

การวางตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายเส้นใยแสง
ที่ใช้การมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นอย่างมีประสิทธิภาพ

นายกานต์ มุกดาสนิท

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFICIENT PLACEMENT OF OPTICAL PHASE CONJUGATORS IN WDM OPTICAL
NETWORKS

Mr. Karn Mukdasanit

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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวางตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายเส้นใยแสง
ที่ใช้การมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นอย่างมีประสิทธิภาพ

โดย

นาย กานต์ มุกดาสนิท

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

กานต์ มุกดาสนิท : การวางตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายเส้นใยแสงที่ใช้การมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นอย่างมีประสิทธิภาพ. (EFFICIENT PLACEMENT OF OPTICAL PHASE CONJUGATORS IN WDM OPTICAL NETWORKS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 241 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายเส้นใยแสงที่ใช้การมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น ซึ่งโครงข่ายที่พิจารณานั้น มีอยู่ด้วยกันสองลักษณะคือโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ(broadcast-and-select network) และโครงข่ายแบบเมช(mesh network) ซึ่งวิธีที่นำเสนอ นั้น จะทำให้โครงข่ายใช้จำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้น้อยกว่ากรณีที่ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงมากที่สุด นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่โครงข่ายมีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งมีกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบเปลี่ยนเส้นทาง (path protection) วิธีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้น ทำได้โดยการวิเคราะห์กราฟฟิกของข้อมูลทั้งหมดและวิเคราะห์ตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง รวมถึงหาค่าพารามิเตอร์ที่สามารถบอกได้ว่าโครงข่ายไหนใช้วิธีลดจำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ หรือโครงข่ายไหนต้องวางไว้ที่ตำแหน่งกลางข่ายเชื่อมโยงทุกๆข่าย

เนื่องจากเกิดปัญหาในการหาช่องในการซ้อนทับทุกๆกราฟฟิกได้ไม่ทั้งหมด จึงได้คิดค้นระเบียบขั้นตอนวิธีเพื่อที่จะทำการซ้อนทับทุกๆกราฟฟิกให้ได้ทั้งหมด โดยใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า R ซึ่งสามารถช่วยตัดสินใจได้ว่า โครงข่ายนั้นสามารถใช้วิธีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้หรือไม่ เมื่อได้ทดลองใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอ ในโครงข่ายตัวอย่างแบบแพร่และเลือกสัญญาณ 1 ตัวอย่าง และโครงข่ายแบบเมช 3 ตัวอย่าง ได้แก่ OPEN ERNet และ NARNet โดยใช้ค่า R ที่คิดค้นพัฒนาขึ้นในการลดขนาดโครงข่ายแต่ละโครงข่ายให้เหมาะสม พบว่าสามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ด้วยจำนวนน้อยกว่าการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในกรณีที่วางกลางข่ายเชื่อมโยงทุกๆข่าย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา...2551.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5070538221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : OPTICAL FIBER TRANSMISSION / DISPERSION COMPENSATION/
OPTICAL PHASE CONJUGATION / WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING /
BROADCAST-AND-SELECT NETWORK / MESH NETWORK / NETWORK
PROTECTION

KARN MUKDASANIT : EFFICIENT PLACEMENT OF OPTICAL PHASE
CONJUGATORS IN WDM OPTICAL NETWORKS. ADVISOR : ASSISTANT
PROFESSOR PASU KAEWPLUNG, 241 pp.

This thesis proposes a method for placing optical phase conjugators (OPCs) in WDM broadcast-and-select network (B&S network) and mesh network. Our method can be applied for reducing the number of OPC needed in the networks to be less than using the OPC in the middle of each link, in which the number of OPC is maximum. Moreover, it can applied in the network that faces a single-link failure protected by shared path protection. Our method is implemented by analyzing all possible traffics in the network, then find the ranges of OPC location, and find R -parameter that determines whether the network can use our algorithm.

According to the restriction that the OPC placable ranges of all traffics in a shared path must be overlapped, we derived R -parameter that is useful to determine whether the network can employ OPC using our algorithm or it can only employ OPC in the middle of each link. We applied our method with scaling the network size using R -parameter to 1 sample of the B&S network and 3 samples of the mesh networks; OPEN, ERNet and NARNet. The results, from all the sample networks, showed that our proposed method can efficiently help reducing the number of OPC to be less than using the OPC in the middle of each link.

Department : Electrical Engineering..... Student's Signature :

Field of Study : Electrical Engineering..... Advisor's Signature :

Academic Year : 2008.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสร็จสมบูรณ์ได้เนื่องจากความกรุณา เสียสละของอาจารย์ ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง ที่ได้ให้คำปรึกษา หลักการคิด วิเคราะห์ และข้อมูลความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย รวมถึงช่วยแก้ไขส่วนที่บกพร่อง หรือส่วนที่ผิดพลาดต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่เป็นกำลังใจ พร้อมทั้งให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆทุกคนที่มีส่วนช่วยให้ งานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี รวมถึงการให้คำปรึกษาต่างๆของงานวิจัย

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ และสถานที่ใช้ทำวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	9
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	9
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง.....	12
2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง.....	13
2.2.1 การสูญเสียกำลังสัญญาณ.....	14
2.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง.....	15
2.2.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง.....	21
2.3 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสง.....	23
2.3.1 ระบบและองค์ประกอบของโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็ม.....	23
2.3.2 ระบบและองค์ประกอบของโครงข่ายดีดับเบิ้ลยูดีเอ็ม.....	25
2.4 โครงข่ายแบบแพร์และเล็อกสัญญาณ.....	27
2.5 โครงข่ายแบบเมช.....	28
2.6 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีการจัดการดิสเพอร์ชัน.....	32
2.7 เครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	35
2.7.1 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	35
2.7.2 ชนิดของเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	37
2.7.2.1 เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น	38

2.7.2.2 เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น....	38
2.7.3 ประสิทธิภาพของเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	39
2.7.4 การจัดการดิสเพอร์ชันด้วยเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	40
บทที่ 3 การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ	
3.1 ระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	43
3.2 การคำนวณหาตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	44
3.2.1 การคำนวณหาตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	44
3.2.2 เงื่อนไขที่ใช้ตัดสินโครงข่ายว่าสามารถใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีนี้ได้หรือไม่.....	45
3.3 ตัวอย่างการคำนวณ.....	49
บทที่ 4 การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมช	
4.1 ระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	67
4.2 วิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด.....	67
4.3 ตัวอย่างการคำนวณ.....	70
บทที่ 5 การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายและการวิเคราะห์ OSNR	
5.1 การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย..	118
5.1.1 วิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย.....	119
5.1.2 ตัวอย่างการคำนวณ.....	119
5.2 การวิเคราะห์ผล OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	131
5.2.1 การคำนวณหาค่า OSNR ของระบบ.....	131
5.2.2 ตัวอย่างการคำนวณ.....	134
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 บทสรุป.....	159
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	160
รายการอ้างอิง.....	161
ภาคผนวก.....	168
บทควมทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	240
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	241

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ดิสเพอร์ชันสะสมของงานวิจัยต่างๆ.....	8
ตารางที่ 3.1 จำนวนทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดในโครงข่ายตัวอย่าง.....	50
ตารางที่ 3.2 ความยาวคลื่นและดิสเพอร์ชันของแต่ละสถานี.....	51
ตารางที่ 3.3 การหาค่า R ของแต่ละทราฟฟิก.....	57
ตารางที่ 3.4 ทราฟฟิกและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายตัวอย่างที่ ลดขนาดลงแล้ว.....	58
ตารางที่ 4.1 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย ERNet.....	71
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า R ของโครงข่าย ERNet.....	75
ตารางที่ 4.3 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย ERNet (ลดขนาด โครงข่าย).....	76
ตารางที่ 4.4 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย NARNet.....	102
ตารางที่ 4.5 ค่า R ของโครงข่าย NARNet.....	106
ตารางที่ 4.6 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย NARNet (ลดขนาด โครงข่าย).....	107
ตารางที่ 4.7 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย OPEN.....	114
ตารางที่ 4.8 ค่า R ของโครงข่าย OPEN.....	115
ตารางที่ 4.9 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย OPEN (ลดขนาด โครงข่าย).....	116
ตารางที่ 5.1 ค่า R ของโครงข่าย NARNet กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย...	120
ตารางที่ 5.2 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย NARNet กรณีทำงาน ปกติภายใต้เงื่อนไขที่คิดกรณีข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย สัญญาณ (R เท่ากับ 28.53).....	122
ตารางที่ 5.3 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย NARNet กรณีข่าย เชื่อมโยงเกิดความเสียหายพร้อมทั้งลดขนาดโครงข่าย.....	126
ตารางที่ 5.4 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายตัวอย่างแบบแพร่และเลือก สัญญาณ.....	134
ตารางที่ 5.5 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายตัวอย่างแบบแพร่และเลือก	

สัญญาณกรณีนีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่กลางข่ายเชื่อมโยง.....	135
ตารางที่ 5.6 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย OPEN.....	136
ตารางที่ 5.7 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย OPEN กรณีนีที่วางเครื่องส่งยุค เฟสแสงที่กลางข่ายเชื่อมโยง.....	137
ตารางที่ 5.8 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย ERNet.....	138
ตารางที่ 5.9 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย ERNet กรณีนีที่วางเครื่องส่งยุค เฟสแสงที่กลางข่ายเชื่อมโยง.....	141
ตารางที่ 5.10 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย NARNet.....	144
ตารางที่ 5.11 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย NARNet กรณีนีที่วางเครื่องส่ง ยุคเฟสแสงที่กลางข่ายเชื่อมโยง.....	147
ตารางที่ 5.12 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย NARNet ที่มีการกู้คืน สัญญาณ.....	150
ตารางที่ 5.13 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย NARNet ที่มีการกู้คืน สัญญาณ กรณีนีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่กลางข่ายเชื่อมโยง.....	153

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ระบบดับเบิลยูดีเอ็ม.....	2
รูปที่ 1.2 ตัวอย่างโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ.....	3
รูปที่ 1.3 ตัวอย่างโครงข่ายแบบวงแหวนแบบทิศทางเดียว (uni-directional) และ สองทิศทาง (bi-directional).....	4
รูปที่ 1.4 ตัวอย่างโครงข่ายแบบเมช NSFNET (national science foundation network).....	5
รูปที่ 1.5 ระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่มีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไว้ที่กึ่งกลาง ระบบ.....	7
รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง.....	12
รูปที่ 2.2 ระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะทางไกล.....	12
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น	16
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่มในแต่ ละความยาวคลื่น.....	17
รูปที่ 2.5 Chromatic dispersion.....	19
รูปที่ 2.6 การเกิด inter-symbol interference.....	20
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_2 และ D ในช่วงของดิสเพอร์ชัน.....	21
รูปที่ 2.8 ระบบและองค์ประกอบของดับเบิลยูดีเอ็ม.....	23
รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารโทรคมนาคมแบบดับเบิลยูดีเอ็ม.....	27
รูปที่ 2.10 โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร์และเลือกสัญญาณ.....	28
รูปที่ 2.11 โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบกำหนดความยาวคลื่นประจำเส้นทาง.....	29
รูปที่ 2.12 วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบต่างๆ.....	30
รูปที่ 2.13 path protection และ link protection.....	32
รูปที่ 2.14 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันเพื่อจำกัดความผิดเพี้ยน.....	33
รูปที่ 2.15 ระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ....	34
รูปที่ 2.16 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตโดยกระบวนการ FWM ใน third-order nonlinear medium.....	36
รูปที่ 2.17 รูปแบบพลังงานของสัญญาณในการส่ง.....	37

รูปที่ 2.18 การสร้างสัญญาณคอนจุกต์แบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น.....	38
รูปที่ 2.19 การสร้างสัญญาณคอนจุกต์แบบเลื่อนความยาวคลื่น.....	39
รูปที่ 2.20 ประสิทธิภาพของเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	40
รูปที่ 2.21 ระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่มีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไว้ที่กึ่งกลางระบบ.....	40
รูปที่ 2.29 กำลังสัญญาณของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงที่ใช้วิธีการคอนจุกต์สัญญาณที่กึ่งกลางระบบ.....	41
รูปที่ 3.1 การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงตรงกลางข่ายเชื่อมโยง.....	44
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการคิดหาตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	44
รูปที่ 3.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการซ้อนทับไม่ได้ทุกทราฟฟิก.....	46
รูปที่ 3.4 การหาค่า R	46
รูปที่ 3.5 ปัญหาระยะทางในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงใกล้เกินไป.....	47
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณที่นำมาคำนวณ.....	49
รูปที่ 3.7 วิธีการพิจารณาข่ายเชื่อมโยง.....	52
รูปที่ 3.8 ทราฟฟิกและช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายตัวอย่าง.....	52
รูปที่ 3.9 โครงข่ายตัวอย่างที่ได้รับการลดขนาดลง 20.20 เท่า.....	58
รูปที่ 3.10 วิธีพิจารณาหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	59
รูปที่ 3.11 ทราฟฟิกและช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายตัวอย่าง(ลดขนาด).....	60
รูปที่ 3.12 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่ายตัวอย่าง.....	66
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างวิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยระเบียบขั้นตอนวิธีของ Dijkstra.....	68
รูปที่ 4.2 โครงข่าย ERNet.....	70
รูปที่ 4.3 โครงข่าย ERNet ที่ได้รับการลดขนาดลงมา 12.01 เท่า.....	80
รูปที่ 4.4 วิธีการพิจารณาข่ายเชื่อมโยง.....	80
รูปที่ 4.5 ทราฟฟิกและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่าย ERNet.....	81
รูปที่ 4.6 วิธีการคิดช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	97
รูปที่ 4.7 วิธีการดูข่ายเชื่อมโยงในตาราง.....	98
รูปที่ 4.8 ปัญหาระยะทางในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงใกล้เกินไป.....	99
รูปที่ 4.9 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่าย ERNet.....	99
รูปที่ 4.10 แผนภาพผังงานของการหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง.....	100

รูปที่ 4.11	โครงข่าย NARNet.....	101
รูปที่ 4.12	โครงข่าย NARNet ที่ได้รับการลดขนาดลงมา 15.75 เท่า.....	111
รูปที่ 4.13	ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่าย NARNet.....	112
รูปที่ 4.14	โครงข่าย OPEN.....	113
รูปที่ 4.15	โครงข่าย OPEN ที่ได้รับการลดขนาดลงมา 4.90 เท่า.....	115
รูปที่ 4.16	ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่าย OPEN.....	117
รูปที่ 5.1	เคเบิลและเส้นใยแสง.....	119
รูปที่ 5.2	การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีที่ยาวเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย.....	121
รูปที่ 5.3	ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่าย NARNet กรณีมีการกู้คืน สัญญาณ.....	130
รูปที่ 5.4	การคำนวณหา OSNR.....	131
รูปที่ 5.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง BER_N และ BER_O	157

บทที่ 1

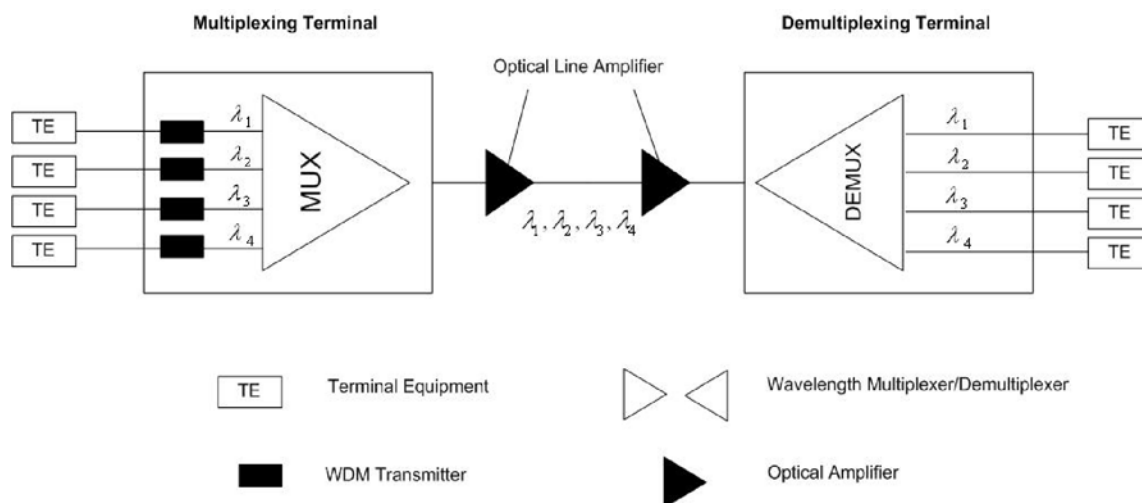
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารข้อมูลเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการค้นคว้าวิจัย เพื่อที่จะเพิ่มศักยภาพของการสื่อสารข้อมูลให้มีคุณภาพดีขึ้น ในอดีตการสื่อสารจะอยู่ในรูปแบบของการส่งสัญญาณไฟฟ้าผ่านสายทองแดงชนิดสายคู่พันเกลียว (twisted pair) หรือสายเคเบิลแกนร่วม (coaxial cable) อย่างไรก็ตาม การสื่อสารก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการพัฒนาของเทคโนโลยี ส่งผลให้การสื่อสารในรูปแบบเดิมๆ มีปริมาณแบนด์วิดท์ไม่เพียงพอต่อความต้องการ จึงต้องมีการพัฒนาการสื่อสารใหม่ จากระบบเดิมคือการสื่อสารทางไฟฟ้า (electrical communication) มาเป็นการสื่อสารทางแสง (optical communication) เพราะการสื่อสารระบบนี้มีแบนด์วิดท์ที่สูงและส่งในระยะทางที่ไกลได้มากขึ้น การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลหรือการใช้แบนด์วิดท์ให้คุ้มค่านั้นสามารถทำได้โดยใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นอย่างหนาแน่น (dense wavelength division multiplexing : DWDM) ซึ่งเป็นกลวิธีการรวมช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างแต่ละช่องสัญญาณแคบกว่า 100 GHz ทำให้มีจำนวนช่องสัญญาณให้ใช้งานมากขึ้น จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้การสื่อสารทางแสงสามารถรองรับปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ดีกว่าการสื่อสารรูปแบบอื่น การสื่อสารทางแสงสามารถรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในการส่งผ่านข้อมูลที่ต้องการทั้งคุณภาพและปริมาณที่สูงขึ้นตลอดเวลาได้ ทำให้ระบบสื่อสารผ่านโครงข่ายทางแสงมีการวิจัยและการพัฒนาอย่างกว้างขวาง ซึ่งส่งผลทำให้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ได้ถูกพัฒนาแล้วนำออกมาใช้มากมายหลายประเภททั้งอุปกรณ์แบบกัมมันต์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (active component) และอุปกรณ์แบบพาสซีฟหรืออุปกรณ์ที่ไม่ใช้พลังงานในการทำงาน (passive component) ในโครงข่ายที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากนั้นจะเกิดปัญหาคอขวด (bottleneck) เนื่องจากขีดจำกัดของอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 40 GHz ดังนั้นการลดจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลงแล้วแทนที่ด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีฟจะทำให้อัตราการส่งข้อมูลภายในโครงข่ายทางแสงมีประสิทธิภาพมากขึ้น รูปที่ 1.1 แสดงระบบและอุปกรณ์ของดับเบิลยูดีเอ็ม

การสื่อสารทางแสง ใช้เส้นใยแสงเป็นตัวกลางในการสื่อสารข้อมูล เส้นใยแสงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลางชนิดอื่นๆ จะพบว่ามีประสิทธิภาพที่ดีกว่ามากมาย [1] เช่น

1. เส้นใยแสงมีอัตราสูญเสียพลังงานแสงต่ำ ทำให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกล และใช้อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (repeater) และอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) น้อยกว่าการสื่อสารแบบอื่นๆ



รูปที่ 1.1 ระบบดับเบิลยูดีเอ็ม[32]

2. เส้นใยแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา จากการที่มันมีขนาดเล็กทำให้สามารถรวมเส้นใยแสงหลายๆเส้นให้อยู่ในสายเคเบิลเดียวกันได้ ทำให้เพิ่มช่องทางการสื่อสารมากขึ้น จากการใช้พื้นที่เท่าเดิม

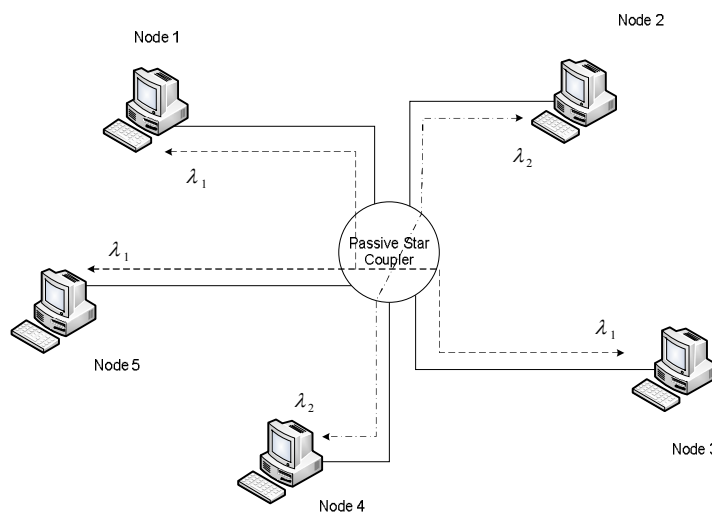
3. เส้นใยแสงผลิตมาจากวัสดุฉนวนไฟฟ้า ทำให้ปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงมีความถูกต้องและความแม่นยำของสัญญาณสูงเมื่อเทียบกับตัวกลางประเภทอื่น ข่าวสารที่ส่งไปจะมีตำแหน่งรับและส่งที่แน่นอน ทำให้การลักลอบดักฟังนั้นเป็นไปได้ยาก

4. เส้นใยแสงทำจากวัสดุที่ไม่มีสารเจือจาง และมีความต้านทานต่ออุณหภูมิและความชื้น จึงสามารถนำเส้นใยแสงไปติดตั้งใช้งานได้นานได้ นอกจากนั้นยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน บางเส้นมีอายุการใช้งานยาวถึง 40 ปี และความต้องการในการบำรุงรักษาน้อยมาก

จากข้อดีต่างๆของเส้นใยแสงที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้โครงข่ายทางแสง (optical network) ที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางนั้น มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นโครงข่ายแกนหลัก (core network) โครงข่ายขนส่งระยะไกล (long-haul Network) โครงข่ายบริเวณกว้าง (wide area network : WAN) หรือโครงข่ายนครหลวง (metro-politan area network : MAN)

โครงข่ายในการสื่อสารทางแสงที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วยความยาวคลื่นสามารถจำแนกออกเป็นสองแบบหลักๆ[32] คือ โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร่และเลือกสัญญาณ (WDM broadcast-and-select network) และโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบกำหนดความยาวคลื่นประจำเส้นทาง(WDM wavelength-routed optical network)

รูปที่ 1.2 แสดงโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ ซึ่งเป็นโครงข่ายแบบหนึ่งของการสื่อสารทางแสงที่อุปกรณ์ภายในโครงข่ายเป็นแบบแพสซีฟทั้งหมดประกอบด้วย อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟ (passive star coupler: PSC) และหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน (dispersion compensation units: DCUs) อีกทั้งยังเป็นโครงข่ายที่มีต้นทุนต่ำและมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง

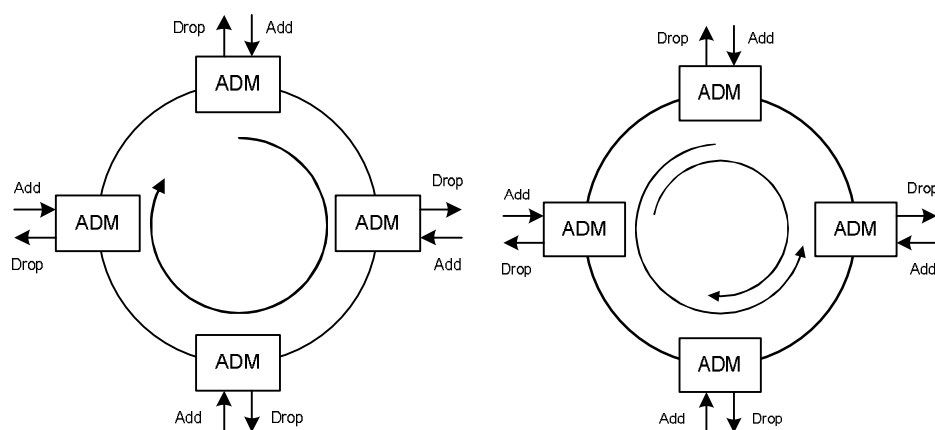


รูปที่ 1.2 ตัวอย่างโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณส่วนใหญ่จะเป็นการวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ภายในโครงข่าย[2]-[5] เมื่อระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากขึ้นด้วยเช่นกัน ในด้านปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณนั้นเกิดจากดิสเพอร์ชัน (dispersion) และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (fiber nonlinearity) ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันและการจัดสรรความยาวคลื่น (wavelength assignment) เพื่อช่วยลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ตัวอย่างการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณนั้น ได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องคือการติดตั้งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในโครงข่ายทางแสง [6] การทำการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อทำการลดค่าดิสเพอร์ชัน [7] ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันในโครงข่ายลดลง สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดสรรความยาวคลื่นที่ผ่านมา เช่น การจัดสรรความยาวคลื่นสำหรับการแพร์สัญญาณเฉพาะกลุ่ม (multicast) ในโครงข่ายแบบดับเบิลยูดีเอ็มด้วยเงื่อนไขขีดจำกัดของอุปกรณ์แยกสัญญาณ (splitter)[8] และการจัดสรรความยาวคลื่นภายในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณให้มีระยะห่างของแต่ละช่องสัญญาณ (channel

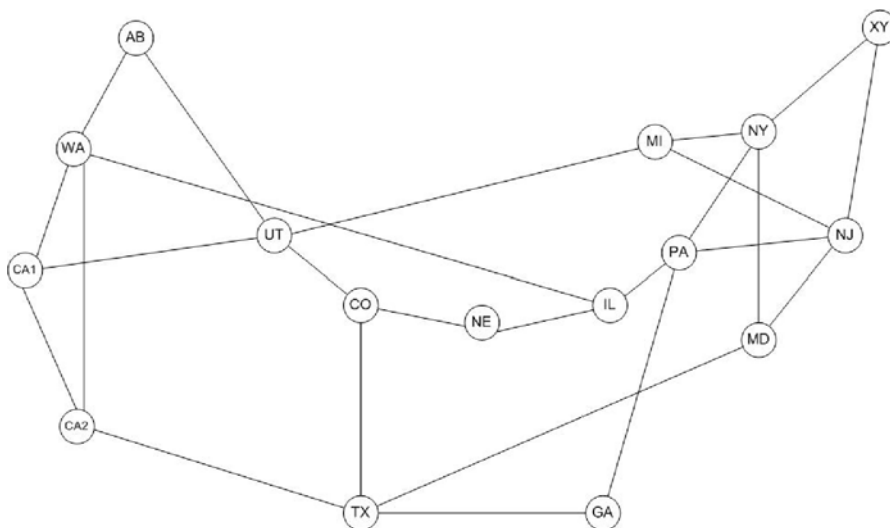
spacing) มากที่สุด[9] ซึ่งการจัดสรรความยาวคลื่นให้เหมาะสมในแต่ละสายเชื่อมโยงเพื่อเพิ่มระยะห่างในแต่ละช่องสัญญาณจะเป็นการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากผลกระทบของเคอร์[10]ได้

โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบกำหนดความยาวคลื่นประจำเส้นทางนั้นแบ่งได้อีก 2 ประเภท คือ โครงข่ายแบบวงแหวนและโครงข่ายแบบเมช โครงข่ายแบบวงแหวนเป็นโครงข่ายที่ใช้งานอยู่อย่างแพร่หลายในโครงข่าย MAN/WAN เนื่องจากเป็นโครงข่ายที่เชื่อถือได้ (reliability) ไม่มีการชนกันของข้อมูลเพราะข้อมูลมีการเดินทางในทิศทางเดียวกันในแต่ละเส้นใยแสงคือทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา และยังมีกำบังการลุ่มของโครงข่าย (protection) ในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแบบวงแหวนมีการแบ่งการเข้าใช้ช่องสัญญาณทางเวลา (time division multiplexing, TDM) ซึ่งใช้อุปกรณ์ในโครงข่ายแบบอิเล็กทรอนิกส์ ต่อมา มีการแบ่งการเข้าใช้ช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing, WDM) ทำให้สามารถใช้อุปกรณ์แบบแอนะล็อกและสามารถส่งข้อมูลอนาล็อกได้ (analog) แต่ระยะห่างระหว่างความยาวคลื่น(channel spacing) ยังห่างอยู่มาก เพื่อให้ใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงได้มีการเปลี่ยนเป็นการแบ่งการเข้าใช้ช่องสัญญาณทางความยาวคลื่นแบบหนาแน่น (dense wavelength division multiplexing, DWDM) แทน[11] โดยมีตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ งานวิจัยที่ศึกษาถึงข้อดีของดับเบิลยูดีเอ็ม ที่สามารถกำหนดความยาวคลื่นที่ใช้ของข้อมูลทั้งแบบอัตโนมัติ (dynamic traffic) และกำหนดค่าเอง (static traffic) ในการสื่อสารในโครงข่าย[12] งานวิจัยที่ศึกษาถึงโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวนสามารถทำงานร่วมกับการเชื่อมต่อกันได้ เช่น การสื่อสารผ่านดาวเทียมเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบ[13] งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันกำบังของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม เช่น การหาระเบียบขั้นตอนวิธี (algorithm) เพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางที่เชื่อมต่อที่ชำรุด การจัดสรรการใช้งานความยาวคลื่น[14][15] และยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการวางเครือข่ายสัญญาณทางแสงในระบบดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวน[16] รูปที่ 1.3 แสดงโครงข่ายแบบวงแหวนทั้งแบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างโครงข่ายแบบวงแหวนแบบทิศทางเดียว (uni-directional) และสองทิศทาง (bi-directional)

โครงข่ายแบบเมช (mesh network) เป็นโครงข่ายที่สามารถป้องกันการล่มของโครงข่ายได้ดีที่สุด โครงข่ายชนิดนี้ มีความสามารถในการป้องกันการล่ม (protection) ความยืดหยุ่น (flexibility) ความมีประสิทธิภาพ (efficiency) และมีสภาพทนทาน (robustness) ของโครงข่ายดีกว่าโครงข่ายแบบวงแหวน โครงข่ายชนิดนี้มีการใช้ช่องสัญญาณแบบดับเบิลยูดีเอ็มเช่นกัน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายแบบเมชส่วนใหญ่จะเป็นเรื่องงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น (routing and wavelength assignment) หรือการป้องกันโครงข่ายเนื่องจากเกิดการล่มของโครงข่าย เช่น การป้องกันแบบใช้วิถีร่วมกัน (shared path protection) หรือ การป้องกันแบบใช้ข่ายเชื่อมโยงร่วมกัน (shared link protection) [17][18] การศึกษาวิธีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นเพื่อการอยู่รอดของโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบเมช [19] วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบใช้วิถีร่วมกันแบบผสม (mixed shared path protection)[20] เป็นต้น รูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่างโครงข่ายแบบเมช หรือ NSFNET (national science foundation network)

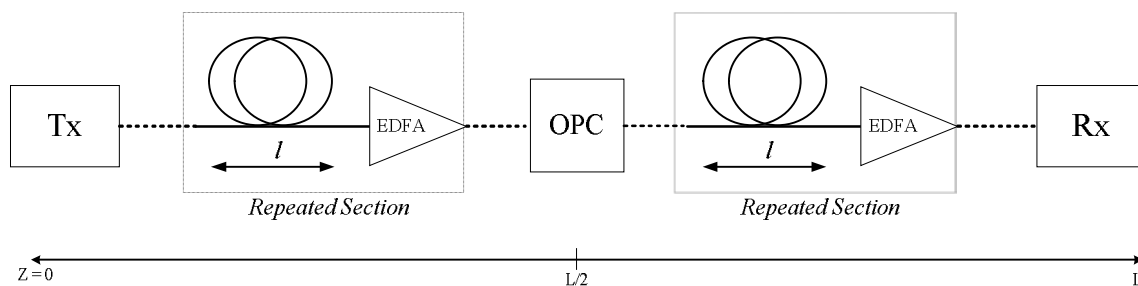


รูปที่ 1.4 ตัวอย่างโครงข่ายแบบเมช NSFNET (national science foundation network)

ด้วยความต้องการอัตราข้อมูลที่ยังมีอยู่อย่างไม่จำกัด ทำให้ยังคงมีการพัฒนาโครงข่ายทางแสงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งถ้าจะทำการเปลี่ยนแปลงทั้งโครงข่ายจะต้องลงทุนสูง ดังนั้นจึงเน้นไปที่การพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายแทน อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายปัจจุบันมี 2 ประเภท ได้แก่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์แบบแพสซีฟ แต่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นมีความเร็วต่ำ จึงเริ่มมีการหันมาใช้อุปกรณ์แบบแพสซีฟ ซึ่งรองรับข้อมูลที่มีความเร็วสูงขึ้นและระยะทางในการส่งไกลขึ้น แต่ก็จะมีผลกระทบอื่นตามมา เช่น การลดทอนของสัญญาณ (attenuation) การขยายออกของ

สัญญาณ (dispersion) และความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) ซึ่งเราสามารถจัดการผลกระทบเหล่านี้ได้

การลดทอนสัญญาณเราสามารถจัดการด้วยการวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) เช่น การใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบอีดีเอฟเอ (EDFA) เป็นต้น สำหรับการจัดการดิสเพอร์ชันนั้น มีการใช้ dispersion compensating fiber (DCF) วางเป็นรายคาบเพื่อให้อัตราการกระจายสัญญาณทุกจุดในโครงข่ายไม่เกินค่าที่กำหนด[21] และมีการใช้เครื่องสังยุคเฟสแสง(optical phase conjugator) ในการจัดการดิสเพอร์ชันโดยการวางในตำแหน่งกึ่งกลางของโครงข่ายเพื่อให้อัตราการกระจายสัญญาณก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงและหลังจากออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงหักล้างกันหมด อีกทั้งยังสามารถจัดการความไม่เป็นเชิงเส้นได้ด้วย มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในระบบการสื่อสารทางแสงเพื่อลดดิสเพอร์ชัน เช่น การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในระบบการสื่อสารทางแสงที่ใช้เส้นใยแสงแบบ dispersion-shifted fiber (DSF) เพื่อลดดิสเพอร์ชันได้หลายความยาวคลื่นพร้อมกัน ซึ่งสรุปได้ว่า ได้ศึกษาสัญญาณกลับเฟสของความยาวคลื่นหลายความยาวคลื่น (multiwavelength) การบิดเบี้ยวของสัญญาณ และวิธีลดผลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสัญญาณโดยการใช้ค่ากำลังที่เหมาะสม เพื่อการคืนรูปของสัญญาณ [22] การออกแบบการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในการส่งระยะทางไกลเพื่อจัดการดิสเพอร์ชัน โดยนำเครื่องสังยุคเฟสแสงวางที่กึ่งกลางของระบบ (รูปที่ 5) โดยได้ผลว่าสามารถส่งระยะทางไกลได้คือวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณให้สั้นกว่าความยาวไม่เชิงเส้น (nonlinearity length) ส่งสัญญาณในช่วงของดิสเพอร์ชันที่เหมาะสม และค่าเฉลี่ย GVD ควรจะมากกว่าความยาวไม่เชิงเส้น[23] การศึกษาการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสงเพื่อลดสัญญาณรบกวนเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear noise) จากเครื่องขยายสัญญาณทางแสงในระบบสื่อสารระยะทางไกล ซึ่งได้ผลว่าการใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงสามารถลดผลของสัญญาณรบกวนเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นได้[24] การศึกษาการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสงเพื่อลดผลจากปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง โดยสรุปว่าตำแหน่งของการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงไม่จำเป็นต้องอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางแต่เป็นตำแหน่งที่ทำให้กำลังของสัญญาณทั้งสองข้างสมมาตรกัน [25] การศึกษาการใช้งานเครื่องสังยุคเฟสแสงเพื่อลด nonlinear phase noise ในระบบการสื่อสารแบบระยะไกลยิ่งที่ใช้การมอดูเลตแบบ phase shift keying (PSK) ซึ่งได้ข้อสรุปว่าเมื่อใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงแล้ว ทำให้ประสิทธิภาพของระบบมากขึ้น และไม่มีผลของสัญญาณรบกวนเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้ dispersion compensating fiber[26] และล่าสุดนี้ได้มีการใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงในระบบสื่อสารทางไกลแบบดับเบิลยูดีเอ็ม เพื่อลดปัญหาของทั้งดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ซึ่งได้ผลว่าทำให้ได้ระยะทางการส่งมากขึ้น[27]



รูปที่ 1.5 ระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่มีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไว้ที่กึ่งกลางระบบ

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าการใช้งานเครื่องส่งยุคเฟสแสงเพื่อจัดการผลของดิสเพอร์ชันจะใช้กับโครงข่ายขนส่งระยะไกล (long-haul network) ซึ่งข้อดีของเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้นมีมากมายดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ในระดับโครงข่ายทางแสงนั้นแทบจะไม่เคยมีการทดลองการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายเลย มีเพียงหนึ่งงานวิจัยที่นำความสามารถนี้มาใช้ในโครงข่ายทางแสงในระดับนี้ [28][29] ซึ่งได้ทำการทดลองวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกับโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวนที่มี 6 สถานีและ 6 เส้นใยแสง มีการส่งข้อมูล 2 ทิศทาง (bi-direction) มีความยาวรวมทั้งหมด 637 km เพื่อจัดการผลของดิสเพอร์ชันในโครงข่าย 3 แบบคือ โครงข่ายที่ทำงานปกติ โครงข่ายที่มีสายเชื่อมโยงเสียหายและใช้กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบเปลี่ยนความยาวคลื่น (path protection) และโครงข่ายที่มีสายเชื่อมโยงเสียหายและใช้กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม (span protection) โดยใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งแบบเลื่อนความยาวคลื่นและไม่เลื่อนความยาวคลื่น ซึ่งผลการคำนวณดิสเพอร์ชันสะสมที่ได้หลังจากวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ไม่เกินค่าดิสเพอร์ชันลิมิต แต่ค่า optical signal-to-noise ratio (OSNR) ของระบบลดลง จากผลการวิจัยนี้ จึงมีความคิดว่าจะประยุกต์เครื่องส่งยุคเฟสแสงกับโครงข่ายแบบอื่นๆ ได้เช่นกัน

ในกรณีที่โครงข่ายมีระยะทางไกลมากๆ ระเบียบวิธีที่ใช้บนโครงข่ายแบบวงแหวน [28],[29] ซึ่งมีการกำหนดขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน (dispersion limit) ไว้ที่ ± 1600 ps/nm ที่อัตราการส่งข้อมูล (data rate) เท่ากับ 10 Gb/s ซึ่งขีดจำกัดดิสเพอร์ชันตลอดเส้นทางการสื่อสาร ไม่จำเป็นต้องวางไว้ที่ขีดจำกัดดิสเพอร์ชันก็ได้ ดังแสดงได้จากค่าดิสเพอร์ชันสะสมก่อนวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงของผลการทดลองต่างๆที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 1.1[27][42]-[55] ซึ่งเป็นงานวิจัยที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไว้ตรงกลางของระบบทั้งหมด

ตารางที่ 1.1 ดิสเพอร์ชันสะสมของงานวิจัยต่างๆ

เอกสารอ้างอิง	ระยะทาง [km]	ดิสเพอร์ชันสะสม[ps/nm]
[42]	360	5760
[43]	94, 101	1560,1705
[44]	200	3400
[45]	100, 100	1780, 1790
[46]	2000	-8000
[47]	100	1751
[48]	106.5	1704
[49]	106	1704.48
[50]	208	-2283
[51]	100,103.8	1714, 1713.74
[52]	10200	80000
[27]	283.5	160000
[53]	1200	20436
[54]	5000	-5000
[55]	5000	81500

จากตารางที่ 1.1 จะสรุปได้ว่า ดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางไม่จำเป็นต้องเป็นค่าที่กำหนดไว้ แต่ที่ปลายทางนั้น ต้องมีค่าตามที่สถานีปลายทางสามารถรับได้ ซึ่งในที่นี้ เราจะกำหนดให้สถานีปลายทางมีค่าเท่ากับ ± 1600 ps/nm ที่อัตราการส่งข้อมูล 10 Gb/s สาเหตุที่อ้างถึงเงื่อนไขนี้ เป็นเพราะว่าได้ศึกษาถึงระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวน[28][29] ซึ่งเมื่อนำมาใช้ในโครงข่ายที่ทำการวิจัย จะทำให้ไม่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ เพราะวาระยะทางของแต่ละทราฟฟิกนั้น ไม่เท่ากัน มีระยะทางไกลและเส้นทางของแต่ละทราฟฟิกนั้นมีหลายเส้นทาง ทำให้การซ้อนทับ(intersection)ช่วงของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้ยังทำให้มีจำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงมีจำนวนมาก ทำให้ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เพราะจะมีจำนวนมากกว่าการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่จุดกึ่งกลางข่ายเชื่อมโยง เรื่องปัญหาที่ไม่สามารถซ้อนทับหาช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง จะกล่าวละเอียดในบทที่ 3

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาการประยุกต์ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงกับโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร่และเลือกสัญญาณ กับโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบเมช รวมถึงการประยุกต์ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงกับโครงข่ายดังกล่าวที่เกิดการล้มเหลวไม่เกิน 1 ข่ายเชื่อมโยง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนาระเบียบขั้นตอนวิธีการกำหนดตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็มแบบแพร์และเลือกสัญญาณ
2. พัฒนาระเบียบขั้นตอนวิธีการกำหนดตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็มแบบเมซ
3. พัฒนาระเบียบขั้นตอนวิธีการกำหนดตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็มแบบเมซที่เกิดการล้มเหลวไม่เกิน 1 ข่ายเชื่อมโยง
4. ศึกษาถึงผลกระทบของ conversion efficiency อันนำมาซึ่ง optical signal-to-noise ratio (OSNR) ที่จะต่ำลง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดลองวิธีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกับโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็มแบบแพร์และเลือกสัญญาณและโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็มแบบเมซเท่านั้น
2. การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกับโครงข่ายนั้นจะไม่คำนึงถึงผลของปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้น
3. กำหนดให้กรณีที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย เกิดเฉพาะกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเท่านั้น
4. กำหนดกลไกการกู้คืนสัญญาณเป็นแบบใช้วิธีร่วมกันเท่านั้น
5. จำนวนตัวอย่างโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็มแบบแพร์และเลือกสัญญาณใช้ 1 ตัวอย่างโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็มแบบเมซใช้ 3 ตัวอย่าง
6. กำหนดผลการทดลองด้วยการคำนวณเท่านั้น โดยมีได้ทำการทดลองกับระบบจริง

1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

1. ศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับพื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อส่งแสงผ่านเส้นใยแสง โดยเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันรวมทั้งการแก้ไขดิสเพอร์ชันในโครงข่าย
2. ศึกษาคุณสมบัติโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ และโครงข่ายแบบเมซ

3. ศึกษาคุณสมบัติของเครื่องส่งยุคเฟสแสง การทำงาน ความสามารถ และตัวอย่างการนำไปใช้งานของอุปกรณ์
4. ศึกษาความแตกต่างของการใช้งานช่องสัญญาณแบบทีดีเอ็ม (TDM), ดับเบิลยูดีเอ็ม (WDM) และดีดับเบิลยูดีเอ็ม (DWDM)
5. ศึกษาการใช้งานเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ
6. คิดระเบียบวิธีหาตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ และจำนวนของเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่จะใช้ทั้งหมด โดยจะต้องไม่ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมเกินค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด
7. ศึกษาการใช้งานเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมช
8. คิดระเบียบวิธีหาตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมช และจำนวนของเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่จะใช้ทั้งหมด โดยจะต้องไม่ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมเกินค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด และสามารถใช้งานได้เมื่อโครงข่ายได้รับการเสียหาย และข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายไม่เกินหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (single-link failure) โดยได้รับการกู้คืนสัญญาณแบบใช้วิธีร่วมกัน
9. วิเคราะห์ผล optical signal-to-noise ratio (OSNR) ของระบบหลังจากที่ได้มีการใช้งานเครื่องส่งยุคเฟสแสง เพราะเครื่องส่งยุคเฟสแสงจะทำให้ค่า OSNR ลดลงอย่างมาก
10. เรียบเรียงรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับวิธีชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยการใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสง รวมทั้งการประยุกต์ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงกับโครงข่ายชนิดต่างๆ
2. ประยุกต์การใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณและแบบเมช และคิดค้นระเบียบวิธีในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงซึ่งจะทำให้ดิสเพอร์ชันของโครงข่ายไม่เกินค่าที่กำหนดไว้เป็นครั้งแรก
3. ระเบียบวิธีในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมชกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายไม่เกินหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

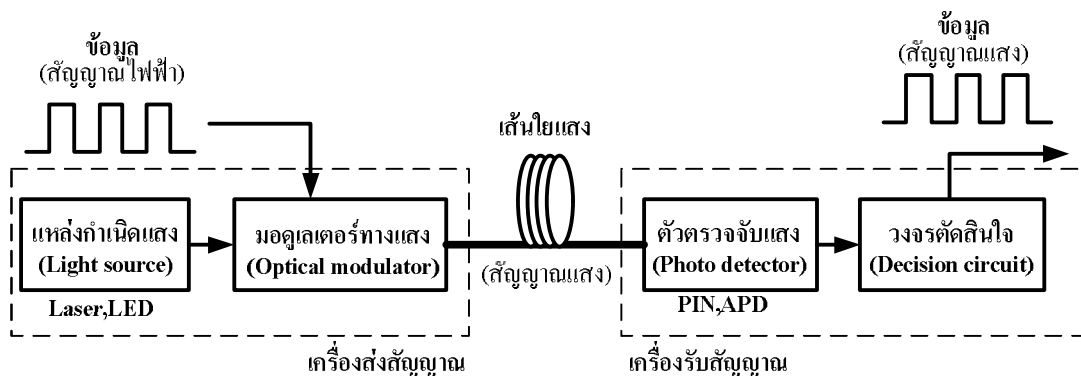
4. ตีพิมพ์และนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติ

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ปัจจุบัน การสื่อสารทางแสงเข้ามามีบทบาทสำหรับการสื่อสารมากยิ่งขึ้น เนื่องจากมีความเร็วในการส่งข้อมูลสูง และช่องสัญญาณในการสื่อสารมากกว่าการสื่อสารแบบเก่า อีกทั้งไม่ได้รับผลการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสัญญาณภายนอก ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ จึงมีการพัฒนาการส่งสัญญาณทางแสงจากระบบดับเบิลยูดีเอ็มแบบเดิม ให้เป็นระบบดับเบิลยูดีเอ็ม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งให้มากยิ่งขึ้น แต่ในการส่งโดยรวมแสงหลายความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน จะมีผลกระทบในกรณีที่ส่งสัญญาณในระยะทางไกล เพราะว่าแสงจะเกิดการบานออก และอาจทำให้ไปรบกวนสัญญาณแสงของช่องสัญญาณที่อยู่ใกล้กัน ทำให้การส่งข้อมูลผิดเพี้ยน ดังนั้น จึงมีการนำเครื่องส่งยูคเฟสแสงเข้ามาใช้ในระบบเพื่อแก้ไขปัญหการบานออกของสัญญาณ แต่การวางเครื่องส่งยูคเฟสแสง จะทำให้พลังงานของสัญญาณมีค่าลดลง จึงต้องมีการศึกษาเพื่อหาตำแหน่งการวางเครื่องส่งยูคเฟสแสงในโครงข่ายที่เหมาะสม ในบทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง และการมัลติเพล็กซ์สัญญาณ รวมถึงทฤษฎีพื้นฐานสำหรับเครื่องส่งยูคเฟสแสง และแนวทางคำนวณตำแหน่งสำหรับเครื่องส่งยูคเฟสแสง ในโครงข่าย

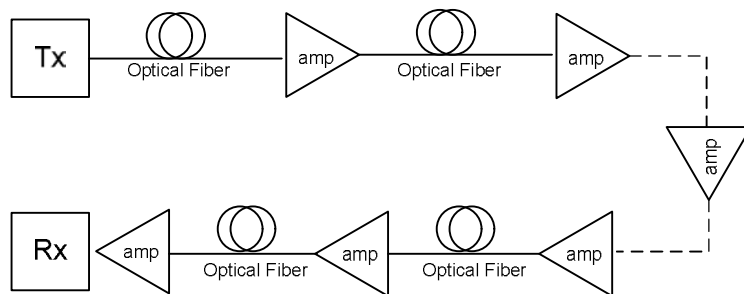
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง[30]

ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงโดยทั่วไปสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ คือ เครื่องส่งสัญญาณแสง (optical transmitter) เส้นใยแสง (optical fiber) และเครื่องรับสัญญาณแสง (optical receiver)

สำหรับระบบการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงระยะไกล (long-haul transmission) แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ามีอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (optical amplifier) หรือ อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (repeater) วางคั่นระหว่างทางเป็นช่วงๆ เนื่องจากการสูญเสียกำลังงานที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสงโดยจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณทางแสงในแต่ละย่านความยาวคลื่น (optical attenuation coefficient : α dB/km) ทำให้กำลังงานสัญญาณแสงลดลงและอาจจะเป็นผลให้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสง (optical detector) ไม่สามารถตรวจจับกำลังงานแสงได้ สำหรับค่ากำลังงานต่ำสุดที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแสงจะสามารถแปลงกำลังงานแสงเป็นกำลังงานไฟฟ้าได้คือค่าสภาพไว (sensitivity) ซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ



รูปที่ 2.2 ระบบสื่อสารสัญญาณผ่านเส้นใยแสงในระยะทางไกล

2.2 ทฤษฎีการส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสง

เนื่องจากสัญญาณแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ดังนั้นสมการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงย่อมมีความสัมพันธ์กับสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) โดยเริ่มต้นพิจารณาการเดินทางของสัญญาณแสง จากสมการความหนาแน่นกระแสและสมการความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จนท้ายที่สุดจะได้สมการการเดินทางของสัญญาณแสงในเส้นใยแสงเป็นไปดังสมการที่ (2.1) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเจอร์ (Nonlinear Schrödinger equation, NLSE) [10][23]

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + i\gamma |A|^2 A , \tag{2.1}$$

โดยที่ A เป็นกรอบคลื่น (envelope) ของสัญญาณ α เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (attenuation constant) β_2 เป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่าจีวีดี (group-velocity dispersion, GVD) γ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear coefficient) z เป็นระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางในเส้นใยแสง และ T เป็นกรอบอ้างอิงเวลาที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับความเร็วกลุ่ม (v_g) ซึ่งสามารถแสดงดังในสมการที่ (2.2)

$$T = t - \frac{z}{v_g}, \quad (2.2)$$

โดยที่ t เป็นเวลาจริง เมื่อพิจารณาพจน์ทางขวามือของสมการที่ (2.2) ซึ่งแสดงถึงปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สัญญาณ จะพิจารณาได้เป็น 3 พจน์ พจน์แรกคือการสูญเสีย (loss) กำลังสัญญาณ ซึ่งมากขึ้นไปตามระยะทางของเส้นใยแสง แต่สามารถชดเชยกำลังสัญญาณได้ด้วยเครื่องขยายสัญญาณแสง สำหรับพจน์ที่สอง คือ GVD (β_2) จะส่งผลให้สัญญาณพัลส์ขยายกว้างออก และสำหรับพจน์สุดท้าย คือ ผลของปรากฏการณ์เคอร์ (Kerr effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นภายในเส้นใยแสงที่ทำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง และส่งผลให้สเปกตรัมของสัญญาณขยายออกอีกด้วย โดยที่ความรุนแรงของปรากฏการณ์เคอร์ในเส้นใยแสงจะขึ้นอยู่กับกำลังงานสูงสุด (peak power) ของสัญญาณ

หัวข้อถัดไปเป็นการแยกพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สัญญาณดังที่ได้กล่าวมา ดังนี้

2.2.1 การสูญเสียกำลังสัญญาณ (Attenuation loss)

เป็นการสูญเสียค่ากำลังสัญญาณ [10] อันเนื่องมาจากการที่แสงเดินทางในเส้นใยแสงเป็นระยะทางหนึ่งๆ โดยมีสมการแสดงการลดทอนกำลังสัญญาณดังนี้

$$P(L) = P(0) - \alpha L, \quad (2.3)$$

โดยที่ $P(L)$ คือ กำลังของสัญญาณพัลส์ทางแสงที่ระยะจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

$P(0)$ คือ กำลังสัญญาณพัลส์ทางแสงที่อุปกรณ์ส่งสัญญาณ [dB]

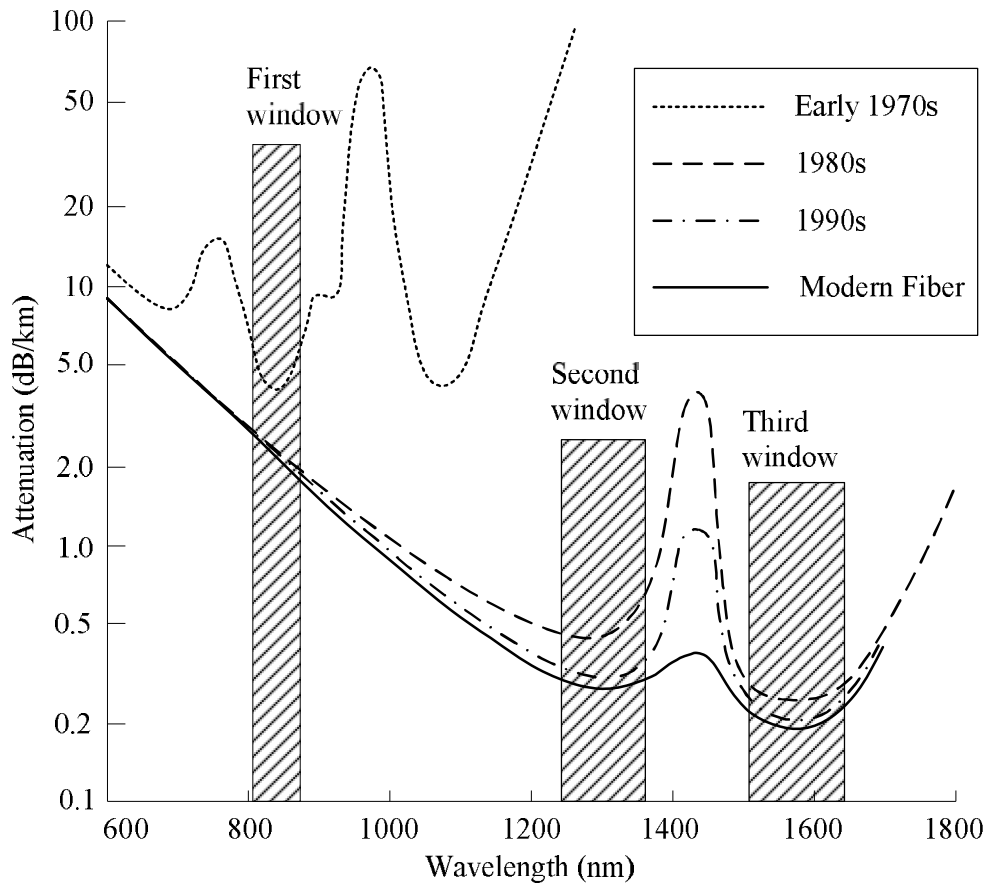
α คือ ค่าคงตัวของ การลดทอน [dB/km]

สำหรับค่าคงตัวการลดทอน α นั้นแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงเส้นโค้งทั้ง 4 เส้นโดยเส้นที่สองจากบนสุดซึ่งเป็นเส้นประแสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนของเส้นประสลับจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงยุค 90 และล่างสุดเส้นที่บซึ่งแสดงถึงเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (first window) นั้นจะทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm บนเส้นใยแสงที่ทำจากซิลิกา และจากเส้นโค้งเราจะพบจุดยอดที่เกิดจากความขึ้นและผลของการกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) ซึ่งทำให้อัตราการสูญเสียสัญญาณมีค่าสูงดังเส้นประในรูปที่ 2.3 หลังจากนั้นก็มีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการสูญเสียสัญญาณในยุคที่ 2 (second window) ซึ่งแสดงโดยเส้นประสลับจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการสูญเสียสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ต่อมาในช่วงปี 1977 Nippon telegraph and telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้งานระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (third window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm และยังคงแสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km ในการใช้งานนั้นถ้าเป็นการส่งผ่านข้อมูลระยะสั้นๆ เช่น ระบบ LAN เราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งผ่านข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (forth window) ซึ่งเพิ่มการใช้ความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm

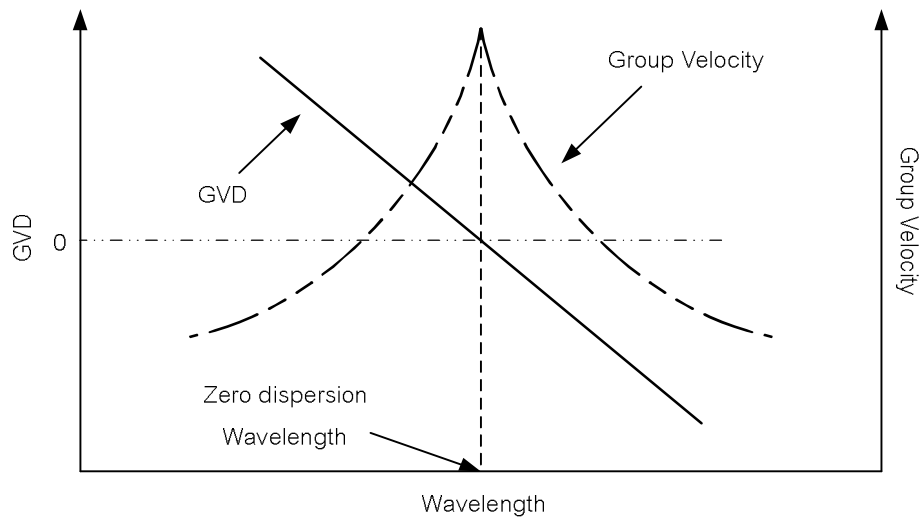
2.2.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (Fiber dispersion)

สัญญาณทางแสงจะเกิดการผิดเพี้ยนมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสงมีระยะทางยาวขึ้น การผิดเพี้ยนนี้เป็นผลมาจากดิสเพอร์ชันแบบภายในแผนคลื่น (intramodal dispersion) และผลการประวิงระหว่างโหมด (intermodal delay effects)[36] โดยการผิดเพี้ยนเหล่านี้สามารถอธิบายด้วยการตรวจสอบความเร็วกลุ่ม (group velocities) ของโหมดการเดินทาง (guided modes) ซึ่งความเร็วกลุ่มนี้คือความเร็วของพลังงานในแต่ละโหมดที่เดินทางในเส้นใยแสง รูปที่ 2.4 เป็นการแสดงตัวอย่างของความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม (group velocity dispersion : GVD) เทียบกับความยาวคลื่นซึ่งเห็นได้ว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าแตกต่างกันและจะมีค่าสูงสุดที่ค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ GVD เป็นปรากฏการณ์ที่

สัญญาณแสงหนึ่งๆ ประกอบด้วยหลายความถี่โดยองค์ประกอบแต่ละความถี่นั้นมีความเร็วกลุ่มต่างกัน จึงส่งผลทำให้แต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแสงใช้เวลาที่แตกต่างกันในการเดินทางซึ่งมีผลทำให้สัญญาณแสงขยายความกว้างออกไปเมื่อมาถึงปลายทาง



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแสงกับความยาวคลื่น [10]



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม
ในแต่ละความยาวคลื่น

ดิสเพอร์ชันแบบภายในแผ่นคลื่นหรือดิสเพอร์ชันภายในสีสัญญาณ (chromatic dispersion) เป็นการขยายตัวของพัลส์ที่เกิดขึ้นในโหมดเดียว (single mode) เมื่อส่งสัญญาณแสงผ่านเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว ผลของดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงจะเด่นชัดเนื่องจากสัญญาณแสงประกอบขึ้นด้วยหลายความถี่ซึ่งแต่ละความถี่มีค่าของดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่ต่างกัน ผลของค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันนี้จะทำให้แสงแต่ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้พัลส์สัญญาณมีการขยายตัวออก (broadening) และเดินทางมาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน เวลาที่ใช้ในการเดินทางคือ

$$\tau = \frac{L}{v_g} = L \frac{\delta\beta}{\delta\omega} = \frac{L}{C} \frac{\delta\beta}{\delta K}, \quad (2.4)$$

โดย L คือ ระยะทาง (km)

v_g คือ group velocity

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

จากสมการที่ (2.4) จะได้ความเร็วกลุ่มเท่ากับ

$$\Delta\tau = L\beta_2\Delta\omega, \quad (2.5)$$

$$\beta_2 = \frac{\delta^2\beta}{\delta\omega^2} = \frac{\delta\beta_1}{\delta\omega} = \frac{\delta\left(\frac{1}{v_g}\right)}{\delta\omega}, \quad (2.6)$$

β_2 คือ group velocity dispersion : GVD parameter

ถ้าเขียนอยู่ในรูปความยาวคลื่นจะได้

$$\Delta\tau = \frac{\delta\left(\frac{1}{v_g}\right)}{\delta\lambda}\Delta\lambda = DL\Delta\lambda, \quad (2.7)$$

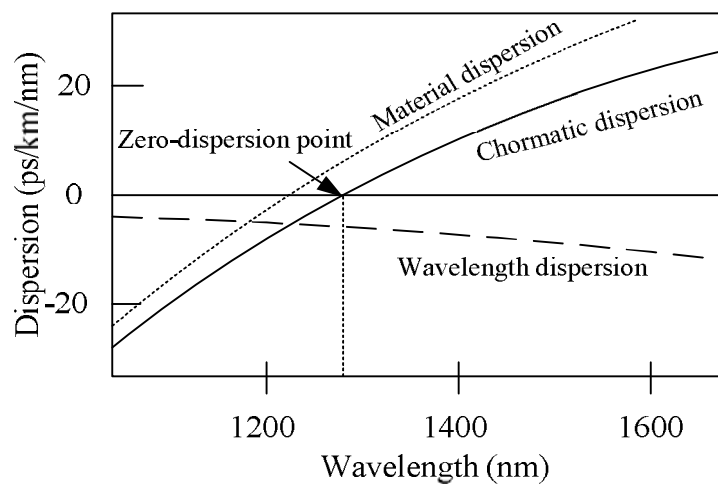
$$D = \frac{\delta\left(\frac{1}{v_g}\right)}{\delta\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\beta_2, \quad (2.8)$$

โดย D คือ dispersion (ps/nm/km)

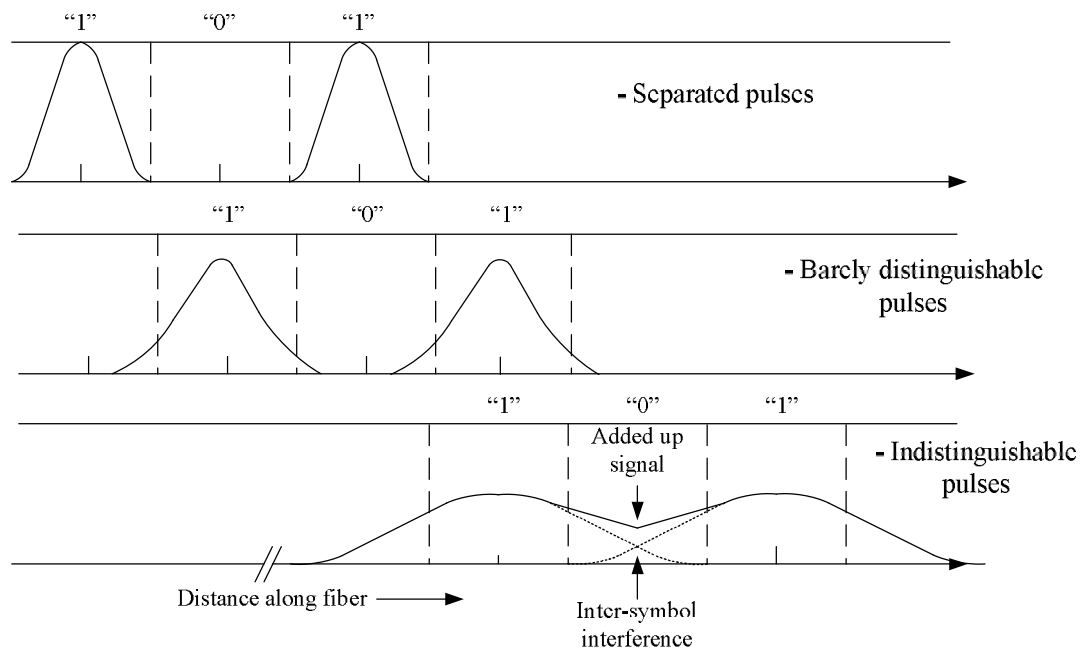
รูปที่ 2.5 แสดงค่าดิสเพอร์ชันที่แตกต่างกันไปตามความยาวคลื่นของแสง การส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1310 nm สำหรับ single mode fiber (SMF: ITU-T G.652) ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ (zero-dispersion point) จะหลีกเลี่ยงผลของดิสเพอร์ชันได้ ยิ่งไปกว่านั้นได้มีการปรับปรุงเพื่อให้เกิดค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่นแถบ 1550 nm ซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราการลดทอนต่ำ เราเรียกเส้นใยแสงประเภทนี้ว่า dispersion shifted fiber (DSF: ITU-T G.653) และเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่นแถบ 1550 nm เราเรียกเส้นใยแสงประเภทนี้ว่า non-zero dispersion shift fiber (NZDSF: ITU-T G.655)

อย่างไรก็ตาม ในระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นซึ่งสัญญาณแสงประกอบด้วยหลายความยาวคลื่นรวมอยู่ด้วยกัน แม้จะมีการเลือกความยาวคลื่นหนึ่งให้เกิดค่าดิส

เพอร์ชันเป็นศูนย์ความยาวคลื่นอื่นๆที่เหลื๋อย่อมได้รับผลจากดิสเพอร์ชันค่าต่างๆ แตกต่างกันไป ทำให้เกิดการบิดเพี้ยนของสัญญาณในช่องสัญญาณที่ต่างกัน (signal distortion) และรุนแรงไม่เท่ากันอันเนื่องมาจากค่าความชันของเส้นโค้งดิสเพอร์ชัน (dispersion slope) โดยการบิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการซ้อนทับกันของพัลส์สัญญาณซึ่งถ้าไม่ทำการแก้ไขจะทำให้ข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้ รูปที่ 2.6 แสดงการเกิด inter-symbol interference (ISI) จากผลดิสเพอร์ชัน



รูปที่ 2.5 Chromatic dispersion[35]



รูปที่ 2.6 การเกิด Inter-symbol interference [40]

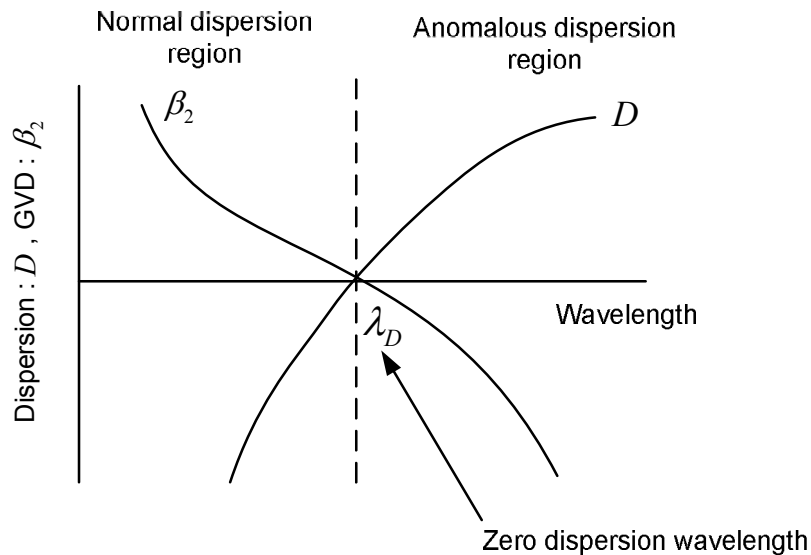
ส่วนการประวิงระหว่างโหมด (intermodal delay) เป็นผลของแต่ละโหมดการเดินทางของแสงในตัวกลางที่มีความแตกต่างกันของค่าความเร็วกลุ่มที่ความถี่เดียวกันซึ่งเกิดในเส้นใยแสงแบบหลายโหมด (multi-mode fiber : MMF) จะมีผลรุนแรงกว่าเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว

การแบ่งช่วงของดิสเพอร์ชัน แบ่งเป็น 2 ช่วงคือ normal dispersion และ anomalous dispersion ดังรูปที่ 2.7 คือ

1. Normal dispersion region คือบริเวณที่ส่วนประกอบของความยาวคลื่นยาวสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าส่วนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า จะมีค่า $D < 0$ และ $\beta_2 > 0$

2. Anomalous dispersion region คือบริเวณที่ส่วนประกอบของความยาวคลื่นสั้นสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าส่วนที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า จะมีค่า $D > 0$ และ $\beta_2 < 0$

Zero dispersion wavelength คือ จุดที่ดิสเพอร์ชันเท่ากับศูนย์ $D = 0$ และ $\beta_2 = 0$ ใน single mode fiber ซึ่งจะมีตำแหน่งอยู่ที่ 1310 nm และใน dispersion-shifted fiber จะมี zero dispersion wavelength อยู่ที่ 1550 nm



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง β_2 และ D ในช่วงของดิสเพอร์ชัน[32]

2.2.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (Fiber nonlinearity)

ผลของเคอร์เป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังงานของสัญญาณ ทำให้เฟสของสัญญาณที่ปลายทางมีการเปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นอยู่กับกำลังงานของสัญญาณ เฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปโดยที่มีขนาดขึ้นอยู่กับกำลังงานเรียกว่า การเลื่อนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear phase shift) เราสามารถแบ่งปรากฏการณ์เคอร์ที่มีผลต่อสัญญาณเดินทางในระบบเส้นใยแสงออกเป็นสามประเภทคือ self-phase modulation (SPM) cross-phase modulation (XPM) และ four-wave mixing (FWM)[10][31][32]

1. Self-phase modulation (SPM) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณโดยกำลังของสัญญาณที่ความถี่เดียวกันกับสัญญาณเอง อันเป็นผลทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณแสงด้วยกำลังของตัวสัญญาณเองซึ่งเฟสที่เลื่อนไปนั้นมีค่าเท่ากับ

$$\phi_{NL} = n_2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) L |E_0|^2 = n_2 k_0 L |E_0|^2, \quad (2.9)$$

โดยที่ n_2 คือ สัมประสิทธิ์ดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear-index coefficient)

L คือ ความยาวของเส้นใยแสง [km]

$|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสง

k_0 คือ เลขคลื่นในที่ว่าง (free space wave number)

SPM ทำให้สเปกตรัม (spectrum) ของสัญญาณขยายออกและเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไป จะถูกเหนี่ยวนำมากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังงานแสง สูงสุด

2. *Cross-phase modulation (XPM)* ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์ ω_1 และ ω_2 ซึ่งมีค่าต่างกัน ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง โดยแต่ละสัญญาณพัลส์ ณ ช่องสัญญาณหนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปเนื่องจาก กำลังงานของสัญญาณแสง อื่นที่อยู่ถี่คลื่นพาห์มีความถี่ที่ต่างออกไปเหนี่ยวนำให้เฟสของสัญญาณแสงเปลี่ยนไปจากเดิม

3. *Four wave mixing (FWM)* เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 4 ความถี่ที่มีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไข การจับคู่ความถี่ (frequency matching) จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังข้ามให้แก่กัน และกัน การกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมา โดยเกิดจากสัญญาณพัลส์หลายๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่างๆกันมาผสมผสานกัน สำหรับการเกิดสัญญาณความถี่ใหม่ (f_4) จากสัญญาณความถี่ f_1 , f_2 และ f_3 ซึ่งเป็นไปตามสมการ (14)

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3, \quad (2.10)$$

และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (phase matching condition) ดังนี้

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3, \quad (2.11)$$

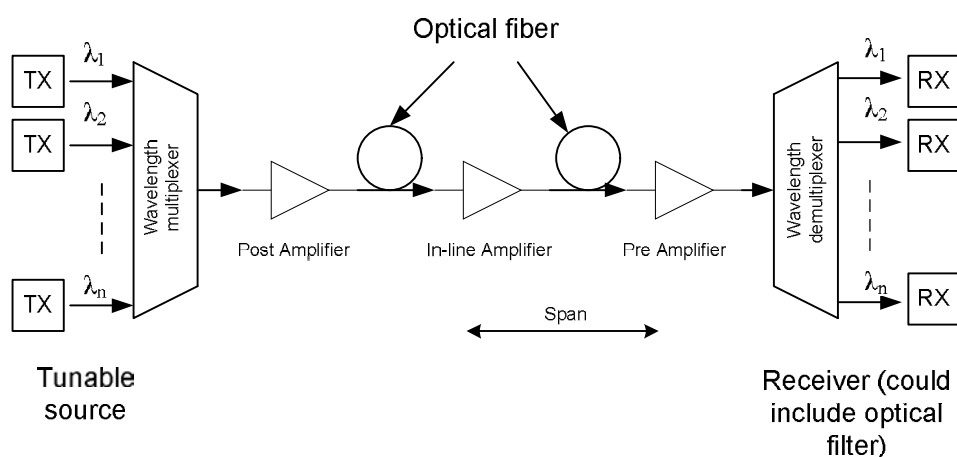
โดยที่ k_n คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n

ผลของ FWM ในกรณีของช่องสัญญาณเดี่ยวเรียกว่า intra-channel FWM (IFWM) จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมาถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกันจนทำให้เกิดพัลส์เงา (ghost pulse) ขึ้นมาในสัญญาณที่มอดูเลตสัญญาณเชิงเลขแบบออน-ออฟ (ON-OFF keying: OOK) สำหรับผลของ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณ จะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมา และจะมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือว่าเชื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้น แต่ว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่า XPM

การลดปัญหาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงสามารถทำได้โดยการจัดสรรความยาวคลื่นในแต่ละสายเชื่อมโยงให้มีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นมากที่สุดเพื่อทำให้การวิ่งตัดกันของสัญญาณเนื่องจากความเร็วกลุ่มของสัญญาณที่แตกต่างกันเป็นไปได้ยากขึ้นพร้อมทั้งทำให้การจับคู่ความถี่เป็นไปได้ยากขึ้นด้วยเช่นกัน

2.3 ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางแสง

2.3.1 ระบบและองค์ประกอบของโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็ม



รูปที่ 2.8 ระบบและองค์ประกอบของดับเบิลยูดีเอ็ม

จากประสิทธิภาพของเส้นใยแสงที่มีความกว้างของแบนด์วิดท์มหาศาลทำให้เราสามารถเลือกใช้ช่วงความยาวคลื่นได้ตั้งแต่ 800 nm ถึง 1600 nm [33] ซึ่งมีจำนวนความยาวคลื่นมากมายเพียงพอกับการใช้งานที่หลากหลายของโครงข่ายทั้งการส่งข้อมูล ภาพ และเสียงด้วย

อัตราการส่งข้อมูลความเร็วสูง การที่จะใช้ประโยชน์ของจำนวนความยาวคลื่นที่มากมายขนาดนี้ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นไปอีกนั้นต้องมีการใช้เทคโนโลยีดับเบิลยูดีเอ็ม [10], [32] โดยข้อมูลแต่ละชุดจะครอบครองสัญญาณแสงในแต่ละความยาวคลื่นโดยระบบและองค์ประกอบของดับเบิลยูดีเอ็มดังรูปที่ 2.8 มีสัญญาณจำนวน N ความยาวคลื่นจะถูกมัลติเพล็กซ์และส่งไปตามเส้นใยแสงเส้นเดียว และอุปกรณ์ที่ปลายทางจะเลือกรับในความยาวคลื่นที่ต้องการ ในช่วงแรกระบบดับเบิลยูดีเอ็ม จะเป็นการส่งความยาวคลื่นเพียง 2 4 8 12 และ 16 ความยาวคลื่น โดยใช้ส่งสัญญาณในระยะทางสั้นๆ เทคโนโลยีในระยะถัดมาคือซีดับเบิลยูดีเอ็ม (coarse wavelength division multiplexing : CWDM) และดีดับเบิลยูดีเอ็ม (dense wavelength division multiplexing : DWDM) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับขีดจำกัดของระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่น เทคโนโลยีซีดับเบิลยูดีเอ็มทั่วไปแล้วจะมีระยะห่างของความยาวคลื่นอยู่ที่ 20 nm (3000 GHz) มีจำนวนความยาวคลื่นอยู่ที่ 18 ความยาวคลื่นและถูกจำกัดอยู่ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 1270 nm ถึง 1610 nm ตามมาตรฐาน ITU-T G.694.2 ส่วนเทคโนโลยีดีดับเบิลยูดีเอ็มนั้น ปกติจะมีระยะห่างของแต่ละความยาวคลื่นอาจจะอยู่ที่ 200 GHz 100 GHz 50 GHz หรือ 25 GHz โดยมีจำนวนช่องสัญญาณให้สามารถใช้ได้จำนวนนับร้อยช่องสัญญาณ ตามอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่มีใช้งานและสามารถส่งสัญญาณไปได้หลายพันกิโลเมตรโดยต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณตามเส้นทาง ทำให้ระหว่างการเดินทางของสัญญาณผ่านเส้นใยแสงจะต้องมีการขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง

ลักษณะการใช้งานอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. Post amplifier : วางไว้ก่อนเข้าสายส่งเพื่อเพิ่มกำลังของสัญญาณ
2. Line amplifier : วางไว้ระหว่างสายส่งสัญญาณเป็นช่วงๆ เพื่อชดเชยการลดทอนสัญญาณเนื่องจากเส้นใยแสง
3. Preamplifier : ทำการขยายสัญญาณเพื่อรับสัญญาณให้ดีขึ้นก่อนเข้าอุปกรณ์รับสัญญาณ

ส่วนระยะห่างของอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (span) นั้น ต้องไม่กำหนดให้มีระยะทางมากเกินไปจนกำลังสัญญาณถูกลดทอนลง ทำให้อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงไม่สามารถ

ตรวจจับได้หรือทำให้อัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณและกำลังของสัญญาณรบกวนทางแสง (optical signal-to-noise ratio: OSNR) มีค่าต่ำซึ่งจะแสดงถึงประสิทธิภาพที่ไม่ดีของระบบ

2.3.2 ระบบและองค์ประกอบของโครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็ม (DWDM)

ระบบดีดับเบิลยูดีเอ็ม (DWDM) พัฒนามาจากระบบสื่อสารทางแสงด้วยเส้นใยแสงที่ใช้เพียงแสงที่มีค่าความยาวคลื่นคงที่เพียงค่าเดียว เช่น 1330 หรือ 1550 nm เมื่อนี้ถึงระบบสื่อสารข้อมูลหลายช่องสัญญาณในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงนำแสงที่ผ่านมา มักจะนึกถึงระบบ TDM/PCM (time division multiplex / pulse code modulation) ที่ใช้ระบบสายส่งที่เป็นสายทองแดง และระบบ SDH/SONET (synchronous digital hierarchy / synchronous optical network) ที่ใช้เส้นใยแสงในระบบสายส่ง ซึ่งระบบ SDH/SONET นี้สามารถส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วหลายระดับ ตัวอย่างเช่น ความเร็วที่อัตรา 2.5 Gb/s ซึ่งเป็นของระบบ STM-16 ที่ใช้ระบบสายส่ง OC-48 ซึ่งระบบ STM-16 นี้ใช้เส้นใยแสงเพียงเส้นเดียว (หรือคู่เดียวในระบบรับส่ง) โดยใช้แสงเพียงความยาวคลื่นเดียว (เช่น 1550 nm) เป็นคลื่นพาห้สำหรับส่งข้อมูลหลายช่องสัญญาณที่ถูกจัดรวมกันด้วยเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ (multiplex) ซึ่งทำงานด้วยวงจรรีเลย์ออปติคัล

ธรรมชาติของมนุษย์ต้องการพัฒนา แม้ว่าระบบสื่อสารจะส่งข้อมูลได้เร็วถึง 2.5 Gb/s แต่ในปัจจุบันก็ยังพยายามที่จะคิดหาวิธีเพิ่มความเร็วมากขึ้น ซึ่งการเพิ่มความเร็วในการส่งข้อมูล มีวิธีการหลักๆ อยู่ 2 วิธี คือ

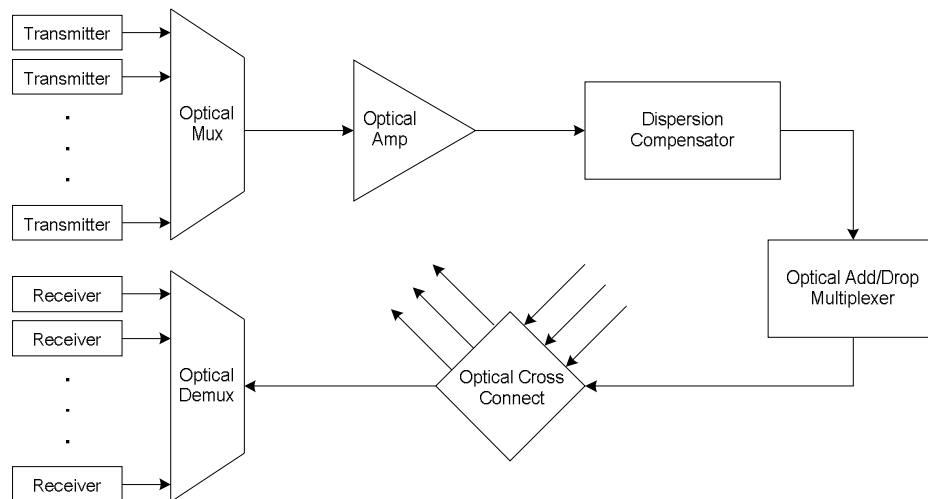
1. เพิ่มอัตราเร็วจากระบบเดิมที่ใช้อยู่ ซึ่งระบบเดิมยังคงสามารถพัฒนาให้มีขีดการทำงานเพิ่มขึ้นได้อีก ที่เห็นอยู่ก็มากถึง 40 Gb/s แต่สุดท้ายอัตราเร็วในการพัฒนาอาจช้าลงและไม่แน่นอน เพราะถูกจำกัดด้วยตัวของเทคโนโลยีเอง โดยเฉพาะความเร็วในการทำงานของอุปกรณ์ทางออปติคัล ซึ่งจะทำให้ระบบมีราคาแพงขึ้นมาก

2. เพิ่มจำนวนความยาวคลื่นแสงในเส้นใยแสงเส้นเดิม เทคนิคนี้สามารถกระทำได้โดยอาศัยเทคโนโลยีที่มีอยู่เดิม อีกทั้งเส้นใยแสงเดิมในระบบยังพอสามารถรองรับขีดการทำงานนี้ได้ ซึ่งจากแนวคิดนี้เป็นจุดเริ่มต้นของระบบสื่อสารสัญญาณแบบดับเบิลยูดีเอ็ม หรือ wavelength division multiplexing ซึ่งพัฒนามาเป็นดีดับเบิลยูดีเอ็ม ในปัจจุบัน

ในระบบดับเบิลยูดีเอ็มเดิม มักนิยมใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 1330 และ 1550 nm แทนช่องสัญญาณอิสระรวมกันทางแสงแล้วส่งไปในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน ซึ่งวิธีนี้ทำให้ไม่สามารถเพิ่มช่องสัญญาณที่อยู่ในเทอมของความยาวคลื่นแสงได้มากนัก เพราะแสงในแต่ละช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกันมาก จะมีค่าการลดทอนสัญญาณไม่เท่ากัน ทำให้ระยะทางสูงสุดที่สามารถส่งข้อมูลได้ ไม่เท่ากันด้วย ทำให้ในระบบสื่อสารทางไกลต้องใช้สถานีทวนสัญญาณ (repeater) แยกกันสำหรับแต่ละความยาวคลื่น เป็นผลทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น และทำให้ระบบมีความยุ่งยาก การแก้ปัญหาทำได้โดยเลือกช่องสัญญาณให้มีค่าความยาวคลื่นแสงใกล้เคียงกัน โดยเป็นแสงในช่วงของหน้าต่างความยาวคลื่นแสงค่าหนึ่ง เช่น ในระบบปัจจุบัน มักจะเลือกช่องหน้าต่างความยาวคลื่นแสงในช่วง 1550 nm และความยาวคลื่นแสงของแต่ละช่องสัญญาณจะมีช่วงห่างกัน (channel spacing) ไม่มาก อาจไม่ถึง 1 nm หรือมากกว่า 1 nm เล็กน้อย เช่นระบบดับเบิลยูดีเอ็ม ระบบหนึ่งมี 8 ช่องสัญญาณ อาจประกอบไปด้วยความยาวคลื่นแสง 1550 nm 1551 nm 1552 nm ... 1557 nm ซึ่งหมายถึงมีช่วงของ channel spacing เท่ากับ 1 nm เป็นต้น การที่กำหนดให้ channel spacing มีค่าน้อยๆ นั้นหมายถึงการเพิ่มโอกาสให้มีอัตราการส่งข้อมูลหรือบิตเรต (bit rate) เพิ่มมากขึ้นด้วย

โครงสร้างพื้นฐานโดยรวมของระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงแบบดับเบิลยูดีเอ็ม อาจสรุปได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นระบบสื่อสารแบบทางเดียว (simplex) เริ่มจาก transmitter ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนข้อมูลทางไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสงแล้วส่งเข้าสู่เส้นใยแสง transmitter หนึ่งชุดจะส่งแสงออกมา 1 ความยาวคลื่น ถือเป็น 1 ช่องสัญญาณ ซึ่งข้อมูลแสงหนึ่งช่องสัญญาณนี้ อาจถูกมัลติเพล็กซ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ให้มีบิตเรตสูงมากๆ เช่น 2.5 Gb/s หรือ 10 Gb/s จากนั้นแสงทุกช่องสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกัน จะถูกรวมเข้าด้วยกันด้วย optical multiplexer (MUX) เพื่อส่งไปยังปลายทางด้วยเส้นใยแสงเพียงเส้นเดียว ข้อมูลที่เดินทางในระหว่างเส้นทางจะเกิดปัญหาการลดทอนสัญญาณทำให้ความเข้มแสงอ่อนลง จึงต้องมีสถานีทวนสัญญาณที่เป็น optical amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณพร้อมกันให้มีขนาดความเข้มแสงมากพอที่จะเดินทางต่อไปไกลๆ ได้ นอกจากนี้สัญญาณพัลส์ที่เดินทางในเส้นใยแสง จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าดิสเพอร์ชัน (dispersion) ทำให้สัญญาณพัลส์เกิดการบานออก ผลลัพธ์ก็คือเป็นตัวจำกัดปริมาณข้อมูลหรือทำให้บิตเรตสูงสุดของระบบลดลงดังนั้นระบบดับเบิลยูดีเอ็มจึงต้องมีอุปกรณ์

dispersion compensator เพื่อทำหน้าที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออกให้มีขนาดคงที่ตลอดการเดินทาง ซึ่งในระบบดีดับเบิลยูดีเอ็มมีความยาวคลื่นแสงหลายค่า ผลของดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นย่อมมีผลกระทบกับทุกช่องสัญญาณ ทำให้ต้องดูแลมากขึ้น



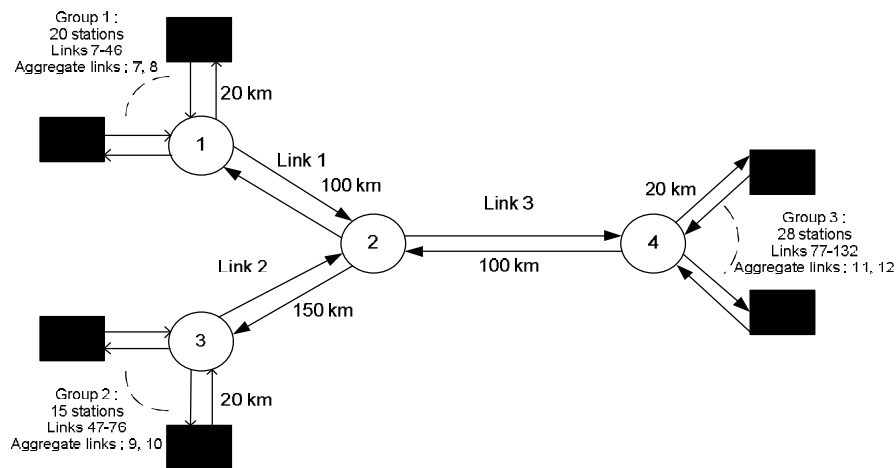
รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารโทรคมนาคมแบบ ดีดับเบิลยูดีเอ็ม

ในช่วงระหว่างสถานี ระบบสามารถขยายการติดต่อเข้ากับสถานีอื่นได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า optical add/drop multiplexer (OADM) ในทำนองเดียวกัน สถานีสื่อสารบางสถานีที่ทำหน้าที่เป็นชุมสายขนาดใหญ่ จะต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตัดต่อหรือเลือกเส้นทางของทางเดินข้อมูลในระบบให้ไปสู่ปลายทางอื่นๆ ในโครงข่ายที่ซับซ้อนได้ อุปกรณ์ตัวนี้เรียกว่า optical cross connect (OXC) เมื่อข้อมูลเดินทางถึงปลายทาง สัญญาณแสงที่รวมทุกช่องสัญญาณมาก็จะถูกแยกออกให้เป็นช่องสัญญาณเดี่ยวตามค่าความยาวคลื่นแสงด้วยอุปกรณ์เชิงแสงที่เรียกว่า optical demultiplexer ซึ่งมีหลักการทำงานตรงข้ามกับ optical multiplexer

2.4 โครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณ

รูปที่ 2.10 แสดงถึงตัวอย่างโครงข่ายแบบดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร์และเลือกสัญญาณ [36] ที่ประกอบไปด้วยจำนวนข่ายเชื่อมโยงจำนวน 132 ข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมโยงสถานีทั้งหมดจำนวน 63 สถานีและอุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟ(passive star coupler) จำนวน 4 ตัว ซึ่งรูปแบบการเชื่อมโยงกันอยู่ในรูปของโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณโดยไม่มี

ปรากฏวงปิดในโครงข่าย โดยแต่ละสถานีประกอบด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณทำหน้าที่ส่งสัญญาณหนึ่งความยาวคลื่นเฉพาะ ส่งกระจายไปยังทุกสถานีในโครงข่าย และอุปกรณ์รับสัญญาณที่สามารถปรับค่าเพื่อเลือกรับสัญญาณแสงจากสถานีอื่น ๆ ในความยาวคลื่นที่ต้องการได้ โดยค่ากำลังสัญญาณที่เข้าสู่อุปกรณ์รับสัญญาณจะต้องมีค่ามากกว่าระดับพลังงานต่ำสุดที่อุปกรณ์สามารถตรวจจับได้ [5] เส้นใยแสงที่ใช้จะใช้เส้นเดี่ยวระหว่างคูโนดใดๆ และทราฟฟิกสามารถวิ่งได้ 2 ทิศทาง



รูปที่ 2.10 โครงข่ายดีดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร่และเลือกสัญญาณ [30][32]

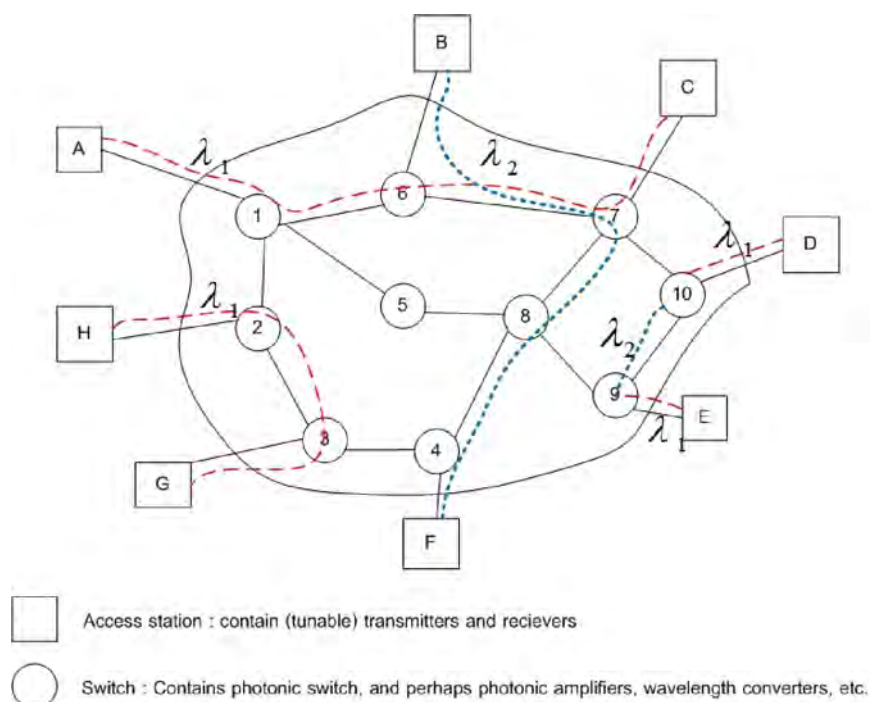
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้งานโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณเนื่องจากเป็นโครงข่ายที่มีต้นทุนต่ำและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายเป็นอุปกรณ์ทางแสงทั้งหมดทำให้มีอัตราการส่งข้อมูลสูง แต่จำเป็นต้องมีการกำหนดความยาวคลื่นให้แต่ละสถานีไม่ให้ซ้ำซ้อนกันเนื่องจาก อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบแพสซีฟไม่มีความสามารถในการจัดสรรความยาวคลื่น

2.5 โครงข่ายแบบเมซ

โครงข่ายแบบเมซ เป็นส่วนหนึ่งของโครงข่ายแบบโครงข่ายแบบกำหนดความยาวคลื่นประจำเส้นทาง (wavelength-routed networks)[10][32] ซึ่งโครงข่ายชนิดนี้ มีความยืดหยุ่น สามารถใช้ความยาวคลื่นซ้ำได้ (reuse) หรืออาจจะมีการแปลงความยาวคลื่น (wavelength conversion)

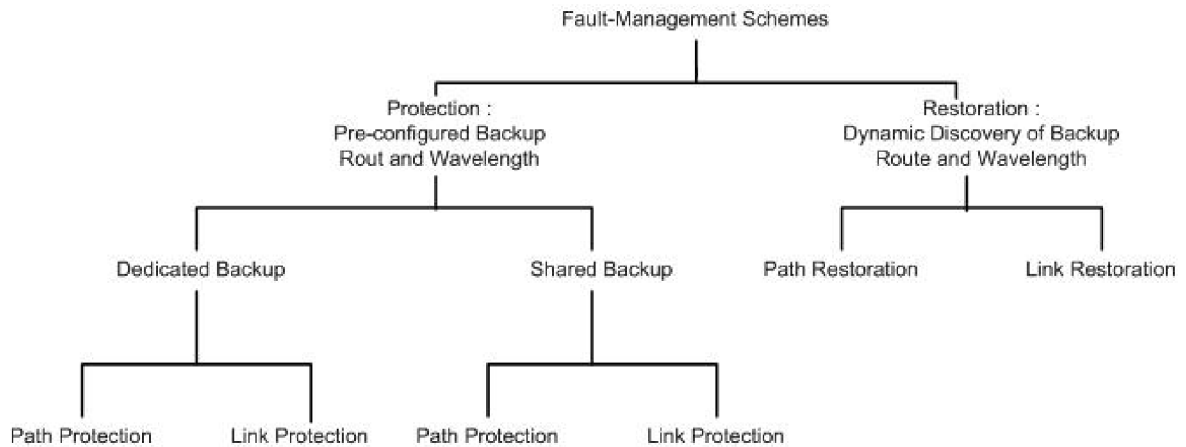
จากการติดตั้งอุปกรณ์แปลงความยาวคลื่น (wavelength converter) รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างของโครงข่ายแบบกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่น อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่าย ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือ สถานี (access station) ประกอบด้วย ภาคส่ง(transmitter) และ ภาครับ(receiver) ส่วนที่สองเป็นสวิตช์แบบแอ็กทีฟ(active switch) คือ wavelength routing switch ภายในประกอบด้วย ออปติคอลลครอสคอนเน็กต์ (optical cross-connect) อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (optical amplifier) เครื่องแปลงความยาวคลื่น (wavelength converter) และอื่นๆ แล้วแต่การติดตั้ง

ทราฟฟิกที่ส่งในโครงข่ายชนิดนี้ ถ้ามีทราฟฟิกมากกว่าหนึ่งทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงนั้น ทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกจะใช้ความยาวคลื่นคนละความยาวคลื่น โดยทั่วไปจะมีการส่งได้สองรูปแบบคือในกรณีที่ไม่มีเครื่องแปลงความยาวคลื่น ทราฟฟิกจะต้องใช้ความยาวคลื่นเพียงหนึ่งความยาวคลื่นตลอดทราฟฟิก ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เรียกว่า wavelength continuity ดังรูปที่ 2.11 ทราฟฟิกระหว่างโนด A กับโนด C ใช้ λ_1 , โนด B กับโนด F ใช้ λ_2 แต่ถ้าโนดมีเครื่องแปลงความยาวคลื่น จะทำให้การสื่อสารมีความยืดหยุ่นมากขึ้น โดยจะทำให้ไม่เกิดเงื่อนไข wavelength continuity ดังเช่นทราฟฟิกระหว่างโนด E กับโนด D ที่ใช้สองความยาวคลื่นในทราฟฟิกนั้น



รูปที่ 2.11 โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบกำหนดความยาวคลื่นประจำเส้นทาง[36]

ระเบียบวิธีที่ใช้เลือกเส้นทางการส่งนั้น จะใช้วิธีหาวิถีที่สั้นที่สุด(shortest path)ซึ่งสามารถแบ่งได้อีกหลายแบบ แต่วิทยานิพนธ์นี้จะใช้ระเบียบวิธีของ Dijkstra (Dijkstra's algorithm) [39] เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถใช้งานได้รวดเร็ว เข้าใจง่าย ส่วนรายละเอียดจะกล่าวถึงอีกในบทที่ 4



รูปที่ 2.12 วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบต่างๆ [35]

การป้องกันการล้มเหลวของโครงข่าย มีได้หลายวิธี แล้วแต่ความเหมาะสมและเข้ากับความ ต้องการของโครงข่าย รูปที่ 2.19 แสดงถึงวิธีการป้องกันแบบต่างๆ โดยทั่วไปแล้วโครงข่ายจะใช้ การป้องกันแบบใช้วิถีร่วมกัน (shared-path protection)

จากรูปที่ 2.12 สามารถแบ่งวิธีการป้องกันโครงข่ายได้เป็น 2 แบบหลักๆ คือ

1. Path protection/restoration เป็นวิธีการหาเส้นทางในการสื่อสารใหม่ตั้งแต่โนดต้นทางไป ยังโนดปลายทาง โดยเส้นทางสำรองต้องไม่ใช้สายเชื่อมโยงเดียวกันกับเส้นทางหลัก(link-disjoint) ดังรูปที่ 2.13(ก) ซึ่งเส้นทางหลักคือทราฟฟิกจากโนด 1 ไปยังโนด 6 คือ 1-2-3-6 ส่วนเส้นทาง สำรองคือ 1-4-5-6 โดยสายเชื่อมโยงที่เกิดความเสียหายคือสายเชื่อมโยงระหว่างโนด 2 กับโนด 3 ซึ่งการป้องกันแบบ path protection ยังสามารถแบ่งได้อีกดังนี้

1.1 Dedicated-path protection (1:1 protection) การป้องกันแบบนี้ เส้นทางสำรอง และความยาวคลื่นที่เตรียมไว้จะใช้สำหรับ 1 ทราฟฟิก และไม่ใช้ร่วมกับทราฟฟิกอื่นๆ ดังรูปที่ 2.13(ค) ซึ่งจะอธิบายได้ว่า ทราฟฟิกจากโนด 1 ไปยังโนด 6 จะมีเส้นทางหลักคือ 1-2-3-6 และใช้ ความยาวคลื่น λ ส่วนเส้นทางสำรองคือ 1-4-5-6 และใช้ความยาวคลื่น λ เช่นกัน ทราฟฟิกจาก โนด 2 ไปยังโนด 4 เส้นทางหลักคือ 2-4 และใช้ความยาวคลื่น λ ส่วนเส้นทางสำรองได้แก่ 2-1-4

โดยข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายคือข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด 2 กับโนด 4 เส้นทางสำรองจะใช้ความยาวคลื่น λ_2 เพราะว่าเส้นทางสำรองของทราฟฟิกจากโนด 2 ไปยังโนด 4 ไปใช้ข่ายเชื่อมโยงซ้ำกับเส้นทางสำรองของทราฟฟิกจากโนด 1 ไปยังโนด 6

1.2 Shared-path protection ต่างจากแบบแรกตรงที่ เส้นทางสำรองและความยาวคลื่นสามารถใช้ได้กับทราฟฟิกอื่นๆได้ นั่นก็คือเส้นทางสำรองของทราฟฟิกจากโนด 2 ไปยังโนด 4 (2-1-4) สามารถใช้ความยาวคลื่น λ_1 ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ dedicated-path protection แล้ว วิธีนี้มีประสิทธิภาพมากกว่าในแง่ของการใช้ทรัพยากรน้อยกว่า ดังรูปที่ 2.13(ง)

1.3 Path restoration เมื่อข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย โหนดต้นทางและโหนดปลายทางจะส่งข้อความไปบอกทุกโนดในโครงข่ายว่าเกิดการล้มเหลวในการส่ง และจะทำการส่งข้อมูลใหม่โดยหาเส้นทางใหม่แบบพลวัต(dynamic)

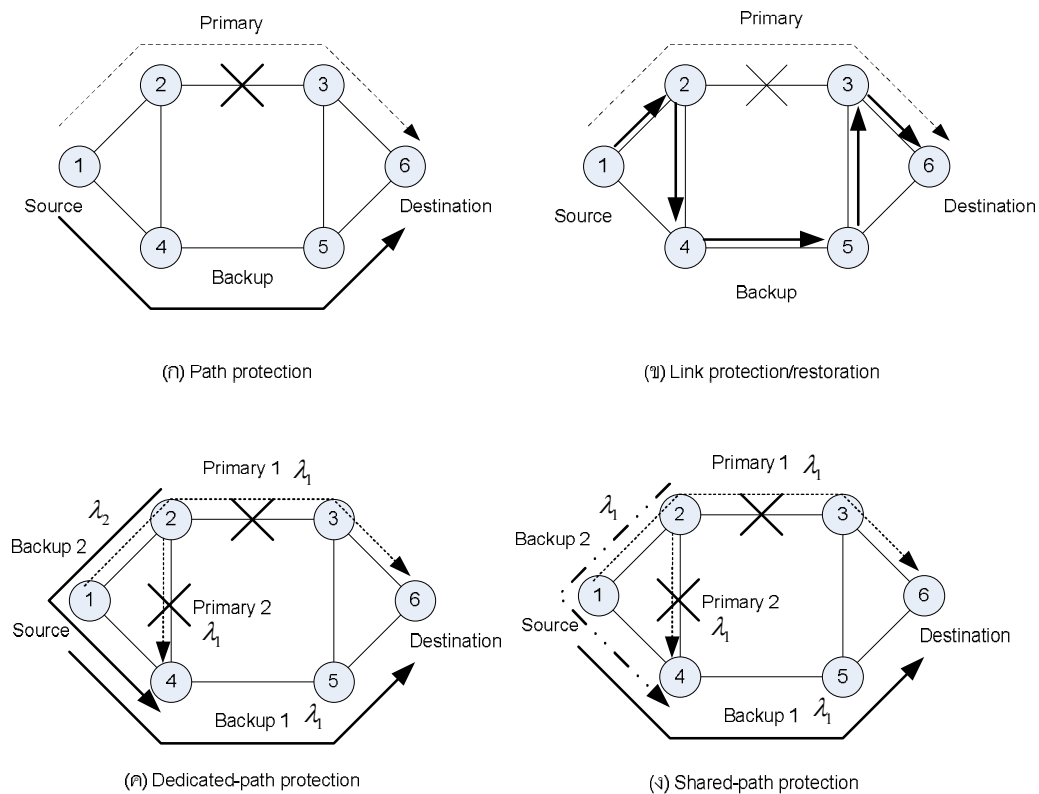
2. Link protection/restoration เป็นวิธีการหาเส้นทางใหม่เฉพาะระหว่างโนด 2 โหนดที่เชื่อมต่อกับข่ายเชื่อมโยงที่ขาดไปแล้ว ดังรูปที่ 2.13(ข) แบ่งได้ดังนี้

2.1 Dedicated-link protection เมื่อข่ายเชื่อมโยงเสียหาย จะหาเส้นทางใหม่ในการส่งข้อมูล ซึ่งเส้นทางใหม่นี้ ใช้ได้กับหนึ่งข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเท่านั้น ถ้ามีข่ายเชื่อมโยงอื่นๆที่เสียหาย ต้องหาเส้นทางใหม่ อีกทั้งความยาวคลื่นก็เตรียมไว้ได้เพียง 1 ความยาวคลื่นต่อ 1 ทราฟฟิก ทำให้วิธีนี้มีความสามารถในการจัดการความยาวคลื่นไม่ดีนัก มีประสิทธิภาพต่ำ จึงไม่มีใช้ในโครงข่ายจริง

2.2 Shared-link protection วิธีนี้ เส้นทางสำรองที่เตรียมไว้สามารถใช้ได้กับเส้นทางสำรองของทราฟฟิกอื่นๆ ซึ่งจะทำให้ใช้ทรัพยากรน้อยกว่าแบบ dedicated-link protection จึงมีประสิทธิภาพมากกว่า

2.3 Link restoration โหนดที่ติดกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย โดยการส่งข้อความไปบอกทุกโนดเช่นเดียวกัน และจะทำการหาเส้นทางใหม่แบบพลวัต ถ้าไม่มีเส้นทางว่างรอบๆข่ายเชื่อมโยงที่เกิดการเสียหาย การสื่อสารนั้นก็ล้มเลิกไป

รูปที่ 2.13 แสดงถึงการป้องกันแบบ path protection และ link protection วิธีการป้องกันแบบ path protection นั้นจะมีความยืดหยุ่นมากกว่าและมีแนวโน้มที่จะหาเส้นทางที่เหมาะสมได้ดีกว่าวิธีการป้องกันแบบ link protection [34][35] จากรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าวิธีการป้องกันแบบ link protection จะหาเส้นทางใหม่เฉพาะระหว่างโหนด 2 โหนดเท่านั้น ซึ่งบางกรณีอาจจะได้เส้นทางสำรองที่ไม่ดีนัก



รูปที่ 2.13 path protection และ link protection

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีการจัดการดิสเพอร์ชัน (Dispersion management)

ในระบบที่สัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัลในลักษณะของพัลส์ข้อมูล สัญญาณพัลส์ที่เดินทางในเส้นใยแสงจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าดิสเพอร์ชัน ทำให้สัญญาณพัลส์เกิดการบานออก ผลลัพธ์ก็คือทำให้จำกัดปริมาณข้อมูลหรือทำให้บิตเรตสูงสุดของระบบลดลง ดังนั้นระบบดีดับเบิลยูดีเอ็มจะต้องมีอุปกรณ์ชดเชยดิสเพอร์ชัน เพื่อทำหน้าที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออก ให้มีขนาดคงที่ตลอดการเดินทางอยู่เสมอ ผลของดิสเพอร์ชันที่เกิดย่อมมีผลกระทบกับทุกช่องสัญญาณด้วย

โดยเฉพาะระบบที่มีจำนวนช่องสัญญาณมาก จะต้องให้ความดูแลและเอาใจใส่กับผลกระทบของดิสเพอร์ชันมากขึ้นด้วยในระบบโครงข่ายสื่อสารขนาดใหญ่หรือโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูง

เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันทำโดยการนำเอาเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันที่ต่างกันนำมาต่อกันเพื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชันและทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการที่ 2.12

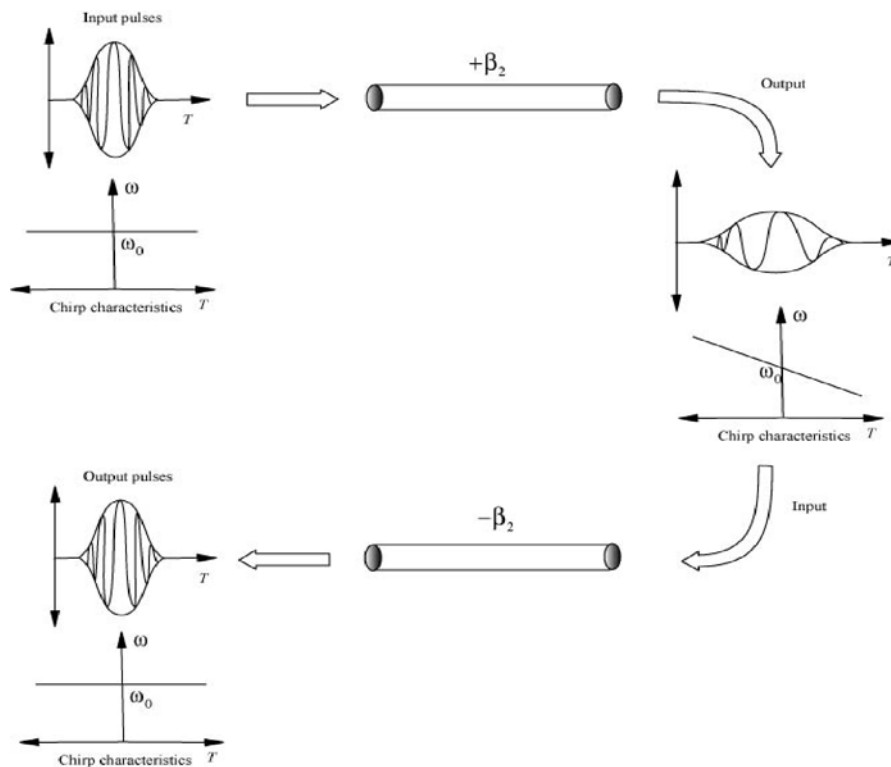
$$D_1L_1 + D_2L_2 = 0, \quad (2.12)$$

โดย D_1 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ (ps/km/nm)

D_2 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน (ps/km/nm)

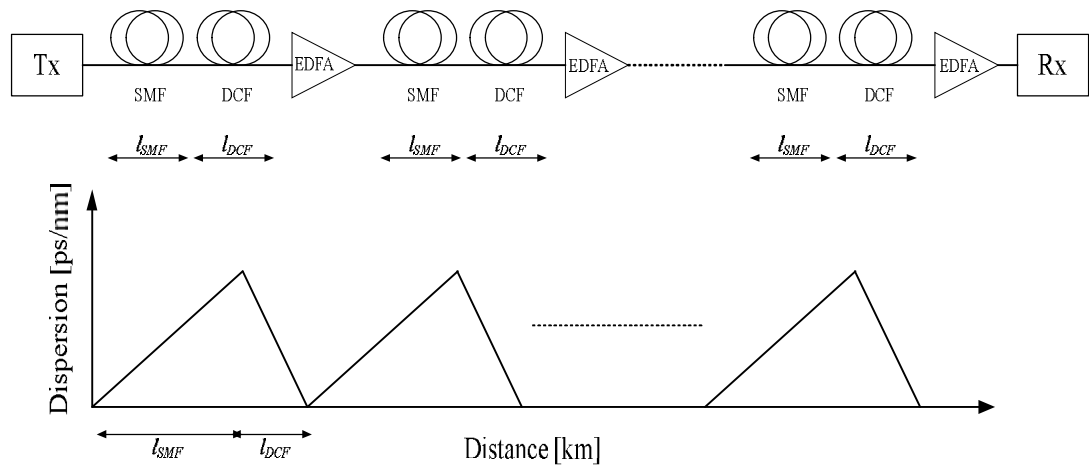
L_1 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ (km)

L_2 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน (km)



รูปที่ 2.14 เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันเพื่อชดเชยความผิดเพี้ยน

รูปที่ 2.14 แสดงถึงวิธีการจัดการความผิดเพี้ยนที่เกิดจากดิสเพอร์ชันด้วยเทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชัน ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี GVD (β_2) ที่มีค่าเป็นบวกจะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการดิสเพอร์ชันด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า β_2 ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการหดเซยดิสเพอร์ชัน ส่งผลให้สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ โดยในระบบการสื่อสารสัญญาณจริงจะมีการต่อการหดเซยดิสเพอร์ชันตามที่ได้กล่าวมาเป็นรายคาบดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่ใช้วิธีการหดเซยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นว่า การใช้วิธีการหดเซยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ ถึงแม้ในระหว่างการสื่อสารสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าดิสเพอร์ชันขึ้นลงตลอดเวลา แต่ค่าดิสเพอร์ชันของทั้งระบบจะมีค่าเป็นศูนย์ เพราะจะมีการสะสมและลดลงเป็นคาบๆ จนถึงปลายทาง จึงทำให้สัญญาณที่เดินทางไปถึงที่ภาครับไม่เกิดความผิดเพี้ยนเนื่องจากผลของดิสเพอร์ชัน

เราสามารถแปลงค่าดิสเพอร์ชันกับ GVD ได้ดังสมการที่ 2.13

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2, \quad (2.13)$$

โดยที่ D คือ ค่าดิสเพอร์ชัน (ps/km/nm)

c คือ ค่าคงที่ความเร็วแสงในสุญญากาศ = 2.99739×10^8 m/s

λ คือ ค่าความยาวคลื่น (nm)

β_2 คือ ค่า GVD (ps^2/km)

นอกจากนี้ การที่ทำการกำหนดความยาวคลื่นโดยให้มีค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ช่วยลดผลเสียจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง เพราะว่า การมีค่าดิสเพอร์ชันจะทำให้เกิดการลดลงของค่ากำลังสัญญาณสูงสุด (peak power) ของสัญญาณ เมื่อค่ากำลังสัญญาณสูงสุดลดลง ดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่โดยปกติจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่ากำลังสัญญาณมีค่าสูง ก็จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่ากำลังของสัญญาณ อย่างไรก็ตามวิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบนั้นทำได้เพียงช่วยลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากดิสเพอร์ชันเท่านั้น ไม่สามารถลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงได้ ดังนั้นสัญญาณที่เดินทางในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ ก็ยังได้รับผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงอยู่

2.7 เครื่องสังยุคเฟสแสง (Optical phase conjugator)

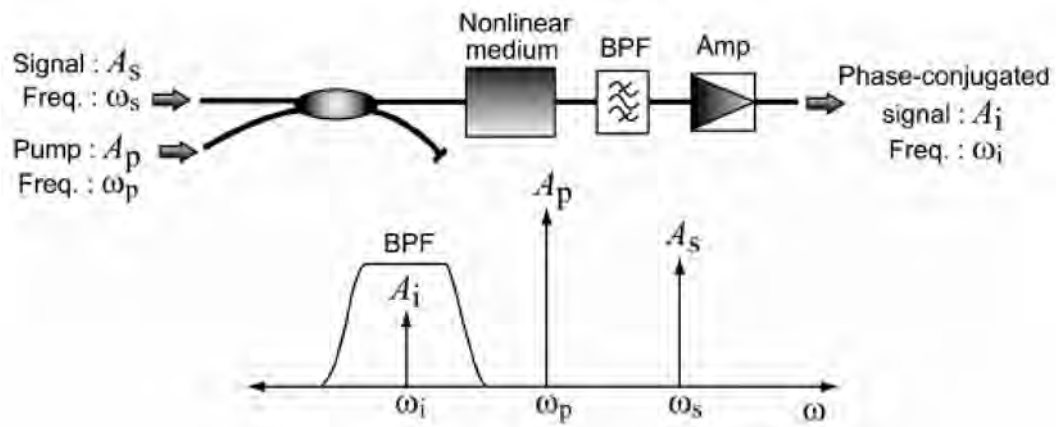
2.7.1 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีเครื่องสังยุคเฟสแสง (Optical Phase Conjugation)

วิธีการคอนจูเกตสัญญาณ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถชดเชยรูปคลื่นสัญญาณที่เกิดการขยายออกและการเกิดความผิดเพี้ยนเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นขึ้น โดยการวางเครื่องเครื่องสังยุคเฟสแสง (optical phase conjugator) ไว้ที่กึ่งกลางระบบ เมื่อสัญญาณถูกปล่อยออกจากตัวส่งให้เดินทางในเส้นใยแสง รูปคลื่นสัญญาณจะเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นในฝั่งครั้งแรกของระบบแต่จะสามารถกลับมาเป็นรูปคลื่นสัญญาณเดิมที่ไม่มีความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นที่เครื่องรับสัญญาณได้ โดยมีเงื่อนไขที่ว่า คุณสมบัติย่อยในสายส่งของทั้งสองฝั่งของระบบจะต้องมีความสมมาตรเมื่อมองจากจุดกึ่งกลางของระบบ เครื่องสังยุคเฟสแสงนั้นสามารถสร้างสัญญาณคอนจูเกตได้โดยใช้หลักการจากกระบวนการ four-wave mixing (FWM) ในตัวกลางที่มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่สาม (third-order nonlinear medium) ซึ่งเป็นตัวกลางที่มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นอย่างรุนแรง โดยอธิบายได้ว่า เมื่อสัญญาณเข้าทำปฏิกิริยากับสัญญาณจากภายนอกที่ใส่เข้าไปที่เรียกว่าสัญญาณปั๊ม (pump) ที่มีกำลังสูงในตัวกลางที่มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นอันดับที่สามแล้วจะ

เกิดสัญญาณความถี่ใหม่ขึ้นมาที่เรียกว่า idler wave โดยกระบวนการ FWM ซึ่ง idler wave เป็นคอนจูเกตกับสัญญาณเข้า ดังรูปที่ 2.16 สมการที่ 2.14

$$2h\omega_p = h\omega_s + h\omega_i, \tag{2.14}$$

สมการที่ 2.14 หมายถึงพลังงานโฟตอนของสัญญาณปั๊มถูกแยกออกมาเพื่อเสริมสัญญาณที่ส่งเข้าและสร้าง Idle wave ที่เป็นคอนจูเกตกับสัญญาณที่ส่งเข้า



รูปที่ 2.16 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตโดยกระบวนการ FWM ใน third-order nonlinear medium

วิธีการลดผลของดิสเพอร์ชันของเครื่องส่งยุคเฟสแสง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ nonlinear Schrödinger สมการที่ 2.15

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + i\gamma |A|^2 A, \tag{2.15}$$

โดยที่ α คือ attenuation coefficient (dB/km)

β_2 คือ GVD coefficient (dispersion)

γ คือ nonlinearity coefficient

z คือ ระยะทาง

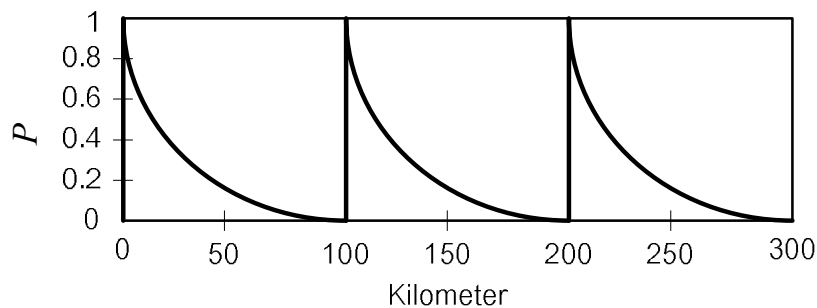
T คือ กรอบเวลาอ้างอิงเทียบกับความเร็วกลุ่ม

A คือ amplitude of the electric field

เมื่อสัญญาณผ่านเครื่องส่งยุคเฟสแสงก็จะได้ สมการที่ 2.16

$$\frac{\partial A^*}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A^* + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A^*}{\partial T^2} - i\gamma |A^*|^2 A^*, \quad (2.16)$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณเดินทางไประยะทางหนึ่งก็จะเกิดดิสเพอร์ชันโดยดูจากค่า β_2 และเมื่อผ่านเครื่องส่งยุคเฟสแสงก็จะทำการคอนจูเกตสัญญาณทำให้เครื่องหมายหน้าจำนวนเชิงซ้อนกลับค่า จึงเปลี่ยนจาก β_2 เป็น $-\beta_2$ และเมื่อเดินทางต่อไปในเส้นใยแสงเส้นเดิมค่า β_2 ก็จะหักล้างกันจนหมด ทำให้ไม่มีดิสเพอร์ชัน นอกจากนี้ เครื่องส่งยุคเฟสแสงยังสามารถจัดการกับคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นได้ โดยสังเกตจากสมการ nonlinear Schrödinger จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้น γ สามารถลดได้ด้วยเช่นกัน คือ self-phase modulation (SPM) แต่ก็ไม่ได้สามารถลดได้ทั้งหมด เนื่องจาก SPM เกิดจากพลังงานของสัญญาณ ในกรณีระบบรูปแบบของกำลังส่งไม่สมมาตรดังรูปที่ 2.17 จะลดผลของ SPM ได้ไม่ทั้งหมด



รูปที่ 2.17 รูปแบบพลังงานของสัญญาณในการส่ง

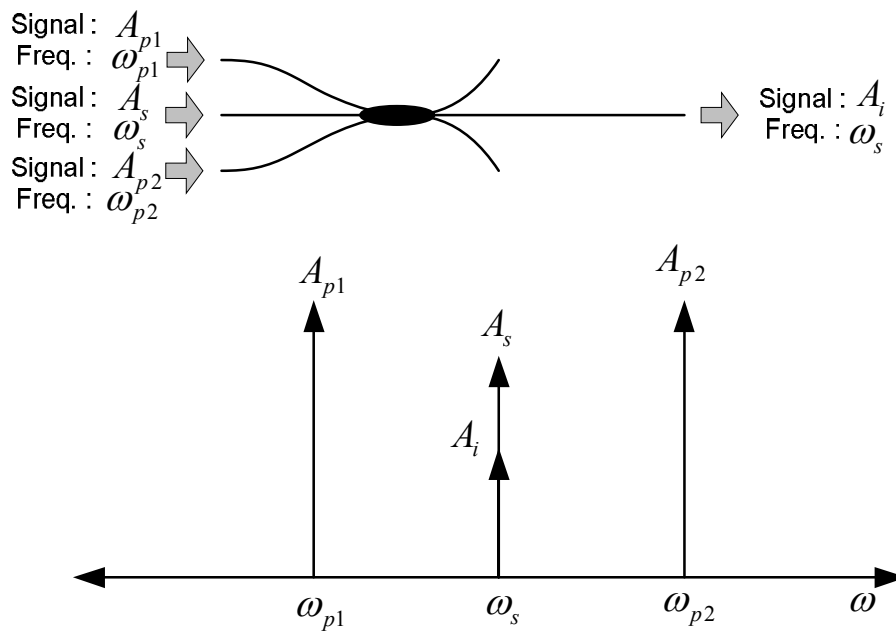
การคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบนั้น สามารถชดเชยผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นและดิสเพอร์ชันในระบบที่มีระยะสั้นได้อย่างดี แต่ในระบบที่มีระยะยาวจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบของสัญญาณกำลัง (periodic power variation) และ การแกว่งไป-มาของค่าดิสเพอร์ชัน ตลอดทั้งระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณผิดเพี้ยนขึ้นที่เครื่องรับ

2.7.2 ชนิดของเครื่องส่งยุคเฟสแสง

เครื่องส่งยุคเฟสแสงแบ่งออกได้ 2 ชนิดหลักๆ คือ ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength shift) และ ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น (wavelength shift free)

2.7.2.1 เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น

เครื่องส่งยุคเฟสแสงนี้ใช้ปรากฏการณ์ FWM ในการสร้างสัญญาณคอนจูเกต แต่เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นนี้ต้องการให้สัญญาณคอนจูเกตเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับสัญญาณข้อมูลเดิม ดังนั้นในการสร้างสัญญาณคอนจูเกตเราจึงต้องทำการใช้ปั๊มพลังงาน 2 ปั๊ม ที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ดังรูปที่ 2.18



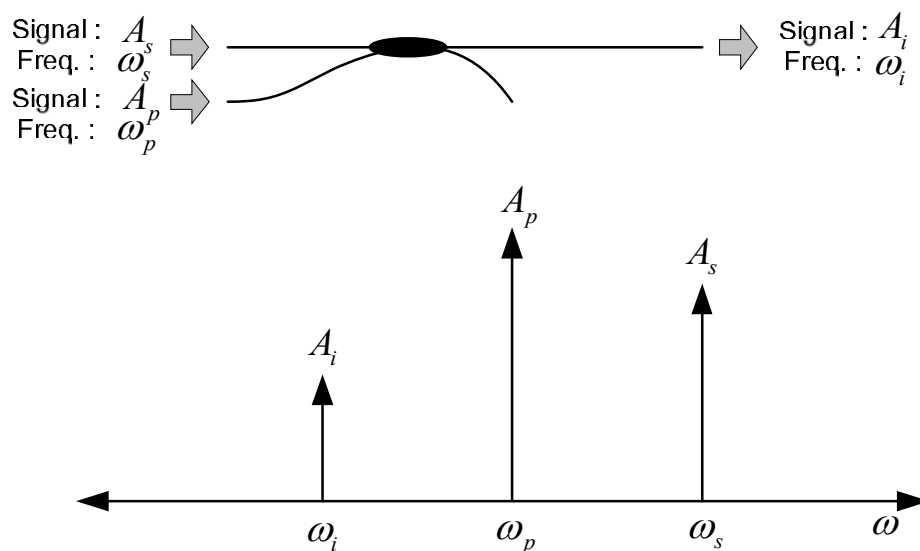
รูปที่ 2.18 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.18 พลังงานปั๊มตัวที่ 1 อยู่ที่ความยาวคลื่น ω_{p1} และพลังงานปั๊มตัวที่ 2 อยู่ที่ความยาวคลื่น ω_{p2} เมื่อความยาวคลื่นของปั๊มพลังงานทั้ง 2 สอดคล้องกันตามปรากฏการณ์ FWM และความยาวคลื่นเหมาะสมกัน จะทำให้ความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตเป็นความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นของสัญญาณข้อมูลที่ ω_s แต่กำลังของสัญญาณจะลดลง

2.7.2.2 เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น

โดยปกติเครื่องส่งยุคเฟสแสงทั่วไปจะเป็นชนิดเลื่อนความยาวคลื่นเนื่องจากในกระบวนการสร้างสัญญาณคอนจูเกตทำได้ง่ายกว่า คือ ใช้พลังงานปั๊มเพียง 1 ปั๊ม ในการสร้างสัญญาณคอนจูเกต ดังรูปที่ 2.19

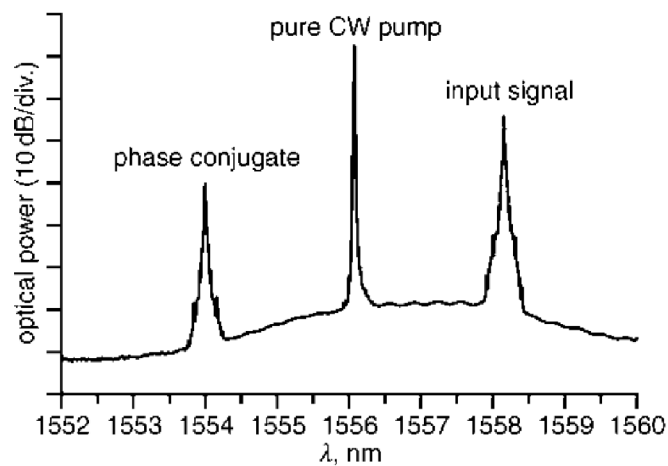
จากรูปที่ 2.19 จะเห็นว่ามีการใช้ปั๊มพลังงานเพียง 1 ปั๊มเท่านั้น โดยจะทำการปั๊มที่ความยาวคลื่น ω_p ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ส่งผลให้เกิดสัญญาณคอนจูเกตขึ้น แต่สัญญาณคอนจูเกตที่ได้จะมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปคือความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตจะเกิดขึ้นที่อีกด้านหนึ่งของปั๊มพลังงาน การใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นจะได้สัญญาณคอนจูเกตที่มีกำลังมากกว่าใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น



รูปที่ 2.19 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบเลื่อนความยาวคลื่น

2.7.3 ประสิทธิภาพของเครื่องส่งยุคเฟสแสง

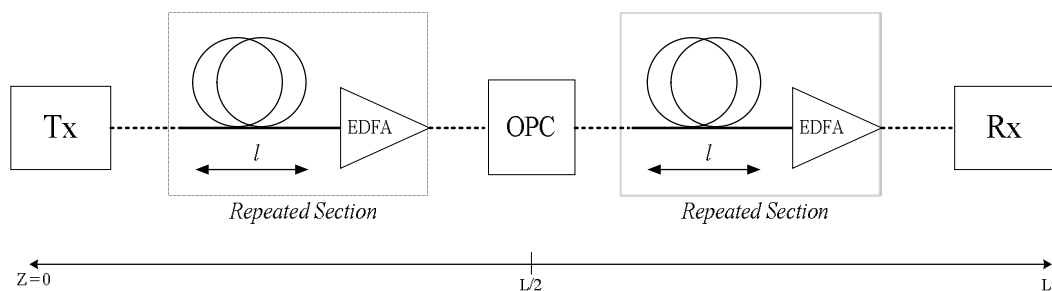
กำลังสัญญาณที่ได้จากเครื่องส่งยุคเฟสแสงจะมีค่าต่ำกว่ากำลังสัญญาณก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสง สาเหตุที่ กำลังสัญญาณลดลงเนื่องจากปรากฏการณ์ FWM ทำให้สัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้นนั้นมีพลังงานน้อยกว่าสัญญาณที่เข้าไปในเครื่องส่งยุคเฟสแสง จากการจำลองระบบที่มีการส่งระยะทาง 75 km ส่งข้อมูลที่มีความยาวคลื่น 1558.16 nm ได้สัญญาณคอนจูเกตที่มีความยาวคลื่น 1554 nm เครื่องส่งยุคเฟสแสงที่มีพลังงานปั๊มที่ 1556 nm จะได้ค่าประสิทธิภาพของเครื่องส่งยุคเฟสแสงดังรูปที่ 2.20 ซึ่งมีค่าประมาณ -14.5 dB [36]



รูปที่ 2.20 ประสิทธิภาพของเครื่องส่งยุคเฟสแสง [36]

2.7.4 การจัดการดิสเพอร์ชันด้วยเครื่องส่งยุคเฟสแสง

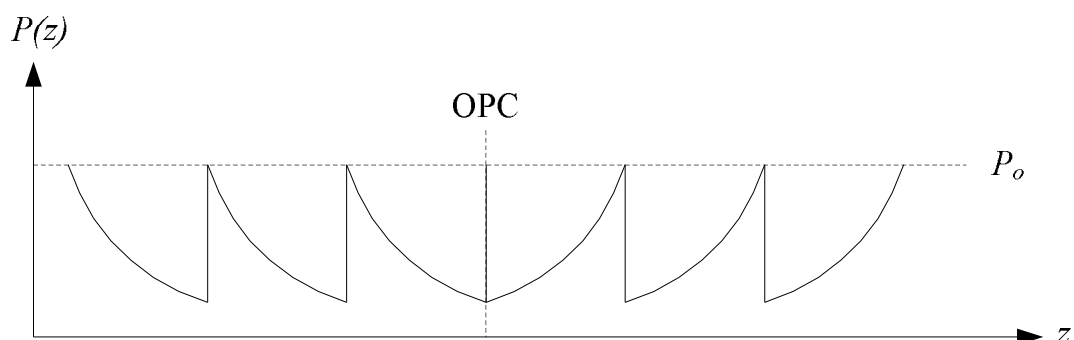
วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบเป็นทางเลือกทางหนึ่งที่สามารถชดเชยรูปคลื่นสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดความผิดเพี้ยนขึ้น โดยการวางอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณไว้ที่กึ่งกลางระบบดังรูปที่ 2.21 เมื่อสัญญาณถูกปล่อยออกจากตัวส่งให้เดินทางในเส้นใยแสง รูปคลื่นสัญญาณจะเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นในฝั่งครั้งแรกของระบบแต่จะสามารถกลับมาเป็นรูปคลื่นสัญญาณเดิมที่ไม่มีความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นที่เครื่องรับสัญญาณได้ โดยมีเงื่อนไขที่ว่า คุณสมบัติย่อยในสายส่งของทั้งสองฝั่งของระบบจะต้องมีความสมมาตรเมื่อมองจากจุดกึ่งกลางของระบบ



รูปที่ 2.21 ระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่มีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไว้ที่กึ่งกลางระบบ

จะเห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณเดินทางไปยังระยะทางหนึ่งจะได้รับผลจากดิสเพอร์ชัน β_2 และเมื่อผ่านเครื่องส่งยุคเฟสแสงก็จะเกิดการกลับเฟส นั่นคือ พจน์ที่เป็นส่วนจินตภาพ (imaginary part) จะมีการเปลี่ยนเครื่องหมายจากลบเป็นบวก จากบวกเป็นลบ ดังจะเห็นได้จากที่พจน์ที่เป็นส่วนของดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงมีการกลับเครื่องหมายหน้าพจน์ และเมื่อเดินทางต่อไปในเส้นใยแสงเส้นเดิมในช่วงครึ่งหลัง ซึ่งจะได้รับผลจากดิสเพอร์ชันค่าเดียวกับครึ่งแรกที่เป็นค่าบวก ก็จะเกิดการหักล้างกัน ทำให้พจน์ของดิสเพอร์ชันหายไป นอกจากนั้นเครื่องส่งยุคเฟสแสงยังสามารถจัดการความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงได้อีกด้วย แต่ไม่สามารถลดได้ทั้งหมด เนื่องจากค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงในช่วงแรกและช่วงหลังของการส่งสัญญาณไม่สมมาตรกัน เหตุเพราะค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงขึ้นกับกำลังสูงสุดของสัญญาณ ถึงแม้กำลังสูงสุดของสัญญาณจะสมมาตรกันดังรูปที่ 2.22 แต่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลของกำลังสัญญาณยังคงส่งผลต่อความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ทำให้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบไม่สามารถลดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงได้ทั้งหมด

ในการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบนั้นสามารถชดเชยผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง และดิสเพอร์ชันในระบบที่มีระยะสั้นได้อย่างดี แต่ในระบบที่มีระยะยาวจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเป็นรายคาบของสัญญาณกำลัง (periodic power variation) และการแกว่งไป-มาของค่าดิสเพอร์ชันตลอดทั้งระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสัญญาณที่เพี้ยนขึ้นที่เครื่องรับ



รูปที่ 2.22 กำลังสัญญาณของสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ

เงื่อนไขที่สำคัญในการออกแบบเพื่อให้คุณสมบัติของการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบนั้นมีประสิทธิภาพสูงคือ

1. ระยะระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง ต้องสั้นกว่าระยะที่มีผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (nonlinearity length)
2. ค่าดิสเพอร์ชันนั้นต้องอยู่ในบริเวณดิสเพอร์ชันปกติ (normal dispersion) (สองเงื่อนไขนี้ใช้กำจัดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงเป็นรายคาบของสัญญาณกำลัง)
3. ในส่วนต่างๆ ของเส้นใยแสงจะต้องมีค่าคงที่เฉลี่ยทั้งระบบของค่าดิสเพอร์ชันยาวกว่าระยะที่มีผลกระทบของความไม่เป็นเชิงเส้น (เงื่อนไขนี้ใช้กำจัดผลกระทบของการแกว่งไป-มาของค่าดิสเพอร์ชัน)
4. กำลังของสัญญาณที่เกี่ยวข้องและดิสเพอร์ชันทั้งสองด้านของอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณต้องเป็นแบบสมมาตร (เงื่อนไขนี้เพื่อให้อุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณทำการคอนจูเกตได้สมบูรณ์)

บทที่ 3

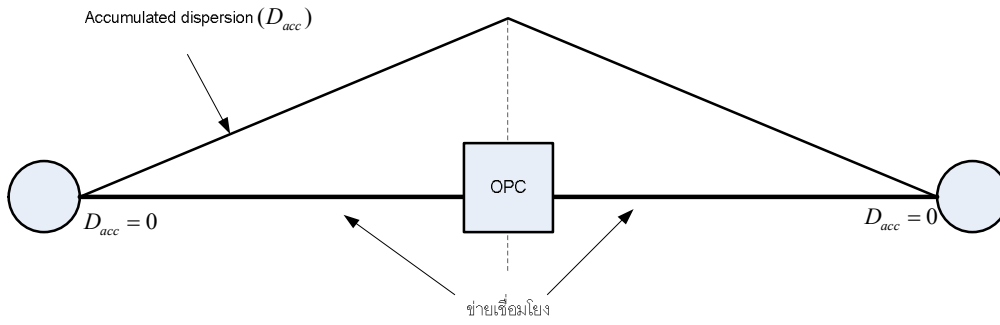
การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงลงบนโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ (broadcast-and-select network) ระเบียบขั้นตอนวิธีในการคิด และผลการทดสอบว่าสามารถใช้ในโครงข่ายได้

ระเบียบขั้นตอนวิธีที่ใช้คำนวณนั้น จะคำนวณหาเส้นทางของทราฟฟิกของทุกๆ สถานี จากนั้นหาค่า R ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บอกว่าควรจะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแบบไหนระหว่างระเบียบขั้นตอนวิธีที่คิดค้นขึ้นมากับการวางที่จุดกึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงดังรูปที่ 3.1 การวางที่จุดกึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงนั้น ไม่ว่าจะข่ายยาวแค่ไหนก็สามารถวิ่งผ่านได้หมดซึ่งเปรียบได้กับการส่งที่ระยะทางไกล[26][42]-[55] ส่วนค่า R มีแนวคิดมาจากที่ว่า ต้องการให้ทุกๆ ทราฟฟิกสามารถซ้อนทับช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ ซึ่งโครงข่ายต่างๆ นั้น จะมีทั้งกรณีที่สามารถซ้อนทับช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ทั้งหมดและซ้อนทับไม่ได้ทั้งหมด จากนั้นจึงหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิกโดยที่เครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้นจะต้องสามารถชดเชยผลของดิสเพอร์ชันในทุกๆ ความยาวคลื่นได้ สุดท้ายกำหนดช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง โดยให้นำช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่คำนวณได้ในแต่ละทราฟฟิกมาหาช่วงที่มีการซ้อนทับและทดสอบผลจากการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง รายละเอียดจะกล่าวถึงต่อไป

3.1 ระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

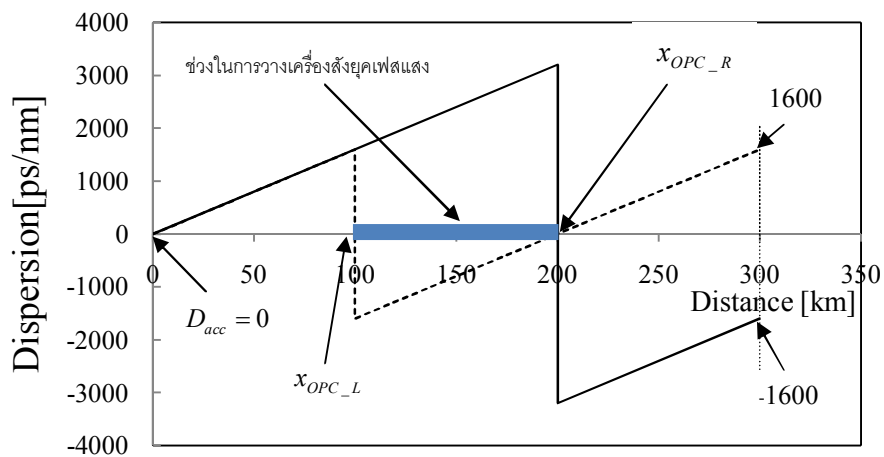
1. คำนวณหาระยะทางของทราฟฟิก รวมทั้งข่ายเชื่อมโยงที่ทราฟฟิกของทุกๆ สถานี
2. ประเมินโครงข่ายว่า สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงให้เหมาะสมที่สุด โดยใช้พารามิเตอร์ R เป็นตัวตัดสิน ซึ่งค่า R จะเป็นตัวตัดสินว่า ควรจะใช้การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแบบไหนระหว่างการวางตรงกลางข่ายเชื่อมโยงหรือวางโดยใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีนี้
3. คำนวณหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิก
4. นำช่วงที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในข้อ 3. มาคิดหาตำแหน่งที่เหมาะสมในแต่ละข่ายเชื่อมโยง โดยใช้วิธีซ้อนทับ (intersection) ของทุกๆ ทราฟฟิก
5. ตรวจสอบผลของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง



รูปที่ 3.1 การวางเครื่องสั่งยุคเฟสแสงตรงกลางสายเคเบิลใยแก้ว

3.2 การคำนวณหาตำแหน่งในการวางเครื่องสั่งยุคเฟสแสง

3.2.1 การคำนวณหาตำแหน่งที่จะวางเครื่องสั่งยุคเฟสแสง ดูรูปที่ 3.2 ประกอบ



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการคิดหาตำแหน่งวางเครื่องสั่งยุคเฟสแสง

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าดิสเพอร์ชันสะสมจนถึงจุดหนึ่งแล้วจะเกิดการเปลี่ยนเครื่องหมาย จากบวกเป็นลบ (ที่ตำแหน่ง 200 km) แล้วก็เริ่มสะสมใหม่ สมการคือ

$$D_{acc} = D_{\lambda} L, \tag{3.1}$$

$$-1600 \leq D_{acc} \leq 1600, \tag{3.2}$$

โดยที่ D_{acc} คือ ค่าดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm) ซึ่งมีค่าไม่เกินขีดจำกัดตามสมการที่ (3.3)

D_{λ} คือ ค่าดิสเพอร์ชันของแต่ละสถานี (ps/km/nm)

L คือ ระยะทาง (km)

ตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่จะวางนั้น แบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีที่ปลายทางนั้นสะสมจนถึงค่าขีดจำกัดที่ 1600 ps/nm ในรูปคือเส้นประ
2. กรณีที่ปลายทางนั้นสะสมจนถึงค่าขีดจำกัดที่ -1600 ps/nm ในรูปคือเส้นทึบ

โดยให้เริ่มต้นส่งที่ค่าดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับศูนย์

สมมติให้

LP คือระยะทางของทราฟฟิกจากต้นทางไปยังปลายทาง หน่วยเป็นกิโลเมตร (km)

x_{OPC_L} คือตำแหน่งขอบเขตด้านซ้ายที่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ตามกรณีที่ 1

x_{OPC_R} คือตำแหน่งขอบเขตด้านขวาที่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ตามกรณีที่ 2

$$1600 = -D_\lambda x_{OPC_L} + D_\lambda (LP - x_{OPC_L}),$$

$$x_{OPC_L} = \frac{D_\lambda LP - 1600}{2D_\lambda}, \quad (3.3)$$

ในทำนองเดียวกัน

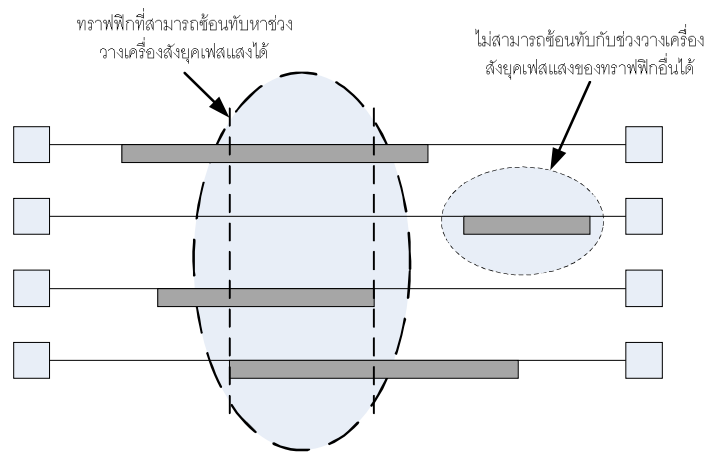
$$x_{OPC_R} = \frac{D_\lambda LP + 1600}{2D_\lambda}, \quad (3.4)$$

และจะได้ช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงคือ $x_{OPC_L} - x_{OPC_R}$

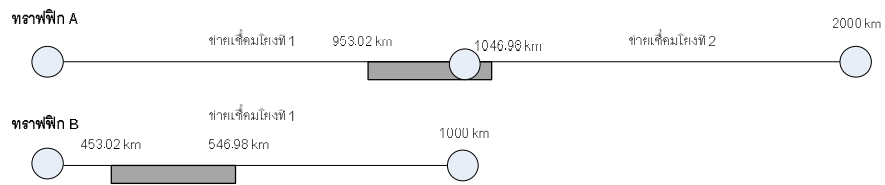
3.2.2 เงื่อนไขที่ใช้ตัดสินโครงข่ายว่าสามารถใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีนี้ได้หรือไม่

เรียกพารามิเตอร์ตัวนี้ว่า R คือตัวที่บอกว่าควรจะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแบบไหนระหว่างระเบียบขั้นตอนวิธีที่คิดค้นขึ้นมากับการวางที่ตรงกลางข่ายเชื่อมโยง เป็นตัวที่วัดระยะทางของทราฟฟิกของโครงข่ายเดิมให้สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้

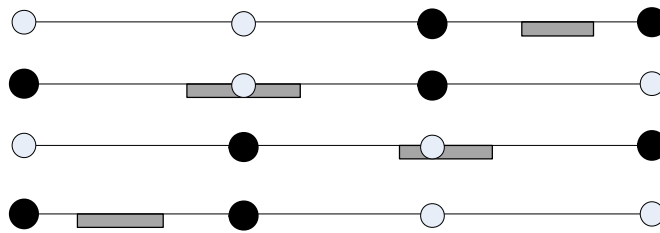
ที่มาของการเกิดค่า R เนื่องมาจากการหาตำแหน่งที่จะซ้อนทับหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ไม่สามารถกระทำได้ เพราะว่าจะมีบางทราฟฟิกในช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ไม่สามารถซ้อนทับได้ดังรูปที่ 3.3 แถบแรเงาสีเทาคือช่วงที่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้จากสมการ(3.3)และ(3.4)ซึ่งสาเหตุที่เกิดปัญหานี้ เนื่องจากว่าทราฟฟิกมีระยะทางที่แตกต่างกันมากเกินไปดังรูปที่ 3.4 ซึ่งถ้าเราจะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงโดยไม่สนใจหลักการซ้อนทับแล้ว อาจจะทำให้การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงมีการวางที่ใกล้เกินไป หรือไม่ก็ห่างเกินไป ทำให้เกิดปัญหาดิสเพอร์ชันสะสมเกินขีดจำกัดที่ปลายทางดังรูปที่ 3.5



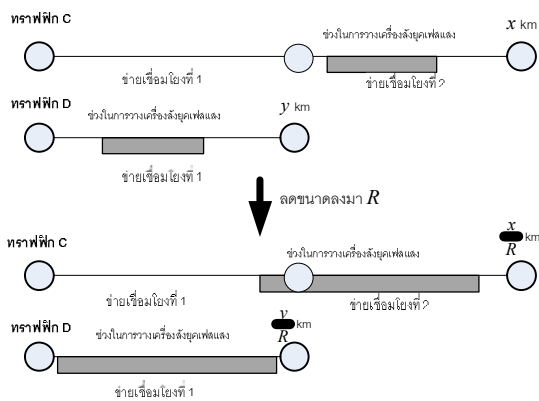
รูปที่ 3.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อไม่ได้ทุกแผงฟิสิก



(ก)

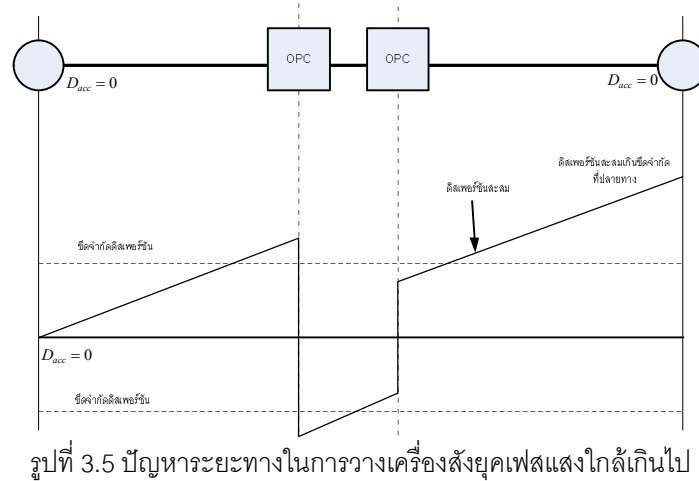


(ข)



(ค)

รูปที่ 3.4 การหาค่า R



รูปที่ 3.4 เป็นรูปประกอบการหาค่า R ต่อไปนี้จะยกตัวอย่างการคำนวณเพื่อความเข้าใจมากขึ้น ดังนี้

ตัวอย่าง ทราฟฟิก A มีระยะทาง 2000 km ทราฟฟิก B มีระยะทาง 1000 km จะได้ช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงของแต่ละทราฟฟิกคือจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.3) และ (3.4) โดยสมมติว่ามีดีสเพอร์ชัน (D_λ) เท่ากับ 17.03 ps/km/nm

$$x_{OPC_L} = \frac{(17.03)(2000) - 1600}{2(17.03)} = 953.02 \text{ km}$$

ทราฟฟิก A:

$$x_{OPC_R} = \frac{(17.03)(2000) + 1600}{2(17.03)} = 1046.98 \text{ km}$$

$$x_{OPC_L} = \frac{(17.03)(1000) - 1600}{2(17.03)} = 453.02 \text{ km}$$

ทราฟฟิก B:

$$x_{OPC_R} = \frac{(17.03)(1000) + 1600}{2(17.03)} = 546.98 \text{ km}$$

ดังนั้น ทราฟฟิก A จะมีช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงเท่ากับ 953.02 - 1046.98 km

ทราฟฟิก B จะมีช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงเท่ากับ 453.02 - 546.98 km

รูปที่ 3.4(ก) แสดงตัวอย่างช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ไม่สามารถทำการซ้อนทับกันได้ จากการคำนวณข้างต้น

จะเห็นได้ว่า การหาช่วงของการซ้อนทับเครื่องสังยุคเฟสแสงนั้น ระยะทางของทราฟฟิกมีผลต่อการหาช่วงในการซ้อนทับเครื่องสังยุคเฟสแสง รูปที่ 3.4(ข) สมมติว่าทราฟฟิกมีทิศทางจากซ้าย

ไปขวา โดยโนดต้นทาง-ปลายทางจะเป็นสีดำ จะเห็นว่าปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้ไม่สามารถซ้อนทับช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง(แถบแรงแสงสีเทา)ได้ ดังนั้นจึงทำการลดขนาดโครงข่าย (ลดระยะทางของทราฟฟิก)ดังรูปที่ 3.4(ค)จนทำให้ตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ขอบเขตซ้ายร่นระยะเข้ามาเรื่อยๆ จนกระทั่งเข้ามาในข่ายเชื่อมโยงแรกของทราฟฟิก จึงได้คิดค้นเป็นสมการดังนี้

$$LP_R = \frac{LP}{R}, \quad (3.5)$$

โดยที่ LP นั้นเป็นของทราฟฟิกที่มีระยะทางที่ยาวที่สุดของแต่ละทราฟฟิกที่ประกอบด้วยข่ายเชื่อมโยงที่เริ่มต้นส่งเป็นข่ายเดียวกัน ดังรูป 3.4(ก)

จากสมการ (3.3)

$$x_{OPC_L} = \frac{D_\lambda LP_R - 1600}{2D_\lambda},$$

และ

$$x_{OPC_L} = \frac{x_1}{R}, \quad (3.6)$$

แก้สมการที่ (3.3), (3.5) และ (3.6) จะได้

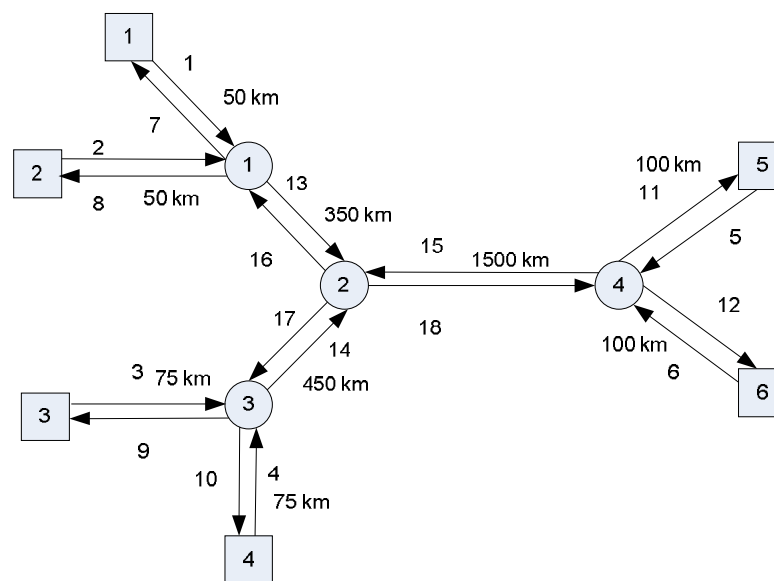
$$R = \frac{D_\lambda LP - 2D_\lambda x_1}{1600}, \quad (3.7)$$

เมื่อ x_1 คือ ความยาวของข่ายเชื่อมโยงแรกๆที่เริ่มส่ง (ดังรูปที่ 3.4 ก็คือข่ายเชื่อมโยงที่ 1 นั่นเอง) และ R ต้องไม่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 (ถ้าน้อยกว่า 1 แสดงว่าไม่ต้องลดขนาด) และต้องประเมินทั้งโครงข่ายโดยเลือกแต่ละทราฟฟิกที่มีระยะทางมากที่สุดที่ประกอบด้วยข่ายเชื่อมโยงข่ายเดียวกัน เช่นรูปที่ 3.4(ก) จะเลือกทราฟฟิก A ไม่เลือกทราฟฟิก B เพราะทราฟฟิก A มีระยะทางมากกว่าทราฟฟิก B ซึ่งมีข่ายเชื่อมโยงแรกเป็นข่ายเชื่อมโยงที่ 1 เหมือนกัน จากนั้นจะเลือกค่า R ที่สูงที่สุดที่หามาได้จากแต่ละทราฟฟิก มาลดขนาดโครงข่ายทั้งหมด

จากสมการที่ (3.5)-(3.7) เป็นการแสดงวิธีหาค่า R ที่สามารถทำให้ลดขนาดโครงข่าย จนกระทั่งทำให้ตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง (x_{OPC_L}) อยู่พอดีที่โนดหรือปลายทางของ ข่ายเชื่อมโยงแรกของทราฟฟิก ดังรูปที่ 3.4(ค) ถ้าเราลดขนาดโครงข่ายด้วยค่า R น้อยกว่าที่หามา ได้ จะทำให้เกิดปัญหาไม่สามารถซ้อนทับได้ทุกทราฟฟิกดังรูปที่ 3.3-3.4 เพื่อความเข้าใจมากขึ้น จะขอยกตัวอย่างประกอบในหัวข้อถัดไป

3.3 ตัวอย่างการคำนวณ

ต่อไปเป็นโครงข่ายตัวอย่างประกอบ



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณที่นำมาคำนวณ

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า โครงข่ายตัวอย่างมีโนดทั้งหมด 4 โนด 6 สถานี และมีข่ายเชื่อมโยง ทั้งหมด 9 ข่าย เพราะที่ใช้เส้นใยแสงเพียงเส้นเดียวโดยทิศทางการสื่อสารจะเป็นแบบสองทิศทาง (bi-directional) จะแสดงวิธีหาตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงตามระเบียบวิธีที่กล่าวไว้ข้างต้นดังนี้

1. คำนวณหาระยะทางของทราฟฟิก รวมทั้งข่ายเชื่อมโยงที่ทราฟฟิกของทุก ๆ สถานี จำนวนทราฟฟิกของข้อมูลทั้งหมดคือ $N \times (N - 1)$ เมื่อ N คือ จำนวนสถานีทั้งหมด ดังนั้นเราจะ ได้จำนวนทราฟฟิกทั้งหมด 30 ทราฟฟิก จากต้นทางสถานีไปยังปลายทางสถานี ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนทราฟฟิกและข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดในแต่ละทราฟฟิก โดย ค่าตัวแปรที่แสดงตัวแปรใน

ตาราง คือ OPC_L คือขอบเขตด้านซ้ายของตำแหน่งเครื่องส่งยูคเฟสแสง, OPC_R คือขอบเขตด้านขวาของตำแหน่งเครื่องส่งยูคเฟสแสง ส่วนตัวเลขในช่องซ้ายเชื่อมโยงคือหมายเลขของซ้ายเชื่อมโยงตามรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดในโครงข่ายตัวอย่าง

สถานีที่ 1	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R	สถานีที่ 4	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R
สถานีที่ 2	100	1,8	2.80	97.20	สถานีที่ 1	875	4,14,16,7	384.11	478.50
สถานีที่ 3	875	1,13,17,9	390.30	484.70	สถานีที่ 2	875	4,14,16,8	384.11	478.50
สถานีที่ 4	875	1,13,17,10	390.30	484.70	สถานีที่ 3	150	4,9	26.74	121.14
สถานีที่ 5	2000	1,13,18,11	952.80	1047.20	สถานีที่ 5	2075	4,14,18,11	975.61	1070.01
สถานีที่ 6	2000	1,13,18,12	952.80	1047.20	สถานีที่ 6	2075	4,14,18,12	975.61	1070.01
สถานีที่ 2	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R	สถานีที่ 5	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R
สถานีที่ 1	100	2,7	2.57	96.96	สถานีที่ 1	2000	5,15,16,7	933.92	1028.32
สถานีที่ 3	875	2,13,17,9	388.24	482.63	สถานีที่ 2	2000	5,15,16,8	933.92	1028.32
สถานีที่ 4	875	2,13,17,10	388.24	482.63	สถานีที่ 3	2075	5,15,17,9	970.72	1065.11
สถานีที่ 5	2000	2,13,18,11	948.08	1042.48	สถานีที่ 4	2075	5,15,17,10	970.72	1065.11
สถานีที่ 6	2000	2,13,18,12	948.08	1042.48	สถานีที่ 6	200	5,12	50.91	145.31
สถานีที่ 3	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R	สถานีที่ 6	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R
สถานีที่ 1	875	3,14,16,7	386.17	480.57	สถานีที่ 1	2000	6,15,16,7	929.20	1023.60
สถานีที่ 2	875	3,14,16,8	386.17	480.57	สถานีที่ 2	2000	6,15,16,8	929.20	1023.60
สถานีที่ 4	150	3,10	27.09	121.49	สถานีที่ 3	2075	6,15,17,9	965.82	1060.21
สถานีที่ 5	2075	3,14,18,11	980.51	1074.90	สถานีที่ 4	2075	6,15,17,10	965.82	1060.21
สถานีที่ 6	2075	3,14,18,12	980.51	1074.90	สถานีที่ 5	200	6,11	50.44	144.84

กำหนดให้โครงข่ายใช้เส้นใยแสงแบบโมดคลื่นเดียว (single-mode fiber : SMF, ITU-T G.652) โดยมีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 16.5 ps/km/nm และความชันของค่าดิสเพอร์ชันที่ 0.05 ps/nm²/km ที่ 1550 nm [37] ดังนั้น เราจะได้ค่าดิสเพอร์ชันของแต่ละสถานีจากสมการ

$$D = 16.50 + 0.05(\lambda - 1550.00), \quad (3.8)$$

เมื่อ λ คือค่าความยาวคลื่นที่กำหนดให้แต่ละสถานี ซึ่งได้ทำการกำหนดความยาวคลื่นให้กับแต่ละสถานีดังนี้ สถานีที่ 1 ใช้ความยาวคลื่น 1558.98 nm สถานีที่ 2 ใช้ความยาวคลื่น 1557.36 nm สถานีที่ 3 ใช้ความยาวคลื่น 1555.75 nm สถานีที่ 4 ใช้ความยาวคลื่น 1554.13 nm สถานีที่ 5 ใช้ความยาวคลื่น 1552.52 nm และสถานีที่ 6 ใช้ความยาวคลื่น 1557.36 nm

ดังนั้น จากสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 6 เราจะได้ค่าดิสเพอร์ชันของแต่ละสถานีเท่ากับ 16.95 ps/km/nm 16.87 ps/km/nm 16.79 ps/km/nm 16.71 ps/km/nm 16.63 ps/km/nm และ 16.55 ps/km/nm ตามลำดับ และกำหนดค่าอัตราส่งข้อมูล (data rate) แต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ 10 Gb/s และมีค่าขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน (dispersion limit) เท่ากับ ± 1600 ps/nm ตารางที่ 3.2 แสดงความยาวคลื่นและดิสเพอร์ชันของแต่ละสถานี

ตารางที่ 3.2 ความยาวคลื่นและดิสเพอร์ชันของแต่ละสถานี

สถานีที่	ความยาวคลื่น [λ]	ดิสเพอร์ชันของสถานี[ps/km/nm]
1	1558.98 nm	16.95
2	1557.36 nm	16.87
3	1555.75 nm	16.79
4	1554.13 nm	16.71
5	1552.52 nm	16.63
6	1557.36 nm	16.55

2. คำนวณหาตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิก จะหาได้จากข้อมูลจากข้อแรก และสมการที่ (3.3) และ (3.4) ในตารางที่ 3.1 ได้บอกตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไว้แล้ว ก็คือ OPC_L และ OPC_R ซึ่งมาจากการคำนวณตามสมการที่ (3.3) และ (3.4)

ตัวอย่างต่อไปนี้จะแสดงวิธีการหาตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิก ตัวอย่าง ทราฟฟิกจากสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 2 มีระยะทางทั้งหมด 100 km จากตารางที่ 3.1 สถานีที่ 1 มีค่าดิสเพอร์ชัน = 16.95 ps/km/nm

จากสมการที่ (3.3) จะได้ตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงด้านซ้ายคือ

$$x_{OPC_L} = \frac{(16.95)(100) - 1600}{(2)(16.95)} \quad \text{km}$$

$$x_{OPC_L} = 2.80 \quad \text{km}$$

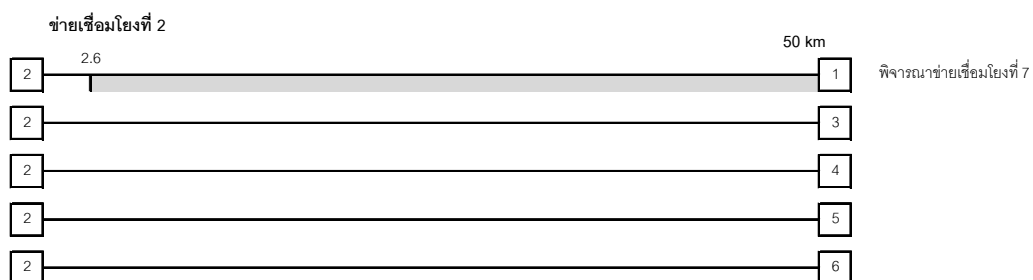
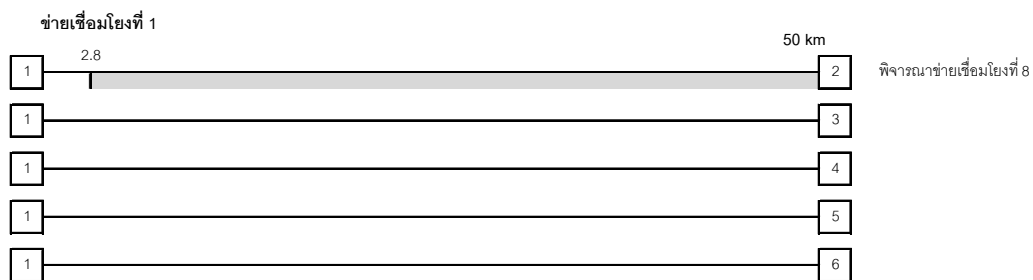
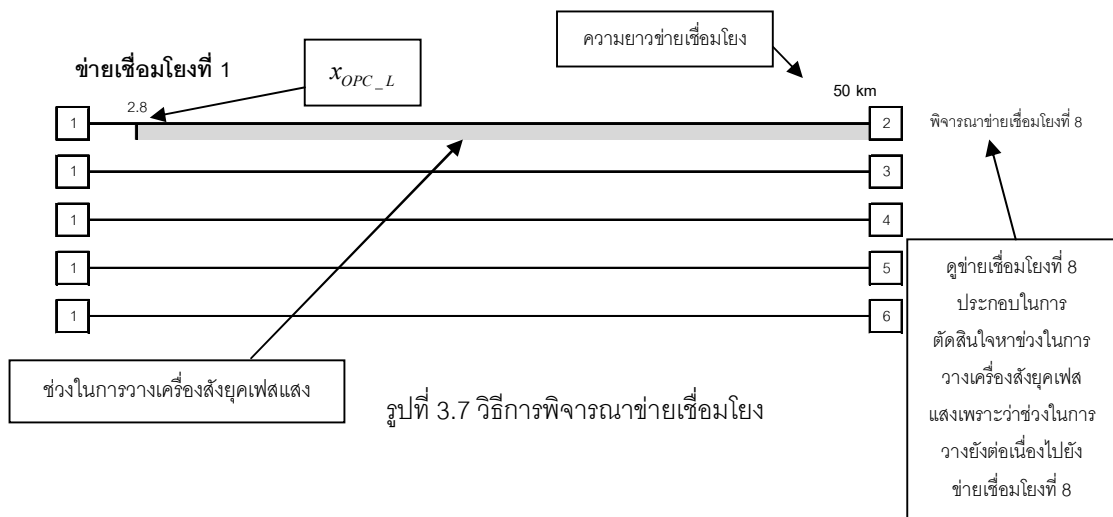
จากสมการที่ (3.4) จะได้ตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงด้านขวาคือ

$$x_{OPC_R} = \frac{(16.95)(100) + 1600}{(2)(16.95)} \quad \text{km}$$

$$x_{OPC_R} = 97.20 \quad \text{km}$$

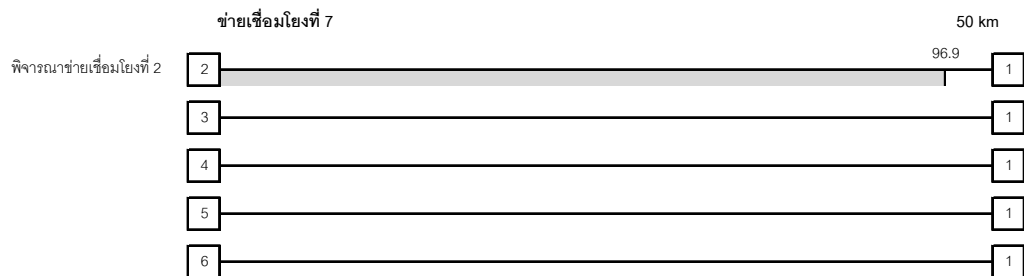
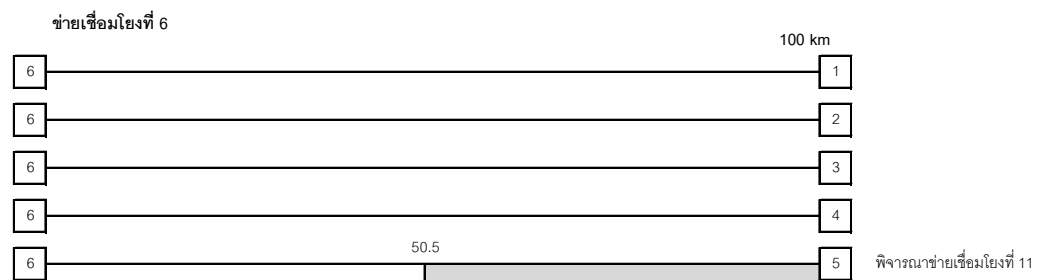
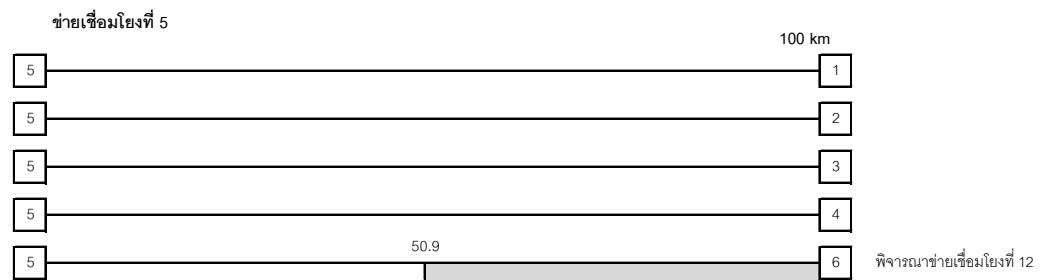
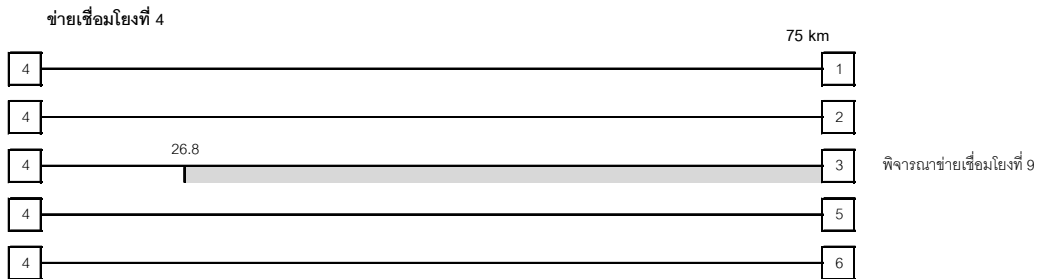
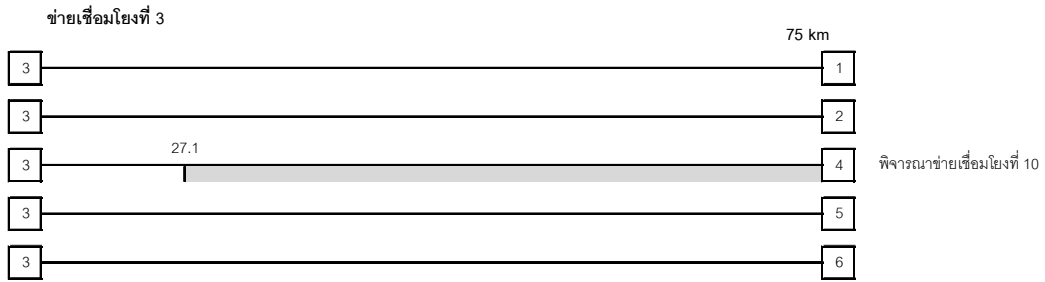
เพราะฉะนั้น จะได้ช่วงในวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงคือ 2.80 - 97.20 km

3. นำผลที่ได้จากข้อ 2. มาคิดหาตำแหน่งซ้อนทับ รูปที่ 3.7 แสดงวิธีการพิจารณาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละข่ายเชื่อมโยง ซึ่งจะบอกว่าในแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีทราฟฟิกอะไรอยู่ในข่ายนั้นๆบ้าง เช่นในรูปที่ 3.7 ข่ายเชื่อมโยงที่ 1 จะมีทราฟฟิกระหว่างโนด 1 ไปโนด 2 โนด 1 ไปโนด 3 โนด 1 ไปโนด 4 โนด 1 ไปโนด 5 และโนด 1 ไปโนด 6 เป็นต้น ส่วนรูปที่ 3.8 เป็นกราฟฟิกและตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

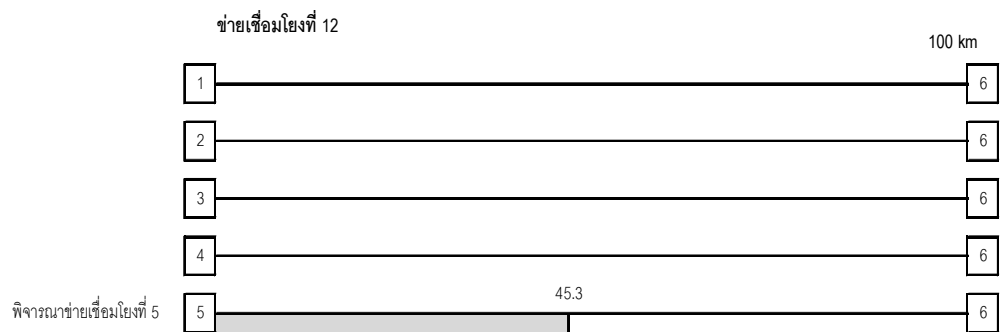
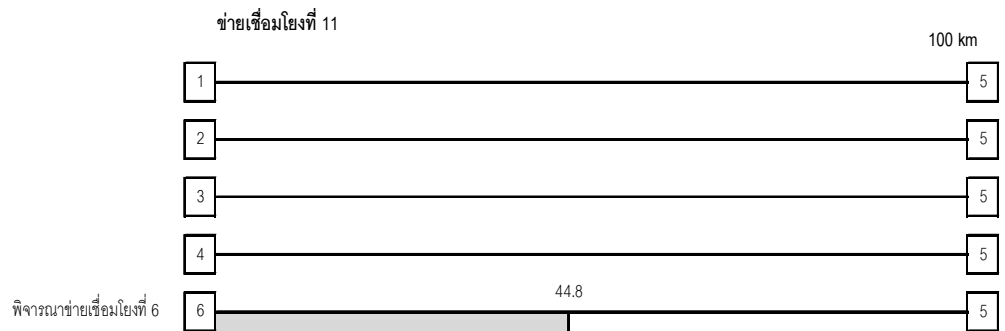
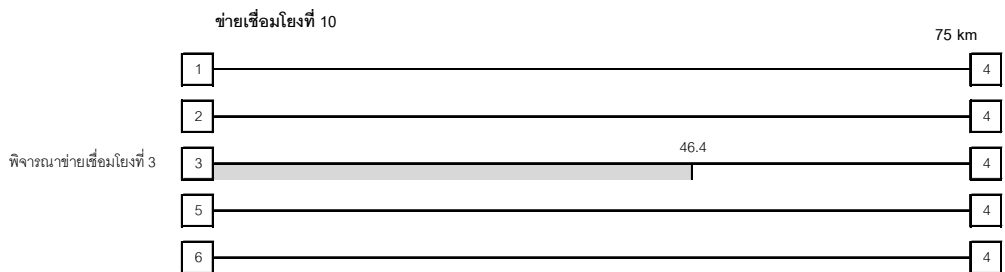
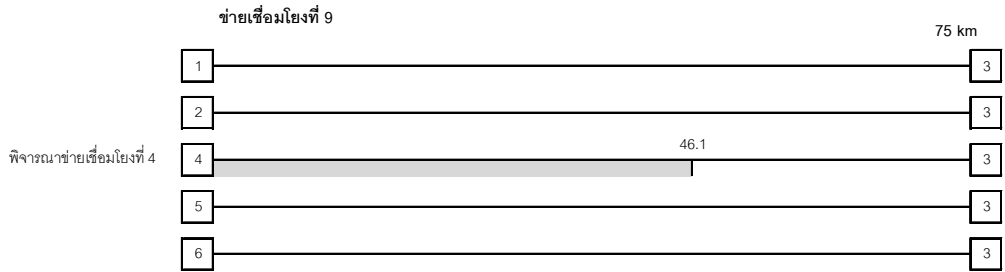
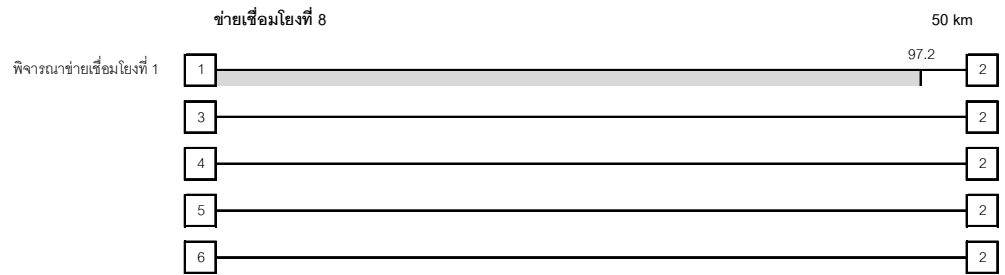


(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 1-2

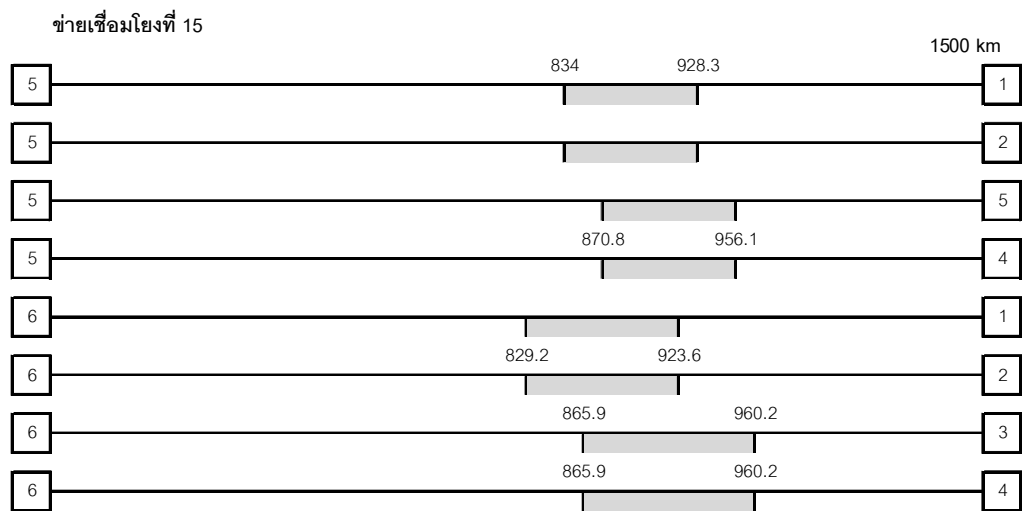
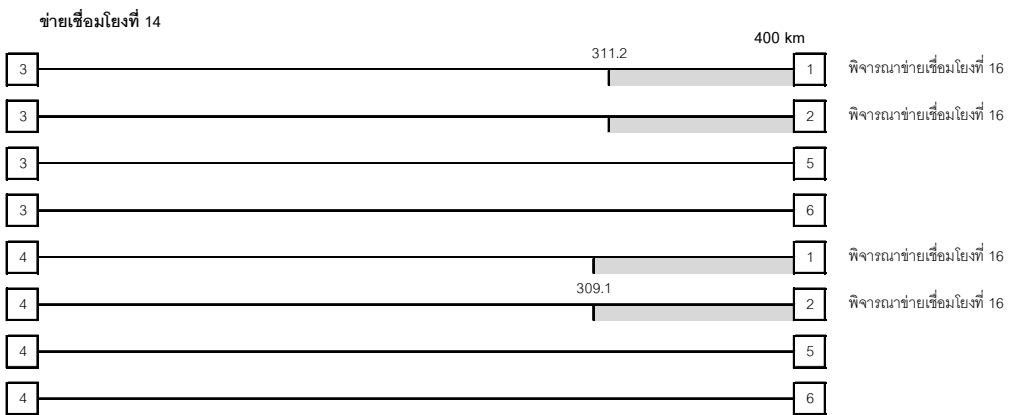
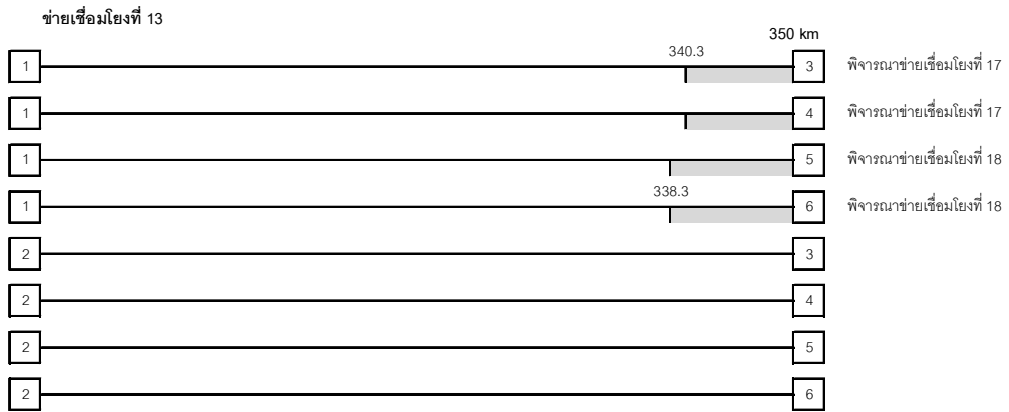
รูปที่ 3.8 กราฟฟิกและช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายตัวอย่าง



(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 3-7

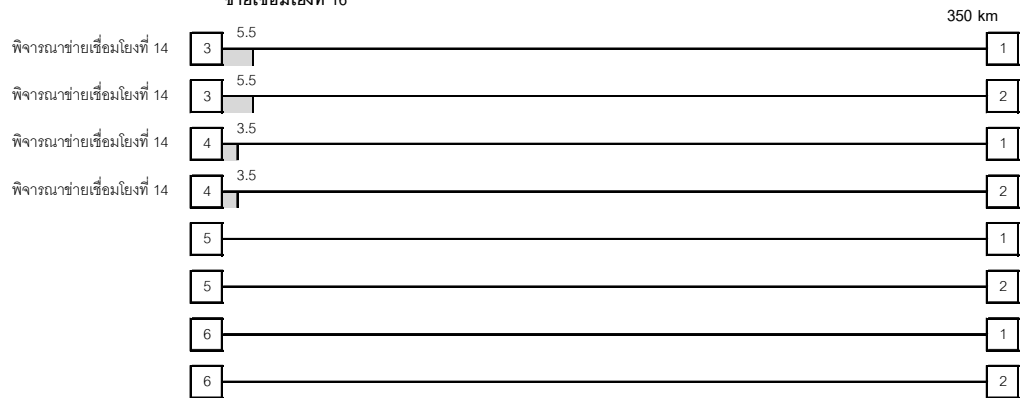


(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 8-12

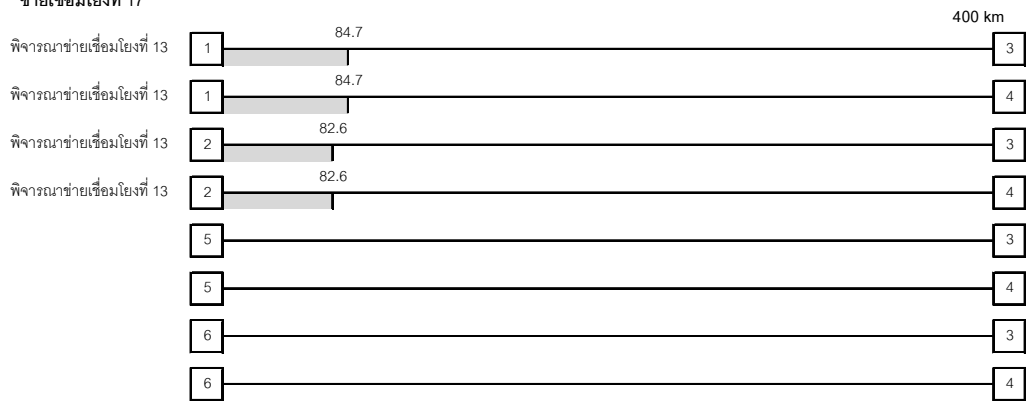


(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13-15

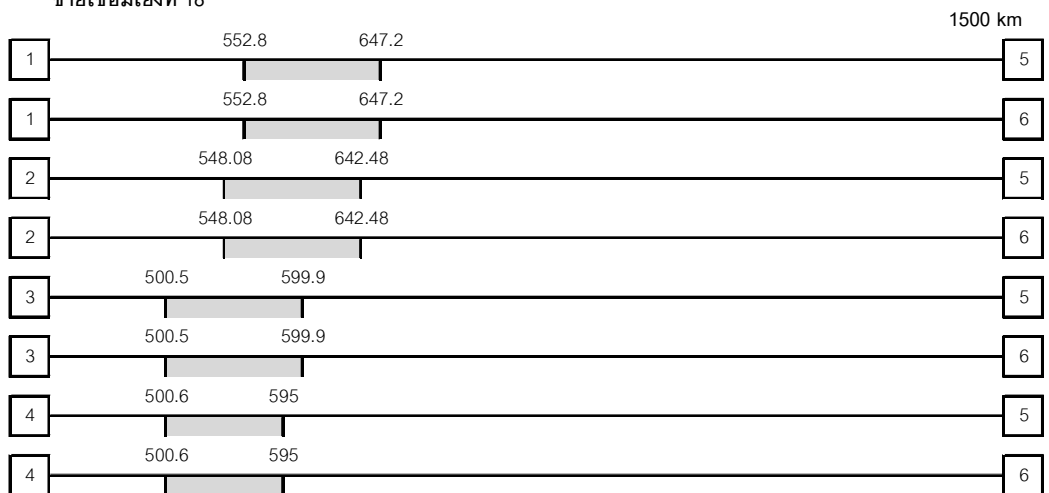
ข่ายเชื่อมโยงที่ 16



ข่ายเชื่อมโยงที่ 17



ข่ายเชื่อมโยงที่ 18



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 16-18

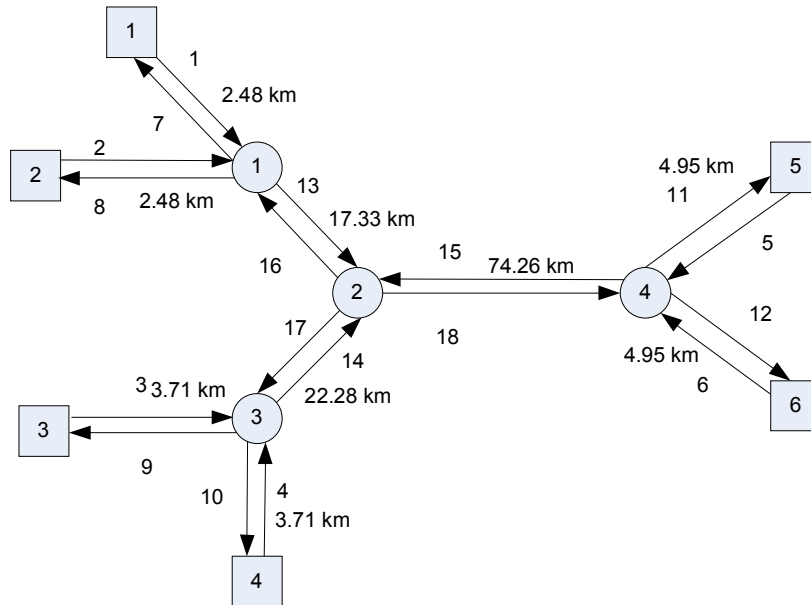
จากรูปที่ 3.8 จะพบว่า ถ้าจะคิดโดยไม่สนใจว่าต้องซ้อนทับทุกๆ ทราฟฟิกในแต่ละข่ายเชื่อมโยง จะต้องใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งหมด 18 ตัวเท่ากับจำนวนข่ายเชื่อมโยง ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว เพียงแค่วางตรงกลางของแต่ละข่าย ก็ทำให้ทุกๆ ทราฟฟิกสามารถเดินทางได้หมดโดยดิสเพอร์ชัน สะสมไม่เกินขีดจำกัดที่ปลายทางเช่นกัน ดังนั้นเราจะใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีที่คิดขึ้นมา โดยต้องหา ค่า R ก่อน ซึ่งจากสมการที่ (3.7) ตัวแปรที่เราจะต้องใส่ค่าในสมการคือระยะทางทราฟฟิกที่ยาวที่สุดและความยาวของข่ายเชื่อมโยงข่ายแรกที่ใช้ส่ง ส่วน D_x เป็นค่าดิสเพอร์ชันของแต่ละสถานี ดังนั้น ถ้าทราฟฟิกที่ส่งใช้ข่ายเชื่อมโยงแรกเหมือนกัน ก็ให้นำทราฟฟิกที่ยาวที่สุดของข่ายเชื่อมโยงแรกนั้นๆ มาคิด เพราะทราฟฟิกที่ยาวที่สุดจะเป็นตัวกำหนดช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ตารางข้างล่างจะเป็นการหาค่า R โดยดูตารางที่ 3.1 ประกอบ (X_1 คือ ความยาวของข่ายเชื่อมโยงแรกของทราฟฟิก)

ตารางที่ 3.3 การหาค่า R ของแต่ละทราฟฟิก

สถานีต้นทาง - สถานีปลายทาง	ความยาวของทราฟฟิก [km]	X_1 [km]	R
1-5 และ 1-6	2000	50	20.13
2-5 และ 2-6	2000	50	20.03
3-5 และ 3-6	2075	75	20.20
4-5 และ 4-6	2075	75	20.10
5-3 และ 5-4	2075	100	19.49
6-3 และ 6-4	2075	100	19.39

หมายเหตุ 1-5 และ 1-6 นั้นความยาวทราฟฟิกเท่ากันและข่ายเชื่อมโยงแรกมีความยาวเท่ากันจึงพิจารณาไปพร้อมๆ กัน

จากตารางที่ 3.3 จะแสดงให้เห็นว่า โครงข่ายเดิมนั้นมีค่า $R > 1$ ซึ่งหมายถึงไม่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงให้น้อยกว่าจำนวนข่ายเชื่อมโยงได้ จากตารางจะเห็นว่า ค่า R ที่มากที่สุดคือ 20.20 หรือลดขนาดโครงข่ายลงมา 20.20 เท่า ซึ่งถ้าเราใช้ค่า R ที่น้อยกว่านี้ เช่น 10 เท่า บางทราฟฟิกก็ยังคงเกิดปัญหาที่ได้อีกว่าไว้ในหัวข้อ 3.2.2 หรือก็คือปัญหาการซ้อนทับไม่ได้ทุกทราฟฟิก ตารางที่ 3.4 จะแสดงถึงทราฟฟิกและตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ลดขนาดลงแล้ว รูปที่ 3.9 เป็นโครงข่ายที่ลดขนาดลง 20.20 เท่า



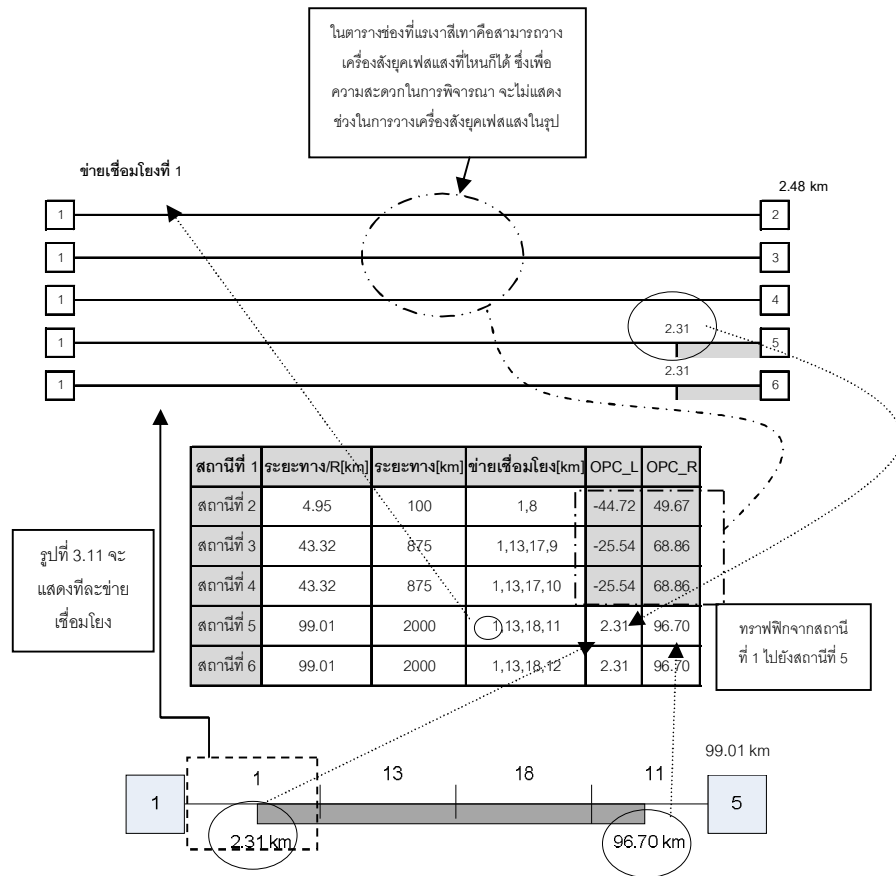
รูปที่ 3.9 โครงข่ายตัวอย่างที่ได้รับการลดขนาดลง 20.20 เท่า

ตารางที่ 3.4 ทราฟฟิกและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายตัวอย่างที่ลดขนาดลงแล้ว

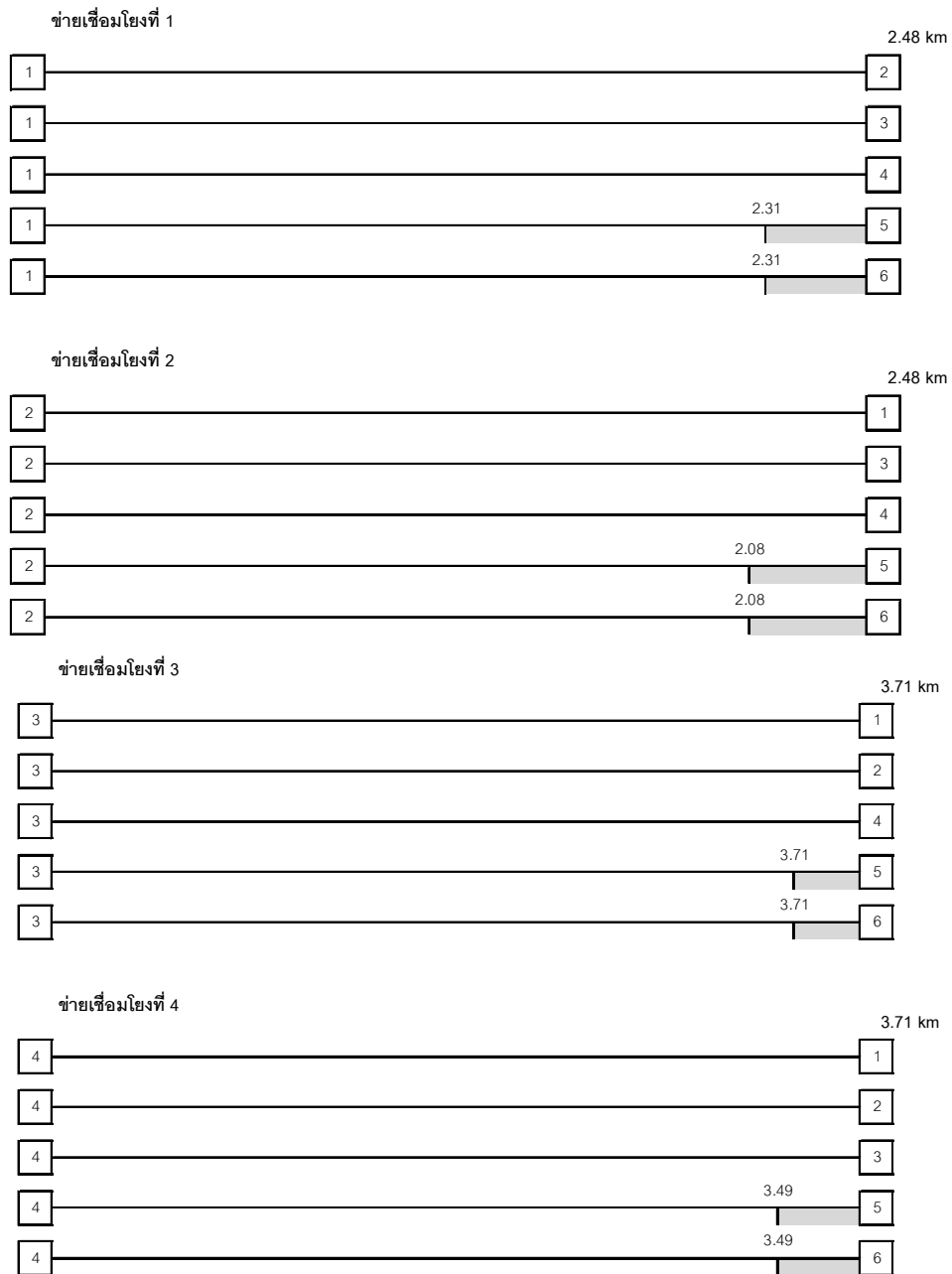
สถานีที่ 1	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R	สถานีที่ 4	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R
สถานีที่ 2	4.95	100	1,8	-44.72	49.67	สถานีที่ 1	43.32	875	4,14,16,7	-26.22	69.53
สถานีที่ 3	43.32	875	1,13,17,9	-25.54	68.86	สถานีที่ 2	43.32	875	4,14,16,8	-26.22	69.53
สถานีที่ 4	43.32	875	1,13,17,10	-25.54	68.86	สถานีที่ 3	7.43	150	4,9	-44.16	51.59
สถานีที่ 5	99.01	2000	1,13,18,11	2.31	96.70	สถานีที่ 5	102.72	2075	4,14,18,11	3.49	99.24
สถานีที่ 6	99.01	2000	1,13,18,12	2.31	96.70	สถานีที่ 6	102.72	2075	4,14,18,12	3.49	99.24
สถานีที่ 2	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R	สถานีที่ 5	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R
สถานีที่ 1	4.95	100	2,7	-44.95	49.90	สถานีที่ 1	99.01	2000	5,15,16,7	1.40	97.61
สถานีที่ 3	43.32	875	2,13,17,9	-25.76	69.08	สถานีที่ 2	99.01	2000	5,15,16,8	1.40	97.61
สถานีที่ 4	43.32	875	2,13,17,10	-25.76	69.08	สถานีที่ 3	102.72	2075	5,15,17,9	3.26	99.47
สถานีที่ 5	99.01	2000	2,13,18,11	2.08	96.93	สถานีที่ 4	102.72	2075	5,15,17,10	3.26	99.47
สถานีที่ 6	99.01	2000	2,13,18,12	2.08	96.93	สถานีที่ 6	9.90	200	5,12	-43.16	53.06
สถานีที่ 3	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R	สถานีที่ 6	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R
สถานีที่ 1	43.32	875	3,14,16,7	-25.99	69.31	สถานีที่ 1	99.01	2000	6,15,16,7	1.17	97.84
สถานีที่ 2	43.32	875	3,14,16,8	-25.99	69.31	สถานีที่ 2	99.01	2000	6,15,16,8	1.17	97.84
สถานีที่ 4	7.43	150	3,10	-43.93	51.36	สถานีที่ 3	102.72	2075	6,15,17,9	3.02	99.70
สถานีที่ 5	102.72	2075	3,14,18,11	3.71	99.01	สถานีที่ 4	102.72	2075	6,15,17,10	3.02	99.70
สถานีที่ 6	102.72	2075	3,14,18,12	3.71	99.01	สถานีที่ 5	9.90	200	6,11	-43.39	53.29

หมายเหตุ : ช่องแวงขาของ OPC_L และ OPC_R คือสามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ข่ายเชื่อมโยงตำแหน่งไหนก็ได้

รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงหลังจากลดขนาดโครงข่ายลงแล้ว ส่วนวิธีการพิจารณา จะแสดงไว้ดังรูปที่ 3.10 โดยจะพิจารณาควบคู่ไปกับตารางที่ 3.4 ซึ่งเป็นตัวอย่างของวิธีดูช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงข่ายเชื่อมโยงที่ 1 วิธีพิจารณานี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้แบบทที่ 4 ได้ด้วย ช่องแรงเสีเทาในตารางหมายถึงเราสามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงตรงไหนก็ได้ของทราฟฟิก ดังนั้นจึงจะไม่นำมาพิจารณาหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง



รูปที่ 3.10 วิธีพิจารณาหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

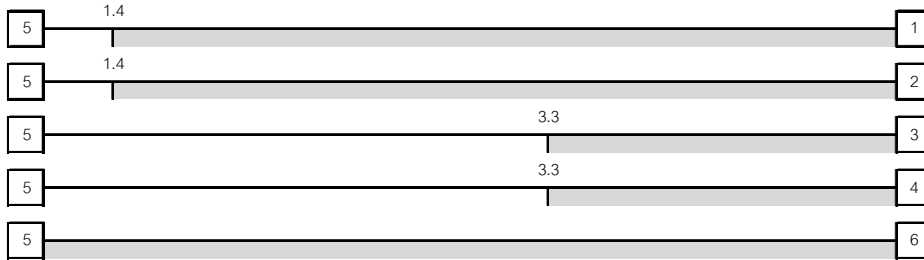


(ก) สายเชื่อมโยงที่ 1-4

รูปที่ 3.11 ทราฟฟิกและช่วงในการวางเครื่องตั้งยุคเฟสแสงในโครงข่ายตัวอย่าง(ลดขนาด)

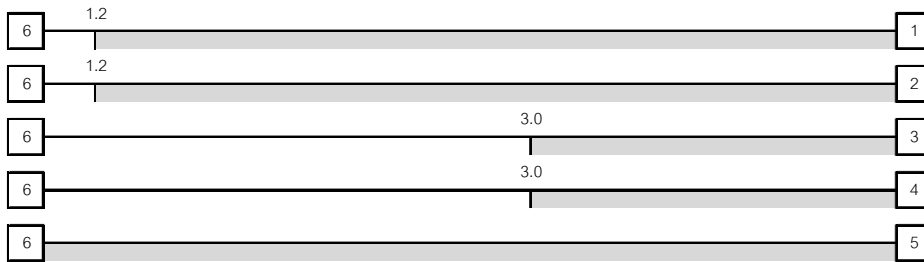
ข่ายเชื่อมโยงที่ 5

4.95 km



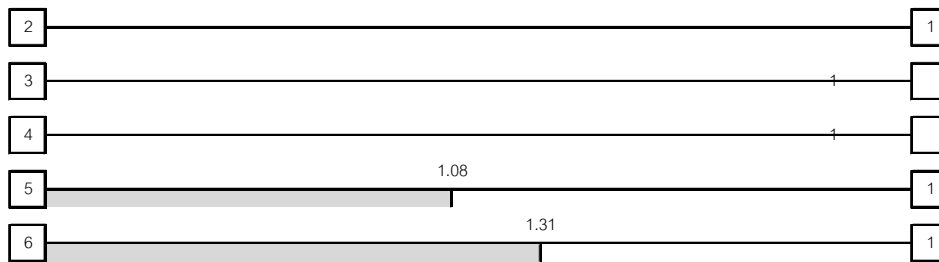
ข่ายเชื่อมโยงที่ 6

4.95 km



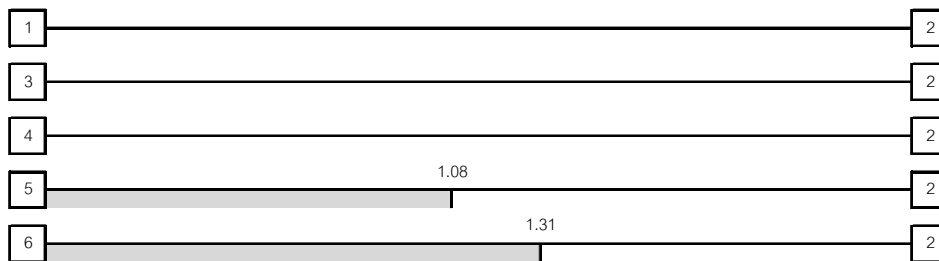
ข่ายเชื่อมโยงที่ 7

2.48 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 8

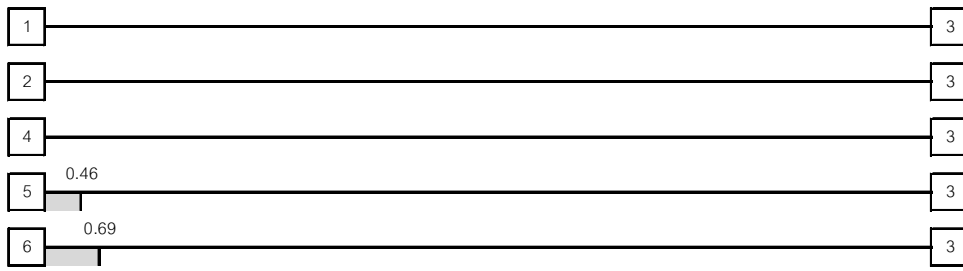
2.48 km



(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 5-8

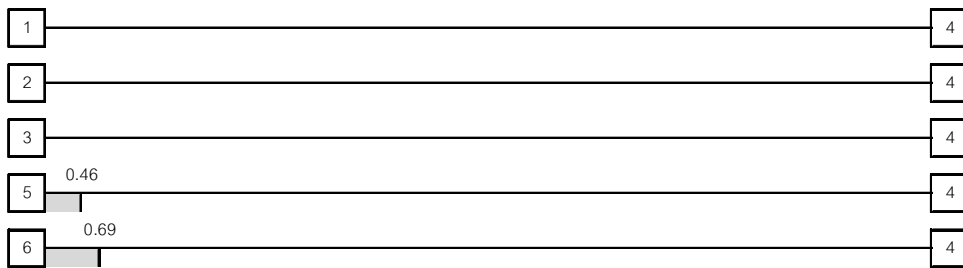
ข่ายเชื่อมโยงที่ 9

3.71 km



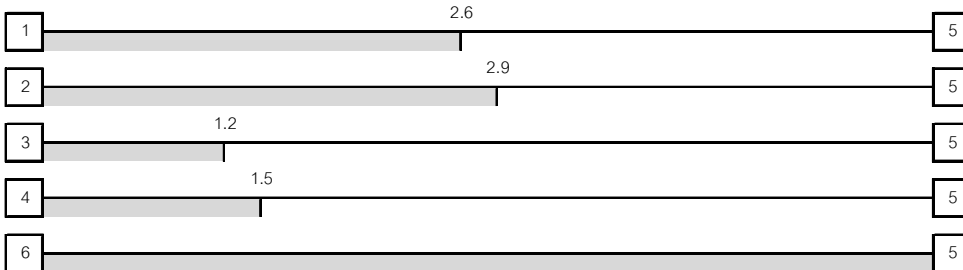
ข่ายเชื่อมโยงที่ 10

3.71 km



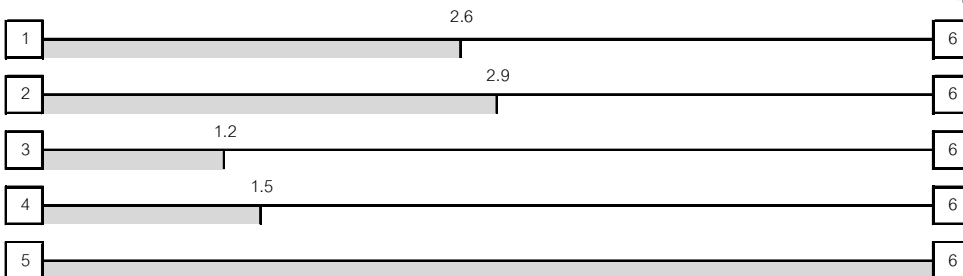
ข่ายเชื่อมโยงที่ 11

4.95 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 12

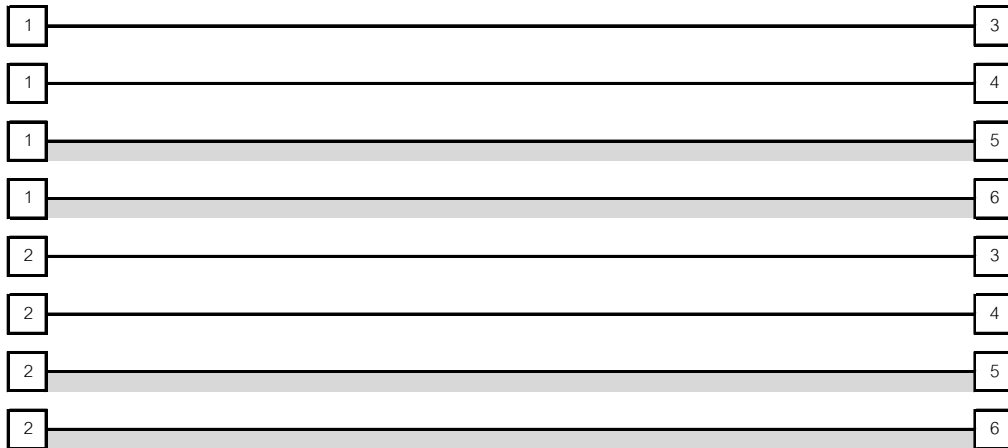
4.95 km



(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 9-12

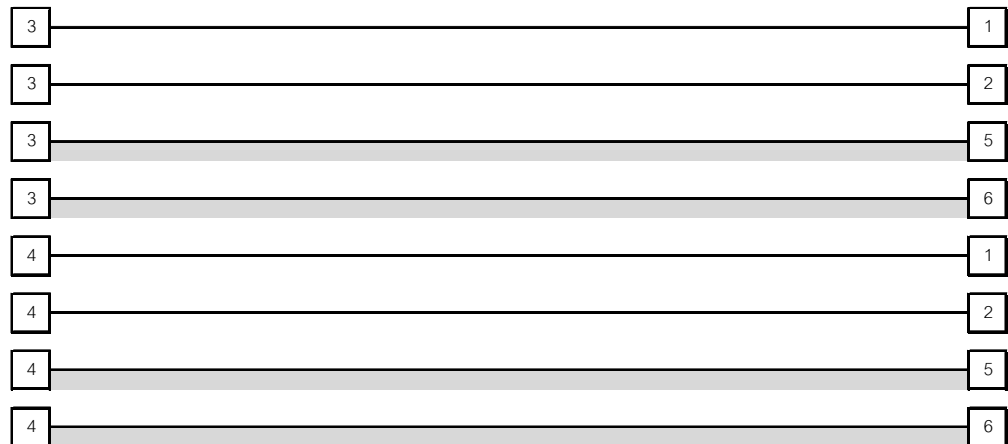
ข่ายเชื่อมโยงที่ 13

17.33 km



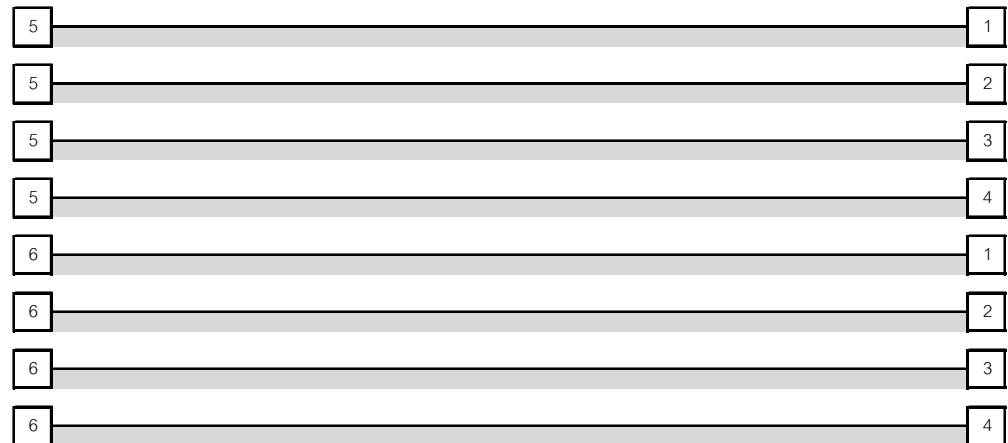
ข่ายเชื่อมโยงที่ 14

19.80 km

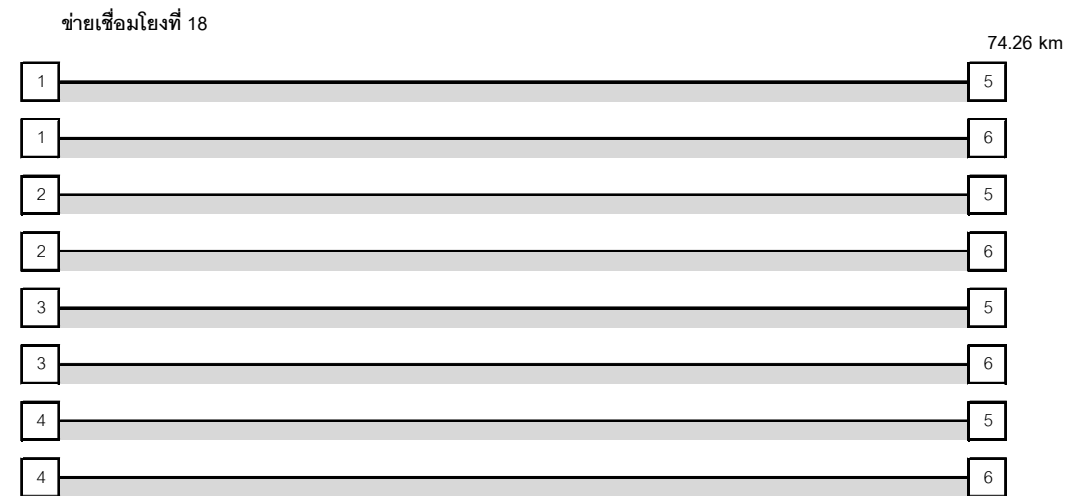
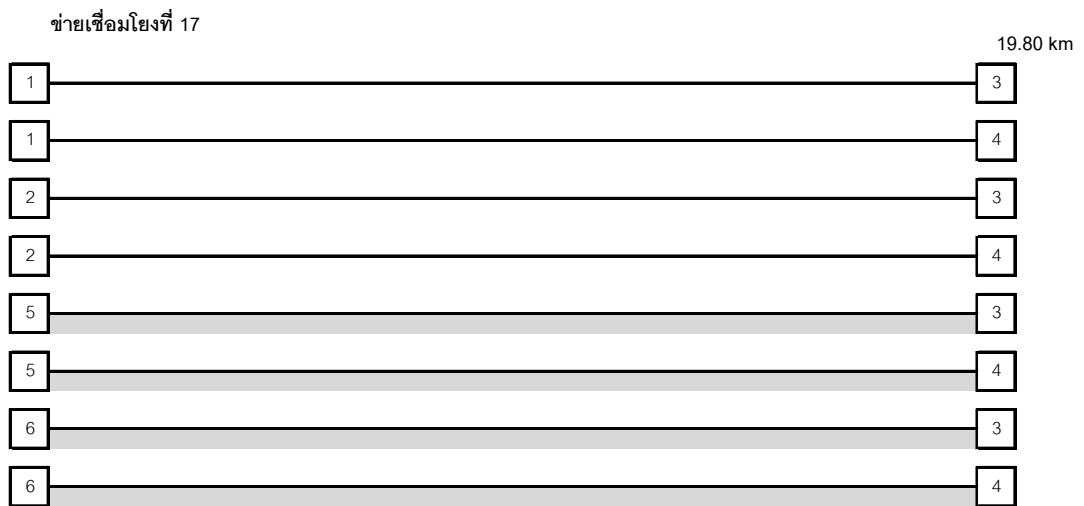
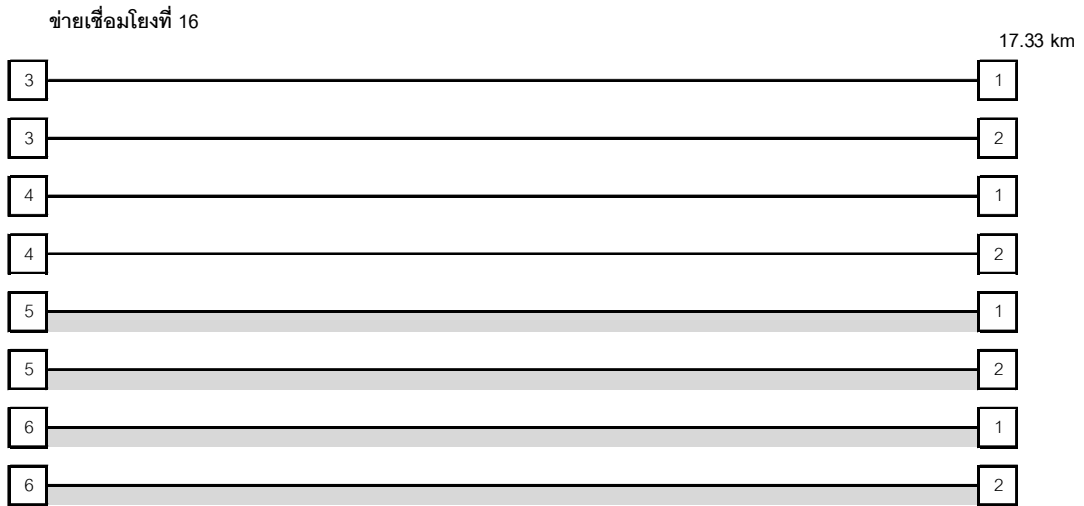


ข่ายเชื่อมโยงที่ 15

74.26 km



(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13-15



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 16-18

4. **พิจารณาหาตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง** จะใช้วิธีพิจารณาว่าทราฟฟิกในข่ายไหนที่ต้องวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงมากที่สุด โดยจะไม่พิจารณาทราฟฟิกที่ไม่จำเป็นต้องวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เนื่องจากทราฟฟิกที่ไม่จำเป็นต้องวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้น ค่าดิสเพอร์ชันสะสม ยังไม่ถึงค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด จากรูปที่ 3.11(ก)-(จ) จะพบว่าข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 18 มี ทราฟฟิกมากที่สุด (8 ทราฟฟิก) จึงพิจารณาข่ายเชื่อมโยงนี้เป็นอันดับแรก จากนั้นดูว่าทราฟฟิกที่มีข่ายเชื่อมโยงนี้ประกอบ (เฉพาะแถบแรงงาสีเทา) มีผลกับข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อกันไหนบ้าง ซึ่งจากรูปที่ 3.11 สรุปได้ว่า วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงเพียงแค่ 2 ตัวเท่านั้น ที่ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 (0-74.26 km) และ 18 (0-74.26 km) เพราะแถบแรงงาสีเทาที่เหลือเมื่อพิจารณาพร้อมทั้งตารางที่ 3.4 แล้ว จะทำให้พบว่า ทราฟฟิกที่อยู่ในข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 18 นั้นเป็นทราฟฟิกเดียวกันกับทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ ซึ่งเมื่อทำการซัอนทับแล้ว จะได้ว่าซัอนทับตรงข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 18 เท่านั้น

จากนั้นเราจะตรวจสอบผลจากการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งหมด 30 ทราฟฟิกจากการคำนวณค่าดิสเพอร์ชันสะสมตามสมการที่ (3.1)

$$D_{acc} = D_{\lambda} L, \quad (3.1)$$

โดยที่ D_{acc} คือ ดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละทราฟฟิก (accumulated dispersion) หน่วย ps/nm

D_{λ} คือ ค่าดิสเพอร์ชันของแต่ละสถานี หน่วย ps/km/nm

L คือ ระยะทาง (km)

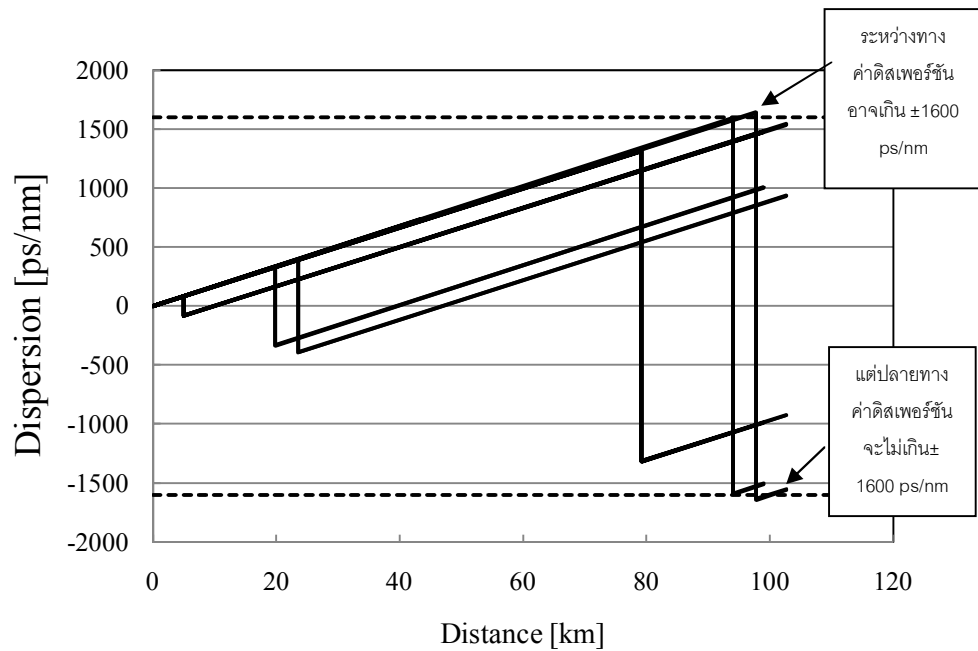
เมื่อถึงตำแหน่งที่จะต้องวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงจะทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเปลี่ยนไปตามสมการที่ (3.9)

$$D_{acc-out} = -D_{acc-in} \quad (3.9)$$

โดยที่ D_{acc-in} คือ ดิสเพอร์ชันสะสมก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสง (ps/nm)

$D_{acc-out}$ คือ ดิสเพอร์ชันสะสมหลังจากออกจากเครื่องส่งยุคเฟสแสง (ps/nm)

และคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมต่อไปดังสมการที่ (3.1) จนถึงสถานีปลายทาง ระหว่างทางของทราฟฟิกค่าดิสเพอร์ชันสะสมอาจจะเกิน 1600 ps/nm หรือ น้อยกว่า -1600 ps/nm ก็ได้ รูปที่ 3.12(ก)-(ค) เป็นค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกๆ ทราฟฟิก



รูปที่ 3.12 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่ายตัวอย่าง

บทที่ 4

การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมช

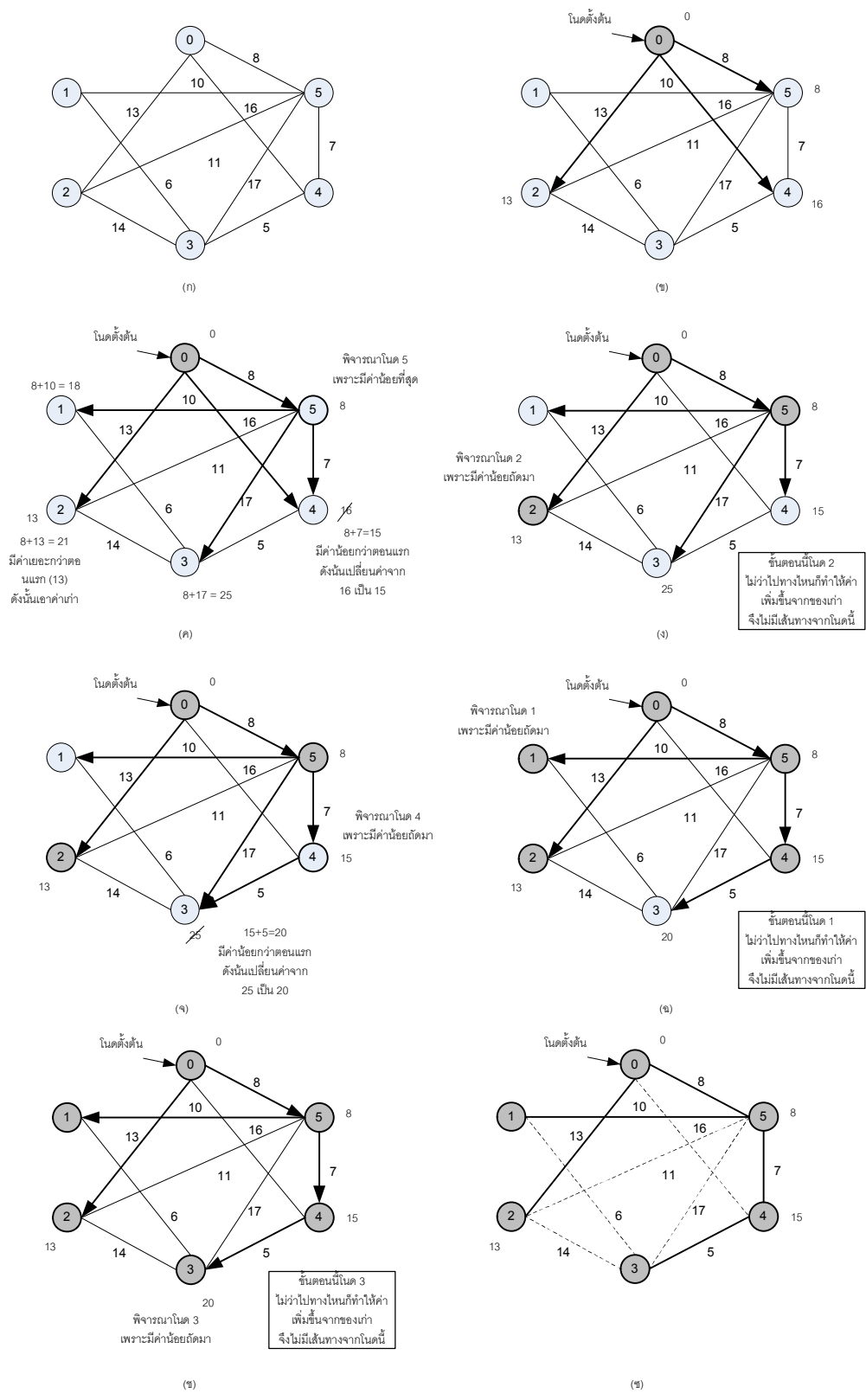
บทที่ 3 ได้กล่าวถึงระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ ซึ่งได้ผลสรุปออกมาว่าต้องลดขนาดของโครงข่ายลงมา 20.20 เท่าถึงจะวางได้ ในบทนี้จะประยุกต์ใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกับโครงข่ายแบบเมช แต่จะมีข้อแตกต่างกันคือ เพิ่มหลักการคิดในการเลือกเส้นทาง เพราะว่าโครงข่ายแบบเมชนั้นสามารถเลือกเส้นทางไปได้หลายเส้นทาง ตลอดจนถึงการกำหนดค่าดิสเพอร์ชัน ซึ่งเราจะเลือกใช้เพียงความยาวคลื่นเดียว ต่างกับโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณที่จะกำหนดความยาวคลื่นให้ในแต่ละสถานี

4.1 ระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

1. คำนวณหาทราฟฟิกของโหนดต่างๆ โดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางแบบสั้นที่สุด (shortest path) ระหว่างโหนดใดๆ รวมถึงหาข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องในทราฟฟิกนั้น เพื่อนำมาคิดหาค่า R
2. ประเมินโครงข่ายว่าสามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงให้เหมาะสมที่สุด โดยใช้พารามิเตอร์ R เป็นตัวตัดสิน ซึ่งค่า R จะเป็นตัวตัดสินว่า ควรจะใช้การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแบบไหน ระหว่างการวางที่จุดกึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงหรือวางโดยใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีนี้
3. คำนวณหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิก
4. นำตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในข้อ 3. มาคิดหาตำแหน่งที่เหมาะสมในแต่ละข่ายเชื่อมโยง โดยใช้วิธีซ้อนทับ (intersection) ของทุกๆ ทราฟฟิก
5. ตรวจสอบผลของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

4.2 วิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด

สิ่งที่สำคัญในโครงข่ายแบบเมชคือ การหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ซึ่งวิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดนั้นมีอยู่หลายระเบียบขั้นตอนวิธี แต่ระเบียบขั้นตอนวิธีที่เราใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีของ Dijkstra (Dijkstra's algorithm) ซึ่งเป็นวิธีที่เข้าใจง่าย และรวดเร็วเพื่อความเข้าใจ จะใช้รูปที่ 4.1 ประกอบการอธิบาย



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างวิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยระเบียบขั้นตอนวิธีของ Dijkstra

จากรูปที่ 4.1(ก) แสดงโครงข่ายที่ประกอบไปด้วย 6 โหนด 10 ข่ายเชื่อมโยง โดยจะมีค่า (cost)ประจำข่ายเชื่อมโยง ซึ่งอาจจะเป็นอะไรก็ได้ เช่น ความจุ ระยะทาง แต่ในที่นี้ เราจะให้ cost คือระยะทางเท่านั้น วิธีการพิจารณาแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

1. ให้โหนดเริ่มต้นคือโหนด 0 มีค่าเท่ากับ 0
2. จากโหนด 0 จะมีเส้นทางไปหาโหนด 2 4 และ 5 ให้เอาค่าของข่ายเชื่อมโยงไปเก็บไว้ที่ปลายทางได้ดังนี้ โหนด 2 มีค่าเท่ากับ 13 โหนด 4 มีค่าเท่ากับ 16 และโหนด 5 มีค่าเท่ากับ 8 ดังรูปที่ 4.1(ข)
3. พิจารณาโหนดที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งก็คือโหนด 5 จะพบว่ามีเส้นทางไปหาโหนด 1 โหนด 2 โหนด 3 และโหนด 4 โดยจะไม่พิจารณาย้อนกลับไปหาโหนดที่พิจารณาแล้ว คือโหนด 0 จากนั้นก็เปลี่ยนแปลงค่าปลายทางของโหนดต่างๆ โดยให้บวกค่าที่โหนดที่พิจารณาอยู่กับค่าของข่ายเชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.1(ค) ที่โหนด 1 จะมีค่า $8+10 = 18$ โหนด 2 มีค่าเท่ากับ $8+13 = 21$ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าเก่าที่พิจารณาจากโหนด 0 จึงไม่เลือกเส้นทางนี้ โหนด 3 มีค่าเท่ากับ $8+17 = 25$ สุดท้ายโหนด 4 มีค่าเท่ากับ $8+7 = 15$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าเก่า คือ 16 ดังนั้นเลือกเส้นทางนี้และตัดเส้นทางเก่าทิ้งจากโหนด 0
4. พิจารณาโหนด 2 ซึ่งมีค่าของโหนดน้อยที่สุดในบรรดาโหนดที่ต้องพิจารณาที่เหลือ ซึ่งพบว่าไม่มีเส้นทางไหนที่มีค่าของโหนดเพิ่มขึ้นจากของเก่า ดังนั้นไม่มีเส้นทางต่อจากโหนดนี้ ดังรูปที่ 4.1(ง)
5. รูปที่ 4.1(จ) พิจารณาโหนด 4 ซึ่งพิจารณาเช่นเดียวกับข้อ 3. จะได้ว่า เปลี่ยนแปลงค่าจากโหนด 4 ไปโหนด 3 เป็น $15+5 = 20$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของเก่า จึงเลือกเส้นทางนี้
6. รูปที่ 4.1(ฉ) และ 4.1(ช) ไม่มีเส้นทางพิจารณาจากโหนด 1 และ โหนด 3 เพราะมีค่ามากกว่าของเก่า
7. รูปที่ 4.1(ซ) แสดงเส้นทางที่สั้นที่สุดของแต่ละคู่โหนด

ในรูปที่ 4.1(ซ) จะได้โครงข่ายที่มีเส้นทางที่สั้นที่สุดซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับโครงข่ายในบทที่ 3 จะเห็นได้ว่า ระเบียบขั้นตอนวิธีนี้ จะทำให้ได้ค่าที่น้อยที่สุดในแต่ละเส้นทางคู่โหนดใดๆ เราจะประยุกต์ใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีนี้กับโครงข่ายตัวอย่าง ซึ่งค่าประจำข่ายเชื่อมโยงก็คือระยะทาง ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.3 ตัวอย่างการคำนวณ

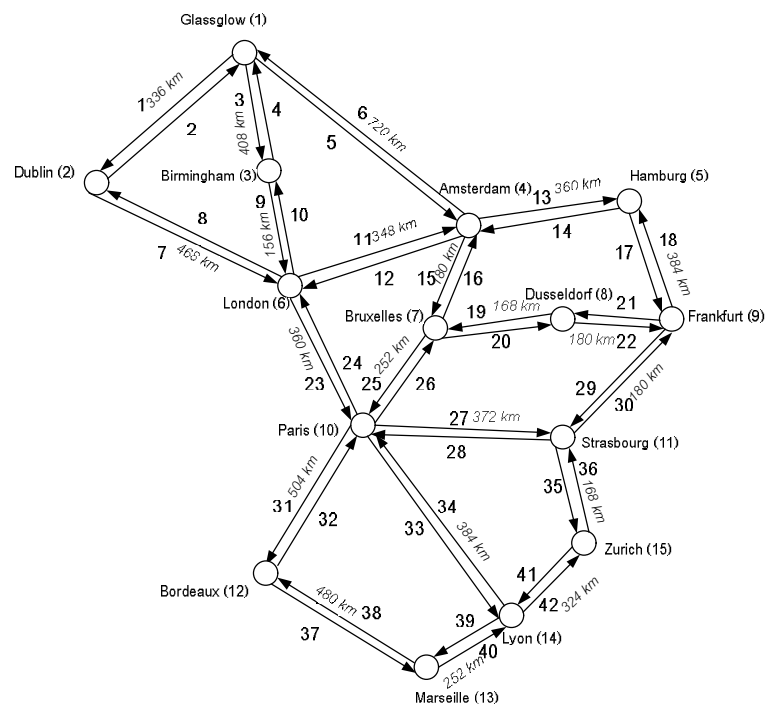
โครงข่ายตัวอย่างในบทนี้ ใช้เส้นใยแสงแบบโมดคลื่นเดี่ยว (single-mode fiber : SMF, ITU-T G.652) โดยมีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 16.5 ps/km/nm และความชันของค่าดิสเพอร์ชันที่ 0.05 ps/nm²/km ที่ 1550 nm ความยาวคลื่นที่ใช้ นำมาจาก ITU-T G.692 [38] ซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1528.77 – 1560.61 nm โดยมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณ (channel spacing) เท่ากับ 100 GHz เมื่อพิจารณาจากสมการที่จะหาค่าดิสเพอร์ชันในแต่ละช่องสัญญาณแล้วพบว่า ที่ความยาวคลื่น 1560.61 nm จากสมการที่(3.8)จะได้ค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดเท่ากับ

$$16.50 + 0.05(1560.61 - 1550.00) = 17.03 \text{ ps/km/nm} \quad (4.1)$$

จากนั้นเราจะกำหนดให้โนดเลือกความยาวคลื่นนี้ทุกโนด เพราะว่าค่าดิสเพอร์ชันจากความยาวคลื่นอื่น ๆ นั้นจะมีค่าน้อยกว่า ค่าจากสมการที่ (4.1) ดังนั้นถ้าค่าดิสเพอร์ชันที่มากที่สุดสามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและผ่านค่าดิสเพอร์ชันลิมิตได้ ความยาวคลื่นค่าอื่น ๆ ก็สามารถผ่านได้เช่นกัน

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างประกอบ

ตัวอย่างที่ 1 โครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เป็นส่วนหนึ่งจาก ERNet (European Reference Network) ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงข่าย ERNet

แสดงวิธีทำเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. หาเส้นทางที่สั้นที่สุดและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงเราจะประยุกต์ใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีของ Dijkstra มาใช้ และหาตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงดังสมการที่ (3.3) และ (3.4) ซึ่งจะได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย ERNet

(ก) โหนดที่ 1 - 4

โนด 1	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 2	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
2	336	1	121.02	214.98	1	336	2	121.02	214.98
3	408	3	157.02	250.98	3	624	7,10	265.02	358.98
4	720	5	313.02	406.98	4	816	7,11	361.02	454.98
5	1080	5,13	493.02	586.98	5	1176	7,11,13	541.02	634.98
6	564	3,9	235.02	328.98	6	468	7	187.02	280.98
7	900	5,15	403.02	496.98	7	996	7,11,15	451.02	544.98
8	1068	5,15,20	487.02	580.98	8	1164	7,11,15,20	535.02	628.98
9	1248	5,15,20,22	577.02	670.98	9	1344	7,11,15,20,22	625.02	718.98
10	924	3,9,23	415.02	508.98	10	828	7,23	367.02	460.98
11	1296	3,9,23,27	601.02	694.98	11	1200	7,23,27	553.02	646.98
12	1428	3,9,23,31	667.02	760.98	12	1332	7,23,31	619.02	712.98
13	1560	3,9,23,33,39	733.02	826.98	13	1464	7,23,33,39	685.02	778.98
14	1308	3,9,23,33	607.02	700.98	14	1212	7,23,33	559.02	652.98
15	1464	3,9,23,27,35	685.02	778.98	15	1368	7,23,27,35	637.02	730.98
โนด 3	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 4	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	408	4	157.02	250.98	1	720	6	313.02	406.98
2	624	9,8	265.02	358.98	2	816	12,8	361.02	454.98
4	504	9,11	205.02	298.98	3	504	12,10	205.02	298.98
5	864	9,11,13	385.02	478.98	5	360	13	133.02	226.98
6	156	9	31.02	124.98	6	348	12	127.02	220.98
7	684	9,11,15	295.02	388.98	7	180	15	43.02	136.98
8	852	9,11,15,20	379.02	472.98	8	348	15,20	127.02	220.98
9	1032	9,11,15,20,22	469.02	562.98	9	528	15,20,22	217.02	310.98
10	516	9,23	211.02	304.98	10	432	15,25	169.02	262.98
11	888	9,23,27	397.02	490.98	11	708	15,20,22,29	307.02	400.98
12	1020	9,23,31	463.02	556.98	12	936	15,25,31	421.02	514.98
13	1152	9,23,33,39	529.02	622.98	13	1068	15,25,33,39	487.02	580.98
14	900	9,23,33	403.02	496.98	14	816	15,25,33	361.02	454.98
15	1056	9,23,27,35	481.02	574.98	15	876	15,20,22,29,35	391.02	484.98

(ข) โหนดที่ 5 - 8

โนด 5	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 6	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	1080	14,6	493.02	586.98	1	564	10,4	235.02	328.98
2	1176	14,12,8	541.02	634.98	2	468	8	187.02	280.98
3	864	14,12,10	385.02	478.98	3	156	10	31.02	124.98
4	360	14	133.02	226.98	4	348	11	127.02	220.98
6	708	14,12	307.02	400.98	5	708	11,13	307.02	400.98
7	540	14,15	223.02	316.98	7	528	11,15	217.02	310.98
8	564	17,21	235.02	328.98	8	696	11,15,20	301.02	394.98
9	384	17	145.02	238.98	9	876	11,15,20,22	391.02	484.98
10	792	14,15,25	349.02	442.98	10	360	23	133.02	226.98
11	564	17,29	235.02	328.98	11	732	23,27	319.02	412.98
12	1296	14,15,25,31	601.02	694.98	12	864	23,31	385.02	478.98
13	1308	17,29,35,41,39	607.02	700.98	13	996	23,33,39	451.02	544.98
14	1056	17,29,35,41	481.02	574.98	14	744	23,33	325.02	418.98
15	732	17,29,35	319.02	412.98	15	900	23,27,35	403.02	496.98
โนด 7	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 8	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	900	16,6	403.02	496.98	1	1068	19,16,6	487.02	580.98
2	996	16,12,8	451.02	544.98	2	1164	19,16,12,8	535.02	628.98
3	684	16,12,10	295.02	388.98	3	852	19,16,12,10	379.02	472.98
4	180	16	43.02	136.98	4	348	19,16	127.02	220.98
5	540	16,13	223.02	316.98	5	564	22,18	235.02	328.98
6	528	16,12	217.02	310.98	6	696	19,16,12	301.02	394.98
8	168	20	37.02	130.98	7	168	19	37.02	130.98
9	348	20,22	127.02	220.98	9	180	22	43.02	136.98
10	252	25	79.02	172.98	10	420	19,25	163.02	256.98
11	528	20,22,29	217.02	310.98	11	360	22,29	133.02	226.98
12	756	25,31	331.02	424.98	12	924	19,25,31	415.02	508.98
13	888	25,33,39	397.02	490.98	13	1056	19,25,33,39	481.02	574.98
14	636	25,33	271.02	364.98	14	804	19,25,33	355.02	448.98
15	696	20,22,29,35	301.02	394.98	15	528	22,29,35	217.02	310.98

(ค) โหนดที่ 9 - 12

โนด 9	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 10	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	1248	21,19,16,6	577.02	670.98	1	924	24,10,4	415.02	508.98
2	1344	21,19,16,12,8	625.02	718.98	2	828	24,8	367.02	460.98
3	1032	21,19,16,12,10	469.02	562.98	3	516	24,10	211.02	304.98
4	528	21,19,16	217.02	310.98	4	432	26,16	169.02	262.98
5	384	18	145.02	238.98	5	792	26,16,13	349.02	442.98
6	876	21,19,16,12	391.02	484.98	6	360	24	133.02	226.98
7	348	21,19	127.02	220.98	7	252	26	79.02	172.98
8	180	21	43.02	136.98	8	420	26,20	163.02	256.98
10	552	29,28	229.02	322.98	9	552	27,30	229.02	322.98
11	180	29	43.02	136.98	11	372	27	139.02	232.98
12	1056	29,28,31	481.02	574.98	12	504	31	205.02	298.98
13	924	29,35,41,39	415.02	508.98	13	636	33,39	271.02	364.98
14	672	29,35,41	289.02	382.98	14	384	33	145.02	238.98
15	348	29,35	127.02	220.98	15	540	27,35	223.02	316.98
โนด 11	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 12	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	1296	28,24,10,4	601.02	694.98	1	1428	32,24,10,4	667.02	760.98
2	1200	28,24,8	553.02	646.98	2	1332	32,24,8	619.02	712.98
3	888	28,24,10	397.02	490.98	3	1020	32,24,10	463.02	556.98
4	708	30,21,19,16	307.02	400.98	4	936	32,26,16	421.02	514.98
5	564	30,18	235.02	328.98	5	1296	32,26,16,13	601.02	694.98
6	732	28,24	319.02	412.98	6	864	32,24	385.02	478.98
7	528	30,21,19	217.02	310.98	7	756	32,26	331.02	424.98
8	360	30,21	133.02	226.98	8	924	32,26,20	415.02	508.98
9	180	30	43.02	136.98	9	1056	32,27,30	481.02	574.98
10	372	28	139.02	232.98	10	504	32	205.02	298.98
12	876	28,31	391.02	484.98	11	876	32,27	391.02	484.98
13	744	35,41,39	325.02	418.98	13	480	37	193.02	286.98
14	492	35,41	199.02	292.98	14	732	37,40	319.02	412.98
15	168	35	37.02	130.98	15	1044	32,27,35	475.02	568.98

(ง) โหนดที่ 13 - 15

โนด 13	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 14	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	1560	40,34,24,10,4	733.02	826.98	1	1308	34,24,10,4	607.02	700.98
2	1464	40,34,24,8	685.02	778.98	2	1212	34,24,8	559.02	652.98
3	1152	40,34,24,10	529.02	622.98	3	900	34,24,10	403.02	496.98
4	1068	40,34,26,16	487.02	580.98	4	816	34,26,16	361.02	454.98
5	1308	40,42,36,30,18	607.02	700.98	5	1056	42,36,30,18	481.02	574.98
6	996	40,34,24	451.02	544.98	6	744	34,24	325.02	418.98
7	888	40,34,26	397.02	490.98	7	636	34,26	271.02	364.98
8	1056	40,34,26,20	481.02	574.98	8	804	34,26,20	355.02	448.98
9	924	40,42,36,30	415.02	508.98	9	672	42,36,30	289.02	382.98
10	636	40,34	271.02	364.98	10	384	34	145.02	238.98
11	744	40,42,36	325.02	418.98	11	492	42,36	199.02	292.98
12	480	38	193.02	286.98	12	732	39,38	319.02	412.98
14	252	40	79.02	172.98	13	252	39	79.02	172.98
15	576	40,42	241.02	334.98	15	324	42	115.02	208.98
โนด 15	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R					
1	1464	36,28,24,10,4	685.02	778.98					
2	1368	36,28,24,8	637.02	730.98					
3	1056	36,28,24,10	481.02	574.98					
4	876	36,30,21,19,16	391.02	484.98					
5	732	36,30,18	319.02	412.98					
6	900	36,28,24	403.02	496.98					
7	696	36,30,21,19	301.02	394.98					
8	528	36,30,21	217.02	310.98					
9	348	36,30	127.02	220.98					
10	540	36,28	223.02	316.98					
11	168	36	37.02	130.98					
12	1044	36,28,31	475.02	568.98					
13	576	41,39	241.02	334.98					
14	324	41	115.02	208.98					

2. คำนวณหาค่า R ซึ่งจะเป็นตัวที่บอกว่าโครงข่ายนี้ต้องการลดขนาดโครงข่ายหรือไม่ จาก การคำนวณจากสมการ (3.7) จะได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า R ของโครงข่าย ERNet

โหนดต้นทาง-โหนดปลายทาง	ทราฟฟิก [km]	X_1 [km]	R	โหนดต้นทาง-โหนดปลายทาง	ทราฟฟิก[km]	X_1 [km]	R
1-9	1248	720	-2.04	9-2	1344	180	10.47
1-15	1464	408	6.90	9-12	1056	180	7.41
2-13	1464	468	5.62	10-1	924	360	2.17
3-13	1152	156	8.94	10-5	792	252	3.07
4-3	504	348	-2.04	10-9	552	372	-2.04
4-13	1068	180	7.54	10-13	636	384	-1.40
5-12	1296	360	6.13	11-1	1296	372	5.88
5-13	1308	384	5.75	11-4	708	180	3.70
6-9	876	348	1.92	11-13	744	168	4.34
6-13	996	360	2.94	12-1	1428	504	4.47
7-2	996	180	6.77	12-14	732	480	-2.43
7-13	888	252	4.09	13-1	1560	252	11.24
7-15	696	168	3.83	14-1	1308	384	5.75
8-2	1164	168	8.81	14-5	1056	324	4.34
8-5	564	180	2.17	15-1	1464	168	12.01

* ค่า X_1 คือ ความยาวของข่ายเชื่อมโยงแรกของทราฟฟิก

จากตารางที่ 4.2 จะสรุปได้ว่าค่า R ที่มากที่สุดคือ 12.01 หรือลดขนาดลงมา 12.01 เท่า จึงจะสามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้โดยไม่เกิดปัญหาดังหัวข้อ 3.2.2 ตารางที่ 4.3 เป็นตารางแสดงทราฟฟิกและตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงหลังจากลดขนาดโครงข่ายแล้ว ส่วนรูปที่ 4.3 เป็นภาพโครงข่าย ERNet ที่ลดขนาดโครงข่ายลงมา รูปที่ 4.4 เป็นวิธีการพิจารณาหาตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสง ซึ่งในแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะประกอบไปด้วยทราฟฟิกที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในโครงข่าย ซึ่งจะต้องดูรูปโครงข่ายประกอบในการพิจารณาด้วย

ตารางที่ 4.3 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่ายERNet (ลดขนาดโครงข่าย)

(ก) โหนดที่ 1 - 4

โหนด 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
2	27.98	336	1	-32.99	60.96	1	27.98	336	2	-32.99	60.96
3	33.97	408	3	-29.99	63.96	3	51.96	624	7,10	-21.00	72.95
4	59.95	720	5	-17.00	76.95	4	67.94	816	7,11	-13.00	80.95
5	89.93	1080	5,13	-2.01	91.94	5	97.92	1176	7,11,13	1.98	95.94
6	46.96	564	3,9	-23.50	70.46	6	38.97	468	7	-27.49	66.46
7	74.94	900	5,15	-9.51	84.44	7	82.93	996	7,11,15	-5.51	88.44
8	88.93	1068	5,15,20	-2.51	91.44	8	96.92	1164	7,11,15,20	1.48	95.44
9	103.91	1248	5,15,20,22	4.98	98.93	9	111.91	1344	7,11,15,20,22	8.98	102.93
10	76.94	924	3,9,23	-8.51	85.44	10	68.94	828	7,23	-12.50	81.45
11	107.91	1296	3,9,23,27	6.98	100.93	11	99.92	1200	7,23,27	2.98	96.93
12	118.90	1428	3,9,23,31	12.47	106.43	12	110.91	1332	7,23,31	8.48	102.43
13	129.89	1560	3,9,23,33,39	17.97	111.92	13	121.90	1464	7,23,33,39	13.97	107.93
14	108.91	1308	3,9,23,33	7.48	101.43	14	100.92	1212	7,23,33	3.48	97.43
15	121.90	1464	3,9,23,27,35	13.97	107.93	15	113.91	1368	7,23,27,35	9.98	103.93
โหนด 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	33.97	408	4	-29.99	63.96	1	59.95	720	6	-17.00	76.95
2	51.96	624	9,8	-21.00	72.95	2	67.94	816	12,8	-13.00	80.95
4	41.97	504	9,11	-25.99	67.96	3	41.97	504	12,10	-25.99	67.96
5	71.94	864	9,11,13	-11.01	82.95	5	29.98	360	13	-31.99	61.96
6	12.99	156	9	-40.48	53.47	6	28.98	348	12	-32.49	61.46
7	56.95	684	9,11,15	-18.50	75.45	7	14.99	180	15	-39.48	54.47
8	70.94	852	9,11,15,20	-11.51	82.45	8	28.98	348	15,20	-32.49	61.46
9	85.93	1032	9,11,15,20,22	-4.01	89.94	9	43.96	528	15,20,22	-24.99	68.96
10	42.96	516	9,23	-25.49	68.46	10	35.97	432	15,25	-28.99	64.96
11	73.94	888	9,23,27	-10.01	83.95	11	58.95	708	15,20,22,29	-17.50	76.45
12	84.93	1020	9,23,31	-4.51	89.44	12	77.94	936	15,25,31	-8.01	85.94
13	95.92	1152	9,23,33,39	0.98	94.94	13	88.93	1068	15,25,33,39	-2.51	91.44
14	74.94	900	9,23,33	-9.51	84.44	14	67.94	816	15,25,33	-13.00	80.95
15	87.93	1056	9,23,27,35	-3.01	90.94	15	72.94	876	15,20,22,29,35	-10.51	83.45

(ข) โหนดที่ 5 - 8

โนด 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	89.93	1080	14,6	-2.01	91.94	1	46.96	564	10,4	-23.50	70.46
2	97.92	1176	14,12,8	1.98	95.94	2	38.97	468	8	-27.49	66.46
3	71.94	864	14,12,10	-11.01	82.95	3	12.99	156	10	-40.48	53.47
4	29.98	360	14	-31.99	61.96	4	28.98	348	11	-32.49	61.46
6	58.95	708	14,12	-17.50	76.45	5	58.95	708	11,13	-17.50	76.45
7	44.96	540	14,15	-24.49	69.46	7	43.96	528	11,15	-24.99	68.96
8	46.96	564	17,21	-23.50	70.46	8	57.95	696	11,15,20	-18.00	75.95
9	31.97	384	17	-30.99	62.96	9	72.94	876	11,15,20,22	-10.51	83.45
10	65.95	792	14,15,25	-14.00	79.95	10	29.98	360	23	-31.99	61.96
11	46.96	564	17,29	-23.50	70.46	11	60.95	732	23,27	-16.50	77.45
12	107.91	1296	14,15,25,31	6.98	100.93	12	71.94	864	23,31	-11.01	82.95
13	108.91	1308	17,29,35,41,39	7.48	101.43	13	82.93	996	23,33,39	-5.51	88.44
14	87.93	1056	17,29,35,41	-3.01	90.94	14	61.95	744	23,33	-16.00	77.95
15	60.95	732	17,29,35	-16.50	77.45	15	74.94	900	23,27,35	-9.51	84.44
โนด 7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	74.94	900	16,6	-9.51	84.44	1	88.93	1068	19,16,6	-2.51	91.44
2	82.93	996	16,12,8	-5.51	88.44	2	96.92	1164	19,16,12,8	1.48	95.44
3	56.95	684	16,12,10	-18.50	75.45	3	70.94	852	19,16,12,10	-11.51	82.45
4	14.99	180	16	-39.48	54.47	4	28.98	348	19,16	-32.49	61.46
5	44.96	540	16,13	-24.49	69.46	5	46.96	564	22,18	-23.50	70.46
6	43.96	528	16,12	-24.99	68.96	6	57.95	696	19,16,12	-18.00	75.95
8	13.99	168	20	-39.98	53.97	7	13.99	168	19	-39.98	53.97
9	28.98	348	20,22	-32.49	61.46	9	14.99	180	22	-39.48	54.47
10	20.98	252	25	-36.48	57.47	10	34.97	420	19,25	-29.49	64.46
11	43.96	528	20,22,29	-24.99	68.96	11	29.98	360	22,29	-31.99	61.96
12	62.95	756	25,31	-15.50	78.45	12	76.94	924	19,25,31	-8.51	85.44
13	73.94	888	25,33,39	-10.01	83.95	13	87.93	1056	19,25,33,39	-3.01	90.94
14	52.96	636	25,33	-20.50	73.45	14	66.94	804	19,25,33	-13.50	80.45
15	57.95	696	20,22,29,35	-18.00	75.95	15	43.96	528	22,29,35	-24.99	68.96

(ค) โหนดที่ 9 - 12

โนด 9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	103.91	1248	21,19,16,6	4.98	98.93	1	76.94	924	24,10,4	-8.51	85.44
2	111.91	1344	21,19,16,12,8	8.98	102.93	2	68.94	828	24,8	-12.50	81.45
3	85.93	1032	21,19,16,12,10	-4.01	89.94	3	42.96	516	24,10	-25.49	68.46
4	43.96	528	21,19,16	-24.99	68.96	4	35.97	432	26,16	-28.99	64.96
5	31.97	384	18	-30.99	62.96	5	65.95	792	26,16,13	-14.00	79.95
6	72.94	876	21,19,16,12	-10.51	83.45	6	29.98	360	24	-31.99	61.96
7	28.98	348	21,19	-32.49	61.46	7	20.98	252	26	-36.48	57.47
8	14.99	180	21	-39.48	54.47	8	34.97	420	26,20	-29.49	64.46
10	45.96	552	29,28	-24.00	69.96	9	45.96	552	27,30	-24.00	69.96
11	14.99	180	29	-39.48	54.47	11	30.97	372	27	-31.49	62.46
12	87.93	1056	29,28,31	-3.01	90.94	12	41.97	504	31	-25.99	67.96
13	76.94	924	29,35,41,39	-8.51	85.44	13	52.96	636	33,39	-20.50	73.45
14	55.95	672	29,35,41	-19.00	74.95	14	31.97	384	33	-30.99	62.96
15	28.98	348	29,35	-32.49	61.46	15	44.96	540	27,35	-24.49	69.46
โนด 11	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 12	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	107.91	1296	28,24,10,4	6.98	100.93	1	118.90	1428	32,24,10,4	12.47	106.43
2	99.92	1200	28,24,8	2.98	96.93	2	110.91	1332	32,24,8	8.48	102.43
3	73.94	888	28,24,10	-10.01	83.95	3	84.93	1020	32,24,10	-4.51	89.44
4	58.95	708	30,21,19,16	-17.50	76.45	4	77.94	936	32,26,16	-8.01	85.94
5	46.96	564	30,18	-23.50	70.46	5	107.91	1296	32,26,16,13	6.98	100.93
6	60.95	732	28,24	-16.50	77.45	6	71.94	864	32,24	-11.01	82.95
7	43.96	528	30,21,19	-24.99	68.96	7	62.95	756	32,26	-15.50	78.45
8	29.98	360	30,21	-31.99	61.96	8	76.94	924	32,26,20	-8.51	85.44
9	14.99	180	30	-39.48	54.47	9	87.93	1056	32,27,30	-3.01	90.94
10	30.97	372	28	-31.49	62.46	10	41.97	504	32	-25.99	67.96
12	72.94	876	28,31	-10.51	83.45	11	72.94	876	32,27	-10.51	83.45
13	61.95	744	35,41,39	-16.00	77.95	13	39.97	480	37	-26.99	66.96
14	40.97	492	35,41	-26.49	67.46	14	60.95	732	37,40	-16.50	77.45
15	13.99	168	35	-39.98	53.97	15	86.93	1044	32,27,35	-3.51	90.44

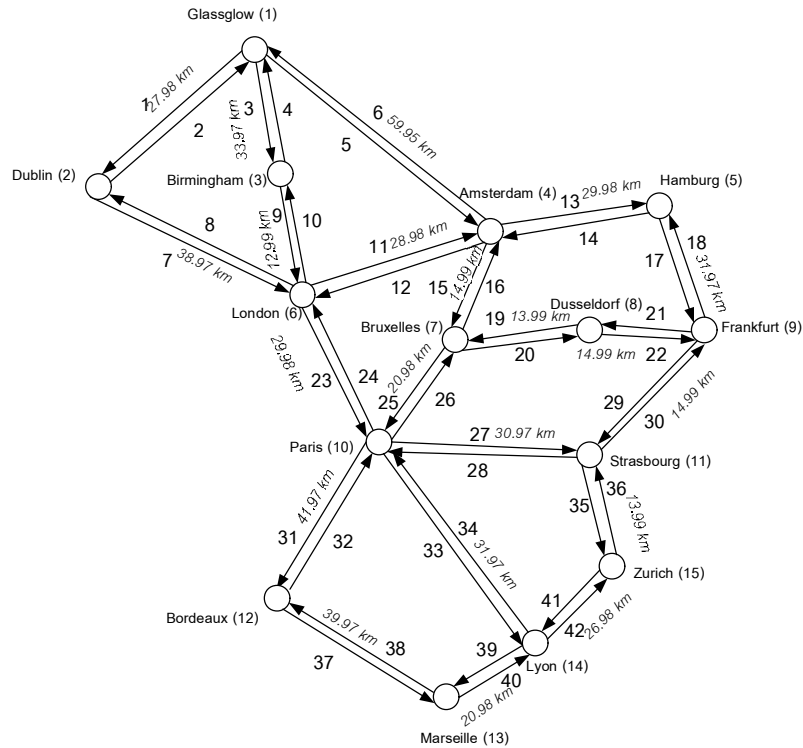
(ง) โหนดที่ 13 - 15

โหนด 13	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 14	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	129.89	1560	40,34,24,10,4	17.97	111.92	1	108.91	1308	34,24,10,4	7.48	101.43
2	121.90	1464	40,34,24,8	13.97	107.93	2	100.92	1212	34,24,8	3.48	97.43
3	95.92	1152	40,34,24,10	0.98	94.94	3	74.94	900	34,24,10	-9.51	84.44
4	88.93	1068	40,34,26,16	-2.51	91.44	4	67.94	816	34,26,16	-13.00	80.95
5	108.91	1308	40,42,36,30,18	7.48	101.43	5	87.93	1056	42,36,30,18	-3.01	90.94
6	82.93	996	40,34,24	-5.51	88.44	6	61.95	744	34,24	-16.00	77.95
7	73.94	888	40,34,26	-10.01	83.95	7	52.96	636	34,26	-20.50	73.45
8	87.93	1056	40,34,26,20	-3.01	90.94	8	66.94	804	34,26,20	-13.50	80.45
9	76.94	924	40,42,36,30	-8.51	85.44	9	55.95	672	42,36,30	-19.00	74.95
10	52.96	636	40,34	-20.50	73.45	10	31.97	384	34	-30.99	62.96
11	61.95	744	40,42,36	-16.00	77.95	11	40.97	492	42,36	-26.49	67.46
12	39.97	480	38	-26.99	66.96	12	60.95	732	39,38	-16.50	77.45
14	20.98	252	40	-36.48	57.47	13	20.98	252	39	-36.48	57.47
15	47.96	576	40,42	-23.00	70.96	15	26.98	324	42	-33.49	60.46
โหนด 15	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R						
1	121.90	1464	36,28,24,10,4	13.97	107.93						
2	113.91	1368	36,28,24,8	9.98	103.93						
3	87.93	1056	36,28,24,10	-3.01	90.94						
4	72.94	876	36,30,21,19,16	-10.51	83.45						
5	60.95	732	36,30,18	-16.50	77.45						
6	74.94	900	36,28,24	-9.51	84.44						
7	57.95	696	36,30,21,19	-18.00	75.95						
8	43.96	528	36,30,21	-24.99	68.96						
9	28.98	348	36,30	-32.49	61.46						
10	44.96	540	36,28	-24.49	69.46						
11	13.99	168	36	-39.98	53.97						
12	86.93	1044	36,28,31	-3.51	90.44						
13	47.96	576	41,39	-23.00	70.96						
14	26.98	324	41	-33.49	60.46						

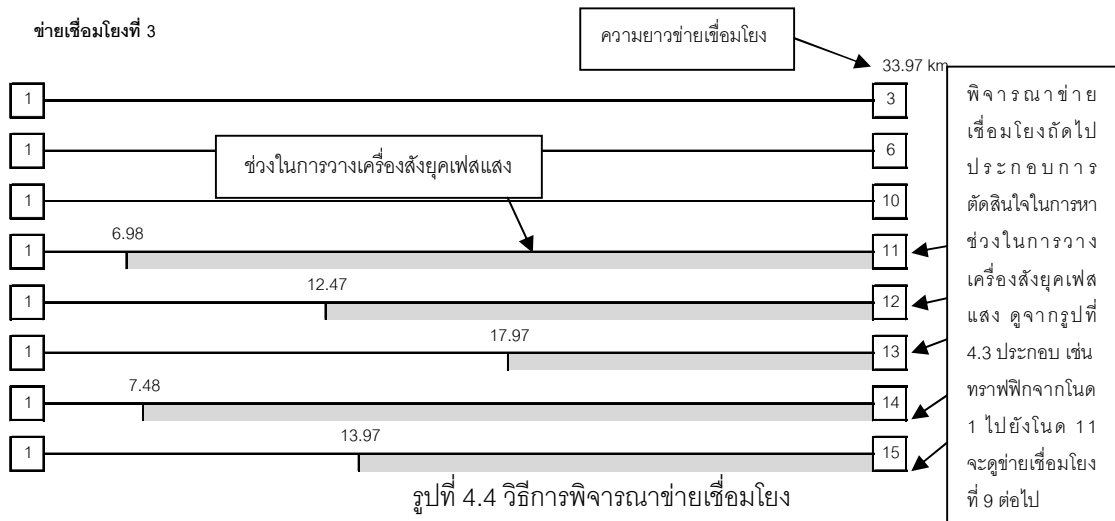
ค่าที่อยู่ในตารางในช่อง OPC_L และ OPC_R ที่เป็นสีเทาเช่น ทราฟฟิกจากโหนด 15 ไปยัง โหนด 3 นั้น ค่าในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงจะอยู่ในช่วงนอกความยาวทราฟฟิก หมายถึงช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้นวางตรงไหนก็ได้ตลอดทราฟฟิก หรือในอีกความหมายก็คือ ทราฟฟิกนั้นไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสง เพราะ ระยะทางที่มากที่สุดที่จะต้องใส่เครื่องส่งยุคเฟสแสงแล้วดีสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางไม่เกิน 1600 ps/nm ก็คือ

$$\frac{1600}{17.03} = 93.95 \text{ km} \quad (4.2)$$

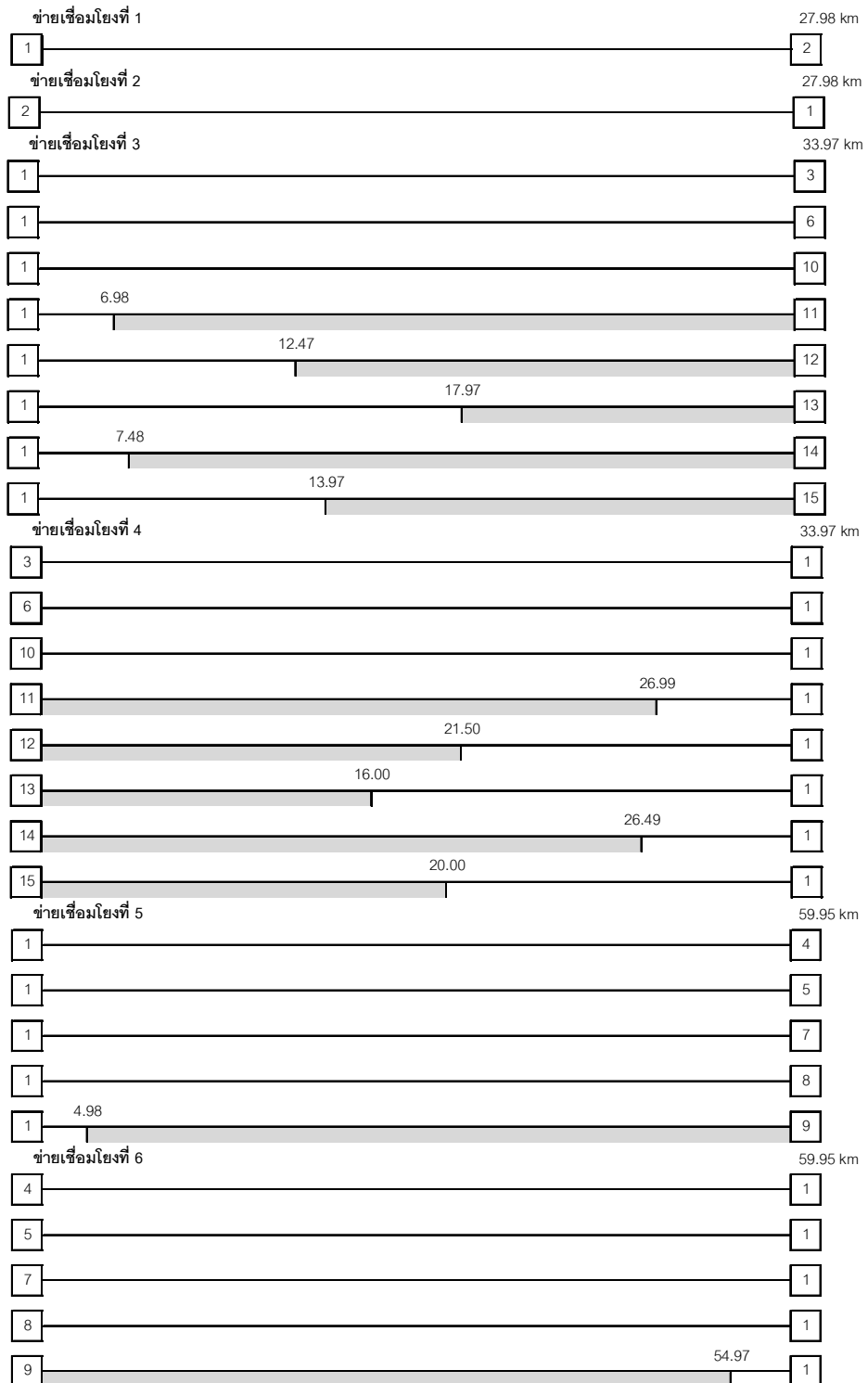
ดังนั้นถ้ากราฟฟิกไหนมีระยะทางไม่เกิน 93.95 km ก็แสดงว่าไม่จำเป็นต้องมีเครื่องส่งยุคเฟสแสงก็ได้ ในรูปที่ 4.5 จะไม่แสดงช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่กราฟฟิกระยะทางไม่เกิน 93.95 km เพื่อสะดวกในการคำนวณหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง และใช้วิธีพิจารณาเช่นเดียวกับบทที่ 3



รูปที่ 4.3 โครงข่าย ERMNet ที่ได้รับการลดขนาดลงมา 12.01 เท่า

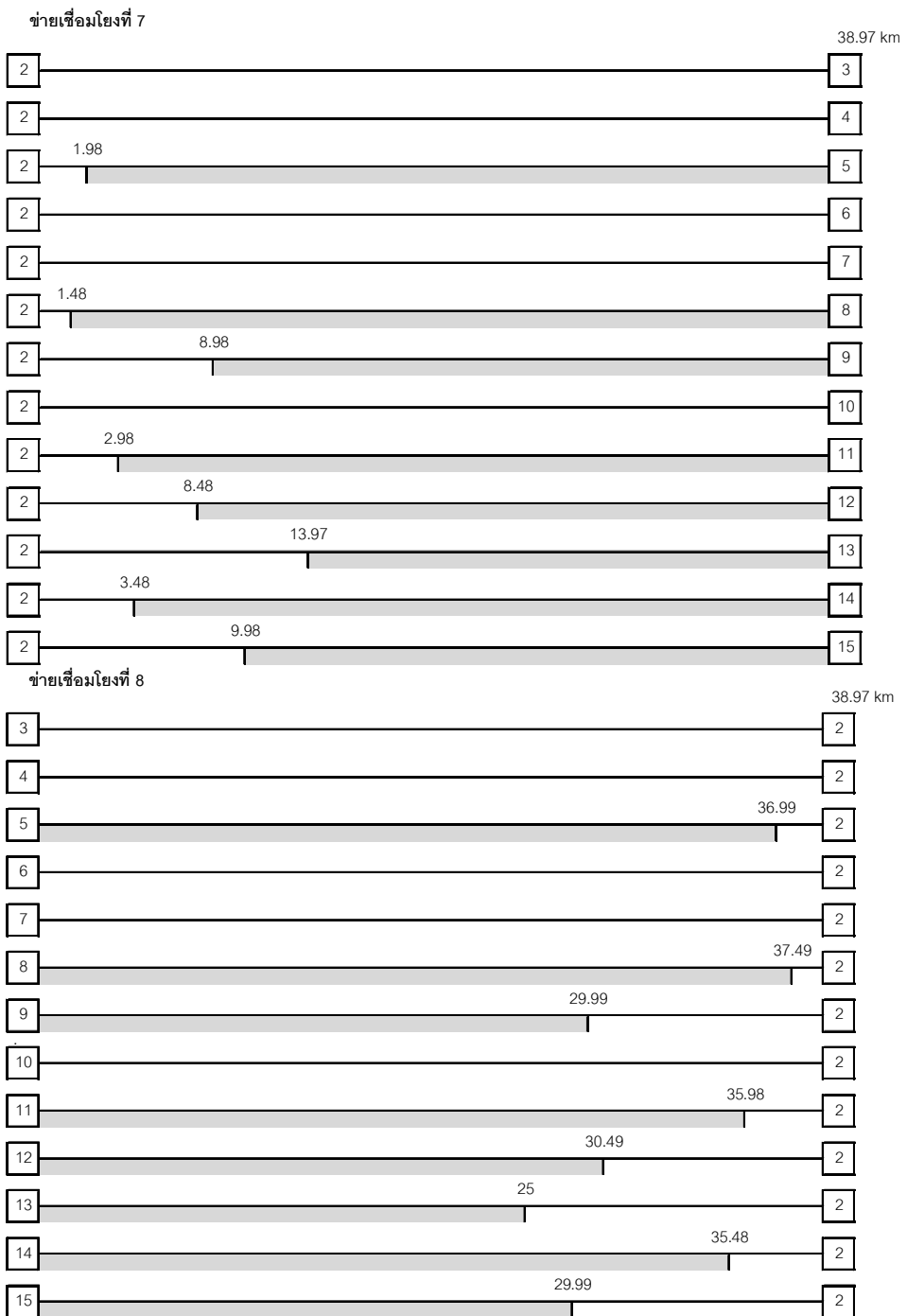


รูปที่ 4.4 วิธีการพิจารณาข่ายเชื่อมโยง

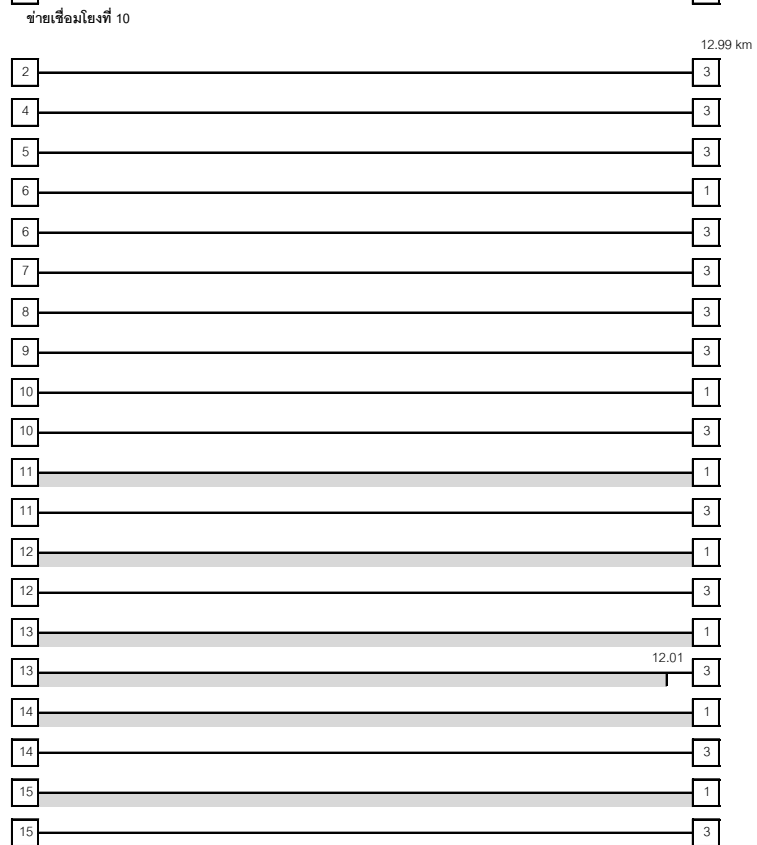
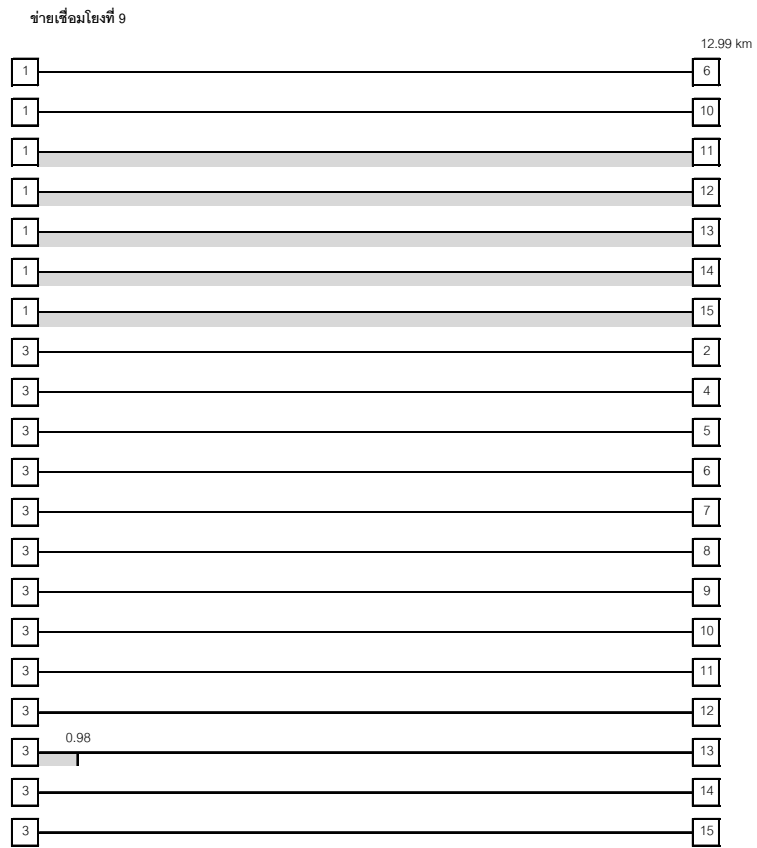


(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 1-6

รูปที่ 4.5 ทราฟฟิกและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่าย ERNet



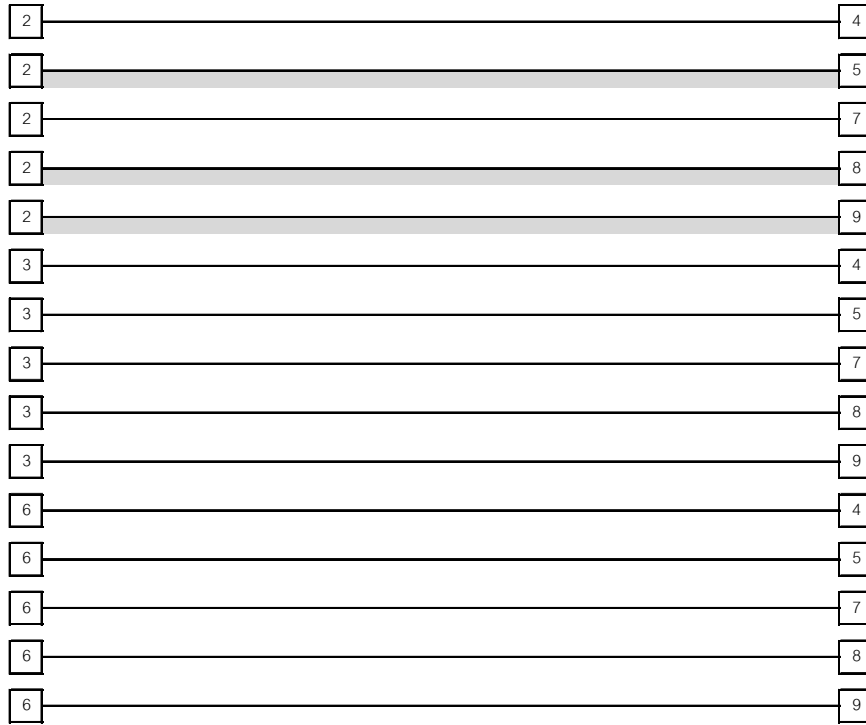
(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 7-8



(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 9-10

ข่ายเชื่อมโยงที่ 11

28.98 km

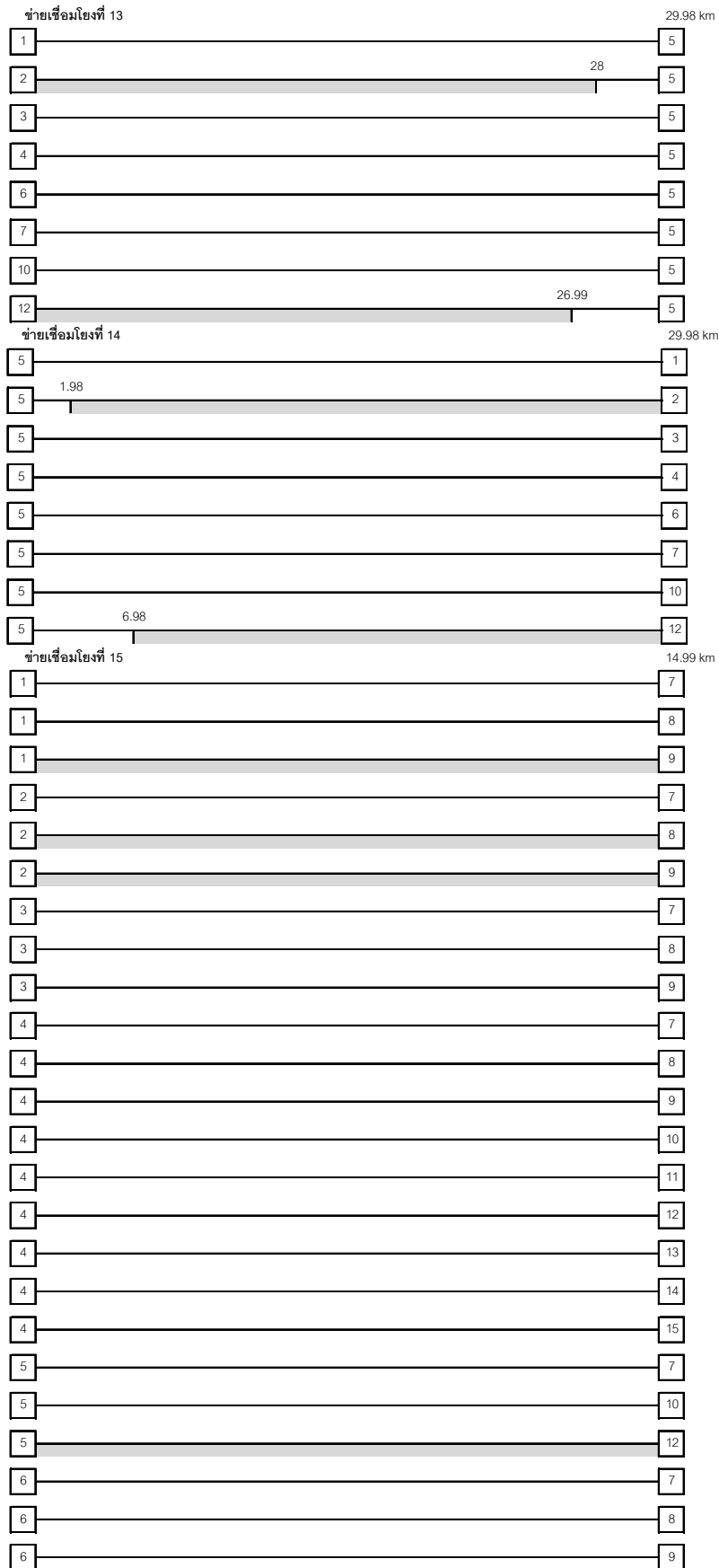


ข่ายเชื่อมโยงที่ 12

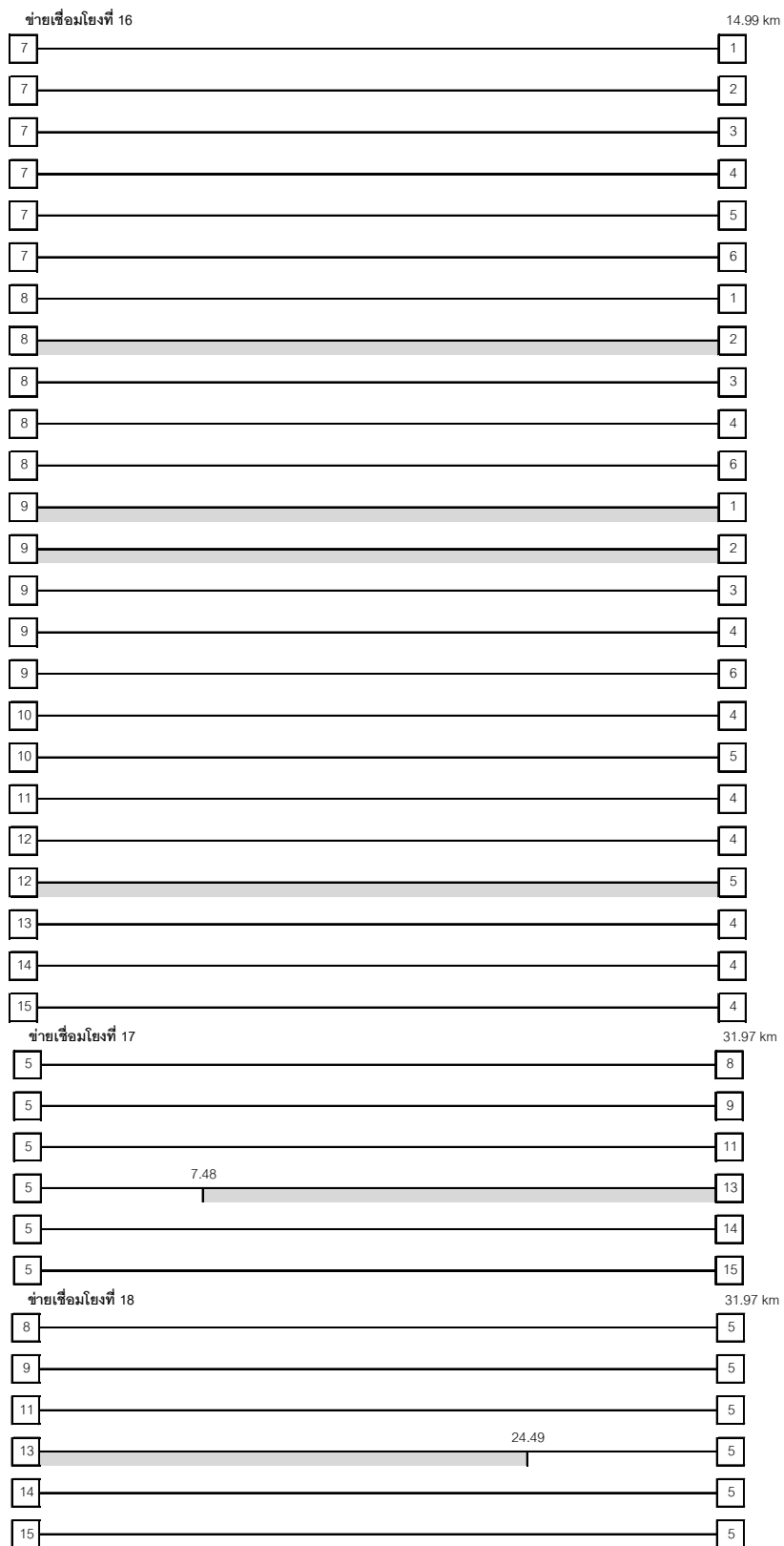
28.98 km



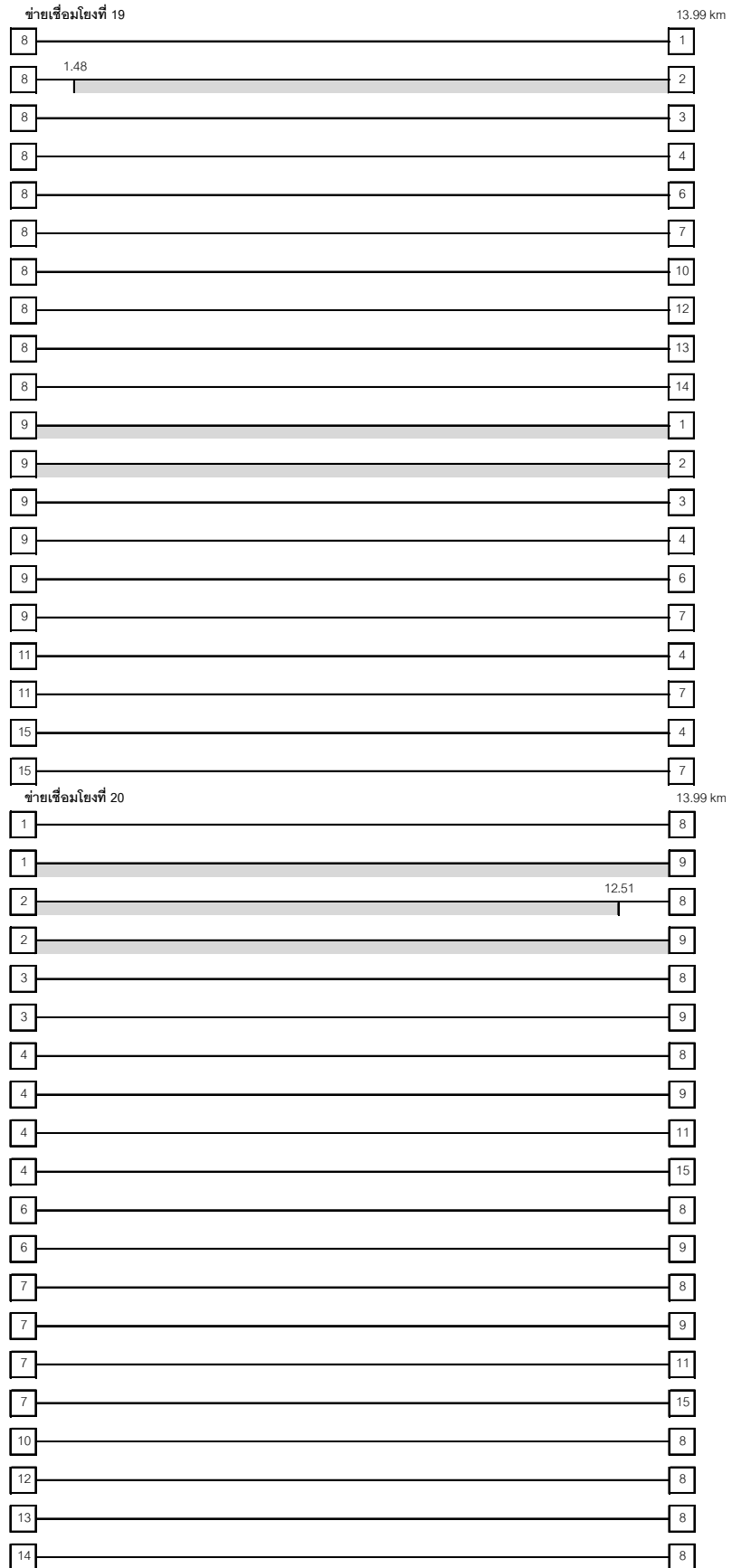
(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 11-12



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13-15

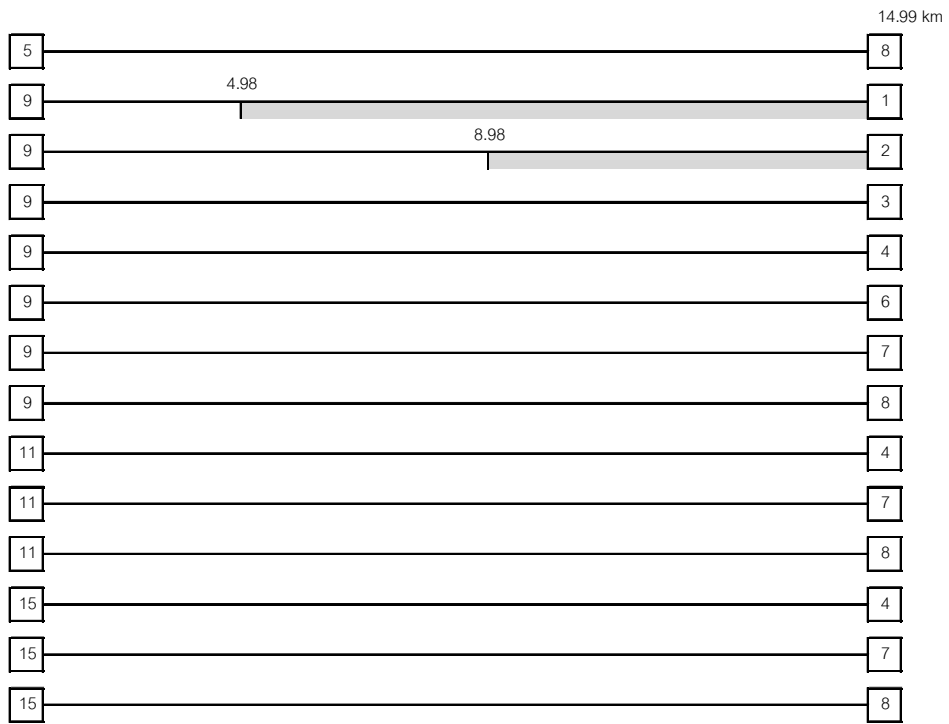


(จ) ข้ายเชื่อมโยงที่ 16-18

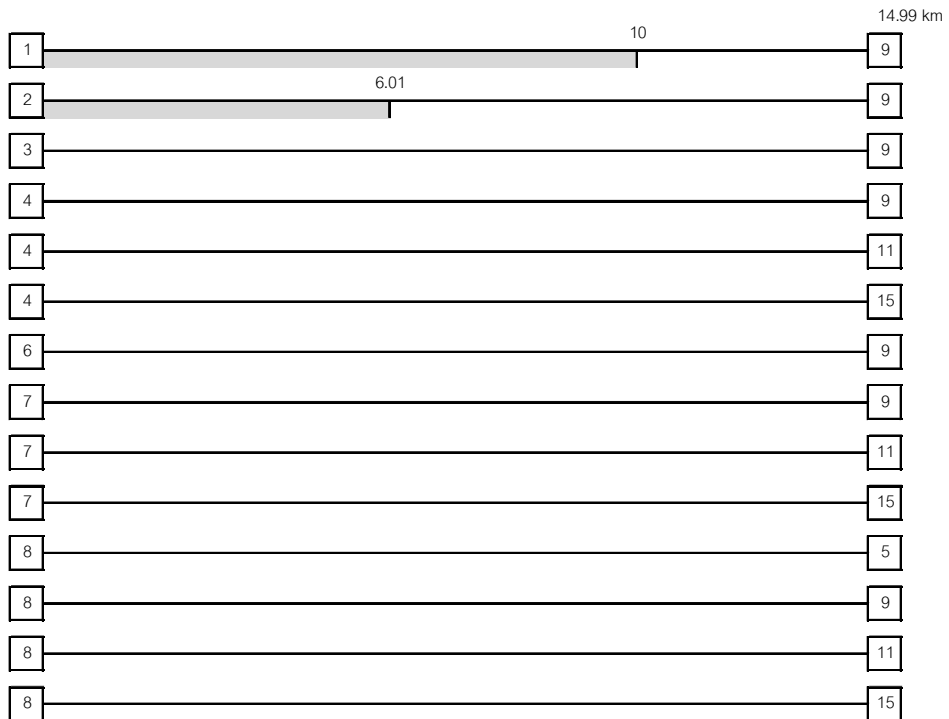


(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 19-20

ข่ายเชื่อมโยงที่ 21



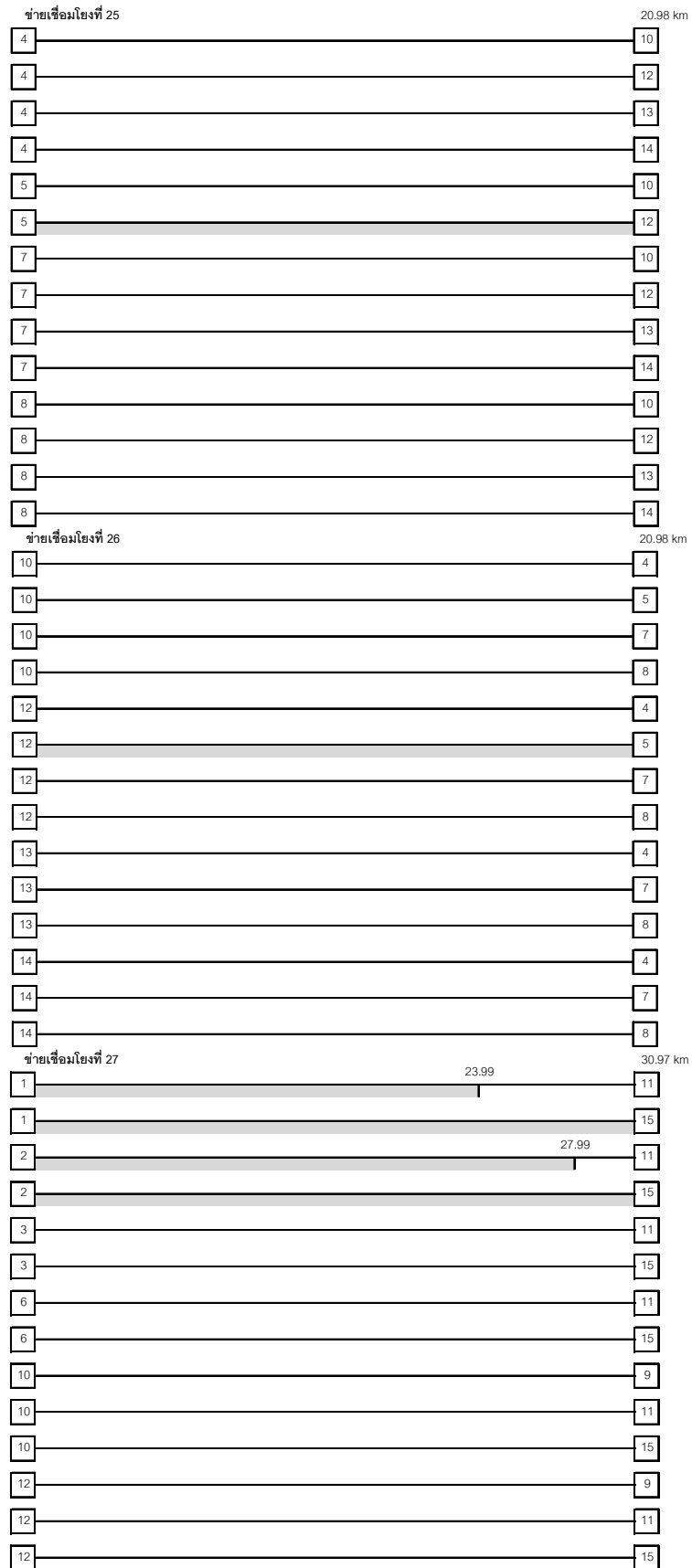
ข่ายเชื่อมโยงที่ 22



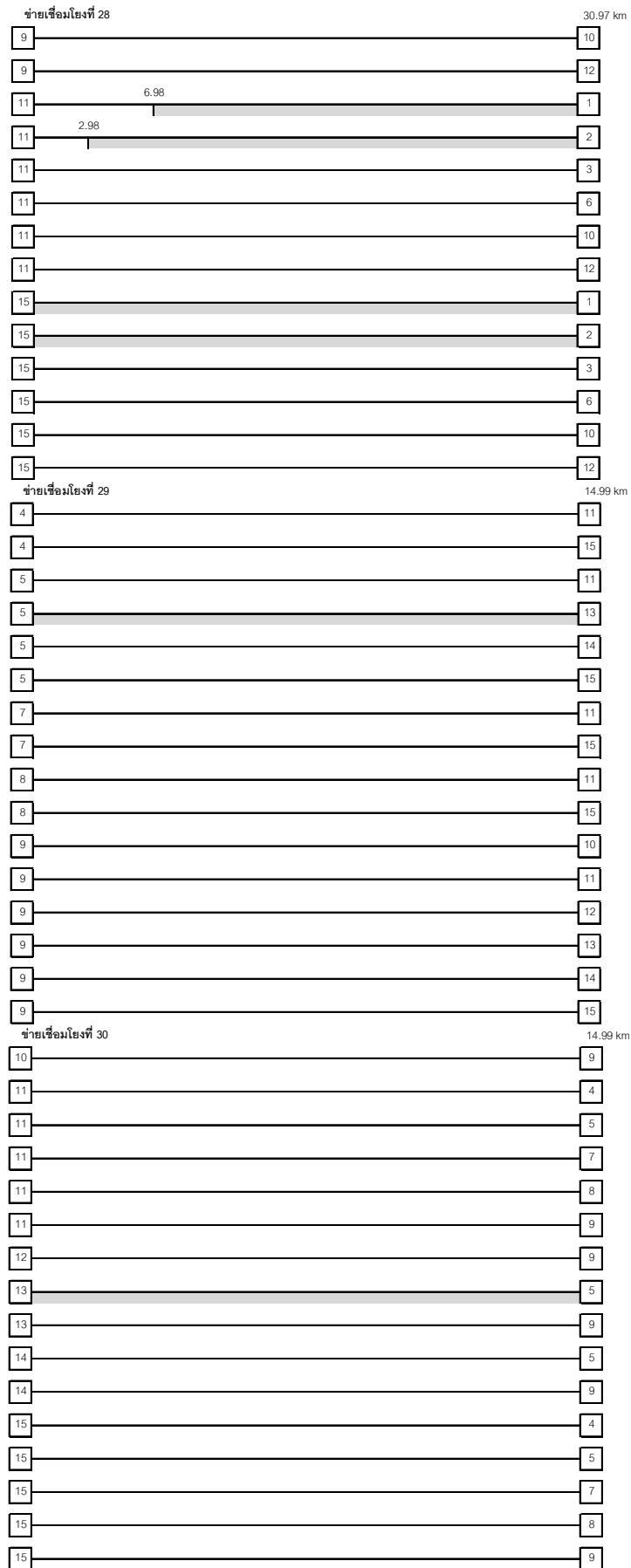
(๗) ข่ายเชื่อมโยงที่ 21-22

ข่ายเชื่อมโยงที่ 23		29.98 km
1		10
1		11
1		12
1		13
1		14
1		15
2		10
2		11
2		12
2		13
2		14
2		15
3		10
3		11
3		12
3		13
3		14
3		15
6		10
6		11
6		12
6		13
6		14
6		15
ข่ายเชื่อมโยงที่ 24		29.98 km
10		1
10		2
10		3
10		6
11		1
11		2
11		3
11		6
12		1
12		2
12		3
12		6
13		1
13		2
13		3
13		6
14		1
14		2
14		3
14		6
15		1
15		2
15		3
15		6

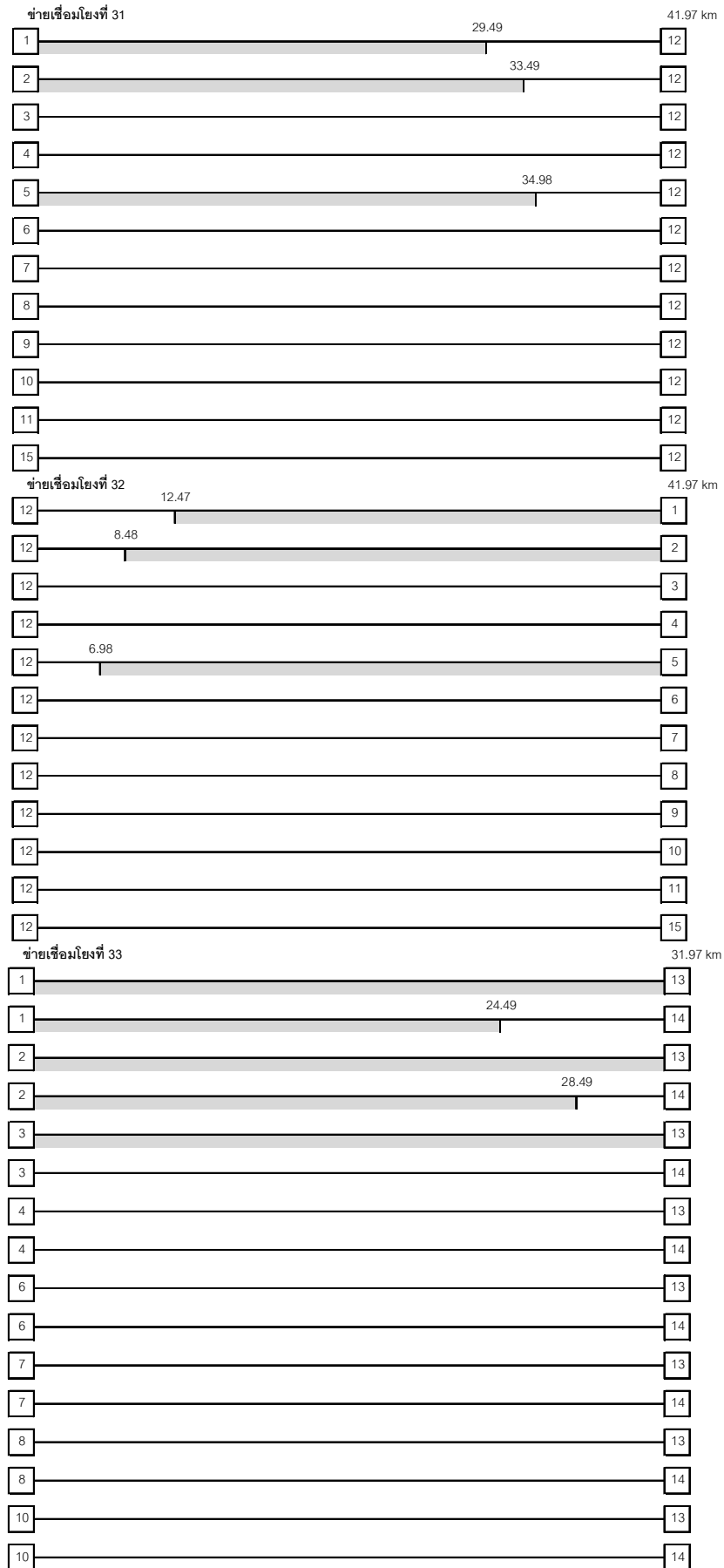
(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 23-24



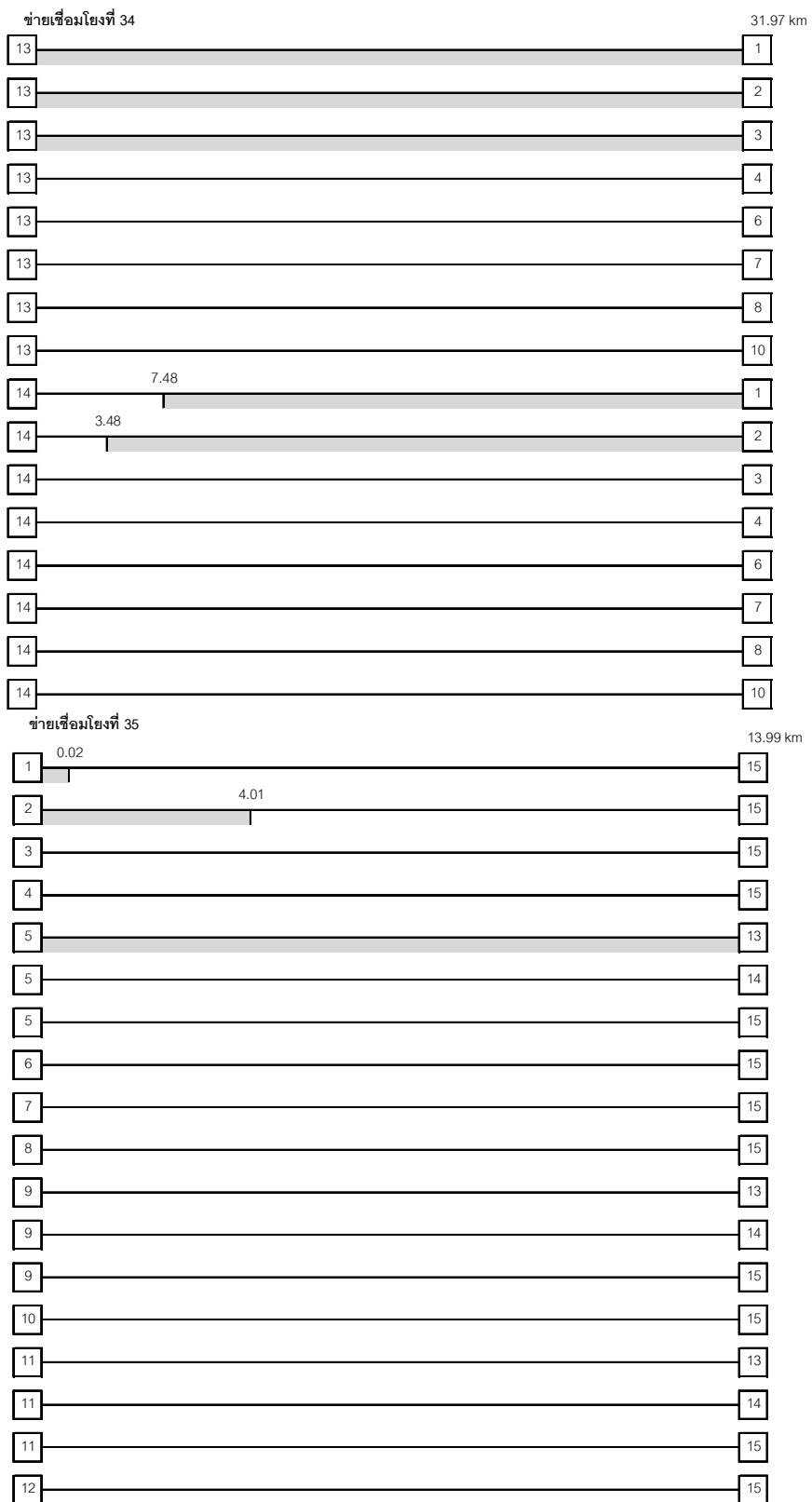
(ญ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 25-27



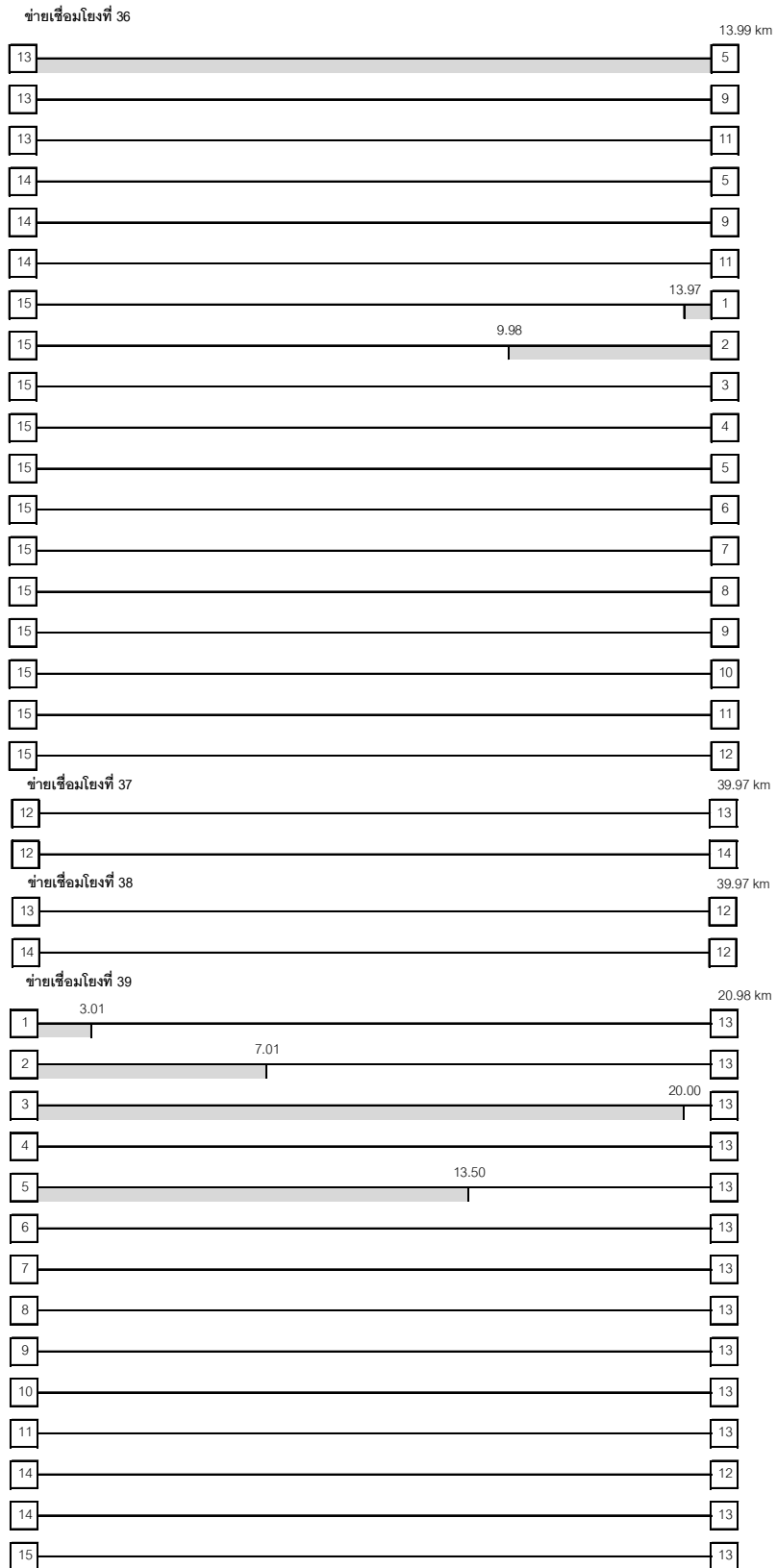
(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 28-30



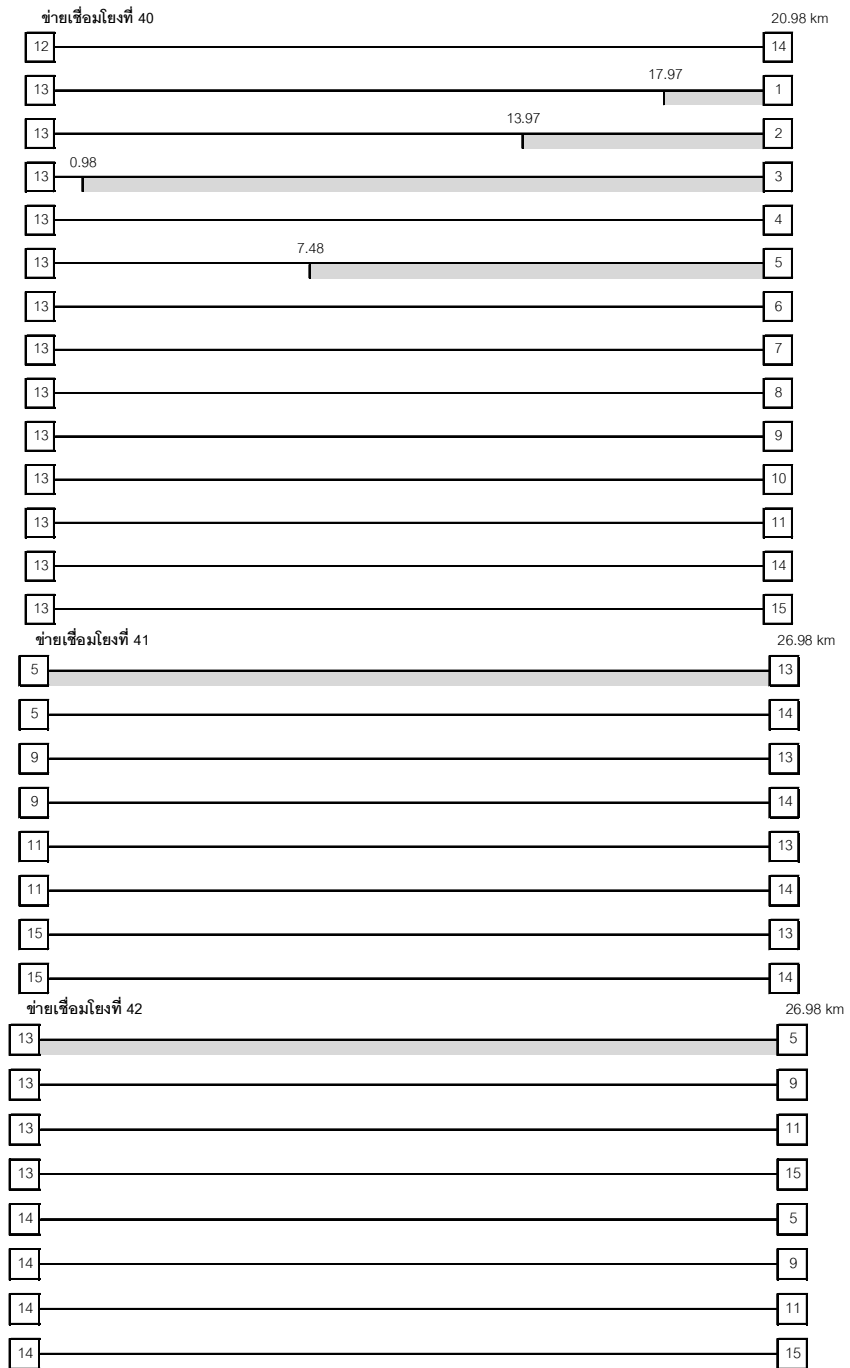
(ฎ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 31-33



(รูป) ข่ายเชื่อมโยงที่ 34-35



(๓) ข่ายเชื่อมโยงที่ 36-39



(ตม) ข่ายเชื่อมโยงที่ 37-42

3. พิจารณาหาตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง จากรูปที่ 4.5(ก)-(ค) และตารางที่ 4.3 จะนำมาพิจารณาหาตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ โดยจะพิจารณาเป็นขั้นๆ ดังนี้

1. หาจำนวนทราฟฟิกในแต่ละข่ายเชื่อมโยง ดูว่าข่ายไหนมีจำนวนทราฟฟิก (แถบสีเทา) มากที่สุด พิจารณาข่ายเชื่อมโยงนั้นเป็นอันดับแรก ในที่นี้ก็คือข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 มีทั้งหมด 11 ทราฟฟิก

2. หาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงจากข่ายเชื่อมโยงที่หาได้จากข้อ 1. จากรูปที่ 4.5(ข) จะได้ตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงจากการซ้อนทับ เท่ากับ 0 – 29.98 km

3. ให้ตัดทราฟฟิกที่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาในข้อ 1. และข้อ 2. ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 จะเชื่อมโยงกับข่ายเชื่อมโยงที่ 3 (5ทราฟฟิก) 7 (8 ทราฟฟิก) 9 (6 ทราฟฟิก) 27 (4 ทราฟฟิก) 31 (3 ทราฟฟิก) 33 (5 ทราฟฟิก) 35 (3 ทราฟฟิก) 39 (4 ทราฟฟิก) หลังจากตัดทราฟฟิกที่เกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 23 แล้ว แต่ละข่ายจะเหลือทราฟฟิกที่ต้องพิจารณาต่อไป ดังนี้

ข่ายเชื่อมโยงที่ 3 เหลือทราฟฟิก = $5 - 5 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 7 เหลือทราฟฟิก = $8 - 5 = 3$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 9 เหลือทราฟฟิก = $6 - 6 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 27 เหลือทราฟฟิก = $4 - 4 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 31 เหลือทราฟฟิก = $3 - 2 = 1$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 33 เหลือทราฟฟิก = $5 - 5 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 35 เหลือทราฟฟิก = $3 - 2 = 1$ ทราฟฟิก

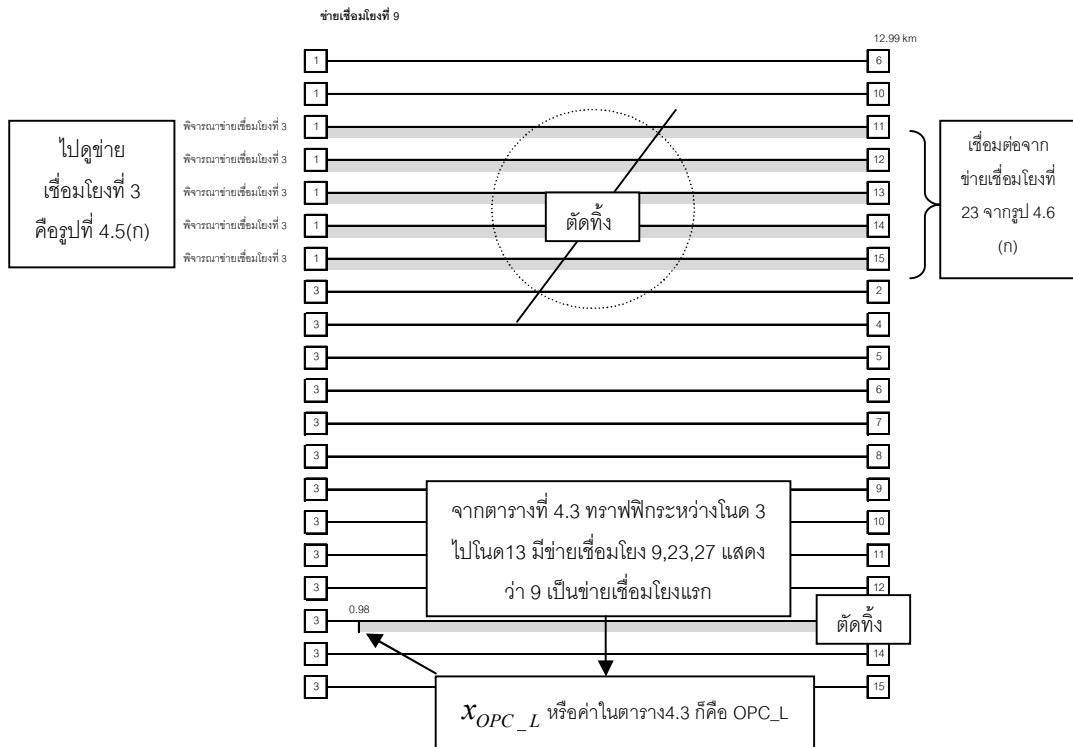
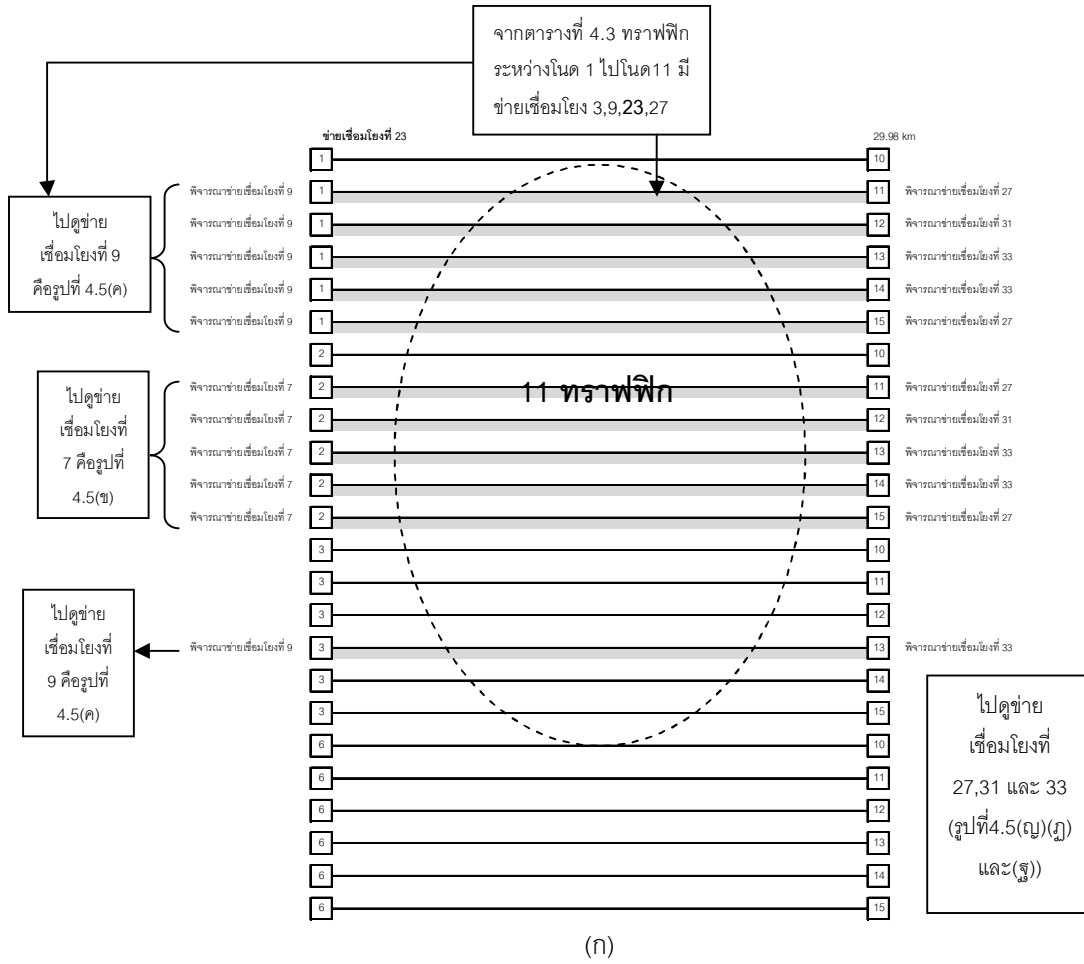
ข่ายเชื่อมโยงที่ 39 เหลือทราฟฟิก = $4 - 3 = 1$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ยังเหลือทราฟฟิก จะนำไปพิจารณาต่อไป ให้ทำเช่นเดียวกันกับข่ายเชื่อมโยงที่ 24 จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 ประกอบ

4. หลังจากทำข้อ 3. เสร็จแล้ว ให้พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกเหลือมากที่สุดข่ายต่อไป และทำซ้ำข้อ 1. ถึงข้อ 3. ซึ่งก็คือข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16

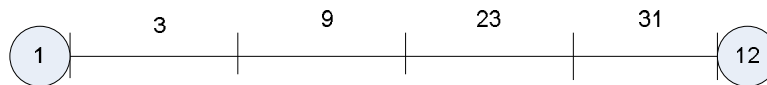
5. ถ้าเหลือทราฟฟิกเท่ากันในทุกข่ายเชื่อมโยงที่เหลือ ให้พิจารณาโดยยึดหลักที่ว่า

5.1 พิจารณาทราฟฟิกที่ยังไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแต่ยังมีผลจากดิสเพอร์ชัน ซึ่งก็คือ ทราฟฟิกที่ไม่ได้มีข่ายเชื่อมโยงที่ 23 ข่ายเชื่อมโยงที่ 24 ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และข่ายเชื่อมโยงที่ 16 โดยตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ได้มาคือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 (0-29.98 km) ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16 (0 -14.99 km) ให้เอาผลที่ได้ไปดูในตารางที่ 4.3 แล้ว ดูว่า ทราฟฟิกไหนที่ไม่มีข่ายเชื่อมโยงที่ 15 16 23 และ 24 ประกอบ ให้พิจารณาข่ายนั้น ใน



รูปที่ 4.6 วิธีการคิดช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแอส

โนด 1	ข่ายเชื่อมโยง [km]
12	3,9,23,31



รูปที่ 4.7 วิธีการดูข่ายเชื่อมโยงในตาราง

ที่นี้ก็คือทราฟฟิกจากโนด 2 ไปโนด 5 โนด 5 ไปโนด 2 โนด 5 ไปโนด 13 และ โนด 13 ไปโนด 5

5.2 พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่ยังไม่ได้ทำการตัดทิ้งจากข้อ 1-4 ซึ่งในที่นี้ก็คือข่ายเชื่อมโยงที่ 29 30 41 และ 42 เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมเกินขีดจำกัดดังรูปที่ 4.8 นั่นคือถ้าวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง 2 ตัว ระยะทางในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไม่ควรใกล้เกินไป ดังนั้นเราควรจะให้มีเครื่องส่งยุคเฟสแสง 1 ตัวต่อ 1 ทราฟฟิก หรือไม่ก็ให้มีระยะห่างที่พอสมควร เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดปัญหาเช่นนี้ขึ้น

5.3 เลือกข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกที่ไม่มีทราฟฟิกที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไปแล้ว ซึ่งก็คือข่ายเชื่อมโยงที่ 41 และ 42 ทำตามข้อ 3.

5.4 ถ้ายังเหลือทราฟฟิกให้พิจารณา ให้ทำตามข้อ 5.3 ซึ่งก็คือข่ายเชื่อมโยงที่ 13 และ 14

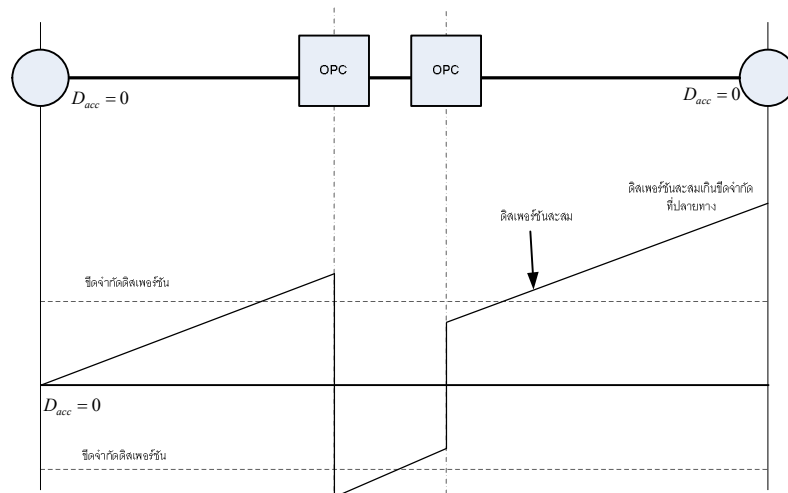
6. พิจารณาว่าตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่มีตำแหน่งเริ่มต้นเท่ากับศูนย์(ที่โนด) ให้ดูว่าเป็นข่ายเชื่อมโยงที่เริ่มต้นของทราฟฟิกหรือไม่ โดยดูจากตารางที่ 4.3 ประกอบ ถ้าเป็น ให้ปรับตำแหน่งจากศูนย์มายังตำแหน่งที่ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันไม่เกินปลายทาง ในที่นี้ก็คือทราฟฟิกจากโนด 5 ไปยัง โนด 2 ซึ่งมีตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ 0- 29.98 km (ข่ายเชื่อมโยงที่ 14) แต่ที่ปลายทางนั้นจะมีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ $17.03(97.92) = 1667.58$ ps/km/nm ดังนั้นเราจะปรับตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงใหม่จาก 0- 29.98 km เป็น 1.98-29.98 km ซึ่งจะได้ค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 1600 ps/km/nm พอดี

จากหลักการพิจารณา 6 ข้อดังกล่าวจะได้ตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงดังนี้

- ข่ายเชื่อมโยงที่ 13 (0 -29.98 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 14 (1.98 -29.98 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16 (0 -14.99 km)

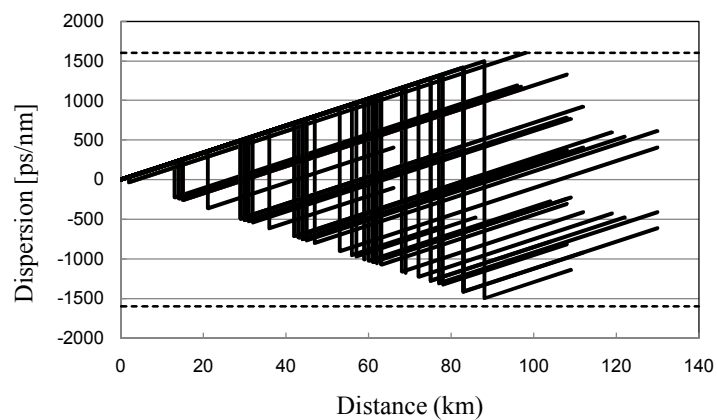
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 (0-29.98 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 41 และ 42 (0-26.98 km)

รูปที่ 4.10 เป็นแผนภาพผังงาน(flowchart diagram) ของการหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

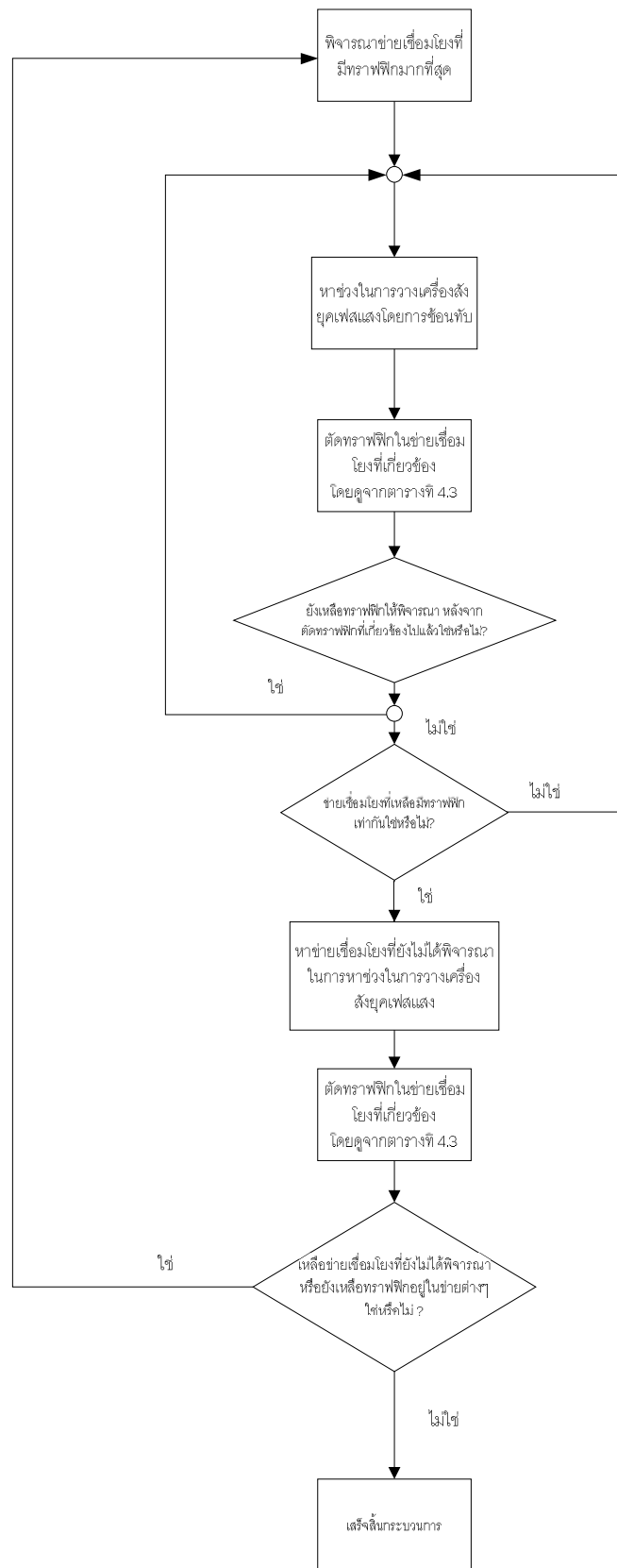


รูปที่ 4.8 ปัญหาระยะทางในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงใกล้เกินไป

4. ตรวจสอบผลจากการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง รูปที่ 4.9 เป็นการตรวจสอบดิสเพอร์ชันสะสมหลังจากวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง โดยใช้สมการที่ (3.1) และ (3.9) ในการคำนวณหาดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิก

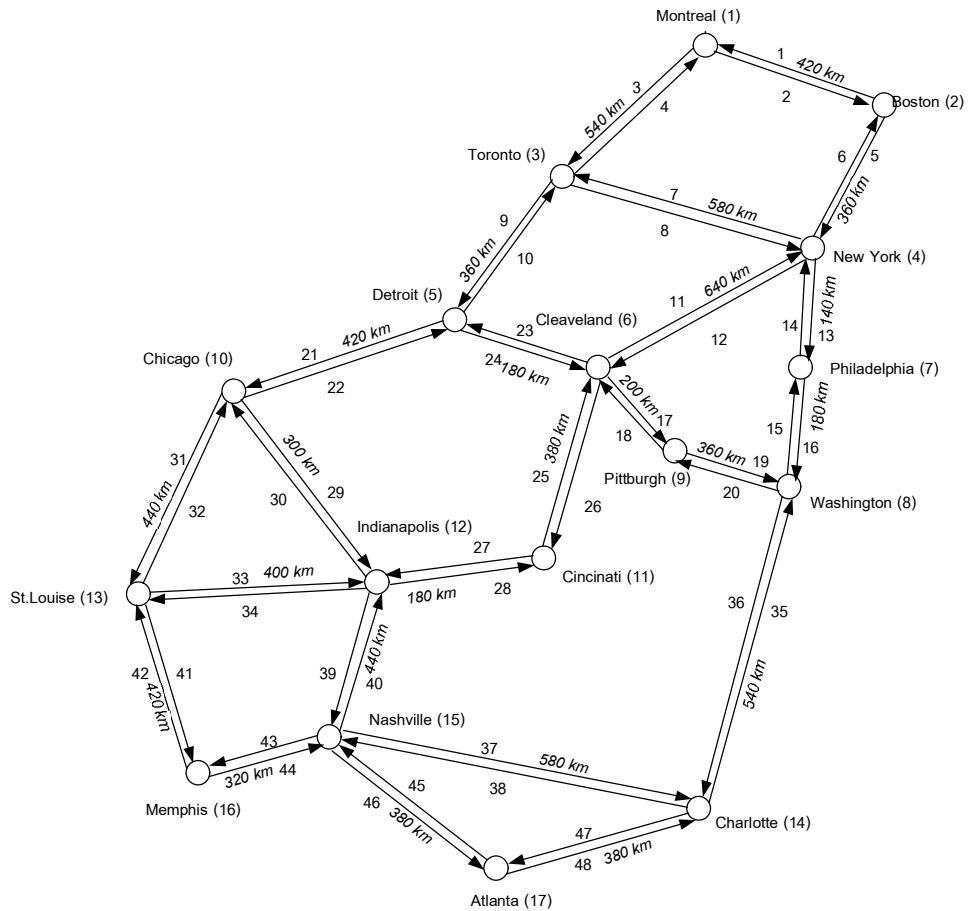


รูปที่ 4.9 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่ายERNet



รูปที่ 4.10 แผนภาพผังงานของการหาช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง

ตัวอย่างที่ 2 โครงข่าย NARNet (North-American Reference Network) ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 โครงข่าย NARNet

- 1.หาเส้นทางที่สั้นที่สุดและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแอสได้ผลตามตารางที่ 4.4
- 2.หาค่า R และลดขนาดโครงข่าย ตารางที่ 4.5 แสดงผลการหาค่า R จากโครงข่าย NARNet ซึ่งสรุปได้ว่า ค่า R ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 15.75 ซึ่งก็คือลดขนาดโครงข่ายลงมา 15.75 เท่า ตารางที่ 4.6 แสดงกราฟฟิกและตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแอสหลังจากลดขนาดโครงข่ายแล้ว ส่วนรูปที่ 4.12 เป็นรูปโครงข่าย NARNet ที่ลดขนาดลงมาแล้ว

ตารางที่ 4.4 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย NARNet

(ก) โหนดที่ 1 - 4

โหนด 1	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 2	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
2	420	2	163.02	256.98	1	420	1	163.02	256.98
3	540	3	223.02	316.98	3	940	5,7	423.02	516.98
4	780	2,5	343.02	436.98	4	360	5	133.02	226.98
5	900	3,9	403.02	496.98	5	1180	5,12,23	543.02	636.98
6	1080	3,9,24	493.02	586.98	6	1000	5,12	453.02	546.98
7	920	2,5,13	413.02	506.98	7	500	5,13	203.02	296.98
8	1100	2,5,13,16	503.02	596.98	8	680	5,13,16	293.02	386.98
9	1280	3,9,24,17	593.02	686.98	9	1040	5,13,16,20	473.02	566.98
10	1320	3,9,21	613.02	706.98	10	1600	5,12,23,21	753.02	846.98
11	1460	3,9,24,26	683.02	776.98	11	1380	5,12,26	643.02	736.98
12	1620	3,9,21,29	763.02	856.98	12	1560	5,12,26,27	733.02	826.98
13	1760	3,9,21,31	833.02	926.98	13	1960	5,12,26,27,34	933.02	1026.98
14	1640	2,5,13,16,36	773.02	866.98	14	1220	5,13,16,36	563.02	656.98
15	2060	3,9,21,29,39	983.02	1076.98	15	1800	5,13,16,36,38	853.02	946.98
16	2180	3,9,21,31,41	1043.02	1136.98	16	2120	5,13,16,36,38,43	1013.02	1106.98
17	2020	2,5,13,16,36,47	963.02	1056.98	17	1600	5,13,16,36,47	753.02	846.98
โหนด 3	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 4	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	540	4	223.02	316.98	1	780	6,1	343.02	436.98
2	940	8,6	423.02	516.98	2	360	6	133.02	226.98
4	580	8	243.02	336.98	3	580	7	243.02	336.98
5	360	9	133.02	226.98	5	820	12,23	363.02	456.98
6	540	9,24	223.02	316.98	6	640	12	273.02	366.98
7	720	8,13	313.02	406.98	7	140	13	23.02	116.98
8	900	8,13,16	403.02	496.98	8	320	13,16	113.02	206.98
9	740	9,24,17	323.02	416.98	9	680	13,16,20	293.02	386.98
10	780	9,21	343.02	436.98	10	1240	12,23,21	573.02	666.98
11	920	9,24,26	413.02	506.98	11	1020	12,26	463.02	556.98
12	1080	9,21,29	493.02	586.98	12	1200	12,26,27	553.02	646.98
13	1220	9,21,31	563.02	656.98	13	1600	12,26,27,34	753.02	846.98
14	1440	8,13,16,36	673.02	766.98	14	860	13,16,36	383.02	476.98
15	1520	9,21,29,39	713.02	806.98	15	1440	13,16,36,38	673.02	766.98
16	1640	9,21,31,41	773.02	866.98	16	1760	13,16,36,38,43	833.02	926.98
17	1820	8,13,16,36,47	863.02	956.98	17	1240	13,16,36,47	573.02	666.98

(ข) โหนดที่ 5 – 8

โนด 5	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 6	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	900	10,4	403.02	496.98	1	1080	23,10,4	493.02	586.98
2	1180	24,11,6	543.02	636.98	2	1000	11,6	453.02	546.98
3	360	10	133.02	226.98	3	540	23,10	223.02	316.98
4	820	24,11	363.02	456.98	4	640	11	273.02	366.98
6	180	24	43.02	136.98	5	180	23	43.02	136.98
7	920	24,17,19,15	413.02	506.98	7	740	17,19,15	323.02	416.98
8	740	24,17,19	323.02	416.98	8	560	17,19	233.02	326.98
9	380	24,17	143.02	236.98	9	200	17	53.02	146.98
10	420	21	163.02	256.98	10	600	23,21	253.02	346.98
11	560	24,26	233.02	326.98	11	380	26	143.02	236.98
12	720	21,29	313.02	406.98	12	560	26,27	233.02	326.98
13	860	21,31	383.02	476.98	13	960	26,27,34	433.02	526.98
14	1280	24,17,19,36	593.02	686.98	14	1100	17,19,36	503.02	596.98
15	1160	21,29,39	533.02	626.98	15	1000	26,27,39	453.02	546.98
16	1280	21,31,41	593.02	686.98	16	1320	26,27,39,43	613.02	706.98
17	1540	21,29,39,46	723.02	816.98	17	1380	26,27,39,46	643.02	736.98
โนด 7	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 8	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	920	14,6,1	413.02	506.98	1	1100	15,14,6,1	503.02	596.98
2	500	14,6	203.02	296.98	2	680	15,14,6	293.02	386.98
3	720	14,7	313.02	406.98	3	900	15,14,7	403.02	496.98
4	140	14	23.02	116.98	4	320	15,14	113.02	206.98
5	920	16,20,18,23	413.02	506.98	5	740	20,18,23	323.02	416.98
6	740	16,20,18	323.02	416.98	6	560	20,18	233.02	326.98
8	180	16	43.02	136.98	7	180	15	43.02	136.98
9	540	16,20	223.02	316.98	9	360	20	133.02	226.98
10	1340	16,20,18,23,21	623.02	716.98	10	1160	20,18,23,21	533.02	626.98
11	1120	16,20,18,26	513.02	606.98	11	940	20,18,26	423.02	516.98
12	1300	16,20,18,26,27	603.02	696.98	12	1120	20,18,26,27	513.02	606.98
13	1700	16,20,18,26,27,34	803.02	896.98	13	1520	20,18,26,27,34	713.02	806.98
14	720	16,36	313.02	406.98	14	540	36	223.02	316.98
15	1300	16,36,38	603.02	696.98	15	1120	36,38	513.02	606.98
16	1620	16,36,38,43	763.02	856.98	16	1440	36,38,43	673.02	766.98
17	1100	16,36,47	503.02	596.98	17	920	36,47	413.02	506.98

(ค) โหนดที่ 9 - 12

โนด 9	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 10	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	1280	18,23,10,4	593.02	686.98	1	1320	22,10,4	613.02	706.98
2	1040	19,15,14,6	473.02	566.98	2	1600	22,24,11,6	753.02	846.98
3	740	18,23,10	323.02	416.98	3	780	22,10	343.02	436.98
4	680	19,15,14	293.02	386.98	4	1240	22,24,11	573.02	666.98
5	380	18,23	143.02	236.98	5	420	22	163.02	256.98
6	200	18	53.02	146.98	6	600	22,24	253.02	346.98
7	540	19,15	223.02	316.98	7	1340	22,24,17,19,15	623.02	716.98
8	360	19	133.02	226.98	8	1160	22,24,17,19	533.02	626.98
10	800	18,23,21	353.02	446.98	9	800	22,24,17	353.02	446.98
11	580	18,26	243.02	336.98	11	480	29,28	193.02	286.98
12	760	18,26,27	333.02	426.98	12	300	29	103.02	196.98
13	1160	18,26,27,34	533.02	626.98	13	440	31	173.02	266.98
14	900	19,36	403.02	496.98	14	1320	29,39,37	613.02	706.98
15	1200	18,26,27,39	553.02	646.98	15	740	29,39	323.02	416.98
16	1520	18,26,27,39,43	713.02	806.98	16	860	31,41	383.02	476.98
17	1280	19,36,47	593.02	686.98	17	1120	29,39,46	513.02	606.98
โนด 11	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 12	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	1460	25,23,10,4	683.02	776.98	1	1620	30,22,10,4	763.02	856.98
2	1380	25,11,6	643.02	736.98	2	1560	28,25,11,6	733.02	826.98
3	920	25,23,10	413.02	506.98	3	1080	30,22,10	493.02	586.98
4	1020	25,11	463.02	556.98	4	1200	28,25,11	553.02	646.98
5	560	25,23	233.02	326.98	5	720	30,22	313.02	406.98
6	380	25	143.02	236.98	6	560	28,25	233.02	326.98
7	1120	25,17,19,15	513.02	606.98	7	1300	28,25,17,19,15	603.02	696.98
8	940	25,17,19	423.02	516.98	8	1120	28,25,17,19	513.02	606.98
9	580	25,17	243.02	336.98	9	760	28,25,17	333.02	426.98
10	480	27,30	193.02	286.98	10	300	30	103.02	196.98
12	180	27	43.02	136.98	11	180	28	43.02	136.98
13	580	27,34	243.02	336.98	13	400	34	153.02	246.98
14	1200	27,39,37	553.02	646.98	14	1020	39,37	463.02	556.98
15	620	27,39	263.02	356.98	15	440	39	173.02	266.98
16	940	27,39,43	423.02	516.98	16	760	39,43	333.02	426.98
17	1000	27,39,46	453.02	546.98	17	820	39,46	363.02	456.98

(ง) โหนดที่ 13 - 16

โหนด 13	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 14	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	1760	32,22,10,4	833.02	926.98	1	1640	35,15,14,6,1	773.02	866.98
2	1960	33,28,25,11,6	933.02	1026.98	2	1220	35,15,14,6	563.02	656.98
3	1220	32,22,10	563.02	656.98	3	1440	35,15,14,7	673.02	766.98
4	1600	33,28,25,11	753.02	846.98	4	860	35,15,14	383.02	476.98
5	860	32,22	383.02	476.98	5	1280	35,20,18,23	593.02	686.98
6	960	33,28,25	433.02	526.98	6	1100	35,20,18	503.02	596.98
7	1700	33,28,25,17,19,15	803.02	896.98	7	720	35,15	313.02	406.98
8	1520	33,28,25,17,19	713.02	806.98	8	540	35	223.02	316.98
9	1160	33,28,25,17	533.02	626.98	9	900	35,20	403.02	496.98
10	440	32	173.02	266.98	10	1320	38,40,30	613.02	706.98
11	580	33,28	243.02	336.98	11	1200	38,40,28	553.02	646.98
12	400	33	153.02	246.98	12	1020	38,40	463.02	556.98
14	1320	41,44,37	613.02	706.98	13	1320	38,43,42	613.02	706.98
15	740	41,44	323.02	416.98	15	580	38	243.02	336.98
16	420	41	163.02	256.98	16	900	38,43	403.02	496.98
17	1120	41,44,46	513.02	606.98	17	380	47	143.02	236.98
โหนด 15	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 16	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	2060	40,30,22,10,4	983.02	1076.98	1	2180	42,32,22,10,4	1043.02	1136.98
2	1800	37,35,15,14,6	853.02	946.98	2	2120	44,37,35,15,14,6	1013.02	1106.98
3	1520	40,30,22,10	713.02	806.98	3	1640	42,32,22,10	773.02	866.98
4	1440	37,35,15,14	673.02	766.98	4	1760	44,37,35,15,14	833.02	926.98
5	1160	40,30,22	533.02	626.98	5	1280	42,32,22	593.02	686.98
6	1000	40,28,25	453.02	546.98	6	1320	44,40,28,25	613.02	706.98
7	1300	37,35,15	603.02	696.98	7	1620	44,37,35,15	763.02	856.98
8	1120	37,35	513.02	606.98	8	1440	44,37,35	673.02	766.98
9	1200	40,28,25,17	553.02	646.98	9	1520	44,40,28,25,17	713.02	806.98
10	740	40,30	323.02	416.98	10	860	42,32	383.02	476.98
11	620	40,28	263.02	356.98	11	940	44,40,28	423.02	516.98
12	440	40	173.02	266.98	12	760	44,40	333.02	426.98
13	740	43,42	323.02	416.98	13	420	42	163.02	256.98
14	580	37	243.02	336.98	14	900	44,37	403.02	496.98
16	320	43	113.02	206.98	15	320	44	113.02	206.98
17	380	46	143.02	236.98	17	700	44,46	303.02	396.98

(จ) โหนดที่ 17

โหนด 17	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	2020	48,35,15,14,6,1	963.02	1056.98
2	1600	48,35,15,14,6	753.02	846.98
3	1820	48,35,15,14,7	863.02	956.98
4	1240	48,35,15,14	573.02	666.98
5	1540	45,40,30,22	723.02	816.98
6	1380	45,40,28,25	643.02	736.98
7	1100	48,35,15	503.02	596.98
8	920	48,35	413.02	506.98
9	1280	48,35,20	593.02	686.98
10	1120	45,40,30	513.02	606.98
11	1000	45,40,28	453.02	546.98
12	820	45,40	363.02	456.98
13	1120	45,43,42	513.02	606.98
14	380	48	143.02	236.98
15	380	45	143.02	236.98
16	700	45,43	303.02	396.98

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า R ของโครงข่ายNARNet

โหนดต้นทาง-โหนดปลายทาง	ทราฟฟิก [km]	X_1[km]	R	โหนดต้นทาง-โหนดปลายทาง	ทราฟฟิก [km]	X_1[km]	R
1-16	2180	540	11.71	9-16	1520	200	11.92
1-17	2020	420	12.56	9-17	1280	360	5.96
2-16	2120	360	14.90	10-2	1600	420	8.09
3-16	1640	360	9.79	10-14	1320	300	7.66
3-17	1820	580	7.02	11-1	1460	380	7.45
4-1	780	360	0.64	11-14	1200	180	8.94
4-13	1600	640	3.41	12-1	1620	300	10.86
4-16	1760	140	15.75	12-2	1560	180	12.77
5-1	900	360	1.92	12-14	1020	440	1.49
5-14	1280	180	9.79	13-1	1760	440	9.37
5-17	1540	420	7.45	13-2	1960	400	12.35
6-1	1080	180	7.66	14-1	1640	540	5.96
6-2	1000	640	-2.98	14-10	1320	580	1.70
6-14	1100	200	7.45	15-1	2060	440	12.56
6-17	1380	380	6.60	15-2	1800	580	6.81
7-1	920	140	6.81	16-1	2180	420	14.26
7-13	1700	180	14.26	16-2	2120	320	15.75
8-1	1100	180	7.88	17-1	2020	380	13.41
8-13	1520	360	8.52	17-5	1540	380	8.30
8-16	1440	540	3.83				

ตารางที่ 4.6 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย NARNet (ลดขนาดโครงข่าย)

(ก) โหนดที่ 1 - 4

โหนด 1	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 2	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
2	26.67	420	2	-33.64	60.31	1	26.67	420	1	-33.64	60.31
3	34.29	540	3	-29.83	64.12	3	59.68	940	5,7	-17.13	76.82
4	49.52	780	2,5	-22.21	71.74	4	22.86	360	5	-35.55	58.40
5	57.14	900	3,9	-18.40	75.55	5	74.92	1180	5,12,23	-9.52	84.44
6	68.57	1080	3,9,24	-12.69	81.26	6	63.49	1000	5,12	-15.23	78.72
7	58.41	920	2,5,13	-17.77	76.18	7	31.75	500	5,13	-31.10	62.85
8	69.84	1100	2,5,13,16	-12.06	81.90	8	43.17	680	5,13,16	-25.39	68.56
9	81.27	1280	3,9,24,17	-6.34	87.61	9	66.03	1040	5,13,16,20	-13.96	79.99
10	83.81	1320	3,9,21	-5.07	88.88	10	101.59	1600	5,12,23,21	3.82	97.77
11	92.70	1460	3,9,24,26	-0.63	93.33	11	87.62	1380	5,12,26	-3.17	90.79
12	102.86	1620	3,9,21,29	4.45	98.40	12	99.05	1560	5,12,26,27	2.55	96.50
13	111.75	1760	3,9,21,31	8.90	102.85	13	124.44	1960	5,12,26,27,34	15.25	109.20
14	104.13	1640	2,5,13,16,36	5.09	99.04	14	77.46	1220	5,13,16,36	-8.25	85.71
15	130.79	2060	3,9,21,29,39	18.42	112.37	15	114.29	1800	5,13,16,36,38	10.17	104.12
16	138.41	2180	3,9,21,31,41	22.23	116.18	16	134.60	2120	5,13,16,36,38,43	20.33	114.28
17	128.25	2020	2,5,13,16,36,47	17.15	111.10	17	101.59	1600	5,13,16,36,47	3.82	97.77
โหนด 3	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 4	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	34.29	540	4	-29.83	64.12	1	49.52	780	6,1	-22.21	71.74
2	59.68	940	8,6	-17.13	76.82	2	22.86	360	6	-35.55	58.40
4	36.83	580	8	-28.56	65.39	3	36.83	580	7	-28.56	65.39
5	22.86	360	9	-35.55	58.40	5	52.06	820	12,23	-20.94	73.01
6	34.29	540	9,24	-29.83	64.12	6	40.63	640	12	-26.66	67.29
7	45.71	720	8,13	-24.12	69.83	7	8.89	140	13	-42.53	51.42
8	57.14	900	8,13,16	-18.40	75.55	8	20.32	320	13,16	-36.82	57.13
9	46.98	740	9,24,17	-23.48	70.47	9	43.17	680	13,16,20	-25.39	68.56
10	49.52	780	9,21	-22.21	71.74	10	78.73	1240	12,23,21	-7.61	86.34
11	58.41	920	9,24,26	-17.77	76.18	11	64.76	1020	12,26	-14.59	79.36
12	68.57	1080	9,21,29	-12.69	81.26	12	76.19	1200	12,26,27	-8.88	85.07
13	77.46	1220	9,21,31	-8.25	85.71	13	101.59	1600	12,26,27,34	3.82	97.77
14	91.43	1440	8,13,16,36	-1.26	92.69	14	54.60	860	13,16,36	-19.67	74.28
15	96.51	1520	9,21,29,39	1.28	95.23	15	91.43	1440	13,16,36,38	-1.26	92.69
16	104.13	1640	9,21,31,41	5.09	99.04	16	111.75	1760	13,16,36,38,43	8.90	102.85
17	115.56	1820	8,13,16,36,47	10.80	104.75	17	78.73	1240	13,16,36,47	-7.61	86.34

(ข) โหนดที่ 5 - 8

โนด 5	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 6	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	57.14	900	10,4	-18.40	75.55	1	68.57	1080	23,10,4	-12.69	81.26
2	74.92	1180	24,11,6	-9.52	84.44	2	63.49	1000	11,6	-15.23	78.72
3	22.86	360	10	-35.55	58.40	3	34.29	540	23,10	-29.83	64.12
4	52.06	820	24,11	-20.94	73.01	4	40.63	640	11	-26.66	67.29
6	11.43	180	24	-41.26	52.69	5	11.43	180	23	-41.26	52.69
7	58.41	920	24,17,19,15	-17.77	76.18	7	46.98	740	17,19,15	-23.48	70.47
8	46.98	740	24,17,19	-23.48	70.47	8	35.56	560	17,19	-29.20	64.75
9	24.13	380	24,17	-34.91	59.04	9	12.70	200	17	-40.63	53.33
10	26.67	420	21	-33.64	60.31	10	38.10	600	23,21	-27.93	66.02
11	35.56	560	24,26	-29.20	64.75	11	24.13	380	26	-34.91	59.04
12	45.71	720	21,29	-24.12	69.83	12	35.56	560	26,27	-29.20	64.75
13	54.60	860	21,31	-19.67	74.28	13	60.95	960	26,27,34	-16.50	77.45
14	81.27	1280	24,17,19,36	-6.34	87.61	14	69.84	1100	17,19,36	-12.06	81.90
15	73.65	1160	21,29,39	-10.15	83.80	15	63.49	1000	26,27,39	-15.23	78.72
16	81.27	1280	21,31,41	-6.34	87.61	16	83.81	1320	26,27,39,43	-5.07	88.88
17	97.78	1540	21,29,39,46	1.91	95.86	17	87.62	1380	26,27,39,46	-3.17	90.79
โนด 7	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 8	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	58.41	920	14,6,1	-17.77	76.18	1	69.84	1100	15,14,6,1	-12.06	81.90
2	31.75	500	14,6	-31.10	62.85	2	43.17	680	15,14,6	-25.39	68.56
3	45.71	720	14,7	-24.12	69.83	3	57.14	900	15,14,7	-18.40	75.55
4	8.89	140	14	-42.53	51.42	4	20.32	320	15,14	-36.82	57.13
5	58.41	920	16,20,18,23	-17.77	76.18	5	46.98	740	20,18,23	-23.48	70.47
6	46.98	740	16,20,18	-23.48	70.47	6	35.56	560	20,18	-29.20	64.75
8	11.43	180	16	-41.26	52.69	7	11.43	180	15	-41.26	52.69
9	34.29	540	16,20	-29.83	64.12	9	22.86	360	20	-35.55	58.40
10	85.08	1340	16,20,18,23,21	-4.44	89.52	10	73.65	1160	20,18,23,21	-10.15	83.80
11	71.11	1120	16,20,18,26	-11.42	82.53	11	59.68	940	20,18,26	-17.13	76.82
12	82.54	1300	16,20,18,26,27	-5.71	88.25	12	71.11	1120	20,18,26,27	-11.42	82.53
13	107.94	1700	16,20,18,26,27,34	6.99	100.94	13	96.51	1520	20,18,26,27,34	1.28	95.23
14	45.71	720	16,36	-24.12	69.83	14	34.29	540	36	-29.83	64.12
15	82.54	1300	16,36,38	-5.71	88.25	15	71.11	1120	36,38	-11.42	82.53
16	102.86	1620	16,36,38,43	4.45	98.40	16	91.43	1440	36,38,43	-1.26	92.69
17	69.84	1100	16,36,47	-12.06	81.90	17	58.41	920	36,47	-17.77	76.18

(ค) โหนดที่ 9 - 12

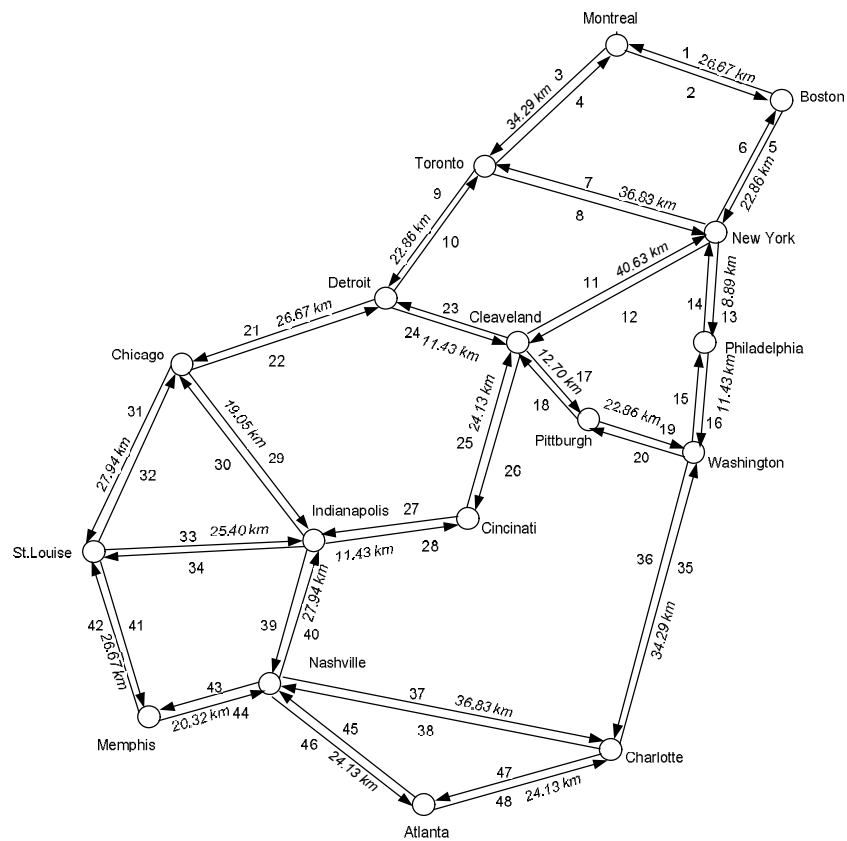
โหนด 9	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 10	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	81.27	1280	18,23,10,4	-6.34	87.61	1	83.81	1320	22,10,4	-5.07	88.88
2	66.03	1040	19,15,14,6	-13.96	79.99	2	101.59	1600	22,24,11,6	3.82	97.77
3	46.98	740	18,23,10	-23.48	70.47	3	49.52	780	22,10	-22.21	71.74
4	43.17	680	19,15,14	-25.39	68.56	4	78.73	1240	22,24,11	-7.61	86.34
5	24.13	380	18,23	-34.91	59.04	5	26.67	420	22	-33.64	60.31
6	12.70	200	18	-40.63	53.33	6	38.10	600	22,24	-27.93	66.02
7	34.29	540	19,15	-29.83	64.12	7	85.08	1340	22,24,17,19,15	-4.44	89.52
8	22.86	360	19	-35.55	58.40	8	73.65	1160	22,24,17,19	-10.15	83.80
10	50.79	800	18,23,21	-21.58	72.37	9	50.79	800	22,24,17	-21.58	72.37
11	36.83	580	18,26	-28.56	65.39	11	30.48	480	29,28	-31.74	62.21
12	48.25	760	18,26,27	-22.85	71.10	12	19.05	300	29	-37.45	56.50
13	73.65	1160	18,26,27,34	-10.15	83.80	13	27.94	440	31	-33.01	60.94
14	57.14	900	19,36	-18.40	75.55	14	83.81	1320	29,39,37	-5.07	88.88
15	76.19	1200	18,26,27,39	-8.88	85.07	15	46.98	740	29,39	-23.48	70.47
16	96.51	1520	18,26,27,39,43	1.28	95.23	16	54.60	860	31,41	-19.67	74.28
17	81.27	1280	19,36,47	-6.34	87.61	17	71.11	1120	29,39,46	-11.42	82.53
โหนด 11	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 12	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	92.70	1460	25,23,10,4	-0.63	93.33	1	102.86	1620	30,22,10,4	4.45	98.40
2	87.62	1380	25,11,6	-3.17	90.79	2	99.05	1560	28,25,11,6	2.55	96.50
3	58.41	920	25,23,10	-17.77	76.18	3	68.57	1080	30,22,10	-12.69	81.26
4	64.76	1020	25,11	-14.59	79.36	4	76.19	1200	28,25,11	-8.88	85.07
5	35.56	560	25,23	-29.20	64.75	5	45.71	720	30,22	-24.12	69.83
6	24.13	380	25	-34.91	59.04	6	35.56	560	28,25	-29.20	64.75
7	71.11	1120	25,17,19,15	-11.42	82.53	7	82.54	1300	28,25,17,19,15	-5.71	88.25
8	59.68	940	25,17,19	-17.13	76.82	8	71.11	1120	28,25,17,19	-11.42	82.53
9	36.83	580	25,17	-28.56	65.39	9	48.25	760	28,25,17	-22.85	71.10
10	30.48	480	27,30	-31.74	62.21	10	19.05	300	30	-37.45	56.50
12	11.43	180	27	-41.26	52.69	11	11.43	180	28	-41.26	52.69
13	36.83	580	27,34	-28.56	65.39	13	25.40	400	34	-34.28	59.67
14	76.19	1200	27,39,37	-8.88	85.07	14	64.76	1020	39,37	-14.59	79.36
15	39.37	620	27,39	-27.29	66.66	15	27.94	440	39	-33.01	60.94
16	59.68	940	27,39,43	-17.13	76.82	16	48.25	760	39,43	-22.85	71.10
17	63.49	1000	27,39,46	-15.23	78.72	17	52.06	820	39,46	-20.94	73.01

(ง) โหนดที่ 13 - 16

โนด 13	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 14	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	111.75	1760	32,22,10,4	8.90	102.85	1	104.13	1640	35,15,14,6,1	5.09	99.04
2	124.44	1960	33,28,25,11,6	15.25	109.20	2	77.46	1220	35,15,14,6	-8.25	85.71
3	77.46	1220	32,22,10	-8.25	85.71	3	91.43	1440	35,15,14,7	-1.26	92.69
4	101.59	1600	33,28,25,11	3.82	97.77	4	54.60	860	35,15,14	-19.67	74.28
5	54.60	860	32,22	-19.67	74.28	5	81.27	1280	35,20,18,23	-6.34	87.61
6	60.95	960	33,28,25	-16.50	77.45	6	69.84	1100	35,20,18	-12.06	81.90
7	107.94	1700	33,28,25,17,19,15	6.99	100.94	7	45.71	720	35,15	-24.12	69.83
8	96.51	1520	33,28,25,17,19	1.28	95.23	8	34.29	540	35	-29.83	64.12
9	73.65	1160	33,28,25,17	-10.15	83.80	9	57.14	900	35,20	-18.40	75.55
10	27.94	440	32	-33.01	60.94	10	83.81	1320	38,40,30	-5.07	88.88
11	36.83	580	33,28	-28.56	65.39	11	76.19	1200	38,40,28	-8.88	85.07
12	25.40	400	33	-34.28	59.67	12	64.76	1020	38,40	-14.59	79.36
14	83.81	1320	41,44,37	-5.07	88.88	13	83.81	1320	38,43,42	-5.07	88.88
15	46.98	740	41,44	-23.48	70.47	15	36.83	580	38	-28.56	65.39
16	26.67	420	41	-33.64	60.31	16	57.14	900	38,43	-18.40	75.55
17	71.11	1120	41,44,46	-11.42	82.53	17	24.13	380	47	-34.91	59.04
โนด 15	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 16	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	130.79	2060	40,30,22,10,4	18.42	112.37	1	138.41	2180	42,32,22,10,4	22.23	116.18
2	114.29	1800	37,35,15,14,6	10.17	104.12	2	134.60	2120	44,37,35,15,14,6	20.33	114.28
3	96.51	1520	40,30,22,10	1.28	95.23	3	104.13	1640	42,32,22,10	5.09	99.04
4	91.43	1440	37,35,15,14	-1.26	92.69	4	111.75	1760	44,37,35,15,14	8.90	102.85
5	73.65	1160	40,30,22	-10.15	83.80	5	81.27	1280	42,32,22	-6.34	87.61
6	63.49	1000	40,28,25	-15.23	78.72	6	83.81	1320	44,40,28,25	-5.07	88.88
7	82.54	1300	37,35,15	-5.71	88.25	7	102.86	1620	44,37,35,15	4.45	98.40
8	71.11	1120	37,35	-11.42	82.53	8	91.43	1440	44,37,35	-1.26	92.69
9	76.19	1200	40,28,25,17	-8.88	85.07	9	96.51	1520	44,40,28,25,17	1.28	95.23
10	46.98	740	40,30	-23.48	70.47	10	54.60	860	42,32	-19.67	74.28
11	39.37	620	40,28	-27.29	66.66	11	59.68	940	44,40,28	-17.13	76.82
12	27.94	440	40	-33.01	60.94	12	48.25	760	44,40	-22.85	71.10
13	46.98	740	43,42	-23.48	70.47	13	26.67	420	42	-33.64	60.31
14	36.83	580	37	-28.56	65.39	14	57.14	900	44,37	-18.40	75.55
16	20.32	320	43	-36.82	57.13	15	20.32	320	44	-36.82	57.13
17	24.13	380	46	-34.91	59.04	17	44.44	700	44,46	-24.75	69.20

(จ) โหนดที่ 17

โหนด 17	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	128.25	2020	48,35,15,14,6,1	17.15	111.10
2	101.59	1600	48,35,15,14,6	3.82	97.77
3	115.56	1820	48,35,15,14,7	10.80	104.75
4	78.73	1240	48,35,15,14	-7.61	86.34
5	97.78	1540	45,40,30,22	1.91	95.86
6	87.62	1380	45,40,28,25	-3.17	90.79
7	69.84	1100	48,35,15	-12.06	81.90
8	58.41	920	48,35	-17.77	76.18
9	81.27	1280	48,35,20	-6.34	87.61
10	71.11	1120	45,40,30	-11.42	82.53
11	63.49	1000	45,40,28	-15.23	78.72
12	52.06	820	45,40	-20.94	73.01
13	71.11	1120	45,43,42	-11.42	82.53
14	24.13	380	48	-34.91	59.04
15	24.13	380	45	-34.91	59.04
16	44.44	700	45,43	-24.75	69.20



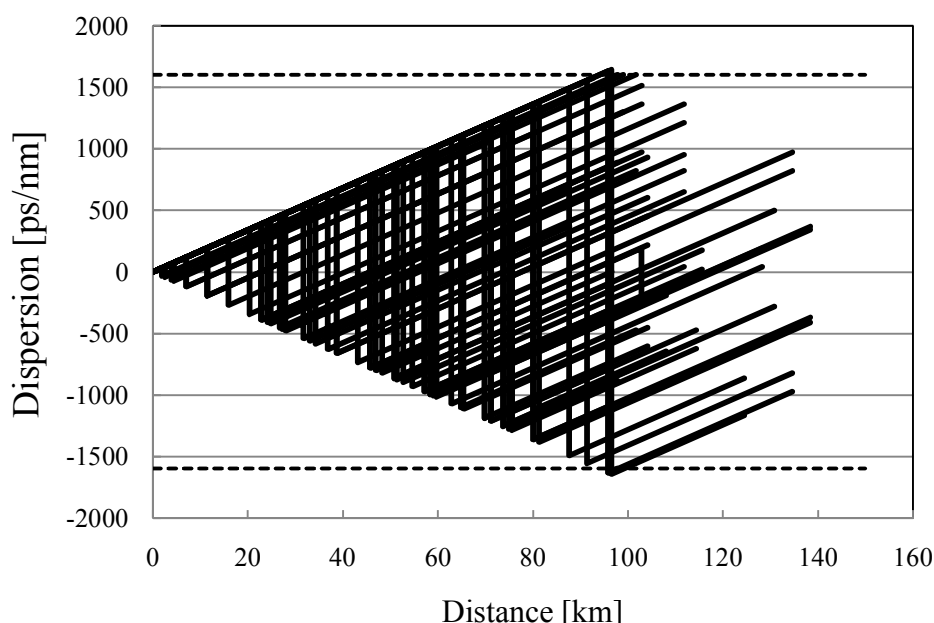
รูปที่ 4.12 โครงข่าย NARNet ที่ได้รับการลดขนาดลงมา 15.75 เท่า

3. พิจารณาหาตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง พิจารณาหาตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้โดยใช้หลักการเดิมจากตัวอย่างที่ 1 โดยย้ายเชื่อมโยงแรกที่ต้องพิจารณาคือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16 หลังจากกระทำการหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งหมดแล้ว จะใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งหมด 6 ตัว และได้ตำแหน่งหรือช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงดังนี้

- ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 (0 - 4.43 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 16 (6.99 – 11.43 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 21(1.91 - 22.85 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 22 (3.82 - 24.75 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 27 (0 – 8.88 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 28 (2.55 – 11.43 km)

(ปรับตำแหน่งของข่ายเชื่อมโยงที่ 21 จาก 0 เป็น 1.91 เนื่องจากว่ากราฟฟิกของโนด 5 -17 ไม่ผ่าน เพราะข่ายเชื่อมโยงที่ 21 เป็นข่ายแรกของกราฟฟิก)

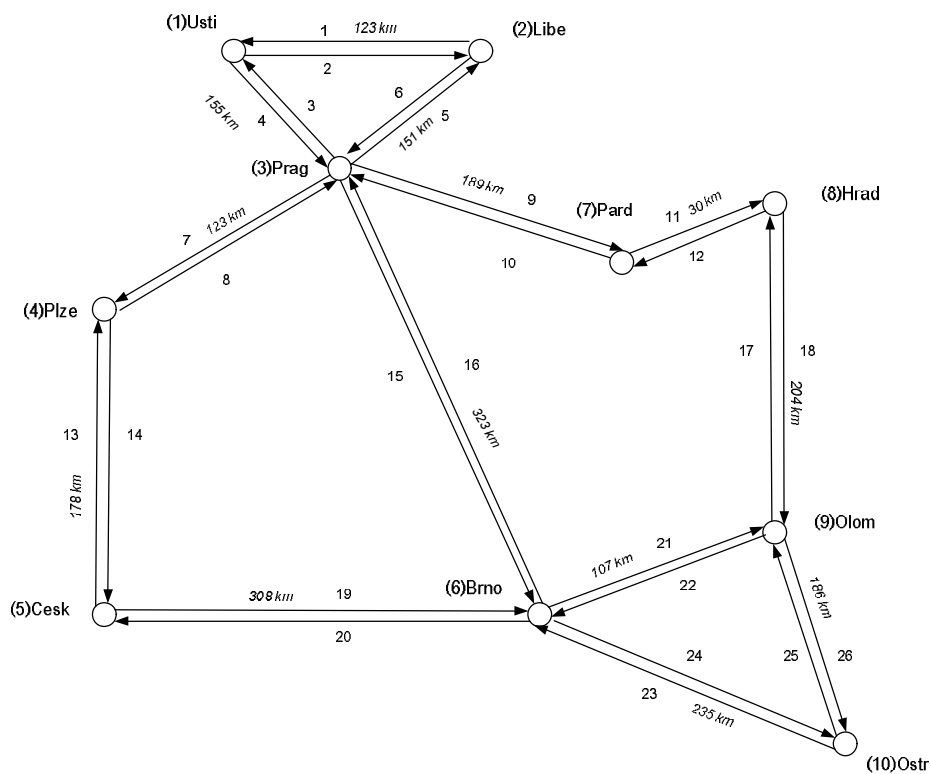
4. ตรวจสอบดิสเพอร์ชันของทุกกราฟฟิก รูปที่ 4.13 เป็นการตรวจสอบดิสเพอร์ชันหลังจากวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง



รูปที่ 4.13 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกกราฟฟิกในโครงข่าย NARNet

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าที่ปลายทางค่าดิสเพอร์ชันสะสมจะไม่เกินค่าที่กำหนด (± 1600 ps/nm) ไว้ แต่ระหว่างทางการสื่อสาร ค่าดิสเพอร์ชันอาจจะเกินค่าที่กำหนดไว้ก็ได้

ตัวอย่างที่ 3 โครงข่าย OPEN (Optical Pan European Network) ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 โครงข่าย OPEN

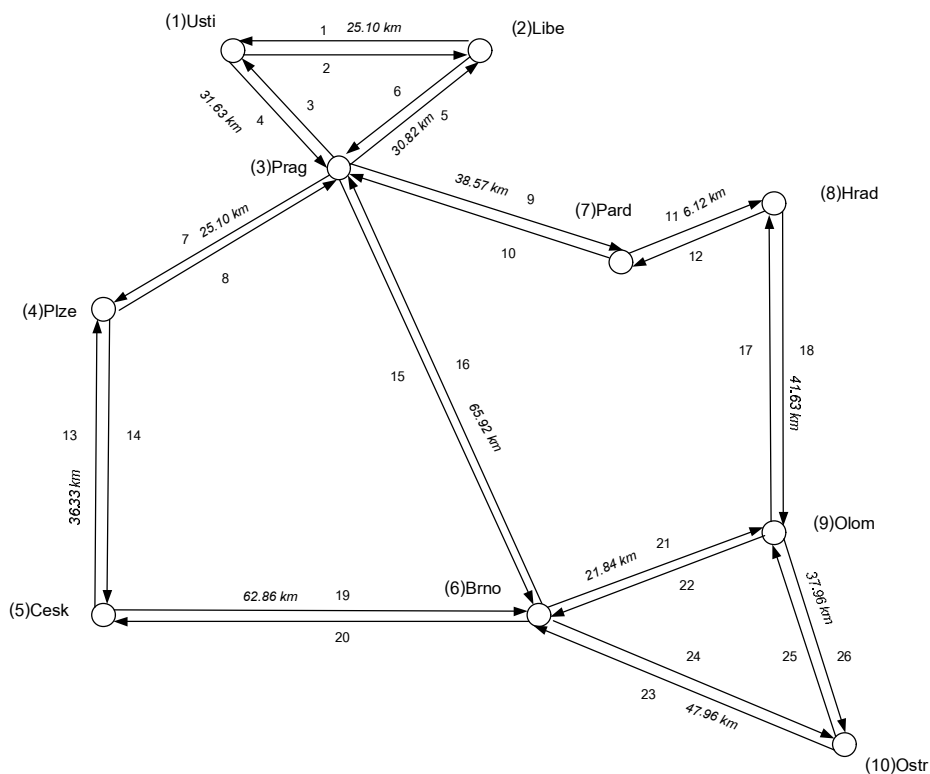
- 1.หาเส้นทางที่สั้นที่สุดและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสง ได้ผลตามตารางที่ 4.7
- 2.หาค่า R และลดขนาดโครงข่าย ตารางที่ 4.8 แสดงผลการหาค่า R จากโครงข่าย OPEN ซึ่งสรุปได้ว่า ค่า R ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 4.90 หรือลดขนาดโครงข่ายลงมา 4.90 เท่า รูปที่ 4.15 แสดงโครงข่าย OPEN ที่ได้รับการลดขนาดลงมาแล้ว ตารางที่ 4.9 แสดงกราฟฟิกและตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงหลังจากลดขนาดโครงข่ายแล้ว

ตารางที่ 4.7 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย OPEN

1	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	2	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	3	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
2	123	2	14.52	108.48	1	123	1	14.52	108.48	1	155	3	30.52	124.48
3	155	4	30.52	124.48	3	151	6	28.52	122.48	2	151	5	28.52	122.48
4	278	4,7	92.02	185.98	4	274	6,7	90.02	183.98	4	123	7	14.52	108.48
5	456	4,7,14	181.02	274.98	5	452	6,7,14	179.02	272.98	5	301	7,14	103.52	197.48
6	478	4,15	192.02	285.98	6	474	6,15	190.02	283.98	6	323	15	114.52	208.48
7	344	4,9	125.02	218.98	7	340	6,9	123.02	216.98	7	189	9	47.52	141.48
8	374	4,9,11	140.02	233.98	8	370	6,9,11	138.02	231.98	8	219	9,11	62.52	156.48
9	578	4,9,11,18	242.02	335.98	9	574	6,9,11,18	240.02	333.98	9	423	9,11,18	164.52	258.48
10	713	4,15,24	309.52	403.48	10	709	6,15,24	307.52	401.48	10	558	15,24	232.02	325.98
4	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	5	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	6	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	278	8,3	92.02	185.98	1	456	13,8,3	181.02	274.98	1	478	16,3	192.02	285.98
2	274	8,5	90.02	183.98	2	452	13,8,5	179.02	272.98	2	474	16,5	190.02	283.98
3	123	8	14.52	108.48	3	301	13,8	103.52	197.48	3	323	16	114.52	208.48
5	178	14	42.02	135.98	4	178	13	42.02	135.98	4	446	16,7	176.02	269.98
6	446	8,15	176.02	269.98	6	308	19	107.02	200.98	5	308	20	107.02	200.98
7	312	8,9	109.02	202.98	7	490	13,8,9	198.02	291.98	7	341	21,17,12	123.52	217.48
8	342	8,9,11	124.02	217.98	8	520	13,8,9,11	213.02	306.98	8	311	21,17	108.52	202.48
9	546	8,9,11,18	226.02	319.98	9	415	19,21	160.52	254.48	9	107	21	6.52	100.48
10	681	8,15,24	293.52	387.48	10	543	19,24	224.52	318.48	10	235	24	70.52	164.48
7	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	8	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	9	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R
1	344	10,3	125.02	218.98	1	374	12,10,3	140.02	233.98	1	578	17,12,10,3	242.02	335.98
2	340	10,5	123.02	216.98	2	370	12,10,5	138.02	231.98	2	574	17,12,10,5	240.02	333.98
3	189	10	47.52	141.48	3	219	12,10	62.52	156.48	3	423	17,12,10	164.52	258.48
4	312	10,7	109.02	202.98	4	342	12,10,7	124.02	217.98	4	546	17,12,10,7	226.02	319.98
5	490	10,7,14	198.02	291.98	5	520	12,10,7,14	213.02	306.98	5	415	22,20	160.52	254.48
6	341	11,18,22	123.52	217.48	6	311	18,22	108.52	202.48	6	107	22	6.52	100.48
8	30	11	-31.98	61.98	7	30	12	-31.98	61.98	7	234	17,12	70.02	163.98
9	234	11,18	70.02	163.98	9	204	18	55.02	148.98	8	204	17	55.02	148.98
10	420	11,18,26	163.02	256.98	10	390	18,26	148.02	241.98	10	186	26	46.02	139.98
10	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R										
1	123	23,16,3	14.52	108.48										
2	155	23,16,5	30.52	124.48										
3	278	23,16	92.02	185.98										
4	456	23,16,7	181.02	274.98										
5	478	23,20	192.02	285.98										
6	340	23	123.02	216.98										
7	374	25,17,12	140.02	233.98										
8	578	25,17	242.02	335.98										
9	713	25	309.52	403.48										

ตารางที่ 4.8 ค่า R ของโครงข่าย OPEN

โน้ตต้นทาง-โน้ตปลายทาง	ทราฟฟิก [km]	X_1 [km]	R	โน้ตต้นทาง-โน้ตปลายทาง	ทราฟฟิก [km]	X_1 [km]	R
1-10	713	155	4.29	6-7	341	107	1.35
2-10	709	151	4.33	7-5	490	189	1.19
3-5	301	123	0.59	7-10	420	30	3.83
3-9	423	189	0.48	8-5	520	30	4.90
3-10	558	323	-0.94	8-10	390	204	-0.19
4-10	681	123	4.63	9-1	578	204	1.81
5-8	520	178	1.75	9-5	415	107	2.14
5-10	543	308	-0.78	10-5	478	235	0.09
6-1	478	323	-1.79	10-8	578	186	2.19



รูปที่ 4.15 โครงข่าย OPEN ที่ได้รับการลดขนาดโครงข่ายลงมา 4.90 เท่า

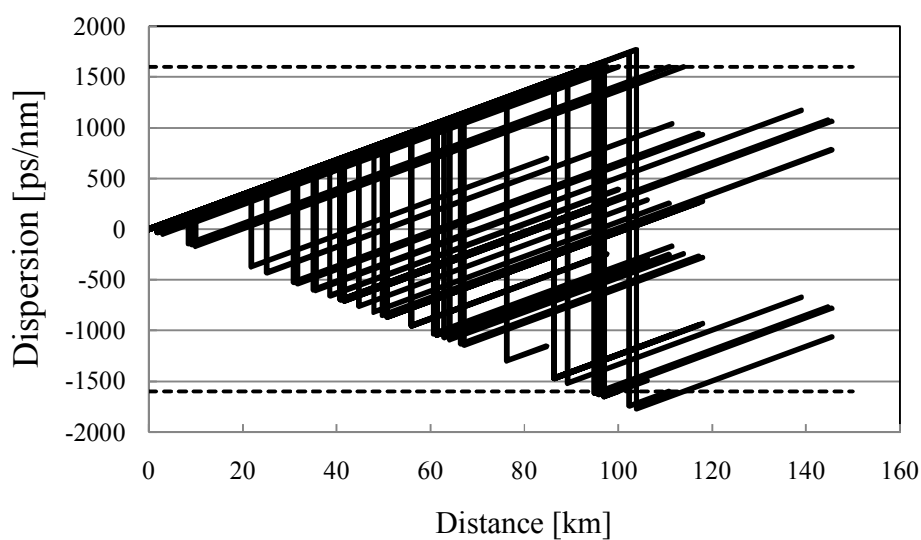
ตารางที่ 4.9 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย OPEN (ลดขนาดโครงข่าย)

1	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	2	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	3	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R
2	25.10	123	2	-34.42	59.53	1	25.10	123	1	-34.42	59.53	1	31.63	155	3	-31.16	62.79
3	31.63	155	4	-31.16	62.79	3	30.82	151	6	-31.57	62.38	2	30.82	151	5	-31.57	62.38
4	56.73	278	4,7	-18.61	75.34	4	55.92	274	6,7	-19.02	74.94	4	25.10	123	7	-34.42	59.53
5	93.06	456	4,7,14	-0.45	93.51	5	92.24	452	6,7,14	-0.85	93.10	5	61.43	301	7,14	-16.26	77.69
6	97.55	478	4,15	1.80	95.75	6	96.73	474	6,15	1.39	95.34	6	65.92	323	15	-14.02	79.94
7	70.20	344	4,9	-11.87	82.08	7	69.39	340	6,9	-12.28	81.67	7	38.57	189	9	-27.69	66.26
8	76.33	374	4,9,11	-8.81	85.14	8	75.51	370	6,9,11	-9.22	84.73	8	44.69	219	9,11	-24.63	69.32
9	117.96	578	4,9,11,18	12.00	105.96	9	117.14	574	6,9,11,18	11.60	105.55	9	86.33	423	9,11,18	-3.81	90.14
10	145.51	713	4,15,24	25.78	119.73	10	144.69	709	6,15,24	25.37	119.32	10	113.88	558	15,24	9.96	103.91
4	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	5	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	6	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R
1	56.73	278	8,3	-18.61	75.34	1	93.06	456	13,8,3	-0.45	93.51	1	97.55	478	16,3	1.80	95.75
2	55.92	274	8,5	-19.02	74.94	2	92.24	452	13,8,5	-0.85	93.10	2	96.73	474	16,5	1.39	95.34
3	25.10	123	8	-34.42	59.53	3	61.43	301	13,8	-16.26	77.69	3	65.92	323	16	-14.02	79.94
5	36.33	178	14	-28.81	65.14	4	36.33	178	13	-28.81	65.14	4	91.02	446	16,7	-1.47	92.49
6	91.02	446	8,15	-1.47	92.49	6	62.86	308	19	-15.55	78.40	5	62.86	308	20	-15.55	78.40
7	63.67	312	8,9	-15.14	78.81	7	100.00	490	13,8,9	3.02	96.98	7	69.59	341	21,17,12	-12.18	81.77
8	69.80	342	8,9,11	-12.08	81.87	8	106.12	520	13,8,9,11	6.09	100.04	8	63.47	311	21,17	-15.24	78.71
9	111.43	546	8,9,11,18	8.74	102.69	9	84.69	415	19,21	-4.63	89.32	9	21.84	107	21	-36.06	57.89
10	138.98	681	8,15,24	22.51	116.47	10	110.82	543	19,24	8.43	102.38	10	47.96	235	24	-23.00	70.96
7	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	8	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	9	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R
1	70.20	344	10,3	-11.87	82.08	1	76.33	374	12,10,3	-8.81	85.14	1	117.96	578	17,12,10,3	12.00	105.96
2	69.39	340	10,5	-12.28	81.67	2	75.51	370	12,10,5	-9.22	84.73	2	117.14	574	17,12,10,5	11.60	105.55
3	38.57	189	10	-27.69	66.26	3	44.69	219	12,10	-24.63	69.32	3	86.33	423	17,12,10	-3.81	90.14
4	63.67	312	10,7	-15.14	78.81	4	69.80	342	12,10,7	-12.08	81.87	4	111.43	546	17,12,10,7	8.74	102.69
5	100.00	490	10,7,14	3.02	96.98	5	106.12	520	12,10,7,14	6.09	100.04	5	84.69	415	22,20	-4.63	89.32
6	69.59	341	11,18,22	-12.18	81.77	6	63.47	311	18,22	-15.24	78.71	6	21.84	107	22	-36.06	57.89
8	6.12	30	11	-43.91	50.04	7	6.12	30	12	-43.91	50.04	7	47.76	234	17,12	-23.10	70.85
9	47.76	234	11,18	-23.10	70.85	9	41.63	204	18	-26.16	67.79	8	41.63	204	17	-26.16	67.79
10	85.71	420	11,18,26	-4.12	89.83	10	79.59	390	18,26	-7.18	86.77	10	37.96	186	26	-28.00	65.96
10	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R												
1	145.51	713	23,16,3	25.78	119.73												
2	144.69	709	23,16,5	25.37	119.32												
3	113.88	558	23,16	9.96	103.91												
4	138.98	681	23,16,7	22.51	116.47												
5	110.82	543	23,20	8.43	102.38												
6	47.96	235	23	-23.00	70.96												
7	85.71	420	25,17,12	-4.12	89.83												
8	79.59	390	25,17	-7.18	86.77												
9	37.96	186	25	-28.00	65.96												

3.พิจารณาหาตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง หาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงโดยใช้หลักการเดียวกับตัวอย่างที่ 1 จะได้จำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งหมด 6 ตัว ดังนี้

- ข่ายเชื่อมโยงที่ 9 (0.00 - 35.55 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 10 (3.02 - 38.57 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 (9.96 - 64.12 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 16 (1.80 - 55.95 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 19 (8.43 - 62.86 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 20 (0.00 - 54.42 km)

4.ตรวจสอบดิสเพอร์ชันของทุกทราฟฟิก รูปที่ 4.16 เป็นการตรวจสอบดิสเพอร์ชันหลังจากวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงของทุกๆทราฟฟิกในโครงข่าย OPEN



รูปที่ 4.16 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่าย OPEN

บทที่ 5

การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายและการวิเคราะห์ OSNR

การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายนั้น เราจะมีเงื่อนไขว่า ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายได้ไม่เกิน 1 ข่ายเชื่อมโยง(single-link failure) และมีกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบใช้วิถีร่วมกัน (shared path protection) ซึ่งการกู้คืนสัญญาณแบบนี้ ข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ในการกู้คืนสัญญาณสามารถใช้ร่วมกันได้ในหลายๆทราฟฟิก

ส่วนการวิเคราะห์ OSNR นั้น เมื่อเราวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่าย จะทำให้กำลังสัญญาณที่ได้จากเครื่องส่งยุคเฟสแสงลดลงเนื่องจากปรากฏการณ์ FWM ทำให้สัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้น มีพลังงานน้อยกว่าสัญญาณที่เข้าไปในเครื่องส่งยุคเฟสแสง เราจึงใส่เครื่องขยายสัญญาณเพิ่มเติมจากเดิม ซึ่งเครื่องขยายสัญญาณนั้น นอกจากจะขยายสัญญาณข้อมูลแล้ว ยังขยายสัญญาณรบกวนด้วย เป็นผลทำให้ค่า OSNR ของระบบลดลง[36]

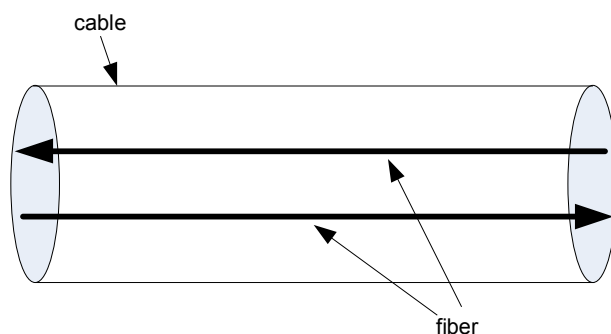
ในบทนี้เราจะศึกษาว่า การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายว่าใช้หลักวิธีอะไร รวมถึงการวิเคราะห์ OSNR ของระบบด้วย ว่ามีความเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

5.1 การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย

หลักการในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายไม่เกิน 1 ข่ายเชื่อมโยงนั้น จะหาเส้นทางใหม่ที่ไม่ใช่เส้นทางเดิม โดยเส้นทางใหม่นั้น จะไม่ใช่ท่อเส้นใยแสงเดิมด้วย เพราะเมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด หมายถึงขาดทั้งเคเบิล ซึ่งภายในมีข่ายเชื่อมโยงหลายๆเส้น ดังรูปที่ 5.1 ในตัวอย่างที่ผ่านมา จะคิดว่าเส้นใยแสงมี 2 เส้นต่อ 1 เคเบิล การคิดคำนวณหาเส้นทางใหม่ที่ไม่ใช่เส้นทางเดิม จะใช้วิธีของ Dijkstra (Dijkstra's algorithm)เช่นเดียวกัน

เราจะกำหนดเงื่อนไขของการกู้คืนสัญญาณดังนี้

1. กำหนดให้ข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายมีเส้นใยแสง 4 เส้น เป็นเส้นใยแสงหลัก(working fiber) 2 เส้น เส้นใยแสงสำรอง(protection fiber) 2 เส้น
2. กำหนดให้ความยาวคลื่นมีใช้ไม่จำกัด ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการชนกันของความยาวคลื่นเดียวกันใน protection fiber
3. สมมติให้ทราฟฟิกในกรณีที่มีการกู้คืนสัญญาณ ยังคงใช้ความยาวคลื่นเดียวกันกับกรณีปกติ



รูปที่ 5.1 เคเบิลและเส้นใยแสง

5.1.1 วิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย

การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายไม่เกิน 1 ข่ายเชื่อมโยงนั้น เราจะกู้คืนสัญญาณแบบใช้วิถีร่วมกัน (shared path protection) และต้องไม่ใช่ข่ายเชื่อมโยงเดิมด้วย (link-disjoint) ดังรูปที่ 5.2 เป็นตัวอย่างการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายของกราฟฟิกจากโหนด 1 ไปยังโหนด 10 เส้นทางเดิมคือ 3-9-21 แต่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย เราจะเปลี่ยนทั้งเส้นทางเพราะว่าเราจะไม่หาเส้นทางสำรองที่ใช้ข่ายเชื่อมโยงซ้ำกัน(link-disjoint) ดังนั้น เราจะไม่เอาข่ายเชื่อมโยงที่ 3 ข่ายเชื่อมโยงที่ 9 และข่ายเชื่อมโยงที่ 21 มาคิดคำนวณในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย ซึ่งจะได้เส้นทางใหม่จากโหนด 1 ไปยังโหนด 10 คือ 2-5-12-26-27-30 ดังรูปที่ 5.2(ข)

5.1.2 ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างที่ 1 โครงข่าย NARNet จากบทที่ 4 ตัวอย่างที่ 2 (NARNet) รูปที่ 5.2(ก) แสดงโครงข่าย NARNet จะแสดงวิธีทำได้ดังนี้

1.หาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสง ด้วยวิธีของ Dijkstra

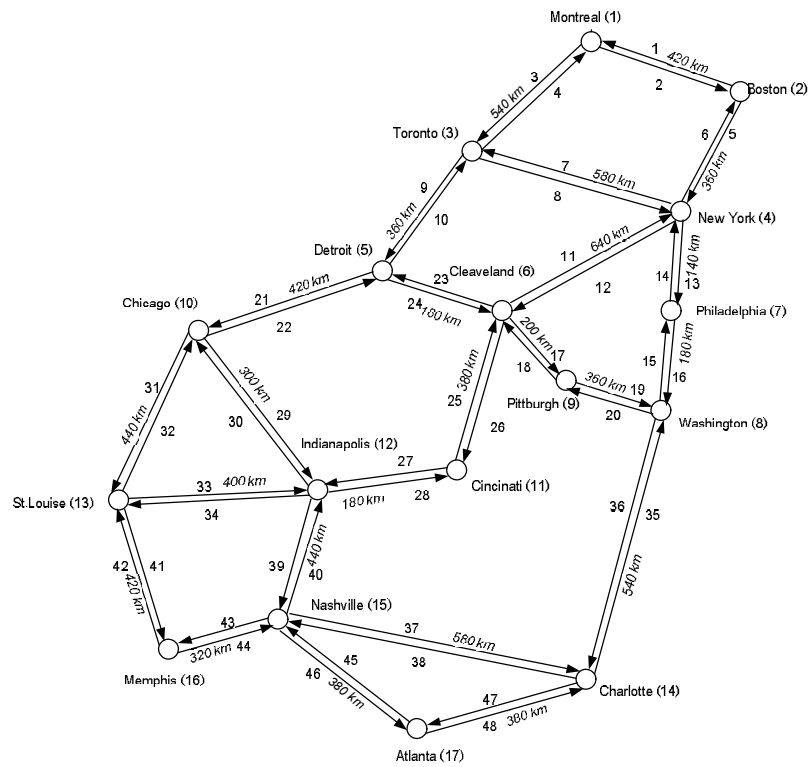
2.หาค่า R พร้อมทั้งลดขนาดโครงข่าย ตารางที่ 5.1 แสดงผลของการหาค่า R จากโครงข่าย NARNet ซึ่งสรุปได้ว่าค่า R ที่มากที่สุดเท่ากับ 28.53 หรือต้องลดขนาดโครงข่ายลงมา 28.53 เท่า ตารางที่ 5.2 แสดงกราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่ายและระยะทางที่ได้รับการลดขนาดโครงข่ายจากค่า R ในกรณีที่ทำงานปกติที่ R เท่ากับ 28.53 ตารางที่ 5.3 แสดงกราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่ายและระยะทางที่ได้รับการลดขนาดโครงข่ายจากค่า R ในกรณีที่เกิดความเสียหาย จะเห็นได้ว่าค่า R มีค่ามากกว่าค่า R ในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ ดังนั้น ถ้าเรา

จะคิดถึงกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายด้วยนั้น เราจะใช้ค่า R ที่หาได้เท่ากับ 28.53 ในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งในเวลาทำงานปกติและเวลาที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย

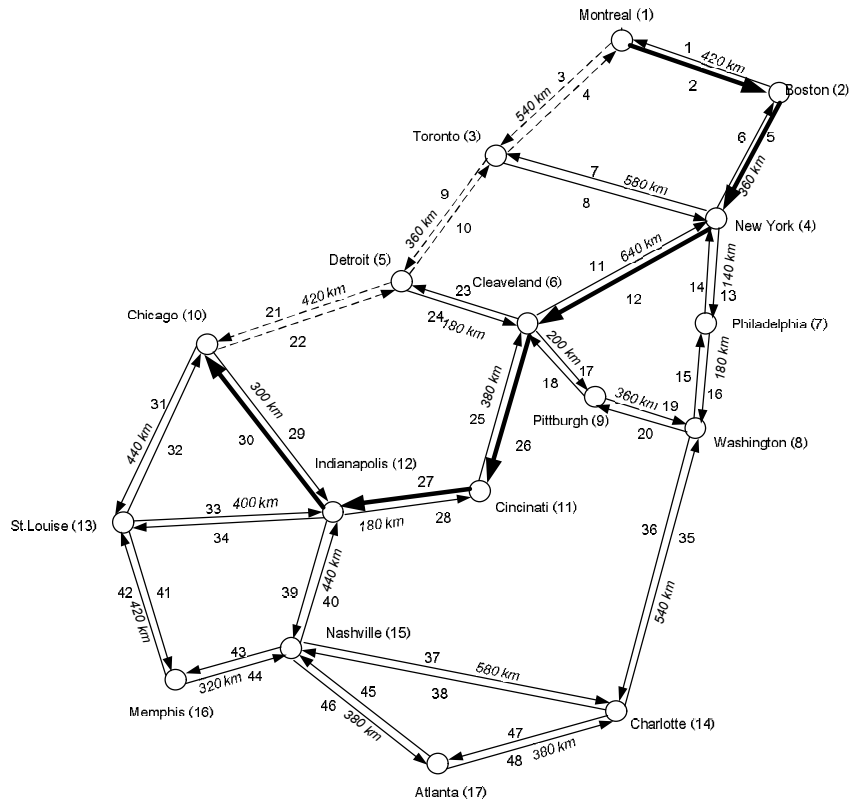
จากตารางที่ 5.2 จะพบว่ากรณีที่ทำงานปกตินั้น ไม่จำเป็นต้องวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงก็ได้ ซึ่งค่าตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสง (OPC_L และ OPC_R) นั้นเป็นแถบแรงเงาสีเทาหมด ซึ่งหมายความว่าช่วงในการวางนั้นมีระยะทางที่ยาวกว่าทราฟฟิกนั้นๆ

ตารางที่ 5.1 ค่า R ของโครงข่าย NARNet กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย

โหนดต้นทาง-โหนดปลายทาง	ทราฟฟิก[km]	X_1[km]	R	โหนดต้นทาง-โหนดปลายทาง	ทราฟฟิก[km]	X_1[km]	R
1-7	1820	540	7.88	9-17	1580	200	12.56
1-11	2840	420	21.29	10-2	3280	300	28.53
2-1	1480	360	8.09	10-15	1180	440	3.19
2-10	3280	420	25.97	10-17	2080	420	13.20
3-11	2640	580	15.75	11-1	2840	180	26.40
3-17	1900	360	12.56	11-15	2060	380	13.84
4-10	1740	140	15.54	12-1	1980	180	17.24
4-11	1840	580	7.24	12-2	2040	300	15.33
4-14	2220	640	10.01	12-17	2040	180	17.88
5-9	1620	360	9.58	13-1	2380	400	16.82
5-14	1740	420	9.58	13-2	2180	440	13.84
5-15	1860	180	15.97	13-9	2220	420	14.69
6-9	1320	640	0.43	14-2	3060	580	20.22
6-14	1580	380	8.73	14-10	1800	540	7.66
6-15	1680	200	13.62	14-16	2180	380	15.11
7-2	2240	180	20.01	15-1	2220	580	11.28
7-14	2360	140	22.14	15-2	2480	440	17.03
8-10	1820	180	15.54	16-1	2740	320	22.35
8-13	1860	540	8.30	16-9	2780	420	20.65
8-14	2140	360	15.11	17-2	2860	380	22.35
9-16	2780	360	21.93	17-16	2220	380	15.54



(ก) โครงข่ายเดิม



(ข) เมื่อเกิดข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายของกราฟฟิกระหว่างโหนด 1 ไปโหนด 10
รูปที่ 5.2 การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย

ตารางที่ 5.2 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย NARNet กรณีทำงานปกติภายใต้เงื่อนไขที่คิดกรณีข่าย
เชื่อมโยงเกิดความเสียหายสัญญาณ(R เท่ากับ 28.53)

(ก) โหนดที่ 1 - 4

โหนด 1	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 2	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
2	14.72	420	2	-39.62	54.34	1	14.72	420	1	-39.62	54.34
3	18.93	540	3	-37.51	56.44	3	32.95	940	5,7	-30.50	63.45
4	27.34	780	2,5	-33.31	60.65	4	12.62	360	5	-40.67	53.29
5	31.55	900	3,9	-31.20	62.75	5	41.36	1180	5,12,23	-26.30	67.66
6	37.85	1080	3,9,24	-28.05	65.90	6	35.05	1000	5,12	-29.45	64.50
7	32.25	920	2,5,13	-30.85	63.10	7	17.53	500	5,13	-38.21	55.74
8	38.56	1100	2,5,13,16	-27.70	66.25	8	23.83	680	5,13,16	-35.06	58.89
9	44.87	1280	3,9,24,17	-24.54	69.41	9	36.45	1040	5,13,16,20	-28.75	65.20
10	46.27	1320	3,9,21	-23.84	70.11	10	56.08	1600	5,12,23,21	-18.94	75.02
11	51.17	1460	3,9,24,26	-21.39	72.56	11	48.37	1380	5,12,26	-22.79	71.16
12	56.78	1620	3,9,21,29	-18.58	75.37	12	54.68	1560	5,12,26,27	-19.64	74.32
13	61.69	1760	3,9,21,31	-16.13	77.82	13	68.70	1960	5,12,26,27,34	-12.63	81.33
14	57.48	1640	2,5,13,16,36	-18.23	75.72	14	42.76	1220	5,13,16,36	-25.59	68.36
15	72.20	2060	3,9,21,29,39	-10.87	83.08	15	63.09	1800	5,13,16,36,38	-15.43	78.52
16	76.41	2180	3,9,21,31,41	-8.77	85.18	16	74.31	2120	5,13,16,36,38,43	-9.82	84.13
17	70.80	2020	2,5,13,16,36,47	-11.57	82.38	17	56.08	1600	5,13,16,36,47	-18.94	75.02
โหนด 3	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 4	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	18.93	540	4	-37.51	56.44	1	27.34	780	6,1	-33.31	60.65
2	32.95	940	8,6	-30.50	63.45	2	12.62	360	6	-40.67	53.29
4	20.33	580	8	-36.81	57.14	3	20.33	580	7	-36.81	57.14
5	12.62	360	9	-40.67	53.29	5	28.74	820	12,23	-32.61	61.35
6	18.93	540	9,24	-37.51	56.44	6	22.43	640	12	-35.76	58.19
7	25.24	720	8,13	-34.36	59.59	7	4.91	140	13	-44.52	49.43
8	31.55	900	8,13,16	-31.20	62.75	8	11.22	320	13,16	-41.37	52.58
9	25.94	740	9,24,17	-34.01	59.94	9	23.83	680	13,16,20	-35.06	58.89
10	27.34	780	9,21	-33.31	60.65	10	43.46	1240	12,23,21	-25.24	68.71
11	32.25	920	9,24,26	-30.85	63.10	11	35.75	1020	12,26	-29.10	64.85
12	37.85	1080	9,21,29	-28.05	65.90	12	42.06	1200	12,26,27	-25.95	68.01
13	42.76	1220	9,21,31	-25.59	68.36	13	56.08	1600	12,26,27,34	-18.94	75.02
14	50.47	1440	8,13,16,36	-21.74	72.21	14	30.14	860	13,16,36	-31.90	62.05
15	53.28	1520	9,21,29,39	-20.34	73.61	15	50.47	1440	13,16,36,38	-21.74	72.21
16	57.48	1640	9,21,31,41	-18.23	75.72	16	61.69	1760	13,16,36,38,43	-16.13	77.82
17	63.79	1820	8,13,16,36,47	-15.08	78.87	17	43.46	1240	13,16,36,47	-25.24	68.71

(ข) โหนดที่ 5 - 8

โนด 5	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 6	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	31.55	900	10,4	-31.20	62.75	1	37.85	1080	23,10,4	-28.05	65.90
2	41.36	1180	24,11,6	-26.30	67.66	2	35.05	1000	11,6	-29.45	64.50
3	12.62	360	10	-40.67	53.29	3	18.93	540	23,10	-37.51	56.44
4	28.74	820	24,11	-32.61	61.35	4	22.43	640	11	-35.76	58.19
6	6.31	180	24	-43.82	50.13	5	6.31	180	23	-43.82	50.13
7	32.25	920	24,17,19,15	-30.85	63.10	7	25.94	740	17,19,15	-34.01	59.94
8	25.94	740	24,17,19	-34.01	59.94	8	19.63	560	17,19	-37.16	56.79
9	13.32	380	24,17	-40.32	53.64	9	7.01	200	17	-43.47	50.48
10	14.72	420	21	-39.62	54.34	10	21.03	600	23,21	-36.46	57.49
11	19.63	560	24,26	-37.16	56.79	11	13.32	380	26	-40.32	53.64
12	25.24	720	21,29	-34.36	59.59	12	19.63	560	26,27	-37.16	56.79
13	30.14	860	21,31	-31.90	62.05	13	33.65	960	26,27,34	-30.15	63.80
14	44.87	1280	24,17,19,36	-24.54	69.41	14	38.56	1100	17,19,36	-27.70	66.25
15	40.66	1160	21,29,39	-26.65	67.31	15	35.05	1000	26,27,39	-29.45	64.50
16	44.87	1280	21,31,41	-24.54	69.41	16	46.27	1320	26,27,39,43	-23.84	70.11
17	53.98	1540	21,29,39,46	-19.99	73.97	17	48.37	1380	26,27,39,46	-22.79	71.16
โนด 7	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 8	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	32.25	920	14,6,1	-30.85	63.10	1	38.56	1100	15,14,6,1	-27.70	66.25
2	17.53	500	14,6	-38.21	55.74	2	23.83	680	15,14,6	-35.06	58.89
3	25.24	720	14,7	-34.36	59.59	3	31.55	900	15,14,7	-31.20	62.75
4	4.91	140	14	-44.52	49.43	4	11.22	320	15,14	-41.37	52.58
5	32.25	920	16,20,18,23	-30.85	63.10	5	25.94	740	20,18,23	-34.01	59.94
6	25.94	740	16,20,18	-34.01	59.94	6	19.63	560	20,18	-37.16	56.79
8	6.31	180	16	-43.82	50.13	7	6.31	180	15	-43.82	50.13
9	18.93	540	16,20	-37.51	56.44	9	12.62	360	20	-40.67	53.29
10	46.97	1340	16,20,18,23,21	-23.49	70.46	10	40.66	1160	20,18,23,21	-26.65	67.31
11	39.26	1120	16,20,18,26	-27.35	66.60	11	32.95	940	20,18,26	-30.50	63.45
12	45.57	1300	16,20,18,26,27	-24.19	69.76	12	39.26	1120	20,18,26,27	-27.35	66.60
13	59.59	1700	16,20,18,26,27,34	-17.18	76.77	13	53.28	1520	20,18,26,27,34	-20.34	73.61
14	25.24	720	16,36	-34.36	59.59	14	18.93	540	36	-37.51	56.44
15	45.57	1300	16,36,38	-24.19	69.76	15	39.26	1120	36,38	-27.35	66.60
16	56.78	1620	16,36,38,43	-18.58	75.37	16	50.47	1440	36,38,43	-21.74	72.21
17	38.56	1100	16,36,47	-27.70	66.25	17	32.25	920	36,47	-30.85	63.10

(ข) โหนดที่ 9 - 12

โนด 9	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 10	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	44.87	1280	18,23,10,4	-24.54	69.41	1	46.27	1320	22,10,4	-23.84	70.11
2	36.45	1040	19,15,14,6	-28.75	65.20	2	56.08	1600	22,24,11,6	-18.94	75.02
3	25.94	740	18,23,10	-34.01	59.94	3	27.34	780	22,10	-33.31	60.65
4	23.83	680	19,15,14	-35.06	58.89	4	43.46	1240	22,24,11	-25.24	68.71
5	13.32	380	18,23	-40.32	53.64	5	14.72	420	22	-39.62	54.34
6	7.01	200	18	-43.47	50.48	6	21.03	600	22,24	-36.46	57.49
7	18.93	540	19,15	-37.51	56.44	7	46.97	1340	22,24,17,19,15	-23.49	70.46
8	12.62	360	19	-40.67	53.29	8	40.66	1160	22,24,17,19	-26.65	67.31
10	28.04	800	18,23,21	-32.96	61.00	9	28.04	800	22,24,17	-32.96	61.00
11	20.33	580	18,26	-36.81	57.14	11	16.82	480	29,28	-38.56	55.39
12	26.64	760	18,26,27	-33.66	60.30	12	10.52	300	29	-41.72	52.23
13	40.66	1160	18,26,27,34	-26.65	67.31	13	15.42	440	31	-39.26	54.69
14	31.55	900	19,36	-31.20	62.75	14	46.27	1320	29,39,37	-23.84	70.11
15	42.06	1200	18,26,27,39	-25.95	68.01	15	25.94	740	29,39	-34.01	59.94
16	53.28	1520	18,26,27,39,43	-20.34	73.61	16	30.14	860	31,41	-31.90	62.05
17	44.87	1280	19,36,47	-24.54	69.41	17	39.26	1120	29,39,46	-27.35	66.60
11	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 12	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	51.17	1460	25,23,10,4	-21.39	72.56	1	56.78	1620	30,22,10,4	-18.58	75.37
2	48.37	1380	25,11,6	-22.79	71.16	2	54.68	1560	28,25,11,6	-19.64	74.32
3	32.25	920	25,23,10	-30.85	63.10	3	37.85	1080	30,22,10	-28.05	65.90
4	35.75	1020	25,11	-29.10	64.85	4	42.06	1200	28,25,11	-25.95	68.01
5	19.63	560	25,23	-37.16	56.79	5	25.24	720	30,22	-34.36	59.59
6	13.32	380	25	-40.32	53.64	6	19.63	560	28,25	-37.16	56.79
7	39.26	1120	25,17,19,15	-27.35	66.60	7	45.57	1300	28,25,17,19,15	-24.19	69.76
8	32.95	940	25,17,19	-30.50	63.45	8	39.26	1120	28,25,17,19	-27.35	66.60
9	20.33	580	25,17	-36.81	57.14	9	26.64	760	28,25,17	-33.66	60.30
10	16.82	480	27,30	-38.56	55.39	10	10.52	300	30	-41.72	52.23
12	6.31	180	27	-43.82	50.13	11	6.31	180	28	-43.82	50.13
13	20.33	580	27,34	-36.81	57.14	13	14.02	400	34	-39.97	53.99
14	42.06	1200	27,39,37	-25.95	68.01	14	35.75	1020	39,37	-29.10	64.85
15	21.73	620	27,39	-36.11	57.84	15	15.42	440	39	-39.26	54.69
16	32.95	940	27,39,43	-30.50	63.45	16	26.64	760	39,43	-33.66	60.30
17	35.05	1000	27,39,46	-29.45	64.50	17	28.74	820	39,46	-32.61	61.35

(ข) โหนดที่ 13 - 17

โหนด 13	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 14	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	61.69	1760	32,22,10,4	-16.13	77.82	1	57.48	1640	35,15,14,6,1	-18.23	75.72
2	68.70	1960	33,28,25,11,6	-12.63	81.33	2	42.76	1220	35,15,14,6	-25.59	68.36
3	42.76	1220	32,22,10	-25.59	68.36	3	50.47	1440	35,15,14,7	-21.74	72.21
4	56.08	1600	33,28,25,11	-18.94	75.02	4	30.14	860	35,15,14	-31.90	62.05
5	30.14	860	32,22	-31.90	62.05	5	44.87	1280	35,20,18,23	-24.54	69.41
6	33.65	960	33,28,25	-30.15	63.80	6	38.56	1100	35,20,18	-27.70	66.25
7	59.59	1700	33,28,25,17,19,15	-17.18	76.77	7	25.24	720	35,15	-34.36	59.59
8	53.28	1520	33,28,25,17,19	-20.34	73.61	8	18.93	540	35	-37.51	56.44
9	40.66	1160	33,28,25,17	-26.65	67.31	9	31.55	900	35,20	-31.20	62.75
10	15.42	440	32	-39.26	54.69	10	46.27	1320	38,40,30	-23.84	70.11
11	20.33	580	33,28	-36.81	57.14	11	42.06	1200	38,40,28	-25.95	68.01
12	14.02	400	33	-39.97	53.99	12	35.75	1020	38,40	-29.10	64.85
14	46.27	1320	41,44,37	-23.84	70.11	13	46.27	1320	38,43,42	-23.84	70.11
15	25.94	740	41,44	-34.01	59.94	15	20.33	580	38	-36.81	57.14
16	14.72	420	41	-39.62	54.34	16	31.55	900	38,43	-31.20	62.75
17	39.26	1120	41,44,46	-27.35	66.60	17	13.32	380	47	-40.32	53.64
โหนด 15	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 16	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	72.20	2060	40,30,22,10,4	-10.87	83.08	1	76.41	2180	42,32,22,10,4	-8.77	85.18
2	63.09	1800	37,35,15,14,6	-15.43	78.52	2	74.31	2120	44,37,35,15,14,6	-9.82	84.13
3	53.28	1520	40,30,22,10	-20.34	73.61	3	57.48	1640	42,32,22,10	-18.23	75.72
4	50.47	1440	37,35,15,14	-21.74	72.21	4	61.69	1760	44,37,35,15,14	-16.13	77.82
5	40.66	1160	40,30,22	-26.65	67.31	5	44.87	1280	42,32,22	-24.54	69.41
6	35.05	1000	40,28,25	-29.45	64.50	6	46.27	1320	44,40,28,25	-23.84	70.11
7	45.57	1300	37,35,15	-24.19	69.76	7	56.78	1620	44,37,35,15	-18.58	75.37
8	39.26	1120	37,35	-27.35	66.60	8	50.47	1440	44,37,35	-21.74	72.21
9	42.06	1200	40,28,25,17	-25.95	68.01	9	53.28	1520	44,40,28,25,17	-20.34	73.61
10	25.94	740	40,30	-34.01	59.94	10	30.14	860	42,32	-31.90	62.05
11	21.73	620	40,28	-36.11	57.84	11	32.95	940	44,40,28	-30.50	63.45
12	15.42	440	40	-39.26	54.69	12	26.64	760	44,40	-33.66	60.30
13	25.94	740	43,42	-34.01	59.94	13	14.72	420	42	-39.62	54.34
14	20.33	580	37	-36.81	57.14	14	31.55	900	44,37	-31.20	62.75
16	11.22	320	43	-41.37	52.58	15	11.22	320	44	-41.37	52.58
17	13.32	380	46	-40.32	53.64	17	24.54	700	44,46	-34.71	59.24
โหนด 17	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R						
1	70.80	2020	48,35,15,14,6,1	-11.57	82.38						
2	56.08	1600	48,35,15,14,6	-18.94	75.02						
3	63.79	1820	48,35,15,14,7	-15.08	78.87						
4	43.46	1240	48,35,15,14	-25.24	68.71						
5	53.98	1540	45,40,30,22	-19.99	73.97						
6	48.37	1380	45,40,28,25	-22.79	71.16						
7	38.56	1100	48,35,15	-27.70	66.25						
8	32.25	920	48,35	-30.85	63.10						
9	44.87	1280	48,35,20	-24.54	69.41						
10	39.26	1120	45,40,30	-27.35	66.60						
11	35.05	1000	45,40,28	-29.45	64.50						
12	28.74	820	45,40	-32.61	61.35						
13	39.26	1120	45,43,42	-27.35	66.60						
14	13.32	380	48	-40.32	53.64						
15	13.32	380	45	-40.32	53.64						
16	24.54	700	45,43	-34.71	59.24						

ตารางที่ 5.3 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย NARNet กรณีข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายพร้อมทั้งลด

ขนาดโครงข่าย

(ก) โหนดที่ 1 - 4

โหนด 1	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 2	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R
2	51.88	1480	3,8,6	-21.04	72.91	1	51.88	1480	5,7,4	-21.04	72.91
3	47.67	1360	2,5,7	-23.14	70.81	3	33.65	960	1,3	-30.15	63.80
4	39.26	1120	3,8	-27.35	66.60	4	53.98	1540	1,3,8	-19.99	73.97
5	56.08	1600	2,5,12,23	-18.94	75.02	5	46.27	1320	1,3,9	-23.84	70.11
6	49.77	1420	2,5,12	-22.09	71.86	6	52.58	1500	1,3,9,24	-20.69	73.26
7	63.79	1820	3,9,24,17,19,15	-15.08	78.87	7	78.51	2240	1,3,9,24,17,19,15	-7.72	86.23
8	57.48	1640	3,9,24,17,19	-18.23	75.72	8	72.20	2060	1,3,9,24,17,19	-10.87	83.08
9	51.17	1460	2,5,13,16,20	-21.39	72.56	9	59.59	1700	1,3,9,24,17	-17.18	76.77
10	79.92	2280	2,5,12,26,27,30	-7.02	86.93	10	114.97	3280	1,3,8,13,16,20,18,26,27,30	10.51	104.46
11	99.54	2840	2,5,13,16,36,38,40,28	2.80	96.75	11	77.81	2220	1,3,9,21,29,28	-8.07	85.88
12	69.40	1980	2,5,12,26,27	-12.28	81.68	12	71.50	2040	1,3,9,21,29	-11.22	82.73
13	83.42	2380	2,5,12,26,27,34	-5.27	88.69	13	76.41	2180	1,3,9,21,31	-8.77	85.18
14	92.53	2640	3,9,21,29,39,37	-0.71	93.24	14	107.26	3060	1,3,9,21,29,39,37	6.65	100.60
15	77.81	2220	2,5,13,16,36,38	-8.07	85.88	15	86.93	2480	1,3,9,21,29,39	-3.51	90.44
16	96.04	2740	2,5,12,26,27,39,43	1.04	95.00	16	91.13	2600	1,3,9,21,31,41	-1.41	92.54
17	85.52	2440	3,9,21,29,39,46	-4.21	89.74	17	100.25	2860	1,3,9,21,29,39,46	3.15	97.10
โหนด 3	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 4	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R
1	47.67	1360	8,6,1	-23.14	70.81	1	39.26	1120	7,4	-27.35	66.60
2	33.65	960	4,2	-30.15	63.80	2	53.98	1540	7,4,2	-19.99	73.97
4	41.36	1180	9,24,11	-26.30	67.66	3	41.36	1180	12,23,10	-26.30	67.66
5	49.07	1400	8,12,23	-22.44	71.51	5	32.95	940	7,9	-30.50	63.45
6	42.76	1220	8,12	-25.59	68.36	6	30.84	880	13,16,20,18	-31.55	62.40
7	44.87	1280	9,24,17,19,15	-24.54	69.41	7	48.37	1380	12,17,19,15	-22.79	71.16
8	38.56	1100	9,24,17,19	-27.70	66.25	8	42.06	1200	12,17,19	-25.95	68.01
9	44.16	1260	8,13,16,20	-24.89	69.06	9	29.44	840	12,17	-32.25	61.70
10	72.91	2080	8,12,26,27,30	-10.52	83.43	10	60.99	1740	13,16,20,18,25,27,30	-16.48	77.47
11	92.53	2640	8,13,16,36,38,40,28	-0.71	93.24	11	64.49	1840	7,9,21,29,28	-14.73	79.22
12	62.39	1780	8,12,26,27	-15.78	78.17	12	58.18	1660	7,9,21,29	-17.88	76.07
13	76.41	2180	8,12,26,27,34	-8.77	85.18	13	63.09	1800	7,9,21,31	-15.43	78.52
14	73.61	2100	9,21,29,39,37	-10.17	83.78	14	77.81	2220	12,26,27,39,37	-8.07	85.88
15	70.80	2020	8,13,16,36,38	-11.57	82.38	15	57.48	1640	12,26,27,39	-18.23	75.72
16	82.02	2340	8,13,16,36,38,43	-5.97	87.99	16	70.80	2020	12,26,27,34,41	-11.57	82.38
17	66.60	1900	9,21,29,39,46	-13.68	80.27	17	70.80	2020	12,26,27,39,46	-11.57	82.38

(ข) โหนดที่ 5 - 8

โนด 5	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	โนด 6	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R
1	56.08	1600	24,11,6,1	-18.94	75.02	1	49.77	1420	11,6,1	-22.09	71.86
2	46.27	1320	10,4,2	-23.84	70.11	2	52.58	1500	23,10,4,2	-20.69	73.26
3	49.07	1400	24,11,7	-22.44	71.51	3	42.76	1220	11,7	-25.59	68.36
4	32.95	940	10,8	-30.50	63.45	4	30.84	880	17,19,15,14	-31.55	62.40
6	44.87	1280	21,29,28,25	-24.54	69.41	5	44.87	1280	26,27,30,22	-24.54	69.41
7	37.85	1080	10,8,13	-28.05	65.90	7	27.34	780	11,13	-33.31	60.65
8	44.16	1260	10,8,13,16	-24.89	69.06	8	33.65	960	11,13,16	-30.15	63.80
9	56.78	1620	10,8,13,16,20	-18.58	75.37	9	46.27	1320	11,13,16,20	-23.84	70.11
10	36.45	1040	24,26,27,30	-28.75	65.20	10	30.14	860	26,27,30	-31.90	62.05
11	31.55	900	21,29,28	-31.20	62.75	11	37.85	1080	23,21,29,28	-28.05	65.90
12	25.94	740	24,26,27	-34.01	59.94	12	31.55	900	23,21,29	-31.20	62.75
13	39.96	1140	24,26,27,34	-27.00	66.95	13	36.45	1040	23,21,31	-28.75	65.20
14	60.99	1740	21,29,39,37	-16.48	77.47	14	55.38	1580	26,27,39,37	-19.29	74.67
15	65.19	1860	24,17,19,36,38	-14.38	79.57	15	58.89	1680	17,19,36,38	-17.53	76.42
16	52.58	1500	24,26,27,39,43	-20.69	73.26	16	51.17	1460	23,21,31,41	-21.39	72.56
17	58.18	1660	24,17,19,36,47	-17.88	76.07	17	51.88	1480	17,19,36,47	-21.04	72.91
โนด 7	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	โนด 8	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R
1	63.79	1820	16,20,18,23,10,4	-15.08	78.87	1	57.48	1640	20,18,23,10,4	-18.23	75.72
2	78.51	2240	16,20,18,23,10,4,2	-7.72	86.23	2	72.20	2060	20,18,23,10,4,2	-10.87	83.08
3	44.87	1280	16,20,18,23,10	-24.54	69.41	3	38.56	1100	20,18,23,10	-27.70	66.25
4	48.37	1380	16,20,18,11	-22.79	71.16	4	42.06	1200	20,18,11	-25.95	68.01
5	37.85	1080	14,7,9	-28.05	65.90	5	44.16	1260	15,14,7,9	-24.89	69.06
6	27.34	780	14,12	-33.31	60.65	6	33.65	960	15,14,12	-30.15	63.80
8	46.97	1340	14,12,17,19	-23.49	70.46	7	46.97	1340	20,18,11,13	-23.49	70.46
9	34.35	980	14,12,17	-29.80	64.15	9	40.66	1160	15,14,12,17	-26.65	67.31
10	57.48	1640	14,12,26,27,30	-18.23	75.72	10	63.79	1820	15,14,12,26,27,30	-15.08	78.87
11	65.19	1860	14,12,23,21,29,28	-14.38	79.57	11	60.99	1740	36,38,40,28	-16.48	77.47
12	58.89	1680	14,12,23,21,29	-17.53	76.42	12	54.68	1560	36,38,40	-19.64	74.32
13	63.79	1820	14,12,23,21,31	-15.08	78.87	13	65.19	1860	36,38,43,42	-14.38	79.57
14	82.72	2360	14,12,26,27,39,37	-5.62	88.34	14	75.01	2140	20,18,26,27,39,37	-9.47	84.48
15	62.39	1780	14,12,26,27,39	-15.78	78.17	15	54.68	1560	20,18,26,27,39	-19.64	74.32
16	75.71	2160	14,12,26,27,34,41	-9.12	84.83	16	68.00	1940	20,18,26,27,34,41	-12.98	80.98
17	70.80	2020	14,12,26,27,39,46	-11.57	82.38	17	68.00	1940	20,18,26,27,39,46	-12.98	80.98

(ค) โหนดที่ 9 - 12

โหนด 9	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 10	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R
1	51.17	1460	19,15,14,6,1	-21.39	72.56	1	79.92	2280	29,28,25,11,6,1	-7.02	86.93
2	59.59	1700	18,23,10,4,2	-17.18	76.77	2	114.97	3280	29,28,25,17,19,15,14,7,4,2	10.51	104.46
3	44.16	1260	19,15,14,7	-24.89	69.06	3	72.91	2080	29,28,25,11,7	-10.52	83.43
4	29.44	840	18,11	-32.25	61.70	4	60.99	1740	29,28,25,17,19,15,14	-16.48	77.47
5	56.78	1620	19,15,14,7,9	-18.58	75.37	5	36.45	1040	29,28,25,23	-28.75	65.20
6	46.27	1320	19,15,14,12	-23.84	70.11	6	30.14	860	29,28,25	-31.90	62.05
7	34.35	980	18,11,13	-29.80	64.15	7	57.48	1640	29,28,25,11,13	-18.23	75.72
8	40.66	1160	18,11,13,16	-26.65	67.31	8	63.79	1820	29,28,25,11,13,16	-15.08	78.87
10	77.81	2220	19,15,14,12,26,27,30	-8.07	85.88	9	76.41	2180	29,28,25,11,13,16,20	-8.77	85.18
11	73.61	2100	19,36,38,40,28	-10.17	83.78	11	34.35	980	22,24,26	-29.80	64.15
12	67.30	1920	19,36,38,40	-13.33	80.62	12	29.44	840	31,33	-32.25	61.70
13	77.81	2220	19,36,38,43,42	-8.07	85.88	13	24.54	700	29,34	-34.71	59.24
14	62.39	1780	18,26,27,39,37	-15.78	78.17	14	59.59	1700	22,24,17,19,36	-17.18	76.77
15	51.88	1480	19,36,38	-21.04	72.91	15	41.36	1180	31,41,44	-26.30	67.66
16	97.44	2780	19,15,14,12,23,21,31,41	1.74	95.70	16	37.15	1060	29,39,43	-28.40	65.55
17	55.38	1580	18,26,27,39,46	-19.29	74.67	17	72.91	2080	22,24,17,19,36,47	-10.52	83.43
โหนด 11	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 12	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R
1	99.54	2840	27,39,37,35,15,14,6,1	2.80	96.75	1	69.40	1980	28,25,11,6,1	-12.28	81.68
2	77.81	2220	27,30,22,10,4,2	-8.07	85.88	2	71.50	2040	30,22,10,4,2	-11.22	82.73
3	92.53	2640	27,39,37,35,15,14,7	-0.71	93.24	3	62.39	1780	28,25,11,7	-15.78	78.17
4	64.49	1840	27,30,22,10,8	-14.73	79.22	4	58.18	1660	30,22,10,8	-17.88	76.07
5	31.55	900	27,30,22	-31.20	62.75	5	25.94	740	28,25,23	-34.01	59.94
6	37.85	1080	27,30,22,24	-28.05	65.90	6	31.55	900	30,22,24	-31.20	62.75
7	65.19	1860	27,30,22,24,11,13	-14.38	79.57	7	58.89	1680	30,22,24,11,13	-17.53	76.42
8	60.99	1740	27,39,37,35	-16.48	77.47	8	54.68	1560	39,37,35	-19.64	74.32
9	73.61	2100	27,39,37,35,20	-10.17	83.78	9	67.30	1920	39,37,35,20	-13.33	80.62
10	34.35	980	25,23,21	-29.80	64.15	10	29.44	840	34,32	-32.25	61.70
12	44.87	1280	25,23,21,29	-24.54	69.41	11	44.87	1280	30,22,24,26	-24.54	69.41
13	49.77	1420	25,23,21,31	-22.09	71.86	13	25.94	740	30,31	-34.01	59.94
14	51.88	1480	25,17,19,36	-21.04	72.91	14	58.18	1660	28,25,17,19,36	-17.88	76.07
15	72.20	2060	25,17,19,36,38	-10.87	83.08	15	39.96	1140	34,41,44	-27.00	66.95
16	64.49	1840	25,23,21,31,41	-14.73	79.22	16	28.74	820	34,41	-32.61	61.35
17	65.19	1860	25,17,19,36,47	-14.38	79.57	17	71.50	2040	28,25,17,19,36,47	-11.22	82.73

(ง) โหนดที่ 13 - 17

โหนด 13	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 14	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R
1	83.42	2380	33,28,25,11,6,1	-5.27	88.69	1	92.53	2640	38,40,30,22,10,4	-0.71	93.24
2	76.41	2180	32,22,10,4,2	-8.77	85.18	2	107.26	3060	38,40,30,22,10,4,2	6.65	100.60
3	76.41	2180	33,28,25,11,7	-8.77	85.18	3	73.61	2100	38,40,30,22,10	-10.17	83.78
4	63.09	1800	32,22,10,8	-15.43	78.52	4	77.81	2220	38,40,28,25,11	-8.07	85.88
5	39.96	1140	33,28,25,23	-27.00	66.95	5	60.99	1740	38,40,30,22	-16.48	77.47
6	36.45	1040	32,22,24	-28.75	65.20	6	55.38	1580	38,40,28,25	-19.29	74.67
7	63.79	1820	32,22,24,11,13	-15.08	78.87	7	82.72	2360	38,40,28,25,11,13	-5.62	88.34
8	65.19	1860	41,44,37,35	-14.38	79.57	8	75.01	2140	38,40,28,25,17,19	-9.47	84.48
9	77.81	2220	41,44,37,35,20	-8.07	85.88	9	62.39	1780	38,40,28,25,17	-15.78	78.17
10	24.54	700	33,30	-34.71	59.24	10	59.59	1700	35,20,18,23,21	-17.18	76.77
11	49.77	1420	32,22,24,26	-22.09	71.86	11	51.88	1480	35,20,18,26	-21.04	72.91
12	25.94	740	32,29	-34.01	59.94	12	58.18	1660	35,20,18,26,27	-17.88	76.07
14	56.08	1600	33,39,46,48	-18.94	75.02	13	56.08	1600	47,45,40,34	-18.94	75.02
15	29.44	840	33,39	-32.25	61.70	15	26.64	760	47,45	-33.66	60.30
16	40.66	1160	33,39,43	-26.65	67.31	16	70.80	2020	47,45,40,34,41	-11.57	82.38
17	63.09	1800	33,39,37,47	-15.43	78.52	17	33.65	960	38,46	-30.15	63.80
โหนด 15	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 16	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R
1	77.81	2220	37,35,15,14,6,1	-8.07	85.88	1	96.04	2740	44,40,28,25,11,6,1	1.04	95.00
2	86.93	2480	40,30,22,10,4,2	-3.51	90.44	2	91.13	2600	42,32,22,10,4,2	-1.41	92.54
3	70.80	2020	37,35,15,14,7	-11.57	82.38	3	82.02	2340	44,37,35,15,14,7	-5.97	87.99
4	57.48	1640	40,28,25,11	-18.23	75.72	4	70.80	2020	42,33,28,25,11	-11.57	82.38
5	65.19	1860	37,35,20,18,23	-14.38	79.57	5	52.58	1500	44,40,28,25,23	-20.69	73.26
6	58.89	1680	37,35,20,18	-17.53	76.42	6	51.17	1460	42,32,22,24	-21.39	72.56
7	62.39	1780	40,28,25,11,13	-15.78	78.17	7	75.71	2160	42,33,28,25,11,13	-9.12	84.83
8	54.68	1560	40,28,25,17,19	-19.64	74.32	8	68.00	1940	42,33,28,25,17,19	-12.98	80.98
9	51.88	1480	37,35,20	-21.04	72.91	9	97.44	2780	42,32,22,24,11,13,16,20	1.74	95.70
10	41.36	1180	43,42,32	-26.30	67.66	10	37.15	1060	44,40,30	-28.40	65.55
11	72.20	2060	37,35,20,18,26	-10.87	83.08	11	64.49	1840	42,32,22,24,26	-14.73	79.22
12	39.96	1140	43,42,33	-27.00	66.95	12	28.74	820	42,33	-32.61	61.35
13	29.44	840	40,34	-32.25	61.70	13	40.66	1160	44,40,34	-26.65	67.31
14	26.64	760	46,48	-33.66	60.30	14	70.80	2020	42,33,39,46,48	-11.57	82.38
16	44.16	1260	40,34,41	-24.89	69.06	15	44.16	1260	42,33,39	-24.89	69.06
17	33.65	960	37,47	-30.15	63.80	17	77.81	2220	42,33,39,37,47	-8.07	85.88
โหนด 17	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R						
1	85.52	2440	45,40,30,22,10,4	-4.21	89.74						
2	100.25	2860	45,40,30,22,10,4,2	3.15	97.10						
3	66.60	1900	45,40,30,22,10	-13.68	80.27						
4	70.80	2020	45,40,28,25,11	-11.57	82.38						
5	58.18	1660	48,35,20,18,23	-17.88	76.07						
6	51.88	1480	48,35,20,18	-21.04	72.91						
7	70.80	2020	45,40,28,25,11,13	-11.57	82.38						
8	68.00	1940	45,40,28,25,17,19	-12.98	80.98						
9	55.38	1580	45,40,28,25,17	-19.29	74.67						
10	72.91	2080	48,35,20,18,23,21	-10.52	83.43						
11	65.19	1860	48,35,20,18,26	-14.38	79.57						
12	71.50	2040	48,35,20,18,26,27	-11.22	82.73						
13	63.09	1800	48,38,40,34	-15.43	78.52						
14	33.65	960	45,37	-30.15	63.80						
15	33.65	960	48,38	-30.15	63.80						
16	77.81	2220	48,38,40,34,41	-8.07	85.88						

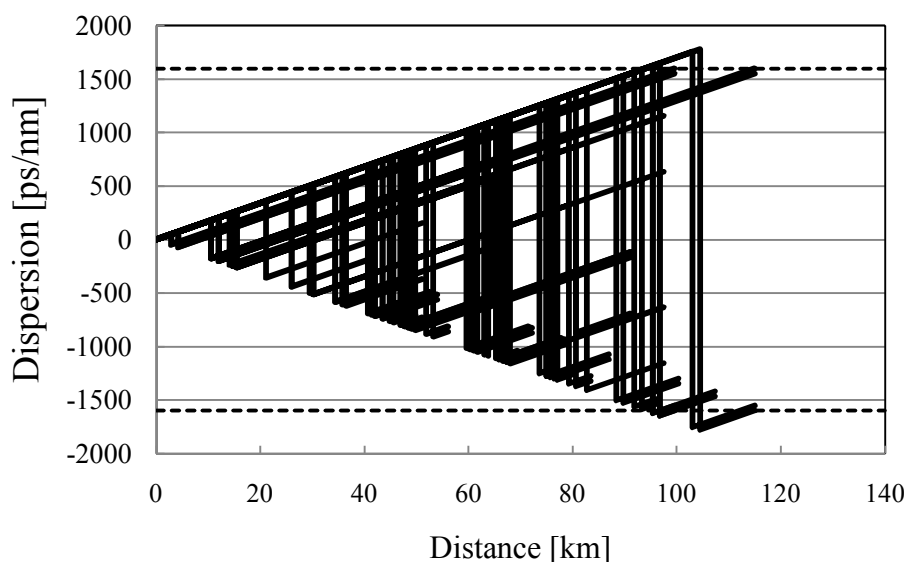
3.พิจารณาหาตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง โดยพิจารณาโดยยึดตามหลักการในบทที่ 4 ข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกในข่ายนั้นมากที่สุดคือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 1(10.51 – 11.92 km) และ 2 (2.80 - 4.21 km) จากนั้นจะพิจารณาข่ายต่อไปหลังจากตัดข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 1และ 2 ทั้ง คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 31 และ 32 ซึ่งข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ ต่างก็เหลือทราฟฟิกเพียง 1 ข่ายเชื่อมโยง แต่ข่ายเชื่อมโยงที่ 31 และ 32 จะมีผลกระทบต่อทราฟฟิกอื่นๆ ที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไปแล้ว สรุปจะได้จำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ต้องวาง 4 ตัว

- ข่ายเชื่อมโยงที่ 1 (10.51-11.92 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 2 (2.80-4.21 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 31 (0-15.42 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 32 (0-15.42 km)

เมื่อคิดถึงกรณีทำงานปกติแล้วจะสรุปได้ว่า

- จำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใช้ในเส้นใยแสงหลัก (working fiber) = 0 ตัว
- จำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใช้ในเส้นใยแสงสำรอง (protection fiber) = 4 ตัว

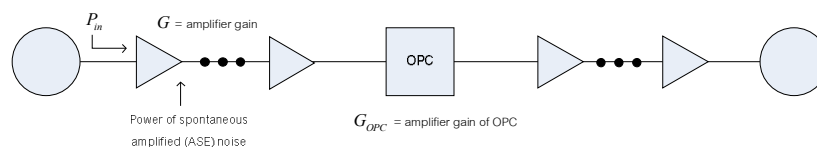
4.ตรวจสอบดิสเพอร์ชันของทุกทราฟฟิก รูปที่ 5.3 เป็นผลแสดงดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่าย NARNet กรณีมีการกู้คืนสัญญาณแล้ว



รูปที่ 5.3 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่าย NARNet กรณีมีการกู้คืนสัญญาณ

5.2 การวิเคราะห์ผล OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

เมื่อเราวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่าย จะทำให้กำลังสัญญาณที่ได้จากเครื่องส่งยุคเฟสแสงลดลงเนื่องจากปรากฏการณ์ FWM ทำให้สัญญาณคอนจูเกตที่ได้ มีพลังงานน้อยกว่าสัญญาณที่เข้าไปในเครื่องส่งยุคเฟสแสง จึงต้องใส่เครื่องขยายสัญญาณเพิ่มเติมจากเดิม ซึ่งเครื่องขยายสัญญาณนี้ นอกจากจะขยายสัญญาณข้อมูลแล้ว ยังขยายสัญญาณรบกวนอีกด้วย เป็นผลทำให้ค่าของ OSNR ของระบบลดลง ในหัวข้อนี้ จะทำการศึกษาว่าการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงจะทำให้ค่า OSNR เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร



รูปที่ 5.4 การคำนวณหา OSNR

5.2.1 การคำนวณหาค่า OSNR ของระบบ

OSNR คือ อัตราส่วนของสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณรบกวน ดังสมการที่ (5.1)[56]

$$OSNR = \frac{P_{in}}{2n_{sp}(G-1) \cdot hf \cdot \Delta f} \quad (5.1)$$

เมื่อ	P_{in}	คือ กำลังของสัญญาณเข้า (power input)
	n_{sp}	คือ spontaneous emission factor
	G	คือ อัตราขยายของตัวขยายสัญญาณ (amplifier gain)
	hf	คือ ค่าคงที่ของ Plank (Plank's constant) มีค่าเท่ากับ 6.62×10^{-34}
	Δf	คือ แบนด์วิดท์ของการวัด (bandwidth of measurement) มีค่าเท่ากับ 12.5 GHz

แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ เราจะพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง และโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง โดย OSNR ของโครงข่ายที่ติดตั้งเครื่องส่งยุคเฟสแสงไปแล้ว หาได้จาก

$$\frac{1}{OSNR_{final}} = \sum_i \frac{1}{OSNR_i} \quad (5.2)$$

เมื่อ $OSNR_{final}$ คือ OSNR รวมของระบบ
 $OSNR_i$ คือ OSNR ของแต่ละระยะ(stage)ที่มีการขยายสัญญาณ

ดังนั้น OSNR ของโครงข่ายที่ติดตั้งเครื่องส่งยุคเฟสแอสไปแล้วคือ

$$\frac{1}{OSNR_{new}} = \frac{1}{OSNR_{amp}} + \frac{1}{OSNR_{OPC}}$$

แทนค่าสมการ (5.1) จะได้

$$\frac{1}{OSNR_{new}} = \frac{2n_{sp}(G_{amp} - 1) \cdot hf \cdot \Delta f}{P_{in}} + \frac{2n_{sp}(G_{OPC} - 1) \cdot hf \cdot \Delta f}{P_{in}}$$

ดังนั้น

$$OSNR_{new} = \frac{P_{in}}{2n_{sp}(G_{amp} - 1) \cdot hf \cdot \Delta f + 2n_{sp}(G_{OPC} - 1) \cdot hf \cdot \Delta f} \quad (5.3)$$

เมื่อ G_{amp} คือ อัตราขยายทั้งหมดของเครื่องขยายสัญญาณที่ต้องใช้ในการส่งข้อมูล
 G_{OPC} คือ อัตราขยายของเครื่องขยายสัญญาณที่นำมาชดเชยสัญญาณที่ลดลงจากเครื่องส่งยุคเฟสแอส (dB)

ดังนั้น อัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแอส และโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแอส คือ

$$\frac{OSNR_{new}}{OSNR_{old}} = \frac{\frac{P_{in}}{2n_{sp}(G_{amp} - 1) \cdot hf \cdot \Delta f + 2n_{sp}(G_{OPC} - 1) \cdot hf \cdot \Delta f}}{\frac{P_{in}}{2n_{sp}(G_{amp} - 1) \cdot hf \cdot \Delta f}}$$

$$\frac{OSNR_{new}}{OSNR_{old}} = \frac{(G_{amp} - 1)}{(G_{amp} - 1) + (G_{OPC} - 1)} \quad (5.4)$$

ถ้าในกรณีมีเครื่องขยายสัญญาณ 2 ตัว จะได้อัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแอส และโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแอส

$$\frac{OSNR_{new}}{OSNR_{old}} = \frac{(G_{amp-link1} - 1) + (G_{amp-link2} - 1)}{\{(G_{amp-link1} - 1) + (G_{OPC} - 1)\}_{link1} + \{(G_{amp-link2} - 1) + (G_{OPC} - 1)\}_{link2}}$$

$$\frac{OSNR_{new}}{OSNR_{old}} = \frac{(G_{amp-link1+2} - 2)}{(G_{amp-link1+2} - 2) + (2)(G_{OPC} - 1)} \quad (5.5)$$

เมื่อ $G_{amp-link1}$ คือ อัตราขยายของเครื่องขยายสัญญาณตัวที่ 1

$G_{amp-link2}$ คือ อัตราขยายของเครื่องขยายสัญญาณตัวที่ 2

$G_{amp-link1+2}$ คือ อัตราขยายทั้งหมดของเครื่องขยายสัญญาณในระบบ

จากสมการที่ (5.5) เราสามารถนำมาสรุปเป็นสูตรทั่วไปได้ดังนี้

$$\frac{OSNR_{new}}{OSNR_{old}} = \frac{(G_{amp} - n)}{(G_{amp} - n) + (n)(G_{OPC} - 1)} \quad (5.6)$$

เมื่อ n คือ จำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสง

เราสามารถหาค่าอัตราขยายสัญญาณก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสงโดยคำนวณจากสมการที่ (5.7)

$$G = \alpha \times L \quad (5.7)$$

เมื่อ G คือ อัตราขยายสัญญาณ

α คือ attenuation coefficient มีค่าเท่ากับ 0.275 dB/km หรือ 1.065 เท่า [41]

L คือ ระยะทาง (km)

จากนั้น เราจะเปรียบเทียบอัตราส่วน OSNR ระหว่างโครงข่ายที่ใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีที่คิดค้นขึ้นมากับโครงข่ายที่ใช้จำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่มากที่สุด โดยอัตราส่วน OSNR ของโครงข่ายที่ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงที่มากที่สุดนั้น จะคิดจำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใช้ตามจำนวนข่ายเชื่อมโยงในทราฟฟิกันนั้นๆ แล้วนำมาคำนวณหา OSNR โดยใช้สมการที่ (5.6) ต่อไป

5.2.2 ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างที่ 1 จากโครงข่ายตัวอย่างแบบแพร่และเลือกสัญญาณในบพที่ 3

1. **หาค่ากำลังขยายของทุกทราฟฟิก** เราจะหาค่าอัตราขยายก่อนเข้าเครื่องส่งยูคเฟสแสงได้จากสมการที่ (5.7) เช่น กำลังขยายจากสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 2 มีค่าเท่ากับ

$$G = 1.065 \times 4.95 = 5.272 \text{ เท่า}$$

2. **คำนวณหาอัตราส่วน OSNR** จากสมการที่ (5.6) แทนค่า G_{OPC} เท่ากับ 33.88 เท่า (15.3 dB) [26][36][54] แล้วนำไปคำนวณอัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยูคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยูคเฟสแสง เช่น

อัตราส่วน OSNR ของทราฟฟิกระหว่างสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 5 คือ

$$\frac{OSNR_{new}}{OSNR_{old}} = \frac{(105.446 - 1)}{(105.446 - 1) + (1)(33.88 - 1)} \text{ เท่า}$$

$$\frac{OSNR_{new}}{OSNR_{old}} = 0.761 \text{ เท่า}$$

ตารางที่ 5.4 แสดงอัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยูคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยูคเฟสแสง ในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ ของทุกทราฟฟิก

ตารางที่ 5.4 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายตัวอย่างแบบแพร่และเลือกสัญญาณ

สถานีที่ 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	สถานีที่ 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
สถานีที่ 2	4.95	100	5.272	0	1.000	สถานีที่ 1	43.32	875	46.132	0	1.000
สถานีที่ 3	43.32	875	46.132	0	1.000	สถานีที่ 2	43.32	875	46.132	0	1.000
สถานีที่ 4	43.32	875	46.132	0	1.000	สถานีที่ 3	7.43	150	7.908	0	1.000
สถานีที่ 5	99.01	2000	105.446	1	0.761	สถานีที่ 5	102.72	2075	109.400	1	0.767
สถานีที่ 6	99.01	2000	105.446	1	0.761	สถานีที่ 6	102.72	2075	109.400	1	0.767
สถานีที่ 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	สถานีที่ 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
สถานีที่ 1	4.95	100	5.272	0	1.000	สถานีที่ 1	99.01	2000	105.446	1	0.761
สถานีที่ 3	43.32	875	46.132	0	1.000	สถานีที่ 2	99.01	2000	105.446	1	0.761
สถานีที่ 4	43.32	875	46.132	0	1.000	สถานีที่ 3	102.72	2075	109.400	1	0.767
สถานีที่ 5	99.01	2000	105.446	1	0.761	สถานีที่ 4	102.72	2075	109.400	1	0.767
สถานีที่ 6	99.01	2000	105.446	1	0.761	สถานีที่ 6	9.90	200	10.545	0	1.000
สถานีที่ 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	สถานีที่ 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
สถานีที่ 1	43.32	875	46.132	0	1.000	สถานีที่ 1	99.01	2000	105.446	1	0.761
สถานีที่ 2	43.32	875	46.132	0	1.000	สถานีที่ 2	99.01	2000	105.446	1	0.761
สถานีที่ 4	7.43	150	7.908	0	1.000	สถานีที่ 3	102.72	2075	109.400	1	0.767
สถานีที่ 5	102.72	2075	109.400	1	0.767	สถานีที่ 4	102.72	2075	109.400	1	0.767
สถานีที่ 6	102.72	2075	109.400	1	0.767	สถานีที่ 5	9.90	200	10.545	0	1.000

จากตารางที่ 5.4 อัตราส่วน OSNR จะมีค่าตกลงมามากที่สุดเท่ากับ 0.761 เท่า จะเห็นได้ว่า การใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่าย จะทำให้ OSNR ของระบบมีค่าลดลง

จากบทที่ 3 จะหาอัตราส่วน OSNR ของกรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่กลางข่าย เชื่อมโยงได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายตัวอย่างแบบแพร่และเลือกสัญญาณกรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่กลางข่ายเชื่อมโยง

สถานีที่ 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	สถานีที่ 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
สถานีที่ 2	4.95	100	5.272	2	0.047	สถานีที่ 1	43.32	875	46.132	4	0.243
สถานีที่ 3	43.32	875	46.132	4	0.243	สถานีที่ 2	43.32	875	46.132	4	0.243
สถานีที่ 4	43.32	875	46.132	4	0.243	สถานีที่ 3	7.43	150	7.908	2	0.082
สถานีที่ 5	99.01	2000	105.446	4	0.435	สถานีที่ 5	102.72	2075	109.400	4	0.445
สถานีที่ 6	99.01	2000	105.446	4	0.435	สถานีที่ 6	102.72	2075	109.400	4	0.445
สถานีที่ 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	สถานีที่ 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
สถานีที่ 1	4.95	100	5.272	2	0.047	สถานีที่ 1	99.01	2000	105.446	4	0.435
สถานีที่ 3	43.32	875	46.132	4	0.243	สถานีที่ 2	99.01	2000	105.446	4	0.435
สถานีที่ 4	43.32	875	46.132	4	0.243	สถานีที่ 3	102.72	2075	109.400	4	0.445
สถานีที่ 5	99.01	2000	105.446	4	0.435	สถานีที่ 4	102.72	2075	109.400	4	0.445
สถานีที่ 6	99.01	2000	105.446	4	0.435	สถานีที่ 6	9.90	200	10.545	2	0.115
สถานีที่ 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	สถานีที่ 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
สถานีที่ 1	43.32	875	46.132	4	0.243	สถานีที่ 1	99.01	2000	105.446	4	0.435
สถานีที่ 2	43.32	875	46.132	4	0.243	สถานีที่ 2	99.01	2000	105.446	4	0.435
สถานีที่ 4	7.43	150	7.908	2	0.082	สถานีที่ 3	102.72	2075	109.400	4	0.445
สถานีที่ 5	102.72	2075	109.400	4	0.445	สถานีที่ 4	102.72	2075	109.400	4	0.445
สถานีที่ 6	102.72	2075	109.400	4	0.445	สถานีที่ 5	9.90	200	10.545	2	0.115

จากตารางที่ 5.5 จะพบว่า อัตราส่วน OSNR มีค่าตกลงมามากที่สุดเท่ากับ 0.047 เท่า ตัวอย่างที่ 2 โครงข่าย OPEN

ตารางที่ 5.6 แสดงอัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่าย OPEN จากการคำนวณตามสมการที่(5.6) และ (5.7) ซึ่งจะได้อัตราส่วนระหว่าง OSNR ตกลงมามากที่สุดเท่ากับ 0.549 เท่า ส่วนในกรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกลางข่ายเชื่อมโยง OSNR จะมีค่าตกลงไปเท่ากับ 0.144 เท่า

ตัวอย่างที่ 3 โครงข่าย ERNet

ตารางที่ 5.8 แสดงอัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่าย ERNet

ตารางที่ 5.6 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย OPEN

1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
2	25.10	123	26.73	0	1.000	1	25.10	123	26.73	0	1.000
3	31.63	155	33.69	0	1.000	3	30.82	151	32.82	0	1.000
4	56.73	278	60.42	0	1.000	4	55.92	274	59.55	0	1.000
5	93.06	456	99.11	0	1.000	5	92.24	452	98.24	0	1.000
6	97.55	478	103.89	1	0.758	6	96.73	474	103.02	1	0.756
7	70.20	344	74.77	1	0.692	7	69.39	340	73.90	1	0.689
8	76.33	374	81.29	1	0.709	8	75.51	370	80.42	1	0.707
9	117.96	578	125.63	1	0.791	9	117.14	574	124.76	1	0.790
10	145.51	713	154.97	1	0.824	10	144.69	709	154.10	1	0.823
3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	31.63	155	33.69	0	1.000	1	56.73	278	60.42	0	1.000
2	30.82	151	32.82	0	1.000	2	55.92	274	59.55	0	1.000
4	25.10	123	26.73	0	1.000	3	25.10	123	26.73	0	1.000
5	61.43	301	65.42	0	1.000	5	36.33	178	38.69	0	1.000
6	65.92	323	70.20	1	0.678	6	91.02	446	96.94	1	0.745
7	38.57	189	41.08	1	0.549	7	63.67	312	67.81	1	0.670
8	44.69	219	47.60	1	0.586	8	69.80	342	74.33	1	0.690
9	86.33	423	91.94	1	0.734	9	111.43	546	118.67	1	0.782
10	113.88	558	121.28	1	0.785	10	138.98	681	148.01	1	0.817
5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	93.06	456	99.11	0	1.000	1	97.55	478	103.89	1	0.758
2	92.24	452	98.24	0	1.000	2	96.73	474	103.02	1	0.756
3	61.43	301	65.42	0	1.000	3	65.92	323	70.20	1	0.678
4	36.33	178	38.69	0	1.000	4	91.02	446	96.94	1	0.745
6	62.86	308	66.94	1	0.667	5	62.86	308	66.94	1	0.667
7	100.00	490	106.50	1	0.762	7	69.59	341	74.12	1	0.690
8	106.12	520	113.02	1	0.773	8	63.47	311	67.59	1	0.669
9	84.69	415	90.20	1	0.731	9	21.84	107	23.26	1	0.404
10	110.82	543	118.02	1	0.781	10	47.96	235	51.08	0	1.000
7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	70.20	344	74.77	1	0.692	1	76.33	374	81.29	1	0.709
2	69.39	340	73.90	1	0.689	2	75.51	370	80.42	1	0.707
3	38.57	189	41.08	1	0.549	3	44.69	219	47.60	1	0.586
4	63.67	312	67.81	1	0.670	4	69.80	342	74.33	1	0.690
5	100.00	490	106.50	1	0.762	5	106.12	520	113.02	1	0.773
6	69.59	341	74.12	0	1.000	6	63.47	311	67.59	0	1.000
8	6.12	30	6.52	0	1.000	7	6.12	30	6.52	0	1.000
9	47.76	234	50.86	0	1.000	9	41.63	204	44.34	0	1.000
10	85.71	420	91.29	0	1.000	10	79.59	390	84.77	0	1.000
9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	117.96	578	125.63	1	0.791	1	145.51	713	154.97	1	0.824
2	117.14	574	124.76	1	0.790	2	144.69	709	154.10	1	0.823
3	86.33	423	91.94	1	0.734	3	113.88	558	121.28	1	0.785
4	111.43	546	118.67	1	0.782	4	138.98	681	148.01	1	0.817
5	84.69	415	90.20	1	0.731	5	110.82	543	118.02	1	0.781
6	21.84	107	23.26	0	1.000	6	47.96	235	51.08	0	1.000
7	47.76	234	50.86	0	1.000	7	85.71	420	91.29	0	1.000
8	41.63	204	44.34	0	1.000	8	79.59	390	84.77	0	1.000
10	37.96	186	40.43	0	1.000	9	37.96	186	40.43	0	1.000

ตารางที่ 5.7 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย OPEN กรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่กลางข่ายเชื่อมโยง

1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
2	25.10	123	26.73	1	0.439	1	25.10	123	26.73	1	0.439
3	31.63	155	33.69	1	0.499	3	30.82	151	32.82	1	0.492
4	56.73	278	60.42	2	0.470	4	55.92	274	59.55	2	0.467
5	93.06	456	99.11	3	0.494	5	92.24	452	98.24	3	0.491
6	97.55	478	103.89	2	0.608	6	96.73	474	103.02	2	0.606
7	70.20	344	74.77	2	0.525	7	69.39	340	73.90	2	0.522
8	76.33	374	81.29	3	0.442	8	75.51	370	80.42	3	0.440
9	117.96	578	125.63	4	0.480	9	117.14	574	124.76	4	0.479
10	145.51	713	154.97	3	0.606	10	144.69	709	154.10	3	0.605
3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	31.63	155	33.69	1	0.499	1	56.73	278	60.42	2	0.470
2	30.82	151	32.82	1	0.492	2	55.92	274	59.55	2	0.467
4	25.10	123	26.73	1	0.439	3	25.10	123	26.73	1	0.439
5	61.43	301	65.42	2	0.491	5	36.33	178	38.69	1	0.534
6	65.92	323	70.20	1	0.678	6	91.02	446	96.94	2	0.591
7	38.57	189	41.08	1	0.549	7	63.67	312	67.81	2	0.500
8	44.69	219	47.60	2	0.409	8	69.80	342	74.33	3	0.420
9	86.33	423	91.94	3	0.474	9	111.43	546	118.67	4	0.466
10	113.88	558	121.28	2	0.645	10	138.98	681	148.01	3	0.595
5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	93.06	456	99.11	3	0.494	1	97.55	478	103.89	2	0.608
2	92.24	452	98.24	3	0.491	2	96.73	474	103.02	2	0.606
3	61.43	301	65.42	2	0.491	3	65.92	323	70.20	1	0.678
4	36.33	178	38.69	1	0.534	4	91.02	446	96.94	2	0.591
6	62.86	308	66.94	1	0.667	5	62.86	308	66.94	1	0.667
7	100.00	490	106.50	3	0.512	7	69.59	341	74.12	3	0.419
8	106.12	520	113.02	4	0.453	8	63.47	311	67.59	2	0.499
9	84.69	415	90.20	2	0.573	9	21.84	107	23.26	1	0.404
10	110.82	543	118.02	2	0.638	10	47.96	235	51.08	1	0.604
7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	70.20	344	74.77	2	0.525	1	76.33	374	81.29	3	0.442
2	69.39	340	73.90	2	0.522	2	75.51	370	80.42	3	0.440
3	38.57	189	41.08	1	0.549	3	44.69	219	47.60	2	0.409
4	63.67	312	67.81	2	0.500	4	69.80	342	74.33	3	0.420
5	100.00	490	106.50	3	0.512	5	106.12	520	113.02	4	0.453
6	69.59	341	74.12	3	0.419	6	63.47	311	67.59	2	0.499
8	6.12	30	6.52	1	0.144	7	6.12	30	6.52	1	0.144
9	47.76	234	50.86	2	0.426	9	41.63	204	44.34	1	0.569
10	85.71	420	91.29	3	0.472	10	79.59	390	84.77	2	0.557
9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	117.96	578	125.63	4	0.480	1	145.51	713	154.97	3	0.606
2	117.14	574	124.76	4	0.479	2	144.69	709	154.10	3	0.605
3	86.33	423	91.94	3	0.474	3	113.88	558	121.28	2	0.645
4	111.43	546	118.67	4	0.466	4	138.98	681	148.01	3	0.595
5	84.69	415	90.20	2	0.573	5	110.82	543	118.02	2	0.638
6	21.84	107	23.26	1	0.404	6	47.96	235	51.08	1	0.604
7	47.76	234	50.86	2	0.426	7	85.71	420	91.29	3	0.472
8	41.63	204	44.34	1	0.569	8	79.59	390	84.77	2	0.557
10	37.96	186	40.43	1	0.545	9	37.96	186	40.43	1	0.545

ตารางที่ 5.8 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย ERNet

(ก) โหนดที่ 1 - 6

โหนด 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
2	27.98	336	29.80	0	1.000	1	27.98	336	29.80	0	1.000
3	33.97	408	36.18	0	1.000	3	51.96	624	55.33	0	1.000
4	59.95	720	63.85	0	1.000	4	67.94	816	72.36	0	1.000
5	89.93	1080	95.77	1	0.742	5	97.92	1176	104.28	1	0.759
6	46.96	564	50.01	0	1.000	6	38.97	468	41.50	0	1.000
7	74.94	900	79.81	1	0.706	7	82.93	996	88.32	1	0.726
8	88.93	1068	94.71	1	0.740	8	96.92	1164	103.22	1	0.757
9	103.91	1248	110.67	1	0.769	9	111.91	1344	119.18	1	0.782
10	76.94	924	81.94	1	0.711	10	68.94	828	73.42	1	0.688
11	107.91	1296	114.92	1	0.776	11	99.92	1200	106.41	1	0.762
12	118.90	1428	126.63	1	0.793	12	110.91	1332	118.12	1	0.781
13	129.89	1560	138.33	1	0.807	13	121.90	1464	129.82	1	0.797
14	108.91	1308	115.99	1	0.778	14	100.92	1212	107.48	1	0.764
15	121.90	1464	129.82	1	0.797	15	113.91	1368	121.31	1	0.785
โหนด 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	33.97	408	36.18	0	1.000	1	59.95	720	63.85	0	1.000
2	51.96	624	55.33	0	1.000	2	67.94	816	72.36	0	1.000
4	41.97	504	44.69	0	1.000	3	41.97	504	44.69	0	1.000
5	71.94	864	76.62	1	0.697	5	29.98	360	31.92	1	0.485
6	12.99	156	13.83	0	1.000	6	28.98	348	30.86	0	1.000
7	56.95	684	60.65	1	0.645	7	14.99	180	15.96	1	0.313
8	70.94	852	75.55	1	0.694	8	28.98	348	30.86	1	0.476
9	85.93	1032	91.51	1	0.734	9	43.96	528	46.82	1	0.582
10	42.96	516	45.76	1	0.576	10	35.97	432	38.31	1	0.532
11	73.94	888	78.74	1	0.703	11	58.95	708	62.78	1	0.653
12	84.93	1020	90.45	1	0.731	12	77.94	936	83.00	1	0.714
13	95.92	1152	102.15	1	0.755	13	88.93	1068	94.71	1	0.740
14	74.94	900	79.81	1	0.706	14	67.94	816	72.36	1	0.685
15	87.93	1056	93.64	1	0.738	15	72.94	876	77.68	1	0.700
โหนด 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	89.93	1080	95.77	1	0.742	1	46.96	564	50.01	0	1.000
2	97.92	1176	104.28	1	0.759	2	38.97	468	41.50	0	1.000
3	71.94	864	76.62	1	0.697	3	12.99	156	13.83	0	1.000
4	29.98	360	31.92	1	0.485	4	28.98	348	30.86	0	1.000
6	58.95	708	62.78	1	0.653	5	58.95	708	62.78	1	0.653
7	44.96	540	47.89	2	0.411	7	43.96	528	46.82	1	0.582
8	46.96	564	50.01	0	1.000	8	57.95	696	61.72	1	0.649
9	31.97	384	34.05	0	1.000	9	72.94	876	77.68	1	0.700
10	65.95	792	70.23	2	0.509	10	29.98	360	31.92	1	0.485
11	46.96	564	50.01	0	1.000	11	60.95	732	64.91	1	0.660
12	107.91	1296	114.92	2	0.632	12	71.94	864	76.62	1	0.697
13	108.91	1308	115.99	1	0.778	13	82.93	996	88.32	1	0.726
14	87.93	1056	93.64	1	0.738	14	61.95	744	65.98	1	0.664
15	60.95	732	64.91	0	1.000	15	74.94	900	79.81	1	0.706

(ก) โหนดที่ 7 - 12

โหนด 7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	74.94	900	79.81	1	0.706	1	88.93	1068	94.71	1	0.740
2	82.93	996	88.32	1	0.726	2	96.92	1164	103.22	1	0.757
3	56.95	684	60.65	1	0.645	3	70.94	852	75.55	1	0.694
4	14.99	180	15.96	1	0.313	4	28.98	348	30.86	1	0.476
5	44.96	540	47.89	2	0.411	5	46.96	564	50.01	0	1.000
6	43.96	528	46.82	1	0.582	6	57.95	696	61.72	1	0.649
8	13.99	168	14.90	0	1.000	7	13.99	168	14.90	0	1.000
9	28.98	348	30.86	0	1.000	9	14.99	180	15.96	0	1.000
10	20.98	252	22.35	0	1.000	10	34.97	420	37.24	0	1.000
11	43.96	528	46.82	0	1.000	11	29.98	360	31.92	0	1.000
12	62.95	756	67.04	0	1.000	12	76.94	924	81.94	0	1.000
13	73.94	888	78.74	0	1.000	13	87.93	1056	93.64	0	1.000
14	52.96	636	56.40	0	1.000	14	66.94	804	71.30	0	1.000
15	57.95	696	61.72	0	1.000	15	43.96	528	46.82	0	1.000
โหนด 9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	103.91	1248	110.67	1	0.769	1	76.94	924	81.94	1	0.711
2	111.91	1344	119.18	1	0.782	2	68.94	828	73.42	1	0.688
3	85.93	1032	91.51	1	0.734	3	42.96	516	45.76	1	0.576
4	43.96	528	46.82	1	0.582	4	35.97	432	38.31	1	0.532
5	31.97	384	34.05	0	1.000	5	65.95	792	70.23	2	0.509
6	72.94	876	77.68	1	0.700	6	29.98	360	31.92	1	0.485
7	28.98	348	30.86	0	1.000	7	20.98	252	22.35	0	1.000
8	14.99	180	15.96	0	1.000	8	34.97	420	37.24	0	1.000
10	45.96	552	48.95	0	1.000	9	45.96	552	48.95	0	1.000
11	14.99	180	15.96	0	1.000	11	30.97	372	32.99	0	1.000
12	87.93	1056	93.64	0	1.000	12	41.97	504	44.69	0	1.000
13	76.94	924	81.94	1	0.711	13	52.96	636	56.40	0	1.000
14	55.95	672	59.59	1	0.641	14	31.97	384	34.05	0	1.000
15	28.98	348	30.86	0	1.000	15	44.96	540	47.89	0	1.000
โหนด 11	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 12	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	107.91	1296	114.92	1	0.776	1	118.90	1428	126.63	1	0.793
2	99.92	1200	106.41	1	0.762	2	110.91	1332	118.12	1	0.781
3	73.94	888	78.74	1	0.703	3	84.93	1020	90.45	1	0.731
4	58.95	708	62.78	1	0.653	4	77.94	936	83.00	1	0.714
5	46.96	564	50.01	0	1.000	5	107.91	1296	114.92	2	0.632
6	60.95	732	64.91	1	0.660	6	71.94	864	76.62	1	0.697
7	43.96	528	46.82	0	1.000	7	62.95	756	67.04	0	1.000
8	29.98	360	31.92	0	1.000	8	76.94	924	81.94	0	1.000
9	14.99	180	15.96	0	1.000	9	87.93	1056	93.64	0	1.000
10	30.97	372	32.99	0	1.000	10	41.97	504	44.69	0	1.000
12	72.94	876	77.68	0	1.000	11	72.94	876	77.68	0	1.000
13	61.95	744	65.98	1	0.664	13	39.97	480	42.56	0	1.000
14	40.97	492	43.63	1	0.565	14	60.95	732	64.91	0	1.000
15	13.99	168	14.90	0	1.000	15	86.93	1044	92.58	0	1.000

(ข) โหนดที่ 13 - 15

โหนด 13	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 14	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	129.89	1560	138.33	1	0.807	1	108.91	1308	115.99	1	0.778
2	121.90	1464	129.82	1	0.797	2	100.92	1212	107.48	1	0.764
3	95.92	1152	102.15	1	0.755	3	74.94	900	79.81	1	0.706
4	88.93	1068	94.71	1	0.740	4	67.94	816	72.36	1	0.685
5	108.91	1308	115.99	1	0.778	5	87.93	1056	93.64	1	0.738
6	82.93	996	88.32	1	0.726	6	61.95	744	65.98	1	0.664
7	73.94	888	78.74	0	1.000	7	52.96	636	56.40	0	1.000
8	87.93	1056	93.64	0	1.000	8	66.94	804	71.30	0	1.000
9	76.94	924	81.94	1	0.711	9	55.95	672	59.59	1	0.641
10	52.96	636	56.40	0	1.000	10	31.97	384	34.05	0	1.000
11	61.95	744	65.98	1	0.664	11	40.97	492	43.63	1	0.565
12	39.97	480	42.56	0	1.000	12	60.95	732	64.91	0	1.000
14	20.98	252	22.35	0	1.000	13	20.98	252	22.35	0	1.000
15	47.96	576	51.08	1	0.604	15	26.98	324	28.73	1	0.458
โหนด 15	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR						
1	121.90	1464	129.82	1	0.797						
2	113.91	1368	121.31	1	0.785						
3	87.93	1056	93.64	1	0.738						
4	72.94	876	77.68	1	0.700						
5	60.95	732	64.91	0	1.000						
6	74.94	900	79.81	1	0.706						
7	57.95	696	61.72	0	1.000						
8	43.96	528	46.82	0	1.000						
9	28.98	348	30.86	0	1.000						
10	44.96	540	47.89	0	1.000						
11	13.99	168	14.90	0	1.000						
12	86.93	1044	92.58	0	1.000						
13	47.96	576	51.08	1	0.604						
14	26.98	324	28.73	1	0.458						

จากตารางที่ 5.8 จะหาค่าอัตราส่วนระหว่าง OSNR ที่มากที่สุดเท่ากับ 0.313 เท่า ส่วนในกรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกลางข่ายเชื่อมโยง OSNR จะมีค่าตกลงไปเท่ากับ 0.281 เท่า ดังตารางที่ 5.9

ตัวอย่างที่ 4 โครงข่าย NARNet

ตารางที่ 5.10 แสดงอัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่าย NARNet จะหาค่าอัตราส่วนระหว่าง OSNR ที่ตกลงมากที่สุดเท่ากับ 0.254 เท่า ส่วนในกรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกลางข่ายเชื่อมโยง OSNR จะมีค่าตกลงไปเท่ากับ 0.205 เท่า ดังตารางที่ 5.11

ตัวอย่างที่ 5 โครงข่าย NARNet กรณีเกิดความเสียหายไม่เกิน 1 ข่ายเชื่อมโยง

ตารางที่ 5.12 แสดงอัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่าย NARNet ที่มีการกู้คืนสัญญาณ จะหาค่าอัตราส่วนระหว่าง OSNR ที่ตกลงมากที่สุดเท่ากับ 0.447 เท่า ส่วนในกรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกลางข่ายเชื่อมโยง OSNR จะมีค่าตกลงไปเท่ากับ 0.209 เท่า ดังตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.9 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่าย ERNet กรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่กลางข่ายเชื่อมโยง

(ค) โหนดที่ 1 - 6

โนด 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
2	27.98	336	29.80	1	0.467	1	27.98	336	29.80	1	0.467
3	33.97	408	36.18	1	0.517	3	51.96	624	55.33	2	0.448
4	59.95	720	63.85	1	0.657	4	67.94	816	72.36	2	0.517
5	89.93	1080	95.77	2	0.588	5	97.92	1176	104.28	3	0.507
6	46.96	564	50.01	2	0.422	6	38.97	468	41.50	1	0.552
7	74.94	900	79.81	2	0.542	7	82.93	996	88.32	3	0.464
8	88.93	1068	94.71	3	0.482	8	96.92	1164	103.22	4	0.430
9	103.91	1248	110.67	4	0.448	9	111.91	1344	119.18	5	0.410
10	76.94	924	81.94	3	0.445	10	68.94	828	73.42	2	0.521
11	107.91	1296	114.92	4	0.458	11	99.92	1200	106.41	3	0.512
12	118.90	1428	126.63	4	0.483	12	110.91	1332	118.12	3	0.539
13	129.89	1560	138.33	5	0.448	13	121.90	1464	129.82	4	0.489
14	108.91	1308	115.99	4	0.460	14	100.92	1212	107.48	3	0.514
15	121.90	1464	129.82	5	0.432	15	113.91	1368	121.31	4	0.471
โนด 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	33.97	408	36.18	1	0.517	1	59.95	720	63.85	1	0.657
2	51.96	624	55.33	2	0.448	2	67.94	816	72.36	2	0.517
4	41.97	504	44.69	2	0.394	3	41.97	504	44.69	2	0.394
5	71.94	864	76.62	3	0.427	5	29.98	360	31.92	1	0.485
6	12.99	156	13.83	1	0.281	6	28.98	348	30.86	1	0.476
7	56.95	684	60.65	3	0.369	7	14.99	180	15.96	1	0.313
8	70.94	852	75.55	4	0.352	8	28.98	348	30.86	2	0.305
9	85.93	1032	91.51	5	0.345	9	43.96	528	46.82	3	0.308
10	42.96	516	45.76	2	0.400	10	35.97	432	38.31	2	0.356
11	73.94	888	78.74	3	0.434	11	58.95	708	62.78	4	0.309
12	84.93	1020	90.45	3	0.470	12	77.94	936	83.00	3	0.448
13	95.92	1152	102.15	4	0.427	13	88.93	1068	94.71	4	0.408
14	74.94	900	79.81	3	0.438	14	67.94	816	72.36	3	0.413
15	87.93	1056	93.64	4	0.405	15	72.94	876	77.68	5	0.307
โนด 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	89.93	1080	95.77	2	0.588	1	46.96	564	50.01	2	0.422
2	97.92	1176	104.28	3	0.507	2	38.97	468	41.50	1	0.552
3	71.94	864	76.62	3	0.427	3	12.99	156	13.83	1	0.281
4	29.98	360	31.92	1	0.485	4	28.98	348	30.86	1	0.476
6	58.95	708	62.78	2	0.480	5	58.95	708	62.78	2	0.480
7	44.96	540	47.89	2	0.411	7	43.96	528	46.82	2	0.405
8	46.96	564	50.01	2	0.422	8	57.95	696	61.72	3	0.373
9	31.97	384	34.05	1	0.501	9	72.94	876	77.68	4	0.359
10	65.95	792	70.23	3	0.405	10	29.98	360	31.92	1	0.485
11	46.96	564	50.01	2	0.422	11	60.95	732	64.91	2	0.489
12	107.91	1296	114.92	4	0.458	12	71.94	864	76.62	2	0.532
13	108.91	1308	115.99	5	0.403	13	82.93	996	88.32	3	0.464
14	87.93	1056	93.64	4	0.405	14	61.95	744	65.98	2	0.493
15	60.95	732	64.91	3	0.386	15	74.94	900	79.81	3	0.438

(ข) โหนดที่ 7 – 12

โนด 7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	74.94	900	79.81	2	0.542	1	88.93	1068	94.71	3	0.482
2	82.93	996	88.32	3	0.464	2	96.92	1164	103.22	4	0.430
3	56.95	684	60.65	3	0.369	3	70.94	852	75.55	4	0.352
4	14.99	180	15.96	1	0.313	4	28.98	348	30.86	2	0.305
5	44.96	540	47.89	2	0.411	5	46.96	564	50.01	2	0.422
6	43.96	528	46.82	2	0.405	6	57.95	696	61.72	3	0.373
8	13.99	168	14.90	1	0.297	7	13.99	168	14.90	1	0.297
9	28.98	348	30.86	2	0.305	9	14.99	180	15.96	1	0.313
10	20.98	252	22.35	1	0.394	10	34.97	420	37.24	2	0.349
11	43.96	528	46.82	3	0.308	11	29.98	360	31.92	2	0.313
12	62.95	756	67.04	2	0.497	12	76.94	924	81.94	3	0.445
13	73.94	888	78.74	3	0.434	13	87.93	1056	93.64	4	0.405
14	52.96	636	56.40	2	0.453	14	66.94	804	71.30	3	0.409
15	57.95	696	61.72	4	0.305	15	43.96	528	46.82	3	0.308
โนด 9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	103.91	1248	110.67	4	0.448	1	76.94	924	81.94	3	0.445
2	111.91	1344	119.18	5	0.410	2	68.94	828	73.42	2	0.521
3	85.93	1032	91.51	5	0.345	3	42.96	516	45.76	2	0.400
4	43.96	528	46.82	3	0.308	4	35.97	432	38.31	2	0.356
5	31.97	384	34.05	1	0.501	5	65.95	792	70.23	3	0.405
6	72.94	876	77.68	4	0.359	6	29.98	360	31.92	1	0.485
7	28.98	348	30.86	2	0.305	7	20.98	252	22.35	1	0.394
8	14.99	180	15.96	1	0.313	8	34.97	420	37.24	2	0.349
10	45.96	552	48.95	2	0.417	9	45.96	552	48.95	2	0.417
11	14.99	180	15.96	1	0.313	11	30.97	372	32.99	1	0.493
12	87.93	1056	93.64	3	0.479	12	41.97	504	44.69	1	0.571
13	76.94	924	81.94	4	0.372	13	52.96	636	56.40	2	0.453
14	55.95	672	59.59	3	0.365	14	31.97	384	34.05	1	0.501
15	28.98	348	30.86	2	0.305	15	44.96	540	47.89	2	0.411
โนด 11	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 12	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	107.91	1296	114.92	4	0.458	1	118.90	1428	126.63	4	0.483
2	99.92	1200	106.41	3	0.512	2	110.91	1332	118.12	3	0.539
3	73.94	888	78.74	3	0.434	3	84.93	1020	90.45	3	0.470
4	58.95	708	62.78	4	0.309	4	77.94	936	83.00	3	0.448
5	46.96	564	50.01	2	0.422	5	107.91	1296	114.92	4	0.458
6	60.95	732	64.91	2	0.489	6	71.94	864	76.62	2	0.532
7	43.96	528	46.82	3	0.308	7	62.95	756	67.04	2	0.497
8	29.98	360	31.92	2	0.313	8	76.94	924	81.94	3	0.445
9	14.99	180	15.96	1	0.313	9	87.93	1056	93.64	3	0.479
10	30.97	372	32.99	1	0.493	10	41.97	504	44.69	1	0.571
12	72.94	876	77.68	2	0.535	11	72.94	876	77.68	2	0.535
13	61.95	744	65.98	3	0.390	13	39.97	480	42.56	1	0.558
14	40.97	492	43.63	2	0.388	14	60.95	732	64.91	2	0.489
15	13.99	168	14.90	1	0.297	15	86.93	1044	92.58	3	0.476

(ค) โหนดที่ 13 – 15

โหนด 13	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 14	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	129.89	1560	138.33	5	0.448	1	108.91	1308	115.99	4	0.460
2	121.90	1464	129.82	4	0.489	2	100.92	1212	107.48	3	0.514
3	95.92	1152	102.15	4	0.427	3	74.94	900	79.81	3	0.438
4	88.93	1068	94.71	4	0.408	4	67.94	816	72.36	3	0.413
5	108.91	1308	115.99	5	0.403	5	87.93	1056	93.64	4	0.405
6	82.93	996	88.32	3	0.464	6	61.95	744	65.98	2	0.493
7	73.94	888	78.74	3	0.434	7	52.96	636	56.40	2	0.453
8	87.93	1056	93.64	4	0.405	8	66.94	804	71.30	3	0.409
9	76.94	924	81.94	4	0.372	9	55.95	672	59.59	3	0.365
10	52.96	636	56.40	2	0.453	10	31.97	384	34.05	1	0.501
11	61.95	744	65.98	3	0.390	11	40.97	492	43.63	2	0.388
12	39.97	480	42.56	1	0.558	12	60.95	732	64.91	2	0.489
14	20.98	252	22.35	1	0.394	13	20.98	252	22.35	1	0.394
15	47.96	576	51.08	2	0.427	15	26.98	324	28.73	1	0.458
โหนด 15	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR						
1	121.90	1464	129.82	5	0.432						
2	113.91	1368	121.31	4	0.471						
3	87.93	1056	93.64	4	0.405						
4	72.94	876	77.68	5	0.307						
5	60.95	732	64.91	3	0.386						
6	74.94	900	79.81	3	0.438						
7	57.95	696	61.72	4	0.305						
8	43.96	528	46.82	3	0.308						
9	28.98	348	30.86	2	0.305						
10	44.96	540	47.89	2	0.411						
11	13.99	168	14.90	1	0.297						
12	86.93	1044	92.58	3	0.476						
13	47.96	576	51.08	2	0.427						
14	26.98	324	28.73	1	0.458						

ตารางที่ 5.10 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย NARNet

(ก) โหนดที่ 1 – 6

โหนด 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
2	26.67	420	28.40	0	1.000	1	26.67	420	28.40	0	1.000
3	34.29	540	36.51	0	1.000	3	59.68	940	63.56	0	1.000
4	49.52	780	52.74	0	1.000	4	22.86	360	24.34	0	1.000
5	57.14	900	60.86	0	1.000	5	74.92	1180	79.79	0	1.000
6	68.57	1080	73.03	0	1.000	6	63.49	1000	67.62	0	1.000
7	58.41	920	62.21	0	1.000	7	31.75	500	33.81	0	1.000
8	69.84	1100	74.38	1	0.691	8	43.17	680	45.98	1	0.578
9	81.27	1280	86.55	0	1.000	9	66.03	1040	70.32	1	0.678
10	83.81	1320	89.26	1	0.729	10	101.59	1600	108.19	1	0.765
11	92.70	1460	98.72	0	1.000	11	87.62	1380	93.31	0	1.000
12	102.86	1620	109.54	1	0.768	12	99.05	1560	105.49	1	0.761
13	111.75	1760	119.01	1	0.782	13	124.44	1960	132.53	1	0.800
14	104.13	1640	110.90	1	0.770	14	77.46	1220	82.50	1	0.713
15	130.79	2060	139.30	1	0.808	15	114.29	1800	121.71	1	0.786
16	138.41	2180	147.41	1	0.817	16	134.60	2120	143.35	1	0.812
17	128.25	2020	136.59	1	0.805	17	101.59	1600	108.19	1	0.765
โหนด 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	34.29	540	36.51	0	1.000	1	49.52	780	52.74	0	1.000
2	59.68	940	63.56	0	1.000	2	22.86	360	24.34	0	1.000
4	36.83	580	39.22	0	1.000	3	36.83	580	39.22	0	1.000
5	22.86	360	24.34	0	1.000	5	52.06	820	55.45	0	1.000
6	34.29	540	36.51	0	1.000	6	40.63	640	43.28	0	1.000
7	45.71	720	48.69	0	1.000	7	8.89	140	9.47	0	1.000
8	57.14	900	60.86	1	0.645	8	20.32	320	21.64	1	0.386
9	46.98	740	50.04	0	1.000	9	43.17	680	45.98	1	0.578
10	49.52	780	52.74	1	0.611	10	78.73	1240	83.85	1	0.716
11	58.41	920	62.21	0	1.000	11	64.76	1020	68.97	0	1.000
12	68.57	1080	73.03	1	0.687	12	76.19	1200	81.14	1	0.709
13	77.46	1220	82.50	1	0.713	13	101.59	1600	108.19	1	0.765
14	91.43	1440	97.37	1	0.746	14	54.60	860	58.15	1	0.635
15	96.51	1520	102.78	1	0.756	15	91.43	1440	97.37	1	0.746
16	104.13	1640	110.90	1	0.770	16	111.75	1760	119.01	1	0.782
17	115.56	1820	123.07	1	0.788	17	78.73	1240	83.85	1	0.716
โหนด 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	57.14	900	60.86	0	1.000	1	68.57	1080	73.03	0	1.000
2	74.92	1180	79.79	0	1.000	2	63.49	1000	67.62	0	1.000
3	22.86	360	24.34	0	1.000	3	34.29	540	36.51	0	1.000
4	52.06	820	55.45	0	1.000	4	40.63	640	43.28	0	1.000
6	11.43	180	12.17	0	1.000	5	11.43	180	12.17	0	1.000
7	58.41	920	62.21	1	0.651	7	46.98	740	50.04	1	0.599
8	46.98	740	50.04	0	1.000	8	35.56	560	37.87	0	1.000
9	24.13	380	25.70	0	1.000	9	12.70	200	13.52	0	1.000
10	26.67	420	28.40	1	0.455	10	38.10	600	40.57	1	0.546
11	35.56	560	37.87	0	1.000	11	24.13	380	25.70	0	1.000
12	45.71	720	48.69	1	0.592	12	35.56	560	37.87	1	0.529
13	54.60	860	58.15	1	0.635	13	60.95	960	64.91	1	0.660
14	81.27	1280	86.55	1	0.722	14	69.84	1100	74.38	0	1.000
15	73.65	1160	78.44	1	0.702	15	63.49	1000	67.62	1	0.670
16	81.27	1280	86.55	1	0.722	16	83.81	1320	89.26	1	0.729
17	97.78	1540	104.13	0	1.000	17	87.62	1380	93.31	1	0.737

(ข) โหนดที่ 7 - 12

โหนด 7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	58.41	920	62.21	0	1.000	1	69.84	1100	74.38	1	0.691
2	31.75	500	33.81	0	1.000	2	43.17	680	45.98	1	0.578
3	45.71	720	48.69	0	1.000	3	57.14	900	60.86	1	0.645
4	8.89	140	9.47	0	1.000	4	20.32	320	21.64	1	0.386
5	58.41	920	62.21	1	0.651	5	46.98	740	50.04	0	1.000
6	46.98	740	50.04	1	0.599	6	35.56	560	37.87	0	1.000
8	11.43	180	12.17	1	0.254	7	11.43	180	12.17	1	0.254
9	34.29	540	36.51	1	0.519	9	22.86	360	24.34	0	1.000
10	85.08	1340	90.61	2	0.574	10	73.65	1160	78.44	1	0.702
11	71.11	1120	75.73	1	0.694	11	59.68	940	63.56	0	1.000
12	82.54	1300	87.90	2	0.566	12	71.11	1120	75.73	1	0.694
13	107.94	1700	114.95	2	0.632	13	96.51	1520	102.78	1	0.756
14	45.71	720	48.69	1	0.592	14	34.29	540	36.51	0	1.000
15	82.54	1300	87.90	1	0.726	15	71.11	1120	75.73	0	1.000
16	102.86	1620	109.54	1	0.768	16	91.43	1440	97.37	0	1.000
17	69.84	1100	74.38	1	0.691	17	58.41	920	62.21	0	1.000
โหนด 9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	81.27	1280	86.55	0	1.000	1	83.81	1320	89.26	1	0.729
2	66.03	1040	70.32	1	0.678	2	101.59	1600	108.19	1	0.765
3	46.98	740	50.04	0	1.000	3	49.52	780	52.74	1	0.611
4	43.17	680	45.98	1	0.578	4	78.73	1240	83.85	1	0.716
5	24.13	380	25.70	0	1.000	5	26.67	420	28.40	1	0.455
6	12.70	200	13.52	0	1.000	6	38.10	600	40.57	1	0.546
7	34.29	540	36.51	1	0.519	7	85.08	1340	90.61	2	0.574
8	22.86	360	24.34	0	1.000	8	73.65	1160	78.44	1	0.702
10	50.79	800	54.10	1	0.618	9	50.79	800	54.10	1	0.618
11	36.83	580	39.22	0	1.000	11	30.48	480	32.46	1	0.489
12	48.25	760	51.39	1	0.605	12	19.05	300	20.29	0	1.000
13	73.65	1160	78.44	1	0.702	13	27.94	440	29.75	0	1.000
14	57.14	900	60.86	0	1.000	14	83.81	1320	89.26	0	1.000
15	76.19	1200	81.14	1	0.709	15	46.98	740	50.04	0	1.000
16	96.51	1520	102.78	1	0.756	16	54.60	860	58.15	0	1.000
17	81.27	1280	86.55	0	1.000	17	71.11	1120	75.73	0	1.000
โหนด 11	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 12	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	92.70	1460	98.72	0	1.000	1	102.86	1620	109.54	1	0.768
2	87.62	1380	93.31	0	1.000	2	99.05	1560	105.49	1	0.761
3	58.41	920	62.21	0	1.000	3	68.57	1080	73.03	1	0.687
4	64.76	1020	68.97	0	1.000	4	76.19	1200	81.14	1	0.709
5	35.56	560	37.87	0	1.000	5	45.71	720	48.69	1	0.592
6	24.13	380	25.70	0	1.000	6	35.56	560	37.87	1	0.529
7	71.11	1120	75.73	1	0.694	7	82.54	1300	87.90	2	0.566
8	59.68	940	63.56	0	1.000	8	71.11	1120	75.73	1	0.694
9	36.83	580	39.22	0	1.000	9	48.25	760	51.39	1	0.605
10	30.48	480	32.46	1	0.489	10	19.05	300	20.29	0	1.000
12	11.43	180	12.17	1	0.254	11	11.43	180	12.17	1	0.254
13	36.83	580	39.22	1	0.538	13	25.40	400	27.05	0	1.000
14	76.19	1200	81.14	1	0.709	14	64.76	1020	68.97	0	1.000
15	39.37	620	41.92	1	0.554	15	27.94	440	29.75	0	1.000
16	59.68	940	63.56	1	0.655	16	48.25	760	51.39	0	1.000
17	63.49	1000	67.62	1	0.670	17	52.06	820	55.45	0	1.000

(ค) โหนดที่ 13 – 17

โหนด 13	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 14	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	111.75	1760	119.01	1	0.782	1	104.13	1640	110.90	1	0.770
2	124.44	1960	132.53	1	0.800	2	77.46	1220	82.50	1	0.713
3	77.46	1220	82.50	1	0.713	3	91.43	1440	97.37	1	0.746
4	101.59	1600	108.19	1	0.765	4	54.60	860	58.15	1	0.635
5	54.60	860	58.15	1	0.635	5	81.27	1280	86.55	0	1.000
6	60.95	960	64.91	1	0.660	6	69.84	1100	74.38	0	1.000
7	107.94	1700	114.95	2	0.632	7	45.71	720	48.69	1	0.592
8	96.51	1520	102.78	1	0.756	8	34.29	540	36.51	0	1.000
9	73.65	1160	78.44	1	0.702	9	57.14	900	60.86	0	1.000
10	27.94	440	29.75	0	1.000	10	83.81	1320	89.26	0	1.000
11	36.83	580	39.22	1	0.538	11	76.19	1200	81.14	1	0.709
12	25.40	400	27.05	0	1.000	12	64.76	1020	68.97	0	1.000
14	83.81	1320	89.26	0	1.000	13	83.81	1320	89.26	0	1.000
15	46.98	740	50.04	0	1.000	15	36.83	580	39.22	0	1.000
16	26.67	420	28.40	0	1.000	16	57.14	900	60.86	0	1.000
17	71.11	1120	75.73	0	1.000	17	24.13	380	25.70	0	1.000
โหนด 15	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 16	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	130.79	2060	139.30	1	0.808	1	138.41	2180	147.41	1	0.817
2	114.29	1800	121.71	1	0.786	2	134.60	2120	143.35	1	0.812
3	96.51	1520	102.78	1	0.756	3	104.13	1640	110.90	1	0.770
4	91.43	1440	97.37	1	0.746	4	111.75	1760	119.01	1	0.782
5	73.65	1160	78.44	1	0.702	5	81.27	1280	86.55	1	0.722
6	63.49	1000	67.62	1	0.670	6	83.81	1320	89.26	1	0.729
7	82.54	1300	87.90	1	0.726	7	102.86	1620	109.54	1	0.768
8	71.11	1120	75.73	0	1.000	8	91.43	1440	97.37	0	1.000
9	76.19	1200	81.14	1	0.709	9	96.51	1520	102.78	1	0.756
10	46.98	740	50.04	0	1.000	10	54.60	860	58.15	0	1.000
11	39.37	620	41.92	1	0.554	11	59.68	940	63.56	1	0.655
12	27.94	440	29.75	0	1.000	12	48.25	760	51.39	0	1.000
13	46.98	740	50.04	0	1.000	13	26.67	420	28.40	0	1.000
14	36.83	580	39.22	0	1.000	14	57.14	900	60.86	0	1.000
16	20.32	320	21.64	0	1.000	15	20.32	320	21.64	0	1.000
17	24.13	380	25.70	0	1.000	17	44.44	700	47.33	0	1.000
โหนด 17	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR						
1	128.25	2020	136.59	1	0.805						
2	101.59	1600	108.19	1	0.765						
3	115.56	1820	123.07	1	0.788						
4	78.73	1240	83.85	1	0.716						
5	97.78	1540	104.13	1	0.758						
6	87.62	1380	93.31	1	0.737						
7	69.84	1100	74.38	1	0.691						
8	58.41	920	62.21	0	1.000						
9	81.27	1280	86.55	0	1.000						
10	71.11	1120	75.73	0	1.000						
11	63.49	1000	67.62	1	0.670						
12	52.06	820	55.45	0	1.000						
13	71.11	1120	75.73	0	1.000						
14	24.13	380	25.70	0	1.000						
15	24.13	380	25.70	0	1.000						
16	44.44	700	47.33	0	1.000						

ตารางที่ 5.11 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย NARNet กรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่กลางข่ายเชื่อมโยง
(ง) โหนดที่ 1-6

โนด 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
2	26.67	420	28.40	1	0.455	1	26.67	420	28.40	1	0.455
3	34.29	540	36.51	1	0.519	3	59.68	940	63.56	2	0.484
4	49.52	780	52.74	2	0.436	4	22.86	360	24.34	1	0.415
5	57.14	900	60.86	2	0.472	5	74.92	1180	79.79	3	0.438
6	68.57	1080	73.03	3	0.415	6	63.49	1000	67.62	2	0.499
7	58.41	920	62.21	3	0.375	7	31.75	500	33.81	2	0.326
8	69.84	1100	74.38	4	0.349	8	43.17	680	45.98	3	0.303
9	81.27	1280	86.55	4	0.386	9	66.03	1040	70.32	4	0.335
10	83.81	1320	89.26	3	0.467	10	101.59	1600	108.19	4	0.442
11	92.70	1460	98.72	4	0.419	11	87.62	1380	93.31	3	0.478
12	102.86	1620	109.54	4	0.445	12	99.05	1560	105.49	4	0.436
13	111.75	1760	119.01	4	0.467	13	124.44	1960	132.53	5	0.437
14	104.13	1640	110.90	5	0.392	14	77.46	1220	82.50	4	0.374
15	130.79	2060	139.30	5	0.450	15	114.29	1800	121.71	5	0.415
16	138.41	2180	147.41	5	0.464	16	134.60	2120	143.35	6	0.410
17	128.25	2020	136.59	6	0.398	17	101.59	1600	108.19	5	0.386
โนด 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	34.29	540	36.51	1	0.519	1	49.52	780	52.74	2	0.436
2	59.68	940	63.56	2	0.484	2	22.86	360	24.34	1	0.415
4	36.83	580	39.22	1	0.538	3	36.83	580	39.22	1	0.538
5	22.86	360	24.34	1	0.415	5	52.06	820	55.45	2	0.448
6	34.29	540	36.51	2	0.344	6	40.63	640	43.28	1	0.563
7	45.71	720	48.69	1	0.592	7	8.89	140	9.47	1	0.205
8	57.14	900	60.86	3	0.370	8	20.32	320	21.64	2	0.230
9	46.98	740	50.04	3	0.323	9	43.17	680	45.98	3	0.303
10	49.52	780	52.74	2	0.436	10	78.73	1240	83.85	3	0.450
11	58.41	920	62.21	3	0.375	11	64.76	1020	68.97	2	0.505
12	68.57	1080	73.03	3	0.415	12	76.19	1200	81.14	3	0.442
13	77.46	1220	82.50	3	0.446	13	101.59	1600	108.19	4	0.442
14	91.43	1440	97.37	4	0.415	14	54.60	860	58.15	3	0.359
15	96.51	1520	102.78	4	0.429	15	91.43	1440	97.37	4	0.415
16	104.13	1640	110.90	4	0.448	16	111.75	1760	119.01	5	0.410
17	115.56	1820	123.07	5	0.418	17	78.73	1240	83.85	4	0.378
โนด 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	57.14	900	60.86	2	0.472	1	68.57	1080	73.03	3	0.415
2	74.92	1180	79.79	3	0.438	2	63.49	1000	67.62	2	0.499
3	22.86	360	24.34	1	0.415	3	34.29	540	36.51	2	0.344
4	52.06	820	55.45	2	0.448	4	40.63	640	43.28	1	0.563
6	11.43	180	12.17	1	0.254	5	11.43	180	12.17	1	0.254
7	58.41	920	62.21	4	0.307	7	46.98	740	50.04	3	0.323
8	46.98	740	50.04	3	0.323	8	35.56	560	37.87	2	0.353
9	24.13	380	25.70	2	0.265	9	12.70	200	13.52	1	0.276
10	26.67	420	28.40	1	0.455	10	38.10	600	40.57	2	0.370
11	35.56	560	37.87	2	0.353	11	24.13	380	25.70	1	0.429
12	45.71	720	48.69	2	0.415	12	35.56	560	37.87	2	0.353
13	54.60	860	58.15	2	0.461	13	60.95	960	64.91	3	0.386
14	81.27	1280	86.55	4	0.386	14	69.84	1100	74.38	3	0.420
15	73.65	1160	78.44	3	0.433	15	63.49	1000	67.62	3	0.396
16	81.27	1280	86.55	3	0.459	16	83.81	1320	89.26	4	0.393
17	97.78	1540	104.13	4	0.432	17	87.62	1380	93.31	4	0.404

(ข) โหนดที่ 7 - 12

โนด 7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [หน่วย]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [หน่วย]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	58.41	920	62.21	3	0.375	1	69.84	1100	74.38	4	0.349
2	31.75	500	33.81	2	0.326	2	43.17	680	45.98	3	0.303
3	45.71	720	48.69	2	0.415	3	57.14	900	60.86	3	0.370
4	8.89	140	9.47	1	0.205	4	20.32	320	21.64	2	0.230
5	58.41	920	62.21	4	0.307	5	46.98	740	50.04	3	0.323
6	46.98	740	50.04	3	0.323	6	35.56	560	37.87	2	0.353
8	11.43	180	12.17	1	0.254	7	11.43	180	12.17	1	0.254
9	34.29	540	36.51	2	0.344	9	22.86	360	24.34	1	0.415
10	85.08	1340	90.61	5	0.342	10	73.65	1160	78.44	4	0.361
11	71.11	1120	75.73	4	0.353	11	59.68	940	63.56	3	0.380
12	82.54	1300	87.90	5	0.335	12	71.11	1120	75.73	4	0.353
13	107.94	1700	114.95	6	0.356	13	96.51	1520	102.78	5	0.373
14	45.71	720	48.69	2	0.415	14	34.29	540	36.51	1	0.519
15	82.54	1300	87.90	3	0.463	15	71.11	1120	75.73	2	0.529
16	102.86	1620	109.54	4	0.445	16	91.43	1440	97.37	3	0.489
17	69.84	1100	74.38	3	0.420	17	58.41	920	62.21	2	0.478
โนด 9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [หน่วย]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [หน่วย]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	81.27	1280	86.55	4	0.386	1	83.81	1320	89.26	3	0.467
2	66.03	1040	70.32	4	0.335	2	101.59	1600	108.19	4	0.442
3	46.98	740	50.04	3	0.323	3	49.52	780	52.74	2	0.436
4	43.17	680	45.98	3	0.303	4	78.73	1240	83.85	3	0.450
5	24.13	380	25.70	2	0.265	5	26.67	420	28.40	1	0.455
6	12.70	200	13.52	1	0.276	6	38.10	600	40.57	2	0.370
7	34.29	540	36.51	2	0.344	7	85.08	1340	90.61	5	0.342
8	22.86	360	24.34	1	0.415	8	73.65	1160	78.44	4	0.361
10	50.79	800	54.10	3	0.341	9	50.79	800	54.10	3	0.341
11	36.83	580	39.22	2	0.361	11	30.48	480	32.46	2	0.317
12	48.25	760	51.39	3	0.329	12	19.05	300	20.29	1	0.370
13	73.65	1160	78.44	4	0.361	13	27.94	440	29.75	1	0.467
14	57.14	900	60.86	2	0.472	14	83.81	1320	89.26	3	0.467
15	76.19	1200	81.14	4	0.370	15	46.98	740	50.04	2	0.422
16	96.51	1520	102.78	5	0.373	16	54.60	860	58.15	2	0.461
17	81.27	1280	86.55	3	0.459	17	71.11	1120	75.73	3	0.424
โนด 11	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [หน่วย]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 12	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [หน่วย]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	92.70	1460	98.72	4	0.419	1	102.86	1620	109.54	4	0.445
2	87.62	1380	93.31	3	0.478	2	99.05	1560	105.49	4	0.436
3	58.41	920	62.21	3	0.375	3	68.57	1080	73.03	3	0.415
4	64.76	1020	68.97	2	0.505	4	76.19	1200	81.14	3	0.442
5	35.56	560	37.87	2	0.353	5	45.71	720	48.69	2	0.415
6	24.13	380	25.70	1	0.429	6	35.56	560	37.87	2	0.353
7	71.11	1120	75.73	4	0.353	7	82.54	1300	87.90	5	0.335
8	59.68	940	63.56	3	0.380	8	71.11	1120	75.73	4	0.353
9	36.83	580	39.22	2	0.361	9	48.25	760	51.39	3	0.329
10	30.48	480	32.46	2	0.317	10	19.05	300	20.29	1	0.370
12	11.43	180	12.17	1	0.254	11	11.43	180	12.17	1	0.254
13	36.83	580	39.22	2	0.361	13	25.40	400	27.05	1	0.442
14	76.19	1200	81.14	3	0.442	14	64.76	1020	68.97	2	0.505
15	39.37	620	41.92	2	0.378	15	27.94	440	29.75	1	0.467
16	59.68	940	63.56	3	0.380	16	48.25	760	51.39	2	0.429
17	63.49	1000	67.62	3	0.396	17	52.06	820	55.45	2	0.448

(ค) โหนดที่ 13 - 17

โหนด 13	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 14	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	111.75	1760	119.01	4	0.467	1	104.13	1640	110.90	5	0.392
2	124.44	1960	132.53	5	0.437	2	77.46	1220	82.50	4	0.374
3	77.46	1220	82.50	3	0.446	3	91.43	1440	97.37	4	0.415
4	101.59	1600	108.19	4	0.442	4	54.60	860	58.15	3	0.359
5	54.60	860	58.15	2	0.461	5	81.27	1280	86.55	4	0.386
6	60.95	960	64.91	3	0.386	6	69.84	1100	74.38	3	0.420
7	107.94	1700	114.95	6	0.356	7	45.71	720	48.69	2	0.415
8	96.51	1520	102.78	5	0.373	8	34.29	540	36.51	1	0.519
9	73.65	1160	78.44	4	0.361	9	57.14	900	60.86	2	0.472
10	27.94	440	29.75	1	0.467	10	83.81	1320	89.26	3	0.467
11	36.83	580	39.22	2	0.361	11	76.19	1200	81.14	3	0.442
12	25.40	400	27.05	1	0.442	12	64.76	1020	68.97	2	0.505
14	83.81	1320	89.26	3	0.467	13	83.81	1320	89.26	3	0.467
15	46.98	740	50.04	2	0.422	15	36.83	580	39.22	1	0.538
16	26.67	420	28.40	1	0.455	16	57.14	900	60.86	2	0.472
17	71.11	1120	75.73	3	0.424	17	24.13	380	25.70	1	0.429
โหนด 15	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 16	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	130.79	2060	139.30	5	0.450	1	138.41	2180	147.41	5	0.464
2	114.29	1800	121.71	5	0.415	2	134.60	2120	143.35	6	0.410
3	96.51	1520	102.78	4	0.429	3	104.13	1640	110.90	4	0.448
4	91.43	1440	97.37	4	0.415	4	111.75	1760	119.01	5	0.410
5	73.65	1160	78.44	3	0.433	5	81.27	1280	86.55	3	0.459
6	63.49	1000	67.62	3	0.396	6	83.81	1320	89.26	4	0.393
7	82.54	1300	87.90	3	0.463	7	102.86	1620	109.54	4	0.445
8	71.11	1120	75.73	2	0.529	8	91.43	1440	97.37	3	0.489
9	76.19	1200	81.14	4	0.370	9	96.51	1520	102.78	5	0.373
10	46.98	740	50.04	2	0.422	10	54.60	860	58.15	2	0.461
11	39.37	620	41.92	2	0.378	11	59.68	940	63.56	3	0.380
12	27.94	440	29.75	1	0.467	12	48.25	760	51.39	2	0.429
13	46.98	740	50.04	2	0.422	13	26.67	420	28.40	1	0.455
14	36.83	580	39.22	1	0.538	14	57.14	900	60.86	2	0.472
16	20.32	320	21.64	1	0.386	15	20.32	320	21.64	1	0.386
17	24.13	380	25.70	1	0.429	17	44.44	700	47.33	2	0.408
โหนด 17	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR						
1	128.25	2020	136.59	6	0.398						
2	101.59	1600	108.19	5	0.386						
3	115.56	1820	123.07	5	0.418						
4	78.73	1240	83.85	4	0.378						
5	97.78	1540	104.13	4	0.432						
6	87.62	1380	93.31	4	0.404						
7	69.84	1100	74.38	3	0.420						
8	58.41	920	62.21	2	0.478						
9	81.27	1280	86.55	3	0.459						
10	71.11	1120	75.73	3	0.424						
11	63.49	1000	67.62	3	0.396						
12	52.06	820	55.45	2	0.448						
13	71.11	1120	75.73	3	0.424						
14	24.13	380	25.70	1	0.429						
15	24.13	380	25.70	1	0.429						
16	44.44	700	47.33	2	0.408						

ตารางที่ 5.12 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย NARNet ที่มีการกู้คืนสัญญาณ

(จ) โหนดที่ 1-6

โนด 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
2	51.88	1480	55.25	0	1.000	1	51.88	1480	55.25	0	1.000
3	47.67	1360	50.77	1	0.602	3	33.65	960	35.84	1	0.514
4	39.26	1120	41.81	0	1.000	4	53.98	1540	57.49	1	0.632
5	56.08	1600	59.73	1	0.641	5	46.27	1320	49.27	1	0.595
6	49.77	1420	53.01	1	0.613	6	52.58	1500	55.99	1	0.626
7	63.79	1820	67.94	0	1.000	7	78.51	2240	83.62	1	0.715
8	57.48	1640	61.22	0	1.000	8	72.20	2060	76.90	1	0.698
9	51.17	1460	54.50	1	0.619	9	59.59	1700	63.46	1	0.655
10	79.92	2280	85.11	1	0.719	10	114.97	3280	122.44	1	0.787
11	99.54	2840	106.01	1	0.762	11	77.81	2220	82.87	1	0.713
12	69.40	1980	73.91	1	0.689	12	71.50	2040	76.15	1	0.696
13	83.42	2380	88.84	1	0.728	13	76.41	2180	81.38	2	0.547
14	92.53	2640	98.55	0	1.000	14	107.26	3060	114.23	1	0.775
15	77.81	2220	82.87	1	0.713	15	86.93	2480	92.58	1	0.736
16	96.04	2740	102.28	1	0.755	16	91.13	2600	97.06	2	0.591
17	85.52	2440	91.08	0	1.000	17	100.25	2860	106.76	1	0.763
โนด 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	47.67	1360	50.77	1	0.602	1	39.26	1120	41.81	0	1.000
2	33.65	960	35.84	1	0.514	2	53.98	1540	57.49	1	0.632
4	41.36	1180	44.05	0	1.000	3	41.36	1180	44.05	0	1.000
5	49.07	1400	52.26	0	1.000	5	32.95	940	35.09	0	1.000
6	42.76	1220	45.54	0	1.000	6	30.84	880	32.85	0	1.000
7	44.87	1280	47.78	0	1.000	7	48.37	1380	51.51	0	1.000
8	38.56	1100	41.06	0	1.000	8	42.06	1200	44.79	0	1.000
9	44.16	1260	47.03	0	1.000	9	29.44	840	31.36	0	1.000
10	72.91	2080	77.64	0	1.000	10	60.99	1740	64.95	0	1.000
11	92.53	2640	98.55	0	1.000	11	64.49	1840	68.69	0	1.000
12	62.39	1780	66.45	0	1.000	12	58.18	1660	61.97	0	1.000
13	76.41	2180	81.38	0	1.000	13	63.09	1800	67.19	1	0.668
14	73.61	2100	78.39	0	1.000	14	77.81	2220	82.87	0	1.000
15	70.80	2020	75.40	0	1.000	15	57.48	1640	61.22	0	1.000
16	82.02	2340	87.35	0	1.000	16	70.80	2020	75.40	0	1.000
17	66.60	1900	70.93	0	1.000	17	70.80	2020	75.40	0	1.000
โนด 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	56.08	1600	59.73	1	0.641	1	49.77	1420	53.01	1	0.613
2	46.27	1320	49.27	1	0.595	2	52.58	1500	55.99	1	0.626
3	49.07	1400	52.26	0	1.000	3	42.76	1220	45.54	0	1.000
4	32.95	940	35.09	0	1.000	4	30.84	880	32.85	0	1.000
6	44.87	1280	47.78	0	1.000	5	44.87	1280	47.78	0	1.000
7	37.85	1080	40.32	0	1.000	7	27.34	780	29.12	0	1.000
8	44.16	1260	47.03	0	1.000	8	33.65	960	35.84	0	1.000
9	56.78	1620	60.47	0	1.000	9	46.27	1320	49.27	0	1.000
10	36.45	1040	38.82	0	1.000	10	30.14	860	32.10	0	1.000
11	31.55	900	33.60	0	1.000	11	37.85	1080	40.32	0	1.000
12	25.94	740	27.62	0	1.000	12	31.55	900	33.60	0	1.000
13	39.96	1140	42.56	0	1.000	13	36.45	1040	38.82	1	0.535
14	60.99	1740	64.95	0	1.000	14	55.38	1580	58.98	0	1.000
15	65.19	1860	69.43	0	1.000	15	58.89	1680	62.71	0	1.000
16	52.58	1500	55.99	0	1.000	16	51.17	1460	54.50	0	1.000
17	58.18	1660	61.97	0	1.000	17	51.88	1480	55.25	0	1.000

(ข) โหนดที่ 7 - 12

โนด 7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	63.79	1820	67.94	0	1.000	1	57.48	1640	61.22	0	1.000
2	78.51	2240	83.62	1	0.715	2	72.20	2060	76.90	1	0.698
3	44.87	1280	47.78	0	1.000	3	38.56	1100	41.06	0	1.000
4	48.37	1380	51.51	0	1.000	4	42.06	1200	44.79	0	1.000
5	37.85	1080	40.32	0	1.000	5	44.16	1260	47.03	0	1.000
6	27.34	780	29.12	0	1.000	6	33.65	960	35.84	0	1.000
8	46.97	1340	50.02	0	1.000	7	46.97	1340	50.02	0	1.000
9	34.35	980	36.58	0	1.000	9	40.66	1160	43.30	0	1.000
10	57.48	1640	61.22	0	1.000	10	63.79	1820	67.94	0	1.000
11	65.19	1860	69.43	0	1.000	11	60.99	1740	64.95	0	1.000
12	58.89	1680	62.71	0	1.000	12	54.68	1560	58.23	0	1.000
13	63.79	1820	67.94	1	0.671	13	65.19	1860	69.43	0	1.000
14	82.72	2360	88.10	0	1.000	14	75.01	2140	79.88	0	1.000
15	62.39	1780	66.45	0	1.000	15	54.68	1560	58.23	0	1.000
16	75.71	2160	80.63	0	1.000	16	68.00	1940	72.42	0	1.000
17	70.80	2020	75.40	0	1.000	17	68.00	1940	72.42	0	1.000
โนด 9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	51.17	1460	54.50	1	0.619	1	79.92	2280	85.11	1	0.719
2	59.59	1700	63.46	1	0.655	2	114.97	3280	122.44	1	0.787
3	44.16	1260	47.03	0	1.000	3	72.91	2080	77.64	0	1.000
4	29.44	840	31.36	0	1.000	4	60.99	1740	64.95	0	1.000
5	56.78	1620	60.47	0	1.000	5	36.45	1040	38.82	0	1.000
6	46.27	1320	49.27	0	1.000	6	30.14	860	32.10	0	1.000
7	34.35	980	36.58	0	1.000	7	57.48	1640	61.22	0	1.000
8	40.66	1160	43.30	0	1.000	8	63.79	1820	67.94	0	1.000
10	77.81	2220	82.87	0	1.000	9	76.41	2180	81.38	0	1.000
11	73.61	2100	78.39	0	1.000	11	34.35	980	36.58	0	1.000
12	67.30	1920	71.67	0	1.000	12	29.44	840	31.36	1	0.480
13	77.81	2220	82.87	0	1.000	13	24.54	700	26.13	0	1.000
14	62.39	1780	66.45	0	1.000	14	59.59	1700	63.46	0	1.000
15	51.88	1480	55.25	0	1.000	15	41.36	1180	44.05	1	0.567
16	97.44	2780	103.77	1	0.758	16	37.15	1060	39.57	0	1.000
17	55.38	1580	58.98	0	1.000	17	72.91	2080	77.64	0	1.000
11	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 12	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	99.54	2840	106.01	1	0.762	1	69.40	1980	73.91	1	0.689
2	77.81	2220	82.87	1	0.713	2	71.50	2040	76.15	1	0.696
3	92.53	2640	98.55	0	1.000	3	62.39	1780	66.45	0	1.000
4	64.49	1840	68.69	0	1.000	4	58.18	1660	61.97	0	1.000
5	31.55	900	33.60	0	1.000	5	25.94	740	27.62	0	1.000
6	37.85	1080	40.32	0	1.000	6	31.55	900	33.60	0	1.000
7	65.19	1860	69.43	0	1.000	7	58.89	1680	62.71	0	1.000
8	60.99	1740	64.95	0	1.000	8	54.68	1560	58.23	0	1.000
9	73.61	2100	78.39	0	1.000	9	67.30	1920	71.67	0	1.000
10	34.35	980	36.58	0	1.000	10	29.44	840	31.36	1	0.480
12	44.87	1280	47.78	0	1.000	11	44.87	1280	47.78	0	1.000
13	49.77	1420	53.01	1	0.613	13	25.94	740	27.62	1	0.447
14	51.88	1480	55.25	0	1.000	14	58.18	1660	61.97	0	1.000
15	72.20	2060	76.90	0	1.000	15	39.96	1140	42.56	0	1.000
16	64.49	1840	68.69	1	0.673	16	28.74	820	30.61	0	1.000
17	65.19	1860	69.43	0	1.000	17	71.50	2040	76.15	0	1.000

(ค) โหนดที่ 13 - 17

โหนด 13	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 14	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	83.42	2380	88.84	1	0.728	1	92.53	2640	98.55	0	1.000
2	76.41	2180	81.38	2	0.547	2	107.26	3060	114.23	1	0.775
3	76.41	2180	81.38	0	1.000	3	73.61	2100	78.39	0	1.000
4	63.09	1800	67.19	1	0.668	4	77.81	2220	82.87	0	1.000
5	39.96	1140	42.56	0	1.000	5	60.99	1740	64.95	0	1.000
6	36.45	1040	38.82	1	0.535	6	55.38	1580	58.98	0	1.000
7	63.79	1820	67.94	1	0.671	7	82.72	2360	88.10	0	1.000
8	65.19	1860	69.43	0	1.000	8	75.01	2140	79.88	0	1.000
9	77.81	2220	82.87	0	1.000	9	62.39	1780	66.45	0	1.000
10	24.54	700	26.13	0	1.000	10	59.59	1700	63.46	0	1.000
11	49.77	1420	53.01	1	0.613	11	51.88	1480	55.25	0	1.000
12	25.94	740	27.62	1	0.447	12	58.18	1660	61.97	0	1.000
14	56.08	1600	59.73	0	1.000	13	56.08	1600	59.73	0	1.000
15	29.44	840	31.36	0	1.000	15	26.64	760	28.37	0	1.000
16	40.66	1160	43.30	0	1.000	16	70.80	2020	75.40	0	1.000
17	63.09	1800	67.19	0	1.000	17	33.65	960	35.84	0	1.000
โหนด 15	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 16	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	77.81	2220	82.87	1	0.713	1	96.04	2740	102.28	1	0.755
2	86.93	2480	92.58	1	0.736	2	91.13	2600	97.06	2	0.591
3	70.80	2020	75.40	0	1.000	3	82.02	2340	87.35	0	1.000
4	57.48	1640	61.22	0	1.000	4	70.80	2020	75.40	0	1.000
5	65.19	1860	69.43	0	1.000	5	52.58	1500	55.99	0	1.000
6	58.89	1680	62.71	0	1.000	6	51.17	1460	54.50	1	0.619
7	62.39	1780	66.45	0	1.000	7	75.71	2160	80.63	0	1.000
8	54.68	1560	58.23	0	1.000	8	68.00	1940	72.42	0	1.000
9	51.88	1480	55.25	0	1.000	9	97.44	2780	103.77	1	0.758
10	41.36	1180	44.05	1	0.567	10	37.15	1060	39.57	0	1.000
11	72.20	2060	76.90	0	1.000	11	64.49	1840	68.69	1	0.673
12	39.96	1140	42.56	0	1.000	12	28.74	820	30.61	0	1.000
13	29.44	840	31.36	0	1.000	13	40.66	1160	43.30	0	1.000
14	26.64	760	28.37	0	1.000	14	70.80	2020	75.40	0	1.000
16	44.16	1260	47.03	0	1.000	15	44.16	1260	47.03	0	1.000
17	33.65	960	35.84	0	1.000	17	77.81	2220	82.87	0	1.000
โหนด 17	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR						
1	85.52	2440	91.08	0	1.000						
2	100.25	2860	106.76	1	0.763						
3	66.60	1900	70.93	0	1.000						
4	70.80	2020	75.40	0	1.000						
5	58.18	1660	61.97	0	1.000						
6	51.88	1480	55.25	0	1.000						
7	70.80	2020	75.40	0	1.000						
8	68.00	1940	72.42	0	1.000						
9	55.38	1580	58.98	0	1.000						
10	72.91	2080	77.64	0	1.000						
11	65.19	1860	69.43	0	1.000						
12	71.50	2040	76.15	0	1.000						
13	63.09	1800	67.19	0	1.000						
14	33.65	960	35.84	0	1.000						
15	33.65	960	35.84	0	1.000						
16	77.81	2220	82.87	0	1.000						

ตารางที่ 5.13 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่าย NARNet ที่มีการกู้คืนสัญญาณ กรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่
กลางข่ายเชื่อมโยง
(ฉ) โหนดที่ 1-6

โหนด 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
2	51.88	1480	55.25	1	0.623	1	51.88	1480	55.25	1	0.623
3	47.67	1360	50.77	1	0.602	3	33.65	960	35.84	2	0.340
4	39.26	1120	41.81	2	0.377	4	53.98	1540	57.49	1	0.632
5	56.08	1600	59.73	2	0.467	5	46.27	1320	49.27	3	0.319
6	49.77	1420	53.01	3	0.336	6	52.58	1500	55.99	2	0.451
7	63.79	1820	67.94	3	0.397	7	78.51	2240	83.62	2	0.554
8	57.48	1640	61.22	4	0.303	8	72.20	2060	76.90	3	0.428
9	51.17	1460	54.50	4	0.277	9	59.59	1700	63.46	4	0.311
10	79.92	2280	85.11	3	0.454	10	114.97	3280	122.44	4	0.474
11	99.54	2840	106.01	4	0.437	11	77.81	2220	82.87	3	0.447
12	69.40	1980	73.91	4	0.347	12	71.50	2040	76.15	4	0.354
13	83.42	2380	88.84	4	0.392	13	76.41	2180	81.38	5	0.317
14	92.53	2640	98.55	5	0.363	14	107.26	3060	114.23	4	0.456
15	77.81	2220	82.87	5	0.321	15	86.93	2480	92.58	5	0.348
16	96.04	2740	102.28	5	0.372	16	91.13	2600	97.06	6	0.316
17	85.52	2440	91.08	6	0.301	17	100.25	2860	106.76	5	0.382
โหนด 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	47.67	1360	50.77	1	0.602	1	39.26	1120	41.81	2	0.377
2	33.65	960	35.84	2	0.340	2	53.98	1540	57.49	1	0.632
4	41.36	1180	44.05	1	0.567	3	41.36	1180	44.05	1	0.567
5	49.07	1400	52.26	1	0.609	5	32.95	940	35.09	2	0.335
6	42.76	1220	45.54	2	0.398	6	30.84	880	32.85	1	0.492
7	44.87	1280	47.78	2	0.410	7	48.37	1380	51.51	1	0.606
8	38.56	1100	41.06	3	0.278	8	42.06	1200	44.79	2	0.394
9	44.16	1260	47.03	3	0.309	9	29.44	840	31.36	3	0.223
10	72.91	2080	77.64	2	0.535	10	60.99	1740	64.95	3	0.386
11	92.53	2640	98.55	3	0.492	11	64.49	1840	68.69	2	0.503
12	62.39	1780	66.45	3	0.391	12	58.18	1660	61.97	3	0.374
13	76.41	2180	81.38	3	0.443	13	63.09	1800	67.19	4	0.325
14	73.61	2100	78.39	4	0.361	14	77.81	2220	82.87	3	0.447
15	70.80	2020	75.40	4	0.352	15	57.48	1640	61.22	4	0.303
16	82.02	2340	87.35	4	0.388	16	70.80	2020	75.40	5	0.300
17	66.60	1900	70.93	5	0.286	17	70.80	2020	75.40	4	0.352
โหนด 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	56.08	1600	59.73	2	0.467	1	49.77	1420	53.01	3	0.336
2	46.27	1320	49.27	3	0.319	2	52.58	1500	55.99	2	0.451
3	49.07	1400	52.26	1	0.609	3	42.76	1220	45.54	2	0.398
4	32.95	940	35.09	2	0.335	4	30.84	880	32.85	1	0.492
6	44.87	1280	47.78	1	0.587	5	44.87	1280	47.78	1	0.587
7	37.85	1080	40.32	4	0.216	7	27.34	780	29.12	3	0.209
8	44.16	1260	47.03	3	0.309	8	33.65	960	35.84	2	0.340
9	56.78	1620	60.47	2	0.471	9	46.27	1320	49.27	1	0.595
10	36.45	1040	38.82	1	0.535	10	30.14	860	32.10	2	0.314
11	31.55	900	33.60	2	0.325	11	37.85	1080	40.32	1	0.545
12	25.94	740	27.62	2	0.280	12	31.55	900	33.60	2	0.325
13	39.96	1140	42.56	2	0.381	13	36.45	1040	38.82	3	0.266
14	60.99	1740	64.95	4	0.317	14	55.38	1580	58.98	3	0.362
15	65.19	1860	69.43	3	0.402	15	58.89	1680	62.71	3	0.377
16	52.58	1500	55.99	3	0.349	16	51.17	1460	54.50	4	0.277
17	58.18	1660	61.97	4	0.306	17	51.88	1480	55.25	4	0.280

(ข) โหนดที่ 7 - 12

โนด 7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เทห์]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เทห์]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	63.79	1820	67.94	3	0.397	1	57.48	1640	61.22	4	0.303
2	78.51	2240	83.62	2	0.554	2	72.20	2060	76.90	3	0.428
3	44.87	1280	47.78	2	0.410	3	38.56	1100	41.06	3	0.278
4	48.37	1380	51.51	1	0.606	4	42.06	1200	44.79	2	0.394
5	37.85	1080	40.32	4	0.216	5	44.16	1260	47.03	3	0.309
6	27.34	780	29.12	3	0.209	6	33.65	960	35.84	2	0.340
8	46.97	1340	50.02	1	0.599	7	46.97	1340	50.02	1	0.599
9	34.35	980	36.58	2	0.345	9	40.66	1160	43.30	1	0.563
10	57.48	1640	61.22	5	0.255	10	63.79	1820	67.94	4	0.327
11	65.19	1860	69.43	4	0.332	11	60.99	1740	64.95	3	0.386
12	58.89	1680	62.71	5	0.260	12	54.68	1560	58.23	4	0.292
13	63.79	1820	67.94	6	0.239	13	65.19	1860	69.43	5	0.282
14	82.72	2360	88.10	2	0.567	14	75.01	2140	79.88	1	0.706
15	62.39	1780	66.45	3	0.391	15	54.68	1560	58.23	2	0.461
16	75.71	2160	80.63	4	0.368	16	68.00	1940	72.42	3	0.413
17	70.80	2020	75.40	3	0.423	17	68.00	1940	72.42	2	0.517
โนด 9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เทห์]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เทห์]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	51.17	1460	54.50	4	0.277	1	79.92	2280	85.11	3	0.454
2	59.59	1700	63.46	4	0.311	2	114.97	3280	122.44	4	0.474
3	44.16	1260	47.03	3	0.309	3	72.91	2080	77.64	2	0.535
4	29.44	840	31.36	3	0.223	4	60.99	1740	64.95	3	0.386
5	56.78	1620	60.47	2	0.471	5	36.45	1040	38.82	1	0.535
6	46.27	1320	49.27	1	0.595	6	30.14	860	32.10	2	0.314
7	34.35	980	36.58	2	0.345	7	57.48	1640	61.22	5	0.255
8	40.66	1160	43.30	1	0.563	8	63.79	1820	67.94	4	0.327
10	77.81	2220	82.87	3	0.447	9	76.41	2180	81.38	3	0.443
11	73.61	2100	78.39	2	0.537	11	34.35	980	36.58	2	0.345
12	67.30	1920	71.67	3	0.410	12	29.44	840	31.36	1	0.480
13	77.81	2220	82.87	4	0.375	13	24.54	700	26.13	1	0.433
14	62.39	1780	66.45	2	0.495	14	59.59	1700	63.46	3	0.380
15	51.88	1480	55.25	4	0.280	15	41.36	1180	44.05	2	0.390
16	97.44	2780	103.77	5	0.375	16	37.15	1060	39.57	2	0.364
17	55.38	1580	58.98	3	0.362	17	72.91	2080	77.64	3	0.431
โนด 11	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เทห์]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 12	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เทห์]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	99.54	2840	106.01	4	0.437	1	69.40	1980	73.91	4	0.347
2	77.81	2220	82.87	3	0.447	2	71.50	2040	76.15	4	0.354
3	92.53	2640	98.55	3	0.492	3	62.39	1780	66.45	3	0.391
4	64.49	1840	68.69	2	0.503	4	58.18	1660	61.97	3	0.374
5	31.55	900	33.60	2	0.325	5	25.94	740	27.62	2	0.280
6	37.85	1080	40.32	1	0.545	6	31.55	900	33.60	2	0.325
7	65.19	1860	69.43	4	0.332	7	58.89	1680	62.71	5	0.260
8	60.99	1740	64.95	3	0.386	8	54.68	1560	58.23	4	0.292
9	73.61	2100	78.39	2	0.537	9	67.30	1920	71.67	3	0.410
10	34.35	980	36.58	2	0.345	10	29.44	840	31.36	1	0.480
12	44.87	1280	47.78	1	0.587	11	44.87	1280	47.78	1	0.587
13	49.77	1420	53.01	2	0.437	13	25.94	740	27.62	1	0.447
14	51.88	1480	55.25	3	0.346	14	58.18	1660	61.97	2	0.477
15	72.20	2060	76.90	2	0.532	15	39.96	1140	42.56	1	0.558
16	64.49	1840	68.69	3	0.400	16	28.74	820	30.61	2	0.303
17	65.19	1860	69.43	3	0.402	17	71.50	2040	76.15	2	0.530

(ค) โหนดที่ 13 - 17

โหนด 13	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 14	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	83.42	2380	88.84	4	0.392	1	92.53	2640	98.55	5	0.363
2	76.41	2180	81.38	5	0.317	2	107.26	3060	114.23	4	0.456
3	76.41	2180	81.38	3	0.443	3	73.61	2100	78.39	4	0.361
4	63.09	1800	67.19	4	0.325	4	77.81	2220	82.87	3	0.447
5	39.96	1140	42.56	2	0.381	5	60.99	1740	64.95	4	0.317
6	36.45	1040	38.82	3	0.266	6	55.38	1580	58.98	3	0.362
7	63.79	1820	67.94	6	0.239	7	82.72	2360	88.10	2	0.567
8	65.19	1860	69.43	5	0.282	8	75.01	2140	79.88	1	0.706
9	77.81	2220	82.87	4	0.375	9	62.39	1780	66.45	2	0.495
10	24.54	700	26.13	1	0.433	10	59.59	1700	63.46	3	0.380
11	49.77	1420	53.01	2	0.437	11	51.88	1480	55.25	3	0.346
12	25.94	740	27.62	1	0.447	12	58.18	1660	61.97	2	0.477
14	56.08	1600	59.73	3	0.365	13	56.08	1600	59.73	3	0.365
15	29.44	840	31.36	2	0.309	15	26.64	760	28.37	1	0.454
16	40.66	1160	43.30	1	0.563	16	70.80	2020	75.40	2	0.527
17	63.09	1800	67.19	3	0.394	17	33.65	960	35.84	1	0.514
โหนด 15	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 16	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	77.81	2220	82.87	5	0.321	1	96.04	2740	102.28	5	0.372
2	86.93	2480	92.58	5	0.348	2	91.13	2600	97.06	6	0.316
3	70.80	2020	75.40	4	0.352	3	82.02	2340	87.35	4	0.388
4	57.48	1640	61.22	4	0.303	4	70.80	2020	75.40	5	0.300
5	65.19	1860	69.43	3	0.402	5	52.58	1500	55.99	3	0.349
6	58.89	1680	62.71	3	0.377	6	51.17	1460	54.50	4	0.277
7	62.39	1780	66.45	3	0.391	7	75.71	2160	80.63	4	0.368
8	54.68	1560	58.23	2	0.461	8	68.00	1940	72.42	3	0.413
9	51.88	1480	55.25	4	0.280	9	97.44	2780	103.77	5	0.375
10	41.36	1180	44.05	2	0.390	10	37.15	1060	39.57	2	0.364
11	72.20	2060	76.90	2	0.532	11	64.49	1840	68.69	3	0.400
12	39.96	1140	42.56	1	0.558	12	28.74	820	30.61	2	0.303
13	29.44	840	31.36	2	0.309	13	40.66	1160	43.30	1	0.563
14	26.64	760	28.37	1	0.454	14	70.80	2020	75.40	2	0.527
16	44.16	1260	47.03	1	0.583	15	44.16	1260	47.03	1	0.583
17	33.65	960	35.84	1	0.514	17	77.81	2220	82.87	2	0.552
โหนด 17	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [เท่า]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR						
1	85.52	2440	91.08	6	0.301						
2	100.25	2860	106.76	5	0.382						
3	66.60	1900	70.93	5	0.286						
4	70.80	2020	75.40	4	0.352						
5	58.18	1660	61.97	4	0.306						
6	51.88	1480	55.25	4	0.280						
7	70.80	2020	75.40	3	0.423						
8	68.00	1940	72.42	2	0.517						
9	55.38	1580	58.98	3	0.362						
10	72.91	2080	77.64	3	0.431						
11	65.19	1860	69.43	3	0.402						
12	71.50	2040	76.15	2	0.530						
13	63.09	1800	67.19	3	0.394						
14	33.65	960	35.84	1	0.514						
15	33.65	960	35.84	1	0.514						
16	77.81	2220	82.87	2	0.552						

ต่อไปเราจะหาความสัมพันธ์ระหว่าง OSNR กับ อัตราความผิดพลาดบิต (bit-error-rate, BER)[57] โดยสมมติว่าที่ตัวรับสัญญาณ(receiver) ไม่มีสัญญาณรบกวน

$$BER = \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (5.8)$$

หาค่า Q ได้จาก

$$OSNR = Q^2 \quad (5.9)$$

เมื่อ BER คือ อัตราความผิดพลาดบิต

Q คือ ตัวประกอบ Q (Q factor)

Q factor นั้นใช้ในการบอกถึงคุณภาพของตัวรับสัญญาณ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ค่า BER ของระบบเส้นใยแสงจะอยู่ในช่วง 10^{-9} ถึง 10^{-12} [10]

จากค่าอัตราส่วน OSNR ที่เราคำนวณได้ เราสามารถหาความสัมพันธ์ตามสมการที่ (5.9) ได้ดังนี้

$$\frac{OSNR_{new}}{OSNR_{old}} = \left(\frac{Q_N}{Q_O} \right)^2$$

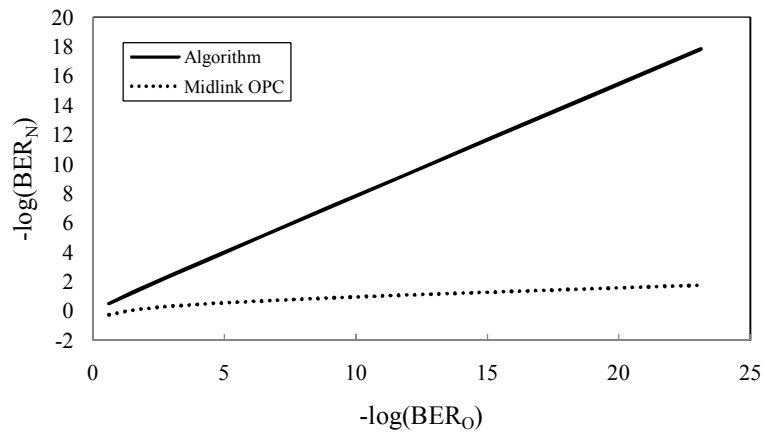
$$Q_N = \left(\sqrt{\frac{OSNR_{new}}{OSNR_{old}}} \right) Q_O \quad (5.10)$$

เมื่อ Q_N คือ Q factor หลังจากวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

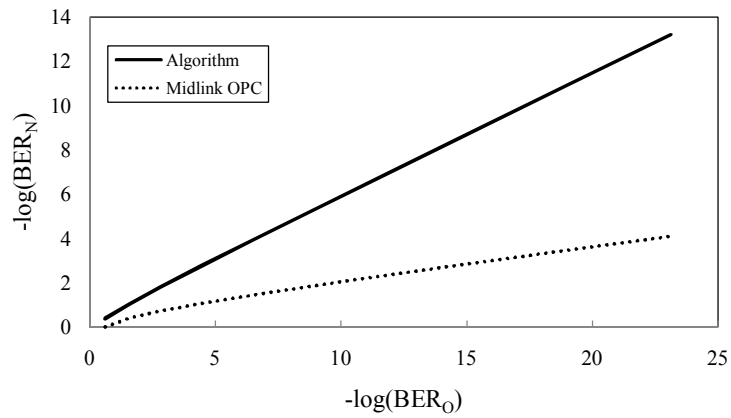
Q_O คือ Q factor เดิมก่อนเครื่องส่งยุคเฟสแสง

จากสมการที่ (5.10) เราสามารถนำค่าอัตราส่วน OSNR มาหาค่า Q factor ใหม่ได้ที่ค่า Q factor ต่างๆกัน และยังสามารถนำไปหาค่า BER ได้อีกด้วย

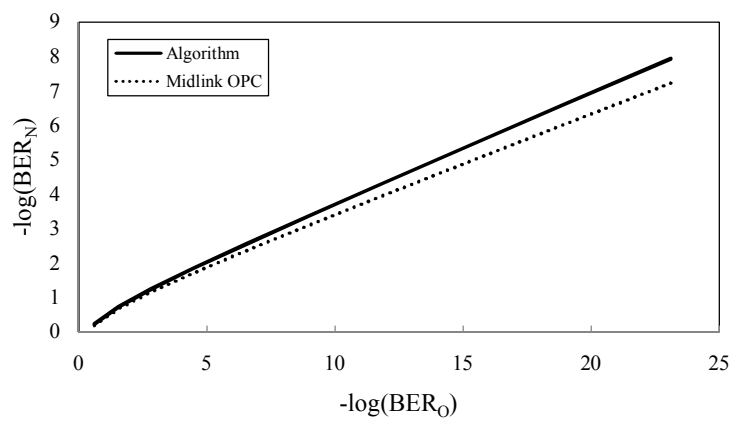
รูปที่ 5.5 (ก)-(จ) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง BER หลังจากวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง (BER_N) และ BER ของโครงข่ายปกติ (BER_O) โดยเส้นกราฟเส้นประคือกรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่กลางข่ายเชื่อมโยง ส่วนเส้นทึบเป็นกรณีที่ใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีที่คิดค้นขึ้น



(ก) โครงข่ายตัวอย่างแบบแพร์และเลือกสัญญาณ

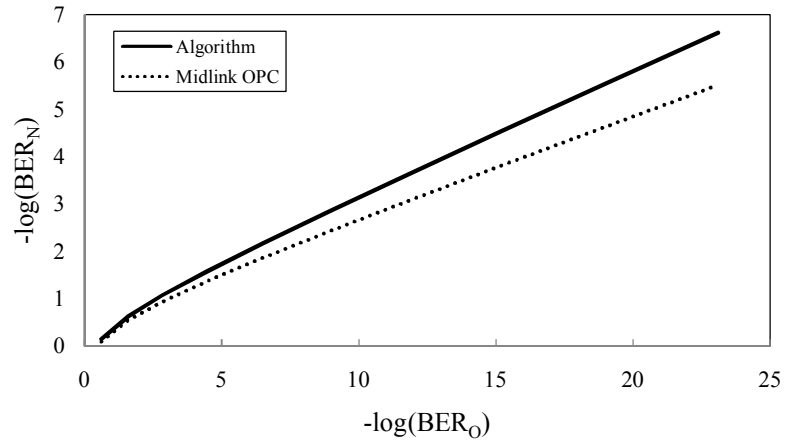


(ข) โครงข่าย OPEN

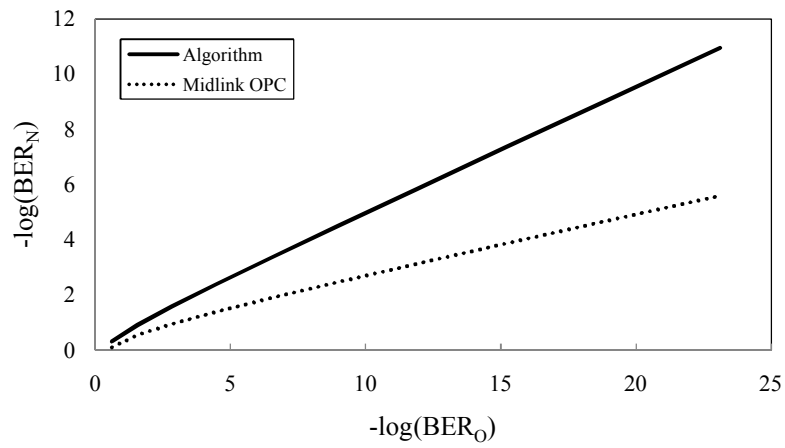


(ค) โครงข่าย ERNet

รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง BER_N และ BER_O



(ง) โครงข่าย NARNet



(จ) โครงข่าย NARNet มีการกู้คืนสัญญาณ

รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง BER_N และ BER_O

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการศึกษารวบรวมเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร่และเลือกสัญญาณ และโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบเมช โดยโครงข่ายแบบเมชนั้น ได้ยกตัวอย่างโครงข่ายมา 3 ตัวอย่าง รวมถึงได้รวมกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย และได้มีการกู้คืนสัญญาณแบบใช้วิถีร่วมกัน (shared path protection) ซึ่งโครงข่ายทั้งหมดนั้น ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น โดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์กราฟิกในระบบ รวมถึงตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสง ซึ่งถ้าโครงข่ายมีระยะทางไกล การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่จุดกึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงจะเป็นวิธีที่ดีและไม่ยุ่งยาก แต่ในกรณีที่โครงข่ายมีระยะทางสั้นๆ ในจุดนี้ได้มีการนำเสนอวิธีที่สามารถบอกได้ว่า โครงข่ายชนิดไหนควรวางที่กลางข่ายเชื่อมโยงหรือโครงข่ายชนิดไหนใช้วิธีที่ลดจำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงลงได้ โดยใช้พารามิเตอร์ R เป็นตัวกำหนด หลังจากนั้นก็วิเคราะห์ค่าดีสเพอร์ชันสะสมของกราฟิกในระบบว่า เกินกว่าค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ ซึ่งทั้งหมดนี้ เราได้ทำการทดลองในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ 1 ตัวอย่าง ได้ผลออกมาว่า ต้องวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งหมด 2 ตัว โครงข่ายแบบเมช 3 ตัวอย่าง ดังนี้ ERNet ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสง 8 ตัว NARNet ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสง 6 ตัว และสุดท้าย OPEN ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสง 6 ตัว นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดลองในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายไม่เกินหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยใช้การกู้คืนสัญญาณแบบใช้วิถีร่วมกัน (shared path protection) ซึ่งได้ทำการทดลองในโครงข่าย NARNet โดยสรุปได้ว่าต้องใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งหมด 4 ตัว

นอกจากนี้ในระบบที่มีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง สัญญาณที่ออกจากเครื่องส่งยุคเฟสแสงจะมีกำลังสัญญาณลดลงมากกว่าการจัดการดีสเพอร์ชันแบบอื่น จึงต้องมีการใช้เครื่องขยายสัญญาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเครื่องขยายสัญญาณนั้นนอกจากจะขยายสัญญาณข้อมูลแล้ว ยังขยายสัญญาณรบกวนในระบบอีกด้วย ทำให้ OSNR ของระบบลดลง ดังนั้นเราจึงทำการวิเคราะห์ค่า OSNR ในโครงข่าย โดยพิจารณาจากอัตราส่วน OSNR ระหว่างโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแล้ว กับโครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง จากนั้นนำค่าอัตราส่วน OSNR ที่ได้ นำมาวิเคราะห์หา BER ซึ่งจะเปรียบเทียบกับกรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่จุดกึ่งกลางข่ายเชื่อมโยง

ซึ่งพบว่า ทุกๆ โครงข่ายตัวอย่าง ค่า BER ในกรณีที่ใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีที่คิดค้นขึ้นมา จะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่จุดกึ่งกลางข่ายเชื่อมโยง

สรุปการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายรูปแบบต่างๆนั้น จะมีวิธีการคิดพิจารณาที่แตกต่างกันในขั้นตอนที่จะต้องเลือกเส้นทางกับความยาวของระยะทางโครงข่าย แต่วิธีการหาตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสง จะสามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุกโครงข่าย ซึ่งโครงข่ายแบบเมชนั้นจะมีความซับซ้อนมากที่สุด

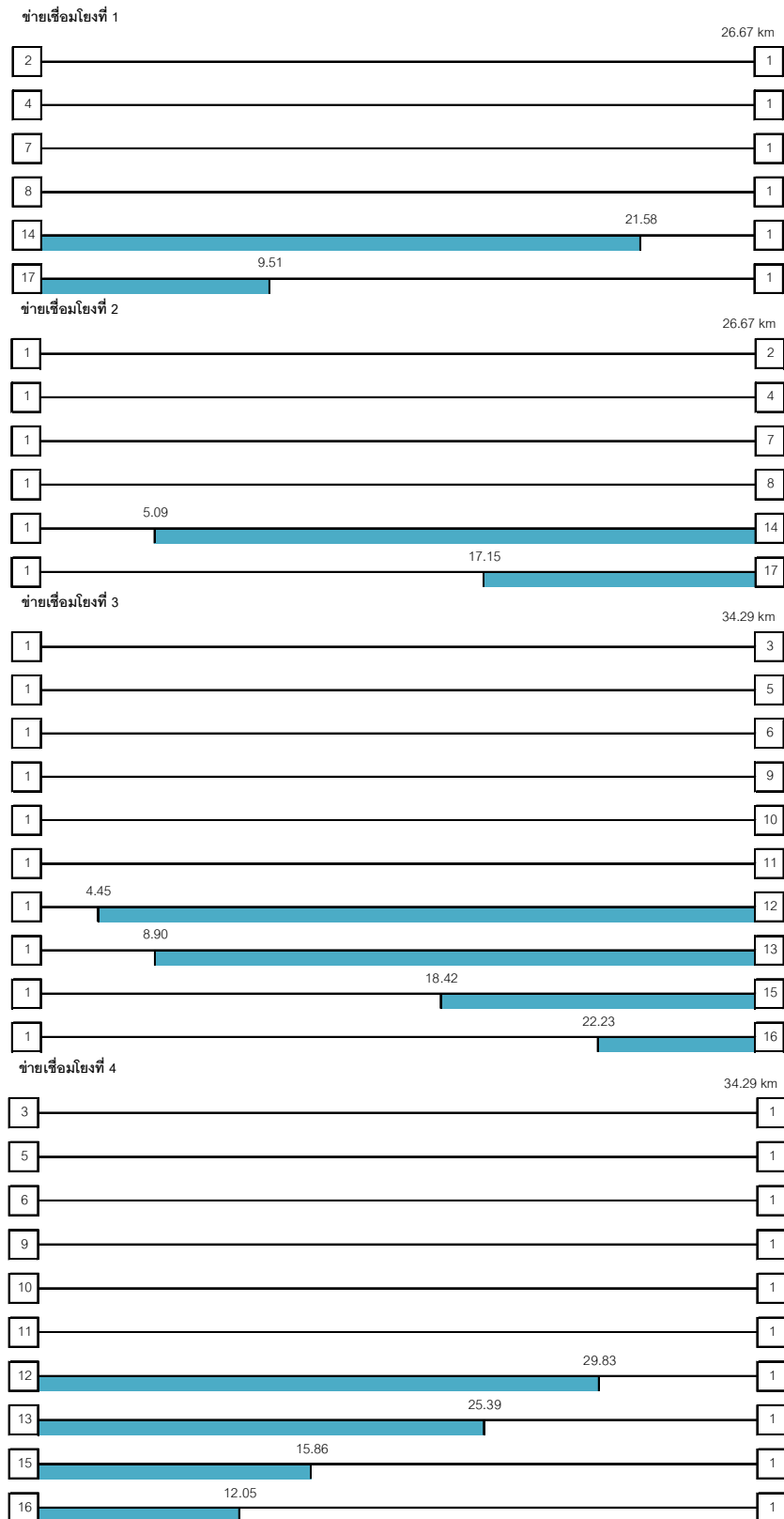
6.2 ข้อเสนอแนะ

การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมชนั้น ยังมีเงื่อนไขจำกัดในเรื่องของระยะทางของทราฟฟิก และการใช้วิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ซึ่งวิธีที่ใช้ ต้องทำการลดขนาดโครงข่ายหรือไม่สามารถใช้ในโครงข่ายในระยะทางไกลๆ ได้ เป็นเพราะว่า ตำแหน่งที่จะซับซ้อนทับหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้น ไม่ตรงกันทุกๆ ทราฟฟิกเนื่องจากระยะทางของทราฟฟิกมีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นจึงคิดว่า น่าจะมีวิธีอื่นที่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้โดยที่ไม่ต้องทำการลดขนาด โดยอาจใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีในการหาเส้นทางของทราฟฟิก (routing) เข้ามาช่วย

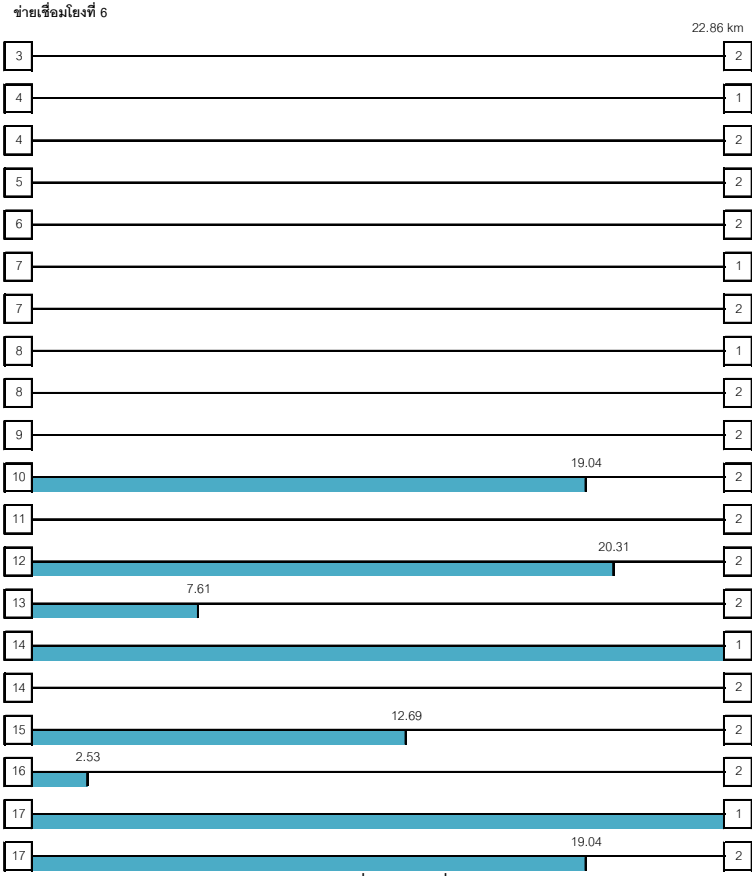
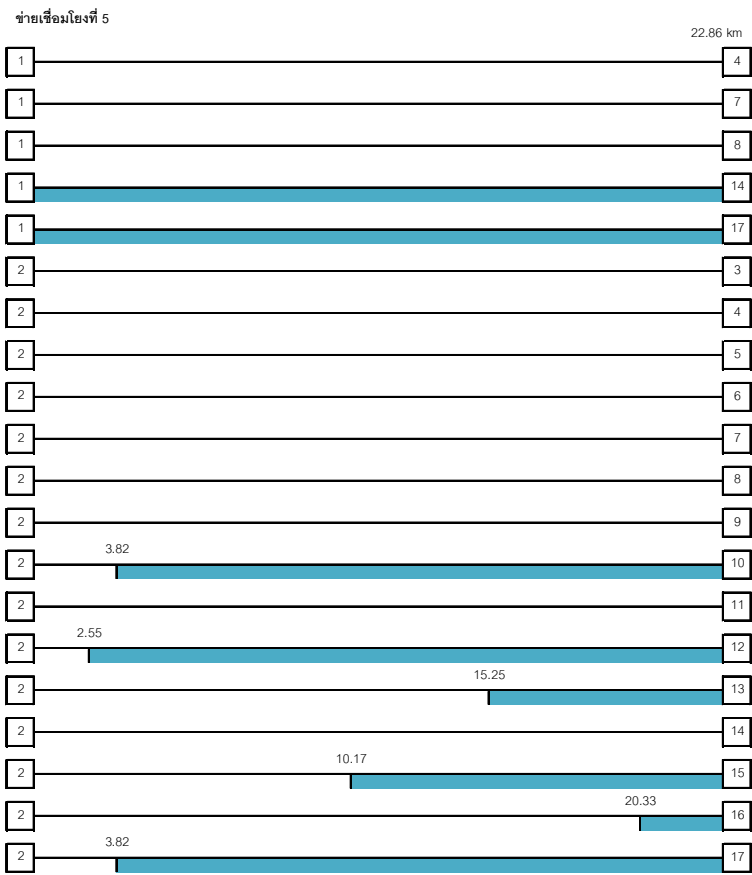
ในวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาผลการทดลองด้วยวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ คิดว่าน่าจะลองนำไปใช้กับระบบจริง หรือนำไปสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (simulation) รวมถึงผลกระทบต่างๆ นอกเหนือจากดิสเพอร์ชัน เพื่อให้การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงสามารถนำไปใช้ได้จริงในระบบการสื่อสารปัจจุบัน รวมถึงอาจจะมีการปรับปรุงเพื่อสร้างโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงและ การอินเตอร์เซกหาตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ต่อไป

ภาคผนวก

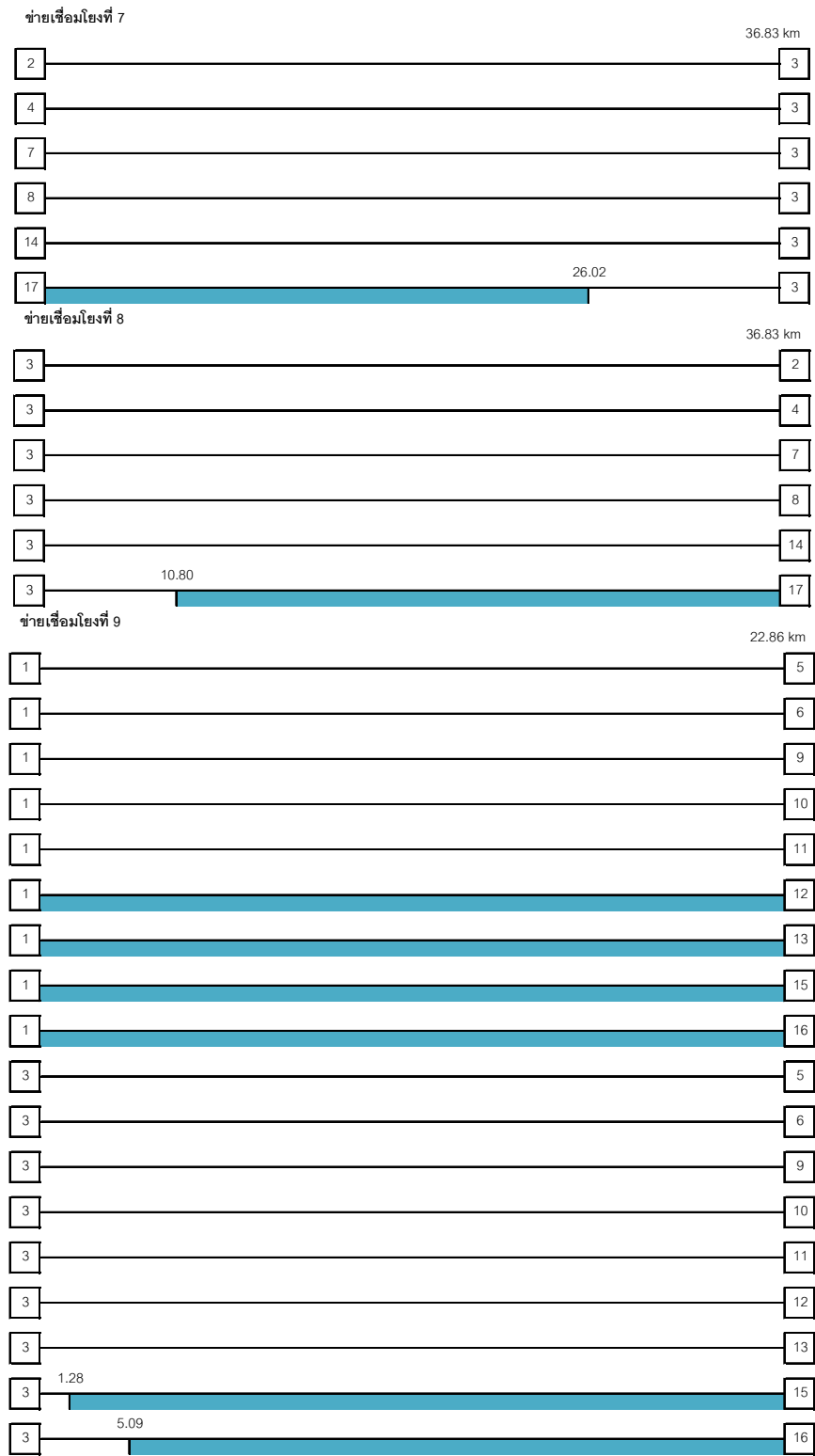
กราฟฟิกและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่าย NARNet



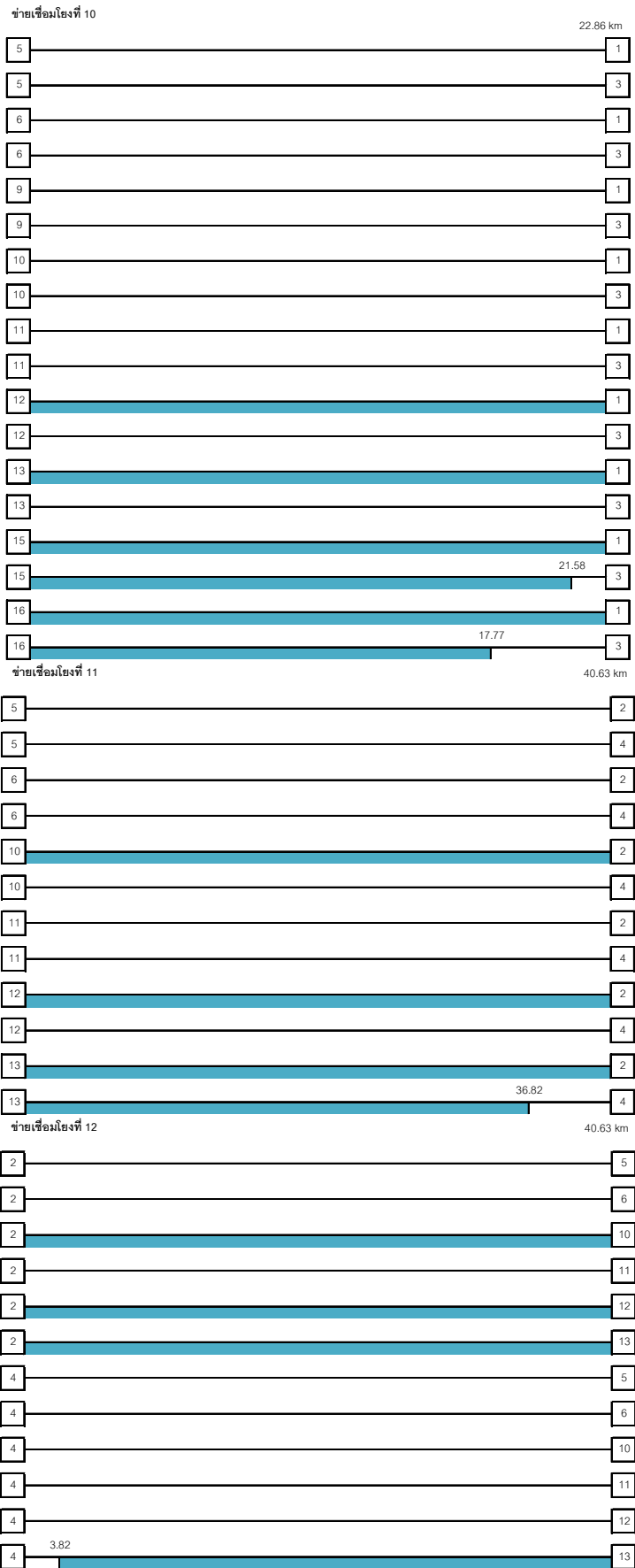
(ก) สายเชื่อมโยงที่ 1-4



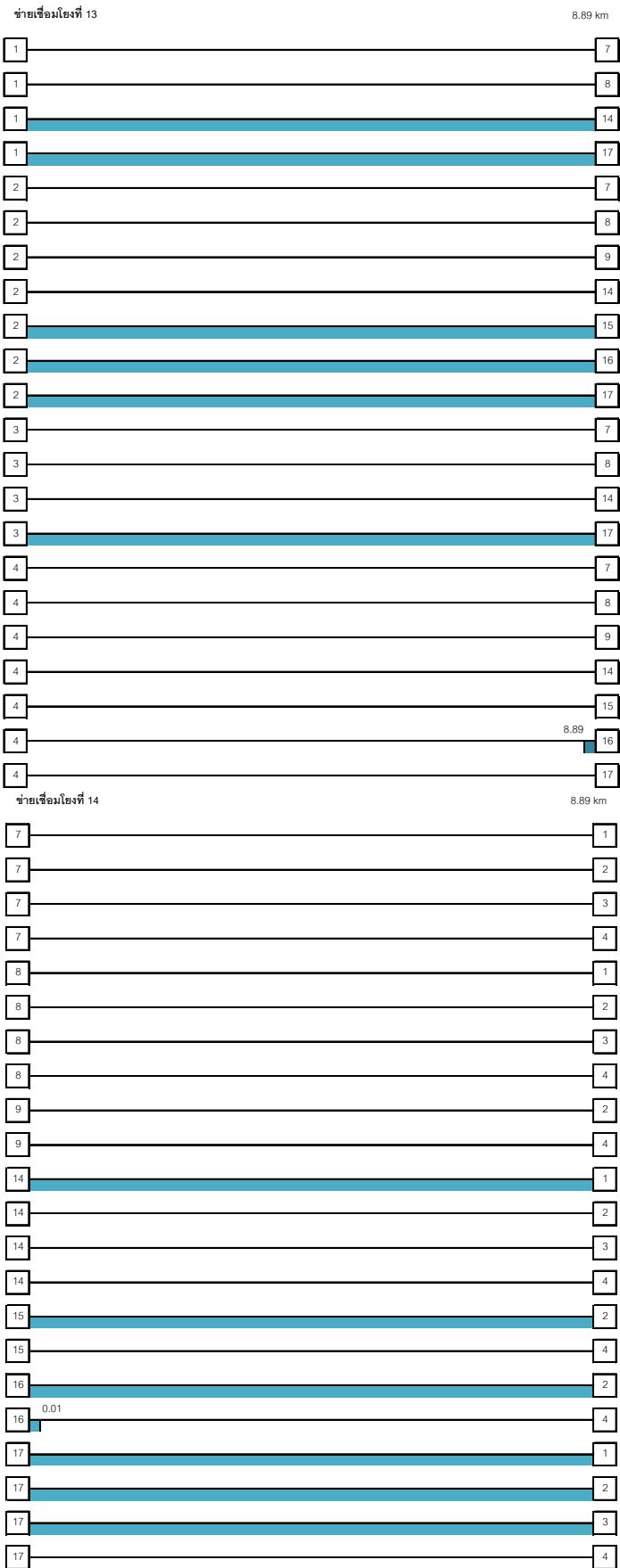
(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 5-6



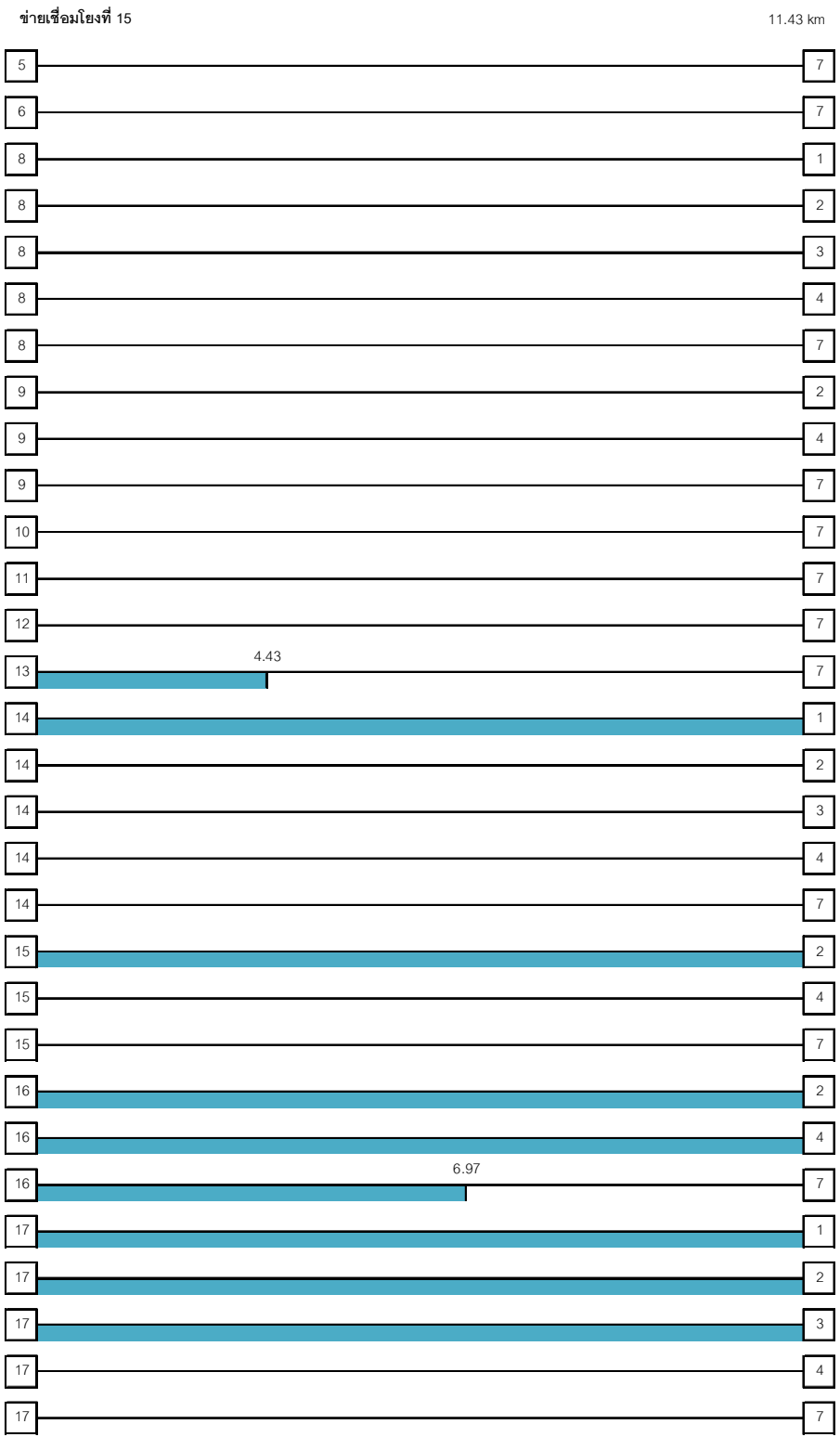
(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 7-9



(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 10-12



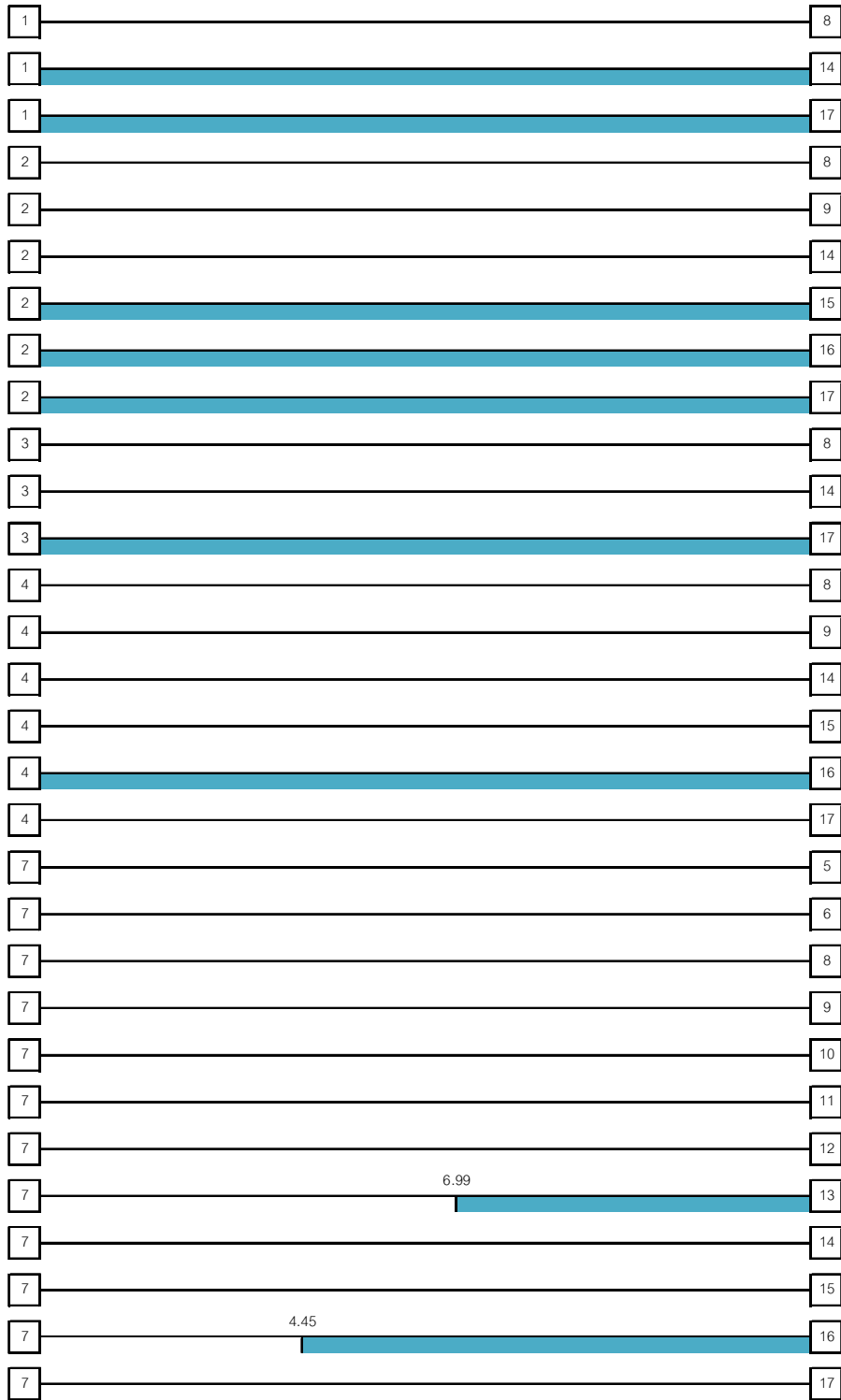
(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13-14



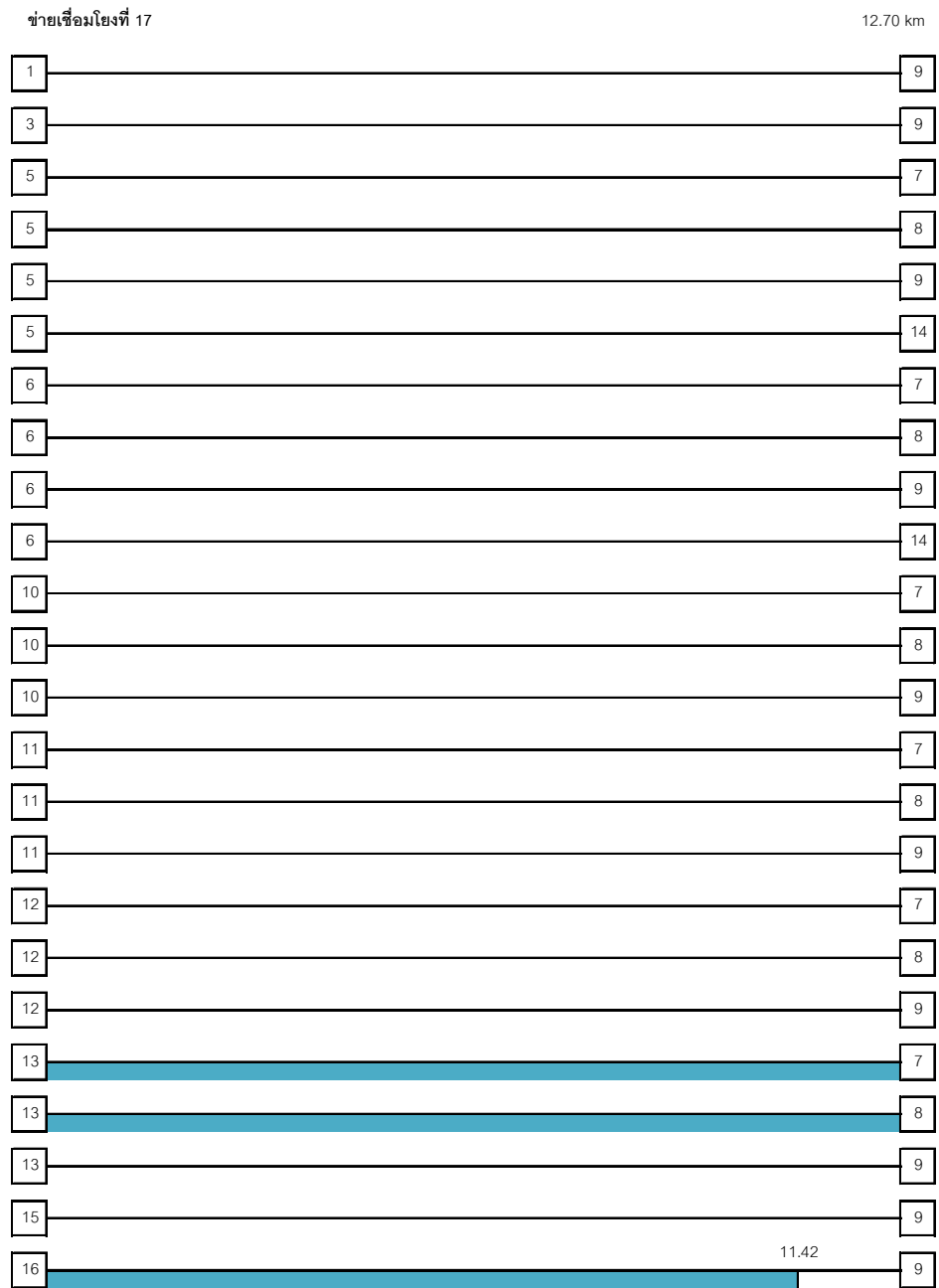
(ด) ข่ายเชื่อมโยงที่ 15

ข่ายเชื่อมโยงที่ 16

11.43 km



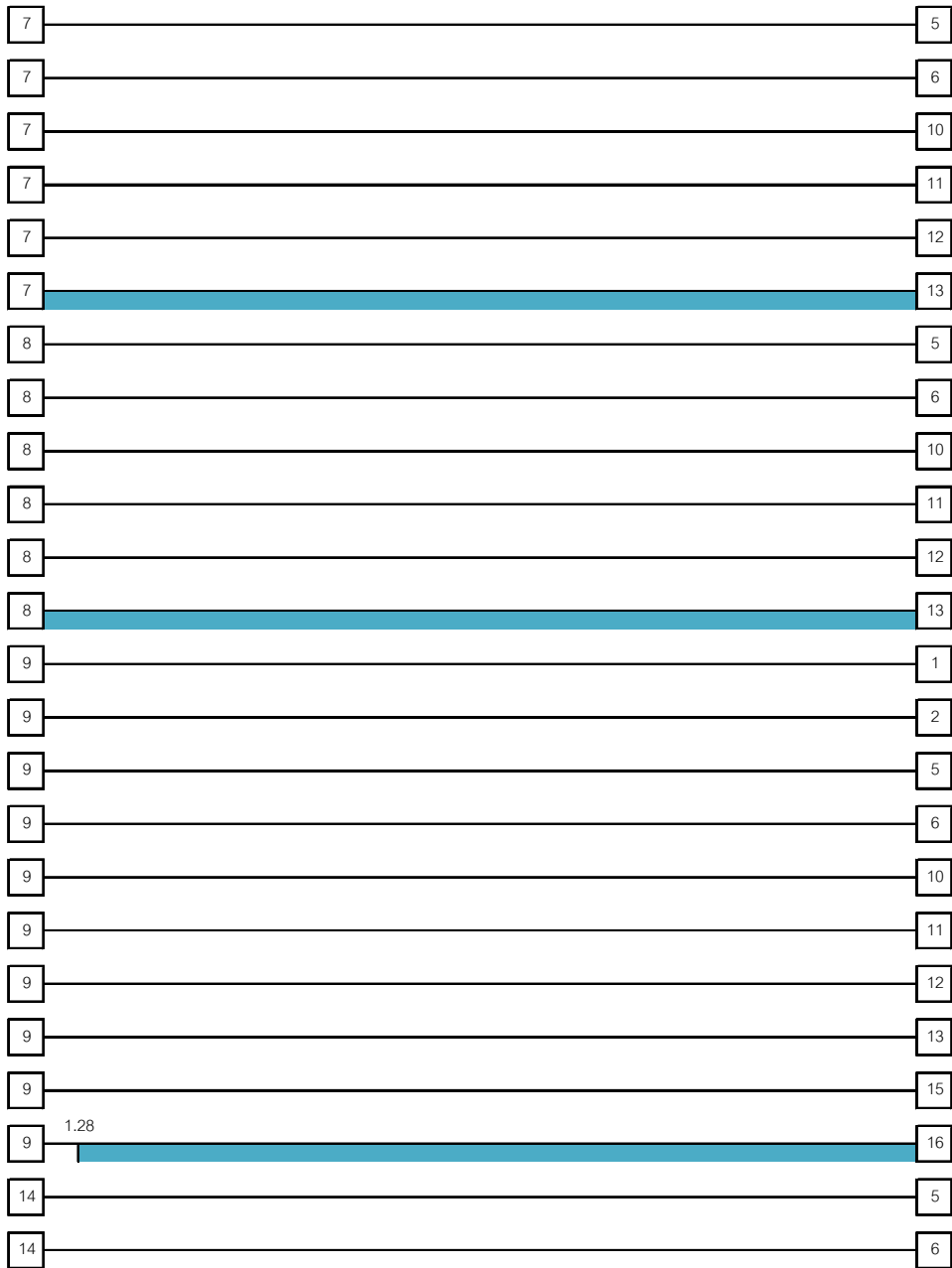
(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 16



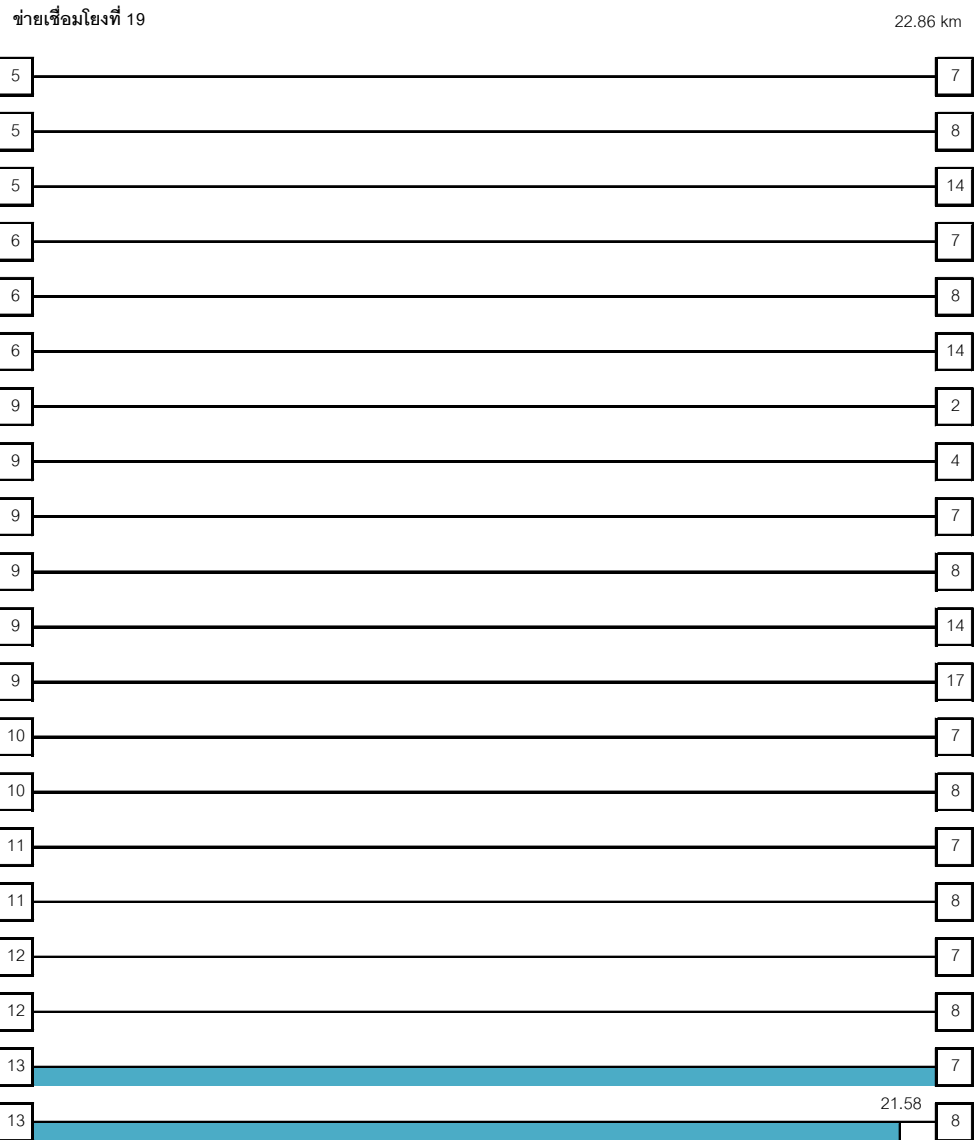
(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 17

ข่ายเชื่อมโยงที่ 18

12.70 km



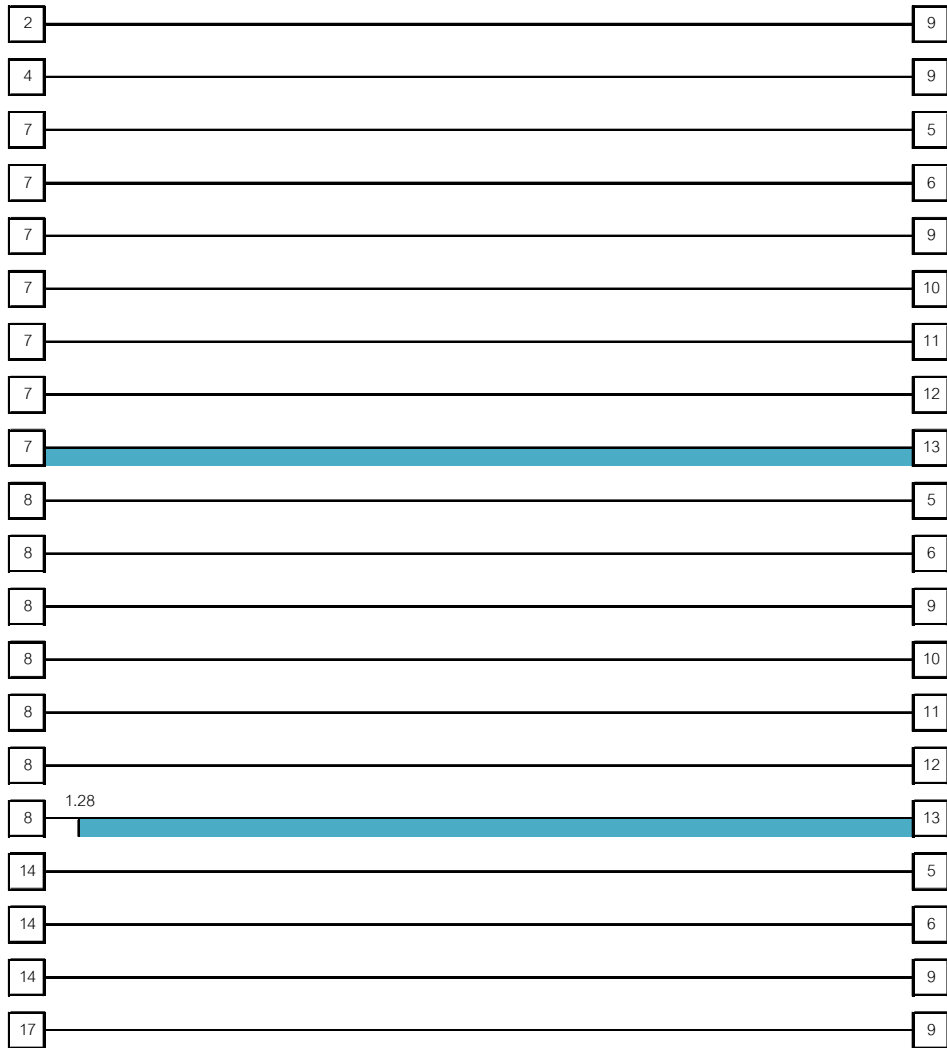
(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 18



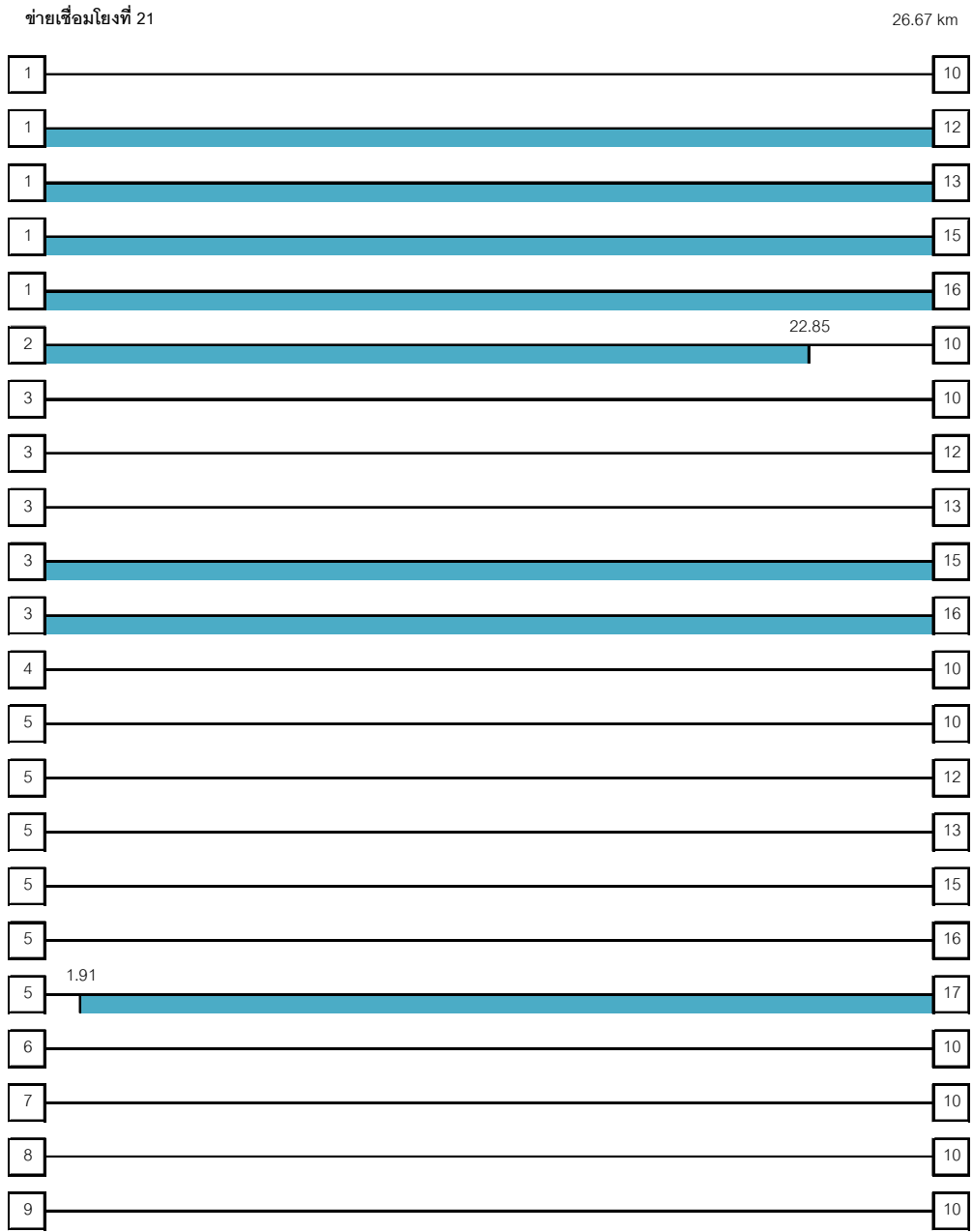
(ญ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 19

ข่ายเชื่อมโยงที่ 20

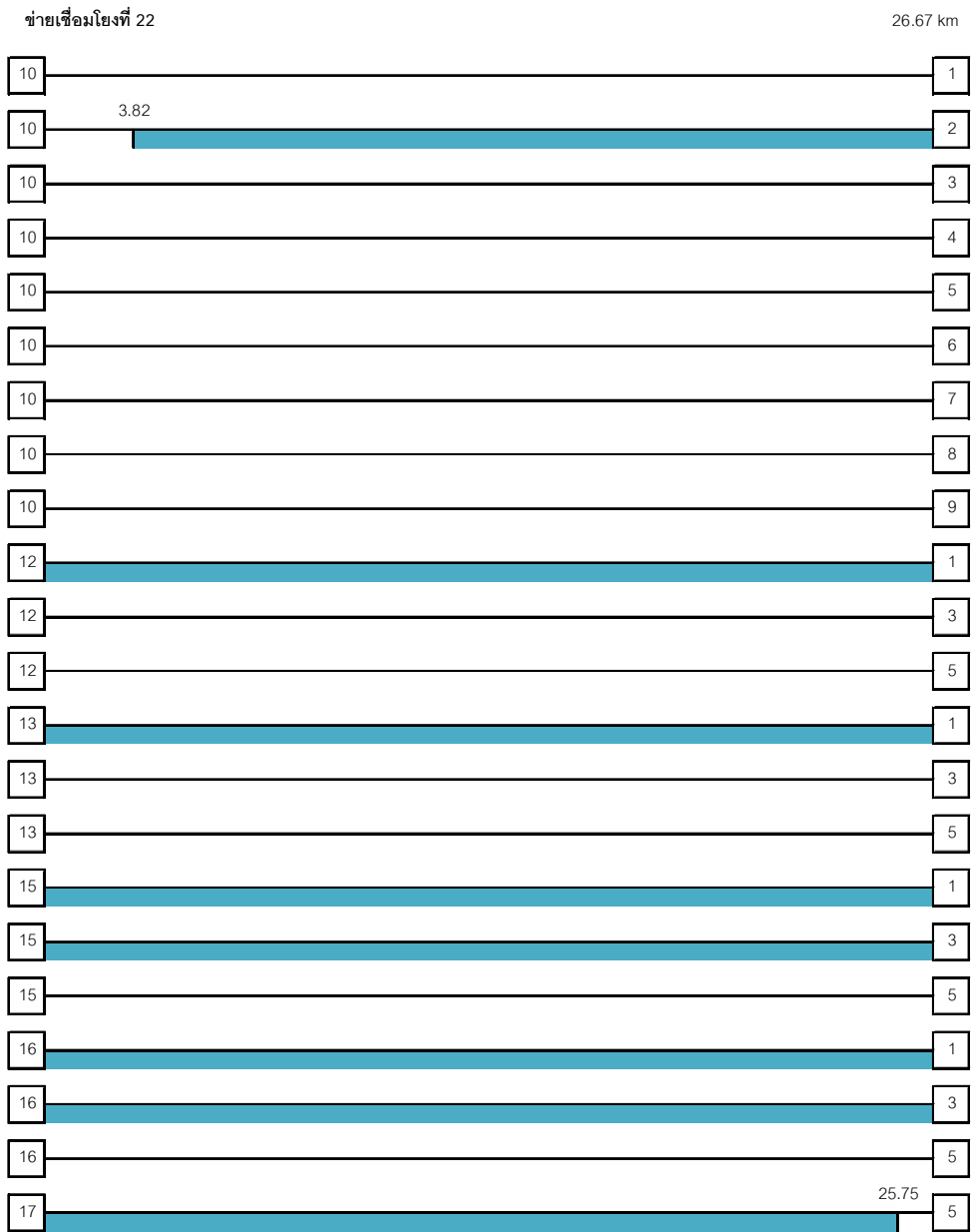
22.86 km



(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 20



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 21



(รูป) ข่ายเชื่อมโยงที่ 22

ข่ายเชื่อมโยงที่ 23

11.43 km

2	5
2	10
4	5
4	10
6	1
6	3
6	5
6	10
7	5
7	10
8	5
8	10
9	1
9	3
9	5
9	10
11	1
11	3
11	5
14	5

ข่ายเชื่อมโยงที่ 24

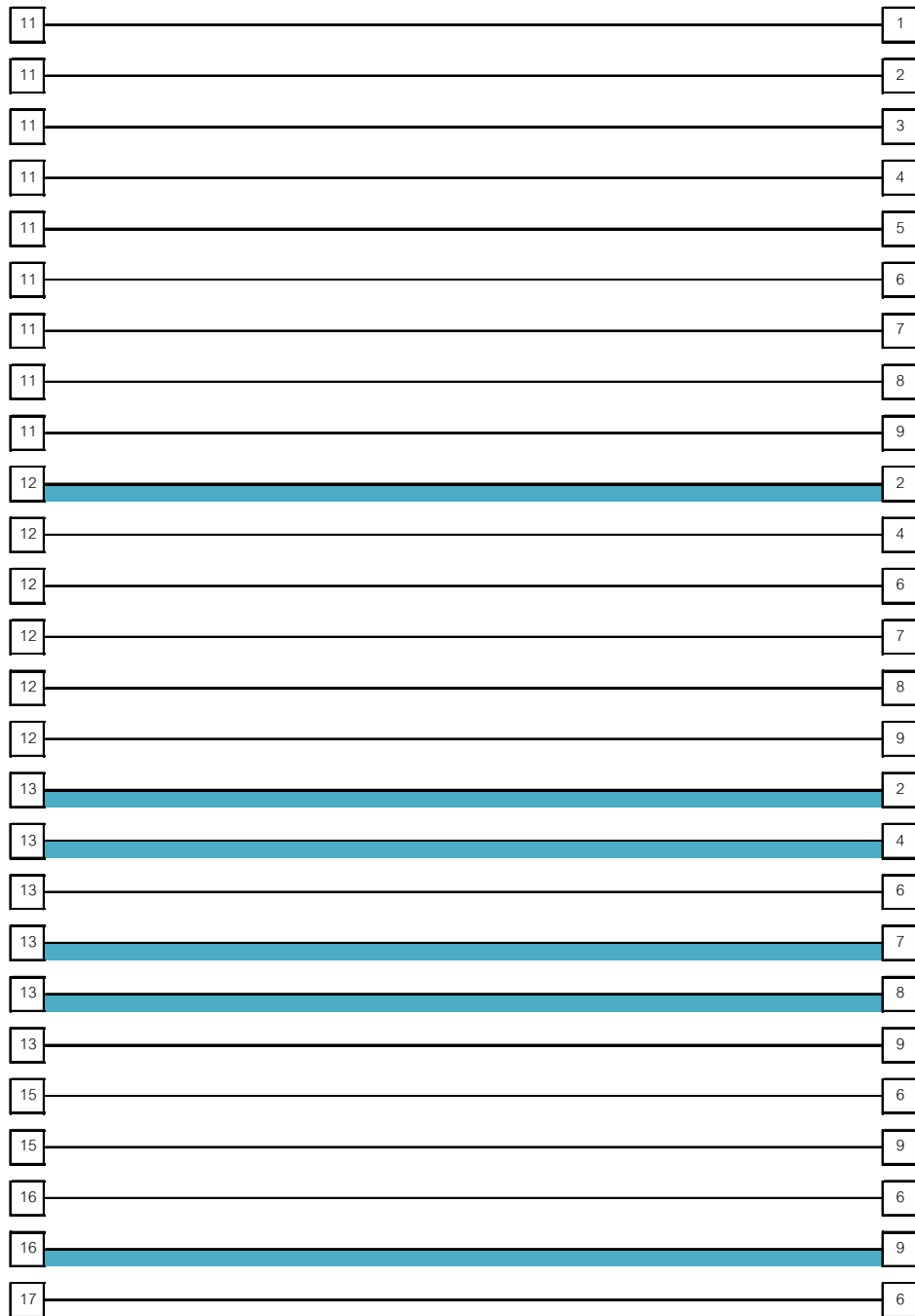
11.43 km

1	6
1	9
1	11
3	6
3	9
3	11
5	2
5	4
5	6
5	7
5	8
5	9
5	11
5	14
10	2
10	4
10	6
10	7
10	8
10	9

(๓) ข่ายเชื่อมโยงที่ 23-24

ข่ายเชื่อมโยงที่ 25

24.13 km



(ฅม) ข่ายเชื่อมโยงที่ 25

ข่ายเชื่อมโยงที่ 26

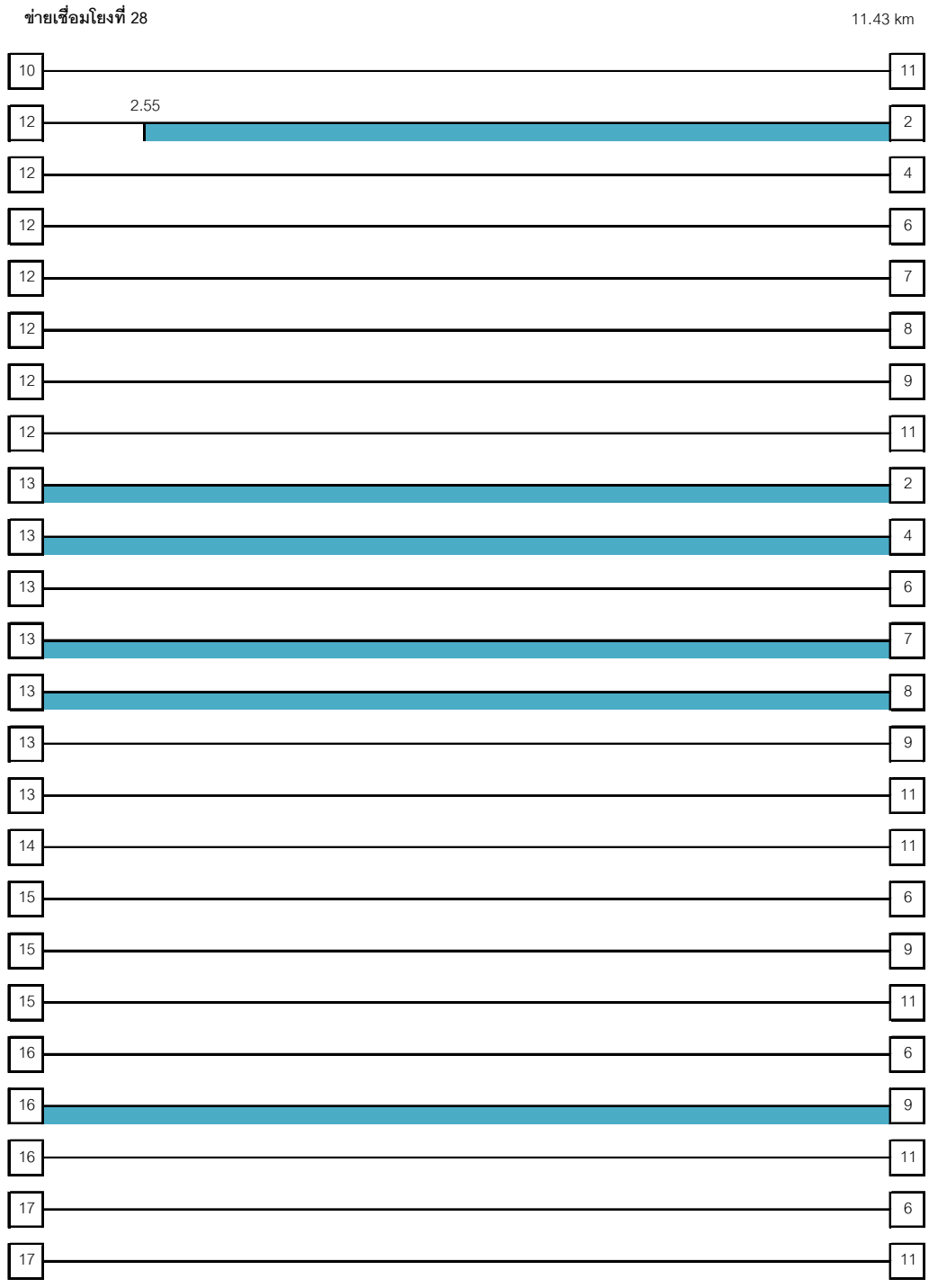
24.13 km



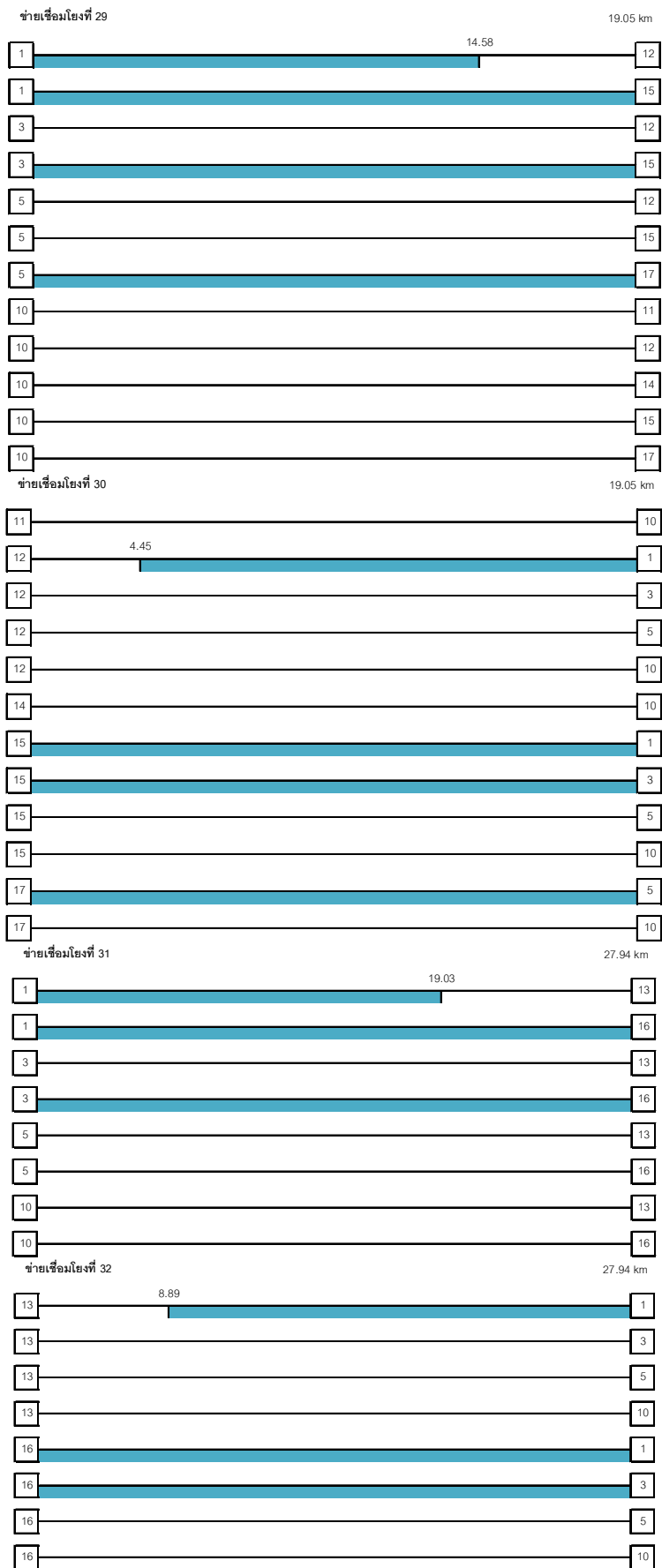
(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 26



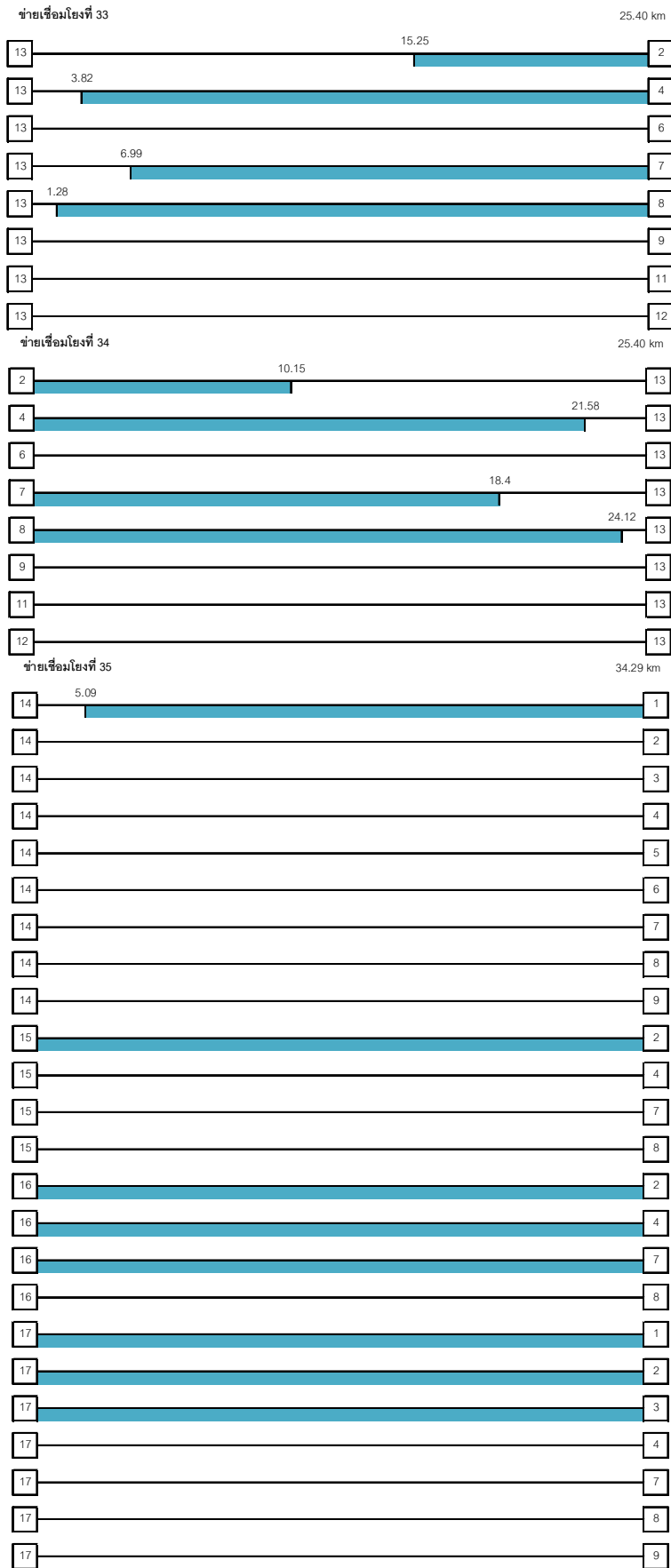
(ด) ข่ายเชื่อมโยงที่ 27



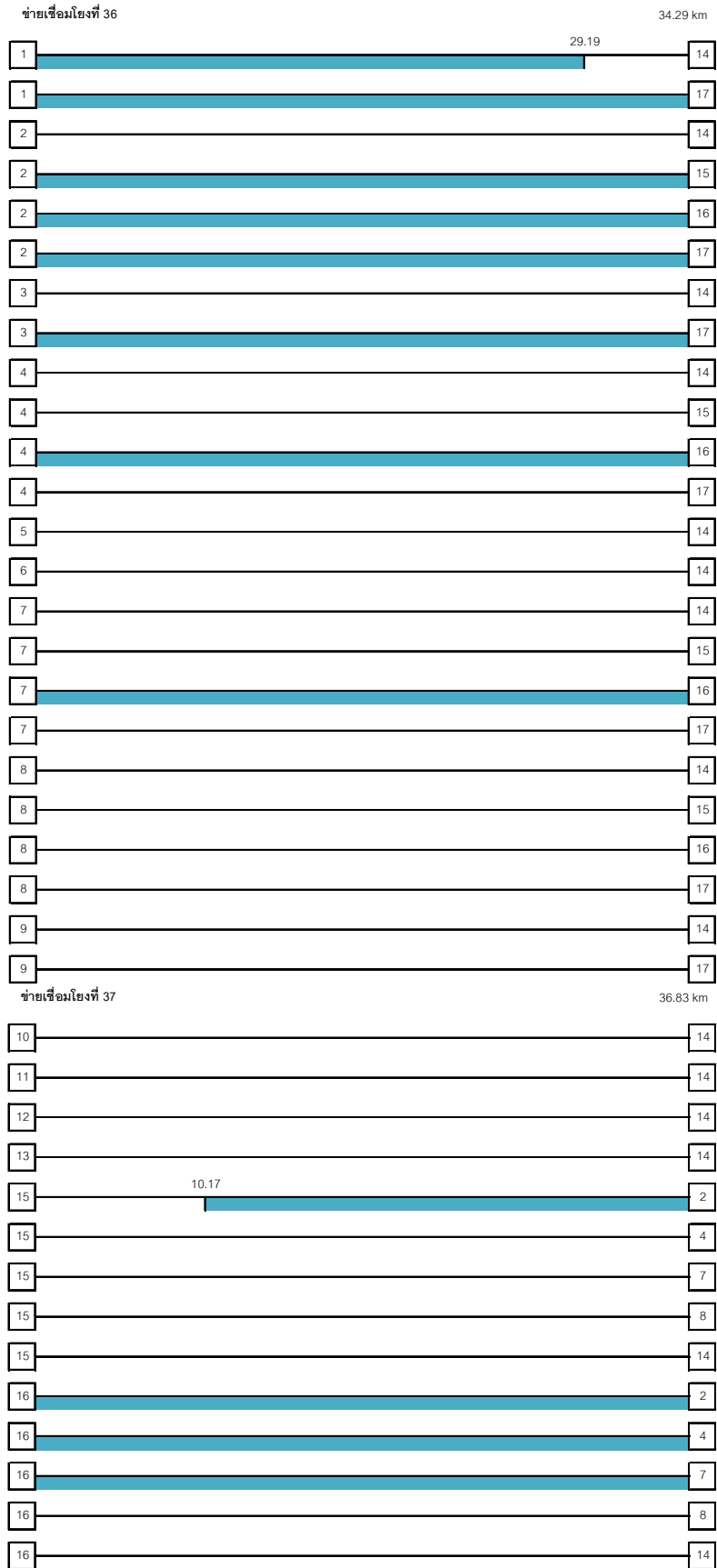
(ต) ข่ายเชื่อมโยงที่ 28



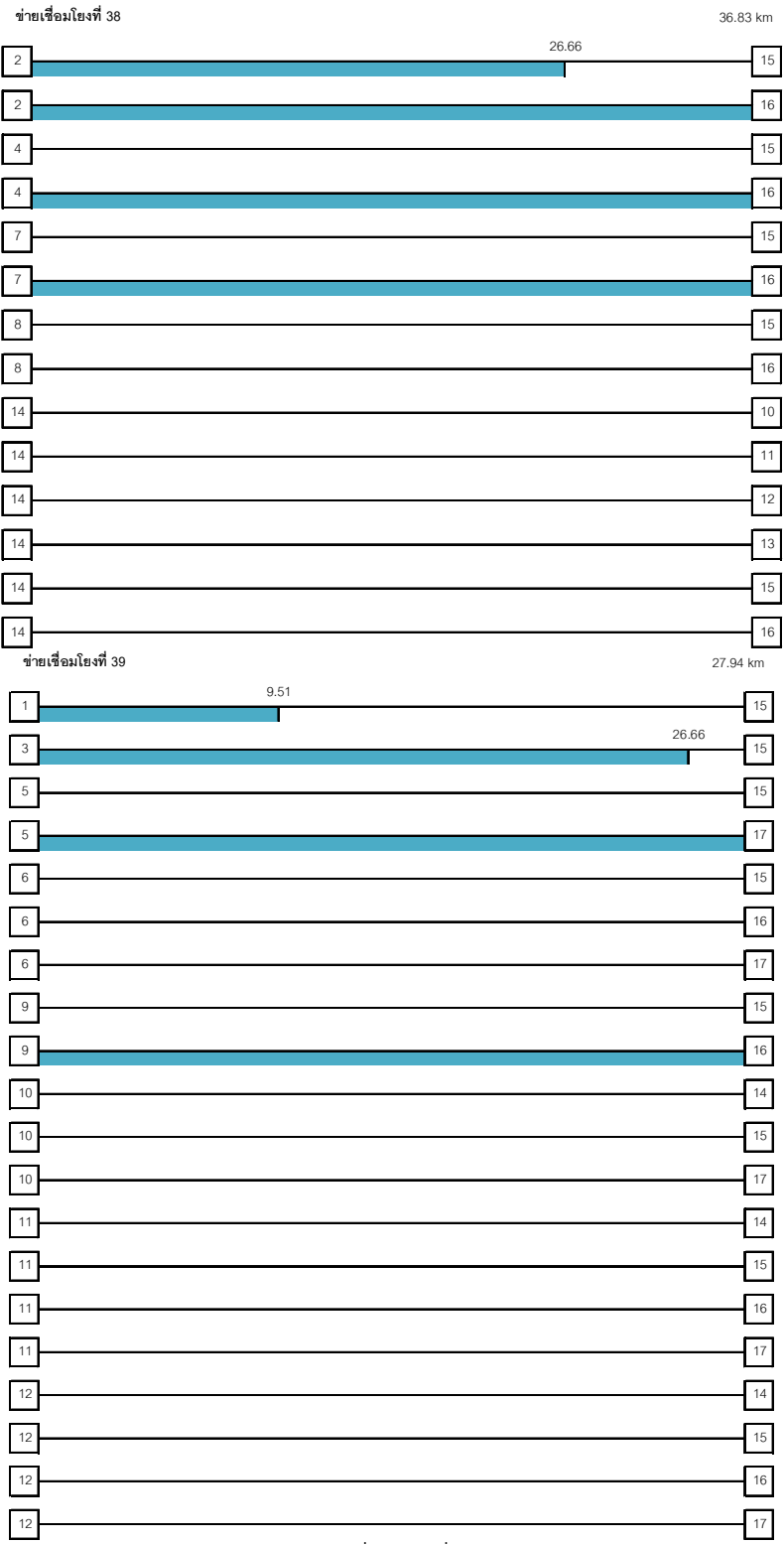
(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 29-32



(ท) ข่ายเชื่อมโยงที่ 33-35



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 36-37



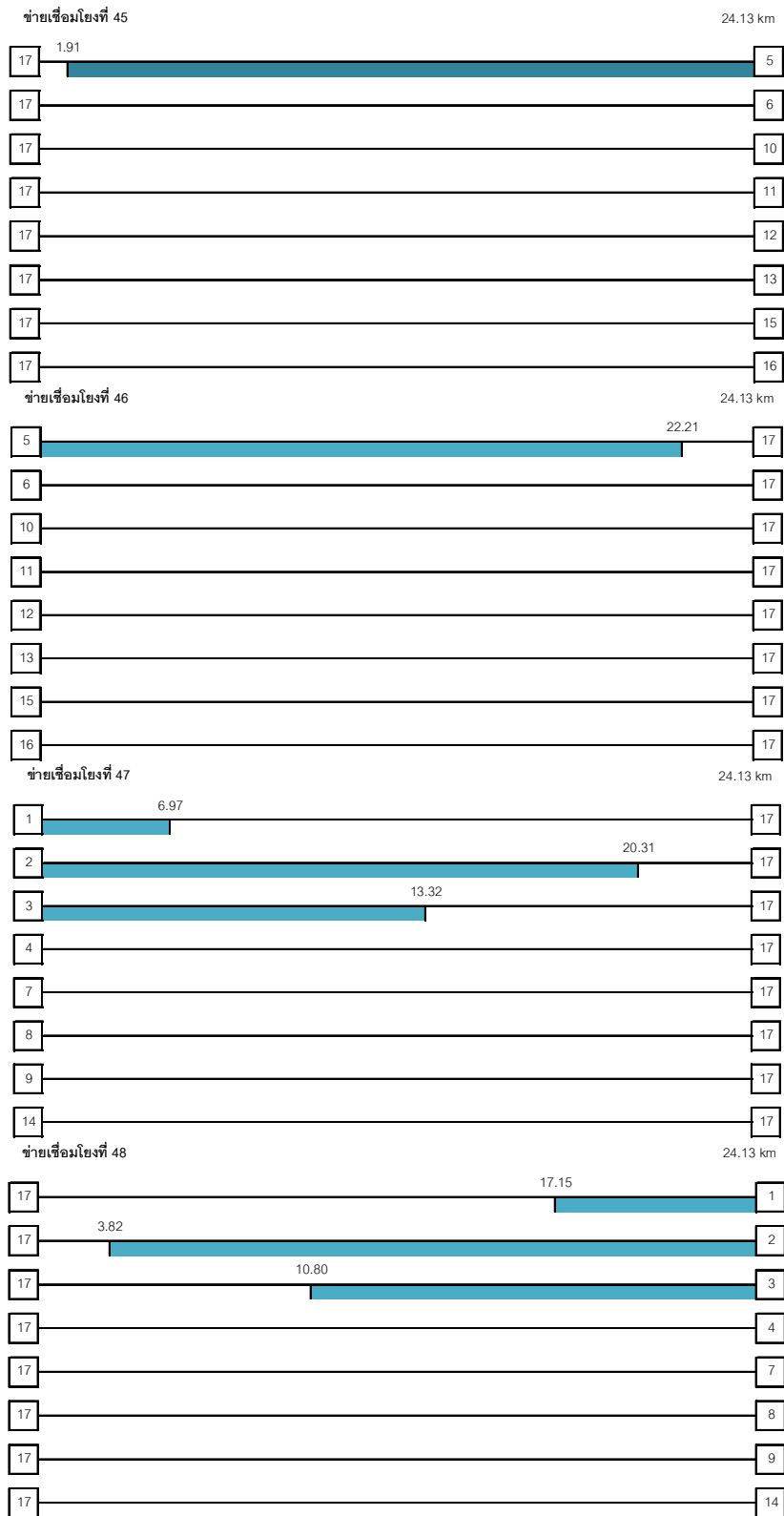
(น) ข่ายเชื่อมโยงที่ 38-39



(บ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 40-42

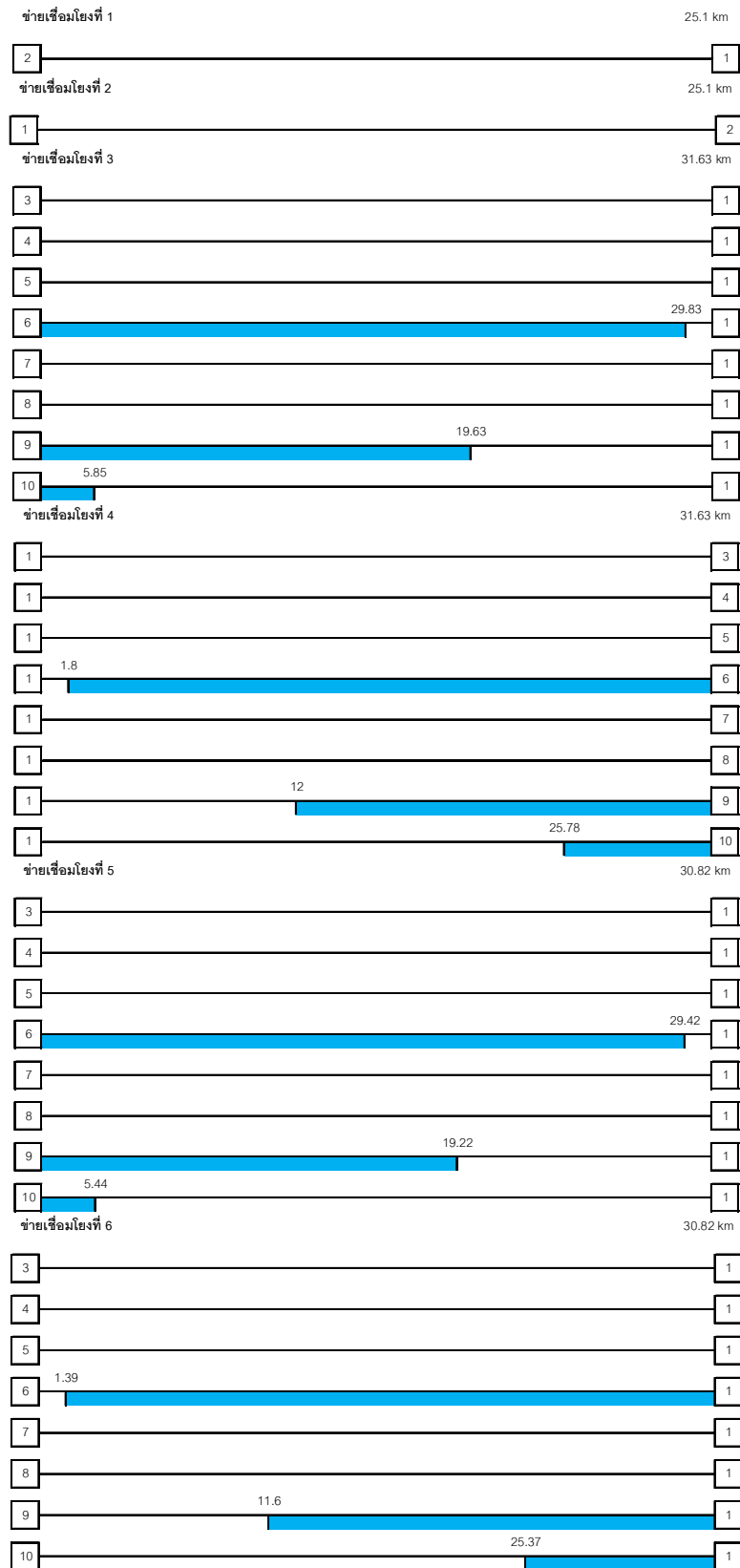


(ป) ข่ายเชื่อมโยงที่ 43-44

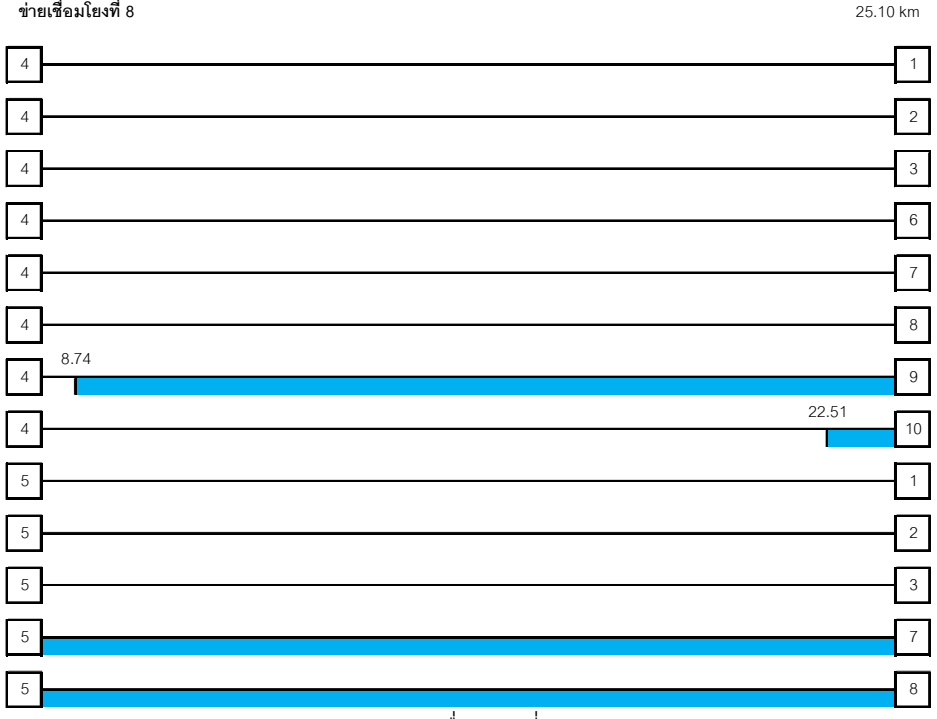
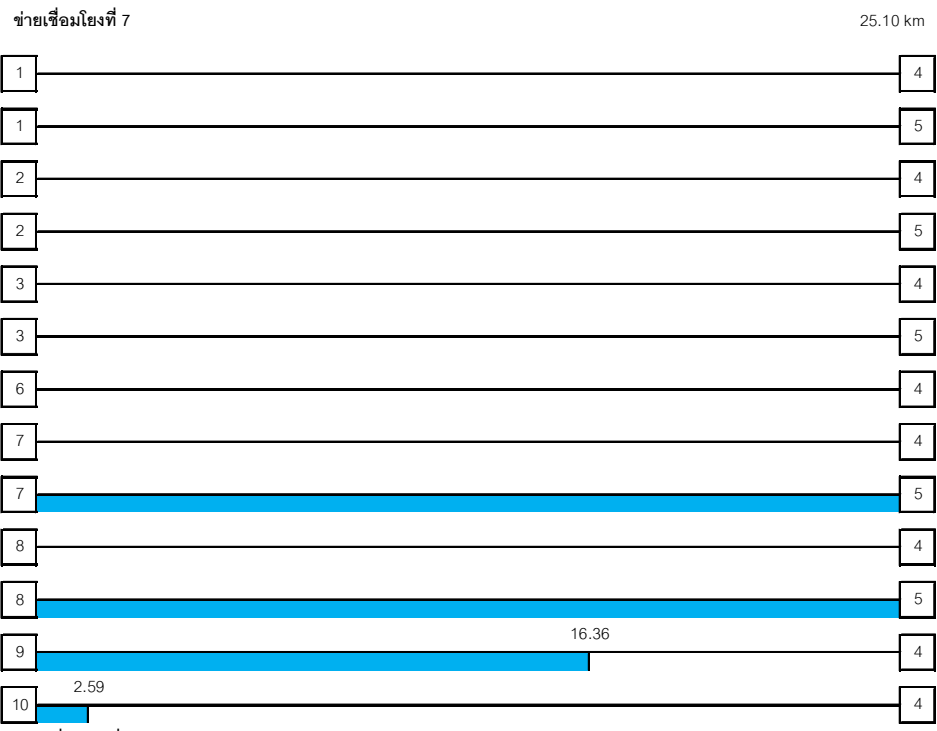


(ผ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 45-48

กราฟฟีกและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่าย OPEN

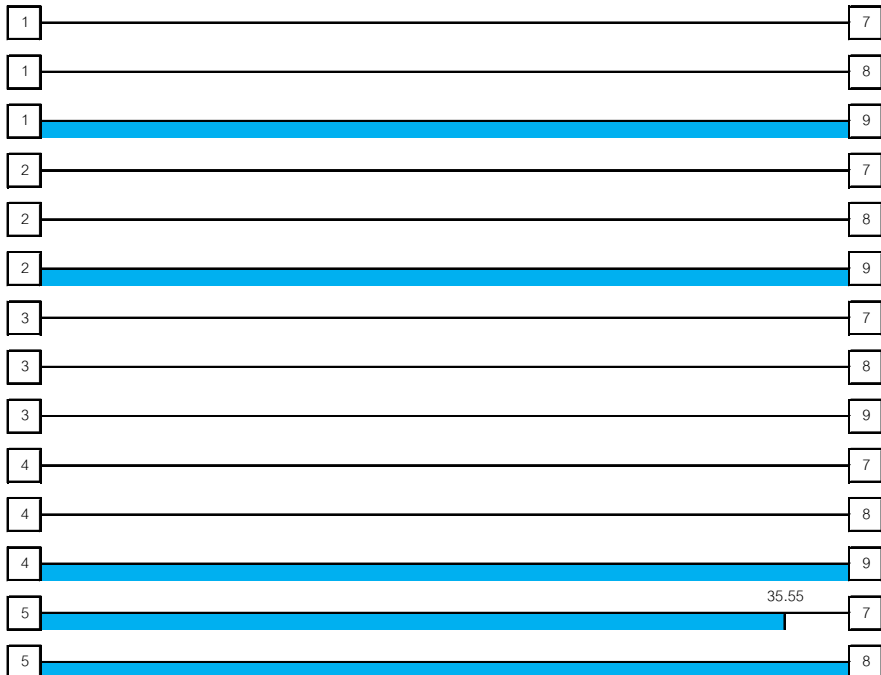


(ก) สายเชื่อมโยงที่ 1-6



(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 7-8

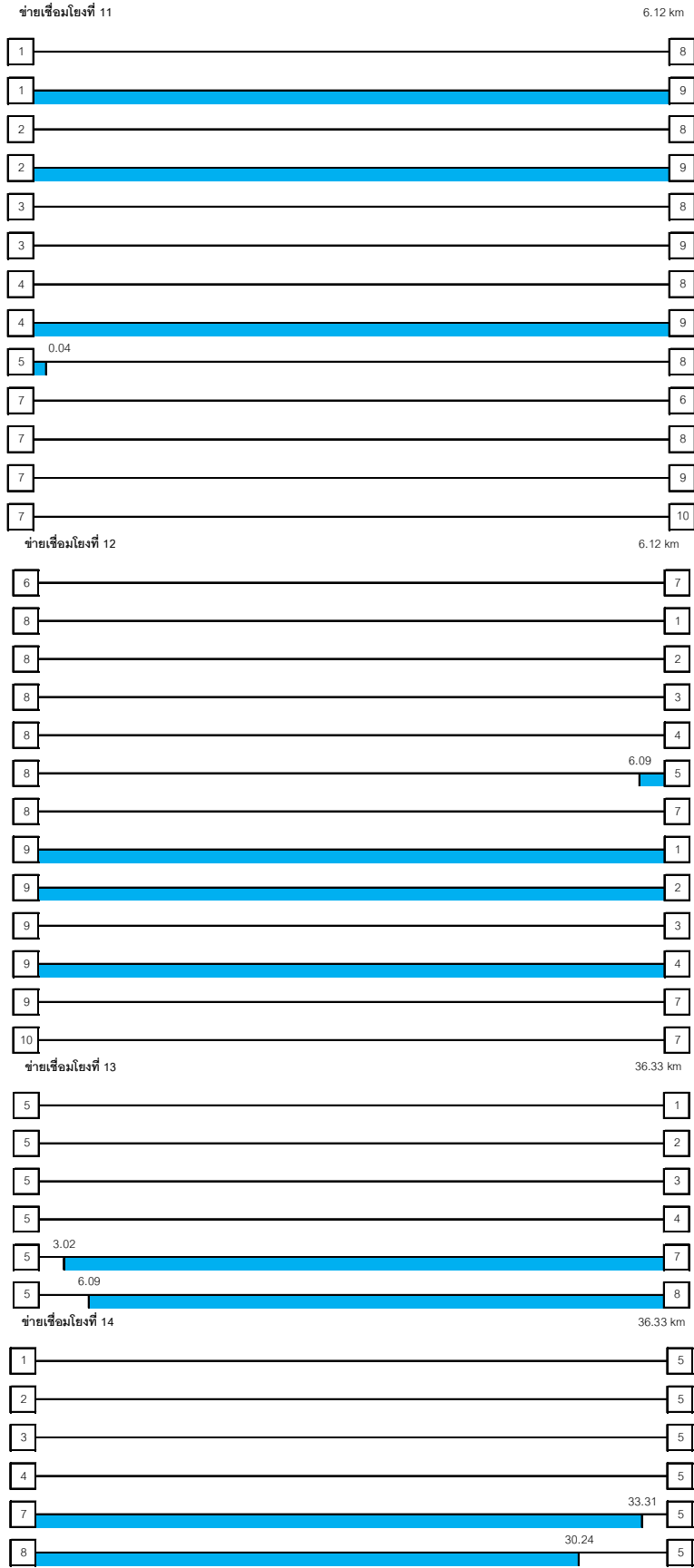
ข่ายเชื่อมโยงที่ 9 38.57 km



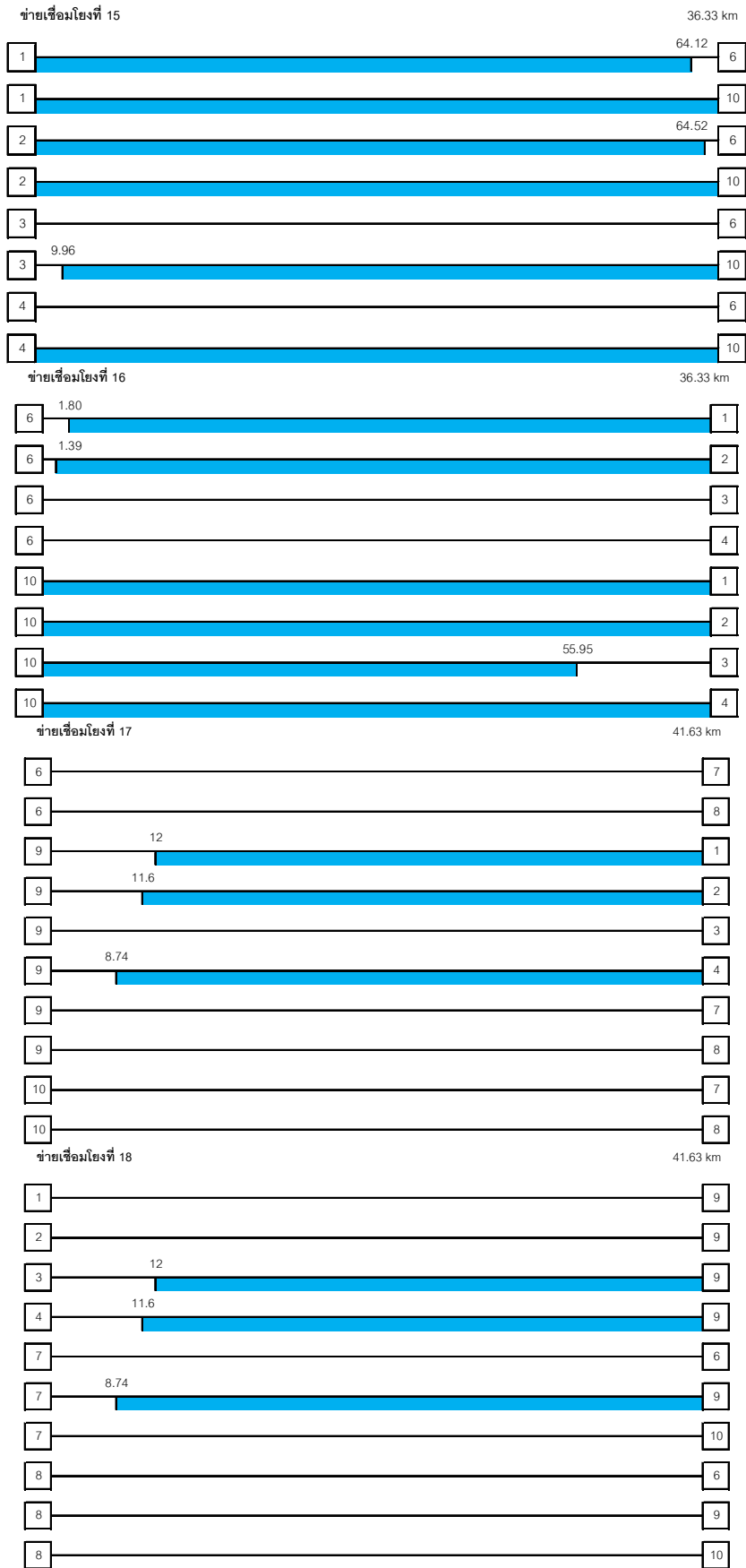
ข่ายเชื่อมโยงที่ 10 38.57 km



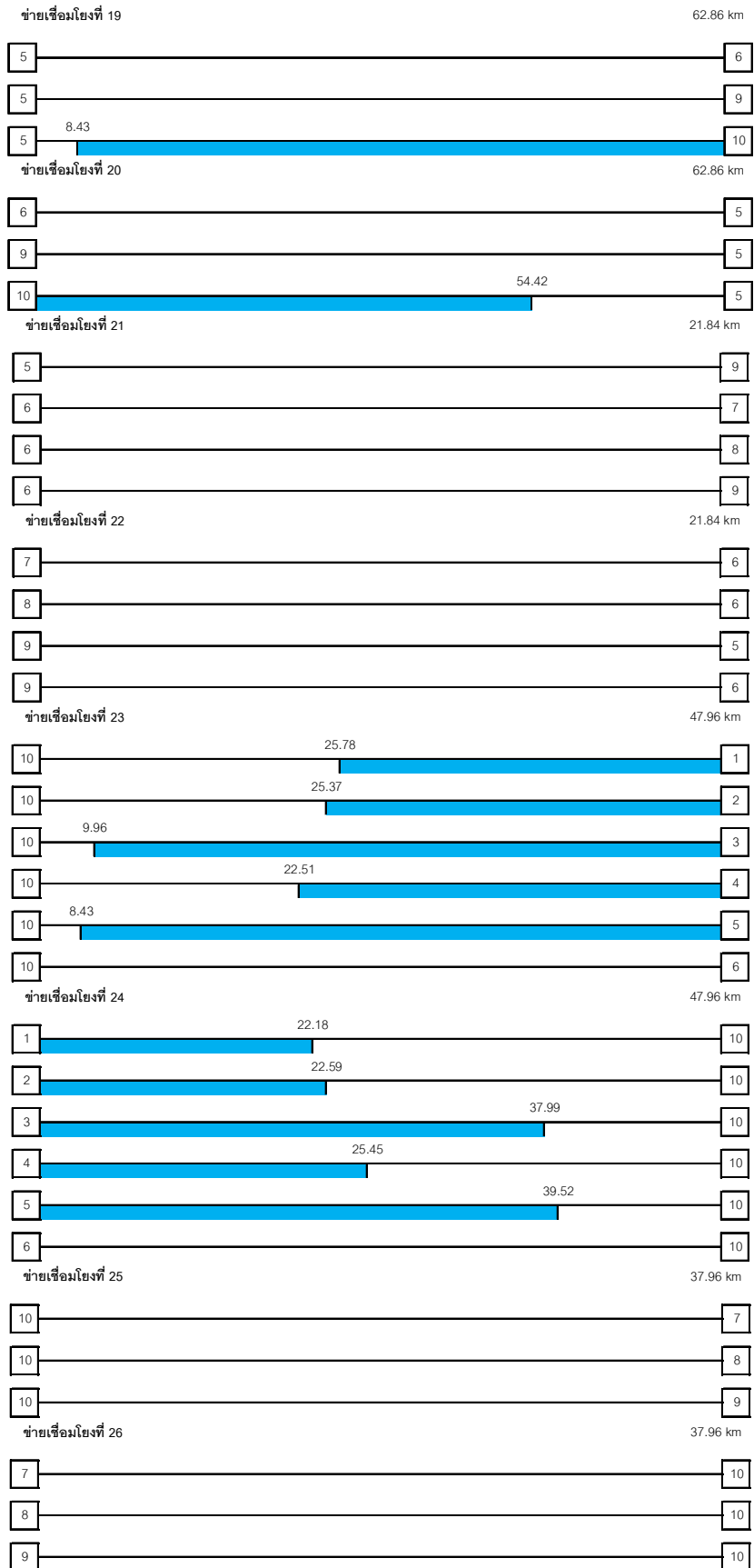
(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 9-10



(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 11-14

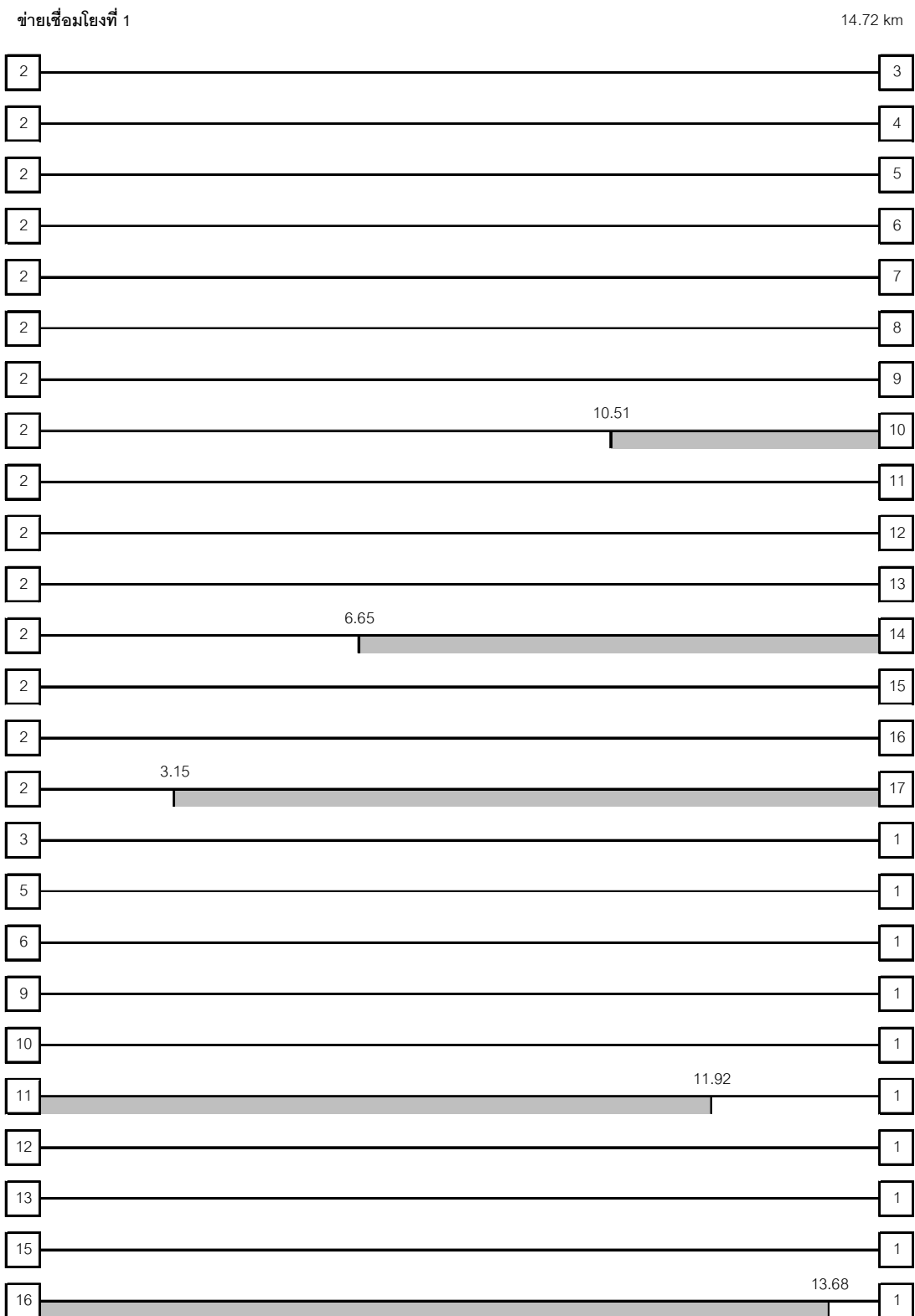


(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 15-18



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 19-26

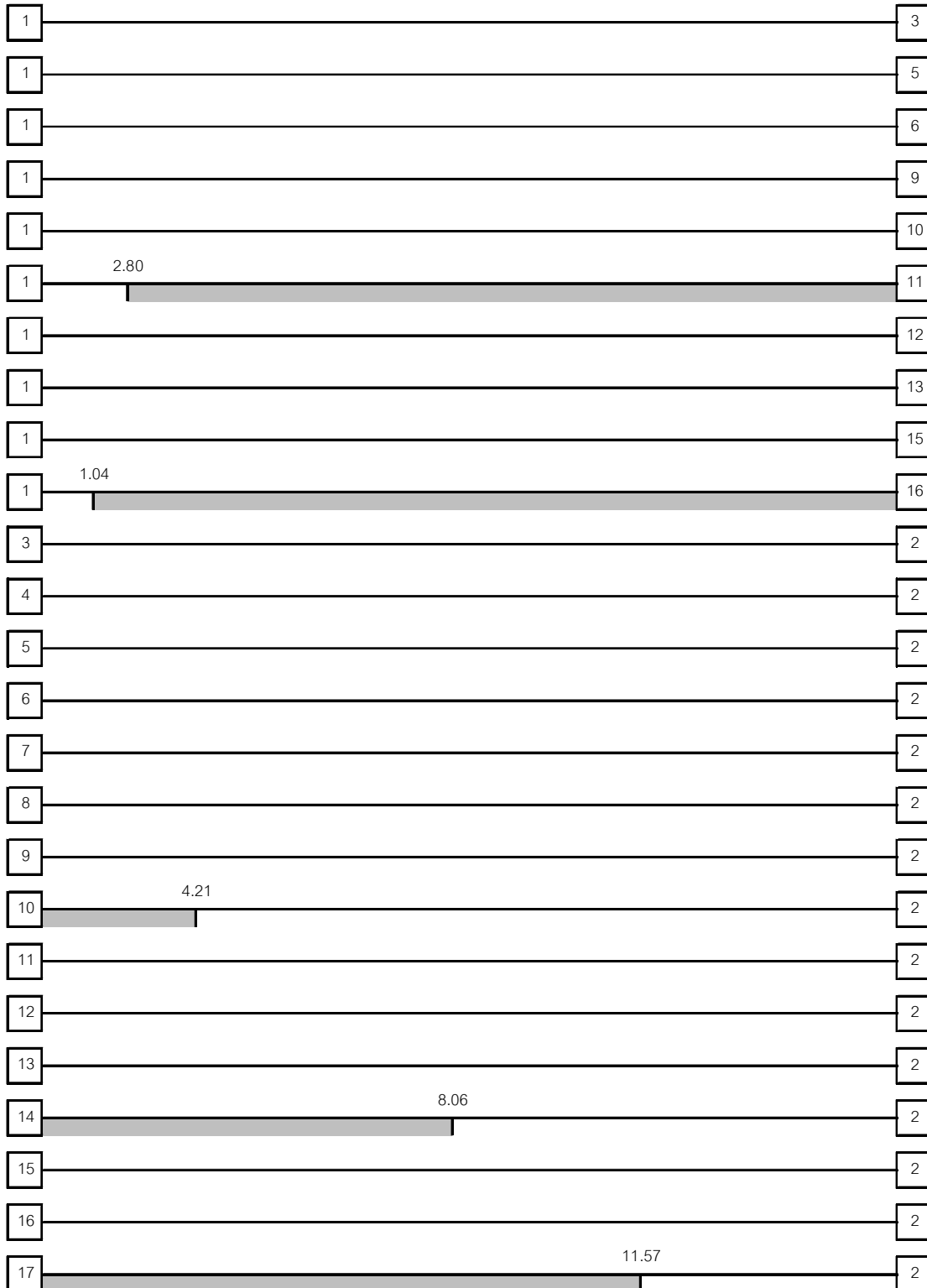
กราฟฟีกและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่าย NARNet
กรณีข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย



(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 1

ข่ายเชื่อมโยงที่ 2

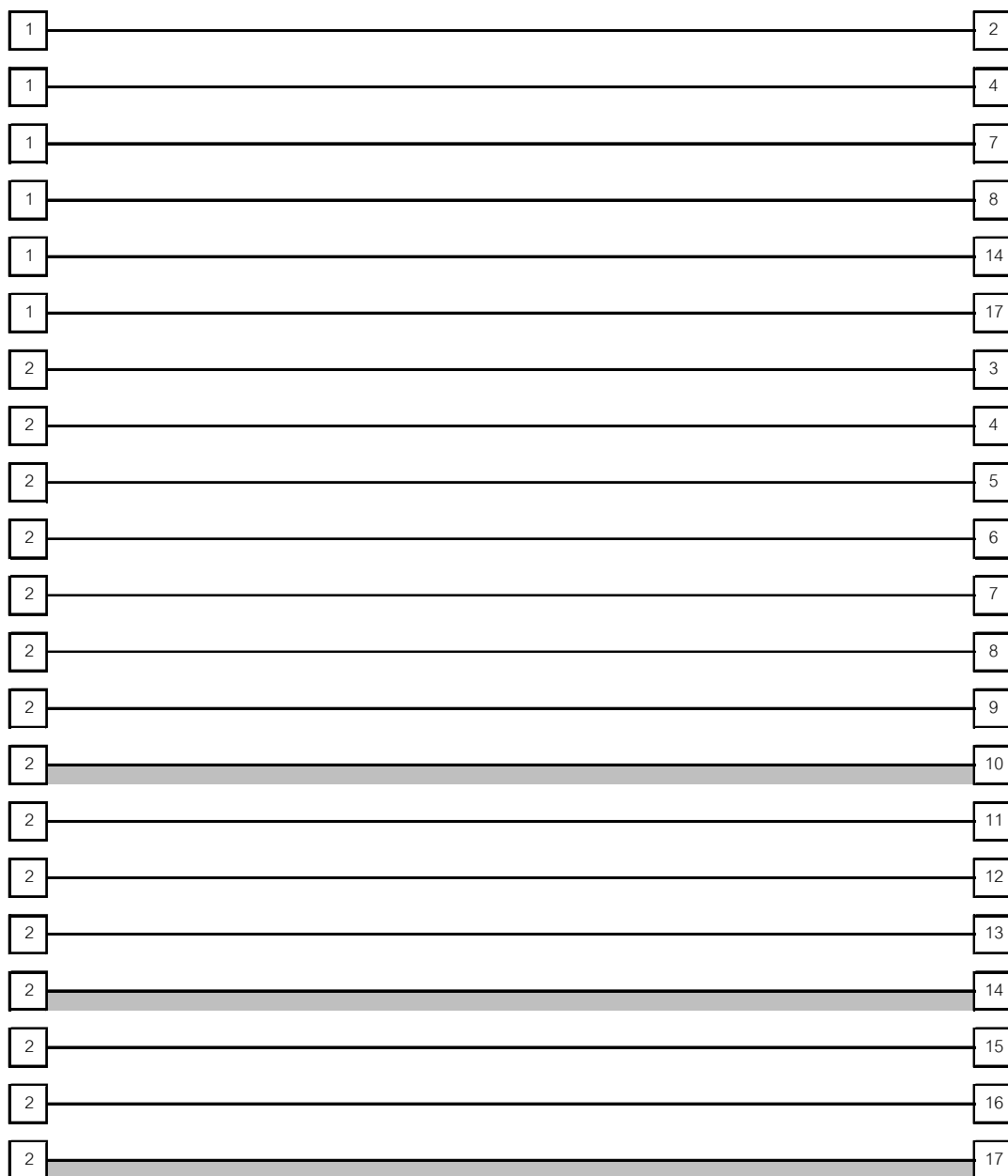
14.72 km



(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 2

ข่ายเชื่อมโยงที่ 3

18.93 km



(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 3

ข่ายเชื่อมโยงที่ 4

18.93 km

2	1
3	2
4	1
4	2
5	2
6	2
7	1
7	2
8	1
8	2
9	2
10	2
11	2
12	2
13	2
14	1
14	2
15	2
16	2
17	1
17	2

(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 4

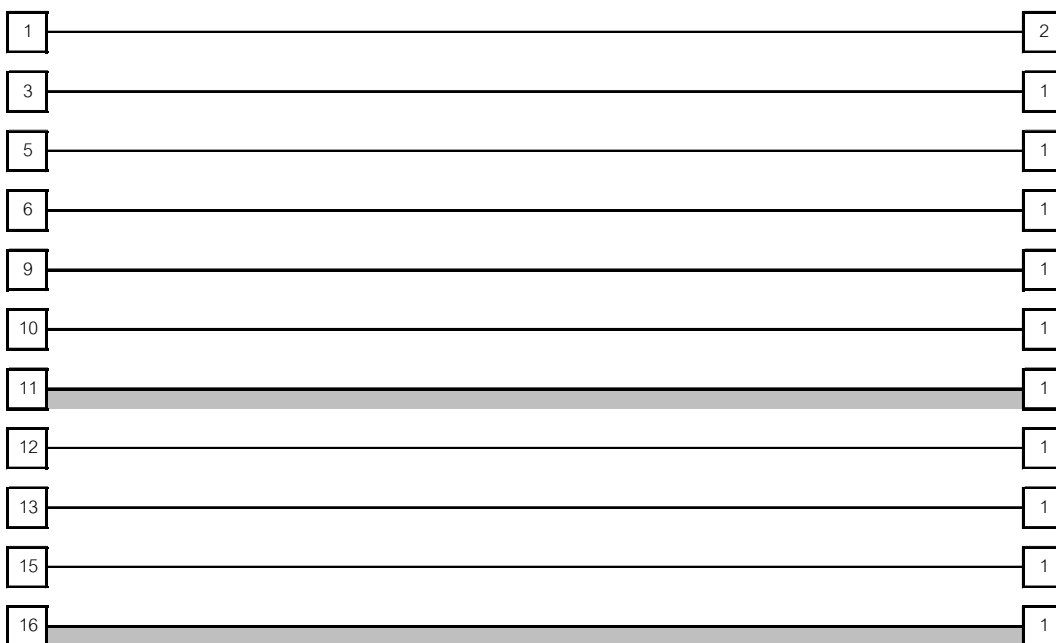
ข่ายเชื่อมโยงที่ 5

12.62 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 6

12.62 km



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 - 6

ข่ายเชื่อมโยงที่ 7

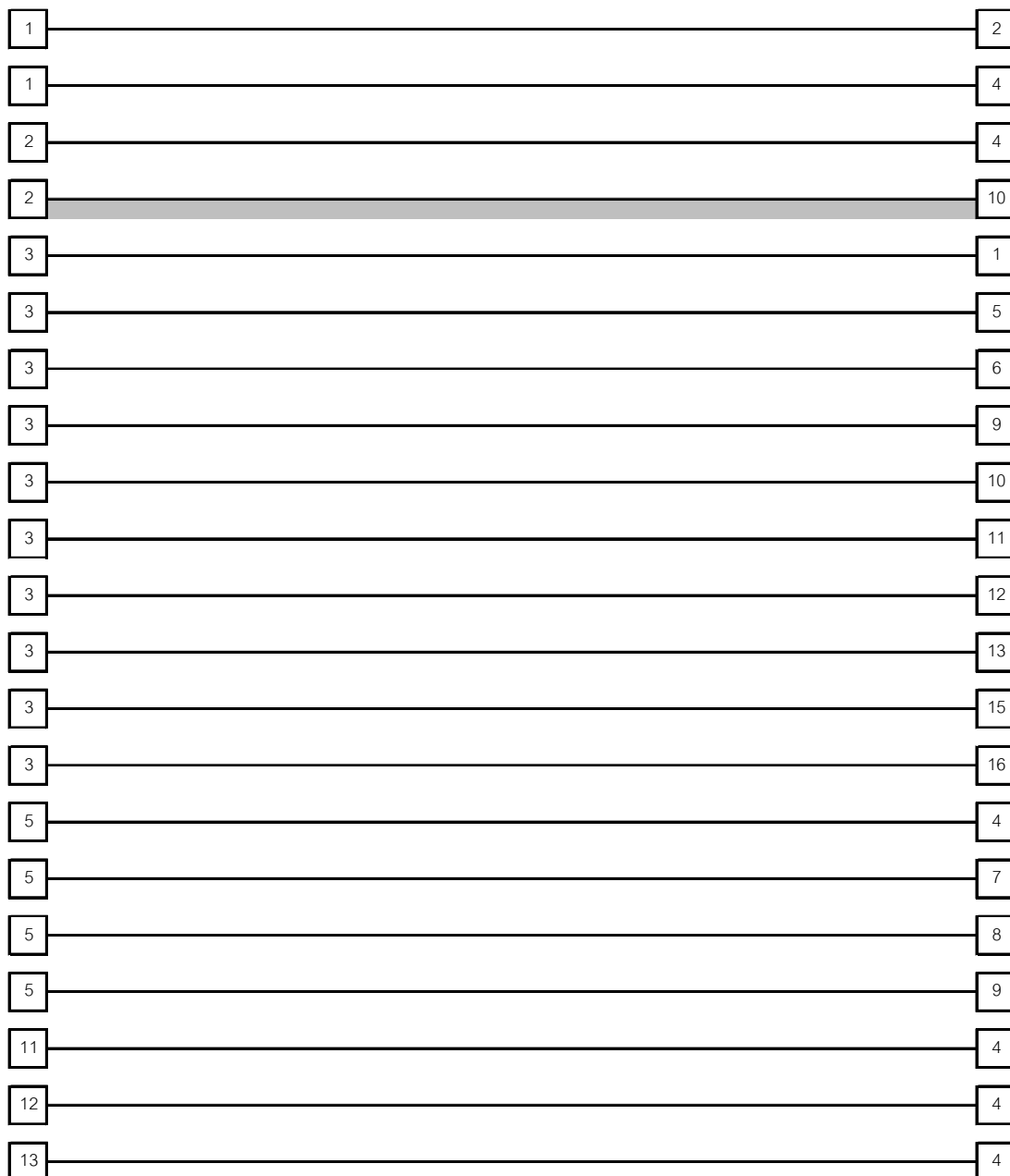
20.33 km

1	3
2	1
4	1
4	2
4	5
4	11
4	12
4	13
5	3
6	3
7	5
8	5
9	3
9	5
10	2
10	3
11	3
12	3
13	3
15	3
16	3

(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 7

ข่ายเชื่อมโยงที่ 8

20.33 km



(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 8

ข่ายเชื่อมโยงที่ 9

20.33 km

1	7
1	8
1	14
1	17
2	4
2	5
2	6
2	7
2	8
2	9
2	11
2	12
2	13
2	14
2	15
2	16
2	17
3	4
3	7
3	8
3	14
3	17
4	5
4	11
4	12
4	13
7	5
8	5
9	5

(ซ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 9

ข่ายเชื่อมโยงที่ 10

20.33 km

4	2
4	3
5	2
5	4
5	7
5	8
5	9
6	2
7	1
7	2
7	3
8	1
8	2
8	3
9	2
11	2
11	4
12	2
12	4
13	2
13	4
14	1
14	2
14	3
15	2
16	2
17	1
17	2
17	3

(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 10

ข่ายเชื่อมโยงที่ 11

22.43 km

3	4
5	1
5	3
6	1
6	3
6	7
6	8
6	9
7	4
8	4
8	7
9	4
9	7
9	8
10	1
10	3
10	7
10	8
10	9
11	7
12	1
12	3
12	7
13	1
13	3
13	7
14	4
14	7
15	4
15	7
16	1
16	4
16	7
16	9
17	4
17	7

(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 11

ข่ายเชื่อมโยงที่ 12

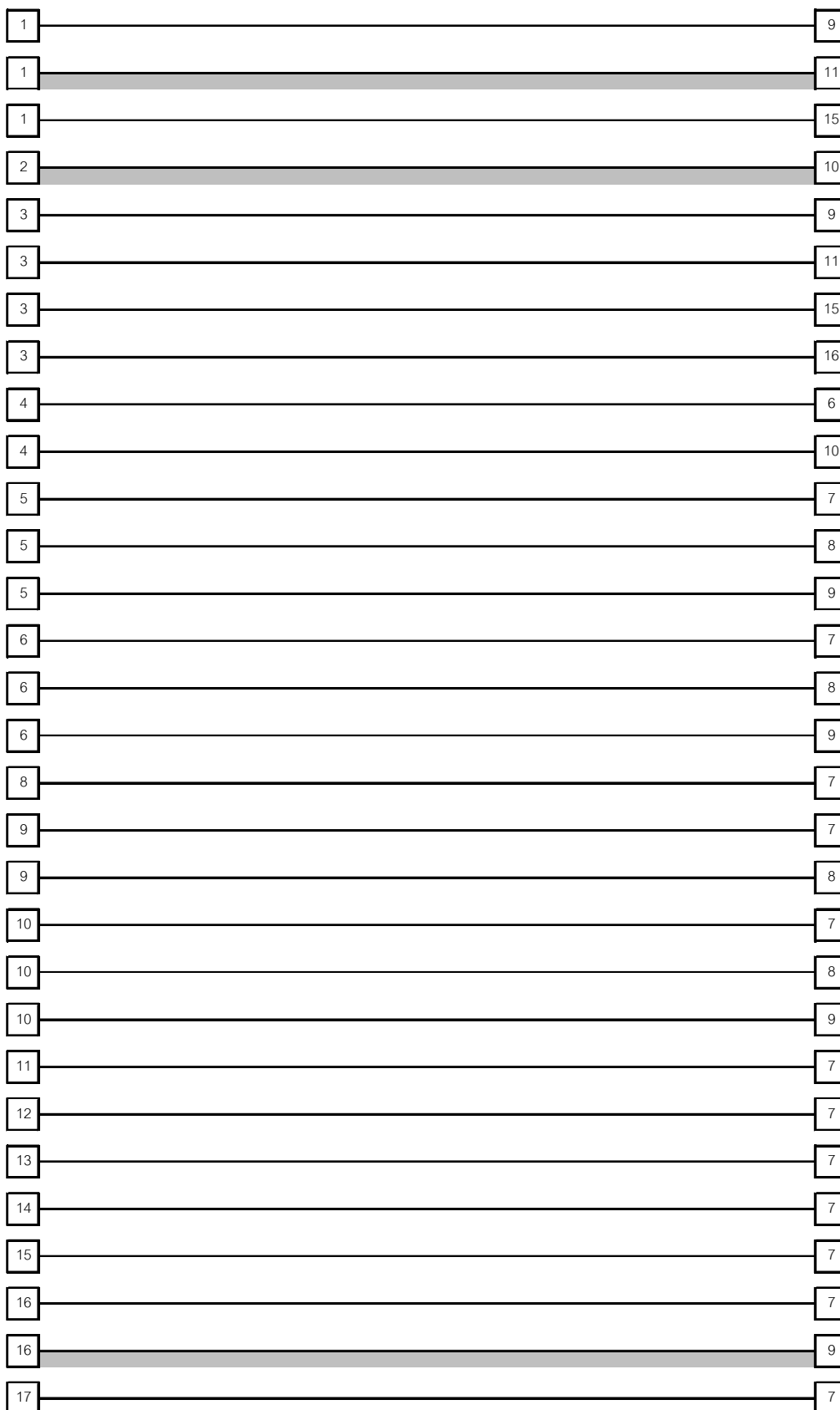
22.43 km

1	5
1	6
1	10
1	12
1	13
1	16
3	5
3	6
3	10
3	12
3	13
4	3
4	7
4	8
4	9
4	14
4	15
4	16
4	17
7	6
7	8
7	9
7	10
7	11
7	12
7	13
7	14
7	15
7	16
7	17
8	6
8	9
8	10
9	6
9	10
9	16

(ฎ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 12

ข่ายเชื่อมโยงที่ 13

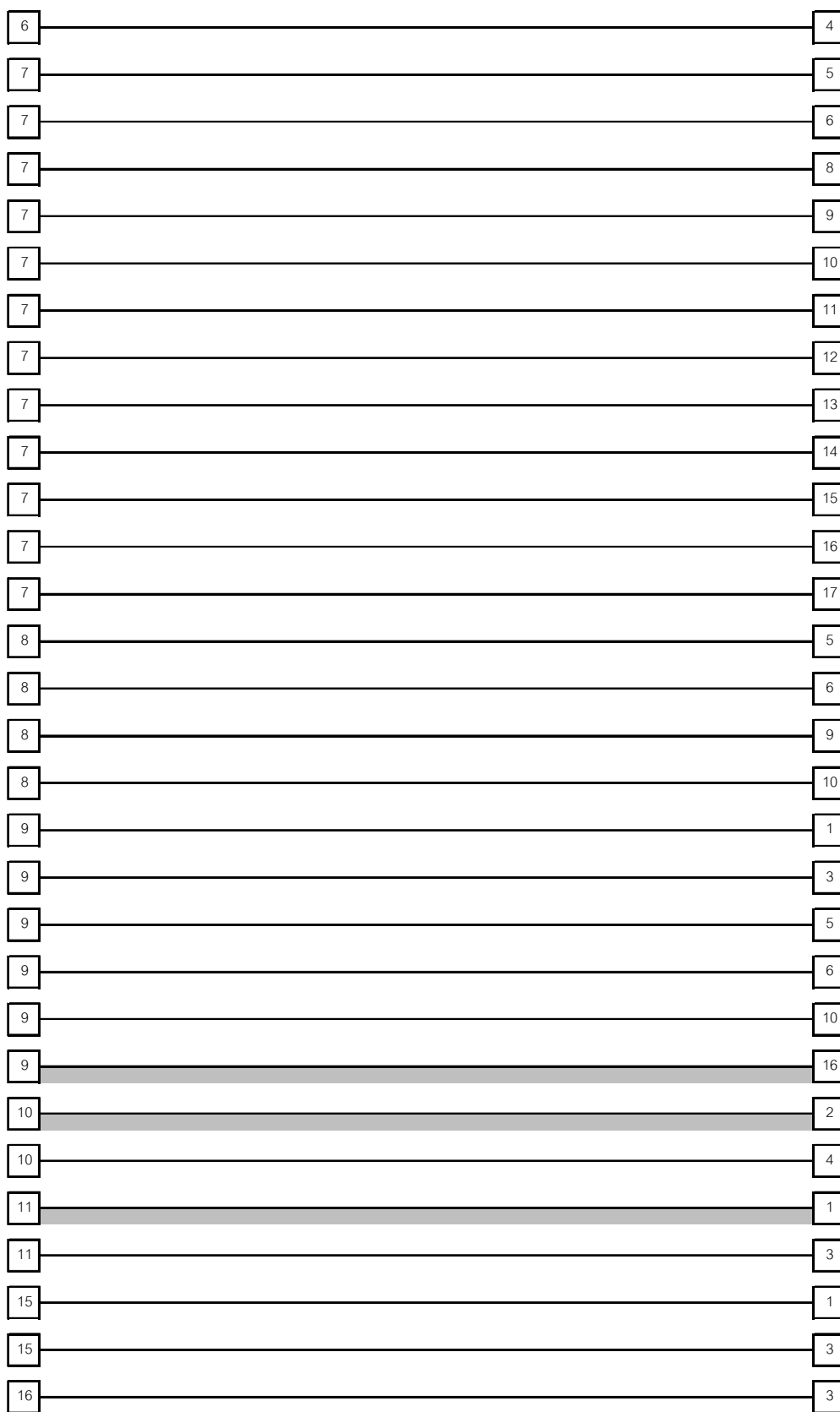
4.91 km



(ฎ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13

ข่ายเชื่อมโยงที่ 14

4.91 km



(รูป) ข่ายเชื่อมโยงที่ 14

ข่ายเชื่อมโยงที่ 15

6.31 km

1	7
2	7
3	7
4	7
6	4
8	5
8	6
8	9
8	10
9	1
9	3
9	5
9	6
9	10
9	16
10	2
10	4
11	1
11	3
15	1
15	3
16	3

(ท) ข่ายเชื่อมโยงที่ 15

ข่ายเชื่อมโยงที่ 16

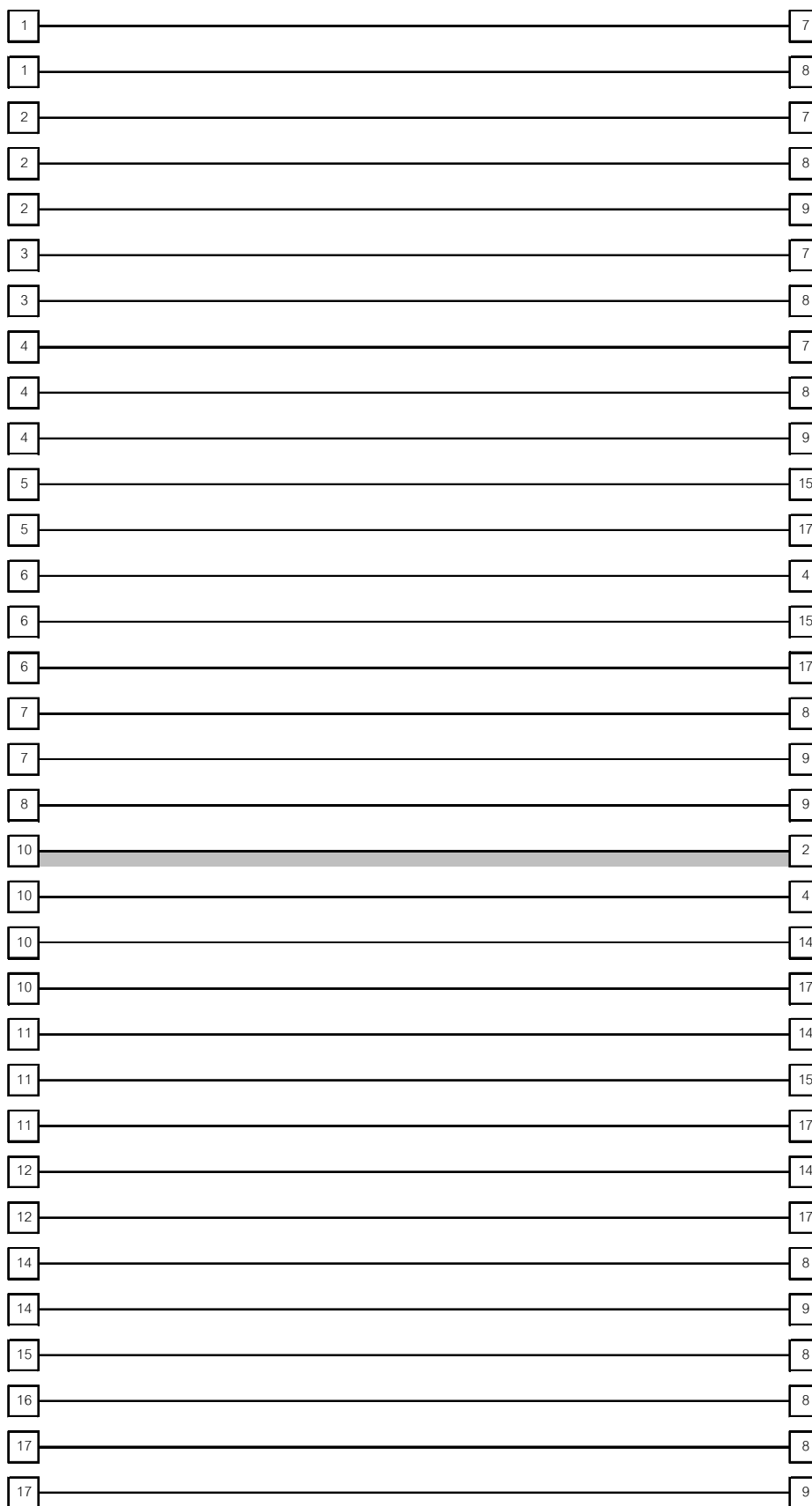
6.31 km

1	9
1	11
1	16
2	10
3	9
3	11
3	15
3	16
4	6
4	10
5	8
5	9
6	8
6	9
7	1
7	2
7	3
7	4
9	8
10	8
10	9
16	9

(ตม) ข่ายเชื่อมโยงที่ 16

ข่ายเชื่อมโยงที่ 17

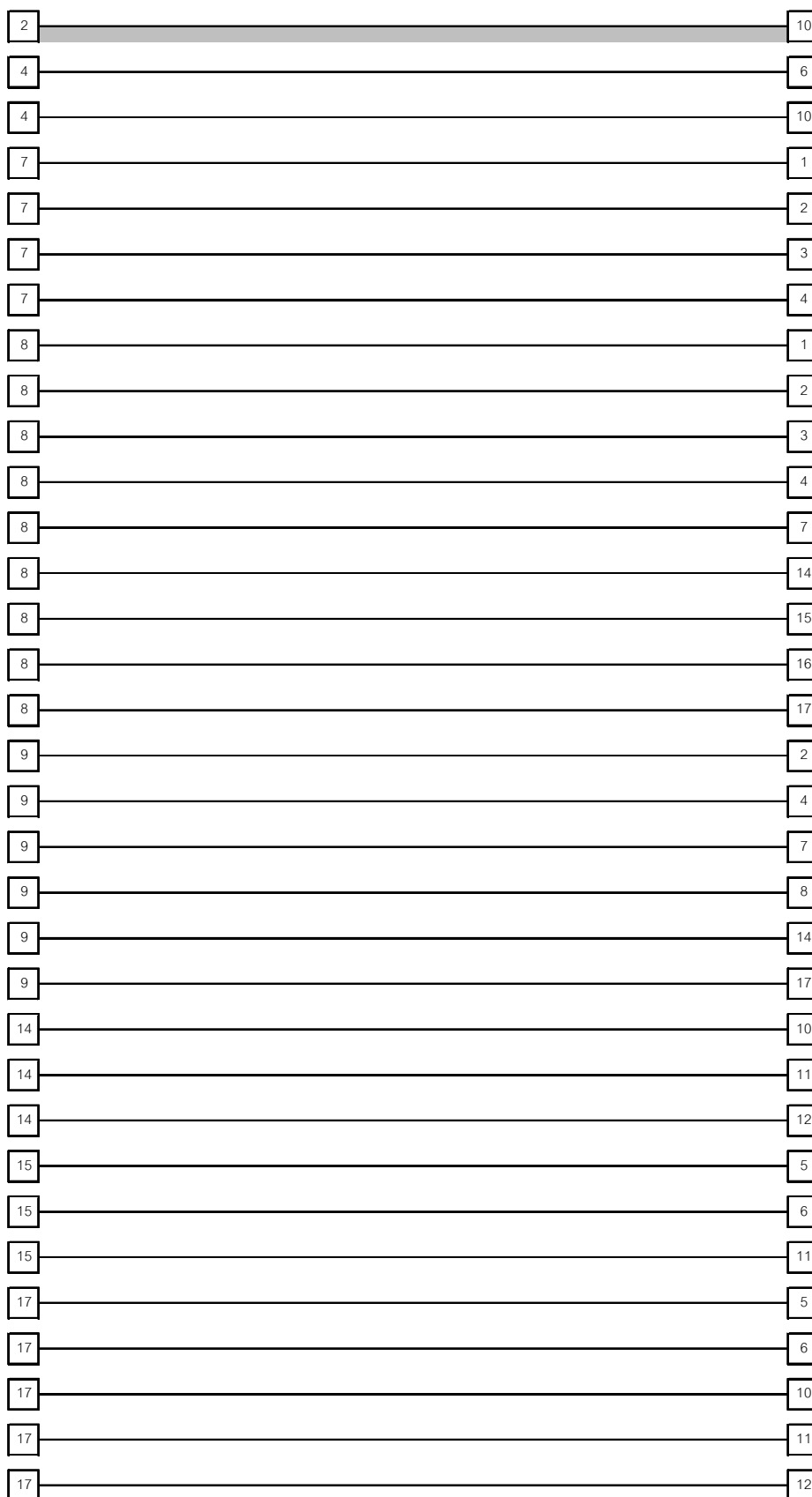
7.01 km



(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 17

ข่ายเชื่อมโยงที่ 18

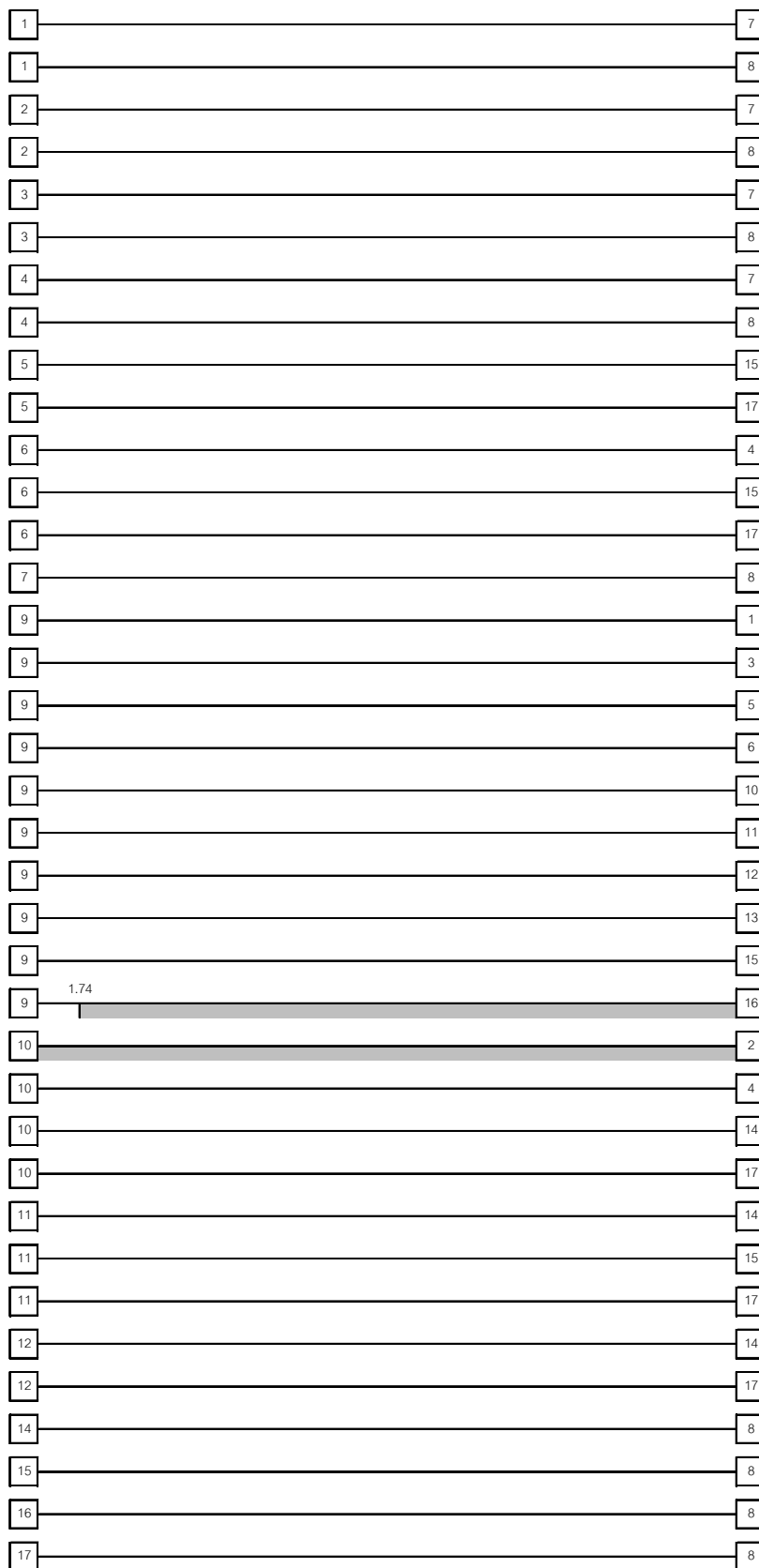
7.01 km



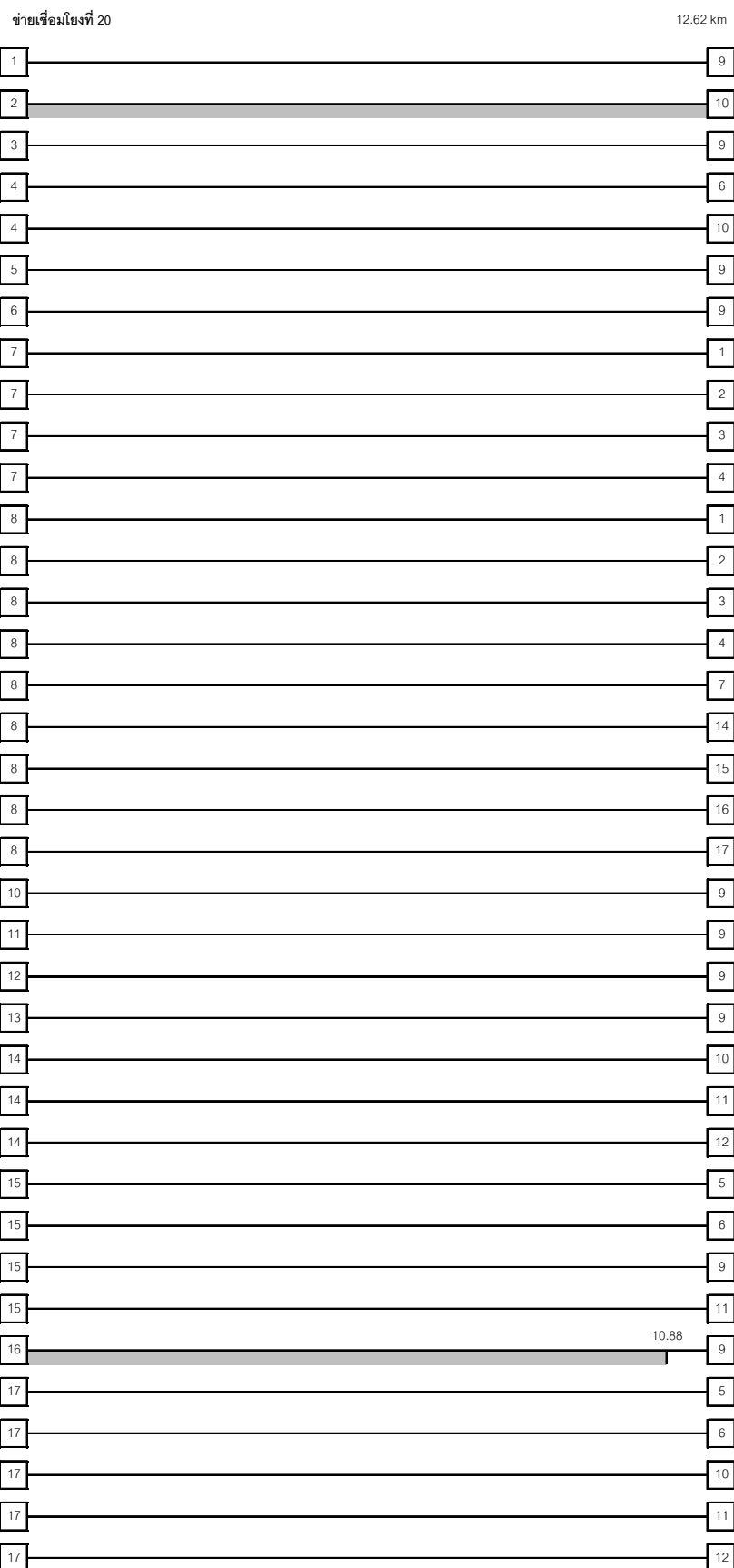
(ด) ข่ายเชื่อมโยงที่ 18

ข่ายเชื่อมโยงที่ 19

12.62 km



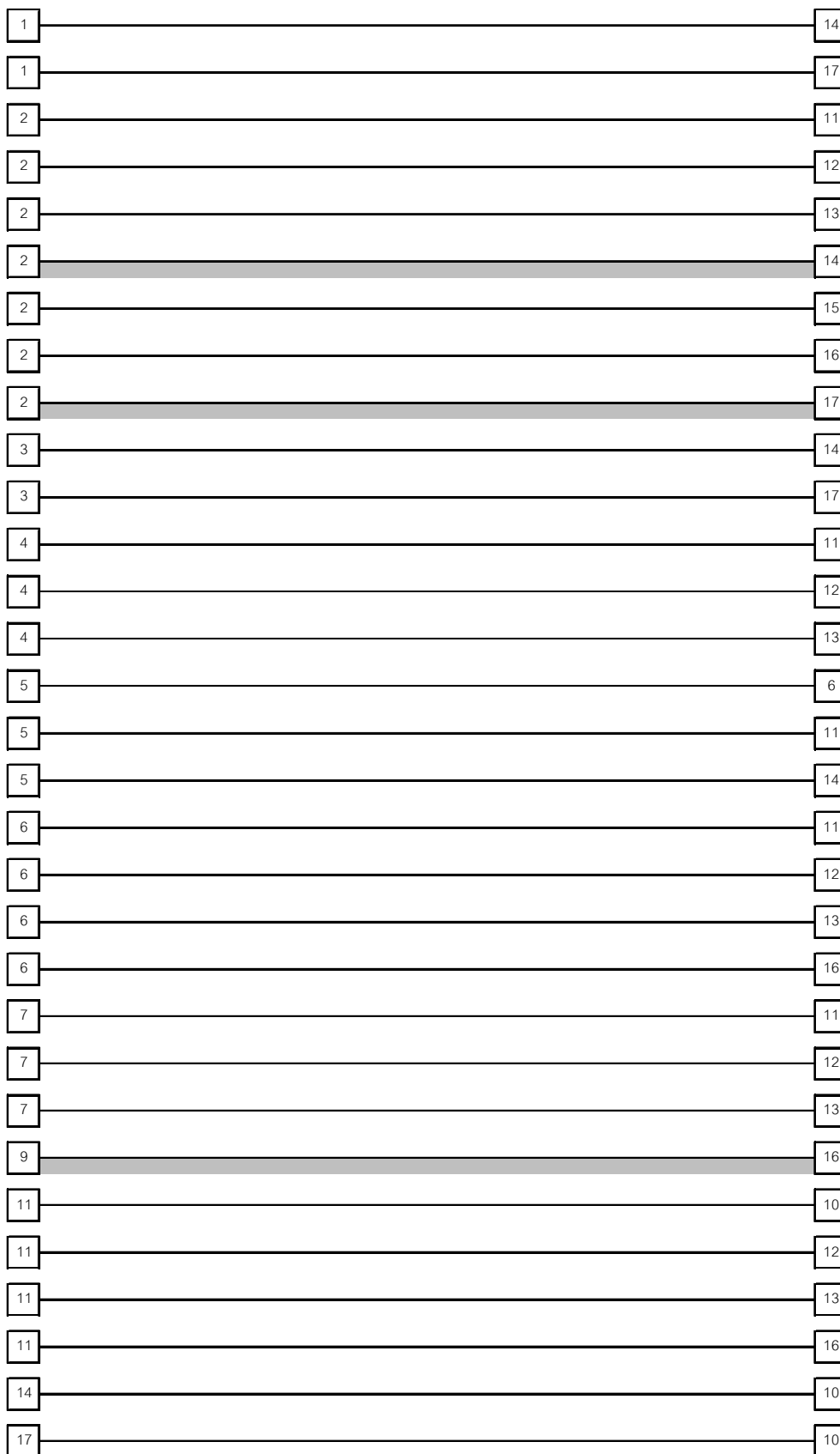
(ต) ข่ายเชื่อมโยงที่ 19



(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 20

ข่ายเชื่อมโยงที่ 21

14.72 km



(ท) ข่ายเชื่อมโยงที่ 21

ข่ายเชื่อมโยงที่ 22

14.72 km

6	5
10	11
10	14
10	17
11	2
11	4
11	5
11	6
11	7
12	2
12	4
12	6
12	7
12	11
13	2
13	4
13	6
13	7
13	11
14	1
14	2
14	3
14	5
15	2
16	2
16	6
16	9
16	11
17	1
17	2
17	3

(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 22

ข่ายเชื่อมโยงที่ 23

6.31 km

1	5
3	5
4	3
6	2
6	11
6	12
6	13
6	16
7	1
7	2
7	3
7	11
7	12
7	13
8	1
8	2
8	3
9	2
9	16
10	5
11	10
11	12
11	13
11	16
12	16
13	5
14	10
15	5
16	5
17	5
17	10

(น) ข่ายเชื่อมโยงที่ 23

ข่ายเชื่อมโยงที่ 24

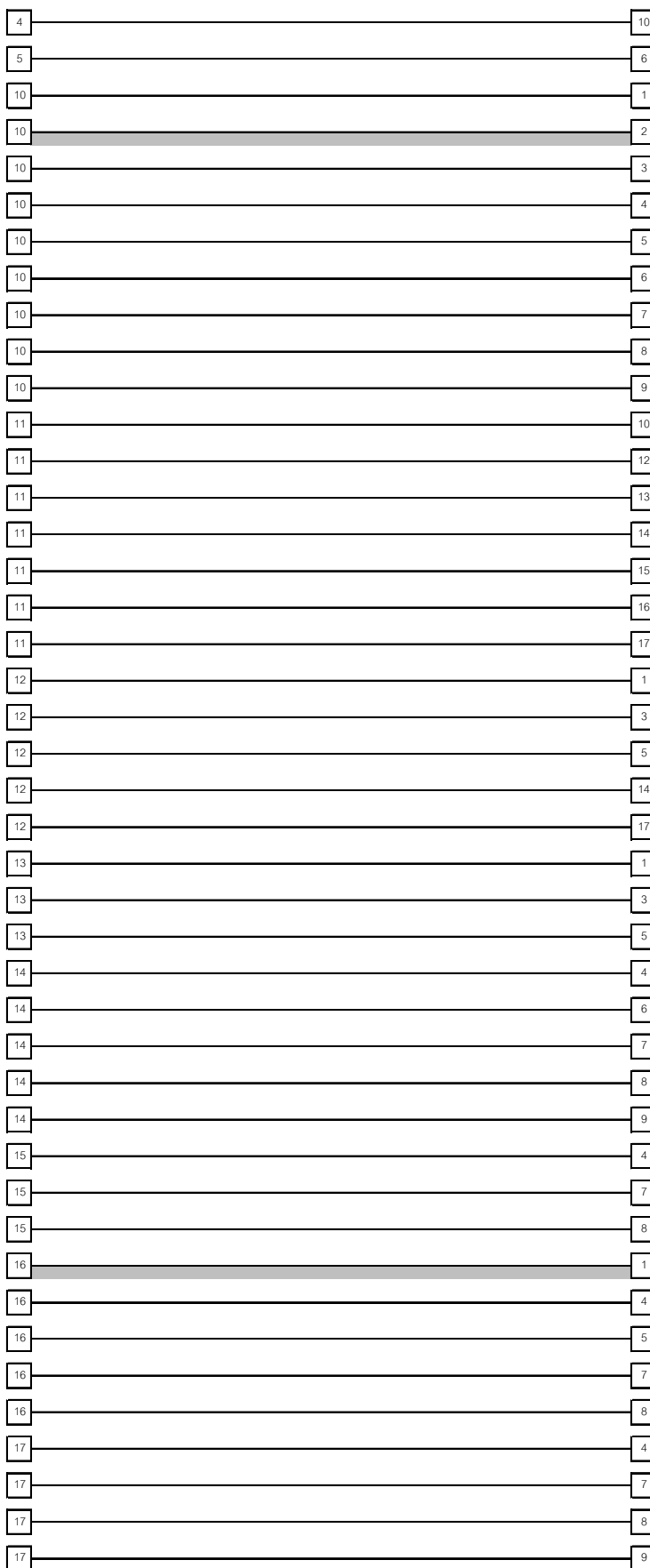
6.31 km

1	7
1	8
2	6
2	7
2	8
2	9
3	4
3	7
3	8
5	1
5	3
5	10
5	12
5	13
5	15
5	16
5	17
10	11
10	14
10	17
11	6
11	7
12	6
12	7
12	11
13	6
13	7
13	11
16	6
16	9
16	11

(บ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 24

ข่ายเชื่อมโยงที่ 25

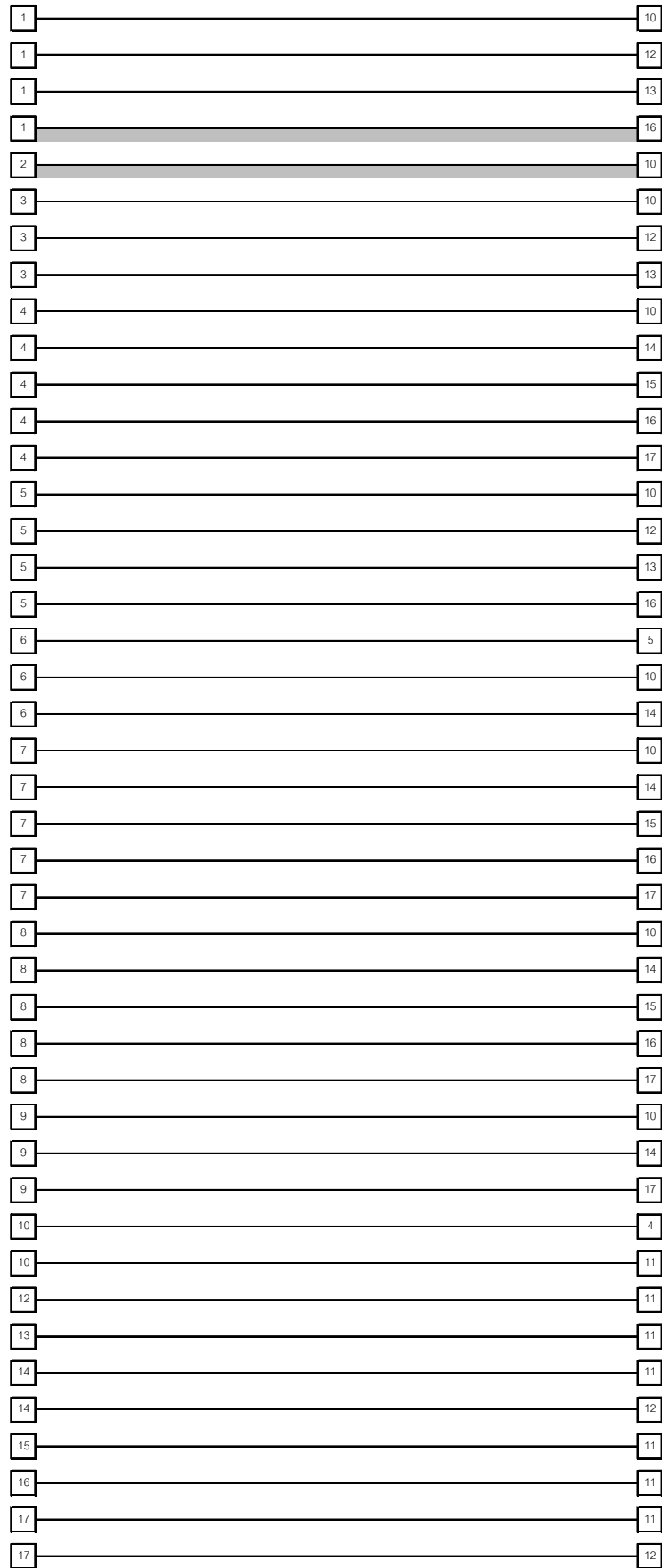
13.32 km



(ป) ข่ายเชื่อมโยงที่ 25

ข่ายเชื่อมโยงที่ 26

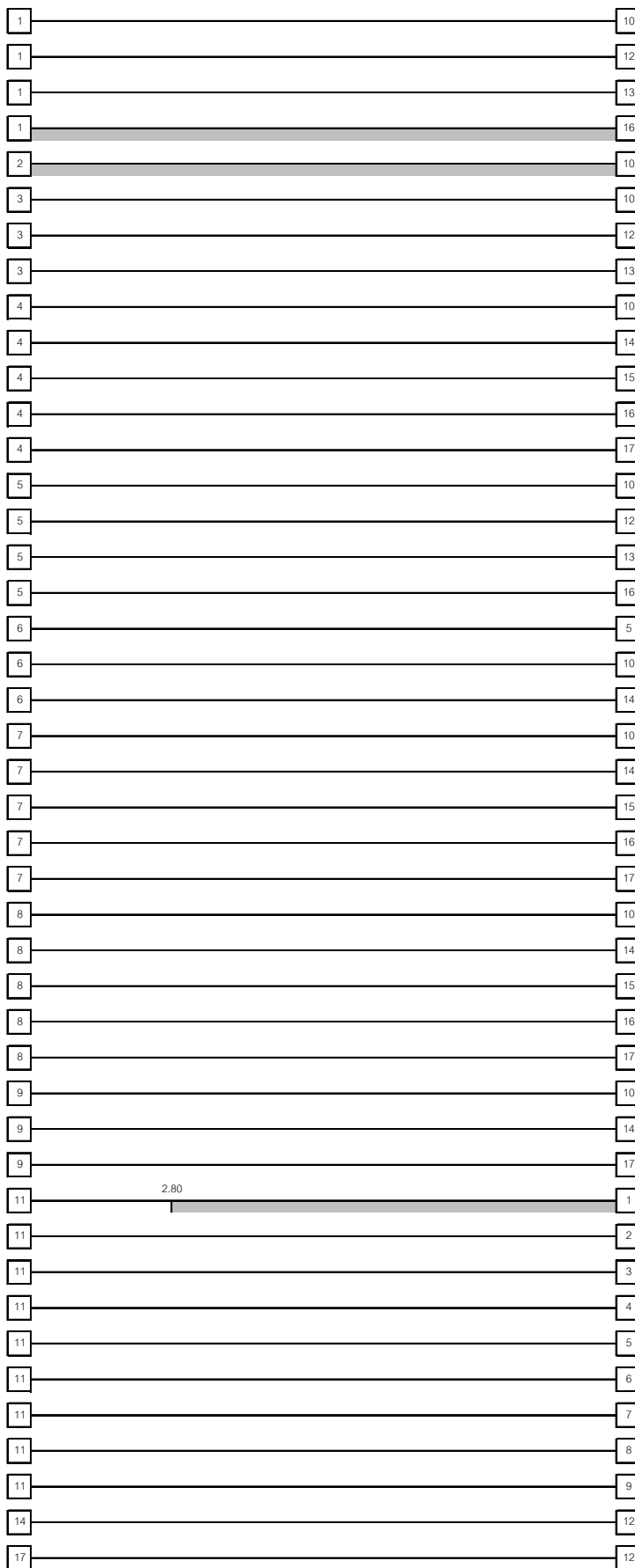
13.32 km



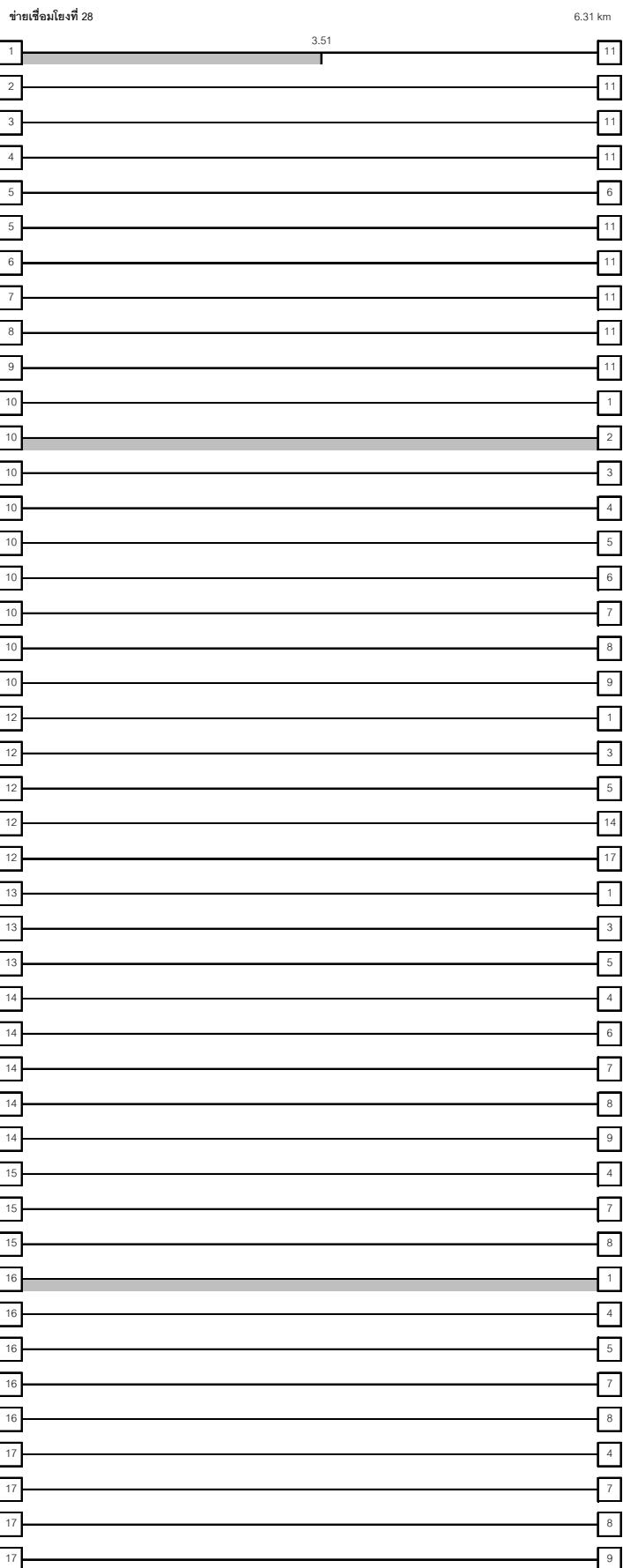
(ผ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 26

ข่ายเชื่อมโยงที่ 27

6.31 km



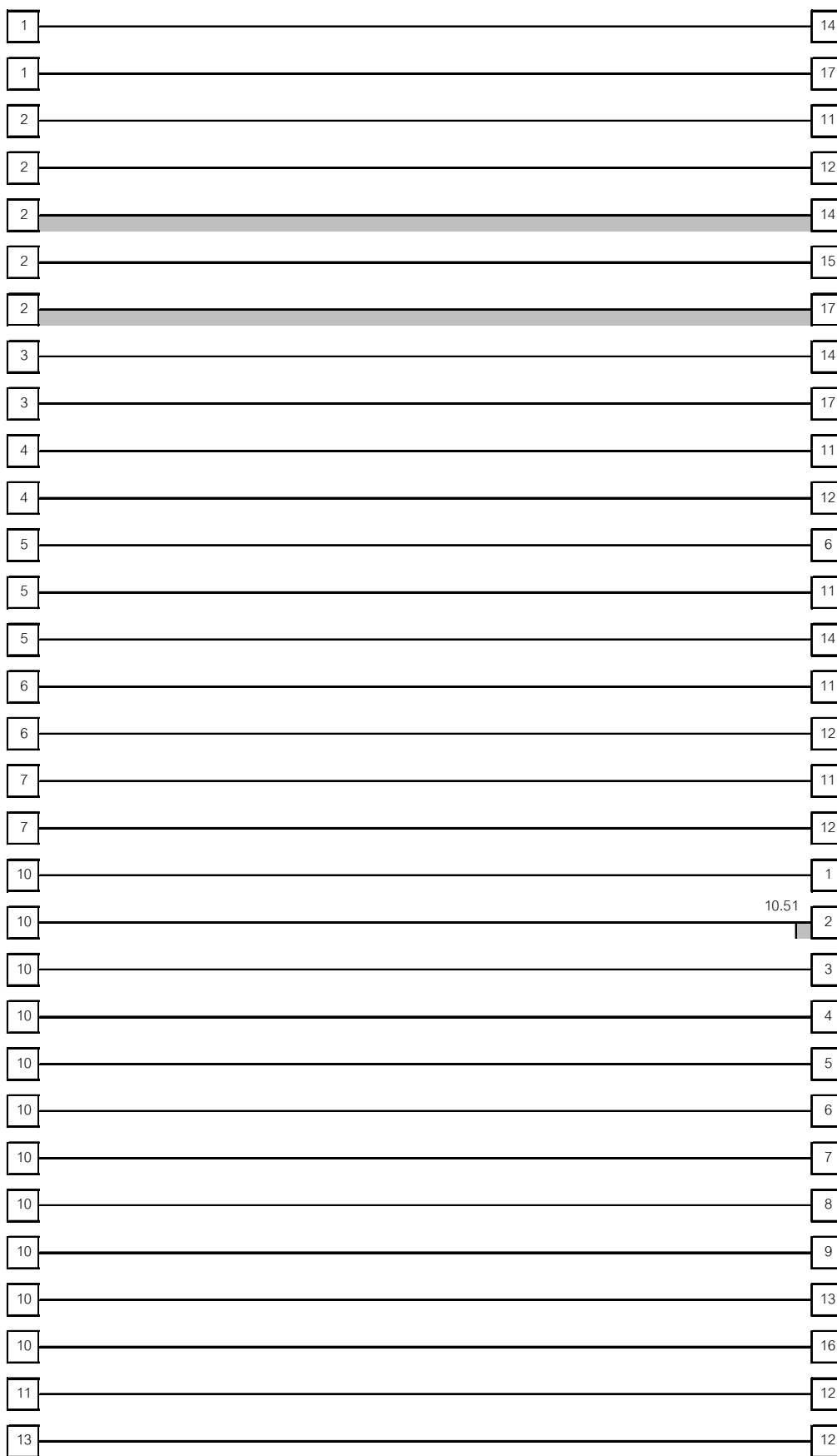
(ผ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 27



(พ) ซ้ายเชื่อมโยงที่ 28

ข่ายเชื่อมโยงที่ 29

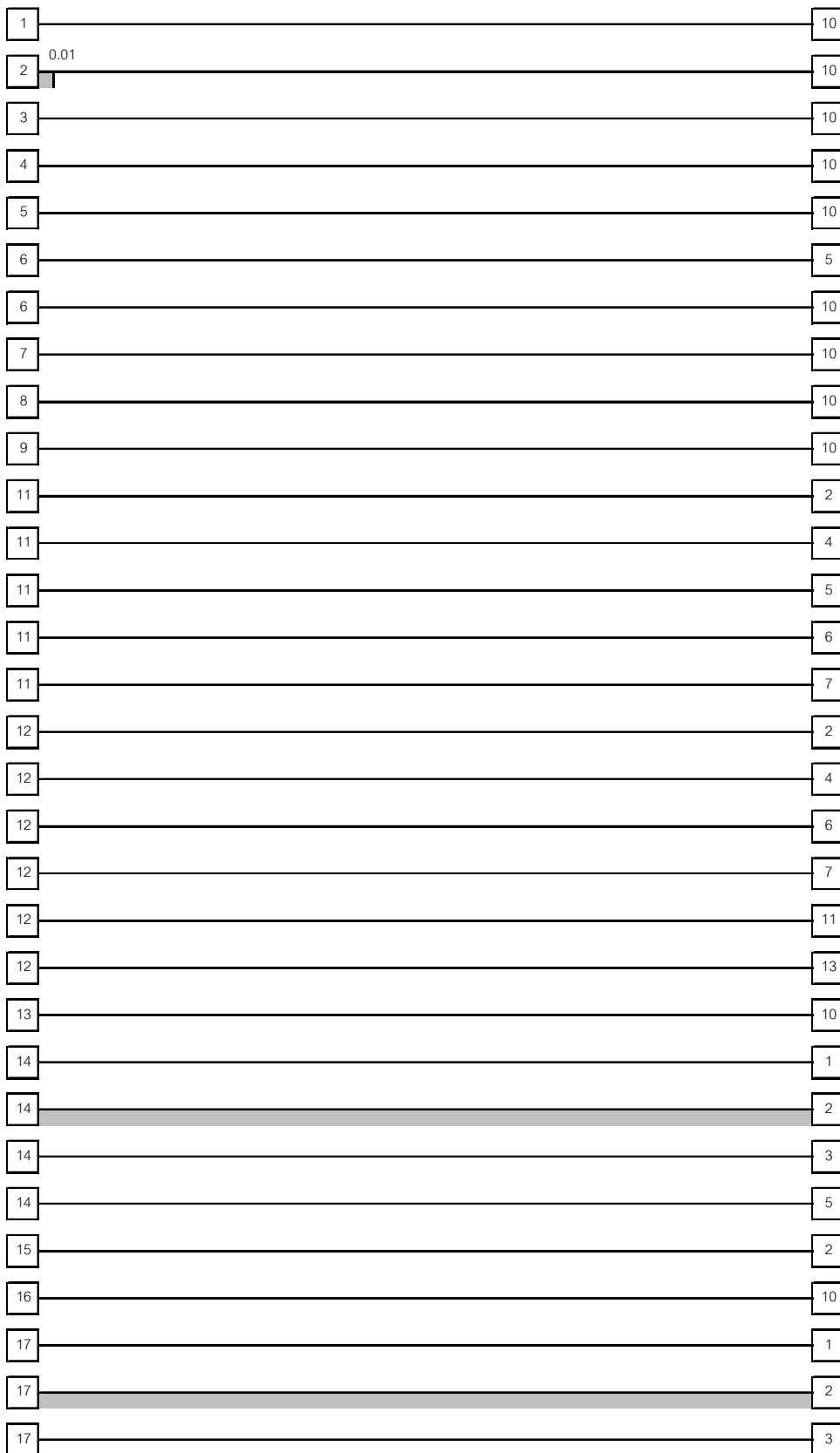
10.52 km



(ฟ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 29

ข่ายเชื่อมโยงที่ 30

10.52 km



(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 30

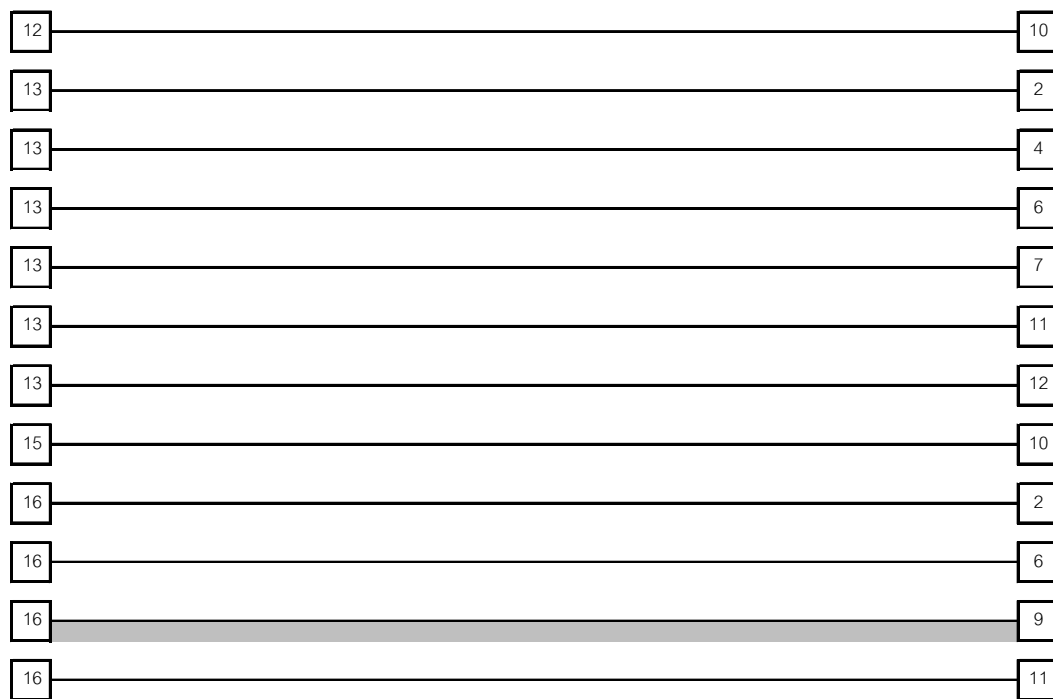
ข่ายเชื่อมโยงที่ 31

15.42 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 32

15.42 km



(ม) ข่ายเชื่อมโยงที่ 31 - 32

ข่ายเชื่อมโยงที่ 33

14.02 km

10	12
13	1
13	3
13	5
13	10
13	14
13	15
13	16
13	17
15	12
16	4
16	7
16	8
16	12
16	14
16	15
16	17

ข่ายเชื่อมโยงที่ 34

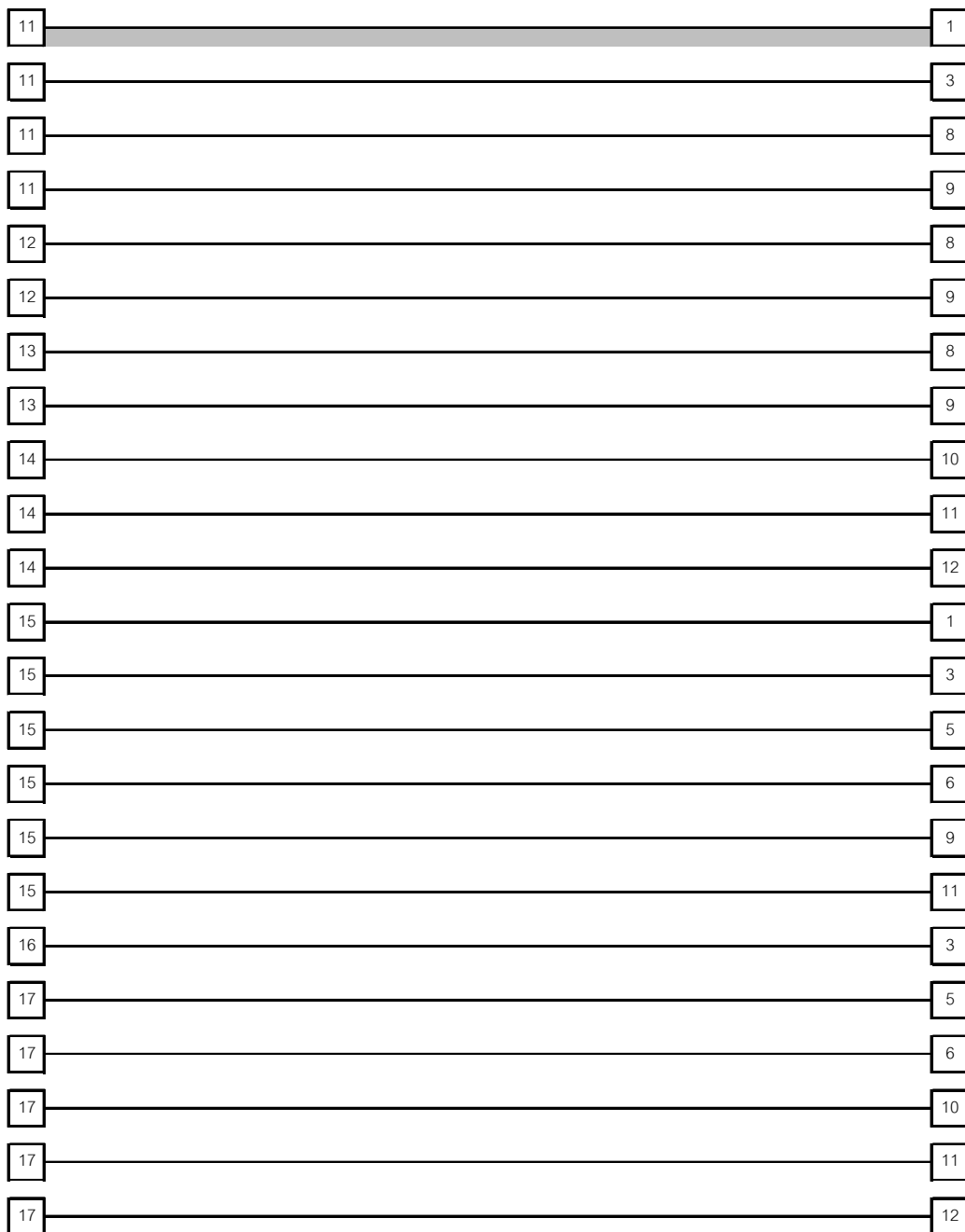
14.02 km

1	13
3	13
4	16
5	13
7	16
8	16
10	13
12	10
12	15
12	16
14	13
14	16
15	13
15	16
16	13
17	13
17	16

(ย) ข่ายเชื่อมโยงที่ 33 - 34

ข่ายเชื่อมโยงที่ 35

18.93 km



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 35

ข่ายเชื่อมโยงที่ 36

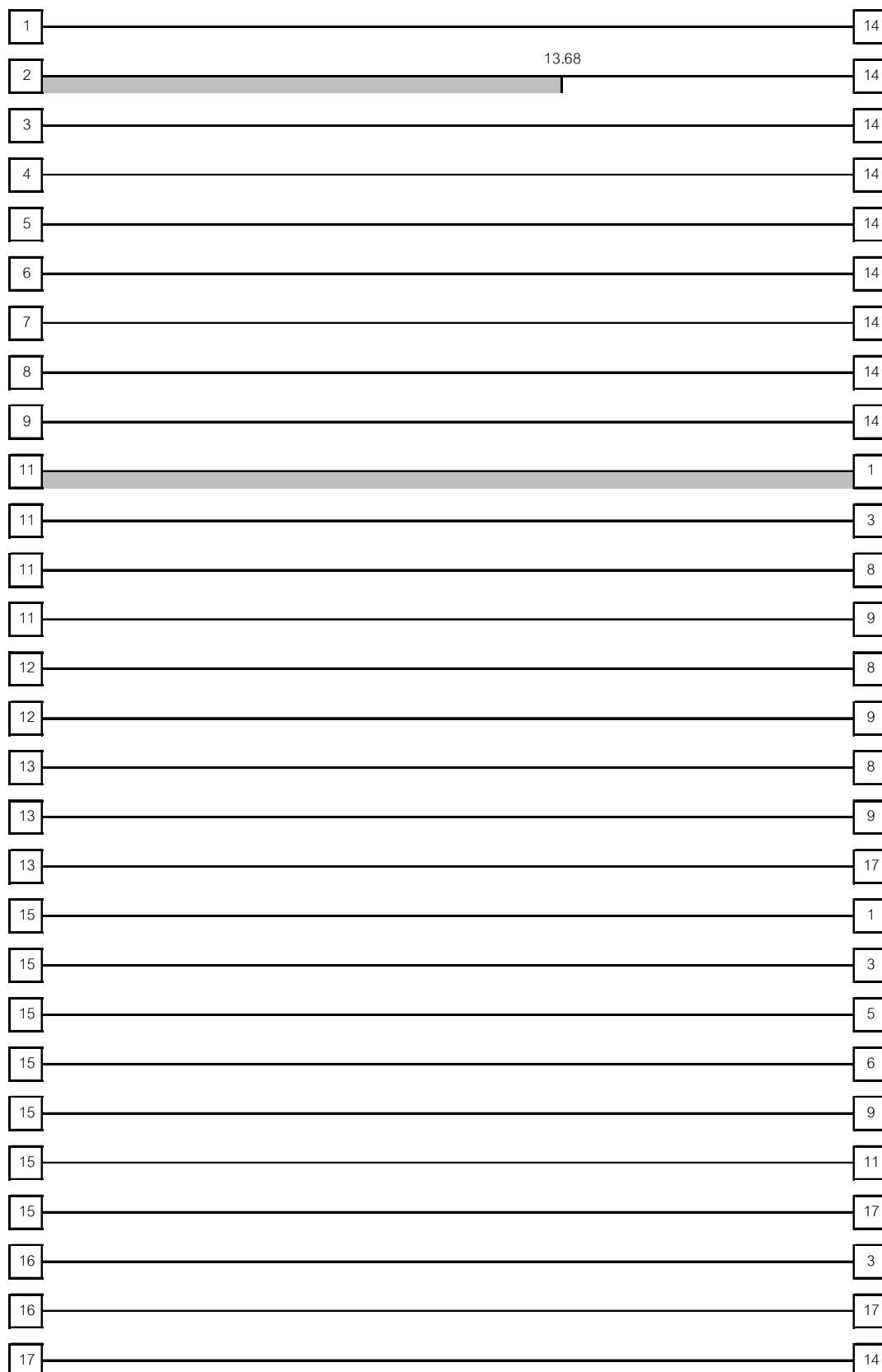
18.93 km

1	11
1	15
3	11
3	15
3	16
5	15
5	17
6	15
6	17
8	11
8	12
8	13
9	11
9	12
9	13
9	15
10	14
10	17
11	14
11	15
11	17
12	14
12	17

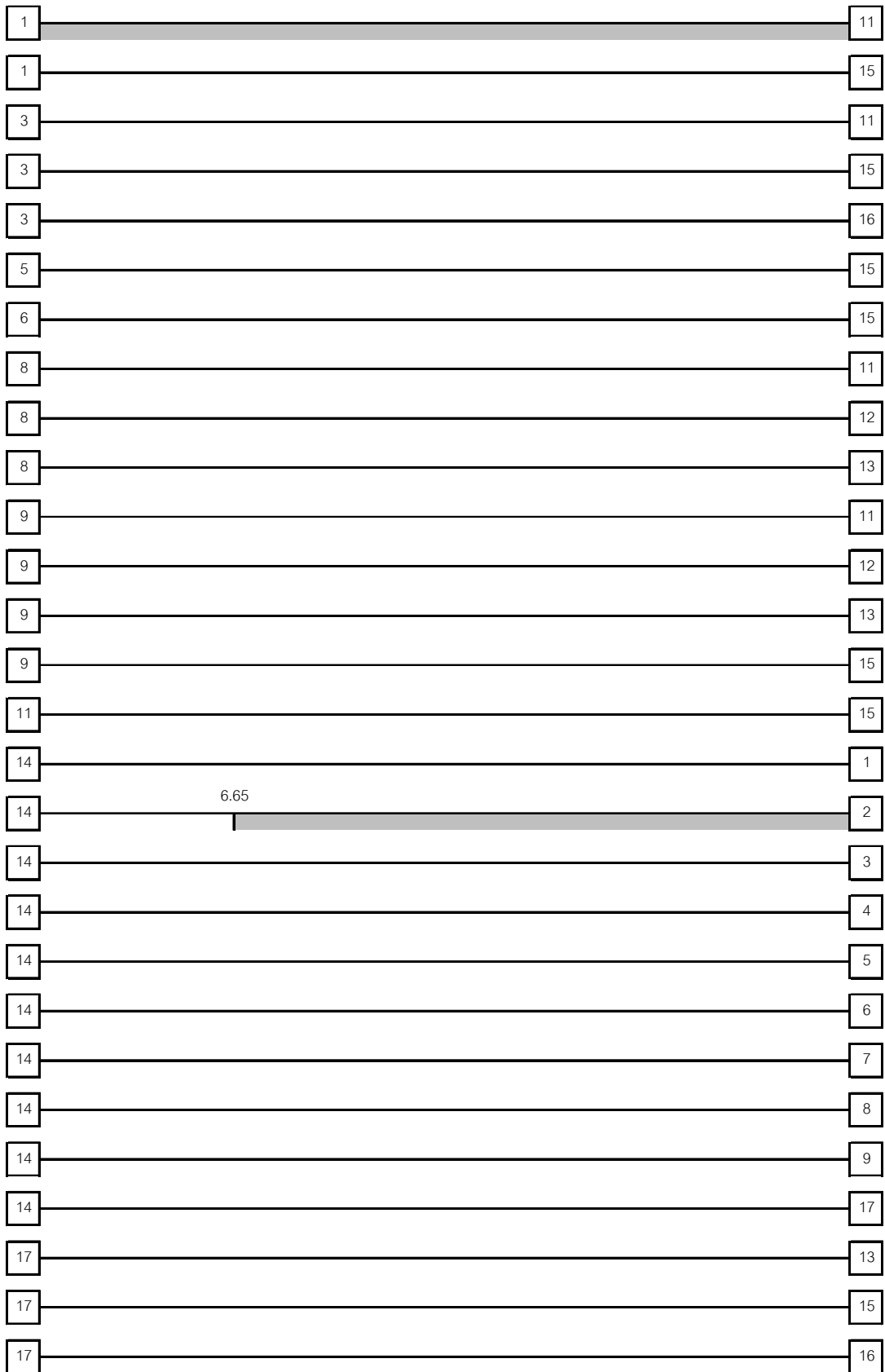
(ล) ข่ายเชื่อมโยงที่ 36

ข่ายเชื่อมโยงที่ 37

20.33 km



(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 37



(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 38

ข่ายเชื่อมโยงที่ 39

15.42 km

1	14
1	16
1	17
2	14
2	15
2	17
3	14
3	17
4	14
4	15
4	17
5	14
5	16
6	14
7	14
7	15
7	17
8	14
8	15
8	17
9	14
9	17
10	16
11	1
11	3
11	8
11	9
12	8
12	9
13	14
13	15
13	16
13	17
16	14
16	15
16	17

(๒) ข่ายเชื่อมโยงที่ 39

ข่ายเชื่อมโยงที่ 40

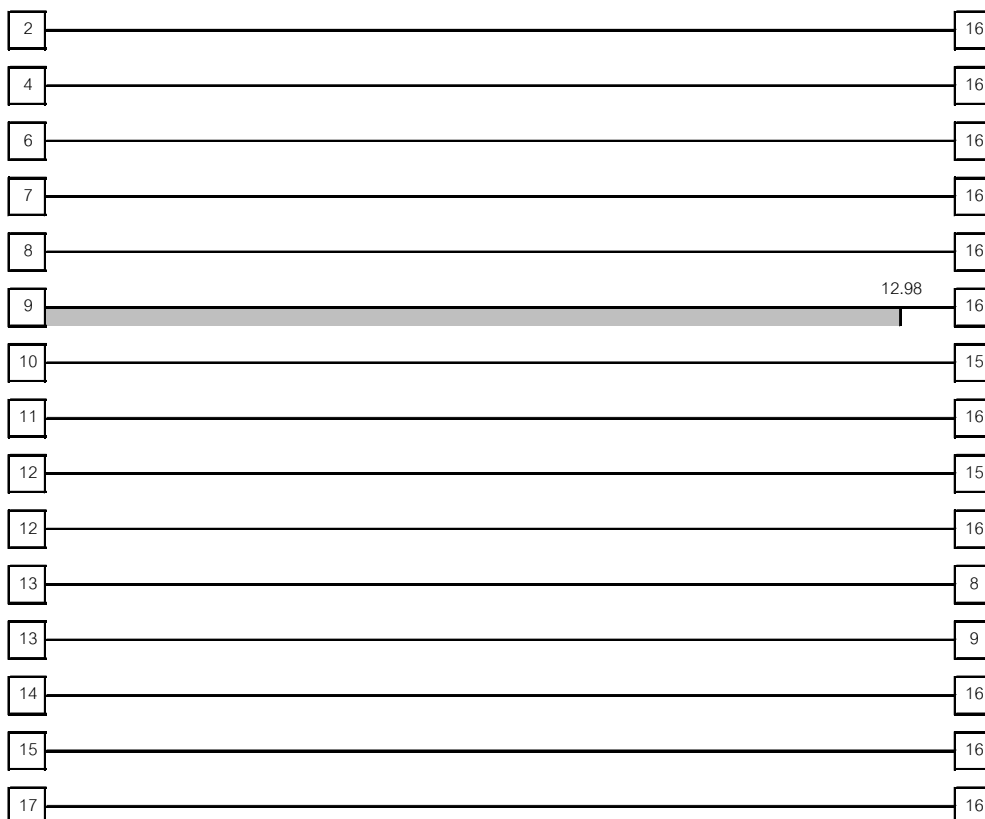
15.42 km

1	11
3	11
8	11
8	12
9	11
9	12
14	1
14	2
14	3
14	4
14	5
14	6
14	7
14	8
14	9
14	13
14	16
15	2
15	4
15	7
15	8
15	13
15	16
16	1
16	5
16	10
16	13
17	1
17	2
17	3
17	4
17	7
17	8
17	9
17	13
17	16

(ด) ข่ายเชื่อมโยงที่ 40

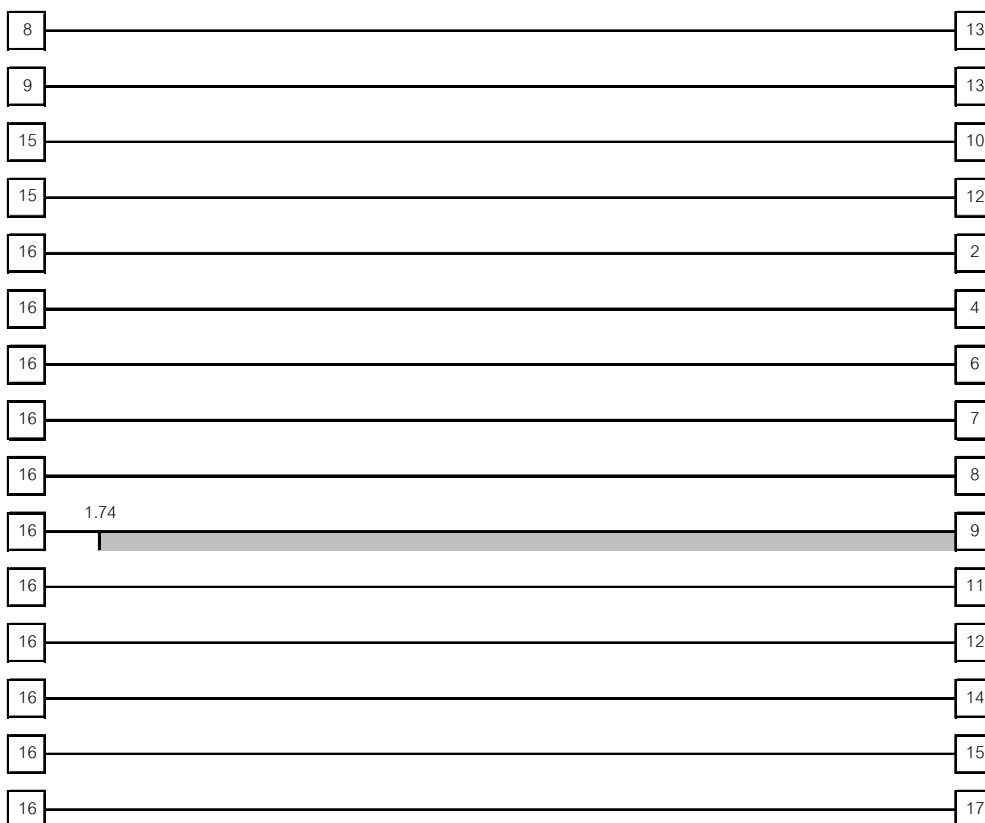
ข่ายเชื่อมโยงที่ 41

14.72 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 42

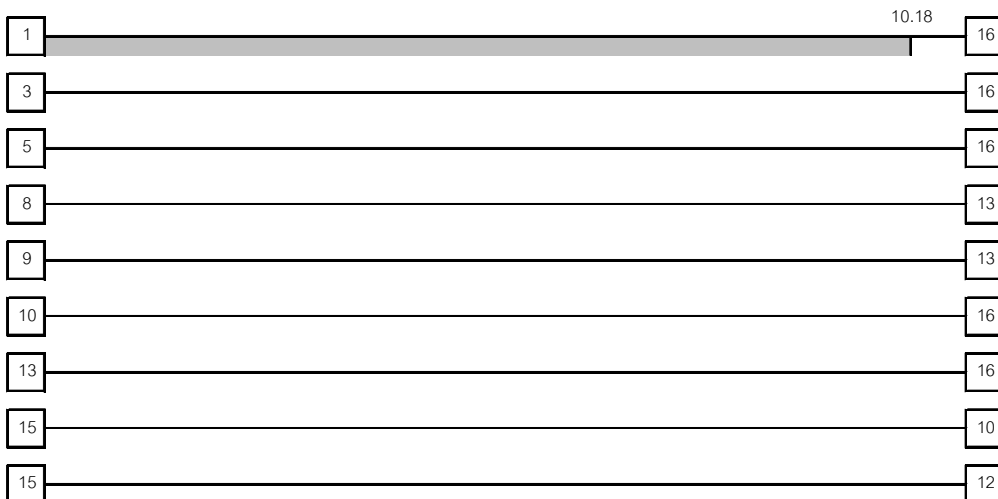
14.72 km



(ห) ข่ายเชื่อมโยงที่ 41 - 42

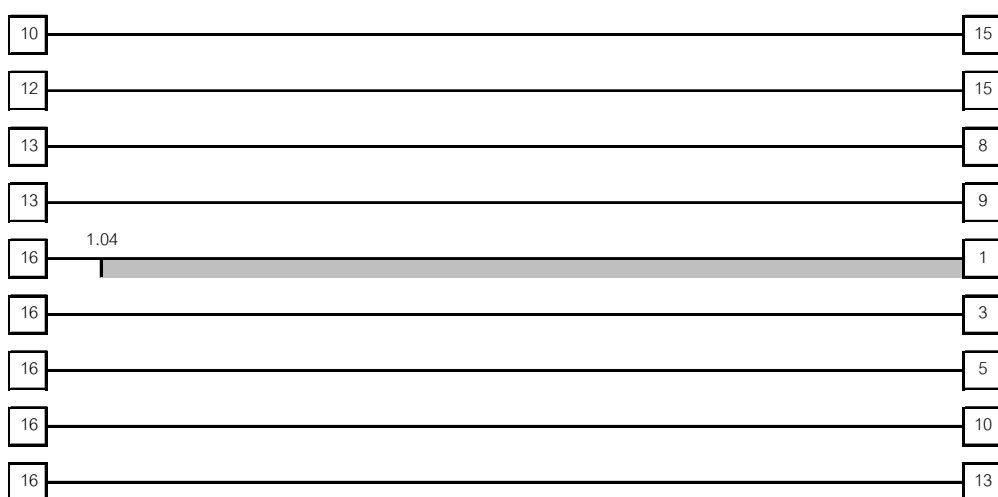
ข่ายเชื่อมโยงที่ 43

11.22 km



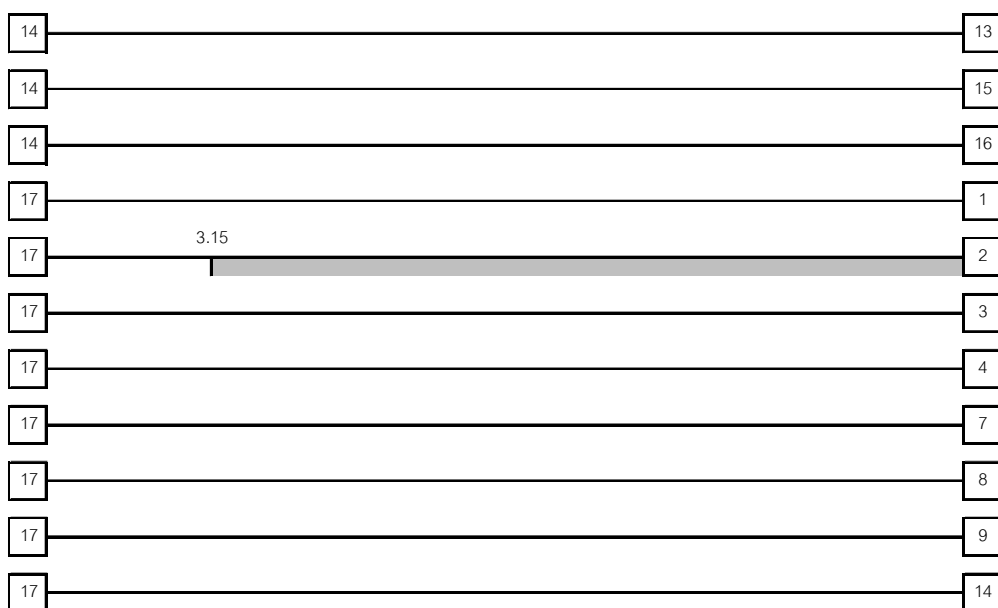
ข่ายเชื่อมโยงที่ 44

11.22 km

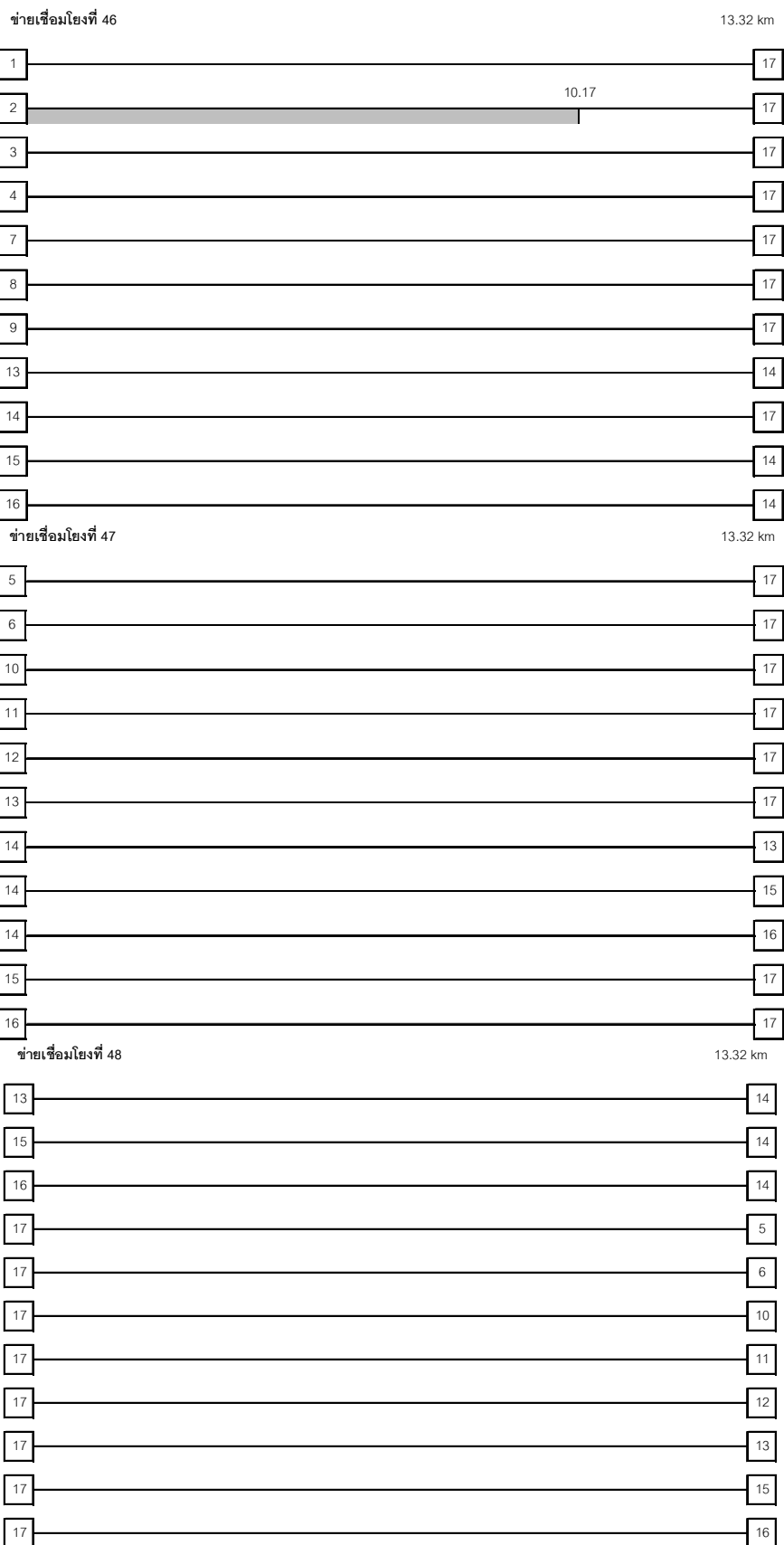


ข่ายเชื่อมโยงที่ 45

13.32 km



(พ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 43 - 45



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 46 - 48

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในงานประชุมทางวิชาการทั้งหมด 2 ฉบับ

1. บทความวิชาการในงานประชุม The 7th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON 2008) จัดขึ้นที่ SMU Conference Center ประเทศสิงคโปร์ ในวันที่ 8 – 11 ธันวาคม 2551 ในชื่อบทความเรื่อง Employment of Optical Phase Conjugators in Transparent WDM Broadcast-and-Select Network
2. บทความวิชาการในงานประชุม The 3rd National Conference on Optics and Application 2008 (NCOA 2008) จัดขึ้นที่ โรงแรม ดิ เอ็มเมอรัล ดินแดง กรุงเทพฯ ประเทศไทย ในวันที่ 15 สิงหาคม 2551 ในชื่อบทความเรื่อง Employment of Optical Phase Conjugators in Transparent WDM Broadcast-and-Select Network

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกานต์ มุกดาสนิท เกิดวันที่ 30 กรกฎาคม พ.ศ. 2527 อำเภอเมือง จังหวัด สิงห์บุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550

รายการอ้างอิง

- [1] Chomycz, Bob. Fiber optic installer's field manual.Singapore: McGraw Hill, 2000.
- [2] Kavehrad, M., and Tabiani, M. Selective-broadcast optical passive star coupler design for dense WDM networks. IEEE Photon. Technol. Lett. 3 (May 1991) : 487-489.
- [3] Khanal,M., Chae,C. J., and Tucker, R. S. Optimum operating conditions of a WDM passive optical network with selective video broadcasting capability through a single modulator. Proceedings of IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS),pp.220-221. Sydney, 2005.
- [4] Rhee,J. K., Tomkos, I., and Li, M. J. A broadcast-and-select OADM optical network with dedicated optical-channel protection. J. Lightwave Technology. 21 (January 2003) : 25-31.
- [5] Ramamurthy, B., Iness,J., and Mukherjee, B. Optimizing amplifier placements in a multiwavelength optical LAN/MAN: The equally powered-wavelengths case. J. Lightwave Technol. 16 (September 1998) : 1560-1569.
- [6] Kaewplung, P., and Lolurlert, K. T. Dispersion compensation in broadcast-and-selective optical network, Proceedings of Lasers and Electro-Optics CLEO/Pacific Rim 2005. Pacific Rim Conference (2005).
- [7] Jarupoom, P., Kulsuwam, N., and Kaewplung, P. Optimal placement of dispersion compensation unit in long-haul broadcast and selective DWDM passive optical networks, Proceedings of 11th Opto-Electronic Communication Conference (OECC'2006),pp.151-153. Taiwan, 2006.
- [8] Wang,J., Qi,X., and Chen, B. Wavelength assignment for multicast in all-optical WDM network with splitting constraints. IEEE/ACM Transactions on Networking. 14 (February 2006) : 169-182.

- [9] Jarupoom, P., and Kaewplung, P. Reducing of Kerr effect in long-haul broadcast-and-select transparent DWDM optical network by static wavelength assignment, Proceedings of 12th OptoElectronic and Communication Conference (OECC'07). Japan, 2007.
- [10] Keiser, G. Optical fiber communications 3rd ed. Singapore : McGraw Hill, 2000.
- [11] Fujitsu. Tutorial DWDM prerequisite training[Online]. Available from: <http://www.pucsp.br/labcom/download/DWDM-T-V01.pdf>[2002,November 15]
- [12] Stoll, D., Leisching,P., Bock,H., and Richter,A. SIEMENS AG. Metropolitan DWDM: A dynamically configurable ring for the KomNet field trial in Berlin. IEEE Communications Magazine.39 (February 2001) :106-113.
- [13] Kouvatsos,D. D. , Mouchos,C. V. , and Tsokanos,A. S. Performance modelling of a DWDM ring optical network with wavelength conversion and satellite support, Performance Modeling and Engineering Group University of Bradford.
- [14] Zhang, H., and Yang, O. Finding protection cycles in DWDM networks. Proceedings of IEEE International Conference on Communications,pp.2756-2760. USA, 2002.
- [15] Hinderthur, H., and Friedrich, L. Scaling protection to the needs of metro optical networking. Proceedings of 5th international Workshop on Design of Reliable Communication Networks(DRCN'05). Italy, 2005.
- [16] Tran,A.V., Tucker, R.S., and Boland N.L. Amplifier placement methods for metropolitan WDM ring networks, J. Lightwave Technol. 22 (Nov 2004): 2509-2522.
- [17] Ramamurthy, S., and Mukherjee, B. Survivable WDM mesh networks, Part I – Protection, Proceedings of IEEE infocom 1999,pp.744-751. USA, 1999.

- [18] Ramamurthy, S., and Mukherjee, B. Survivable WDM mesh networks, Part II – Restoration, Proceedings of IEEE International Conference on Communications, pp.2023-2030. Canada, 1999.
- [19] Zhang, J., Zhu, K., Sahasrabudde, L., Ben Yoo, S. J., and Mukherjee, B. on the study of routing and wavelength assignment approaches for survivable wavelength-routed WDM mesh network. Optical Network Magazine, November/December 2003.
- [20] Guo, L., Cao, J., Yu, H., and Li, L. Path-based routing provisioning with mixed shared protection in WDM mesh networks. J. Lightwave Technol. 24 (March 2006):1129-1141.
- [21] Agrawal, G. P. Lightwave Technology Telecommunication System, 3rd ed. New York: John Willey & Sons.
- [22] Wen, S. Optical phase conjugation of multiwavelength signals in a dispersion-shifted fiber. J. Lightwave Technol. 5 (July 1997): 1061-1070.
- [23] Lorattanasane, C. and Kikuchi, K. Design theory of long-distance optical transmission systems using midway optical phase conjugation. J. Lightwave Technol. 15, (June 1997): 948-955.
- [24] Tang, X. and Wu, Z. Nonlinear noise amplification in optical transmission systems with optical phase conjugation. J. Lightwave Technol. 23 (May 2005): 1866-1873.
- [25] Minzioni, P., Alberti, F., and Schiffrini, A. Techniques for nonlinearity cancellation into embedded links by optical phase conjugation. J. Lightwave Technol. 23 (August 2005): 2364-2370.
- [26] Jansen, S. L., et al. Optical phase conjugation for ultra long-haul phase-shift-keyed transmission. J. Lightwave Technol. 24 (January 2006): 54-64.

- [27] Jansen, S. L., et al. Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation, Selected Topics in Quantum Electronics J., 12 (July-August 2006): 505-520.
- [28] Chuenprasertsuk, N. and Kaewplung, P. Employment of optical phase conjugators in transparent DWDM single-ring network, Proceedings of 12th OptoElectronic and Communication Conference (OECC'07), Japan, 2007.
- [29] ณิชฎฐา ขึ้นประเสริฐสุข. การศึกษาความเป็นไปได้การใช้งานเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2551.
- [30] Ramamurthy, B., Mukherjee, B. Design of Optical WDM Networks. Massachusetts : Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [31] Agrawal, G. P. Nonlinear fiber optics. California : Academic Press, 1989.
- [32] Mukherjee, B. Optical Communication Networks. New York : McGraw-Hill, 1997.
- [33] Ramamurthy, B. Optical WDM Networks: Principles and Practice, chapter 2. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [34] Ramamurthy, S., Sahasrabudde, L., and Mukherjee, B. Survivable WDM mesh networks. J. Lightwave Technol. 21, (April 2003): 870-883.
- [35] ัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ. วิศวกรรมโทรคมนาคม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [36] Lee, J.H., et. al. Bismuth nonlinear fibre-based optical phase conjugator without SBS-induced efficiency limitation and its application to dispersion compensation in transmission link. Electronics Letter, 42 (March 2006):298-299.
- [37] Antoniadis, N., et. al. Performance engineering and topological design of metro WDM optical networks using computer simulation. IEEE J. Sel. Areas Commun., 20 (January 2002): 149-165 .

- [38] ITU-T Recommendation. Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers[Online]. Available from: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.692/en>
[2008, July]
- [39] Balakrishnan, V. K. Theory and problems of graph theory. New York : McGraw-Hill, 1997.
- [40] ณัฐพล กุลสุวรรณ. การแปลงเชิงแสงทั้งหมดของการมอดูเลตสัญญาณแบบเปิดปิดเป็นพีเอสเค โดยอาศัยการครอสเฟสมอดูเลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2549.
- [41] ITU-T Recommendation. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable [Online]. Available from: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-200506-l/en>
[2005, June]
- [42] Gnauck, A. H., Jopson, R.M., and Derosier, R. M. 10-Gb/s 360-km transmission over dispersive fiber using midway spectral inversion. IEEE Photon. Technol. Lett. 5. (June 1993) : 663-666.
- [43] Watanabe, S., Naito, T., and Chikama, T. Compensation of chromatic dispersion in a single-mode fiber by optical phase conjugation. IEEE Photon. Technol. Lett. 5. (January 1993) : 92-95.
- [44] Tatham, M. C., Gu, X., Westbrook, L. D., Sherlock, G., and Spirit, D. M. Transmission of 10-Gbit/s directly modulated DFB signals over 200 km standard fibre using mid-span spectral inversion. Electron. Lett. 30. (August 1994) : 1335-1336.
- [45] Watanabe, S., Ishikawa, G., Naito, T., and Chikama, T. Generation of optical phase-conjugate waves and compensation for pulse shape distortion in a single-mode fiber. J. Lightwave Technology. 12 (December 1994): 2139-2146.

- [46] Lorattanasane, C., and Kikuchi, K. Design of long distance optical transmission systems using midway optical phase conjugation. IEEE Photon. Technol. Lett. 7. (November 1995) : 1375-1377.
- [47] Marcenac, D.D, Nessel, D., Kelly, A.E., and Gavrilovic, D. 40 Gbit/s transmission over 103 km of NDSF using polarization independent mid-span spectral inversion by four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier. Electron. Lett. 34. (January 1998) : 100-101.
- [48] Feiste, U., et al. 80-Gb/s transmission over 106-km standard-fiber using optical phase conjugation in a Sagnac-interferometer. IEEE Photon. Technol. Lett. 11. (August 1999) : 1063-1065.
- [49] Merker, T., Meissner, P., and Feiste. U. High bit-rate OTDM transmission over standard fiber using mid-span spectral inversion and its limitations. J. Selected topics in Quantum Electron. 6 (March/April 2000) : 258-262.
- [50] Inoue, J., Sotobayashi, H., Chujo, W., and Kawaguchi, H. 80 Gbit/s OTDM signal transmission over 208 km standard fibre using midspan optical phase conjugation based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers. Electron. Lett. 38. (July 2002) : 819-821.
- [51] Tani, M., and Yamashita, S. Dispersion compensation with SBS-suppressed fibre phase conjugator using synchronized phase modulation. Electron. Lett. 39. (September 2003)
- [52] Jansen, S.L., et al. 10200 km 22x2x10Gbit/s RZ-DQPSK dense WDM transmission without inline dispersion compensation through optical phase conjugation. Optical society of America (2005).
- [53] Li, J., Xu, K., Zhou, G., Wu, J., and Lin, J. Dispersion-compensation schemes for 160-Gb/s 1200-km transmission by optical phase conjugation. J. Lightwave Technology. 25 (August 2007) : 1986-1995.

- [54] Kaewplung, P., and Kikuchi, K. Simultaneous cancellation of fiber loss, dispersion, and Kerr effect in ultralong-haul optical fiber transmission by midway optical phase conjugation incorporated with distributed Raman amplification. J. Lightwave Technology. 25 (October 2007) : 3035-3050.
- [55] Sarapa, N., and Kaewplung, P. Theoretical study on performance of optical phase conjugation for ultra long-haul differential phase-shift-keyed transmission. Optical society of America (2007).
- [56] Cisco press.WDM network design[Online]. Available from: <http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=30886&seqNum=5>[2003,February]
- [57] Keiser, G. Optical communications essentials 3rd ed. New York : McGraw Hill, 2003.