



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การประยุกต์ใช้วิธีสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายเส้นใยแสง

APPLICATIONS OF OPTICAL PHASE CONJUGATION IN OPTICAL FIBER NETWORKS

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พลุ แก้วปลั่ง และคณะ

มกราคม ๒๕๕๔

สัญญาเลขที่ MRG5180176

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การประยุกต์ใช้วิธีสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายเส้นใยแสง

APPLICATIONS OF OPTICAL PHASE CONJUGATION

IN OPTICAL FIBER NETWORKS

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ นำเสนอวิธีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายเส้นใยแสงที่ใช้การมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น ซึ่งโครงข่ายที่พิจารณานั้น มีอยู่ด้วยกัน 3 ลักษณะคือโครงข่ายแบบวงแหวน (ring network) แบบแพร่และเลือกสัญญาณ(broadcast-and-select network) และโครงข่ายแบบเมช(mesh network) ซึ่งวิธีที่นำเสนอจะจะทำให้โครงข่ายใช้จำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้น้อยกว่ากรณีที่ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงมากที่สุด นอกจากนั้น ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่โครงข่ายมีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งมีกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบเปลี่ยนเส้นทาง (path protection) วิธีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้น ทำได้โดยการวิเคราะห์กราฟฟิกของข้อมูลทั้งหมด และวิเคราะห์ตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง รวมถึงหาค่าพารามิเตอร์ที่สามารถบอกได้ว่าโครงข่ายไหนใช้วิธีลดจำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ หรือโครงข่ายไหนต้องวางไว้ที่ตำแหน่งกลางข่ายเชื่อมโยงทุกข่าย

เนื่องจากเกิดปัญหาในการหาช่วงในการซ้อนทับทุกๆกราฟฟิกได้ไม่ทั้งหมด จึงได้คิดค้นระเบียบขั้นตอนวิธีเพื่อที่จะทำการซ้อนทับทุกๆกราฟฟิกให้ได้ทั้งหมด โดยใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า R ซึ่งสามารถช่วยตัดสินใจได้ว่าโครงข่ายนั้นสามารถใช้วิธีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้หรือไม่ เมื่อได้ทดลองใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอ ในโครงข่ายตัวอย่างต่างๆ ได้แก่ OPEN ERNet และ NARNet โดยใช้ค่า R ที่คิดค้นพัฒนาขึ้นในการลดขนาดโครงข่ายแต่ละโครงข่ายให้เหมาะสม พบว่าสามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ด้วยจำนวนน้อยกว่าการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในกรณีที่วางกลางข่ายเชื่อมโยงทุกข่าย

เพื่อให้ไม่จำเป็นต้องลดขนาดโครงข่ายลง ผู้วิจัยจึงได้ใช้วิธีเลือกช่วงของความยาวคลื่นที่เหมาะสม หรือช่วงของค่าดิสเพอร์ชันเริ่มต้นที่เหมาะสมแทน จากการทดลองวิธีดังกล่าวบน ERNet ซึ่งประกอบด้วย 42 link และ 15 node ช่วงของความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายดังกล่าว คือ 1220.21-1248.51 nm โดยใช้จำนวน OPC เพียงแค่ 10 ตัว สำหรับโครงข่าย NARNet ซึ่งประกอบด้วย 48 link และ 17 node ช่วงของความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายดังกล่าว คือ 1220.20-1237.50 nm โดยใช้จำนวน OPC เพียงแค่ 10 ตัวเช่นเดียวกัน. จะเห็นได้ว่า ด้วยวิธีดังกล่าว เราสามารถลดจำนวน OPC บนโครงข่าย ERNet และ NARNet ลงมาได้ถึง 32 และ 38 ตัวตามลำดับ

ABSTRACT

We propose a method for placing optical phase conjugators (OPCs) in optical wavelength-division multiplexed (WDM) fiber network. Our method is transparent to network topologies, therefore, it can be applied for both broadcast-and-select (B&S) network and wavelength-routed networks, such as ring network and mesh network, and can be extended for all such the networks that faces a single-link failure, protected by shared path protection. Moreover, our method can give the number of OPC needed in the networks less than using the OPC in the middle of each link, for which the number of OPC is maximum.

For a given range of wavelengths that intend to be used for signal transmission in a network, according to the restriction that the OPC usable ranges of all traffics in a shared path must be overlapped, we derive a useful parameter, which denotes R parameter, to determine whether the network can employ OPC using our algorithm, or it can only employ OPC in the middle of each link. The R parameter can also be used for scaling a network size to be suitable for which our algorithm can be applied. We demonstrate our algorithm 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, show that our proposed algorithm can efficiently help reducing the number of OPC to be less than using the OPC in the middle of each link.

Next, we investigate the elimination of such limitation manifested through the R parameter by finding the suitable range of wavelength, as well as the suitable range of dispersion values, that can be used in the network without scaling down the size of the network. Again, we demonstrate our analysis on the ERNet and the NARNet. For the ERNet which consists of 42 links and 15 nodes, the suitable range of wavelengths is 1220.21-1248.51 nm with the necessary number of OPC is 10. On the other hand, we show that, for the NARNet which consists of 48 links and 17 nodes, the suitable range of wavelengths is 1220.20-1237.50 nm with the necessary number of OPC is 10. As a result, we can significantly reduce the number of OPC as much as 32 and 38 for the ERNet and NARNet, respectively.

Key Words: Optical fiber communication, optical fiber network, wavelength-division multiplexing, wavelength-routed network, broadcast & select network, optical fiber dispersion, dispersion compensation, optical phase conjugator

Executive Summary

การสื่อสารทางแสง ใช้เส้นใยแสงเป็นตัวกลางในการสื่อสารข้อมูล เส้นใยแสงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลางชนิดอื่นๆ จะพบว่ามีประสิทธิภาพที่ดีกว่ามากมาย ทำให้โครงข่ายทางแสง (optical network) ที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงเป็นตัวกลางนั้น มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นโครงข่ายแกนหลัก (core network) โครงข่ายระยะไกล (long-haul Network) โครงข่ายบริเวณกว้าง (wide area network : WAN) และโครงข่ายนครหลวง (metro-politan area network : MAN) โครงข่ายในการสื่อสารทางแสงที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์สัญญาณด้วยความยาวคลื่นสามารถจำแนกออกเป็นสองแบบหลักๆ คือ โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร่และเลือกสัญญาณ (WDM broadcast-and-select network) และโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบกำหนดความยาวคลื่นประจำเส้นทาง (WDM wavelength-routed optical network) ซึ่งอาจแบ่งเป็นโครงข่ายรูปแบบวงแหวน (ring network) และโครงข่ายรูปแบบเมช (mesh network)

ด้วยความต้องการอัตราข้อมูลที่ยังมีอยู่อย่างไม่จำกัด ทำให้ยังคงมีการพัฒนาโครงข่ายทางแสงอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับข้อมูลที่มีความเร็วสูงขึ้นและระยะทางในการส่งไกลขึ้น แต่ก็จะมีผลกระทบอื่นตามมา โดยเฉพาะ การขยายออกของสัญญาณทางเวลาโดยดิสเพอร์ชัน (dispersion) ของเส้นใยแสง การจัดการดิสเพอร์ชันนั้น มีการใช้ dispersion compensating fiber (DCF) วางเป็นรายคาบเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันทุกจุดในโครงข่ายไม่เกินค่าที่กำหนด และมีการใช้เครื่องสังยุคเฟสแสง (optical phase conjugator) ในการจัดการดิสเพอร์ชันโดยการวางในตำแหน่งกึ่งกลางของโครงข่ายเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงและหลังจากออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงหักล้างกันหมด

โครงการวิจัยนี้ นำเสนอวิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายเส้นใยแสงที่ใช้การมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น ซึ่งโครงข่ายที่พิจารณานั้น มีอยู่ด้วยกัน 3 ลักษณะคือโครงข่ายแบบวงแหวน (ring network) แบบแพร่และเลือกสัญญาณ (broadcast-and-select network) และโครงข่ายแบบเมช (mesh network) ซึ่งวิธีที่นำเสนอขึ้นจะทำให้โครงข่ายใช้จำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสงได้น้อยกว่ากรณีที่ใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงมากที่สุด นอกจากนั้น ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่โครงข่ายมีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งมีกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบเปลี่ยนเส้นทาง (path protection) วิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงนั้น ทำได้โดยการวิเคราะห์กราฟฟิกของข้อมูลทั้งหมด และวิเคราะห์ตำแหน่งที่จะวางเครื่องสังยุคเฟสแสง รวมถึงหาค่าพารามิเตอร์ที่สามารถบอกได้ว่าโครงข่ายไหนใช้วิธีลดจำนวนเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ หรือโครงข่ายไหนต้องวางไว้ที่ตำแหน่งกลางข่ายเชื่อมโยงทุกข่าย เนื่องจากเกิดปัญหาในการหาช่วงในการซ้อนทับทุกๆกราฟฟิกได้ไม่ทั้งหมด จึงได้คิดค้นระเบียบขั้นตอนวิธีเพื่อที่จะทำการซ้อนทับทุกๆกราฟฟิกให้ได้ทั้งหมด โดยใช้พารามิเตอร์ที่เรียกว่า R ซึ่งสามารถช่วยตัดสินใจได้ว่า โครงข่ายนั้นสามารถใช้วิธีการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้หรือไม่ เมื่อได้ทดลองใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอ ในโครงข่ายตัวอย่างต่างๆ ได้แก่ OPEN ERNet และ NARNet โดยใช้ค่า R ที่คิดค้นพัฒนาขึ้นในการลดขนาดโครงข่ายแต่ละโครงข่ายให้เหมาะสม พบว่าสามารถวางเครื่องสังยุคเฟสแสงได้ด้วยจำนวนน้อยกว่าการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในกรณีที่วางกลางข่ายเชื่อมโยงทุกข่าย

ระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงที่ได้คิดค้นขึ้นนั้น คือ

1. คำนวณหาระยะทางของกราฟฟิก รวมทั้งข่ายเชื่อมโยงที่กราฟฟิกของทุกๆ สถานี

2. ประเมินโครงข่ายว่า สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงให้เหมาะสมที่สุด โดยใช้พารามิเตอร์ R เป็นตัวตัดสิน ซึ่งค่า จะเป็นตัวตัดสินว่า ควรจะใช้การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแบบไหนระหว่างการวางตรงกลางข่ายเชื่อมโยง หรือวางโดยใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีนี้
3. คำนวณหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิก
4. นำช่วงที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในข้อ 3 มาคิดหาตำแหน่งที่เหมาะสมในแต่ละข่ายเชื่อมโยง โดยใช้วิธีซ้อนทับ (intersection) ของทุกๆทราฟฟิก
5. ตรวจสอบผลของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

เพื่อให้ไม่จำเป็นต้องลดขนาดโครงข่ายลง ผู้วิจัยจึงได้ใช้วิธีเลือกช่วงของความยาวคลื่นที่เหมาะสม หรือ ช่วงของค่าดิสเพอร์ชันเริ่มต้นที่เหมาะสมแทน ระเบียบขั้นตอนในการดำเนินการจะถูกปรับเปลี่ยนไปเป็นดังนี้

1. คำนวณหาทราฟฟิกของโนดต่างๆ โดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางแบบสั้นที่สุด (shortest path) ระหว่างคู่ โหนดทราฟฟิกนี้ใดๆ รวมถึงหาข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องในท เพื่อนำมาคิดหาค่าพารามิเตอร์
2. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ กับ ค่าความยาวคลื่น (λ) เพื่อหาช่วงของความยาวคลื่น และ ช่วงของค่าดิสเพอร์ชันเริ่มต้นของช่องสัญญาณทั้งหมด ที่ทำให้พารามิเตอร์ มีค่าระหว่าง 0.1 – 1
3. คำนวณหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิก นำตำแหน่งในข้อที่ 3 มาคิดหา ตำแหน่งที่เหมาะสมในแต่ละข่ายเชื่อมโยง โดยใช้วิธีซ้อนทับกัน(intersection) ทุกทราฟฟิก
4. ตรวจสอบผลของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

จากการทดลองวิธีดังกล่าวบน ERNet ซึ่งประกอบด้วย 42 link และ 15 node ช่วงของความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายดังกล่าว คือ 1220.21-1248.51 nm โดยใช้จำนวน OPC เพียงแค่ 10 ตัว สำหรับ โครงข่าย NARNet ซึ่งประกอบด้วย 48 link และ 17 node ช่วงของความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับโครงข่าย ดังกล่าว คือ 1220.20-1237.50 nm โดยใช้จำนวน OPC เพียงแค่ 10 ตัวเช่นเดียวกัน จะเห็นได้ว่า ด้วยวิธีดังกล่าว เราสามารถลดจำนวน OPC บนโครงข่าย ERNet และ NARNet ลงมาได้ถึง 32 และ 38 ตัวตามลำดับ

นอกจากนี้ในระบบที่มีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง สัญญาณที่ออกจากเครื่องส่งยุคเฟสแสง จะมีกำลัง สัญญาณลดลงมากกว่าการจัดการดิสเพอร์ชันแบบอื่น จึงต้องมีการใช้เครื่องขยายสัญญาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเครื่อง ขยายสัญญาณนั้นนอกจากจะขยายสัญญาณข้อมูลแล้ว ยังขยายสัญญาณรบกวนในระบบอีกด้วย ทำให้ OSNR ของระบบลดลง ดังนั้นเราจึงทำการวิเคราะห์ค่า OSNR ในโครงข่าย โดยพิจารณาจากอัตราส่วน OSNR ระหว่าง โครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแล้ว กับโครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบแพร่และ เลือกสัญญาณ จะมีค่า OSNR ลดลง 1.890 dB ส่วนโครงข่ายแบบเมช จะได้ผลดังนี้ OPEN อัตราส่วน OSNR ลดลง 5.863 dB ERNet อัตราส่วน OSNR ลดลง 7.467dB NARNet อัตราส่วน OSNR ลดลง 8.850 dB และ กรณีที่มีการกู้คืนสัญญาณ อัตราส่วน OSNR จะลดลง 5.227 dB

สารบัญ

บทคัดย่อ.....	iii
Abstract.....	iv
Executive summary.....	V
บทที่ 1: บทนำ.....	1
บทที่ 2: การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบวงแหวน.....	10
บทที่ 3: การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ.....	82
บทที่ 4: การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมช	105
บทที่ 5: การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมช กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายและ การวิเคราะห์ OSNR.....	186
บทที่ 6: การหาช่วงความยาวคลื่นใหม่ที่ส่งได้โดยไม่ต้องลดขนาดโครงข่าย	255
บทที่ 7: บทสรุป.....	307
รายการอ้างอิง.....	309

บทที่ 1

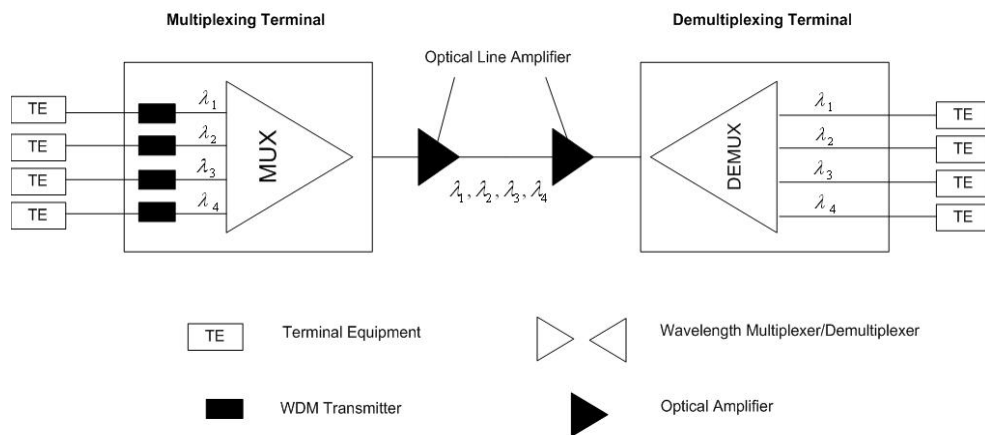
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารข้อมูลเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการค้นคว้าวิจัย เพื่อที่จะเพิ่มศักยภาพของการสื่อสารข้อมูลให้มีคุณภาพดีขึ้น ในอดีตการสื่อสารจะอยู่ในรูปแบบของการส่ง สัญญาณไฟฟ้าผ่านสายทองแดงชนิดสายคู่พันเกลียว (twisted pair) หรือสายเคเบิลแกนร่วม (coaxial cable) อย่างไรก็ตาม การสื่อสารก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการพัฒนาของเทคโนโลยี ส่งผลให้การสื่อสารในรูปแบบเดิมๆ มีปริมาณแบนด์วิดท์ไม่เพียงพอต่อความต้องการ จึงต้องมีการพัฒนาการสื่อสารใหม่ จากระบบเดิมคือการ สื่อสารทางไฟฟ้า (electrical communication) มาเป็นการสื่อสารทางแสง (optical communication) เพราะ การสื่อสารระบบนี้มีแบนด์วิดท์ที่สูงและส่งในระยะทางที่ไกลได้มากขึ้น การเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลหรือการใช้ แบนด์วิดท์ให้คุ้มค่านั้นสามารถทำได้โดยใช้วิธีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นอย่างหนาแน่น (dense wavelength division multiplexing : DWDM) ซึ่งเป็นกลวิธีการรวมช่องสัญญาณที่มีระยะห่างระหว่างแต่ละ ช่องสัญญาณแคบกว่า 100 GHz ทำให้มีจำนวนช่องสัญญาณให้ใช้งานมากขึ้น จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้การ สื่อสารทางแสงสามารถรองรับปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ดีกว่าการสื่อสารรูปแบบอื่น การสื่อสาร ทางแสงสามารถรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในการส่งผ่านข้อมูลที่ต้องการทั้งคุณภาพและ ปริมาณที่สูงขึ้นตลอดเวลาได้ ทำให้ระบบสื่อสารผ่านโครงข่ายทางแสงมีการวิจัยและการพัฒนาอย่างกว้างขวาง ซึ่งส่งผลทำให้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ได้ถูกพัฒนาแล้วนำออกมาใช้มากมายหลายประเภททั้งอุปกรณ์แบบกัม มันต์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (active component) และอุปกรณ์แบบแพสซีฟหรืออุปกรณ์ที่ไม่ใช้พลังงานใน การทำงาน (passive component) ในโครงข่ายที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากนั้นจะเกิดปัญหาคอขวด (bottleneck) เนื่องจากขีดจำกัดของอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 40 GHz ดังนั้นการลดจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ลงแล้วแทนที่ด้วยอุปกรณ์แบบแพสซีฟจะทำให้อัตราการส่งข้อมูลภายในโครงข่ายทางแสงมีประสิทธิภาพมาก ขึ้น รูปที่ 1.1 แสดงระบบและอุปกรณ์ของดับเบิลยูดีเอ็ม

การสื่อสารทางแสง ใช้เส้นใยแสงเป็นตัวกลางในการสื่อสารข้อมูล เส้นใยแสงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลาง ชนิดอื่นๆ จะพบว่ามีประสิทธิภาพที่ดีกว่ามากมาย [1] เช่น

1. เส้นใยแสงมีอัตราสูญเสียพลังงานแสงต่ำ ทำให้ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกล และใช้อุปกรณ์ทวน สัญญาณ (repeater) และอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) น้อยกว่าการสื่อสารแบบอื่นๆ
2. เส้นใยแสงมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา จากการที่มันมีขนาดเล็กทำให้สามารถรวมเส้นใยแสงหลายๆเส้น ให้อยู่ในสายเคเบิลเดียวกันได้ ทำให้เพิ่มช่องทางการสื่อสารมากขึ้น จากการใช้พื้นที่เท่าเดิม
3. เส้นใยแสงผลิตมาจากวัสดุซิลิคอนไฟฟ้า ทำให้ปราศจากสัญญาณรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงมี ความถูกต้องและความแม่นยำของสัญญาณสูงเมื่อเทียบกับตัวกลางประเภทอื่น ขั้วสารที่ส่งไปจะมีตำแหน่งรับ และส่งที่แน่นอน ทำให้การลักลอบดักฟังนั้นเป็นไปได้ยาก
4. เส้นใยแสงทำจากวัสดุที่ไม่มีการเสื่อม และมีความต้านทานต่ออุณหภูมิและความชื้น จึงสามารถนำ เส้นใยแสงไปติดตั้งใช้งานได้นานได้ นอกจากนั้นยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน บางเส้นมีอายุการใช้งานยาวถึง 40 ปี และความต้องการในการบำรุงรักษาน้อยมาก

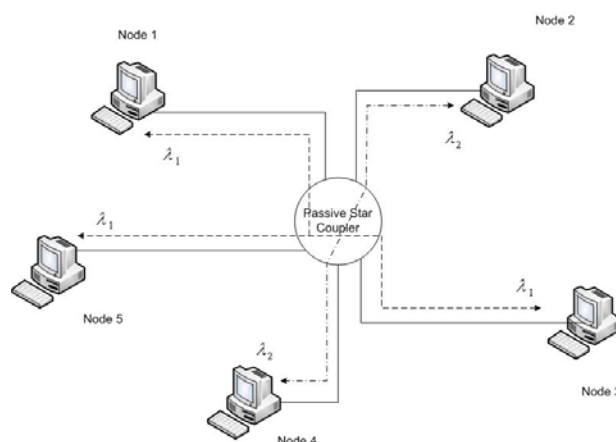


รูปที่ 1.1 ระบบดับเบิลยูดีเอ็ม

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)

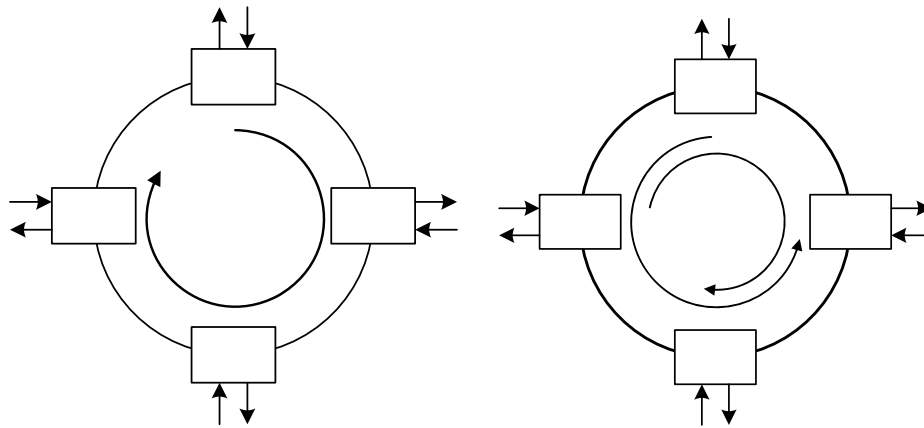
รูปที่ 1.2 แสดงโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ ซึ่งเป็นโครงข่ายแบบหนึ่งของการสื่อสารทางแสงที่อุปกรณ์ภายในโครงข่ายเป็นแบบพาสซีฟทั้งหมดประกอบด้วย อุปกรณ์กระจายสัญญาณตัวคู่ต่อแบบพาสซีฟ (passive star coupler: PSC), อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง(optical amplifier) และ หน่วยชดเชยดีสเพอร์ชัน (dispersion compensation units: DCUs) อีกทั้งยังเป็นโครงข่ายที่มีต้นทุนต่ำและมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูง



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณส่วนใหญ่จะเป็นการวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ภายในโครงข่าย[2]-[5] เมื่อระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณมากขึ้นด้วยเช่นกัน ในด้านปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณนั้นเกิดจากดิสเพอร์ชัน (dispersion) และความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (fiber nonlinearity) ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันและการจัดสรรความยาวคลื่น (wavelength assignment) เพื่อช่วยลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ตัวอย่างการแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณนั้น ได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องคือการติดตั้งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในโครงข่ายทางแสง [6] การทำการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อทำการลดค่าดิสเพอร์ชัน [7] ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันในโครงข่ายลดลง สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรความยาวคลื่นที่ผ่านมา เช่น การจัดสรรความยาวคลื่นสำหรับการแพร์สัญญาณเฉพาะกลุ่ม (multicast) ในโครงข่ายแบบดับเบิลยูดีเอ็ม ด้วยเงื่อนไขขีดจำกัดของอุปกรณ์แยกสัญญาณ (splitter)[8] และการจัดสรรความยาวคลื่นภายในโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณให้มีระยะห่างของแต่ละช่องสัญญาณ (channel spacing) มากที่สุด[9] ซึ่งการจัดสรรความยาวคลื่นให้เหมาะสมในแต่ละข่ายเชื่อมโยงเพื่อเพิ่มระยะห่างในแต่ละช่องสัญญาณจะเป็นการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากผลกระทบของเคอร์[10]ได้

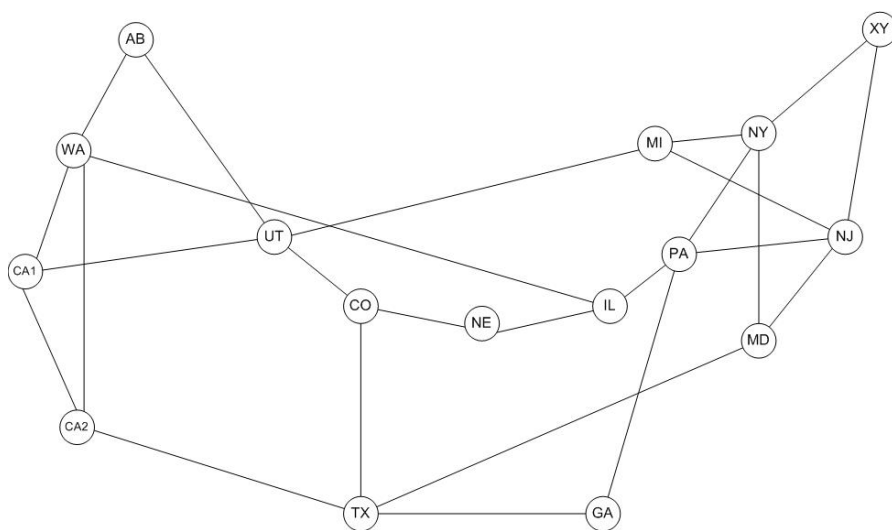
โครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบกำหนดความยาวคลื่นประจำเส้นทางนั้นแบ่งได้อีก 2 ประเภท คือโครงข่ายแบบวงแหวนและโครงข่ายแบบเมช โครงข่ายแบบวงแหวนเป็นโครงข่ายที่ใช้งานอยู่อย่างแพร่หลายในโครงข่าย MAN/WAN เนื่องจากเป็นโครงข่ายที่เชื่อถือได้ (reliability) ไม่มีการชนกันของข้อมูลเพราะข้อมูลมีการเดินทางในทิศทางเดียวกันในแต่ละเส้นใยแสงคือทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา และยังมีการป้องกันการล่มของโครงข่าย (protection) ในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแบบวงแหวนมีการแบ่งการเข้าใช้ช่องสัญญาณทางเวลา (time division multiplexing, TDM) ซึ่งใช้อุปกรณ์ในโครงข่ายแบบอเล็กทรอนิกส์ ต่อมา มีการแบ่งการเข้าใช้ช่องสัญญาณทางความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing, WDM) ทำให้สามารถใช้อุปกรณ์แบบแพสซีฟและสามารถส่งข้อมูลอนาล็อกได้ (analog) แต่ระยะห่างระหว่างความยาวคลื่น (channel spacing) ยังห่างอยู่มาก เพื่อให้ใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงได้มีการเปลี่ยนเป็นการแบ่งการเข้าใช้ช่องสัญญาณทางความยาวคลื่นแบบหนาแน่น (dense wavelength division multiplexing, DWDM) แทน[11] โดยมีตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ งานวิจัยที่ศึกษาถึงข้อดีของดับเบิลยูดีเอ็ม ที่สามารถกำหนดความยาวคลื่นที่ใช้ของข้อมูลทั้งแบบแอตโนมัติ (dynamic traffic) และกำหนดค่าเอง (static traffic) ในการสื่อสารในโครงข่าย[12], งานวิจัยที่ศึกษาถึงโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวนสามารถทำงานร่วมกับการเชื่อมต่ออื่นได้ เช่น การสื่อสารผ่านดาวเทียมเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบ[13], งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการป้องกันการล่มของระบบดับเบิลยูดีเอ็ม เช่น การหาระเบียบขั้นตอนวิธี (algorithm) เพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางการเชื่อมต่อที่ซ้ำรูด การจัดการการใช้งานความยาวคลื่น[14],[15] และยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการวางแผนเครือข่ายสัญญาณทางแสงในระบบดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวน[16] รูปที่ 1.3 แสดงโครงข่ายแบบวงแหวนทั้งแบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง



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

โครงข่ายมาเชื่อมต่อกัน (interconnect rings) อย่างไรก็ตามเส้นทางการเดินทางของข้อมูลในโครงข่ายแบบเมชอาจมีความหลากหลายกว่าโครงข่ายแบบวงแหวน และโครงข่ายแบบเมชยังเป็นโครงข่ายที่สามารถป้องกันการล่มของโครงข่ายได้ดีที่สุด โครงข่ายชนิดนี้ มีความสามารถในการป้องกันการล่ม (protection) ความยืดหยุ่น (flexibility) ความมีประสิทธิภาพ (efficiency) และมีสภาพทนทาน (robustness) ของโครงข่ายดีกว่าโครงข่ายแบบวงแหวน โครงข่ายชนิดนี้มีการใช้ช่องสัญญาณแบบดับเบิลยูดีเอ็มเช่นกัน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายแบบเมชส่วนใหญ่จะเป็นเรื่องงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น (routing and wavelength assignment) หรือการป้องกันโครงข่ายเนื่องจากเกิดการล่มของโครงข่าย เช่น การป้องกันแบบใช้วิถีร่วมกัน (shared path protection) หรือ การป้องกันแบบใช้สายเชื่อมโยงร่วมกัน (shared link protection) [17],[18] การศึกษาวิธีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นเพื่อการอยู่รอดของโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบเมช [19] วิธีการป้องกันโครงข่ายแบบใช้วิถีร่วมกันแบบผสม (mixed shared path protection)[20] เป็นต้น

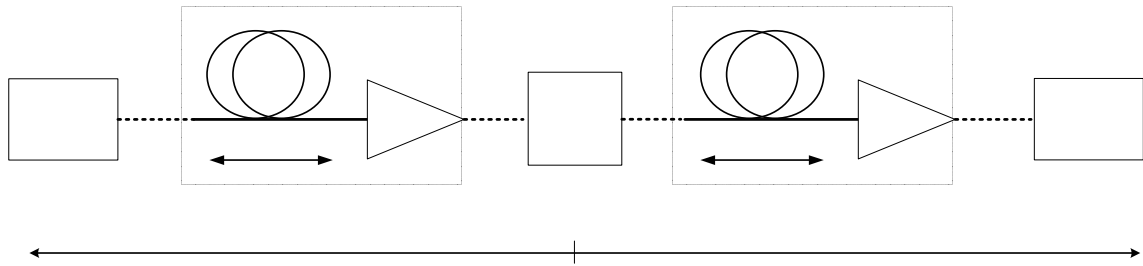
รูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่างโครงข่ายแบบเมช หรือ NSFNET (national science foundation network)



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) การขยายออกของสัญญาณ (dispersion) และความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearity) ซึ่งเราสามารถจัดการผลกระทบเหล่านี้ได้

การลดทอนสัญญาณเราสามารถจัดการด้วยการวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) เช่น การใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบอีดีเอฟเอ (EDFA) เป็นต้น สำหรับการจัดการดิสเพอร์ชันนั้น มีการใช้ dispersion compensating fiber (DCF) วางเป็นรายคาบเพื่อให้อัตราดิสเพอร์ชันทุกจุดในโครงข่ายไม่เกินค่าที่กำหนด[21] และมีการใช้เครื่องสังยุคเฟสแสง (optical phase conjugator) ในการจัดการดิสเพอร์ชันโดยการวางในตำแหน่งกึ่งกลางของโครงข่ายเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมก่อนเข้าเครื่องสังยุคเฟสแสงและหลังจากออกจากเครื่องสังยุคเฟสแสงหักล้างกันหมด อีกทั้งยังสามารถจัดการความไม่เป็นเชิงเส้นได้ด้วย มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในระบบการสื่อสารทางแสงเพื่อลดดิสเพอร์ชัน เช่น การวางเครื่องสังยุคเฟสแสงในระบบการสื่อสารทางแสงที่ใช้เส้นใยแสงแบบ dispersion-shifted fiber (DSF) เพื่อลดดิสเพอร์ชันได้หลายความยาวคลื่นพร้อมกัน ซึ่งสรุปได้ว่า ได้ศึกษาสัญญาณกลับเฟสของความยาวคลื่นหลายความยาวคลื่น (multiwavelength) การบิดเบี้ยวของสัญญาณ และวิธีลดผลกระทบเปลี่ยนรูปร่างของสัญญาณโดยใช้ค่ากำลังที่เหมาะสม 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 ในระบบการสื่อสารแบบระยะไกลยังที่ใช้การมอดูเลตแบบ 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 โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายและใช้กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบเปลี่ยนความยาวคลื่น (path protection) และโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายและใช้กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม (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 เพราะวาระยะทางของแต่ละทราฟฟิกันนั้นไม่เท่ากัน มีระยะทางไกล และเส้นทางของแต่ละทราฟฟิกันนั้นมีหลายเส้นทาง ทำให้การซ้อนทับ(intersection) ช่วงของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้ยังทำให้มีจำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงมีจำนวนมาก ทำให้ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เพราะจะมีจำนวนมากกว่าการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่จุดกึ่งกลางข่ายเชื่อมโยง เรื่องปัญหาที่ไม่สามารถซ้อนทับหาช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง จะกล่าวละเอียดในบทที่ 3

รายงานความก้าวหน้านี้จะรายงานผลการศึกษาการประยุกต์ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงกับโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร่และเลือกสัญญาณ กับโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบเมช รวมถึงการประยุกต์ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงกับโครงข่ายดังกล่าวที่เกิดการล้มเหลวไม่เกิน 1 ข่ายเชื่อมโยง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เสนอระเบียบวิธีการวางและกำหนดตำแหน่ง optical phase conjugator ในโครงข่าย WDM ทั้งแบบ ring แบบ mesh และแบบ B&S เพื่อชดเชย dispersion พร้อมทั้งลดผลของ Kerr effect ในโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด เป็นครั้งแรกของวงการวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง
2. นำเสนอองค์ความรู้ใหม่ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการนานาชาติ เพื่อให้ผลงานสามารถถูกนำไปพัฒนาเทคโนโลยีระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงในอนาคต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทดลองวิธีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกับโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบแพร่และเลือกสัญญาณ แบบวงแหวน และแบบเมชเท่านั้น
2. การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกับโครงข่ายนั้นจะไม่คำนึงถึงผลของปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้น
3. กำหนดให้กรณีที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย เกิดเฉพาะกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเท่านั้น
4. กำหนดกลไกการกู้คืนสัญญาณเป็นแบบใช้วิธีร่วมกันเท่านั้น
5. ผลการทดลองจะได้จากการคำนวณเท่านั้น โดยมีได้ทำการทดลองกับระบบจริง

1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

1. ศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับพื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อส่งแสงผ่านเส้นใยแสง โดยเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันรวมทั้งการแก้ไขดิสเพอร์ชันในโครงข่าย
2. ศึกษาคุณสมบัติโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ แบบวงแหวน และโครงข่ายแบบเมช
3. ศึกษาคุณสมบัติของเครื่องส่งยุคเฟสแสง การทำงาน ความสามารถ และตัวอย่างการนำไปใช้งานของอุปกรณ์
4. ศึกษาการใช้งานเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ
5. คิดระเบียบวิธีหาตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ และจำนวนของเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่จะใช้ทั้งหมด โดยจะต้องไม่ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมเกินค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด
6. ศึกษาการใช้งานเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมช
7. คิดระเบียบวิธีหาตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมช และจำนวนของเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่จะใช้ทั้งหมด โดยจะต้องไม่ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมเกินค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด และ

สามารถใช้งานได้เมื่อโครงข่ายได้รับการเสียหาย และข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายไม่เกินหนึ่งข่ายเชื่อมโยง(single-link failure) โดยได้รับการกู้คืนสัญญาณแบบใช้วิธีร่วมกัน

8. วิเคราะห์ผล optical signal-to-noise ratio (OSNR) ของระบบหลังจากที่ได้มีการใช้งานเครื่องส่งยุคเฟสแสง เพราะเครื่องส่งยุคเฟสแสงจะทำให้ค่า OSNR ลดลงอย่างมาก
9. นำเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ เรียบเรียงผลงานเพื่อส่งไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

บทที่ 2

การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบวงแหวน

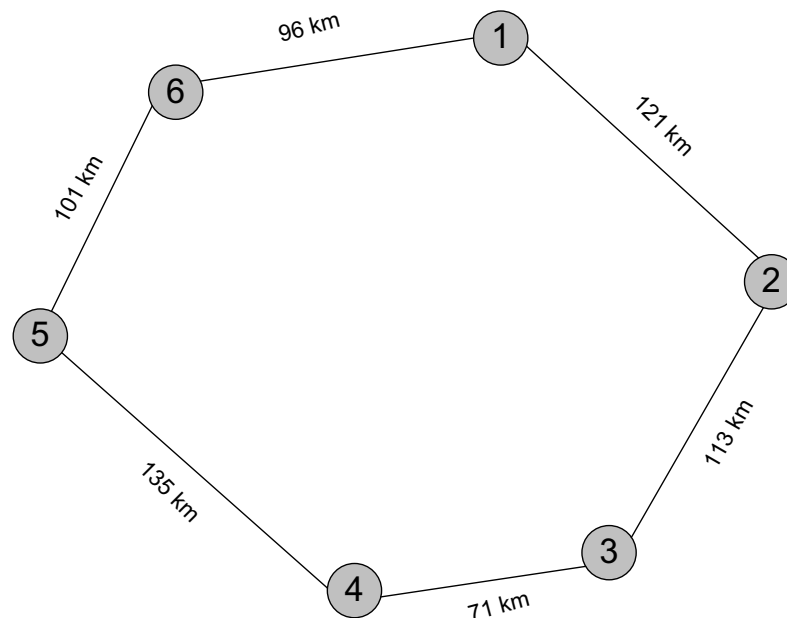
ในบทนี้ จะกล่าวถึงการศึกษาการนำเครื่องส่งยุคเฟสแสงมาใช้ในระบบโครงข่าย โดยเริ่มต้นศึกษาการทำงานของเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น ในระบบโครงข่าย 3 แบบ คือ โครงข่ายเชื่อมโยงปกติ โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายกรณีมีช่องความยาวคลื่นเหลือเพียงพอ และโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายกรณีมีช่องความยาวคลื่นเหลือไม่เพียงพอ จากนั้นเป็นการศึกษาการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบต่างๆ จากนั้นทำการแสดงผลการคำนวณด้วยตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายตัวอย่าง

2.1 การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น

ในการเริ่มต้นวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงจะเริ่มทำการศึกษาจากเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น เพื่อควบคุมจำนวนตัวแปรในการวาง เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นจะมีปั๊มพลังงาน 2 ตำแหน่งเพื่อสร้างสัญญาณคอนจูเกตให้เกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดิมดัง**ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง** และทำการวางลงบนโครงข่ายตัวอย่าง

2.1.1 การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

การศึกษาวิธีการใช้งานเครื่องส่งยุคเฟสแสงเพื่อจัดวางในโครงข่ายแบบวงแหวนทำได้โดยการทดสอบกับโครงข่ายตัวอย่างดัง รูปที่ 2. ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 6 เส้นใยแสง ส่งข้อมูลสองทิศทางโดยวิธีที่ได้ศึกษาและนำเสนอนี้มีทั้งหมด 3 ขั้นตอนในการหาตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงข่ายตัวอย่าง

2.1.1.1 ความเป็นไปได้ทั้งหมดของการส่งในแต่ละสถานี

ในขั้นแรก ต้องทำการหาจำนวนทราฟฟิกที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการส่งซึ่งมีจำนวนเท่ากับ $N \times (N-1)$ แบบ โดย N คือจำนวนสถานีทั้งหมด หลังจากนั้นทำการคำนวณหาระยะทางที่สั้นที่สุดในการส่งข้อมูลของแต่ละทราฟฟิก ซึ่งจากตัวอย่างโครงข่ายเราสามารถหาความเป็นไปได้ในการส่งทั้งหมดมี $6 \times 5 = 30$ การส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายตัวอย่างนี้โดยการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่สั้นที่สุด

1 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 121 km 1 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 96 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 121 km 2 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 113 km 2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนนาฬิกา ระยะทาง 217 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 113 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 71 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 71 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 135 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km 5 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา	6 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 96 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา

ระยะทาง 135 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 101 km	ระยะทาง 236 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 101 km
--	--

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิคย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของ สถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิคย่อย คือ ระหว่าง สถานีที่ 1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิคใดๆ จะทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุด จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.1 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทางพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน ดังตารางที่ 2.2

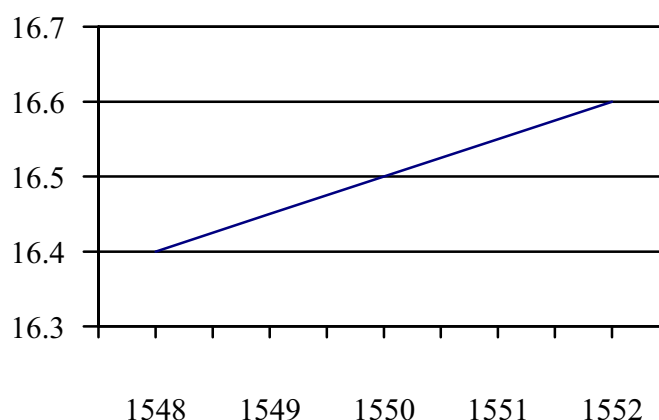
ตารางที่ 2.2 แสดงทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km

2.1.1.2 หาช่วงของตำแหน่งที่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงให้ใช้จำนวนน้อยที่สุด

การจัดการดิสเพอร์ชันของเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ ดังนั้นระยะห่างแต่ละตำแหน่งของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงจึงมีผลต่อการจัดการดิสเพอร์ชัน ในการจัดการดิสเพอร์ชันเราจะเลือกค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่นที่มีผลมากที่สุด ในโครงข่าย ซึ่งถ้าความยาวคลื่นที่มีค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดของ

สัญญาณ ไม่เกินค่าจำกัดของดิสเพอร์ชัน ($D_{\max}$) ความยาวคลื่นอื่นๆ ก็สามารถผ่านไปได้ด้วยเช่นกัน สำหรับทุกๆ ค่าของทราฟฟิกซึ่งเราหาได้จากขั้นตอนที่ 1 แล้ว จะนำแต่ละทราฟฟิกมาหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง โดยไม่ให้ดิสเพอร์ชันเกินค่าที่กำหนดและใช้จำนวนน้อยที่สุด จากการทดลองในตัวอย่างโครงข่าย ซึ่งระบบทำการส่งข้อมูลด้วยความยาวคลื่นทั้งหมด 5 ความยาวคลื่น โดยความยาวคลื่นกลางอยู่ที่ 1550 nm มีระยะห่างระหว่างความยาวคลื่น 0.8 nm โดยโครงข่ายตัวอย่างใช้ เส้นใยแสงชนิด Single-mode fiber (SMF,G.652) ซึ่งมีดิสเพอร์ชัน (D_2) 16.5 ps/km/nm มีความชันดิสเพอร์ชัน (D_3) 0.05 ps/km/nm² ที่ 1550 nm และมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมไม่เกิน 1600 ps/nm ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันดังรูปที่ 2.2 จากความยาวคลื่นทั้งหมด 5 ความยาวคลื่น เราจะเลือกความยาวคลื่นดังนี้ 1548.4 1549.2 1550 1550.8 และ 1551.6 nm ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 ดิสเพอร์ชันของ เส้นใยแสงชนิด SMF

จากความยาวคลื่น 1548.4 1549.2 1550 1550.8 และ 1551.6 nm รวมทั้งจากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่า ค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดคือความยาวคลื่น 1551.6 nm เราสามารถหาค่าดิสเพอร์ชันสูงสุดจากสมการที่ (2.1)

$$D = 16.5 + (1.6 \times 0.05) = 16.58 \quad (2.1)$$

จากระยะทางและค่าดิสเพอร์ชันที่คำนวณได้ จากตารางที่ 2.2 เราสามารถหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ดัง ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

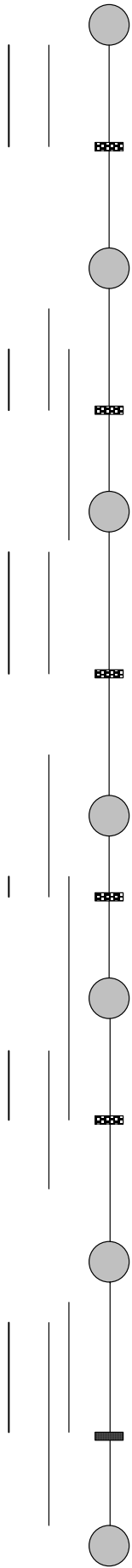
1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km เลือกวางที่กม.ที่ 48-96 และ 183-288	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km เลือกวางที่กม.ที่ 44-96
1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km เลือกวางที่กม.ที่ 51-96	2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km เลือกวางที่กม.ที่ 61-96 และ 186-288

3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km เลือกวางที่กม.ที่ 69-96 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km เลือกวางที่กม.ที่ 50-96 และ 184-288	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km เลือกวางที่กม.ที่ 48-96 และ 183-288 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km เลือกวางที่กม.ที่ 70-96
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km เลือกวางที่กม.ที่ 60-96 และ 197-288 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km เลือกวางที่กม.ที่ 55-96	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km เลือกวางที่กม.ที่ 61-96 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km เลือกวางที่กม.ที่ 50-96 และ 184-288

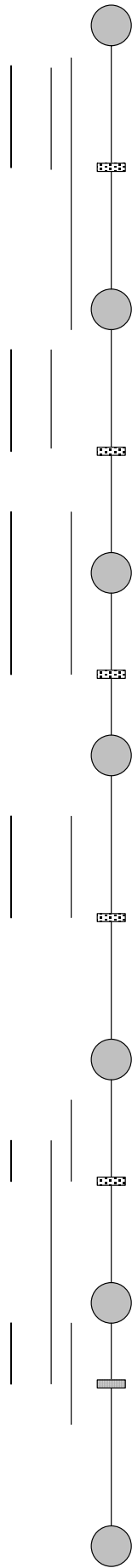
เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องส่งยุคเฟสแสงแล้ว นำทุกช่วงที่คำนวณได้ มาเปรียบเทียบกับตำแหน่งบนโครงข่ายตัวอย่าง เพื่อหาจุดวางที่เหมาะสมรูปที่ 0.13 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทางเข็มนาฬิกา และรูปที่ 2.44 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา โดยในการกำหนดตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่ายนั้น มีข้อกำหนดว่าทุกช่วงระหว่างสถานีย่อยระหว่างเส้นทางหลัก หรือก็คือ ภายในทราฟฟิเคย์ย่อยของแต่ละช่วงนั้น ต้องมีการติดตั้งเครื่องส่งยุคเฟสแสง เพื่อไม่ให้ค่าดีสเพอร์ชันสะสมมีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนดในแต่ละช่วงย่อยมีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงลงไปเพื่อไม่ให้ดีสเพอร์ชันสะสมเกินขอบเขต ตัวอย่างเช่น จากสถานีที่ 1 ส่งข้อมูลไปยังสถานีที่ 2 ทิศทางตามเข็มนาฬิกา เราจะได้ช่วงในการวางคือ กิโลเมตรที่ 48-96 ของข้อมูลจากสถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 และ กิโลเมตรที่ 0-91 ของข้อมูลจากสถานีที่ 5 ส่งไปสถานีที่ 2 เราจะได้เลือกช่วงในการวางที่ซ้อนทับกัน นั่นก็คือ กิโลเมตรที่ 48-91 เป็นช่วงที่ร่วมกันทั้งหมด ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาและ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

2.1.1.3 ช่วงที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

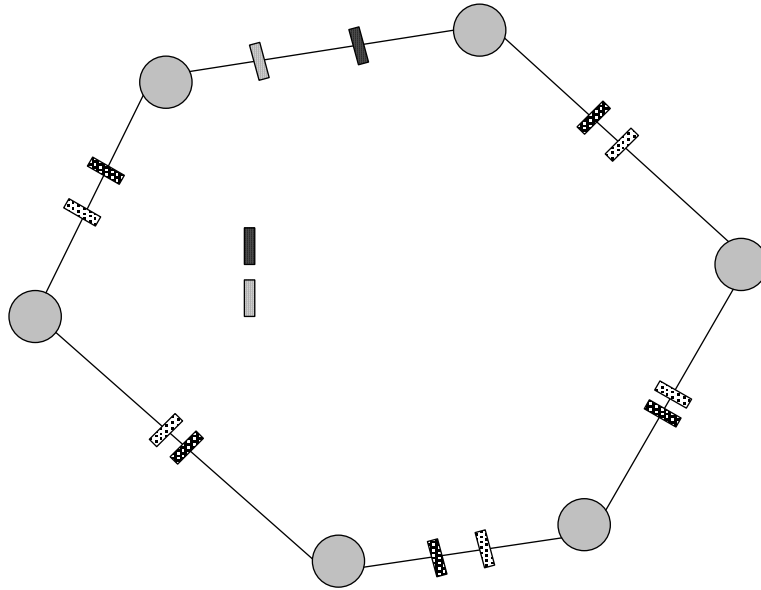
ในการส่งข้อมูลด้วยโครงข่ายแบบวงแหวนนั้น ผู้ใช้มีโอกาสนำสัญญาณข้อมูลไปใช้งานจากทุกตำแหน่งใดๆในโครงข่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการออกแบบให้สัญญาณในระบบมีค่าดีสเพอร์ชันต่ำสุดตลอดระยะทางการส่ง ดังนั้นการคำนวณหาตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสง นะโครงข่ายควรเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมกับข้อกำหนดดังกล่าวด้วย จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.1 จะพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด คือ ตำแหน่งที่อยู่ใกล้สถานีที่ส่งมากที่สุด อย่างในตัวอย่างจากสถานีที่ 1 ถึงสถานีที่ 2 ช่วงที่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้คือ 48-91 เราต้องเลือกตำแหน่งที่ 48 เป็นจุดที่ห่างจากสถานีที่ 1 น้อยที่สุด และทำซ้ำกับทุกช่วงจะได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด แสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 0.1 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเส้นทางพิกกา



รูปที่ 2.4 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเส้นทางพิกกา



รูปที่ 2.5 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากที่ได้กล่าวมา จะพบว่า ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง สามารถแสดงได้รูปที่ 2.5 โดยตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสง สำหรับกรณีมีการส่งข้อมูลแบบตามเข็มแสดงได้ด้วย Link 1 และสำหรับกรณีมีการส่งข้อมูลแบบตามเข็มแสดงได้ด้วย Link 2 ซึ่งสรุปตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายได้ดังนี้

ข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

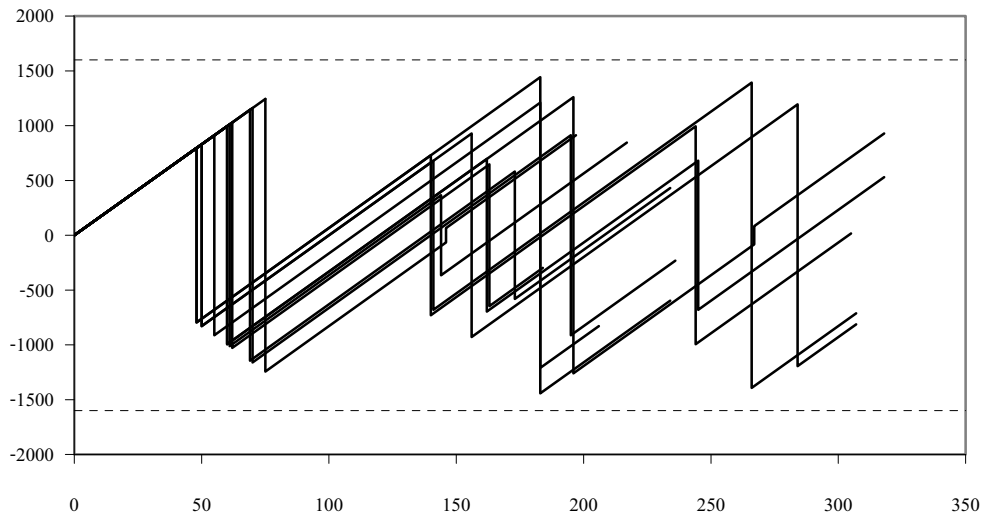
- เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 48
- เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 62
- เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 50
- เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 70
- เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 60
- เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

ข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

- เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 75
- เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 50
- เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 55
- เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 48
- เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 69
- เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

101 km

5

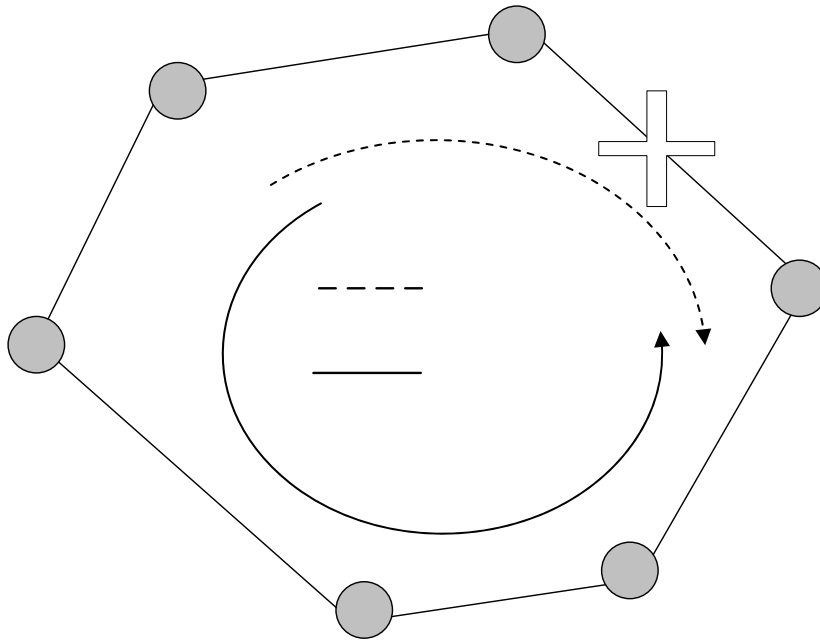


รูปที่ 2.6 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันของทุกเส้นทางและทุกสถานะ

หลังจากที่ได้ดำเนินการทั้ง 3 ขั้นตอนจนได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด เราได้ตรวจสอบการทำงานของทราฟฟิก 30 ทราฟฟิก ซึ่งเป็นจำนวนทราฟฟิกทั้งหมดที่เป็นไปได้ โดยการหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมและทำการเปรียบเทียบกับค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในทราฟฟิกทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน -1600 ps/nm/km ถึง $+1600$ ps/nm/km

2.1.2 การวางเครื่องส่งยุคเฟสชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

จากที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.1.1 ซึ่งเป็นการศึกษาการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในกรณีโครงข่ายปกติ ในหัวข้อถัดไป เราได้ศึกษากรณีที่โครงข่ายมีการเสียหายเกิดขึ้น เช่น กรณีสายไฟเบอร์บางช่วงขาด เป็นต้น ซึ่งการเกิดการเสียหายเหล่านี้มีผลต่อการส่งข้อมูลในระบบ เนื่องจากเส้นทางของโครงข่ายจะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ดังนั้นในการศึกษาการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง โครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายจึงซับซ้อนกว่ากรณีโครงข่ายปกติ เนื่องจากไม่สามารถคาดเดาตำแหน่งที่ข่ายเชื่อมโยงจะเกิดการเสียหายขึ้นได้ เราจึงทำการจำลองการเสียหายทีละส่วน และการศึกษาการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายในขั้นแรก ในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ระบบจะนำข้อมูลที่ต้องส่งผ่านบริเวณที่ลิงค์เสียหายมาทำการส่งข้อมูลในลิงค์ที่ไม่เกิดการเสียหายแทน คือส่งไปในทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นทางที่เสียหาย ระบบจะทำการเปลี่ยนจากความยาวคลื่นหลักมาเป็นความยาวคลื่นสำรอง ในการส่งข้อมูลแทน ซึ่งจะทำให้ระยะทางในการส่งเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังตัวอย่าง ถ้าเกิดการล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงระหว่างสถานีที่ 1 และสถานีที่ 2 จะทำให้ ทราฟฟิกที่ส่งจาก สถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 แบบตามเข็มนาฬิกา(ระยะทางสั้นที่สุด)ไม่สามารถส่งได้ ระบบจะทำการเปลี่ยนความยาวคลื่นและส่งในทิศทางตรงกันข้ามคือ ทวนเข็มนาฬิกา(ระยะทางยาวที่สุด) แทนดังรูปที่ 2.7 ทำให้ระยะทางเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงเส้นทางของทราฟฟิกเมื่อข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ การเปลี่ยนความยาวคลื่น

2.1.2.1 วิเคราะห์เส้นทางของทราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงไปจากเส้นใยแสงปกติ

จากโครงข่ายตัวอย่างเดิมในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 5 เส้นใยแสง เมื่อทำการจำลอง การเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกจากสถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงจากสถานี ที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย จะได้ทิศทางและระยะทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km (จากสถานี ที่ 6 ไปสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 3 และสถานีที่ 2) ซึ่งคำนวณแต่ละการเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละข่าย เชื่อมโยงทำให้เส้นทางของทราฟฟิกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km
1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km
1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

101 km

5

กรณีที่ขายเชื่อมโยงจากสถานที่ 2 ไปสถานที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km

กรณีที่ขายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km
3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km	4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km

กรณีที่ขายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลี้ยวเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลี้ยวเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 5 เลี้ยวเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 4 → 6 เลี้ยวเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 3 เลี้ยวเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 5 → 4 เลี้ยวเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km	6 → 3 เลี้ยวเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลี้ยวเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km

กรณีที่ขายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km
3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

กรณีที่ขายเชื่อมโยงจากสถานที่ 6 ไปสถานที่ 1 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิคย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดีสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของ สถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 มีค่าน้อยกว่าค่าดีสเพอร์ชันที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิคย่อย คือ ระหว่าง สถานีที่ 1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดีสเพอร์ชันสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิคใดๆ จะทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุดในกลุ่มที่มีขายเชื่อมโยงเสียหายกรณีเดียวกันและ ส่งจากสถานีต้นทางเดียวกัน จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.1 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทางพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกันได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สรุปทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนแปลงจากทราฟฟิกปกติ

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง
--	--

516 km 1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	516 km 2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km 3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km 4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km 4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km 5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km 5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km 6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

จากตารางที่ 2.5 แสดงเส้นทางการส่งข้อมูลที่ตัดเส้นทางการคำนวณที่ซ้ำซ้อนลง จากนั้น ในการคำนวณตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง จะคำนวณจากระยะทางระหว่างสถานีส่งที่มีการส่งไกลที่สุด เช่นเดียวกับการคำนวณการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ ซึ่งสามารถแสดงเส้นทางการที่มีการส่งไกลที่สุดได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1 → 2 เลี่ยงเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 1 → 6 เลี่ยงเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 1 เลี่ยงเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km 2 → 3 เลี่ยงเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km
3 → 2 เลี่ยงเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km 3 → 4 เลี่ยงเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km	4 → 3 เลี่ยงเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km 4 → 5 เลี่ยงเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km
5 → 4 เลี่ยงเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km 5 → 6 เลี่ยงเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 1 เลี่ยงเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km 6 → 5 เลี่ยงเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

2.1.2.2 ช่วงของตำแหน่งที่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงให้ใช้จำนวนน้อยที่สุด

จากสมการที่ 2.1 ค่าดีสเพอร์ชันเป็น 16.58 และระยะทางจากตารางที่ 2.6 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

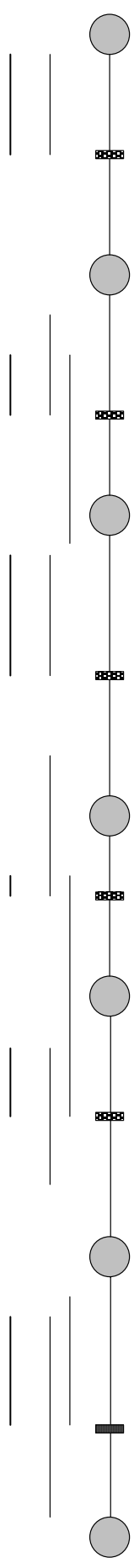
1 → 2 เลี่ยงเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km เลือกวางที่กม.ที่ 18-96, 132-288 และ 334-480 1 → 6 เลี่ยงเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km เลือกวางที่กม.ที่ 31-96, 158-288 และ 350-480	2 → 1 เลี่ยงเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km เลือกวางที่กม.ที่ 18-96, 132-288 และ 334-480 2 → 3 เลี่ยงเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km เลือกวางที่กม.ที่ 32-96, 140-288 และ 332-480
3 → 2 เลี่ยงเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km เลือกวางที่กม.ที่ 32-96, 140-288 และ 332-480 3 → 4 เลี่ยงเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง	4 → 3 เลี่ยงเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km เลือกวางที่กม.ที่ 43-96, 232-288 และ 374-480 4 → 5 เลี่ยงเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง

566 km เลือกวางที่กม.ที่ 43-96, 232-288 และ 374-480	502 km เลือกวางที่กม.ที่ 11-96, 118-288 และ 310-480
5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km เลือกวางที่กม.ที่ 11-96, 118-288 และ 310-480 5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km เลือกวางที่กม.ที่ 38-96, 152-288 และ 344-480	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km เลือกวางที่กม.ที่ 31-96, 158-288 และ 350-480 6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km เลือกวางที่กม.ที่ 38-96, 152-288 และ 344-480

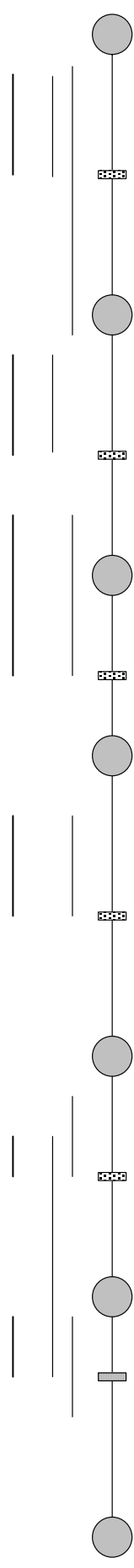
เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องส่งยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่นนี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่ายปกติ และก็นำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสม ดังรูปที่ 0.28 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา และรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกา และ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

2.1.2.3 ช่วงที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

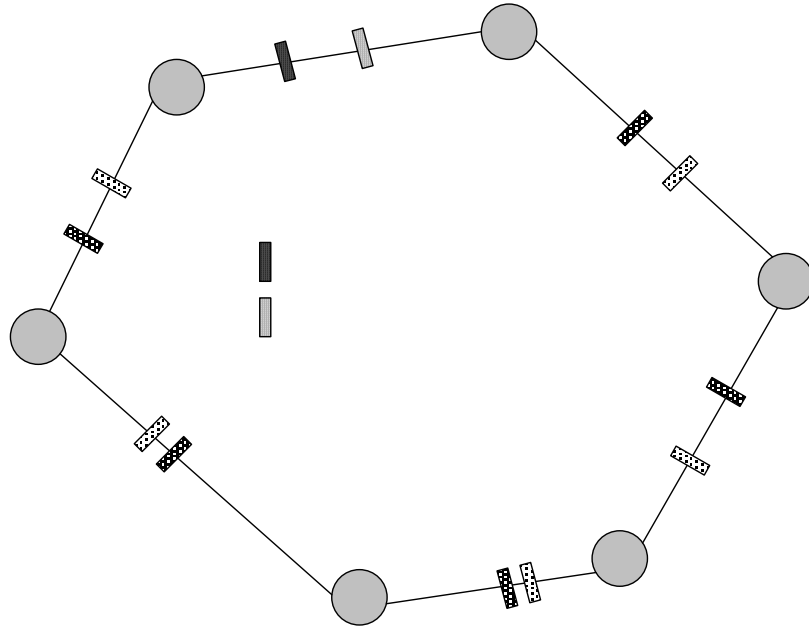
เช่นเดียวกับการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อมโยง จะได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.30



รูปที่ 0.2 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเส้นทางพิกกา



รูปที่ 2.9 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเส้นทางพิกกา



รูปที่ 2.30 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 2.30 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายด้วยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น ซึ่งเมื่อระบบเกิดการเสียหายที่จุดใดๆ ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังทิศตรงข้ามกับความเสียหายนั้นโดยใช้ความยาวคลื่นสำรองในการส่ง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

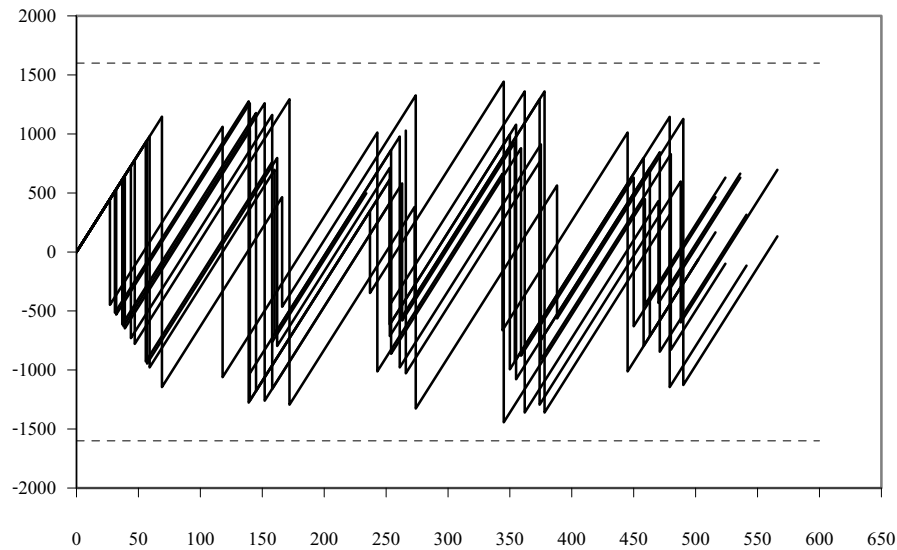
- เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 56
- เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 37
- เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 32
- เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 69
- เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 31
- เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 38

ข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

- เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 39
- เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 44
- เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 57
- เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 30
- เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 47
- เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 59

101 km

5

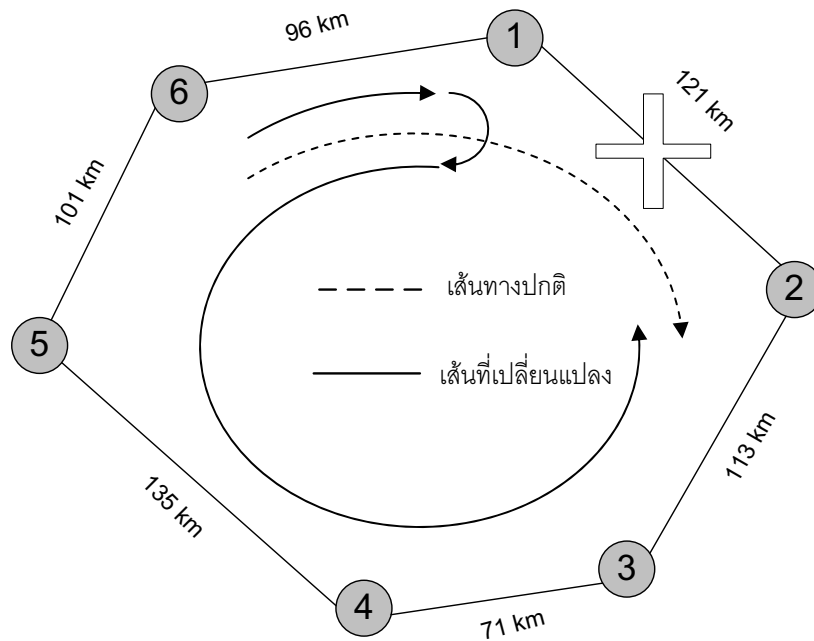


รูปที่ 2.41 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกเส้นทางและทุกสถานี

จากกระบวนการขั้นตอน หลังจากได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดทำการตรวจสอบทุก ทราฟฟิกว่าเกินดิสเพอร์ชันที่กำหนดไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบจากดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละทราฟฟิกกับดิสเพอร์ชันที่กำหนด เราสามารถแสดงกราฟของค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นทางการส่งทุกๆทราฟฟิกได้ดังรูปที่ 2.41 จะเห็นว่าค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในทราฟฟิกทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน -1600 ps/nm/km ถึง $+1600 \text{ ps/nm/km}$

2.1.3 การวางเครื่องส่งยุคเฟสชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม ซึ่งทำการส่งข้อมูลด้วยเส้นใยแสงสำรองในทิศทางตรงข้ามแทนการส่งในเส้นใยแสงหลักดังเช่นในหัวข้อ 2.1.2 โดยระบบจะทำการส่งข้อมูลด้วยเส้นใยแสงสำรองในทิศทางตรงข้าม ซึ่งเป็นเส้นใยแสงซึ่งมีการติดตั้งคู่ขนานกับเส้นใยแสงปกติเพื่อใช้งานในกรณีที่เส้นใยแสงหลักไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ โดยการเปลี่ยนเส้นใยแสงไปใช้เส้นใยแสงสำรองจะเกิดขึ้นที่สถานีอยู่ใกล้ตำแหน่งที่เส้นใยแสงเกิดการเสียหาย ยกตัวอย่างตามรูปที่ 2.12 หากเส้นใยแสงเกิดการเสียหายระหว่างสถานีที่ 1 และสถานีที่ 2 สถานีที่ 1 จะทำการเปลี่ยนเส้นทางการส่งข้อมูลไปยังทิศทางตรงข้ามโดยทำการทอดข้าม ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลในทิศทางตรงข้าม โดยใช้เส้นใยแสงสำรองในการส่งข้อมูลแทนการเปลี่ยนไปใช้ความยาวคลื่นที่เหลือในเส้นใยแสงหลักดังกรณีการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น



รูปที่ 2.52 การเปลี่ยนแปลงเส้นทางของทราฟฟิกเมื่อข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณ
แบบการทอดข้าม

2.1.3.1 เส้นทางของทราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงไปจากเส้นใยแสงปกติ

จากโครงข่ายตัวอย่างเดิมในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 5 เส้นใยแสง เมื่อทำการจำลองการเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกจากสถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย จะได้ทิศทางและระยะทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ เป็นระยะทาง 96 km (จากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1) และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็นระยะทาง 516 (จากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 3 และสถานีที่ 2) รวมทั้ง 2 เส้นทาง ได้ระยะทางรวม 612 km ซึ่งคำนวณแต่ละการเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทำให้เส้นทางของทราฟฟิกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม
1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง

5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 319 กม 5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 401 กม 6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม
---	---

กรณีที่ย้ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 440 กม 1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 561 กม 2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม 5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 521 กม	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม 6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 420 กม

จากตารางที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราบฟังก์ชันไปในทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทาง

เดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิคย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดีสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 มีค่าน้อยกว่าค่าดีสเพอร์ชันที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิคย่อย คือ ระหว่างสถานีที่ 1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดีสเพอร์ชันสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิคใดๆ จะทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุด ในกลุ่มที่มีชายเชื่อมโยงเสียหายกรณีเดียวกันและ ส่งจากสถานีต้นทางเดียวกัน จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2. เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทาง 2 เส้นใยแสงพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ทราฟฟิค ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

กรณีที่ชายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม

กรณีที่ชายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม
3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง	4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรวจ เป็น ระยะทาง 632 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรวจ เป็น ระยะทาง 686 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรวจ เป็น ระยะทาง 742 กม	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรวจ เป็น ระยะทาง 671 กม
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรวจ เป็น ระยะทาง 536 กม	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรวจ เป็น ระยะทาง 536 กม

กรณีที่ย้ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรวจ เป็น ระยะทาง 541 กม	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรวจ เป็น ระยะทาง 602 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรวจ เป็น ระยะทาง 642 กม	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรวจ เป็น ระยะทาง 541 กม

2.1.3.2 ช่วงของตำแหน่งที่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงให้ใช้จำนวนน้อยที่สุด

จากสมการที่ (2.1) ค่าดิสเพอร์ชันเป็น 16.58 และระยะทางจากตารางที่ 2.9 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม เลือกวางที่กม.ที่ 18-96, 132-288 และ 334-480	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม เลือกวางที่กม.ที่ 18-96, 132-288 และ 334-480
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม เลือกวางที่กม.ที่ 70-96, 246-288 และ 430-480	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม เลือกวางที่กม.ที่ 14-96, 124-288, 316-480 และ 508-672
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม เลือกวางที่กม.ที่ 82-96, 260-288, 452-480 และ 644-672	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม เลือกวางที่กม.ที่ 65-96, 228-288 และ 420-480

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม เลือกวางที่กม.ที่ 77-96, 260-288 และ 458-480	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม เลือกวางที่กม.ที่ 32-96, 140-288 334-480
3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม เลือกวางที่กม.ที่ 32-96, 140-288 และ 334-480	4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม เลือกวางที่กม.ที่ 58-96, 212-288 และ 404-480

กรณีที่ย้ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม เลือกวางที่กม.ที่ 64-96, 224-288, 416-480 และ 608-672	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม เลือกวางที่กม.ที่ 5-96, 105-288, 298-480 และ 490-672
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม เลือกวางที่กม.ที่ 43-96, 182-288 และ 374-480	4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม เลือกวางที่กม.ที่ 43-96, 182-288 และ 374-480
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม เลือกวางที่กม.ที่ 14-96, 125-288, 318-480 และ 512-672	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม เลือกวางที่กม.ที่ 65-96, 226-288, 418-480 และ 610-672

กรณีที่ย้ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม เลือกวางที่กม.ที่ 47-96, 190-288 และ 382-480	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม เลือกวางที่กม.ที่ 11-96, 118-288 และ 310-480
5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม เลือกวางที่กม.ที่ 11-96, 118-288 และ 310-480	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม เลือกวางที่กม.ที่ 61-96, 219-288 และ 412-480

กรณีที่ย้ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม เลือกวางที่กม.ที่ 73-96, 248-288 และ 440-480	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม เลือกวางที่กม.ที่ 7-96, 110-288, 302-480 และ 494-672
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม เลือกวางที่กม.ที่ 35-96, 166-288, 358-480 และ 550-672	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม เลือกวางที่กม.ที่ 3-96, 100-288, 290-480 และ 486-672
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม เลือกวางที่กม.ที่ 38-96, 152-288 และ 344-480	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม เลือกวางที่กม.ที่ 38-96, 152-288 และ 344-480

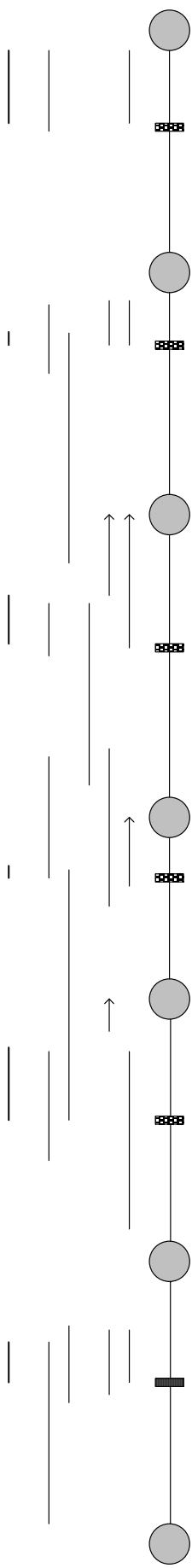
กรณีที่ย้ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม เลือกวางที่กม.ที่ 31-96, 158-288 และ 350-480	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม เลือกวางที่กม.ที่ 61-96, 218-288 และ 410-480
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม เลือกวางที่กม.ที่ 76-96, 258-288 และ 450-480	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม เลือกวางที่กม.ที่ 31-96, 158-288 และ 350-480

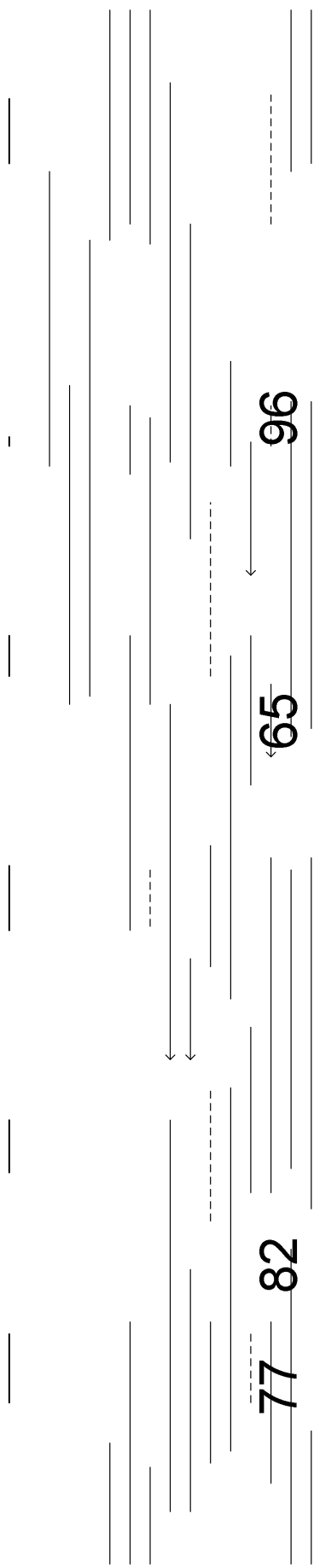
เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องส่งยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้ามนี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่ายปกติ และนำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสมดังรูปที่ 2.3 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทางขึ้นนาฬิกา บนเส้นใยแสงปกติ รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทางขึ้นนาฬิกา บนเส้นใยแสงปกติ รูปที่ 2.5 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทางขึ้นนาฬิกา บนเส้นใยแสงสำรอง และรูปที่ 2.6 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทางขึ้นนาฬิกา บนเส้นใยแสงสำรอง ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง และ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง

2.1.3.3 ช่วงที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

เช่นเดียวกับการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อมโยง จะได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่

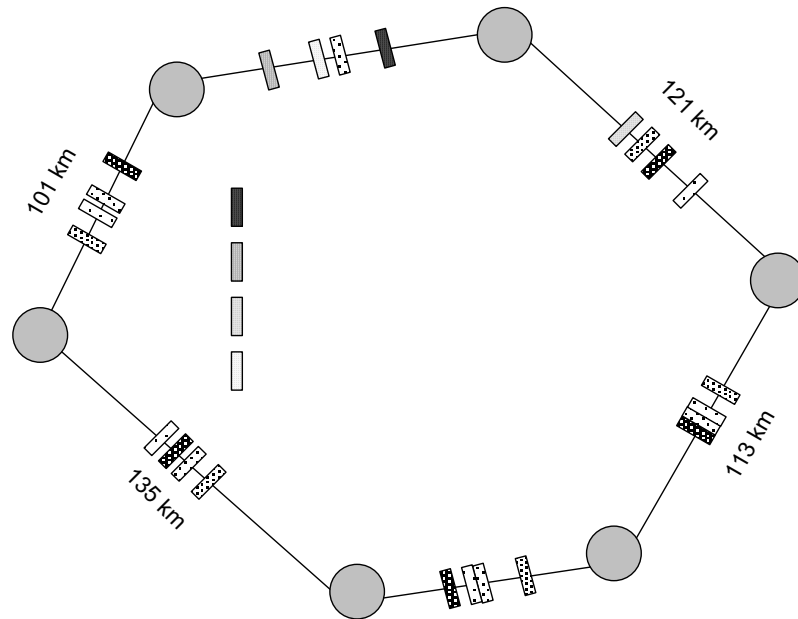


รูปที่ 2.13 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นโน้ตแสดงปกติในการส่งแบบตามเส้นนาฬิกา



รูปที่ 2.14 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นโน้ตแสดงลำดับในการส่งแบบทวนเข็มนาฬิกา

76	96	
77	96	65
		96



รูปที่ 2.77 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 2.77 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายด้วยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบการทอดข้าม ซึ่งเมื่อระบบเกิดการเสียหายที่จุดใดๆ ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังทิศทางที่ยังทำงานได้อยู่บนเส้นทางปกติและใช้เส้นใยแสงสำรองสำรองกับเส้นทางที่เสียหายในการส่ง ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งดังนี้

เส้นใยแสงปกติข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 62

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 74

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 77

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 65

เส้นใยแสงปกติข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 75

เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 63

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 48

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

เส้นใยแสงสำรองข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 56

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 40

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 48

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 40

เส้นใยแสงสำรองข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 58

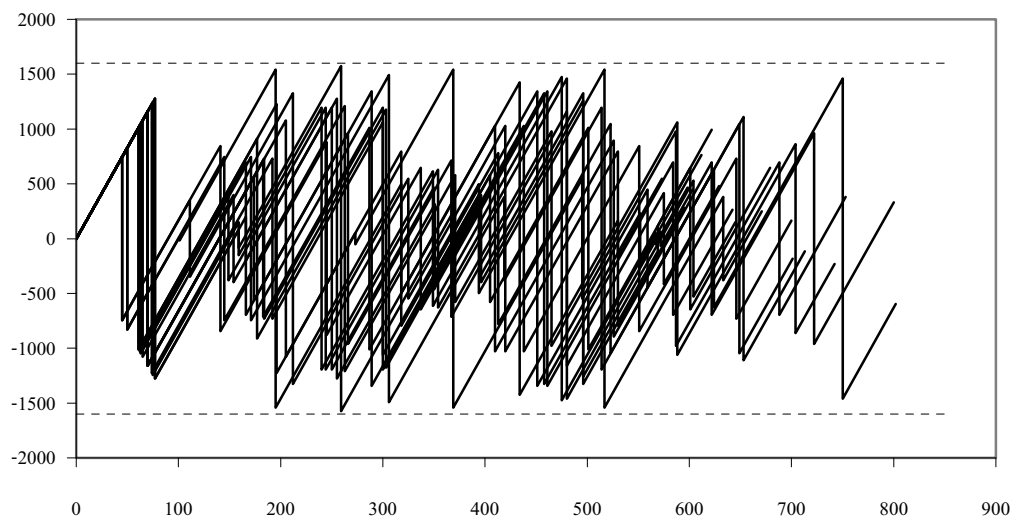
เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 58

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 57

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 30

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 53

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 63



รูปที่ 2.88 กราฟแสดงค่าดิสเพอร์ชันของทุกเส้นทางและทุกสถานี

จากกระบวนการขั้นตอน หลังจากได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดทำการตรวจสอบทุก ทราฟฟิกว่าเกินดิสเพอร์ชันที่จำกัดไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบจากดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละทราฟฟิกกับดิสเพอร์ชันที่กำหนด เราสามารถแสดงกราฟของค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดระหว่างเส้นทางการส่งทุกๆทราฟฟิกได้ดังรูปที่ 2.88 จะเห็นว่าค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในทราฟฟิกทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน -1600 ps/nm/km ถึง $+1600 \text{ ps/nm/km}$

2.2 การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในหัวข้อ 2.1 มาแล้ว แต่เครื่องส่งยุคเฟสแสงที่มีใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนั้นเป็นชนิดเลื่อนความยาวคลื่น ซึ่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นจะมีปั๊มพลังงาน 1 ตำแหน่งและทำให้ได้สัญญาณคอนจูเกตที่ความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงจากเดิมดัง**ผิดพลาด!** ไม่พบแหล่งการอ้างอิง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลงในโครงข่ายตัวอย่างเดิม

2.2.1 การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

จากโครงข่ายเดิมดังรูปที่ 2.1 ที่มีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 6 เส้นใยแสง ซึ่งวิธีที่ได้ศึกษาและนำเสนอนี้มีทั้งหมด 4 ขั้นตอนในการหาตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ดังนี้

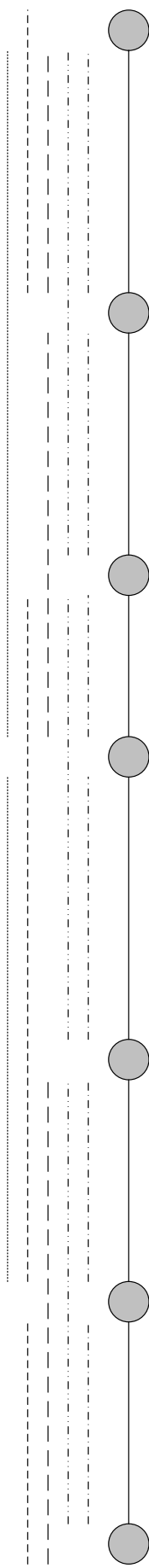
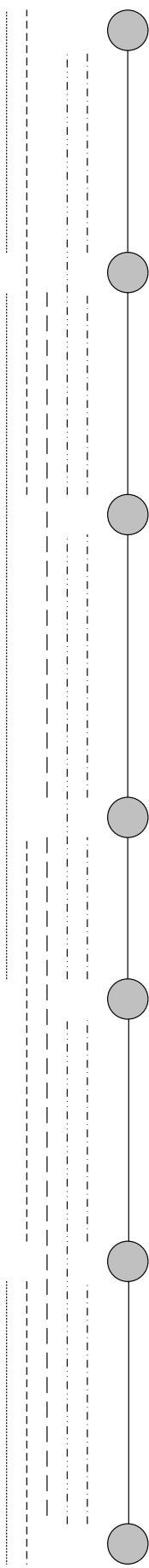
2.2.1.1 จำนวนความยาวคลื่น

เราจะทำการหาจำนวนช่องความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดที่ต้องใช้ในการส่งข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.2)

$$W = \begin{cases} \frac{N^2 - 1}{8} & N \text{ odd} \\ \frac{N^2 + 4}{8} & N/2 \text{ odd} \\ \frac{N^2}{8} & N/2 \text{ even} \end{cases} \quad (2.2)$$

โดยที่ W คือ จำนวนช่องความยาวคลื่นที่ใช้ (ช่อง)
 N คือ จำนวนสถานีในโครงข่าย (สถานี)

จากการคำนวณด้วยค่า $N = 6$ สถานี จะได้จำนวนช่องความยาวคลื่น 5 ช่อง และสามารถแจกแจงได้ดังรูปที่ 2.19



.....

รูปที่ 2.19 แสดงจำนวนช่องความยาวคลื่นที่ได้จากการคำนวณตามสมการ ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง

6 6

6

1

6 6

1

2.2.1.2 ความเป็นไปได้ทั้งหมดของการส่งในแต่ละสถานี

จำนวนทราฟฟิกทั้งหมดของการส่งมีจำนวนเท่ากับ $N \times (N-1)$ โดย N คือจำนวนสถานีทั้งหมด หลังจากนั้นจะทำการหาระยะทางที่สั้นที่สุดในการส่งข้อมูลของแต่ละทราฟฟิก ซึ่งจากตัวอย่างโครงข่ายเราสามารถหาความเป็นไปได้ในการส่งทั้งหมดมี $6 \times 5 = 30$ แบบในการส่ง โดยเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด และได้ผลตามตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่สั้นที่สุด

1 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 121 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 121 km
1 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km	2 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 113 km
1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km
1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km
1 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 96 km	2 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนนาฬิกา ระยะทาง 217 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km
3 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 113 km	4 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km
3 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 71 km	4 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 71 km
3 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km	4 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 135 km
3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km	4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 96 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km
5 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง	6 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง

135 km 5 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 101 km	236 km 6 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 101 km
--	--

จากตารางที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิคย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดีสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 มีค่าน้อยกว่าค่าดีสเพอร์ชันที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิคย่อย คือ ระหว่าง สถานีที่ 1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดีสเพอร์ชันสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิคใดๆ จะทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุด จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.1 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทางพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน ตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 206 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km

2.2.1.3 ช่วงของตำแหน่งที่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงให้ใช้จำนวนน้อยที่สุด

การจัดการดีสเพอร์ชันของเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ ดังนั้นระยะห่างแต่ละตำแหน่งของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงจึงมีผลต่อการจัดการดีสเพอร์ชัน ในการจัดการดีสเพอร์ชันเราจะเลือกค่าดีสเพอร์ชันของความยาวคลื่นที่มีผลมากที่สุด ในโครงข่าย ซึ่งถ้าความยาวคลื่นที่มีค่าดีสเพอร์ชันมากที่สุดของสัญญาณ ไม่เกินค่าจำกัดของดีสเพอร์ชัน (D_{max}) ความยาวคลื่นอื่นๆ ก็สามารถผ่านไปได้ด้วยเช่นกัน สำหรับเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นนั้น ดีสเพอร์ชันก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสงและดีสเพอร์ชันหลัง

ออกจากเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้นจะไม่เท่ากัน จากจำนวนความยาวคลื่นจากสมการที่ (2.2) ในโครงข่ายตัวอย่าง จำเป็นต้องใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด 5 ความยาวคลื่น ตาม ITU Grid Specification เราจะเลือกค่าความยาวคลื่นทั้ง 10 ความยาวคลื่น คือ 5 ความยาวคลื่นเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสง ดังนี้ 1553.73, 1552.93, 1552.12, 1551.32 และ 1550.52 และ 5 ความยาวคลื่นหลังจากผ่านเครื่องส่งยุคเฟสแสง ดังนี้ 1549.72, 1548.91, 1548.11, 1547.32 และ 1546.52 จากนั้นหาค่าดิสเพอร์ชันจาก ITU-T Recommendation จากสมการที่ (2.3) ค่า D_{1550} เท่ากับ 17 ps/nm/km ค่า S_{1550} เท่ากับ 0.056 ps/nm²/km คำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันของความยาวก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ค่าดังนี้ 17.208, 17.164, 17.118, 17.073 และ 17.029 ตามลำดับ และ คำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันของความยาวหลังจากออกจากเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ค่าดังนี้ 16.984, 16.938, 16.894, 16.849 และ 16.805 ตามลำดับ ค่าดิสเพอร์ชันที่มีผลมากที่สุดก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสง คือ 17.208 และ ค่าดิสเพอร์ชันที่มีผลมากที่สุดหลังจากออกจากเครื่องส่งยุคเฟสแสง คือ 16.984 จากค่าทั้ง 2 และระยะทางจากตารางที่ 2.12 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดัง ตารางที่ 2.13

$$D_{Link}(\lambda) = D_{1550} + S_{1550}(\lambda - 1550) \quad (2.3)$$

โดย D_{1550} คือ chromatic dispersion coefficient ที่ 1550 nm (ps/nm/km)
 S_{1550} คือ chromatic dispersion slope coefficient (ps/nm²/km)
 λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

ตารางที่ 2.13 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหาย (แบบมีความยาวคลื่นเพียงพอ)

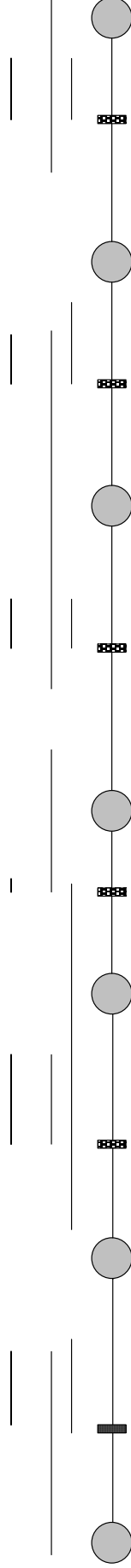
1 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km เลือกวางที่กม.ที่ 44-92 และ 122-280 1 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 197 km เลือกวางที่กม.ที่ 51-92	2 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 184 km เลือกวางที่กม.ที่ 46-92 2 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km เลือกวางที่กม.ที่ 50-92 และ 134-280
3 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 234 km เลือกวางที่กม.ที่ 67-92 3 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 307 km เลือกวางที่กม.ที่ 45-92 และ 124-280	4 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 305 km เลือกวางที่กม.ที่ 44-92 และ 122-280 4 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 236 km เลือกวางที่กม.ที่ 69-92
5 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 318 km เลือกวางที่กม.ที่ 50-92 และ 124-280 5 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา	6 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 217 km เลือกวางที่กม.ที่ 61-92 6 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา

ระยะทาง 206 km เลือกวางที่กม.ที่ 56-92	ระยะทาง 307 km เลือกวางที่กม.ที่ 45-92 และ 124-280
---	---

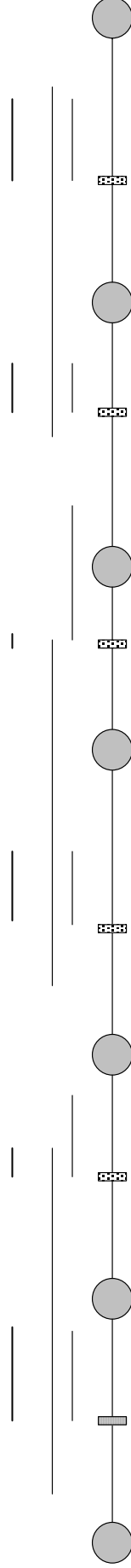
เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องส่งยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นของโครงข่ายปกตินี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นของโครงข่ายปกติ แต่เปลี่ยนค่าดิสเพอร์ชันที่ใช้ในการคำนวณจาก 16.58 เป็น 17.208 และ 16.984 จากนั้นจึงนำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2.0 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทางเข้มนาฬิกา และรูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทางทวนเข้มนาฬิกา ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข้มนาฬิกาและ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข้มนาฬิกา

2.2.1.4 ช่วงที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

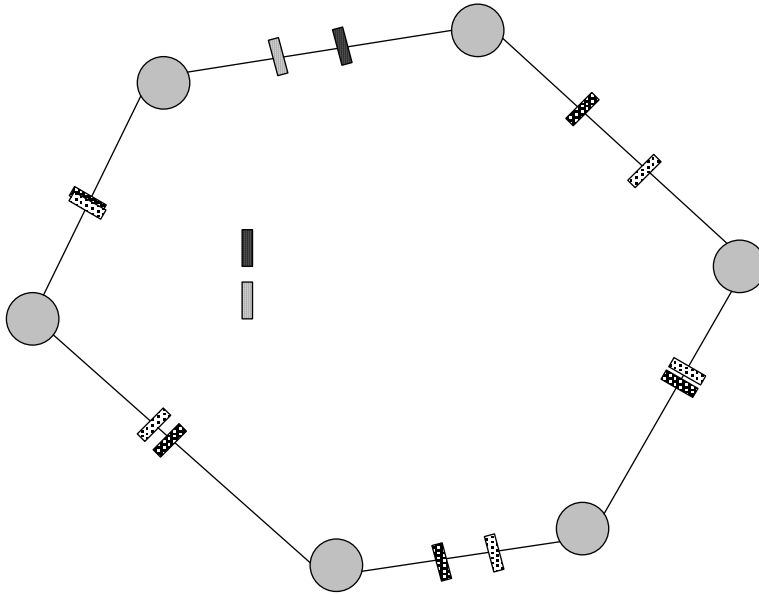
เช่นเดียวกับการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อมโยง จะได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.92



รูปที่ 2.20 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเส้นทางพิก



รูปที่ 2.21 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเส้นทางพิก



รูปที่ 2.92 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 2.92 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายปกติที่ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่น ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งการวางดังนี้

ข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

- เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 44
- เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 46
- เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 45
- เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 69
- เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 50
- เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

ข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

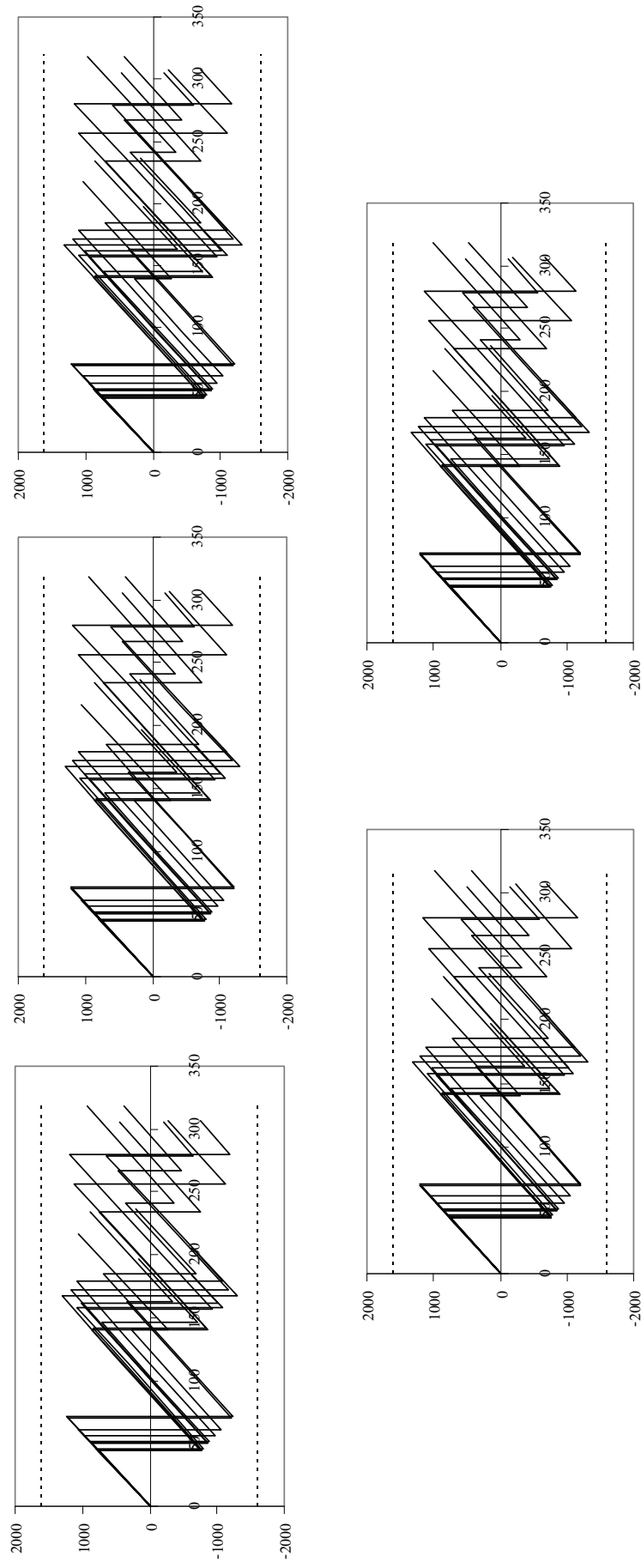
- เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 51
- เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 50
- เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 56
- เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 44
- เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 67
- เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 50

6

101 km

5

135 km



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงค่าดีเฟนอร์ชันของทุกเส้นทางและทุกสถานี

หลังจากที่ได้ดำเนินการทั้ง 4 ขั้นตอนจนได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด เราได้ตรวจสอบการทำงานของทราฟฟิกทั้งหมดและทุกความยาวคลื่นที่ใช้งาน โดยการหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมและทำการเปรียบเทียบกับค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนดของทุกความยาวคลื่น จากรูปที่ 2.103 โดย รูป ก แสดงความยาวคลื่น 17.208 และ 16.805 รูป ข แสดงความยาวคลื่น 17.164 และ 16.849 รูป ค แสดงความยาวคลื่น 17.118 และ 16.894 รูป ง แสดงความยาวคลื่น 17.073 และ 16.938 และรูป จ แสดงความยาวคลื่น 17.029 และ 16.984 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในทราฟฟิกทุกเส้นทางและทุกความยาวคลื่นมีค่าไม่เกิน -1600 ps/nm/km ถึง $+1600$ ps/nm/km

2.2.2 การวางเครื่องส่งยุคเฟสชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น

หลังจากที่ทำการวางบนโครงข่ายปกติ ต่อไปเราจะทำการศึกษากฎเกณฑ์ที่โครงข่ายเกิดการเสียหายซึ่งกลไกการกู้คืนข้อมูลเป็นไปตามหัวข้อที่ 2.1.2

2.2.2.1 วิเคราะห์เส้นทางของทราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงไปจากเส้นทางแสงปกติ

จากโครงข่ายตัวอย่างเดิมในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 5 เส้นทางแสง เมื่อทำการจำลองการเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกจากสถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย จะได้ทิศทางและระยะทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km (จากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 3 และสถานีที่ 2) ซึ่งคำนวณแต่ละการเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทำให้เส้นทางของทราฟฟิกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km
1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km
1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km
1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km

จากตารางที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทิศทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 4 จะพบว่า การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิคย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดีสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของ สถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 มีค่าน้อยกว่าค่าดีสเพอร์ชันที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิคย่อย คือ ระหว่าง สถานีที่ 1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดีสเพอร์ชันสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิคใดๆ จะทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุดในกลุ่มที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายกรณีเดียวกันและ ส่งจากสถานีต้นทางเดียวกัน จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.1 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทางพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกันได้ดังตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 สรุปทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนแปลงจากทราฟฟิกปกติ

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km
1 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	2 → 3 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km

1 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km	2 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
1 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km	2 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km
1 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 6 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
3 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 403 km	4 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 332 km
3 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km	4 → 2 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 453 km
3 → 4 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km	4 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km
3 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km	4 → 5 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km
3 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km	4 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 440 km	6 → 1 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km
5 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 319 km	6 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 420 km
5 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 431 km	6 → 3 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 330 km
5 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km	6 → 4 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 401 km
5 → 6 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 5 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

จากตารางที่ 2.15 แสดงเส้นทางการส่งข้อมูลที่ตัดเส้นทางการคำนวณที่ซ้ำซ้อนลง จากนั้น ในการคำนวณตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง จะคำนวณจากระยะทางระหว่างสถานีส่งที่มีการส่งไกลที่สุดเช่นเดียวกับการคำนวณการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ ซึ่งสามารถแสดงเส้นทางที่มีการส่งไกลที่สุดได้ดังตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.16 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

1 → 2 เลือกเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km	2 → 1 เลือกเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km
---	---

1 → 6 เลือกลำเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km	2 → 3 เลือกลำเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km
3 → 2 เลือกลำเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km	4 → 3 เลือกลำเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km
3 → 4 เลือกลำเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km	4 → 5 เลือกลำเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km
5 → 4 เลือกลำเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km	6 → 1 เลือกลำเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km
5 → 6 เลือกลำเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km	6 → 5 เลือกลำเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km

2.2.2.2 หาช่วงของตำแหน่งที่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงให้ใช้จำนวนน้อยที่สุด

จากสมการที่ (2.3) ได้ค่าดิสเพอร์ชันก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสงเท่ากับ 17.208 และค่าดิสเพอร์ชันหลังออกจากเครื่องส่งยุคเฟสแสงเท่ากับ 16.849 และระยะทางจากตารางที่ 2.166 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดังตารางที่ 2.177

ตารางที่ 2.17 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหยา (แบบมีความยาวคลื่นเพียงพอ)

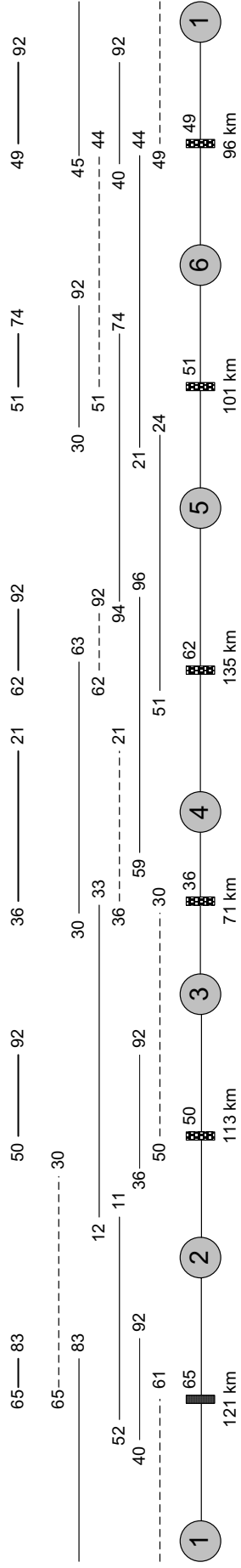
1 → 2 เลือกลำเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 162-280 และ 340-464	2 → 1 เลือกลำเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 516 km เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 162-280 และ 340-464
1 → 6 เลือกลำเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km เลือกวางที่กม.ที่ 40-92, 165-280 และ 356-464	2 → 3 เลือกลำเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km เลือกวางที่กม.ที่ 36-92 165-280 และ 370-464
3 → 2 เลือกลำเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 524 km เลือกวางที่กม.ที่ 36-92 165-280 และ 370-464	4 → 3 เลือกลำเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km เลือกวางที่กม.ที่ 62-92, 203-280 และ 397-464
3 → 4 เลือกลำเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 566 km เลือกวางที่กม.ที่ 62-92, 203-280 และ 397-464	4 → 5 เลือกลำเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km เลือกวางที่กม.ที่ 30-92, 150-280 และ 330-464

5 → 4 เลือกลำเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 502 km เลือกวางที่กม.ที่ 30-92, 150-280 และ 330-464 5 → 6 เลือกลำเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km เลือกวางที่กม.ที่ 39-92, 172-280 และ 370-464	6 → 1 เลือกลำเส้นทาง ทวนเข็มนาฬิกา ระยะทาง 541 km เลือกวางที่กม.ที่ 40-92, 165-280 และ 356-464 6 → 5 เลือกลำเส้นทาง ตามเข็มนาฬิกา ระยะทาง 536 km เลือกวางที่กม.ที่ 39-92, 172-280 และ 370-464
---	---

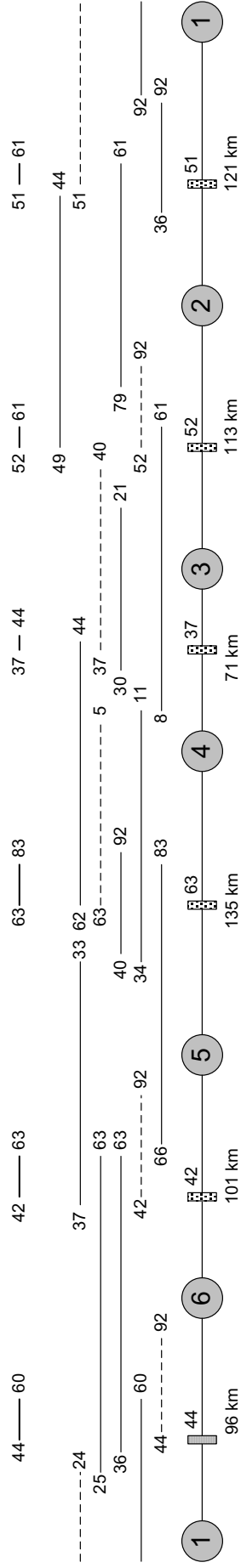
เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องส่งยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่นนี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่ายปกติ และก็นำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อหาจุดวางที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศตามเข็มนาฬิกา และรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทวนเข็มนาฬิกา ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกา และ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

2.2.2.3 เลือกช่วงที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

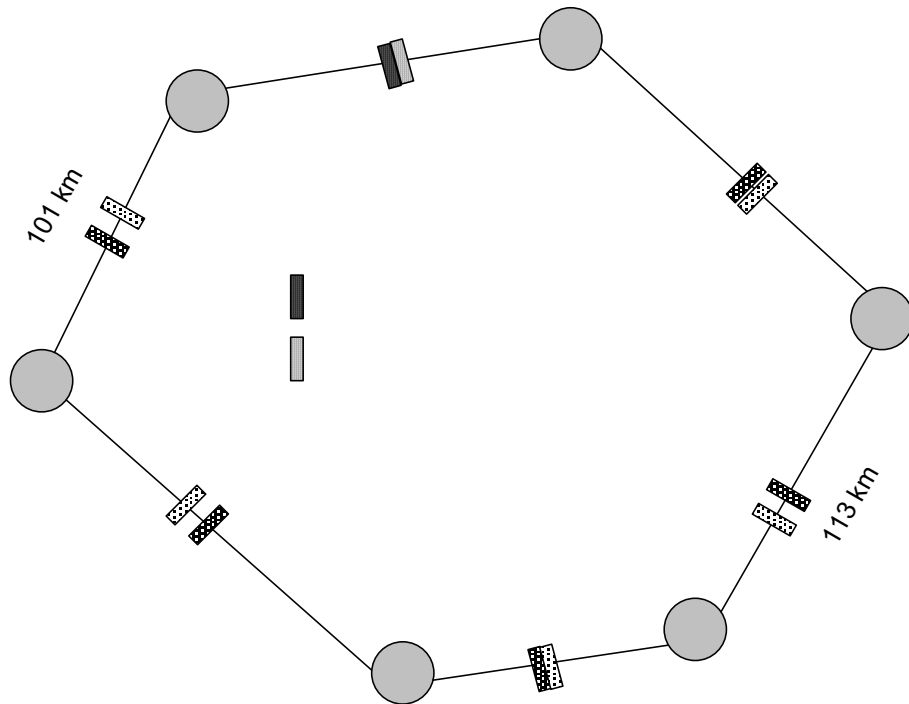
เช่นเดียวกับการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อมโยง จะได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.24 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบตามเส้นทาง



รูปที่ 2.25 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงในการส่งแบบทวนเส้นทาง



รูปที่ 2.26 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

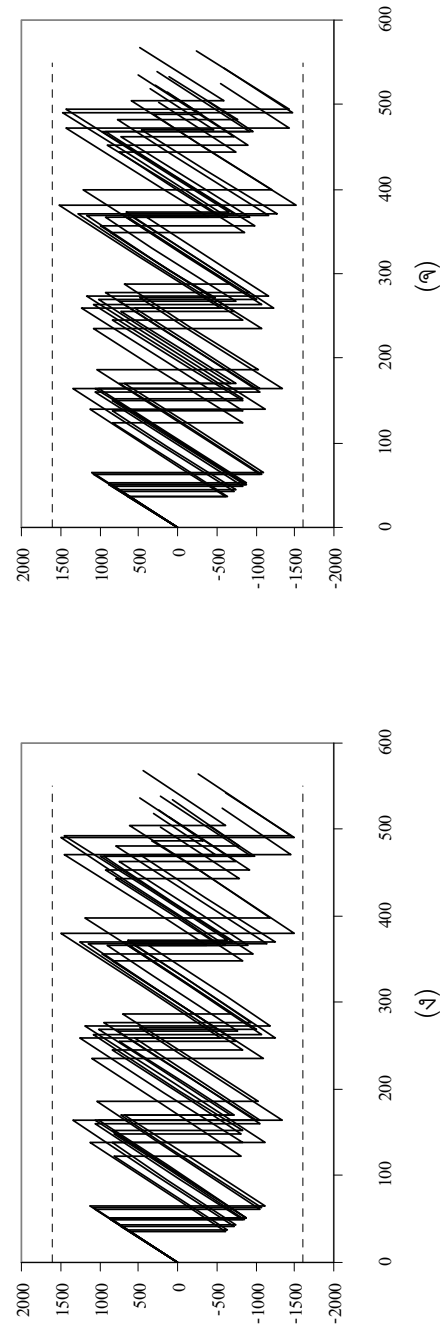
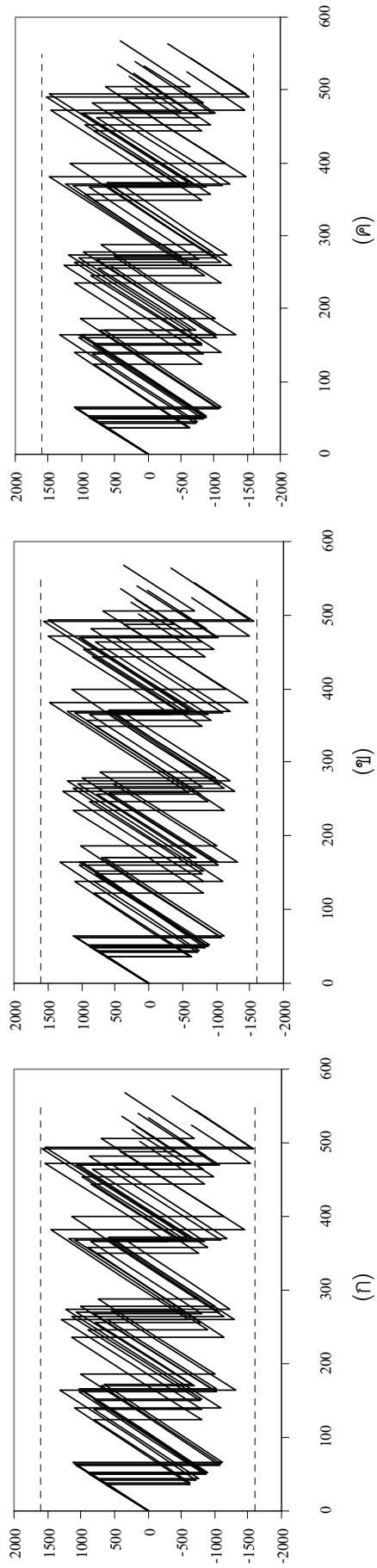
จากรูปที่ 2.2.26 แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายด้วยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบการเปลี่ยนความยาวคลื่น ซึ่งเมื่อระบบเกิดการเสียหายที่จุดใดๆ ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังทิศทางตรงข้ามกับความเสียหายนั้นโดยใช้ความยาวคลื่นสำรองในการส่ง ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งการวางดังนี้

ข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

- เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 65
- เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 50
- เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 36
- เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 62
- เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 51
- เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 49

ข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

- เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 44
- เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 42
- เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 63
- เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 37
- เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 52
- เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 51



รูปที่ 2.27 กราฟแสดงค่าดีสเพอร์ชันของทุกเส้นทางและทุกสถานี

จากกระบวนการขั้นตอน หลังจากได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดทำการตรวจสอบทุก ทราฟฟิกว่าเกินดิสเพอร์ชันที่จำกัดไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบจากดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละทราฟฟิกกับดิสเพอร์ชันที่กำหนด เราสามารถแสดงกราฟของค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดระหว่างเส้นทางการส่งทุกๆทราฟฟิกได้ดังรูปที่ 2.2.27 โดย รูป ก แสดงความยาวคลื่น 17.208 และ 16.805 รูป ข แสดงความยาวคลื่น 17.164 และ 16.849 รูป ค แสดงความยาวคลื่น 17.118 และ 16.894 รูป ง แสดงความยาวคลื่น 17.073 และ 16.938 และรูป จ แสดงความยาวคลื่น 17.029 และ 16.984 และจะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในทราฟฟิกทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน – 1600 ps/nm/km ถึง +1600 ps/nm/km

2.2.3 การวางเครื่องส่งยุคเฟสชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแสงบนโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้าม ซึ่งทำการส่งข้อมูลด้วยเส้นใยแสงสำรองในทิศทางตรงข้ามแทนการส่งในเส้นใยแสงหลักดังเช่นในหัวข้อ 2.2.2 โดยรายละเอียดของกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้ามได้ใช้หลักการเดียวกันกับหัวข้อที่ 2.1.3

2.2.3.1 เส้นทางของทราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงไปจากเส้นใยแสงปกติ

จากโครงข่ายตัวอย่างเดิมในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีจำนวนสถานีทั้งหมด 6 สถานี 5 เส้นใยแสง เมื่อทำการจำลองการเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างเช่น ทราฟฟิกจากสถานีที่ 6 ไปยังสถานีที่ 2 เมื่อเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย จะได้ทิศทางและระยะทาง คือ เส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ เป็นระยะทาง 96 km (จากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1) และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็นระยะทาง 516 (จากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 3 และสถานีที่ 2) รวมทั้ง 2 เส้นทาง ได้ระยะทางรวม 612 km ซึ่งคำนวณแต่ละการเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทำให้เส้นทางของทราฟฟิกเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ดังตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.18 แสดงทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางที่เปลี่ยนไปจากทราฟฟิกปกติ

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม
1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง

แสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 319 กม 5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 536 กม	ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 401 กม 6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 536 กม
--	---

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 440 กม 1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 541 กม	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 561 กม 2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 602 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 642 กม 5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 521 กม	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 541 กม 6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 420 กม

จากตารางที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าในการส่งแต่ละสถานีจะมีเส้นทางที่ทราฟฟิกวิ่งไปในทางเดียวกัน เช่น สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 2 , สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 3 และ สถานีที่ 1 ส่งไปสถานีที่ 4 ซึ่งเป็นการส่งไปในทิศทางเดียวกันคือตามเข็มนาฬิกา ซึ่ง ถ้าทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 4 จะพบว่า การส่ง

ระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 2 และ การส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 3 เป็นทราฟฟิคย่อยที่เกิดระหว่างการส่งระหว่างสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าดิสเพอร์ชันสะสมตลอดเส้นทางระหว่างการส่งของสถานีที่ 1 และ สถานีที่ 4 มีค่าน้อยกว่าค่าดิสเพอร์ชันที่กำหนด แสดงว่าการส่งในทราฟฟิคย่อย คือ ระหว่างสถานีที่ 1 ไปยัง สถานีที่ 2 และ สถานีที่ 3 ก็จะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมไม่เกินค่าที่กำหนดเช่นกัน ดังนั้น ในการวิเคราะห์การส่งในทราฟฟิคใดๆ จะทำการวิเคราะห์การส่งระหว่างสถานีที่มีระยะทางไกลที่สุด ในกลุ่มที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายกรณีเดียวกันและ ส่งจากสถานีต้นทางเดียวกัน จากโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.1 เมื่อทำการวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน 2 ทิศทาง 2 เส้นใยแสงพบว่าจะได้ ระยะทางไกลที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน ดังตารางที่ 2.19

ตารางที่ 2.19 ทราฟฟิก ทิศทางและระยะทางของทราฟฟิกที่ยาวที่สุดที่ไปในทิศทางเดียวกัน

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม
3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ	4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ

ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 632 กม	ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 686 กม
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 742 กม	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 671 กม
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 536 กม	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 536 กม

กรณีที่ย้ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 541 กม	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง ปกติ และเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 602 กม
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 642 กม	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงปกติ และเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง สำรวจ เป็น ระยะทาง 541 กม

2.2.3.2 ช่วงของตำแหน่งที่สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงให้ใช้จำนวนน้อยที่สุด

จากสมการที่ (2.3) ได้ค่าดิสเพอร์ชันก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสงเท่ากับ 17.208 และค่าดิสเพอร์ชันหลังออกจากเครื่องส่งยุคเฟสแสงเท่ากับ 16.849 และระยะทางจากตารางที่ 2.19 เราสามารถหาตำแหน่งในการวางได้ดังตารางที่ 2.20

ตารางที่ 2.20 ทราฟฟิก ทิศทาง ระยะทาง และตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ของโครงข่ายที่มีย้ายเชื่อมโยงเสียหาย (แบบมีความยาวคลื่นไม่เพียงพอ)

กรณีที่ย้ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เสียหาย

1 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 162-280 และ 340-464	2 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 516 กม เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 162-280 และ 340-464
3 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 629 กม เลือกวางที่กม.ที่ 82-92, 260-280 และ 445-464	4 → 1 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 700 กม เลือกวางที่กม.ที่ 25-92, 144-280, 328-464 และ 516-651
5 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 835 กม เลือกวางที่กม.ที่ 85-92, 260-280, 450-464 และ 630-651	6 → 2 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 612 กม เลือกวางที่กม.ที่ 73-92, 241-280 และ 425-464

กรณีที่ย้ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 2 ไปสถานีที่ 3 เสียหาย

1 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 645 กม เลือกวางที่กม.ที่ 89-92, 274-280 และ 458-464	2 → 3 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 165-280 และ 352-464
3 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 524 กม เลือกวางที่กม.ที่ 36-92, 165-280 และ 352-464	4 → 2 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 595 กม เลือกวางที่กม.ที่ 64-92, 223-280 และ 407-464

กรณีที่ย้ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 3 ไปสถานีที่ 4 เสียหาย

1 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบน เส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 800 กม เลือกวางที่กม.ที่ 75-92, 245-280, 429- 464 และ 617-651	2 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบน เส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 679 กม เลือกวางที่กม.ที่ 15-92, 124-280, 308- 464 และ 496-651
3 → 4 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบน เส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม เลือกวางที่กม.ที่ 62-92, 203-280 และ 397-464	4 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง ปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 566 กม เลือกวางที่กม.ที่ 62-92, 203-280 และ 397-464
5 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง ปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 701 กม เลือกวางที่กม.ที่ 25-92, 144-280, 328- 464 และ 516-651	6 → 3 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง ปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 802 กม เลือกวางที่กม.ที่ 76-92, 247-280, 431- 464 และ 619-651

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 4 ไปสถานีที่ 5 เสียหาย

3 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบน เส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 573 กม เลือกวางที่กม.ที่ 54-92, 201-280 และ 385-464	4 → 5 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบน เส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม เลือกวางที่กม.ที่ 30-92, 150-280 และ 330-464
5 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง ปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 502 กม เลือกวางที่กม.ที่ 30-92, 150-280 และ 330-464	6 → 4 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง ปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใย แสงสำรอง เป็น ระยะทาง 603 กม เลือกวางที่กม.ที่ 68-92, 231-280 และ 415-464

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 5 ไปสถานีที่ 6 เสียหาย

1 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง	2 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสง
--	--

ปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 632 กม เลือกวางที่กม.ที่ 84-92, 264-280 และ 449-464	ปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 686 กม เลือกวางที่กม.ที่ 18-92, 130-280, 314-464 และ 502-651
3 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 742 กม เลือกวางที่กม.ที่ 46-92, 187-208, 371-464 และ 558-651	4 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 671 กม เลือกวางที่กม.ที่ 11-92, 116-280, 300-464 และ 488-651
5 → 6 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม เลือกวางที่กม.ที่ 40-92,172-280 และ 370-464	6 → 5 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 536 กม เลือกวางที่กม.ที่ 40-92,172-280 และ 370-464

กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงจากสถานีที่ 6 ไปสถานีที่ 1 เสียหาย

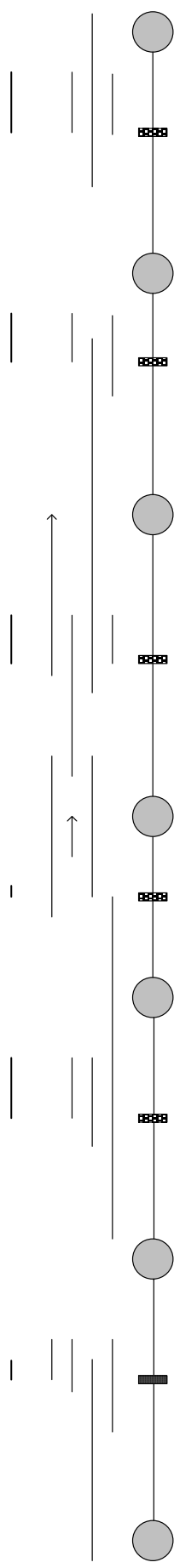
1 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม เลือกวางที่กม.ที่ 40-92, 165-280 และ 356-464	2 → 6 เลือกเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 602 กม เลือกวางที่กม.ที่ 68-92, 231-280 และ 415-464
5 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 642 กม เลือกวางที่กม.ที่ 89-92, 274-280 และ 458-464	6 → 1 เลือกเส้นทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติและเส้นทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง เป็น ระยะทาง 541 กม เลือกวางที่กม.ที่ 40-92, 165-280 และ 356-464

เมื่อเราได้ช่วงในการวางของทุกๆ ช่วงของเครื่องส่งยุคเฟสแสง การหาช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงมีการเสียหายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบการทอดข้ามนี้ จะใช้วิธีการเดียวกันกับการหาช่วงการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่ายปกติ และนำทุกช่วงมาวาดลงบนเส้นใยแสงเพื่อ

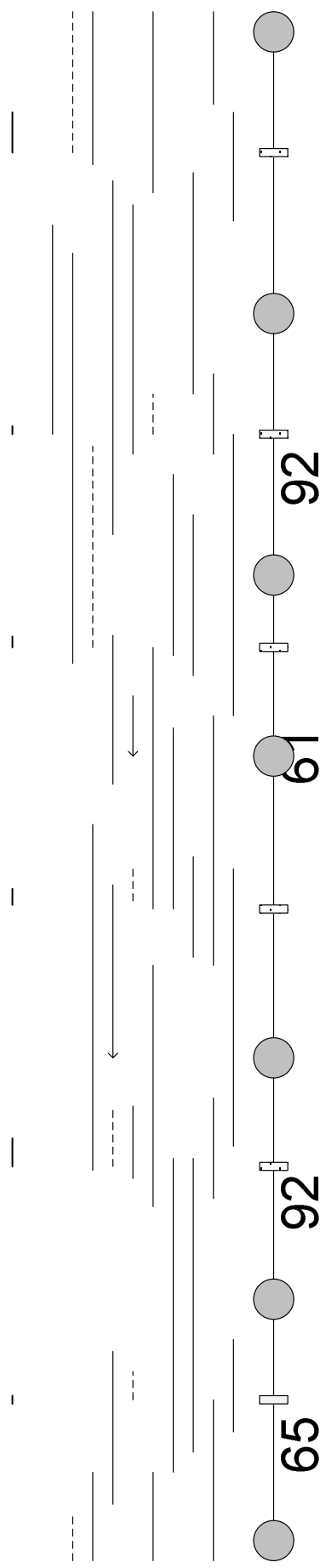
หาจุดวางที่เหมาะสมดังรูปที่ 2.28 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทางเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงปกติ รูปที่ 2.29 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทางเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงปกติ รูปที่ 2.30 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทางเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงสำรอง และรูปที่ 2.31 แสดงตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เมื่อทำการส่งข้อมูลในทิศทางเข็มนาฬิกา บนเส้นใยแสงสำรอง ด้วยวิธีนี้เราจะได้ช่วงของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ทั้งหมด 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงปกติ 6 ช่วงของทิศทางตามเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง และ 6 ช่วงสำหรับทิศทางทวนเข็มนาฬิกาบนเส้นใยแสงสำรอง

2.2.3.3 เลือกช่วงที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่เหมาะสมที่สุด

เช่นเดียวกับการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายปกติ เราเลือกจุดที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใกล้สถานีที่สุด ทำซ้ำในทุกแบบการเสียหายและทุกข่ายเชื่อมโยง จะได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.28 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงปกติในการส่งแบบตามเส้นนำพิกา



รูปที่ 2.29 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นใยแสงสำหรับการส่งแบบทวนชั้นนาฬิกา

59

92

16

29

74

33

50

92

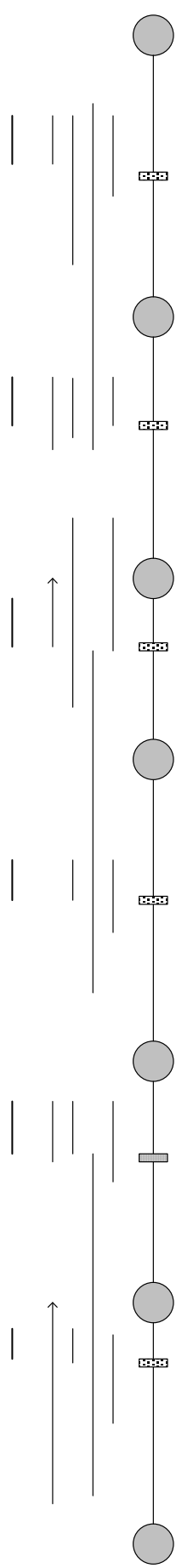
16

29

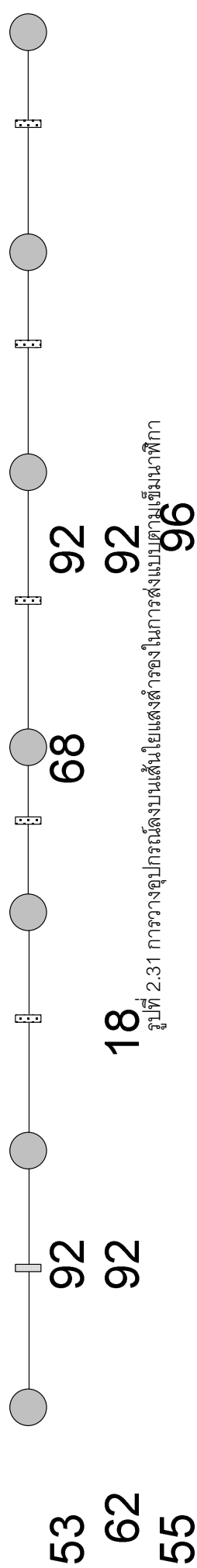
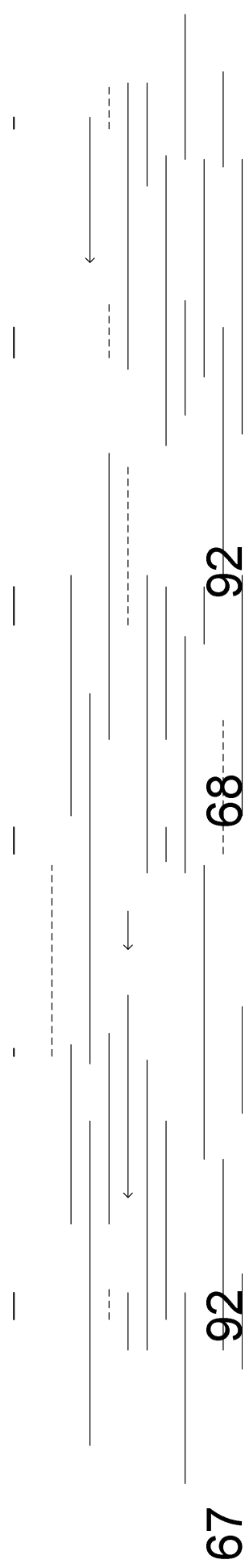
55

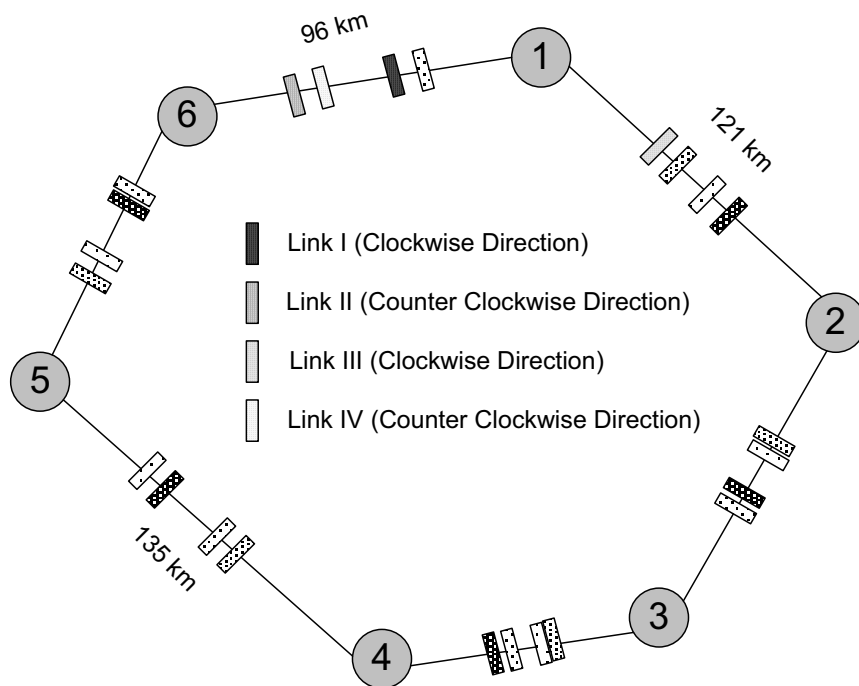
C

16



รูปที่ 2.30 การวางอุปกรณ์ลงบนเส้นโน้ตแสดงปกติในการส่งแบบทวนเพิ่มเติมฟีกา





รูปที่ 2.32 โครงข่ายตัวอย่างที่วางอุปกรณ์แล้ว

จากรูปที่ 2. แสดงการวางอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงเสียหายด้วยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบการทอดข้าม ซึ่งเมื่อระบบเกิดการเสียหายที่จุดใดๆ ระบบจะทำการส่งข้อมูลไปยังทิศทางที่ยังทำงานได้อยู่บนเส้นทางปกติและใช้เส้นใยแสงสำรองสำรองกับเส้นทางที่เสียหายในการส่ง ซึ่งสามารถสรุปตำแหน่งการวางดังนี้

เส้นใยแสงปกติข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 71

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 45

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 65

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 61

เส้นใยแสงปกติข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 63

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 71

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 46

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 67

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 68

เส้นใยแสงสำรองข้อมูลทิศตามเข็มนาฬิกา

101 km

เส้นใยแสงจาก 1 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 2 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 62

เส้นใยแสงจาก 3 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 36

เส้นใยแสงจาก 4 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 70

เส้นใยแสงจาก 5 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 68

เส้นใยแสงจาก 6 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 59

เส้นใยแสงสำรองข้อมูลทิศทวนเข็มนาฬิกา

เส้นใยแสงจาก 1 → 6 วางที่ กิโลเมตรที่ 58

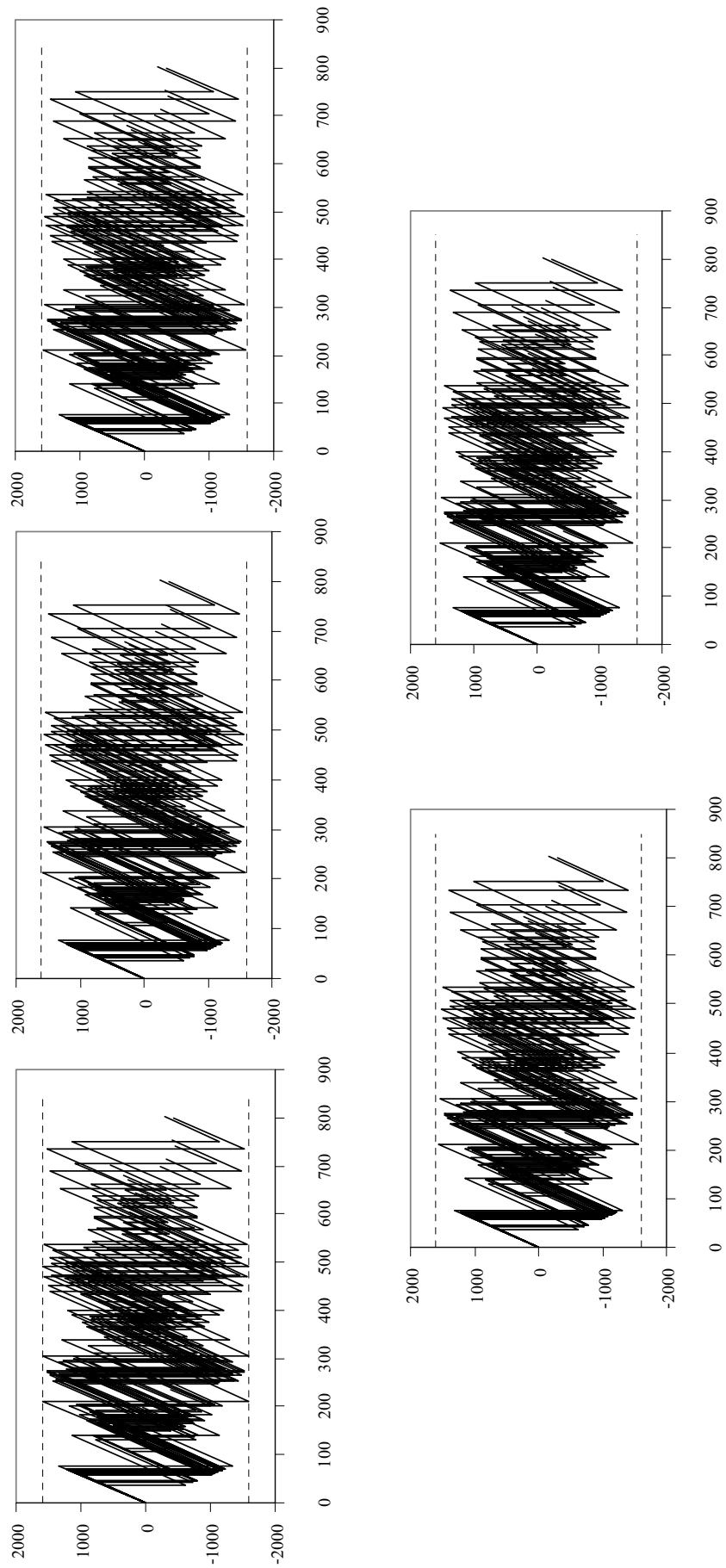
เส้นใยแสงจาก 6 → 5 วางที่ กิโลเมตรที่ 57

เส้นใยแสงจาก 5 → 4 วางที่ กิโลเมตรที่ 69

เส้นใยแสงจาก 4 → 3 วางที่ กิโลเมตรที่ 42

เส้นใยแสงจาก 3 → 2 วางที่ กิโลเมตรที่ 60

เส้นใยแสงจาก 2 → 1 วางที่ กิโลเมตรที่ 70



รูปที่ 2.33 กราฟแสดงค่าดีฟเฟอเรนซ์ของทุกเส้นทางและทุกสถานี

จากกระบวนการขั้นตอน หลังจากได้ตำแหน่งที่วางอุปกรณ์ทั้งหมดทำการตรวจสอบทุก ทราฟฟิกว่าเกินดิสเพอร์ชันที่กำหนดไว้หรือไม่ โดยเปรียบเทียบจากดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละทราฟฟิกกับดิสเพอร์ชันที่กำหนด เราสามารถแสดงกราฟของค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดระหว่างเส้นทางการส่งทุกๆทราฟฟิกได้ดังรูปที่ 2.33 โดยรูป ก แสดงความยาวคลื่น 17.208 และ 16.805 รูป ข แสดงความยาวคลื่น 17.164 และ 16.849 รูป ค แสดงความยาวคลื่น 17.118 และ 16.894 รูป ง แสดงความยาวคลื่น 17.073 และ 16.938 และรูป จ แสดงความยาวคลื่น 17.029 และ 16.984 จะเห็นได้ว่าค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในทราฟฟิกทุกเส้นทางมีค่าไม่เกิน -1600 ps/nm/km ถึง $+1600$ ps/nm/km

2.3 วิเคราะห์ผล OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายปกติ

เมื่อเราวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่ายจะทำให้กำลังสัญญาณที่ได้จากเครื่องส่งยุคเฟสแสงลดลงเราจึงต้องใส่เครื่องขยายสัญญาณเพิ่มเติมจากเดิม ซึ่งเครื่องขยายสัญญาณนั้นนอกจากจะขยายสัญญาณข้อมูลแล้วยังจะขยายของสัญญาณรบกวนด้วย เป็นผลทำให้ค่า OSNR ของระบบลดลง ในหัวข้อนี้เราจึงจะศึกษาว่าการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่ายจะทำให้ค่า OSNR เปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

OSNR คือ อัตราส่วนของสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณรบกวนซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.4)

$$OSNR = \frac{P_{in}}{2n_{sp}(G-1) \cdot hf \cdot \Delta f} \quad (2.4)$$

โดยที่	P_{in}	คือ Power input
	n_{sp}	คือ Spontaneous emission factor
	G	คือ Amplifier Gain
	hf	คือ Plank's constant มีค่าเท่ากับ 6.62×10^{-34}
	Δf	คือ Bandwidth of the measurement

แต่ในวิทยานิพนธ์นี้เราจะพิจารณาที่อัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกับ OSNR ในโครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ได้ดัง สมการที่ (2.5)

$$\frac{OSNR_{New}}{OSNR_{Old}} = 10 \log \frac{(G_{link} - n)}{(G_{link} - n) + n(G_{opc} - 1)} \quad (dB) \quad (2.5)$$

โดยที่	G_{link}	คือ กำลังขยายทั้งหมดของเครื่องขยายสัญญาณที่ต้องใช้ในการส่งข้อมูล
	G_{opc}	คือ กำลังขยายของเครื่องขยายสัญญาณที่นำมาชดเชยสัญญาณที่ลดลงจากเครื่องส่งยุคเฟสแสง
	n	คือ จำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสง

จากโครงข่ายรูปที่ 2.2.1 และระยะทางจากตารางที่ 2.11 เราสามารถหาค่ากำลังขยายสัญญาณก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสงโดยคำนวณจากสมการที่ (2.6) ได้ดังตารางที่ 2.21

$$G = \alpha \times L \quad (2.6)$$

โดยที่ G คือ กำลังขยายสัญญาณ
 α คือ attenuation coefficient เท่ากับ 0.275 dB/km
 L คือ ระยะทาง

ตารางที่ 2.21 กำลังขยายทั้งหมดในการส่งข้อมูลและจำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใช้

1 → 2 ระยะทาง 121 km ใช้กำลังขยาย 33.275 dB ใช้ OPC 1 ตัว 1 → 3 ระยะทาง 234 km ใช้กำลังขยาย 64.35 dB ใช้ OPC 2 ตัว 1 → 4 ระยะทาง 305 km ใช้กำลังขยาย 83.875 dB ใช้ OPC 3 ตัว 1 → 5 ระยะทาง 197 km ใช้กำลังขยาย 54.175 dB ใช้ OPC 2 ตัว 1 → 6 ระยะทาง 96 km ใช้กำลังขยาย 26.4 dB ใช้ OPC 1 ตัว	2 → 1 ระยะทาง 121 km ใช้กำลังขยาย 33.275 dB ใช้ OPC 1 ตัว 2 → 3 ระยะทาง 113 km ใช้กำลังขยาย 31.075 dB ใช้ OPC 1 ตัว 2 → 4 ระยะทาง 184 km ใช้กำลังขยาย 50.6 dB ใช้ OPC 2 ตัว 2 → 5 ระยะทาง 318 km ใช้กำลังขยาย 87.45 dB ใช้ OPC 3 ตัว 2 → 6 ระยะทาง 217 km ใช้กำลังขยาย 59.675 dB ใช้ OPC 2 ตัว
3 → 1 ระยะทาง 234 km ใช้กำลังขยาย 64.35 dB ใช้ OPC 2 ตัว 3 → 2 ระยะทาง 113 km ใช้กำลังขยาย 31.075 dB ใช้ OPC 1 ตัว 3 → 4 ระยะทาง 71 km ใช้กำลังขยาย 19.525 dB ใช้ OPC 1 ตัว 3 → 5 ระยะทาง 206 km ใช้กำลังขยาย 56.65 dB	4 → 1 ระยะทาง 305 km ใช้กำลังขยาย 83.375 dB ใช้ OPC 3 ตัว 4 → 2 ระยะทาง 184 km ใช้กำลังขยาย 50.6 dB ใช้ OPC 2 ตัว 4 → 3 ระยะทาง 71 km ใช้กำลังขยาย 19.525 dB ใช้ OPC 1 ตัว 4 → 5 ระยะทาง 135 km ใช้กำลังขยาย 37.125 dB

ใช้ OPC 2 ตัว 3 → 6 ระยะทาง 307 km ใช้กำลังขยาย 84.425 dB ใช้ OPC 3 ตัว	ใช้ OPC 1 ตัว 4 → 6 ระยะทาง 236 km ใช้กำลังขยาย 64.9 dB ใช้ OPC 2 ตัว
5 → 1 ระยะทาง 197 km ใช้กำลังขยาย 54.175 dB ใช้ OPC 2 ตัว 5 → 2 ระยะทาง 318 km ใช้กำลังขยาย 87.45 dB ใช้ OPC 3 ตัว 5 → 3 ระยะทาง 206 km ใช้กำลังขยาย 56.65 dB ใช้ OPC 2 ตัว 5 → 4 ระยะทาง 135 km ใช้กำลังขยาย 37.125 dB ใช้ OPC 1 ตัว 5 → 6 ระยะทาง 101 km ใช้กำลังขยาย 27.775 dB ใช้ OPC 1 ตัว	6 → 1 ระยะทาง 96 km ใช้กำลังขยาย 26.4 dB ใช้ OPC 1 ตัว 6 → 2 ระยะทาง 217 km ใช้กำลังขยาย 59.675 dB ใช้ OPC 2 ตัว 6 → 3 ระยะทาง 307 km ใช้กำลังขยาย 84.425 dB ใช้ OPC 3 ตัว 6 → 4 ระยะทาง 236 km ใช้กำลังขยาย 64.9 dB ใช้ OPC 2 ตัว 6 → 5 ระยะทาง 101 km ใช้กำลังขยาย 27.775 dB ใช้ OPC 1 ตัว

จากสมการที่ (2.5) เมื่อเราแทนค่ากำลังขยายและจำนวนเครื่องยุคเฟสแสงจากตารางที่ 2.21 และแทนค่ากำลังขยายที่นำมาชดเชยสัญญาณที่ลดลงจากเครื่องส่งยุคเฟสแสง ซึ่งมีค่า เท่ากับ 15.3 dB เราจะได้ค่าอัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกับ OSNR ในโครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ได้ดังตารางที่ 2.22

ตารางที่ 2.22 ค่าอัตราส่วนระหว่าง OSNR ในโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงกับ OSNR ในโครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

1 → 2 อัตราส่วน OSNR -1.528 dB ใช้ OPC 1 ตัว 1 → 3 อัตราส่วน OSNR -1.687 dB ใช้ OPC 2 ตัว 1 → 4 อัตราส่วน OSNR -1.918 dB ใช้ OPC 3 ตัว 1 → 5 อัตราส่วน OSNR -1.92 dB ใช้ OPC 2 ตัว	2 → 1 อัตราส่วน OSNR -1.528 dB ใช้ OPC 1 ตัว 2 → 3 อัตราส่วน OSNR -1.689 dB ใช้ OPC 1 ตัว 2 → 4 อัตราส่วน OSNR -2.066 dB ใช้ OPC 2 ตัว 2 → 5 อัตราส่วน OSNR -1.852 dB ใช้ OPC 3 ตัว
---	--

1 → 6 อัตราส่วน OSNR -1.94 dB ใช้ OPC 1 ตัว	2 → 6 อัตราส่วน OSNR -1.799 dB ใช้ OPC 2 ตัว
3 → 1 อัตราส่วน OSNR -1.687 dB ใช้ OPC 2 ตัว 3 → 2 อัตราส่วน OSNR -1.689 dB ใช้ OPC 1 ตัว 3 → 4 อัตราส่วน OSNR -2.484 dB ใช้ OPC 1 ตัว 3 → 5 อัตราส่วน OSNR -1.880 dB ใช้ OPC 2 ตัว 3 → 6 อัตราส่วน OSNR -1.907 dB ใช้ OPC 3 ตัว	4 → 1 อัตราส่วน OSNR -1.927 dB ใช้ OPC 3 ตัว 4 → 2 อัตราส่วน OSNR -2.066 dB ใช้ OPC 2 ตัว 4 → 3 อัตราส่วน OSNR -2.484 dB ใช้ OPC 1 ตัว 4 → 5 อัตราส่วน OSNR -1.448 dB ใช้ OPC 1 ตัว 4 → 6 อัตราส่วน OSNR -1.675 dB ใช้ OPC 2 ตัว
5 → 1 อัตราส่วน OSNR -1.952 dB ใช้ OPC 2 ตัว 5 → 2 อัตราส่วน OSNR -1.852 dB ใช้ OPC 3 ตัว 5 → 3 อัตราส่วน OSNR -1.880 dB ใช้ OPC 2 ตัว 5 → 4 อัตราส่วน OSNR -1.448 dB ใช้ OPC 1 ตัว 5 → 6 อัตราส่วน OSNR -1.858 dB ใช้ OPC 1 ตัว	6 → 1 อัตราส่วน OSNR -1.94 dB ใช้ OPC 1 ตัว 6 → 2 อัตราส่วน OSNR -1.799 dB ใช้ OPC 2 ตัว 6 → 3 อัตราส่วน OSNR -1.907 dB ใช้ OPC 3 ตัว 6 → 4 อัตราส่วน OSNR -1.675 dB ใช้ OPC 2 ตัว 6 → 5 อัตราส่วน OSNR -1.858 dB ใช้ OPC 1 ตัว

จากตารางที่ 2.22 เมื่อเรานำอัตราส่วน OSNR มาหาค่าเฉลี่ย โดยแยกตามจำนวนเครื่องส่งยูคเฟสแสงที่ใช้ จะได้ค่าดังนี้

เครื่องส่งยูคเฟสแสง 1 ตัว ลด OSNR ลง -1.8245 dB

เครื่องส่งยูคเฟสแสง 2 ตัว ลด OSNR ลง -1.8405 dB

เครื่องส่งยูคเฟสแสง 3 ตัว ลด OSNR ลง -1.8940 dB

จะเห็นได้ว่าการใช้เครื่องส่งยูคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่ายจะทำให้มี OSNR ลดลง โดยที่จำนวนเครื่องส่งยูคเฟสแสง 1 ตัว มีค่า OSNR ที่ลดลง น้อยกว่าใช้เครื่องส่งยูคเฟสแสง 2 ตัว และ 3 ตัว ตามลำดับ

บทที่ 3

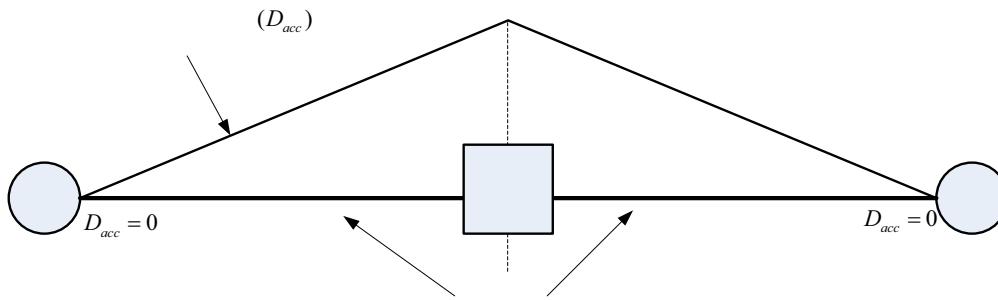
การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงลงบนโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ(broadcast-and-select network) ระเบียบขั้นตอนวิธีในการคิด และผลการทดสอบว่าสามารถใช้ในโครงข่ายได้

ระเบียบขั้นตอนวิธีที่ใช้คำนวณนั้น จะคำนวณหาเส้นทางของกราฟฟิกของทุกๆสถานี จากนั้นหาค่า R ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บอกว่าควรที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแบบไหนระหว่างระเบียบขั้นตอนวิธีที่คิดค้นขึ้นมากับการวางที่จุดกึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงดังรูปที่ 3.1 การวางที่จุดกึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงนั้น ไม่ว่าจะข่ายยาวแค่ไหนก็สามารถวิ่งผ่านได้หมดซึ่งเปรียบได้กับการส่งที่ระยะทางไกล[26][42]-[55] ส่วนค่า R มีแนวคิดมาจากที่ว่าต้องการให้ทุกๆ กราฟฟิกสามารถซ้อนทับช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ ซึ่งโครงข่ายต่างๆนั้น จะมีทั้งกรณีที่สามารถซ้อนทับช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ทั้งหมดและซ้อนทับไม่ได้ทั้งหมด จากนั้นจึงหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละกราฟฟิกโดยที่เครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้นจะต้องสามารถชดเชยผลของดิสเพอร์ชันในทุกๆ ความยาวคลื่นได้ สุดท้ายกำหนดช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง โดยให้นำช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่คำนวณได้ในแต่ละกราฟฟิกมาหาช่วงที่มีการซ้อนทับ และทดสอบผลจากการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง รายละเอียดจะกล่าวถึงต่อไป

3.1 ระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

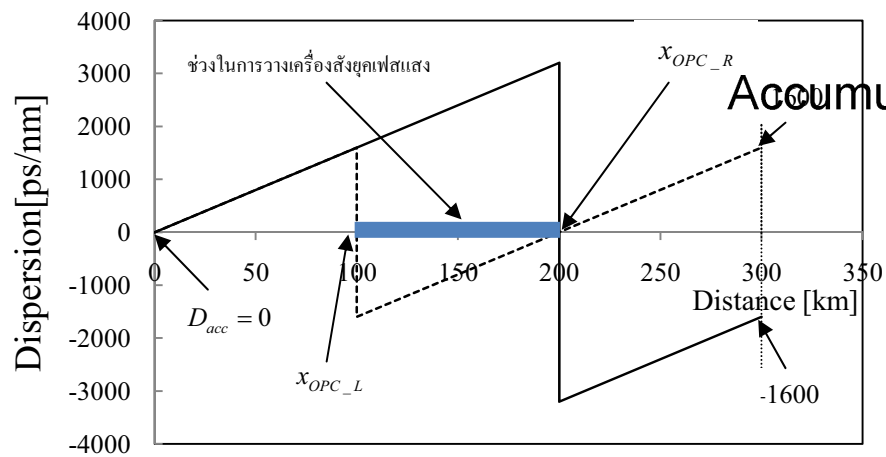
1. คำนวณหาระยะทางของกราฟฟิก รวมทั้งข่ายเชื่อมโยงที่กราฟฟิกของทุกๆ สถานี
2. ประเมินโครงข่ายว่า สามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงให้เหมาะที่สุด โดยใช้พารามิเตอร์ R เป็นตัวตัดสิน ซึ่งค่า R จะเป็นตัวตัดสินว่า ควรจะใช้การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแบบไหนระหว่างการวางตรงกลางข่ายเชื่อมโยงหรือวางโดยใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีนี้
3. คำนวณหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละกราฟฟิก
4. นำช่วงที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในข้อ 3. มาคิดหาตำแหน่งที่เหมาะสมในแต่ละข่ายเชื่อมโยง โดยใช้วิธีซ้อนทับ (intersection) ของทุกๆกราฟฟิก
5. ตรวจสอบผลของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง



รูปที่ 3.1 การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงตรงกลางข่ายเชื่อมโยง

3.2 การคำนวณหาตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

3.2.1 การคำนวณหาตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ดูรูปที่ 3.2 ประกอบ



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการคิดหาตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าดิสเพอร์ชันสะสมจนถึงจุดหนึ่งแล้วจะเกิดการเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกเป็นลบ (ที่ตำแหน่ง 200 km) แล้วก็เริ่มสะสมใหม่ สมการคือ

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

$$-1600 \leq D_{acc} \leq 1600, \quad (3.2)$$

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

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

L คือ ระยะทาง (km)

ตำแหน่งของเครื่องส่งยูคเฟสแสงที่จะวางนั้น 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} คือตำแหน่งขอบเขตด้านซ้ายที่สามารถวางเครื่องส่งยูคเฟสแสงได้ตามกรณีที่ 1

x_{OPC_R} คือตำแหน่งขอบเขตด้านขวาที่สามารถวางเครื่องส่งยูคเฟสแสงได้ตามกรณีที่ 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

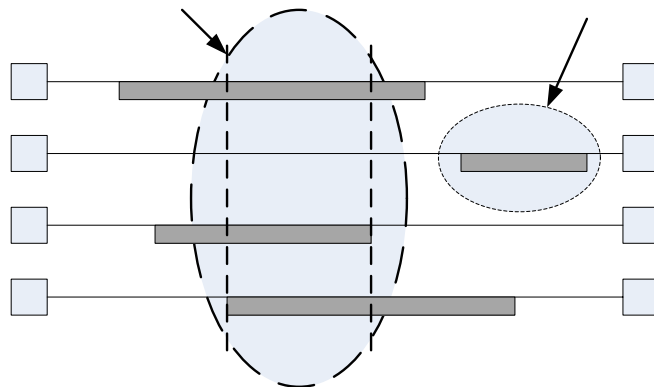
$$x_{OPC_R} = \frac{D_\lambda LP + 1600}{2D_\lambda}, \quad (3.4)$$

และจะได้ช่วงในการวางเครื่องส่งยูคเฟสแสงคือ $x_{OPC_L} - x_{OPC_R}$

3.2.2 เงื่อนไขที่ใช้ตัดสินโครงข่ายว่าสามารถใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีนี้ได้หรือไม่

เรียกพารามิเตอร์ตัวนี้ว่า R คือตัวที่บอกว่าควรจะวางเครื่องส่งยูคเฟสแสงแบบไหนระหว่างระเบียบขั้นตอนวิธีที่คิดค้นขึ้นมากับการวางที่ตรงกลางข่ายเชื่อมโยง เป็นตัวที่วัดขนาดทราฟฟิกของโครงข่ายเดิมให้สามารถวางเครื่องส่งยูคเฟสแสงได้

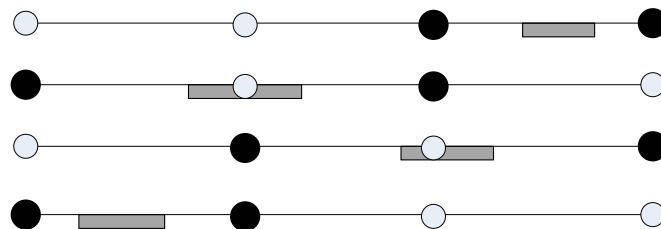
ที่มาของการเกิดค่า R เนื่องมาจากการหาตำแหน่งที่จะซ้อนทับหาช่วงในการเครื่องส่งยูคเฟสแสง ไม่สามารถกระทำได้ เพราะว่ามีบางทราฟฟิกในช่วงในการวางเครื่องส่งยูคเฟสแสง ไม่สามารถซ้อนทับได้ดังรูปที่ 3.3 แถบแรเงาสีเทาคือช่วงที่สามารถวางเครื่องส่งยูคเฟสแสงได้จากสมการ(3.3)และ(3.4)ซึ่งสาเหตุที่เกิดปัญหานี้ เนื่องจากว่าทราฟฟิกมีระยะทางที่แตกต่างกันมากเกินไปดังรูปที่ 3.4 ซึ่งถ้าเราจะวางเครื่องส่งยูคเฟสแสงโดยไม่สนใจหลักการซ้อนทับแล้ว อาจจะทำให้การวางเครื่องส่งยูคเฟสแสงมีการวางที่ใกล้เกินไป หรือไม่ก็ห่างเกินไป ทำให้เกิดปัญหาดิสเพอร์ชันสะสมเกินขีดจำกัดที่ปลายทางดังรูปที่ 3.5



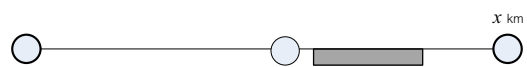
รูปที่ 3.3 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการซ้อนทับไม่ได้ทุกกราฟฟิค



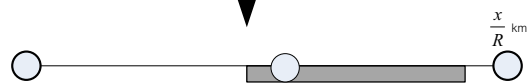
(ก)



(ข)

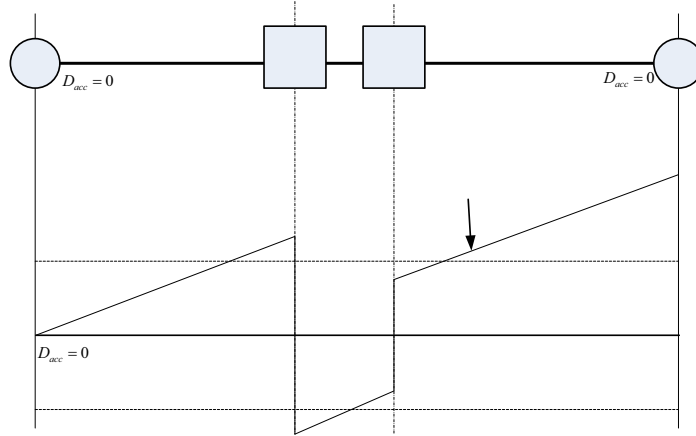


ลดขนาดลงมา R



(ค)

รูปที่ 3.4 การหาค่า R



รูปที่ 3.5 ปัญหาระยะทางในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงใกล้เคียงเกินไป

รูปที่ 3.4 เป็นรูปประกอบการหาค่า R ต่อไปนี้จะยกตัวอย่างการคำนวณเพื่อความเข้าใจมากขึ้น ดังนี้

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

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

ทราฟฟิกร A:

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

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

ทราฟฟิกร B:

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

ดังนั้น ทราฟฟิกร A จะมีช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงเท่ากับ 953.02 - 1046.98 km

ทราฟฟิกร B จะมีช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงเท่ากับ 453.02 - 546.98 km

รูปที่ 3.4(ก) แสดงตัวอย่างช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ไม่สามารถทำการซ้อนทับกันได้ จากการคำนวณข้างต้น

จะเห็นได้ว่า การหาช่วงของการซ้อนทับเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้น ระยะทางของทราฟฟิกมีผลต่อการหาช่วงในการซ้อนทับเครื่องส่งยุคเฟสแสง รูปที่ 3.4(ข) สมมติว่าทราฟฟิกมีทิศทางจากซ้ายไปขวา โดยโนดต้นทาง-ปลายทางจะเป็นสีดำ จะเห็นว่าปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้ไม่สามารถซ้อนทับช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง(แถบแรเงาสีเทา)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)

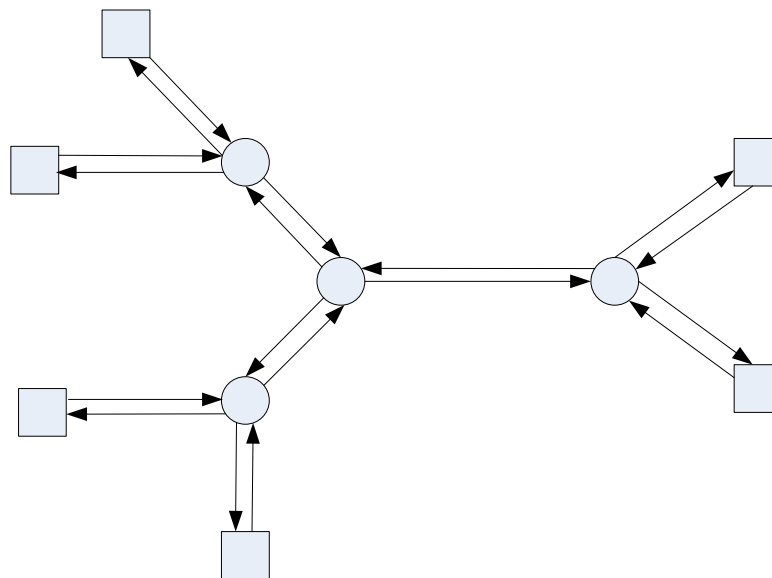
และ R ต้องไม่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 (ถ้าน้อยกว่า 1 แสดงว่าไม่ต้องลดขนาด) และต้องประเมินทั้งโครงข่ายโดยเลือกแต่ละทราฟฟิกที่มีระยะทางมากที่สุดที่ประกอบด้วยข่ายเชื่อมโยงข่ายเดียวกัน เช่นรูปที่ 3.4(ก) จะเลือกทราฟฟิก A ไม่เลือกทราฟฟิก B เพราะทราฟฟิก A มีระยะทางมากกว่าทราฟฟิก B ซึ่งมีข่ายเชื่อมโยงแรกเป็นข่ายเชื่อมโยงที่ 1 เหมือนกัน จากนั้นจะเลือกค่า R ที่สูงที่สุดที่หามาได้จากแต่ละทราฟฟิก

จากสมการที่ (3.5)-(3.7) เป็นการแสดงวิธีหาค่า R ที่สามารถทำให้ลดขนาดโครงข่ายจนกระทั่งทำให้ตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง (x_{OPC_L}) อยู่พอดีที่โนดหรือปลายทางของข่ายเชื่อมโยงแรกๆของทราฟ

ฟิก ดังรูปที่ 3.4(ค) ถ้าเราลดขนาดโครงข่ายด้วยค่า R น้อยกว่าที่หามาได้ จะทำให้เกิดปัญหาไม่สามารถซ้อนทับได้ทุกทราฟฟิกดังรูปที่ 3.3-3.4 เพื่อความเข้าใจมากขึ้น จะขอยกตัวอย่างประกอบในหัวข้อถัดไป

3.3 ตัวอย่างการคำนวณ

ต่อไปเป็นโครงข่ายตัวอย่างประกอบ



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างโครงข่ายแบบแพร์และเลือกสัญญาณที่นำมาคำนวณ

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า โครงข่ายตัวอย่างมีโนดทั้งหมด 4 โนด 6 สถานี และมีสายเชื่อมโยงทั้งหมด 18 สาย ทิศทางการสื่อสารจะเป็นแบบสองทิศทาง (bi-directional) จะแสดงวิธีหาดำแหน่งเครื่องส่งยูคเฟสแสงตามระเบียบวิธีที่กล่าวไว้ข้างต้นดังนี้

1. คำนวณหาระยะทางของทราฟฟิก รวมทั้งสายเชื่อมโยงที่ทราฟฟิกของทุก ๆ สถานี จำนวนทราฟฟิกของข้อมูลทั้งหมดคือ $N \times (N-1)$ เมื่อ N คือ จำนวนสถานีทั้งหมด ดังนั้นเราจะได้จำนวนทราฟฟิกทั้งหมด 30 ทราฟฟิก จากต้นทางสถานีไปยังปลายทางสถานี ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนทราฟฟิกและสายเชื่อมโยงทั้งหมดในแต่ละทราฟฟิก โดย ค่าตัวแปรที่แสดงตัวแปรในตาราง คือ OPC_L คือขอบเขตด้านซ้ายของตำแหน่งเครื่องส่งยูคเฟสแสง, OPC_R คือขอบเขตด้านขวาของตำแหน่งเครื่องส่งยูคเฟสแสง ส่วนตัวเลขในช่องสายเชื่อมโยงคือหมายเลขของสายเชื่อมโยงตามรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 แสดงจำนวนทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดในโครงข่ายตัวอย่าง

สถานีที่ 1	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R	สถานีที่ 4	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง[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]	ข่ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R	สถานีที่ 5	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง[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]	ข่ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R	สถานีที่ 6	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง[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

ดังนั้น เราจะได้ค่าดีสเพอร์ชันของแต่ละสถานีจากสมการ

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

เมื่อ λ คือค่าความยาวคลื่นที่กำหนดให้แต่ละสถานี ซึ่งได้ทำการกำหนดความยาวคลื่นให้กับแต่ละสถานี ดังนี้ 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 และ สถานีที่ 6 ใช้ความยาวคลื่น 1557.36 nm

ดังนั้น จากสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 6 เราจะได้ค่าดีสเพอร์ชันของแต่ละสถานีเท่ากับ 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 แสดง ความยาวคลื่นและดิสเพอร์ชันของแต่ละสถานี

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)

ตัวอย่างต่อไปนี้ จะแสดงวิธีการหาตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิก

ตัวอย่าง ทราฟฟิกจากสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 2 มีระยะทางทั้งหมด 100 km จากตารางที่ 3.1

สถานีที่ 1 มีค่าดิสเพอร์ชัน = 16.95 ps/km/nm

จากสมการที่ (3.3) จะได้ตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงด้านซ้ายคือ

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

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

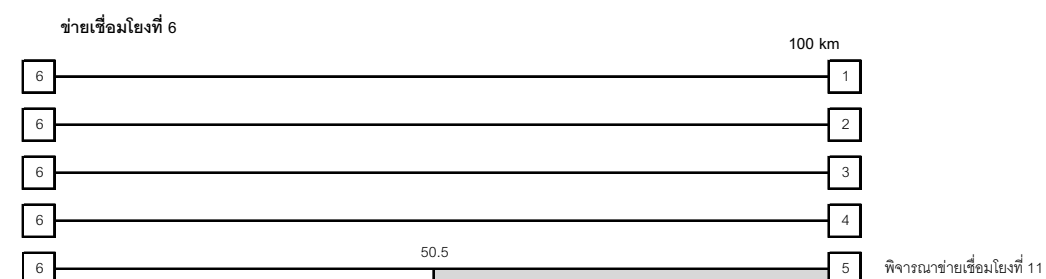
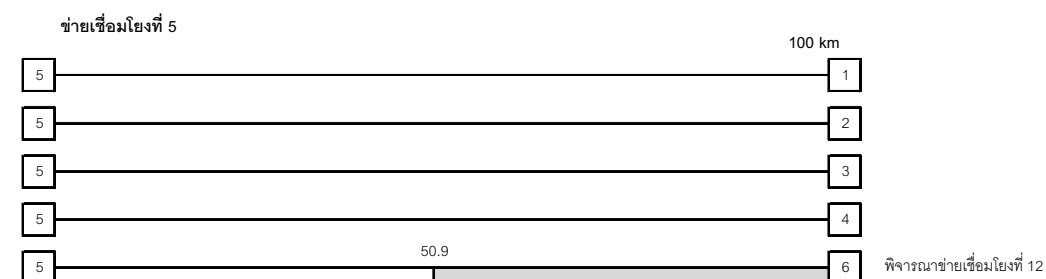
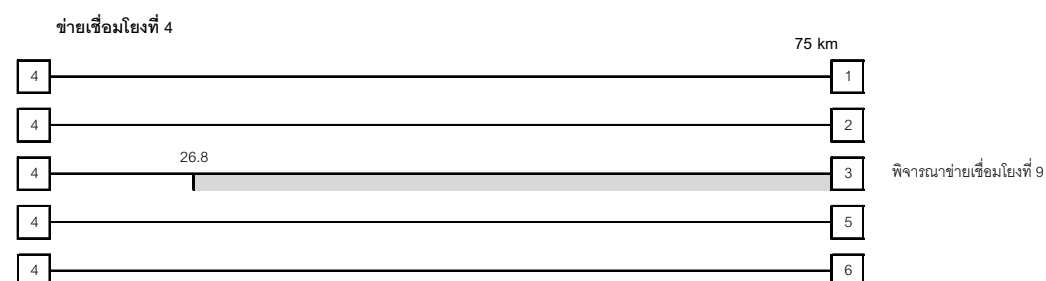
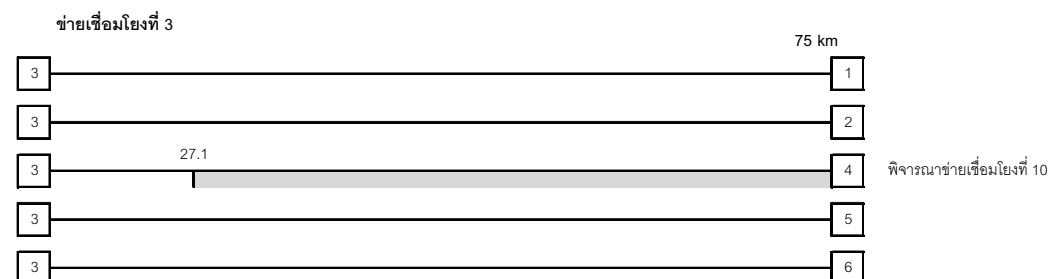
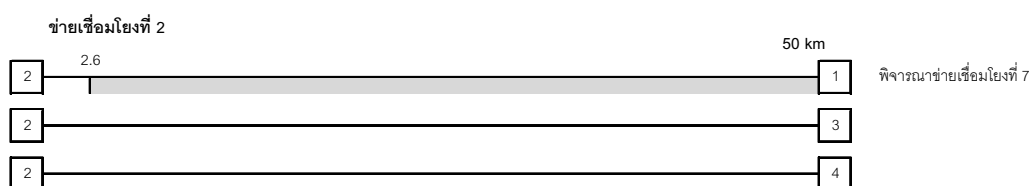
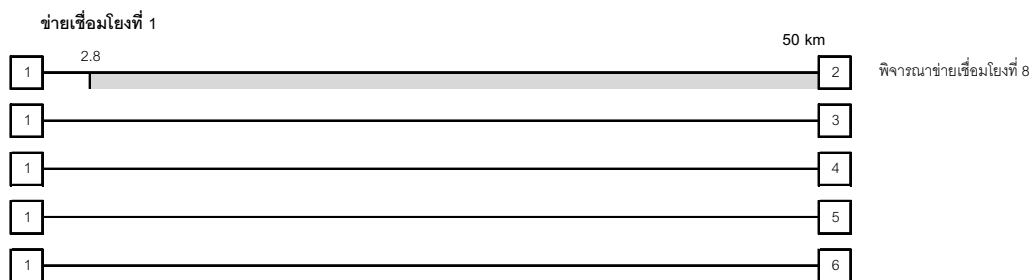
จากสมการที่ (3.4) จะได้ตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงด้านขวาคือ

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

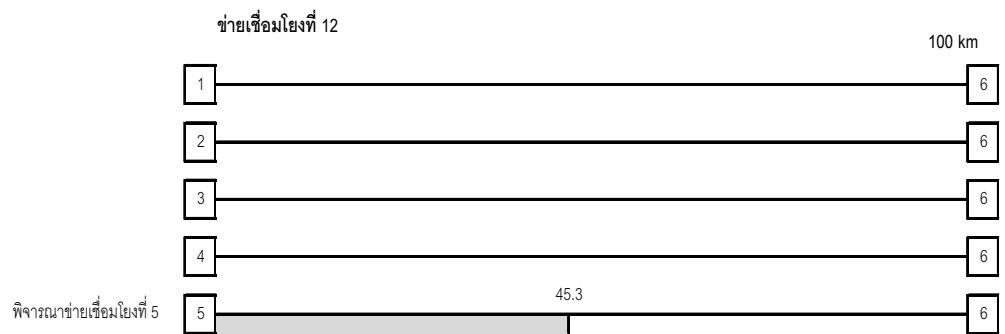
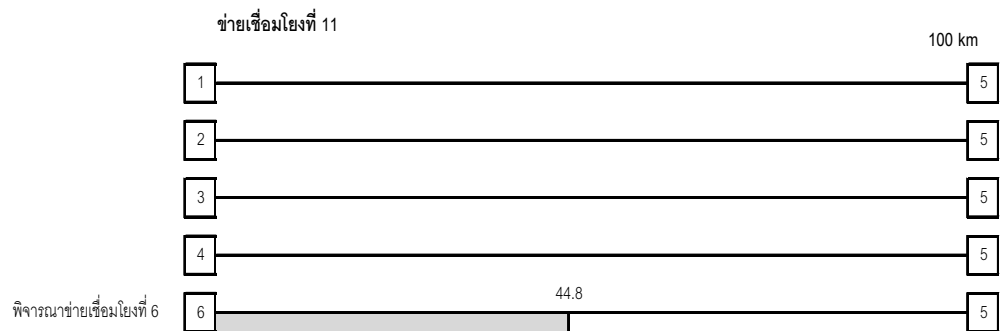
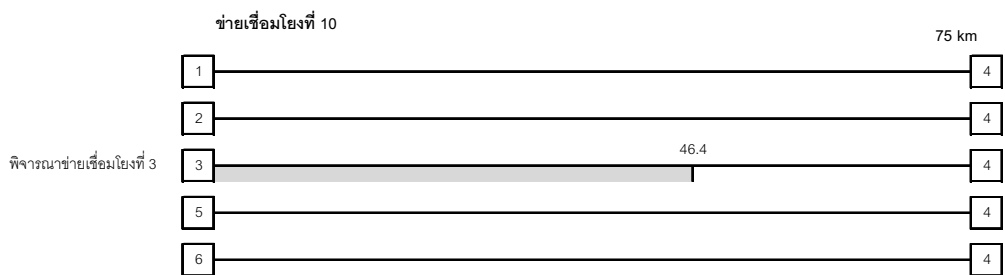
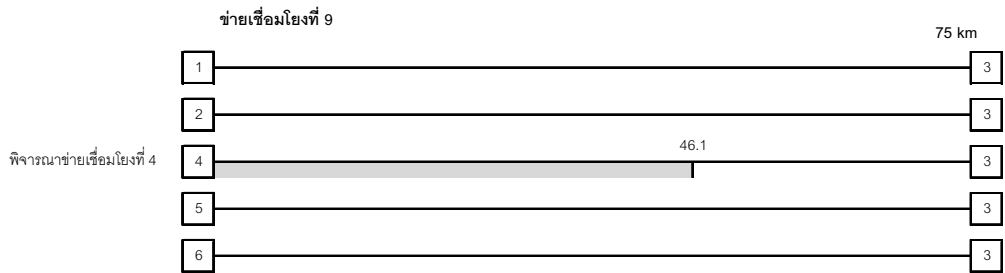
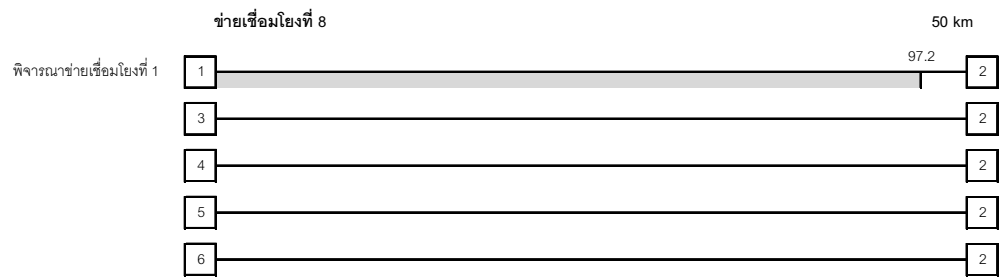
$$x_{OPC_R} = 97.20 \quad \text{km}$$

เพราะฉะนั้น จะได้ช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงคือ 2.80 - 97.20 km

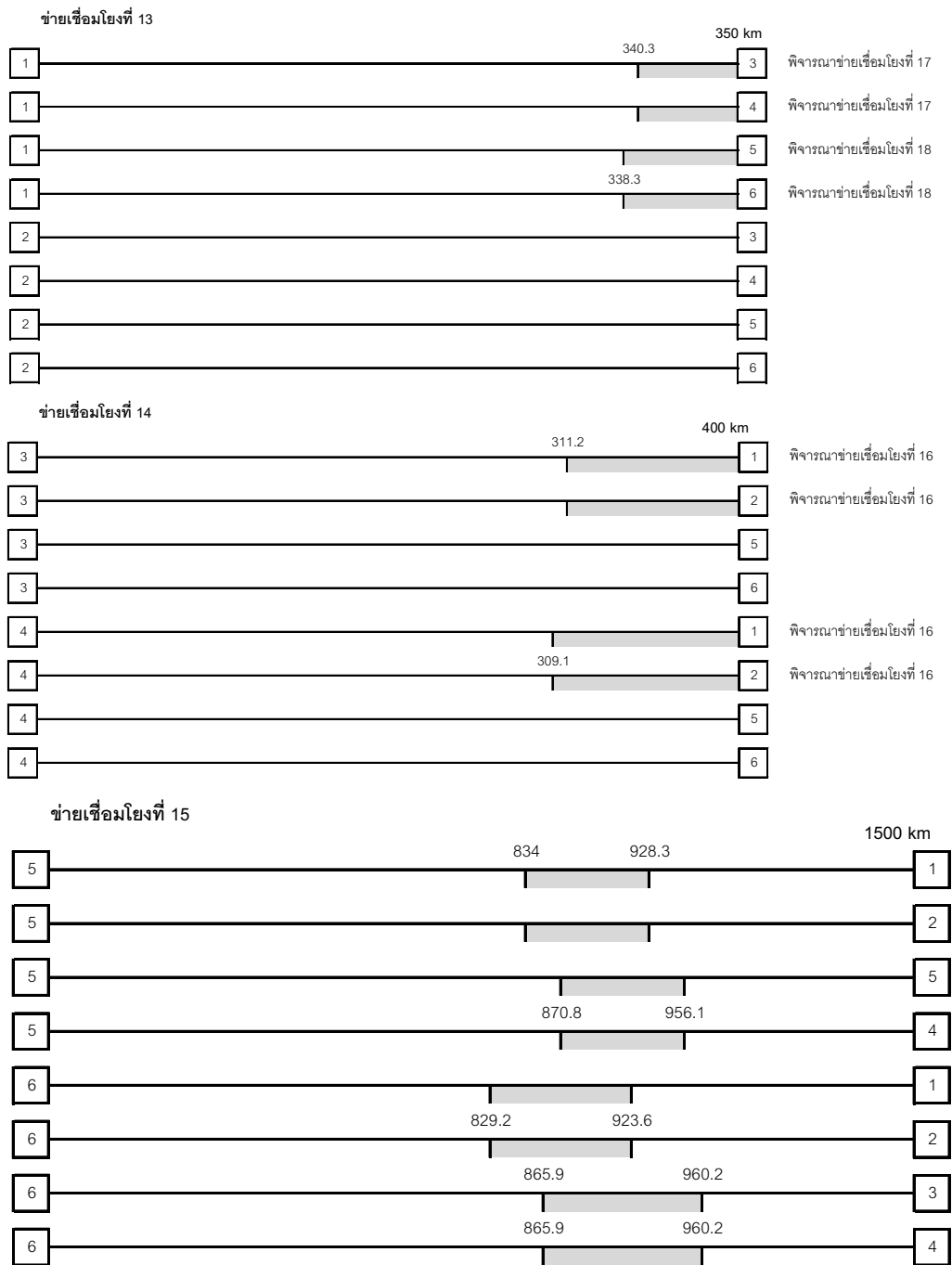
3. นำผลที่ได้จากข้อ 2. มาคิดหาตำแหน่งซ้อนทับ รูปที่ 3.7 แสดงวิธีการพิจารณาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละข่ายเชื่อมโยง ซึ่งจะบอกว่าในแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีทราฟฟิกอะไรอยู่ในข่ายนั้นๆบ้าง เช่นในรูปที่ 3.7 ข่ายเชื่อมโยงที่ 1 จะมีทราฟฟิกระหว่างโนด 1 ไปโนด 2 โนด1 ไปโนด 3 โนด1 ไปโนด 4 โนด1ไปโนด 5 และโนด 1 ไปโนด 6 เป็นต้น ส่วนรูปที่ 3.8 เป็น ทราฟฟิกและตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 3-7



(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 8-12



(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13-15

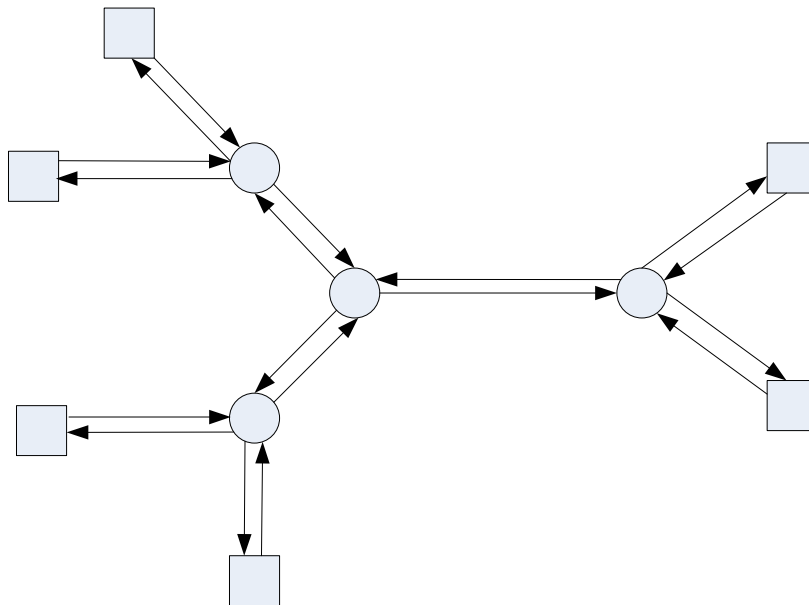
จากรูปที่ 3.8 จะพบว่า ถ้าจะคิดโดยไม่สนใจว่าต้องซ้อนทับทุกๆ ทราฟฟิกในแต่ละข่ายเชื่อมโยง จะต้องใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งหมด 18 ตัวเท่ากับจำนวนข่ายเชื่อมโยง ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว เพียงแค่วางตรงกลางของแต่ละข่าย ก็ทำให้ทุกๆ ทราฟฟิกสามารถเดินทางได้หมดโดยดีสเพอร์ชันสะสมไม่เกินขีดจำกัดที่ปลายทางเช่นกัน ดังนั้นเราจะใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีที่คิดขึ้นมา โดยต้องหาค่า R ก่อน ซึ่งจากสมการที่ (3.7) ตัวแปรที่เราจะต้องใส่ค่าในสมการคือระยะทางทราฟฟิกที่ยาวที่สุดและความยาวของข่ายเชื่อมโยงข่ายแรกที่ใช้ส่ง ส่วน D_{λ} เป็นค่าดีสเพอร์ชันของแต่ละสถานี 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

ข่ายเชื่อมโยงได้ จากตารางจะเห็นว่า ค่า R ทมากที่สุดคือ 20.20 หรือลดขนาดโครงข่ายลงมา 20.20 เทา ซึ่งถ้าเราใช้ค่า R ที่น้อยกว่านี้ เช่น 10 เทา บางทราฟฟิกก็ยังคงเกิดปัญหาที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2.2 หรือก็คือปัญหาการซ้อนทับไม่ได้ทุกทราฟฟิก ตารางที่ 3.4 จะแสดงถึงทราฟฟิกและตำแหน่งในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ลดขนาดลงแล้ว รูปที่ 3.9 เป็นโครงข่ายที่ลดขนาดลง 20.20 เทา

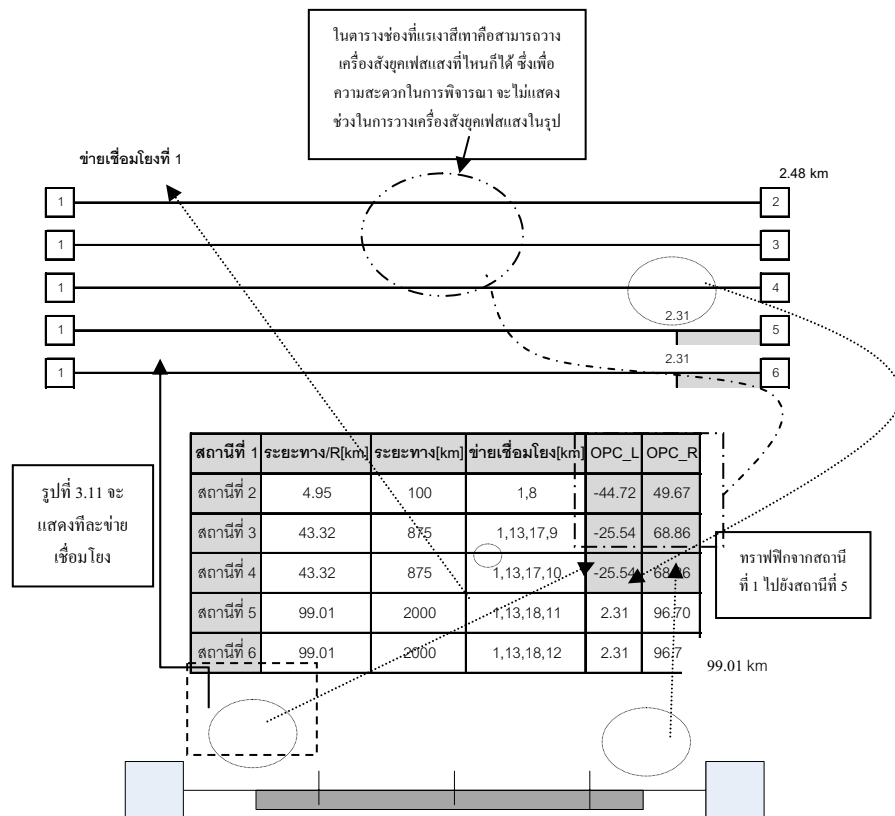


รูปที่ 3.9 โครงข่ายตัวอย่างที่ได้รับการลดขนาดลง 20.20 เท่า

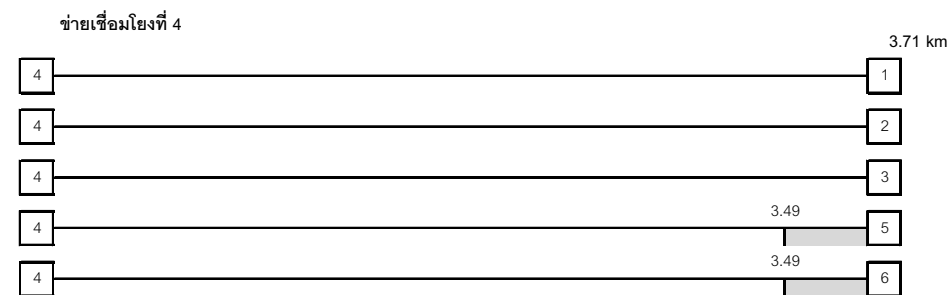
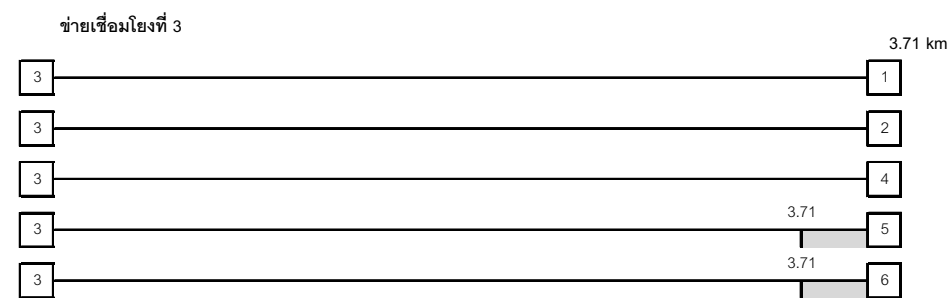
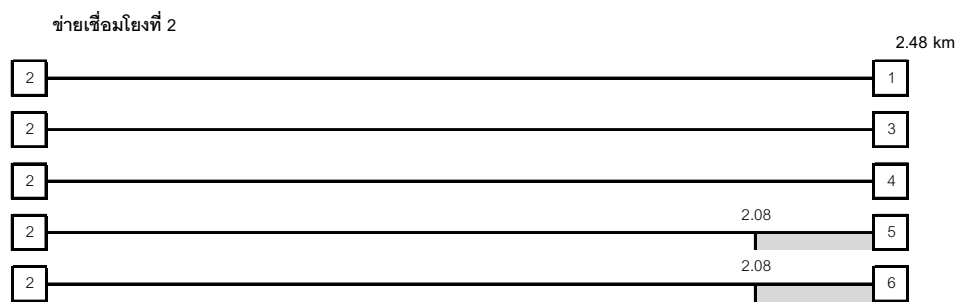
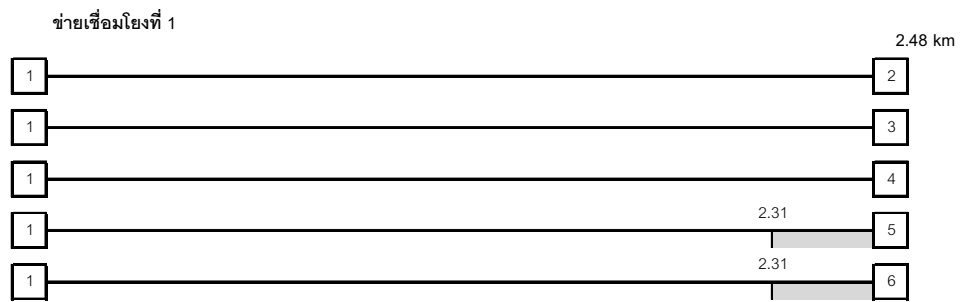
สถานีที่ 1	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R	สถานีที่ 4	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง[km]	OPC_L	OPC_R
สถานีที่ 2	4.95	100	1,8	-44.72	49.67	สถานีที่ 1	43.32	875	4,14,16,7	-26.22	69.53
สถานีที่ 3	43.32	875	1,13,17,9	-25.54	68.86	สถานีที่ 2	43.32	875	4,14,16,8	-26.22	69.53
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 : ช่องแรงเงาของ OPC_L และ OPC_R คือสามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ข่ายเชื่อมโยงตำแหน่งไหนก็ได้

เฟสแสงข่ายเชื่อมโยงที่ 1 วิธีพิจารณานี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในบทที่ 4 ได้ด้วย ช่องแรงเงาสีเทาในตาราง หมายถึงเราสามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงตรงไหนก็ได้ของกราฟฟิก ดังนั้นจึงจะไม่นำมาพิจารณาหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

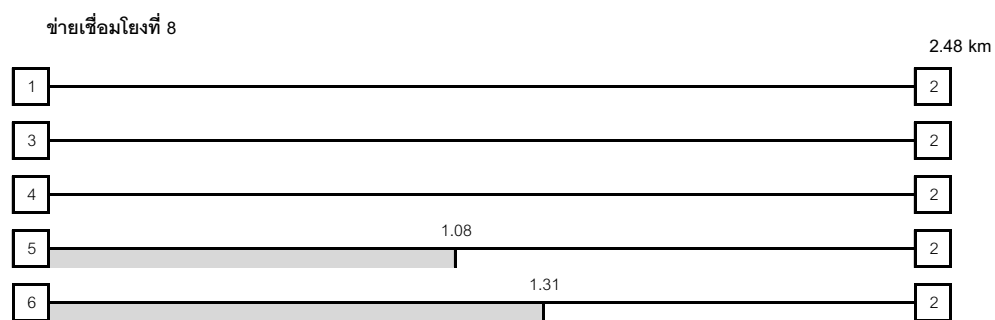
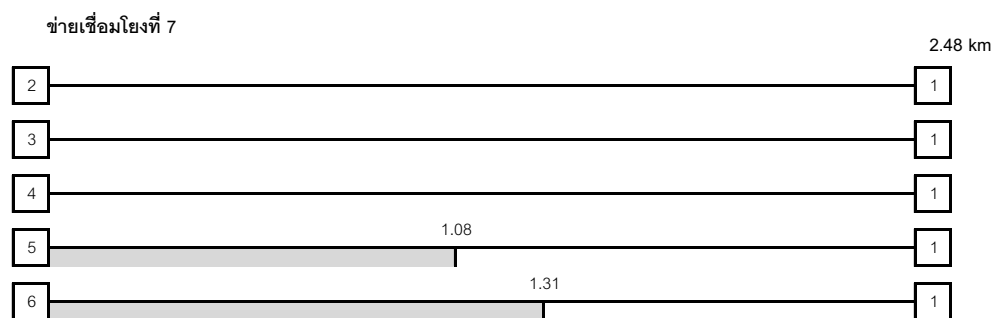
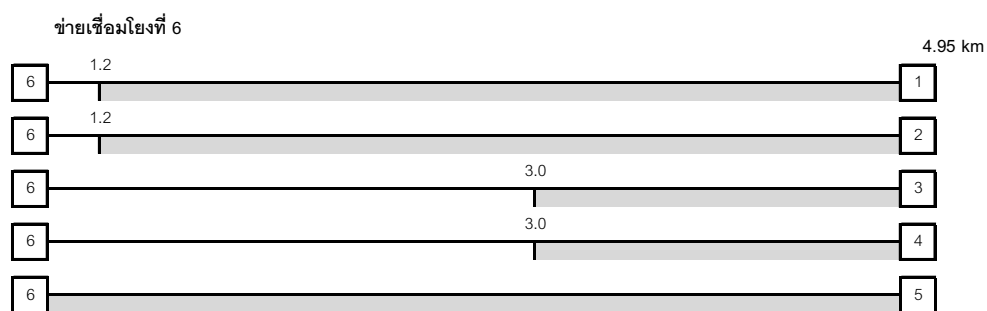
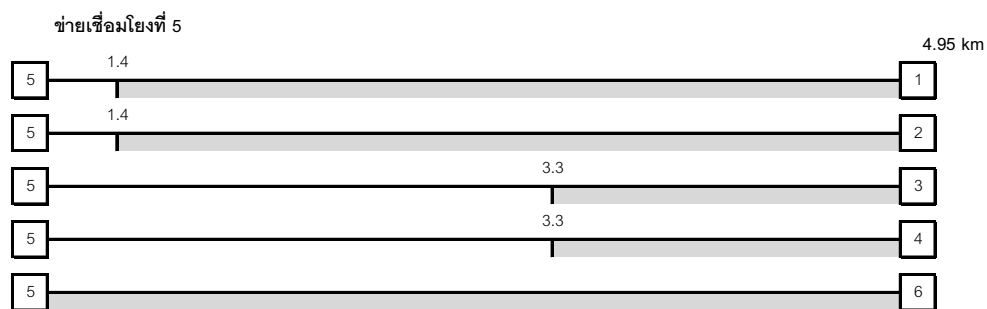


รูปที่ 3.10 วิธีพิจารณาหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง



(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 1-4

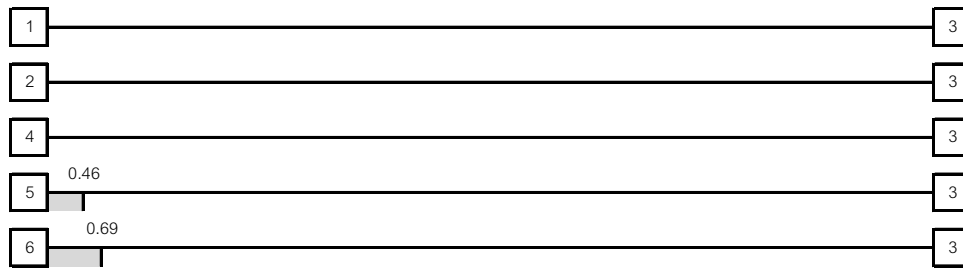
รูปที่ 3.11 ทราฟฟิกและช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายตัวอย่าง(ลดขนาด)



(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 5-8

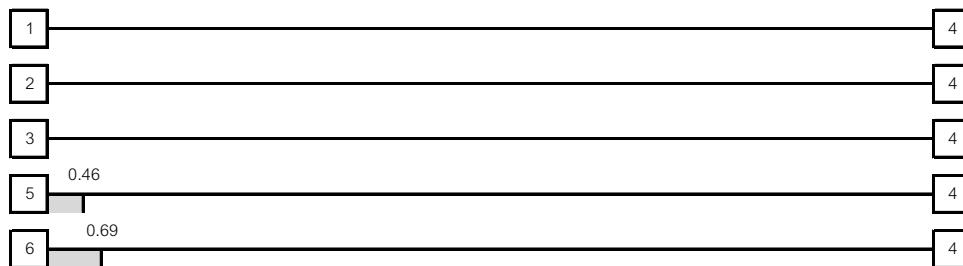
ข่ายเชื่อมโยงที่ 9

3.71 km



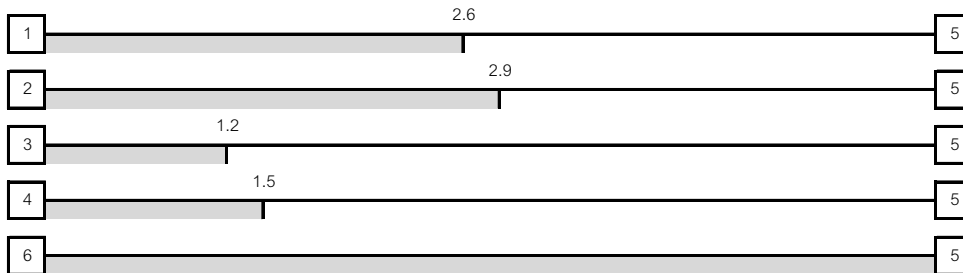
ข่ายเชื่อมโยงที่ 10

3.71 km



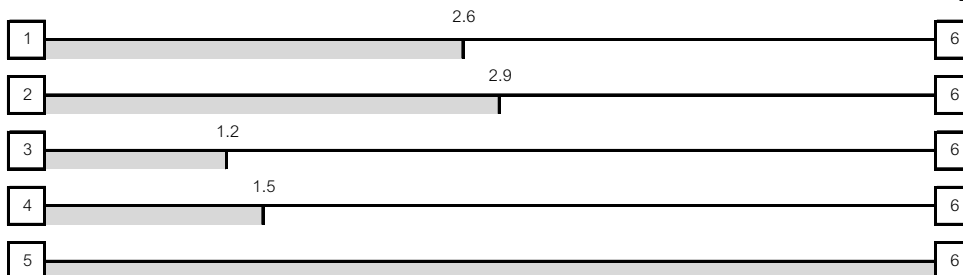
ข่ายเชื่อมโยงที่ 11

4.95 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 12

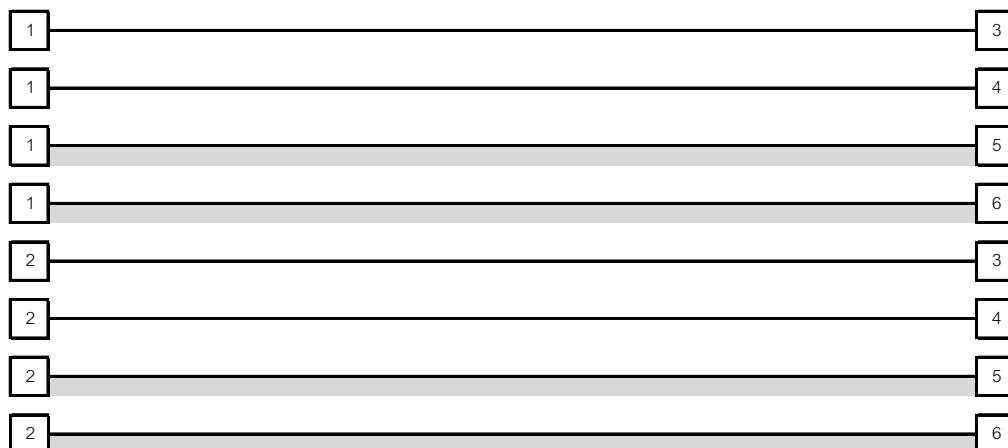
4.95 km



(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 9-12

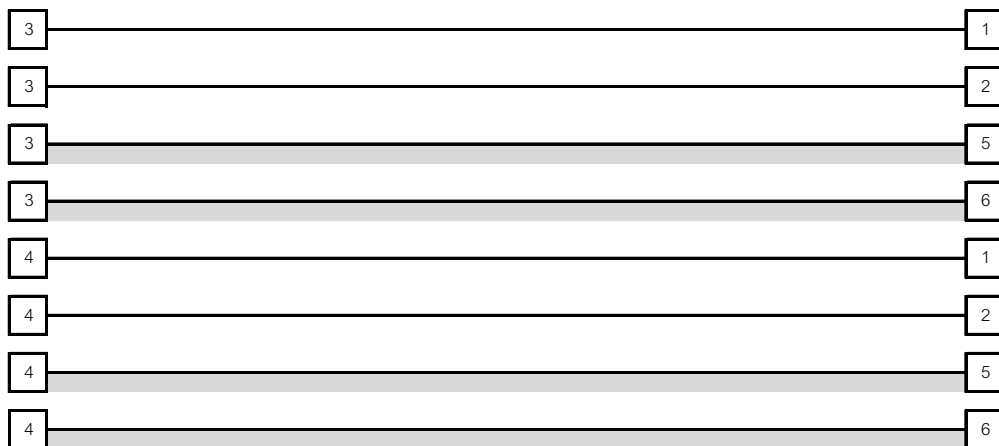
ข่ายเชื่อมโยงที่ 13

17.33 km



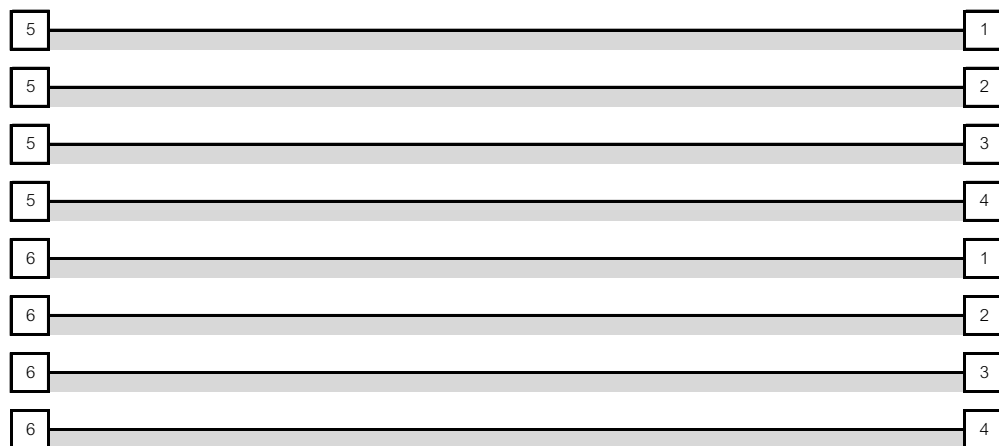
ข่ายเชื่อมโยงที่ 14

19.80 km

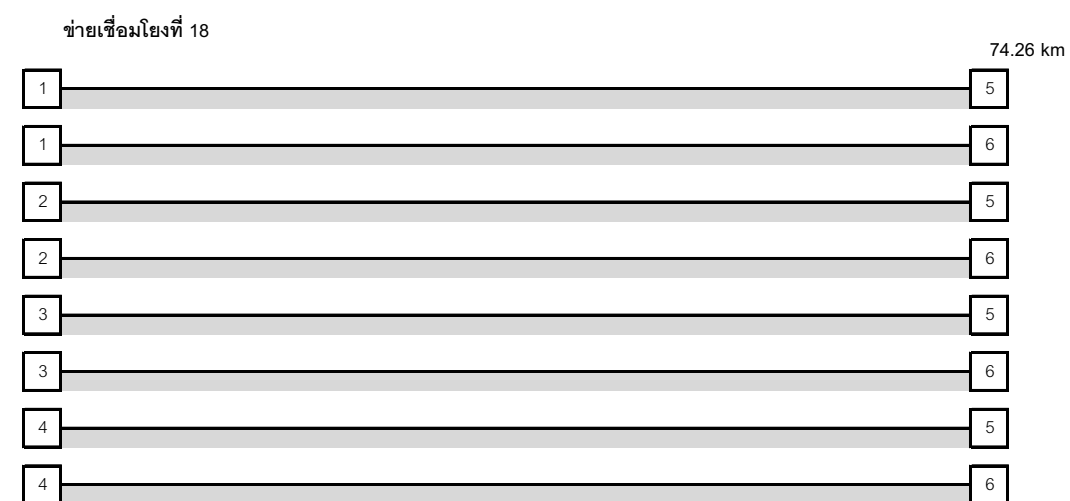
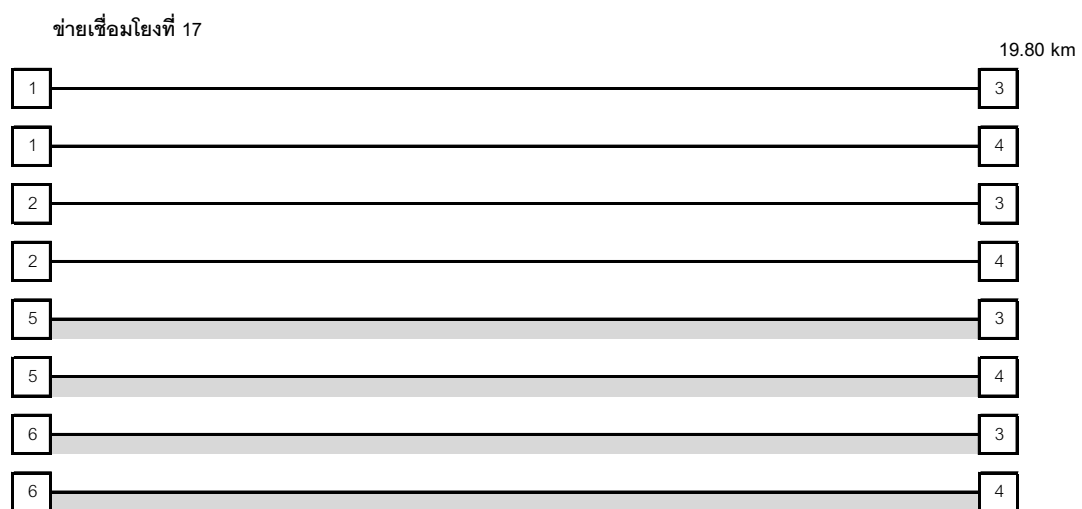
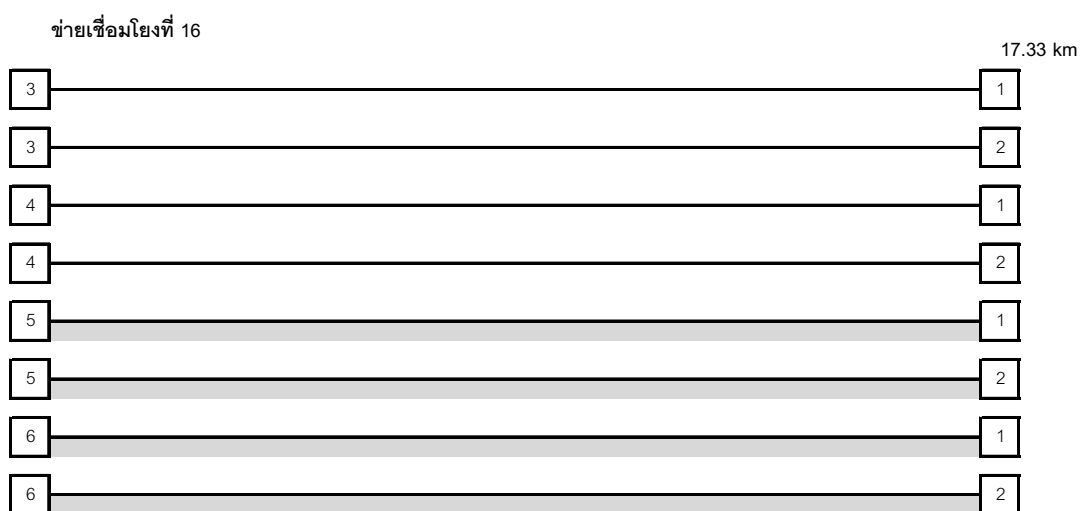


ข่ายเชื่อมโยงที่ 15

74.26 km



(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13-15



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 16-18

4. พิจารณาดำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง จะใช้วิธีพิจารณาว่าทราฟฟิกในข่ายไหนที่ต้องวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงมากที่สุด โดยจะไม่พิจารณาทราฟฟิกที่ไม่จำเป็นต้องวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ตามรูปที่ 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) เพราะแถบแรงงาสีเทาที่เหลือเมื่อพิจารณาพร้อมๆกับตารางที่ 3.4 แล้ว จะทำให้พบว่า ทราฟฟิกที่อยู่ในข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 18 นั้นเป็นทราฟฟิกเดียวกันกับทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงอื่นๆ ซึ่งเมื่อทำการซ้อนทับแล้ว จะได้ว่าซ้อนทับตรงข่ายเชื่อมโยงที่ 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)

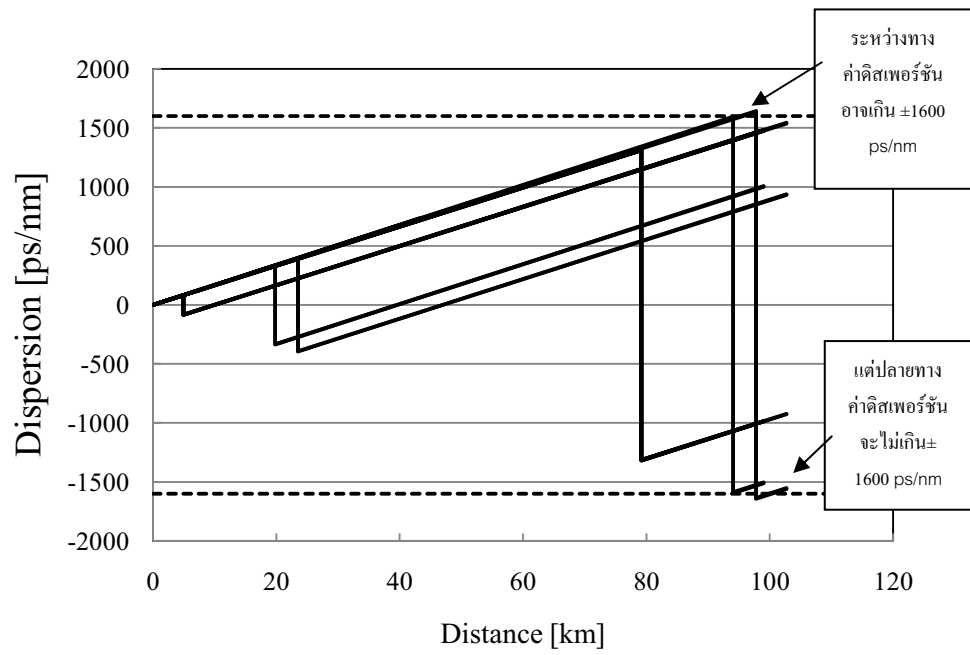
เมื่อถึงตำแหน่งที่จะต้องวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงจะทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเปลี่ยนไปตามสมการที่ (3.9)

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

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

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

และคำนวณหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมต่อไปดังสมการที่ (3.1) จนถึงสถานีปลายทาง ระหว่างทางของทราฟฟิกค่าดิสเพอร์ชันสะสมอาจจะเกิน 1600 ps/nm หรือ น้อยกว่า -1600 ps/nm ก็ได้รูปที่ 3.12 เป็นค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกๆ ทราฟฟิก



รูปที่ 3.12 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่ายตัวอย่าง

บทที่ 4

การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมช

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

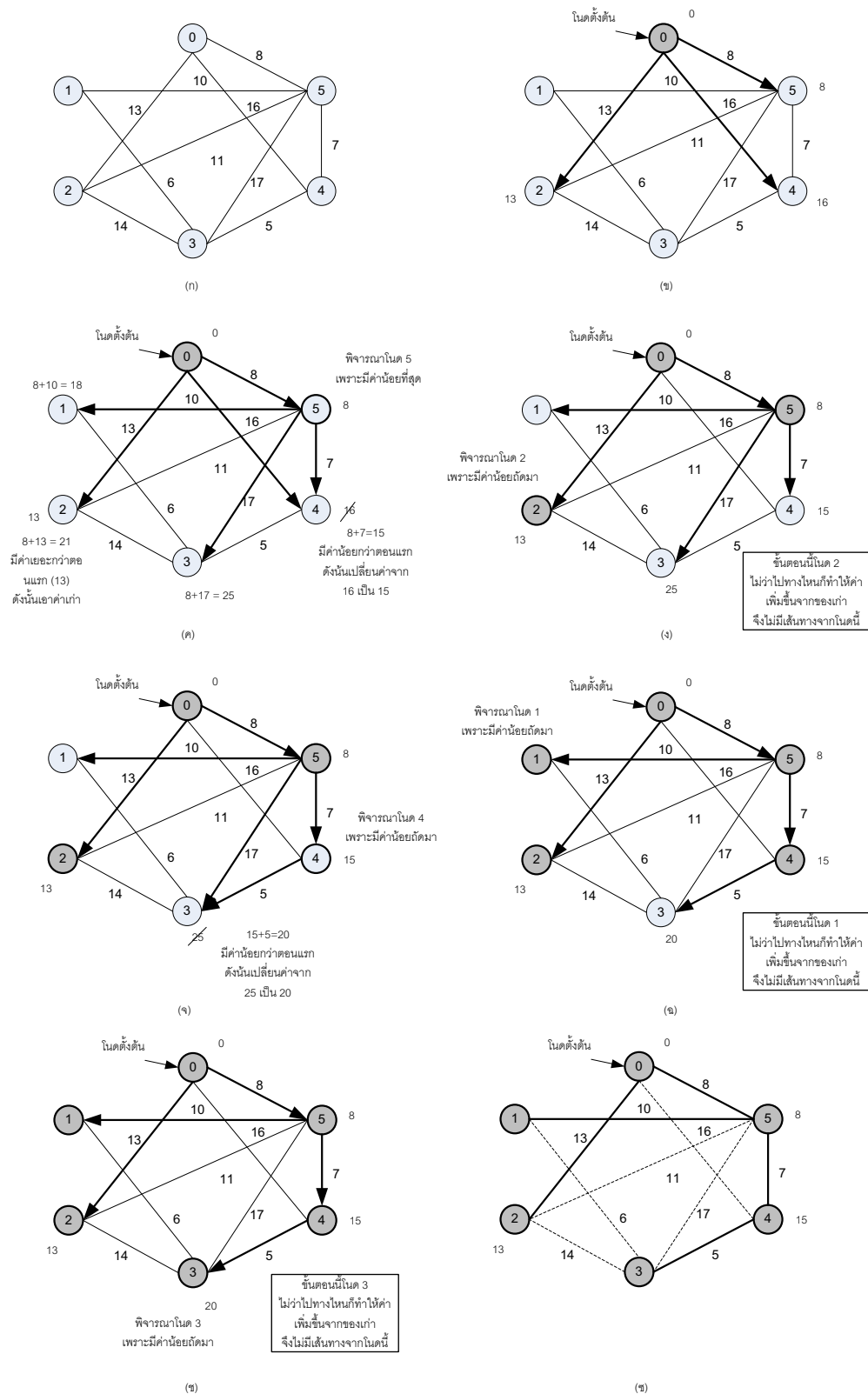
4.1 ระเบียบขั้นตอนวิธีในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

1. คำนวณหากราฟฟิกของโหนดต่างๆ โดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางแบบสั้นที่สุด(shortest path) ระหว่างโหนดใดๆ รวมถึงหาข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องในกราฟฟิกนั้น เพื่อนำมาคิดหาค่า R
2. ประเมินโครงข่ายว่าสามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงให้เหมาะสมที่สุด โดยใช้พารามิเตอร์ R เป็นตัวตัดสิน ซึ่งค่า R จะเป็นตัวตัดสินว่า ควรจะใช้การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแบบไหนระหว่างการวางที่จุดกึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงหรือวางโดยใช้ระเบียบขั้นตอนวิธีนี้
3. คำนวณหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละกราฟฟิก
4. นำตำแหน่งที่จะวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในข้อ 3. มาคิดหาตำแหน่งที่เหมาะสมในแต่ละข่ายเชื่อมโยง โดยใช้วิธีซ้อนทับ (intersection) ของทุกๆ กราฟฟิก
5. ตรวจสอบผลของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

4.2 วิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด

สิ่งที่สำคัญในโครงข่ายแบบเมชคือ การหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ซึ่งวิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดนั้นมีอยู่หลายระเบียบขั้นตอนวิธี แต่ระเบียบขั้นตอนวิธีที่เราใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ คือ ระเบียบขั้นตอนวิธีของ Dijkstra(Dijkstra's algorithm) ซึ่งเป็นวิธีที่เข้าใจง่าย และรวดเร็ว

เพื่อความเข้าใจ จะใช้รูปที่ 4.1 ประกอบการอธิบาย



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างวิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยระเบียบขั้นตอนวิธีของ Dijkstra

2. จากโนด 0 จะมีเส้นทางไปหาโนด 2 4 และ 5 ให้เอาค่าของข่ายเชื่อมโยงไปเก็บไว้ที่ปลายทางได้ดังนี้
โนด2 มีค่าเท่ากับ 13 โหนด 4 มีค่าเท่ากับ 16 และโนด 5 มีค่าเท่ากับ 8 ดังรูปที่ 4.1(ข)
3. พิจารณาโนดที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งก็คือโนด 5 จะพบว่าไม่มีเส้นทางไปหาโนด 1 โหนด 2 โหนด 3 และโนด 4 โดยจะไม่พิจารณาย้อนกลับไปหาโนดที่พิจารณาแล้ว คือโนด 0 จากนั้นก็เปลี่ยนแปลงค่าปลายทางของโนดต่างๆ โดยให้บวกค่าที่โนดที่พิจารณาอยู่กับค่าของข่ายเชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.1(ค) ที่โนด1 จะมีค่า $8+10 = 18$ โหนด 2 มีค่าเท่ากับ $8+ 13 = 21$ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าเก่าที่พิจารณาจากโนด 0 จึงไม่เลือกเส้นทางนี้ โหนด 3 มีค่าเท่ากับ $8 + 17 = 25$ สุดท้ายโนด 4 มีค่าเท่ากับ $8 + 7 = 15$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าเก่า คือ 16 ดังนั้นเลือกเส้นทางนี้และตัดเส้นทางเก่าทิ้งจากโนด 0
4. พิจารณาโนด 2 ซึ่งมีค่าของโนดน้อยที่สุดในบรรดาโนดที่ต้องพิจารณาที่เหลือ ซึ่งพบว่าไม่มีเส้นทางไหนที่มีค่าของโนดเพิ่มขึ้นจากของเก่า ดังนั้นไม่มีเส้นทางต่อจากโนดนี้ ดังรูปที่ 4.1(ง)
5. รูปที่ 4.1(จ) พิจารณาโนด 4 ซึ่งพิจารณาเช่นเดียวกับข้อ 3. จะได้ว่า เปลี่ยนแปลงค่าจากโนด 4 ไปโนด 3 เป็น $15 + 5 = 20$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของเก่า จึงเลือกเส้นทางนี้
6. รูปที่ 4.1(ฉ) และ 4.1(ช) ไม่มีเส้นทางพิจารณาจากโนด 1 และ โหนด 3 เพราะมีค่ามากกว่าของเก่า
7. รูปที่ 4.1(ซ) แสดงเส้นทางที่สั้นที่สุดของแต่ละคู่โนด

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

4.3 ตัวอย่างการคำนวณ

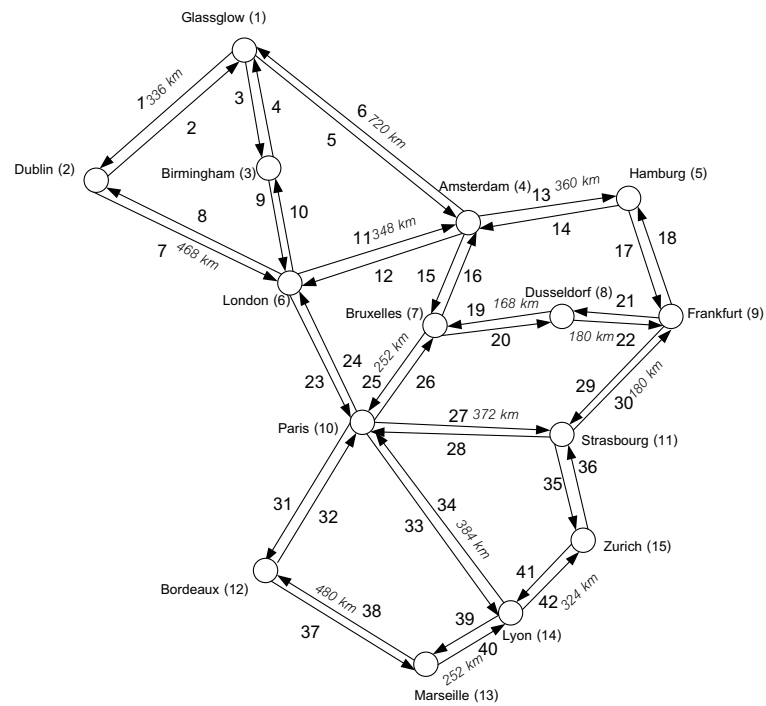
โครงข่ายตัวอย่างในบทนี้ ใช้เส้นใยแสงแบบโมดคลื่นเดียว (single-mode fiber : SMF, ITU-T G.652) โดยมีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ 16.5 ps/km/nm และความชันของค่าดิสเพอร์ชันที่ $0.05 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ ที่ 1550 nm ความยาวคลื่นที่ใช้ นำมาจาก ITU-T G.692 [38] ซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ $1528.77 - 1560.61 \text{ nm}$ 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 เพราะว่าค่าดิสเพอร์ชันจากความยาวคลื่นอื่นๆ นั้นจะมีค่าน้อยกว่า ค่าจากสมการที่ (4.1) ดังนั้นถ้าค่าดิสเพอร์ชันที่มากที่สุดสามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและผ่านค่าดิสเพอร์ชันลิมิตได้ ความยาวคลื่นค่าอื่นๆ 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 4.1กราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่ายERNet

(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	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
โหนด 3	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 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. คำนวณค่า R ซึ่งจะเป็นตัวที่บอกว่าโครงข่ายนี้ต้องการลดขนาดโครงข่ายหรือไม่ จากการคำนวณจากสมการ (3.7) จะได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า R ของโครงข่าย ERNet

โนดต้นทาง-โนดปลายทาง	ทราฟฟิก [km]	X_1 [km]	R	โนดต้นทาง-โนดปลายทาง	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

โนด 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมต่อ [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมต่อ [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
โนด 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมต่อ [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมต่อ [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]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [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]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 12	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ข่ายเชื่อมโยง [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

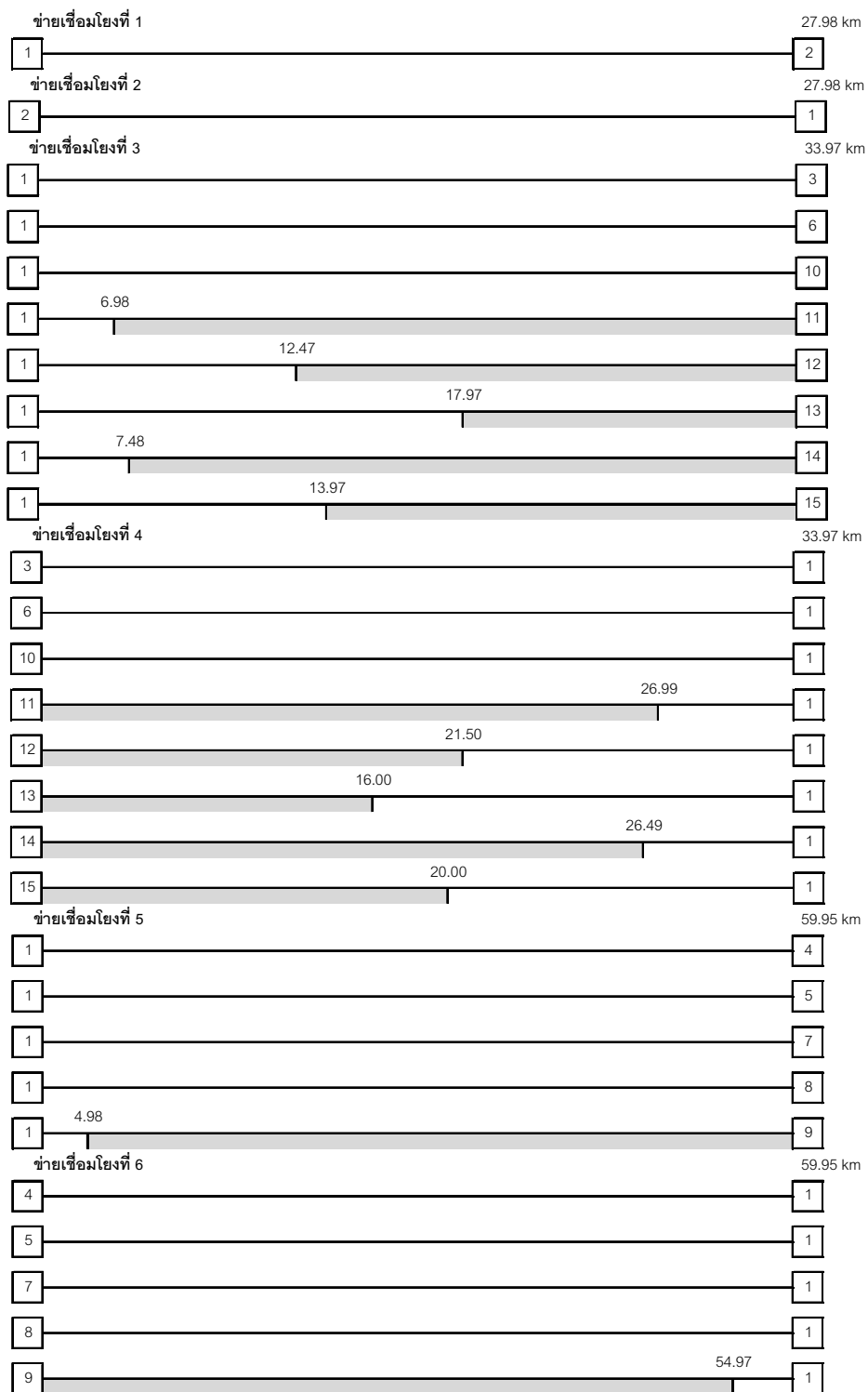
โนด 13	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 14	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	129.89	1560	40,34,24,10,4	17.97	111.92	1	108.91	1308	34,24,10,4	7.48	101.43
2	121.90	1464	40,34,24,8	13.97	107.93	2	100.92	1212	34,24,8	3.48	97.43
3	95.92	1152	40,34,24,10	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
โนด 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 ทราฟฟิกจากโนด 15 ไปยังโนด 3 นั้น ค่าในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงจะอยู่ในช่วงนอกความยาวทราฟฟิก หมายถึงช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้นวางตรงไหนก็ได้ตลอดทราฟฟิก หรือในอีกความหมายก็คือ ทราฟฟิกนั้นไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสง เพราะ ระยะทางที่มากที่สุดที่จะต้องใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงแล้วดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางไม่เกิน 1600 ps/nm ก็คือ

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

ดังนั้นถ้าทราฟฟิกไหนมีระยะทางไม่เกิน 93.95 km ก็แสดงว่าไม่จำเป็นต้องมีเครื่องส่งยุคเฟสแสงก็ได้ ในรูปที่ 4.5 จะไม่แสดงช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ทราฟฟิกระยะทางไม่เกิน 93.95 km เพื่อสะดวกในการคำนวณหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง และใช้วิธีพิจารณาเช่นเดียวกับบทที่ 3

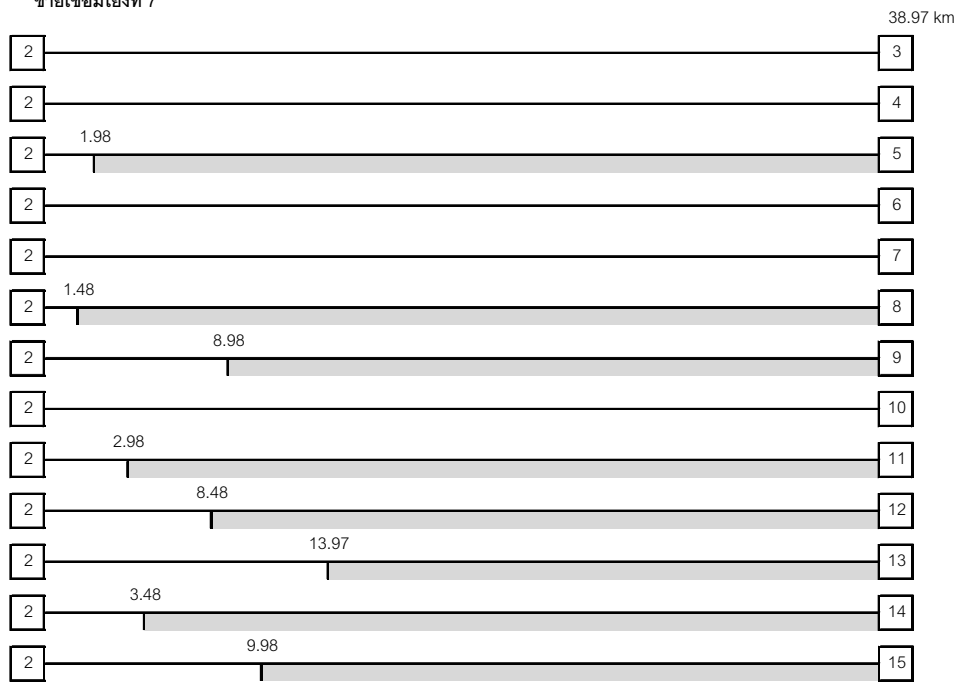




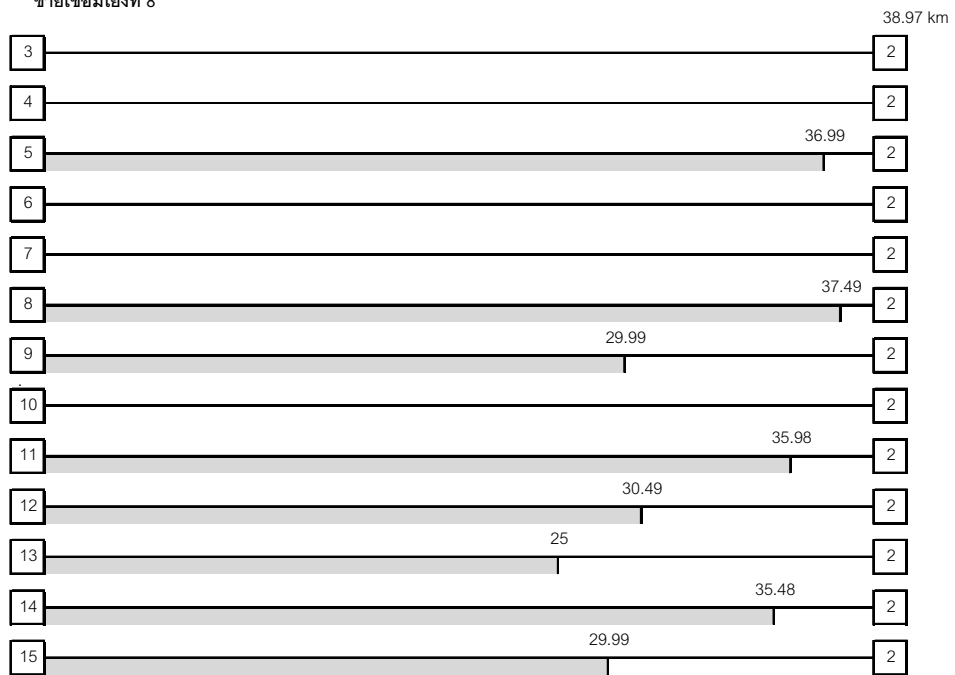
(ก) ขั้วเชื่อมต่อใยที่ 1-6

รูปที่ 4.5 ทราฟฟิกและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่าย ERNet

ข่ายเชื่อมโยงที่ 7

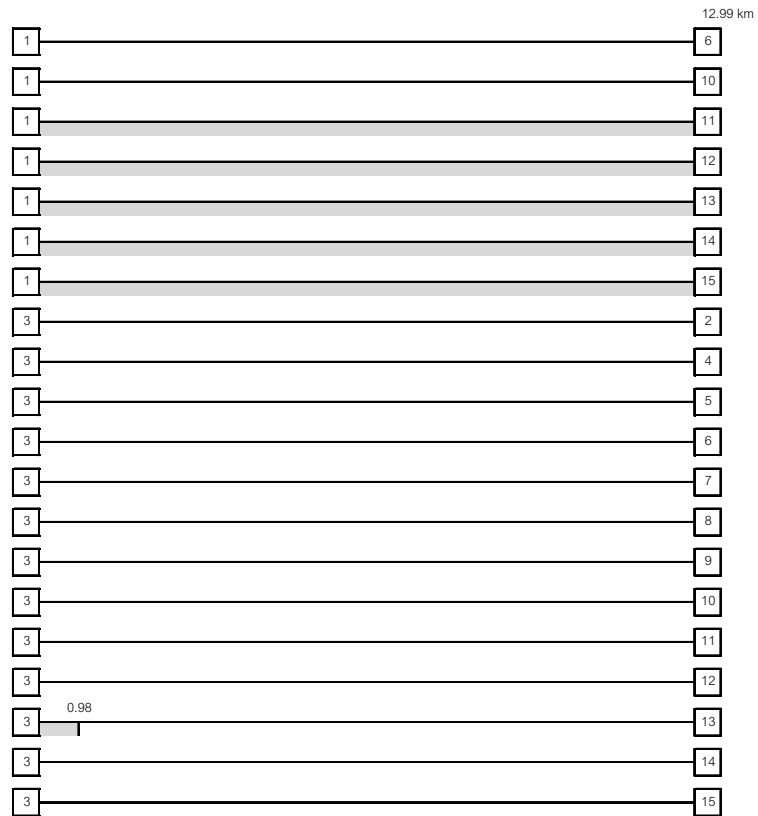


ข่ายเชื่อมโยงที่ 8

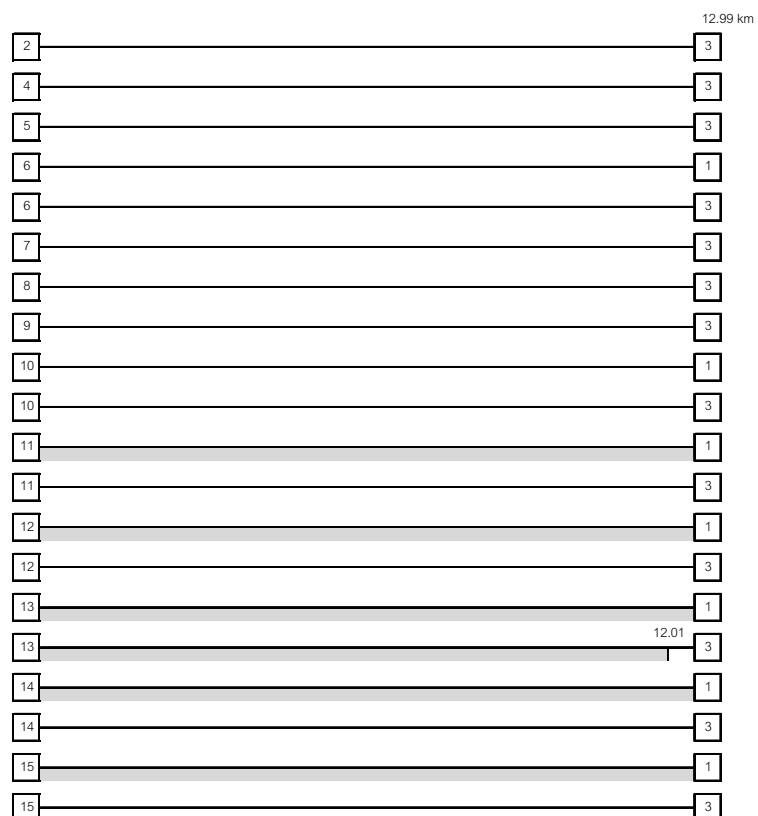


(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 7-8

ข่ายเชื่อมโยงที่ 9



ข่ายเชื่อมโยงที่ 10



(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 9-10

ข่ายเชื่อมโยงที่ 11

28.98 km

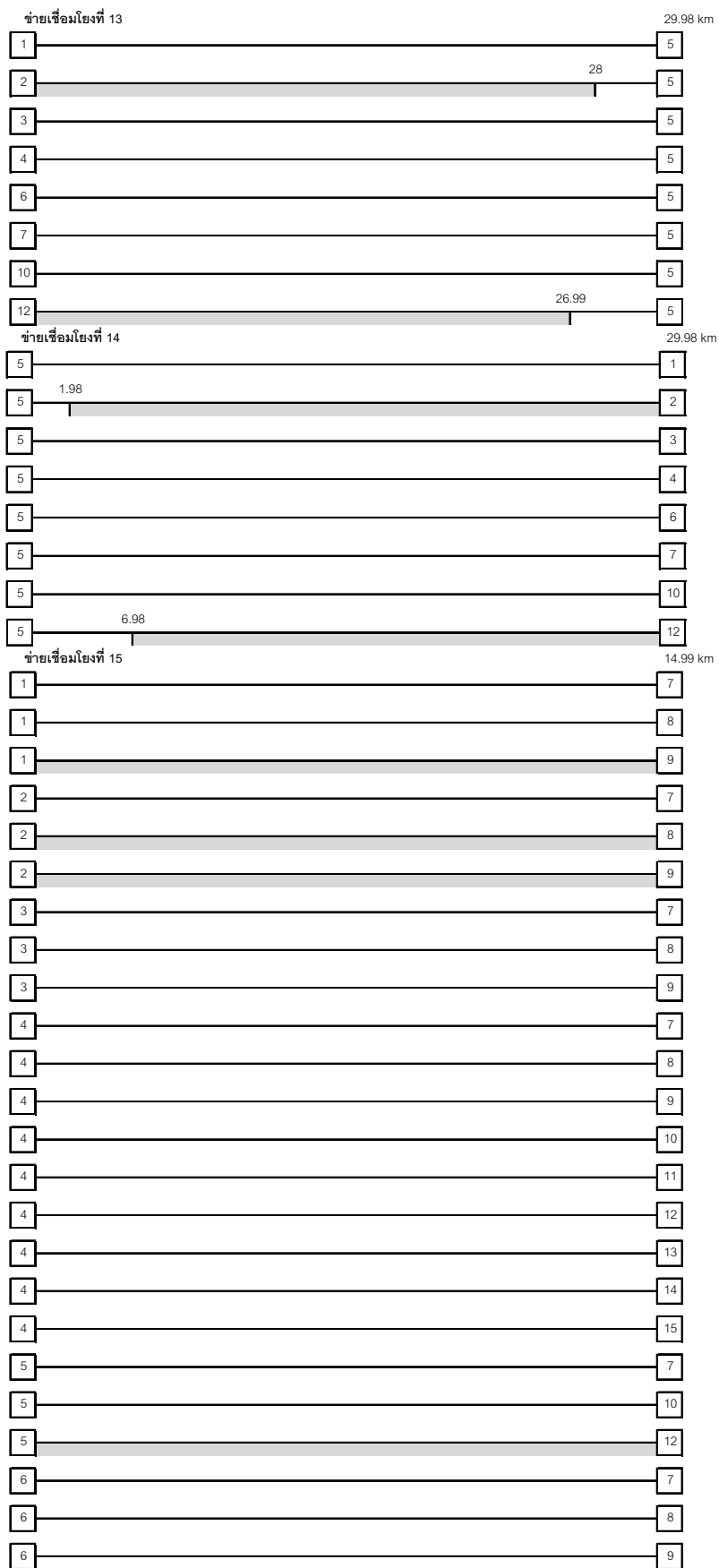
2	4
2	5
2	7
2	8
2	9
3	4
3	5
3	7
3	8
3	9
6	4
6	5
6	7
6	8
6	9

ข่ายเชื่อมโยงที่ 12

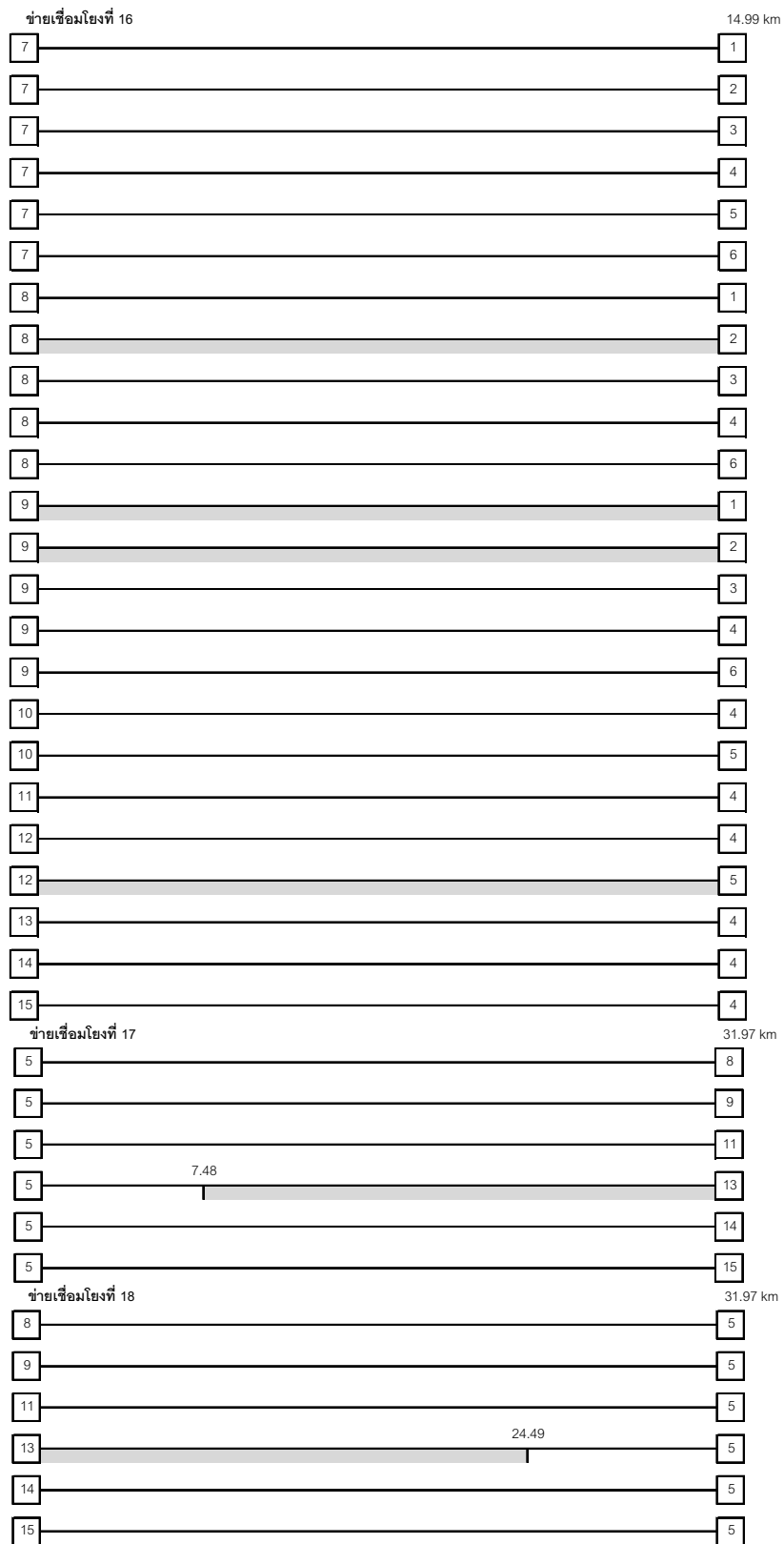
28.98 km

4	2
4	3
4	6
5	2
5	3
5	6
7	2
7	3
7	6
8	2
8	3
8	6
9	2
9	3
9	6

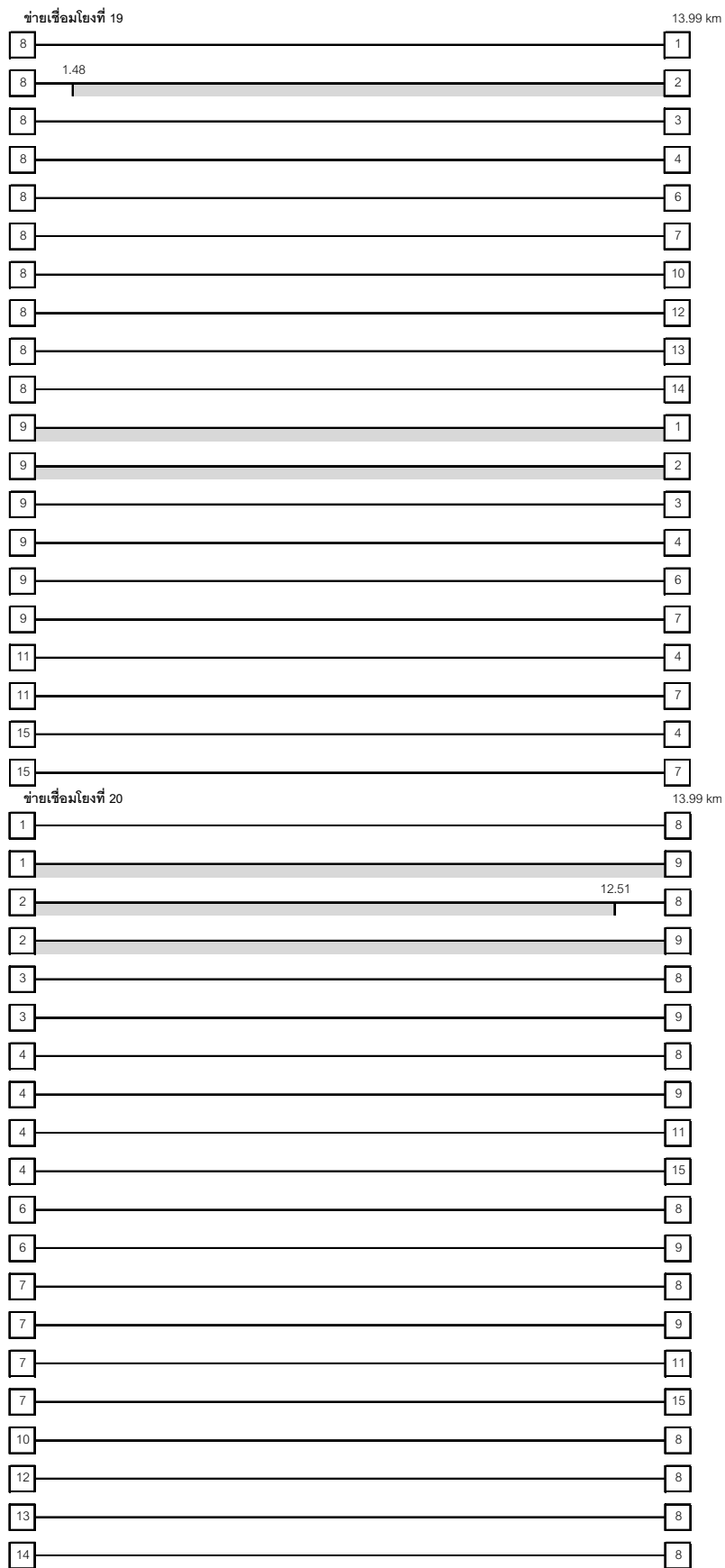
(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 11-12



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13-15

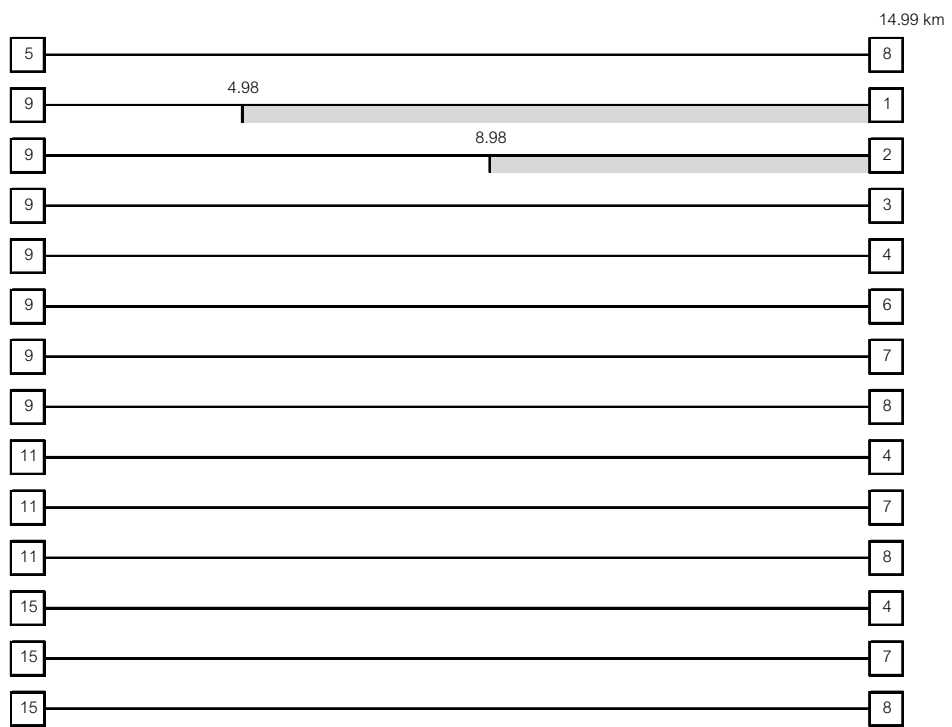


(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 16-18

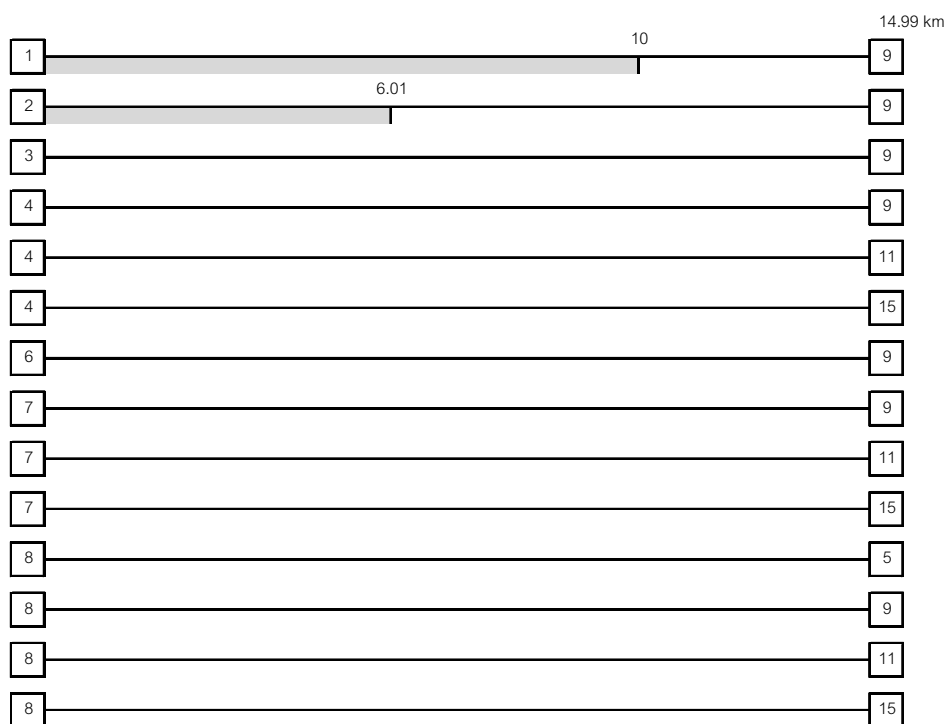


(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 19-20

ข่ายเชื่อมโยงที่ 21



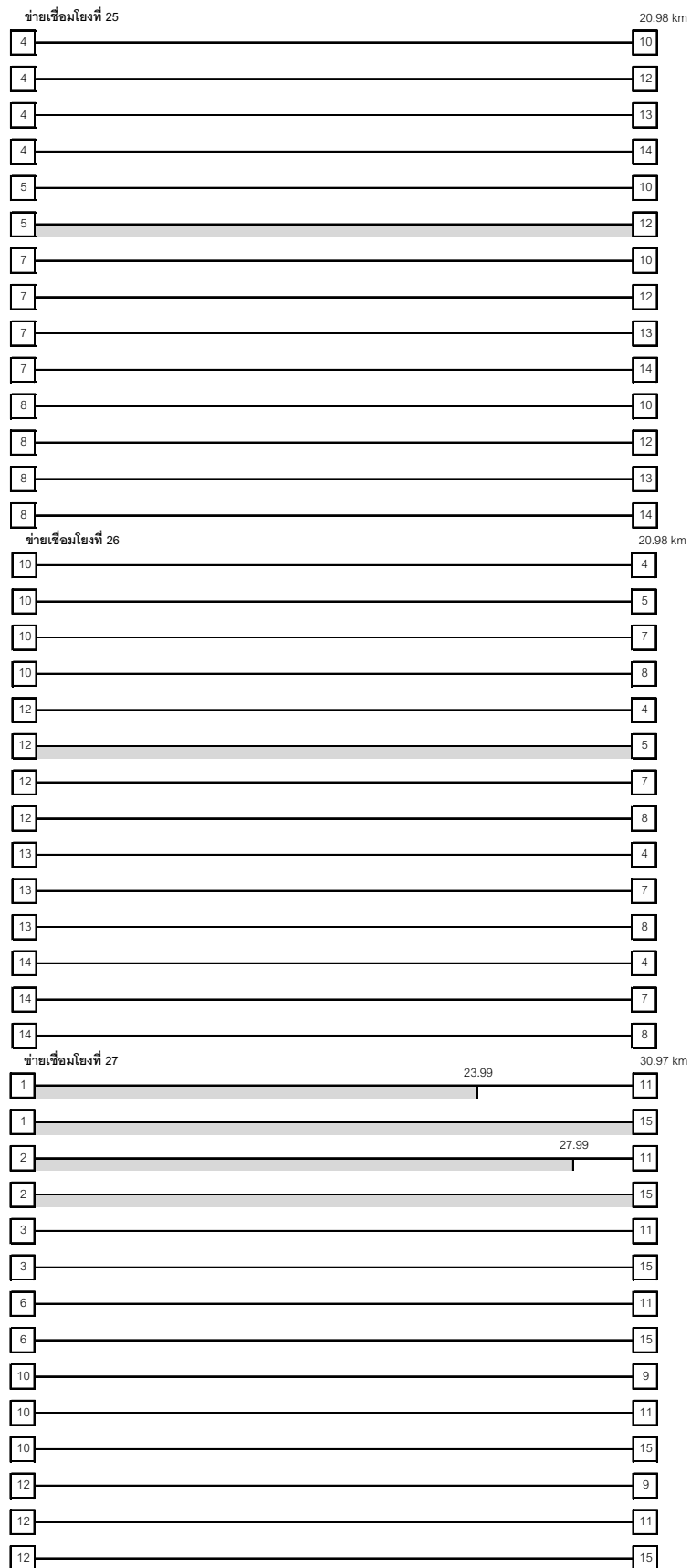
ข่ายเชื่อมโยงที่ 22



(ซ) 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

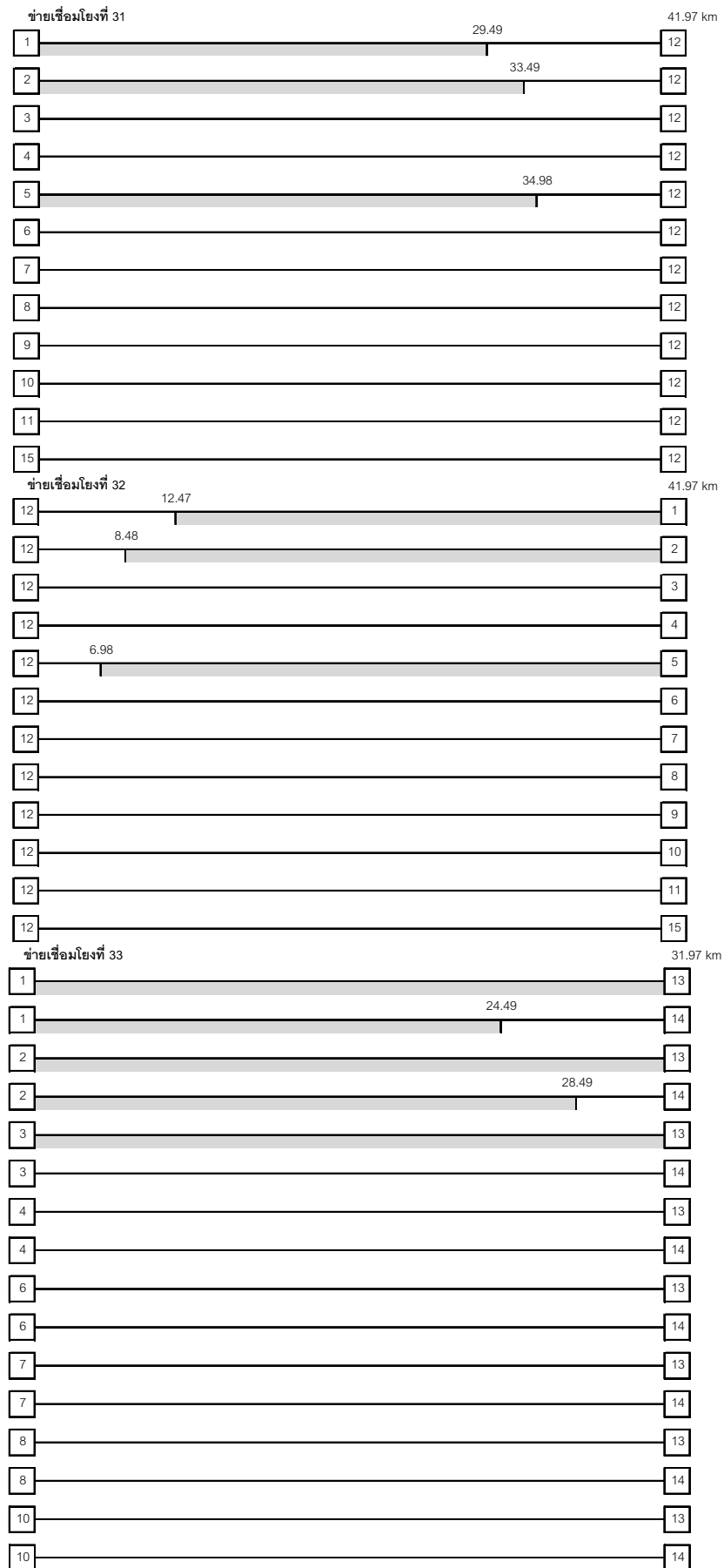
(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 23-24



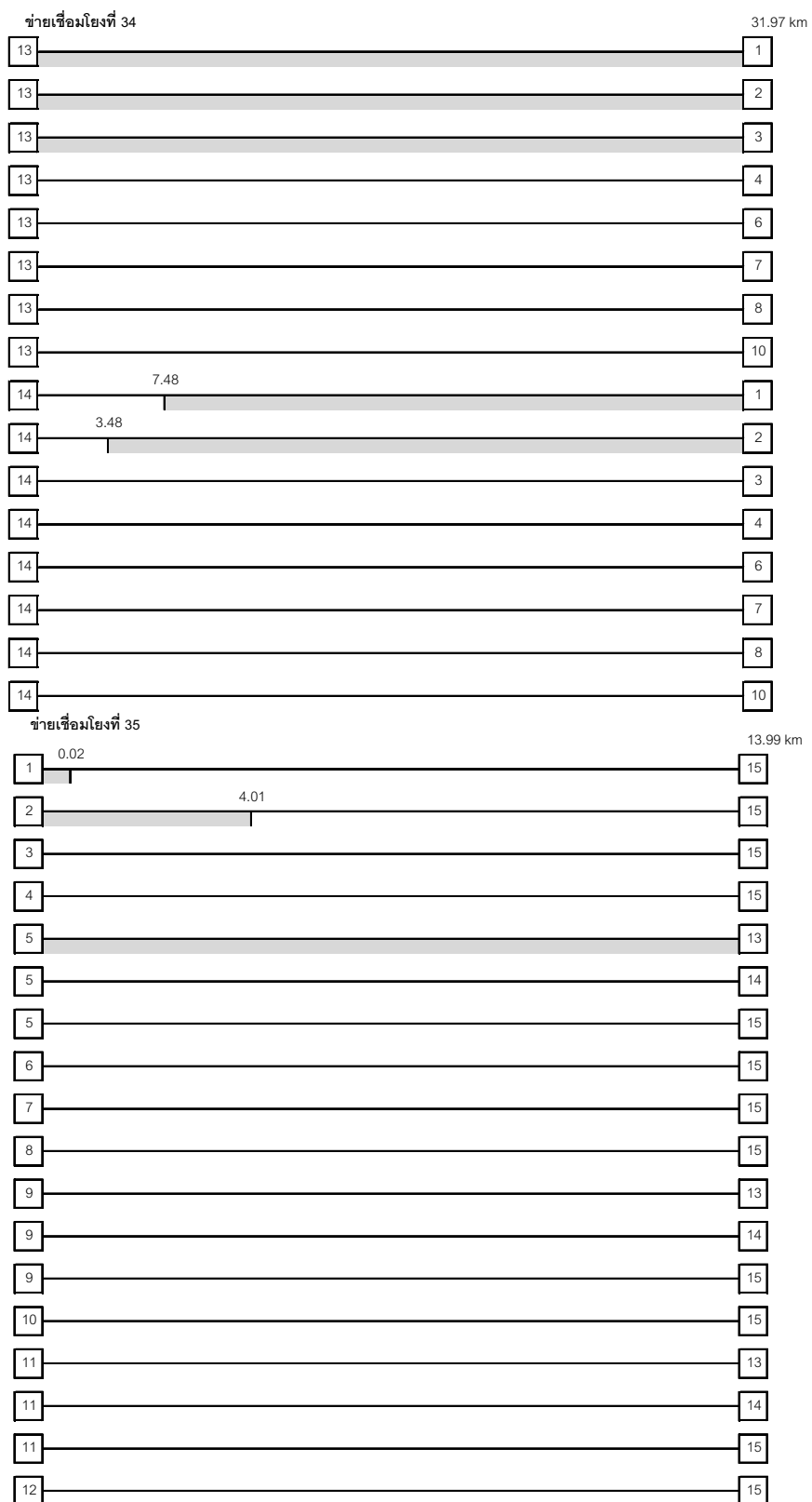
(ญ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 25-27

ข่ายเชื่อมโยงที่ 28		30.97 km
9		10
9		12
11	6.98	1
11	2.98	2
11		3
11		6
11		10
11		12
15		1
15		2
15		3
15		6
15		10
15		12
ข่ายเชื่อมโยงที่ 29		14.99 km
4		11
4		15
5		11
5		13
5		14
5		15
7		11
7		15
8		11
8		15
9		10
9		11
9		12
9		13
9		14
9		15
ข่ายเชื่อมโยงที่ 30		14.99 km
10		9
11		4
11		5
11		7
11		8
11		9
12		9
13		5
13		9
14		5
14		9
15		4
15		5
15		7
15		8
15		9

(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 28-30



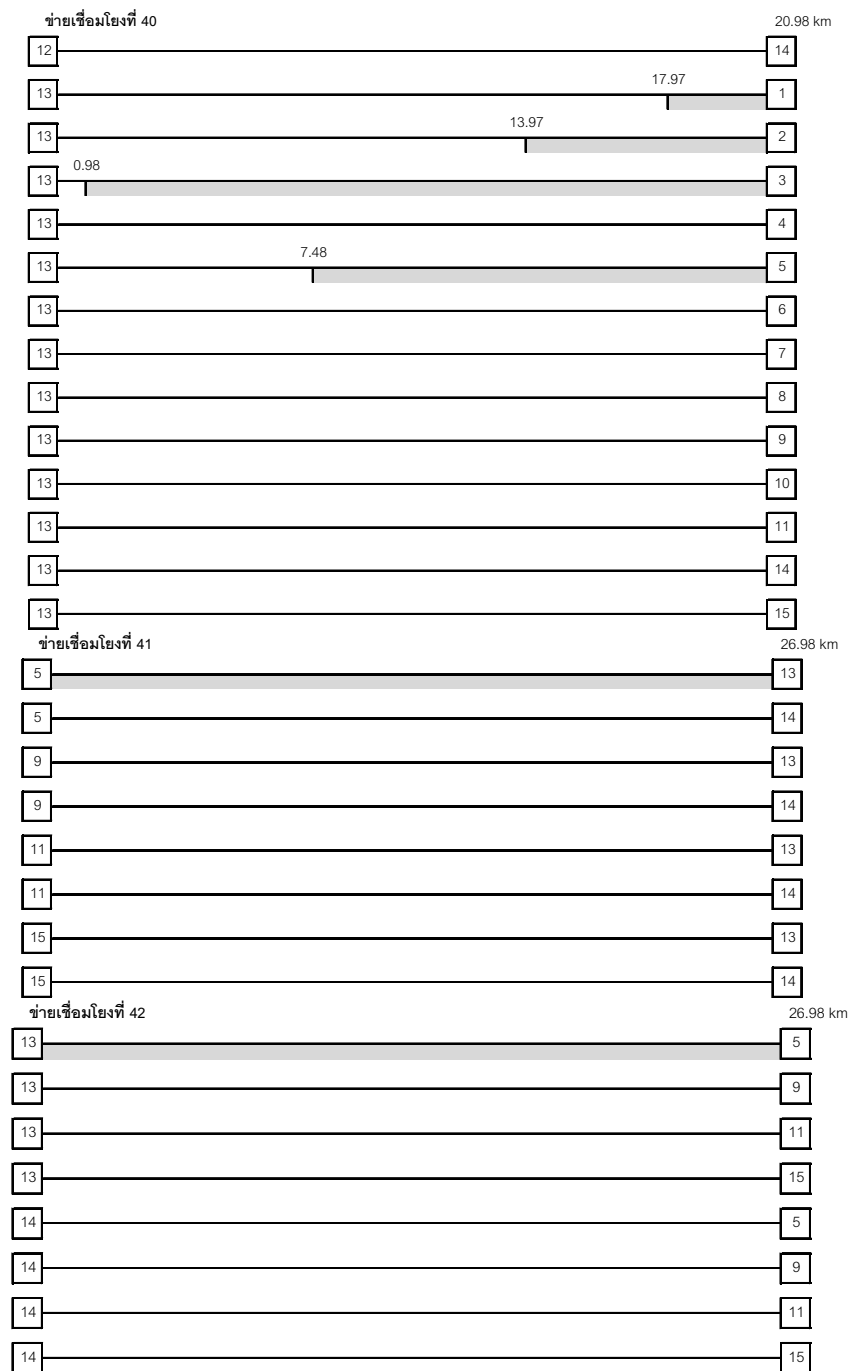
(ฎ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 31-33



(รูป) ข่ายเชื่อมโยงที่ 34-35

ลำดับ	ชื่อ	คะแนน	หมายเหตุ
ชายเชื่อมโยงที่ 36			
13		13.99 km	5
13			9
13			11
14			5
14			9
14			11
15		13.97	1
15		9.98	2
15			3
15			4
15			5
15			6
15			7
15			8
15			9
15			10
15			11
15			12
ชายเชื่อมโยงที่ 37			
12		39.97 km	13
12			14
ชายเชื่อมโยงที่ 38			
13		39.97 km	12
14			12
ชายเชื่อมโยงที่ 39			
1		20.98 km	13
2		3.01	13
3		7.01	13
4		20.00	13
5		13.50	13
6			13
7			13
8			13
9			13
10			13
11			13
14			12
14			13
15			13

(๓) ข่ายเชื่อมโยงที่ 36-39



(ต่อ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 37-42

3. พิจารณาดำเนินงานวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง จากรูปที่ 4.5(ก)-(ค) และตารางที่ 4.3 จะนำมาพิจารณาดำเนินงานของเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้ 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

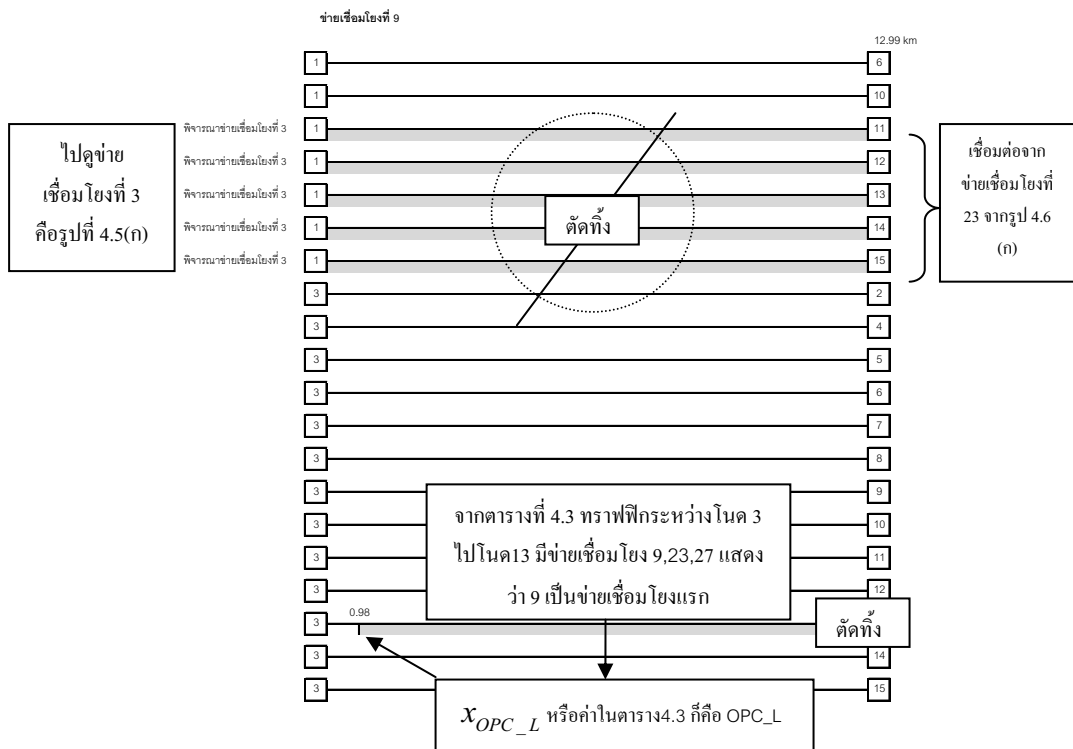
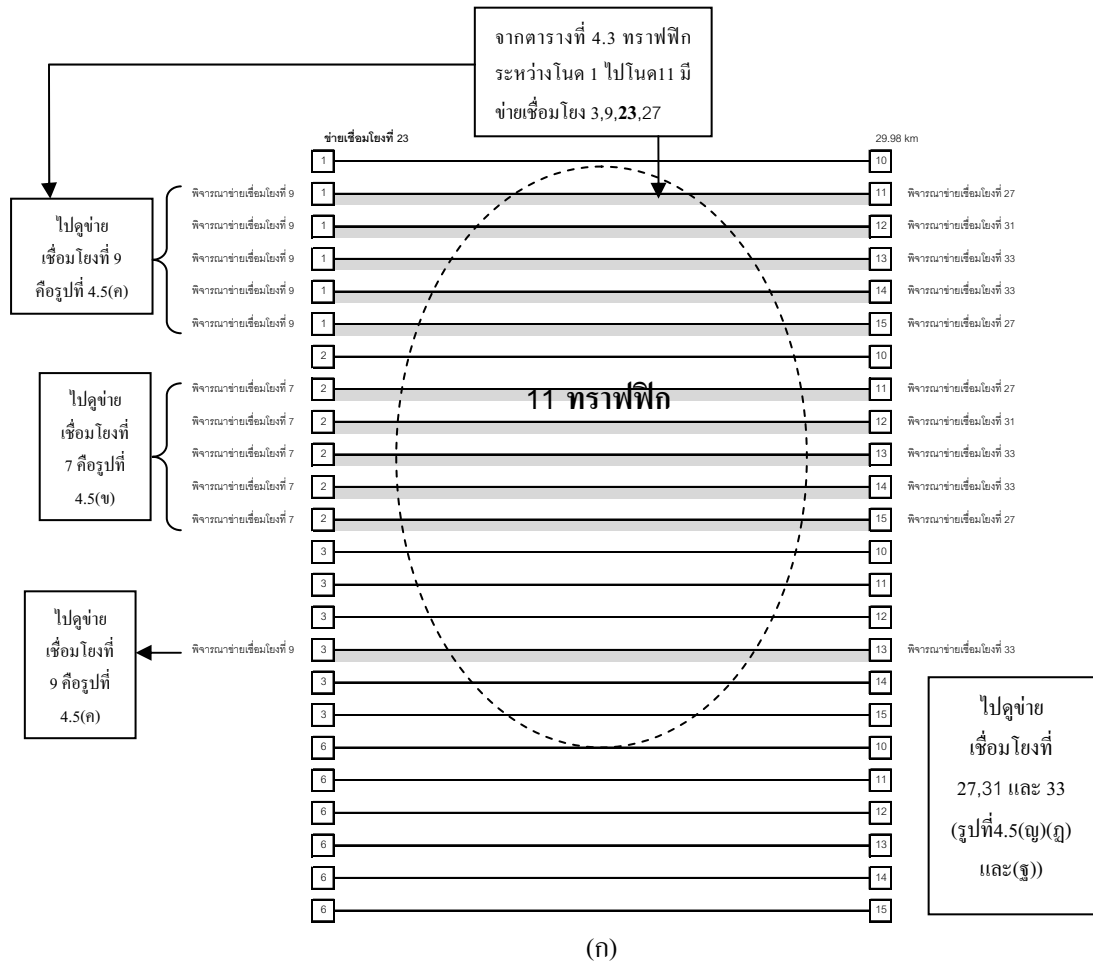
ข่ายเชื่อมโยงที่ 39 เหลือทราฟฟิก = $4 - 3 = 1$ ทราฟฟิก

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 แล้วดูว่า ทราฟฟิกไหนที่ไม่มีข่ายเชื่อมโยงที่ 15, 16 ,23 และ 24 ประกอบ ให้พิจารณาข่ายนั้น ในที่นี้ก็คือทราฟฟิกจากโนด 2 ไปโนด 5, โนด 5 ไปโนด 2, โนด 5 ไปโนด 13, และ โนด 13 ไปโนด 5



โนด1	ข่ายเชื่อมโยง [km]
12	3,9,23,31



รูปที่ 4.7 วิธีการดูข่ายเชื่อมโยงในตาราง

5.2 พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่ยังคงไม่ได้คิดพิจารณาจากข้อ 1 – 4 หรือข่ายเชื่อมโยงที่ยังไม่ได้ทำการตัดทิ้งจากข้อ 1-4 ซึ่งในที่นี้ก็คือข่ายเชื่อมโยงที่ 29, 30, 41 และ 42 ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมเกินขีดจำกัดดังรูปที่ 4.8 เพราะว่าทราฟฟิกที่ตัดทิ้งไปแล้วก็คือทราฟฟิกที่ได้พิจารณาวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไปแล้ว ซึ่งถ้าวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง 2 ตัว ระยะทางในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไม่ควรไกลเกินไป ดังนั้นเราควรจะให้มีเครื่องส่งยุคเฟสแสง 1 ตัวต่อ 1 ทราฟฟิกหรือไม่ก็ให้มีระยะห่างที่พอสมควร เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดปัญหาเช่นนี้ขึ้น

5.3 เลือกข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกที่ไม่มีทราฟฟิกที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไปแล้ว ซึ่งก็คือข่ายเชื่อมโยงที่ 41 และ 42 ทำตามข้อ 3.

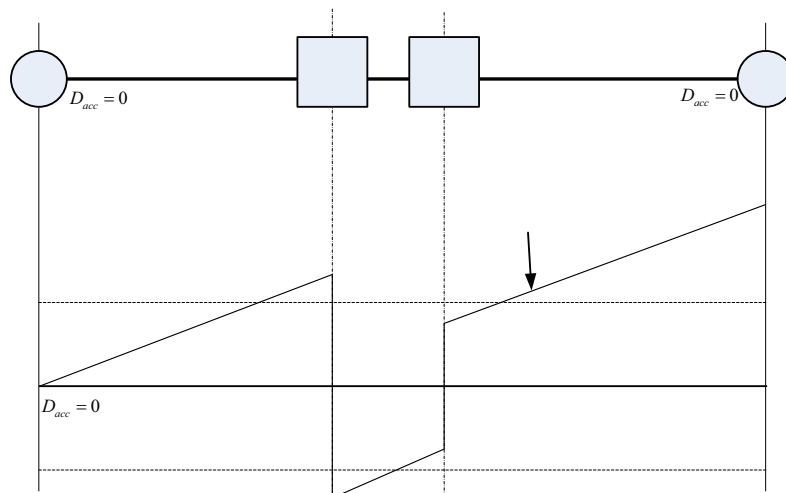
5.4 ถ้ายังเหลือทราฟฟิกให้พิจารณา ให้ทำตามข้อ 5.3 ซึ่งก็คือข่ายเชื่อมโยงที่ 13 และ 14

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

จากหลักการพิจารณา 6 ข้อดังกล่าวจะได้ตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงดังนี้

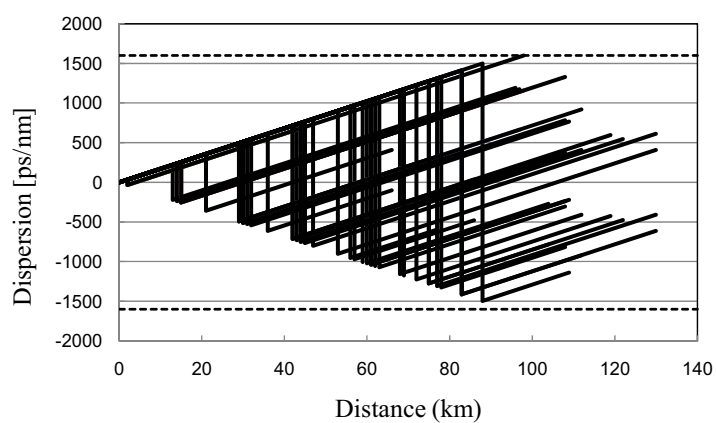
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 13 (0 -29.98 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 14 (1.98 -29.98 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16 (0 -14.99 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 (0-29.98 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 41 และ 42 (0-26.98 km)

รูปที่ 4.10 เป็นแผนภาพผังงาน(flowchart diagram) ของการหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

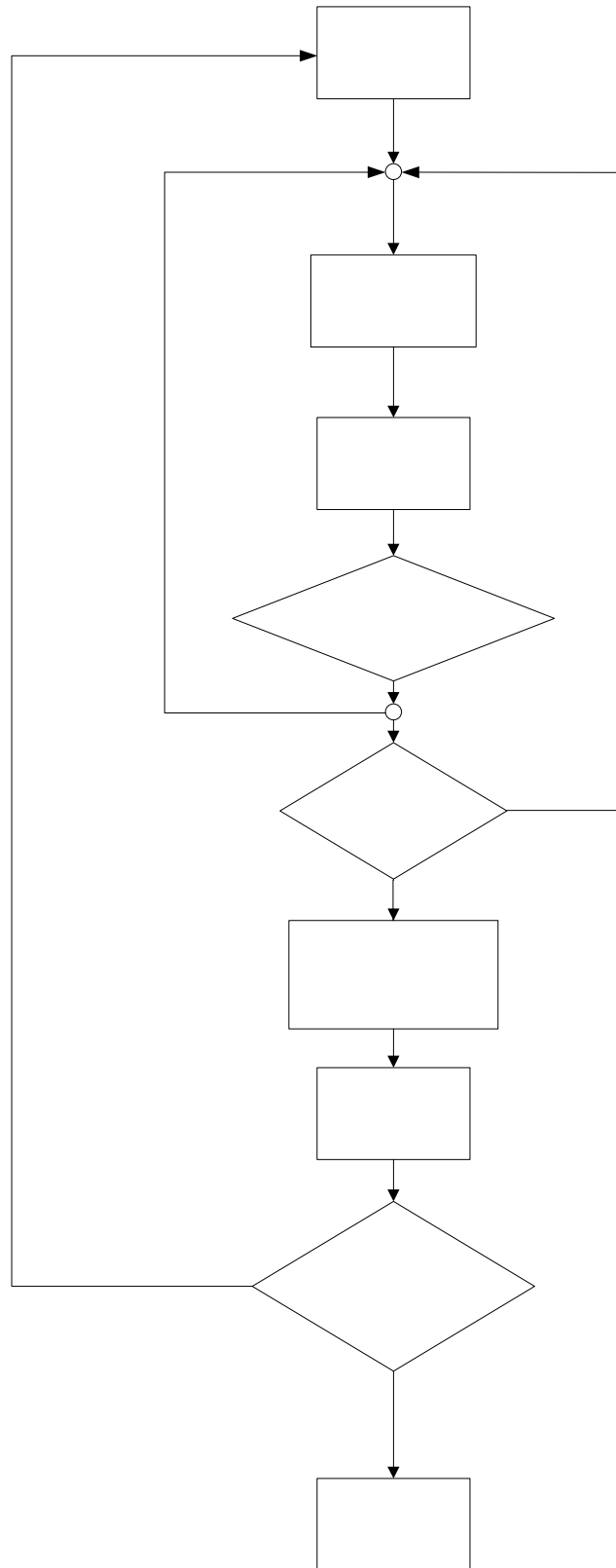


รูปที่ 4.8 ปัญหาระยะทางในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสงใกล้เคียงเกินไป

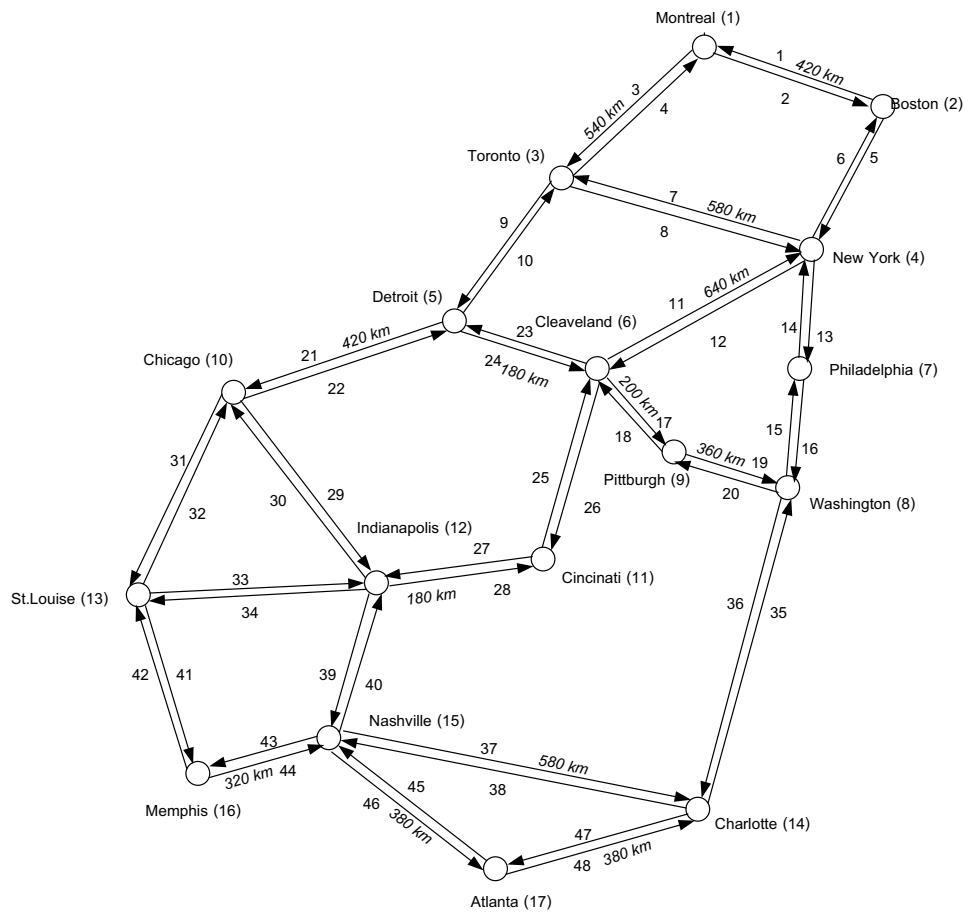
4. ตรวจสอบผลจากการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง รูปที่ 4.9 เป็นการตรวจสอบดิสเพอร์ชันสะสมหลังจากวางเครื่องสังยุคเฟสแสง โดยใช้สมการที่ (3.1) และ (3.9) ในการคำนวณหาดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิก



รูปที่ 4.9 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่ายERNET



รูปที่ 4.10 แผนภาพผังงานของการหาช่วงในการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง



1.หาเส้นทางที่สั้นที่สุดและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสง ได้ผลตามตารางที่ 4.4

2.หาค่า R และลดขนาดโครงข่าย ตารางที่ 4.5 แสดงผลการหาค่า R จากโครงข่าย NARNet ซึ่งสรุปได้ว่าค่า R ที่มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 15.75 ซึ่งก็คือลดขนาดโครงข่ายลงมา 15.75 เท่า ตารางที่ 4.6 แสดงกราฟฟิกและตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงหลังจากลดขนาดโครงข่ายแล้ว ส่วนรูปที่ 4.12 เป็นรูปโครงข่าย NARNet ที่ลดขนาดลงมาแล้ว รูปที่ 4.13แสดงตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงลงบนข่ายเชื่อมโยง

ตารางที่ 4.4 กราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย 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

โหนด 5	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 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
โหนด 7	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 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

โหนด 9	ระยะทาง [km]	ขายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 10	ระยะทาง [km]	ขายเชื่อมโยง [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
โหนด 11	ระยะทาง [km]	ขายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 12	ระยะทาง [km]	ขายเชื่อมโยง [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]	ย้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 6	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ย้ายเชื่อมโยง [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]	ย้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 8	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ย้ายเชื่อมโยง [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

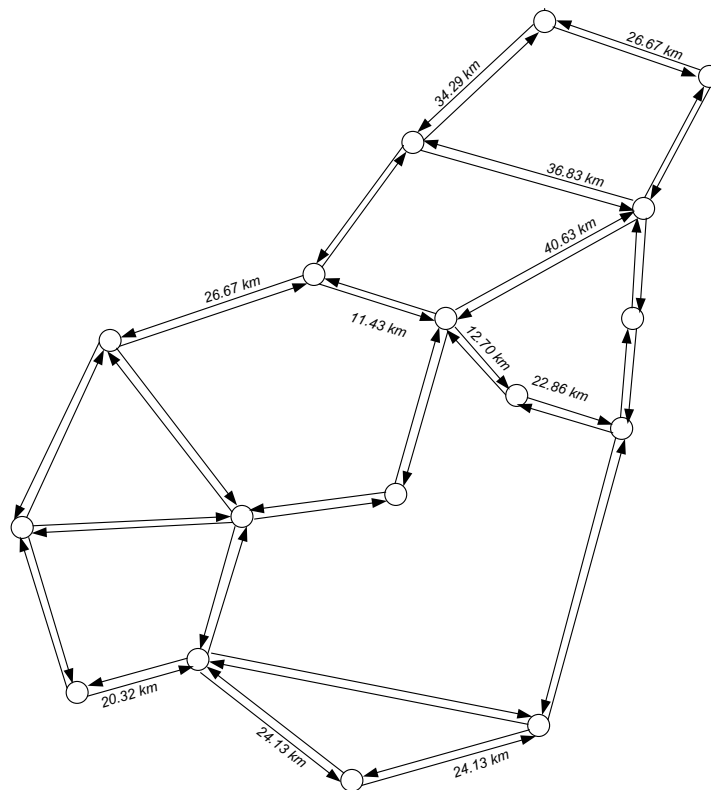
โนด 9	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 10	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	81.27	1280	18,23,10,4	-6.34	87.61	1	83.81	1320	22,10,4	-5.07	88.88
2	66.03	1040	19,15,14,6	-13.96	79.99	2	101.59	1600	22,24,11,6	3.82	97.77
3	46.98	740	18,23,10	-23.48	70.47	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
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	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

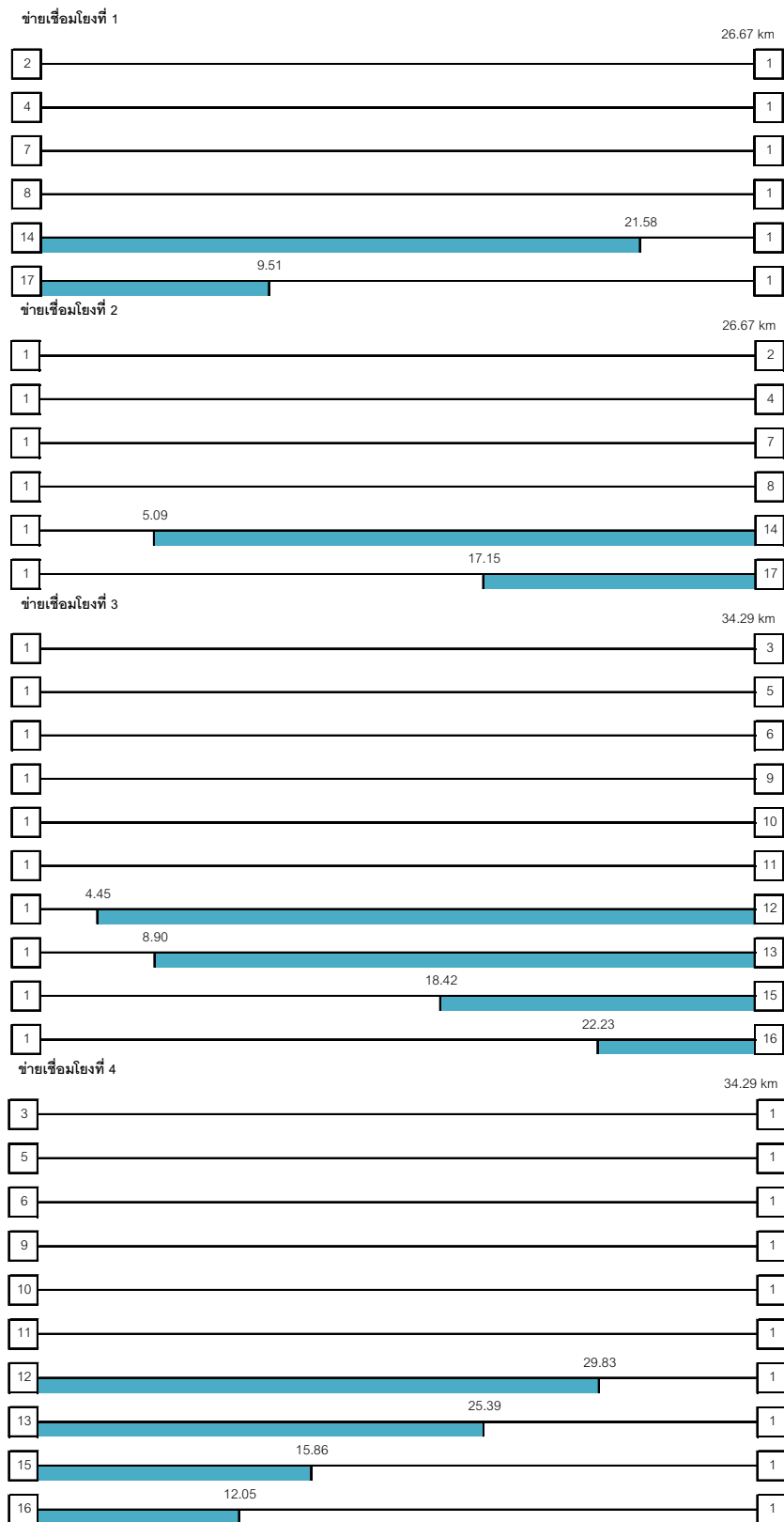
โหนด 13	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ย้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 14	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ย้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R
1	111.75	1760	32,22,10,4	8.90	102.85	1	104.13	1640	35,15,14,6,1	5.09	99.04
2	124.44	1960	33,28,25,11,6	15.25	109.20	2	77.46	1220	35,15,14,6	-8.25	85.71
3	77.46	1220	32,22,10	-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
โหนด 15	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ย้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โหนด 16	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง [km]	ย้ายเชื่อมโยง [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



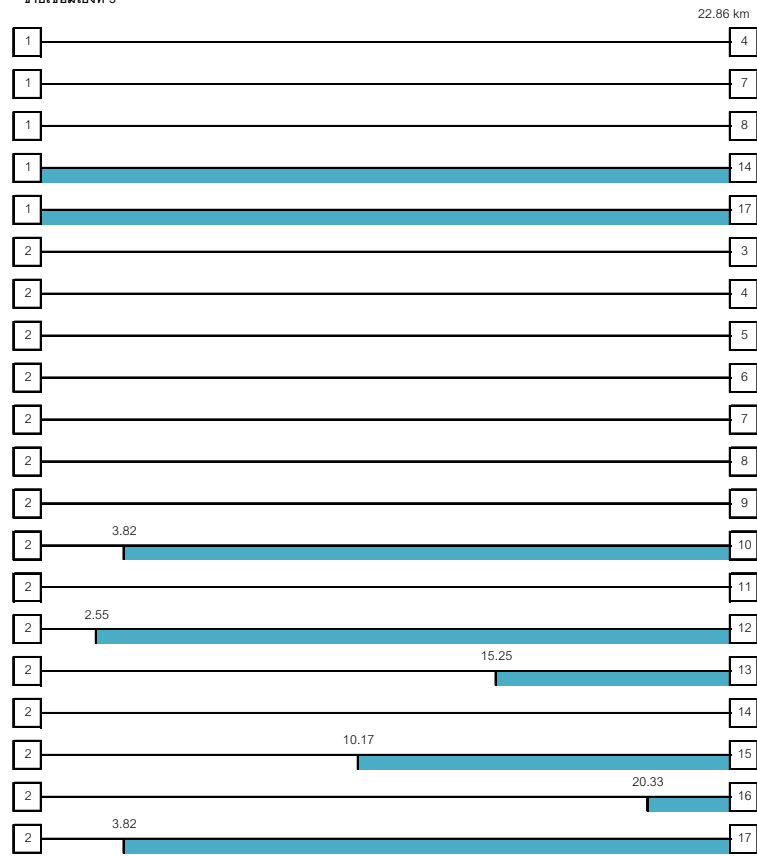
รูปที่ 4.12 โครงข่าย NARNet ที่ได้รับการลดขนาดลงมา 15.75 เท่า



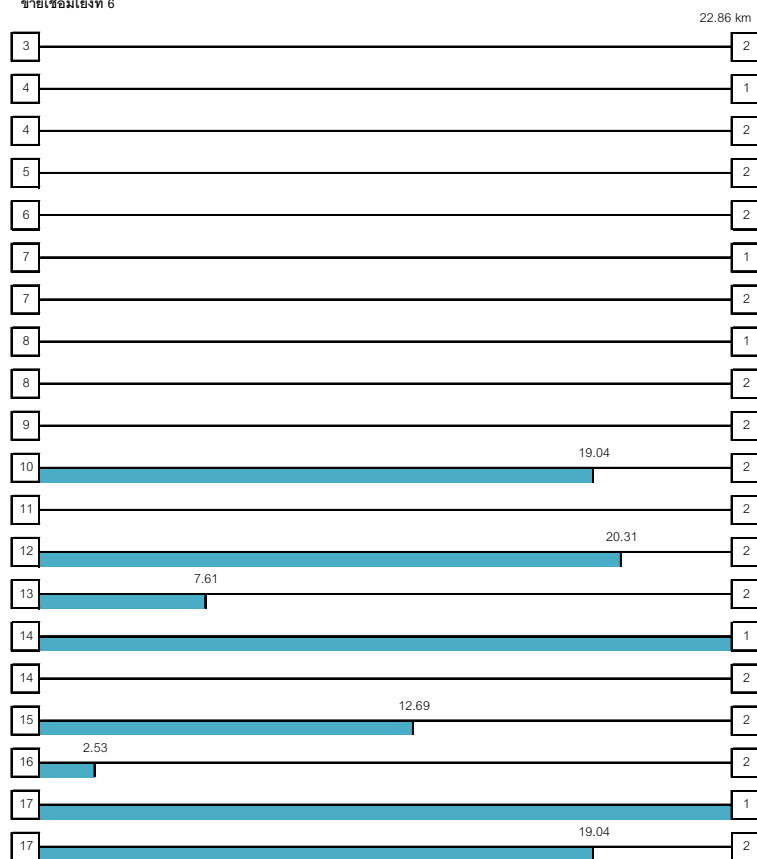
(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 1-4

รูปที่ 4.13 ทราฟฟิกและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่าย NARNet

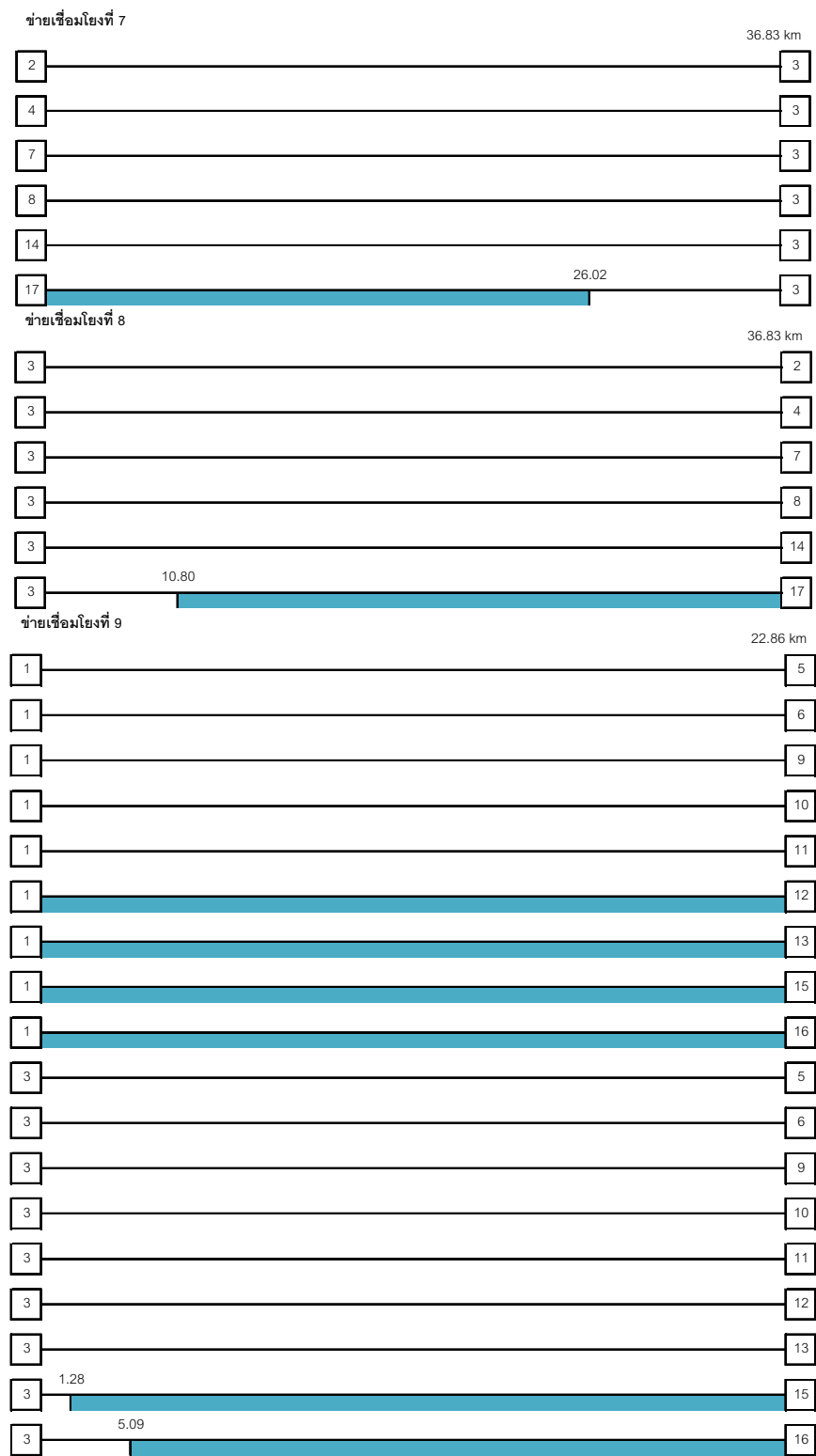
ข่ายเชื่อมโยงที่ 5



ข่ายเชื่อมโยงที่ 6



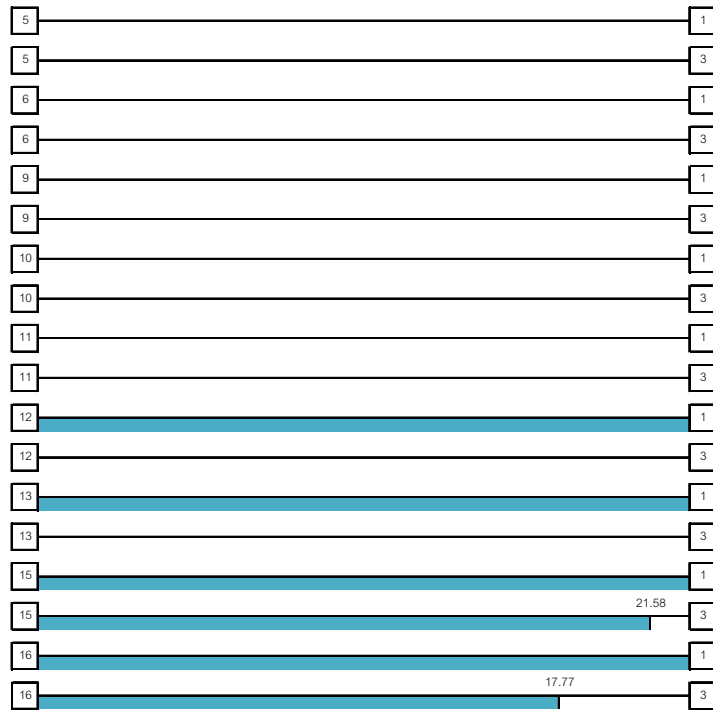
(๗) ข่ายเชื่อมโยงที่ 5-6



(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 7-9

ข่ายเชื่อมโยงที่ 10

22.86 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 11

40.63 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 12

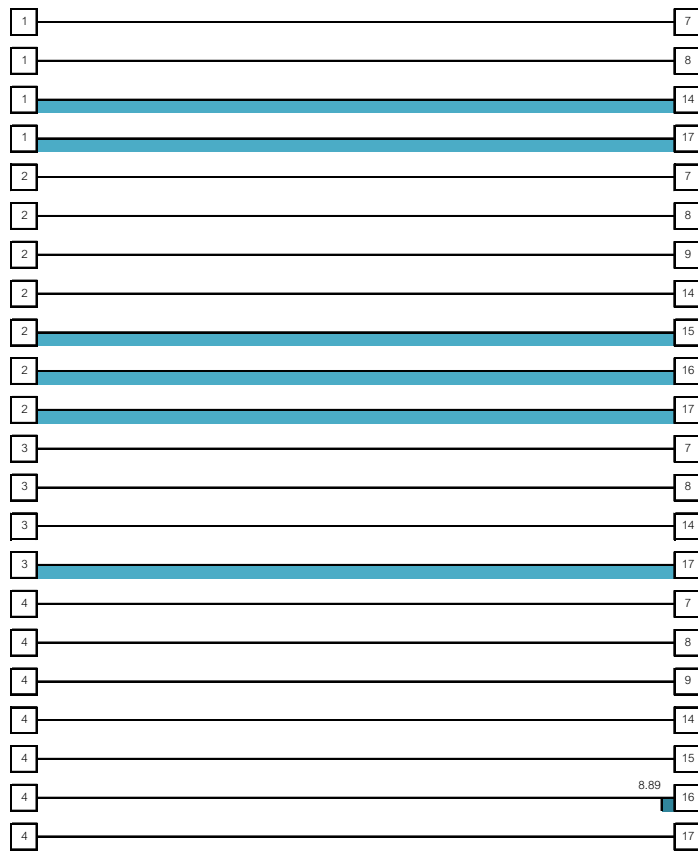
40.63 km



(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 10-12

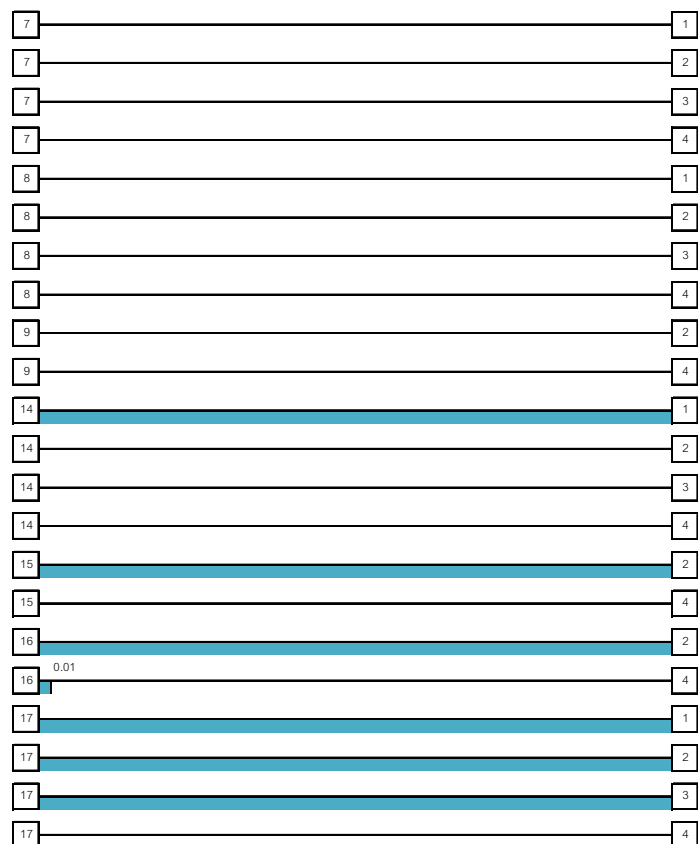
ข่ายเชื่อมโยงที่ 13

8.89 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 14

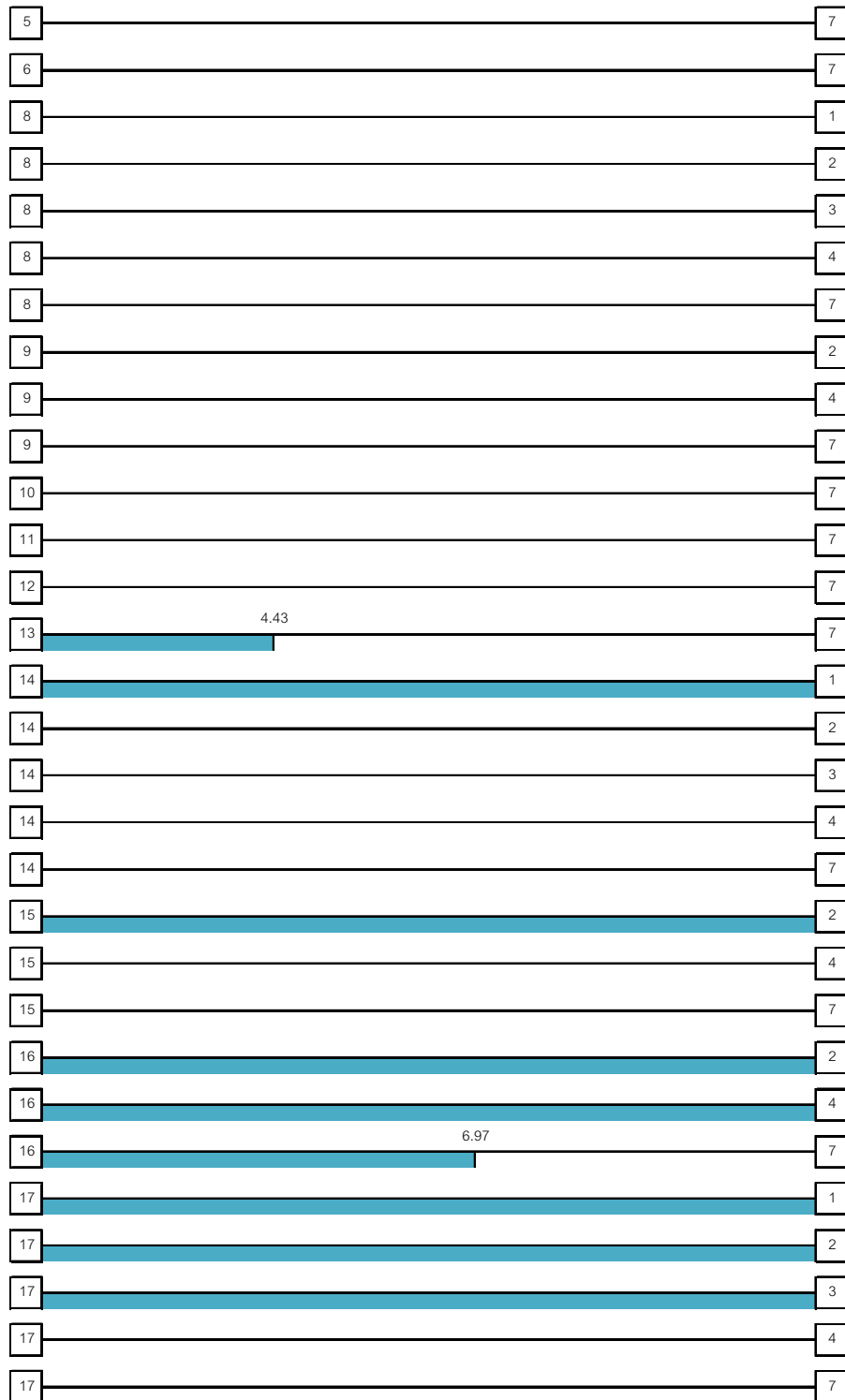
8.89 km



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13-14

ข่ายเชื่อมโยงที่ 15

11.43 km



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 15

ข่ายเชื่อมโยงที่ 16

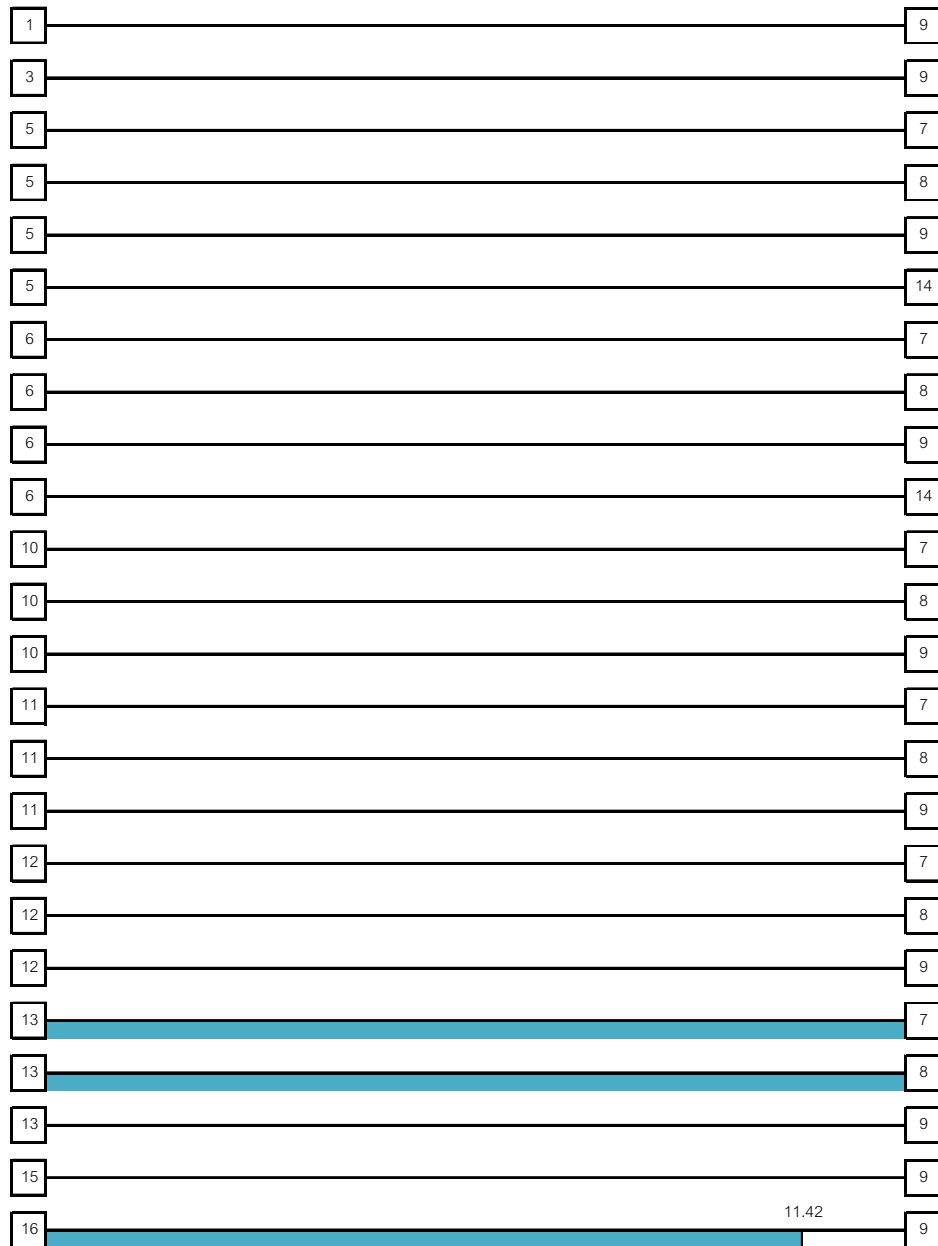
11.43 km



(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 16

ข่ายเชื่อมโยงที่ 17

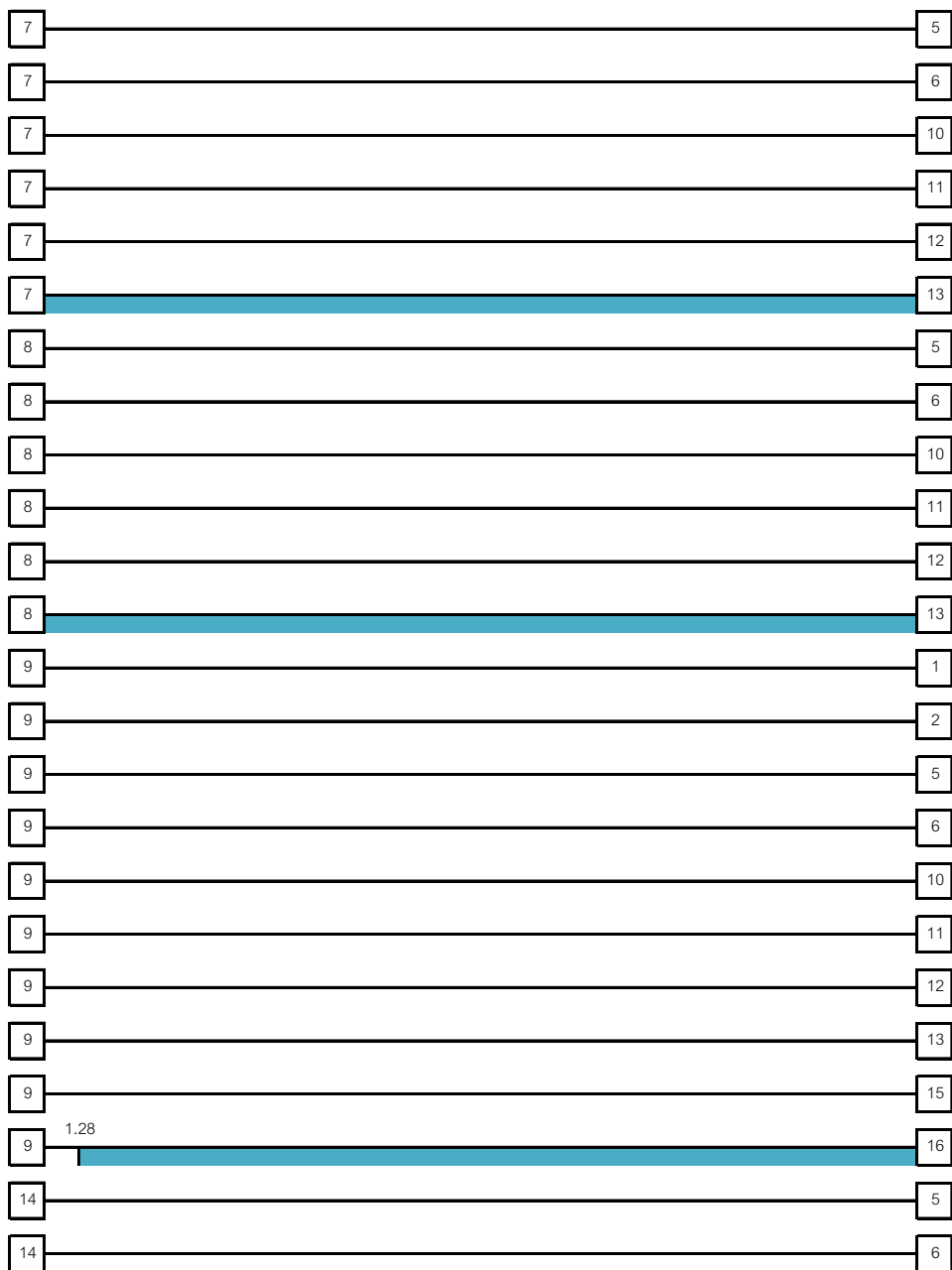
12.70 km



(๒) ข่ายเชื่อมโยงที่ 17

ข่ายเชื่อมโยงที่ 18

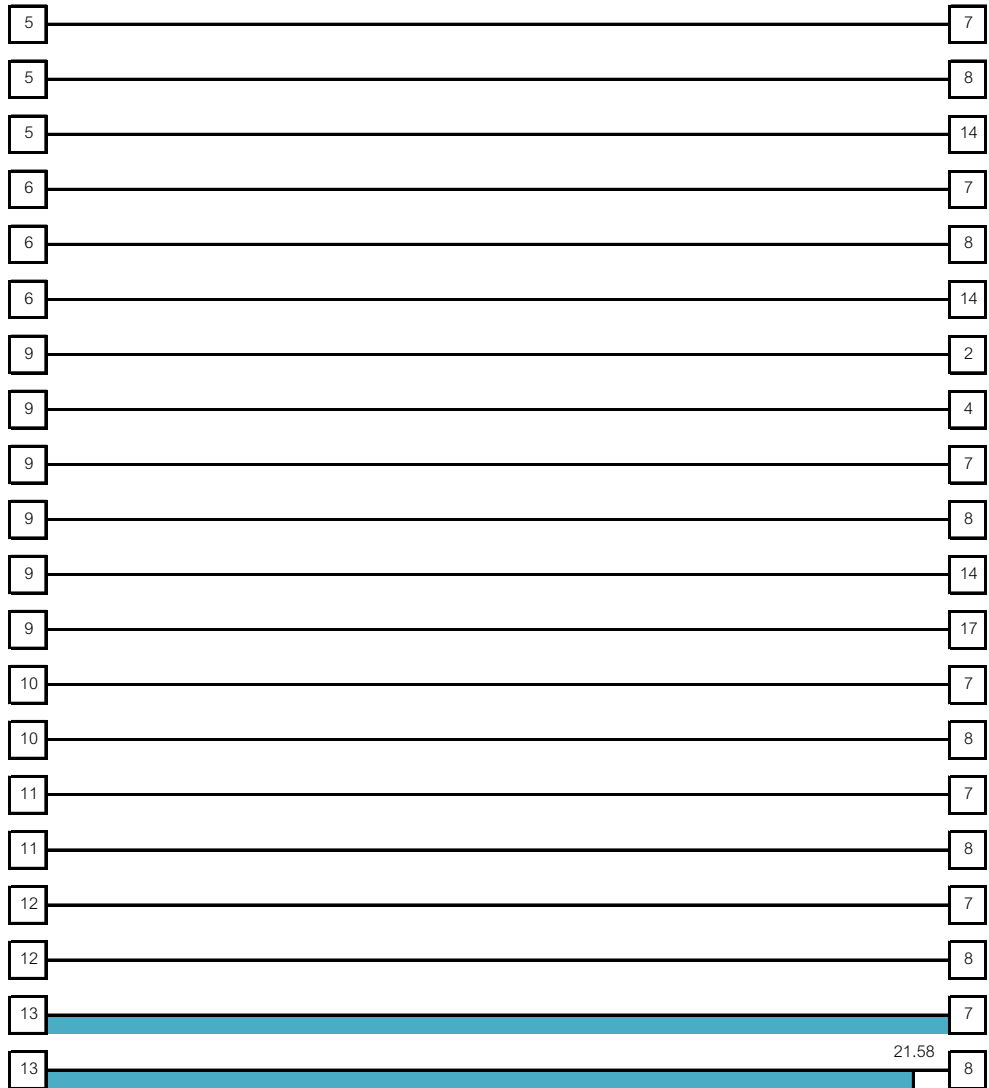
12.70 km



(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 18

ข่ายเชื่อมโยงที่ 19

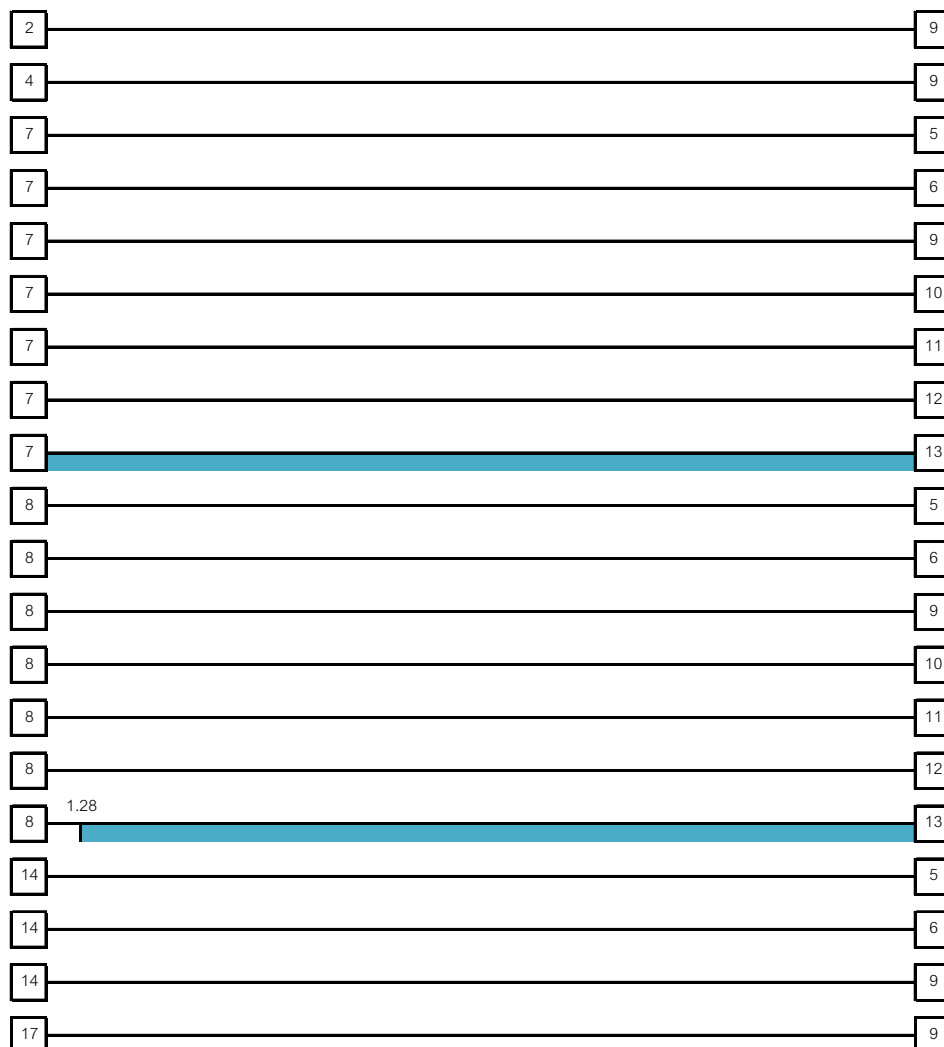
22.86 km



(ญ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 19

ข่ายเชื่อมโยงที่ 20

22.86 km



(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 20

ข่ายเชื่อมโยงที่ 21

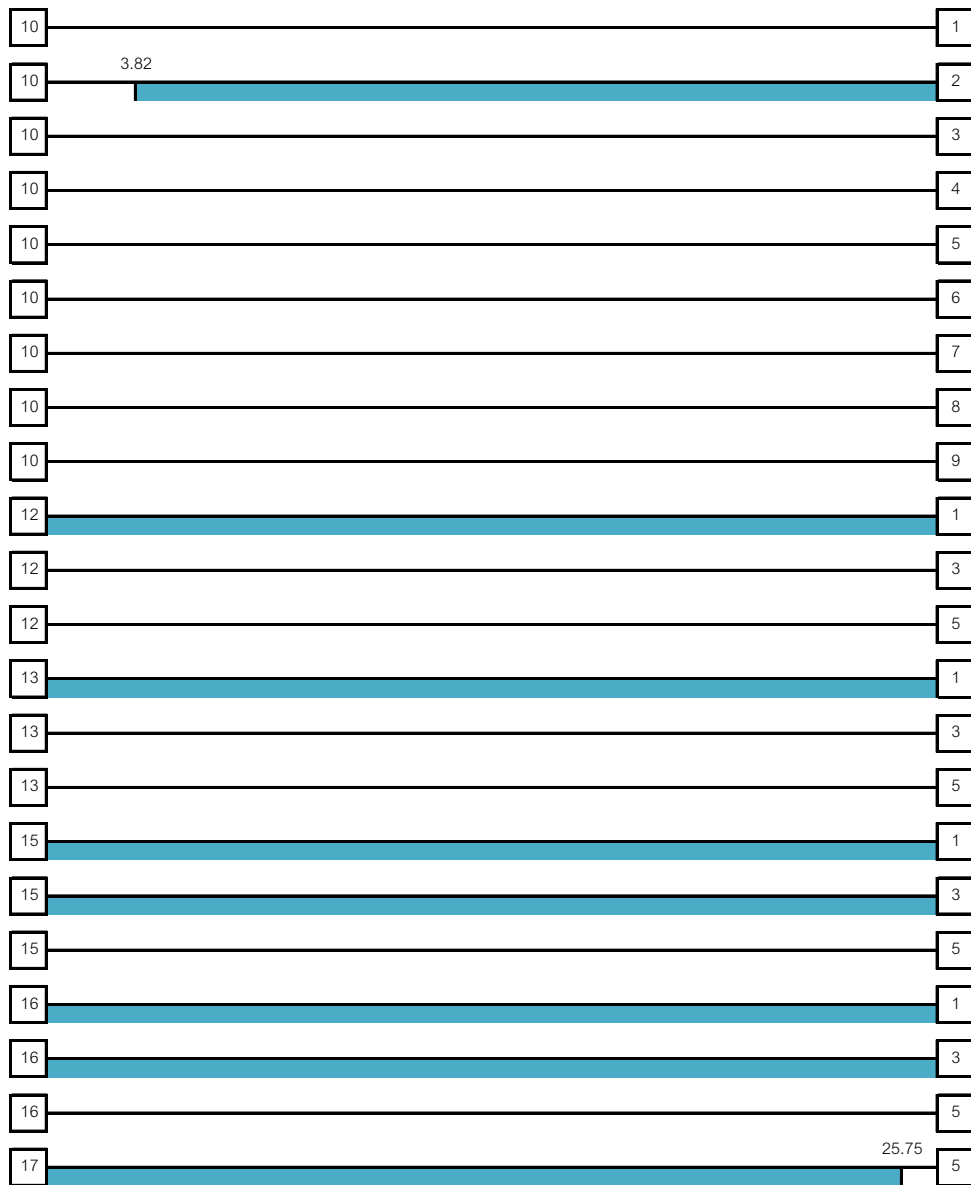
26.67 km



(ฎ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 21

ข่ายเชื่อมโยงที่ 22

26.67 km



(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

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

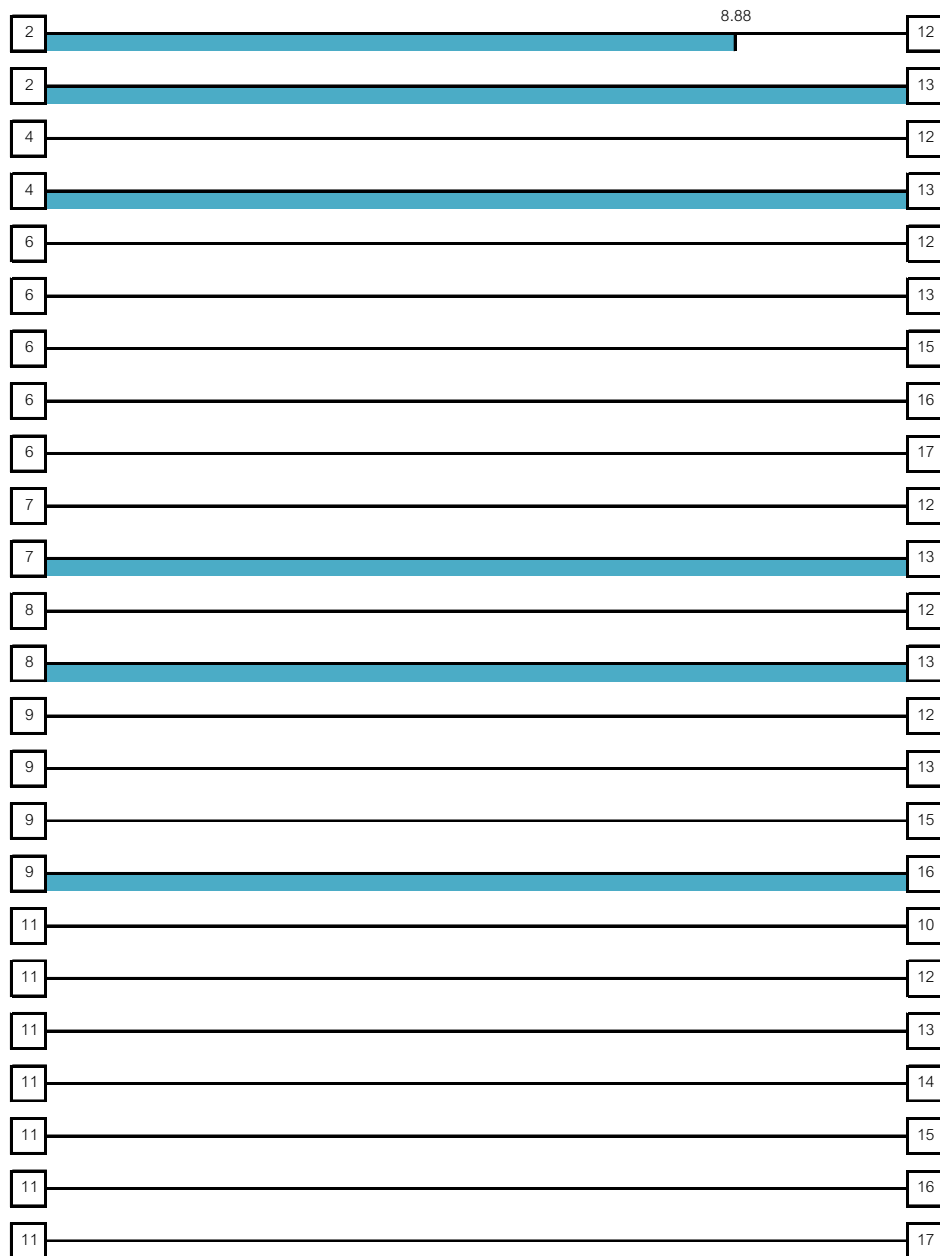
(ตม) ข่ายเชื่อมโยงที่ 25

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

(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 26

ข่ายเชื่อมโยงที่ 27

11.43 km

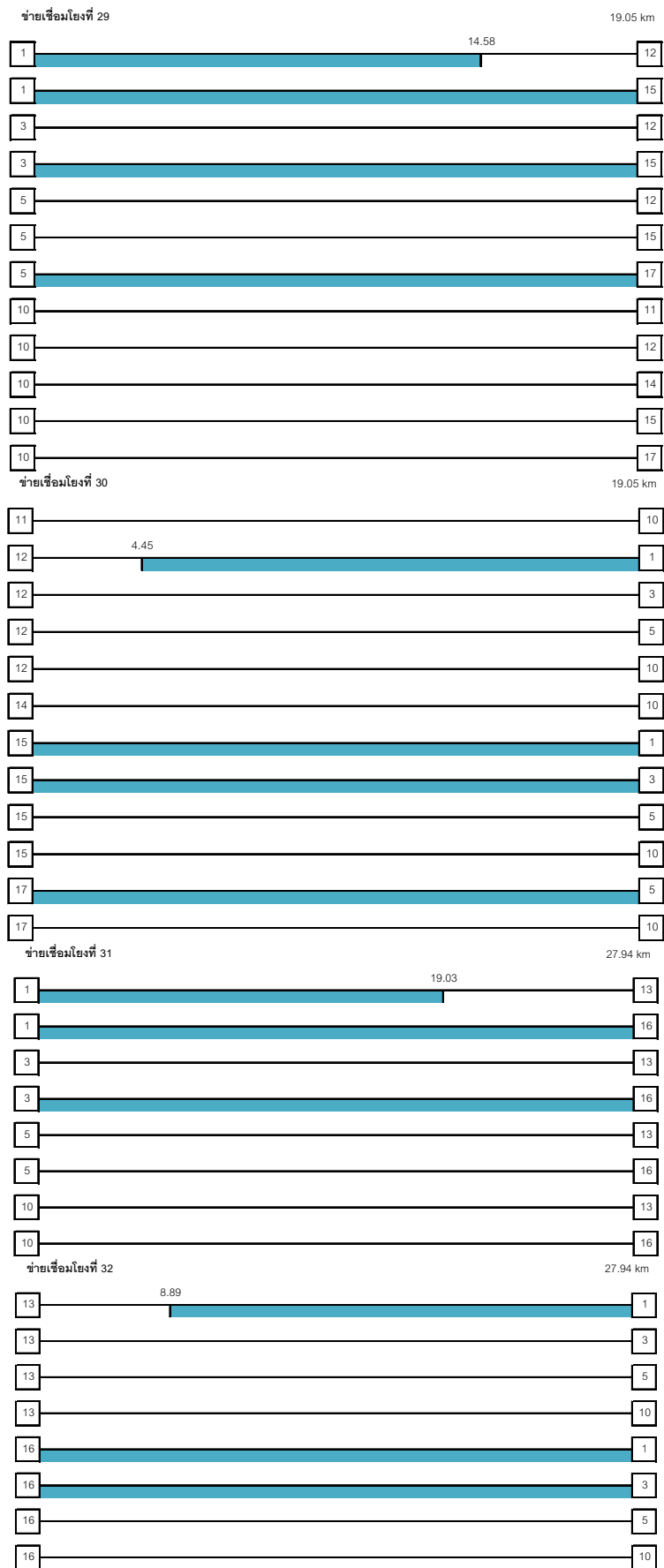


(ด) ข่ายเชื่อมโยงที่ 27

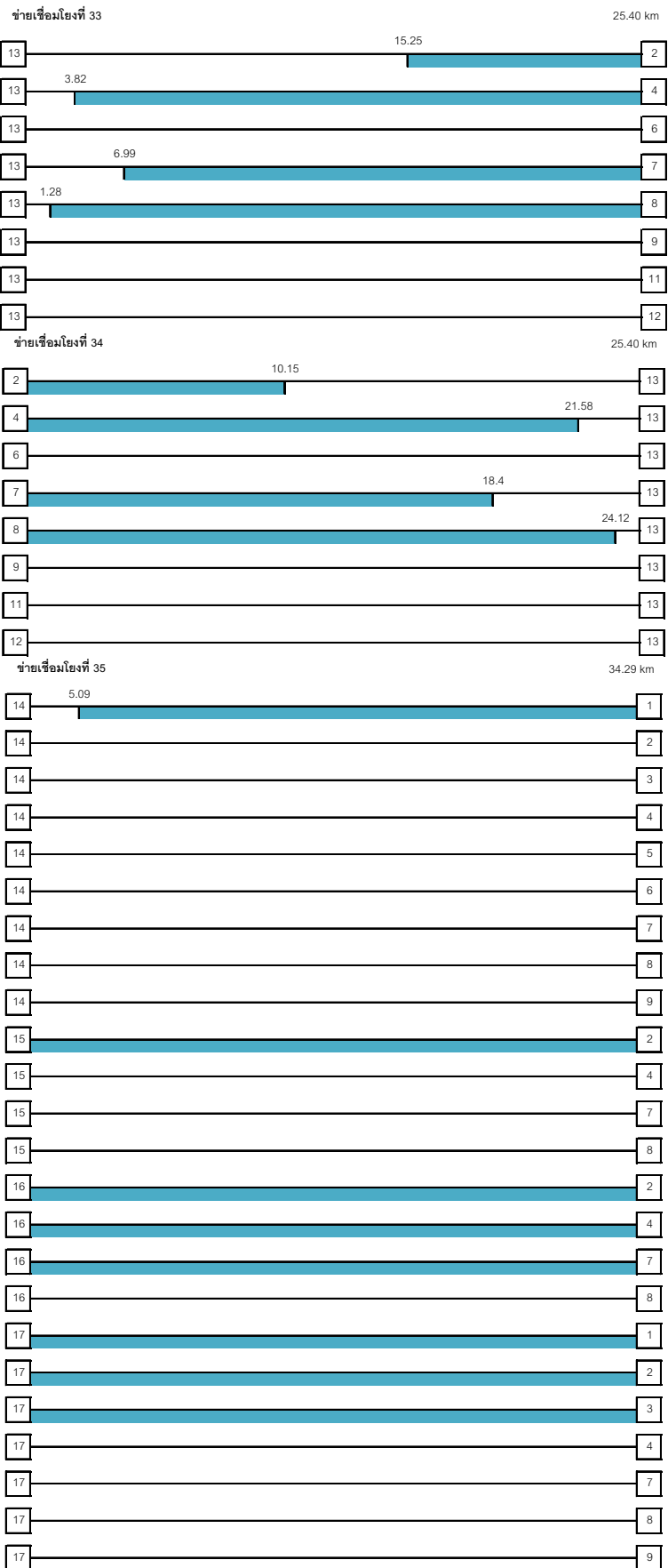
ข่ายเชื่อมโยงที่ 28

11.43 km





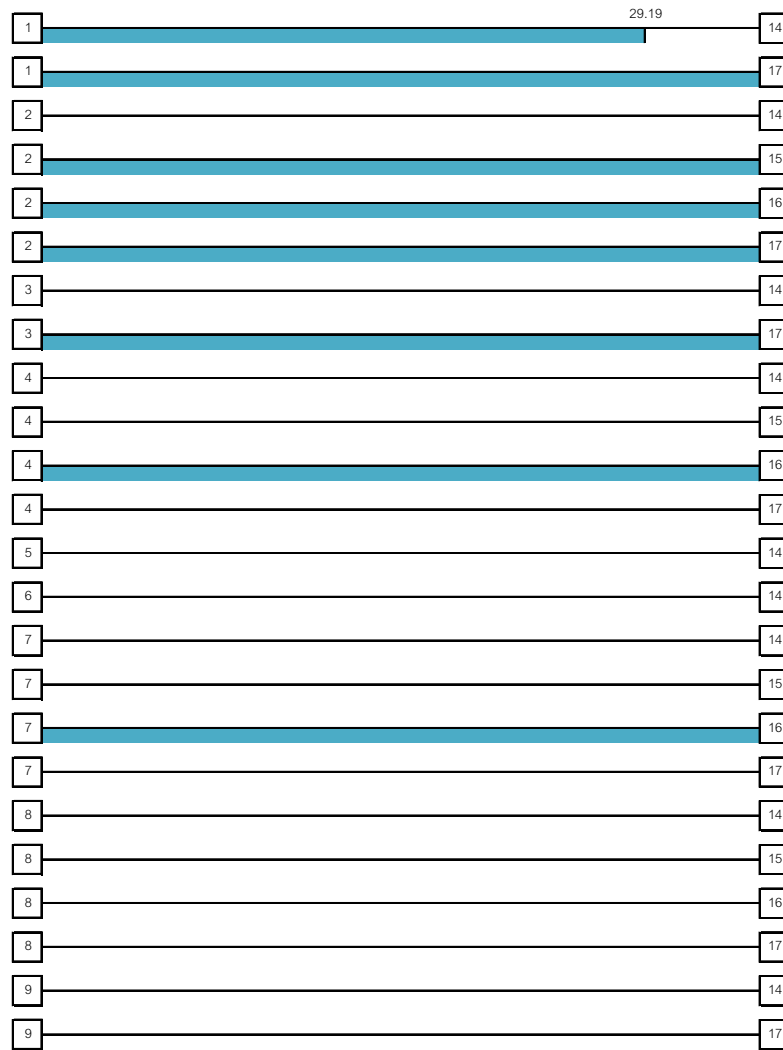
(ถ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 29-32



(ท) ข่ายเชื่อมโยงที่ 33-35

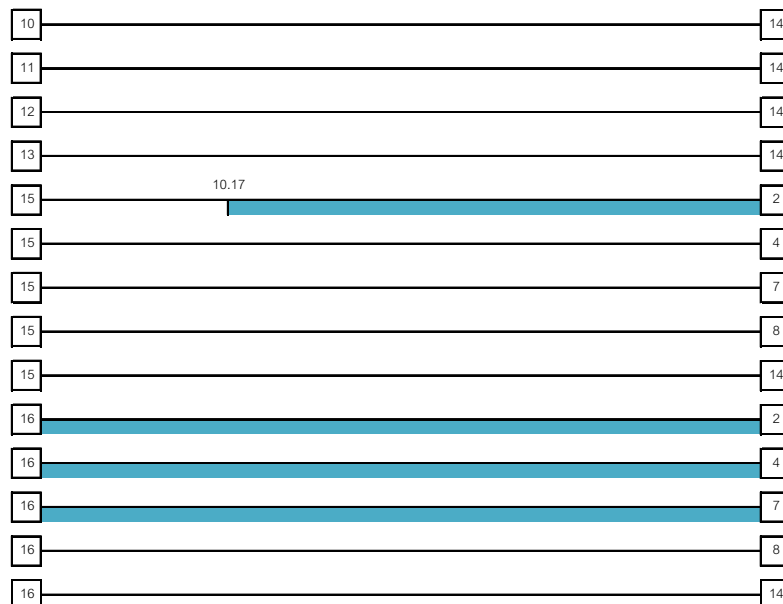
ข่ายเชื่อมโยงที่ 36

34.29 km

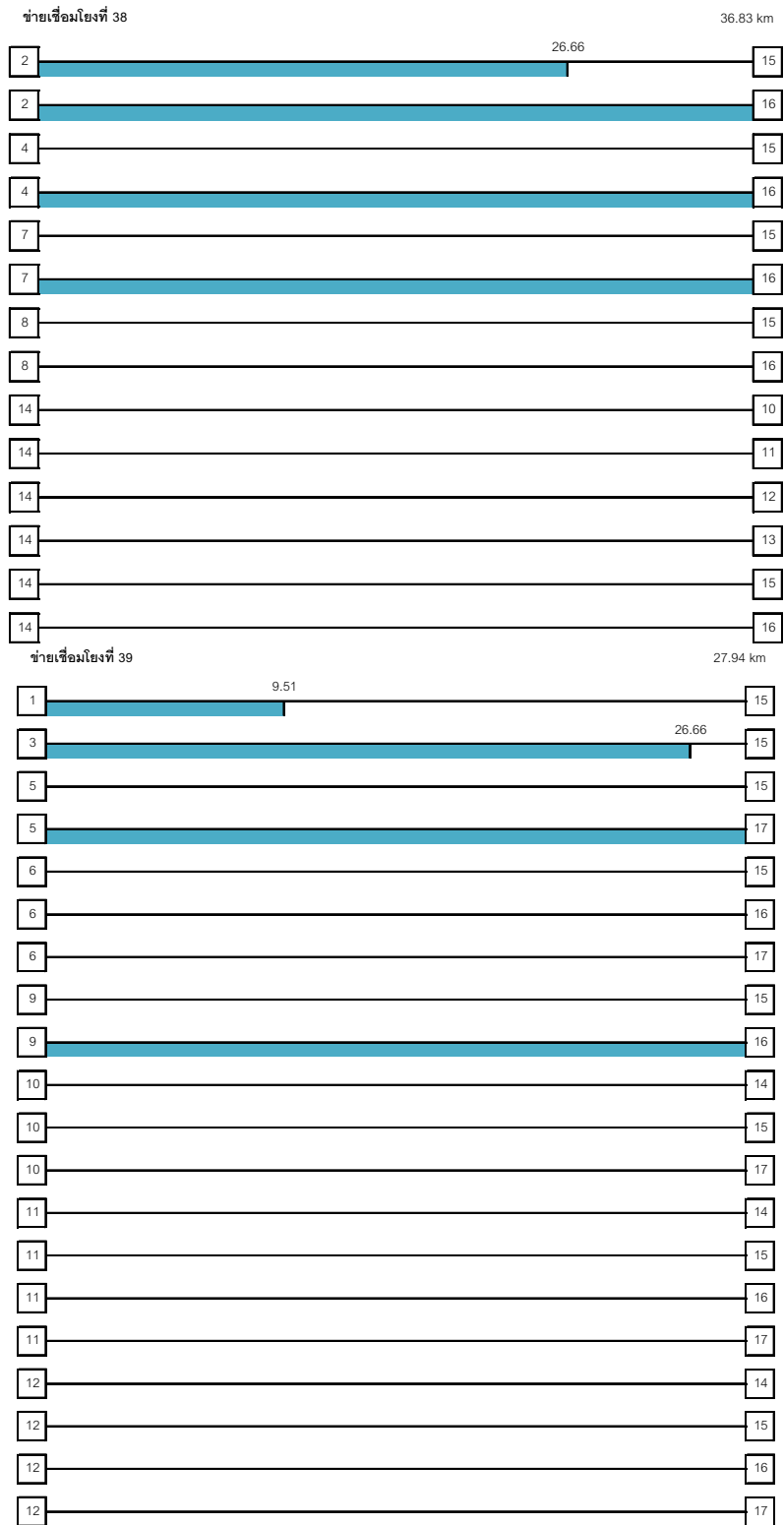


ข่ายเชื่อมโยงที่ 37

36.83 km



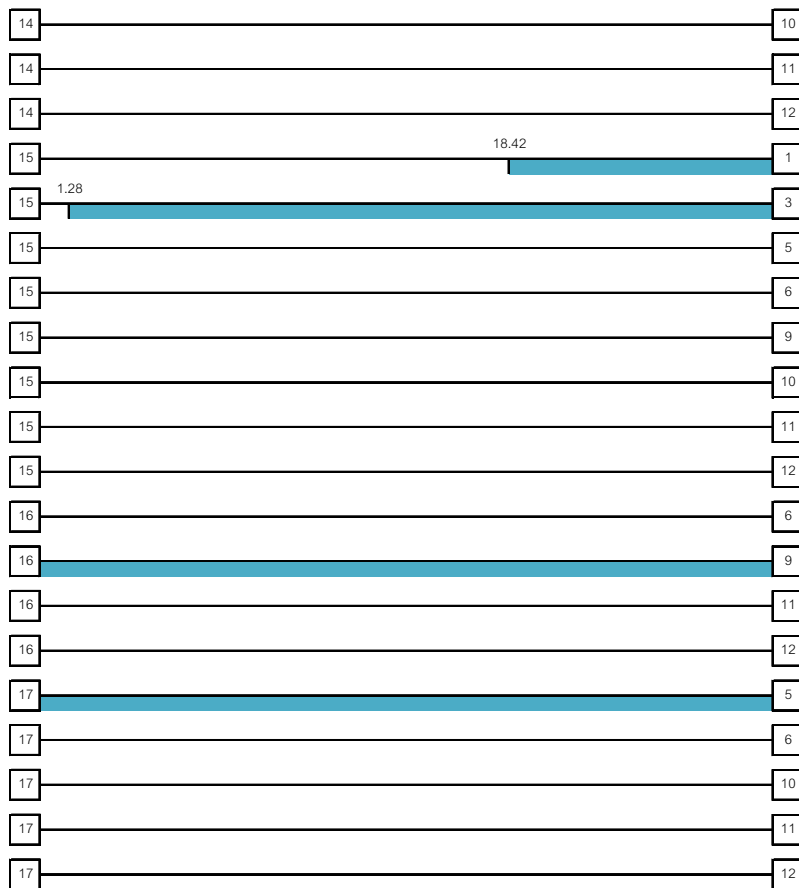
(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 36-37



(น) ข่ายเชื่อมโยงที่ 38-39

ข่ายเชื่อมโยงที่ 40

27.94 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 41

26.67 km

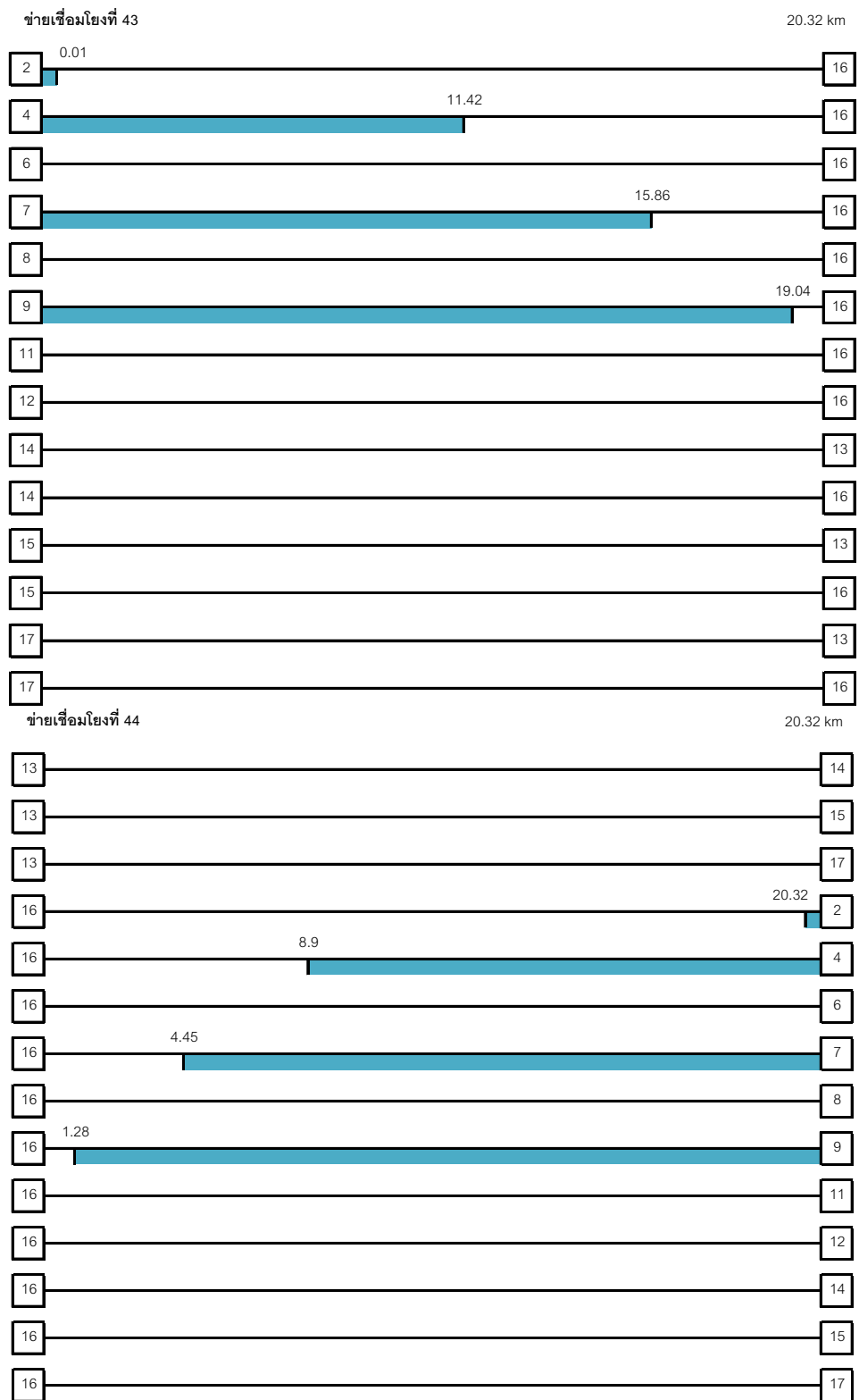


ข่ายเชื่อมโยงที่ 42

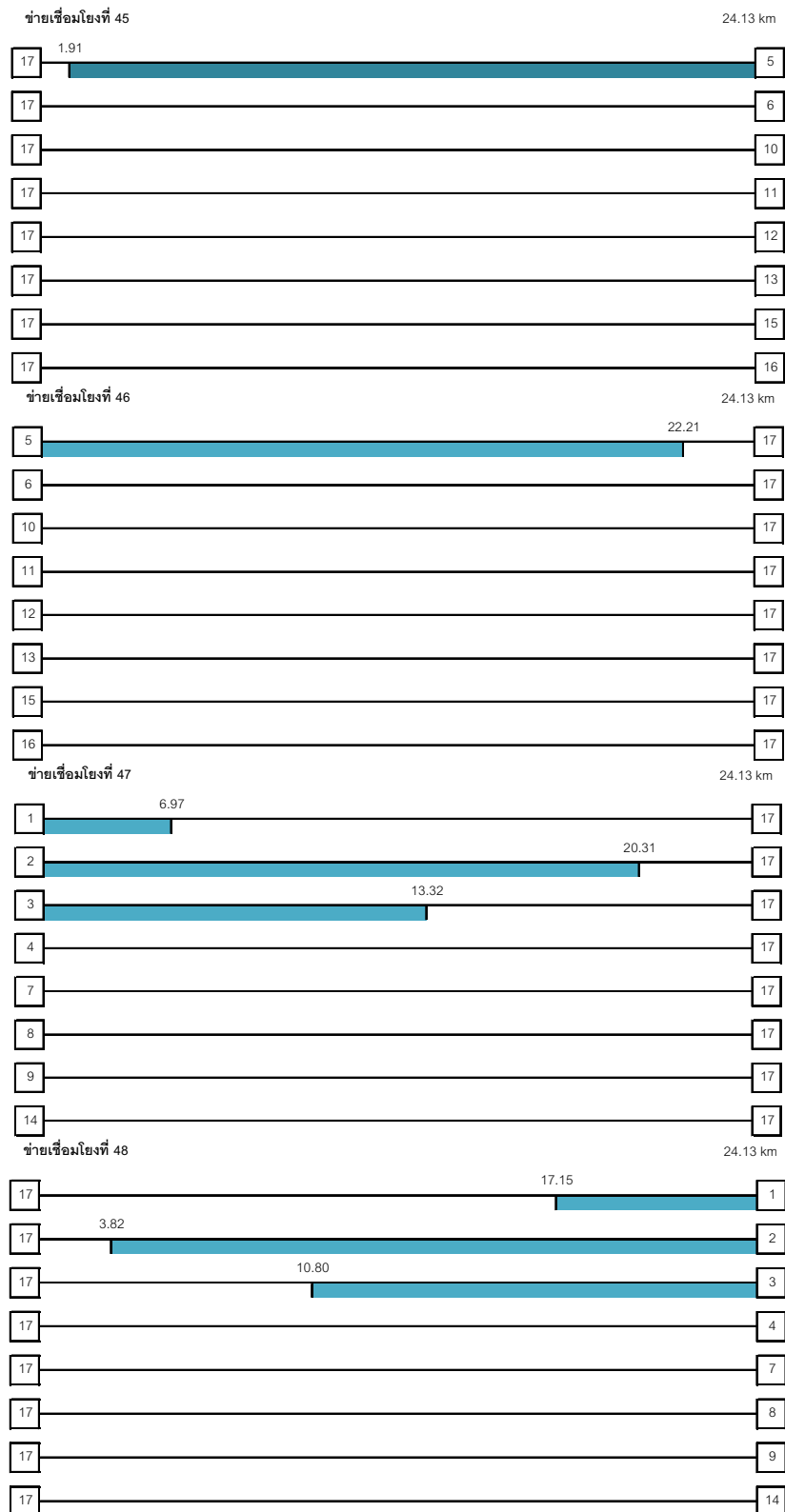
26.67 km



(บ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 40-42



(ป) ข่ายเชื่อมโยงที่ 43-44



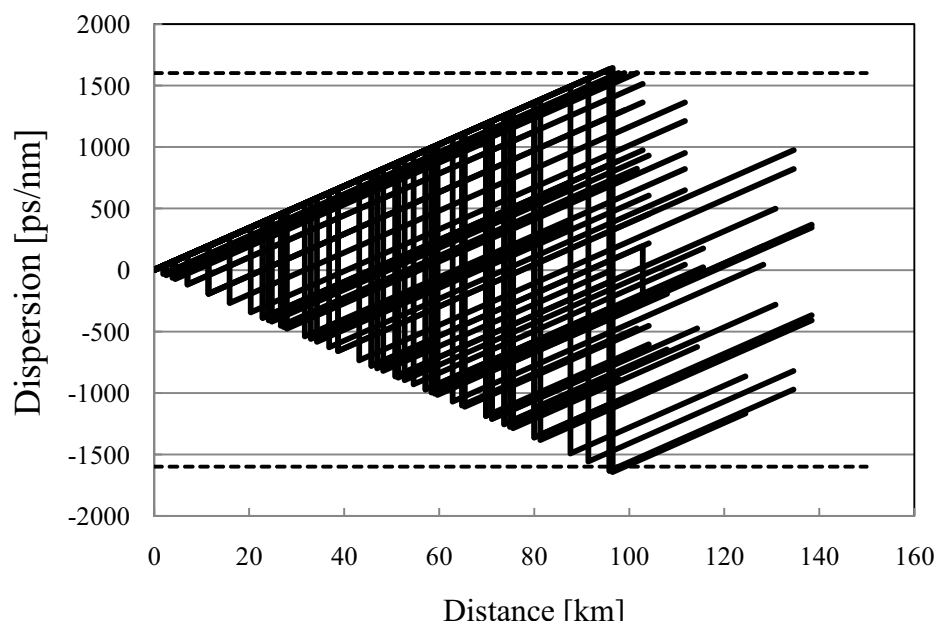
(ผ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 45-48

3. พิจารณาดำเนินการวางแผนเครื่องส่งยุคเฟสแสง จากรูปที่ 4.13(ก)-(ผ) จะพิจารณาดำเนินการของเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้โดยใช้หลักการเดิมจากตัวอย่างที่ 1 โดยข่ายเชื่อมโยงแรกที่ต้องพิจารณาคือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16 หลังจากกระทำการหาช่วงในการวางแผนเครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งหมดแล้ว จะใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งหมด 6 ตัว และได้ตำแหน่งหรือช่วงการวางแผนเครื่องส่งยุคเฟสแสงดังนี้

- 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 ไม่ผ่านเพราะข่ายเชื่อมโยงที่ 21 เป็นข่ายแรกของกราฟฟิก)

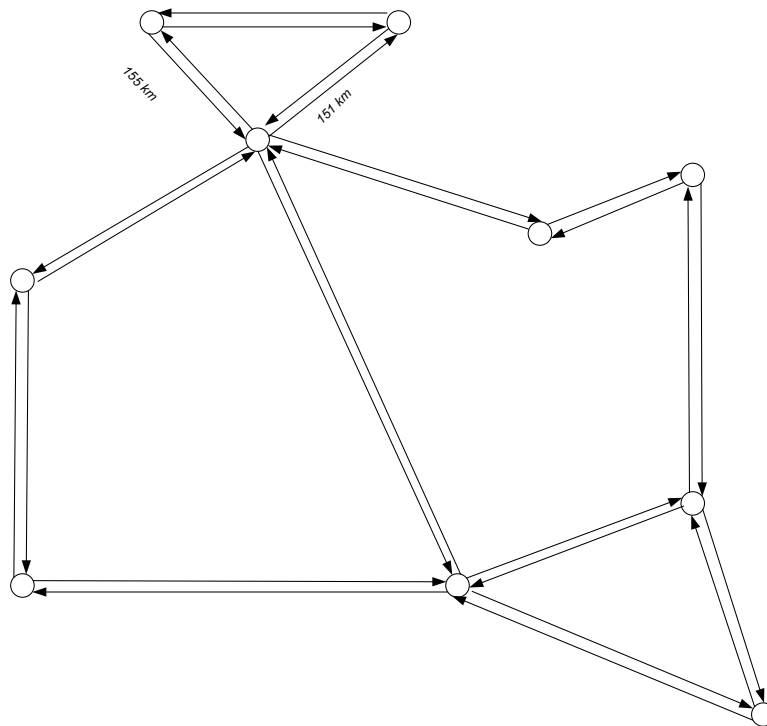
4. ตรวจสอบดิสเพอร์ชันของทุกกราฟฟิก รูปที่ 4.14 เป็นการตรวจสอบดิสเพอร์ชันหลังจากวางแผนเครื่องส่งยุคเฟสแสง



รูปที่ 4.14 ผลการตรวจสอบดิสเพอร์ชันหลังจากวางแผนเครื่องส่งยุคเฟสแสง

จากรูปที่ 4.38 จะเห็นว่าที่ปลายทางค่าดิสเพอร์ชันสะสมจะไม่เกินค่าที่กำหนด (± 1600 ps/nm) ไว้ แต่ระหว่างทางการสื่อสาร ค่าดิสเพอร์ชันอาจจะเกินค่าที่กำหนดไว้ก็ได้

ตัวอย่างที่ 3 โครงข่าย OPEN (Optical Pan European Network) ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 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 4.16 แสดงโครงข่าย OPEN ที่ได้รับการลดขนาดลงมาแล้ว ตารางที่ 4.9 แสดงกราฟฟิคและตำแหน่งการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงหลังจากลดขนาดโครงข่ายแล้ว ส่วนรูปที่ 4.17 แสดงตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงลงบนข่ายเชื่อมโยง

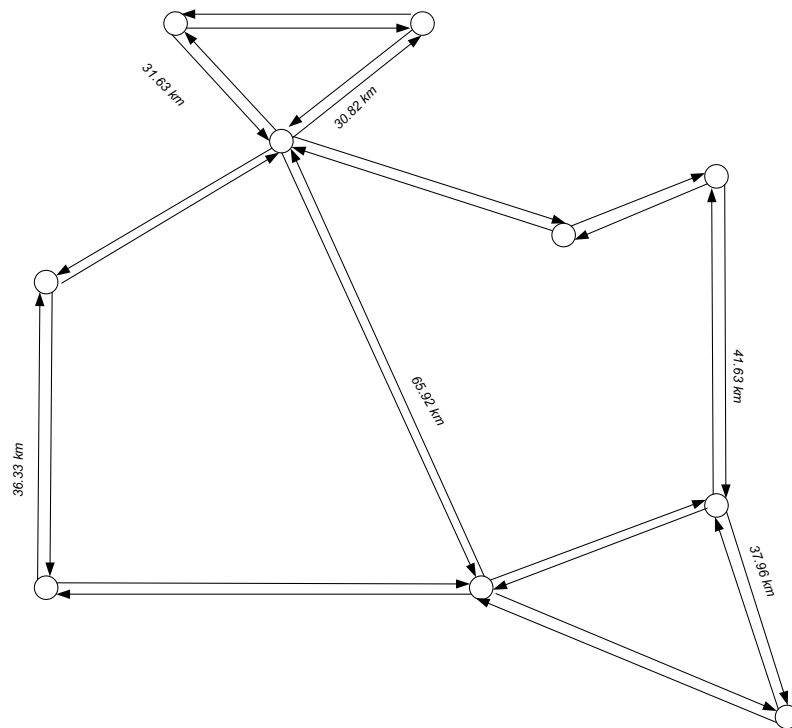
(4)Plze

ตารางที่ 4.7 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย OPEN

1	ระยะทาง [km]	ย้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	2	ระยะทาง [km]	ย้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	3	ระยะทาง [km]	ย้ายเชื่อมโยง [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]	ย้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	5	ระยะทาง [km]	ย้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	6	ระยะทาง [km]	ย้ายเชื่อมโยง [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]	ย้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	8	ระยะทาง [km]	ย้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	9	ระยะทาง (km)	ย้ายเชื่อมโยง (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]	ย้ายเชื่อมโยง [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 แสดงค่า R ของโครงข่ายตัวอย่างที่ 3

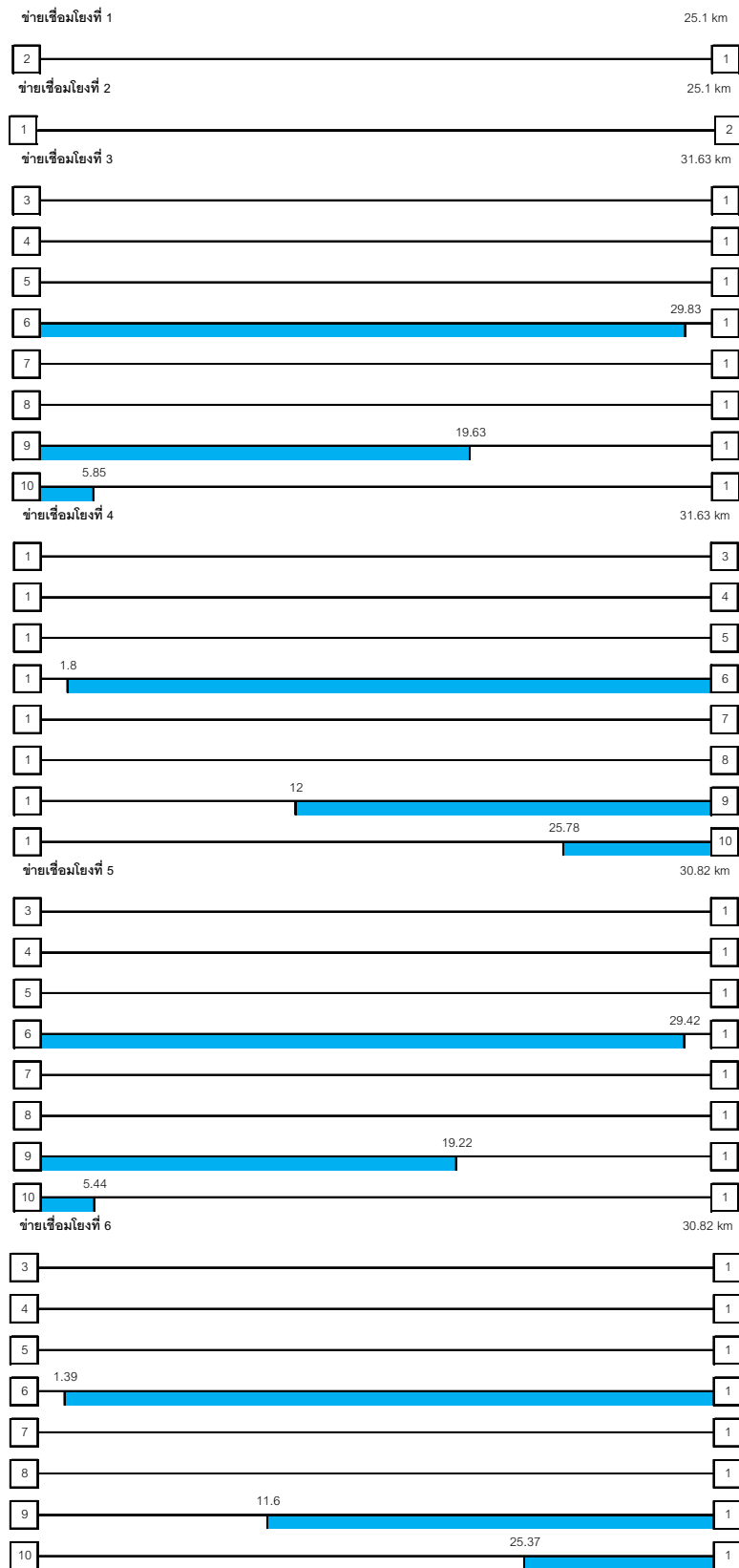
โนดต้นทาง-โนดปลายทาง	ทราฟฟิก [km]	X_1 [km]	R	โนดต้นทาง-โนดปลายทาง	ทราฟฟิก [km]	X_1 [km]	R
1-10	713	155	4.29	6-7	341	107	1.35
2-10	709	151	4.33	7-5	490	189	1.19
3-5	301	123	0.59	7-10	420	30	3.83
3-9	423	189	0.48	8-5	520	30	4.90
3-10	558	323	-0.94	8-10	390	204	-0.19
4-10	681	123	4.63	9-1	578	204	1.81
5-8	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 4.16 โครงข่าย OPEN ที่ได้รับการลดขนาดโครงข่ายลงมา 4.90 เท่า

ตารางที่ 4.9 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย OPEN (ลดขนาดโครงข่าย)

1	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ย้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	2	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ย้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	3	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ย้ายเชื่อมโยง (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)	ย้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	5	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ย้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	6	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ย้ายเชื่อมโยง (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)	ย้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	8	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ย้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	9	ระยะทาง/R (km)	ระยะทาง (km)	ย้ายเชื่อมโยง (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)	ย้ายเชื่อมโยง (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													



รูปที่ 4.17 ทราฟฟิกและตำแหน่งของเครื่องส่งยูคเพลสแสงของโครงข่าย OPEN

ข่ายเชื่อมโยงที่ 7

25.10 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 8

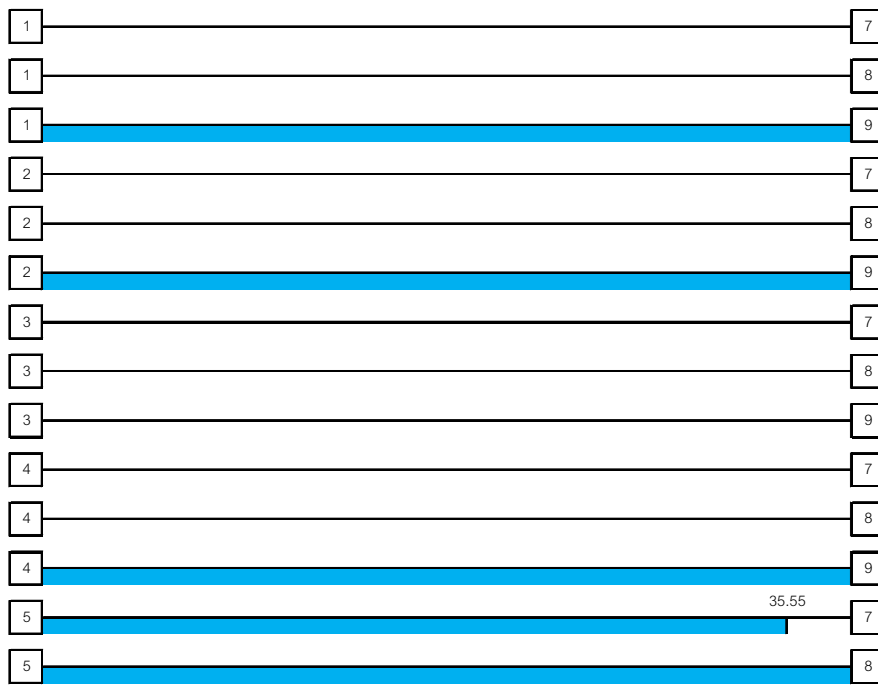
25.10 km



(๗) ข่ายเชื่อมโยงที่ 7-8

ข่ายเชื่อมโยงที่ 9

38.57 km

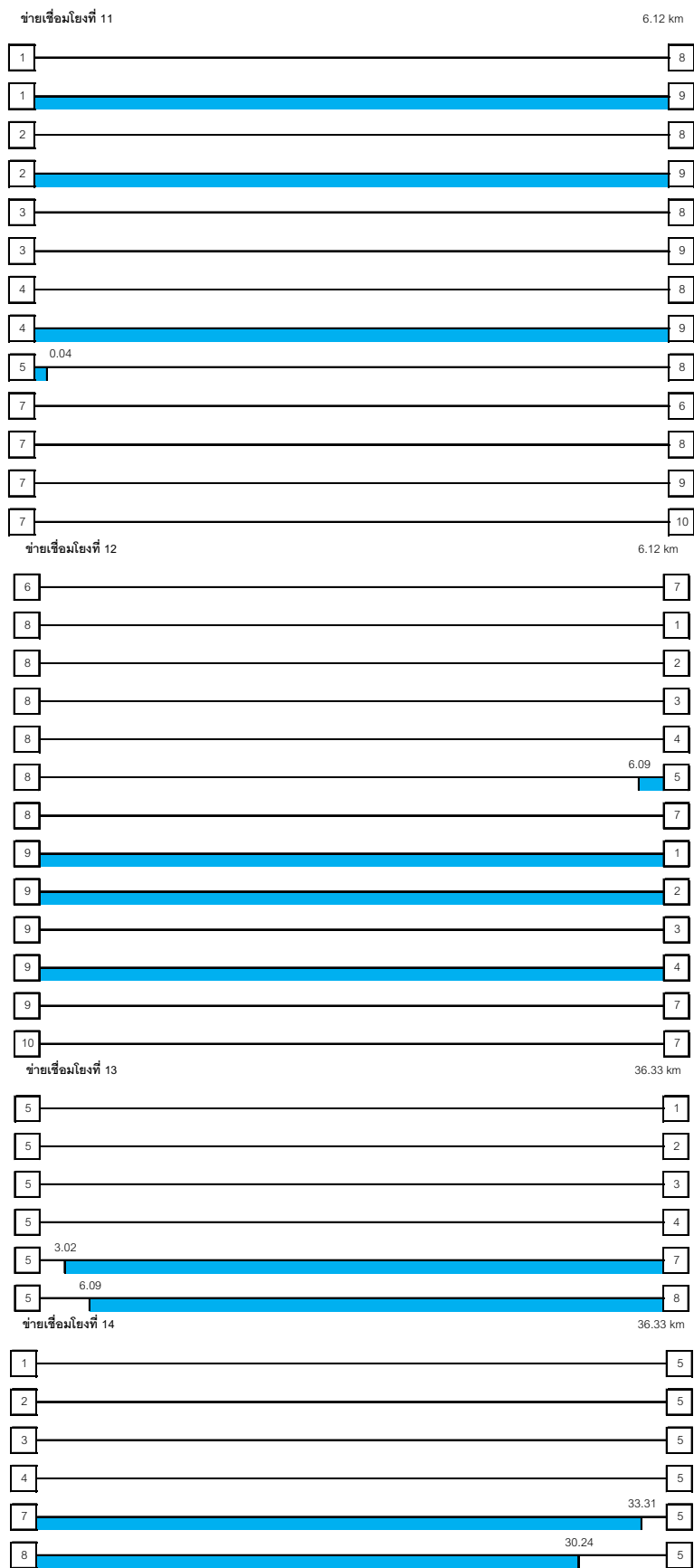


ข่ายเชื่อมโยงที่ 10

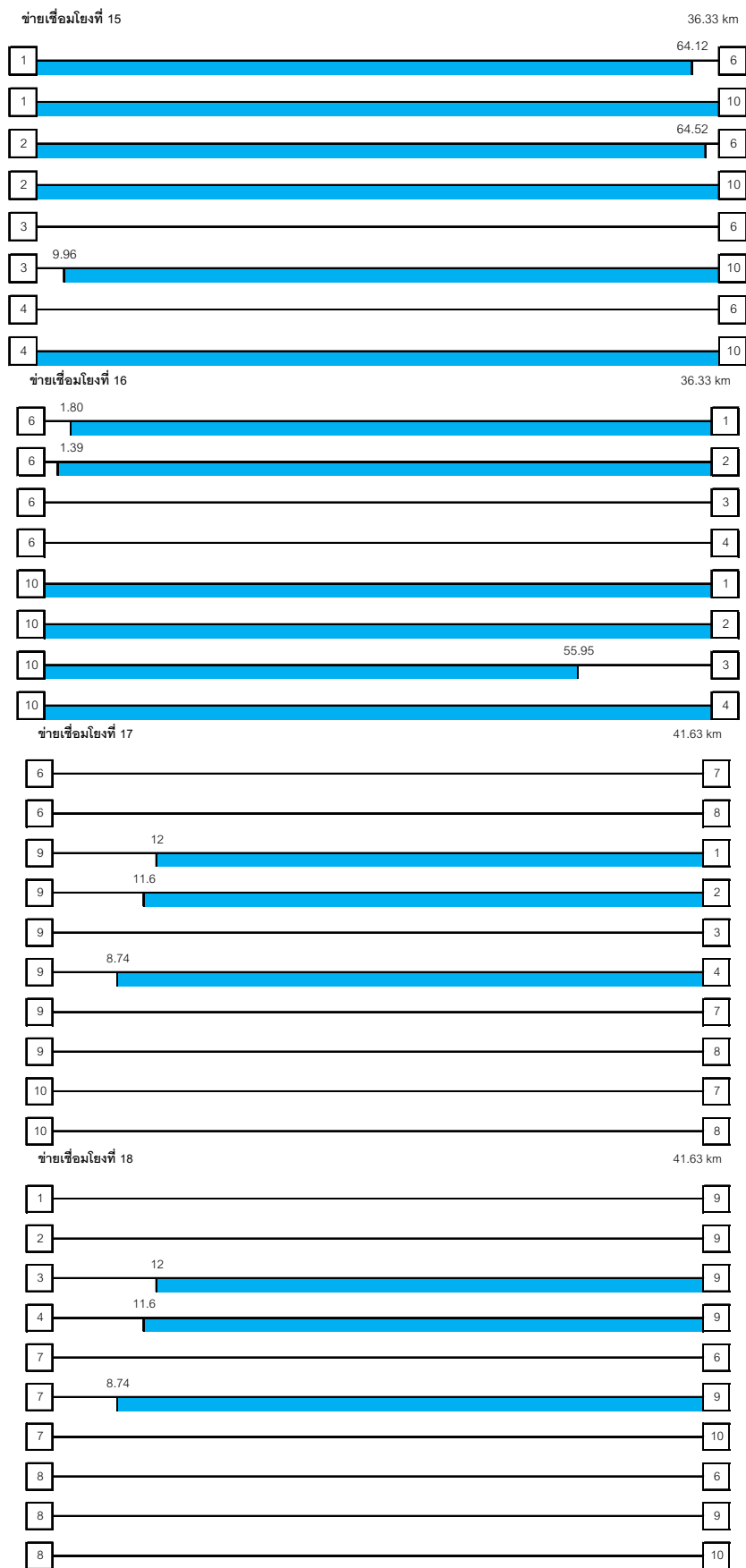
38.57 km



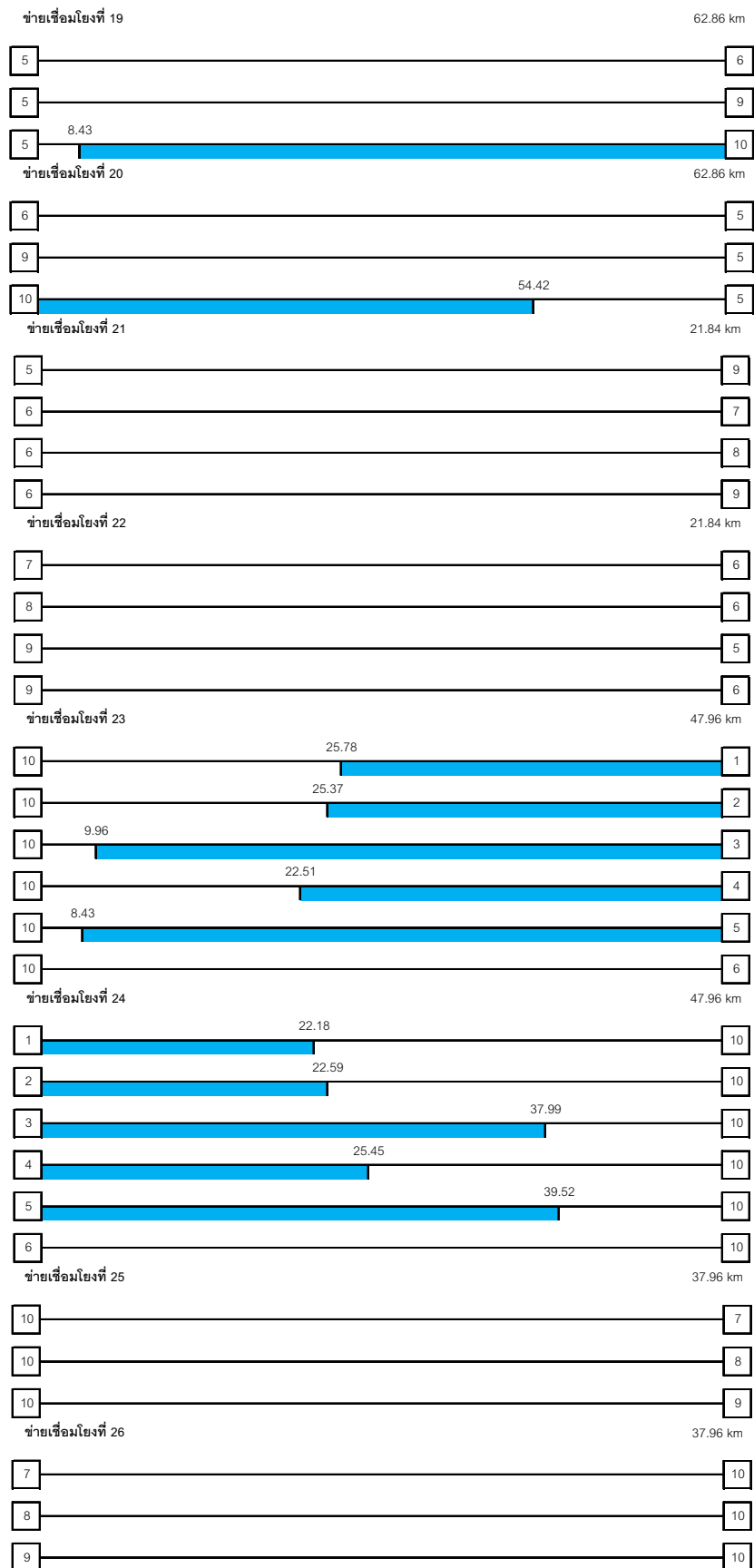
(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 9-10



(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 11-14



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 15-18

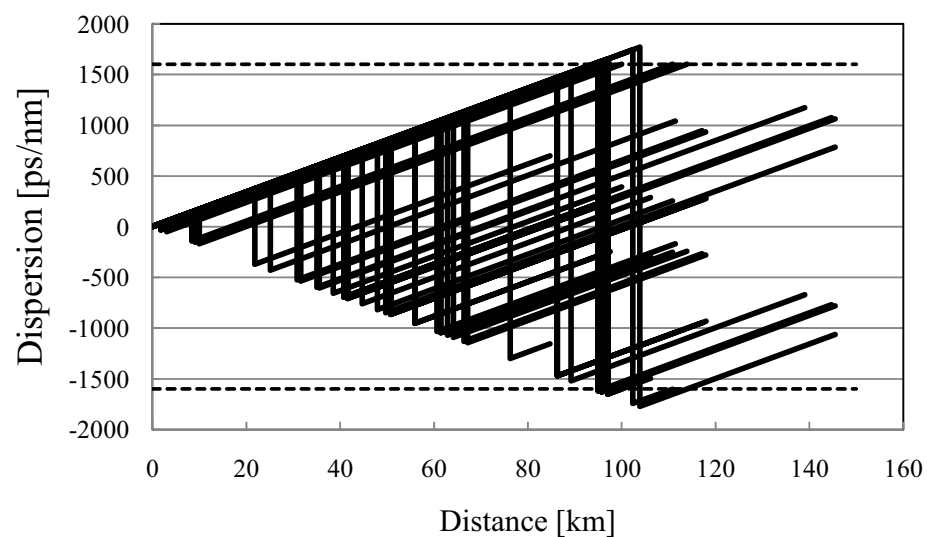


(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 19-26

3.พิจารณาหาตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง จากรูปที่ 4.17 จะหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงโดยใช้หลักการเดียวกับตัวอย่างที่ 1 จะได้จำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งหมด 6 ตัว ดังนี้

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

4.ตรวจสอบดิสเพอร์ชันของทุกทราฟฟิก รูปที่ 4.18 เป็นการตรวจสอบดิสเพอร์ชันหลังจากวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงของทุกๆทราฟฟิกในโครงข่าย OPEN



รูปที่ 4.18 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่าย OPEN

บทที่ 5

การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมช กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายและการวิเคราะห์ OSNR

การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายนั้น เราจะมีเงื่อนไขว่าข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายได้ไม่เกิน 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]

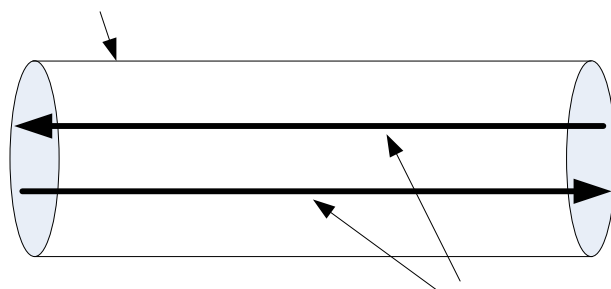
ในบทนี้เราจะศึกษาว่า การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย ว่าใช้หลักวิธีอะไร รวมถึงการวิเคราะห์ OSNR ของระบบด้วย ว่ามีความเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

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 เป็นตัวอย่างการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายของทราฟฟิกจากโนด 1 ไปยังโนด 10 เส้นทางเดิมคือ 3-9-21 แต่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย เราจะเปลี่ยนทั้งเส้นทางเพราะว่าเราจะไม่หาเส้นทางสำรองที่ใช้ข่ายเชื่อมโยงซ้ำกัน(link-disjoint) ดังนั้น เราจะไม่เอาข่ายเชื่อมโยงที่ 3 ข่ายเชื่อมโยงที่ 9 และข่ายเชื่อมโยงที่ 21 มาคิดคำนวณในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย ซึ่งจะได้เส้นทางใหม่จากโนด 1 ไปยังโนด 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

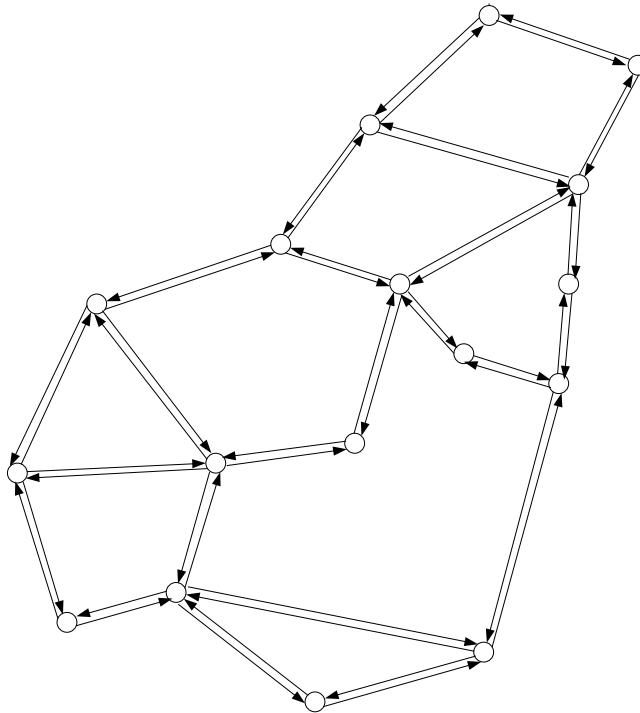
1.หาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสง ด้วยวิธีของ Dijkstra

2.หาค่า R พร้อมทั้งลดขนาดโครงข่าย ตารางที่ 5.1 แสดงผลของการหาค่า R จากโครงข่าย NARNet ซึ่งสรุปได้ว่าค่า R ที่มากที่สุดเท่ากับ 28.53 หรือต้องลดขนาดโครงข่ายลงมา 28.53 เท่า ตารางที่ 5.2 แสดงทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่ายและระยะทางที่ได้รับการลดขนาดโครงข่ายจากค่า R ในกรณีที่ทำงานปกติที่ R เท่ากับ 28.53 ตารางที่ 5.3 แสดงทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่ายและระยะทางที่ได้รับการลดขนาดโครงข่ายจากค่า R ในกรณีที่เกิดความเสียหาย จะเห็นได้ว่าค่า R มีค่ามากกว่าค่า R ในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติ ดังนั้น ถ้าเราจะคิดถึงกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายด้วยนั้น เราจะใช้ค่า R ที่หาได้เท่ากับ 28.53 ในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งในเวลาที่ทำงานปกติและเวลาที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย

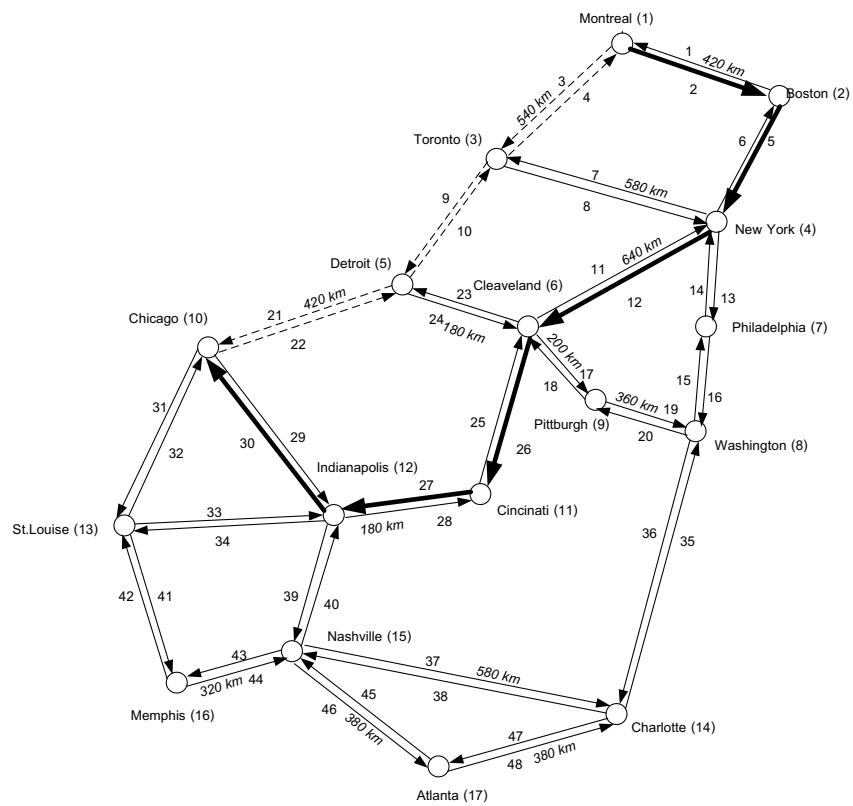
จากตารางที่ 5.2 จะพบว่ากรณีที่ทำงานปกตินั้น ไม่จำเป็นต้องวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงก็ได้ ซึ่งค่าตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสง (OPC_L และ OPC_R) นั้นเป็นแถบแรงเงาสีเทาหมด ซึ่งหมายความว่าช่วงในการวางนั้นมีระยะทางที่ยาวกว่าทราฟฟิกนั้นๆ

ตารางที่ 5.1 แสดงค่า R ของโครงข่าย NARNet กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย

โน้ตค้นทาง-ในคปลายทาง	กราฟฟิก[km]	X_1[km]	R	โน้ตค้นทาง-ในคปลายทาง	กราฟฟิก[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) เมื่อเกิดข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายของทราฟฟิกระหว่างโนด 1 ไปโนด 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

(๒) 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

โนด 13	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 14	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [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
โนด 15	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [km]	OPC_L	OPC_R	โนด 16	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [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
โนด 17	ระยะทาง/R[km]	ระยะทาง[km]	ซ้ายเชื่อมโยง [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)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	โนด 6	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ซ้ายเชื่อมโยง (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)	ซ้ายเชื่อมโยง (km)	OPC_L	OPC_R	โนด 8	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ซ้ายเชื่อมโยง (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

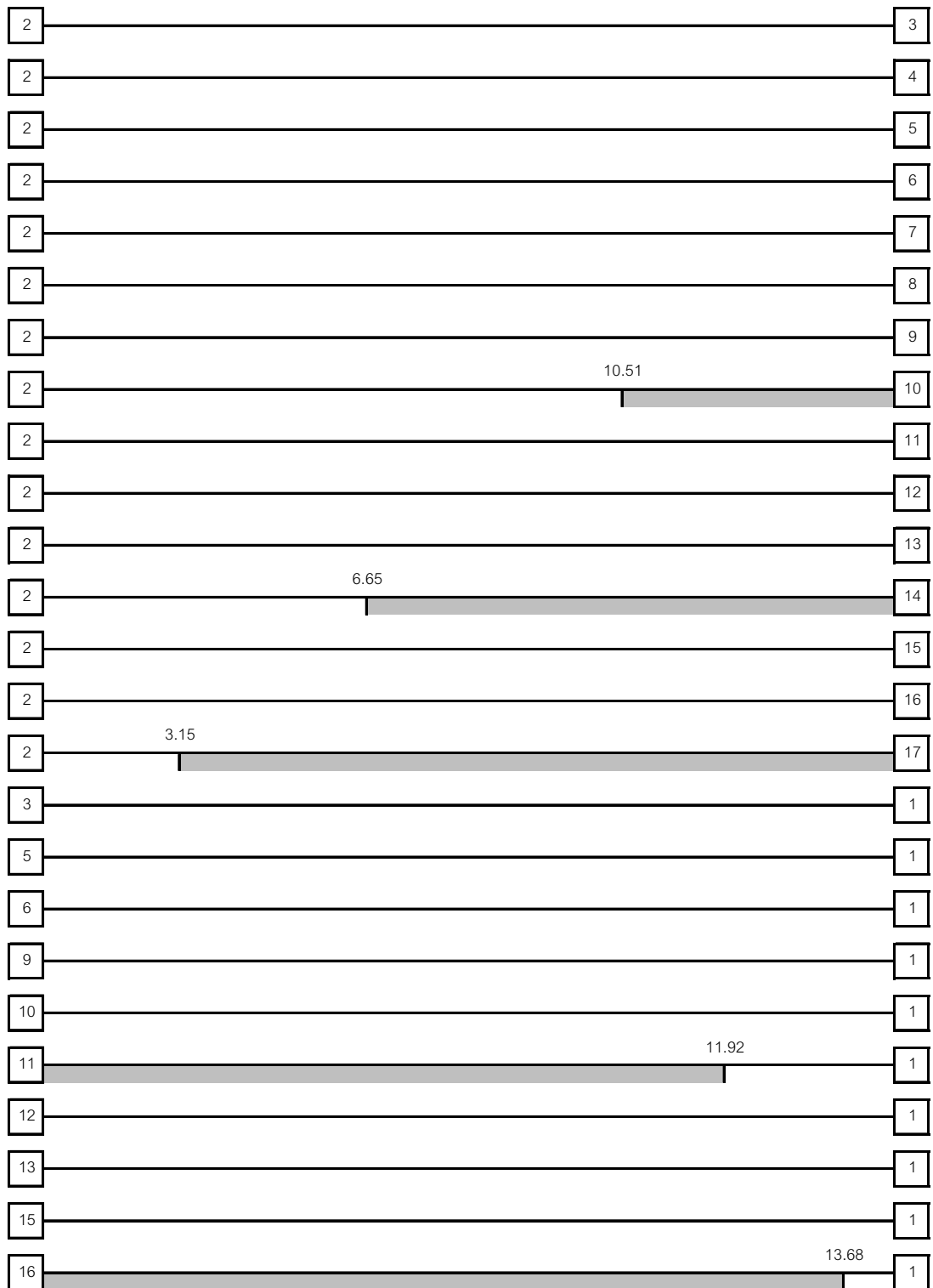
โหนด 9	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมต่อ (km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 10	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมต่อ (km)	OPC_L	OPC_R
1	51.17	1460	19,15,14,6,1	-21.39	72.56	1	79.92	2280	29,28,25,11,6,1	-7.02	86.93
2	59.59	1700	18,23,10,4,2	-17.18	76.77	2	114.97	3280	29,28,25,17,19,15,14,7,4,2	10.51	104.46
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)	ข่ายเชื่อมต่อ (km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 12	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมต่อ (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

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	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
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	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
โนด 17	ระยะทาง/R(km)	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง (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						

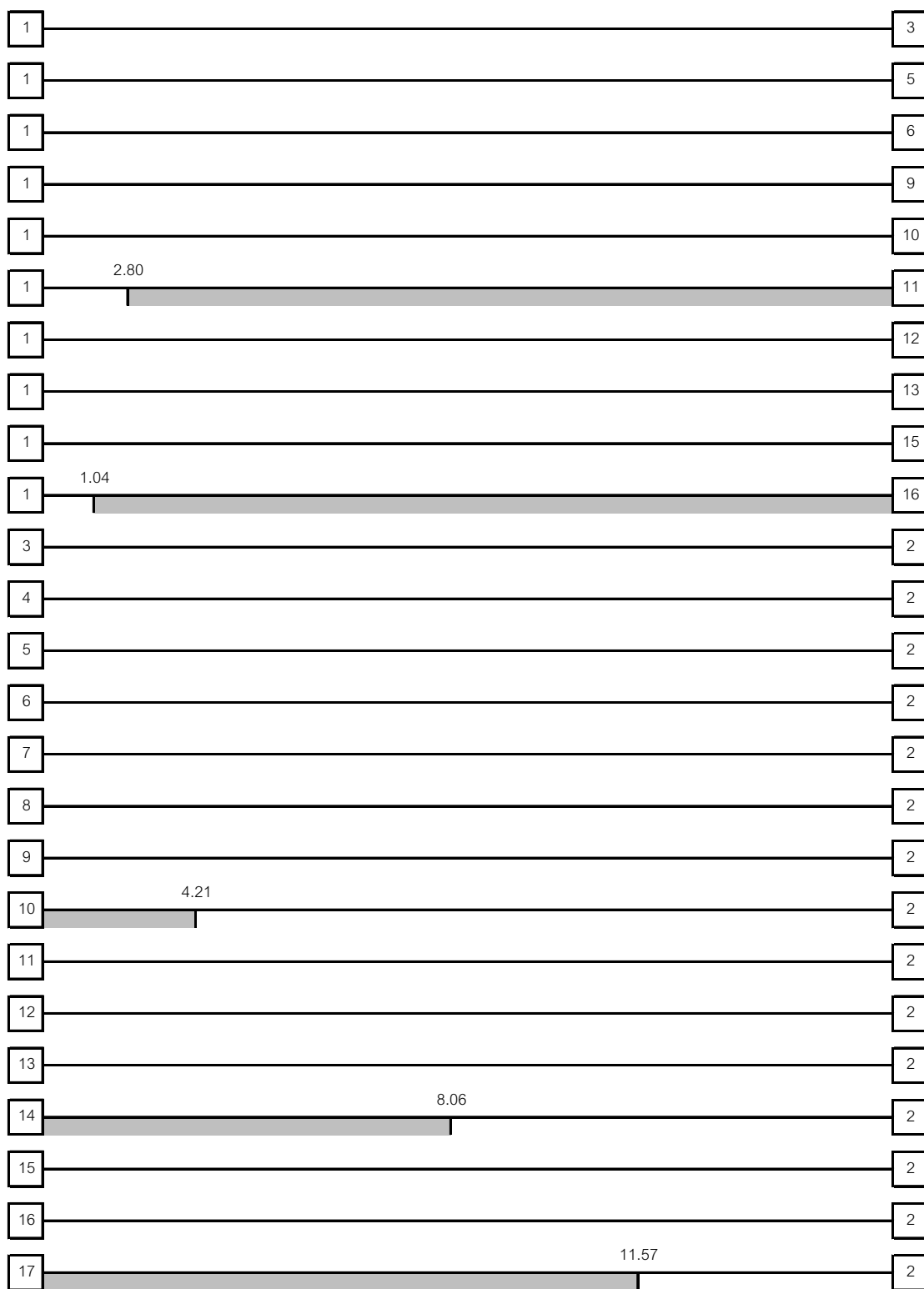
ข่ายเชื่อมโยงที่ 1

14.72 km



รูปที่ 5.3 ทราฟฟิกและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่าย NARNet กรณีข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย

(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 1



ข่ายเชื่อมโยงที่ 3

18.93 km

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

(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 3

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

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

ข่ายเชื่อมโยงที่ 6

12.62 km

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

(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 - 6

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

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

(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 8

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

(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 9

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

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

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

(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 12

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

(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13

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

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

(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 15

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

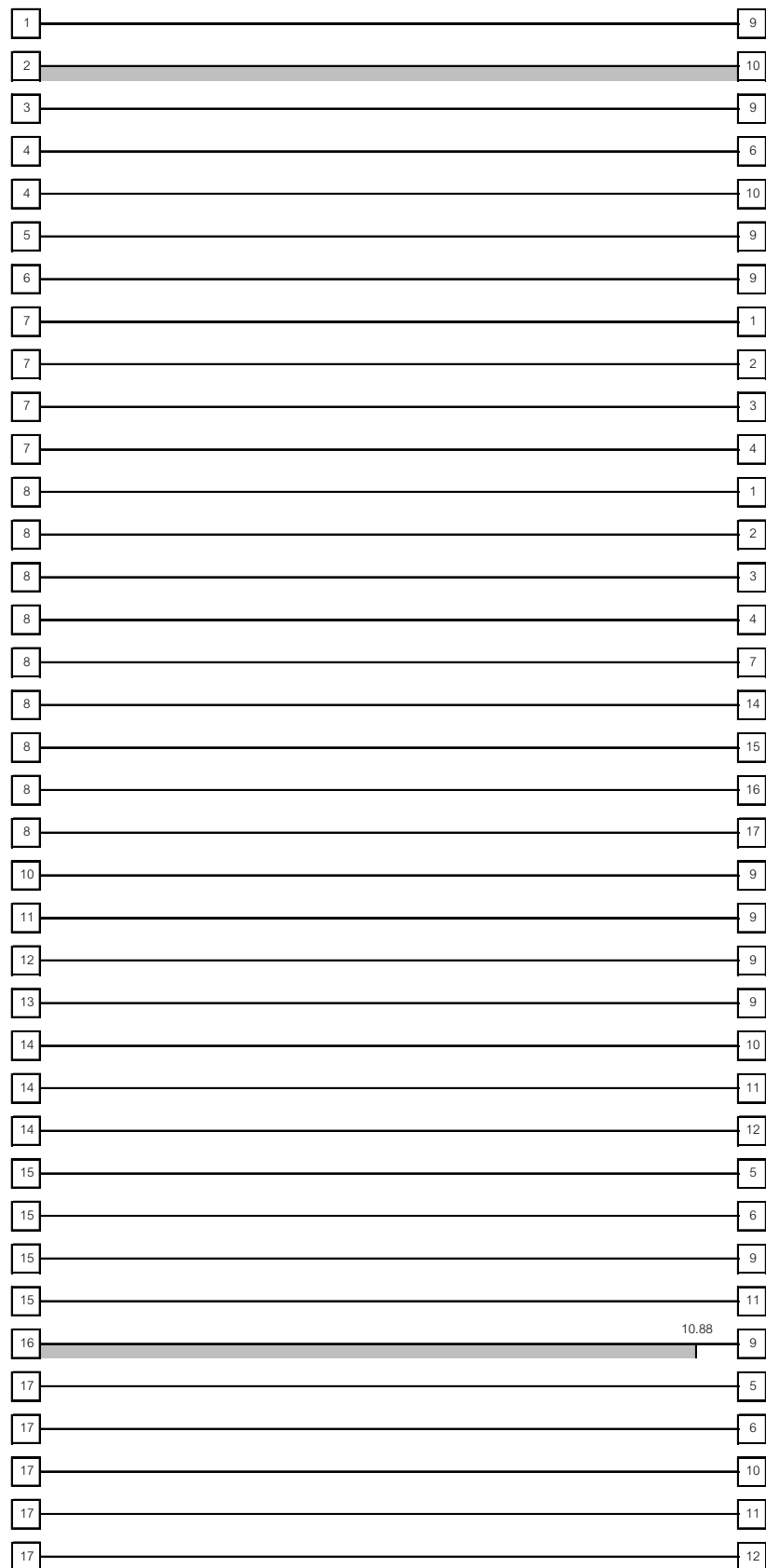
1	7
1	8
2	7
2	8
2	9
3	7
3	8
4	7
4	8
4	9
5	15
5	17
6	4
6	15
6	17
7	8
7	9
8	9
10	2
10	4
10	14
10	17
11	14
11	15
11	17
12	14
12	17
14	8
14	9
15	8
16	8
17	8
17	9

(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 17

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

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

(ต) ข่ายเชื่อมโยงที่ 19



(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 20

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

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

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

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

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

(ป) ข่ายเชื่อมโยงที่ 25

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

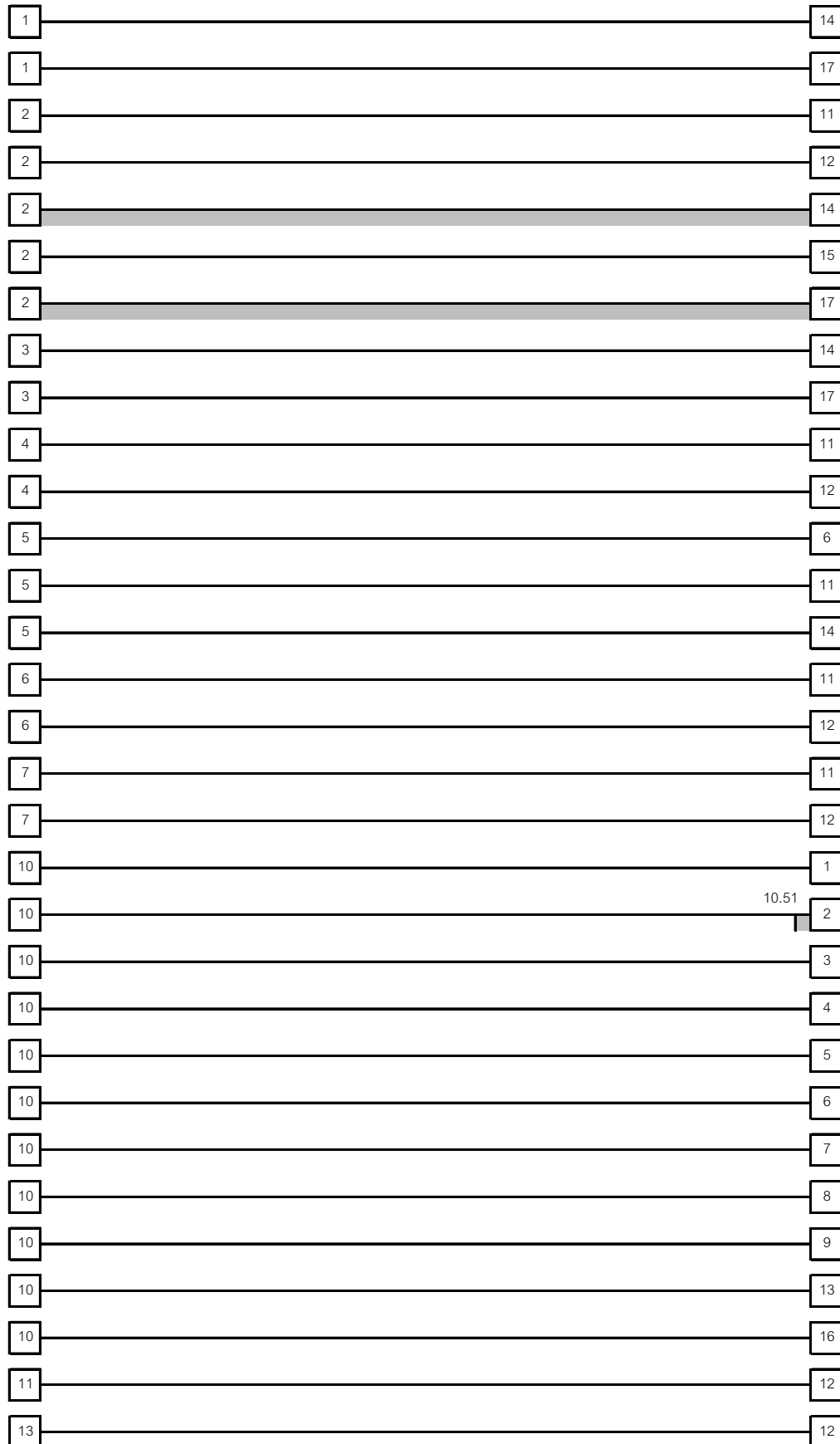
(ผ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 26

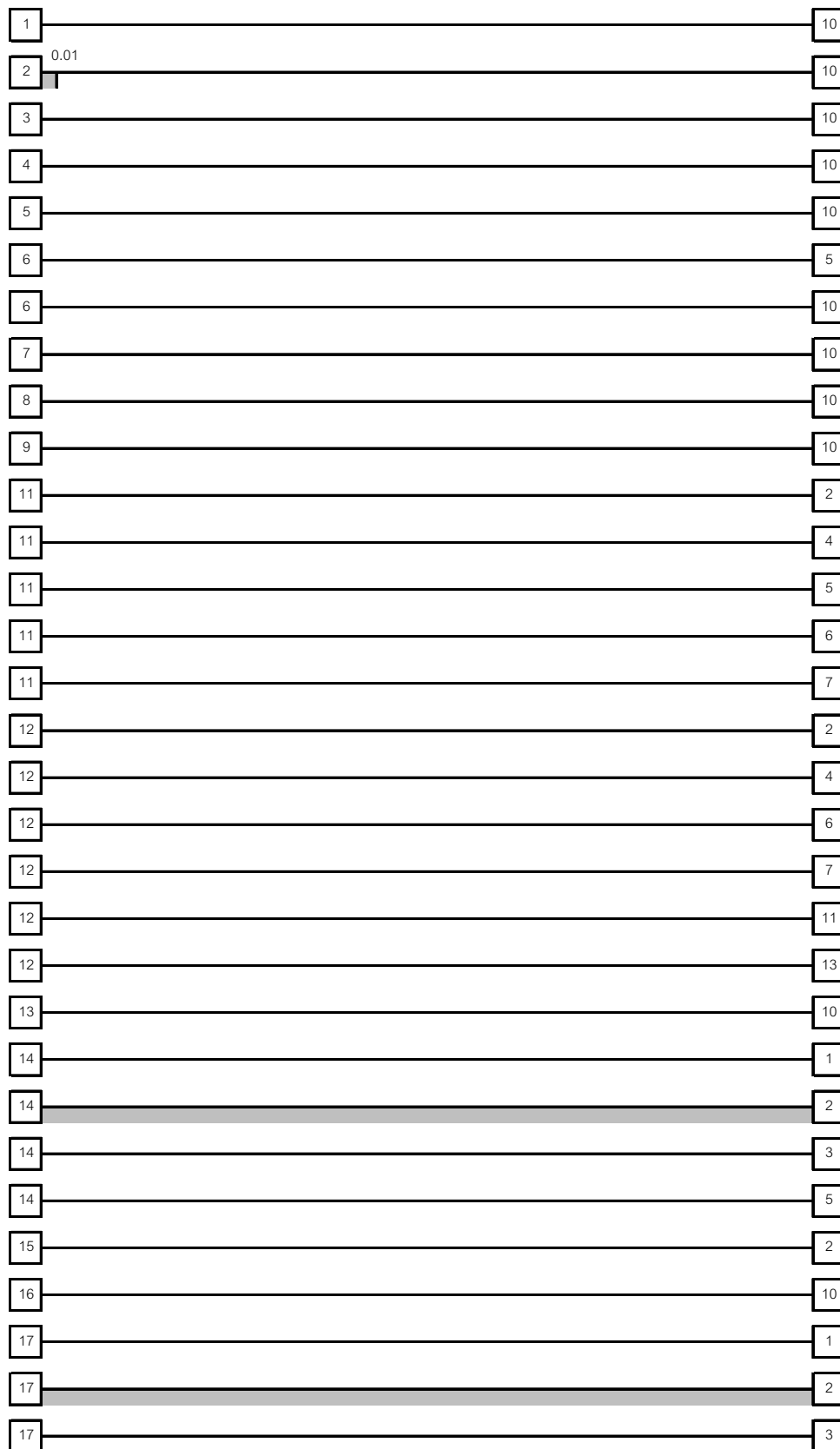
1		10
1		12
1		13
1		16
2		10
3		10
3		12
3		13
4		10
4		14
4		15
4		16
4		17
5		10
5		12
5		13
5		16
6		5
6		10
6		14
7		10
7		14
7		15
7		16
7		17
8		10
8		14
8		15
8		16
8		17
9		10
9		14
9		17
11	2.80	1
11		2
11		3
11		4
11		5
11		6
11		7
11		8
11		9
14		12
17		12

(ผ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 27

1	3.51	11
2		11
3		11
4		11
5		6
5		11
6		11
7		11
8		11
9		11
10		1
10		2
10		3
10		4
10		5
10		6
10		7
10		8
10		9
12		1
12		3
12		5
12		14
12		17
13		1
13		3
13		5
14		4
14		6
14		7
14		8
14		9
15		4
15		7
15		8
16		1
16		4
16		5
16		7
16		8
17		4
17		7
17		8
17		9

(พ) ซ้ายเชื่อมโยงที่ 28





ข่ายเชื่อมโยงที่ 31

15.42 km

2	13
2	16
4	13
6	13
6	16
7	13
9	16
10	12
10	15
11	13
11	16
12	13

ข่ายเชื่อมโยงที่ 32

15.42 km

12	10
13	2
13	4
13	6
13	7
13	11
13	12
15	10
16	2
16	6
16	9
16	11

(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

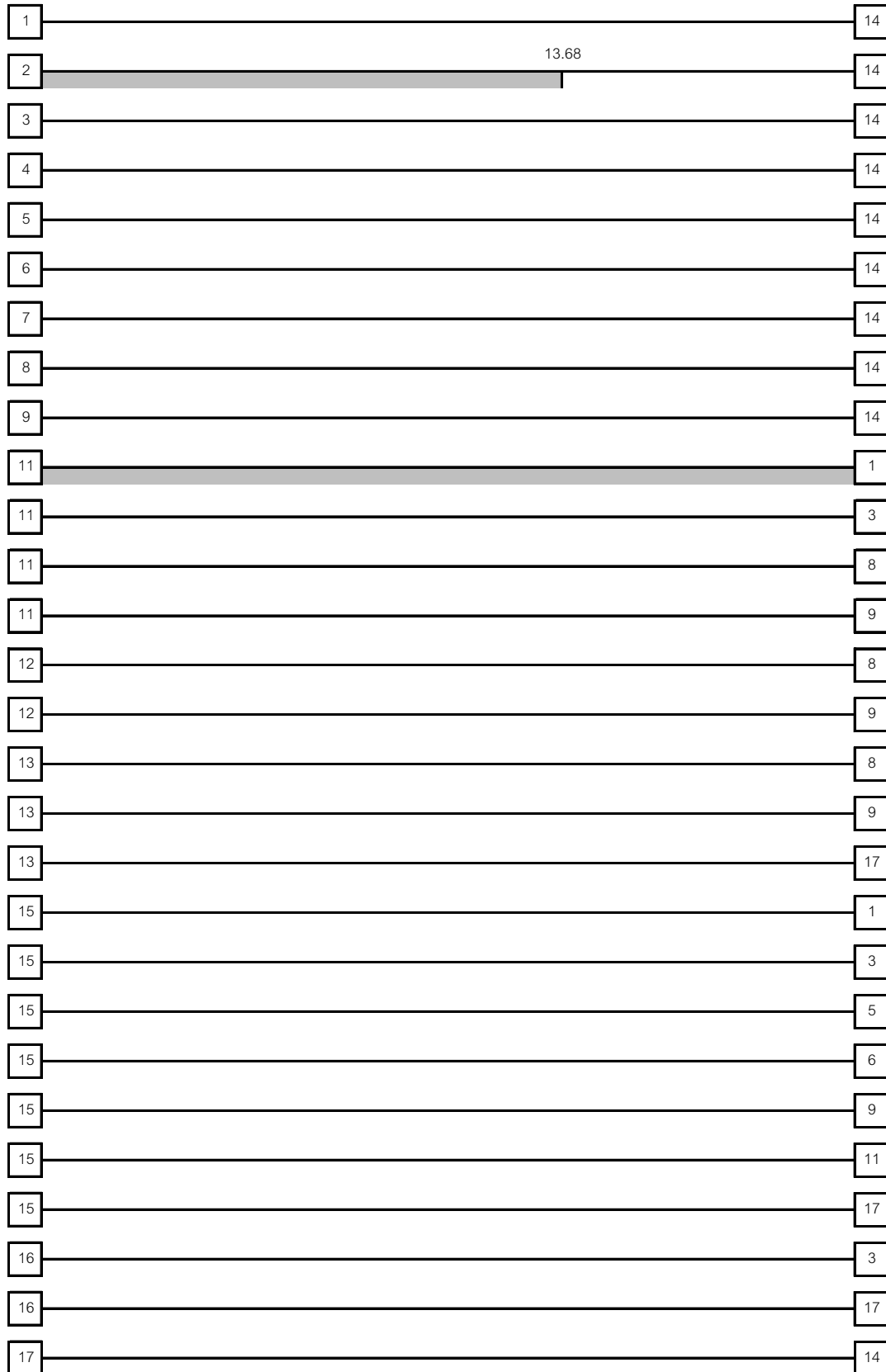
18.93 km

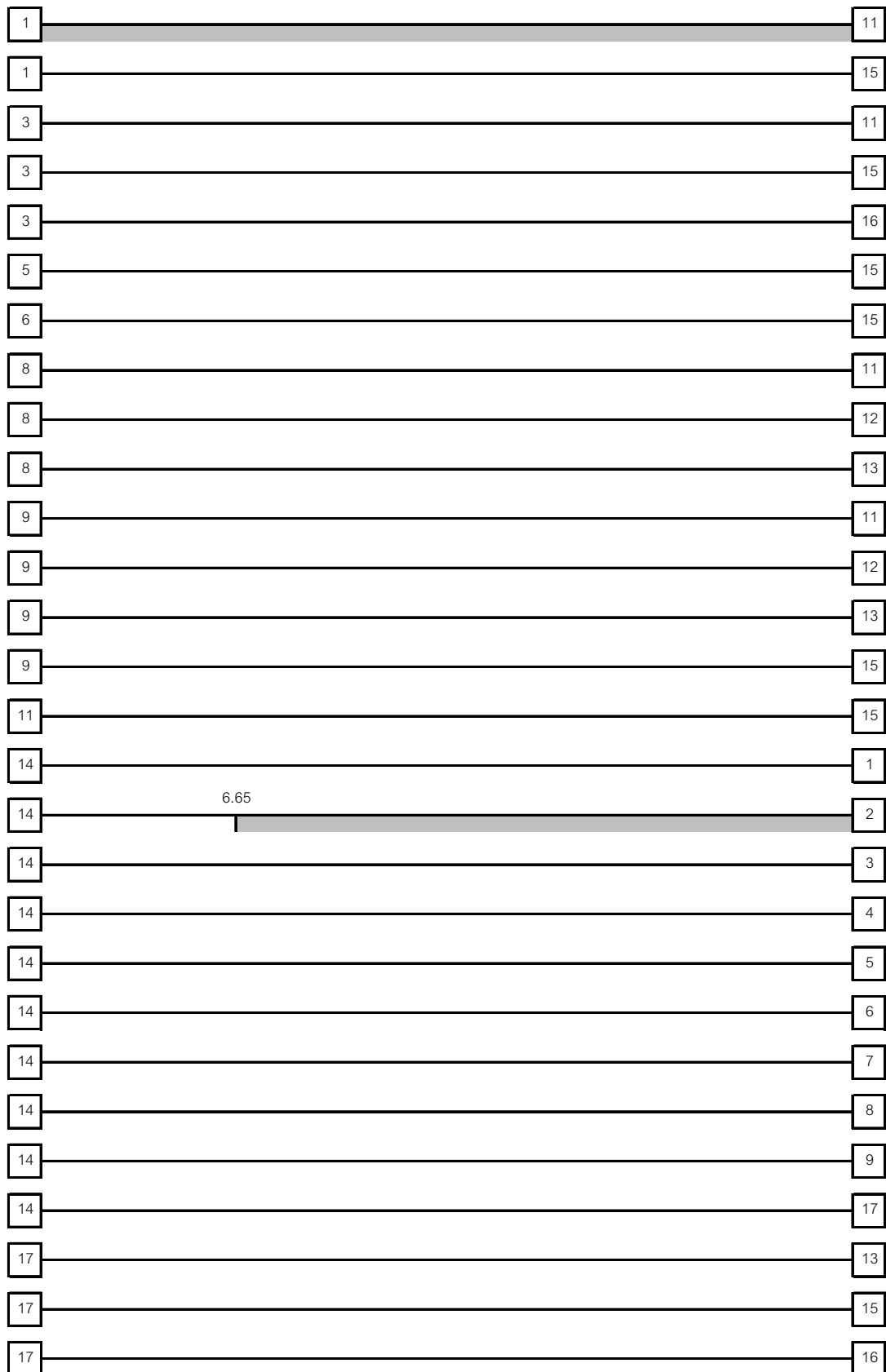
11	1
11	3
11	8
11	9
12	8
12	9
13	8
13	9
14	10
14	11
14	12
15	1
15	3
15	5
15	6
15	9
15	11
16	3
17	5
17	6
17	10
17	11
17	12

(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 35

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





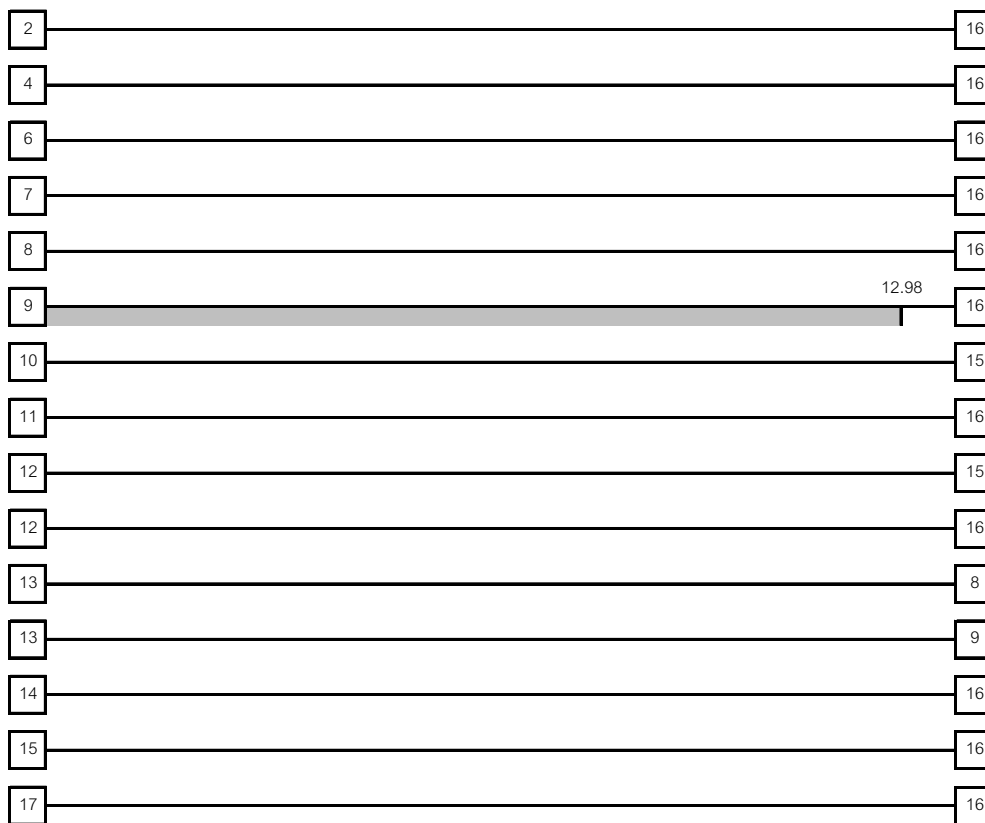
1	14
1	16
1	17
2	14
2	15
2	17
3	14
3	17
4	14
4	15
4	17
5	14
5	16
6	14
7	14
7	15
7	17
8	14
8	15
8	17
9	14
9	17
10	16
11	1
11	3
11	8
11	9
12	8
12	9
13	14
13	15
13	16
13	17
16	14
16	15
16	17

(๒) ข่ายเชื่อมโยงที่ 39

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

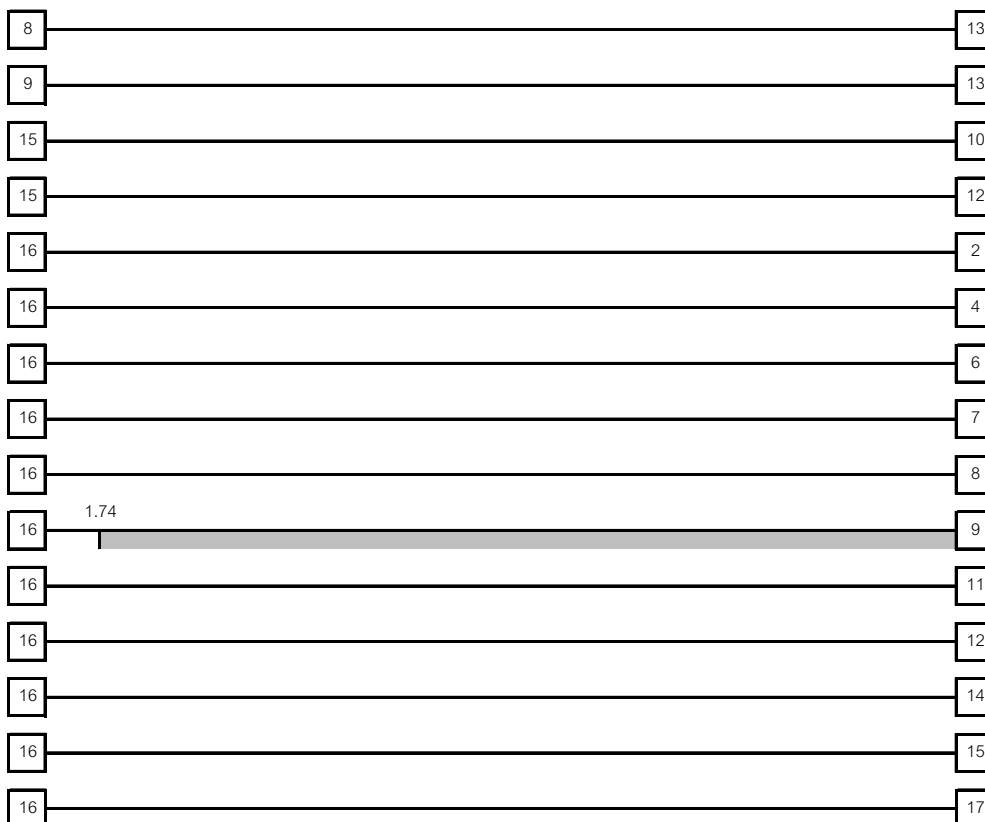
ข่ายเชื่อมโยงที่ 41

14.72 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 42

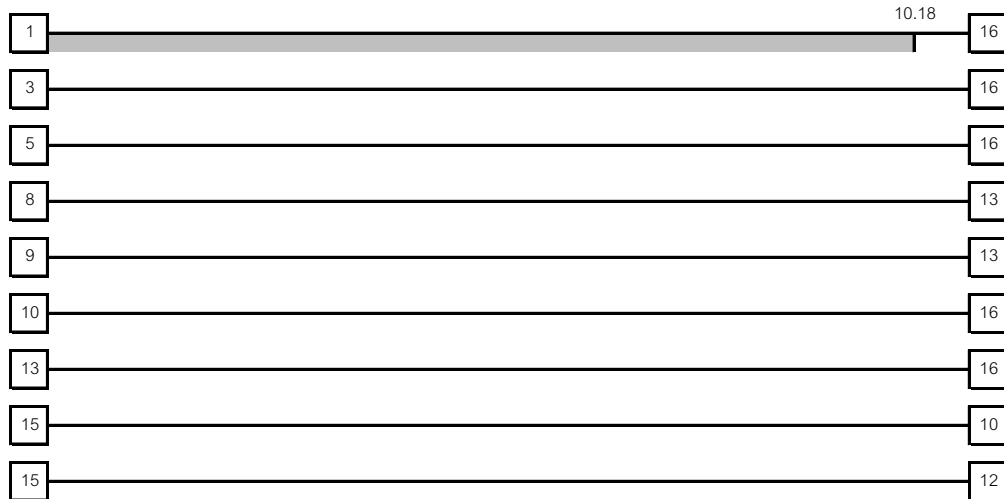
14.72 km



(ห) ข่ายเชื่อมโยงที่ 41 – 42

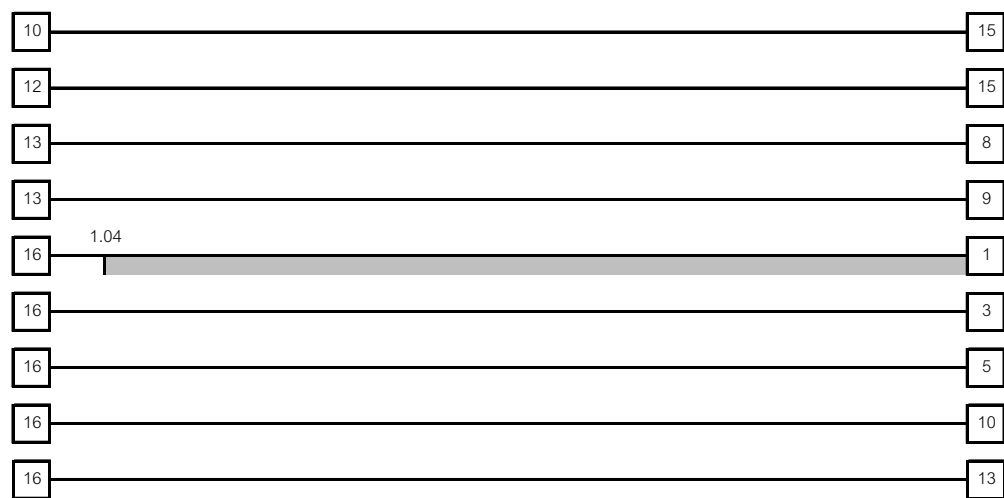
ข่ายเชื่อมโยงที่ 43

11.22 km



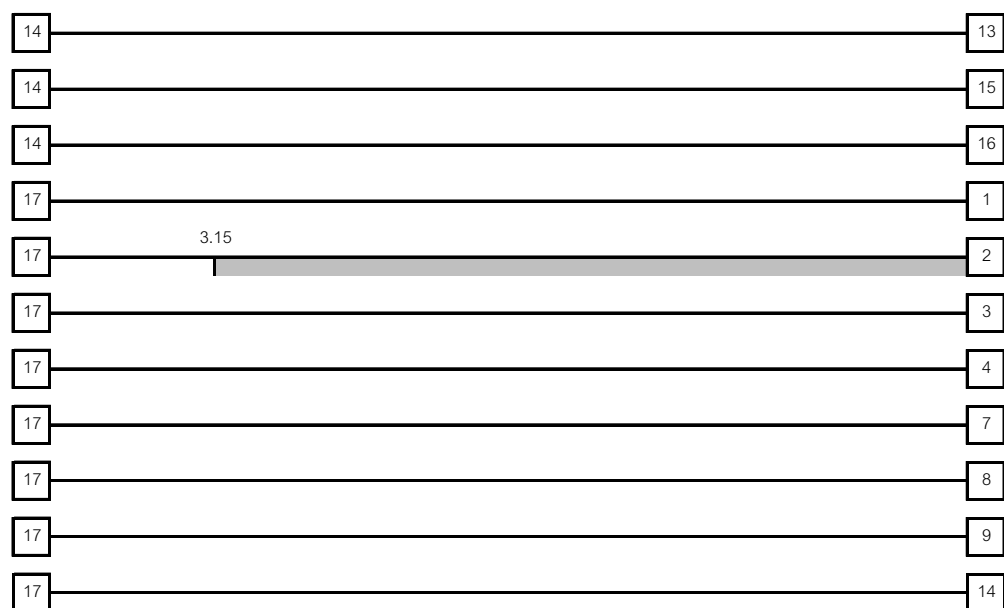
ข่ายเชื่อมโยงที่ 44

11.22 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 45

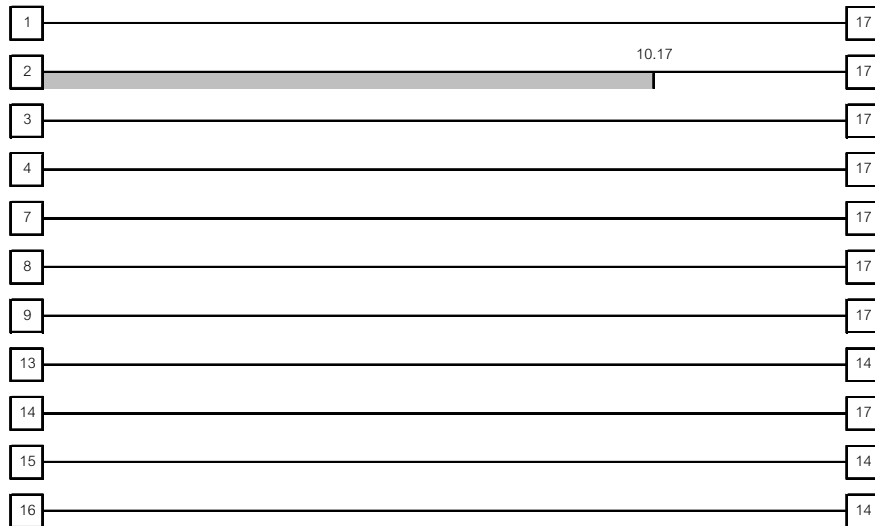
13.32 km



(พ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 43 - 45

ข่ายเชื่อมโยงที่ 46

13.32 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 47

13.32 km



ข่ายเชื่อมโยงที่ 48

13.32 km



(อ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 46 - 48

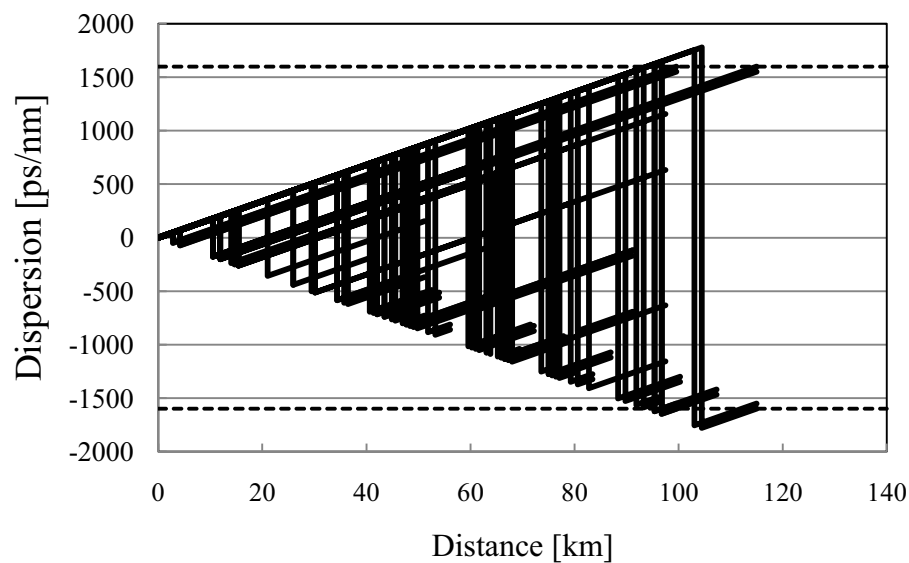
3.พิจารณาหาตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง จากรูปที่ 5.3(ก)-(อ) จะพิจารณาโดยยึดตามหลักการในบทที่ 4 ข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกในข่ายนั้นมากที่สุดคือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 1(10.51 – 11.92 km) และ 2 (2.80 - 4.21 km) จากนั้นจะพิจารณาข่ายต่อไปหลังจากตัดข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 1 และ 2 ทั้ง คือ 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 5.4 เป็นผลแสดงดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่าย NARNet กรณีมีการกู้คืนสัญญาณแล้ว



รูปที่ 5.4 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่าย NARNet กรณีมีการกู้คืนสัญญาณ

5.2 การวิเคราะห์ผล OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

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

5.2.1 การคำนวณหาค่า OSNR ของระบบ

OSNR คือ อัตราส่วนของสัญญาณข้อมูลกับสัญญาณรบกวน ดังสมการที่ (5.1)

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

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

แต่ในการศึกษาครั้งนี้ เราจะพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง และโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ดังสมการที่ (5.2)

$$\frac{OSNR_{new}}{OSNR_{old}} = 10 \log \frac{(G_{link} - n)}{(G_{link} - n) + n(G_{OPC} - 1)} \quad (5.2)$$

เมื่อ	G_{link}	คือ อัตราขยายทั้งหมดของเครื่องขยายสัญญาณที่ต้องใช้ในการส่งข้อมูล (dB)
	G_{OPC}	คือ อัตราขยายของเครื่องขยายสัญญาณที่นำมาชดเชยสัญญาณที่ลดลงจากเครื่องส่งยุคเฟสแสง
	n	คือ จำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสง

เราสามารถหาค่าอัตราขยายสัญญาณก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสงโดยคำนวณจากสมการที่ (5.3)

$$G = \alpha \times L \quad (5.3)$$

เมื่อ	G	คือ อัตราขยายสัญญาณ (dB)
	α	คือ attenuation coefficient มีค่าเท่ากับ 0.275 dB/km [41]
	L	คือ ระยะทาง (km)

5.2.2 ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างที่ 1 จากโครงข่ายตัวอย่างแบบแพร่และเลือกสัญญาณในบทที่ 3

1.หากำลังขยายของทุกทราฟฟิก เราจะหาค่าอัตราขยายก่อนเข้าเครื่องส่งยุคเฟสแสงได้จากสมการที่ (5.3) เช่น กำลังขยายจากสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 2 มีค่าเท่ากับ

$$G = 0.275 \times 4.95 = 1.36 \text{ dB}$$

ตารางที่ 5.4 แสดงกำลังขยายทุกทราฟฟิก โดยจะพิจารณาเฉพาะโครงข่ายที่ลดขนาดมาแล้ว

2.คำนวณหาอัตราส่วน OSNR จากสมการที่ (5.2) แทนค่า G_{OPC} เท่ากับ 15.3 dB [26][36][54] และนำค่าจากตารางที่ 5.4 ไปคำนวณ อัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง เช่น

อัตราส่วน OSNR ของทราฟฟิกระหว่างสถานีที่ 1 ไปยังสถานีที่ 5 คือ

$$\frac{OSNR_{new}}{OSNR_{old}} = 10 \log \frac{(27.23-1)}{(27.23-1) + (1)(15.3-1)} \text{ dB}$$

$$\frac{OSNR_{new}}{OSNR_{old}} = -1.890 \text{ dB}$$

ตารางที่ 5.5 แสดงอัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ ของทุกทราฟฟิก

ตารางที่ 5.4 กำลังขยายทั้งหมดในการส่งข้อมูลและจำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใช้

สถานีที่ 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	สถานีที่ 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]
สถานีที่ 2	4.95	100	1.36	0	สถานีที่ 1	43.32	875	11.91	0
สถานีที่ 3	43.32	875	11.91	0	สถานีที่ 2	43.32	875	11.91	0
สถานีที่ 4	43.32	875	11.91	0	สถานีที่ 3	7.43	150	2.04	0
สถานีที่ 5	99.01	2000	27.23	1	สถานีที่ 5	102.72	2075	28.25	1
สถานีที่ 6	99.01	2000	27.23	1	สถานีที่ 6	102.72	2075	28.25	1
สถานีที่ 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	สถานีที่ 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]
สถานีที่ 1	4.95	100	1.36	0	สถานีที่ 1	99.01	2000	27.23	1
สถานีที่ 3	43.32	875	11.91	0	สถานีที่ 2	99.01	2000	27.23	1
สถานีที่ 4	43.32	875	11.91	0	สถานีที่ 3	102.72	2075	28.25	1
สถานีที่ 5	99.01	2000	27.23	1	สถานีที่ 4	102.72	2075	28.25	1
สถานีที่ 6	99.01	2000	27.23	1	สถานีที่ 6	9.90	200	2.72	0
สถานีที่ 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	สถานีที่ 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]
สถานีที่ 1	43.32	875	11.91	0	สถานีที่ 1	99.01	2000	27.23	1
สถานีที่ 2	43.32	875	11.91	0	สถานีที่ 2	99.01	2000	27.23	1
สถานีที่ 4	7.43	150	2.04	0	สถานีที่ 3	102.72	2075	28.25	1
สถานีที่ 5	102.72	2075	28.25	1	สถานีที่ 4	102.72	2075	28.25	1
สถานีที่ 6	102.72	2075	28.25	1	สถานีที่ 5	9.90	200	2.72	0

ตารางที่ 5.5 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ

สถานีที่ 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	สถานีที่ 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
สถานีที่ 2	4.95	100	1.36	0	0.000	สถานีที่ 1	43.32	875	11.91	0	0.000
สถานีที่ 3	43.32	875	11.91	0	0.000	สถานีที่ 2	43.32	875	11.91	0	0.000
สถานีที่ 4	43.32	875	11.91	0	0.000	สถานีที่ 3	7.43	150	2.04	0	0.000
สถานีที่ 5	99.01	2000	27.23	1	-1.890	สถานีที่ 5	102.72	2075	28.25	1	-1.832
สถานีที่ 6	99.01	2000	27.23	1	-1.890	สถานีที่ 6	102.72	2075	28.25	1	-1.832
สถานีที่ 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	สถานีที่ 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
สถานีที่ 1	4.95	100	1.36	0	0.000	สถานีที่ 1	99.01	2000	27.23	1	-1.890
สถานีที่ 3	43.32	875	11.91	0	0.000	สถานีที่ 2	99.01	2000	27.23	1	-1.890
สถานีที่ 4	43.32	875	11.91	0	0.000	สถานีที่ 3	102.72	2075	28.25	1	-1.832
สถานีที่ 5	99.01	2000	27.23	1	-1.890	สถานีที่ 4	102.72	2075	28.25	1	-1.832
สถานีที่ 6	99.01	2000	27.23	1	-1.890	สถานีที่ 6	9.90	200	2.72	0	0.000
สถานีที่ 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	สถานีที่ 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
สถานีที่ 1	43.32	875	11.91	0	0.000	สถานีที่ 1	99.01	2000	27.23	1	-1.890
สถานีที่ 2	43.32	875	11.91	0	0.000	สถานีที่ 2	99.01	2000	27.23	1	-1.890
สถานีที่ 4	7.43	150	2.04	0	0.000	สถานีที่ 3	102.72	2075	28.25	1	-1.832
สถานีที่ 5	102.72	2075	28.25	1	-1.832	สถานีที่ 4	102.72	2075	28.25	1	-1.832
สถานีที่ 6	102.72	2075	28.25	1	-1.832	สถานีที่ 5	9.90	200	2.72	0	0.000

จากตารางที่ 5.5 อัตราส่วน OSNR ที่มีค่ามากที่สุดเท่ากับ -1.890 dB จะเห็นได้ว่า การใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงเข้าไปในโครงข่าย จะทำให้ OSNR ของระบบมีค่าลดลง

ต่อไป จะลองหาค่าอัตราส่วน OSNR ของโครงข่ายแบบเมช รวมทั้งกรณีข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายไม่เกิน 1 ข่ายเชื่อมโยงด้วย

ตัวอย่างที่ 2 โครงข่าย OPEN

ตารางที่ 5.6 แสดงอัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่าย OPEN จากการคำนวณตามสมการที่(5.2) และ (5.3)

จากตารางที่ 5.6 อัตราส่วน OSNR ที่มากที่สุดได้เท่ากับ -5.863 dB

ตัวอย่างที่ 3 โครงข่าย ERNet

ตารางที่ 5.7 แสดงอัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่าย ERNet

ตารางที่ 5.6 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่าย OPEN

1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
2	25.10	123	6.90	0	0.000	1	25.10	123	6.90	0	0.000
3	31.63	155	8.70	0	0.000	3	30.82	151	8.47	0	0.000
4	56.73	278	15.60	0	0.000	4	55.92	274	15.38	0	0.000
5	93.06	456	25.59	0	0.000	5	92.24	452	25.37	0	0.000
6	97.55	478	26.83	1	-1.914	6	96.73	474	26.60	1	-1.927
7	70.20	344	19.31	1	-2.507	7	69.39	340	19.08	1	-2.531
8	76.33	374	20.99	1	-2.344	8	75.51	370	20.77	1	-2.364
9	117.96	578	32.44	1	-1.628	9	117.14	574	32.21	1	-1.638
10	145.51	713	40.02	1	-1.356	10	144.69	709	39.79	1	-1.363
3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	31.63	155	8.70	0	0.000	1	56.73	278	15.60	0	0.000
2	30.82	151	8.47	0	0.000	2	55.92	274	15.38	0	0.000
4	25.10	123	6.90	0	0.000	3	25.10	123	6.90	0	0.000
5	61.43	301	16.89	0	0.000	5	36.33	178	9.99	0	0.000
6	65.92	323	18.13	1	-2.636	6	91.02	446	25.03	1	-2.028
7	38.57	189	10.61	1	-3.959	7	63.67	312	17.51	1	-2.709
8	44.69	219	12.29	1	-3.554	8	69.80	342	19.19	1	-2.519
9	86.33	423	23.74	1	-2.119	9	111.43	546	30.64	1	-1.710
10	113.88	558	31.32	1	-1.678	10	138.98	681	38.22	1	-1.412
5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	93.06	456	25.59	0	0.000	1	97.55	478	26.83	1	-1.914
2	92.24	452	25.37	0	0.000	2	96.73	474	26.60	1	-1.927
3	61.43	301	16.89	0	0.000	3	65.92	323	18.13	1	-2.636
4	36.33	178	9.99	0	0.000	4	91.02	446	25.03	1	-2.028
6	62.86	308	17.29	1	-2.737	5	62.86	308	17.29	1	-2.737
7	100.00	490	27.50	1	-1.874	7	69.59	341	19.14	1	-2.525
8	106.12	520	29.18	1	-1.782	8	63.47	311	17.45	1	-2.716
9	84.69	415	23.29	1	-2.152	9	21.84	107	6.01	1	-5.863
10	110.82	543	30.47	1	-1.718	10	47.96	235	13.19	0	0.000
7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	70.20	344	19.31	1	-2.507	1	76.33	374	20.99	1	-2.344
2	69.39	340	19.08	1	-2.531	2	75.51	370	20.77	1	-2.364
3	38.57	189	10.61	1	-3.959	3	44.69	219	12.29	1	-3.554
4	63.67	312	17.51	1	-2.709	4	69.80	342	19.19	1	-2.519
5	100.00	490	27.50	1	-1.874	5	106.12	520	29.18	1	-1.782
6	69.59	341	19.14	0	0.000	6	63.47	311	17.45	0	0.000
8	6.12	30	1.68	0	0.000	7	6.12	30	1.68	0	0.000
9	47.76	234	13.13	0	0.000	9	41.63	204	11.45	0	0.000
10	85.71	420	23.57	0	0.000	10	79.59	390	21.89	0	0.000
9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	117.96	578	32.44	1	-1.628	1	145.51	713	40.02	1	-1.356
2	117.14	574	32.21	1	-1.638	2	144.69	709	39.79	1	-1.363
3	86.33	423	23.74	1	-2.119	3	113.88	558	31.32	1	-1.678
4	111.43	546	30.64	1	-1.710	4	138.98	681	38.22	1	-1.412
5	84.69	415	23.29	1	-2.152	5	110.82	543	30.47	1	-1.718
6	21.84	107	6.01	0	0.000	6	47.96	235	13.19	0	0.000
7	47.76	234	13.13	0	0.000	7	85.71	420	23.57	0	0.000
8	41.63	204	11.45	0	0.000	8	79.59	390	21.89	0	0.000
10	37.96	186	10.44	0	0.000	9	37.96	186	10.44	0	0.000

ตารางที่ 5.7 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง
ในโครงข่าย ERNet
(ก) โหนดที่ 1 - 4

โหนด 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
2	27.98	336	7.69	0	0.000	1	27.98	336	7.69	0	0.000
3	33.97	408	9.34	0	0.000	3	51.96	624	14.29	0	0.000
4	59.95	720	16.49	0	0.000	4	67.94	816	18.68	0	0.000
5	89.93	1080	24.73	1	-2.048	5	97.92	1176	26.93	1	-1.908
6	46.96	564	12.91	0	0.000	6	38.97	468	10.72	0	0.000
7	74.94	900	20.61	1	-2.379	7	82.93	996	22.81	1	-2.190
8	88.93	1068	24.45	1	-2.067	8	96.92	1164	26.65	1	-1.924
9	103.91	1248	28.58	1	-1.814	9	111.91	1344	30.77	1	-1.703
10	76.94	924	21.16	1	-2.328	10	68.94	828	18.96	1	-2.544
11	107.91	1296	29.68	1	-1.757	11	99.92	1200	27.48	1	-1.875
12	118.90	1428	32.70	1	-1.617	12	110.91	1332	30.50	1	-1.717
13	129.89	1560	35.72	1	-1.498	13	121.90	1464	33.52	1	-1.583
14	108.91	1308	29.95	1	-1.743	14	100.92	1212	27.75	1	-1.860
15	121.90	1464	33.52	1	-1.583	15	113.91	1368	31.32	1	-1.678
โหนด 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	33.97	408	9.34	0	0.000	1	59.95	720	16.49	0	0.000
2	51.96	624	14.29	0	0.000	2	67.94	816	18.68	0	0.000
4	41.97	504	11.54	0	0.000	3	41.97	504	11.54	0	0.000
5	71.94	864	19.78	1	-2.458	5	29.98	360	8.24	1	-4.734
6	12.99	156	3.57	0	0.000	6	28.98	348	7.97	0	0.000
7	56.95	684	15.66	1	-2.956	7	14.99	180	4.12	1	-7.467
8	70.94	852	19.51	1	-2.486	8	28.98	348	7.97	1	-4.846
9	85.93	1032	23.63	1	-2.127	9	43.96	528	12.09	1	-3.597
10	42.96	516	11.82	1	-3.659	10	35.97	432	9.89	1	-4.163
11	73.94	888	20.33	1	-2.405	11	58.95	708	16.21	1	-2.878
12	84.93	1020	23.36	1	-2.148	12	77.94	936	21.43	1	-2.304
13	95.92	1152	26.38	1	-1.941	13	88.93	1068	24.45	1	-2.067
14	74.94	900	20.61	1	-2.379	14	67.94	816	18.68	1	-2.573
15	87.93	1056	24.18	1	-2.087	15	72.94	876	20.06	1	-2.431

(ข) โหนดที่ 5 - 10

โนด 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	89.93	1080	24.73	1	-2.048	1	46.96	564	12.91	0	0.000
2	97.92	1176	26.93	1	-1.908	2	38.97	468	10.72	0	0.000
3	71.94	864	19.78	1	-2.458	3	12.99	156	3.57	0	0.000
4	29.98	360	8.24	1	-4.734	4	28.98	348	7.97	0	0.000
6	58.95	708	16.21	1	-2.878	5	58.95	708	16.21	1	-2.878
7	44.96	540	12.36	2	-5.751	7	43.96	528	12.09	1	-3.597
8	46.96	564	12.91	0	0.000	8	57.95	696	15.94	1	-2.917
9	31.97	384	8.79	0	0.000	9	72.94	876	20.06	1	-2.431
10	65.95	792	18.13	2	-4.429	10	29.98	360	8.24	1	-4.734
11	46.96	564	12.91	0	0.000	11	60.95	732	16.76	1	-2.804
12	107.91	1296	29.68	2	-3.082	12	71.94	864	19.78	1	-2.458
13	108.91	1308	29.95	1	-1.743	13	82.93	996	22.81	1	-2.190
14	87.93	1056	24.18	1	-2.087	14	61.95	744	17.04	1	-2.769
15	60.95	732	16.76	0	0.000	15	74.94	900	20.61	1	-2.379
โนด 7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	74.94	900	20.61	1	-2.379	1	88.93	1068	24.45	1	-2.067
2	82.93	996	22.81	1	-2.190	2	96.92	1164	26.65	1	-1.924
3	56.95	684	15.66	1	-2.956	3	70.94	852	19.51	1	-2.486
4	14.99	180	4.12	1	-7.467	4	28.98	348	7.97	1	-4.846
5	44.96	540	12.36	2	-5.751	5	46.96	564	12.91	0	0.000
6	43.96	528	12.09	1	-3.597	6	57.95	696	15.94	1	-2.917
8	13.99	168	3.85	0	0.000	7	13.99	168	3.85	0	0.000
9	28.98	348	7.97	0	0.000	9	14.99	180	4.12	0	0.000
10	20.98	252	5.77	0	0.000	10	34.97	420	9.62	0	0.000
11	43.96	528	12.09	0	0.000	11	29.98	360	8.24	0	0.000
12	62.95	756	17.31	0	0.000	12	76.94	924	21.16	0	0.000
13	73.94	888	20.33	0	0.000	13	87.93	1056	24.18	0	0.000
14	52.96	636	14.56	0	0.000	14	66.94	804	18.41	0	0.000
15	57.95	696	15.94	0	0.000	15	43.96	528	12.09	0	0.000
โนด 9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	103.91	1248	28.58	1	-1.814	1	76.94	924	21.16	1	-2.328
2	111.91	1344	30.77	1	-1.703	2	68.94	828	18.96	1	-2.544
3	85.93	1032	23.63	1	-2.127	3	42.96	516	11.82	1	-3.659
4	43.96	528	12.09	1	-3.597	4	35.97	432	9.89	1	-4.163
5	31.97	384	8.79	0	0.000	5	65.95	792	18.13	2	-4.429
6	72.94	876	20.06	1	-2.431	6	29.98	360	8.24	1	-4.734
7	28.98	348	7.97	0	0.000	7	20.98	252	5.77	0	0.000
8	14.99	180	4.12	0	0.000	8	34.97	420	9.62	0	0.000
10	45.96	552	12.64	0	0.000	9	45.96	552	12.64	0	0.000
11	14.99	180	4.12	0	0.000	11	30.97	372	8.52	0	0.000
12	87.93	1056	24.18	0	0.000	12	41.97	504	11.54	0	0.000
13	76.94	924	21.16	1	-2.328	13	52.96	636	14.56	0	0.000
14	55.95	672	15.39	1	-2.997	14	31.97	384	8.79	0	0.000
15	28.98	348	7.97	0	0.000	15	44.96	540	12.36	0	0.000

(ค) โหนดที่ 11 - 15

โหนด 11	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 12	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	107.91	1296	29.68	1	-1.757	1	118.90	1428	32.70	1	-1.617
2	99.92	1200	27.48	1	-1.875	2	110.91	1332	30.50	1	-1.717
3	73.94	888	20.33	1	-2.405	3	84.93	1020	23.36	1	-2.148
4	58.95	708	16.21	1	-2.878	4	77.94	936	21.43	1	-2.304
5	46.96	564	12.91	0	0.000	5	107.91	1296	29.68	2	-3.082
6	60.95	732	16.76	1	-2.804	6	71.94	864	19.78	1	-2.458
7	43.96	528	12.09	0	0.000	7	62.95	756	17.31	0	0.000
8	29.98	360	8.24	0	0.000	8	76.94	924	21.16	0	0.000
9	14.99	180	4.12	0	0.000	9	87.93	1056	24.18	0	0.000
10	30.97	372	8.52	0	0.000	10	41.97	504	11.54	0	0.000
12	72.94	876	20.06	0	0.000	11	72.94	876	20.06	0	0.000
13	61.95	744	17.04	1	-2.769	13	39.97	480	10.99	0	0.000
14	40.97	492	11.27	1	-3.789	14	60.95	732	16.76	0	0.000
15	13.99	168	3.85	0	0.000	15	86.93	1044	23.91	0	0.000
โหนด 13	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 14	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	129.89	1560	35.72	1	-1.498	1	108.91	1308	29.95	1	-1.743
2	121.90	1464	33.52	1	-1.583	2	100.92	1212	27.75	1	-1.860
3	95.92	1152	26.38	1	-1.941	3	74.94	900	20.61	1	-2.379
4	88.93	1068	24.45	1	-2.067	4	67.94	816	18.68	1	-2.573
5	108.91	1308	29.95	1	-1.743	5	87.93	1056	24.18	1	-2.087
6	82.93	996	22.81	1	-2.190	6	61.95	744	17.04	1	-2.769
7	73.94	888	20.33	0	0.000	7	52.96	636	14.56	0	0.000
8	87.93	1056	24.18	0	0.000	8	66.94	804	18.41	0	0.000
9	76.94	924	21.16	1	-2.328	9	55.95	672	15.39	1	-2.997
10	52.96	636	14.56	0	0.000	10	31.97	384	8.79	0	0.000
11	61.95	744	17.04	1	-2.769	11	40.97	492	11.27	1	-3.789
12	39.97	480	10.99	0	0.000	12	60.95	732	16.76	0	0.000
14	20.98	252	5.77	0	0.000	13	20.98	252	5.77	0	0.000
15	47.96	576	13.19	1	-3.371	15	26.98	324	7.42	1	-5.089
โหนด 15	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR						
1	121.90	1464	33.52	1	-1.583						
2	113.91	1368	31.32	1	-1.678						
3	87.93	1056	24.18	1	-2.087						
4	72.94	876	20.06	1	-2.431						
5	60.95	732	16.76	0	0.000						
6	74.94	900	20.61	1	-2.379						
7	57.95	696	15.94	0	0.000						
8	43.96	528	12.09	0	0.000						
9	28.98	348	7.97	0	0.000						
10	44.96	540	12.36	0	0.000						
11	13.99	168	3.85	0	0.000						
12	86.93	1044	23.91	0	0.000						
13	47.96	576	13.19	1	-3.371						
14	26.98	324	7.42	1	-5.089						

จากตารางที่ 5.7 จะหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน OSNR โดยแยกตามจำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใช้
ดังนี้

เครื่องส่งยุคเฟสแสง 1 ตัว อัตราส่วน OSNR ที่มากที่สุดเท่ากับ -7.467 dB

เครื่องส่งยุคเฟสแสง 2 ตัว อัตราส่วน OSNR ที่มากที่สุดเท่ากับ -5.751 dB

ตัวอย่างที่ 4 โครงข่าย NARNet ตารางที่ 5.8 แสดงอัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง และโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่าย NARNet

ตารางที่ 5.8 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง และโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่าย NARNet

(ก) โหนดที่ 1 – 4

โหนด 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
2	26.67	420	7.33	0	0.000	1	26.67	420	7.33	0	0.000
3	34.29	540	9.43	0	0.000	3	59.68	940	16.41	0	0.000
4	49.52	780	13.62	0	0.000	4	22.86	360	6.29	0	0.000
5	57.14	900	15.71	0	0.000	5	74.92	1180	20.60	0	0.000
6	68.57	1080	18.86	0	0.000	6	63.49	1000	17.46	0	0.000
7	58.41	920	16.06	0	0.000	7	31.75	500	8.73	0	0.000
8	69.84	1100	19.21	1	-2.517	8	43.17	680	11.87	1	-3.646
9	81.27	1280	22.35	0	0.000	9	66.03	1040	18.16	1	-2.633
10	83.81	1320	23.05	1	-2.171	10	101.59	1600	27.94	1	-1.849
11	92.70	1460	25.49	0	0.000	11	87.62	1380	24.10	0	0.000
12	102.86	1620	28.29	1	-1.830	12	99.05	1560	27.24	1	-1.889
13	111.75	1760	30.73	1	-1.706	13	124.44	1960	34.22	1	-1.555
14	104.13	1640	28.63	1	-1.811	14	77.46	1220	21.30	1	-2.316
15	130.79	2060	35.97	1	-1.489	15	114.29	1800	31.43	1	-1.673
16	138.41	2180	38.06	1	-1.417	16	134.60	2120	37.02	1	-1.452
17	128.25	2020	35.27	1	-1.515	17	101.59	1600	27.94	1	-1.849
โหนด 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	34.29	540	9.43	0	0.000	1	49.52	780	13.62	0	0.000
2	59.68	940	16.41	0	0.000	2	22.86	360	6.29	0	0.000
4	36.83	580	10.13	0	0.000	3	36.83	580	10.13	0	0.000
5	22.86	360	6.29	0	0.000	5	52.06	820	14.32	0	0.000
6	34.29	540	9.43	0	0.000	6	40.63	640	11.17	0	0.000
7	45.71	720	12.57	0	0.000	7	8.89	140	2.44	0	0.000
8	57.14	900	15.71	1	-2.949	8	20.32	320	5.59	1	-6.146
9	46.98	740	12.92	0	0.000	9	43.17	680	11.87	1	-3.646
10	49.52	780	13.62	1	-3.290	10	78.73	1240	21.65	1	-2.285
11	58.41	920	16.06	0	0.000	11	64.76	1020	17.81	0	0.000
12	68.57	1080	18.86	1	-2.555	12	76.19	1200	20.95	1	-2.347
13	77.46	1220	21.30	1	-2.316	13	101.59	1600	27.94	1	-1.849
14	91.43	1440	25.14	1	-2.020	14	54.60	860	15.02	1	-3.054
15	96.51	1520	26.54	1	-1.931	15	91.43	1440	25.14	1	-2.020
16	104.13	1640	28.63	1	-1.811	16	111.75	1760	30.73	1	-1.706
17	115.56	1820	31.78	1	-1.657	17	78.73	1240	21.65	1	-2.285

(ข) โหนดที่ 5 – 10

โหนด 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	57.14	900	15.71	0	0.000	1	68.57	1080	18.86	0	0.000
2	74.92	1180	20.60	0	0.000	2	63.49	1000	17.46	0	0.000
3	22.86	360	6.29	0	0.000	3	34.29	540	9.43	0	0.000
4	52.06	820	14.32	0	0.000	4	40.63	640	11.17	0	0.000
6	11.43	180	3.14	0	0.000	5	11.43	180	3.14	0	0.000
7	58.41	920	16.06	1	-2.899	7	46.98	740	12.92	1	-3.423
8	46.98	740	12.92	0	0.000	8	35.56	560	9.78	0	0.000
9	24.13	380	6.63	0	0.000	9	12.70	200	3.49	0	0.000
10	26.67	420	7.33	1	-5.129	10	38.10	600	10.48	1	-3.995
11	35.56	560	9.78	0	0.000	11	24.13	380	6.63	0	0.000
12	45.71	720	12.57	1	-3.494	12	35.56	560	9.78	1	-4.198
13	54.60	860	15.02	1	-3.054	13	60.95	960	16.76	1	-2.804
14	81.27	1280	22.35	1	-2.227	14	69.84	1100	19.21	0	0.000
15	73.65	1160	20.25	1	-2.412	15	63.49	1000	17.46	1	-2.716
16	81.27	1280	22.35	1	-2.227	16	83.81	1320	23.05	1	-2.171
17	97.78	1540	26.89	0	0.000	17	87.62	1380	24.10	1	-2.093
โหนด 7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	58.41	920	16.06	0	0.000	1	69.84	1100	19.21	1	-2.517
2	31.75	500	8.73	0	0.000	2	43.17	680	11.87	1	-3.646
3	45.71	720	12.57	0	0.000	3	57.14	900	15.71	1	-2.949
4	8.89	140	2.44	0	0.000	4	20.32	320	5.59	1	-6.146
5	58.41	920	16.06	1	-2.899	5	46.98	740	12.92	0	0.000
6	46.98	740	12.92	1	-3.423	6	35.56	560	9.78	0	0.000
8	11.43	180	3.14	1	-8.850	7	11.43	180	3.14	1	-8.850
9	34.29	540	9.43	1	-4.308	9	22.86	360	6.29	0	0.000
10	85.08	1340	23.40	2	-3.686	10	73.65	1160	20.25	1	-2.412
11	71.11	1120	19.56	1	-2.481	11	59.68	940	16.41	0	0.000
12	82.54	1300	22.70	2	-3.769	12	71.11	1120	19.56	1	-2.481
13	107.94	1700	29.68	2	-3.082	13	96.51	1520	26.54	1	-1.931
14	45.71	720	12.57	1	-3.494	14	34.29	540	9.43	0	0.000
15	82.54	1300	22.70	1	-2.199	15	71.11	1120	19.56	0	0.000
16	102.86	1620	28.29	1	-1.830	16	91.43	1440	25.14	0	0.000
17	69.84	1100	19.21	1	-2.517	17	58.41	920	16.06	0	0.000
โหนด 9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	81.27	1280	22.35	0	0.000	1	83.81	1320	23.05	1	-2.171
2	66.03	1040	18.16	1	-2.633	2	101.59	1600	27.94	1	-1.849
3	46.98	740	12.92	0	0.000	3	49.52	780	13.62	1	-3.290
4	43.17	680	11.87	1	-3.646	4	78.73	1240	21.65	1	-2.285
5	24.13	380	6.63	0	0.000	5	26.67	420	7.33	1	-5.129
6	12.70	200	3.49	0	0.000	6	38.10	600	10.48	1	-3.995
7	34.29	540	9.43	1	-4.308	7	85.08	1340	23.40	2	-3.686
8	22.86	360	6.29	0	0.000	8	73.65	1160	20.25	1	-2.412
10	50.79	800	13.97	1	-3.228	9	50.79	800	13.97	1	-3.228
11	36.83	580	10.13	0	0.000	11	30.48	480	8.38	1	-4.680
12	48.25	760	13.27	1	-3.356	12	19.05	300	5.24	0	0.000
13	73.65	1160	20.25	1	-2.412	13	27.94	440	7.68	0	0.000
14	57.14	900	15.71	0	0.000	14	83.81	1320	23.05	0	0.000
15	76.19	1200	20.95	1	-2.347	15	46.98	740	12.92	0	0.000
16	96.51	1520	26.54	1	-1.931	16	54.60	860	15.02	0	0.000
17	81.27	1280	22.35	0	0.000	17	71.11	1120	19.56	0	0.000

(ค) โหนดที่ 11 – 16

โนด 11	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 12	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	92.70	1460	25.49	0	0.000	1	102.86	1620	28.29	1	-1.830
2	87.62	1380	24.10	0	0.000	2	99.05	1560	27.24	1	-1.889
3	58.41	920	16.06	0	0.000	3	68.57	1080	18.86	1	-2.555
4	64.76	1020	17.81	0	0.000	4	76.19	1200	20.95	1	-2.347
5	35.56	560	9.78	0	0.000	5	45.71	720	12.57	1	-3.494
6	24.13	380	6.63	0	0.000	6	35.56	560	9.78	1	-4.198
7	71.11	1120	19.56	1	-2.481	7	82.54	1300	22.70	2	-3.769
8	59.68	940	16.41	0	0.000	8	71.11	1120	19.56	1	-2.481
9	36.83	580	10.13	0	0.000	9	48.25	760	13.27	1	-3.356
10	30.48	480	8.38	1	-4.680	10	19.05	300	5.24	0	0.000
12	11.43	180	3.14	1	-8.850	11	11.43	180	3.14	1	-8.850
13	36.83	580	10.13	1	-4.094	13	25.40	400	6.98	0	0.000
14	76.19	1200	20.95	1	-2.347	14	64.76	1020	17.81	0	0.000
15	39.37	620	10.83	1	-3.901	15	27.94	440	7.68	0	0.000
16	59.68	940	16.41	1	-2.851	16	48.25	760	13.27	0	0.000
17	63.49	1000	17.46	1	-2.716	17	52.06	820	14.32	0	0.000
โนด 13	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 14	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	111.75	1760	30.73	1	-1.706	1	104.13	1640	28.63	1	-1.811
2	124.44	1960	34.22	1	-1.555	2	77.46	1220	21.30	1	-2.316
3	77.46	1220	21.30	1	-2.316	3	91.43	1440	25.14	1	-2.020
4	101.59	1600	27.94	1	-1.849	4	54.60	860	15.02	1	-3.054
5	54.60	860	15.02	1	-3.054	5	81.27	1280	22.35	0	0.000
6	60.95	960	16.76	1	-2.804	6	69.84	1100	19.21	0	0.000
7	107.94	1700	29.68	2	-3.082	7	45.71	720	12.57	1	-3.494
8	96.51	1520	26.54	1	-1.931	8	34.29	540	9.43	0	0.000
9	73.65	1160	20.25	1	-2.412	9	57.14	900	15.71	0	0.000
10	27.94	440	7.68	0	0.000	10	83.81	1320	23.05	0	0.000
11	36.83	580	10.13	1	-4.094	11	76.19	1200	20.95	1	-2.347
12	25.40	400	6.98	0	0.000	12	64.76	1020	17.81	0	0.000
14	83.81	1320	23.05	0	0.000	13	83.81	1320	23.05	0	0.000
15	46.98	740	12.92	0	0.000	15	36.83	580	10.13	0	0.000
16	26.67	420	7.33	0	0.000	16	57.14	900	15.71	0	0.000
17	71.11	1120	19.56	0	0.000	17	24.13	380	6.63	0	0.000
โนด 15	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 16	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	130.79	2060	35.97	1	-1.489	1	138.41	2180	38.06	1	-1.417
2	114.29	1800	31.43	1	-1.673	2	134.60	2120	37.02	1	-1.452
3	96.51	1520	26.54	1	-1.931	3	104.13	1640	28.63	1	-1.811
4	91.43	1440	25.14	1	-2.020	4	111.75	1760	30.73	1	-1.706
5	73.65	1160	20.25	1	-2.412	5	81.27	1280	22.35	1	-2.227
6	63.49	1000	17.46	1	-2.716	6	83.81	1320	23.05	1	-2.171
7	82.54	1300	22.70	1	-2.199	7	102.86	1620	28.29	1	-1.830
8	71.11	1120	19.56	0	0.000	8	91.43	1440	25.14	0	0.000
9	76.19	1200	20.95	1	-2.347	9	96.51	1520	26.54	1	-1.931
10	46.98	740	12.92	0	0.000	10	54.60	860	15.02	0	0.000
11	39.37	620	10.83	1	-3.901	11	59.68	940	16.41	1	-2.851
12	27.94	440	7.68	0	0.000	12	48.25	760	13.27	0	0.000
13	46.98	740	12.92	0	0.000	13	26.67	420	7.33	0	0.000
14	36.83	580	10.13	0	0.000	14	57.14	900	15.71	0	0.000
16	20.32	320	5.59	0	0.000	15	20.32	320	5.59	0	0.000
17	24.13	380	6.63	0	0.000	17	44.44	700	12.22	0	0.000

(ง) โหนดที่ 17

โนด 17	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G [dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	128.25	2020	35.27	1	-1.515
2	101.59	1600	27.94	1	-1.849
3	115.56	1820	31.78	1	-1.657
4	78.73	1240	21.65	1	-2.285
5	97.78	1540	26.89	1	-1.910
6	87.62	1380	24.10	1	-2.093
7	69.84	1100	19.21	1	-2.517
8	58.41	920	16.06	0	0.000
9	81.27	1280	22.35	0	0.000
10	71.11	1120	19.56	0	0.000
11	63.49	1000	17.46	1	-2.716
12	52.06	820	14.32	0	0.000
13	71.11	1120	19.56	0	0.000
14	24.13	380	6.63	0	0.000
15	24.13	380	6.63	0	0.000
16	44.44	700	12.22	0	0.000

จากตารางที่ 5.8 จะหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน OSNR โดยแยกตามจำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใช้
ดังนี้

เครื่องส่งยุคเฟสแสง 1 ตัว อัตราส่วน OSNR ที่มากที่สุดเท่ากับ -8.850 dB

เครื่องส่งยุคเฟสแสง 2 ตัว อัตราส่วน OSNR ที่มากที่สุดเท่ากับ -3.769 dB

ตัวอย่างที่ 5 โครงข่าย NARNet กรณีเกิดความเสียหายไม่เกิน 1 ข่ายเชื่อมโยง ตารางที่ 5.9 แสดงอัตราส่วน
ระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง และโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่าย
NARNet ที่มีการกู้คืนสัญญาณ

ตารางที่ 5.9 อัตราส่วนระหว่าง OSNR ของโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง และโครงข่ายที่ไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสง ในโครงข่าย NARNet ที่มีการกู้คืนสัญญาณ

(ก) โหนดที่ 1 – 6

โหนด 1	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 2	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
2	51.88	1480	14.27	0	0.000	1	51.88	1480	14.27	0	0.000
3	47.67	1360	13.11	1	-3.386	3	33.65	960	9.25	1	-4.366
4	39.26	1120	10.80	0	0.000	4	53.98	1540	14.84	1	-3.081
5	56.08	1600	15.42	1	-2.992	5	46.27	1320	12.72	1	-3.463
6	49.77	1420	13.69	1	-3.278	6	52.58	1500	14.46	1	-3.144
7	63.79	1820	17.54	0	0.000	7	78.51	2240	21.59	1	-2.290
8	57.48	1640	15.81	0	0.000	8	72.20	2060	19.86	1	-2.451
9	51.17	1460	14.07	1	-3.209	9	59.59	1700	16.39	1	-2.854
10	79.92	2280	21.98	1	-2.257	10	114.97	3280	31.62	1	-1.665
11	99.54	2840	27.37	1	-1.881	11	77.81	2220	21.40	1	-2.307
12	69.40	1980	19.09	1	-2.530	12	71.50	2040	19.66	1	-2.470
13	83.42	2380	22.94	1	-2.179	13	76.41	2180	21.01	2	-3.987
14	92.53	2640	25.45	0	0.000	14	107.26	3060	29.50	1	-1.766
15	77.81	2220	21.40	1	-2.307	15	86.93	2480	23.90	1	-2.107
16	96.04	2740	26.41	1	-1.939	16	91.13	2600	25.06	2	-3.503
17	85.52	2440	23.52	0	0.000	17	100.25	2860	27.57	1	-1.870
โหนด 3	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 4	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	47.67	1360	13.11	1	-3.386	1	39.26	1120	10.80	0	0.000
2	33.65	960	9.25	1	-4.366	2	53.98	1540	14.84	1	-3.081
4	41.36	1180	11.37	0	0.000	3	41.36	1180	11.37	0	0.000
5	49.07	1400	13.49	0	0.000	5	32.95	940	9.06	0	0.000
6	42.76	1220	11.76	0	0.000	6	30.84	880	8.48	0	0.000
7	44.87	1280	12.34	0	0.000	7	48.37	1380	13.30	0	0.000
8	38.56	1100	10.60	0	0.000	8	42.06	1200	11.57	0	0.000
9	44.16	1260	12.15	0	0.000	9	29.44	840	8.10	0	0.000
10	72.91	2080	20.05	0	0.000	10	60.99	1740	16.77	0	0.000
11	92.53	2640	25.45	0	0.000	11	64.49	1840	17.74	0	0.000
12	62.39	1780	17.16	0	0.000	12	58.18	1660	16.00	0	0.000
13	76.41	2180	21.01	0	0.000	13	63.09	1800	17.35	1	-2.729
14	73.61	2100	20.24	0	0.000	14	77.81	2220	21.40	0	0.000
15	70.80	2020	19.47	0	0.000	15	57.48	1640	15.81	0	0.000
16	82.02	2340	22.56	0	0.000	16	70.80	2020	19.47	0	0.000
17	66.60	1900	18.31	0	0.000	17	70.80	2020	19.47	0	0.000
โหนด 5	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โหนด 6	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	56.08	1600	15.42	1	-2.992	1	49.77	1420	13.69	1	-3.278
2	46.27	1320	12.72	1	-3.463	2	52.58	1500	14.46	1	-3.144
3	49.07	1400	13.49	0	0.000	3	42.76	1220	11.76	0	0.000
4	32.95	940	9.06	0	0.000	4	30.84	880	8.48	0	0.000
6	44.87	1280	12.34	0	0.000	5	44.87	1280	12.34	0	0.000
7	37.85	1080	10.41	0	0.000	7	27.34	780	7.52	0	0.000
8	44.16	1260	12.15	0	0.000	8	33.65	960	9.25	0	0.000
9	56.78	1620	15.62	0	0.000	9	46.27	1320	12.72	0	0.000
10	36.45	1040	10.02	0	0.000	10	30.14	860	8.29	0	0.000
11	31.55	900	8.68	0	0.000	11	37.85	1080	10.41	0	0.000
12	25.94	740	7.13	0	0.000	12	31.55	900	8.68	0	0.000
13	39.96	1140	10.99	0	0.000	13	36.45	1040	10.02	1	-4.124
14	60.99	1740	16.77	0	0.000	14	55.38	1580	15.23	0	0.000
15	65.19	1860	17.93	0	0.000	15	58.89	1680	16.19	0	0.000
16	52.58	1500	14.46	0	0.000	16	51.17	1460	14.07	0	0.000
17	58.18	1660	16.00	0	0.000	17	51.88	1480	14.27	0	0.000

(ข) โหนดที่ 7 – 12

โนด 7	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 8	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	63.79	1820	17.54	0	0.000	1	57.48	1640	15.81	0	0.000
2	78.51	2240	21.59	1	-2.290	2	72.20	2060	19.86	1	-2.451
3	44.87	1280	12.34	0	0.000	3	38.56	1100	10.60	0	0.000
4	48.37	1380	13.30	0	0.000	4	42.06	1200	11.57	0	0.000
5	37.85	1080	10.41	0	0.000	5	44.16	1260	12.15	0	0.000
6	27.34	780	7.52	0	0.000	6	33.65	960	9.25	0	0.000
8	46.97	1340	12.92	0	0.000	7	46.97	1340	12.92	0	0.000
9	34.35	980	9.45	0	0.000	9	40.66	1160	11.18	0	0.000
10	57.48	1640	15.81	0	0.000	10	63.79	1820	17.54	0	0.000
11	65.19	1860	17.93	0	0.000	11	60.99	1740	16.77	0	0.000
12	58.89	1680	16.19	0	0.000	12	54.68	1560	15.04	0	0.000
13	63.79	1820	17.54	1	-2.705	13	65.19	1860	17.93	0	0.000
14	82.72	2360	22.75	0	0.000	14	75.01	2140	20.63	0	0.000
15	62.39	1780	17.16	0	0.000	15	54.68	1560	15.04	0	0.000
16	75.71	2160	20.82	0	0.000	16	68.00	1940	18.70	0	0.000
17	70.80	2020	19.47	0	0.000	17	68.00	1940	18.70	0	0.000
โนด 9	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 10	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	51.17	1460	14.07	1	-3.209	1	79.92	2280	21.98	1	-2.257
2	59.59	1700	16.39	1	-2.854	2	114.97	3280	31.62	1	-1.665
3	44.16	1260	12.15	0	0.000	3	72.91	2080	20.05	0	0.000
4	29.44	840	8.10	0	0.000	4	60.99	1740	16.77	0	0.000
5	56.78	1620	15.62	0	0.000	5	36.45	1040	10.02	0	0.000
6	46.27	1320	12.72	0	0.000	6	30.14	860	8.29	0	0.000
7	34.35	980	9.45	0	0.000	7	57.48	1640	15.81	0	0.000
8	40.66	1160	11.18	0	0.000	8	63.79	1820	17.54	0	0.000
10	77.81	2220	21.40	0	0.000	9	76.41	2180	21.01	0	0.000
11	73.61	2100	20.24	0	0.000	11	34.35	980	9.45	0	0.000
12	67.30	1920	18.51	0	0.000	12	29.44	840	8.10	1	-4.793
13	77.81	2220	21.40	0	0.000	13	24.54	700	6.75	0	0.000
14	62.39	1780	17.16	0	0.000	14	59.59	1700	16.39	0	0.000
15	51.88	1480	14.27	0	0.000	15	41.36	1180	11.37	1	-3.763
16	97.44	2780	26.80	1	-1.915	16	37.15	1060	10.22	0	0.000
17	55.38	1580	15.23	0	0.000	17	72.91	2080	20.05	0	0.000
โนด 11	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 12	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	99.54	2840	27.37	1	-1.881	1	69.40	1980	19.09	1	-2.530
2	77.81	2220	21.40	1	-2.307	2	71.50	2040	19.66	1	-2.470
3	92.53	2640	25.45	0	0.000	3	62.39	1780	17.16	0	0.000
4	64.49	1840	17.74	0	0.000	4	58.18	1660	16.00	0	0.000
5	31.55	900	8.68	0	0.000	5	25.94	740	7.13	0	0.000
6	37.85	1080	10.41	0	0.000	6	31.55	900	8.68	0	0.000
7	65.19	1860	17.93	0	0.000	7	58.89	1680	16.19	0	0.000
8	60.99	1740	16.77	0	0.000	8	54.68	1560	15.04	0	0.000
9	73.61	2100	20.24	0	0.000	9	67.30	1920	18.51	0	0.000
10	34.35	980	9.45	0	0.000	10	29.44	840	8.10	1	-4.793
12	44.87	1280	12.34	0	0.000	11	44.87	1280	12.34	0	0.000
13	49.77	1420	13.69	1	-3.278	13	25.94	740	7.13	1	-5.227
14	51.88	1480	14.27	0	0.000	14	58.18	1660	16.00	0	0.000
15	72.20	2060	19.86	0	0.000	15	39.96	1140	10.99	0	0.000
16	64.49	1840	17.74	1	-2.682	16	28.74	820	7.90	0	0.000
17	65.19	1860	17.93	0	0.000	17	71.50	2040	19.66	0	0.000

(ค) โหนดที่ 13 – 17

โนด 13	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 14	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	83.42	2380	22.94	1	-2.179	1	92.53	2640	25.45	0	0.000
2	76.41	2180	21.01	2	-3.987	2	107.26	3060	29.50	1	-1.766
3	76.41	2180	21.01	0	0.000	3	73.61	2100	20.24	0	0.000
4	63.09	1800	17.35	1	-2.729	4	77.81	2220	21.40	0	0.000
5	39.96	1140	10.99	0	0.000	5	60.99	1740	16.77	0	0.000
6	36.45	1040	10.02	1	-4.124	6	55.38	1580	15.23	0	0.000
7	63.79	1820	17.54	1	-2.705	7	82.72	2360	22.75	0	0.000
8	65.19	1860	17.93	0	0.000	8	75.01	2140	20.63	0	0.000
9	77.81	2220	21.40	0	0.000	9	62.39	1780	17.16	0	0.000
10	24.54	700	6.75	0	0.000	10	59.59	1700	16.39	0	0.000
11	49.77	1420	13.69	1	-3.278	11	51.88	1480	14.27	0	0.000
12	25.94	740	7.13	1	-5.227	12	58.18	1660	16.00	0	0.000
14	56.08	1600	15.42	0	0.000	13	56.08	1600	15.42	0	0.000
15	29.44	840	8.10	0	0.000	15	26.64	760	7.33	0	0.000
16	40.66	1160	11.18	0	0.000	16	70.80	2020	19.47	0	0.000
17	63.09	1800	17.35	0	0.000	17	33.65	960	9.25	0	0.000
โนด 15	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR	โนด 16	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR
1	77.81	2220	21.40	1	-2.307	1	96.04	2740	26.41	1	-1.939
2	86.93	2480	23.90	1	-2.107	2	91.13	2600	25.06	2	-3.503
3	70.80	2020	19.47	0	0.000	3	82.02	2340	22.56	0	0.000
4	57.48	1640	15.81	0	0.000	4	70.80	2020	19.47	0	0.000
5	65.19	1860	17.93	0	0.000	5	52.58	1500	14.46	0	0.000
6	58.89	1680	16.19	0	0.000	6	51.17	1460	14.07	1	-3.209
7	62.39	1780	17.16	0	0.000	7	75.71	2160	20.82	0	0.000
8	54.68	1560	15.04	0	0.000	8	68.00	1940	18.70	0	0.000
9	51.88	1480	14.27	0	0.000	9	97.44	2780	26.80	1	-1.915
10	41.36	1180	11.37	1	-3.763	10	37.15	1060	10.22	0	0.000
11	72.20	2060	19.86	0	0.000	11	64.49	1840	17.74	1	-2.682
12	39.96	1140	10.99	0	0.000	12	28.74	820	7.90	0	0.000
13	29.44	840	8.10	0	0.000	13	40.66	1160	11.18	0	0.000
14	26.64	760	7.33	0	0.000	14	70.80	2020	19.47	0	0.000
16	44.16	1260	12.15	0	0.000	15	44.16	1260	12.15	0	0.000
17	33.65	960	9.25	0	0.000	17	77.81	2220	21.40	0	0.000
โนด 17	ระยะทาง/R [km]	ระยะทาง [km]	G[dB]	OPC [ตัว]	อัตราส่วน OSNR						
1	85.52	2440	23.52	0	0.000						
2	100.25	2860	27.57	1	-1.870						
3	66.60	1900	18.31	0	0.000						
4	70.80	2020	19.47	0	0.000						
5	58.18	1660	16.00	0	0.000						
6	51.88	1480	14.27	0	0.000						
7	70.80	2020	19.47	0	0.000						
8	68.00	1940	18.70	0	0.000						
9	55.38	1580	15.23	0	0.000						
10	72.91	2080	20.05	0	0.000						
11	65.19	1860	17.93	0	0.000						
12	71.50	2040	19.66	0	0.000						
13	63.09	1800	17.35	0	0.000						
14	33.65	960	9.25	0	0.000						
15	33.65	960	9.25	0	0.000						
16	77.81	2220	21.40	0	0.000						

จากตารางที่ 5.7 จะหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน OSNR โดยแยกตามจำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ใช้
ดังนี้

เครื่องส่งยุคเฟสแสง 1 ตัว อัตราส่วน OSNR ที่มากที่สุดเท่ากับ -5.227 dB

เครื่องส่งยุคเฟสแสง 2 ตัว อัตราส่วน OSNR ที่มากที่สุดเท่ากับ -3.987 dB

บทที่ 6

การหาช่วงความยาวคลื่นใหม่ที่สามารถส่งได้โดยไม่ต้องลดขนาดโครงข่าย

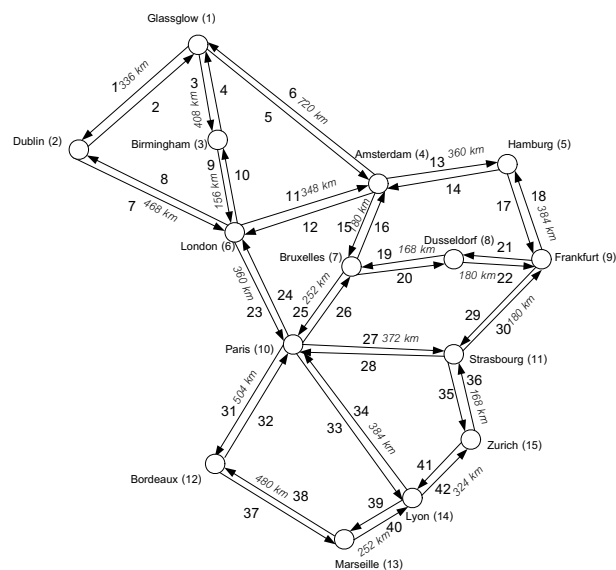
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบเมช (mesh network) คือวิธีการหาช่วงความยาวคลื่นค่าใหม่ที่สามารถส่งบนโครงข่ายได้โดยไม่ต้องลดขนาดโครงข่าย และหาความเป็นไปได้ในการชดเชยดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดต้นทางและปลายทางเพื่อหลีกเลี่ยงการลดขนาดโครงข่าย

6.1 ระเบียบขั้นตอนในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

1. คำนวณหากราฟฟิสิกของโนดต่างๆ โดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางแบบสั้นที่สุด (shortest path) ระหว่างคู่โนดในกราฟฟิสิกนี้ๆ รวมถึงหาข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องในท เพื่อนำมาคิดหาค่าพารามิเตอร์ R
2. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ R กับ ค่าความยาวคลื่น (λ) เพื่อหาช่วงของความยาวคลื่น และช่วงของค่าดิสเพอร์ชันเริ่มต้นของช่องสัญญาณทั้งหมด ที่ทำให้พารามิเตอร์ R มีค่าระหว่าง 0.1 – 1
3. คำนวณหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละกราฟฟิสิก
4. นำตำแหน่งในข้อที่ 3 มาคิดหาตำแหน่งที่เหมาะสมในแต่ละข่ายเชื่อมโยง โดยใช้วิธีซ้อนทับกัน(intersection) ทุกกราฟฟิสิก
5. ตรวจสอบผลของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

6.2 ตัวอย่างการคำนวณบนโครงข่าย ERNet

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



รูปที่ 6.1 โครงข่าย ERNet

6.2.1 คำนวณหากราฟฟิกของโนดต่างๆ โดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางแบบสั้นที่สุด(shortest path) ระหว่างคู่โนดใดๆ ซึ่งจะได้ผลดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 กราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย ERNet

(ก) โหนด 1 – 3

โนด 1	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมต่อ	โนด 2	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมต่อ	โนด 3	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมต่อ
2	336	1	1	336	2	1	408	4
3	408	3	3	624	7,10	2	624	9,8
4	720	5	4	816	7,11	4	504	9,11
5	1080	5,13	5	1176	7,11,13	5	864	9,11,13
6	564	3,9	6	468	7	6	156	9
7	900	5,15	7	996	7,11,15	7	684	9,11,15
8	1068	5,15,20	8	1164	7,11,15,20	8	852	9,11,15,20
9	1248	5,15,20,22	9	1344	7,11,15,20,22	9	1032	9,11,15,20,22
10	924	3,9,23	10	828	7,23	10	516	9,23
11	1296	3,9,23,27	11	1200	7,23,27	11	888	9,23,27
12	1428	3,9,23,31	12	1332	7,23,31	12	1020	9,23,31
13	1560	3,9,23,33,39	13	1464	7,23,33,39	13	1152	9,23,33,39
14	1308	3,9,23,33	14	1212	7,23,33	14	900	9,23,33
15	1464	3,9,23,27,35	15	1368	7,23,27,35	15	1056	9,23,27,35

(ข) โหนด 4 – 6

โนด 4	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมต่อ	โนด 5	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมต่อ	โนด 6	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมต่อ
1	720	6	1	1080	14,6	1	564	10,4
2	816	12,8	2	1176	14,12,8	2	468	8
3	504	12,10	3	864	14,12,10	3	156	10
5	360	13	4	360	14	4	348	11
6	348	12	6	708	14,12	5	708	11,13
7	180	15	7	540	14,15	7	528	11,15
8	348	15,20	8	564	17,21	8	696	11,15,20
9	528	15,20,22	9	384	17	9	876	11,15,20,22

10	432	15,25	10	792	14,15,25	10	360	23
11	708	15,20,22,29	11	564	17,29	11	732	23,27
12	936	15,25,31	12	1296	14,15,25,31	12	864	23,31
13	1068	15,25,33,39	13	1308	17,29,35,41,39	13	996	23,33,39
14	816	15,25,33	14	1056	17,29,35,41	14	744	23,33
15	876	15,20,22,29,35	15	732	17,29,35	15	900	23,27,35

(ก) โหนด 7 – 9

โหนด 7	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 8	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 9	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง
1	900	16,6	1	1068	19,16,6	1	1248	21,19,16,6
2	996	16,12,8	2	1164	19,16,12,8	2	1344	21,19,16,12,8
3	684	16,12,10	3	852	19,16,12,10	3	1032	21,19,16,12,10
4	180	16	4	348	19,16	4	528	21,19,16
5	540	16,13	5	564	22,18	5	384	18
6	528	16,12	6	696	19,16,12	6	876	21,19,16,12
8	168	20	7	168	19	7	348	21,19
9	348	20,22	9	180	22	8	180	21
10	252	25	10	420	19,25	10	552	29,28
11	528	20,22,29	11	360	22,29	11	180	29
12	756	25,31	12	924	19,25,31	12	1056	29,28,31
13	888	25,33,39	13	1056	19,25,33,39	13	924	29,35,41,39
14	636	25,33	14	804	19,25,33	14	672	29,35,41
15	696	20,22,29,35	15	528	22,29,35	15	348	29,35

(ง) โหนด 10 – 12

โหนด 10	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 11	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 12	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง
1	924	24,10,4	1	1296	28,24,10,4	1	1428	32,24,10,4
2	828	24,8	2	1200	28,24,8	2	1332	32,24,8
3	516	24,10	3	888	28,24,10	3	1020	32,24,10
4	432	26,16	4	708	30,21,19,16	4	936	32,26,16
5	792	26,16,13	5	564	30,18	5	1296	32,26,16,13
6	360	24	6	732	28,24	6	864	32,24

7	252	26	7	528	30,21,19	7	756	32,26
8	420	26,20	8	360	30,21	8	924	32,26,20
9	552	27,30	9	180	30	9	1056	32,27,30
11	372	27	10	372	28	10	504	32
12	504	31	12	876	28,31	11	876	32,27
13	636	33,39	13	744	35,41,39	13	480	37
14	384	33	14	492	35,41	14	732	37,40
15	540	27,35	15	168	35	15	1044	32,27,35

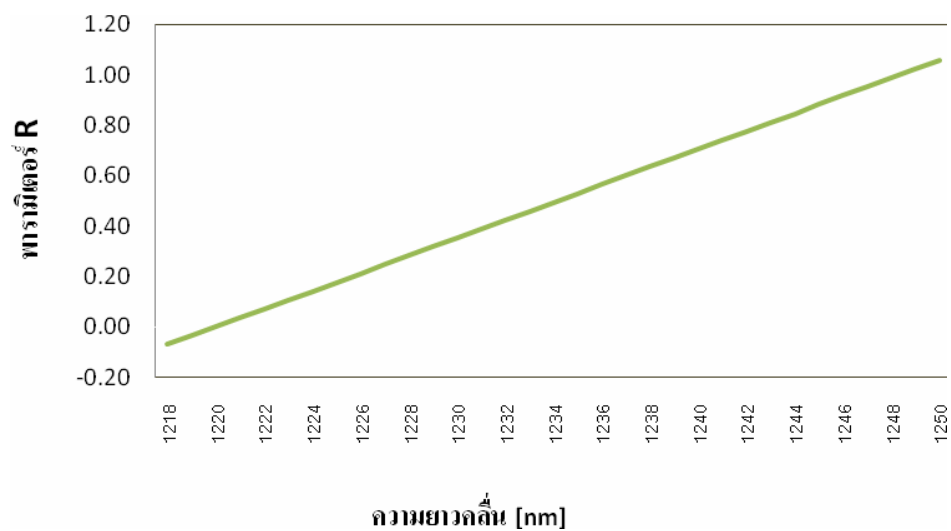
(จ) โหนด 13 – 15

โหนด 13	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 14	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 15	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง
1	1560	40,34,24,10,4	1	1308	34,24,10,4	1	1464	36,28,24,10,4
2	1464	40,34,24,8	2	1212	34,24,8	2	1368	36,28,24,8
3	1152	40,34,24,10	3	900	34,24,10	3	1056	36,28,24,10
4	1068	40,34,26,16	4	816	34,26,16	4	876	36,30,21,19,16
5	1308	40,42,36,30,18	5	1056	42,36,30,18	5	732	36,30,18
6	996	40,34,24	6	744	34,24	6	900	36,28,24
7	888	40,34,26	7	636	34,26	7	696	36,30,21,19
8	1056	40,34,26,20	8	804	34,26,20	8	528	36,30,21
9	924	40,42,36,30	9	672	42,36,30	9	348	36,30
10	636	40,34	10	384	34	10	540	36,28
11	744	40,42,36	11	492	42,36	11	168	36
12	480	38	12	732	39,38	12	1044	36,28,31
14	252	40	13	252	39	13	576	41,39
15	576	40,42	15	324	42	14	324	41

6.2.2 หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นกับพารามิเตอร์ R ได้ผลดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 พารามิเตอร์ R ของโครงข่าย ERNet

โนดต้นทาง-โนดปลายทาง	ทราฟฟิก [km]	X_1 [km]	R	โนดต้นทาง-โนดปลายทาง	ทราฟฟิก [km]	X_1 [km]	R
1 - 9	1248	720	-0.14	9 - 2	1344	180	0.88
1 - 15	1464	408	0.58	9 - 12	1056	180	-0.17
2 - 13	1464	468	0.47	10 - 1	924	360	0.18
3 - 13	1152	156	0.75	10 - 5	792	252	0.26
4 - 13	1068	180	0.68	10 - 13	636	384	-0.12
5 - 13	1308	384	0.48	11 - 4	708	180	0.31
6 - 9	876	348	0.16	11 - 13	744	168	0.36
6 - 13	996	360	0.25	12 - 1	1428	504	0.37
7 - 2	996	180	0.57	12 - 14	732	480	-0.2
7 - 13	888	252	0.34	13 - 1	1560	252	0.94
7 - 15	696	168	0.32	14 - 1	1308	384	0.48
8 - 2	1164	168	0.74	14 - 5	1056	324	0.36
8 - 15	564	180	0.15	15 - 1	1464	168	1



จากตารางที่ 6.2 พบว่าที่ทราฟฟิกจากโนด 15 ไปโนด 1 ให้ค่าพารามิเตอร์ R ที่มากที่สุด ดังนั้นเราจึงใช้ทราฟฟิกนี้ในการคำนวณหาช่วงความยาวคลื่นที่ทำให้พารามิเตอร์ R มีค่าระหว่าง 0.1 – 1 เมื่อนำมาพล็อตกราฟได้ผลดังรูปที่ 6.

รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ R กับความยาวคลื่น

ที่ $R = 1$ จะได้ความยาวคลื่น 1248.51 nm

มีค่าดิสเพอร์ชันสะสมคือ $16.5 + 0.05(1248.51 - 1550) = 1.43$ ps/nm/km

ที่ $R = 0.1$ จะได้ความยาวคลื่น 1220.21 nm

มีค่าดิสเพอร์ชันสะสมคือ $16.5 + 0.05(1220.21 - 1550) = 0.01$ ps/nm/km

เมื่อได้ช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมแล้ว จะเห็นได้ว่าช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวไม่ใช่ช่วงความยาวคลื่นที่นิยมใช้กันในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงในปัจจุบัน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ เพื่อให้นำไปใช้ได้จริง ช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหาช่วงของค่าดิสเพอร์ชันเริ่มต้นของแต่ละช่องสัญญาณได้ ซึ่งก็จะเป็นการเลือกใช้ชนิดของเส้นใยแสงที่ให้ค่าดิสเพอร์ชันเริ่มต้นแก่ช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการนำมาใช้สัญญาณได้

Longest path Origin-Destination	Length [km]	Dispersion value [ps/km/nm]	Wavelength [nm]	R
15-1	1464	-1.43 to 1.43	1294.45- 1325.54	1
15-1	1464	15.44 to 17	1528.77- 1560.61	12

ตารางที่ 6.3 แสดงช่วงของค่าดิสเพอร์ชันเริ่มต้นและช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมเมื่อไม่ลดขนาดของโครงข่ายเปรียบเทียบกับเมื่อลดขนาดของโครงข่ายลง 12 เท่าเพื่อให้ช่วงความยาวคลื่นในช่วง C band ใช้งานได้

ตารางที่ 6.3 ช่วงของค่าดิสเพอร์ชันเริ่มต้นและช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมเมื่อไม่ลดขนาดของโครงข่าย เปรียบเทียบกับเมื่อลดขนาดของโครงข่ายลง 12 เท่าเพื่อให้ช่วงความยาวคลื่นในช่วง C band ใช้งานได้

6.2.3 คำนวณหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิก ได้ผลดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิก

(ก) โหนด 1 – 4

โหนด 1	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R	โหนด 2	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R
2	336	-393.21	729.21	1	336	-393.21	729.21
3	408	-357.21	765.21	3	624	-249.21	873.21
4	720	-201.21	921.21	4	816	-153.21	969.21
5	1080	-21.21	1101.21	5	1176	26.79	1149.21
6	564	-279.21	843.21	6	468	-327.21	795.21
7	900	-111.21	1011.21	7	996	-63.21	1059.21
8	1068	-27.21	1095.21	8	1164	20.79	1143.21
9	1248	62.79	1185.21	9	1344	110.79	1233.21
10	924	-99.21	1023.21	10	828	-147.21	975.21
11	1296	86.79	1209.21	11	1200	38.79	1161.21
12	1428	152.79	1275.21	12	1332	104.79	1227.21
13	1560	218.79	1341.21	13	1464	170.79	1293.21
14	1308	92.79	1215.21	14	1212	44.79	1167.21
15	1464	170.79	1293.21	15	1368	122.79	1245.21
โหนด 3	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R	โหนด 4	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R
1	408	-357.21	765.21	1	720	-201.21	921.21
2	624	-249.21	873.21	2	816	-153.21	969.21
4	504	-309.21	813.21	3	504	-309.21	813.21
5	864	-129.21	993.21	5	360	-381.21	741.21
6	156	-483.21	639.21	6	348	-387.21	735.21
7	684	-219.21	903.21	7	180	-471.21	651.21
8	852	-135.21	987.21	8	348	-387.21	735.21
9	1032	-45.21	1077.21	9	528	-297.21	825.21
10	516	-303.21	819.21	10	432	-345.21	777.21
11	888	-117.21	1005.21	11	708	-207.21	915.21
12	1020	-51.21	1071.21	12	936	-93.21	1029.21

13	1152	14.79	1137.21	13	1068	-27.21	1095.21
14	900	-111.21	1011.21	14	816	-153.21	969.21
15	1056	-33.21	1089.21	15	876	-123.21	999.21

(๗) โหนด 5 – 8

โหนด 5	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R	โหนด 6	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R
1	1080	-21.21	1101.21	1	564	-279.21	843.21
2	1176	26.79	1149.21	2	468	-327.21	795.21
3	864	-129.21	993.21	3	156	-483.21	639.21
4	360	-381.21	741.21	4	348	-387.21	735.21
6	708	-207.21	915.21	5	708	-207.21	915.21
7	540	-291.21	831.21	7	528	-297.21	825.21
8	564	-279.21	843.21	8	696	-213.21	909.21
9	384	-369.21	753.21	9	876	-123.21	999.21
10	792	-165.21	957.21	10	360	-381.21	741.21
11	564	-279.21	843.21	11	732	-195.21	927.21
12	1296	86.79	1209.21	12	864	-129.21	993.21
13	1308	92.79	1215.21	13	996	-63.21	1059.21
14	1056	-33.21	1089.21	14	744	-189.21	933.21
15	732	-195.21	927.21	15	900	-111.21	1011.21
โหนด 7	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R	โหนด 8	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R
1	900	-111.21	1011.21	1	1068	-27.21	1095.21
2	996	-63.21	1059.21	2	1164	20.79	1143.21
3	684	-219.21	903.21	3	852	-135.21	987.21
4	180	-471.21	651.21	4	348	-387.21	735.21
5	540	-291.21	831.21	5	564	-279.21	843.21
6	528	-297.21	825.21	6	696	-213.21	909.21
8	168	-477.21	645.21	7	168	-477.21	645.21
9	348	-387.21	735.21	9	180	-471.21	651.21
10	252	-435.21	687.21	10	420	-351.21	771.21
11	528	-297.21	825.21	11	360	-381.21	741.21

12	756	-183.21	939.21	12	924	-99.21	1023.21
13	888	-117.21	1005.21	13	1056	-33.21	1089.21
14	636	-243.21	879.21	14	804	-159.21	963.21
15	696	-213.21	909.21	15	528	-297.21	825.21

(ค) โหนด 9 – 12

โหนด 9	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R	โหนด 10	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R
1	1248	62.79	1185.21	1	924	-99.21	1023.21
2	1344	110.79	1233.21	2	828	-147.21	975.21
3	1032	-45.21	1077.21	3	516	-303.21	819.21
4	528	-297.21	825.21	4	432	-345.21	777.21
5	384	-369.21	753.21	5	792	-165.21	957.21
6	876	-123.21	999.21	6	360	-381.21	741.21
7	348	-387.21	735.21	7	252	-435.21	687.21
8	180	-471.21	651.21	8	420	-351.21	771.21
10	552	-285.21	837.21	9	552	-285.21	837.21
11	180	-471.21	651.21	11	372	-375.21	747.21
12	1056	-33.21	1089.21	12	504	-309.21	813.21
13	924	-99.21	1023.21	13	636	-243.21	879.21
14	672	-225.21	897.21	14	384	-369.21	753.21
15	348	-387.21	735.21	15	540	-291.21	831.21
โหนด 11	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R	โหนด 12	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R
1	1296	86.79	1209.21	1	1428	152.79	1275.21
2	1200	38.79	1161.21	2	1332	104.79	1227.21
3	888	-117.21	1005.21	3	1020	-51.21	1071.21
4	708	-207.21	915.21	4	936	-93.21	1029.21
5	564	-279.21	843.21	5	1296	86.79	1209.21
6	732	-195.21	927.21	6	864	-129.21	993.21
7	528	-297.21	825.21	7	756	-183.21	939.21
8	360	-381.21	741.21	8	924	-99.21	1023.21
9	180	-471.21	651.21	9	1056	-33.21	1089.21
10	372	-375.21	747.21	10	504	-309.21	813.21

12	876	-123.21	999.21	11	876	-123.21	999.21
13	744	-189.21	933.21	13	480	-321.21	801.21
14	492	-315.21	807.21	14	732	-195.21	927.21
15	168	-477.21	645.21	15	1044	-39.21	1083.21

(ง) โหนด 13 – 15

โหนด 13	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R	โหนด 14	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R
1	1560	218.79	1341.21	1	1308	92.79	1215.21
2	1464	170.79	1293.21	2	1212	44.79	1167.21
3	1152	14.79	1137.21	3	900	-111.21	1011.21
4	1068	-27.21	1095.21	4	816	-153.21	969.21
5	1308	92.79	1215.21	5	1056	-33.21	1089.21
6	996	-63.21	1059.21	6	744	-189.21	933.21
7	888	-117.21	1005.21	7	636	-243.21	879.21
8	1056	-33.21	1089.21	8	804	-159.21	963.21
9	924	-99.21	1023.21	9	672	-225.21	897.21
10	636	-243.21	879.21	10	384	-369.21	753.21
11	744	-189.21	933.21	11	492	-315.21	807.21
12	480	-321.21	801.21	12	732	-195.21	927.21
14	252	-435.21	687.21	13	252	-435.21	687.21
15	576	-273.21	849.21	15	324	-399.21	723.21
โหนด 15	ระยะทาง	OPC_L	OPC_R				
1	1464	170.79	1293.21				
2	1368	122.79	1245.21				
3	1056	-33.21	1089.21				
4	876	-123.21	999.21				
5	732	-195.21	927.21				
6	900	-111.21	1011.21				
7	696	-213.21	909.21				
8	528	-297.21	825.21				
9	348	-387.21	735.21				

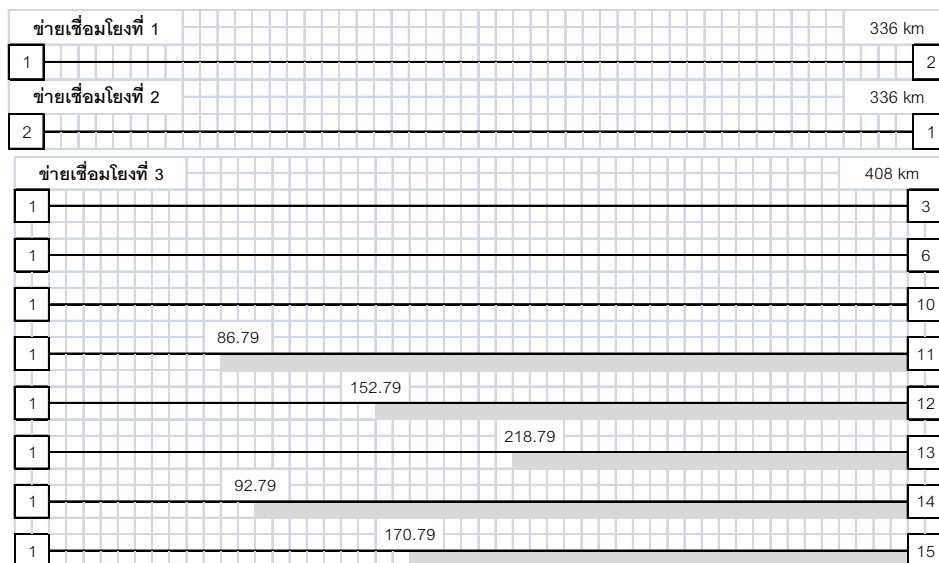
10	540	-291.21	831.21
11	168	-477.21	645.21
12	1044	-39.21	1083.21
13	576	-273.21	849.21
14	324	-399.21	723.21

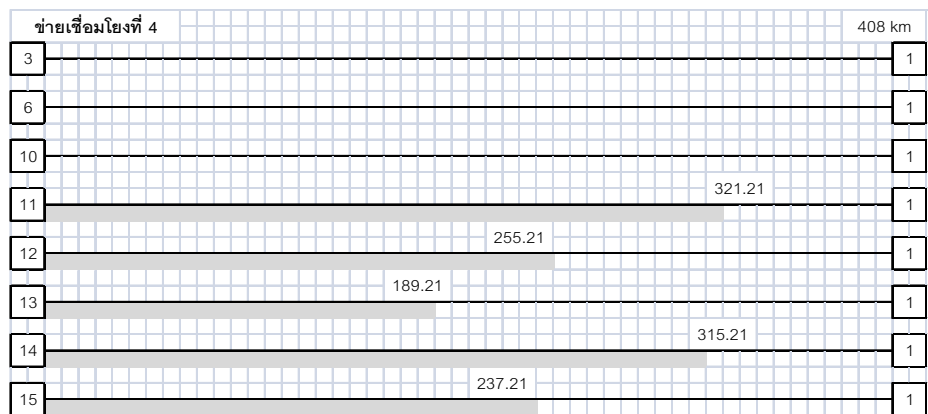
ค่าที่อยู่ในตารางที่ 6.4 ในช่อง OPC_L และ OPC_R เช่น ทราฟฟิกจากโนด 15 ไปยังโนด 13 นั้น ค่าในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงจะอยู่ในช่วงนอกความยาวทราฟฟิกหมายถึงช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้นวางตรงไหนก็ได้ตลอดทราฟฟิก หรือในอีกความหมายก็คือทราฟฟิกนั้นไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสง เนื่องจากระยะทางที่มากที่สุดที่จะต้องใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงแล้วดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางไม่เกิน 1600 ps/nm ก็คือ

$$\frac{1600}{1.43} = 1118.88 \text{ km}$$

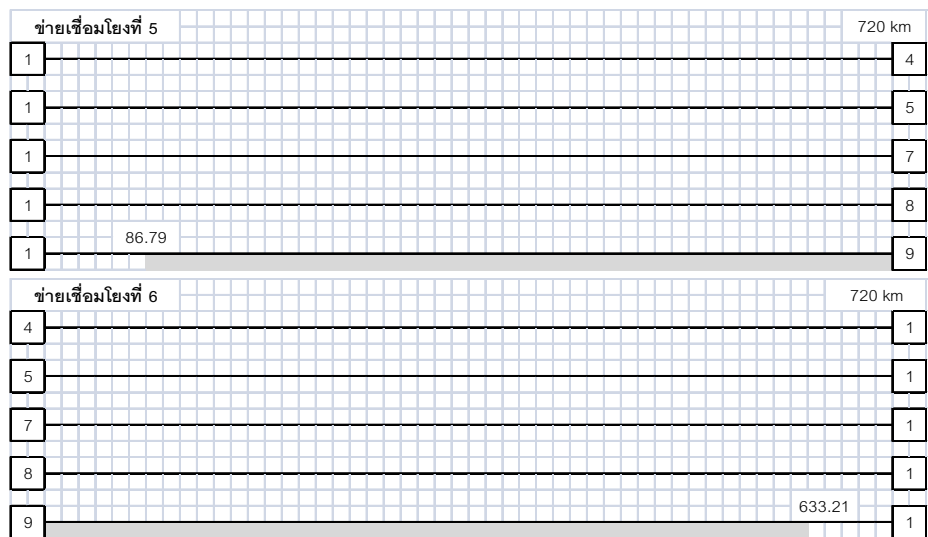
ดังนั้นถ้าทราฟฟิกไหนมีระยะทางไม่เกิน 1118.88 km ก็แสดงว่าไม่จำเป็นต้องมีเครื่องส่งยุคเฟสแสงก็ได้

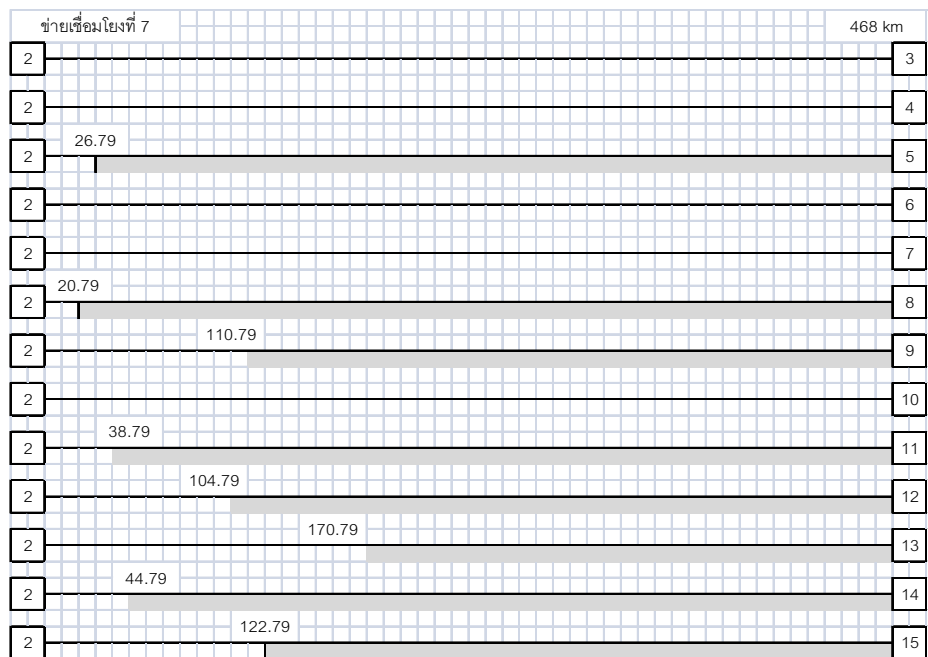
6.2.4 หาช่วงซ้อนทับในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแต่ละข่ายเชื่อมโยง





(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 1 - 4





(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 - 7

ข่ายเชื่อมโยงที่ 8		468 km
3		2
4		2
5	441.21	2
6		2
7		2
8	447.21	2
9	357.2	2
10		2
11	429.21	2
12	363.2	2
13	297.20	2
14	423.21	2
15	345.2	2
ข่ายเชื่อมโยงที่ 9		156 km
1		6
1		10
1		11
1		12
1		13
1		14
1		15
3		2
3		4
3		5
3		6
3		7
3		8
3		9
3		10
3		11
3		12
3	14.79	13
3		14
3		15

(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 8 - 9

ข่ายเชื่อมโยงที่ 10		156 km
2		3
4		3
5		3
6		1
6		3
7		3
8		3
9		3
10		1
10		3
11		1
11		3
12		1
12		3
13		1
13	141.21	3
14		1
14		3
15		1
15		3
ข่ายเชื่อมโยงที่ 11		348 km
2		4
2		5
2		7
2		8
2		9
3		4
3		5
3		7
3		8
3		9
6		4
6		5
6		7
6		8
6		9

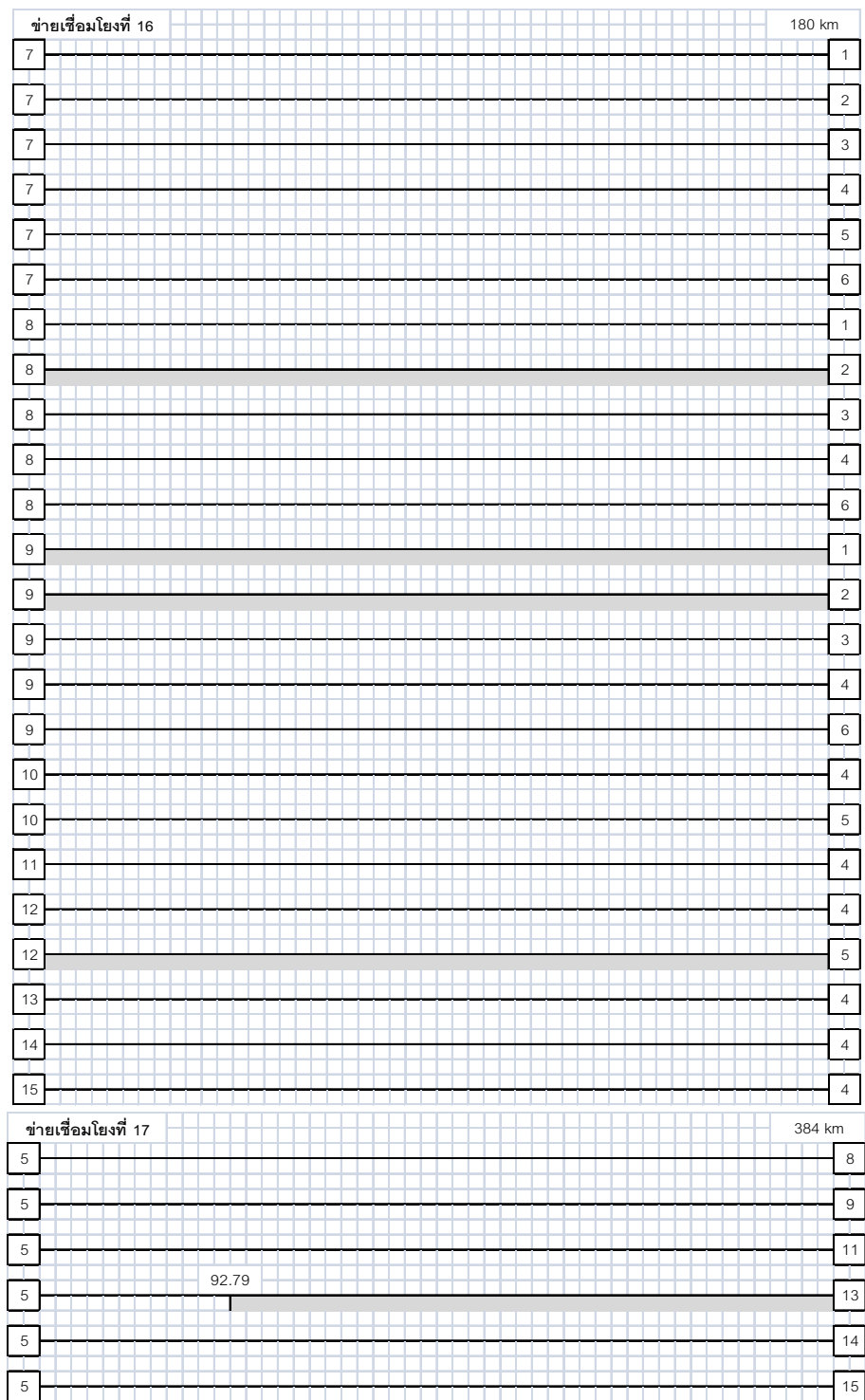
(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 10 - 11

ข่ายเชื่อมโยงที่ 12		348 km
4		2
4		3
4		6
5		2
5		3
5		6
7		2
7		3
7		6
8		2
8		3
8		6
9		2
9		3
9		6
ข่ายเชื่อมโยงที่ 13		360 km
1		5
2	333.21	5
3		5
4		5
6		5
7		5
10		5
12	273.21	5
ข่ายเชื่อมโยงที่ 14		360 km
5		1
5	26.79	2
5		3
5		4
5		6
5		7
5		10
5	86.79	12

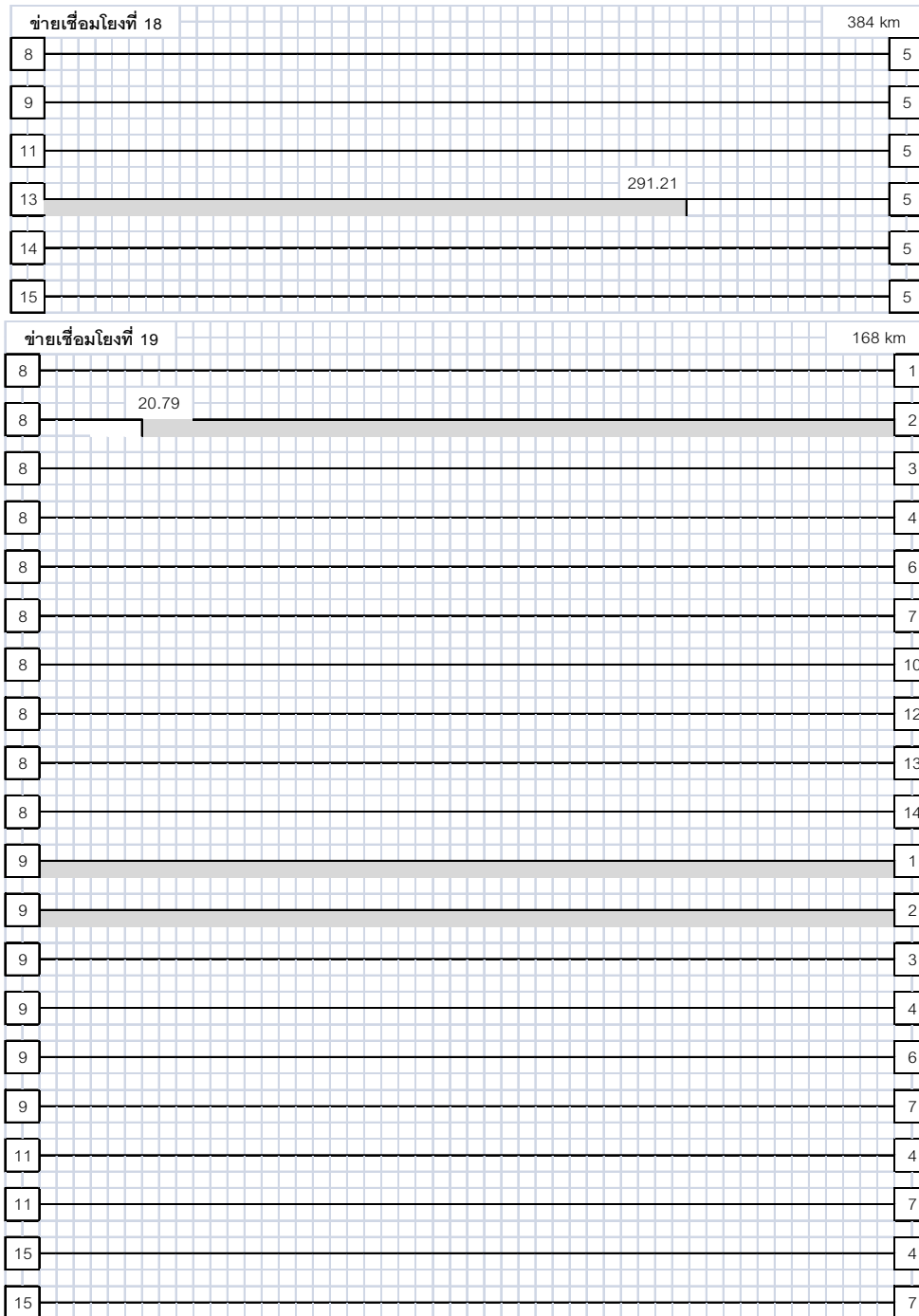
(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 12 – 14

ข่ายเชื่อมโยงที่ 15		180 km
1		7
1		8
1		9
2		7
2		8
2		9
3		7
3		8
3		9
4		7
4		8
4		9
4		10
4		11
4		12
4		13
4		14
4		15
5		7
5		10
5		12
6		7
6		8
6		9

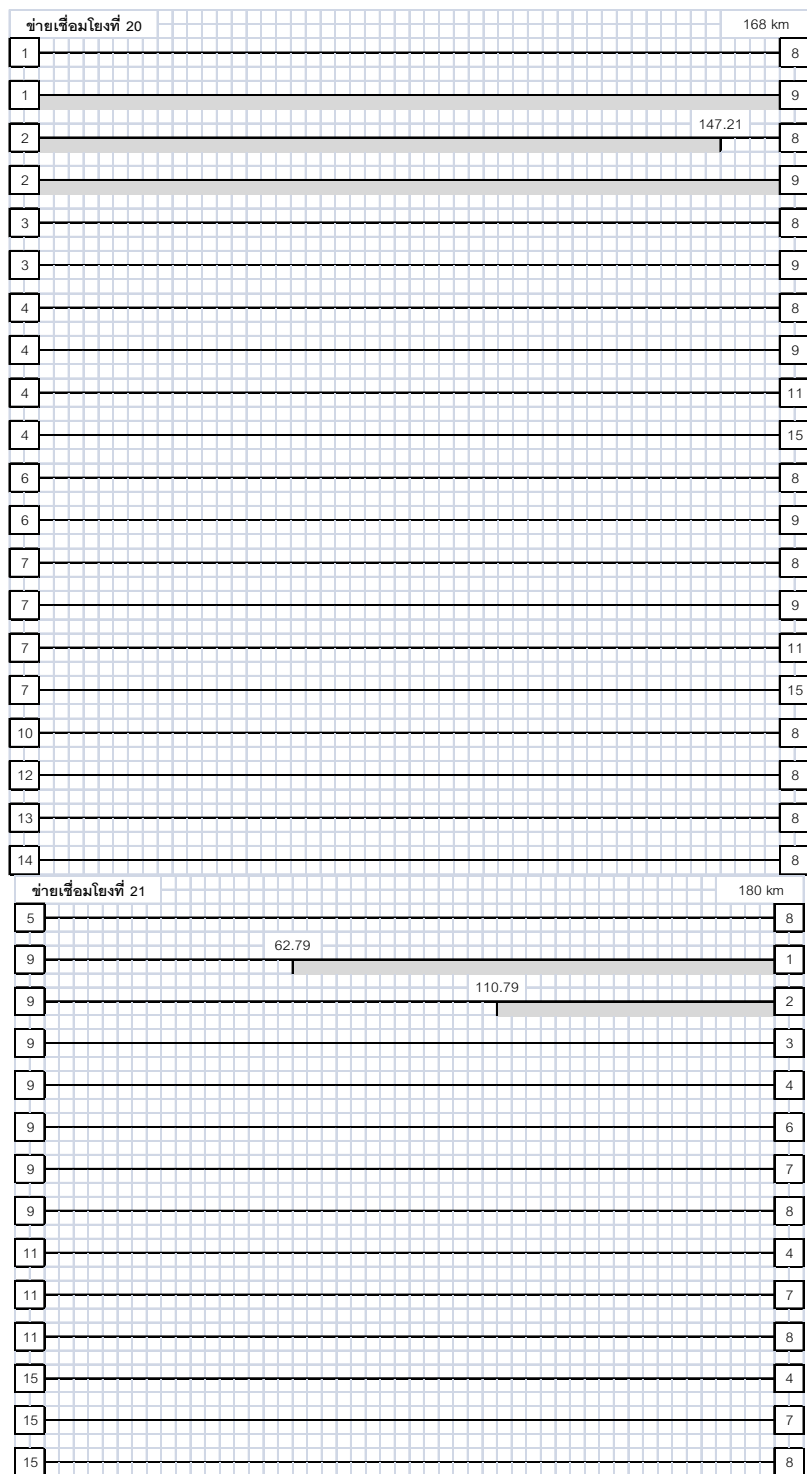
(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 15



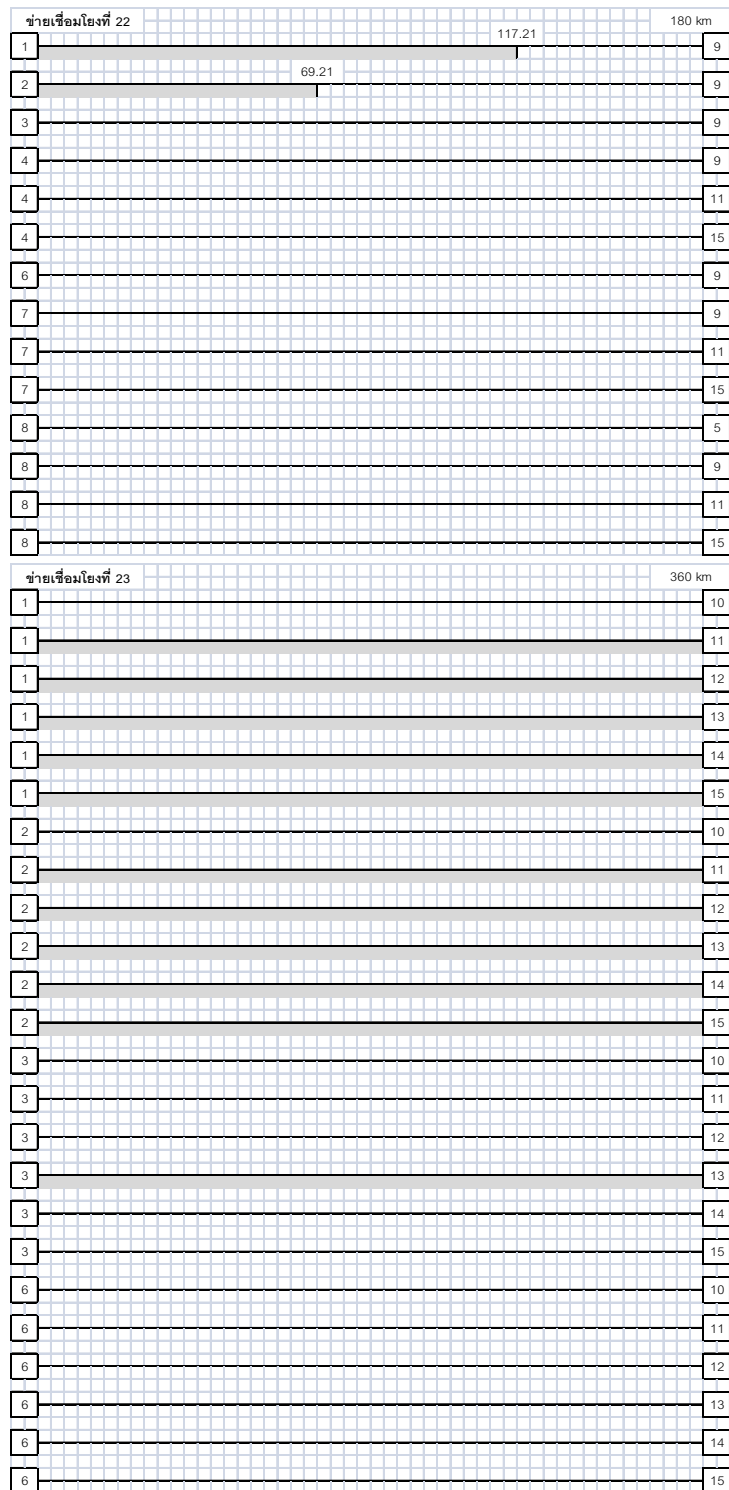
(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 16 - 17



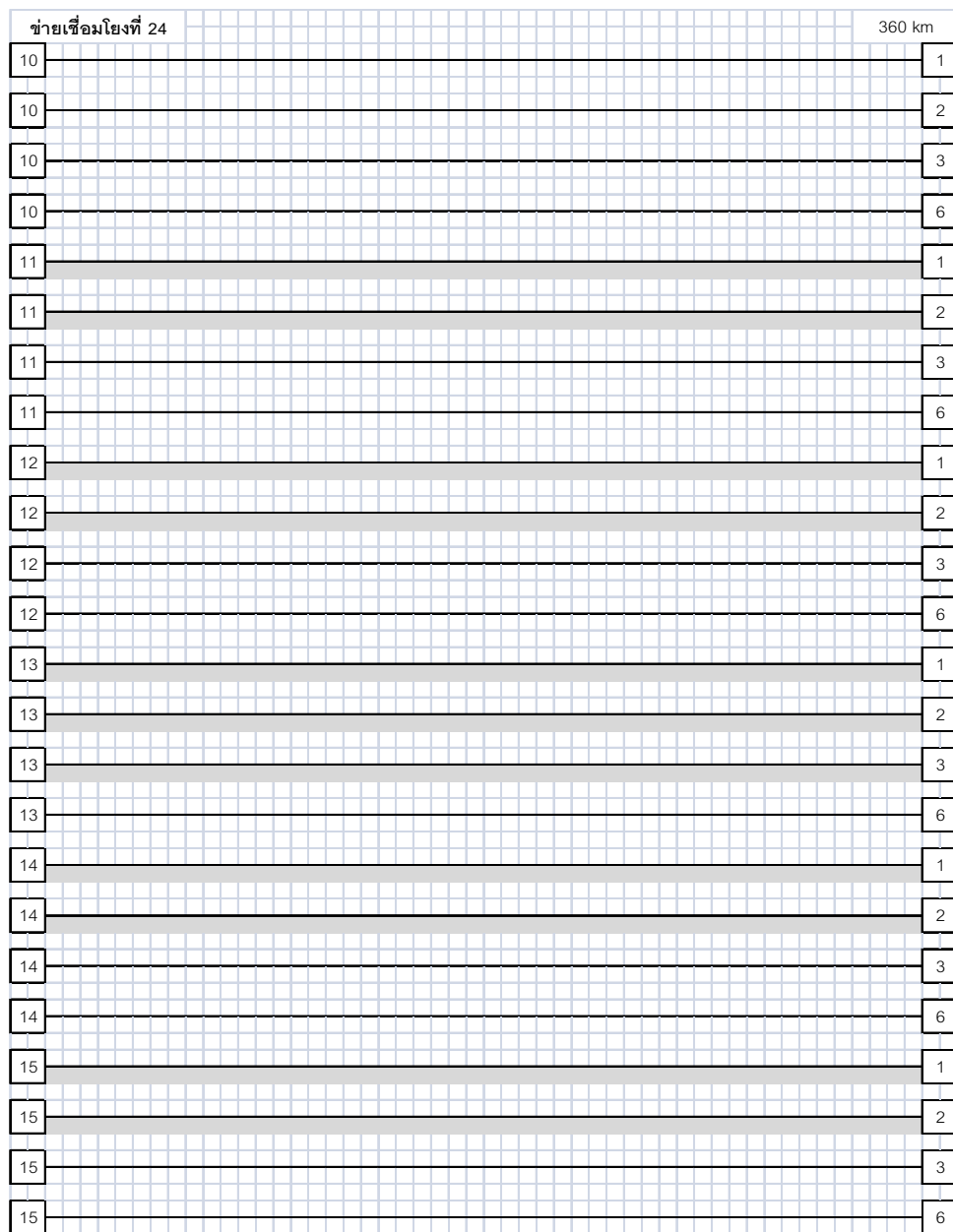
(๗) ข่ายเชื่อมโยงที่ 18 – 19



(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 20 – 21



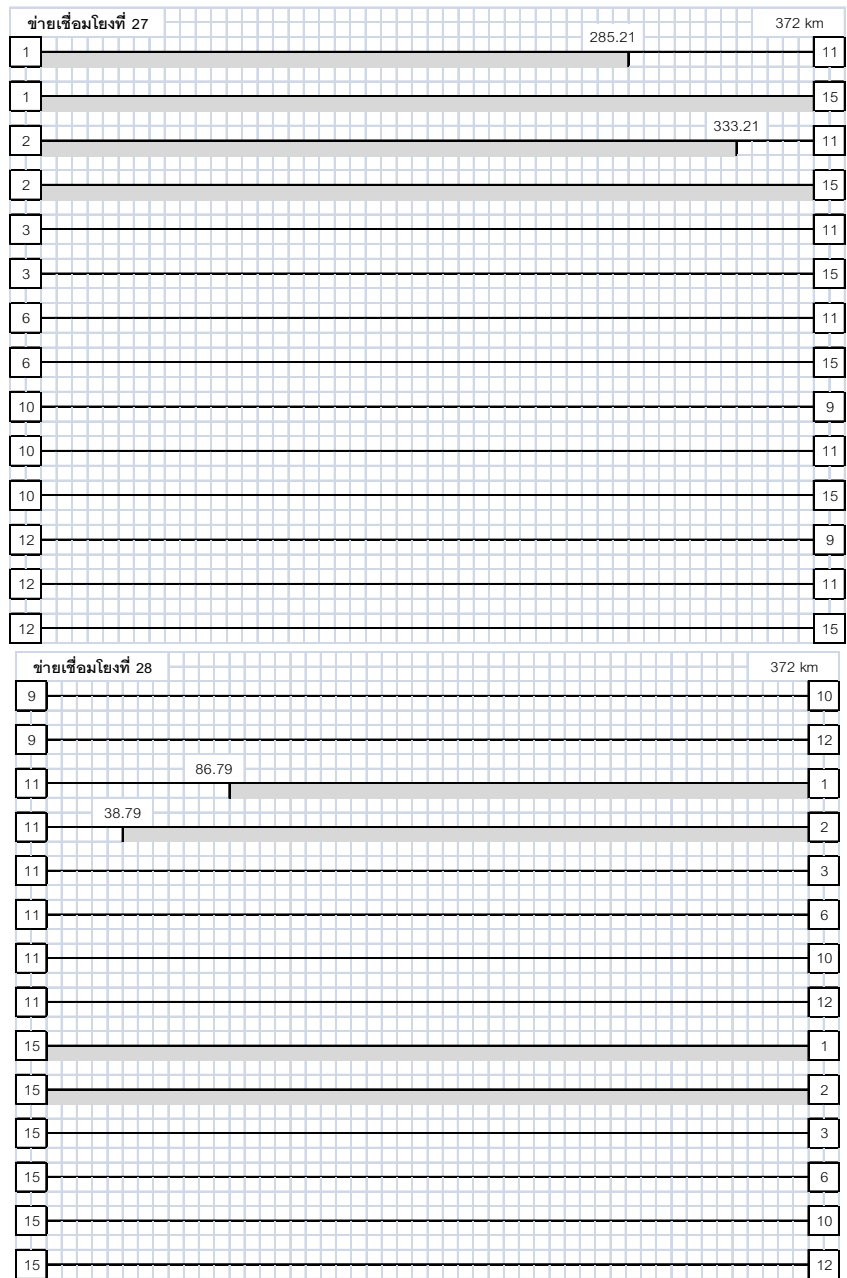
(ญ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 22 - 23



(ฎ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 24

ข่ายเชื่อมโยงที่ 25		252 km
4		10
4		12
4		13
4		14
5		10
5		12
7		10
7		12
7		13
7		14
8		10
8		12
8		13
8		14
ข่ายเชื่อมโยงที่ 26		252 km
10		4
10		5
10		7
10		8
12		4
12		5
12		7
12		8
13		4
13		7
13		8
14		4
14		7
14		8

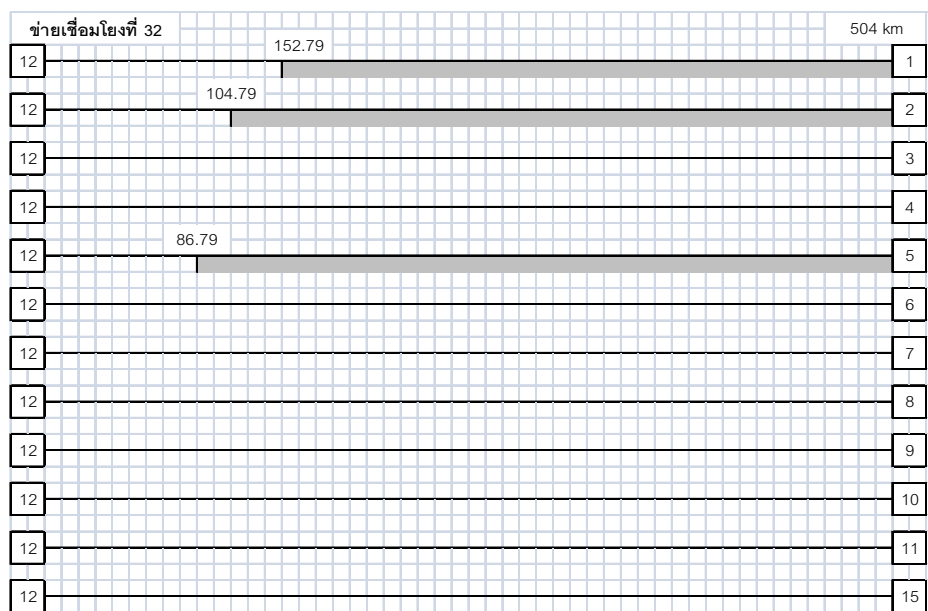
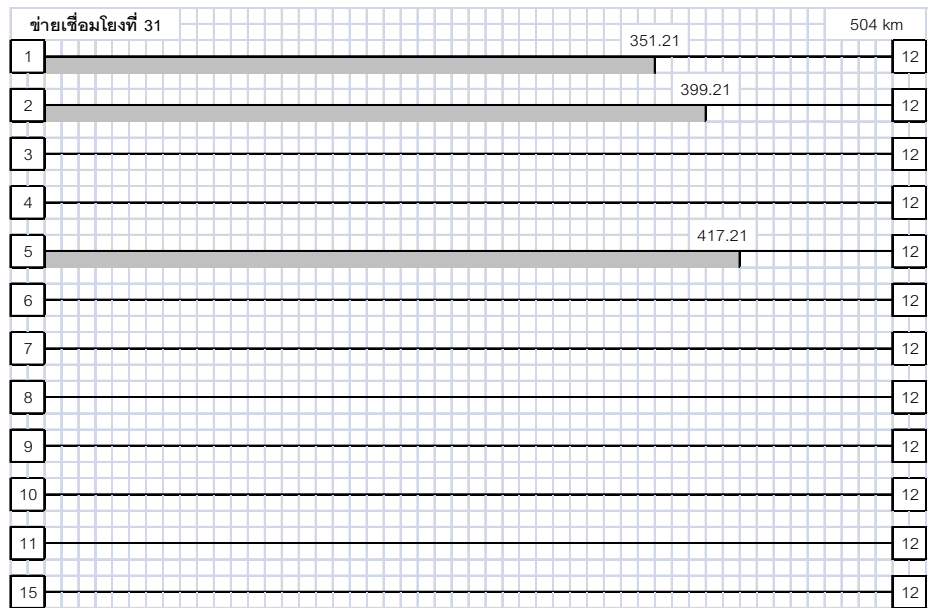
(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 25 - 26



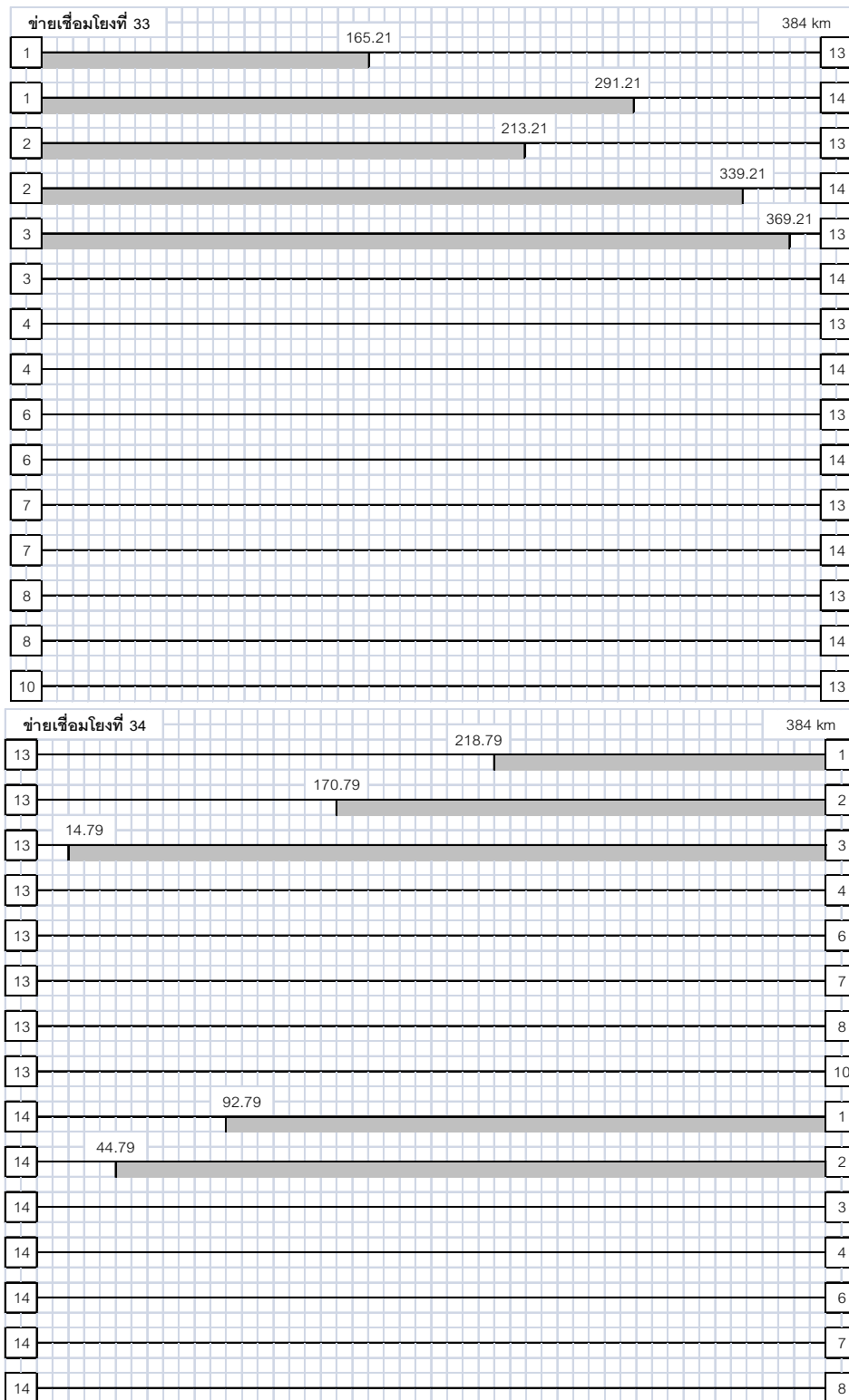
(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 27 - 28

ข่ายเชื่อมโยงที่ 29		180 km
4		11
4		15
5		11
5		13
5		14
5		15
7		11
7		15
8		11
8		15
9		10
9		11
9		12
9		13
9		14
9		15
ข่ายเชื่อมโยงที่ 30		180 km
10		9
11		4
11		5
11		7
11		8
11		9
12		9
13		5
13		9
14		5
14		9
15		4
15		5
15		7
15		8
15		9

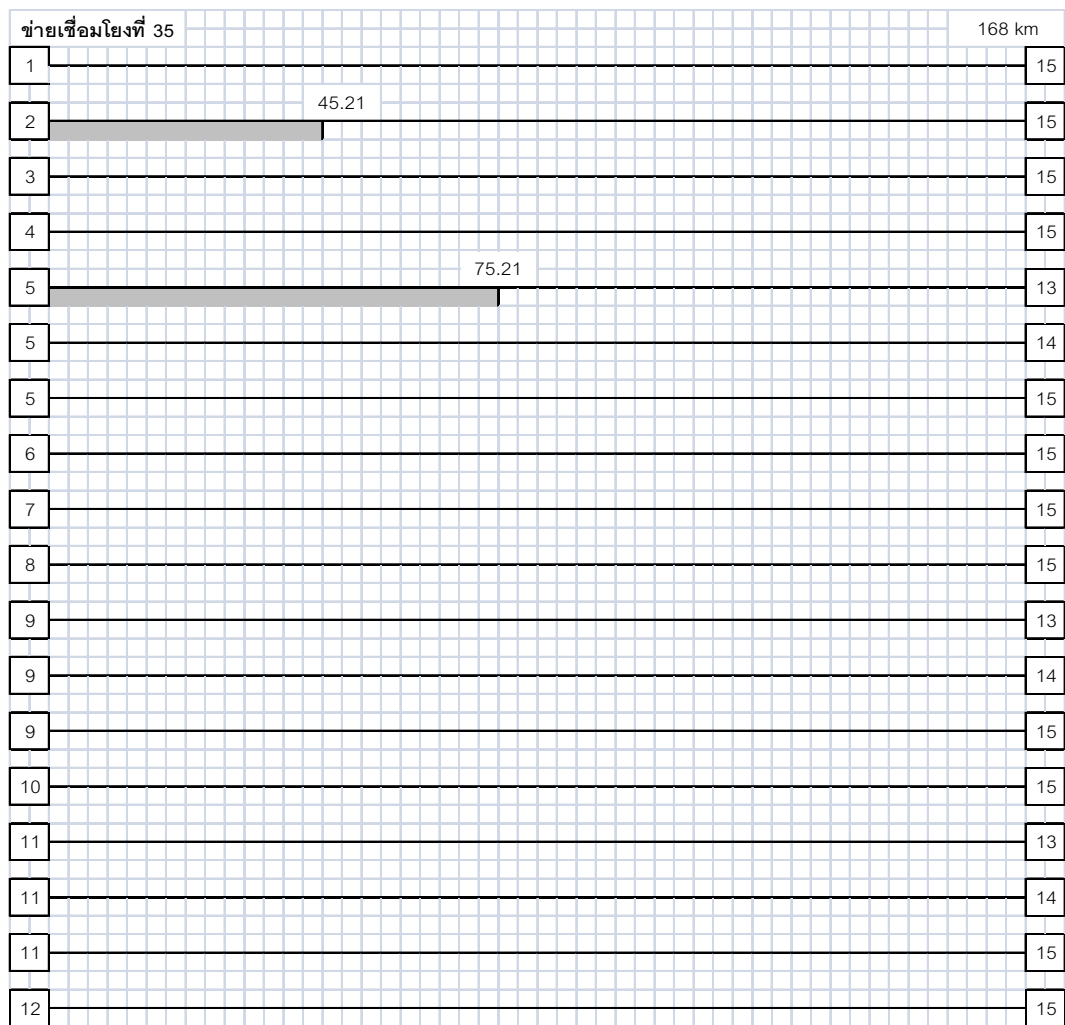
(๓) ข่ายเชื่อมโยงที่ 29 - 30



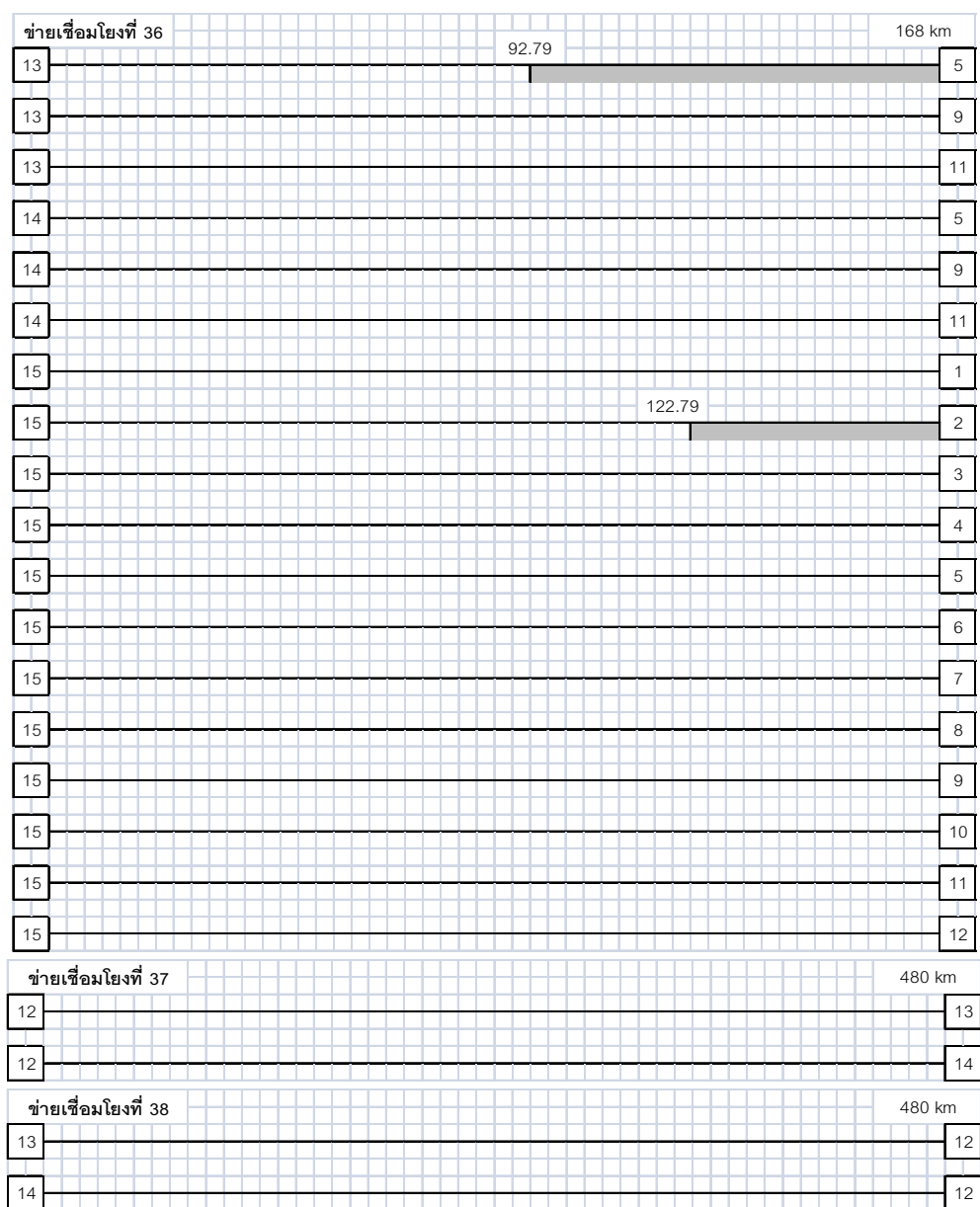
(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 31 - 32



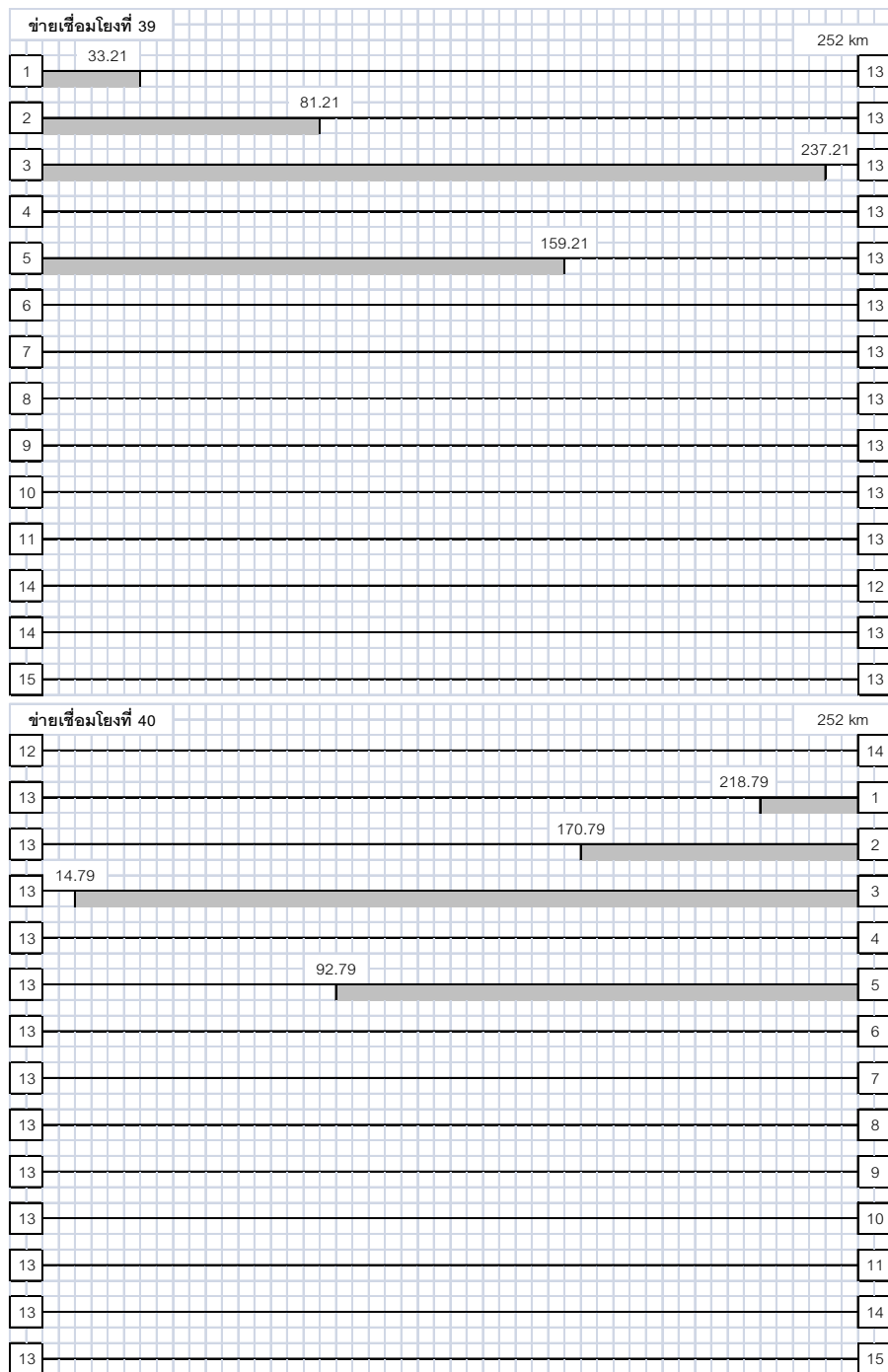
(ณ)ข่ายเชื่อมโยงที่ 33 - 34



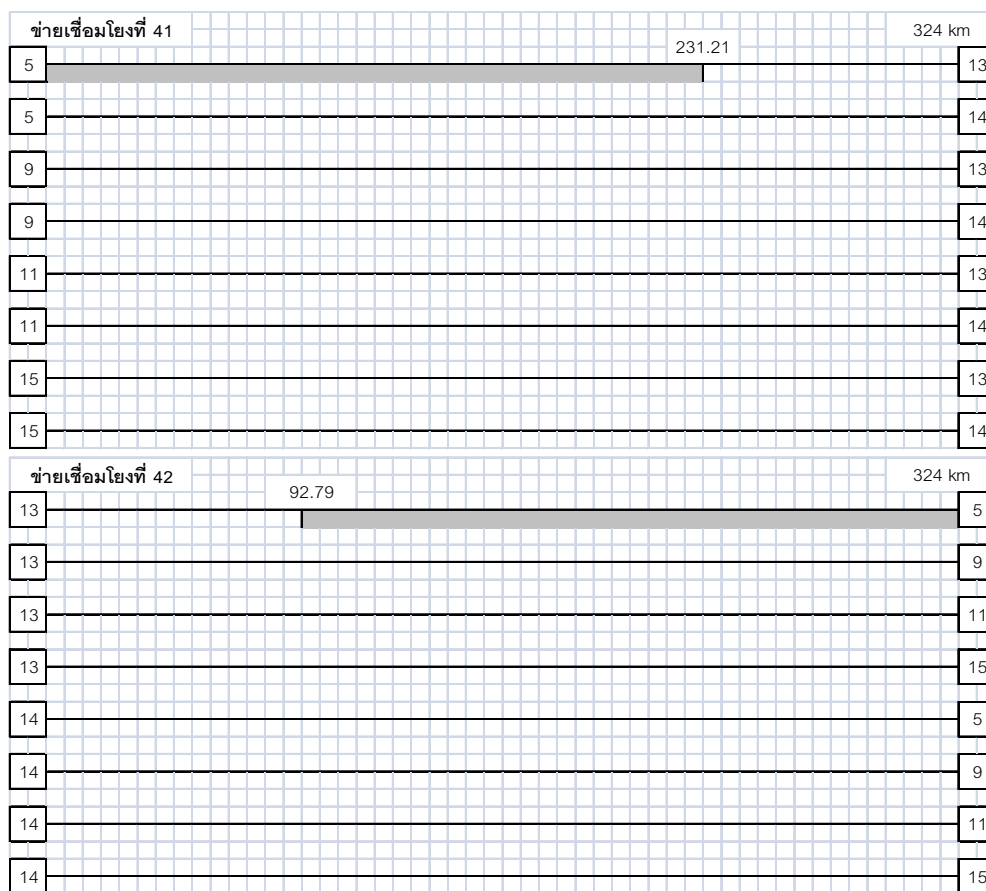
(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 35



(ต) ข่ายเชื่อมโยงที่ 36 - 38



(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 39 – 40



(ท) ข่ายเชื่อมโยงที่ 41 – 42

รูปที่ 6.3 ทราฟฟิกและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่าย ERNet

6.2.5 ระบุตำแหน่งวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงบนโครงข่าย

1. พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกมากที่สุดเป็นลำดับแรกในที่นี้ก็คือข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 มีทั้งหมด 11 ทราฟฟิก
2. หาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงจากข่ายเชื่อมโยงที่หาได้จากข้อ 1. จะได้ตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงจากการซ้อนทับเท่ากับ 0 – 360 km
3. ให้ตัดทราฟฟิกที่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาในข้อ 1 ซึ่งมีข่ายเชื่อมโยงดังนี้
ทราฟฟิกที่ความเชื่อมโยงกับข่าย 23 คือ

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 = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

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

ตัดทราฟฟิกที่ความเชื่อมโยงกับข่าย 24 คือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 4 เหลือทราฟฟิก = $5 - 5 = 0$ ทราฟฟิก

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

ข่ายเชื่อมโยงที่ 10 เหลือทราฟฟิก = $6 - 6 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 28 เหลือทราฟฟิก = $4 - 4 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 32 เหลือทราฟฟิก = $3 - 2 = 1$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 34 เหลือทราฟฟิก = $5 - 5 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 36 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

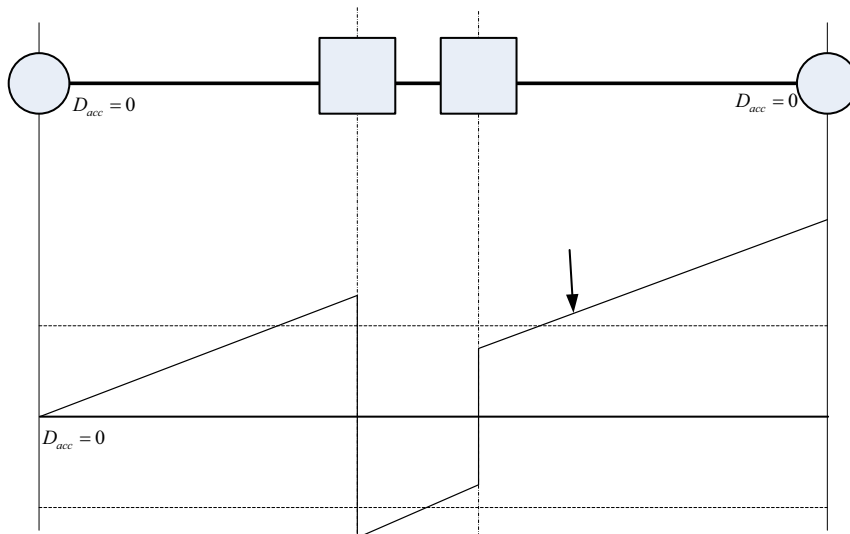
ข่ายเชื่อมโยงที่ 40 เหลือทราฟฟิก = $4 - 3 = 1$ ทราฟฟิก

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

5. ถ้าเหลือทราฟฟิกเท่ากันในทุกข่ายเชื่อมโยงที่เหลือ ให้พิจารณาโดยยึดหลักที่ว่า

5.1 พิจารณาทราฟฟิกที่ยังไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแต่ยังมีผลจากดิสเพอร์ชัน ซึ่งก็คือ ทราฟฟิกที่ไม่เกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณามาแล้วในข้อ 1 – ข้อ 4 ที่นี้ก็คือข่ายเชื่อมโยงที่ 7 กับ 8

5.2 พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่ยังไม่ได้ทำการตัดทิ้งจากข้อ 1-4 ซึ่งในที่นี้ก็คือข่ายเชื่อมโยงที่ 31, 32, 41, 42, 17 และ 18 เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมเกินขีดจำกัดจากการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง 2 ตัวดังรูปที่ 4.4 นั่นคือถ้าวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง 2 ตัว ระยะทางในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงไม่ควรใกล้เกินไป



รูปที่ 6.4 ปัญหาระยะทางในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงใกล้เคียงเกินไป

จากหลักการพิจารณา 5 ข้อดังกล่าวจะได้ตำแหน่งเครื่องส่งยุคเฟสแสงดังนี้

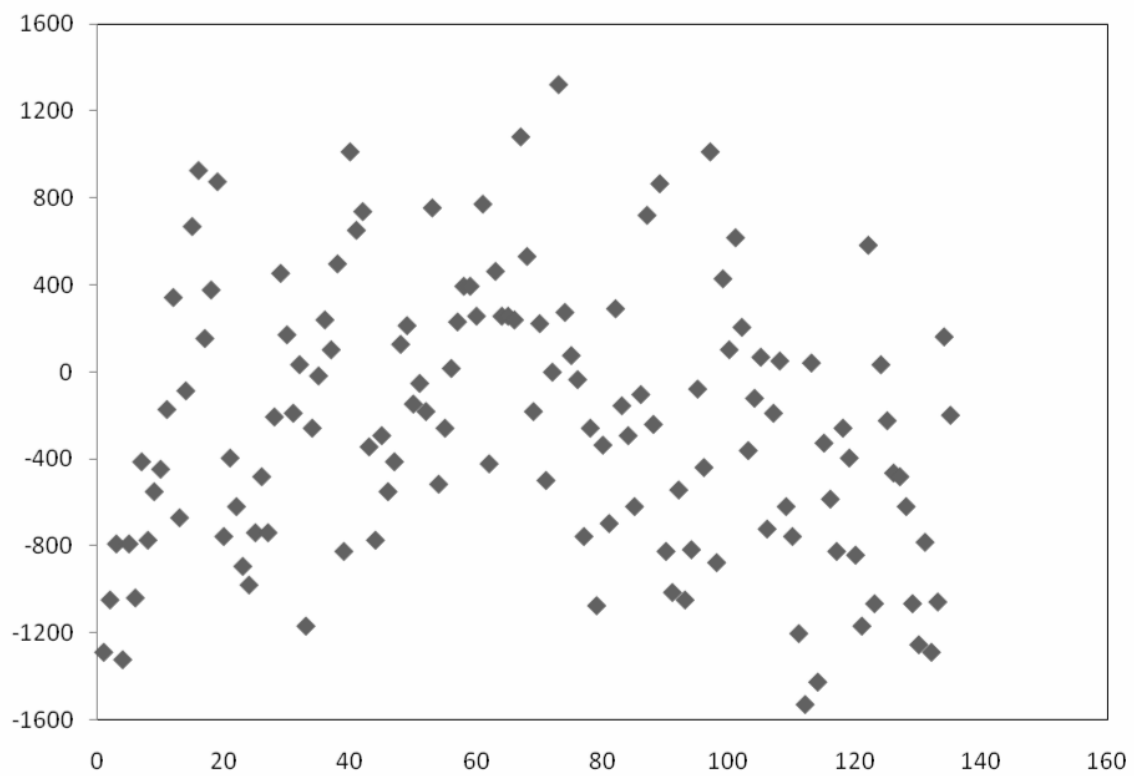
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 7 (170.79 – 468 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 8 (0 – 297.20 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16 (0 – 180 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 17 (92.79 – 384 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 18 (0 – 291.21 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 (0 – 360 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 31 (0 – 351.21 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 32 (152.79 – 504 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 41 (0 – 231.21 km)
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 42 (92.79 – 324 km)

6.2.6 การตรวจสอบการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง

ขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน

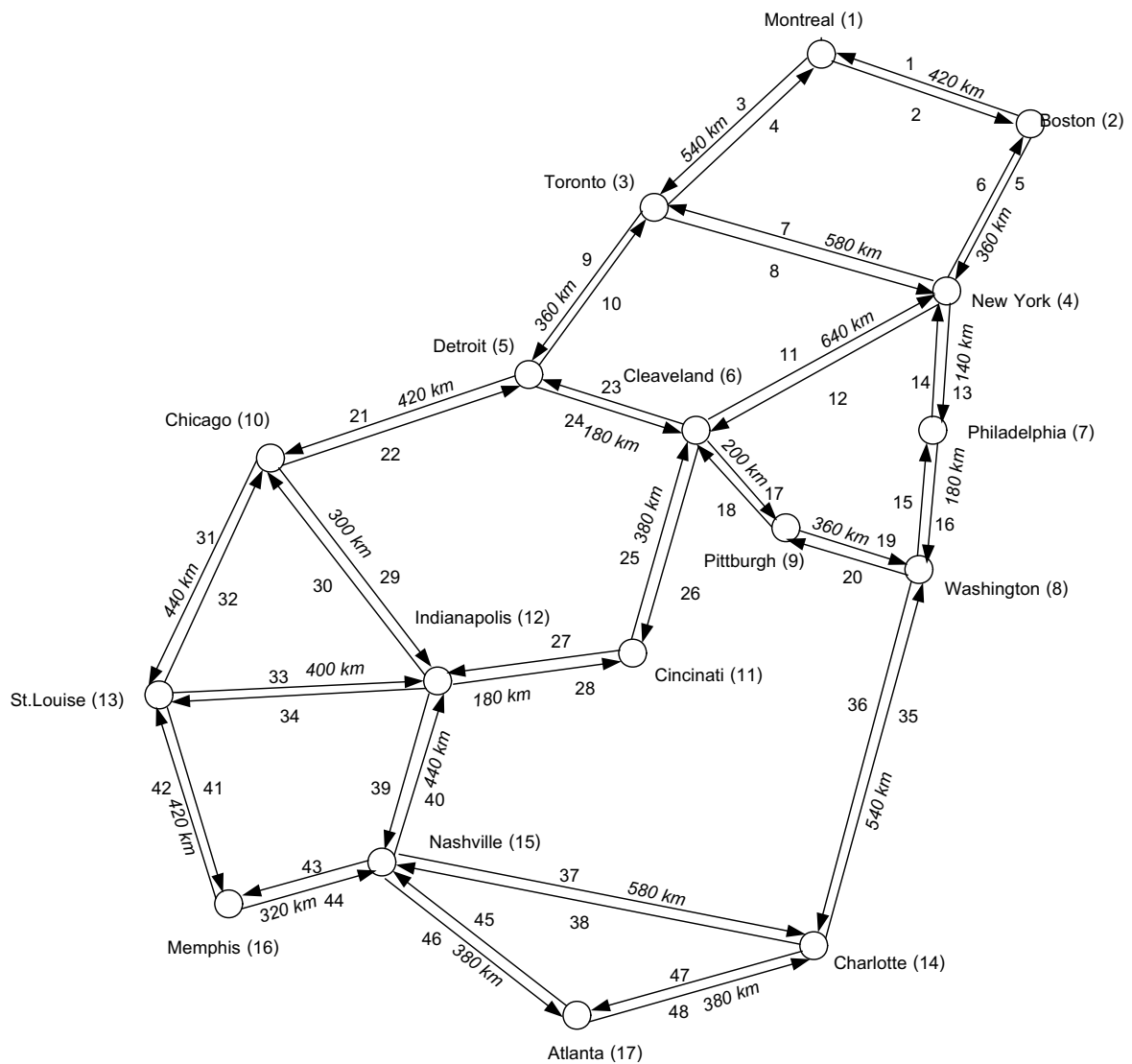
รูปที่ 6.5 เป็นการตรวจสอบดิสเพอร์ชันสะสมหลังจากวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง คำนวณหาดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิก พบว่าที่ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางมีค่าไม่เกินขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน ดังนั้นที่ภาคีสามารถตรวจจับสัญญาณได้ไม่ผิดพลาด

ขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน



รูปที่ 6.5 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกกราฟฟิกในโครงข่าย ERNet

6.3 ตัวอย่างการคำนวณบนโครงข่าย NARNet (North-American Reference Network)



รูปที่ 6.6 โครงข่าย NARNet

6.3.1 คำนวณหากราฟฟิกของโนดต่างๆ โดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางแบบสั้นที่สุด (shortest path) ระหว่างคูโนดใดๆ ซึ่งจะได้ผลดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ทราฟฟิกและระยะทางทั้งหมดของโครงข่าย NARNet

ก) โหนด 1-4

โหนด 1	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมต่อ (km)	โหนด 2	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมต่อ (km)	โหนด 3	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมต่อ (km)	โหนด 4	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมต่อ (km)
2	420	2	1	420	1	1	540	4	1	780	6,1
3	540	3	3	940	5,7	2	940	8,6	2	360	6
4	780	2,5	4	360	5	4	580	8	3	580	7
5	900	3,9	5	1180	5,12,23	5	360	9	5	820	12,23
6	1080	3,9,24	6	1000	5,12	6	540	9,24	6	640	12
7	920	2,5,13	7	500	5,13	7	720	8,13	7	140	13
8	1100	2,5,13,16	8	680	5,13,16	8	900	8,13,16	8	320	13,16
9	1280	3,9,24,17	9	1040	5,13,16,20	9	740	9,24,17	9	680	13,16,20
10	1320	3,9,21	10	1600	5,12,23,21	10	780	9,21	10	1240	12,23,21
11	1460	3,9,24,26	11	1380	5,12,26	11	920	9,24,26	11	1020	12,26
12	1620	3,9,21,29	12	1560	5,12,26,27	12	1080	9,21,29	12	1200	12,26,27
13	1760	3,9,21,31	13	1960	5,12,26,27,34	13	1220	9,21,31	13	1600	12,26,27,34
14	1640	2,5,13,16,36	14	1220	5,13,16,36	14	1440	8,13,16,36	14	860	13,16,36
15	2060	3,9,21,29,39	15	1800	5,13,16,36,38	15	1520	9,21,29,39	15	1440	13,16,36,38
16	2180	3,9,21,31,41	16	2120	5,13,16,36,38,43	16	1640	9,21,31,41	16	1760	13,16,36,38,43
17	2020	2,5,13,16,36,47	17	1600	5,13,16,36,47	17	1820	8,13,16,36,47	17	1240	13,16,36,47

ข) โหนด 5-8

โหนด 5	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมต่อ (km)	โหนด 6	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมต่อ (km)	โหนด 7	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมต่อ (km)	โหนด 8	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมต่อ (km)
1	900	10,4	1	1080	23,10,4	1	920	14,6,1	1	1100	15,14,6,1
2	1180	24,11,6	2	1000	11,6	2	500	14,6	2	680	15,14,6
3	360	10	3	540	23,10	3	720	14,7	3	900	15,14,7
4	820	24,11	4	640	11	4	140	14	4	320	15,14
6	180	24	5	180	23	5	920	16,20,18,23	5	740	20,18,23
7	920	24,17,19,15	7	740	17,19,15	6	740	16,20,18	6	560	20,18
8	740	24,17,19	8	560	17,19	8	180	16	7	180	15
9	380	24,17	9	200	17	9	540	16,20	9	360	20
10	420	21	10	600	23,21	10	1340	16,20,18,23,21	10	1160	20,18,23,21
11	560	24,26	11	380	26	11	1120	16,20,18,26	11	940	20,18,26
12	720	21,29	12	560	26,27	12	1300	16,20,18,26,27	12	1120	20,18,26,27
13	860	21,31	13	960	26,27,34	13	1700	16,20,18,26,27,34	13	1520	20,18,26,27,34
14	1280	24,17,19,36	14	1100	17,19,36	14	720	16,36	14	540	36
15	1160	21,29,39	15	1000	26,27,39	15	1300	16,36,38	15	1120	36,38

16	1280	21,31,41	16	1320	26,27,39,43	16	1620	16,36,38,43	16	1440	36,38,43
17	1540	21,29,39,46	17	1380	26,27,39,46	17	1100	16,36,47	17	920	36,47

ค) โหนด 9-12

โหนด 9	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	โหนด 10	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	โหนด 11	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	โหนด 12	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)
1	1280	18,23,10,4	1	1320	22,10,4	1	1460	25,23,10,4	1	1620	30,22,10,4
2	1040	19,15,14,6	2	1600	22,24,11,6	2	1380	25,11,6	2	1560	28,25,11,6
3	740	18,23,10	3	780	22,10	3	920	25,23,10	3	1080	30,22,10
4	680	19,15,14	4	1240	22,24,11	4	1020	25,11	4	1200	28,25,11
5	380	18,23	5	420	22	5	560	25,23	5	720	30,22
6	200	18	6	600	22,24	6	380	25	6	560	28,25
7	540	19,15	7	1340	22,24,17,19,15	7	1120	25,17,19,15	7	1300	28,25,17,19,15
8	360	19	8	1160	22,24,17,19	8	940	25,17,19	8	1120	28,25,17,19
10	800	18,23,21	9	800	22,24,17	9	580	25,17	9	760	28,25,17
11	580	18,26	11	480	29,28	10	480	27,30	10	300	30
12	760	18,26,27	12	300	29	12	180	27	11	180	28
13	1160	18,26,27,34	13	440	31	13	580	27,34	13	400	34
14	900	19,36	14	1320	29,39,37	14	1200	27,39,37	14	1020	39,37
15	1200	18,26,27,39	15	740	29,39	15	620	27,39	15	440	39
16	1520	18,26,27,39,43	16	860	31,41	16	940	27,39,43	16	760	39,43
17	1280	19,36,47	17	1120	29,39,46	17	1000	27,39,46	17	820	39,46

ง) โหนด 13-16

โหนด 13	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	โหนด 14	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	โหนด 15	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)	โหนด 16	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)
1	1760	32,22,10,4	1	1640	35,15,14,6,1	1	2060	40,30,22,10,4	1	2180	42,32,22,10,4
2	1960	33,28,25,11,6	2	1220	35,15,14,6	2	1800	37,35,15,14,6	2	2120	44,37,35,15,14,6
3	1220	32,22,10	3	1440	35,15,14,7	3	1520	40,30,22,10	3	1640	42,32,22,10
4	1600	33,28,25,11	4	860	35,15,14	4	1440	37,35,15,14	4	1760	44,37,35,15,14
5	860	32,22	5	1280	35,20,18,23	5	1160	40,30,22	5	1280	42,32,22
6	960	33,28,25	6	1100	35,20,18	6	1000	40,28,25	6	1320	44,40,28,25
7	1700	33,28,25,17,19,15	7	720	35,15	7	1300	37,35,15	7	1620	44,37,35,15
8	1520	33,28,25,17,19	8	540	35	8	1120	37,35	8	1440	44,37,35
9	1160	33,28,25,17	9	900	35,20	9	1200	40,28,25,17	9	1520	44,40,28,25,17
10	440	32	10	1320	38,40,30	10	740	40,30	10	860	42,32
11	580	33,28	11	1200	38,40,28	11	620	40,28	11	940	44,40,28
12	400	33	12	1020	38,40	12	440	40	12	760	44,40
14	1320	41,44,37	13	1320	38,43,42	13	740	43,42	13	420	42

15	740	41,44	15	580	38	14	580	37	14	900	44,37
16	420	41	16	900	38,43	16	320	43	15	320	44
17	1120	41,44,46	17	380	47	17	380	46	17	700	44,46

จ) โหนด 17

โหนด 17	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง (km)
1	2020	48,35,15,14,6,1
2	1600	48,35,15,14,6
3	1820	48,35,15,14,7
4	1240	48,35,15,14
5	1540	45,40,30,22
6	1380	45,40,28,25
7	1100	48,35,15
8	920	48,35
9	1280	48,35,20
10	1120	45,40,30
11	1000	45,40,28
12	820	45,40
13	1120	45,43,42
14	380	48
15	380	45
16	700	45,43

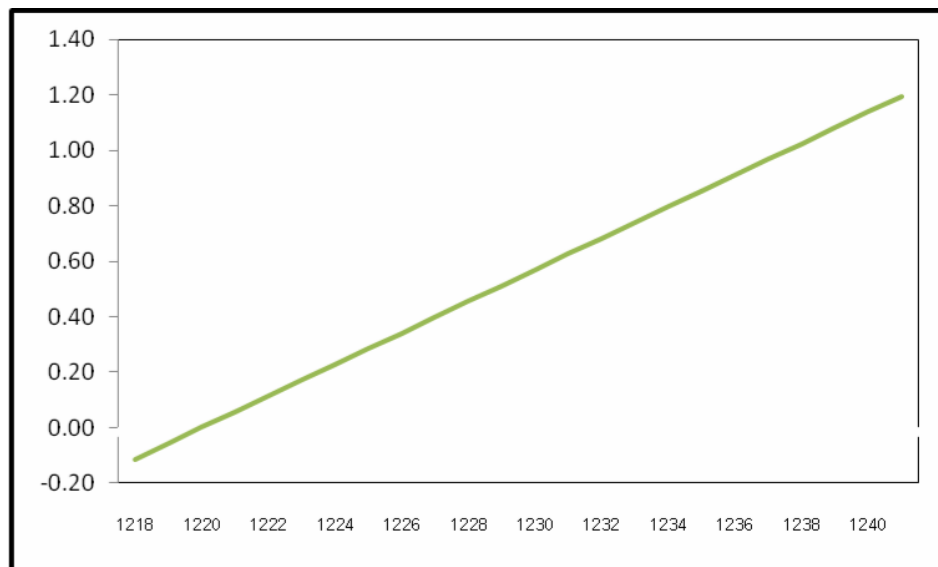
6.3.2 หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวคลื่นกับพารามิเตอร์ R

ตารางที่ 6.6 พารามิเตอร์ R ของโครงข่าย NARNet

โหนดต้นทาง-โหนดปลายทาง	ทราฟฟิก [km]	X_1[km]	R	โหนดต้นทาง-โหนดปลายทาง	ทราฟฟิก [km]	X_1[km]	R
5-17	1540	420	0.38	13-2	540	400	-0.14
6-1	1080	180	0.39	14-1	420	540	-0.36
6-2	1000	640	-0.15	14-10	1380	580	0.12
6-14	1100	200	0.38	15-1	540	440	-0.19
6-17	1380	380	0.34	15-2	1800	580	6.81

7-1	420	140	0.08	16-1	2180	420	-0.03
7-13	1760	180	0.77	16-2	2120	320	-0.15
7-16	2180	180	1	17-1	2020	380	0.08
8-13	1960	360	0.68	17-5	1540	380	-0.32
8-16	2120	540	0.57	17-16	1540	380	0.43

จากตารางที่ 6.6 พบว่าที่ทราบพิกจากโนด 7 ไปโนด 16 ให้ค่าพารามิเตอร์ R ที่มากที่สุด ดังนั้นเราจึงใช้ทราบพิกนี้ในการคำนวณหาช่วงความยาวคลื่นที่ทำให้พารามิเตอร์ R มีค่าระหว่าง 0.1 – 1 เมื่อนำมาพล็อตกราฟได้ผลดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ R กับความยาวคลื่น

ที่ $R = 1$ จะได้ความยาวคลื่น 1237.5 nm ซึ่งจะมีค่าดิสเพอร์ชันคือ $16.5 + 0.05 * (1237.5 - 1550) = 0.875$ ps/nm/km

ที่ $R = 0.1$ จะได้ความยาวคลื่น 1220.2 nm ซึ่งจะมีค่าดิสเพอร์ชันคือ $16.5 + 0.05 * (1220.2 - 1550) = 0.01$ ps/nm

6.3.3 คำนวณหาช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิก ได้ผลดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 ช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในแต่ละทราฟฟิก

(จ) โหนด 1 – 4

โหนด 1	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 2	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R
2	420	-704.39	1124.39	1	420	-704.39	1124.39
3	540	-644.39	1184.39	3	940	-444.39	1384.39
4	780	-524.39	1304.39	4	360	-734.39	1094.39
5	900	-464.39	1364.39	5	1180	-324.39	1504.39
6	1080	-374.39	1454.39	6	1000	-414.39	1414.39
7	920	-454.39	1374.39	7	500	-664.39	1164.39
8	1100	-364.39	1464.39	8	680	-574.39	1254.39
9	1280	-274.39	1554.39	9	1040	-394.39	1434.39
10	1320	-254.39	1574.39	10	1600	-114.39	1714.39
11	1460	-184.39	1644.39	11	1380	-224.39	1604.39
12	1620	-104.39	1724.39	12	1560	-134.39	1694.39
13	1760	-34.39	1794.39	13	1960	65.71	1894.39
14	1640	-94.39	1734.39	14	1220	-304.39	1524.39
15	2060	115.71	1944.39	15	1800	-14.39	1814.39
16	2180	175.71	2004.39	16	2120	145.71	1974.39
17	2020	95.71	1924.39	17	1600	-114.39	1714.39
โหนด 3	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 4	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R
1	540	-644.39	1184.39	1	780	-524.39	1304.39
2	940	-444.39	1384.39	2	360	-	1094.39

						734.39	
4	580	-624.39	1204.39	3	580	- 624.39	1204.39
5	360	-734.39	1094.39	5	820	- 504.39	1324.39
6	540	-644.39	1184.39	6	640	- 594.39	1234.39
7	720	-554.39	1274.39	7	140	- 844.39	984.39
8	900	-464.39	1364.39	8	320	- 754.39	1074.39
9	740	-544.39	1284.39	9	680	- 574.39	1254.39
10	780	-524.39	1304.39	10	1240	- 294.39	1534.39
11	920	-454.39	1374.39	11	1020	- 404.39	1424.39
12	1080	-374.39	1454.39	12	1200	- 314.39	1514.39
13	1220	-304.39	1524.39	13	1600	- 114.39	1714.39
14	1440	-194.39	1634.39	14	860	- 484.39	1344.39
15	1520	-154.39	1674.39	15	1440	- 194.39	1634.39
16	1640	-94.39	1734.39	16	1760	-34.39	1794.39
17	1820	-4.39	1824.39	17	1240	- 294.39	1534.39

๗) โหนด 5 – 8

โหนด 5	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 6	ระยะทาง (km)	OPC_L	OPC_R
1	900	- 464.39	1364.39	1	1080	- 374.39	1454.39
2	1180	- 324.39	1504.39	2	1000	- 414.39	1414.39
3	360	- 734.39	1094.39	3	540	- 644.39	1184.39
4	820	- 504.39	1324.39	4	640	- 594.39	1234.39
6	180	- 824.39	1004.39	5	180	- 824.39	1004.39
7	920	- 454.39	1374.39	7	740	- 544.39	1284.39
8	740	- 544.39	1284.39	8	560	- 634.39	1194.39
9	380	- 724.39	1104.39	9	200	- 814.39	1014.39
10	420	- 704.39	1124.39	10	600	- 614.39	1214.39
11	560	- 634.39	1194.39	11	380	- 724.39	1104.39
12	720	- 554.39	1274.39	12	560	- 634.39	1194.39
13	860	- 484.39	1344.39	13	960	- 434.39	1394.39
14	1280	- 274.39	1554.39	14	1100	- 364.39	1464.39
15	1160	- 334.39	1494.39	15	1000	- 414.39	1414.39
16	1280	- 274.39	1554.39	16	1320	- 254.39	1574.39
17	1540	- 144.39	1684.39	17	1380	- 224.39	1604.39
โหนด 7	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 8	ระยะทาง (km)	OPC_L	OPC_R

1	920	- 454.39	1374.39	1	1100	- 364.39	1464.39
2	500	- 664.39	1164.39	2	680	- 574.39	1254.39
3	720	- 554.39	1274.39	3	900	- 464.39	1364.39
4	140	- 844.39	984.39	4	320	- 754.39	1074.39
5	920	- 454.39	1374.39	5	740	- 544.39	1284.39
6	740	- 544.39	1284.39	6	560	- 634.39	1194.39
8	180	- 824.39	1004.39	7	180	- 824.39	1004.39
9	540	- 644.39	1184.39	9	360	- 734.39	1094.39
10	1340	- 244.39	1584.39	10	1160	- 334.39	1494.39
11	1120	- 354.39	1474.39	11	940	- 444.39	1384.39
12	1300	- 264.39	1564.39	12	1120	- 354.39	1474.39
13	1700	-64.39	1764.39	13	1520	- 154.39	1674.39
14	720	- 554.39	1274.39	14	540	- 644.39	1184.39
15	1300	- 264.39	1564.39	15	1120	- 354.39	1474.39
16	1620	- 104.39	1724.39	16	1440	- 194.39	1634.39
17	1100	- 364.39	1464.39	17	920	- 454.39	1374.39

ค) โหนด 9 – 12

โหนด 9	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 10	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R
1	1280	- 274.39	1554.39	1	1320	- 254.39	1574.39
2	1040	- 394.39	1434.39	2	1600	- 114.39	1714.39
3	740	- 544.39	1284.39	3	780	- 524.39	1304.39
4	680	- 574.39	1254.39	4	1240	- 294.39	1534.39
5	380	- 724.39	1104.39	5	420	- 704.39	1124.39
6	200	- 814.39	1014.39	6	600	- 614.39	1214.39
7	540	- 644.39	1184.39	7	1340	- 244.39	1584.39
8	360	- 734.39	1094.39	8	1160	- 334.39	1494.39
10	800	- 514.39	1314.39	9	800	- 514.39	1314.39
11	580	- 624.39	1204.39	11	480	- 674.39	1154.39
12	760	- 534.39	1294.39	12	300	- 764.39	1064.39
13	1160	- 334.39	1494.39	13	440	- 694.39	1134.39
14	900	- 464.39	1364.39	14	1320	- 254.39	1574.39
15	1200	- 314.39	1514.39	15	740	- 544.39	1284.39
16	1520	- 154.39	1674.39	16	860	- 484.39	1344.39
17	1280	- 274.39	1554.39	17	1120	- 354.39	1474.39
โหนด 11	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 12	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R
1	1460	- 184.39	1644.39	1	1620	- 104.39	1724.39

2	1380	- 224.39	1604.39	2	1560	- 134.39	1694.39
3	920	- 454.39	1374.39	3	1080	- 374.39	1454.39
4	1020	- 404.39	1424.39	4	1200	- 314.39	1514.39
5	560	- 634.39	1194.39	5	720	- 554.39	1274.39
6	380	- 724.39	1104.39	6	560	- 634.39	1194.39
7	1120	- 354.39	1474.39	7	1300	- 264.39	1564.39
8	940	- 444.39	1384.39	8	1120	- 354.39	1474.39
9	580	- 624.39	1204.39	9	760	- 534.39	1294.39
10	480	- 674.39	1154.39	10	300	- 764.39	1064.39
12	180	- 824.39	1004.39	11	180	- 824.39	1004.39
13	580	- 624.39	1204.39	13	400	- 714.39	1114.39
14	1200	- 314.39	1514.39	14	1020	- 404.39	1424.39
15	620	- 604.39	1224.39	15	440	- 694.39	1134.39
16	940	- 444.39	1384.39	16	760	- 534.39	1294.39
17	1000	- 414.39	1414.39	17	820	- 504.39	1324.39

ง) โหนด 13 – 16

โหนด 13	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 14	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R
1	1760	-34.39	1794.39	1	1640	-94.39	1734.39
2	1960	65.71	1894.39	2	1220	- 304.39	1524.39
3	1220	- 304.39	1524.39	3	1440	- 194.39	1634.39
4	1600	- 114.39	1714.39	4	860	- 484.39	1344.39
5	860	- 484.39	1344.39	5	1280	- 274.39	1554.39
6	960	- 434.39	1394.39	6	1100	- 364.39	1464.39
7	1700	-64.39	1764.39	7	720	- 554.39	1274.39
8	1520	- 154.39	1674.39	8	540	- 644.39	1184.39
9	1160	- 334.39	1494.39	9	900	- 464.39	1364.39
10	440	- 694.39	1134.39	10	1320	- 254.39	1574.39
11	580	- 624.39	1204.39	11	1200	- 314.39	1514.39
12	400	- 714.39	1114.39	12	1020	- 404.39	1424.39
14	1320	- 254.39	1574.39	13	1320	- 254.39	1574.39
15	740	- 544.39	1284.39	15	580	- 624.39	1204.39
16	420	- 704.39	1124.39	16	900	- 464.39	1364.39
17	1120	- 354.39	1474.39	17	380	- 724.39	1104.39
โหนด 15	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R	โหนด 16	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R
1	2060	115.71	1944.39	1	2180	175.71	2004.39
2	1800	-14.39	1814.39	2	2120	145.71	1974.39
3	1520	-	1674.39	3	1640	-94.39	1734.39

		154.39					
4	1440	- 194.39	1634.39	4	1760	-34.39	1794.39
5	1160	- 334.39	1494.39	5	1280	- 274.39	1554.39
6	1000	- 414.39	1414.39	6	1320	- 254.39	1574.39
7	1300	- 264.39	1564.39	7	1620	- 104.39	1724.39
8	1120	- 354.39	1474.39	8	1440	- 194.39	1634.39
9	1200	- 314.39	1514.39	9	1520	- 154.39	1674.39
10	740	- 544.39	1284.39	10	860	- 484.39	1344.39
11	620	- 604.39	1224.39	11	940	- 444.39	1384.39
12	440	- 694.39	1134.39	12	760	- 534.39	1294.39
13	740	- 544.39	1284.39	13	420	- 704.39	1124.39
14	580	- 624.39	1204.39	14	900	- 464.39	1364.39
16	320	- 754.39	1074.39	15	320	- 754.39	1074.39
17	380	- 724.39	1104.39	17	700	- 564.39	1264.39

ด) โหนด 17

โหนด 17	ระยะทาง(km)	OPC_L	OPC_R
1	2020	95.71	1924.39
2	1600	- 114.39	1714.39
3	1820	-4.39	1824.39
4	1240	- 294.39	1534.39
5	1540	- 144.39	1684.39
6	1380	- 224.39	1604.39
7	1100	- 364.39	1464.39
8	920	- 454.39	1374.39
9	1280	- 274.39	1554.39
10	1120	- 354.39	1474.39
11	1000	- 414.39	1414.39
12	820	- 504.39	1324.39
13	1120	- 354.39	1474.39
14	380	- 724.39	1104.39
15	380	- 724.39	1104.39
16	700	- 564.39	1264.39

ค่าที่อยู่ในตารางในช่อง OPC_L และ OPC_R ที่เป็นสีเข้มเช่น ทราฟฟิกจากโนด 15 ไปยังโนด 13 นั้น ค่าในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงจะอยู่ในช่วงนอกความยาวทราฟฟิก หมายถึงช่วงในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้นวางตรงไหนก็ได้ตลอดทราฟฟิก หรือในอีกความหมายก็คือ ทราฟฟิคนั้นไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสง เพราะ ระยะทางที่มากที่สุดที่จะต้องใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงแล้วดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางไม่เกิน 1600 ps/nm ก็คือ

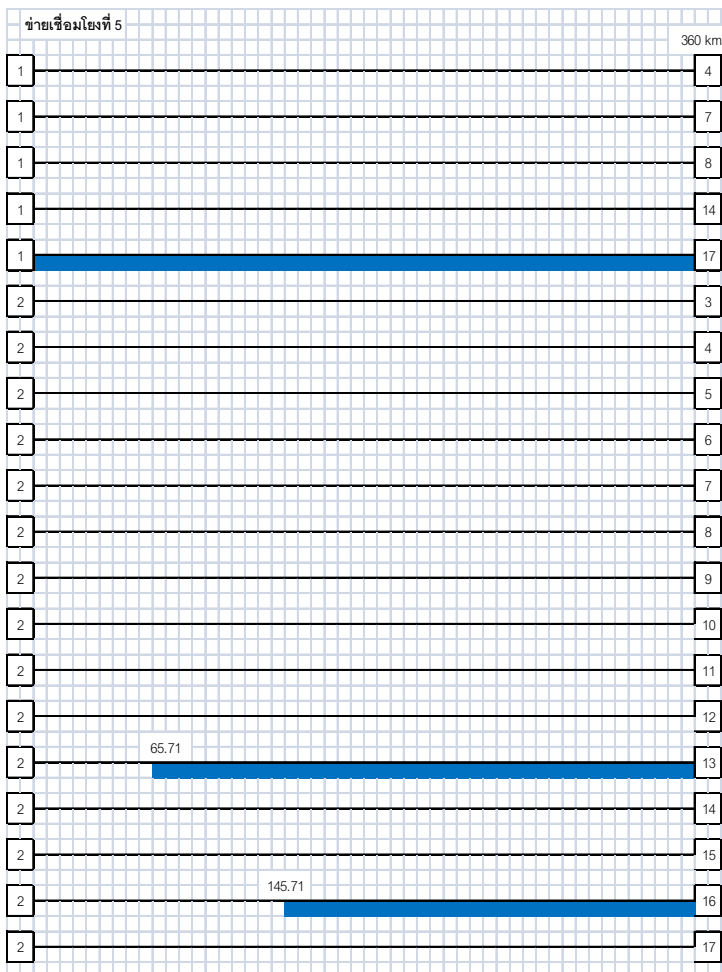
$$\frac{1600}{0.875} = 1828.57 \text{ km}$$

ดังนั้นถ้าทราฟฟิกไหนมีระยะทางไม่เกิน 1828.57 km ก็แสดงว่าไม่จำเป็นต้องมีเครื่องส่งยุคเฟส

6.3.4 คำนวนหาช่วงซ้อนทับของการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแต่ละข่ายเชื่อมโยง

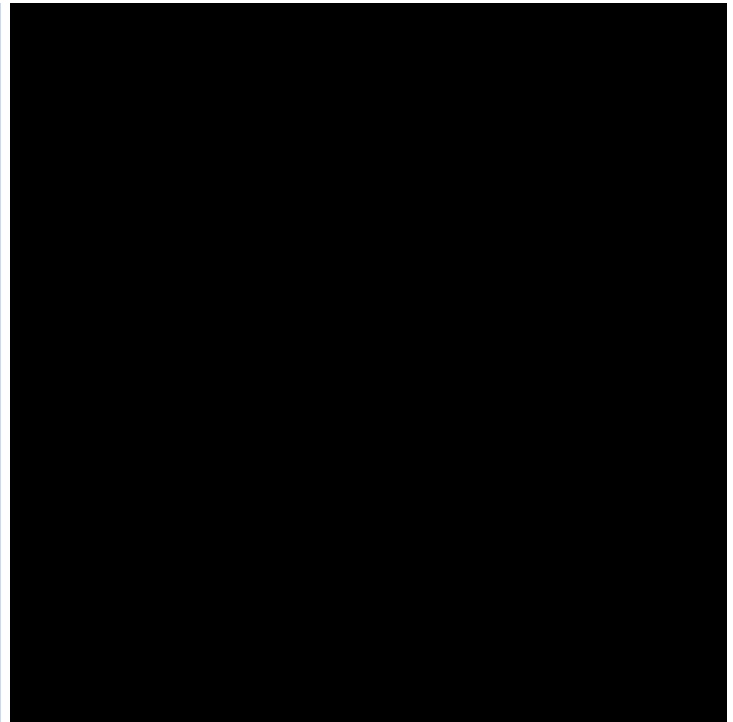
รูปที่ 6.8 ทราฟฟิกและตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสงของโครงข่าย NARNet (บางส่วน)

ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 5-6



ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 9-10

ข่ายเชื่อมโยงที่ 9		360 km
1		5
1		6
1		9
1		10
1		11
1		12
1		13
1		15
1		16
3		5
3		6
3		9
3		10
3		11
3		12
3		13
3		15
3		16



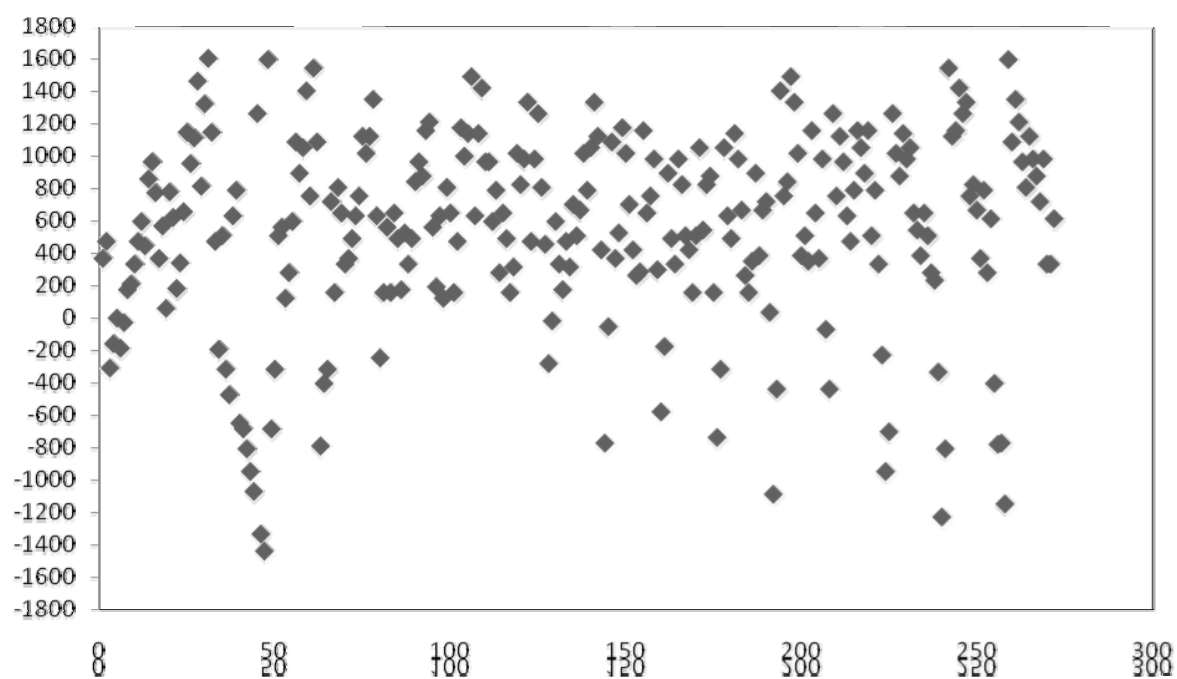
6.3.5 ระบุตำแหน่งการวางเครื่องส่งยูคเฟสแสงบนโครงข่าย

พิจารณาหาตำแหน่งของเครื่องส่งยูคเฟสแสงได้โดยใช้หลักการเดิมจากตัวอย่างของโครงข่าย NARNet โดยข่ายเชื่อมโยงแรกที่ต้องพิจารณาคือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 และ 6 หลังจากกระทำการหาช่วงในการวางเครื่องส่งยูคเฟสแสงทั้งหมดแล้ว จะใช้เครื่องส่งยูคเฟสแสงทั้งหมด 4 ตัวบน 4 โครงข่าย และได้ตำแหน่งหรือช่วงการวางเครื่องส่งยูคเฟสแสงดังนี้

- ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 -ข่ายเชื่อมโยงที่ 6) 5145.71 - 360 km(
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 6) 60 – 214.39 km(
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 9)0-360 km(
- ข่ายเชื่อมโยงที่ 10) 0-360 km(

6.3.6 การตรวจสอบการวางเครื่องสังยุคเฟสแสง

รูปที่ 6.9 เป็นการตรวจสอบดิสเพอร์ชันหลังจากวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ซึ่งพบว่ามีค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางมีค่าไม่เกินขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน



รูปที่ 6.9 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกในโครงข่าย NARNet

6.4 ความเป็นไปได้ในการใช้ดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดต้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงการลดขนาดโครงข่าย

วิธีนี้เราจะพิจารณาที่ความยาวคลื่นในช่วง 1528.51 – 1560.61 nm เมื่อพิจารณาจากสมการหาค่าดิสเพอร์ชันในแต่ ละช่องสัญญาณแล้วพบว่า ที่ความยาวคลื่น 1560.61 nm จะได้ค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดเท่ากับ

$$D_\lambda = 16.5 + 0.05 * (1560.61 - 1550) = 17.03 \text{ ps/km/nm}$$

จากนั้นเราจะกำหนดให้ทุกทราฟฟิกส่งความยาวคลื่นนี้ทุกโนด เพราะว่าค่าดิสเพอร์ชันจากความยาวคลื่นอื่น ๆ นั้นมี คำน้อยกว่า ดังนั้นถ้าค่าดิสเพอร์ชันที่มากที่สุดสามารถวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงและผ่านค่าขีดจำกัดดิสเพอร์ชันได้ ความยาว คลื่นค่าอื่นๆ ก็สามารถผ่านได้เช่นกัน

จากสมการ

$$R = \frac{D_\lambda * (LP - 2X1) + D_i}{1600}$$

โดยที่ D_i คือค่าชดเชยดิสเพอร์ชันที่โนดเริ่มต้น

ถ้าไม่ทำการลดขนาดต้องกำหนดให้พารามิเตอร์ R มีค่าเท่ากับ 1

$$1 = \frac{17.03 * (1464 - (2 * 168)) + D_i}{1600}$$

จะได้ $D_i = -17,609.84 \text{ ps/km/nm}$ ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมมีค่ามากเกินไป เป็นวิธีที่ไม่เหมาะสม

6.5 ความเป็นไปได้ในการใช้ดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทางเพื่อหลีกเลี่ยงการลดขนาดโครงข่าย

วิธีนี้เราใช้ dispersion compensation unit (DCU) ซึ่งเป็นเครื่องที่สามารถชดเชยดิสเพอร์ชันได้ ทำให้ที่ดิสเพอร์ชันสะสมที่

ปลายทางสามารถมีค่ามากกว่าค่าขีดจำกัดดิสเพอร์ชันสะสมจากสมการ

$$R = \frac{D_\lambda * (LP - 2X1)}{y}$$

โดย y คือค่าชดเชยดิสเพอร์ชันที่ปลายทางโดยใช้ DCU

ถ้าไม่ทำการลดขนาดต้องกำหนดให้พารามิเตอร์ R มีค่าเท่ากับ 1 จะได้

ps/km/nm ซึ่งค่าดิสเพอร์ชันที่เราต้องชดเชยมีค่ามากเกินไปเช่นเดียวกับวิธีที่แล้ว เป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมเช่นกัน

บทที่ 7

บทสรุป

รายงานฉบับนี้ ได้รายงานผลการศึกษาวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็มแบบวงแหวนแบบแพร่และเลือกสัญญาณ และโครงข่ายดับเบิ้ลยูดีเอ็มแบบเมช โดยโครงข่ายแบบเมชนั้น ได้ยกตัวอย่างโครงข่ายมา 3 ตัวอย่าง รวมถึงได้รวมกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย และได้มีการกู้คืนสัญญาณแบบใช้วิธีร่วมกัน (shared path protection) ซึ่งโครงข่ายทุกรูปแบบทั้งหมดนั้น สามารถใช้วิธีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่ได้คิดค้นขึ้น วิธีการใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงนั้น เริ่มต้นจากการวิเคราะห์กราฟฟิกในระบบ รวมถึงตำแหน่งของเครื่องส่งยุคเฟสแสง ซึ่งถ้าโครงข่ายมีระยะทางไกล การวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงที่จุดกึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงจะเป็นวิธีที่ดีและไม่ยุ่งยาก แต่ในกรณีที่โครงข่ายมีระยะทางสั้นๆ ในจุดนี้ได้มีการนำเสนอวิธีที่สามารถบอกได้ว่าโครงข่ายชนิดไหนควรวางที่กลางข่ายเชื่อมโยง หรือโครงข่ายชนิดไหนใช้วิธีที่ลดจำนวนเครื่องส่งยุคเฟสแสงลงได้ โดยใช้พารามิเตอร์ R เป็นตัวกำหนด หลังจากนั้นก็วิเคราะห์ค่าดีสเพอร์ชันสะสมของกราฟฟิกในระบบว่าเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ 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 โดยใช้การกู้คืนสัญญาณแบบใช้วิธีร่วมกัน (shared path protection) ซึ่งได้ทำการทดลองในโครงข่าย NARNet โดยสรุปได้ว่าต้องใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงทั้งหมด 4 ตัว

นอกจากนี้ในระบบที่มีการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง สัญญาณที่ออกจากเครื่องส่งยุคเฟสแสง จะมีกำลังสัญญาณลดลงมากกว่าการจัดการดีสเพอร์ชันแบบอื่น จึงต้องมีการใช้เครื่องขยายสัญญาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเครื่องขยายสัญญาณนั้นนอกจากจะขยายสัญญาณข้อมูลแล้ว ยังขยายสัญญาณรบกวนในระบบอีกด้วย ทำให้ OSNR ของระบบลดลง ดังนั้นเราจึงทำการวิเคราะห์ค่า OSNR ในโครงข่าย โดยพิจารณาจากอัตราส่วน OSNR ระหว่างโครงข่ายที่วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงแล้ว กับโครงข่ายที่ยังไม่ได้วางเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายแบบแพร่และเลือกสัญญาณ จะมีค่า OSNR ลดลง 1.890 dB ส่วนโครงข่ายแบบเมช จะได้ผลดังนี้ OPEN อัตราส่วน OSNR ลดลง 5.863 dB ERNet อัตราส่วน OSNR ลดลง 7.467dB NARNet อัตราส่วน OSNR ลดลง 8.850 dB และกรณีมีการกู้คืนสัญญาณ อัตราส่วน OSNR จะลดลง 5.227 dB

ต่อไปได้พัฒนาระเบียบวิธีสำหรับการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสง โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ R และความยาวคลื่น โดยไม่ต้องลดขนาดของโครงข่าย และระบบสามารถส่งผ่านข้อมูลผ่านเส้นใยแสงได้โดยไม่เกินขีดจำกัดดีสเพอร์ชัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีแรกนั้นคือ สามารถหาช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในการส่งข้อมูลได้ โดยใช้ระเบียบวิธีเดียวกันสำหรับโครงข่ายอ้างอิง 2 ตัวอย่างคือ ERNetและNARNet ซึ่งสรุปได้ว่าอัลกอริทึมในการวางเครื่องส่งยุคเฟสแสงดังกล่าวนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้สำหรับโครงข่ายในการวางเส้นใยแสงทั่วไปได้ เมื่อได้ช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมแล้ว จะเห็นได้ว่าช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวไม่ใช่ช่วงความยาวคลื่นที่นิยมใช้กันในระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงในปัจจุบัน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ

เพื่อให้นำไปใช้ได้จริง ช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหาช่วงของค่าดิสเพอร์ชันเริ่มต้นของแต่ละช่องสัญญาณได้ ซึ่งก็จะเป็นการเลือกใช้ชนิดของเส้นใยแสงที่ให้ค่าดิสเพอร์ชันเริ่มต้นแก่ช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการนำมาใช้สื่อสารสัญญาณได้

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 (Febuary 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., Sahasrabuddhe, 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 Wiley & 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] ณัฏฐา ขึ้นประเสริฐสุข. การศึกษาความเป็นไปได้การใช้งานเครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายดับเบิลยูดีเอ็มแบบวงแหวน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, 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] ลัญฉกร วุฒิสถิตกุลกิจ. 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] Antoniadou, 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. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, 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-I/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, Nasset, 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]