รูปที่ 3. 1 โครงสร้างและการทำงานของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA

โครงสร้างและการทำงานของระบบ FTTx ซึ่งใช้สวิตช์แบบ WSS ร่วมกับ DWBA แสดงดังรูปที่ 3.1 มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่แตกต่างกันให้ผู้ให้บริการแต่ละราย ระบบนี้จะไม่มีโอกาสชนกันของข้อมูล เรียกว่า การจัดสรรความยาวคลื่นแบบ CWDM ระบบจะส่งสัญญาณ WDM ที่ประกอบไปด้วยจำนวนความยาวคลื่นที่แตกต่างกันของ CWDM และส่งสัญญาณในช่วงเวลาที่ต่างกัน ซึ่งถูกสร้างขึ้นจาก OLT ที่ถูกควบคุมแบบ dynamic โดยตัวควบคุม DWBA ภายใต้การร้องขอการใช้อัตราข้อมูลในการส่งสัญญาณจาก ONU ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ที่บ้านของผู้ใช้บริการ การตอบสนองที่แตกต่างกันในการร้องขออัตราข้อมูลในการส่งสัญญาณจากแต่ละ ONU สามารถจัดการด้วยการจัดสรรจำนวนความยาวคลื่นให้เหมาะสมกับแต่ละ ONU หรือผู้ให้บริการแต่ละราย สัญญาณ CWDM ที่ถูกจัดสรรความยาว

คลื่นแล้ว จะถูกส่งผ่านเส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652.D และถูกสับสวิตช์ด้วย WSS ซึ่งถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ DWBA เช่นกัน ไปสู่แต่ละ ONU ที่ต้องการใช้สัญญาณ

ในโครงสร้างของระบบ FTTx นี้ สามารถใช้ WSS แทนที่ passive optical splitter ที่ใช้ในระบบ TDM-PON หรือแทนที่ passive WDM demultiplexer ที่ใช้ในระบบ WDM-PON สำหรับการทำงานในการ downlink การส่งสัญญาณของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ดังรูปที่ 3.1 สมมุติในระบบมีทั้งหมด 4 ความยาวคลื่น (ความยาวคลื่นละ 10 Gbps) จำนวน ONU ที่เชื่อมกับ OLT จะมีทั้งหมด 4 port ถ้า ONU1 ร้องขออัตราข้อมูลเท่ากับ 40 Gbps ในช่วงเวลา  $t_1$  OLT จะจัดสรรความยาวคลื่นทั้งหมด 4 ความยาวคลื่นไปสู่ ONU1 ในช่วงเวลา  $t_1$  ในขณะที่ ONU อื่นๆ ไม่ร้องขออัตราข้อมูลในการส่งสัญญาณ เมื่อ ONU1 เสร็จสิ้นการรับอัตราข้อมูลที่ร้องขอในช่วงเวลา  $t_1$  แล้ว ความยาวคลื่นทั้งหมดจะถูกส่งกลับคืน OLT เพื่อจะได้จัดสรรความยาวคลื่นใหม่ให้ในช่วงเวลา  $t_2$  ต่อมา ช่วงเวลา  $t_2$  หาก ONU1 ไม่มีการร้องขออัตราข้อมูล พบว่า ไม่มีความยาวคลื่นใดๆส่งไปให้ ONU1 ในระหว่างช่วงเวลา  $t_2$  แต่เราจะเห็นว่า DWBA จัดสรร 1 ความยาวคลื่นไปที่ ONU2 และอีก 1 ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันไปที่ ONU4 และอีก 2 ความยาวคลื่นไปที่ ONU3 เนื่องจาก ONU2 และ ONU4 ร้องขออัตราข้อมูล 10 Gbps ในขณะที่ ONU3 ร้องขออัตราข้อมูล 20 Gbps ต่อมา ในช่วงเวลา  $t_3$  หาก ONU1-ONU4 ร้องขออัตราข้อมูลที่เท่ากันคือ 10 Gbps พบว่า DWBA จัดสรรความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน 1 ความยาวคลื่นให้กับ ONU แต่ละตัว สุดท้ายในช่วงเวลา  $t_4$  หาก ONU4 ร้องขอให้อัตราข้อมูล 40 Gbps DWBA จะจัดสรรทั้งหมด 4 ความยาวคลื่นให้กับ ONU4

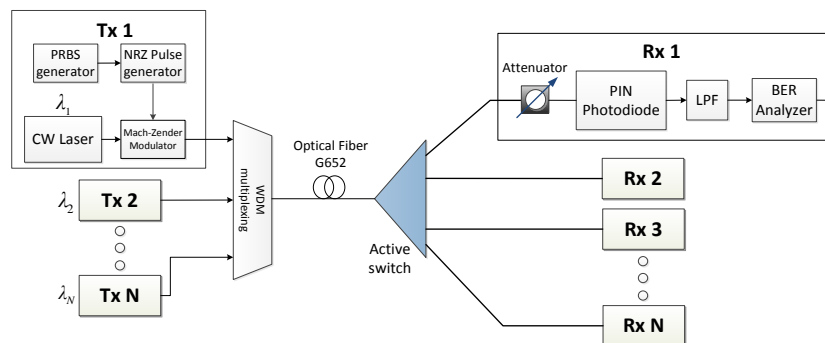
โดยทั่วไปในกรณีที่มี 8 หรือ 16 ความยาวคลื่นที่มีอยู่ในระบบ FTTx การทำงานของ DWBA จะเหมือนกับที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ แต่อัตราการส่งข้อมูลสูงสุดต่อผู้ใช้บริการ 1 คน จะเพิ่มขึ้นเป็น 80 Gbps หรือ 160 Gbps สำหรับ 8 หรือ 16 ความยาวคลื่นที่ตามลำดับ ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า จำนวนของ ONU ที่เชื่อมต่อกับพอร์ตเดียวกันกับ OLT จะมีกี่พอร์ตก็ได้ สามารถตัดสินใจได้อย่างอิสระโดยไม่ต้องขึ้นอยู่กับจำนวนของความยาวคลื่นในระบบ FTTx

ดังนั้น โครงสร้างของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS มาใช้ร่วมกับ DWBA นี้ มีความสามารถในการจัดสรรอัตราข้อมูลในการส่งสัญญาณให้แต่ละ ONU ที่มีการใช้แบนด์วิดท์ที่มีประสิทธิภาพสูง

### 3.2 การจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA

การจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA อาศัยการมอดูเลตสัญญาณแบบอนอพคีย์อิงชนิดไม่กลับสู่ศูนย์ (NRZ-OOK) ด้วยอัตราข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps มีกำลังส่งของสัญญาณเท่ากับ 9 dBm โดยจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ optisystem software version 10.0 เพื่อทดสอบการออกแบบระบบและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ รวมไปถึงการวิเคราะห์ปัจจัยโดดเด่นที่จำกัดประสิทธิภาพการทำงาน

ของระบบ FTTx ซึ่งจะจำลองระบบลงบนโปรแกรม optisystem software version 10.0 และกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบ ตามที่ปรากฏดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3. 2 การจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA

สัญญาณ CWDM 16 ความยาวคลื่นซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1271-1571 nm โดยระยะห่างของช่องสัญญาณเท่ากับ 20 nm ถูกสร้างขึ้นโดยใช้อาร์เรย์ของ CWDM continuous-wave (CW) เลเซอร์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง แต่ละ CW เลเซอร์จะถูกมอดูเลตแบบ NRZ-OOK และถูกเปลี่ยนรูปร่างโดย Mach-Zehnder modulator ด้วยอัตราข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps จากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วทั้งหมดจะถูกรวมเข้ากับ CWDM multiplexer ต่อจากนั้นสัญญาณของแต่ละความยาวคลื่นจะถูกส่งผ่านเส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652.D ที่มีกำลังส่งสัญญาณเท่ากับ 9 dBm โดยมีค่า attenuation และ dispersion ของ SMF สำหรับทุกความยาวคลื่น CWDM ที่ใช้ในการจำลองระบบ ซึ่งจะถูกแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3. 1 ค่า attenuation และ dispersion ของ SMF ITU-T G.652.D แต่ละความยาวคลื่น CWDM

Wavelength [nm]	Attenuation [dB/km]	Dispersion [ps/km/nm]
1271	0.385	-4.3
1291	0.37	-2.1
1311	0.35	-0.0931065
1331	0.34	1.72952
1351	0.32	3.47295
1371	0.3	5.14286
1391	0.32	6.74447
1411	0.275	8.28254

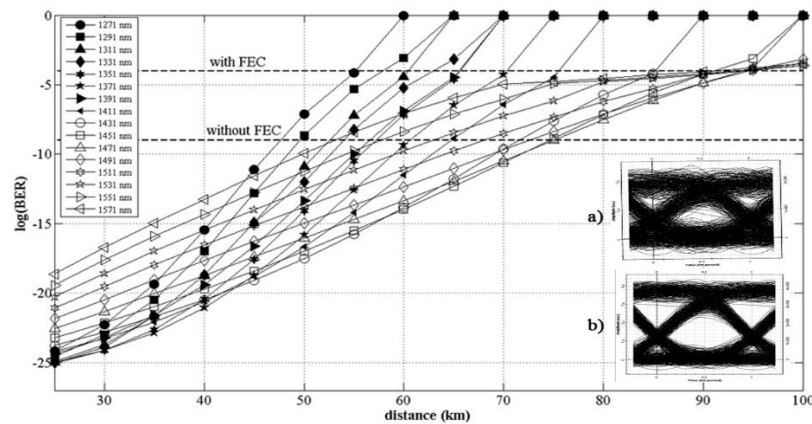
1431	0.243	9.76147
1451	0.2254	11.1853
1471	0.2127	12.5567
1491	0.2029	13.8819
1511	0.1956	15.1614
1531	0.1908	16.3988
1551	0.1892	17.5969
1571	0.1915	18.7581

ค่า insertion loss ของ WSS เท่ากับ 7 dB ในแต่ละ ONU สัญญาณ WDM ถูกตรวจจับโดยตัวรับสัญญาณ CWDM ซึ่งจะประกอบด้วย PIN photodetector ตามด้วยวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านไฟฟ้า (low-pass filter: LPF) , thermal noise ของตัวรับสัญญาณมีค่าเท่ากับ  $2.3104 \times 10^{-24}$  W / Hz และ dark current ของตัวรับสัญญาณ คือ 10 nA ตัวรับสัญญาณจะมีแบนด์วิดท์ต่อความยาวคลื่น เท่ากับ  $0.75 \times \text{data rate Hz}$  สุดท้ายสัญญาณที่ถูกตรวจจับแล้วจะถูกส่งไปที่ eye-diagram analyzer เพื่อคำนวณค่า BER ซึ่ง BER ที่สามารถยอมรับได้จะมีค่าน้อยกว่า  $10^{-9}$  ในบทที่ 3 นี้จะศึกษาข้อจำกัดของระบบ FTTx สองกรณี กล่าวคือ ระบบถูกจำกัดด้วย attenuation และ dispersion และวิเคราะห์หาระยะทางในการส่งสัญญาณสูงที่สุด โดยพิจารณาค่า BER ไม่เกินขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ ถูกกำหนดด้วยตัวตรวจเช็คความผิดพลาดของสัญญาณ (forward error correction: FEC) ที่ BER =  $10^{-4}$  และไม่มี FEC ที่ BER =  $10^{-9}$  ซึ่ง FEC ทำหน้าที่ตรวจเช็คความผิดพลาดของสัญญาณทำให้สามารถปรับปรุงอัตราบิดผิดพลาดได้ดีขึ้นจาก  $10^{-4}$  กลายเป็น  $10^{-9}$  ในการทดลองการจำลองบนคอมพิวเตอร์จะไม่คิดผลของโหมดการกระจายโพลาไรเซชัน (PMD) และความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) เนื่องจาก การส่งสัญญาณใช้ signal power ต่อความยาวคลื่นค่อนข้างต่ำและส่งสัญญาณในระยะทางสั้นๆด้วยอัตราข้อมูล 10 Gbps

### 3.3 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การจำกัดสมรรถนะในการส่งสัญญาณในระบบ

ทดสอบและวิเคราะห์ระบบที่จำลองดังรูปที่ 26 การส่งสัญญาณด้วยอัตราข้อมูล 10 Gbps อาศัยการมอดูเลตแบบ NRZ-OOK ใช้กำลังส่งสัญญาณ 9 dBm โดยการส่งสัญญาณจำนวนสูงสุดของความยาวคลื่น CWDM ในวิธานิพจน์นี้สามารถส่งสัญญาณได้สูงสุด 16 ความยาวคลื่น และส่งผ่านเส้นใยแสงแบบ SMF โดยพิจารณาผลกระทบของ attenuation และ dispersion ดังตารางที่ 2 เพื่อศึกษากรณีที่น่าเลวร้ายที่สุดกล่าวคือ ผู้ใช้บริการคนเดียวร้องขออัตราข้อมูลทั้งหมด 160 Gbps ดังนั้นทั้ง 16 ความยาวคลื่นจะถูกส่งไปสู่ผู้ให้บริการนั้น ประสิทธิภาพของระบบสามารถประเมินได้จาก

ระยะทางในการส่งสัญญาณสูงสุด สำหรับกรณีนี้ที่เลวร้ายที่สุดนี้จะอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของ BER น้อยกว่า  $10^{-4}$  (FEC) และ  $10^{-9}$  (ไม่มี FEC) นั่นเป็นเพราะว่า ถ้าการส่งอัตราข้อมูล 160 Gbps จะกลายเป็นที่ประสบความสำเร็จในช่วงการใช้งานสูงสุดที่ได้รับการร้องขอทั้งหมด ดังนั้นการร้องขออัตราข้อมูลที่ต่ำกว่า 160 Gbps จะประสบความสำเร็จเช่นกัน



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ ระยะทางการส่งสัญญาณ ทั้ง 16 ความยาวคลื่น, eye-diagrams ของสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1271 nm a) มี FEC ที่ BER =  $10^{-4}$  b) ไม่มี FEC ที่ BER =  $10^{-9}$

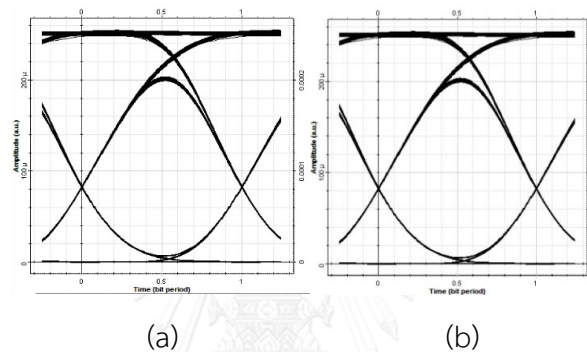
รูปที่ 3.3 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง BER และระยะการส่งสัญญาณสำหรับทั้งหมด 16 ความยาวคลื่น CWDM และภาพประกอบ ในรูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพจาก eye-diagrams ของสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1271 nm a) ที่มี FEC ที่ BER  $10^{-4}$  เปรียบเทียบกับ b) โดยไม่มี FEC ที่ BER  $10^{-9}$  จากผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA แสดงให้เห็นว่า BER ของสัญญาณที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1271-1471 nm ลดลงอย่างรวดเร็วกว่า สัญญาณที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1491-1571 nm ทั้งนี้เป็นเพราะการลดทอนสัญญาณ (attenuation) อยู่ในช่วงความยาวคลื่นของ 1271-1471 nm สูงกว่า attenuation ที่ความยาวคลื่น 1491-1571 nm จึงจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า attenuation ที่อยู่ช่วงความยาวคลื่นเป็น 1271-1471 nm จะกลายเป็นปัจจัยหลักที่จำกัดระยะทางการส่งสัญญาณของ FTTx มากกว่า ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (fiber dispersion) ที่อยู่ช่วงความยาวคลื่นเป็น 1271-1471 nm ดังนั้น fiber dispersion จะเพิ่มขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 1491-1571 nm ซึ่งในช่วงนี้ attenuation จะค่อนข้างต่ำลง ซึ่งสามารถเปรียบเทียบการส่งสัญญาณจากกราฟที่ความยาวคลื่น 1491 nm สามารถส่งสัญญาณได้ไกลกว่า ที่ 1571 nm นั้นหมายถึง fiber dispersion อยู่ในช่วงความยาวคลื่นของ 1271-1471 nm ต่ำกว่า fiber dispersion ที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1491-1571 nm

จากที่กล่าวในข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ในช่วงความยาวคลื่น 1271-1471 nm จะมีผลกระทบจากการลดทอนสัญญาณ (attenuation) มากกว่า ดิสเพอร์ชันเส้นใยแสง (fiber

dispersion) ส่วนในช่วงความยาวคลื่น 1491-1571 nm จะมีผลกระทบของ fiber dispersion มากกว่า attenuation และปัจจัยหลักที่สำคัญในการจำกัดสมรรถนะของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA คือ attenuation ที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 1271 nm จะมากกว่า fiber dispersion ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 1571 nm

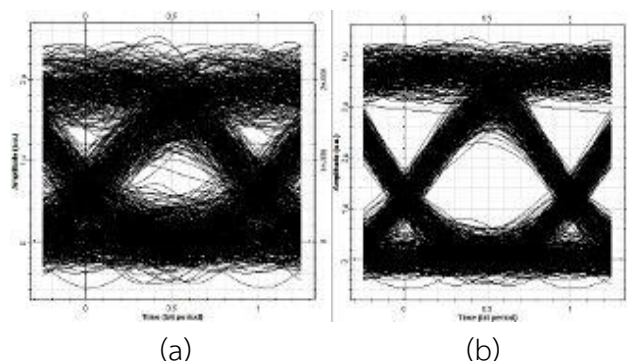
### 3.4 การวิเคราะห์ผลของ fiber dispersion และ attenuation จาก Eye-diagram

การวิเคราะห์ผลกระทบจาก dispersion และ attenuation ที่อัตราข้อมูลเท่ากับ 10 Gbps จากกราฟ eye diagram ที่ความยาวคลื่น 1271 nm และ 1571 nm ที่ระยะทางในการรับส่งสัญญาณต่างๆกัน



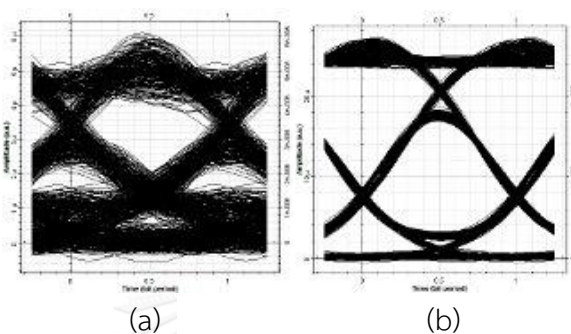
รูปที่ 3.4 eye diagram ของสัญญาณความเร็ว 10 Gbps เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง (back to back) ที่ความยาวคลื่น (a) 1271 nm และ (b) 1571 nm

จากกราฟรูปที่ 3.4 พบว่า เมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ความยาวคลื่นทั้งสอง 1271 nm และ 1571 nm สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ เนื่องจาก ไม่มีผลกระทบของ dispersion และ attenuation ซึ่งค่า BER ของทั้งสองความยาวคลื่นอยู่ประมาณ  $10^{-27}$



รูปที่ 3.5 eye diagram ของสัญญาณความเร็ว 10 Gbps ที่ความยาวคลื่น 1271 nm เมื่อ BER เท่ากับ (a)  $10^{-4}$  และ (b)  $10^{-9}$

จากกราฟรูปที่ 3.5 เมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ที่ความยาวคลื่น 1271 nm พบว่า BER ที่  $10^{-9}$  มีความแตกต่างระหว่างบิต 0 กับ บิต 1 มากกว่า BER ที่  $10^{-4}$  ทำให้กราฟ eye diagram ของค่า BER ที่  $10^{-9}$  ดีกว่า BER ที่  $10^{-4}$  เป็นผลเนื่องมาจาก ค่า attenuation ซึ่งมีผลทำให้กำลังในการส่งสัญญาณ ถูกลดทอนลง กำลังของสัญญาณถูกลดทอนจาก 9 dBm เป็น -30.819 dBm เมื่อ BER น้อยลง ทำให้ ระยะทางการให้บริการน้อยลงด้วย ระยะทางการให้บริการที่ BER  $10^{-9}$  เท่ากับ 47.62 km และ BER  $10^{-4}$  เท่ากับ 55.21 km



รูปที่ 3. 6 eye diagram ของสัญญาณความเร็ว 10 Gbps ที่ความยาวคลื่น 1571 nm เมื่อ BER เท่ากับ (a)  $10^{-4}$  และ (b)  $10^{-9}$

จากกราฟรูปที่ 3.6 เมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ที่ความยาวคลื่น 1571 nm พบว่า BER ที่  $10^{-4}$  มีความกว้างของพัลส์ มากกว่า BER ที่  $10^{-9}$  ทำให้ eye diagram ของค่า BER ที่  $10^{-9}$  ดีกว่า BER ที่  $10^{-4}$  เป็นผลเนื่องมาจาก ค่า dispersion ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทำให้พัลส์เปลี่ยนรูป เมื่อระยะทางการส่งสัญญาณไกลขึ้น จะทำให้พัลส์ขยายกว้างออก เกิดการแทรกสอดระหว่างบิตข้างเคียง ทำให้ ตรวจวัดบิตผิดพลาด ซึ่งระยะทางการให้บริการที่ BER  $10^{-9}$  เท่ากับ 53.09 km ระยะทางการให้บริการที่ BER  $10^{-4}$  เท่ากับ 90.84 km

### 3.5 การวิเคราะห์หาระยะทางการให้บริการสูงสุด

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง BER และ ระยะทางการส่งสัญญาณ ทั้ง 16 ความยาวคลื่น ดังรูปที่ 3.3 สามารถสรุประยะทางการส่งสัญญาณสูงสุดสำหรับทุกความยาวคลื่น 16 CWDM ทั้งสองกรณีด้วย FEC (BER =  $10^{-4}$ ) และไม่มี FEC (BER =  $10^{-9}$ ) ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 3.2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3. 2 ระยะทางที่ส่งสัญญาณได้ สำหรับทุกความยาวคลื่น 16 CWDM

Wavelength [nm]	Distance [km]	
	With FEC	Without FEC
1271	55.2	47.6
1291	57.9	49.5

1311	60.4	52.5
1331	63.0	54.0
1351	65.7	57.2
1371	70.3	60.6
1391	65.5	56.5
1411	75.5	64.7
1431	85.2	71.5
1451	91.1	74.6
1471	93.9	75.0
1491	94.5	72.6
1511	93.2	68.1
1531	94.3	62.8
1551	93.5	57.7
1571	90.8	53.0

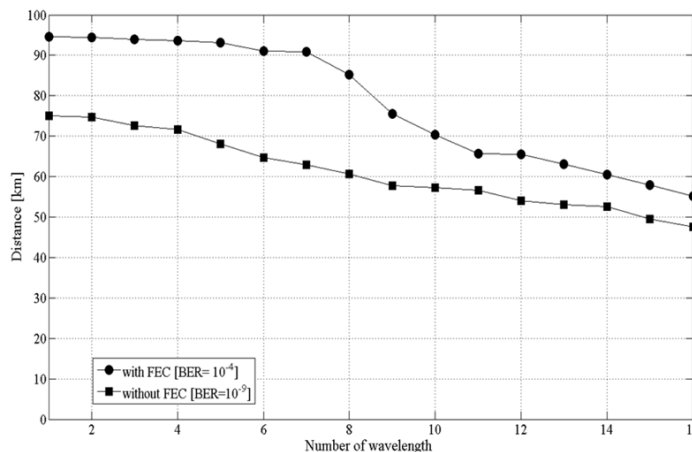
ในการวิเคราะห์หาระยะทางการให้บริการสูงสุดจากตารางที่ 3.2 สำหรับกรณีที่ทุกความยาวคลื่น 16 CWDM กล่าวคือ ผู้ใช้บริการเพียงคนเดียวต้องการใช้อัตราข้อมูลสูงสุดถึง 160 Gbps จะใช้สัญญาณอย่างเต็มที่ FTTx ต้องสนับสนุนสำหรับการส่งสัญญาณทั้งหมด 16 ความยาวคลื่นให้กับผู้ให้บริการที่ร้องขออัตราข้อมูลทั้งหมด ดังนั้นระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุดของ FTTx โดยใช้ทั้ง 16 ความยาวคลื่นที่ถูกจำกัดด้วยการลดทอนสัญญาณที่ 1271 nm จะพบว่าระยะทางที่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลที่สุดคือ 55.2 km ด้วย FEC ( BER =  $10^{-4}$  ) และ 47.6 km โดยไม่มี FEC (BER =  $10^{-9}$ )

### 3.6 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของจำนวนความยาวคลื่นและระยะทางการให้บริการ

การออกแบบการทำงานของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ทำได้โดยระบบจะส่งอัตราข้อมูลจาก OLT ไปสู่ ONU และจัดสรรความยาวคลื่นให้ผู้ใช้บริการตามที่ร้องขอ โดยจะจัดสรรความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณสูงสุดก่อน กล่าวคือ ความยาวคลื่นที่ให้ระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุด ซึ่งการลดจำนวนของความยาวคลื่นที่ใช้งานในระบบ FTTx หรือการลดจำนวนของการร้องขออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดจากผู้ให้บริการ สามารถช่วยเพิ่มระยะทางการส่งสัญญาณให้สูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 3.7 แสดงระยะทางในการส่งสัญญาณสูงสุดโดยใช้จำนวนความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เมื่ออัตราการส่งข้อมูลต่อความยาวคลื่นเท่ากับ 10 Gbps ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า



ระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุดได้มาจากการเลือกสรรและจัดกลุ่มจากความยาวคลื่นในช่วงความยาวคลื่น 16 CWDM ที่สามารถให้ผลผลิตในระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุด



รูปที่ 3. 7 ระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุดโดยใช้จำนวนความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เมื่ออัตราข้อมูลต่อความยาวคลื่นเท่ากับ 10 Gbps

จากรูปที่ 3.7 สามารถสรุปความสัมพันธ์ของจำนวนความยาวคลื่น อัตราข้อมูลที่ใช้บริการ ร้องขอ และระยะทางการให้บริการ

ตารางที่ 3. 3 จำนวนความยาวคลื่น การจัดสรรอัตราข้อมูล และระยะทางการให้บริการ

Number of wavelength	Data rate [Gbps]	Distance [km]	
		With FEC	Without FEC
1	10	94.5 (1491 nm)	75.0 (1471 nm)
2	20	94.3 (1531 nm)	74.6 (1451 nm)
3	30	93.9 (1471 nm)	72.6 (1491 nm)
4	40	93.5 (1551 nm)	71.5 (1431 nm)
5	50	93.2 (1511 nm)	68.1 (1511 nm)
6	60	91.1 (1451 nm)	64.7 (1411 nm)
7	70	90.8 (1571 nm)	62.8 (1531 nm)
8	80	85.3 (1431 nm)	60.6 (1371 nm)
9	90	75.5 (1411 nm)	57.7 (1551 nm)
10	100	70.3 (1371 nm)	57.2 (1351 nm)
11	110	65.7 (1351 nm)	56.5 (1391 nm)
12	120	65.5 (1391 nm)	54.0 (1331 nm)

13	130	63.0 (1331 nm)	53.1 (1571 nm)
14	140	60.4 (1311 nm)	52.5 (1311 nm)
15	150	57.9 (1291 nm)	49.5 (1291 nm)
16	160	55.2 (1271 nm)	47.6 (1271 nm)

จากตารางที่ 3.3 จะสรุปความสัมพันธ์ของ จำนวนความยาวคลื่น , อัตราการส่งข้อมูล และ ระยะทางการให้บริการ ความยาวคลื่นที่อยู่ในวงเล็บในตาราง คือ ความยาวคลื่นที่จำกัดสมรรถนะในการส่งสัญญาณ ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีระยะทางการส่งสัญญาณสั้นที่สุดจากการจัดสรรความยาวคลื่น CWDM อย่างเหมาะสมที่ผู้ใช้บริการร้องขอ

ระยะทางที่ปรากฏดังตารางที่ 3.3 เป็นกรณี best case ที่จัดสรรความยาวคลื่นที่ให้ระยะทางการให้บริการสูงสุด ซึ่งถูกจำกัดสมรรถนะของระบบด้วยความยาวคลื่นในวงเล็บ ตัวอย่างเช่น ถ้าในระบบ FTTx ได้รับอนุญาตให้ส่งอัตราข้อมูลสูงสุดจากการร้องขอของผู้ใช้บริการ 40 Gbps โดยมีการใช้ FEC ( $BER = 10^{-4}$ ) ซึ่งระบบ FTTx จะจัดสรรความยาวคลื่น 4 ความยาวคลื่น ได้แก่ ความยาวคลื่น 1491, 1531, 1471 และ 1551 nm ไปสู่ผู้ใช้บริการ และระบบนี้มีระยะทางการส่งสัญญาณคือ 93.5 km โดยมี FEC ซึ่งถูกจำกัดด้วย fiber dispersion ที่ความยาวคลื่น 1551 nm แต่ในกรณีไม่มีการใช้ FEC ( $BER = 10^{-9}$ ) ระบบ FTTx จะจัดสรรความยาวคลื่น 4 ความยาวคลื่น ได้แก่ ความยาวคลื่น 1471, 1451, 1491 และ 1431 nm ไปสู่ผู้ใช้บริการ และระบบนี้มีระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุดคือ 71.5 km ซึ่งถูกจำกัดด้วยการบิดเบือนของสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1431 nm ในทางเดียวกัน การส่งอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด 80 Gbps โดยมีการใช้ FEC ระบบจะจัดสรร 8 ความยาวคลื่น ได้แก่ 1491, 1531, 1471, 1551, 1511, 1451, 1571 และ 1431 nm ไปสู่ผู้ใช้บริการ และระยะทางสูงสุดคือ 85.3 km และในกรณีไม่มีการใช้ FEC ระบบจะจัดสรร 8 ความยาวคลื่น ได้แก่ 1471, 1451, 1491, 1431, 1511, 1411, 1531 และ 1371 nm ไปสู่ผู้ใช้บริการ และระยะทางสูงสุดคือ 60.6 km

ถ้าเป็นกรณี worst case ระบบ FTTx จะจัดสรรความยาวคลื่นที่ 1271 nm ให้ผู้ใช้บริการที่ FEC จะมีระยะทางการส่งสัญญาณ 55.2 km และที่ไม่ใช้ FEC จัดสรรความยาวคลื่น 1271 nm เช่นกัน แต่ให้ระยะทางการส่งสัญญาณ 47.6 km

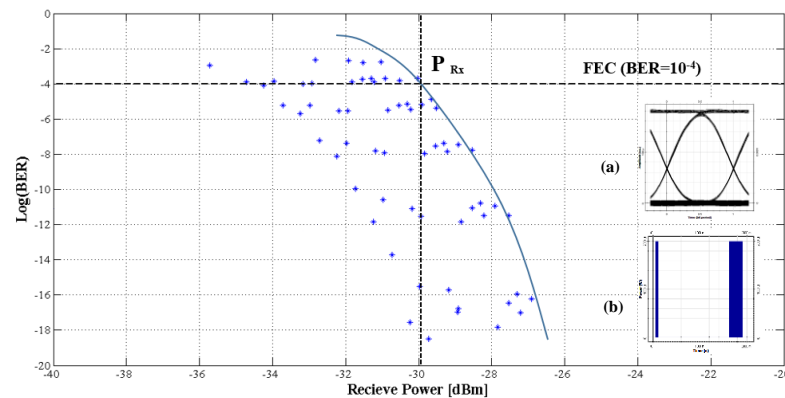
ที่กล่าวไว้ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุดของระบบ FTTx สามารถเพิ่มสมรรถนะในการส่งสัญญาณได้โดย การลดลงของจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณ หรือลดลงของการอนุญาตการส่งอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดจากผู้ให้บริการ จากตาราง best case นี้ ทำให้เราสามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นที่สามารถให้ระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุด เพื่อนำไปใช้ใน

ระบบ FTTx แบบ 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย ในบอทที่ 4 และแบบ 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย ในบอทที่ 5 นอกจากนี้ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA สามารถเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นในระบบได้ถึง 16 ความยาวคลื่น

### 3.7 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ที่มีค่า time constant = 0s ร่วมกับ DWBA

#### 3.7.1 ระบบ 4 ความยาวคลื่น และผู้ให้บริการ 10 ราย

ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA เมื่อไม่คิดผลของ switching characteristic ในที่นี้ จะใช้ค่า time constant ของ WSS เท่ากับ 0 s เปรียบเสมือนสวิตช์ความยาวคลื่น WSS ที่ใช้เป็นสวิตช์แบบอุดมคติ ซึ่งสามารถจัดสรรความยาวคลื่นได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูง การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx โดยไม่คิดผลกระทบของ switching characteristic ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และ receive power ได้ดังนี้

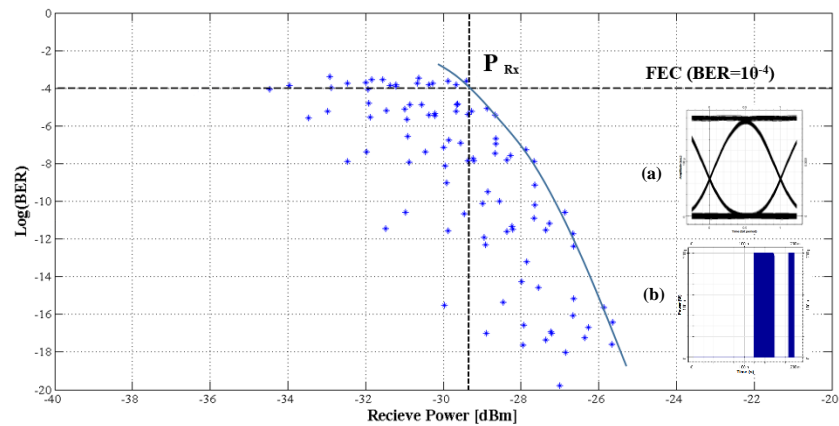


รูปที่ 3. 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และ receive power ของระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และ receive power สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  ที่ FEC ได้เท่ากับ -29.93 dBm และจากรูป eye-diagram ในกรณีที่ไม่คิดผลของ time constant เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณดีที่สุด และจากกราฟ time domain ของ WSS ที่ไม่คิดผลของ time constant จะมีรูปกราฟเป็นรูปสี่เหลี่ยม เนื่องจากเป็นสวิตช์แบบอุดมคติที่มีประสิทธิภาพในการสับสวิตช์ได้เร็วมาก และไม่มีผลกระทบที่ได้จาก switching characteristic ด้วย

### 3.7.2 ระบบ 8 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 5 ราย

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx โดยไม่คิดผลกระทบของ switching characteristic ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และ receive power ได้ดังนี้



รูปที่ 3. 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และ receive power ของระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และ receive power สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  ที่ FEC ได้เท่ากับ  $-29.37$  dBm และจากรูป eye-diagram ในกรณีที่ไม่คิดผลของ time constant เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณดีที่สุด และจากกราฟ time domain ของ WSS ที่ไม่คิดผลของ time constant จะมีรูปกราฟเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีประสิทธิภาพในการสับสวิตช์ได้เร็วมากเช่นกัน

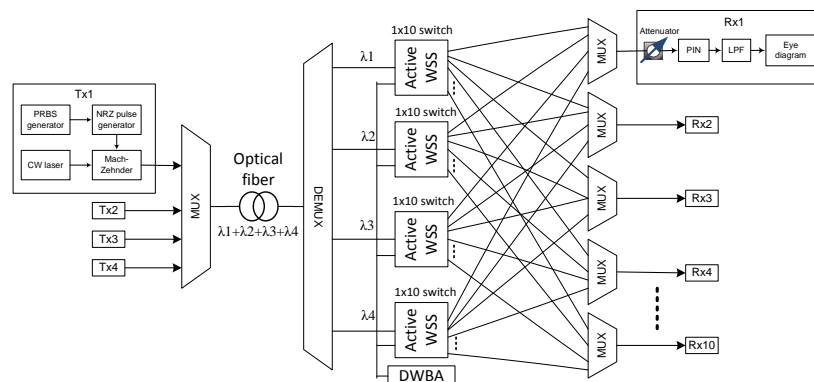
## บทที่ 4

### ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 4 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 10 ราย โดย คิดผลของ switching characteristic

ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA โดยไม่คิดผลของ switching characteristic ได้ถูกวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในบทที่ 3 แล้ว ซึ่งระบบนี้สามารถส่งอัตราข้อมูลได้สูงสุดถึง 160 Gbps แต่ในความเป็นจริง WSS ทุกชนิดจะมีผลของ switching characteristic ด้วย อาจจะทำให้การส่งสัญญาณมีประสิทธิภาพน้อยกว่าถ้าเทียบกับสวิตช์ในอุดมคติที่ไม่คิดผลของ switching characteristic ดังนั้น บทที่ 4 นำเสนอระบบ FTTx ซึ่งใช้ WSS ร่วมกับตัวควบคุมแบบ DWBA โดยคิดผลของ switching characteristic ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการมากกว่าจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ ในกรณีนี้ใช้ความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ 4 ความยาวคลื่นจัดสรรความยาวคลื่นให้ผู้ใช้บริการได้ถึง 10 ราย รวมไปถึงการออกแบบ WSS ในรูปแบบต่างๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการ และสามารถใช้งานได้จริงในปัจจุบันและในอนาคต

#### 4.1 โครงสร้างของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ที่มี 4 ความยาวคลื่นจัดสรรให้ ผู้ใช้บริการได้ถึง 10 ราย

โครงสร้างของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA โดยคิดผลของ switching characteristic จะมีโครงสร้างการทำงานคล้ายกับแบบไม่คิดผลของ switching characteristic กล่าวคือระบบนี้จะส่งอัตราข้อมูลจาก OLT ที่ถูกควบคุมแบบไดนามิกโดยตัวควบคุม DWBA ผ่านเส้นใยแสงไปสู่ ONU โดยที่มีสวิตช์ความยาวคลื่น WSS จัดสรรความยาวคลื่นให้ตามผู้ใช้บริการร้องขอ ซึ่งระบบนี้จะไม่มีโอกาสชนกันของข้อมูล และมีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณสูง แต่จะแตกต่างกันตรงที่ระบบ FTTx ที่คิดผลของ switching characteristic จะใช้ WSS ที่คำนึงถึง ผลกระทบของ switching characteristic และ switching time ที่ผู้ใช้บริการร้องขอ



รูปที่ 4. 1 โครงสร้าง FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและ subscriber 10 ราย

จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงโครงสร้างและการทำงาน FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA โดยคิดผลของ switching characteristic ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการมากกว่าจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ ระบบนี้จะจัดสรรความยาวคลื่นที่แตกต่างกันของ CWDM ให้ผู้ใช้บริการแต่ละราย ให้เหมาะสมกับงานที่ผู้ใช้บริการร้องขอ โดยไม่มีโอกาสชนกันของข้อมูล ซึ่งถูกสร้างขึ้นจาก OLT ที่ถูกควบคุมโดยตัวควบคุม DWBA ส่งผ่านเส้นใยแสงแบบโหมตเดี่ยว SMF G.652.D และถูกสับสวิตช์ด้วย WSS ซึ่งถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ DWBA เช่นกัน ไปสู่แต่ละ ONU ที่ต้องการใช้สัญญาณ เมื่อ ONU เสร็จสิ้นการรับอัตราข้อมูลที่ร้องขอในช่วงเวลาต่างๆแล้ว ความยาวคลื่นทั้งหมดจะถูกส่งกลับคืน OLT ทันที ระบบ FTTx นี้จะมีความยาวคลื่นทั้งหมด 4 ความยาวคลื่นสามารถจัดสรรความยาวคลื่นให้ subscriber ได้ทั้งหมด 10 ราย โดยที่ WSS จัดสรรความยาวคลื่นที่แตกต่างกันของ CWDM และจัดสรรเวลาในการส่งความยาวคลื่นไปสู่ผู้ใช้บริการตามที่ได้ร้องขอ ซึ่งสามารถส่งอัตราข้อมูลได้สูงสุดถึง 40 Gbps นั่นคือ ส่ง 4 ความยาวคลื่นต่อผู้ใช้บริการ 1 ราย ซึ่งระบบนี้จะเหมาะกับสถานที่ที่มีผู้ใช้บริการจำนวนมาก แต่ปริมาณการใช้อัตราข้อมูลในกิจกรรมการ upload หรือ download ต่างๆ ไม่สูงมากนัก เช่น เขตที่อยู่อาศัย หมู่บ้านขนาดเล็ก เป็นต้น ที่มีการอัตราข้อมูลอย่างจำกัด ไม่จำเป็นต้องใช้อัตราข้อมูลจำนวนมาก แต่สามารถส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการได้อย่างทั่วถึง

#### 4.2 WSS ที่ใช้ในระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA

WSS เป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่เลือกและจัดสรรความยาวคลื่นให้ตรงตามผู้ใช้บริการร้องขอ อุปกรณ์นี้ทำงานแบบพลวัต (dynamic) อยู่ภายใต้การควบคุมของ DWBA สามารถจัดสรรอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการในรูปแบบของความยาวคลื่น และจัดสรรความยาวคลื่นให้ตรงกับเวลาที่ผู้ใช้บริการร้องขอ (switching time) โดยทั่วไปแล้ว WSS จะมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่ switching characteristic และ time constant และบางประเภทที่ใช้วัสดุที่ใช้ทำ WSS ชนิดเดียวกัน แต่อาจจะมีค่า switching characteristic และ time constant ไม่เท่ากันก็ได้ โดยวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้ WSS ทั้งหมด 6 ชนิด ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.1 [23], [24], [28], [29], [30]

ตารางที่ 4. 1 ชนิดของ WSS และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

Type of WSS	Time constant ( $\tau$ )	Insertion loss	Noise figure
Photonic crystal switch	0.5 ps	16 dB	-
Photonic crystal switch	1 ps	16 dB	-
GaAs photonic crystal cavities switch	15 ps	16 dB	-

GalnAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	100 ps	16.5 dB	-
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	1 ns	-	8 dB
Electro-optic switch	5 ns	2 dB	-

#### 4.3 การจำลองระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 10 ราย

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการจำลองและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA เมื่อคิดผลของ switching characteristic กรณีมีจำนวนผู้ใช้บริการ มากกว่าจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ ในที่นี้ใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด 4 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลไปสู่อุปกรณ์ผู้ใช้บริการได้ถึง 10 ราย โดยจำลองบนคอมพิวเตอร์โปรแกรม optisystem software version 10.0 เพื่อทดสอบการออกแบบระบบและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

โครงสร้างระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ที่มีความยาวคลื่นในระบบทั้งหมด 4 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลไปสู่อุปกรณ์ผู้ใช้บริการได้ถึง 10 ราย แสดงดังรูปที่ 4.1 มีการจัดสรรความยาวคลื่นที่แตกต่างกันให้ผู้ใช้บริการแต่ละราย ระบบนี้ไม่มีโอกาสชนกันของข้อมูล โดยที่ OLT จะส่งสัญญาณ CWDM 4 ความยาวคลื่นซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1471-1531 nm ซึ่งระยะห่างของช่องสัญญาณเท่ากับ 20 nm สัญญาณทั้ง 4 ความยาวคลื่นถูกสร้างขึ้นโดยใช้อาร์เรย์ของ CWDM continuous-wave laser เป็นแหล่งกำเนิดแสง และระบบจะสร้างสัญญาณบิตอย่าง random จาก Pseudo-random bit sequence generator จากนั้นจะถูกมอดูเลตสัญญาณแบบ NRZ-OOK และถูกเปลี่ยนรูปร่างโดย Mach-Zehnder modulator ด้วยอัตราข้อมูลต่อหนึ่งความยาวคลื่นเท่ากับ 10 Gbps จากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วทั้งหมดจะถูกรวมเข้ากับ multiplexer ที่มีค่า Insertion loss เท่ากับ 1.5 dB ต่อจากนั้นสัญญาณของแต่ละความยาวคลื่นจะถูกส่งผ่านเส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652.D โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (attenuation) และค่าดิสเพอร์ชัน (dispersion) ของ SMF สำหรับความยาวคลื่น CWDM ที่ 1471-1531 nm ที่ใช้ในการจำลองระบบซึ่งจะถูกแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4. 2 ค่า attenuation และ dispersion ของความยาวคลื่นที่ 1471-1531 nm

Wavelength [nm]	Attenuation [dB/km]	Dispersion [ps/km/nm]
1471	0.2127	12.5567

1491	0.2029	13.8819
1511	0.1956	15.1614
1531	0.1908	16.3988

โหมตการกระจายโพลาไรเซชัน (PMD) เท่ากับ  $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  ในเส้นใยแสงจะส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปร่างของเส้นใยแสงแบบ random ทุกๆ 100 m (Scattering section disper) และคิดค่าเฉลี่ยของ PMD เมื่อครบ 500 m (mean scattering section) แต่ระบบนี้จะไม่คิดผลของ non-linear จากนั้นทั้ง 4 ความยาวคลื่นจะถูกแยกสัญญาณแต่ละความยาวคลื่นด้วย demultiplexer มีค่า insertion loss เท่ากับ 1.5 dB เช่นกัน และ WSS อยู่ภายใต้การควบคุมของ DWBA จะจัดสรรความยาวคลื่นให้กับ subscriber แต่ละราย ซึ่งมีอยู่ 6 ชนิดตามที่ปรากฏดังตารางที่ 4.1 โดยแต่ละชนิดจะมีค่า switching characteristic และ time constant ที่แตกต่างกัน จากนั้นจะผ่าน multiplexer อีกครั้งหนึ่งเพื่อรวมสัญญาณก่อนถึงภาครับ ในส่วนของภาครับ สัญญาณแต่ละความยาวคลื่นจะถูกปรับเพิ่มค่า attenuation 3 dB ใน optical attenuator และถูกตรวจจับสัญญาณด้วย PIN photodetector ที่สามารถรับสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพถึง 90% มีค่า dark current ของตัวรับสัญญาณ คือ 10 nA และ thermal noise เท่ากับ  $12.87 \times 10^{-12} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$  จากนั้นสัญญาณจะถูกกรองสัญญาณที่ไม่ดีออกด้วยวงจร low-pass filter ซึ่งมี cutoff frequency เท่ากับ  $0.75 \times \text{bit rate Hz}$  ตามด้วย 3R Regenerator สุดท้ายสัญญาณที่ถูกตรวจจับแล้วจะถูกส่งไปที่ eye-diagram analyzer เพื่อที่จะคำนวณ bit-error rate (BER) ซึ่ง BER ที่สามารถยอมรับได้จะมีค่าน้อยกว่า  $10^{-4}$  ที่ FEC

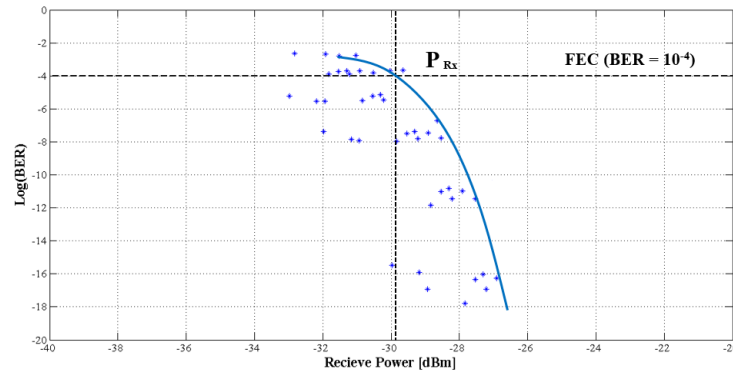
#### 4.4 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 10 ราย เมื่อใช้ WSS ชนิดต่างๆ

ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน subscriber มากกว่าจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ ในที่นี้ใช้ 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย ก่อนที่จะคำนวณ power budget ของแต่ละระบบ จำเป็นต้องวิเคราะห์ผลจากการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS แต่ละชนิด โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) เพื่อหาค่ากำลังสัญญาณขารับ (receive Power :  $P_{Rx}$ ) เมื่อคิดที่ FEC (BER= $10^{-4}$ ) จากระบบนี้ก่อน โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง (Transmit Power :  $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของสวิตซ์ทั้ง 6 ชนิดดังต่อไปนี้



#### 4.4.1 Photonic crystal switch ที่มี $\tau = 0.5$ ps

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx โดยคิดผลกระทบของ switching characteristic เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$  ps) ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับได้ดังนี้



รูปที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$  ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับเมื่อใช้สวิตช์แบบ Photonic crystal ( $\tau = 0.5$  ps) ในกรณีที่ระบบ FTTx ที่มีจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ 4 ความยาวคลื่นส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ให้บริการถึง 10 ราย กราฟที่ได้จากการจำลองระบบจะเป็นกลุ่มจุดที่กระจัดกระจายกัน เพราะระบบมีการสับสวิตช์ไปให้ subscriber หลายราย และมีการเพิ่มกำลังสัญญาณขาส่งมากขึ้นด้วย จากนั้นเลือกขีดเส้นกราฟเพื่อหาจุดตัดของกำลังสัญญาณขารับและ  $\log(\text{BER})$  ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) โดยเลือกขีดเส้นให้มีแนวโน้มอยู่ด้านขวาสุดของกราฟ ซึ่งเป็นกรณี worst case ที่ให้ค่ากำลังสัญญาณขารับมากที่สุด ทำให้ค่า power budget ของระบบมีค่าน้อยสุดด้วย เราสามารถหาจุดตัดดังกล่าว คือค่า  $P_{Rx}$  ที่ FEC ได้เท่ากับ  $-29.83$  dBm จากนั้นนำค่ากำลังสัญญาณขารับจากการจำลองระบบไปคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) โดยระบบ FTTx ของสวิตช์ตัวนี้มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4. 3 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและ subscriber 10 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$  ps)

FTTx/parameter	value	unit
Transmit power ( $P_{Tx}$ )	10	dBm
Receive power ( $P_{Rx}$ )	-29.83	dBm
Insertion loss ( $P_{insertion}$ )	4 x 1.5	dB

Attenuation @1471 nm ( $\alpha$ )	0.2127	dB/km
Loss of WSS ( $P_{wss}$ )	16	dB
System margin ( $G_{margin}$ )	3	dB

เนื่องจากระบบ FTTx นี้มีจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ 4 ความยาวคลื่น สามารถส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการได้ถึง 10 ราย ความยาวคลื่นของ CWDM ของระบบนี้มีตั้งแต่ 1471-1531 nm ที่มี channel spacing = 20 nm ในการคำนวณ power budget จะเลือกใช้ค่า attenuation ของความยาวคลื่นที่ให้ระยะทางการให้บริการของเส้นใยแสงน้อยที่สุด เพราะค่าความยาวคลื่นนี้จะ เป็นขีดจำกัดสมรรถนะของระบบ ดังนั้นในกรณี 4 ความยาวคลื่น subscriber 10 ราย จึงใช้ค่า สัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณของความยาวคลื่นที่ 1471 nm มาคำนวณค่า power budget

การคำนวณค่า power budget จะกำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไว้ที่ 10 dBm เนื่องจากตามมาตรฐาน GE-PON กำหนดให้กำลังสัญญาณสูงสุดที่ออกจาก OLT ไว้เท่ากับ 10 dBm [41]

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.3 แล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

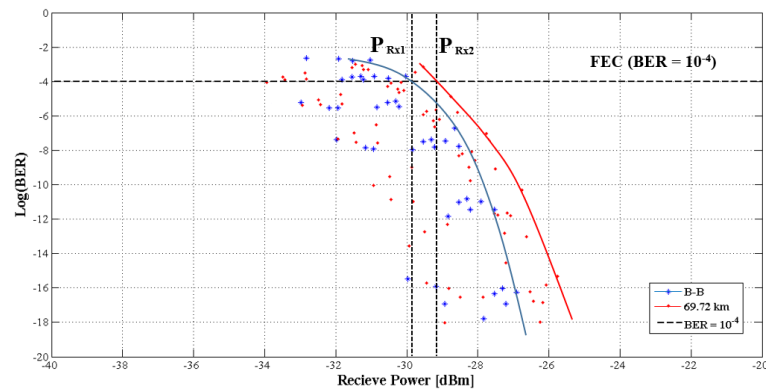
$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (4-1)$$

$$10 - (-29.83) = 0.2127 \times L + (4 \times 1.5) + 16 + 3 \quad (4-2)$$

$$L = 69.72 \text{ km} \quad (4-3)$$

จากการคำนวณ power budget จะได้ค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) เท่ากับ 69.72 km จากนั้นนำความยาวเส้นใยแสงที่ได้ไปจำลองระบบ FTTx โดยผ่านเส้นใยแสงต่อไป

เมื่อได้ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) จากการคำนวณ power budget แล้ว จากนั้นนำความยาวของเส้นใยแสงไปจำลองระบบโดยผ่านเส้นใยแสง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับ ที่ FEC ( $\text{BER} = 10^{-4}$ ) ออกมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ดังรูป



รูปที่ 4. 3 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) และผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$  ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อผ่านเส้นใยแสง โดยใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$  ps) ที่มีจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ 4 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการได้มากที่สุด 10 ราย จะได้ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $BER=10^{-4}$ ) เท่ากับ  $-29.17$  dBm และนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-29.83$  dBm จากนั้นจะได้ค่า power penalty :  $P_{penalty}$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (4-4)$$

$$P_{penalty} = -29.17 - (-29.83) = 0.66 \text{ dB} \quad (4-5)$$

จากสมการจะได้ค่า power penalty เท่ากับ  $0.66$  dB ซึ่งค่า Power Penalty เป็นค่ากำลังสัญญาณขารับที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้เส้นใยแสงเพิ่มเข้ามาในระบบ ซึ่งเกิดจากค่า dispersion เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังสัญญาณขารับมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ไม่ได้ใช้เส้นใยแสง ถ้ามีค่า power penalty มากจะไม่ดีต่อระบบ ในกรณีที่ดีที่สุด (best case) คือกรณีที่ค่า  $P_{Rx2} - P_{Rx1}$  มีค่าน้อยที่สุด กราฟของกำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสงและผ่านเส้นใยแสงอยู่ใกล้กันมากที่สุด หรือทั้งสองกราฟเป็นเส้นเดียวกัน

จากรูปที่ 4.3 เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $BER=10^{-4}$ ) เท่ากับ  $-29.17$  dBm เราสามารถออกแบบระบบ FTTx ได้โดยการคำนวณค่า power budget ของระบบ FTTx โดยที่กำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx2}$ ) ไว้ที่  $10$  dBm เราสามารถคำนวณค่า power budget ของระบบได้ดังสมการนี้

$$P_{Tcal} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (4-6)$$

$$P_{Tcal} = 10 - (-29.17) = 39.17 \text{ dB} \quad (4-7)$$

จากสมการเราจะได้อำนาจ power budget จากการคำนวณ ( $P_{T_{cal}}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาอำนาจ power budget ที่แท้จริงของระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

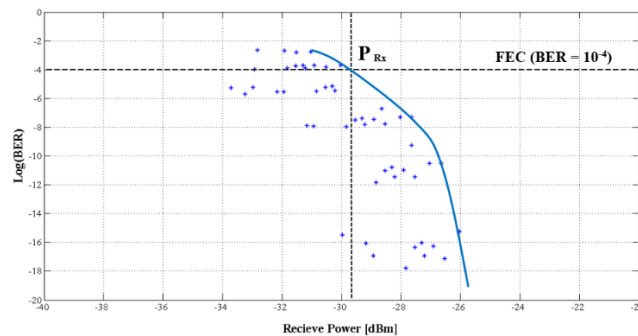
$$P_{T_{real}} = P_{T_{cal}} - P_{penalty} \quad (4-8)$$

$$P_{T_{real}} = 39.17 - 0.66 = 38.51 \text{ dB} \quad (4-9)$$

ดังนั้นระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ Photonic crystal ( $\tau = 0.5$  ps) ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย มีอำนาจ power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 38.51 dB ซึ่งการออกแบบระบบ FTTx จะช่วยให้เลือกใช้ WSS ได้อย่างเหมาะสม และจะต้องออกแบบให้ค่าการสูญเสียกำลังของสัญญาณทั้งหมดมีค่าไม่เกิน power budget ที่แท้จริงของระบบที่ได้จากการคำนวณนี้

#### 4.4.2 Photonic crystal switch ที่มี $\tau = 1$ ps

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$  ps) ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับได้ดังนี้



รูปที่ 4. 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$  ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับเมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$  ps) สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  เมื่อคิดที่ FEC ( $\text{BER} = 10^{-4}$ ) ได้เท่ากับ -29.8 dBm จากนั้นนำค่ากำลังสัญญาณขารับจากการจำลองระบบไปคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) โดยระบบ FTTx ของสวิตช์ตัวนี้มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4. 4 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและ subscriber 10 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ photonic crystal ( $\tau = 1\text{ps}$ )

FTTx/parameter	value	unit
Transmit power ( $P_{Tx}$ )	10	dBm
Receive power ( $P_{Rx}$ )	-29.8	dBm
Insertion loss ( $P_{insertion}$ )	4 x1.5	dB
Attenuation @1471 nm ( $\alpha$ )	0.2127	dB/km
Loss of WSS ( $P_{wss}$ )	16	dB
System margin ( $G_{margin}$ )	3	dB

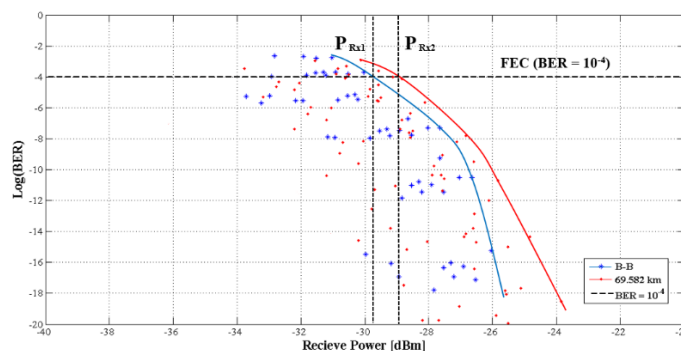
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.4 แล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้สูงสุด ( $L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (4-10)$$

$$10 - (-29.8) = 0.2127 \times L + (4 \times 1.5) + 16 + 3 \quad (4-11)$$

$$L = 69.582\text{km} \quad (4-12)$$

จากการคำนวณ power budget จะได้ค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) เท่ากับ 69.582 km จากนั้นนำความยาวเส้นใยแสงที่ได้ไปจำลองระบบ FTTx โดยผ่านเส้นใยแสง จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับ ที่ FEC ( $\text{BER} = 10^{-4}$ ) ออกมาแล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ดังรูป



รูปที่ 4. 5 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) และผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1\text{ ps}$ ) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อผ่านเส้นใยแสง โดยใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$  ps) จะได้ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC (BER= $10^{-4}$ ) เท่ากับ -28.93 dBm และนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ -29.8 dBm จากนั้นสามารถหาค่า power penalty :  $P_{penalty}$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (4-13)$$

$$P_{penalty} = -28.93 - (-29.8) = 0.87 \text{ dB} \quad (4-14)$$

จากสมการจะได้ค่า power penalty เท่ากับ 0.87 dB

จากรูปที่ 4.5 เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC (BER= $10^{-4}$ ) เท่ากับ -28.93 dBm เราสามารถออกแบบระบบ FTTx ได้โดยการคำนวณค่า power budget เพื่อออกแบบระบบ FTTx โดยที่กำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx2}$ ) ไว้ที่ 10 dBm เราสามารถคำนวณค่า power budget ของระบบได้ดังสมการนี้

$$P_{Tcal} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (4-15)$$

$$P_{Tcal} = 10 - (-28.93) = 38.93 \text{ dB} \quad (4-16)$$

จากสมการเราจะได้ค่า power budget จากการคำนวณ ( $P_{Tcal}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า power budget ที่แท้จริงของระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

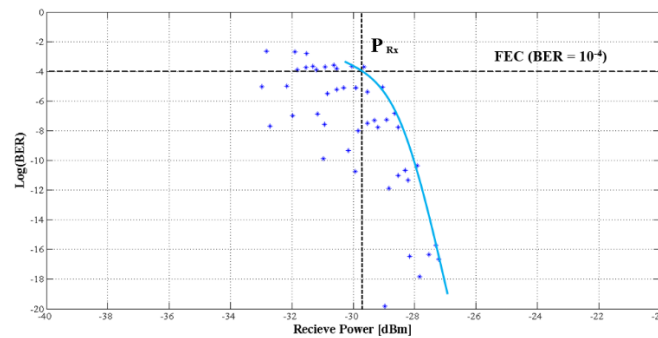
$$P_{Treal} = P_{Tcal} - P_{penalty} \quad (4-17)$$

$$P_{Treal} = 38.93 - 0.87 = 38.06 \text{ dB} \quad (4-18)$$

ดังนั้นระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$  ps) ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 38.06 dB

#### 4.4.3 GaAs photonic crystal cavities switch ที่มี $\tau = 15$ ps

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15$  ps) ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับได้ดังนี้



รูปที่ 4. 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15$  ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับเมื่อใช้สวิตช์แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15$  ps) สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  เมื่อคิดที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) ได้เท่ากับ -29.77 dBm จากนั้นนำค่ากำลังสัญญาณขารับจากการจำลองระบบไปคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) โดยระบบ FTTx ของสวิตช์ตัวนี้มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4. 5 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและ subscriber 10 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15$  ps)

FTTx/parameter	value	unit
Transmit power ( $P_{Tx}$ )	10	dBm
Receive power ( $P_{Rx}$ )	-29.77	dBm
Insertion loss ( $P_{insertion}$ )	4 x 1.5	dB
Attenuation @1471 nm ( $\alpha$ )	0.2127	dB/km
Loss of WSS ( $P_{wss}$ )	16	dB
System margin ( $G_{margin}$ )	3	dB

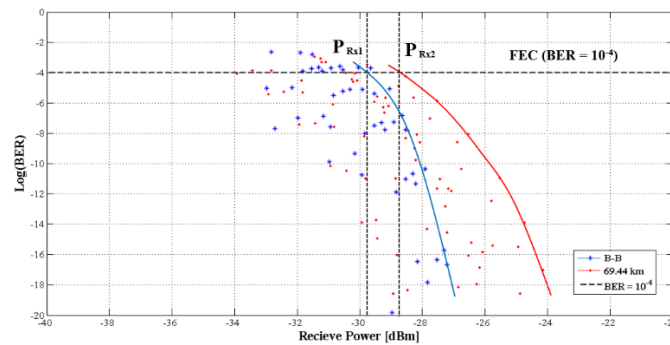
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.5 แล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้สูงสุด ( $L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (4-19)$$

$$10 - (-29.77) = 0.2127 \times L + (4 \times 1.5) + 16 + 3 \quad (4-20)$$

$$L = 69.44 \text{ km} \quad (4-21)$$

จากการคำนวณ power budget จะได้ค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) เท่ากับ 69.44 km จากนั้นนำความยาวเส้นใยแสงที่ได้ไปจำลองระบบ FTTx โดยผ่านเส้นใยแสง จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับ ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) ออกมาแล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ดังรูป



รูปที่ 4. 7 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) และผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ GaAS photonic crystal ( $\tau = 15$  ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อผ่านเส้นใยแสง โดยใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$  ps) จะได้ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) เท่ากับ -28.77 dBm และนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ -29.77 dBm จากนั้นสามารถหาค่า power penalty :  $P_{penalty}$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (4-22)$$

$$P_{penalty} = -28.77 - (-29.77) = 1dB \quad (4-23)$$

จากสมการจะได้ค่า power penalty เท่ากับ 1 dB

จากรูปที่ 4.7 เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) เท่ากับ -28.77 dBm เราสามารถออกแบบระบบ FTTx ได้โดยการคำนวณค่า power budget เพื่อออกแบบระบบ FTTx โดยที่กำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx2}$ ) ไว้ที่ 10 dBm เราสามารถคำนวณค่า power budget ของระบบได้ดังสมการนี้

$$P_{Tcal} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (4-24)$$

$$P_{Tcal} = 10 - (-28.77) = 38.77dB \quad (4-25)$$

จากสมการเราจะได้ค่า power budget จากการคำนวณ ( $P_{Tcal}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า power budget ที่แท้จริงของระบบได้ดังสมการต่อไปนี้



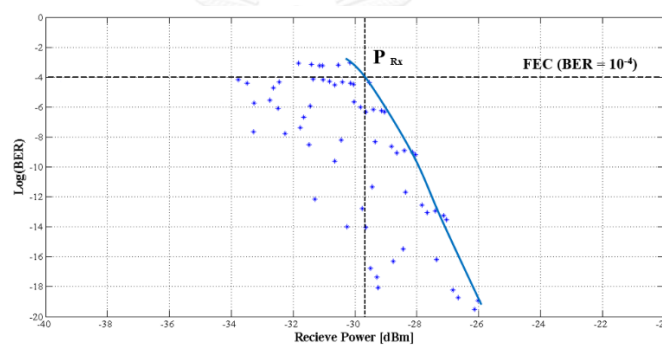
$$P_{T_{real}} = P_{T_{cal}} - P_{penalty} \quad (4-26)$$

$$P_{T_{real}} = 38.77 - 1 = 37.77 \text{ dB} \quad (4-27)$$

ดังนั้นระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15$  ps) ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบเท่ากับ 37.77 dB

#### 4.4.4 GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่มี $\tau = 100$ ps

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับได้ดังนี้



รูปที่ 4. 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับเมื่อใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  เมื่อคิดที่ FEC ( $\text{BER} = 10^{-4}$ ) ได้เท่ากับ -29.7 dBm จากนั้นนำค่ากำลังสัญญาณขารับจากการจำลองระบบไปคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) โดยระบบ FTTx ของสวิตช์ตัวนี้มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4. 6 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและ subscriber 10 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps)

FTTx/parameter	value	unit
Transmit power ( $P_{Tx}$ )	10	dBm
Receive power ( $P_{Rx}$ )	-29.7	dBm
Insertion loss ( $P_{insertion}$ )	4 x 1.5	dB
Attenuation @1471 nm ( $\alpha$ )	0.2127	dB/km

Loss of WSS ( $P_{wss}$ )	16.5	dB
System margin ( $G_{margin}$ )	3	dB

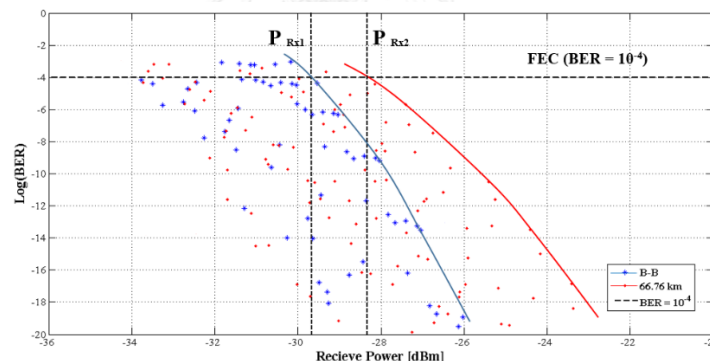
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.6 แล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้สูงสุด ( $L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (4-28)$$

$$10 - (-29.7) = 0.2127 \times L + (4 \times 1.5) + 16.5 + 3 \quad (4-29)$$

$$L = 66.76 \text{ km} \quad (4-30)$$

จากการคำนวณ power budget จะได้ค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) เท่ากับ 66.76 km จากนั้นนำความยาวเส้นใยแสงที่ได้ไปจำลองระบบ FTTx โดยผ่านเส้นใยแสง จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับ ที่ FEC ( $\text{BER} = 10^{-4}$ ) ออกมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ดังรูป



รูปที่ 4. 9 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) และผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อผ่านเส้นใยแสง โดยใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) จะได้ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $\text{BER} = 10^{-4}$ ) เท่ากับ -28.33 dBm และนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ -29.7 dBm จากนั้นสามารถหาค่า power penalty :  $P_{penalty}$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (4-31)$$

$$P_{penalty} = -28.33 - (-29.7) = 1.37 \text{ dB} \quad (4-32)$$

จากสมการจะได้ค่า power penalty เท่ากับ 1.37 dB

จากรูปที่ 4.9 เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC (BER=10<sup>-4</sup>) เท่ากับ -28.33 dBm เราสามารถออกแบบระบบ FTTx ได้โดยการคำนวณค่า power budget เพื่อออกแบบระบบ FTTx โดยที่กำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx2}$ ) ไว้ที่ 10 dBm เราสามารถคำนวณค่า power budget ของระบบได้ดังสมการนี้

$$P_{T_{cal}} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (4-33)$$

$$P_{T_{cal}} = 10 - (-28.33) = 38.33dB \quad (4-34)$$

จากสมการเราจะได้ค่า power budget จากการคำนวณ ( $P_{T_{cal}}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า power budget ที่แท้จริงของระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

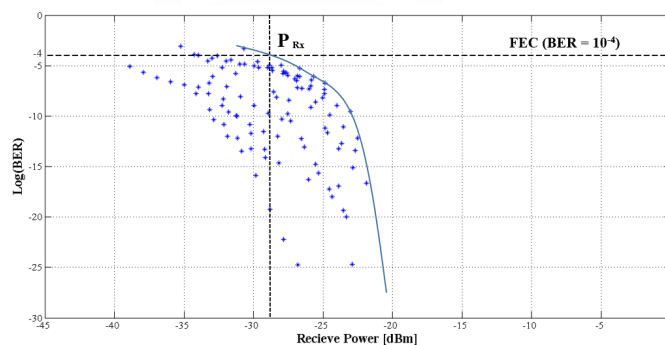
$$P_{T_{real}} = P_{T_{cal}} - P_{penalty} \quad (4-35)$$

$$P_{T_{real}} = 38.33 - 1.37 = 36.96dB \quad (4-36)$$

ดังนั้นระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 36.96 dB

#### 4.4.5 Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ที่มี $\tau = 1$ ns

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง 10<sup>-4</sup> จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log(BER) และกำลังสัญญาณที่ขารับได้ดังนี้



รูปที่ 4. 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง log(BER) และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง log(BER) และกำลังสัญญาณที่ขารับเมื่อใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  เมื่อคิดที่ FEC (BER=10<sup>-4</sup>) ได้เท่ากับ -28.82 dBm จากนั้นนำค่ากำลังสัญญาณขารับจากการจำลองระบบไปคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) โดยระบบ FTTx ของสวิตช์ตัวนี้มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4. 7 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและsubscriber 10 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns)

FTTx/parameter	value	unit
Transmit power ( $P_{Tx}$ )	10	dBm
Receive power ( $P_{Rx}$ )	-28.82	dBm
Insertion loss ( $P_{insertion}$ )	4 x1.5	dB
Attenuation @1471 nm ( $\alpha$ )	0.2127	dB/km
Loss of WSS ( $P_{wss}$ )	0	dB
System margin ( $G_{margin}$ )	3	dB

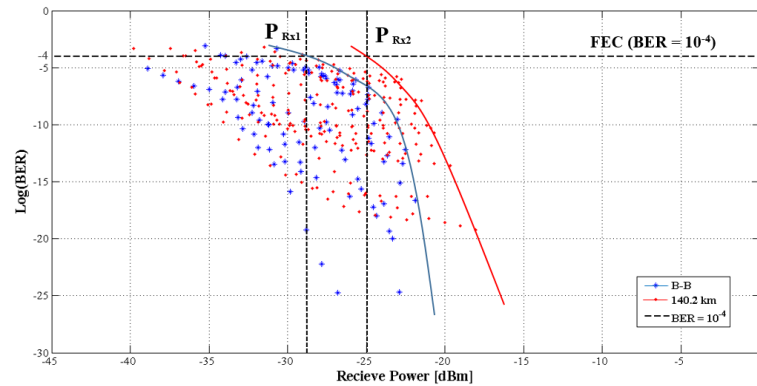
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.7 แล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้สูงสุด ( $L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (4-37)$$

$$10 - (-28.82) = 0.2127 \times L + (4 \times 1.5) + 0 + 3 \quad (4-38)$$

$$L = 140.2 \text{ km} \quad (4-39)$$

จากการคำนวณ power budget จะได้ค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) เท่ากับ 140.2 km จากนั้นนำความยาวเส้นใยแสงที่ได้ไปจำลองระบบ FTTx โดยผ่านเส้นใยแสง จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับ ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) ออกมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ดังรูป



รูปที่ 4. 11 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) และผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อผ่านเส้นใยแสง โดยใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) จะได้ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $BER=10^{-4}$ ) เท่ากับ  $-25$  dBm และนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-28.82$  dBm จากนั้นสามารถหาค่า power penalty :  $P_{penalty}$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (4-40)$$

$$P_{penalty} = -25 - (-28.82) = 3.82 \text{ dB} \quad (4-41)$$

จากสมการจะได้ค่า power penalty เท่ากับ  $3.82$  dB

จากรูปที่ 4.11 เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $BER=10^{-4}$ ) เท่ากับ  $-25$  dBm เราสามารถออกแบบระบบ FTTx ได้โดยการคำนวณค่า power budget เพื่อออกแบบระบบ FTTx โดยที่กำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx2}$ ) ไว้ที่  $10$  dBm เราสามารถคำนวณค่า power budget ของระบบได้ดังสมการนี้

$$P_{Tcal} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (4-42)$$

$$P_{Tcal} = 10 - (-25) = 35 \text{ dB} \quad (4-43)$$

จากสมการเราจะได้ค่า power budget จากการคำนวณ ( $P_{Tcal}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า power budget ที่แท้จริงของระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

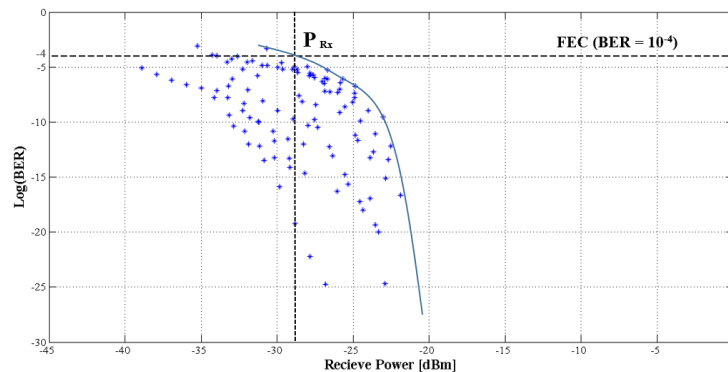
$$P_{Treal} = P_{Tcal} - P_{penalty} \quad (4-44)$$

$$P_{Treal} = 35 - 3.82 = 31.18 \text{ dB} \quad (4-45)$$

ดังนั้นระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ  $31.18$  dB

#### 4.4.6 Electro-optic switch ที่มี $\tau = 5$ ns

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับได้ดังนี้



รูปที่ 4. 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับเมื่อใช้สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  เมื่อคิดที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) ได้เท่ากับ -23.6 dBm จากนั้นนำค่ากำลังสัญญาณขารับจากการจำลองระบบไปคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) โดยระบบ FTTx ของสวิตช์ตัวนี้มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4. 8 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและ subscriber 10 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ Electro-optic ( $\tau = 5$  ns)

FTTx/parameter	value	unit
Transmit power ( $P_{Tx}$ )	10	dBm
Receive power ( $P_{Rx}$ )	-23.6	dBm
Insertion loss ( $P_{insertion}$ )	4 x1.5	dB
Attenuation @1471 nm ( $\alpha$ )	0.2127	dB/km
Loss of WSS ( $P_{wss}$ )	2	dB
System margin ( $G_{margin}$ )	3	dB

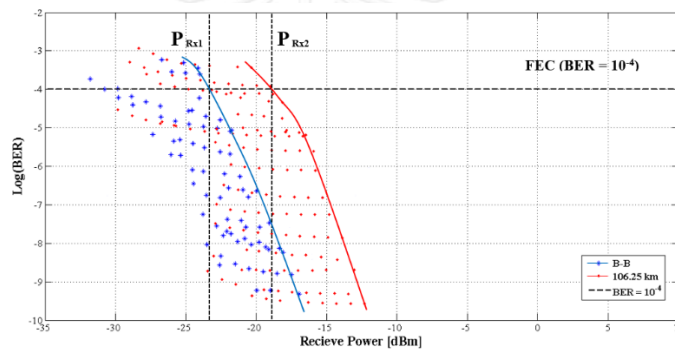
เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.8 แล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้สูงสุด ( $L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (4-46)$$

$$10 - (-23.6) = 0.2127 \times L + (4 \times 1.5) + 2 + 3 \quad (4-47)$$

$$L = 106.25 \text{ km} \quad (4-48)$$

จากการคำนวณ power budget จะได้ค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) เท่ากับ 106.25 km จากนั้นนำความยาวเส้นใยแสงที่ได้ไปจำลองระบบ FTTx โดยผ่านเส้นใยแสง จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับ ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) ออกมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ดังรูป



รูปที่ 4. 13 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) และผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) ที่มี 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย

จากผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อผ่านเส้นใยแสง โดยใช้สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) จะได้ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) เท่ากับ -18.96 dBm และนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ -23.6 dBm จากนั้นสามารถหาค่า power penalty :  $P_{penalty}$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (4-49)$$

$$P_{penalty} = -18.96 - (-23.6) = 4.64 \text{ dB} \quad (4-50)$$

จากสมการจะได้ค่า power penalty เท่ากับ 4.64 dB

จากรูปที่ 4.13 เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) เท่ากับ -18.96 dBm เราสามารถออกแบบระบบ FTTx ได้โดยการคำนวณค่า power budget เพื่อ

ออกแบบระบบ FTTx โดยที่กำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx2}$ ) ไว้ที่ 10 dBm เราสามารถคำนวณค่า power budget ของระบบได้ดังสมการนี้

$$P_{T_{cal}} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (4-51)$$

$$P_{T_{cal}} = 10 - (-18.96) = 28.96dB \quad (4-52)$$

จากสมการเราจะได้ค่า power budget จากการคำนวณ ( $P_{T_{cal}}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า power budget ที่แท้จริงของระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{T_{real}} = P_{T_{cal}} - P_{penalty} \quad (4-53)$$

$$P_{T_{real}} = 28.96 - 4.64 = 24.32dB \quad (4-54)$$

ดังนั้นระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน 4 ความยาวคลื่น และ subscriber 10 ราย มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 24.32 dB





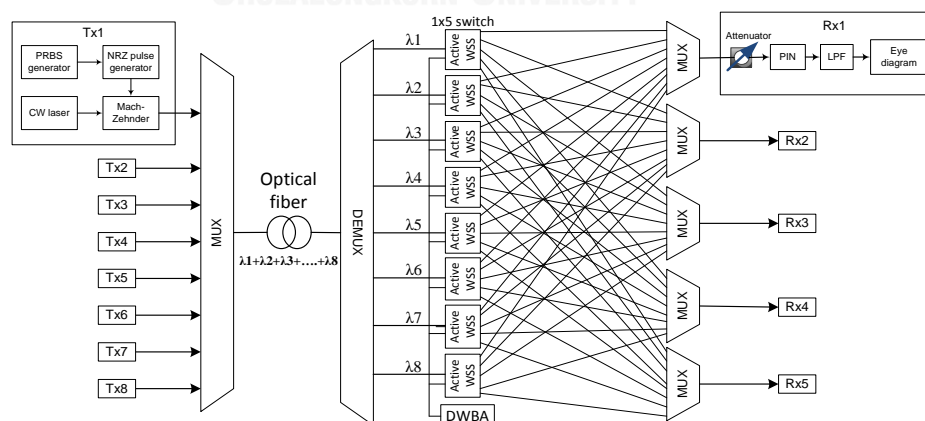
## บทที่ 5

### ระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA จำนวน 8 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 5 ราย โดย คิดผลของ switching characteristic

ในบทนี้จะนำเสนอระบบ FTTx ซึ่งใช้ WSS ร่วมกับ DWBA โดยคิดผลของ switching ที่มีจำนวนผู้ใช้บริการน้อยกว่าจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ ในกรณีนี้ใช้ความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ 8 ความยาวคลื่นจัดสรรความยาวคลื่นให้ผู้ใช้บริการได้ถึง 5 ราย การวิเคราะห์ผลจากการจำลองระบบ FTTx ที่ใช้ WSS ชนิดต่างๆ รวมไปถึงแนวทางการออกแบบระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ที่มีค่า switching characteristic และ time constant ของสวิตช์แต่ละชนิดที่แตกต่างกัน โดยสามารถออกแบบระบบได้จากการคำนวณ power budget ของระบบ

#### 5.1 โครงสร้างของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ที่มี 8 ความยาวคลื่นจัดสรรให้ผู้ใช้บริการได้ถึง 5 ราย

โครงสร้างของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA โดยคิดผลของ switching characteristic ที่มีความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ 8 ความยาวคลื่นจัดสรรความยาวคลื่นให้ผู้ใช้บริการได้ถึง 5 ราย จะมีโครงสร้างการทำงานคล้ายกับระบบที่มี 4 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 10 ราย กล่าวคือระบบนี้จะส่งอัตราข้อมูลจาก OLT ที่ถูกควบคุมด้วย DWBA ผ่านเส้นใยแสงไปสู่ ONU โดยที่มีสวิตช์ความยาวคลื่น WSS จัดสรรความยาวคลื่นให้ตามที่ใช้บริการร้องขอ ซึ่งระบบนี้ จะไม่มีโอกาสชนกันของข้อมูลเช่นกัน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ ระบบนี้จะมีจำนวนผู้ใช้บริการน้อยกว่าจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ



รูปที่ 5. 1 โครงสร้าง FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและ subscriber 10 ราย

จากรูปที่ 5.1 แสดงถึงโครงสร้างและการทำงาน FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA โดยคิดผลของ switching characteristic ที่มีจำนวน subscriber น้อยกว่าจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดใน

ระบบ ในกรณีนี้จะใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด 8 ความยาวคลื่นส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ให้บริการได้ถึง 5 ราย ระบบนี้จัดสรรความยาวคลื่น CWDM ให้ผู้ให้บริการแต่ละรายเช่นกัน ซึ่งแต่ละความยาวคลื่นจะถูกสร้างขึ้นจาก OLT ผ่านเส้นใยแสงไปสู่ ONU โดยมี WSS ที่ถูกควบคุมโดยตัวควบคุม DWBA จัดสรรความยาวคลื่นให้ผู้ให้บริการแต่ละราย และจัดสรรเวลาที่ผู้ให้บริการต้องการใช้สัญญาณ เมื่อ ONU เสร็จสิ้นการรับอัตราข้อมูลที่ร้องขอในช่วงเวลาต่างๆแล้ว ความยาวคลื่นทั้งหมดจะถูกส่งกลับคืน OLT ทันทีเช่นกัน ระบบ FTTx นี้จะมีความยาวคลื่นทั้งหมด 8 ความยาวคลื่นสามารถจัดสรรความยาวคลื่นให้ผู้ให้บริการได้ทั้งหมด 5 ราย สามารถส่งอัตราข้อมูลได้สูงสุดถึง 80 Gbps นั่นคือ ระบบส่งความยาวคลื่นสูงสุด 8 ความยาวคลื่นให้ผู้ให้บริการเพียง 1 รายเท่านั้น ซึ่งระบบนี้จะเหมาะกับสถานที่ที่ต้องการใช้อัตราข้อมูลในปริมาณมาก แต่จำนวนผู้ให้บริการมีจำนวนน้อย

WSS ที่ใช้ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและผู้ให้บริการ 5 ราย จะมี 6 ชนิดเช่นเดียวกับระบบ FTTx ที่มี 4 ความยาวคลื่นและผู้ให้บริการ 10 ราย คือ สวิตช์แบบ photonic crystal ที่มี  $\tau = 0.5$  ps, photonic crystal ที่มี  $\tau = 1$  ps, GaAs photonic crystal ที่มี  $\tau = 15$  ps, MQW ที่มี  $\tau = 100$  ps, SOA ที่มี  $\tau = 1$  ns และ electro-optic ที่มี  $\tau = 5$  ns ซึ่งค่า insertion loss และ noise figure สามารถดูได้จากตารางที่ 4.1

## 5.2 การจำลองระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่น และผู้ให้บริการ 5 ราย

การจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA เมื่อคิดผลของ switching characteristic กรณีมีจำนวนผู้ให้บริการน้อยกว่าจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ ในที่นี้ใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด 8 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลไปสู่ผู้ให้บริการได้ถึง 5 ราย โดยจำลองบนคอมพิวเตอร์โปรแกรม optisystem software version 10.0

โครงสร้างระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ที่มีความยาวคลื่นในระบบทั้งหมด 8 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลไปสู่ผู้ให้บริการได้ถึง 5 ราย แสดงดังรูปที่ 5.1 โดยจะส่งสัญญาณ CWDM 8 ความยาวคลื่นซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 1431-1571 nm ซึ่งระยะห่างของช่องสัญญาณเท่ากับ 20 nm สัญญาณทั้ง 8 ความยาวคลื่นถูกสร้างขึ้นโดยใช้อาร์เรย์ของ CW laser เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยอัตราข้อมูลต่อหนึ่งความยาวคลื่นเท่ากับ 10 Gbps จากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วทั้งหมดจะถูกรวมเข้ากับ multiplexer ที่มีค่า insertion loss เท่ากับ 1.5 dB ต่อจากนั้นสัญญาณของแต่ละความยาวคลื่นจะถูกส่งผ่านเส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652.D โดยมีค่า attenuation และ dispersion ของ SMF สำหรับความยาวคลื่น CWDM ที่ 1431-1571 nm ที่ใช้ในการจำลองระบบซึ่งจะถูกแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5. 1 ค่า attenuation และ dispersion ของความยาวคลื่นที่ 1431-1571 nm

Wavelength [nm]	Attenuation [dB/km]	Dispersion [ps/km/nm]
1431	0.243	9.76147
1451	0.2254	11.1853
1471	0.2127	12.5567
1491	0.2029	13.8819
1511	0.1956	15.1614
1531	0.1908	16.3988
1551	0.1892	17.5969
1571	0.1915	18.7581

PMD เท่ากับ  $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  แต่ระบบนี้จะไม่คิดผลของ non-linear จากนั้นทั้ง 8 ความยาวคลื่นจะถูกแยกสัญญาณแต่ละความยาวคลื่นด้วย demultiplexer มีค่า Insertion loss เท่ากับ 1.5 dB เช่นกัน และ WSS อยู่ภายใต้การควบคุมของ DWBA จะจัดสรรความยาวคลื่นให้กับผู้ใช้บริการแต่ละราย ซึ่งมีอยู่ 6 ชนิดตามที่ปรากฏดังตารางที่ 4.1 โดยแต่ละชนิดจะมีค่า switching characteristic และ time constant ที่แตกต่างกัน จากนั้นจะผ่าน multiplexer อีกครั้งหนึ่งเพื่อรวมสัญญาณก่อนถึงภาครับ ในส่วนของภาครับ สัญญาณแต่ละความยาวคลื่นจะถูกปรับเพิ่มค่า attenuation 3 dB ใน optical attenuator และถูกตรวจจับสัญญาณด้วย PIN photodetector จากนั้นสัญญาณจะถูกกรองสัญญาณที่ไม่ดีออกด้วย low-pass filter สุดท้ายสัญญาณที่ถูกตรวจจับแล้วจะถูกส่งไปที่ eye-diagram analyzer เพื่อที่จะคำนวณ bit-error rate (BER) ซึ่ง BER ที่สามารถยอมรับได้จะมีค่าน้อยกว่า  $10^{-4}$  ที่ FEC

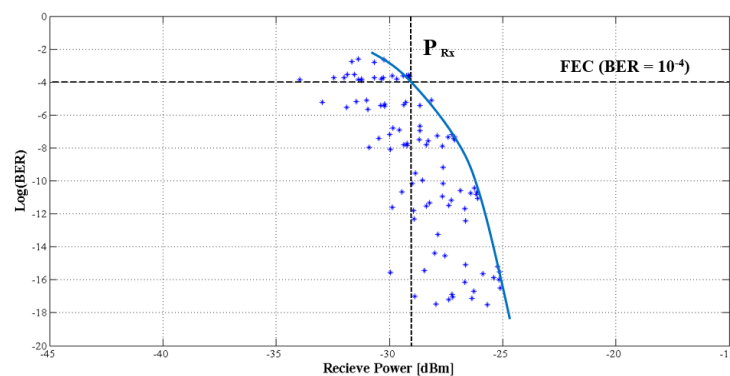
### 5.3 วิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 5 ราย เมื่อใช้ WSS ชนิดต่างๆ

ในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย ก่อนที่จะคำนวณ power budget ของแต่ละระบบ จำเป็นต้องวิเคราะห์ผลจากการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS แต่ละชนิด โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) เพื่อหาค่ากำลังสัญญาณขาเข้า ( $P_{Rx}$ ) เมื่อคิดที่ FEC (BER= $10^{-4}$ ) จากระบบนี้ก่อน โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลัง

สัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของสวิตช์ทั้ง 6 ชนิดได้ดังต่อไปนี้

### 5.3.1 Photonic crystal switch ที่มี $\tau = 0.5$ ps

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx โดยคิดผลกระทบของ switching characteristic เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$  ps) ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับได้ดังนี้



รูปที่ 5. 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$  ps) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับเมื่อใช้สวิตช์แบบ Photonic crystal ( $\tau = 0.5$  ps) สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  เมื่อคิดที่ FEC (BER= $10^{-4}$ ) ได้เท่ากับ -29.02 dBm จากนั้นนำค่ากำลังสัญญาณขารับจากการจำลองระบบไปคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) โดยระบบ FTTx ของสวิตช์ตัวนี้มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5. 2 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและsubscriber 5 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ Photonic crystal ( $\tau = 0.5$ ps)

FTTx/parameter	value	unit
Transmit power ( $P_{Tx}$ )	10	dBm
Receive power ( $P_{Rx}$ )	-29.02	dBm
Insertion loss ( $P_{insertion}$ )	4 x1.5	dB
Attenuation @1431 nm ( $\alpha$ )	0.243	dB/km
Loss of WSS ( $P_{wss}$ )	16	dB

System margin ( $G_{margin}$ )	3	dB
--------------------------------	---	----

เนื่องจากระบบ FTTx นี้มีจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ 8 ความยาวคลื่น สามารถส่งอัตราข้อมูลให้ Subscriber ได้ถึง 5 ราย ความยาวคลื่นของ CWDM ของระบบนี้มีตั้งแต่ 1431-1571 nm (channel spacing = 20 nm) ในการคำนวณ power budget จะเลือกใช้ค่า attenuation ของความยาวคลื่นที่ให้ระยะทางการให้บริการของเส้นใยแสงน้อยที่สุด เพราะค่าความยาวคลื่นนี้จะเป็นขีดจำกัดสมรรถนะของระบบ ดังนั้นในกรณี 8 ความยาวคลื่น subscriber 5 ราย จึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณของความยาวคลื่นที่ 1431 nm มาคำนวณค่า power budget

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 5.2 แล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

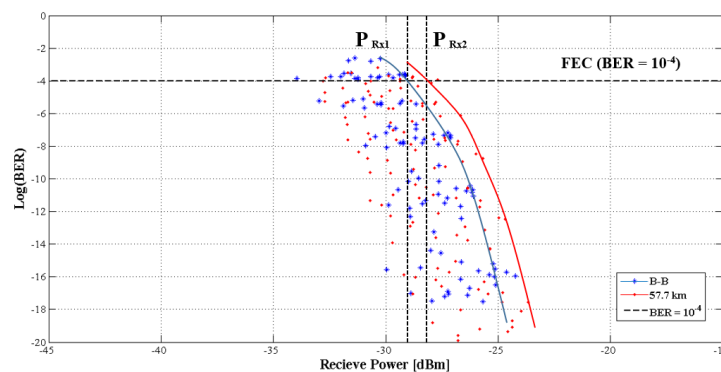
$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (5-1)$$

$$10 - (-29.02) = 0.243 \times L + (4 \times 1.5) + 16 + 3 \quad (5-2)$$

$$L = 57.7 \text{ km} \quad (5-3)$$

จากการคำนวณ power budget จะได้ค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) เท่ากับ 57.7 km จากนั้นนำความยาวเส้นใยแสงที่ได้ไปจำลองระบบ FTTx โดยผ่านเส้นใยแสงต่อไป

เมื่อได้ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) จากการคำนวณ power budget แล้ว จากนั้นนำความยาวของเส้นใยแสงไปจำลองระบบโดยผ่านเส้นใยแสง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับ ที่ FEC ( $\text{BER} = 10^{-4}$ ) ออกมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ดังรูป



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) และผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$  ps) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากผลการจำลองระบบดังรูปที่ 5.3 จะได้ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC (BER= $10^{-4}$ ) เท่ากับ  $-28.22$  dBm และนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-29.02$  dBm จากนั้นจะได้ค่า power penalty :  $P_{penalty}$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (5-4)$$

$$P_{penalty} = -28.22 - (-29.02) = 0.8dB \quad (5-5)$$

จากสมการจะได้ค่า power penalty เท่ากับ  $0.8$  dB

จากรูปที่ 5.3 เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC (BER= $10^{-4}$ ) เท่ากับ  $-28.22$  dBm เราสามารถออกแบบระบบ FTTx ได้โดยการคำนวณค่า power budget เพื่อออกแบบระบบ FTTx โดยที่กำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx2}$ ) ไว้ที่  $10$  dBm เราสามารถคำนวณค่า power budget ของระบบได้ดังสมการนี้

$$P_{Tcal} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (5-6)$$

$$P_{Tcal} = 10 - (-28.22) = 38.22dB \quad (5-7)$$

จากสมการเราจะได้ค่า power budget จากการคำนวณ ( $P_{Tcal}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า power budget ที่แท้จริงของระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

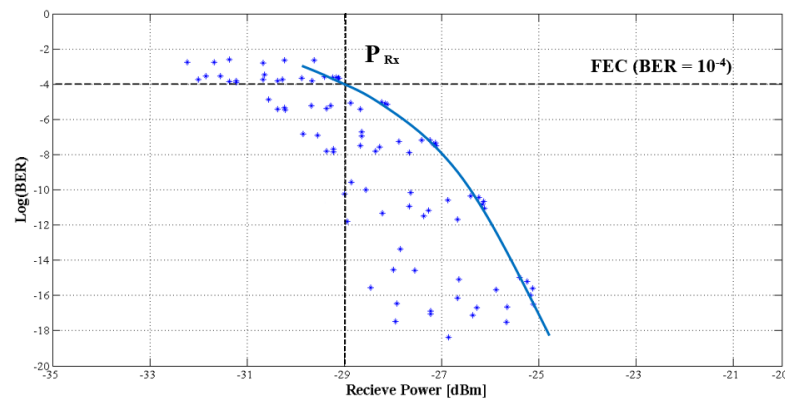
$$P_{Treal} = P_{Tcal} - P_{penalty} \quad (5-8)$$

$$P_{Treal} = 38.22 - 0.8 = 37.42dB \quad (5-9)$$

ดังนั้นระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 0.5$  ps) ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน 8 ความยาวคลื่น และผู้ใช้บริการ 5 ราย มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ  $37.42$  dB

### 5.3.2 Photonic crystal switch ที่มี $\tau = 1$ ps

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx โดยคิดผลกระทบของ switching characteristic เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$  ps) ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับได้ดังนี้



รูปที่ 5. 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$  ps) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับเมื่อใช้สวิตช์แบบ Photonic crystal ( $\tau = 1$  ps) สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  เมื่อคิดที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) ได้เท่ากับ  $-29$  dBm จากนั้นนำค่ากำลังสัญญาณขารับจากการจำลองระบบไปคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) โดยระบบ FTTx ของสวิตช์ตัวนี้มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5. 3 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและ subscriber 5 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ Photonic crystal ( $\tau = 1$  ps)

FTTx/parameter	value	unit
Transmit power ( $P_{Tx}$ )	10	dBm
Receive power ( $P_{Rx}$ )	-29	dBm
Insertion loss ( $P_{insertion}$ )	$4 \times 1.5$	dB
Attenuation @1431 nm ( $\alpha$ )	0.243	dB/km
Loss of WSS ( $P_{wss}$ )	16	dB
System margin ( $G_{margin}$ )	3	dB

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 5.3 แล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

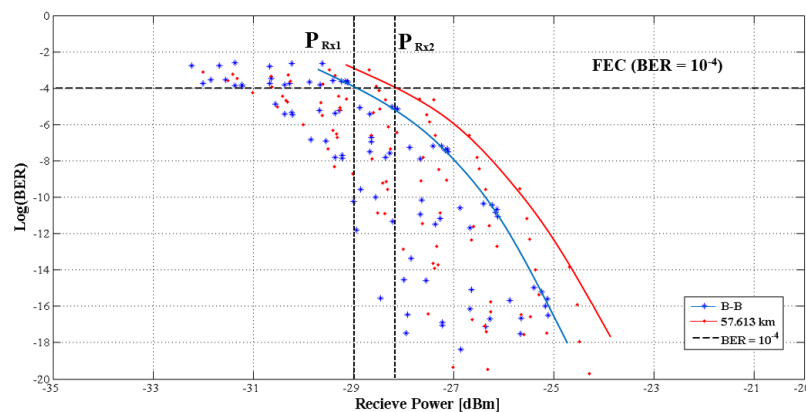
$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (5-10)$$

$$10 - (-29) = 0.243 \times L + (4 \times 1.5) + 16 + 3 \quad (5-11)$$

$$L = 57.613 \text{ km} \quad (5-12)$$

จากการคำนวณ power budget จะได้ค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) เท่ากับ 57.613 km จากนั้นนำความยาวเส้นใยแสงที่ได้ไปจำลองระบบ FTTx โดยผ่านเส้นใยแสงต่อไป

เมื่อได้ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) จากการคำนวณ power budget แล้ว จากนั้นนำความยาวของเส้นใยแสงไปจำลองระบบโดยผ่านเส้นใยแสง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับ ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) ออกมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ดังรูป



รูปที่ 5. 5 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) และผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1$  ps) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากผลการจำลองระบบดังรูปที่ 5.5 จะได้ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) เท่ากับ -28.18 dBm และนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ -29 dBm จากนั้นจะได้ค่า power penalty :  $P_{penalty}$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (5-13)$$

$$P_{penalty} = -28.18 - (-29) = 0.82 \text{ dB} \quad (5-14)$$

จากสมการจะได้ค่า power penalty เท่ากับ 0.82 dB

จากรูปที่ 5.3 เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) เท่ากับ -28.18 dBm เราสามารถออกแบบระบบ FTTx ได้โดยการคำนวณค่า power budget เพื่อออกแบบระบบ FTTx โดยที่กำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx2}$ ) ไว้ที่ 10 dBm เราสามารถคำนวณค่า power budget ของระบบได้ดังสมการนี้

$$P_{Tcal} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (5-15)$$



$$P_{T_{cal}} = 10 - (-28.18) = 38.18 \text{ dB} \quad (5-16)$$

จากสมการเราจะได้อำนาจ power budget จากการคำนวณ ( $P_{T_{cal}}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า power budget ที่แท้จริงของระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

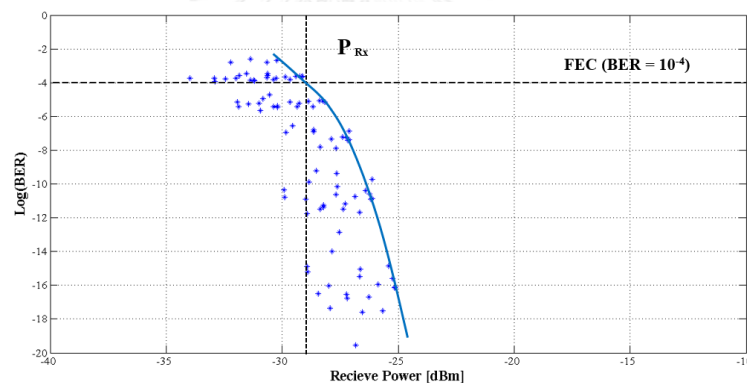
$$P_{T_{real}} = P_{T_{cal}} - P_{penalty} \quad (5-17)$$

$$P_{T_{real}} = 38.18 - 0.82 = 37.36 \text{ dB} \quad (5-18)$$

ดังนั้นระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ photonic crystal ( $\tau = 1 \text{ ps}$ ) ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบเท่ากับ 37.36 dB

### 5.3.3 GaAs photonic crystal cavities switch ที่มี $\tau = 15 \text{ ps}$

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx โดยคิดผลกระทบของ switching characteristic เมื่อใช้สวิตช์แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15 \text{ ps}$ ) ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับได้ดังนี้



รูปที่ 5. 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15 \text{ ps}$ ) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับเมื่อใช้สวิตช์แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15 \text{ ps}$ ) สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  เมื่อคิดที่ FEC ( $\text{BER} = 10^{-4}$ ) ได้เท่ากับ -28.94 dBm จากนั้นนำค่ากำลังสัญญาณขารับจากการจำลองระบบไปคำนวณ power budget เพื่อหาความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) โดยระบบ FTTx ของสวิตช์ตัวนี้มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5. 4 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและ subscriber 5 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15 \text{ ps}$ )

FTTx/parameter	value	unit
Transmit power ( $P_{Tx}$ )	10	dBm
Receive power ( $P_{Rx}$ )	-28.94	dBm
Insertion loss ( $P_{insertion}$ )	4 x1.5	dB
Attenuation @1431 nm ( $\alpha$ )	0.243	dB/km
Loss of WSS ( $P_{wss}$ )	16	dB
System margin ( $G_{margin}$ )	3	dB

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 5.4 แล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

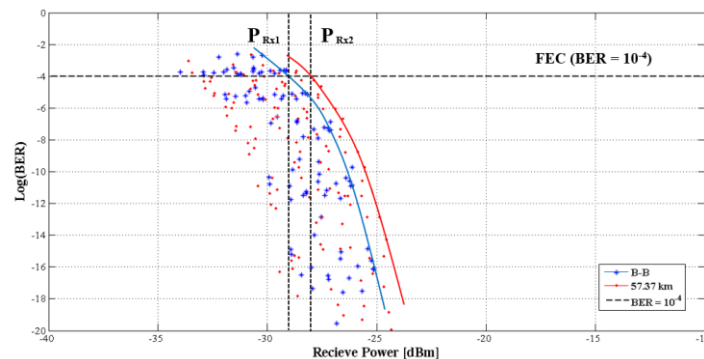
$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (5-19)$$

$$10 - (-28.94) = 0.243 \times L + (4 \times 1.5) + 16 + 3 \quad (5-20)$$

$$L = 57.37 \text{ km} \quad (5-21)$$

จากการคำนวณ power budget จะได้ค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) เท่ากับ 57.37 km จากนั้นนำความยาวเส้นใยแสงที่ได้ไปจำลองระบบ FTTx โดยผ่านเส้นใยแสงต่อไป

เมื่อได้ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) จากการคำนวณ power budget แล้ว จากนั้นนำความยาวของเส้นใยแสงไปจำลองระบบโดยผ่านเส้นใยแสง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับ ที่ FEC ( $\text{BER} = 10^{-4}$ ) ออกมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ดังรูป



รูปที่ 5. 7 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) และผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15$  ps) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากผลการจำลองระบบดังรูปที่ 5.7 จะได้ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC (BER= $10^{-4}$ ) เท่ากับ -27.99 dBm และนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ -28.94 dBm จากนั้นจะได้ค่า power penalty :  $P_{penalty}$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (5-22)$$

$$P_{penalty} = -27.99 - (-28.94) = 0.95dB \quad (5-23)$$

จากสมการจะได้ค่า power penalty เท่ากับ 0.95 dB จากรูปที่ 5.7 เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC (BER= $10^{-4}$ ) เท่ากับ -27.99 dBm เราสามารถออกแบบระบบ FTTx ได้โดยการคำนวณค่า power budget เพื่อออกแบบระบบ FTTx โดยที่กำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx2}$ ) ไว้ที่ 10 dBm เราสามารถคำนวณค่า power budget ของระบบได้ดังสมการนี้

$$P_{Tcal} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (5-24)$$

$$P_{Tcal} = 10 - (-27.99) = 37.99dB \quad (5-25)$$

จากสมการเราจะได้ค่า power budget จากการคำนวณ ( $P_{Tcal}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า power budget ที่แท้จริงของระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

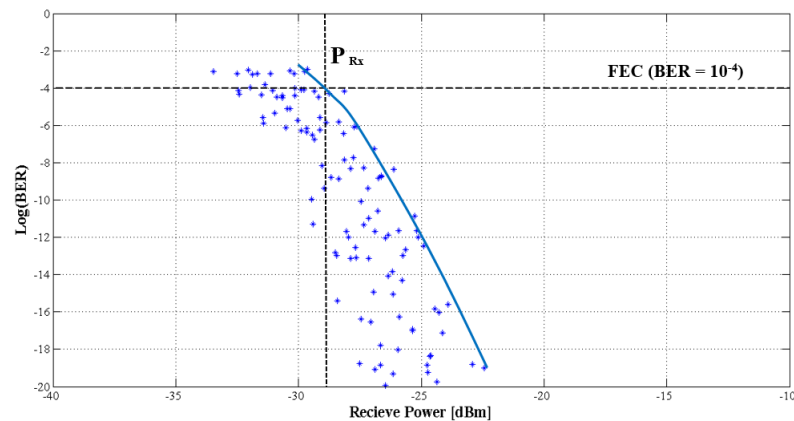
$$P_{Treal} = P_{Tcal} - P_{penalty} \quad (5-26)$$

$$P_{Treal} = 37.99 - 0.95 = 37.04dB \quad (5-27)$$

ดังนั้นระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ GaAs photonic crystal ( $\tau = 15$  ps) ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 37.04 dB

#### 5.3.4 GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW) ที่มี $\tau = 100$ ps

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx โดยคิดผลกระทบของ switching characteristic เมื่อใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับได้ดังนี้



รูปที่ 5. 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับเมื่อใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  เมื่อคิดที่ FEC ( $\text{BER} = 10^{-4}$ ) ได้เท่ากับ  $-28.96$  dBm จากนั้นนำค่ากำลังสัญญาณขารับจากการจำลองระบบไปคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) โดยระบบ FTTx ของสวิตช์ตัวนี้มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5. 5 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและ subscriber 5 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps)

FTTx/parameter	value	unit
Transmit power ( $P_{Tx}$ )	10	dBm
Receive power ( $P_{Rx}$ )	-28.96	dBm
Insertion loss ( $P_{insertion}$ )	$4 \times 1.5$	dB
Attenuation @1431 nm ( $\alpha$ )	0.243	dB/km
Loss of WSS ( $P_{wss}$ )	16.5	dB
System margin ( $G_{margin}$ )	3	dB

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 5.5 แล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

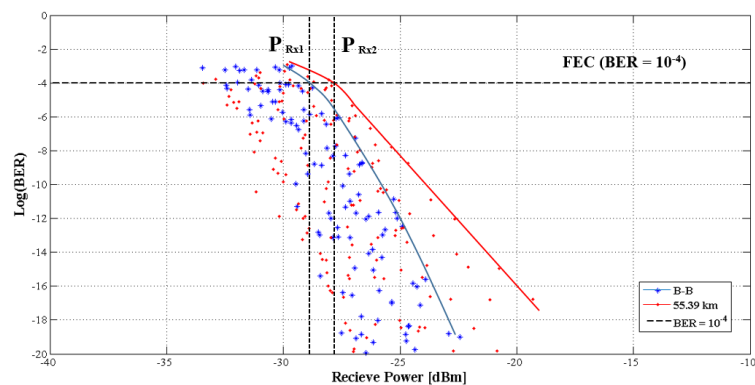
$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (5-28)$$

$$10 - (-28.96) = 0.243 \times L + (4 \times 1.5) + 16.5 + 3 \quad (5-29)$$

$$L = 55.39 \text{ km} \quad (5-30)$$

จากการคำนวณ power budget จะได้ค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) เท่ากับ 55.39 km จากนั้นนำความยาวเส้นใยแสงที่ได้ไปจำลองระบบ FTTx โดยผ่านเส้นใยแสงต่อไป

เมื่อได้ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) จากการคำนวณ power budget แล้ว จากนั้นนำความยาวของเส้นใยแสงไปจำลองระบบโดยผ่านเส้นใยแสง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับ ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) ออกมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ดังรูป



รูปที่ 5. 9 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) และผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากผลการจำลองระบบดังรูปที่ 5.9 จะได้ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) เท่ากับ  $-27.88$  dBm และนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-28.96$  dBm จากนั้นจะได้ค่า power penalty :  $P_{penalty}$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (5-31)$$

$$P_{penalty} = -27.88 - (-28.96) = 1.08 \text{ dB} \quad (5-32)$$

จากสมการจะได้ค่า power penalty เท่ากับ 1.08 dB

จากรูปที่ 5.9 เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) เท่ากับ  $-27.88$  dBm เราสามารถออกแบบระบบ FTTx ได้โดยการคำนวณค่า power budget เพื่อออกแบบระบบ FTTx โดยที่กำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx2}$ ) ไว้ที่ 10 dBm เราสามารถคำนวณค่า power budget ของระบบได้ดังสมการนี้

$$P_{T_{cal}} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (5-33)$$

$$P_{T_{cal}} = 10 - (-27.88) = 37.88 \text{ dB} \quad (5-34)$$

จากสมการเราจะได้อำนาจ power budget จากการคำนวณ ( $P_{T_{cal}}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาอำนาจ power budget ที่แท้จริงของระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

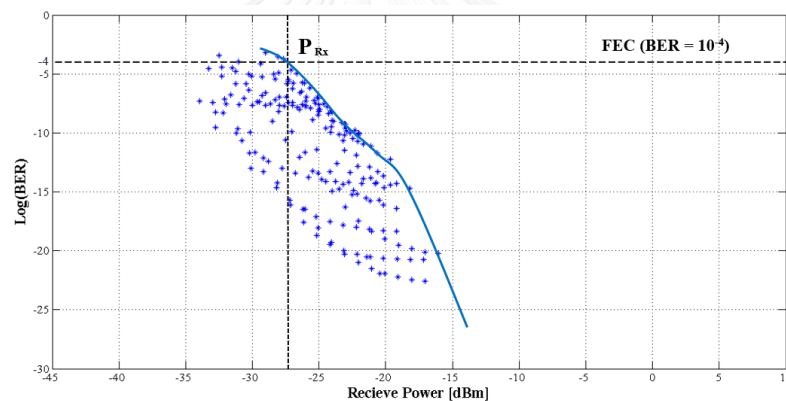
$$P_{T_{real}} = P_{T_{cal}} - P_{penalty} \quad (5-35)$$

$$P_{T_{real}} = 37.88 - 1.08 = 36.8 \text{ dB} \quad (5-36)$$

ดังนั้นระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ MQW ( $\tau = 100$  ps) ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย มีอำนาจ power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 36.8 dB

### 5.3.5 Semiconductor optical amplifier switch (SOA) ที่มี $\tau = 1$ ns

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx โดยคิดผลกระทบของ switching characteristic เมื่อใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับได้ดังนี้



รูปที่ 5. 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับเมื่อใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  เมื่อคิดที่ FEC ( $\text{BER} = 10^{-4}$ ) ได้เท่ากับ -27.28 dBm จากนั้นนำค่ากำลังสัญญาณขารับจากการจำลองระบบไปคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) โดยระบบ FTTx ของสวิตช์ตัวนี้มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5. 6 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและ subscriber 5 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns)

FTTx/parameter	value	unit
Transmit power ( $P_{Tx}$ )	10	dBm

Receive power ( $P_{Rx}$ )	-27.28	dBm
Insertion loss ( $P_{insertion}$ )	4 x1.5	dB
Attenuation @1431 nm ( $\alpha$ )	0.243	dB/km
Loss of WSS ( $P_{wss}$ )	0	dB
System margin ( $G_{margin}$ )	3	dB

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 5.6 แล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

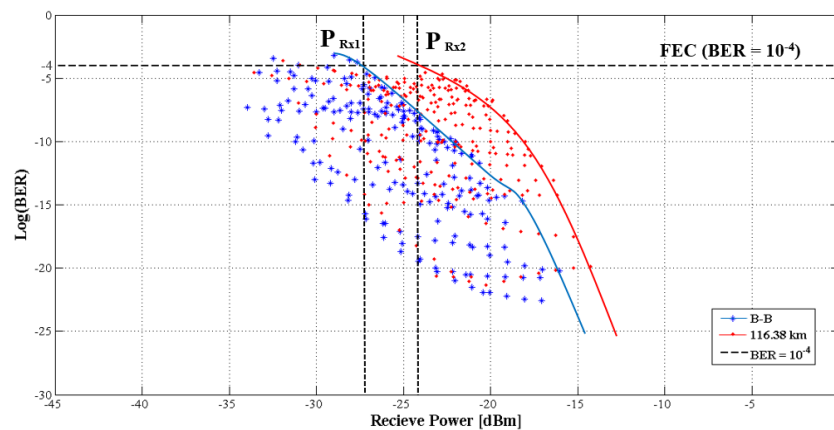
$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (5-37)$$

$$10 - (-27.28) = 0.243 \times L + (4 \times 1.5) + 0 + 3 \quad (5-38)$$

$$L = 116.38 \text{ km} \quad (5-39)$$

จากการคำนวณ power budget จะได้ค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) เท่ากับ 116.38 km จากนั้นนำความยาวเส้นใยแสงที่ได้ไปจำลองระบบ FTTx โดยผ่านเส้นใยแสงต่อไป

เมื่อได้ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) จากการคำนวณ power budget แล้ว จากนั้นนำความยาวของเส้นใยแสงไปจำลองระบบโดยผ่านเส้นใยแสง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับ ที่ FEC ( $\text{BER} = 10^{-4}$ ) ออกมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ดังรูป



รูปที่ 5. 11 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) และผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากผลการจำลองระบบดังรูปที่ 5.11 จะได้ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC (BER= $10^{-4}$ ) เท่ากับ -24.2 dBm และนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ -27.28 dBm จากนั้นจะได้ค่า power penalty :  $P_{penalty}$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (5-40)$$

$$P_{penalty} = -24.2 - (-27.28) = 3.08dB \quad (5-41)$$

จากสมการจะได้ค่า power penalty เท่ากับ 3.08 dB จากรูปที่ 5.11 เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC (BER= $10^{-4}$ ) เท่ากับ -24.2 dBm เราสามารถออกแบบระบบ FTTx ได้โดยการคำนวณค่า power budget เพื่อออกแบบระบบ FTTx โดยที่กำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx2}$ ) ไว้ที่ 10 dBm เราสามารถคำนวณค่า power budget ของระบบได้ดังสมการนี้

$$P_{Tcal} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (5-42)$$

$$P_{Tcal} = 10 - (-24.2) = 34.2dB \quad (5-43)$$

จากสมการเราจะได้ค่า power budget จากการคำนวณ ( $P_{Tcal}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า power budget ที่แท้จริงของระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{Treal} = P_{Tcal} - P_{penalty} \quad (5-44)$$

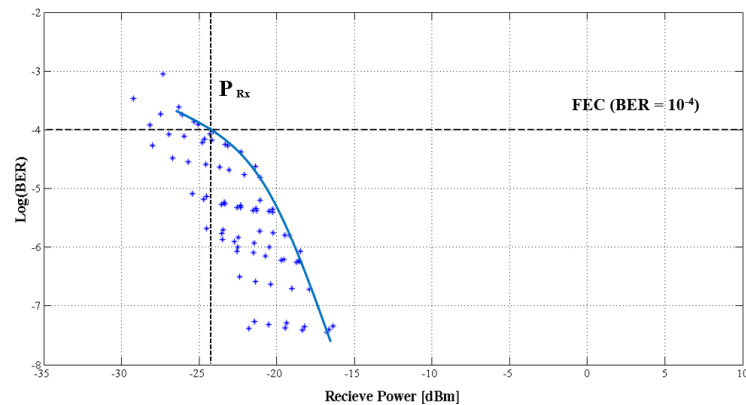
$$P_{Treal} = 34.8 - 3.08 = 31.72dB \quad (5-45)$$

ดังนั้นระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ SOA ( $\tau = 1$  ns) ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 31.72 dB

### 5.3.6 Electro-optic switch ที่มี $\tau = 5$ ns

การวิเคราะห์ผลการจำลองระบบ FTTx โดยคิดผลกระทบของ switching characteristic เมื่อใช้สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) ร่วมกับตัวควบคุม DWBA โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนกำลังสัญญาณขารับมีค่า BER ถึง  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับได้ดังนี้





รูปที่ 5. 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับของระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับเมื่อใช้สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) สามารถหาค่า  $P_{Rx}$  เมื่อคิดที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) ได้เท่ากับ -24.32 dBm จากนั้นนำค่ากำลังสัญญาณขารับจากการจำลองระบบไปคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) โดยระบบ FTTx ของสวิตช์ตัวนี้มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5. 7 ค่าพารามิเตอร์ในระบบ FTTx ที่มี 8 ความยาวคลื่นและsubscriber 5 ราย เมื่อใช้ WSS แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns)

FTTx/parameter	value	unit
Transmit power ( $P_{Tx}$ )	10	dBm
Receive power ( $P_{Rx}$ )	-24.32	dBm
Insertion loss ( $P_{insertion}$ )	4 x1.5	dB
Attenuation @1431 nm ( $\alpha$ )	0.243	dB/km
Loss of WSS ( $P_{wss}$ )	2	dB
System margin ( $G_{margin}$ )	3	dB

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 5.7 แล้ว จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ power budget เพื่อหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) ดังสมการต่อไปนี้

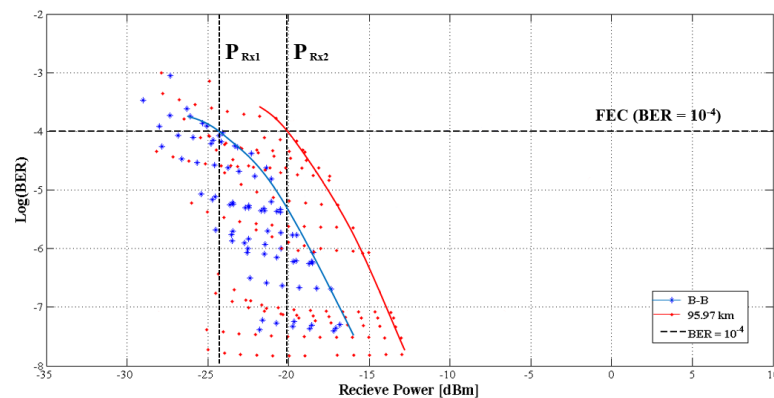
$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (5-46)$$

$$10 - (-24.32) = 0.243 \times L + (4 \times 1.5) + 2 + 3 \quad (5-47)$$

$$L = 95.97 \text{ km} \quad (5-48)$$

จากการคำนวณ power budget จะได้ค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) เท่ากับ 95.97 km จากนั้นนำความยาวเส้นใยแสงที่ได้ไปจำลองระบบ FTTx โดยผ่านเส้นใยแสงต่อไป

เมื่อได้ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการได้ ( $L$ ) จากการคำนวณ power budget แล้ว จากนั้นนำความยาวของเส้นใยแสงไปจำลองระบบโดยผ่านเส้นใยแสง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับ ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) ออกมา แล้วนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ไม่ผ่านเส้นใยแสง ดังรูป



รูปที่ 5. 13 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณที่ตัวรับแบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) และผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) เมื่อใช้สวิตช์แบบ electro-optic ( $\tau = 5$  ns) ที่มี 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย

จากผลการจำลองระบบดังรูปที่ 5.13 จะได้ค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) เท่ากับ -20.08 dBm และนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังสัญญาณแสงที่ตัวรับเมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx1}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ -24.32 dBm จากนั้นจะได้ค่า power penalty :  $P_{penalty}$  ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{penalty} = P_{Rx2} - P_{Rx1} \quad (5-49)$$

$$P_{penalty} = -20.08 - (-24.32) = 4.24 \text{ dB} \quad (5-50)$$

จากสมการจะได้ค่า power penalty เท่ากับ 4.24 dB

จากรูปที่ 5.13 เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณที่ตัวรับเมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC ( $\text{BER}=10^{-4}$ ) เท่ากับ -20.08 dBm เราสามารถออกแบบระบบ FTTx ได้โดยการคำนวณค่า power budget เพื่อออกแบบระบบ FTTx โดยที่กำหนดค่ากำลังของสัญญาณแสงที่ตัวส่ง ( $P_{Tx2}$ ) ไว้ที่ 10 dBm เราสามารถคำนวณค่า power budget ของระบบได้ดังสมการนี้

$$P_{Tcal} = P_{Tx2} - P_{Rx2} \quad (5-51)$$

$$P_{T_{cal}} = 10 - (-20.08) = 30.08dB \quad (5-52)$$

จากสมการเราจะได้อ่า power budget จากการคำนวณ ( $P_{T_{cal}}$ ) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า power budget ที่แท้จริงของระบบได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{T_{real}} = P_{T_{cal}} - P_{penalty} \quad (5-53)$$

$$P_{T_{real}} = 30.08 - 4.24 = 25.84dB \quad (5-54)$$

ดังนั้นระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตช์แบบ Electro-optic ( $\tau = 5$  ns) ร่วมกับ DWBA ที่มีจำนวน 8 ความยาวคลื่น และ subscriber 5 ราย มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 25.84 dB



## บทที่ 6

### อภิปรายผลการทดลองของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ชนิดต่างๆ ร่วมกับ DWBA โดยคิดผลของ switching characteristic

ในบทนี้จะอภิปรายผลจากการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ชนิดต่างๆ ร่วมกับตัวควบคุมแบบ DWBA โดยคิดผลของ switching characteristic ทั้ง 4 ความยาวคลื่นส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการ 10 ราย และ 8 ความยาวคลื่นส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการ 10 ราย เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง time constant กับ power penalty และความสัมพันธ์ระหว่าง time constant กับ power budget ของสวิตซ์ทั้ง 6 ชนิด

#### 6.1 ผลจากการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ชนิดต่างๆ ร่วมกับ DWBA

การออกแบบระบบ FTTx เมื่อใช้สวิตซ์ความยาวคลื่น WSS ร่วมกับตัวควบคุมแบบ DWBA ในขั้นตอนจำลองระบบ FTTx โดยไม่ผ่านเส้นใยแสง (b-b) โดยการจำลองเปลี่ยนค่ากำลังสัญญาณขาส่ง ( $P_{Tx}$ ) ไปเรื่อยๆ จนถึงกำลังขารับมีค่า BER =  $10^{-4}$  จากนั้นจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(\text{BER})$  และกำลังสัญญาณที่ขารับ และสามารถหาค่ากำลังสัญญาณขารับ ( $P_{Rx}$ ) เมื่อไม่ผ่านเส้นใยแสง ที่ FEC (BER =  $10^{-4}$ ) ของระบบ FTTx ที่ใช้ WSS แต่ละชนิดได้ดังนี้

ตารางที่ 6. 1 ค่ากำลังสัญญาณขารับ ( $P_{Rx}$ ) ของ WSS แต่ละชนิด เมื่อระบบไม่ผ่านเส้นใยแสง

Type of WSS	Time constant ( $\tau$ )	Receive power ( $P_{Rx}$ )	
		4 wavelength 10 subscriber	8 wavelength 5 subscriber
Photonic crystal switch	0.5 ps	-29.83 dBm	-29.02 dBm
Photonic crystal switch	1 ps	-29.8 dBm	-29 dBm
GaAs photonic crystal cavities switch	15 ps	-29.77 dBm	-28.94 dBm
GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	100 ps	-29.7 dBm	-28.96 dBm
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	1 ns	-28.82 dBm	-27.28 dBm
Electro-optic switch	5 ns	-23.6 dBm	-24.32 dBm

นำค่ากำลังสัญญาณขารับ ( $P_{Rx}$ ) ที่หาได้จากการจำลองระบบไปคำนวณหาค่า power budget ได้ดังสมการต่อไปนี้ เพื่อหาความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการ ( $L$ )

$$P_{Tx} - P_{Rx} = \alpha L + \sum P_{insertion} + P_{wss} + G_{margin} \quad (6-1)$$

จากสมการ power budget พบว่า ความยาวของเส้นใยแสง ( $L$ ) จะขึ้นอยู่กับกำลังสัญญาณขารับ ( $P_{Rx}$ ) และค่า insertion loss ของสวิตช์แต่ละชนิด ( $P_{wss}$ ) ซึ่งใน WSS แต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน ส่วนค่า attenuation ( $\alpha$ ) ขึ้นอยู่กับระบบ FTTx ถ้าเป็นระบบ 4 ความยาวคลื่น ผู้ให้บริการ 10 ราย จะใช้ความยาวคลื่นที่ 1471 nm ที่มี  $\alpha = 0.2127$  dB/km มาคำนวณ ถ้าเป็น 8 ความยาวคลื่น ผู้ให้บริการ 5 ราย จะใช้ความยาวคลื่นที่ 1431 nm ที่มี  $\alpha = 0.243$  dB/km มาคำนวณ

ตารางที่ 6. 2 ความยาวของเส้นใยแสงที่ให้บริการ ( $L$ ) ของระบบที่ใช้ WSS ชนิดต่างๆ

Type of WSS	Time constant ( $\tau$ )	Distance ( $L$ )	
		4 wavelength 10 subscriber	8 wavelength 5 subscriber
Photonic crystal switch	0.5 ps	69.72 km	57.7 km
Photonic crystal switch	1 ps	69.582 km	57.613 km
GaAs photonic crystal cavities switch	15 ps	69.44 km	57.37 km
GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	100 ps	66.76 km	55.39 km
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	1 ns	140.2 km	116.38 km
Electro-optic switch	5 ns	106.25 km	95.97 km

นำความยาวของเส้นใยแสงนี้ไปจำลองในระบบ FTTx อีกครั้ง โดยการจำลองเปลี่ยนค่า  $P_{Tx}$  ไปเรื่อยๆ จากนั้นจะได้ค่ากำลังสัญญาณขารับ ( $P_{Rx2}$ ) ที่ FEC (BER =  $10^{-4}$ ) เมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6. 3 ค่ากำลังสัญญาณขารับ ( $P_{Rx2}$ ) ของ WSS แต่ละชนิด เมื่อระบบผ่านเส้นใยแสง

Type of WSS	Time constant	Receive power ( $P_{Rx}$ )	
		4 wavelength	8 wavelength

	( $\tau$ )	10 subscriber	5 subscriber
Photonic crystal switch	0.5 ps	-29.17 dBm	-28.22 dBm
Photonic crystal switch	1 ps	-28.93 dBm	-28.18 dBm
GaAs photonic crystal cavities switch	15 ps	-28.77 dBm	-27.99 dBm
GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	100 ps	-28.33 dBm	-27.88 dBm
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	1 ns	-25 dBm	-24.2 dBm
Electro-optic switch	5 ns	-18.96 dBm	-20.08 dBm

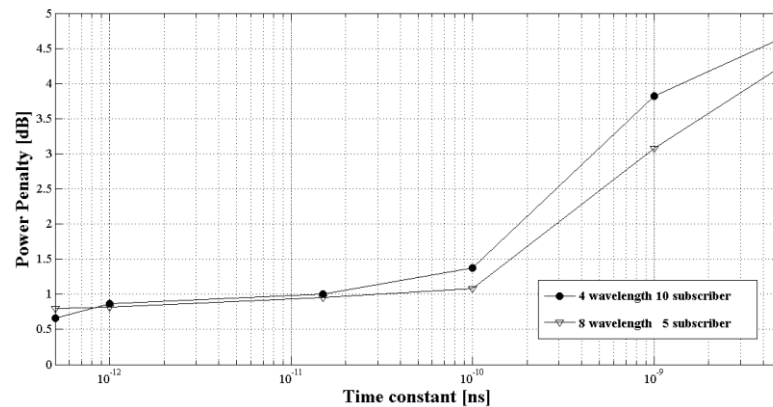
## 6.2 ความสัมพันธ์ของ power penalty และ time constant ของ WSS ชนิดต่างๆ

เมื่อได้ค่า power penalty ของระบบ FTTx ที่มี WSS แต่ละชนิด ทั้งในกรณีที่มีจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ 4 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการได้ 10 ราย และ 8 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการได้ 5 รายแล้ว จากนั้นนำค่า power penalty และ time constant ของสวิตช์ทั้ง 6 ชนิดมาเปรียบเทียบกัน ซึ่ง WSS แต่ละชนิดมีค่า time constant และ power penalty ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6. 4 ค่า time constant และ power penalty ของสวิตช์แต่ละชนิด

Type of WSS	Time constant ( $\tau$ )	Power Penalty [dB]	
		4 wavelength 10 subscriber	8 wavelength 5 subscriber
Photonic crystal switch	0.5 ps	0.66 dB	0.8 dB
Photonic crystal switch	1 ps	0.87 dB	0.82 dB
GaAs photonic crystal cavities switch	15 ps	1 dB	0.95 dB
GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	100 ps	1.37 dB	1.08 dB
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	1 ns	3.82 dB	3.08 dB
Electro-optic switch	5 ns	4.64 dB	4.24 dB

จากตารางที่ 6.4 แสดงค่าของ time constant และ power penalty ของสวิตช์แต่ละชนิด สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของ time constant ( $\tau$ ) และ power penalty ( $P_{penalty}$ ) ทั้งระบบที่มีความยาวคลื่นทั้งหมด 4 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการได้ 10 ราย และ 8 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการได้ 5 ราย ได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง time constant และ power penalty ของสวิตช์แต่ละชนิด

จากรูปความสัมพันธ์ระหว่าง time constant และ power penalty ของสวิตช์ทั้ง 6 ชนิด สามารถสรุปได้ว่า WSS ที่มีค่า time constant มาก จะส่งผลให้ค่า power penalty มากกว่า WSS ที่มีค่า time constant น้อย เนื่องจาก ถ้า time constant มากขึ้น เวลาในการสับสวิตช์จะช้าลง ส่งผลให้ในกราฟ eye diagram มีจำนวนบิตที่ทำให้ pulse ต่ำลงอยู่มาก ทำให้คุณภาพของสัญญาณต่ำลง ซึ่ง time constant จะส่งผลกระทบต่อทั้งในกรณีที่มีเส้นใยแสงและไม่มีเส้นใยแสง ส่วน power penalty มีเฉพาะในระบบที่มีเส้นใยแสงเท่านั้น เนื่องจากในเส้นใยแสงมีผลกระทบจาก dispersion ที่ส่งผลให้ pulse ขยายตัวกว้างขึ้น และ attenuation ที่ส่งผลให้กำลังสัญญาณถูกลดทอน pulse จึงต่ำลง ทั้งสองปัจจัยนี้มีผลทำให้คุณภาพสัญญาณต่ำลงเช่นกัน เมื่อรวมกับผลของ power penalty แล้ว time constant จะส่งผลให้คุณภาพสัญญาณต่ำลงไปอีก ดังนั้น WSS แบบ Photonic crystal switch ( $\tau = 0.5$  ps) มีค่า power penalty น้อยที่สุด ส่วน WSS แบบ Electro-optic switch ( $\tau = 5$  ns) มีค่า power penalty มากที่สุด

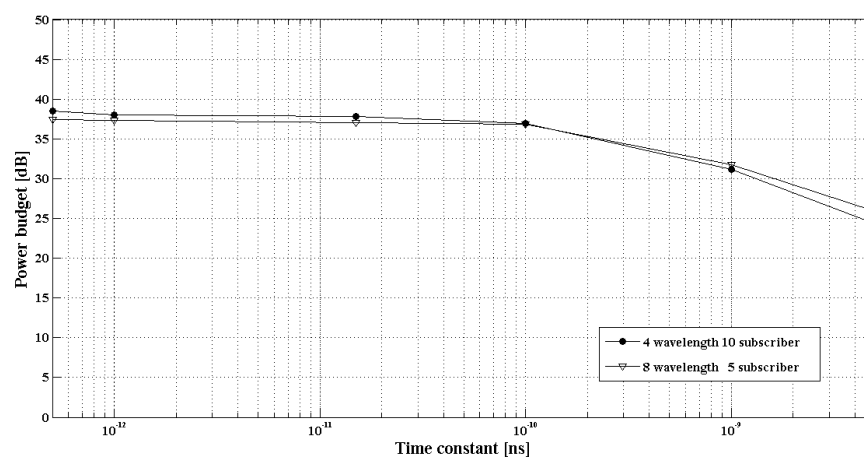
### 6.3 ความสัมพันธ์ของ power budget ที่แท้จริงของระบบและ time constant ของ WSS ชนิดต่างๆ

เมื่อได้ค่า power budget ที่ได้จากการคำนวณ ( $P_{T_{cal}}$ ) ลบด้วยค่า power penalty ( $P_{penalty}$ ) ของระบบที่ใช้สวิตช์แต่ละชนิด จะได้ค่า power budget แท้จริงของระบบ ( $P_{T_{real}}$ ) มาเปรียบเทียบกับดังตารางที่ 6.5 เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง power budget ที่แท้จริงของระบบและ time constant ของ WSS แต่ละชนิด

ตารางที่ 6. 5 ค่า time constant และ power budget ที่แท้จริงของระบบที่ใช้ WSS แต่ละชนิด

Type of WSS	Time constant ( $\tau$ )	Power budget ( $P_{T_{real}}$ )	
		4 wavelength 10 subscriber	8 wavelength 5 subscriber
Photonic crystal switch	0.5 ps	38.51 dB	37.42 dB
Photonic crystal switch	1 ps	38.06 dB	37.36 dB
GaAs photonic crystal cavities switch	15 ps	37.77 dB	37.04 dB
GaInAs/InP multiple quantum well switch (MQW)	100 ps	36.96 dB	36.8 dB
Semiconductor optical amplifier switch (SOA)	1 ns	31.18 dB	31.72 dB
Electro-optic switch	5 ns	24.32 dB	25.84 dB

จากตารางที่ 6.5 แสดงค่าของ time constant และ power budget ที่แท้จริงของระบบที่ใช้สวิตช์แต่ละชนิด สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของ time constant ( $\tau$ ) และ power budget ที่แท้จริง ( $P_{T_{real}}$ ) ทั้งระบบที่มีความยาวคลื่นทั้งหมด 4 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการได้ 10 ราย และ 8 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ใช้บริการได้ 5 รายได้ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6. 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง time constant และ power budget ที่แท้จริงของระบบ

จากรูปความสัมพันธ์ระหว่าง time constant และ power budget ที่แท้จริงของระบบที่ใช้ WSS ทั้ง 6 ชนิดสามารถสรุปได้ว่า WSS ที่มีค่า time constant มากขึ้น จะส่งผลให้ power budget ที่แท้จริงของระบบมีค่าน้อยลง เนื่องจากผลที่สืบเนื่องมาจากค่า power penalty ในรูปที่ 6.1 ที่แสดงให้



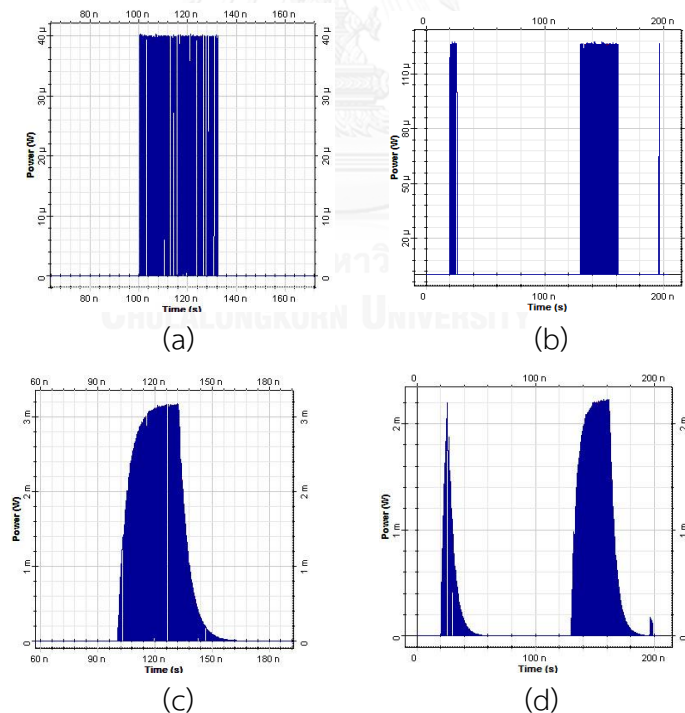
เห็นว่า ถ้า time constant มาก power penalty จะมากขึ้นด้วย แต่จะทำให้ค่า power budget ลดลง ส่งผลให้คุณภาพสัญญาณต่ำลงเช่นกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสมการที่ (6-2)

$$P_{T_{real}} = P_{T_{cal}} - P_{penalty} \quad (6-2)$$

ดังนั้น WSS แบบ Photonic crystal switch ( $\tau = 0.5$  ps) มีค่า power budget มากที่สุด ส่วน WSS แบบ Electro-optic switch ( $\tau = 5$  ns) มีค่า power budget น้อยที่สุด

#### 6.4 วิเคราะห์ผลกระทบของ time constant จาก time domain และ eye diagram

ในการสับสวิตช์โดยปกติแล้วควรมีเวลาในการสับสวิตช์ (switching time) ไม่ควรเกินค่า time constant ( $\tau$ ) ของสวิตช์แต่ละชนิด เพราะจะทำให้สัญญาณที่ออกมาไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ซึ่งเกิดจากกำลังสัญญาณยังไม่ถึงจุดสูงสุด แต่ต้องสับสวิตช์ให้ผู้ใช้บริการรายอื่นแล้ว นอกจากนี้ ผู้ใช้บริการต้องการใช้สัญญาณในรูปแบบที่หลากหลาย ทำให้ไม่สามารถทราบถึงความถี่ในการใช้สัญญาณ เวลาในการสับสวิตช์ไปให้ผู้ใช้บริการรายอื่น และการเลือกใช้ WSS ที่มีค่า time constant ต่างๆ ให้เหมาะสมความต้องการของผู้ใช้บริการ ซึ่งหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการเปรียบเทียบค่า time constant ต่ำสุด ( $\tau = 0.5$  ps) และสูงสุด ( $\tau = 5$  ns) จาก time domain ดังรูปต่อไปนี้

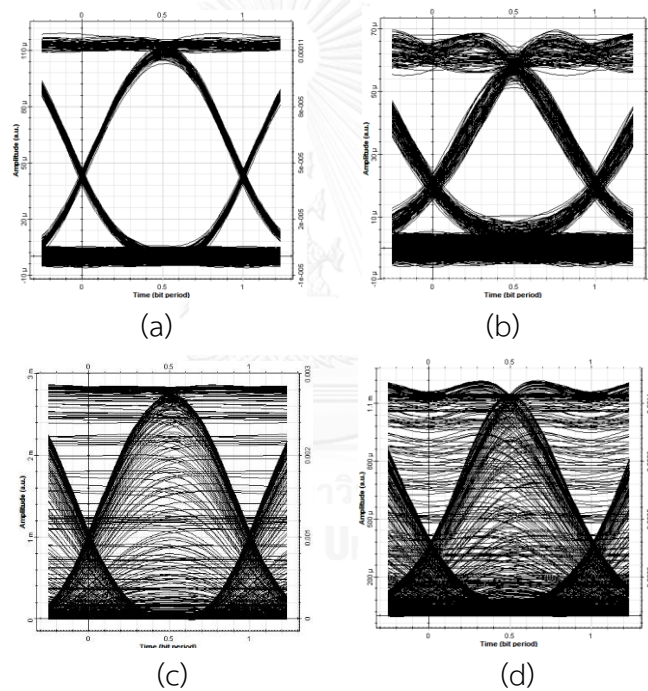


รูปที่ 6.3 time domain ของ WSS ที่มีค่า  $\tau$  ต่างกัน (a), (b)  $\tau = 0.5$  ps และ (c), (d)  $\tau = 5$  ns

จากรูปที่ 6.3 แสดงถึงเวลาและความถี่ในการใช้สัญญาณของผู้ใช้บริการ สังเกตได้ว่า WSS ที่มีค่า time constant ต่ำสุด ( $\tau = 0.5$  ps) ดังรูป (a) และ (b) จะมีรูปกราฟใกล้เคียงรูปสี่เหลี่ยม

เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการสับสวิตช์ได้เร็วมาก ผลกระทบที่ได้จาก switching characteristic มีน้อย ในรูป (a) และ (b) เป็นการยกตัวอย่างที่แสดงถึงความถี่ในการใช้สัญญาณที่แตกต่างกัน ในความจริงแล้วความถี่ในการใช้สัญญาณของผู้บริโภคอาจจะมากหรือน้อยกว่านี้ก็ได้ ส่วน WSS ที่มีค่า time constant สูงสุด ( $\tau = 5$  ns) ดังรูป (c) และ (d) จะมีรูปกราฟโค้งๆคล้ายฟันเลื่อย เนื่องจากเวลาในการสับสวิตช์ค่อนข้างช้ากว่า ทำให้ช่วงการสับสวิตช์ตอนแรกกราฟค่อยๆขึ้นอย่างเอกซ์โพเนนเชียลจนถึงจุดที่ต้องสับสวิตช์ไปให้ผู้ใช้บริการรายอื่นกราฟจะตกลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเช่นกัน ซึ่งได้รับผลกระทบจาก switching characteristic มาก ในรูป (c) และ (d) เป็นการยกตัวอย่างที่แสดงถึงความถี่ในการใช้สัญญาณที่แตกต่างกันเช่นกัน

การวิเคราะห์ผลกระทบของ time constant จาก eye diagram โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่า time constant ต่ำสุด ( $\tau = 0.5$  ps) และสูงสุด ( $\tau = 5$  ns) ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 6.4 eye diagram ของ WSS ที่มีค่า  $\tau = 0.5$  ps (a) ไม่ผ่านเส้นใยแสง (b) ผ่านเส้นใยแสง และ  $\tau = 5$  ns (c) ไม่ผ่านเส้นใยแสง (d) ผ่านเส้นใยแสง

จากรูป eye diagram ที่ 6.4 แสดงถึงผลกระทบของค่า time constant ต่อประสิทธิภาพของสัญญาณ ทั้งในกรณีที่ผ่านมาเส้นใยแสงและไม่ผ่านเส้นใยแสง กล่าวคือ กรณีค่า time constant น้อยสุด ( $\tau = 0.5$  ps) โดยไม่ผ่านเส้นใยแสงดังรูป (a) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณดีที่สุด เนื่องจากผลกระทบของ switching characteristic มีน้อย และยังไม่มียผลกระทบจากเส้นใยแสงด้วย เมื่อเพิ่มเส้นใยแสงเข้าไปในระบบดังรูป (b) ทำให้ประสิทธิภาพของสัญญาณลดลง เพราะว่ามีผลกระทบจาก attenuation ที่ลดทอนกำลังสัญญาณ และ dispersion ของเส้นใยแสงที่ทำให้ pulse

ขยายตัวกว้างขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณต่ำลง ส่วนในกรณีค่า time constant มากสุด ( $\tau = 5$  ns) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณต่ำที่สุด เนื่องจาก ถ้า time constant มากขึ้น เวลาในการสับวิตช์จะช้าลง ส่งผลให้ในกราฟ eye diagram มีจำนวนบิตที่ทำให้ pulse ต่ำลงอยู่ มาก ทำให้ประสิทธิภาพของสัญญาณต่ำลง ซึ่ง time constant จะส่งผลกระทบต่อทั้งในกรณีที่ไม่มีเส้น โยแสงดังรูป (c) และมีเส้นโยแสงดังรูป (d) โดยที่การเพิ่มเส้นโยแสงเข้าสู่ระบบจะส่งผลให้ ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณต่ำไปกว่าเดิมอีก

ดังนั้น WSS ที่มีค่า time constant ( $\tau$ ) เท่ากับ 0.5 ps จะมีประสิทธิภาพในการส่ง สัญญาณได้ดีที่สุด และ WSS ที่มีค่า time constant ( $\tau$ ) เท่ากับ 5 ns จะมีประสิทธิภาพในการส่ง สัญญาณได้ต่ำสุด นอกจากนี้ ความถี่หรือความบ่อยในการสับวิตช์ ไม่ได้ผลต่อ BER โดยตรง แต่ ขึ้นอยู่กับความถี่การสับวิตช์ให้ผู้ใช้บริการรายอื่นแล้วสัญญาณทับกับสัญญาณเดิมบ่อยไหม ซึ่งการ ทับกันของสัญญาณทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ เพราะได้รับสัญญาณรบกวน crosstalk จาก ผู้ใช้บริการรายอื่น ทำให้ประสิทธิภาพของสัญญาณลดลง BER จึงมีค่าน้อยลง แต่ถ้าไม่มีการทับกัน ของสัญญาณ ไม่ว่าจะสับวิตช์บ่อยเท่าไร ก็ไม่ทำให้ประสิทธิภาพของสัญญาณต่ำลงกว่าเดิม

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การสื่อสารผ่านเส้นใยแสงด้วยความเร็วสูงที่ใช้ในปัจจุบัน คือ การสื่อสารผ่านโครงข่าย FTTx ที่เชื่อมโยงผู้ใช้บริการเข้ากับโครงข่ายหลักด้วยเส้นใยแสงความเร็วสูง โดยมีอัตราข้อมูลสูงถึง 10 Gbps ภายใต้มาตรฐาน 10GE-PON และ XG-PON ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีระบบ TDM-PON ที่แชร์อัตราข้อมูลกันทางเวลา และระบบ WDM-PON ที่จัดสรรอัตราข้อมูลในรูปแบบความยาวคลื่นที่ต่างกัน 1 ความยาวคลื่นให้ผู้ใช้บริการแต่ละราย เพื่อตอบสนองการใช้แบนด์วิธของผู้บริโภค แต่ในอนาคตอันใกล้นี้มีแนวโน้มที่ผู้บริโภคใช้อัตราแบนด์วิธมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดปัญหาแบนด์วิธที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานของผู้บริโภค

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอระบบที่ช่วยแก้ปัญหาแบนด์วิธที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน คือ ระบบ FTTx ทำงานร่วมกับ DWBA เพื่อควบคุมการจัดสรรความยาวคลื่นบนสวิตช์ความยาวคลื่น (WSS) ซึ่งจะนำมาใช้แทนที่ passive optical splitter ที่ใช้ในระบบ PON แบบเดิม ภายใต้การทำงานของ DWBA จำนวนความยาวคลื่นที่เหมาะสมของ CWBA ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน จะถูกสร้างขึ้นภายใต้การร้องขออัตราการส่งข้อมูลแบบไดนามิกจากผู้ให้บริการต่างๆ โดยการจำลองระบบบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อไม่คิดผลกระทบของ switching characteristic ซึ่งผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อไม่คิดผลของ switching characteristic นี้สามารถส่งอัตราการส่งข้อมูลได้สูงสุดถึง 160 Gbps กล่าวคือ ใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด 16 ความยาวคลื่น CWDM ในช่วง 1271-1571 nm โดยที่อัตราข้อมูลต่อความยาวคลื่นเป็น 10 Gbps ไปสู่ผู้ใช้บริการเพียงคนเดียวได้รับความประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี ซึ่งจะมีระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุดเท่ากับ 55.2 km ในกรณีที่มี FEC (BER =  $10^{-4}$ ) และ 47.6 km ในกรณีที่ไม่มี FEC (BER =  $10^{-9}$ )

จากผลการจำลองระบบ FTTx ทำให้พบว่ามี 2 ปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อการจำกัดสมรรถนะของระบบ คือ การลดทอนกำลังของสัญญาณ (attenuation) , การดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (fiber dispersion) ซึ่งในช่วงความยาวคลื่น 1271-1471 nm จะมีผลกระทบจาก attenuation มากกว่า dispersion ส่วนในช่วงความยาวคลื่น 1491-1571 nm จะมีผลกระทบของ dispersion มากกว่า attenuation และปัจจัยหลักที่สำคัญในการจำกัดสมรรถนะของระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA คือ การลดทอนของสัญญาณเส้นใยแสง ที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 1271 nm จะมากกว่า การดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 1571 nm ระยะทางการส่งสัญญาณสูงสุดของระบบ FTTx สามารถเพิ่มสมรรถนะในการส่งสัญญาณได้โดย การลดลงของจำนวนความ

ยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งสัญญาณ หรือลดลงของการอนุญาตการส่งอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดจากผู้ให้บริการ

อย่างไรก็ตามระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA โดยไม่คิดผลของ switching characteristic จะสามารถส่งอัตราข้อมูลได้สูงสุดถึง 160 Gbps แต่ในความเป็นจริง WSS ทุกชนิดจะมีผลของ switching characteristic และ time constant ด้วย ทำให้การส่งสัญญาณอาจจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าถ้าเทียบกับสวิตช์ในอุดมคติที่ไม่คิดผลของ switching characteristic ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ จึงนำเสนอระบบ FTTx ซึ่งใช้ WSS ร่วมกับ DWBA โดยคิดผลกระทบ switching characteristic และ time constant ของสวิตช์แต่ละชนิด เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ให้บริการ และสามารถใช้งานได้จริงในปัจจุบันและในอนาคต ซึ่งระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA แบ่งตามลักษณะการใช้อัตราข้อมูลและจำนวนผู้ให้บริการออกเป็น 2 ระบบ ซึ่งแต่ละระบบแบ่ง WSS ออกเป็น 6 ชนิด

ระบบแรก เป็นระบบที่มีจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ 4 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ให้บริการได้มากที่สุด 10 ราย ซึ่งเหมาะกับสถานที่ที่มีผู้ให้บริการมากแต่ต้องการใช้อัตราข้อมูลน้อย กรณีนี้สามารถส่งอัตราข้อมูลได้สูงถึง 40 Gbps ใช้ความยาวคลื่น CWDM ในช่วง 1471-1531 nm และสามารถแบ่ง WSS ที่ใช้งานออกเป็น 6 ชนิด คือ

- photonic crystal switch ที่มี  $\tau = 0.5$  ps มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 38.51 dB และค่า power penalty เท่ากับ 0.66 dB
- photonic crystal switch ที่มี  $\tau = 1$  ps มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 38.06 dB และค่า power penalty เท่ากับ 0.87 dB
- GaAs photonic crystal cavities switch ที่มี  $\tau = 15$  ps มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 37.77 dB และค่า power penalty เท่ากับ 1 dB
- MQW switch ที่มี  $\tau = 100$  ps มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 36.96 dB และค่า power penalty เท่ากับ 1.37 dB
- SOA switch ที่มี  $\tau = 1$  ns มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 31.18 dB และค่า power penalty เท่ากับ 3.82 dB
- electro-optic switch ที่มี  $\tau = 5$  ns มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 24.32 dB และค่า power penalty เท่ากับ 4.64 dB

ระบบที่สอง เป็นระบบที่มีจำนวนความยาวคลื่นทั้งหมดในระบบ 8 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลให้ผู้ให้บริการได้มากที่สุด 5 ราย ซึ่งเหมาะกับสถานที่ที่มีผู้ให้บริการน้อยแต่ต้องการใช้อัตราข้อมูล

มาก กรณีนี้สามารถส่งอัตราข้อมูลได้สูงถึง 80 Gbps ใช้ความยาวคลื่น CWDM ในช่วง 1431-1571 nm

- photonic crystal switch ที่มี  $\tau = 0.5$  ps มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 37.42 dB และค่า power penalty เท่ากับ 0.8 dB
- photonic crystal switch ที่มี  $\tau = 1$  ps มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 37.36 dB และค่า power penalty เท่ากับ 0.82 dB
- GaAs photonic crystal cavities switch ที่มี  $\tau = 15$  ps มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 37.04 dB และค่า power penalty เท่ากับ 0.95 dB
- MQW switch ที่มี  $\tau = 100$  ps มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 36.8 dB และค่า power penalty เท่ากับ 1.08 dB
- SOA switch ที่มี  $\tau = 1$  ns มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 31.72 dB และค่า power penalty เท่ากับ 3.08 dB
- electro-optic switch ที่มี  $\tau = 5$  ns มีค่า power budget ที่แท้จริงของระบบ เท่ากับ 25.84 dB และค่า power penalty เท่ากับ 4.24 dB

จากผลการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA โดยคิดผลของ switching characteristic พบว่า ค่า time constant เป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อระบบ ถ้า time constant มากขึ้น เวลาในการสับสวิตช์จะช้าลง ส่งผลให้ในกราฟ eye diagram มีจำนวนบิตที่ทำให้ pulse ต่ำลงอยู่มาก ทำให้ประสิทธิภาพของสัญญาณลดลง จากผลการคำนวณค่า power penalty และ power budget ของ WSS ชนิดต่างๆ สามารถสรุปได้ว่า WSS ที่มีค่า time constant มากขึ้น จะส่งผลให้ค่า power penalty มากขึ้น แต่ค่า power budget ที่แท้จริงของระบบมีค่าน้อยลง ทั้งในกรณี 4 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลถึงผู้ใช้บริการ 10 ราย และกรณี 8 ความยาวคลื่น ส่งอัตราข้อมูลถึงผู้ใช้บริการ 5 ราย

### ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการนำความยาวคลื่นแบบ Super channel มาปรับใช้ให้เหมาะสมกับระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์การใช้งานได้หลากหลายยิ่งขึ้น

## รายการอ้างอิง

1. David Boraks, *As movies and gaming grow, MI-Connection adds capacity* [online]. Available from : <http://davidsonnews.net/blog/2011/12/20/as-web-movies-gaming-grow-mi-connection-adds-capacity/>. [2011, Dec 20].
2. cisco, *Fiber to the home* [online]. Available from : [http://www.cisco.com/web/HR/expo08/pdf/Thomas\\_Martin\\_Fiber\\_To\\_The\\_Home.pdf](http://www.cisco.com/web/HR/expo08/pdf/Thomas_Martin_Fiber_To_The_Home.pdf).
3. lcdtvthailand, *4k Ultra High Definition* [online]. Available from : [http://www.lcdtvthailand.com/article/detail.asp?param\\_id=1484](http://www.lcdtvthailand.com/article/detail.asp?param_id=1484). 2013, Nov 13.
4. howstuffworks, *How Machine-to-Machine Communication Works* [online]. Available from : <http://computer.howstuffworks.com/m2m-communication.htm>.
5. พสุ แก้วปลั่ง, *Semiconductor Electronics plus*. 2554: p. 121-130.
6. อธิคม ฤกษ์บุตร, *FTTH – Fiber – To – The – Home*. 2549.
7. udontech, *การประยุกต์ใช้เส้นใยนำแสงในระบบโทรคมนาคม chapter8* [online] Available from : [www.udontech.ac.th/web54/media/download/en/en-8.pdf](http://www.udontech.ac.th/web54/media/download/en/en-8.pdf).
8. หลักการรับ-ส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง, [online] Available from : <http://www.udontech.ac.th/web55/media/download/en/en3.pdf>.
9. Md.ShaminAhsan, *Migration to the next generation optical access networks using hybrid WDM/TDM-PON*. journal of networks, Jan 2011. **vol.6**(no.1).
10. IEEE Standard for Information Technology, *Telecommunications and Information Exchange Between Systems—Local and Metropolitan Area Networks—Specific Requirements Part 3: Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks, IEEE Standard 802.3av*.
11. F. J. Effenberger and K. W. Lu, “An Overview of FTTH Networks - Past History, Current Status, and Future Designs”. SPIE Proceeding. **vol. 2917**: p. 293-304.

12. TESTING FTTx PON Description of the technology, *devices for FTTH, FTTB, FTTC, BPON, GPON, EPON*. [online]. Available: [http://www.tehencom.com/Technologies/FTTx\\_PON/FTTx\\_PON.htm](http://www.tehencom.com/Technologies/FTTx_PON/FTTx_PON.htm).
13. GRAHAM FINNIE, "FTTH in Europe :Forecast& Prognosis, 2006-2011," HEAVY READING [online]. Available: [http://www.ftthcouncil.eu/documents/Reports/Market\\_Forecast\\_January\\_2005.pdf](http://www.ftthcouncil.eu/documents/Reports/Market_Forecast_January_2005.pdf).
14. Graham Finnie, "European FTTH Forecast, 2010-2015", in FTTH Council Conference. Milan
15. Keiser, G., *Optical fiber communications* 3rd edition ed. 2000: McGraw Hill.
16. macro communication, "optical fiber", [online]. Available: [http://macao.communications.museum/eng/exhibition/secondfloor/moreinfo/2\\_8\\_3\\_OpticalFibres.html](http://macao.communications.museum/eng/exhibition/secondfloor/moreinfo/2_8_3_OpticalFibres.html).
17. นายสรวิชัย ว่องรัตนากุล, "เทคโนโลยี WAN", [online] . Available from : <http://www.rjasit.ac.th/Project-Teacher/2104-2221/Knowledge/Content008.pdf>.
18. Nick Massa, "Fiber Optic Telecommunication" *Fundamentals of photonics, Module 1.8* [online]. Available from: <http://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2008.pdf>.
19. Sen Zhang, *Advanced Optical Modulation formats in High-speed Lightwave System*. Msc, Department of Electrical Engineering and Computer Science and the Faculty of the Graduate School of the University of Kansas.
20. Parente, F., "Cross effects in services over PON", in *Departamento de Electrónica Telecomunicações e Informática*. 2010.
21. Peter J. Winzer, a.R.-J.E., *Advanced Optical Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks*. *Journal of Lightwave Technology*, December 2006. **Vol.24, No.12**.
22. ITU-T Rec. G.652, "Characteristics of a single-mode optical fibre and cable". June. 2005.
23. Keiichi Nashimoto, "ano Nano Nano-Speed PLZT Optical Switches", [online]. Available: [http://www.nren.nasa.gov/workshops/pdfs9/PanelE\\_OpticalSwitches-Nashimoto.pdf](http://www.nren.nasa.gov/workshops/pdfs9/PanelE_OpticalSwitches-Nashimoto.pdf).



24. Ravinder Yadav, R.R.A., “*Survey and Comparison of Optical Switch Fabrication Techniques and Architectures*”. *Journal of computing*, April 2010. **vol. 2**(Issue 4).
25. Xifang Zhang, Z.F., Jidong Xu and Marek Hajduczenia,, *Power Budget Extender For EPON, IEEE 802.3 interim meeting, Minneapolis, MN, USA*. May, 2012.
26. *Power Budget Calculations for GarrettCom Inc. Fiber Transceivers [online]* Available: [www.garrettcom.com/techsupport/power\\_budget.pdf](http://www.garrettcom.com/techsupport/power_budget.pdf). May 2010.
27. *Telecom Asia.10G EPON- Unleashing the Bandwidth Potential.[online]*. Available: [www.telecomasia.net/pdf/ZTE/ZTE\\_101909.pdf](http://www.telecomasia.net/pdf/ZTE/ZTE_101909.pdf).
28. Joris Van Campenhout, W.M.J.G., Solomon Assefa, and Yurii A. M. and Shami, A.,, “*Low-power, 2x2 silicon electro-optic switch with 110-nm bandwidth for broadband reconfigurable optical networks*”. *Optics Express*, 21 December 2009. **Vol. 17**(Issue 26): p. 24020-24029.
29. Thorlabs, “*SOA1013SXS - 1550 nm Polarization-Independent Optical Shutter/Switch, Butterfly, SMF, FC/APC*”, [online]. Available: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SOA1013SXS>.
30. S.Ponmalar, S.S., “*Design of Ultra Fast Polymer Electro-Optic waveguide Switch for Intelligent Optical Networks*”. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 21 April 2009. **Vol.3**



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

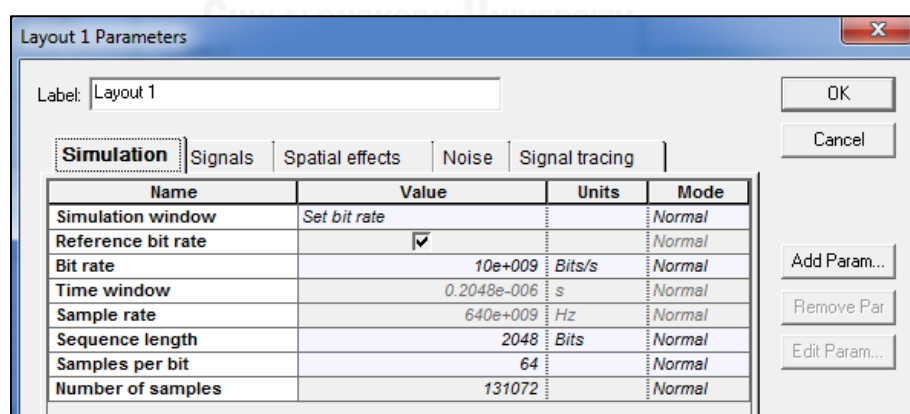
## ภาคผนวก ก

### แบบจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ที่ใช้ใน simulation

ภาคผนวกนี้จะแสดงถึงแบบจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับตัวควบคุมแบบ DWBA โดยจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ optisystem software version 10.0 และการตั้งค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบทั้งระบบ FTTx แบบ 4 ความยาวคลื่น ผู้ให้บริการ 10 ราย และ 8 ความยาวคลื่น ผู้ให้บริการ 5 ราย ในส่วนแรกจะกล่าวถึง การกำหนดค่าพารามิเตอร์หลักของระบบ หรือที่เรียกว่า global parameter ส่วนที่ 2 กล่าวถึง OLT ที่ประกอบไปด้วยตัวส่งสัญญาณแสง ส่วนที่ 3 กล่าวถึง เส้นใยแสงแบบ SMF ITU-T G.652.D ที่ใช้ในระบบนี้ ส่วนที่ 4 กล่าวถึง WSS เป็นส่วนที่ใช้ matlab ในการเขียนโปรแกรมเพื่อเชื่อมต่อกับ optisys และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึง ONU ที่ประกอบด้วยตัวรับสัญญาณแสง วงจรกรองผ่านต่ำ และอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราบิตผิดพลาด

#### Global parameter

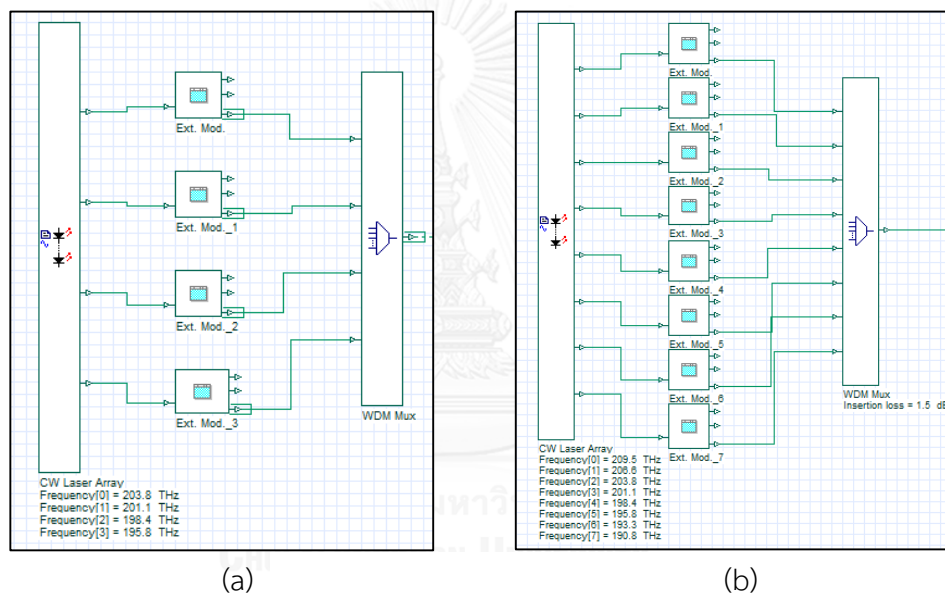
ในการจำลองระบบทุกครั้ง ควรเริ่มกำหนดค่า global parameter ของระบบก่อน ได้แก่ ค่าอัตราบิตของระบบ (bit rate) จำนวนบิตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (sequence length) และอัตราการสุ่มในช่วงเวลา 1 คาบบิต (sample per bit) ซึ่งการจำลองระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA แสดงค่า global parameter ดังรูปที่ ก.1 โดยมี bit rate เท่ากับ 10 Gbps sequence length เท่ากับ 2048 บิต และจำนวน sample per bit เท่ากับ 64 ตามลำดับ



รูปที่ ก. 1 ค่า global parameter ที่กำหนดในระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA

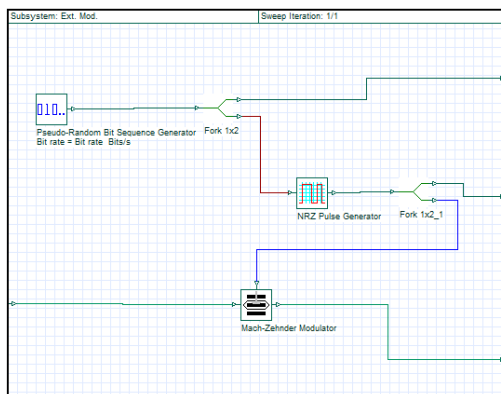
## OLT

ในส่วนของ OLT จะประกอบด้วยอาร์เรย์ของ CWDM continuous-wave laser ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง ในกรณีของระบบ 4 ความยาวคลื่น ผู้ให้บริการ 10 ราย แสดงดังรูป ก.2 (a) CW laser จะสร้างความยาวคลื่น CWDM 4 ความยาวคลื่น ได้แก่ 1471, 1491, 1511 และ 1531 nm ในที่นี้จะใช้ในรูปแบบความถี่แทน ได้แก่ 203.8, 201.1, 198.4 และ 195.8 THz ตามลำดับ ส่วนในกรณีของระบบ 8 ความยาวคลื่น ผู้ให้บริการ 5 ราย แสดงดังรูป ก.2 (b) CW laser จะสร้างความยาวคลื่น CWDM 8 ความยาวคลื่น ได้แก่ 1431, 1451, 1471, 1491, 1511, 1531, 1551 และ 1571 nm ในที่นี้จะใช้ในรูปแบบความถี่แทน ได้แก่ 209.5, 206.6, 203.8, 201.1, 198.4, 195.8, 193.3 และ 190.8 THz ตามลำดับ จากนั้นนำไปต่อเข้ากับ Ext. Mod.



รูปที่ ก. 2 การส่งสัญญาณผ่านระบบ FTTx เมื่อใช้ WSS ร่วมกับ DWBA ในส่วนของ OLT (a) 4 ความยาวคลื่น ผู้ให้บริการ 10 ราย (b) 8 ความยาวคลื่น ผู้ให้บริการ 5 ราย

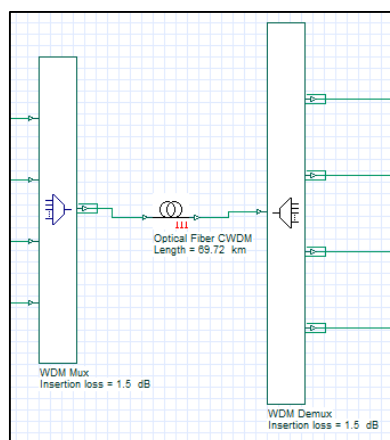
ภายใน Ext. Mod. แสดงดังรูปที่ ก.3 ประกอบไปด้วย pseudo-random bit sequence generator ทำหน้าที่สร้างบิตสัญญาณแบบสุ่ม ที่อัตราบิตเท่ากับอัตราบิตของระบบที่ 10 Gbps และถูกมอดูเลตแบบ NRZ-OOK และถูกเปลี่ยนรูปร่างโดย Mach-Zehnder modulator จากนั้นสัญญาณที่ถูกมอดูเลตแล้วทั้งหมดจะถูกรวมเข้ากับ WDM multiplexer ที่มีค่า insertion loss เท่ากับ 1.5 dB



รูปที่ ก. 3 การส่งสัญญาณผ่านระบบ FTTx ในส่วนของ OLT ภายใน Ext. Mod.

### เส้นใยแสง

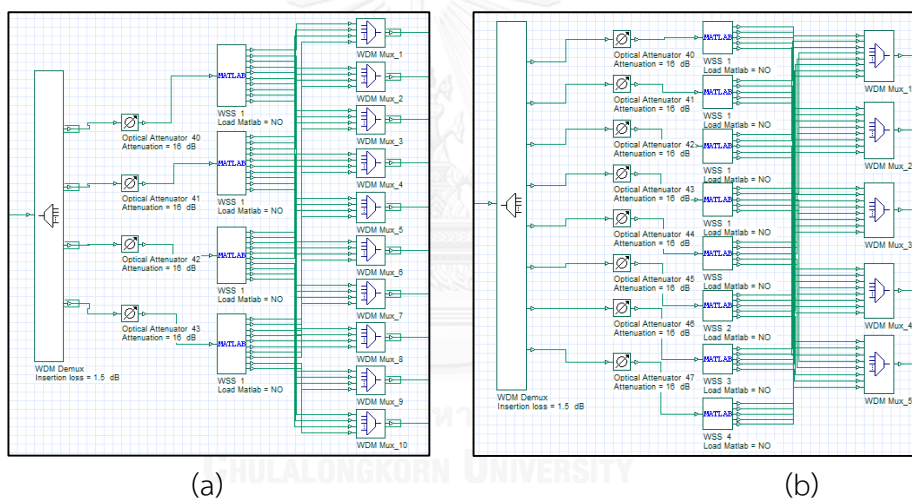
สัญญาณความยาวคลื่นทั้งหมดที่ถูกรวมเข้ากันด้วย WDM multiplexer ที่มีค่า insertion loss เท่ากับ 1.5 dB จะถูกส่งผ่านเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652.D ในส่วนของเส้นใยแสงจะมีค่าพารามิเตอร์ที่เป็นปัจจัยสำคัญในการจำกัดสมรรถนะของระบบ ได้แก่ attenuation และ fiber dispersion ทั้งสองปัจจัยนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นในระบบ ซึ่งค่า attenuation และ fiber dispersion ในระบบ 4 ความยาวคลื่น ผู้ให้บริการ 10 ราย ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ส่วนระบบ 8 ความยาวคลื่น ผู้ให้บริการ 5 ราย ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 นอกจากนี้ระบบจะคิดผลกระทบของ PMD เท่ากับ  $0.2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  ด้วย และความยาวของเส้นใยแสงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง เพราะว่าการส่งสัญญาณจะแปรผันกับความยาวของเส้นใยแสงด้วย นั่นคือ ถ้ามีความยาวของเส้นใยแสงมาก สมรรถนะในการส่งสัญญาณก็จะน้อยลง หลังจากสัญญาณทั้งหมดผ่านเส้นใยแสงแล้ว จะถูกแยกแต่ละความยาวคลื่นด้วย demultiplexer มีค่า Insertion loss เท่ากับ 1.5 dB เช่นกัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก. 4 แบบจำลองการส่งสัญญาณผ่านระบบ FTTx ในส่วนของเส้นใยแสง

## WSS

หลังจากผ่านเส้นใยแสงและถูกแยกสัญญาณแต่ละความยาวคลื่นด้วย demultiplexer แล้ว สัญญาณความยาวคลื่น CWDM จะถูก WSS จัดสรรความยาวคลื่นไปสู่ ONU แต่ละรายที่ต้องการใช้ สัญญาณในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง WSS ที่ใช้ระบบนี้จะถูกเขียนขึ้นจากโปรแกรม matlab แล้วนำมาใช้ ร่วมกับโปรแกรม optisys ก่อนที่สัญญาณความยาวคลื่น CWDM จะถูกส่งไปคำนวณ WSS ใน matlab จะต้องผ่านอุปกรณ์ optical attenuator ก่อน ซึ่งในที่นี้จะใช้แทนค่า insertion loss ของ WSS แต่ละชนิด จากนั้นผ่าน WSS ในส่วนของ matlab เพื่อจัดสรรความยาวคลื่นที่ ONU ร้องขอใช้ สัญญาณ และส่งไปรวมสัญญาณที่ WDM multiplexer มีค่า Insertion loss เท่ากับ 1.5 dB จากนั้น ส่งสัญญาณไปสู่ ONU แต่ละราย แสดงดังรูปที่ ก.5 (a) ในระบบ 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย และ (b) ในระบบ 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย



รูปที่ ก. 5 แบบจำลองระบบ FTTx ในส่วนของ WSS บนโปรแกรม optisys (a) 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย และ (b) 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย

WSS ในส่วนการคำนวณใน matlab ในขั้นต้นจะต้องเขียนส่วนหัวของ matlab ให้สามารถ ดึงข้อมูลของสัญญาณมาจาก optisys ได้ โดยที่ระบบ 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย แสดงดัง รูป ก.6 (a) ซึ่งเขียนส่วนหัว outputport=inputport จำนวน 10 ชุด เนื่องจากมีผู้ใช้บริการ 10 ราย ส่วนระบบ 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย แสดงดังรูป ก.6 (b) ซึ่งเขียนส่วนหัว outputport=inputport จำนวน 5 ชุด จากนั้นประกาศตัวแปร parameter ต่างๆ ที่ใช้ในการ คำนวณ

<pre> OutputPort1 = InputPort1; OutputPort2 = InputPort1; OutputPort3 = InputPort1; OutputPort4 = InputPort1; OutputPort5 = InputPort1; OutputPort6 = InputPort1; OutputPort7 = InputPort1; OutputPort8 = InputPort1; OutputPort9 = InputPort1; OutputPort10 = InputPort1;  m = Parameter0; T = Parameter1; datarate = Parameter2; bitnum = Parameter3; SwitchNo = Parameter4; home=10;  MaxSwitchNo = length(InputPort1.Sampled); OptdataIn = InputPort1.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal; SampleNumber = length(OptdataIn);  A1=sort(randi(SampleNumber,[1,m*2]),2); SampledTime = ((1/datarate)*bitnum)/SampleNumber; </pre>	<pre> OutputPort1 = InputPort1; OutputPort2 = InputPort1; OutputPort3 = InputPort1; OutputPort4 = InputPort1; OutputPort5 = InputPort1;  m = Parameter0; T = Parameter1; datarate = Parameter2; bitnum = Parameter3; SwitchNo = Parameter4; home=5;  MaxSwitchNo = length(InputPort1.Sampled); OptdataIn = InputPort1.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal; SampleNumber = length(OptdataIn);  A1=sort(randi(SampleNumber,[1,m*2]),2); SampledTime = ((1/datarate)*bitnum)/SampleNumber; </pre>
---	---

(a)

(b)

รูปที่ ก. 6 การประกาศตัวแปรของ WSS ใน matlab (a) 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย และ (b) 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย

จากรูปที่ ก.6 ค่า parameter0 คือ ความถี่ในการสวิตช์ของ WSS หนึ่งตัว parameter1 คือ ค่า time constant ของ WSS แต่ละชนิด parameter2 คือ data rate parameter3 คือ sequence length และ parameter4 คือ WSS ตัวที่เท่าไรของระบบ เช่น WSS ตัวที่ 1 หรือ ตัวที่ 2 เป็นต้น ส่วน home คือ จำนวนผู้ใช้บริการทั้งหมดในระบบ ในการสุ่มเวลาในการใช้สัญญาณ เวลาในการสับสวิตช์ เราจะเลือกสุ่มจากจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาจาก optisys โดยเลือกสุ่มแบบ uniform discrete distribution ซึ่งเป็นการสุ่มอย่างไม่ต่อเนื่องที่มีรูปแบบที่แน่นอน ซึ่งเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากการสับสวิตช์ switching time จะมากกว่าหรือน้อยกว่า time constant ของสวิตช์แต่ละชนิด มีโอกาสเกิดขึ้นได้เท่าๆ กัน

```

for i=1:1:home %start loop for assigning the zero values to all switching characteristics of all homes.
Htemp2(i)=1;
for n=1:1:SampleNumber
t(n)=SampledTime*n;
H(1,n)=0;
end
end %now all switching characteristics will be zero.

for x=1:2:2*m % start loop of switching
q=randi(home); %random home for receiving signal
for n=A1(1,x)+1:1:A1(1,x+1) %rise time
Htemp1(q,n)=Htemp2(q)*(1-exp(-(t(n)-(A1(1,x))*SampledTime)/T)); %temporal rise time characteristic.
H(q,n)=H(q,n)+Htemp1(q,n);%Additive switching characteristic of home#q.
end %end of loop for rise time
Htemp2(q)=H(q,A1(1,x+1)); %use for continuing H(q,n) to start falling for home#q.

for n=A1(1,x+1)+1:1:SampleNumber %loop to the end of switching (fall time)
Htemp1(q,n)=Htemp2(q)*exp(-(t(n)-(A1(1,x+1))*SampledTime)/T); %temporal fall time characteristic.
H(q,n)=H(q,n)+Htemp1(q,n);%Additive switching characteristic of home#q.
end %end of loop to the end of switching (fall time).
end %end of loop of switching.

```

รูปที่ ก. 7 การคำนวณของ WSS ใน matlab

```

for b=1:1:SampleNumber
H1(b)=H(1,b);
OptdataOut1(b) = (sqrt(H1(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H2(b)=H(2,b);
OptdataOut2(b) = (sqrt(H2(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H3(b)=H(3,b);
OptdataOut3(b) = (sqrt(H3(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H4(b)=H(4,b);
OptdataOut4(b) = (sqrt(H4(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H5(b)=H(5,b);
OptdataOut5(b) = (sqrt(H5(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H6(b)=H(6,b);
OptdataOut6(b) = (sqrt(H6(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H7(b)=H(7,b);
OptdataOut7(b) = (sqrt(H7(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H8(b)=H(8,b);
OptdataOut8(b) = (sqrt(H8(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H9(b)=H(9,b);
OptdataOut9(b) = (sqrt(H9(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H10(b)=H(10,b);
OptdataOut10(b) = (sqrt(H10(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
end

```

(a)

```

for b=1:1:SampleNumber
H1(b)=H(1,b);
OptdataOut1(b) = (sqrt(H1(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H2(b)=H(2,b);
OptdataOut2(b) = (sqrt(H2(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H3(b)=H(3,b);
OptdataOut3(b) = (sqrt(H3(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H4(b)=H(4,b);
OptdataOut4(b) = (sqrt(H4(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
H5(b)=H(5,b);
OptdataOut5(b) = (sqrt(H5(b))/sqrt(2))*OptdataIn(b);
end

```

(b)

รูปที่ ก. 8 การคำนวณของ WSS ใน matlab (a) 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย และ (b) 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย

จากรูปที่ ก.7 แสดงถึงการคำนวณเวลาในการสับสวิตช์ของ WSS ในขั้นแรก สวิตช์จะเริ่มวน loop for จำนวนบ้านผู้ให้บริการทั้งหมด เพื่อให้ค่าผู้ให้บริการทุกรายเริ่มใช้สัญญาณได้ โดยที่ค่ากำลังสัญญาณของ switching characteristic หรือ  $H(t)$  จะเริ่มจากศูนย์ก่อน จากนั้น WSS จะเริ่มทำงานโดยการเลือกสุมบ้านที่ผู้ให้บริการต้องการใช้สัญญาณก่อน และทำการวน loop for ของการคำนวณ WSS สมการแรก ที่เขียน comment ใน matlab ว่าเป็นช่วง rise time จากสมการใน matlab ผู้ให้บริการจะเริ่มใช้กำลังสัญญาณจาก 0 แล้วค่อยๆเพิ่มขึ้นไปจนถึงเวลาที่ต้องสับสวิตช์ไปให้ผู้ให้บริการอีกราย ซึ่งจะเริ่มทำงานใน loop for ในสมการที่สองแทน ซึ่งเป็นช่วงที่เขียน comment ใน matlab ว่าเป็น fall time นั่นก็คือ เป็นช่วงที่กำลังสัญญาณถูกสับสวิตช์ไปให้ผู้ให้บริการอีกราย ทำให้กำลังส่วนที่เหลืออยู่ในระบบค่อยๆ ตกแบบเอกซ์โพเนนเชียล ไปจนถึงที่กำลังสัญญาณใกล้เคียง 0 ที่อินฟินิตี้ หรือจนกว่าจะมีสัญญาณใหม่มาทับกับสัญญาณเดิม จากรูป ก.8 แสดงถึงค่า switching characteristic ของ WSS แต่ละตัว ไปคูณเข้ากับสัญญาณขาเข้าที่ได้จาก optisys ทำให้ได้สัญญาณขาออกมา จากนั้นเราจะเขียน matlab ที่ใช้ในการเชื่อมกับโปรแกรม optisys ในส่วนปิดท้าย ดังรูปที่ ก.9 ซึ่งในรูป (a) ระบบ 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย และ (b) ระบบ 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย



```

OutputPort1.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut1;
OutputPort2.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut2;
OutputPort3.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut3;
OutputPort4.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut4;
OutputPort5.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut5;
OutputPort6.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut6;
OutputPort7.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut7;
OutputPort8.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut8;
OutputPort9.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut9;
OutputPort10.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut10;

```

(a)

```

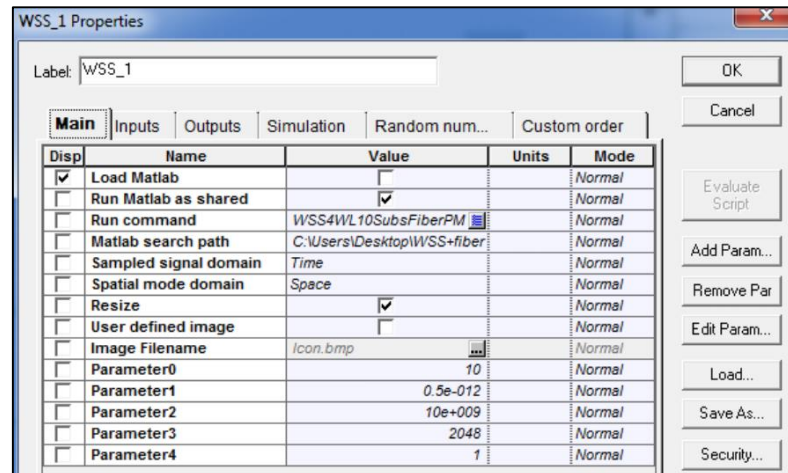
OutputPort1.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut1;
OutputPort2.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut2;
OutputPort3.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut3;
OutputPort4.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut4;
OutputPort5.Sampled(1,MaxSwitchNo-SwitchNo+1).Signal = OptdataOut5;

```

(b)

รูปที่ ก. 9 การเขียน matlab เพื่อเชื่อมต่อกับ optisys ในส่วนปิดท้าย (a) 4 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 10 ราย และ (b) 8 ความยาวคลื่น ผู้ใช้บริการ 5 ราย

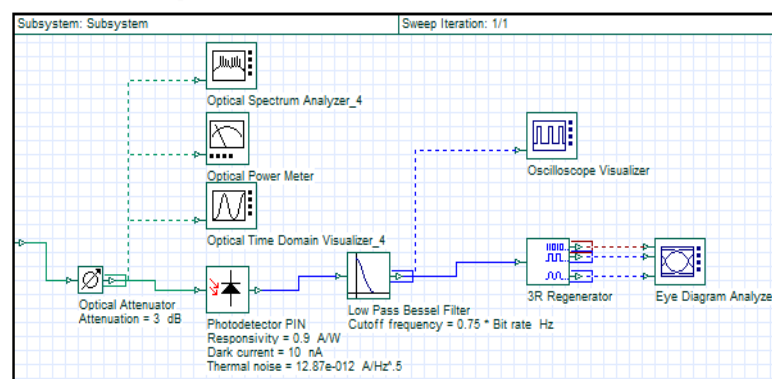
ในส่วนการตั้งค่า parameter ต่างๆ ของ WSS ในโปรแกรม optisys แสดงดังรูปที่ ก.10 ซึ่งมีค่า parameter ที่สำคัญได้แก่ run command เป็นส่วนที่ใส่ชื่อไฟล์ matlab ที่ใช้ในการ run ระบบนี้ matlab search path เป็นส่วนที่ใส่ข้อมูลที่อยู่ของไฟล์ matlab ที่ใช้ run parameter0 คือ ความถี่หรือความบ่อยในการสับสวิตช์ ในที่นี้จะใช้ความถี่ในการสับสวิตช์ 10 ครั้ง ต่อ WSS หนึ่งตัว parameter1 คือ time constant ของ WSS แต่ละชนิด ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ WSS ทั้งหมด 6 ชนิด ซึ่งมีค่า time constant ที่ปรากฏดังตารางที่ 4.1 parameter2 คือ ค่า bit rate ของระบบ เท่ากับ 10 Gbps parameter3 คือ ค่า sequence length เท่ากับ 2048 บิต parameter4 คือ WSS ตัวที่เท่าไร่ของระบบ ซึ่งในรูปนี้ คือ WSS ตัวที่หนึ่ง



รูปที่ ก. 10 ค่า parameter ต่างๆ ของ WSS ในโปรแกรม optisys

## ONU

ในส่วนนี้ เป็นส่วนของภาครับสัญญาณ ประกอบด้วย optical attenuator ซึ่งสัญญาณแต่ ละความยาวคลื่นจะถูกปรับเพิ่มค่า attenuation 3 dB และถูกตรวจจับสัญญาณด้วย PIN photodetector ที่สามารถรับสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพถึง 90% มีค่า dark current ของ ตัวรับสัญญาณ คือ 10 nA และ thermal noise เท่ากับ  $12.87 \times 10^{-12} \text{ W} / \sqrt{\text{Hz}}$  จากนั้นสัญญาณจะ ถูกกรองสัญญาณที่ไม่ดีออกด้วยวงจร low-pass filter ซึ่งมี cutoff frequency เท่ากับ  $0.75 \times \text{bit rate Hz}$  ตามด้วย 3R Regenerator สุดท้ายสัญญาณที่ถูกตรวจจับแล้วจะถูกส่งไปที่ eye-diagram analyzer เพื่อที่จะคำนวณ BER แสดงดังรูปที่ ก.11



รูปที่ ก. 11 แบบจำลองภาครับของการส่งสัญญาณในส่วนของ ONU

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิจิตรา กาญจนภาส เกิดที่จังหวัดชลบุรี เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าในปีการศึกษา 2556 ต่อจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการทั้งหมด 1 ฉบับ

บทความวิชาการในงานประชุม The International Conference on Information Networking 2014 (ICOIN 2014) จัดขึ้นที่โรงแรม Phuket Graceland Resort and Spa จังหวัดภูเก็ต ประเทศไทย ในวันที่ 10 - 12 กุมภาพันธ์ 2557 ในชื่อบทความเรื่อง FTTx with dynamic wavelength and bandwidth allocation