

อัลกอริทึมสำหรับใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงสำหรับโครงข่ายเส้นใยแสง wavelength-routed ที่ใช้
อัตราการรับส่งข้อมูล 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณ

นายตฤยศ แดงประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

AN ALGORITHM FOR USING OPTICAL PHASE CONJUGATOR ON 40 GBPS-PER-
CHANNEL WAVELENGTH-ROUTED NETWORKS

Mr. Danuyot Dangpradit

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อัลกอริทึมสำหรับใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงสำหรับโครงข่าย
เส้นใยแสง wavelength-routed ที่ใช้อัตราการรับส่งข้อมูล
40 Gbps ต่อช่องสัญญาณ

โดย

นายดนุศ แดงประดิษฐ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ)

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

5370241021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : OPTICAL COMMUNICATION / WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING /
OPTICAL PHASE CONJUGATOR / WAVELENGTH-ROUTED-NETWORK / DISPERSION /

DANUYOT DANGPRADIT: AN ALGORITHM FOR USING OPTICAL PHASE
CONJUGATOR ON 40 GBPS-PER-CHANNEL WAVELENGTH ROUTED
NETWORKS. ADVISOR: ASST. PROF. PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 183 pp.

This thesis studies the mitigation of dispersion problem in optical fiber communication by using optical phase conjugators (OPCs). The work proposes an algorithm for using OPCs on 40 Gbps-per-channel wavelength-routed-networks. With this algorithm, the accumulated dispersion at destination of any traffics are guaranteed to be well below the dispersion limit which is 800 ps/nm for 40 Gbps-per-channel based DQPSK modulation format. Our algorithm can be applied for two types of OPC, which are the wavelength-shift-free OPC, and the wavelength-shift OPC. In comparison between these two types of OPC, since the dispersion values of the signal and their conjugated replicas are different, the results obtained from the algorithm for the two types of OPC are different. We validate our algorithm on 3 sample networks, which are ERNet, NARNet, and OPEN.

The first step of the proposed algorithm for the employment of OPCs is to find all possible traffics in a network by assuming the shortest path. Secondly, the relation among wavelength versus dispersion value and R parameter, which is a parameter used for determining the wavelength range, as well as the types of fiber that can be used for the network without scaling down the size of the network. Finally, the last procedure is to verify that the accumulated dispersion of all possible traffics by using our algorithm for the OPC placement is well within the dispersion limit. According to the results and the verifications on the 3 sample networks, our algorithms, for both OPC types, is proved to be capable for to overcoming the dispersion successfully, and can be applied to any wavelength-routed-networks.

Department: ELECTRICAL ENGINEERING Student's Signature

Field of Study: ELECTRICAL ENGINEERING Advisor's Signature

Academic Year: ...2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้เนื่องจากความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง ซึ่งเป็นผู้มีส่วนช่วยในการให้คำแนะนำในด้าน ความรู้พื้นฐานที่เป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัย รวมไปถึงหลักการวิเคราะห์และคำ วิจารณ์ในเชิงสร้างสรรค์ ซึ่งถือเป็นแรงผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดี นอกจากนี้ยังขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว ประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. วัฒนกร วุฒิสีทธิกุลกิจ และผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร. ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ ที่ทุกท่านให้เกียรติเป็นคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์และให้ความกรุณาในการแก้ไขส่วนบกพร่องต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ และน้องชาย ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่มีความ ห่วงใย เป็นกำลังใจ และสนับสนุนด้านการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ตลอดจน เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกท่าน ทั้งจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่ง ประเทศไทย ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และสถานที่ใช้ทำ วิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยี โทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความกรุณา สนับสนุนทุนศิษย์ก้นกุฏิแก่ผู้วิจัย

สิ่งที่ได้รับจากทุกส่วนล้วนเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบ ผลสำเร็จ ซึ่งเป็นพระคุณอย่างหาตอบแทนมิได้ ผู้วิจัยขอคงไว้ซึ่งความรู้สึกซาบซึ้งและ ขอขอบคุณตลอดไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	7
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	8
1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน.....	8
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง	10
2.2 เทคโนโลยี WDM	11
2.3 โครงข่ายเส้นใยแสงแบบ wavelength-routed-network แบบเมช	12
2.4 กลไกป้องกันความเสียหายลักษณะ path protection สำหรับโครงข่าย wavelength-routed แบบเมช	13
2.5 ปัญหาหลักที่เกิดในเส้นใยแสง	15
2.5.1 การลดทอนกำลังของสัญญาณ (fiber attenuation)	15
2.5.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (fiber dispersion)	16
2.5.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง	19

บทที่	หน้า
2.5.3.1 self-phase modulation (SPM)	20
2.5.3.2 Cross-Phase Modulation (XPM)	21
2.5.3.3 Four Wave Mixing (FWM)	22
2.6 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีจัดการดิสเพอร์ชัน	23
2.7 เครื่องส่งยุคเฟสแลง	26
2.7.1 การกำเนิดสัญญาณคอนจูเกต (Conjugated signal)	28
2.7.2 ชนิดของ OPC สำหรับการสื่อสาร 1 ช่องสัญญาณ	28
2.7.2.1 OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสาร 1 ช่องสัญญาณ	28
2.7.2.2 OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสาร 1 ช่องสัญญาณ	30
2.7.3 ชนิดของ OPC สำหรับการสื่อสารหลายช่องสัญญาณ (WDM)	30
2.7.3.1 OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารหลายช่องสัญญาณ (WDM)	31
2.7.3.1.1 OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะเลื่อนแบนด์วิดท์	31
2.7.3.1.2 OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะไม่เลื่อนแบนด์วิดท์	32
2.7.3.2 OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารหลายช่องสัญญาณ	32
3 ระเบียบวิธีการวาง OPC บนโครงข่ายเส้นใยแสงทั่วไป	34
3.1 การคำนวณตำแหน่งในการวาง OPC บนข่ายเชื่อมโยง	34
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ R ความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชัน	39
3.2.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ R ของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น	43
3.2.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ R ของ OPC ชนิดความยาวคลื่น	43
3.3 ระเบียบวิธีการวาง OPC บนโครงข่ายเส้นใยแสงทั่วไป	44
4 การวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย wavelength-routed แบบเมช	49
4.1 ตัวอย่างที่ 1 โครงข่าย European Reference Network (ERNET)	50

บทที่	หน้า
4.1.1 การคำนวณระยะทางระหว่างทุกคู่โหนดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ในโครงข่าย ERNet.....	51
4.1.2 การหาช่วงดิสเพอร์ชันที่จะใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น.....	53
4.1.3 การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารทุกๆโหนดในโครงข่าย ERNet.....	55
4.1.4 การกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย ERNet โดยใช้วิธีซันทาบ.....	60
4.1.5 การทดสอบค่าดิสเพอร์ชันสะสมสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นของการสื่อสารระหว่างทุกๆโหนดในโครงข่าย ERNet.....	72
4.2 ตัวอย่างที่ 2 โครงข่าย North-American Reference Network (NARNet).....	74
4.3 ตัวอย่างที่ 3 โครงข่าย Optical Pan European Network (OPEN).....	77
5 การวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ในโครงข่าย wavelength-routed แบบเมช.....	80
5.2 ตัวอย่างที่ 1 โครงข่าย European Reference Network (ERNet).....	81
5.1.1 การคำนวณระยะทางระหว่างทุกคู่โหนดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ในโครงข่าย ERNet.....	82
5.1.2 การหาช่วงดิสเพอร์ชันที่จะใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์.....	82
5.1.3 การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์สำหรับการสื่อสารทุกๆโหนดในโครงข่าย ERNet.....	84
5.1.4 การกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์สำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย ERNet โดยใช้วิธีซันทาบ...	89

บทที่	หน้า
5.1.5 การทดสอบค่าดีสเพอร์ชันสะสมสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ของการสื่อสารระหว่างทุกๆ โหนดในโครงข่าย ERNet	97
5.2 ตัวอย่างที่ 2 โครงข่าย North-American Reference Network (NARNet) สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์	99
5.3 ตัวอย่างที่ 3 โครงข่าย Optical Pan European Network (OPEN) สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์	101
5.4 การวิเคราะห์การออกแบบ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์และแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์	102
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	106
6.1 บทสรุป	106
6.2 ข้อเสนอแนะ	109
รายการอ้างอิง	110
ภาคผนวก	114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	183

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1	ระยะทางและสายเชื่อมโยงสำหรับการสื่อสารของทุกคู่โหนดในโครงข่าย ERNet	. 51
ตารางที่ 4.2	การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสาร ทุกๆคู่โหนดในโครงข่าย ERNet.....	56
ตารางที่ 4.3	สรุปช่วงการวางสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย ERNet....	72
ตารางที่ 4.4	สรุปช่วงการวางสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย NARNet	75
ตารางที่ 4.5	สรุปช่วงการวางสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย OPEN	78
ตารางที่ 5.1	การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์ วิคท์สำหรับการสื่อสารทุกๆคู่โหนดในโครงข่าย ERNet	85
ตารางที่ 5.2	สรุปช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิคท์ใน โครงข่าย ERNet.....	97
ตารางที่ 5.3	สรุปช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิคท์ใน โครงข่าย NARNet.....	99
ตารางที่ 5.4	สรุปช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิคท์ใน โครงข่ายOPEN	101
ตารางที่ 6.1	ผลลัพธ์ของระเบียบวิธีในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบน 3 โครงข่ายตัวอย่าง.....	107
ตารางที่ 6.2	ผลลัพธ์ของระเบียบวิธีในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อน แบนด์วิคท์บน 3 โครงข่ายตัวอย่าง.....	108

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 เทคโนโลยี WDM.....	3
รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง.....	10
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบภายในเทคโนโลยี WDM	11
รูปที่ 2.3 โครงข่ายเส้นใยแสงแบบ wavelength-routed.....	12
รูปที่ 2.4 โครงข่ายลักษณะเมฆประกอบไปด้วยเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง	13
รูปที่ 2.5 การสื่อสารระหว่างโหนด A ไปโหนด D	14
รูปที่ 2.6 กลไก path protection เมื่อข่ายเชื่อมโยง B-C เสียหาย.....	14
รูปที่ 2.7 อัตราการลดทอนของกำลังสัญญาณในยุคต่างๆ	16
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มกับการกระจายของความเร็วกลุ่มในแต่ละ ความยาวคลื่น	17
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและดิสเพอร์ชันจากท่อนำคลื่น	18
รูปที่ 2.10 การเกิด inter-symbol interference.....	19
รูปที่ 2.11 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงทาง (ก) ความถี่ (ข) สเปกตรัม สัญญาณ.....	21
รูปที่ 2.12 ผลของ XPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง	22
รูปที่ 2.13 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง	23
รูปที่ 2.14 เทคนิคพื้นฐานในการจัดการดิสเพอร์ชัน	24
รูปที่ 2.15 ระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ.....	25
รูปที่ 2.16 ภาพแสดงกระบวนการสังยุคเฟสแสง.....	26
รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังสัญญาณตามระยะทางในระบบการสื่อสารผ่าน เส้นใยแสง	27
รูปที่ 2.18 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น ในการสื่อสาร 1 ช่องสัญญาณ	29
รูปที่ 2.19 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น	30
รูปที่ 2.20 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะ เลื่อนแบนด์วิดท์	31
รูปที่ 2.21 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะ ไม่เลื่อนแบนด์วิดท์	32

รูปที่ 2.22	คุณสมบัติการไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารหลายช่องสัญญาณ.....	33
รูปที่ 3.1	หลักการทำงานของ OPC โดยวางไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของข่ายเชื่อมโยง.....	34
รูปที่ 3.2	การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าบวก.....	35
รูปที่ 3.3	การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบ	36
รูปที่ 3.4	การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าบวก.....	38
รูปที่ 3.5	การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบ	39
รูปที่ 3.6	หลักการซ้อนทับของช่วงการวาง OPC ในแต่ละข่ายเชื่อมโยง.....	40
รูปที่ 3.7	ดิสเพอร์ชันสะสมเกินขีดจำกัดที่ปลายทางเนื่องจากการวาง OPC ใกล้เคียงเกินไป	41
รูปที่ 3.8	ตัวอย่างของกราฟฟิกที่เกิดกรณีไม่ซ้อนทับกันของช่วงการวาง OPC	41
รูปที่ 3.9	การลดระยะทางของข่ายเชื่อมโยงในกราฟฟิกลงเพื่อให้เกิดการซ้อนทับของช่วงการวาง OPC	42
รูปที่ 3.10	ผังงานแสดงระเบียบวิธีของ Dijkstra Algorithm.....	45
รูปที่ 3.11	ผังงานการพิจารณาช่วงการวาง OPC ในของข่ายเชื่อมโยงด้วยวิธีการซ้อนทับ	46
รูปที่ 3.12	ผังงานการกำหนดข่ายเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการวาง OPC ของทั้งโครงข่าย	47
รูปที่ 3.13	ผังงานการทดสอบค่าดิสเพอร์ชันสะสมในการวาง OPC สำหรับการสื่อสารทุกๆคู่โหนด	48
รูปที่ 4.1	โครงข่าย European Reference Network (ERNet).....	50
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R, ดิสเพอร์ชันและความยาวคลื่นสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย ERNet	54
รูปที่ 4.3	ช่วงการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับทุกข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย ERNet.....	70
รูปที่ 4.4	ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกกราฟฟิกสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย ERNet	73

รูปที่ 4.5	โครงข่าย North-American Reference Network (NARNet)	74
รูปที่ 4.6	ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น ในโครงข่าย NARNet	76
รูปที่ 4.7	โครงข่าย Optical Pan European Network (OPEN)	77
รูปที่ 4.8	ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น ในโครงข่าย OPEN	78
รูปที่ 5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R, ดิสเพอร์ชันขาเข้า/ขาออกและความยาวคลื่น สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ในโครงข่าย ERNet.....	83
รูปที่ 5.2	ช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์สำหรับ ทุกข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย ERNet	95
รูปที่ 5.3	ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น แบบเลื่อนแบนด์วิดท์ในโครงข่าย ERNet	98
รูปที่ 5.4	ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น แบบเลื่อนแบนด์วิดท์ในโครงข่าย NARNet.....	100
รูปที่ 5.5	ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น แบบเลื่อนแบนด์วิดท์ในโครงข่าย OPEN	102
รูปที่ 5.6	การสร้างสัญญาณคอนจูเกตเทียบกับค่าดิสเพอร์ชันของ OPC ชนิดเลื่อน ความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์	103
รูปที่ 5.7	การสร้างสัญญาณคอนจูเกตเทียบกับค่าดิสเพอร์ชันของ OPC ชนิดเลื่อน ความยาวคลื่นแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การติดต่อสื่อสารเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทำให้เทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากในอดีตที่มนุษย์จะติดต่อสื่อสารกันได้โดยการพูดคุยกันต่อหน้าเท่านั้น จนกระทั่งปัจจุบันมนุษย์สามารถสื่อสารกันได้แม้ว่าจะอยู่กันคนละฝั่งโลกก็ตาม

รูปแบบการสื่อสารนั้นสามารถจำแนกได้สองประเภทคือแบบใช้สายและแบบไร้สาย ในอดีตรูปแบบการใช้สายนั้นจะใช้การส่งสัญญาณโดยผ่านสายทองแดงพันเกลียวคู่ (twisted pair) หรือสายเคเบิลแกนร่วม (coaxial cable) การส่งสัญญาณหรือระบบดังกล่าวนี้ ปริมาณแบนด์วิดท์ที่มีอยู่จะไม่เพียงพอต่อปริมาณการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของประชากรและความเจริญเติบโตของเศรษฐกิจอย่างก้าวกระโดดควบคู่ไปกับความก้าวหน้าทางวิทยาการ เทคโนโลยีต่าง ๆ ทำให้มนุษย์มีความต้องการในการสื่อสารที่เพิ่มขึ้น รวดเร็วมากขึ้น ส่งผลให้ความต้องการแบนด์วิดท์และคุณภาพของสัญญาณสูงขึ้น ทำให้มีการพัฒนารูปแบบการสื่อสารขึ้นใหม่เรียกว่า การสื่อสารผ่านเส้นใยแสง (optical fiber communication) รูปแบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง (optical fiber) นี้ สามารถตอบสนองทั้งในแง่ของขนาดแบนด์วิดท์ที่มหาศาล สามารถส่งข้อมูลในอัตราเร็วข้อมูลที่สูงขึ้นในระยะทางไกลยิ่งได้ สำหรับการใช้เส้นใยแสงเป็นตัวกลางสำหรับส่งข้อมูลนั้นมีข้อดีและคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ [1] อาทิเช่น

1. เนื่องจากเส้นใยแสงมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากในการสื่อสารข้อมูลจึงสามารถใช้แบนด์วิดท์เหล่านี้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่ามากที่สุด
2. เส้นใยแสงมีอัตราการลดทอนของสัญญาณทางแสงต่ำเมื่อเทียบกับตัวกลางสำหรับสื่อสารแบบอื่นทำให้ส่งได้ในระยะทางไกลขึ้น ใช้อุปกรณ์ทวนและขยายสัญญาณในจำนวนที่น้อยลงกว่าเดิม
3. ด้วยขนาดเล็กและน้ำหนักที่เบามากของเส้นใยแสง จึงทำให้สะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ
4. สามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนและทนทานต่อการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าด้วยคุณสมบัติอันเป็นฉนวนของเส้นใยแสง ทั้งยังทนต่ออุณหภูมิและความชื้นได้ด้วย
5. มีความปลอดภัยในการสื่อสารสูง เพราะข้อมูลในการสื่อสารทั้งหมดอยู่ในโดเมนทางแสงทำให้ถูกโจรกรรมได้ยาก

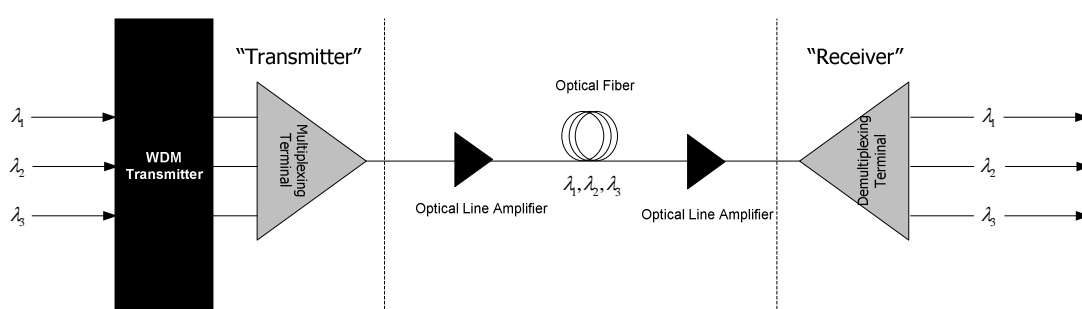
จากข้อดีของคุณลักษณะเฉพาะของเส้นใยแสงข้างต้น ส่งผลให้มีการวิจัย คิดค้นพัฒนาเกี่ยวกับการสื่อสารทางแสงและเส้นใยแสงอย่างแพร่หลาย สำหรับการพัฒนากิจการสื่อสารทางแสงนั้นสามารถแบ่งได้ 3 ยุค [2] ดังนี้

1. ยุคที่ 1 (first window) ช่วงต้น ค.ศ. 1970 เป็นการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 850 nm โดยในช่วงยุคแรกนี้ เส้นใยแสงที่ใช้จะยังเป็นเส้นใยแสงแบบหลายโหมด (multi-mode fiber)
2. ยุคที่ 2 (second window) ช่วง ค.ศ. 1980 การใช้งานเส้นใยแสงจะเปลี่ยนจากช่วงความยาวคลื่น 850 nm มาเป็น 1310 nm ซึ่งมีค่าอัตราการลดทอนของกำลังสัญญาณต่ำกว่ายุคแรก นอกจากนั้นในยุคที่สองนี้ ได้มีการพัฒนาเส้นใยแสงขึ้นเป็นเส้นใยแสงแบบโหมดเดียว (single-mode fiber) ซึ่งดีกว่าแบบหลายโหมดคือสามารถส่งได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น โดยความผิดพลาดน้อยลง เพราะในเส้นใยแสงแบบหลายโหมดนั้น แต่ละโหมดจะเดินทางถึงปลายทางในเวลาที่ไม่พร้อมกัน ทำให้เกิดการขยายออกทางแกนเวลา และภาครับจะรับข้อมูลผิดพลาดได้ง่าย
3. ยุคที่ 3 (third window) ช่วง ค.ศ. 1990 การใช้งานเส้นใยแสงจะเปลี่ยนจากช่วงความยาวคลื่น 1310 nm มาเป็น 1550 nm ซึ่งมีค่าอัตราการลดทอนของกำลังสัญญาณต่ำที่สุดเท่าที่เคยค้นพบมา ทำให้สามารถส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงในระยะทางที่ไกลขึ้นมากได้ อย่างไรก็ตามความยาวคลื่นในย่านนี้ จะเกิดผลกระทบจากปัญหาดีสเพอร์ชันที่ค่อนข้างจะรุนแรง ส่งผลให้พัลส์ของสัญญาณเกิดการบานออก ทำให้ฝั่งรับไม่สามารถรับข้อมูลที่ถูกต้องได้

จะเห็นได้ว่าการสื่อสารทางแสงโดยใช้เส้นใยแสงนั้น ได้รับความนิยมมาเป็นเวลาหลายทศวรรษแล้ว นอกจากการพัฒนาในส่วนของเส้นใยแสงแล้วนั้น ยังมีการพัฒนาในด้านเทคโนโลยีในการส่งสัญญาณด้วยเช่นกัน ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวก็คือ เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (wavelength division multiplexing: WDM) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ประโยชน์จากแบนด์วิดท์อันมหาศาลของเส้นใยแสงให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีนี้ก็คือ การมัลติเพล็กซ์สัญญาณในเชิงความยาวคลื่น โดยในแต่ละช่องสัญญาณจะนำข้อมูลบนความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน แล้วรวมกันส่งไปในเส้นใยแสงเพียงเส้นเดียวดังรูปที่ 1.1 ในแต่ละช่องสัญญาณนั้นอัตราการส่งข้อมูลไม่จำเป็นต้องสูงมาก เพราะการใช้เทคโนโลยี WDM นี้ จะอาศัยจำนวนช่องสัญญาณที่มากขึ้นเพื่อรองรับความจุข้อมูลที่สูงขึ้นมากแทน ซึ่งคือข้อดีที่เหนือกว่าเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์เชิงเวลา (time division multiplexing: TDM) ที่ต้องออกแบบให้แต่ละช่องสัญญาณมีอัตราส่งข้อมูลที่สูง ทำให้เกิดความ

ซับซ้อนในการออกแบบอุปกรณ์และการจัดการรูปสัญญาณที่จะรองรับเทคโนโลยีดังกล่าว อีกหนึ่งข้อดีของการใช้เทคโนโลยี WDM ก็คือ แต่ละความยาวคลื่นที่วิ่งบนแต่ละจำนวนช่องสัญญาณที่มากขึ้นของ WDM นั้น จะเป็นอิสระต่อกันหมายความว่าแต่ละช่องสัญญาณหรือแต่ละความยาวคลื่นนั้นสามารถนำพาข้อมูลที่แตกต่างกันได้โดยอิสระ ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลประเภทเสียง ข้อความ วิดีโอ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติ wavelength routing กล่าวคือเทคโนโลยี WDM สามารถที่จะเลือกและจัดสรรเส้นทางในแต่ละความยาวคลื่นซึ่งสื่อข้อมูลแต่ละประเภทได้ ทำให้ระบบที่ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวมีความยืดหยุ่นมากขึ้น



รูปที่ 1.1 เทคโนโลยี WDM

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าข้อดีของเทคโนโลยี WDM จะมีมากมายเพียงใด แต่ในการสื่อสารทางแสง เมื่อใช้เทคโนโลยี WDM ในการสื่อสารสัญญาณข้อมูลในอัตราที่สูงมากและระยะทางไกลยิ่ง (long-haul high speed transmission system) แล้วนั้น ก็ยังพบปัญหาหลักอยู่ 3 ปัญหา คือ การลดทอนของกำลังสัญญาณ (attenuation) [3], [4], [5] และความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ซึ่งเกิดจากปัญหาการกระจาย (dispersion) [6] รวมถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง (fiber nonlinearity) [7]

การลดทอนของกำลังสัญญาณนั้น เกิดจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของเส้นใยแสง เมื่อส่งสัญญาณแสงไปจนถึงระยะทางหนึ่งๆแล้ว กำลังสัญญาณแสงจะลดลงเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ทำให้ที่ภาครับไม่สามารถตรวจรับได้ ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้ด้วยการวางอุปกรณ์ชนิด active แบบขยายกำลังสัญญาณ (optical amplifier) [8], [9], [10] วางไว้เป็นระยะตามโครงข่ายของการสื่อสารข้อมูลจึงจะแก้ไขปัญหาเหล่านี้ได้

ส่วนความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นจากปัญหาการกระจายนั้นส่งผลให้พัลส์ของสัญญาณที่ส่งไปเกิดการบานออก ทำให้ที่ภาครับไม่สามารถตรวจรับข้อมูลที่ถูกต้องได้ สาเหตุเกิดจากในแต่ละความยาวคลื่นนั้นมีความเร็วกลุ่ม (group velocity) [11] ไม่เท่ากัน ทำให้ใช้ระยะเวลาที่จะถึง

ปลายทางเป็นเวลาที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นปัญหาที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนอีกอย่างหนึ่งก็คือ ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง ซึ่งส่วนมากจะพิจารณาจาก Kerr effect

[12] เป็นปัญหาที่เกิดจากระดับกำลังสัญญาณมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปของ ดัชนีหักเหของเส้นใยแสง ซึ่งทั้งสองปัญหาเหล่านี้จะกล่าวถึงรายละเอียดอีกครั้งในภาคทฤษฎี

เนื่องจากปัจจุบัน ความต้องการใช้แบนด์วิดท์ที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ สืบเนื่องจากความต้องการบริการความเร็วสูงในด้านต่างๆในสถานการณ์ปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็น วิดีโอความละเอียดสูง (HD video) อินเทอร์เน็ตความเร็วสูง (high speed internet) การศึกษาทางไกลแบบ E-Learning รวมไปถึงการใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีทางการแพทย์ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าหากในอนาคตมีความต้องการในลักษณะนี้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผู้ผลิตและผู้ให้บริการที่เกี่ยวข้องกับด้านโทรคมนาคม จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะเผชิญกับปัญหาดังกล่าว สิ่งเหล่านี้จึงเป็นที่มาของการพัฒนาเทคโนโลยี อัตราการส่งข้อมูลระดับ 40Gbps และ 100Gbps โดยเฉพาะการใช้งานเส้นใยแสงเป็นลักษณะ backbone network หรือที่เรียกกันว่า optical transport network (OTN) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องศึกษาเทคโนโลยี 40G-OTN [13], [14] ทั้งในด้านการออกแบบระบบ การบริหารต้นทุนทั้งในด้านอุปกรณ์และด้านระบบส่งให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด และสุดท้ายคือ คุณภาพในการให้บริการแก่ผู้ใช้งานได้อย่างดีที่สุด

สำหรับอัตราการส่งข้อมูลที่ถูกพัฒนาจนถึงระดับ 40 Gbps จะมีปัจจัยบางส่วนที่แตกต่างไปจากอัตราการส่งข้อมูลแบบเดิม เช่น วิธีการมอดูเลตสัญญาณ จากเดิมใช้การมอดูเลตสัญญาณแบบ OOK เปลี่ยนมาใช้ในการมอดูเลตแบบ differential quadrature phase-shift keying (DQPSK) เพื่อรองรับความเร็วที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถส่งข้อมูลต่อแบนด์วิดท์ได้มากกว่าเดิมเป็นจำนวน 2 เท่า แต่จากอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นนี้จะมีผลต่อปัญหาของดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงจาก Kerr effect เช่นเดียวกัน กล่าวคือในการส่งข้อมูลตามอัตราเดิมในระดับ 10 Gbps นั้นจะมีขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน (dispersion limit) ที่ระบบสามารถรับได้อยู่ที่ 1600 ps/nm ในขณะที่อัตราข้อมูล 40 Gbps นั้นขีดจำกัดดิสเพอร์ชันของระบบจะมีค่าลดลงเป็น 800 ps/nm เนื่องจากอัตราข้อมูล 40 Gbps ที่ใช้การมอดูเลตแบบ DQPSK จะส่งข้อมูล 2 bit/symbol ทำให้มี line rate เป็น 20 Gbps ทำให้แบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นจากอัตราข้อมูล 10 Gbps เดิมเป็น 2 เท่า ส่งผลให้ขีดจำกัดดิสเพอร์ชันของระบบลดลง 2 เท่าเช่นเดียวกันขีดจำกัดดิสเพอร์ชันที่ลดลงนี้หมายความว่าระบบที่มีอัตราส่งข้อมูลเร็วมากขึ้นจะยอมรับความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ยากยิ่งขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วนผลกระทบที่เกิดจาก Kerr effect นั้น เมื่ออัตราส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นถึงระดับ 40 Gbps จะส่งผลให้กำลังของสัญญาณเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมและ Kerr effect เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับระดับกำลังของสัญญาณ ดังนั้นผลกระทบจากปรากฏการณ์ดังกล่าว จะทำให้เกิด

FWM และ XPM ที่รุนแรงยิ่งขึ้นสำหรับอัตราข้อมูลระดับ 40 Gbps [15], [16], [17] เพราะฉะนั้นในการออกแบบการจัดการความผิดเพี้ยนทั้งจากดิสเพอร์ชันและ Kerr effect โดยใช้ OPC สำหรับการสื่อสารยุค 40 Gbps จึงมีความซับซ้อนมากขึ้นจากเดิมและเป็นปัญหาที่มีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณา

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว สำหรับการส่งข้อมูลในอัตราที่สูงมากและระยะทางไกลยิ่งนั้น ปัญหาที่ต้องพิจารณาลหลักก็คือผลของดิสเพอร์ชันและ Kerr effect วิธีแก้ไขปัญหาดิสเพอร์ชันที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน คือ เทคนิคการใช้เส้นใยแสงชดเชยดิสเพอร์ชัน (dispersion compensated fiber: DCF) [18] ซึ่งสามารถรองรับอัตราข้อมูล 100Gbps สำหรับการส่งระยะทางไกลยิ่งข้ามมหาสมุทร นอกจากนั้นได้มีงานวิจัยและการทดลองจำนวนมากที่พยายามจะหาวิธีอื่น ๆ ในการแก้ไขปัญหาดิสเพอร์ชัน อาทิเช่น เทคนิคการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ coherent optical orthogonal frequency-division multiplexing (CO-OFDM) ซึ่งแก้ปัญหาดิสเพอร์ชันด้วยการชดเชยและประมวลผลแบบดิจิทัล [19] โดยระบบมีความเร็ว 107 Gbps ในการส่งสัญญาณระยะทาง 1,000 กิโลเมตร โดยวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองบนช่องสัญญาณเดี่ยวและ WDM จำนวน 8 ช่องสัญญาณ ส่วนในด้านปัญหาความผิดเพี้ยนจาก Kerr effect นั้น ก็ได้มีผู้พยายามที่จะแก้ปัญหานี้โดยใช้วิธีการเปลี่ยนวิธีการมอดูเลตสัญญาณจากเดิมใช้ on-off keying (OOK) มาเป็นแบบ differential phase-shift keying (DPSK) [20], [21] ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้จะทนทานต่อความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงได้มากกว่าการมอดูเลตแบบ OOK [22]

จากผลกระทบจากปัญหาดิสเพอร์ชันและ Kerr effect ในเส้นใยแสงนั้น ได้มีผู้พยายามคิดค้นเทคนิคที่จะจัดการปัญหาสองอย่างนี้ไปด้วยกัน โดยวิธีดังกล่าวนี้คือวิธีการสังยุคเฟสแสงโดยประยุกต์ใช้เครื่องสังยุคเฟสแสง (optical phase conjugator: OPC) ซึ่งได้มีการคิดค้นขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1979 [23] หลักการพื้นฐานของการสร้าง OPC ก็คือใช้ปรากฏการณ์ four wave mixing (FWM) ในเส้นใยแสงเพื่อสร้างสัญญาณคอนจูเกต (conjugation signal) [24], [25] ซึ่งต้องสอดคล้องกับสัญญาณปั๊ม (pump signal) โดยต้องอยู่ที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม วิธีการใช้งานของ OPC นั้นคือการวางไว้ที่กึ่งกลางของระบบ เมื่อสัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นในฝั่งครั้งแรกของระบบ และผ่าน OPC แล้วจะเกิดสัญญาณคอนจูเกตขึ้น เมื่อสัญญาณเดินทางในฝั่งครึ่งหลังของระบบแล้ว จะชดเชยความผิดเพี้ยนไปได้ทั้งในส่วนของดิสเพอร์ชันและ Kerr effect ปัจจุบันนั้น OPC ที่วิจัยอยู่จะสามารถจำแนกได้สองประเภท แบ่งตามลักษณะของสัญญาณคอนจูเกตคือ แบบเลื่อนความยาวคลื่น (wavelength-shift) [26], [27], [28] โดยแบบเลื่อนความยาวคลื่นนั้น สามารถแบ่งลักษณะย่อยได้อีก 2 ลักษณะ กล่าวคือ แบบเลื่อนความยาวคลื่นพร้อมทั้งเลื่อนแบนด์วิดท์ (wavelength-shift, bandwidth-shift) และแบบเลื่อนความยาวคลื่นโดยไม่เลื่อน

แบนด์วิดท์ (wavelength-shift, bandwidth-shift-free) ส่วน OPC อีกประเภทหนึ่งคือ แบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength-shift-free) [29], [30], [31] โดยในรายละเอียดของแต่ละประเภทนั้น จะอธิบายโดยละเอียดอีกครั้งในหัวข้อต่อไป

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับ OPC ในการส่งข้อมูลระหว่างจุดต่อจุดนั้น เริ่มต้นด้วยงานวิจัยของ [32] ได้นำเสนอโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอัตราเร็วข้อมูล 40 Gbps ได้ระยะทาง 2,000 กิโลเมตร โดยใช้งาน OPC ร่วมกับ dispersion shifted fiber (DSF) ซึ่งได้ผลว่าการออกแบบระบบโดยใช้ DCF ระยะ 20 กิโลเมตร วางไว้ก่อนช่วงการวาง OPC แล้วจึงตามด้วย DSF 2,000 กิโลเมตรนั้น จะทำให้ส่งข้อมูลได้ในระยะทางที่ไกลยิ่งขึ้น โดยแก้ปัญหาความผิดเพี้ยนได้ทั้งหมด ต่อมายังมีงานวิจัยเกี่ยวกับ OPC โดยวิธีจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นการส่งสัญญาณที่มีอัตราเร็วข้อมูล 21.4 Gbps ระยะทาง 800 กิโลเมตร ควบคู่กับระบบ differential quadrature phase-shift keying (DQPSK) [33] พบว่าให้ค่า Q factor ที่ดีขึ้น และการใช้งาน OPC โดยวิธีทดลองจริง อัตราเร็วข้อมูล 21.4 Gbps โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ DCF และ OPC ในการจัดการดิสเพอร์ชัน ระยะทาง 283.5 กิโลเมตร และ 3,402 กิโลเมตร ตามลำดับ พบว่าการใช้งาน OPC โดยวางไว้ ณ จุดกึ่งกลางของสายเชื่อมโยงนั้นดีกว่า DCF นอกจากนั้นได้มีการพัฒนาการประยุกต์ใช้ OPC บนระบบที่มีอัตราเร็วข้อมูลที่สูงยิ่งขึ้น [34] โดยมีอัตราเร็วข้อมูลสูงถึง 640 Gbps โดยใช้ช่องสัญญาณที่มีความเร็ว 40 Gbps จำนวน 16 ช่องสัญญาณ ส่งภายในระยะทาง 800 กิโลเมตร ซึ่งผลที่ได้คือสามารถชดเชยผลของดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงได้โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ชดเชยอื่นใดทั้งสิ้น และในงานวิจัยล่าสุดนั้น ซึ่งเป็นการใช้ OPC ในการจัดการความผิดเพี้ยนในการสื่อสารทางแสงซึ่งใช้การมัลติเพล็กซ์แบบ coherent optical orthogonal frequency division multiplexing (CO-OFDM) [35] พบว่ารูปแบบของการใช้งาน OPC ในการจัดการดิสเพอร์ชันที่ดีที่สุดคือ การวาง OPC ณ ตำแหน่งกึ่งกลางรวมกับการชดเชยด้วย DCF แบบวางก่อนและหลัง OPC ตามลำดับ

นอกเหนือจากงานวิจัยที่เกี่ยวกับ OPC สำหรับการส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุดแล้วนั้น ยังมีงานวิจัยที่ได้ทดลองบนโครงข่ายรูปแบบต่างๆ เช่น การประยุกต์ใช้ OPC โดยการคิดค้นระเบียบวิธีในการวาง OPC บนโครงข่าย DWDM แบบวงแหวน (single ring DWDM network) [36] แต่นำมาใช้ในทางปฏิบัติได้ยาก เพราะเป็นโครงข่ายลักษณะวงแหวนแบบเดียว การใช้งานบนโครงข่ายเส้นใยแสง WDM แบบแพร่และเลือกสัญญาณ (broadcast and select WDM network) [37] ซึ่งเป็นการหาระเบียบวิธีการวางตำแหน่งของ OPC ที่ไม่ใช่กึ่งกลางของระบบเพื่อไม่ให้ดิสเพอร์ชันสะสมเกินขีดจำกัดที่ปลายทาง นอกจากโครงข่ายสองรูปแบบข้างต้นแล้วนั้น ยังมีความพยายามที่จะประยุกต์ใช้ OPC แบบไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายเส้นใยแสงแบบเมช [38]

โดยเป็นระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงที่มีอัตรารับส่งข้อมูล 10 Gbps ต่อหนึ่งช่องสัญญาณ บนโครงข่ายเส้นใยแสงแบบเมชที่มีชื่อว่า European reference network (ERNET) พบว่าสามารถหาช่วงในการวาง OPC ที่นอกเหนือจากการวางในกึ่งกลางของทุกๆ ข่ายเชื่อมโยง ทำให้สามารถลดจำนวนการใช้งาน OPC ลงได้ แต่อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีดังกล่าวนี้ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญอยู่คือความจำเป็นที่ต้องลดขนาดโครงข่ายลง เนื่องจากในระเบียบวิธีจะกำหนดพารามิเตอร์ในการประเมินโครงข่ายคือพารามิเตอร์ R (R parameter) พารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะมีความแปรผันและเปลี่ยนแปลงไปตามค่าดิสเพอร์ชัน ค่าความยาวคลื่นที่เลือกใช้ในแต่ละโครงข่าย ทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้สำหรับโครงข่ายทั่วไป ซึ่งผลจากระเบียบวิธีข้างต้นพบว่า จะสามารถวาง OPC เพื่อขจัดผลความผิดเพี้ยนได้นั้น จำเป็นต้องลดโครงข่ายลงถึง 12 เท่า ซึ่งเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ นอกจากนี้เมื่อมองไปถึงอนาคตอันใกล้ พบว่าในส่วนของอัตราส่งข้อมูล 10 Gbps นั้นจะล้าสมัยไปในไม่ช้า เนื่องจากการสื่อสารผ่านเส้นใยแสงในยุคหน้านั้น จะมองกันไปถึงอัตราเร็วการส่งข้อมูลระดับ 40 Gbps และ 100 Gbps [39] เป็นหลัก ทำให้ระเบียบวิธีดังกล่าวนี้ค่อนข้างจะรองรับการใช้งานจริงได้ยาก

จากปัญหาและความสำคัญของปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ในส่วนระเบียบวิธีในการวาง OPC บนโครงข่ายแบบเมชดังกล่าวนี้ยังไม่เป็นสากลสำหรับทุกๆ โครงข่ายเพราะมีข้อจำกัดสำคัญคือมีความจำเป็นที่ต้องลดขนาดโครงข่ายซึ่งเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ อีกทั้งระเบียบวิธีเดิมยังรองรับการใช้งานอัตราการส่งข้อมูลเพียง 10 Gbps ดังนั้นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ การปรับปรุงและคิดค้นระเบียบวิธีการวาง OPC บนโครงข่ายเส้นใยแสง wavelength-routed-network แบบเมชโดยไม่ต้องลดขนาดโครงข่ายและรองรับอัตราการส่งข้อมูล 40 Gbps ซึ่งแบบจำลองของ OPC ที่จะใช้ในการวิจัยนั้นใช้ 2 ชนิด คือ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น และ OPC แบบเลื่อนความยาวคลื่นทั้งแบบเลื่อนแบนด์วิดท์และแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ อนึ่งการออกแบบระเบียบวิธีการใช้งาน OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น มีความซับซ้อนมากกว่าแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น เพราะต้องพิจารณาค่าดิสเพอร์ชันของแต่ละช่องสัญญาณทั้งก่อนเข้าและหลังออกจาก OPC จะมีค่าไม่เท่ากัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การนำเสนออัลกอริทึมสำหรับใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น รวมถึงชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์และไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ ในการชดเชยดิสเพอร์ชันสำหรับโครงข่ายแบบ wavelength-routed สำหรับอัตราการส่งข้อมูล 40 Gbps โดยไม่ลดขนาดโครงข่าย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ระเบียบวิธีในการวาง OPC ทั้ง 2 ชนิด จะทดลองโดยจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยคอมพิวเตอร์เท่านั้น ไม่ได้ทดลองบนโครงข่ายจริง
2. ระเบียบวิธีการวาง OPC ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถือว่าไม่คำนึงถึงผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงจาก Kerr effect
3. เส้นใยแสงที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือแบบ SMF ITU-T G.652 และ ITU-T G.655
4. โครงข่ายที่ใช้ศึกษาเป็นแบบ wavelength-routed-network ซึ่งมีการเชื่อมต่อทางกายภาพแบบเมช 3 ตัวอย่างคือ European reference network (ERNET), North American reference network (NARNET) และ Optical Pan-European Network (OPEN) โดยมีกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection

1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงและความผิดเพี้ยนของสัญญาณในตัวกลางเส้นใยแสงโดยเฉพาะผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงจาก Kerr effect
2. ศึกษาโครงข่ายทางแสงที่ส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยี WDM คุณสมบัติโครงข่าย wavelength-routed แบบเมช การจัดการผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันในบทความวิชาการต่างๆเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานในวิทยานิพนธ์
3. ศึกษาหลักการและทฤษฎีของ OPC วิธีการสร้างสัญญาณคอนจุกเกต ประเภทของ OPC วิวัฒนาการและการพัฒนา OPC ตามที่ผู้อื่นได้วิจัยและตีพิมพ์ลงในบทความวิชาการที่เป็นที่ยอมรับ
4. วิเคราะห์การสื่อสารผ่านเส้นใยแสงด้วยอัตราการส่งข้อมูล 40 Gbps พร้อมทั้งพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
5. จัดทำระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น บนโครงข่าย wavelength-routed-network ด้วยอัตราเร็ว 10,40 Gbps
6. จัดทำระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นทั้งแบบเลื่อนแบนด์วิดท์และแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ บนโครงข่าย wavelength-routed-network ด้วยอัตราเร็ว 40 Gbps
7. รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
8. นำผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีข้างต้นจัดทำเป็นเอกสารทางวิชาการเพื่อนำเสนอในการประชุมวิชาการนานาชาติ

9. จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

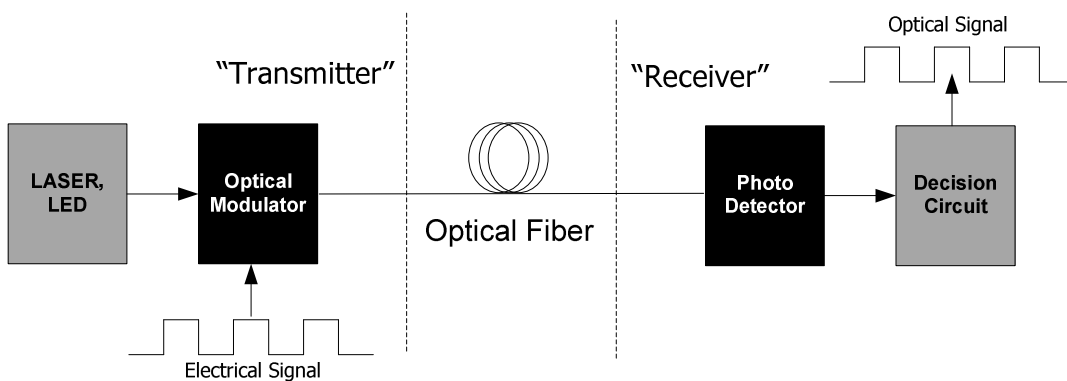
1. ระเบียบวิธีในการวาง OPC บนโครงข่าย wavelength routed network ที่สมบูรณ์ที่สุด
2. จัดทำเป็นเอกสารวิชาการพร้อมทั้งนำเสนอผลงานใน”การวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34 (EEON34)” ในหัวข้อ “อัลกอริทึมสำหรับการประยุกต์ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสงในโครงข่ายเส้นใยแสงแบบเมช”

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ขอบเขตสำคัญคือการหาระเบียบวิธีการวาง OPC ที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายเส้นใยแสงลักษณะเมช ในหัวข้อต่อไปนี้จะเป็นการอธิบายทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วยพื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง เทคโนโลยี WDM ปัญหาหลักที่เกิดในเส้นใยแสง ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีจัดการดิสเพอร์ชัน และเครื่องส่งยุคเฟสแสง

2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแสงโดยทั่วไปนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยองค์ประกอบหลัก 3 องค์ประกอบ [40] ดังแสดงให้เห็นรูปที่ 2.1 ดังนี้ เครื่องส่งสัญญาณแสง (optical transmitter) เส้นใยแสง (optical fiber) และเครื่องรับสัญญาณแสง (optical receiver)



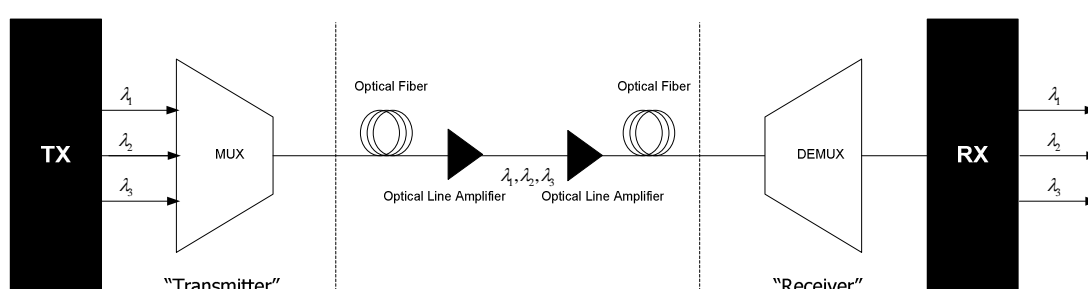
รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยนำแสง

จากรูปที่ 2.1 แสดงถึงองค์ประกอบของการสื่อสารทางแสงอย่างง่าย ส่วนแรกคือส่วนภาคส่ง จะมีอุปกรณ์สำคัญคืออินพุทที่เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าป้อนเข้ามาแล้วจึงทำการมอดูเลตกับแสง (optical modulator) จากแหล่งกำเนิดต่างๆ (light source) เช่น แหล่งกำเนิดจากเลเซอร์หรือไฟ LED จึงกลายเป็นสัญญาณแสง จากนั้นสัญญาณแสงจะเดินทางเข้าสู่องค์ประกอบที่ 2 ซึ่งก็คือเส้นใยแสง (optical fiber) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งสัญญาณไปยังภาครับ โดยในส่วนของเส้นใยแสงนี้ เราสามารถจำแนกได้สองประเภทหลัก คือ เส้นใยแสงแบบแผนคลื่นเดี่ยว (single mode fiber: SMF) และเส้นใยแสงแบบหลายแผนคลื่น (multi mode fiber: MMF) โดยประเภท SMF นั้นจะมีราคาสูงกว่า MMF เนื่องจากมีค่าอัตราการลดทอนของกำลังสัญญาณ (attenuation

coefficient) ที่ต่ำกว่า จากนั้นสัญญาณทางแสงจึงเดินทางไปถึงองค์ประกอบที่ 3 คือส่วนภาครับ ซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ตรวจจับแสง (photo detector) ทำหน้าที่แปลงจากสัญญาณทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้งานกันสองประเภทหลักคือ แบบ positive intrinsic negative junctions (PIN) และ avalanche photodiode (APD) จากนั้นจึงส่งต่อไปยังวงจรตัดสินใจ (decision circuit) ซึ่งทำหน้าที่พิจารณาว่าสัญญาณที่ตรวจจับได้นั้น ควรจะเป็นบิต "0" หรือบิต "1"

2.2 เทคโนโลยี WDM

ในปัจจุบันที่อัตราการสื่อสารข้อมูลสูงขึ้น ความต้องการในการส่งไปยังปลายทางมีระยะทางไกลมากขึ้น เทคโนโลยี WDM จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการรองรับความต้องการข้างต้น เพื่อความเข้าใจเทคโนโลยีนี้ให้ดียิ่งขึ้น จึงจะยกตัวอย่างรูปที่ 2.2 เพื่อประกอบการอธิบาย



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบภายในเทคโนโลยี WDM

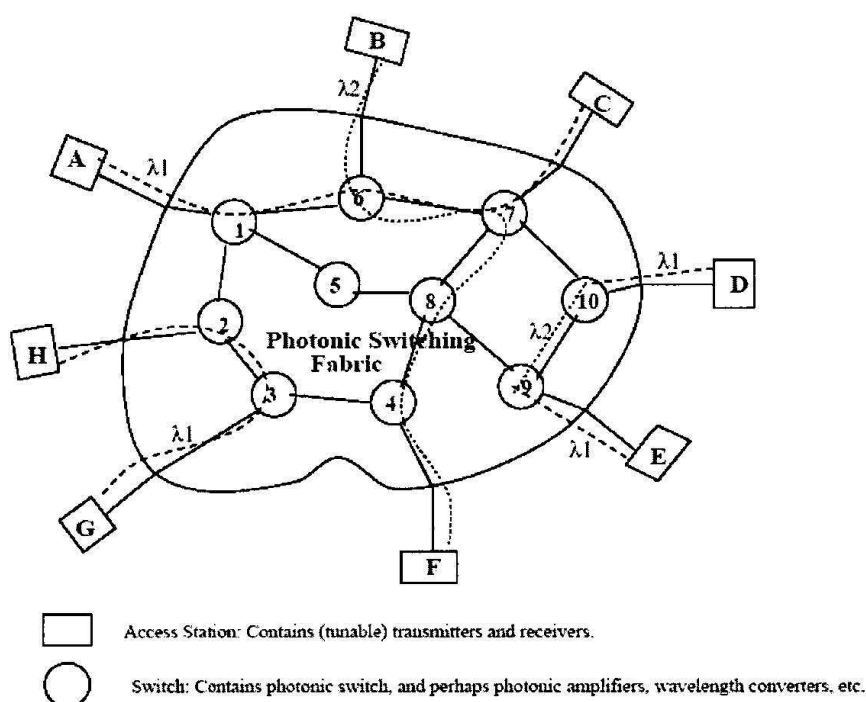
รูปที่ 2.2 แสดงถึงเทคโนโลยี WDM และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง พื้นฐานของเทคโนโลยี WDM นี้คือ จากแบนด์วิดท์ที่มากมายของเส้นใยแสงที่สามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นได้ตั้งแต่ 800-1600 nm จะมีการรวบรวมสัญญาณทางแสงจำนวน N ความยาวคลื่น ส่งไปยังเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน โดยในฝั่งภาคส่งจะมีอุปกรณ์คือ wavelength multiplexer (MUX) ทำหน้าที่เป็นตัวรวมความยาวคลื่นหลายๆความยาวคลื่นไว้ด้วยกัน จากนั้นจึงส่งต่อไปในตัวกลางเส้นใยแสง โดยในระหว่างทางเส้นใยแสงนั้น หากมีระยะทางไกลมาก จะมีการลดทอนของกำลังสัญญาณเกิดขึ้น หากต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ ฝั่งภาครับจะไม่สามารถตรวจจับได้ จึงต้องมีการวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณเป็นระยะๆตามโครงข่าย จากนั้นเมื่อถึงภาครับ ก็จะมีอุปกรณ์คือ wavelength demultiplexer (DEMUX) เป็นตัวแยกความยาวคลื่นแต่ละค่าออกไปยังภาครับแต่ละส่วน

โดยเทคโนโลยี WDM ในปัจจุบันนั้น สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทย่อยคือ Coarse WDM (CWDM) และ Dense WDM (DWDM) ซึ่งทั้งสองประเภทนี้มีความแตกต่างกันที่ โดยทั่วไปแล้ว

CWDM จะมีระยะห่างระหว่างแต่ละช่องสัญญาณ (channel spacing) ประมาณ 3000 GHz หรือ 20 nm ในขณะที่ DWDM จะมีระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณที่ละเอียดขึ้นคือ 25-200 GHz ทำให้เกิดจำนวนช่องสัญญาณได้ถึง 100 ช่องสัญญาณซึ่งมากกว่า CWDM

2.3 โครงข่ายเส้นใยแสงแบบ wavelength-routed-network แบบเมช

โครงข่าย wavelength-routed optical network มีลักษณะการให้บริการคือ ผู้ใช้บริการจะเชื่อมต่อกับสวิตช์เส้นใยแสง (optical switch) ในลักษณะแบบเมช ซึ่งสวิตช์หนึ่งตัวนั้นสามารถรองรับผู้ให้บริการได้มากกว่าหนึ่งคน โดยการเชื่อมต่อระหว่างผู้ให้บริการและสวิตช์นั้นจะเรียกเป็น 1 โหนด (node) แต่ละโหนดมีตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณที่สามารถปรับความยาวคลื่นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงข่ายเส้นใยแสงแบบ wavelength-routed [40]

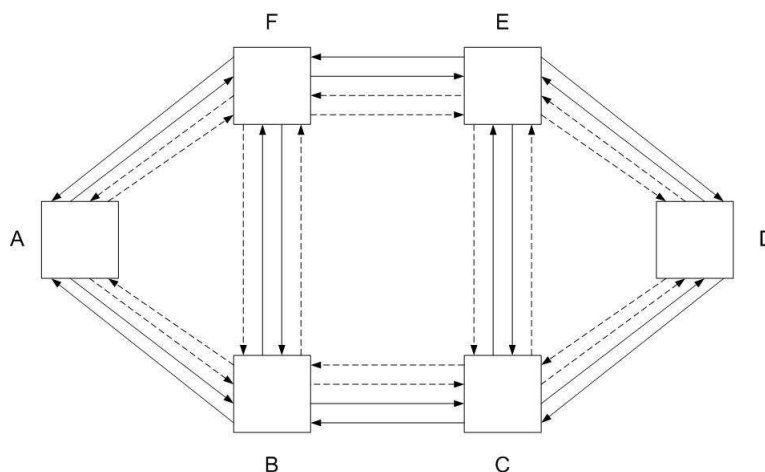
รูปที่ 2.3 แสดงถึงตัวอย่างการสื่อสารของโครงข่ายเส้นใยแสงแบบ wavelength-routed โดยการสื่อสารระหว่างโหนดคู่ใดคู่หนึ่งในโครงข่ายนั้นเราจะเรียกว่า lightpath (LP) โดยในแต่ละ LP นั้นจะถูกจัดสรรความยาวคลื่นให้ใช้ค่าหนึ่งใน ตัวอย่างเช่น LP ระหว่างโหนด A ไปโหนด C จะใช้ความยาวคลื่น λ_1 ในการสื่อสาร ในขณะที่ LP ระหว่าง H ไป G ก็สามารถจัดสรรให้ใช้ความยาวคลื่นเดียวกันได้เช่นกัน แต่ขณะที่ LP ระหว่างโหนด B ไป F จะใช้ความยาวคลื่น λ_2 ซึ่งแตกต่าง

จากคูโหนดคู่แรก นอกจากนั้นในแต่ละ LP นั้นจะใช้เส้นทางเดินผ่านมากกว่า 1 ข่ายเชื่อมโยงหรือผ่านเพียงแค่ว่าข่ายเชื่อมโยงเดียวก็ได้ ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ

นอกจากนี้หากโครงข่ายใดๆมีความจำเป็นที่จะต้องติดตั้งอุปกรณ์แปลงความยาวคลื่น แล้วนั้น LP ใดๆอาจใช้ความยาวคลื่นมากกว่า 1 ในการสื่อสารได้เช่นกัน เช่น LP ระหว่างโหนด D ไป E นั้นจะมีการแปลงความยาวคลื่นจาก λ_1 ไปเป็น λ_2 ในสวิตช์ที่ 10 จากนั้นจึงแปลงกลับความยาวคลื่นเดิม ในสวิตช์ที่ 9 จะเห็นได้ว่าคุณลักษณะของโครงข่ายชนิดนี้มีความยืดหยุ่นและสร้างทางเลือกได้มากมาย แต่เงื่อนไขหนึ่งที่ต้องพิจารณาก็คือ สำหรับ LP 2 เส้นทางหรือมากกว่าที่เดินทางบนเส้นใยแสงเส้นเดียวกันต้องมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันจึงจะทำให้ไม่เกิดการรบกวนระหว่างกัน

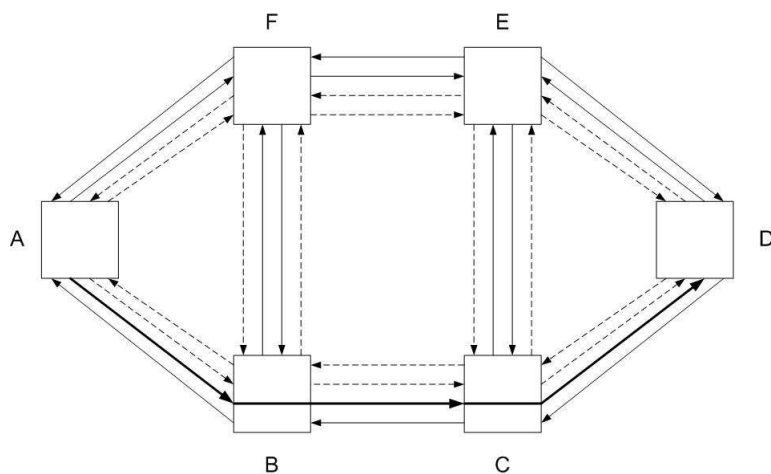
2.4 กลไกป้องกันความเสียหายลักษณะ path protection สำหรับโครงข่าย wavelength-routed แบบเมช

กลไกการกู้คืนสัญญาณเมื่อมีข่ายเชื่อมโยงใดๆในโครงข่ายเกิดเสียหาย วิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้อย่างแพร่หลายคือ path protection เพื่อเป็นการสะดวกในการอธิบาย จึงยกตัวอย่างรูปที่ 2.4 มาประกอบ



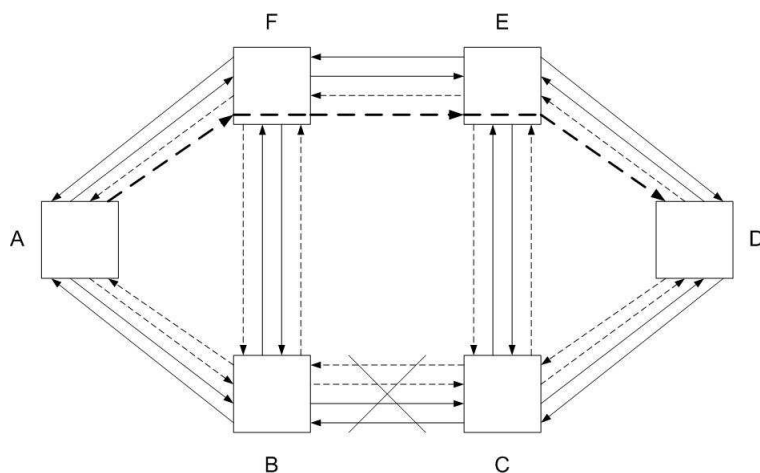
รูปที่ 2.4 โครงข่ายลักษณะเมชประกอบไปด้วยเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรอง

รูปที่ 2.4 แสดงถึงโครงข่ายตัวอย่างลักษณะเมชซึ่งประกอบด้วยเส้นใยแสงทำงาน (เส้นทึบ) และเส้นใยแสงสำรอง (เส้นประ) ในสภาวะปกติการสื่อสารในโครงข่ายจะใช้เส้นใยแสงทำงานในการสื่อสารระหว่างแต่ละ LP ในที่นี้จะยกตัวอย่าง LP ระหว่างโหนด A และ D ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้เส้นทางผ่านข่ายเชื่อมโยง A-B-C-D ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การสื่อสารระหว่างโหนด A ไปโหนด D

แต่เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นในโครงข่ายดังเช่นข่ายเชื่อมโยงระหว่าง B ไป C ในรูปที่ 2.6 ระบบจะมีการสร้างเส้นทางสำรองขึ้น สำหรับ LP จากโหนด A ไป D นั้น เส้นทางสำรองจะมีได้ 3 รูปแบบ คือ A-F-E-D, A-B-F-E-D และ A-B-F-E-C-D แต่เส้นทางสำรองที่สั้นที่สุดคือ A-F-E-D ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไก path protection เมื่อข่ายเชื่อมโยง B-C เสียหาย

รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ path protection เมื่อเกิดข่ายเชื่อมโยงระหว่าง B และ C เสียหาย ในที่นี้ระบบจะเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดคือ A-F-E-D ในขณะที่ 2 ทางเลือกที่เหลือนั้นมีระยะทางที่มากกว่า จะเห็นได้ว่าวิธี path protection นั้นมีประสิทธิภาพมากในแง่ของความสะดวกรวดเร็วและลดต้นทุนมากที่สุด

2.5 ปัญหาหลักที่เกิดในเส้นใยแสง

จากบทนำที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นถึงปัญหาหลักที่เกิดขึ้นในเส้นใยแสง ในที่นี้จะนำเสนอรายละเอียดเกี่ยวกับปัญหาต่างเหล่านั้นอย่างละเอียดอีกครั้งหนึ่ง เมื่อสัญญาณแสงเดินทางไปในเส้นใยแสงแล้วนั้น จะเกิดปัญหาคือกำลังของสัญญาณลดลงจากผลของการลดทอนกำลังสัญญาณ (attenuation) และความผิดเพี้ยนของสัญญาณจากดิสเพอร์ชัน (dispersion) และ Kerr effect โดยรายละเอียดมีดังนี้

2.5.1 การลดทอนกำลังของสัญญาณ (fiber attenuation)

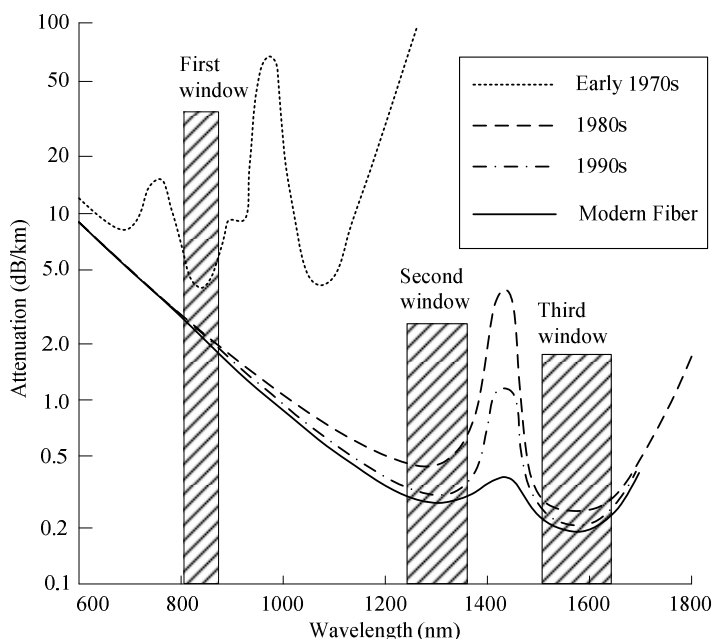
การลดทอนของกำลังสัญญาณจะทำให้เกิดการสูญเสียของกำลังแสง ซึ่งแปรค่าตามสัมประสิทธิ์การลดทอน (attenuation coefficient) ตามสมการที่ (2.1) ดังนี้

$$P(L) = P(0) - \alpha L \quad (2.1)$$

โดยที่	$P(L)$	คือ กำลังสัญญาณที่ระยะ L ใดๆ [dB]
	$P(0)$	คือ กำลังของสัญญาณ ณ ตำแหน่งเริ่มต้น [dB]
	α	คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนกำลังสัญญาณ [dB/km]
	L	คือ ระยะทางใดๆที่เดินทางในเส้นใยแสง [km]

สำหรับค่าคงตัวการลดทอนกำลังสัญญาณ α นั้น แตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่น ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงเส้นโค้งทั้ง 4 เส้นโดยเส้นที่สองจากบนสุดซึ่งเป็นเส้นประแสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงต้นยุค 80 ในส่วนเส้นประสลับจุดถัดลงมาเป็นเส้นโค้งที่แสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณของเส้นใยแสงในช่วงยุค 90 และล่างสุดเส้นที่บซึ่งแสดงถึงเส้นใยแสงในยุคปัจจุบัน ระบบเส้นใยแสงในช่วงแรกหรือยุคแรก (first window) นั้นจะทำงานที่ความยาวคลื่นประมาณ 850 nm บนเส้นใยแสงที่ทำจากซิลิกาและจากเส้นโค้งเราจะพบจุดยอดที่เกิดจากความขึ้น และผลของการกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) ซึ่งทำให้อัตราสูญเสียสัญญาณมีค่าสูงดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 2.7 หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ส่งสัญญาณทางแสงทำให้มีการใช้งานคุณลักษณะการสูญเสียสัญญาณในยุคที่ 2 (second window) ซึ่งแสดงโดยเส้นประสลับจุดที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีอัตราการสูญเสียสัญญาณต่ำกว่า 0.5 dB/km ต่อมาในช่วงปี 1977 Nippon Telegraph and Telephone (NTT) ได้พัฒนาการใช้งานระบบเส้นใยแสงมาสู่ยุคที่ 3 (third window) ที่ความยาวคลื่น 1550 nm และยังคงแสดงถึงอัตราการสูญเสียสัญญาณต่ำสุดที่ 0.2 dB/km ในการใช้งานนั้น ถ้าเป็นการส่งผ่านข้อมูลระยะสั้นๆ เช่น ระบบ LAN เป็นต้นเราจะใช้ความยาวคลื่นที่ 850 nm ส่วนในระบบส่งผ่านข้อมูลทางไกลจะใช้ความยาวคลื่นที่

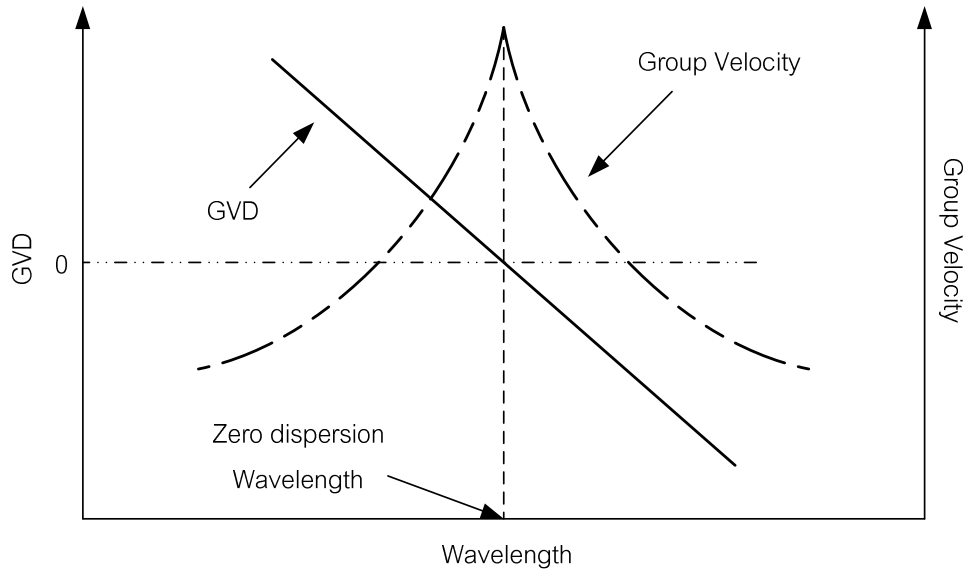
1550 nm ปัจจุบันมีการพัฒนาการใช้งานเส้นใยแสงในยุคที่ 4 (forth window) ซึ่งเพิ่มการใช้ความยาวคลื่นใกล้แถบ 1625 nm



รูปที่ 2.7 อัตราการลดทอนของกำลังสัญญาณในยุคต่างๆ

2.5.2 ดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสง (fiber dispersion)

การเกิดความผิดเพี้ยนจากผลของดิสเพอร์ชัน จะทำให้พัลส์ของสัญญาณกว้างออก โดยการผิดเพี้ยนเหล่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยการตรวจสอบความเร็วกลุ่ม (group velocities) ของโหมดการเดินทาง (guided modes) ซึ่งความเร็วกลุ่มเหล่านี้คือความเร็วของพลังงานในแต่ละโหมดที่เดินทางในเส้นใยแสง ตัวอย่างของความเร็วกลุ่มและการกระจายของความเร็วกลุ่ม (group velocity dispersion : GVD) เทียบกับความยาวคลื่นแสดงดังรูปที่ 2.8 เห็นได้ชัดว่าความเร็วกลุ่มของแต่ละความยาวคลื่นมีค่าต่างกันและมีค่าสูงสุดเมื่อค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ ทั้งนี้ GVD เป็นปรากฏการณ์ที่สัญญาณแสงหนึ่งๆ ประกอบด้วยหลายความถี่โดยองค์ประกอบแต่ละความถี่นั้นมีความเร็วกลุ่มต่างกัน ส่งผลให้แต่ละองค์ประกอบของสัญญาณแสงใช้เวลาที่แตกต่างกันในการเดินทางมีผลทำให้สัญญาณแสงขยายความกว้างออกไปเมื่อมาถึงปลายทาง



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มกับการกระจายของความเร็วกลุ่ม
ในแต่ละความยาวคลื่น

โดยทั่วไปแล้วดิสเพอร์ชันในเส้นใยแสงสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

1. ดิสเพอร์ชันแบบภายในแผนคลื่น (inramodal dispersion) หรืออาจจะเรียกกันว่า chromatic dispersion ซึ่งจะเกิดในเส้นใยแสงประเภท SMF ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกลุ่มกับค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นใดๆ ได้ตามสมการที่ (2.2)-(2.4)

$$v_g = \left[\frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right]^{(-1)} = \beta_1^{(-1)} \quad (2.2)$$

$$\beta_2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = \frac{\partial \beta_1}{\partial \omega} = \frac{\partial \left(\frac{1}{v_g} \right)}{\partial \omega} \quad (2.3)$$

$$D = \left[\frac{(-2\pi c \beta_2)}{\lambda^2} \right] \quad (2.4)$$

โดยที่ V_g คือ Group velocity $K = \frac{2\pi}{\lambda}$

β_2 คือ ค่า GVD [ps^2/km]

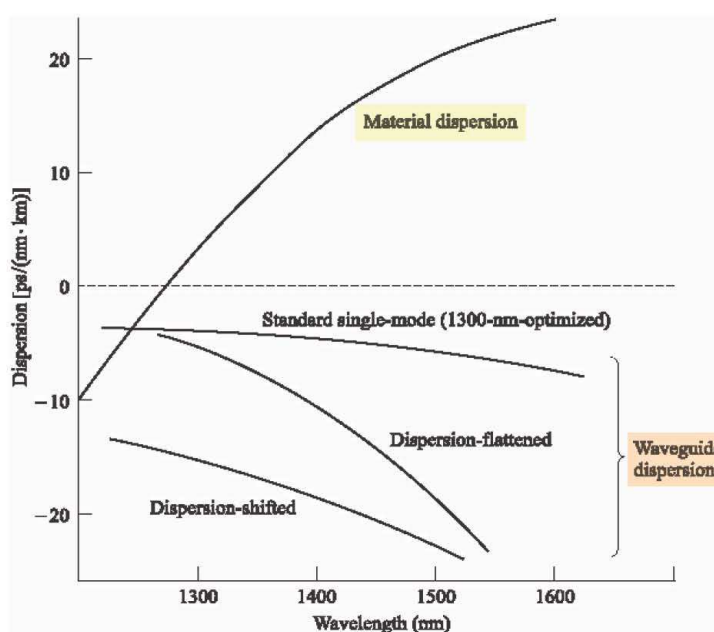
D คือ ค่าดิสเพอร์ชัน [$\text{ps}/\text{km}/\text{nm}$]

c คือ ค่าคงที่ความเร็วแสงในสุญญากาศมีค่าประมาณ

$$2.9974 \times 10^8 \text{ m/s}$$

λ คือ ค่าความยาวคลื่น [nm]

chromatic dispersion หรือ intramodal dispersion นั้นเป็นผลมาจาก 2 ปัจจัยหลักคือ ดิสเพอร์ชันจากวัสดุ (material dispersion) ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะเฉพาะตัวตามธรรมชาติของ เส้นใยแสง ซึ่งค่าของดัชนีเส้นใยแสงจะแปรไปตามความยาวคลื่น ดังนั้นจะทำให้สัญญาณแสงแต่ ละความถี่เดินทางด้วยความเร็วไม่เท่ากัน ทำให้ถึงปลายทางไม่พร้อมกัน และ ดิสเพอร์ชันจากท่อนำคลื่น (waveguide dispersion) ซึ่งเป็นผลจากลักษณะรูปร่างของเส้นใยแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.9

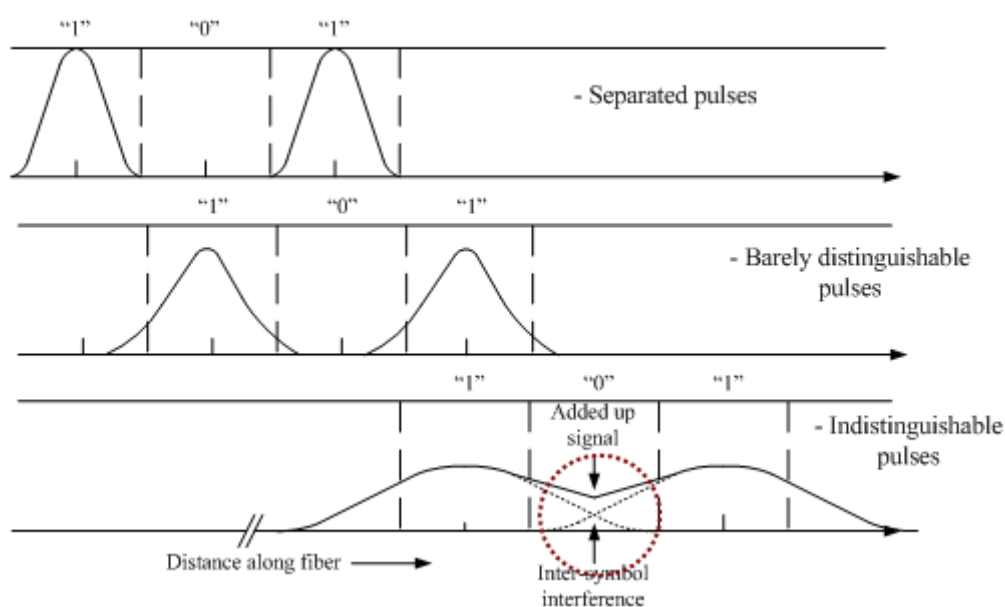


รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและดิสเพอร์ชันจากท่อนำคลื่น

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

2. ดิสเพอร์ชันแบบระหว่างแผนคลื่น (intermodal dispersion) ซึ่งจะเกิดในเส้นใยแสงประเภท MMF เป็นผลจากแต่ละแผนคลื่นมีความเร็วกลุ่มที่ต่างกันบนความถี่เดียวกัน

ผลของดิสเพอร์ชันแบบนี้จะมีความรุนแรงกว่าแบบภายในแผนคลื่น อย่างไรก็ตามใน ระบบการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเชิงความยาวคลื่นซึ่งสัญญาณแสงประกอบด้วยหลาย ความยาวคลื่นรวมอยู่ด้วยกัน แม้จะมีการเลือกความยาวคลื่นหนึ่งให้เกิดค่าดิสเพอร์ชันเป็นศูนย์ความยาวคลื่นอื่นๆ ที่เหลือย่อมได้รับผลจากดิสเพอร์ชันค่าต่างๆ แตกต่าง กันไปทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณในช่องสัญญาณที่ต่างกัน (signal distortion) และรุนแรงไม่เท่ากันอันเนื่องมาจากค่าความชันของเส้นโค้งดิสเพอร์ชัน (dispersion slope) โดยการผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการซ้อนทับ กันของพัลส์สัญญาณซึ่งถ้าไม่ทำการแก้ไขจะทำให้ข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้ รูปที่ 2.10 เป็นการแสดงการเกิด inter-symbol interference (ISI) จากผลของดิสเพอร์ชัน



รูปที่ 2.10 การเกิด inter-symbol interference

2.5.3 ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง

ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ๆ คือ nonlinear stimulated inelastic scattering ซึ่งเป็นการกระเจิงแสงที่ไม่ยืดหยุ่นและ nonlinear refraction ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเห (refractive index, n) ที่ขึ้นอยู่กับระดับของกำลังสัญญาณใน เส้นใยแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Kerr effect โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะ ศึกษาปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มาจาก Kerr effect เท่านั้น

Kerr effect เป็นปรากฏการณ์ที่ค่าดัชนีหักเหเปลี่ยนแปลงไปตามระดับของกำลัง สัญญาณแสงในเส้นใยแสง ทำให้เฟสของสัญญาณแสงที่ปลายทางเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไป

ด้วย เฟสของสัญญาณแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับของกำลังสัญญาณแสงนี้จะเรียกว่า การเลื่อนเฟสอย่างไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear phase shift) ซึ่งสามารถแบ่ง Kerr effect ที่มีผลต่อสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงได้เป็นสามประเภทดังนี้ประเภทแรก เฟสของสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยกำลังของตัวสัญญาณเอง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า self-phase modulation (SPM) ประเภทที่สอง เฟสของสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยกำลังของสัญญาณต่างความยาวคลื่น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า cross-phase modulation (XPM) และประเภทที่สาม อาจเกิดการถ่ายเทพลังงานไปให้สัญญาณความยาวคลื่นอื่น ผ่านปรากฏการณ์ four-wave mixing (FWM) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.5.3.1 self-phase modulation (SPM)

self-phase modulation (SPM) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณโดยระดับกำลังของสัญญาณที่ความถี่เดียวกันกับสัญญาณเอง อันเป็นผลทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของสัญญาณแสงด้วยระดับกำลังของตัวสัญญาณเอง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.5)

$$\Delta\omega_{NL} = \frac{\partial\phi_{NL}(z,T)}{\partial T} \quad (2.5)$$

โดยที่ $\Delta\omega_{NL}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสต่อหน่วยเวลา

ϕ_{NL} คือ เฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น

โดยที่ $\phi_{NL}(z,T)$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.6)

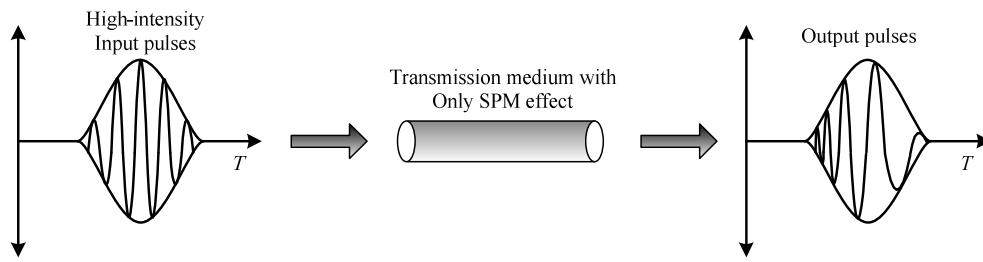
$$\phi_{NL} = n_2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) L |E_0|^2 = n_2 k_0 L |E|^2 \quad (2.6)$$

โดยที่ n_2 คือ สัมประสิทธิ์ดัชนีหักเหที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear index coefficient) ซึ่งมีค่าประมาณ $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$

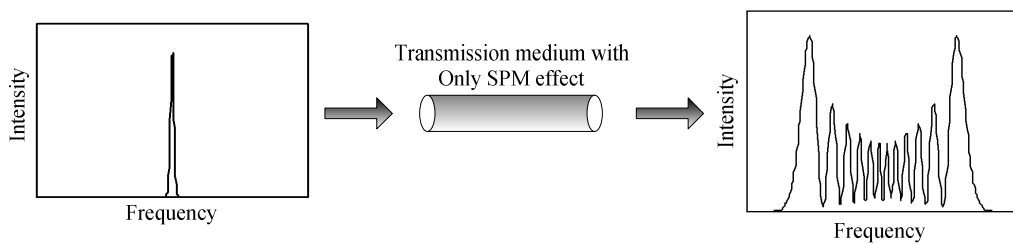
$|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสง

k_0 คือ เลขคลื่นในที่ว่าง (Free space wave number)

ปรากฏการณ์ SPM จะทำให้สเปกตรัม (spectrum) ของสัญญาณแสงขยายออกและเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปจะถูกเหนี่ยวนำมากที่สุดบริเวณตรงกลางสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณกำลังงานแสงสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.11



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.11 ผลของ SPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสงทาง

(ก) ความถี่ (ข) สเปกตรัมสัญญาณ

2.5.3.2 Cross-Phase Modulation (XPM)

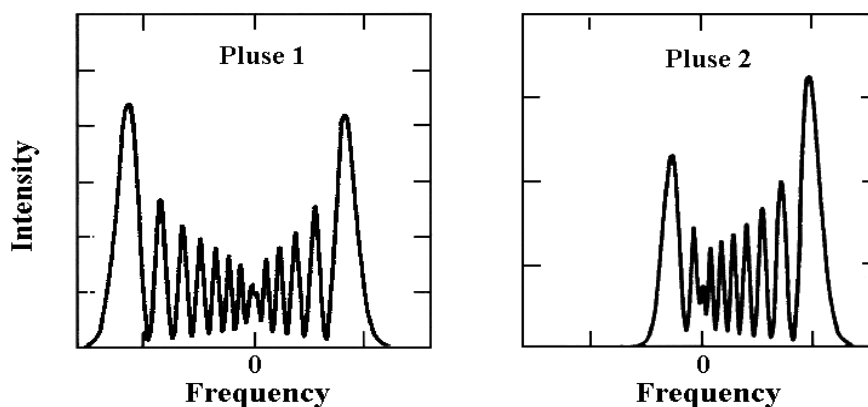
ปรากฏการณ์ XPM จะเกิดขึ้นเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์ ω_1 และ ω_2 ซึ่งมีค่าต่างกัน ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง โดยแต่ละสัญญาณพัลส์ ณ ช่องสัญญาณหนึ่งจะถูกเหนี่ยวนำให้เฟสเปลี่ยนไปจากเดิมเนื่องจากกำลังงานของสัญญาณแสงอื่นที่อยู่ที่คลื่นพาห์มีความถี่ที่ต่างออกไป

โดยทั่วไปเมื่อมี 2 สัญญาณแสงที่มีความถี่คลื่นพาห์เป็น ω_1 และ ω_2 ร่วมเดินทางไปในเส้นใยแสง สัญญาณแสงทั้งสองจะมีความเร็วกลุ่มที่แตกต่างกัน ซึ่งการที่ความเร็วกลุ่มไม่ตรงกันนี้จะเป็นปัจจัยที่กำหนดการเหลื่อมล้ำของสัญญาณแสงทั้งสองในปรากฏการณ์ XPM โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นช่วงที่สัญญาณแสงทั้งสองวิ่งตัดกัน ผลของ XPM มีค่ามากกว่าของ SPM ถึง 2 เท่าโดยมีเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปเนื่องจาก SPM และ XPM ดังนี้

$$\phi_{NL} = n_2 k_0 L (|E_0|^2 + 2|E_1|^2) \quad (2.7)$$

โดยที่ $|E_0|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_1

$|E_1|^2$ คือ ความเข้มของสัญญาณแสงที่ความถี่คลื่นพาห์ ω_2



รูปที่ 2.12 ผลของ XPM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

รูปที่ 2.12 แสดงถึงผลของ XPM ที่มีต่อสัญญาณแสง 2 สัญญาณแสงที่มีกำลังสัญญาณต่างกันที่เดินทางในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน โดยกำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่ากำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 2 จากรูปจะเห็นว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณจะคล้ายกันกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมสัญญาณที่เกิดจากผลของ SPM แต่จะต่างกันตรงที่สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้รับผลจาก XPM จะขยายออกมากกว่าและการขยายออกยังเป็นแบบไม่สมมาตรด้วย โดยสัญญาณพัลส์ที่ 2 จะมีลักษณะการขยายออกของสเปกตรัมที่ไม่สมมาตรกว่าสัญญาณพัลส์ที่ 1 เนื่องจากกำลังสัญญาณของพัลส์ที่ 1 มากกว่าส่งผลให้สัญญาณที่พัลส์ที่ 2 ได้รับผลจาก XPM มากกว่า

2.5.3.3 Four Wave Mixing (FWM)

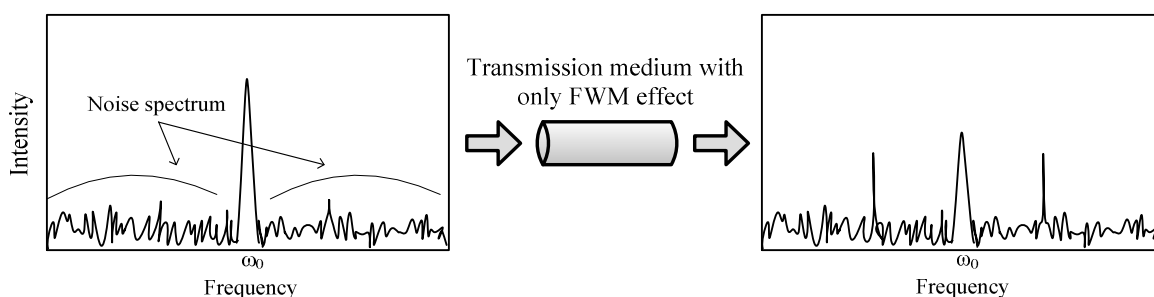
FWM เป็นปรากฏการณ์ของความไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 4 ความถี่ที่มีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (frequency matching) ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานให้แก่กันและกัน การกำเนิดสัญญาณพัลส์ความถี่ใหม่ขึ้นมาเกิดจากสัญญาณพัลส์หลาย ๆ ช่องสัญญาณที่มีความถี่ต่าง ๆ กันมาผสมผสานกัน โดยสัญญาณที่เกิดใหม่ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของการจับคู่ความถี่ (frequency matching condition) และเงื่อนไขของการจับคู่เฟส (phase matching condition) ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9) ตามลำดับ

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \quad (2.8)$$

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3 \quad (2.9)$$

โดยที่ k_n คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n

ผลของ FWM ในกรณีของช่องสัญญาณเดียว เรียกว่า intra channel FWM (IFWM) จะทำให้สัญญาณพัลส์ที่กระจายออกมาถ่ายเทกำลังงานซึ่งกันและกันจนทำให้เกิดพัลส์เงา (ghost pulse) ขึ้นมาในสัญญาณที่มอดูเลตทางความเข้มแสดงดังรูปที่ 2.13 ถ้าความถี่ของสัญญาณข้อมูลและความถี่ของสัญญาณรบกวนทางอินพุตขวามือเป็นไปตามเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ตามหลักของการเกิด FWM แล้ว เมื่อสัญญาณข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนรวมอยู่เดินทางไปในเส้นใยแสงจะทำให้เกิดการถ่ายเทกำลังสัญญาณจากสัญญาณข้อมูลไปที่สัญญาณรบกวนทำให้กำลังของสัญญาณรบกวนเพิ่มมากขึ้น และกำลังของสัญญาณข้อมูลลดลง โดยที่จะมีการถ่ายเทลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ และถ้าระยะเวลาในการสื่อสารมากขึ้น สัญญาณข้อมูลอาจจะกลายเป็นสัญญาณรบกวนไปได้ในที่สุด



รูปที่ 2.13 ผลของ FWM ต่อสัญญาณที่เดินทางในเส้นใยแสง

ในกรณีผลของ FWM ในกรณีของหลายช่องสัญญาณจะมีสัญญาณความถี่ใหม่เกิดขึ้นมา และจะมีความรุนแรงเมื่อความถี่ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทับซ้อนหรือว่าเชื่อมกับความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดของข้อมูลขึ้นแต่ว่าผลที่เกิดขึ้นเนื่องจาก FWM จะมีความรุนแรงน้อยกว่า XPM

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบที่ใช้วิธีจัดการดิสเพอร์ชัน

ในระบบที่สัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัลในลักษณะของพัลส์ข้อมูล สัญญาณพัลส์ที่เดินทางในเส้นใยแสงจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าดิสเพอร์ชัน ทำให้สัญญาณพัลส์เกิดการบานออก ผลลัพธ์ก็คือทำให้จำกัดปริมาณข้อมูลหรือทำให้บิตเรตสูงสุดของระบบลดลง ดังนั้นระบบดีดับเบิลยูดีเอ็ม จะต้องมียุคปรกติชดเชยดิสเพอร์ชัน เพื่อทำหน้าที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออกให้มีขนาดคงที่ตลอดการเดินทางอยู่เสมอ ผลของดิสเพอร์ชันที่เกิดย่อมมีผลกระทบกับทุกช่องสัญญาณด้วย โดยเฉพาะระบบที่มีจำนวนช่องสัญญาณมาก จะต้องให้ความสนใจและเอาใจใส่กับผลกระทบของดิสเพอร์ชันมากขึ้นด้วยในระบบโครงข่ายสื่อสารขนาดใหญ่หรือโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูง เทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชันทำโดยการนำเอาเส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันที่

ต่างก็นำมาต่อกันเพื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชันและทำให้ค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยมีค่าเป็นศูนย์ ตามสมการที่ (2.10)

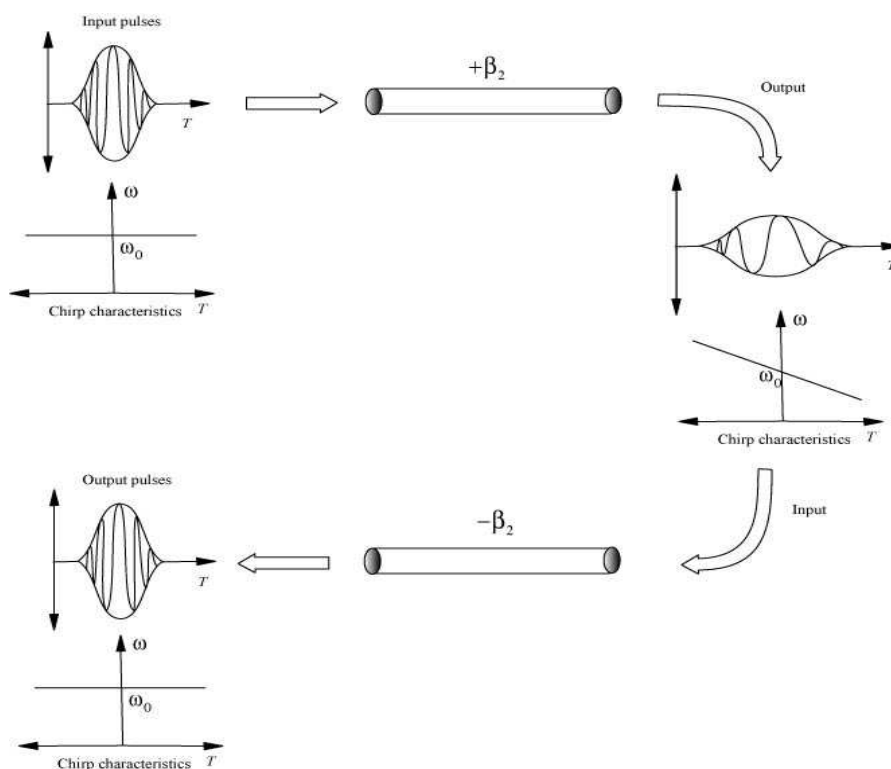
$$D_1 L_1 + D_2 L_2 = 0 \tag{2.10}$$

โดยที่ D_1 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [ps/km/nm]

D_2 คือ ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [ps/km/nm]

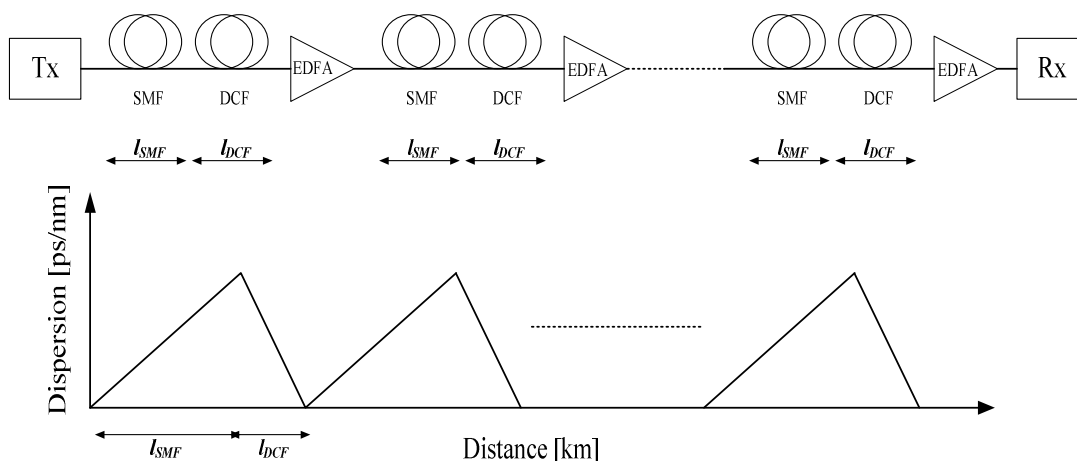
L_1 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณ [km]

L_2 คือ ความยาวของเส้นใยแสงที่ใช้ในการชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน [km]



รูปที่ 2.14 เทคนิคพื้นฐานในการจัดการดิสเพอร์ชัน

รูปที่ 2.14 แสดงถึงวิธีการชดเชยความผิดเพี้ยนด้วยเทคนิคการจัดการดิสเพอร์ชัน ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางผ่านเส้นใยแสงที่มี GVD (β_2) ที่มีค่าเป็นบวกจะทำให้พัลส์เกิดการขยายตัวออกและเมื่อทำการจัดการดิสเพอร์ชันด้วยการนำสัญญาณมาส่งผ่านเส้นใยแสงที่มีค่า β_2 ที่เป็นลบจะทำให้เกิดการชดเชยดิสเพอร์ชัน ส่งผลให้สามารถแก้ไขความผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ โดยในระบบการสื่อสารสัญญาณจริงจะมีการต่อการชดเชยดิสเพอร์ชันตามที่ได้กล่าวมาเป็นรายคาบดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ระบบการสื่อสารสัญญาณทางแสงที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นว่า การใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ ถึงแม้ในระหว่างทาง การสื่อสารสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าดิสเพอร์ชันขึ้นลงตลอดเวลา แต่ค่าดิสเพอร์ชันของทั้ง ระบบจะมีค่าเป็นศูนย์ เพราะว่ามี การสะสมและลดลงเป็นคาบๆ จนถึงปลายทาง จึงทำให้ สัญญาณที่เดินทางไปถึงที่ภาครับไม่เกิดความผิดเพี้ยนเนื่องจากผลของดิสเพอร์ชัน เราสามารถ แปลงค่าดิสเพอร์ชันกับ GVD ได้ดังสมการที่ (2.11)

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.11)$$

โดยที่	D	คือ ค่าดิสเพอร์ชัน [ps/km/nm]
	c	คือ ค่าคงที่ความเร็วแสงในสุญญากาศ = 2.99739×10^8 [m/s]
	λ	คือ ค่าความยาวคลื่น [nm]
	β_2	คือ ค่า GVD [ps^2/km]

นอกจากนี้ การที่ทำการกำหนดความยาวคลื่นโดยให้มีค่าดิสเพอร์ชันไม่เป็นศูนย์ช่วยลด ผลเสียจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง เพราะว่า การมีค่าดิสเพอร์ชันจะทำให้เกิดการ ลดลงของค่ากำลังสัญญาณสูงสุด (peak power) ของสัญญาณ เมื่อค่ากำลังสัญญาณสูงสุด ลดลง ดัชนีหักเหของเส้นใยแสงที่โดยปกติจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่ากำลังสัญญาณมีค่าสูง ก็ จะไม่เปลี่ยนแปลงตามค่ากำลังของสัญญาณ อย่างไรก็ตามวิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ นั้นทำได้เพียงช่วยลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากดิสเพอร์ชันเท่านั้น ไม่สามารถลด ความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงได้ ดังนั้นสัญญาณที่

เดินทางในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชันเป็นรายคาบ ก็ยังได้รับผลกระทบจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงอยู่

2.7 เครื่องส่งยุคเฟสแสง

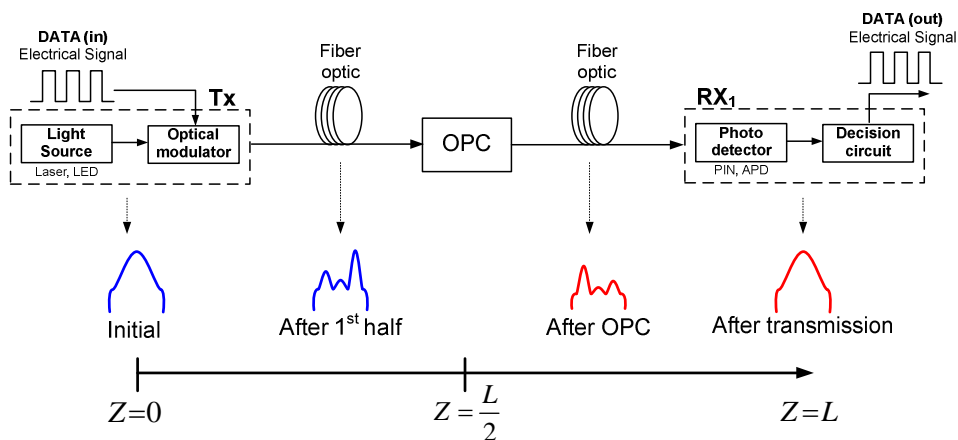
วิธีการคอนจูเกตสัญญาณ (phase conjugation) คือ วิธีการชดเชยรูปสัญญาณที่เกิดการขยายออกและผิดเพี้ยนเนื่องจากปัญหาดิสเพอร์ชันและความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง คือการประยุกต์ใช้เครื่องส่งยุคเฟสแสง (optical phase conjugator, OPC) วางไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของขั้วเชื่อมโยงที่อยู่ในระบบสื่อสารทางแสง เป็นการแบ่งการเดินทางของสัญญาณแสงออกเป็นสองส่วน ในส่วนครึ่งแรกของระบบนั้น เมื่อสัญญาณเดินทางผ่านรูปสัญญาณจะเกิดความผิดเพี้ยนขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณได้จากสมการความไม่เป็นเชิงเส้นของชเรอดิงเงอร์ ในสมการที่ (2.12)

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + i\gamma|A|^2 A \quad (2.12)$$

จากนั้นสัญญาณแสงจากส่วนครึ่งแรกจะผ่านเข้าสู่ OPC ซึ่งมีหน้าที่ในการกำเนิดสัญญาณคอนจูเกต จากสัญญาณแสง A จะได้สัญญาณคอนจูเกต A^* ซึ่งเป็นสัญญาณแสงใหม่สำหรับเดินทางผ่านเส้นใยแสงในส่วนครึ่งหลัง ทำให้ความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกถูกปรับเปลี่ยนกลับมาเป็นรูปสัญญาณเดิมที่ไม่มีความผิดเพี้ยนเหมือนกับสัญญาณแสงที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องส่งสัญญาณแสง ทั้งนี้สัญญาณคอนจูเกตจะเป็นไปตามสมการที่ (2.13)

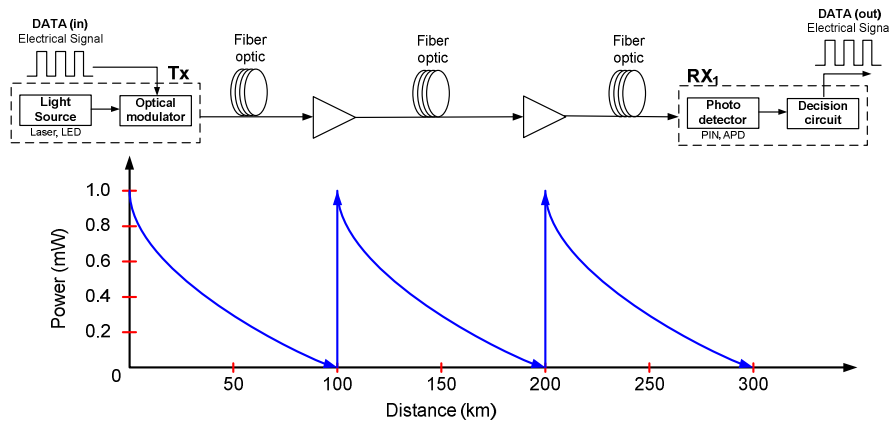
$$\frac{\partial A^*}{\partial z} = -\frac{1}{2}\alpha A^* + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A^*}{\partial T^2} - i\gamma|A^*|^2 A^* \quad (2.13)$$

จากทั้งสมการแสดงการเดินทางในส่วนครึ่งแรกและส่วนครึ่งหลังของระบบในสมการที่ (2.12) และ (2.13) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณแสงเดินทางในส่วนครึ่งแรกของระบบจะเกิดดิสเพอร์ชันขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่า β_2 และเมื่อสัญญาณผ่านการคอนจูเกตที่ OPC มีค่าดิสเพอร์ชันติดลบเป็น $-\beta_2$ ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นจากสัญญาณแสงที่เดินทางในส่วนครึ่งหลังสามารถหักล้างกับดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกได้หมด ทั้งนี้ตำแหน่งการวางของ OPC จะต้องอยู่กึ่งกลางของระยะทางทั้งหมด เพื่อให้ปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันถูกชดเชยได้สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ภาพแสดงกระบวนการสังยุคเฟสแสง

ส่วนปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงจาก Kerr effect นั้น แม้ว่าเครื่องหมายข้างหน้า γ ในส่วนครึ่งแรกจะถูกกลับเป็นค่าตรงกันข้ามในส่วนครึ่งหลัง แต่พบว่าปรากฏการณ์ SPM ไม่สามารถถูกชดเชยได้สมบูรณ์เหมือนกับปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน ทั้งนี้เป็นเพราะปรากฏการณ์ SPM ขึ้นอยู่กับค่ากำลังของสัญญาณ หมายความว่าหากค่าลดทอนกำลังสัญญาณไม่เป็นศูนย์ จะทำให้กำลังของสัญญาณแสงลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะทางที่สัญญาณแสงเดินทางผ่าน ส่งผลให้ความรุนแรงของปรากฏการณ์ SPM ก็จะอ่อนลงตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังสัญญาณตามระยะทางในส่วนครึ่งแรกและครึ่งหลังของระบบไม่สมมาตรกัน ปรากฏการณ์ SPM ที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกและครึ่งหลังจึงไม่สมดุลกัน ทำให้ไม่สามารถชดเชยได้อย่างสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตามปัญหาดังกล่าวสามารถที่จะแก้ได้ด้วยวิธีการดังนี้ เช่น การลดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงในระบบการรับส่งสัญญาณให้สั้นลงการใช้ Raman amplification และการออกแบบตำแหน่งของอุปกรณ์ในระบบการรับส่งสัญญาณ [41] เป็นต้น



รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังสัญญาณตามระยะทางในระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

2.7.1 การกำเนิดสังยุคของสัญญาณ (Conjugated signal)

พื้นฐานของการสร้าง OPC นั้นคือวิธีการคอนจูเกตสัญญาณ ซึ่งการสร้างสัญญาณคอนจูเกตขึ้นมาจากสัญญาณแสง จะอาศัยการเกิดปรากฏการณ์ FWM ซึ่งเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์สามชนิดภายใต้ Kerr effect

ปรากฏการณ์ FWM เกิดจากการที่สัญญาณแสง 4 สัญญาณเดินทางร่วมกันในเส้นใยแสง โดยจะถ่ายเทพลังงานให้กันและกันได้ ซึ่งสัญญาณแสงทั้ง 4 สัญญาณจะต้องมีความถี่และเฟสสอดคล้องกับเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (frequency matching condition) และเงื่อนไขการจับคู่เฟส (phase matching condition) ดังแสดงในสมการที่ (2.14) และ (2.15) ตามลำดับ

สมการเงื่อนไขการจับคู่ความถี่ (frequency matching condition)

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \quad (2.14)$$

สมการเงื่อนไขการจับคู่เฟส (phase matching condition)

$$k_4 = k_1 + k_2 - k_3 \quad (2.15)$$

โดยที่ f_n คือ สัญญาณความถี่ที่ n

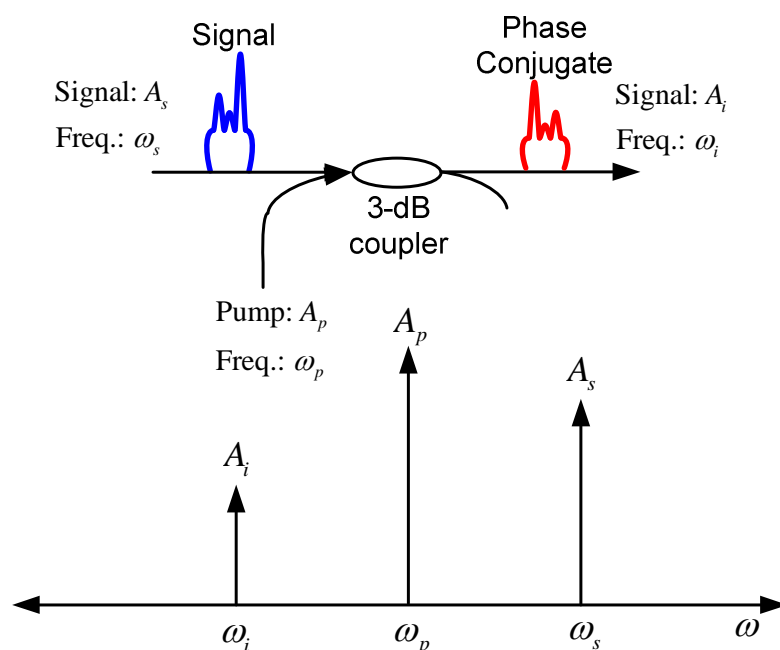
k_n คือ ค่าคงตัวเฟส ณ ความถี่ที่ n

2.7.2 ชนิดของ OPC สำหรับการสื่อสาร 1 ช่องสัญญาณ

OPC ที่ได้มีการวิจัยกันทั่วไปนั้น โดยทั่วไปจะแบ่งได้สองชนิดคือ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นและ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น ซึ่งแบ่งประเภทตามตำแหน่งความยาวคลื่นของการเกิดสัญญาณสังยุค (conjugated signal) และแบ่งตามลักษณะสัญญาณปั๊ม (pump signal) ที่ป้อนเข้ามาเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ตามทฤษฎี ซึ่งรายละเอียดของ OPC สำหรับ 1 ช่องสัญญาณของแต่ละชนิด มีรายละเอียดดังนี้

2.7.2.1 OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสาร 1 ช่องสัญญาณ

กระบวนการสร้างสัญญาณคอนจูเกตสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นนั้น จะมีการใช้สัญญาณ pump เพียงสัญญาณเดียวเท่านั้น ดังรูปที่ 2.18 ทำให้ OPC ชนิดนี้เป็นที่นิยมและทำได้ง่ายกว่าชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น



รูปที่ 2.18 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น
ในการสื่อสาร 1 ช่องสัญญาณ

จากรูปที่ 2.18 แสดงถึงกระบวนการสร้างสัญญาณคอนจูเกตสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นในการสื่อสาร 1 ช่องสัญญาณ โดยใช้สัญญาณปั๊มเพียงสัญญาณเดียว โดยจะป้อนที่ความยาวคลื่น ω_p ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ FWM ส่งผลให้เกิดสัญญาณคอนจูเกตขึ้น แต่สัญญาณคอนจูเกตที่ได้จะเกิดขึ้นที่อีกฝากหนึ่งของสัญญาณปั๊ม จึงเรียกกระบวนการนี้ว่าการเลื่อนความยาวคลื่น

เนื่องจากกระบวนการเลื่อนความยาวคลื่น ทำให้สัญญาณคอนจูเกตและสัญญาณดั้งเดิมเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นต่างกัน ในการชดเชยปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชันด้วย OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นนี้จึงต้องมีการคำนวณระยะทางในส่วนครึ่งแรกและระยะทางในส่วนครึ่งหลังให้เหมาะสมเพื่อให้ผลของดิสเพอร์ชันที่เกิดขึ้นในส่วนครึ่งแรกและครึ่งหลังสมดุลกันพอดี การชดเชยความผิดเพี้ยนจึงจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น เป็นดังต่อไปนี้

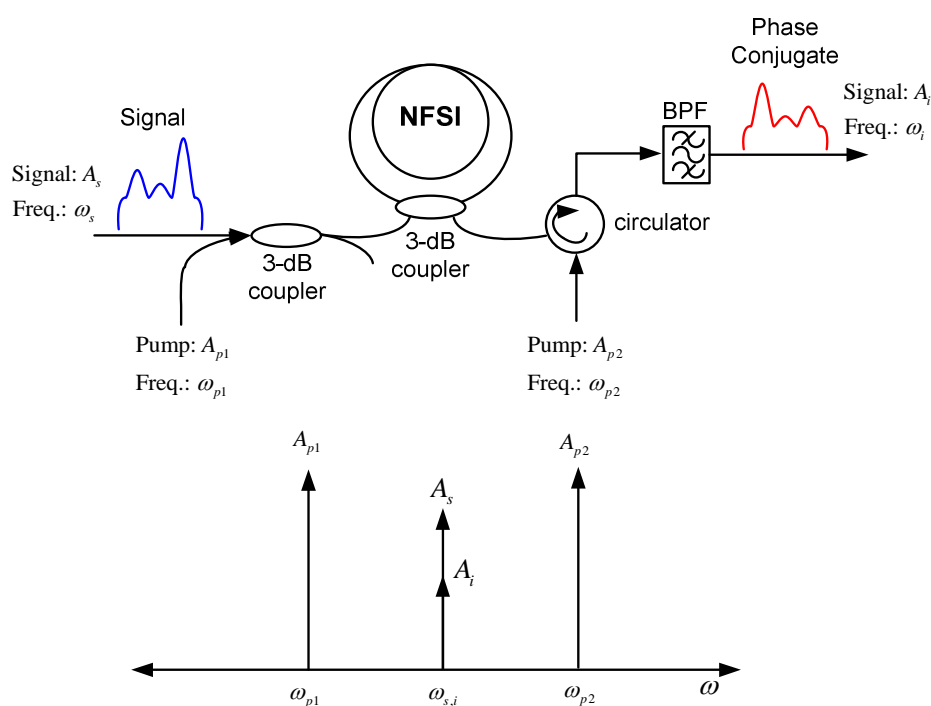
$$\beta_2(\omega_s) \times L_1 = \beta_2(\omega_i) \times (L - L_1) \quad (2.16)$$

โดยที่ ω_s คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณในครึ่งแรก
 ω_i คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณในครึ่งหลัง
 L_1 คือ ระยะทางในครึ่งแรก

L คือ ระยะทางในการรับส่งสัญญาณทั้งหมด

2.7.2.2 OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสาร 1 ช่องสัญญาณ

กระบวนการสร้างสัญญาณคอนจูเกตสำหรับ OPC ชนิดนี้ จะใช้ปรากฏการณ์ FWM ในการสร้างเช่นเดียวกัน แตกต่างกันตรงที่จะต้องมีการใช้สัญญาณปั๊มจำนวนสองสัญญาณ ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.19 สัญญาณปั๊มที่หนึ่งและสองจะอยู่ที่ความยาวคลื่น ω_{p1} และ ω_{p2} ที่แตกต่างกันตามลำดับ เมื่อความยาวคลื่นของสัญญาณปั๊มทั้งสองเหมาะสมและสอดคล้องกันตามเงื่อนไขที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ FWM จะทำให้ความยาวคลื่นของสัญญาณคอนจูเกตเกิดขึ้นที่เดียวกันกับความยาวคลื่นสัญญาณแสงเดิมที่ความยาวคลื่น ω_s แต่กำลังสัญญาณของสัญญาณคอนจูเกตจะมีค่าลดลงและต่ำกว่าสัญญาณคอนจูเกตแบบชนิดเลื่อนความยาวคลื่นอีกด้วย

2.7.3 ชนิดของ OPC สำหรับการสื่อสารหลายช่องสัญญาณ (WDM)

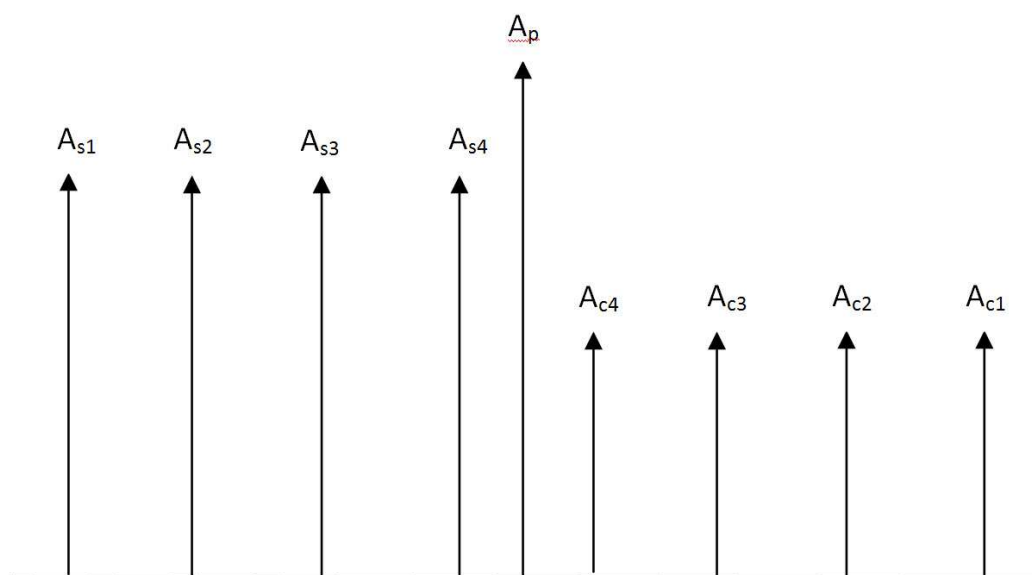
สำหรับชนิดของ OPC ข้างต้นนั้น เป็นการอธิบายลักษณะของ OPC ในการสื่อสารสัญญาณสำหรับ 1 ช่องสัญญาณเท่านั้น แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาการสื่อสารสัญญาณในลักษณะจำนวนหลายช่องสัญญาณ (WDM) ดังนั้นเนื้อหาในส่วนต่อไปที่จะนำเสนอจึงเป็นการทำงานและลักษณะการสร้างสัญญาณคอนจูเกตสำหรับ OPC แต่ละประเภทสำหรับการใช้งานบน WDM

2.7.3.1 OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารหลายช่องสัญญาณ (WDM)

ดังที่กล่าวไว้แล้วว่า OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นนั้นสามารถแบ่งย่อยออกได้อีกสองลักษณะคือ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะเลื่อนแบนด์วิดท์และ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ โดยทั้งสองลักษณะนั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.7.3.1.1 OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะเลื่อนแบนด์วิดท์

กระบวนการสร้างสัญญาณคอนจูเกตสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะเลื่อนแบนด์วิดท์ สำหรับการสื่อสารหลายสัญญาณนั้น จะมีรูปแบบคล้ายกับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น สำหรับการสื่อสารช่องสัญญาณเดียว โดยจะใช้สัญญาณ pump เพียงสัญญาณเดียวเท่านั้น ดังรูปที่ 2.20



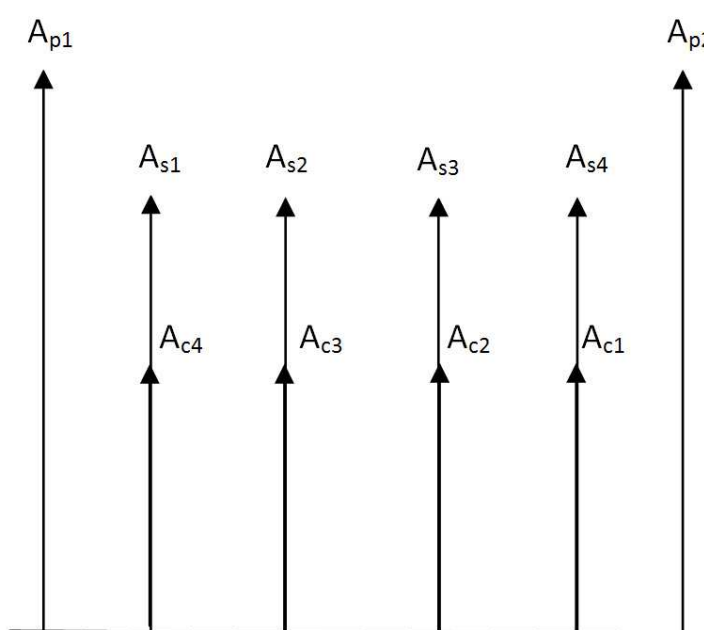
รูปที่ 2.20 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะเลื่อนแบนด์วิดท์

จากรูปที่ 2.20 สัญญาณปั๊มจะมีตัวเดียวและอยู่ที่ความยาวคลื่น A_p ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับปรากฏการณ์ FWM และจะทำให้เกิดสัญญาณคอนจูเกตที่เหมาะสมได้ โดยเมื่อสัญญาณตั้งต้น A_{s1} - A_{s4} เดินทางผ่าน OPC แล้วนั้น จะเกิดการคอนจูเกตขึ้น และสัญญาณคอนจูเกต A_{c1} - A_{c4} ที่เกิดขึ้นนั้น จะเกิดฝั่งตรงข้ามกับสัญญาณตั้งต้น โดยสัญญาณคอนจูเกตจะเกิดขึ้นโดยสลับลำดับกับสัญญาณตั้งต้น จะเห็นได้ว่า OPC ชนิดนี้มีการเลื่อนแบนด์วิดท์สำหรับสัญญาณตั้งต้นและสัญญาณคอนจูเกต และสัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้นจะเกิดที่ตำแหน่งความ

ยาวคลื่นแตกต่างไปจากสัญญาณตั้งต้นเดิม ดังนั้นเราจึงเรียก OPC ชนิดนี้เป็น OPC แบบเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะเลื่อนแบนด์วิดท์

2.7.3.1.2 OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะไม่เลื่อนแบนด์วิดท์

สำหรับ OPC แบบเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะไม่เลื่อนแบนด์วิดท์นี้ จะใช้สัญญาณป้อนเพียงตัวเดียว คล้ายกับ OPC ลักษณะข้างต้น ดังรูปที่ 2.21



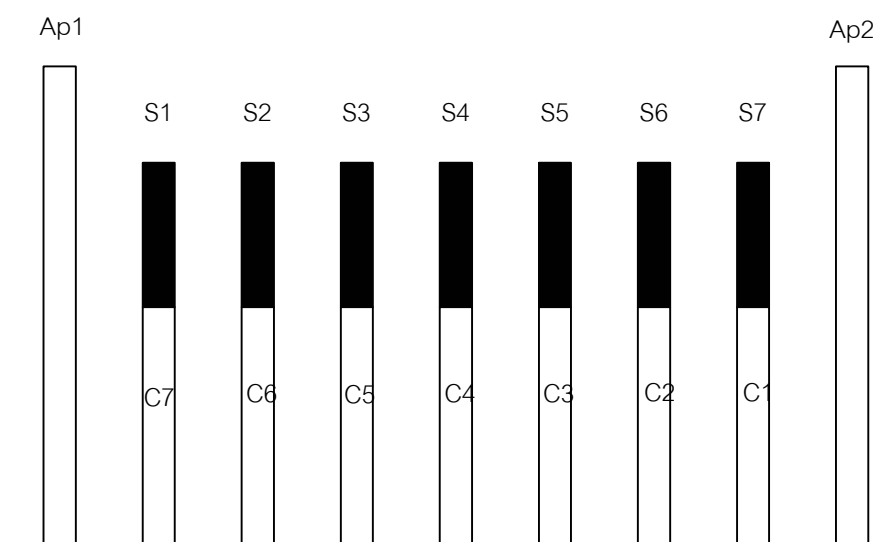
รูปที่ 2.21 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะไม่เลื่อนแบนด์วิดท์

จากรูปที่ 2.21 แสดงการสร้างสัญญาณคอนจูเกตของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ โดยจะมีสัญญาณป้อนกำลังสูงอยู่ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการคอนจูเกตที่สมบูรณ์ เมื่อสัญญาณตั้งต้น A_{s1} - A_{s4} เดินทางผ่าน OPC แล้วนั้นจะเกิดสัญญาณคอนจูเกต A_{c1} - A_{c4} ขึ้น โดยสัญญาณคอนจูเกตเหล่านี้จะเกิดขึ้นในลำดับที่สลับกับสัญญาณตั้งต้น แต่ยังคงอยู่ในช่วงแบนด์วิดท์เดิม เราจึงเรียก OPC ชนิดนี้ว่า OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นลักษณะไม่เลื่อนแบนด์วิดท์

2.7.3.2 OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารหลายช่องสัญญาณ

คุณสมบัติสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับช่องสัญญาณเดียวจะไม่สามารถใช้ได้ในการสื่อสารแบบ WDM โดยในการใช้งาน WDM นั้น OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาว

คลื่นจะเปลี่ยนคุณสมบัติเป็นการไม่เลื่อนแบนด์วิดท์แทน ในขณะที่สัญญาณคอนจูเกตละ สัญญาณตั้งต้นจะเกิดการสลับตำแหน่งความยาวคลื่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.22



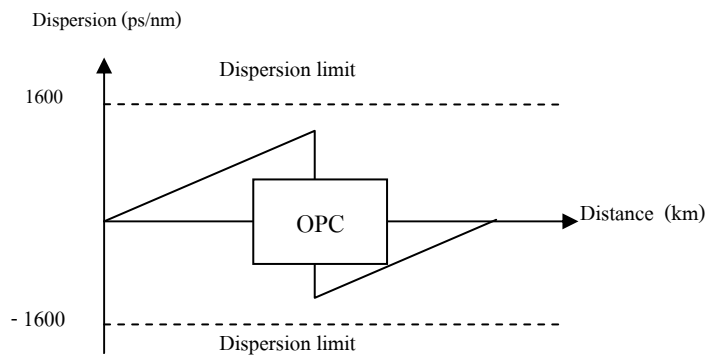
รูปที่ 2.22 คุณสมบัติการไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น สำหรับการสื่อสารหลายช่องสัญญาณ

จากรูปที่ 2.22 แสดงถึงลักษณะการสร้างสัญญาณคอนจูเกตของ OPC แบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ พบว่าสัญญาณคอนจูเกต C1-C7 จะเกิดขึ้นสลับตำแหน่งกับสัญญาณตั้งต้นเดิม S1-S7 แต่จะสังเกตได้ว่า ช่วงแบนด์วิดท์ของสัญญาณทั้งก่อนเข้าและหลักออกจาก OPC แบบนี้ จะเป็นช่วงเดียวกัน จึงเป็นข้อดีของ OPC ชนิดนี้คือการประหยัดและใช้ประโยชน์จากช่วงแบนด์วิดท์ได้คุ้มค่าที่สุด

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวาง OPC บนโครงข่ายเส้นใยแสงทั่วไป

ในบทนี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธีที่เป็นมาตรฐานในการวาง OPC บนโครงข่ายเส้นใยแสงใดๆ จากที่ได้กล่าวไว้แล้วว่า หากใช้งาน OPC โดยวางไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของทุกข่ายเชื่อมใยในโครงข่ายใดๆ ดังรูปที่ 3.1 จะสามารถขจัดผลของดิสเพอร์ชันสะสมในโครงข่ายโดยไม่เกินขีดจำกัดได้

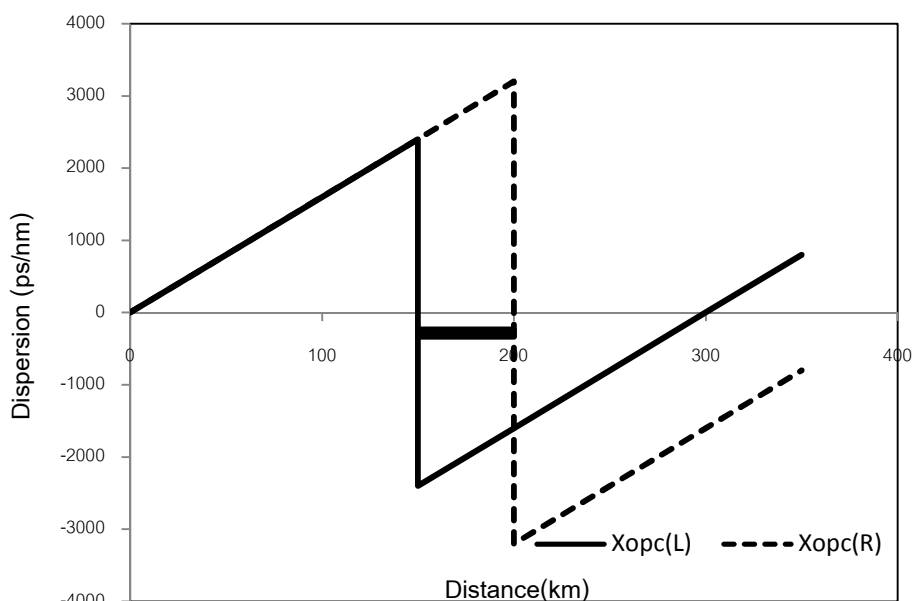


รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของ OPC โดยวางไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของข่ายเชื่อมใย

จากรูปที่ 3.1 เมื่อสัญญาณถูกปล่อยออกจากตัวส่งเดินทางในเส้นใยแสง รูปคลื่นสัญญาณจะเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นในฝั่งครึ่งแรกของระบบแต่จะสามารถกลับมาเป็นรูปคลื่นสัญญาณเดิมที่ไม่มีความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นที่เครื่องรับสัญญาณได้เมื่อวาง OPC ไว้ตำแหน่งกึ่งกลางระบบ แต่ในขณะเดียวกัน วิธีการดังกล่าวต้องใช้จำนวนของ OPC เท่ากับจำนวนของทุกข่ายเชื่อมใยเช่นกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาให้วิธีการใช้งาน OPC บนโครงข่ายเส้นใยแสงให้ดียิ่งขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอระเบียบวิธีการวาง OPC โดยไม่ต้องวาง ณ กึ่งกลางของข่ายเชื่อมใยทั้งหมด ทำให้การใช้งาน OPC บนโครงข่ายเส้นใยแสงมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

3.1 การคำนวณตำแหน่งในการวาง OPC บนข่ายเชื่อมใย

การคำนวณตำแหน่งในการวาง OPC ในแต่ละทราฟฟิกของโครงข่ายนั้นจะพิจารณาจากเงื่อนไขที่ว่าดิสเพอร์ชันสะสมเมื่อถึงปลายทางจะต้องไม่เกินขีดจำกัดดิสเพอร์ชันที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดขีดจำกัดดิสเพอร์ชันไว้ที่ 800 ps/nm/km สำหรับอัตราข้อมูลต่อช่องสัญญาณเท่ากับ 40 Gbps ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น บนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าบวก

รูปที่ 3.2 แสดงถึงช่วงการวาง OPC (แถบสีดำ) พบว่าเมื่อ สัญญาณแสงเดินทางไปในเส้นใยแสงจะมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเพิ่มขึ้น ตามระยะทาง ดังสมการที่ (3.1) เมื่อถึงจุดวางเครื่องสังยุคเฟสแสง ค่าดิสเพอร์ชันจะเกิดการเปลี่ยนเครื่องหมายจากบวกเป็นลบและจะเริ่มสะสม เพิ่มขึ้นอีกตามระยะทางที่เหลือ

$$-800 \leq D_{acc} = D_{\lambda} L \leq 800 \quad (3.1)$$

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

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

L คือ ระยะทาง (km)

ในการวางตำแหน่งของ OPC นั้นสามารถที่จะวางเป็นช่วงได้ โดยเราจะพิจารณาการวางได้ 2 กรณีดังนี้

1. กรณีที่ปลายทางนั้นมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมในช่วงค่าขีดจำกัดที่เป็นช่วงบวก (800 ps/nm) หรือเส้นทึบในรูปที่ 3.2

2. กรณีที่ปลายทางนั้นมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมในช่วงค่าขีดจำกัดที่เป็นช่วงลบ (-800 ps/nm) หรือเส้นประในรูปที่ 3.2

ดังนั้นเราจะกำหนดขอบเขตด้านซ้ายและขวาของช่วงการวางได้ดังนี้

$$+800 = -D_\lambda X_{OPC_L} + D_\lambda (LP - X_{OPC_L}) \quad (3.2)$$

$$-800 = -D_\lambda X_{OPC_R} + D_\lambda (LP - X_{OPC_R}) \quad (3.3)$$

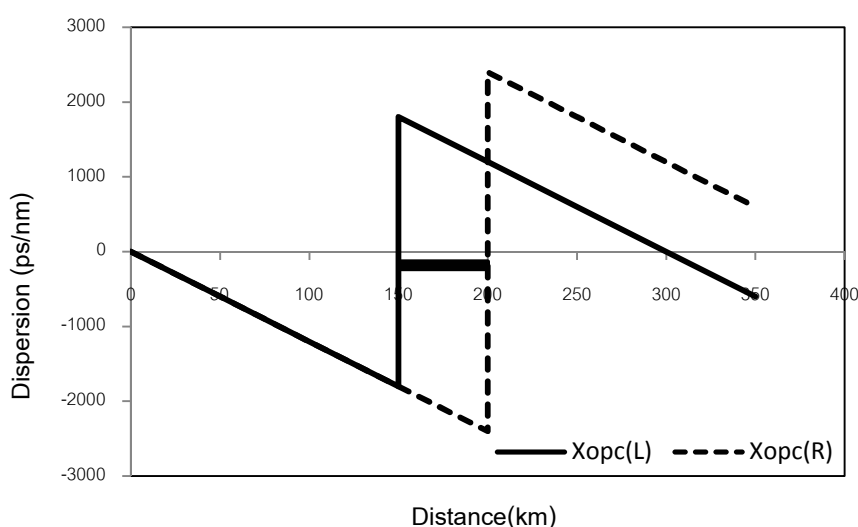
โดยที่ X_{OPC_L} คือ ขอบเขตด้านซ้ายของการวาง OPC
 X_{OPC_R} คือ ขอบเขตด้านขวาของการวาง OPC

สมการที่ (3.2) และ (3.3) อธิบายถึงขีดจำกัดดิสเพอร์ชันในช่วงค่าบวกและลบตามลำดับ พจน์แรกของการวางคือค่าดิสเพอร์ชัน สะสมที่เกิดจากการกลับเครื่องหมาย ณ ตำแหน่งที่วาง OPC แล้วรวมกับ ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่เป็นบวกของระยะทางที่เหลือในทราฟฟิกนั้น เมื่อแก้สมการข้างต้น จะได้ตำแหน่งขอบเขตด้านซ้ายและขวาคือ

$$X_{OPC_L} = \frac{D_\lambda (LP) - 800}{2D_\lambda} \quad (3.4)$$

$$X_{OPC_R} = \frac{D_\lambda (LP) + 800}{2D_\lambda} \quad (3.5)$$

เงื่อนไขการวาง OPC ในสมการที่ (3.2) - (3.5) นั้นตั้งโดยสมมติฐานที่ว่าค่าดิสเพอร์ชันในระบบ (D_λ) มีค่าเป็นบวก โดยค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้เส้นใยแสงในระบบ ซึ่งหากมีการเลือกใช้ค่าดิสเพอร์ชันที่เป็นค่าลบนั้น การคำนวณตำแหน่งในการวาง OPC ในแต่ละทราฟฟิกของโครงข่ายนั้นจะพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบ

รูปที่ 3.3 แสดงถึงการสะสมของดิสเพอร์ชันเมื่อใช้เส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันเป็นลบ จะเห็นได้ว่ารูปกราฟจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับรูปที่ 3.2 โดยสิ้นเชิง ดิสเพอร์ชันจะสะสมด้วยความชันค่าลบตามค่าดิสเพอร์ชันในระบบ ทำให้การกำหนดขอบเขตด้านซ้ายและขวาของช่วงการวาง OPC เปลี่ยนไปตามสมการที่ (3.6) และ (3.7) ดังนี้

$$-800 = -D_\lambda X_{OPC_L} + D_\lambda (LP - X_{OPC_L}) \quad (3.6)$$

$$+800 = -D_\lambda X_{OPC_R} + D_\lambda (LP - X_{OPC_R}) \quad (3.7)$$

จากการแก้สมการที่ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับแล้วนั้น จะได้ตำแหน่งขอบเขตด้านซ้ายและขวาของช่วงการวาง OPC สำหรับระบบที่ใช้เส้นใยแสงที่มีดิสเพอร์ชันค่าลบได้ ดังนี้

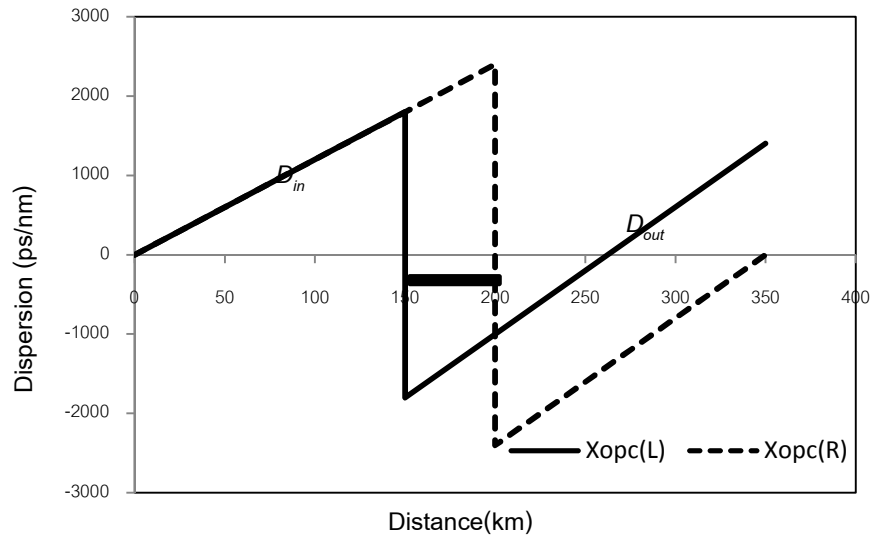
$$X_{OPC_L} = \frac{D_\lambda (LP) + 800}{2D_\lambda} \quad (3.8)$$

$$X_{OPC_R} = \frac{D_\lambda (LP) - 800}{2D_\lambda} \quad (3.9)$$

จะเห็นได้ว่าสำหรับระบบที่ใช้เส้นใยแสงที่มีค่าดิสเพอร์ชันที่แตกต่างกันนั้น ขอบเขตด้านซ้ายและขวาของช่วงการวาง OPC จะมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน มีความแตกต่างกันที่เครื่องหมายเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งขอบเขตด้านซ้ายและขวาตามสมการที่(3.4), (3.5), (3.8)และ (3.9) นั้นอธิบายได้เฉพาะ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นเท่านั้น เนื่องจากลักษณะการกลับเฟสของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นนี้จะทำให้สัญญาณที่ออกจาก OPC กลับมา ณ ตำแหน่งความยาวคลื่นเดิม ทำให้ความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชัน (D_λ) ก่อนเข้า OPC และหลังออก OPC มีค่าเท่ากัน เป็นไปตามสมการที่(3.2), (3.3), (3.6) และ (3.7)

ในขณะที่ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นทั้งประเภทเลื่อนแบนด์วิดท์และไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จะมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างไปจาก OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น เนื่องจากสัญญาณที่กลับเฟสหลังจากออกจาก OPC นั้นตกอยู่ ณ ตำแหน่งความยาวคลื่นที่แตกต่างกับตำแหน่งความยาวคลื่นเดิม จึงทำให้ค่าดิสเพอร์ชันก่อนเข้าและหลังจากออกจาก OPC มีค่าแตกต่างกัน สำหรับระบบที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าบวกนั้น การคำนวณตำแหน่งการวาง OPC สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบน
โครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าบวก

จากรูปที่ 3.4 แสดงถึงรูปแบบการสังยุคเฟสแสงของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น จะเห็นได้ว่า ในช่วงก่อนเข้า OPC นั้นดิสเพอร์ชันสะสมจะเพิ่มขึ้นด้วยความชันอัตราหนึ่ง (D_{in}) ในขณะที่ในช่วงออกจาก OPC แล้วนั้น ค่าดิสเพอร์ชันสะสมจะเพิ่มขึ้นด้วยความชันอีกอัตราหนึ่ง (D_{out}) ซึ่งทั้งสองค่าดังกล่าวมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากคุณสมบัติของ OPC ชนิดดังกล่าว ดังนั้นเราจะกำหนดขอบเขตด้านซ้ายและขวาของช่วงการวางสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นได้ตามสมการที่ (3.10) และ (3.11)

$$+800 = -D_{in} X_{OPC_L} + D_{out} (LP - X_{OPC_L}) \quad (3.10)$$

$$-800 = -D_{in} X_{OPC_R} + D_{out} (LP - X_{OPC_R}) \quad (3.11)$$

โดยที่ D_{in} คือ ค่าดิสเพอร์ชันก่อนเข้า OPC

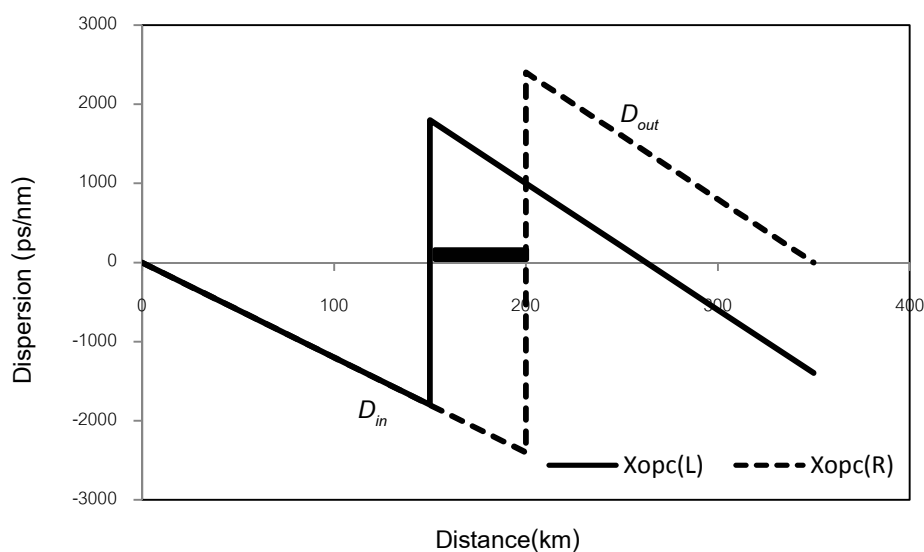
D_{out} คือ ค่าดิสเพอร์ชันหลังออกจาก OPC

จากสมการที่ (3.10) และ (3.11) ทำให้การคำนวณขอบเขตซ้ายและขวานั้นของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าบวกเป็นไปตามสมการที่ (3.12) และ (3.13)

$$X_{OPC_L} = \frac{D_{out} (LP) - 800}{D_{in} + D_{out}} \quad (3.12)$$

$$X_{OPC_R} = \frac{D_{out}(LP) + 800}{D_{in} + D_{out}} \quad (3.13)$$

สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบนั้น จะมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน โดยสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบ

การคำนวณขอบเขตซ้ายและขวาของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบเป็นไปตามสมการที่ (3.14) และ (3.15) ตามลำดับ

$$X_{OPC_L} = \frac{D_{out}(LP) + 800}{D_{in} + D_{out}} \quad (3.14)$$

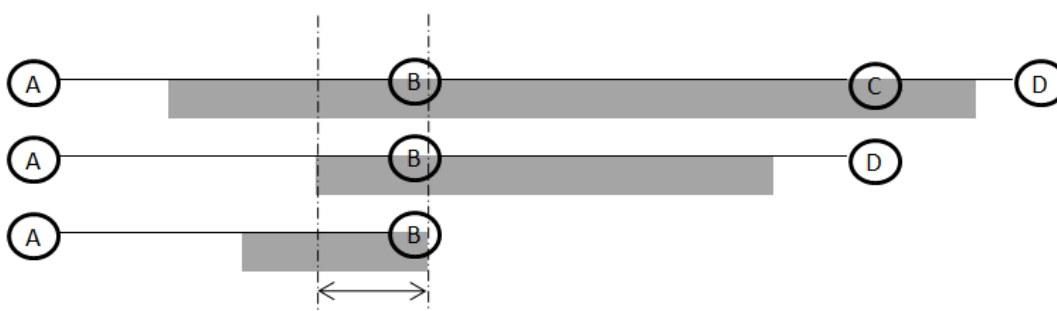
$$X_{OPC_R} = \frac{D_{out}(LP) - 800}{D_{in} + D_{out}} \quad (3.15)$$

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ R ความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชัน

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้นำเสนอการคำนวณขอบเขตการวางของ OPC ทุกชนิดแล้วนั้น จะเห็นได้ว่า การวาง OPC บนข่ายเชื่อมโยงใดๆนั้นสามารถวางเป็นช่วงๆได้ตามที่คำนวณได้ ไม่

จำเป็นที่จะต้องวาง OPC เพียงแค่จุดใดจุดหนึ่งบนข่ายเชื่อมโยง ตราบเท่าที่ดิสเพอร์ชันสะสมที่ระยะปลายทางของการสื่อสารใดๆไม่เกินขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน 800 ps/nm

เมื่อคำนวณช่วงการวาง OPC ดังกล่าวสำหรับทุกๆทราฟฟิกแล้วนั้น ผลลัพธ์คือ ทุกๆข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายมีช่วงการวาง OPC ที่แตกต่างกันไป ซึ่งในหลายๆทราฟฟิกของการสื่อสาร อาจจะมีการใช้ข่ายเชื่อมโยงร่วมกันในการสื่อสาร และข่ายเชื่อมโยงเหล่านี้มีช่วงการวาง OPC ในแต่ละทราฟฟิก หลักการวาง OPC ที่เหมาะสมที่สุดคือ การใช้หลักการซ้อนทับของช่วงการวาง OPC ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงใดๆ จึงจะยกตัวอย่างรูปที่ 3.6 เพื่อเป็นการประกอบ

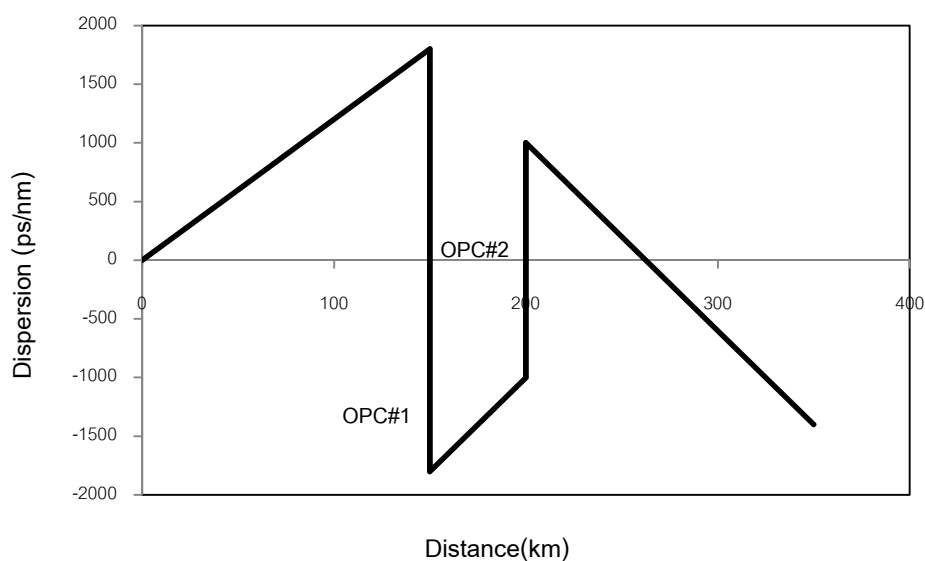


รูปที่ 3.6 หลักการซ้อนทับของช่วงการวาง OPC ในแต่ละข่ายเชื่อมโยง

รูปที่ 3.6 แสดงถึงหลักการซ้อนทับของช่วงการวาง OPC ในแต่ละข่ายเชื่อมโยง ตัวอย่างในที่นี้เป็นการสื่อสารจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางคือ

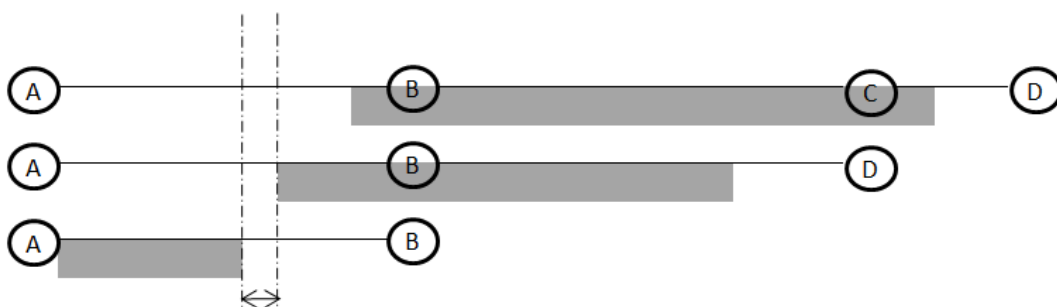
- โหนด A ไปยังโหนด D ผ่านข่ายเชื่อมโยง AB, BC และ CD
- โหนด A ไปยังโหนด D ผ่านข่ายเชื่อมโยง AB และ BD
- โหนด A ไปยังโหนด B ผ่านข่ายเชื่อมโยง AB

ทั้ง 3 ทราฟฟิกนั้นมีช่วงการวาง OPC (แถบสีเทา) ซึ่งคำนวณได้จากหัวข้อที่ผ่านมา ดังแสดงในรูป นอกจากนั้นยังมีการใช้ข่ายเชื่อมโยงในการสื่อสารร่วมกันคือ ข่ายเชื่อมโยง AB เพราะฉะนั้นหลังจากขั้นตอนการคำนวณขอบเขตการวางของ OPC แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การพิจารณาช่วงซ้อนทับของการวาง OPC (ช่วงระหว่างเส้นประ) สาเหตุของการใช้หลักการซ้อนทับดังกล่าว เพื่อเป็นการออกแบบการวาง OPC ให้มีประสิทธิภาพที่สุด ใช้ OPC ในจำนวนที่น้อยที่สุด โดยที่ดิสเพอร์ชันสะสมยังอยู่ในเกณฑ์ที่ระบบยังรับได้ นอกจากนั้นหากในข่ายเชื่อมโยงมีการวาง OPC มากกว่า 1 ตัวในระยะทางที่ไกลมากเกินไปหรือห่างมากเกินไป ก็อาจทำให้เกิดปัญหาดิสเพอร์ชันสะสมเกินขีดจำกัดที่ปลายทางดังรูปที่ 3.7



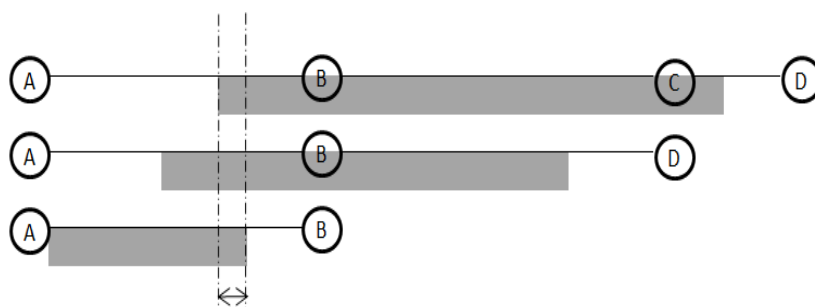
รูปที่ 3.7 ดิสเพอร์ชันสะสมเกินขีดจำกัดที่ปลายทางเนื่องจากการวาง OPC ใกล้เคียงเกินไป

แต่โดยทั่วไปแล้ว สำหรับโครงข่ายใดๆ อาจเกิดกรณีที่แต่ละข่ายเชื่อมโยงไม่สามารถซ้อนทับกันได้ทั้งหมดดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างของทราฟฟิกที่เกิดกรณีไม่ซ้อนทับกันของช่วงการวาง OPC

จากรูปที่ 3.8 แสดงถึงกรณีที่ช่วงการวาง OPC บนข่ายเชื่อมโยง AB ไม่สามารถที่จะซ้อนทับกันได้ทั้งหมด (ช่วงระหว่างเส้นประ) ซึ่งทำให้ไม่สามารถวาง OPC บนข่ายเชื่อมโยง AB ได้เพียงตัวเดียว สาเหตุหลักของปัญหาดังกล่าวคือ ระยะทางของทราฟฟิกใดๆหรือข่ายเชื่อมโยงใดๆ นั้นมีระยะที่ห่างกันมากเกินไป โดยวิธีแก้ไขทำได้คือ ยึดช่วงการวาง OPC ของแต่ละทราฟฟิกเข้ามาให้มีการซ้อนทับกัน หรืออีกนัยหนึ่งคือการย่อขนาดของโครงข่ายหรือการลดระยะทางของข่ายเชื่อมโยงที่ประกอบอยู่ในทราฟฟิกลง ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การลดระยะทางของขั้วเชื่อมใยในทราฟฟิกวงเพื่อให้เกิด
การซ้อนทับของช่วงการวาง OPC

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อลดระยะทางของขั้วเชื่อมใยที่ประกอบอยู่ในทราฟฟิกวง จะทำให้เกิดการซ้อนทับของช่วงการวาง OPC ขึ้น ทำให้ดำเนินการตามระเบียบวิธีต่อไปได้ ดังนั้น พารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดอัตราลดขนาดของโครงข่ายหรือไม่นั้น เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา เป็นสำคัญ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้พารามิเตอร์ประเมินโครงข่ายดังกล่าวเรียกว่า พารามิเตอร์ R ซึ่งพารามิเตอร์ R จะเป็นตัวกำหนดว่ามีความจำเป็นต้องลดขนาดของโครงข่าย หรือไม่ สมมติฐานในการคำนวณ R มีดังต่อไปนี้

- สมมติฐานจากการลดขนาดโครงข่ายลดเป็นจำนวน R เท่า หรือในทางกลับกัน คือลดระยะทางของทราฟฟิกวง R เท่า ตามสมการที่ (3.16)

$$LP_R = \frac{LP}{R} \quad (3.16)$$

- สมมติฐานว่าขอบเขตด้านซ้ายเกิดจากการลดขนาดของความยาวของขั้วเชื่อมใยแรกลง R เท่า ตามสมการที่ (3.17)

$$X_{OPC_L} = \frac{X_1}{R} \quad (3.17)$$

โดยที่ X_1 คือ ความยาวของขั้วเชื่อมใยแรกในทราฟฟิกการสื่อสาร

จากสมมติฐานดังกล่าวประกอบกับสมการที่ (3.4), (3.8), (3.12) และ (3.14) ซึ่งเป็นสมการกำหนดขอบเขตด้านซ้ายของการวาง OPC แต่ละประเภทและดีสเพอร์ชันที่ใช้แล้วนั้น เราจะสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ R ได้ดังนี้

3.2.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ R ของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น

- ระบบที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าบวก

$$R = \frac{D_\lambda(LP) - 2D_\lambda X_1}{800} \quad (3.18)$$

- ระบบที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบ

$$R = \frac{2D_\lambda X_1 - D_\lambda(LP)}{800} \quad (3.19)$$

3.2.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ R ของ OPC ชนิดความยาวคลื่น

- ระบบใช้ดิสเพอร์ชันค่าบวก

$$R = \frac{D_{out}(LP) - (D_{in} + D_{out})X_1}{800} \quad (3.20)$$

- ระบบใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบ

$$R = \frac{(D_{in} + D_{out})X_1 - D_{out}(LP)}{800} \quad (3.21)$$

จากหลักการคำนวณพารามิเตอร์ R ข้างต้น จะเห็นได้ว่าค่า R ของ OPC ทั้งสองชนิดใน ส่วนของทั้งระบบดิสเพอร์ชันค่าบวกและลบนั้น มีความสัมพันธ์กับค่าดิสเพอร์ชัน ($D_\lambda, D_{in}, D_{out}$) ซึ่งค่าดิสเพอร์ชันในระบบมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความยาวคลื่นตามประเภทของเส้นใยแสงที่ใช้ในโครงข่ายเช่นกัน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาการใช้งาน OPC ผ่านเส้นใยแสงประเภท Negative Dispersion, Non-Zero Dispersion Shifted Fiber (Negative NZ-DSF, ITU-T G.655) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นดังนี้

$$\begin{aligned} D_\lambda &= D_{1550} + S_{1550} * (-1550) \\ &= -3 + 0.05 * (\lambda - 1550) \end{aligned} \quad (3.22)$$

โดยที่ D_{1550} คือ ค่าดิสเพอร์ชันของ NZ-DSF ที่ความยาวคลื่น
1550 nm (ps/nm/km)

S_{1550} คือ ความชันดิสเพอร์ชันของ NZ-DSF ที่ความยาวคลื่น

1550 nm ($ps/nm^2/km$)

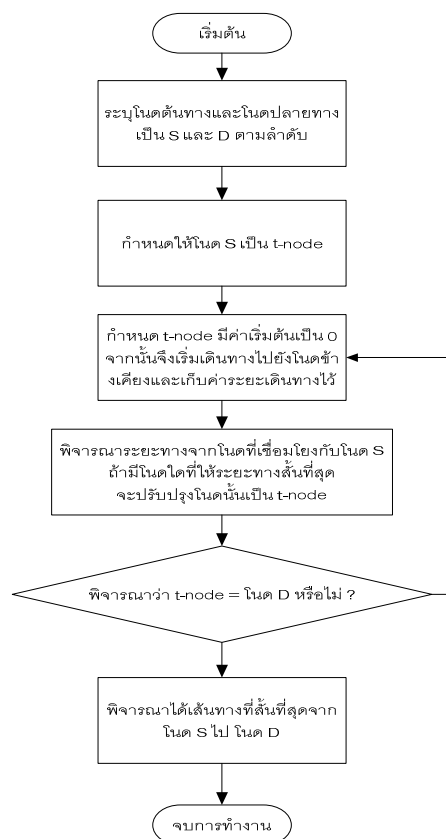
พารามิเตอร์ที่ได้จากสมการที่ (3.22) เป็นค่าที่อ้างอิงจากเส้นใยแสงประเภท Negative NZ-DSF ที่มีขายในท้องตลาด ซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันเป็น $-3 ps/nm/km$ และความชันเป็น $0.05 ps/nm^2/km$ ณ ความยาวคลื่น 1550 nm โดยจากสมการที่ (3.22) อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิสเพอร์ชันที่ใช้ในระบบกับช่วงความยาวคลื่น และเมื่อนำมาประกอบกับสมการความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ R จะได้ว่า ค่า R มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความยาวคลื่นเช่นกันและเป็นตัวประเมินโครงข่ายว่าสามารถใช้ช่วงความยาวคลื่นและช่วงค่าดิสเพอร์ชันที่เป็นไปได้เท่าใดที่ทำให้สามารถใช้ระเบียบวิธีการวาง OPC โดยไม่ต้องลดขนาดโครงข่าย

3.3 ระเบียบวิธีการวาง OPC บนโครงข่ายเส้นใยแสงทั่วไป

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงระเบียบวิธี (algorithm) ที่จะใช้ในการออกแบบการวาง OPC ณ ตำแหน่งใดๆที่ไม่ใช่กึ่งกลางของข่ายเชื่อมโยง โดยมีหลักการคำนวณดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1 ซึ่งในการประยุกต์ใช้กับโครงข่ายใดๆแล้วนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ระเบียบวิธีจะสามารถใช้ได้ทั่วไปสำหรับทุกๆโครงข่าย เพราะฉะนั้นการจัดระเบียบวิธีและสมมติฐานในการออกแบบทั่วไปจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยหลักการของระเบียบวิธีที่จะนำเสนอนี้มีขั้นตอนย่อย 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. การคำนวณระยะทางระหว่างทุกๆคู่อินดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path)

สำหรับขั้นตอนที่ 1 เป็นการหากราฟฟิกการสื่อสารของทุกๆคู่อินดโดยใช้ระเบียบวิธีหาของ Dijkstra (Dijkstra Algorithm) ซึ่งจะมีข้อมูลที่ป้อนเข้าคือ โครงข่ายตัวอย่าง 3 โครงข่าย ซึ่งประกอบด้วยลักษณะที่ไม่เหมือนกันคือ จำนวนอินด จำนวนข่ายเชื่อมโยงและระยะทาง โดยผลลัพธ์จากขั้นตอนนี้คือ การระบุการสื่อสารทุกกราฟฟิก, ระยะทางของกราฟฟิกนั้นๆ และข่ายเชื่อมโยงที่ผ่าน ซึ่งผลลัพธ์โดยละเอียดจะแสดงไว้ในบทที่ 4 และภาคผนวก ซึ่งผังงานของขั้นตอนที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ผังงานแสดงระเบียบวิธีของ Dijkstra Algorithm

- การคำนวณช่วงดิสเพอร์ชันที่ใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R ซึ่งวิธีการคำนวณแบ่งตามแต่ละประเภทของ OPC

ในการหาช่วงความยาวคลื่นและช่วงดิสเพอร์ชันนั้น จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของโครงข่ายตัวอย่างประกอบกับวิธีการคำนวณแบ่งตามแต่ละชนิดของ OPC โดยกระบวนการนี้จะไม่เป็นไปในรูปแบบของระเบียบวิธี แต่จะเป็นขั้นตอนในเชิงเงื่อนไขว่าจะต้องเลือกค่าความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันช่วงใดที่จะสามารถใช้วิธีการวาง OPC ตามระเบียบวิธีนี้ได้โดยไม่ต้องลดขนาดของโครงข่าย โดยจะอาศัยข้อมูลป้อนเข้าคือ ลักษณะองค์ประกอบของโครงข่าย, ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ R ตามแต่ละชนิดของ OPC และ คุณสมบัติเฉพาะตัวของเส้นใยแสง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ ช่วงดิสเพอร์ชันที่ใช้งานในระบบ จะนำไปใช้ในขั้นตอนที่ 3 ถัดไป

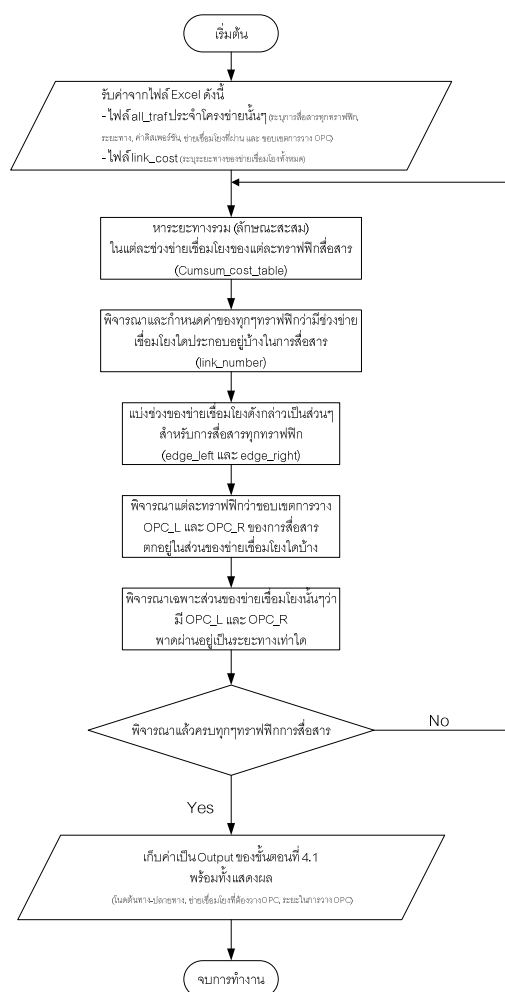
- การคำนวณช่วงในการวาง OPC สำหรับการสื่อสารทุกๆ โหนด

เมื่อได้ผลลัพธ์คือช่วงค่าดิสเพอร์ชันจากขั้นตอนที่ 2 จึงนำผลลัพธ์ดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณขอบเขตด้านซ้ายและขวาในการวาง OPC สำหรับทุกๆ ทราฟฟิก ในการคำนวณนั้นจะแบ่งตามชนิดของ OPC และมีสมการในการคำนวณดังอธิบายในหัวข้อที่ 3.1 โดยในขั้นตอนนี้จะมีข้อมูลที่ป้อนเข้าคือ โครงข่ายตัวอย่าง 3 โครงข่าย หลักการคำนวณขอบเขตด้านซ้ายและขวาของ

การวาง OPC แต่ละชนิด และ ค่าดีสเพอร์ชันจากขั้นตอนที่ 2 โดยผลลัพธ์จากขั้นตอนนี้คือ การระบุ การสื่อสารทุกทราฟฟิก, ระยะทาง, ค่าดีสเพอร์ชัน, ข่ายเชื่อมโยงที่ผ่าน และ ขอบเขตการวาง OPC โดยผลลัพธ์จะถูกจัดเป็นรูปแบบไว้เพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าไปในขั้นตอนที่ 4

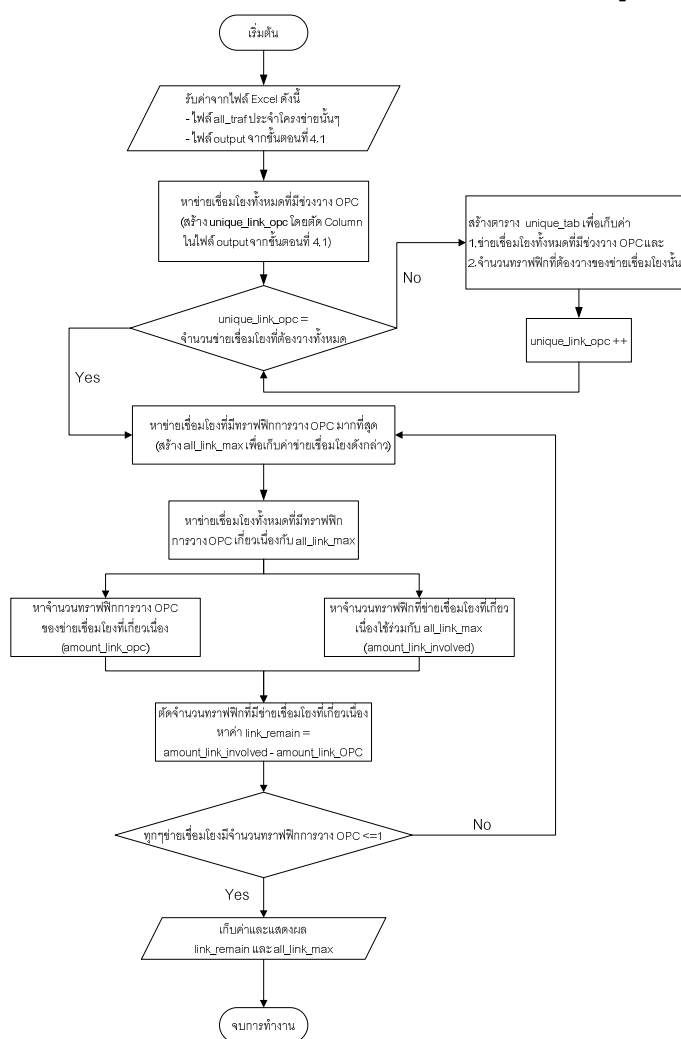
4. การกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC สำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยงโดยใช้วิธี ขั้นตอน

สำหรับขั้นตอนที่ 4 จะใช้ผลลัพธ์ที่ถูกจัดรูปแบบเรียบร้อยแล้วจากขั้นตอนที่ 3 มาเป็น ข้อมูลนำเข้าไป ซึ่งระเบียบวิธีในขั้นตอนที่ 4 นี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนย่อย ส่วนแรกคือ การพิจารณาช่วง การวาง OPC ในของข่ายเชื่อมโยงด้วยวิธีการขั้นตอน โดยจะพิจารณาทุกๆทราฟฟิกการสื่อสารใน โครงข่ายนั้นๆประกอบกับช่วงการวาง OPC จากขั้นตอนที่ผ่านมา โดยจะได้ผลลัพธ์คือ ช่วงการ วาง OPC บนข่ายเชื่อมโยงและทราฟฟิกที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของข่ายเชื่อมโยงนั้น ซึ่งผังงานในส่วน แรกของขั้นตอนที่ 4 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ผังงานการพิจารณาช่วงการวาง OPC ในของข่ายเชื่อมโยงด้วยวิธีการขั้นตอน

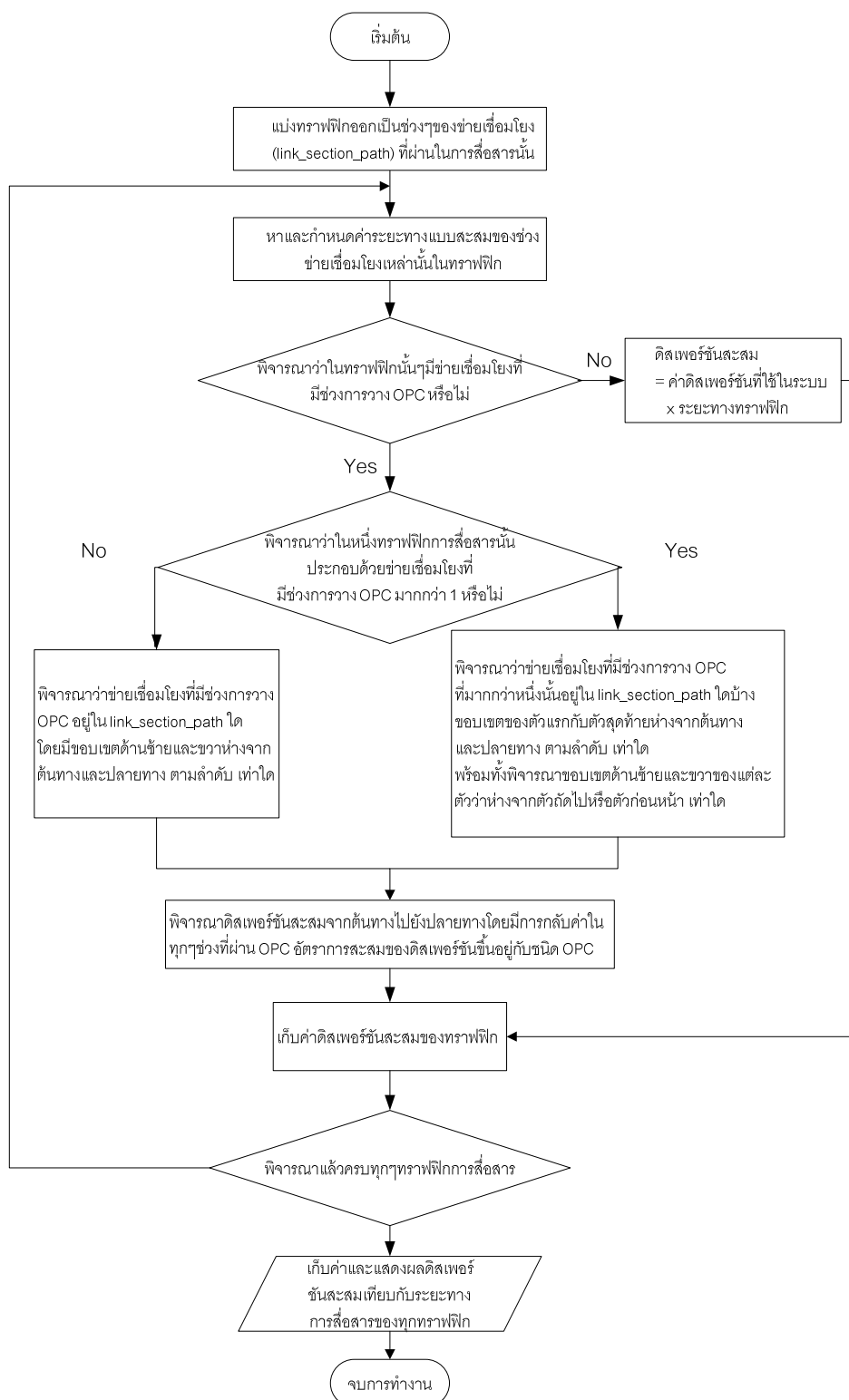
ในส่วนที่สองของขั้นตอนที่ 4 นั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดข่ายเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการวาง OPC ของทั้งโครงข่าย โดยจะใช้วิธีตัดทอนข่ายเชื่อมโยงที่มีช่วงการวาง OPC ช้ำกับข่ายเชื่อมโยงที่ครอบคลุมมากกว่าออก ระเบียบวิธีของส่วนที่สองจะใช้ผลลัพธ์จากส่วนแรกในการพิจารณาประกอบการตัดทอนข่ายเชื่อมโยง รายละเอียดของส่วนที่สองนี้จะแสดงไว้ในบทที่ 4 และภาคผนวกตามลำดับ ซึ่งผังงานในส่วนที่สองของขั้นตอนที่ 4 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ผังงานการกำหนดข่ายเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการวาง OPC ของทั้งโครงข่าย

5. การทดสอบค่าดีสเพอร์ชันสะสมในการวาง OPC สำหรับการสื่อสารทุกๆ โหนด

สำหรับขั้นตอนสุดท้ายเป็นการทดสอบว่าเมื่อวาง OPC ในข่ายเชื่อมโยงที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 4 แล้วนั้น ค่าดีสเพอร์ชันสะสมสำหรับทุกๆ กราฟฟิคการสื่อสารมีค่าไม่เกินขีดจำกัดดีสเพอร์ชันที่ได้ตั้งไว้หรือไม่ ซึ่งผังงานสำหรับขั้นตอนที่ 5 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ผังงานการทดสอบค่าดิสเพอร์ชันสะสมในการวาง OPC สำหรับการสื่อสารทุกๆคุโนด

บทที่ 4

การวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น ในโครงข่าย wavelength-routed แบบเมช

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น OPC ในเชิงทฤษฎีนั้นจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นและชนิดเลื่อนความยาวคลื่น ในการคำนวณระเบียบวิธีการวาง OPC ในโครงข่าย wavelength-routed แบบเมช ในขั้นตอนการหาช่วงค่าดิสเพอร์ชันที่จะใช้ในโครงข่าย โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับพารามิเตอร์ R จะมีความแตกต่างกันไปตามแต่ละประเภทของ OPC โดยขั้นตอนอื่น ๆ นั้นจะมีลักษณะที่เหมือนกัน โดยระเบียบวิธีการวาง OPC สามารถแบ่งได้ดังนี้

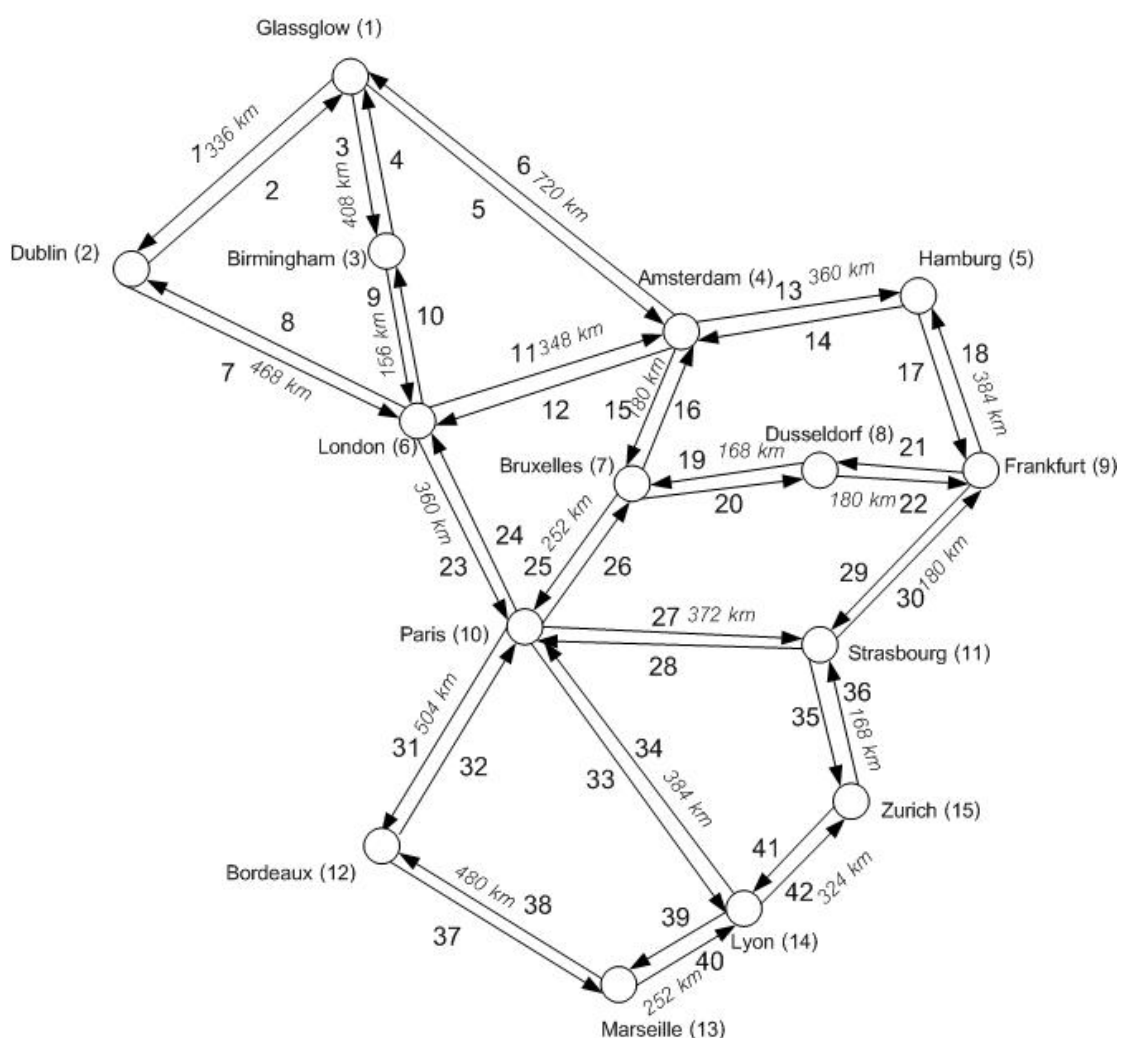
1. การคำนวณระยะทางระหว่างทุกคู่โหนดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path)
2. การคำนวณช่วงดิสเพอร์ชันที่ใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R ซึ่งวิธีการคำนวณแบ่งตามแต่ละประเภทของ OPC
3. การคำนวณช่วงในการวาง OPC สำหรับการสื่อสารทุกคู่โหนด
4. การกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC สำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยงโดยใช้วิธีซ้อนทับ
5. การทดสอบค่าดิสเพอร์ชันสะสมในการวาง OPC สำหรับการสื่อสารทุกคู่โหนด

เพื่อเป็นการง่ายต่อการทำความเข้าใจระเบียบวิธีในการวาง OPC บนโครงข่าย wavelength-routed แบบเมช ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงแบ่งตัวอย่างระเบียบวิธีออกเป็น 2 ส่วน แยกตามประเภทของ OPC โดยทั้ง 2 ประเภทจะทดลองบนโครงข่ายตัวอย่าง 3 โครงข่ายคือ ERNet, NARNet และ OPEN ตามลำดับ ซึ่งในบทนี้จะเป็นการคำนวณระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น และในบทที่ 5 ถัดไปจะเป็นการนำเสนอการคำนวณระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น ตามลำดับ

ตัวอย่างการคำนวณ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น (wavelength shifted-free OPC)

4.1 ตัวอย่างที่ 1 โครงข่าย European Reference Network (ERNet)

โครงข่าย ERNet ประกอบด้วย 15 โหนด 42 ข่ายเชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.1 โดยวิธีการปกติหากใช้ระเบียบวิธีการวาง OPC โดยวางไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของทุกๆข่ายเชื่อมโยงนั้น จะต้องใช้ OPC เป็นจำนวน 42 ตัวเท่ากับจำนวนของข่ายเชื่อมโยงในระบบ แต่หากมีการใช้ระเบียบวิธีที่จะนำเสนอต่อไปนี้ประยุกต์กับโครงข่าย จะสามารถลดจำนวนการใช้งาน OPC ลงได้โดยที่ค่าดิสเพอร์ชันสะสมในระบบไม่เกิดขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน โดยระเบียบวิธีการวาง OPC แบ่งได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 โครงข่าย European Reference Network (ERNet)

4.1.1 การคำนวณระยะทางระหว่างทุกคู่โหนดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ในโครงข่าย ERNet

ในขั้นตอนการหาระยะทางที่สั้นที่สุดนั้น จะระบุการสื่อสารระหว่างทุกคู่โหนด พร้อมระยะทางและช่วงของข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารของคู่นั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระยะทางและข่ายเชื่อมโยงสำหรับการสื่อสารของทุกคู่โหนดในโครงข่าย ERNet

โหนด 1	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 2	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 3	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง
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
โหนด 4	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 5	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 6	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง
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) โหนดที่ 1-6

โนด 7	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 8	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 9	ระยะทาง [km]	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
โนด 10	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 11	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 12	ระยะทาง [km]	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

(ข) โหนดที่ 7-12

โนด 13	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 14	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 15	ระยะทาง [km]	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

(ค) โหนดที่ 13-15

จากตารางที่ 4.1 แสดงถึงระยะทางและข่ายเชื่อมโยงของการสื่อสารระหว่างทุกคู่โนดแล้ว นั้น ขั้นตอนต่อไปในระเบียบวิธีคือ การหาช่วงดิสเพอร์ชันที่จะใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R

4.1.2 การหาช่วงดิสเพอร์ชันที่จะใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น

สำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นนั้นจำเป็นต้องใช้สัญญาณบีบที่ความยาวคลื่นจำนวน 2 ความยาวคลื่น โดยสัญญาณคอนจูเกตจะเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดียวกับสัญญาณแสงเดิมตามที่กล่าวไว้ในภาคทฤษฎี สำหรับหลักการคำนวณพารามิเตอร์ R นั้น จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบ ตามสมการที่ (3.19) และ (3.22) ตามลำดับ ดังนี้

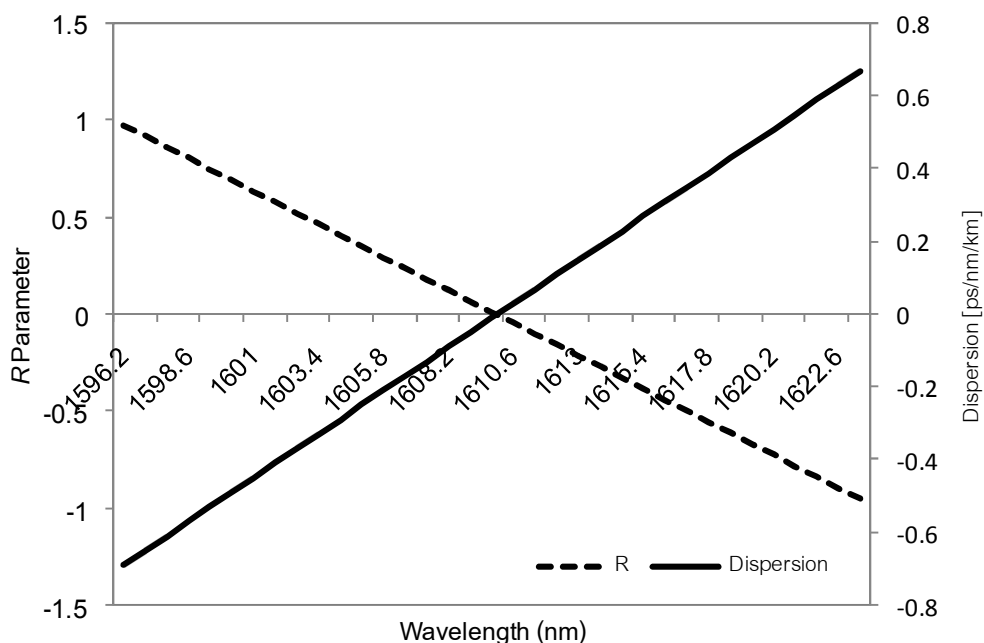
$$R = \frac{2D_\lambda X_1 - D_\lambda(LP)}{800} \quad (3.19)$$

$$D_\lambda = -3 + 0.05 * (\lambda - 1550) \quad (3.22)$$

จากสมการที่ (3.19) และ (3.22) ข้างต้น แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ R กับค่าดิสเพอร์ชันและค่าดิสเพอร์ชันกับความยาวคลื่น ตามลำดับ เมื่อให้ตัวแปรความยาวคลื่นเป็นตัว

แปรอิสระเพื่อเปลี่ยนค่าแล้วนั้น จะเห็นได้ว่าค่า R จะเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่นที่เปลี่ยนเช่นกัน

จากสมมติฐานในการกำหนดพารามิเตอร์ R สรุปได้ว่าหากค่า R มีค่าไม่เกิน ± 1 แสดงว่าโครงข่ายดังกล่าวสามารถใช้ระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นได้โดยไม่ต้องลดขนาดโครงข่าย ซึ่งความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R , ดิสเพอร์ชันและความยาวคลื่นสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย ERNet

จากรูปที่ 4.2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R และดิสเพอร์ชันกับความยาวคลื่นพบว่า ช่วงความยาวคลื่นที่ทำให้ค่า $|R| \leq 1$ คือ

- ช่วงความยาวคลื่น 1592.6 nm ถึง 1623.4 nm

จากช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวนี้ คิดเป็นความยาวคลื่นจำนวน 35 ความยาวคลื่น แบ่งตามมาตรฐาน ITU-T 100 GHz Channel Spacing

โดยในช่วงความยาวคลื่นช่วงนี้จะได้ค่าดิสเพอร์ชันเป็นดังนี้

- ช่วงดิสเพอร์ชัน -0.69 ps/nm/km ถึง 0.67 ps/nm/km

ซึ่งการใช้งานค่าดิสเพอร์ชันช่วงดังกล่าวนี้ จะทำให้ค่า R มีค่าไม่เกิน ± 1 นั้นหมายความว่าโครงข่ายดังกล่าวสามารถใช้ระเบียบวิธีนี้ได้ โดยไม่ต้องลดขนาดโครงข่าย และช่วงค่าดิสเพอร์ชันข้างต้นจะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปของระเบียบวิธีการวาง OPC

4.1.3 การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารทุกๆจุดในโครงข่าย ERNet

ในขั้นตอนการคำนวณช่วงในการวาง OPC นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อหาระยะขอบเขตด้านซ้ายและด้านขวาสำหรับการสื่อสารระหว่างทุกๆจุด โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) ดังนี้

$$X_{OPC_L} = \frac{D_\lambda(LP) + 800}{2D_\lambda} \quad (3.8)$$

$$X_{OPC_R} = \frac{D_\lambda(LP) - 800}{2D_\lambda} \quad (3.9)$$

จากสมการข้างต้นนั้นเป็นระยะขอบเขตในการวาง OPC ทางด้านซ้ายและด้านขวาตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระยะดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะทางทั้งหมดของการสื่อสาร (LP) และค่าดิสเพอร์ชันในระบบ (D_λ) โดยในส่วนของค่าดิสเพอร์ชันของระบบนั้นจะเลือกจากช่วงดิสเพอร์ชันจากขั้นตอนในการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ R โดยใช้ค่าที่ทำให้เกิดดิสเพอร์ชันสะสมที่รุนแรง คือ -0.69 ps/nm/km ในการคำนวณ โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ระยะขอบเขตทางด้านซ้ายและด้านขวาในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น
ในโครงข่าย ERNet

โนด 1	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 2	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
2	336	1	-412	748	1	336	2	-412	748
3	408	3	-376	784	3	624	7,10	-268	892
4	720	5	-220	940	4	816	7,11	-172	988
5	1080	5,13	-40	1120	5	1176	7,11,13	8	1168
6	564	3,9	-298	862	6	468	7	-346	814
7	900	5,15	-130	1030	7	996	7,11,15	-82	1078
8	1068	5,15,20	-46	1114	8	1164	7,11,15,20	2	1162
9	1248	5,15,20,22	44	1204	9	1344	7,11,15,20,22	92	1252
10	924	3,9,23	-118	1042	10	828	7,23	-166	994
11	1296	3,9,23,27	68	1228	11	1200	7,23,27	20	1180
12	1428	3,9,23,31	134	1294	12	1332	7,23,31	86	1246
13	1560	3,9,23,33,39	200	1360	13	1464	7,23,33,39	152	1312
14	1308	3,9,23,33	74	1234	14	1212	7,23,33	26	1186
15	1464	3,9,23,27,35	152	1312	15	1368	7,23,27,35	104	1264
โนด 3	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 4	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	408	4	-376	784	1	720	6	-220	940
2	624	9,8	-268	892	2	816	12,8	-172	988
4	504	9,11	-328	832	3	504	12,10	-328	832
5	864	9,11,13	-148	1012	5	360	13	-400	760
6	156	9	-502	658	6	348	12	-406	754
7	684	9,11,15	-238	922	7	180	15	-490	670
8	852	9,11,15,20	-154	1006	8	348	15,20	-406	754
9	1032	9,11,15,20,22	-64	1096	9	528	15,20,22	-316	844
10	516	9,23	-322	838	10	432	15,25	-364	796
11	888	9,23,27	-136	1024	11	708	15,20,22,29	-226	934
12	1020	9,23,31	-70	1090	12	936	15,25,31	-112	1048
13	1152	9,23,33,39	-4	1156	13	1068	15,25,33,39	-46	1114
14	900	9,23,33	-130	1030	14	816	15,25,33	-172	988
15	1056	9,23,27,35	-52	1108	15	876	15,20,22,29,35	-142	1018

(ก) โหนดที่ 1-4

โนด 5	ระยะทาง	ซ้ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 6	ระยะทาง	ซ้ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	1080	14,6	-40	1120	1	564	10,4	-298	862
2	1176	14,12,8	8	1168	2	468	8	-346	814
3	864	14,12,10	-148	1012	3	156	10	-502	658
4	360	14	-400	760	4	348	11	-406	754
6	708	14,12	-226	934	5	708	11,13	-226	934
7	540	14,15	-310	850	7	528	11,15	-316	844
8	564	17,21	-298	862	8	696	11,15,20	-232	928
9	384	17	-388	772	9	876	11,15,20,22	-142	1018
10	792	14,15,25	-184	976	10	360	23	-400	760
11	564	17,29	-298	862	11	732	23,27	-214	946
12	1296	14,15,25,31	68	1228	12	864	23,31	-148	1012
13	1308	17,29,35,41,39	74	1234	13	996	23,33,39	-82	1078
14	1056	17,29,35,41	-52	1108	14	744	23,33	-208	952
15	732	17,29,35	-214	946	15	900	23,27,35	-130	1030
โนด 7	ระยะทาง	ซ้ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 8	ระยะทาง	ซ้ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	900	16,6	-130	1030	1	1068	19,16,6	-46	1114
2	996	16,12,8	-82	1078	2	1164	19,16,12,8	2	1162
3	684	16,12,10	-238	922	3	852	19,16,12,10	-154	1006
4	180	16	-490	670	4	348	19,16	-406	754
5	540	16,13	-310	850	5	564	22,18	-298	862
6	528	16,12	-316	844	6	696	19,16,12	-232	928
8	168	20	-496	664	7	168	19	-496	664
9	348	20,22	-406	754	9	180	22	-490	670
10	252	25	-454	706	10	420	19,25	-370	790
11	528	20,22,29	-316	844	11	360	22,29	-400	760
12	756	25,31	-202	958	12	924	19,25,31	-118	1042
13	888	25,33,39	-136	1024	13	1056	19,25,33,39	-52	1108
14	636	25,33	-262	898	14	804	19,25,33	-178	982
15	696	20,22,29,35	-232	928	15	528	22,29,35	-316	844

(ข) โหนดที่ 5-8

โนด 9	ระยะทาง	ซ้ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 10	ระยะทาง	ซ้ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	1248	21,19,16,6	44	1204	1	924	24,10,4	-118	1042
2	1344	21,19,16,12,8	92	1252	2	828	24,8	-166	994
3	1032	21,19,16,12,10	-64	1096	3	516	24,10	-322	838
4	528	21,19,16	-316	844	4	432	26,16	-364	796
5	384	18	-388	772	5	792	26,16,13	-184	976
6	876	21,19,16,12	-142	1018	6	360	24	-400	760
7	348	21,19	-406	754	7	252	26	-454	706
8	180	21	-490	670	8	420	26,20	-370	790
10	552	29,28	-304	856	9	552	27,30	-304	856
11	180	29	-490	670	11	372	27	-394	766
12	1056	29,28,31	-52	1108	12	504	31	-328	832
13	924	29,35,41,39	-118	1042	13	636	33,39	-262	898
14	672	29,35,41	-244	916	14	384	33	-388	772
15	348	29,35	-406	754	15	540	27,35	-310	850
โนด 11	ระยะทาง	ซ้ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 12	ระยะทาง	ซ้ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	1296	28,24,10,4	68	1228	1	1428	32,24,10,4	134	1294
2	1200	28,24,8	20	1180	2	1332	32,24,8	86	1246
3	888	28,24,10	-136	1024	3	1020	32,24,10	-70	1090
4	708	30,21,19,16	-226	934	4	936	32,26,16	-112	1048
5	564	30,18	-298	862	5	1296	32,26,16,13	68	1228
6	732	28,24	-214	946	6	864	32,24	-148	1012
7	528	30,21,19	-316	844	7	756	32,26	-202	958
8	360	30,21	-400	760	8	924	32,26,20	-118	1042
9	180	30	-490	670	9	1056	32,27,30	-52	1108
10	372	28	-394	766	10	504	32	-328	832
12	876	28,31	-142	1018	11	876	32,27	-142	1018
13	744	35,41,39	-208	952	13	480	37	-340	820
14	492	35,41	-334	826	14	732	37,40	-214	946
15	168	35	-496	664	15	1044	32,27,35	-58	1102

(ค) โหนดที่ 9-12

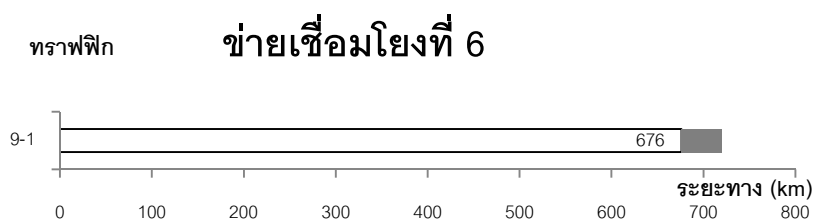
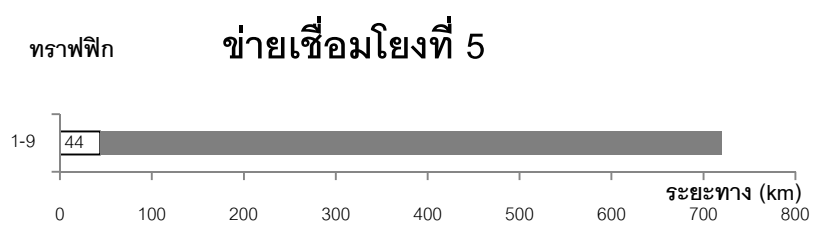
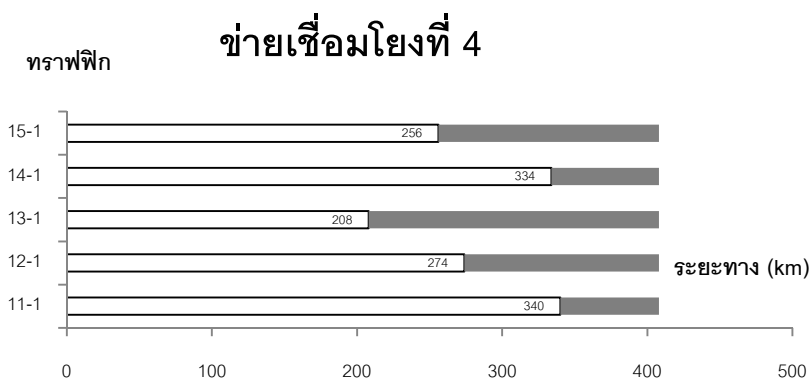
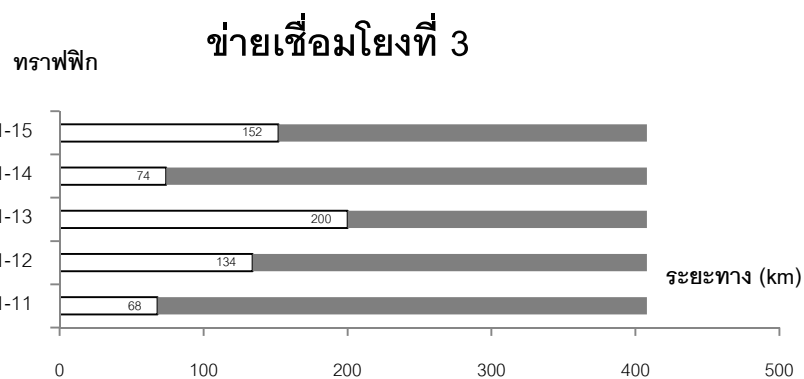
โนด 13	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมต่อโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 14	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมต่อโยง	OPC_L	OPC_R
1	1560	40,34,24,10,4	200	1360	1	1308	34,24,10,4	74	1234
2	1464	40,34,24,8	152	1312	2	1212	34,24,8	26	1186
3	1152	40,34,24,10	-4	1156	3	900	34,24,10	-130	1030
4	1068	40,34,26,16	-46	1114	4	816	34,26,16	-172	988
5	1308	40,42,36,30,18	74	1234	5	1056	42,36,30,18	-52	1108
6	996	40,34,24	-82	1078	6	744	34,24	-208	952
7	888	40,34,26	-136	1024	7	636	34,26	-262	898
8	1056	40,34,26,20	-52	1108	8	804	34,26,20	-178	982
9	924	40,42,36,30	-118	1042	9	672	42,36,30	-244	916
10	636	40,34	-262	898	10	384	34	-388	772
11	744	40,42,36	-208	952	11	492	42,36	-334	826
12	480	38	-340	820	12	732	39,38	-214	946
14	252	40	-454	706	13	252	39	-454	706
15	576	40,42	-292	868	15	324	42	-418	742
โนด 15	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมต่อโยง	OPC_L	OPC_R					
1	1464	36,28,24,10,4	152	1312					
2	1368	36,28,24,8	104	1264					
3	1056	36,28,24,10	-52	1108					
4	876	36,30,21,19,16	-142	1018					
5	732	36,30,18	-214	946					
6	900	36,28,24	-130	1030					
7	696	36,30,21,19	-232	928					
8	528	36,30,21	-316	844					
9	348	36,30	-406	754					
10	540	36,28	-310	850					
11	168	36	-496	664					
12	1044	36,28,31	-58	1102					
13	576	41,39	-292	868					
14	324	41	-418	742					

(ง) โหนดที่ 13-15

จากตารางที่ 4.2 แสดงถึงระยะขอบเขตทางซ้ายและขวาของการวาง OPC สำหรับทราฟฟิกการสื่อสารทั้งหมดในโครงข่าย พบว่าจะมีบางทราฟฟิกที่มีช่วงการวาง OPC ยาวกว่าความยาวรวมของทราฟฟิก ซึ่งหมายความว่าเราสามารถกำหนดจุดวาง OPC ในตำแหน่งใดๆก็ได้บนทราฟฟิกนั้นๆ ในขณะที่เดียวกันจะมีบางทราฟฟิกที่ไม่จำเป็นต้องใช้ OPC ในการจำกัดผลของดีสเพอร์ชันเนื่องจากระยะทางที่มากที่สุดที่จะต้องพิจารณาการวาง OPC คือ $800 / |-0.69| = 1,159$ km ดังนั้นระยะทางของทราฟฟิกใดๆที่น้อยกว่าค่าดังกล่าว จึงไม่ต้องพิจารณาผลของดีสเพอร์ชันสะสมและไม่จำเป็นต้องพิจารณาการวาง OPC

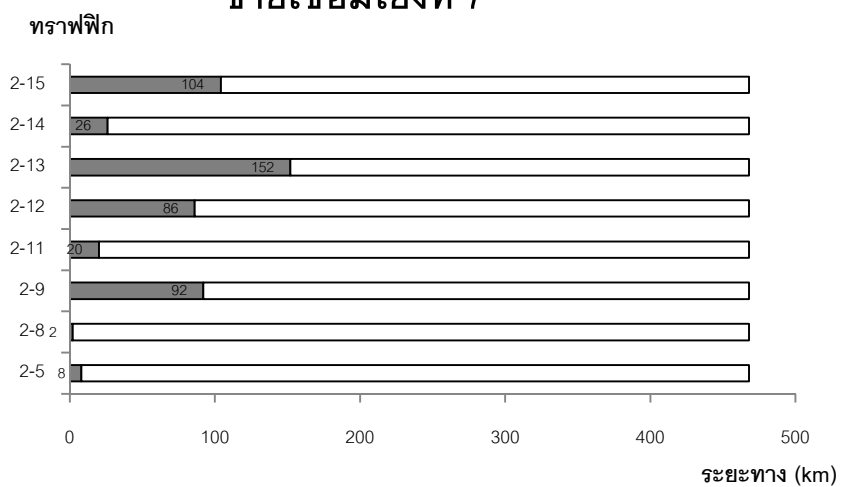
4.1.4 การกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย ERNet โดยใช้วิธีซ้อนทับ

จากขั้นตอนที่ผ่านมา เราจะได้ตำแหน่งขอบเขตด้านซ้ายและด้านขวาในการวาง OPC สำหรับทุกๆทราฟฟิกดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจากตารางดังกล่าว เราสามารถสรุปช่วงการวาง OPC สำหรับข่ายเชื่อมโยงได้ดังรูปที่ 4.3

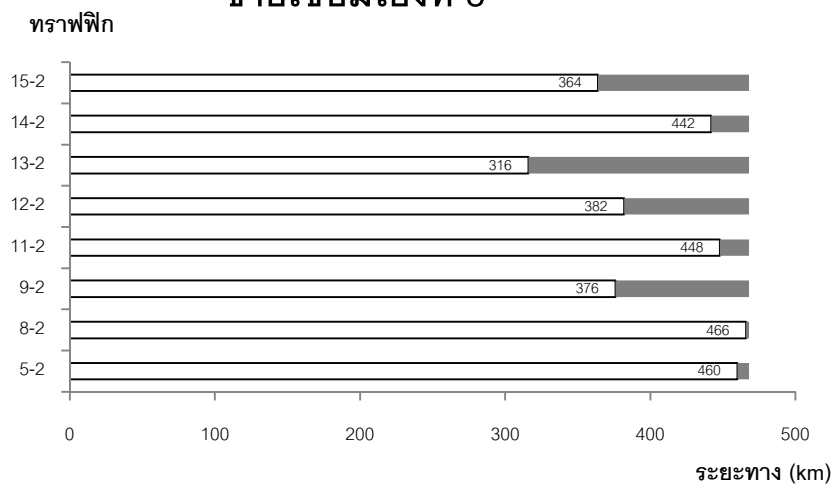


(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 3-6

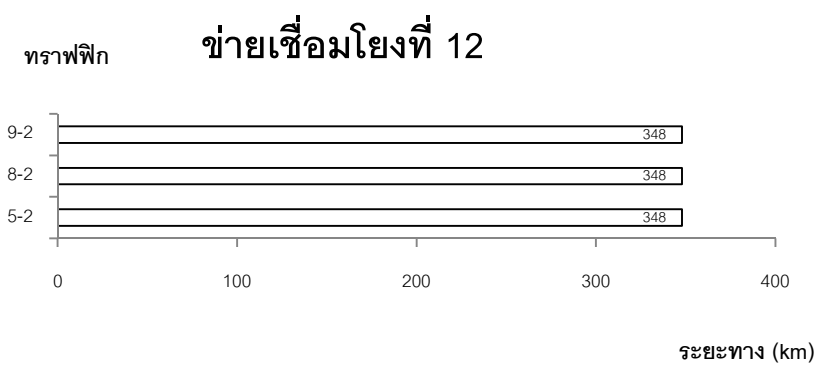
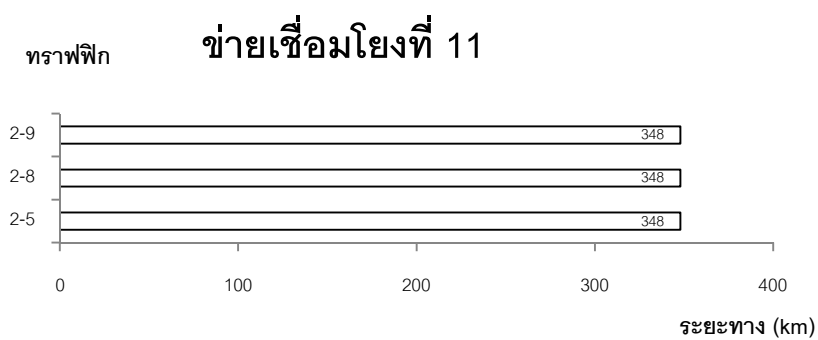
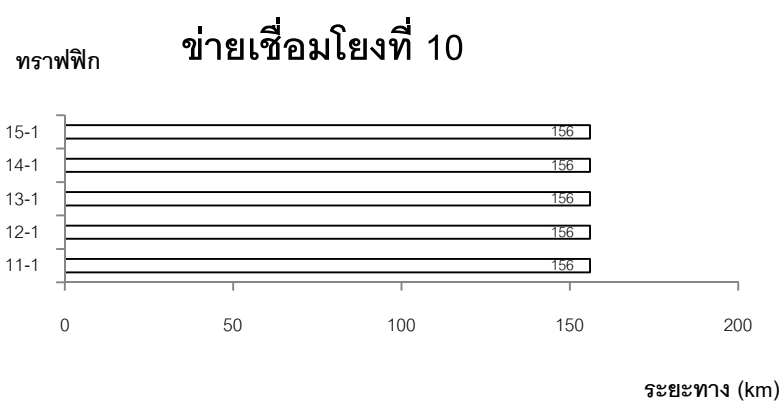
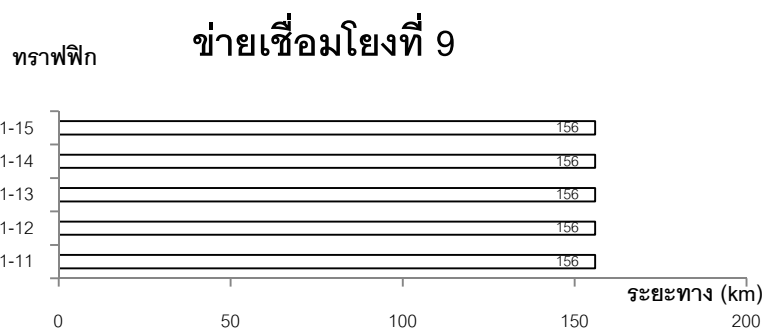
ข่ายเชื่อมโยงที่ 7



ข่ายเชื่อมโยงที่ 8

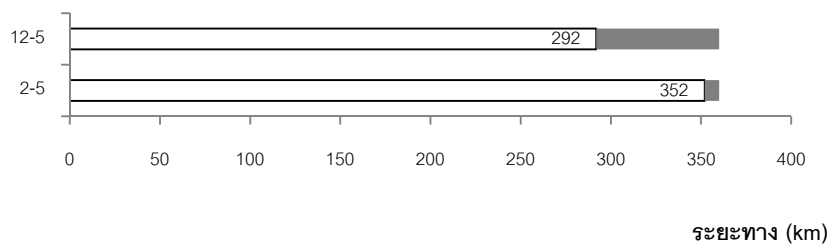


(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 7-8

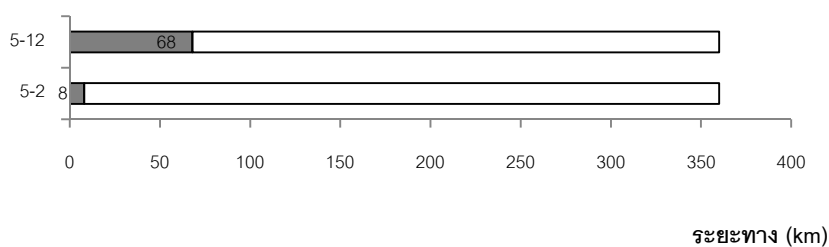


(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 9-12

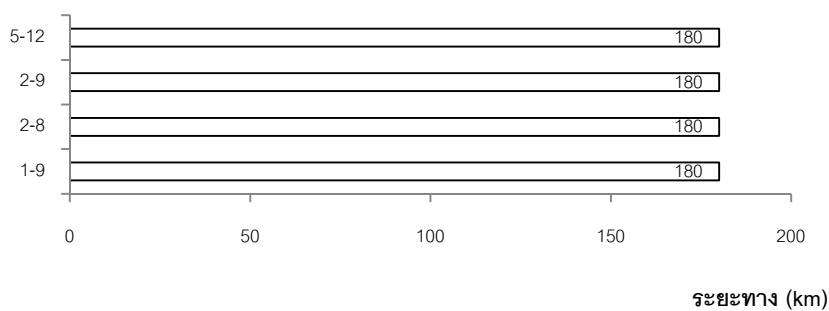
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 13**



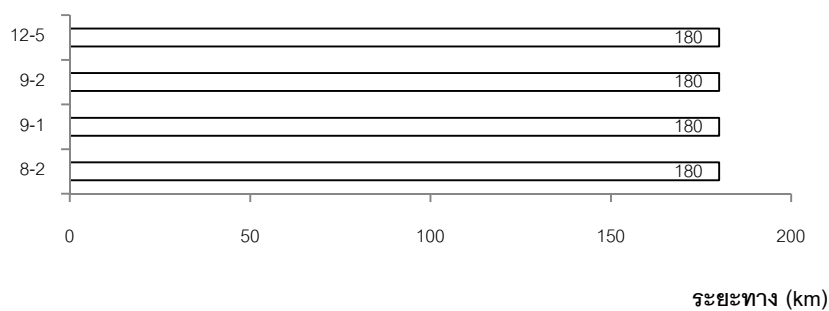
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 14**



ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 15**

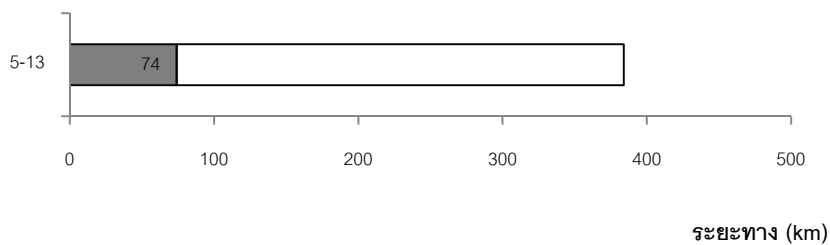


ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 16**

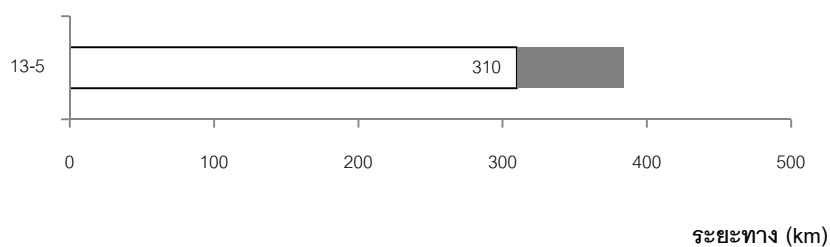


(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13-16

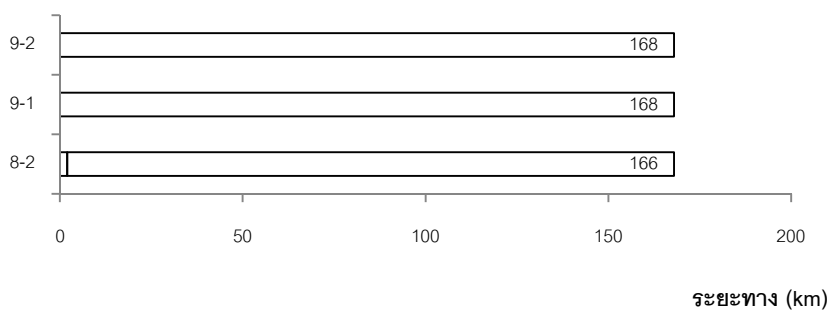
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 17**



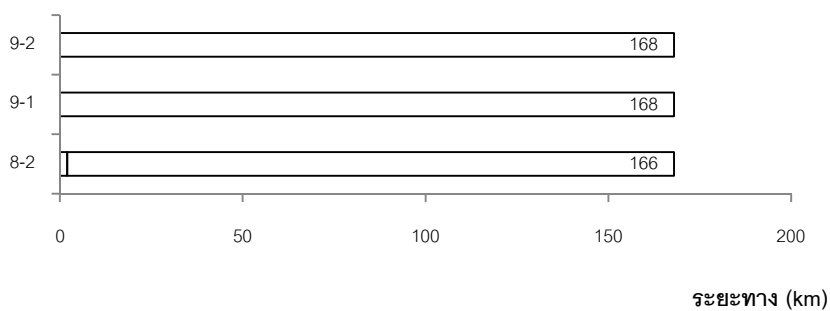
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 18**



ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 19**

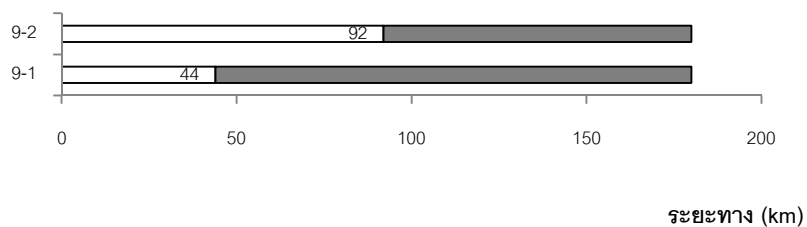


ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 20**

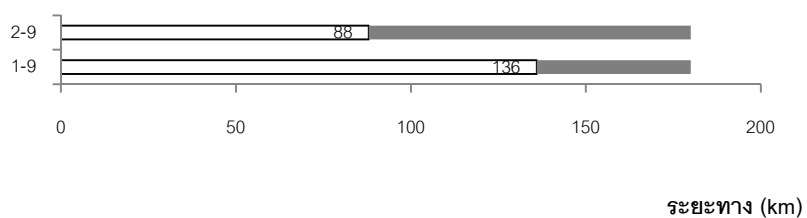


(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 17-20

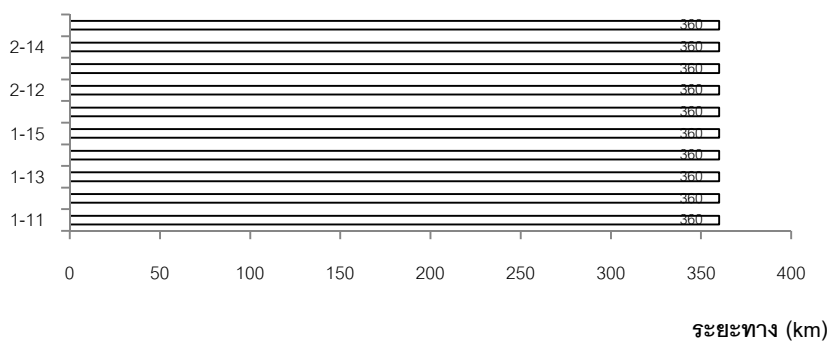
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 21**



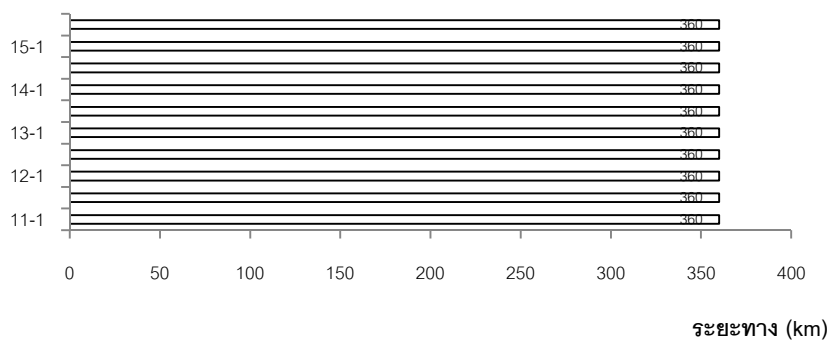
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 22**



ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 23**



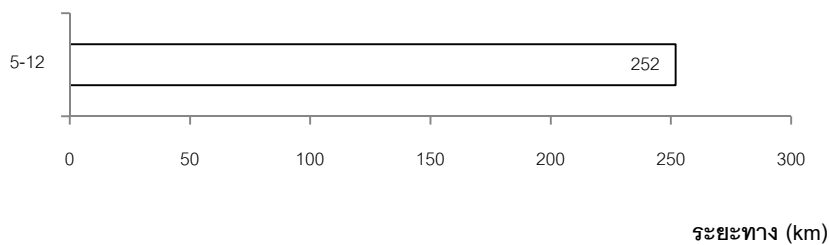
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 24**



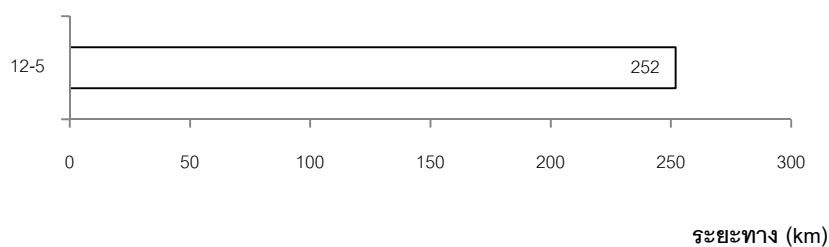
ข่าย

เชื่อมโยงที่ 21-24

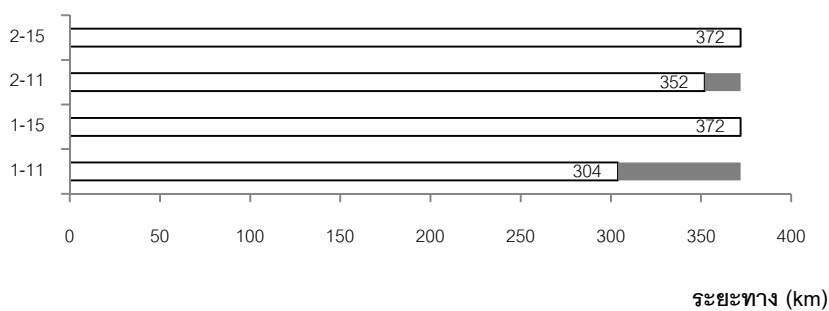
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 25**



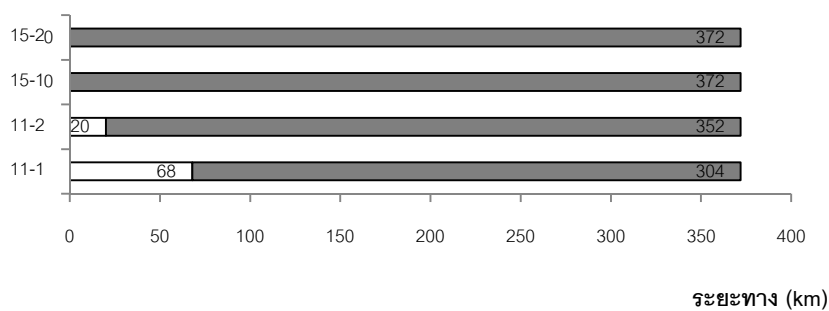
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 26**



ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 27**

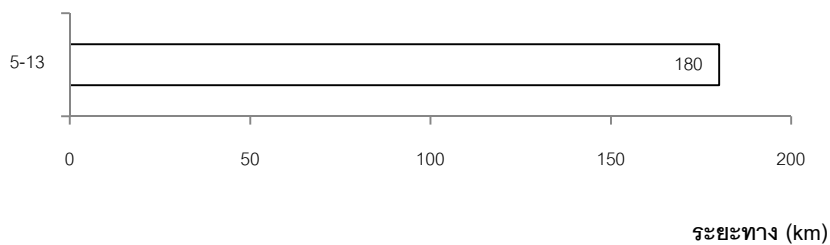


ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 28**

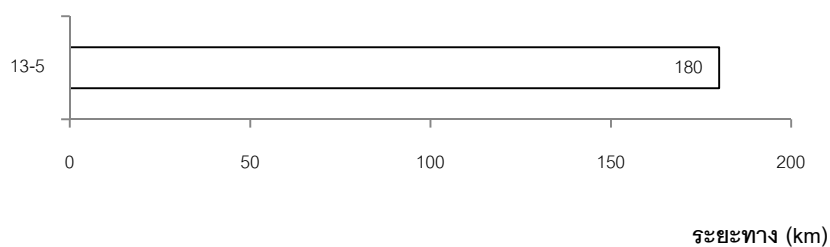


(ด) ข่ายเชื่อมโยงที่ 25-28

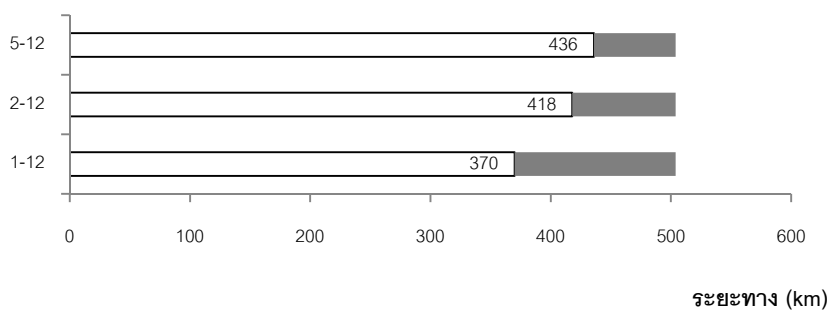
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 29**



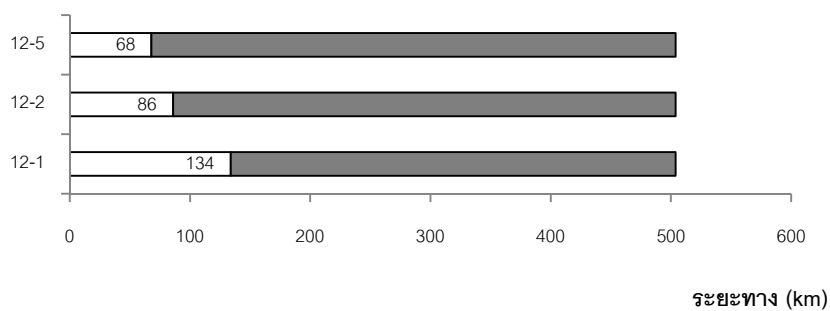
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 30**



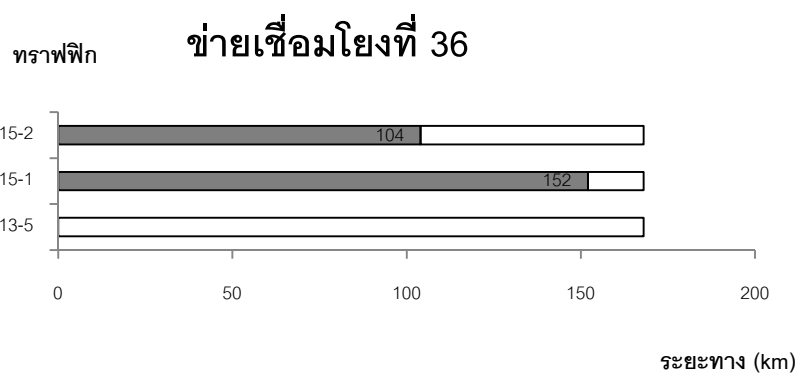
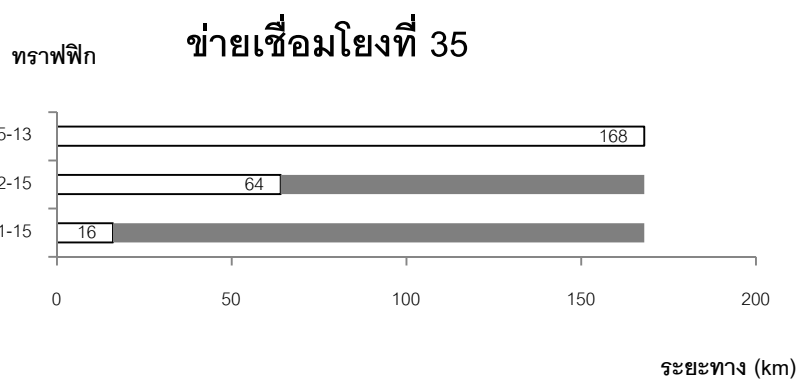
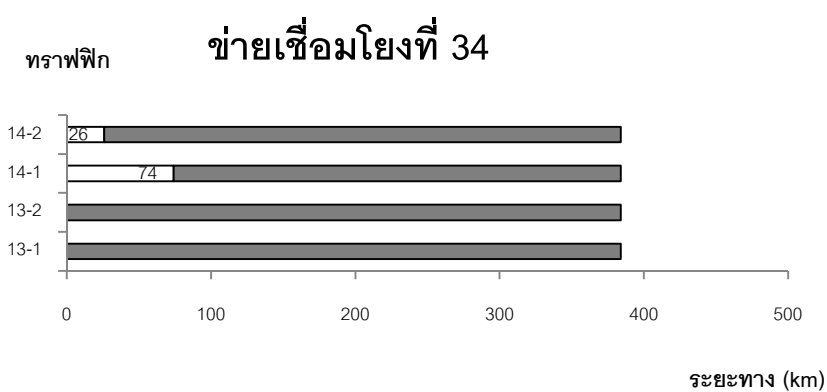
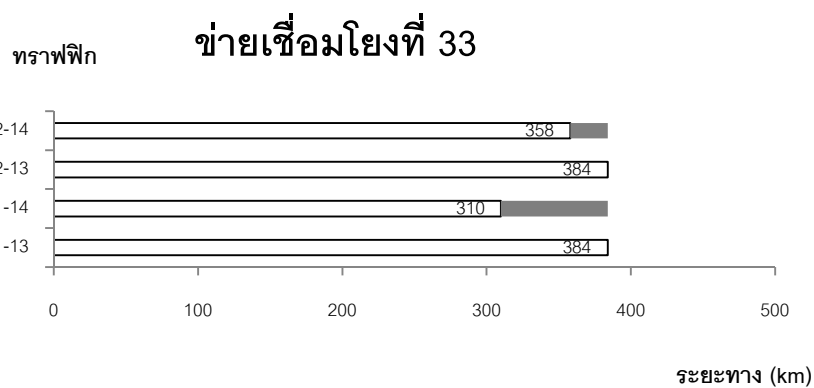
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 31**



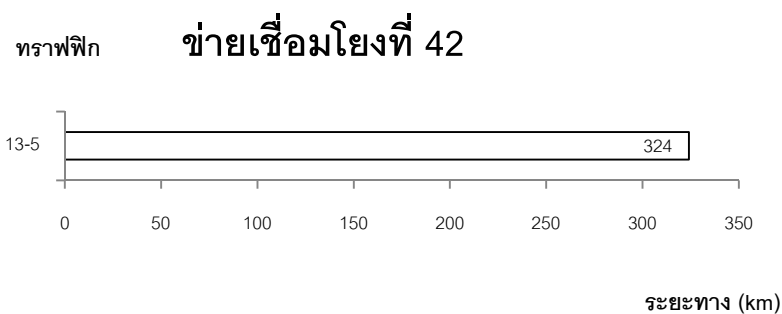
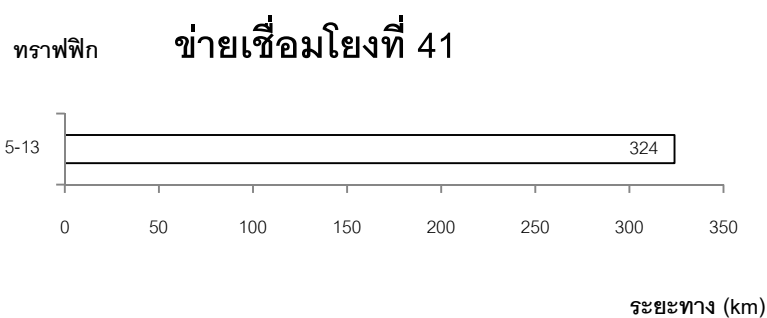
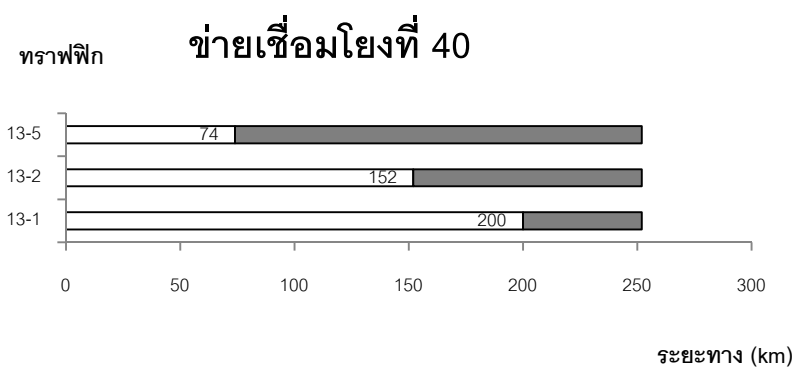
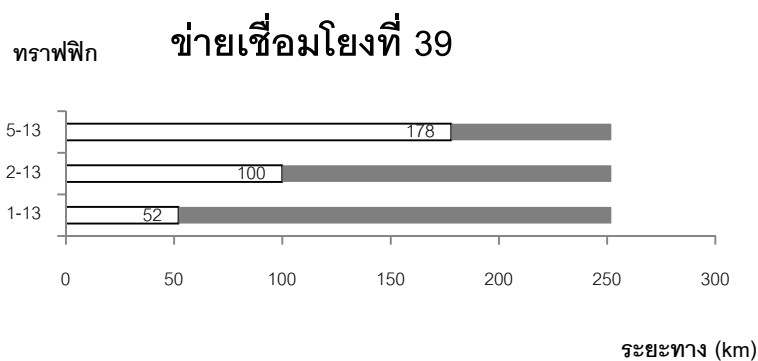
ทราฟฟิก **ข่ายเชื่อมโยงที่ 32**



(ซ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 29-32



(ซ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 33-36



(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 39-42

รูปที่ 4.3 ช่วงการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับทุกข่ายเชื่อมโยงใน
โครงข่าย ERNet

รูปที่ 4.3 แสดงถึงช่วงการวาง OPC บนข่ายเชื่อมโยงที่แตกต่างกันในโครงข่าย ERNet โดยในช่วงแถบสีขาวของแต่ละข่ายเชื่อมโยงนั้น แสดงถึงช่วงที่สามารถวาง OPC ได้ และในขั้นตอนต่อไปคือหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC โดยจะใช้การพิจารณา ดังนี้

1. จากรูปที่ 4.3 พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกในการวาง OPC มากที่สุด ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 ซึ่งประกอบด้วยช่วงการวาง OPC สำหรับ 10 ทราฟฟิก (รูปที่ 4.3 ข) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 0-360 กิโลเมตร
2. พิจารณาตัดข่ายเชื่อมโยงที่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกมากที่สุดตามข้อ 1 โดยใช้หลักการสำหรับโครงข่ายที่เกี่ยวข้องใดๆ ดังนี้

จำนวนทราฟฟิกที่เหลือ = จำนวนทราฟฟิกที่ต้องวาง OPC (แถบในรูปที่ 4.3) – จำนวนทราฟฟิกที่เกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24

ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 3 และ 4 เหลือทราฟฟิก = $5 - 5 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 7 และ 8 เหลือทราฟฟิก = $8 - 6 = 2$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 9 และ 10 เหลือทราฟฟิก = $5 - 5 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 27 และ 28 เหลือทราฟฟิก = $4 - 4 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 31 และ 32 เหลือทราฟฟิก = $3 - 2 = 1$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 33 และ 34 เหลือทราฟฟิก = $4 - 4 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 35 และ 36 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 39 และ 40 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

จากนั้นจึงพิจารณาการตัดทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงที่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกมากที่สุดอันดับรองลงมา ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16 ซึ่งประกอบด้วยช่วงการวาง OPC สำหรับ 4 ทราฟฟิก (รูปที่ 4.3 ง) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 0-180 กิโลเมตร ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 และ 6 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 7 และ 8 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 11 และ 12 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 13 และ 14 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 19 และ 20 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 21 และ 22 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 25 และ 26 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก
 ข่ายเชื่อมโยงที่ 29 และ 30 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก
 ข่ายเชื่อมโยงที่ 31 และ 32 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก
 ข่ายเชื่อมโยงที่ 33 และ 34 เหลือทราฟฟิก = $4 - 4 = 0$ ทราฟฟิก
 ข่ายเชื่อมโยงที่ 35 และ 36 เหลือทราฟฟิก = $1 - 0 = 0$ ทราฟฟิก
 ข่ายเชื่อมโยงที่ 39 และ 40 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

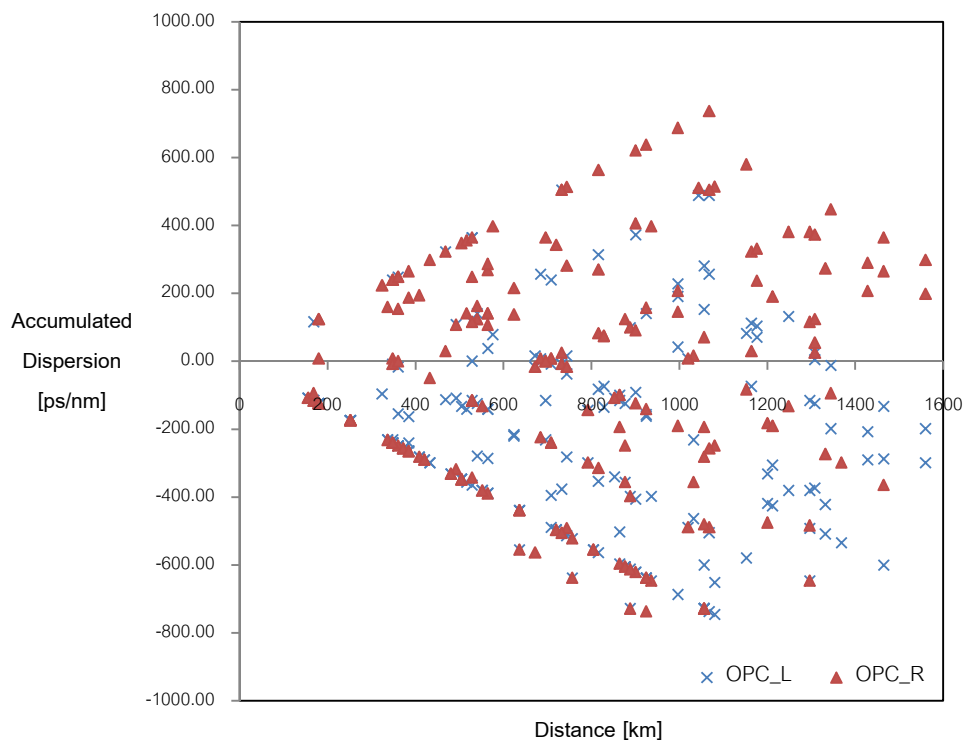
- เมื่อทำการพิจารณาตัดทราฟฟิกตามข้อ 2 จนเหลือข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกที่เหลือเท่ากันแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือ พิจารณาผลของดีสเพอร์ชันสะสมบนข่ายเชื่อมโยงที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 23, 24, 15 และ 16 ตามลำดับ ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 17, 18 และข่ายเชื่อมโยงที่ 41, 42 ตามลำดับ จึงจะทำให้ดีสเพอร์ชันสะสมไม่เกินขีดจำกัดในทุกๆทราฟฟิก
- จากหลักพิจารณาทั้งหมด ประกอบกับช่วงการวาง OPC จากรูปที่ 4.3 สามารถสรุปตำแหน่งการวาง OPC ได้ตามตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 สรุปช่วงการวางสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย ERNet

ข่ายเชื่อมโยง	ช่วงการวาง OPC (กิโลเมตร)	ข่ายเชื่อมโยง	ช่วงการวาง OPC (กิโลเมตร)
15	0-180	23	0-360
16	0-180	24	0-360
17	74-384	41	0-324
18	0-310	42	0-324

4.1.5 การทดสอบค่าดีสเพอร์ชันสะสมสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นของการสื่อสารระหว่างทุก ๆ โหนดในโครงข่าย ERNet

พิจารณาทดสอบค่าดีสเพอร์ชันสะสมสำหรับการสื่อสารระหว่างทุก ๆ โหนด โดยใช้สมการที่ (3.1), (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ ในการคำนวณแต่ละทราฟฟิกนั้นจะพิจารณาค่าดีสเพอร์ชันสะสมจากการวางที่ขอบเขตด้านซ้ายและขวาเท่านั้น ระยะทางระหว่างช่วงซ้ายไปถึงขวาจะไม่ได้พิจารณา เนื่องจากการพิจารณาที่ขอบเขตด้านซ้ายและขวาจะครอบคลุมระยะทางดังกล่าวแล้ว ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปดังรูปที่ 4.4

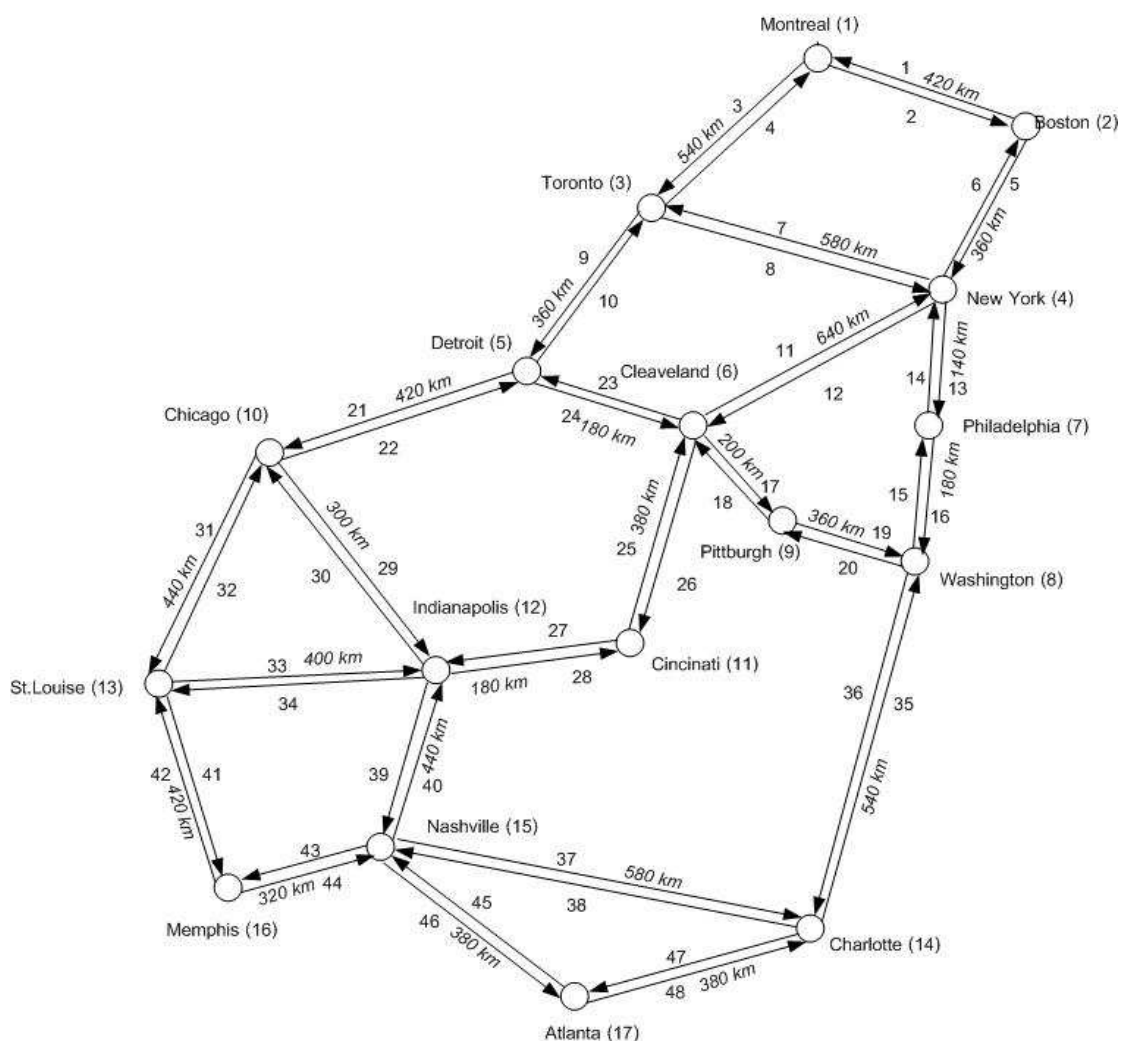


รูปที่ 4.4 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น
ในโครงข่าย ERNet

จากรูปที่ 4.4 แต่ละจุดที่แสดงในรูปคือ ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกเมื่อวางที่
ขอบเขตด้านซ้ายและขวาตามลำดับ พบว่าค่าดังกล่าวมีค่าไม่เกิน 800 ps/nm สำหรับทุกๆ
โหนดใดๆ ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ตั้งไว้ของระบบ และทำให้ลดจำนวนการใช้งาน OPC จาก
วิธีการวางไว้ ณ กึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงลงได้จำนวนเท่ากับ $42 - 8 = 34$ ตัว แสดงว่าระเบียบวิธีดังกล่าว
สามารถใช้ได้ผลกับโครงข่ายนี้

4.2 ตัวอย่างที่ 2 โครงข่าย North-American Reference Network (NARNet)

โครงข่าย NARNet ประกอบด้วย 17 โหนด 48 ข่ายเชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.5 โดยวิธีการปกติ หากใช้ระเบียบวิธีการวาง OPC โดยวางไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของทุกๆข่ายเชื่อมโยงนั้น จะต้องใช้ OPC เป็นจำนวน 48 ตัวเท่ากับจำนวนของข่ายเชื่อมโยงในระบบ แต่หากมีการใช้ระเบียบวิธีที่จะนำเสนอต่อไปนี้ประยุกต์กับโครงข่าย จะสามารถลดจำนวนการใช้งาน OPC ลงได้โดยที่ค่าดีสเพอร์ชันสะสมในระบบไม่เกิดขีดจำกัดดีสเพอร์ชัน โดยระเบียบวิธีการวาง OPC จะกระทำในรูปแบบเดียวกันกับตัวอย่างโครงข่าย ERNet ที่ผ่านมา ซึ่งรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่าย NARNet จะแสดงไว้ในภาคผนวก ส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์



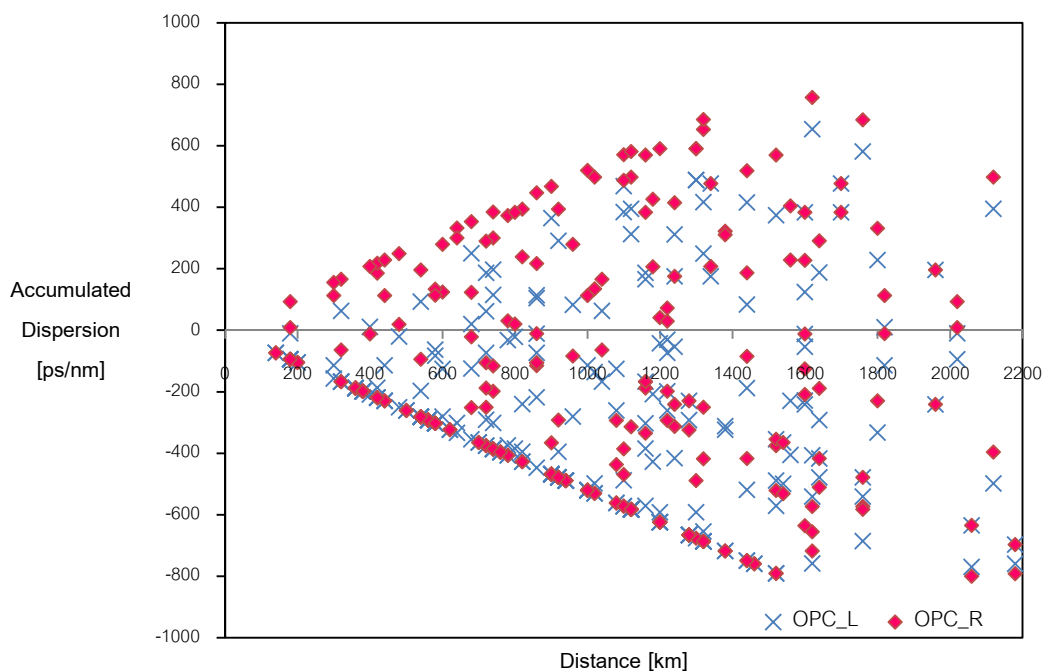
รูปที่ 4.5 โครงข่าย (North-American Reference Network: NARNet)

จากรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของระเบียบวิธีซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก สามารถสรุปตำแหน่งการวาง OPC ได้ตามตารางที่ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.4 สรุปช่วงการวาง OPC ในโครงข่าย NARNet

ข่าย เชื่อมโยง	ช่วงการวาง OPC (กิโลเมตร)	ข่าย เชื่อมโยง	ช่วงการวาง OPC (กิโลเมตร)
11	0-609	31	0-329
12	31-640	32	111-440
15	0-99	33	211-400
16	81-180	34	0-189
21	0-389	35	51-540
22	31-420	36	0-489
29	0-259		
30	41-300		

จากตำแหน่งการวาง OPC แบบไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่าย NARNet เมื่อพิจารณาทดสอบค่าดิสเพอร์ชันสะสมสำหรับการสื่อสารระหว่างทุกๆ โหนด โดยใช้สมการที่ (3.1), (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ ในการคำนวณแต่ละทราฟฟิกนั้นจะพิจารณาค่าดิสเพอร์ชันสะสมจากการวางที่ขอบเขตด้านซ้ายและขวาเท่านั้น ระยะทางระหว่างช่วงซ้ายไปถึงขวาจะไม่ได้พิจารณา เนื่องจากการพิจารณาที่ขอบเขตด้านซ้ายและขวาคงครอบคลุมระยะทางดังกล่าวแล้ว ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปดังรูปที่ 4.6

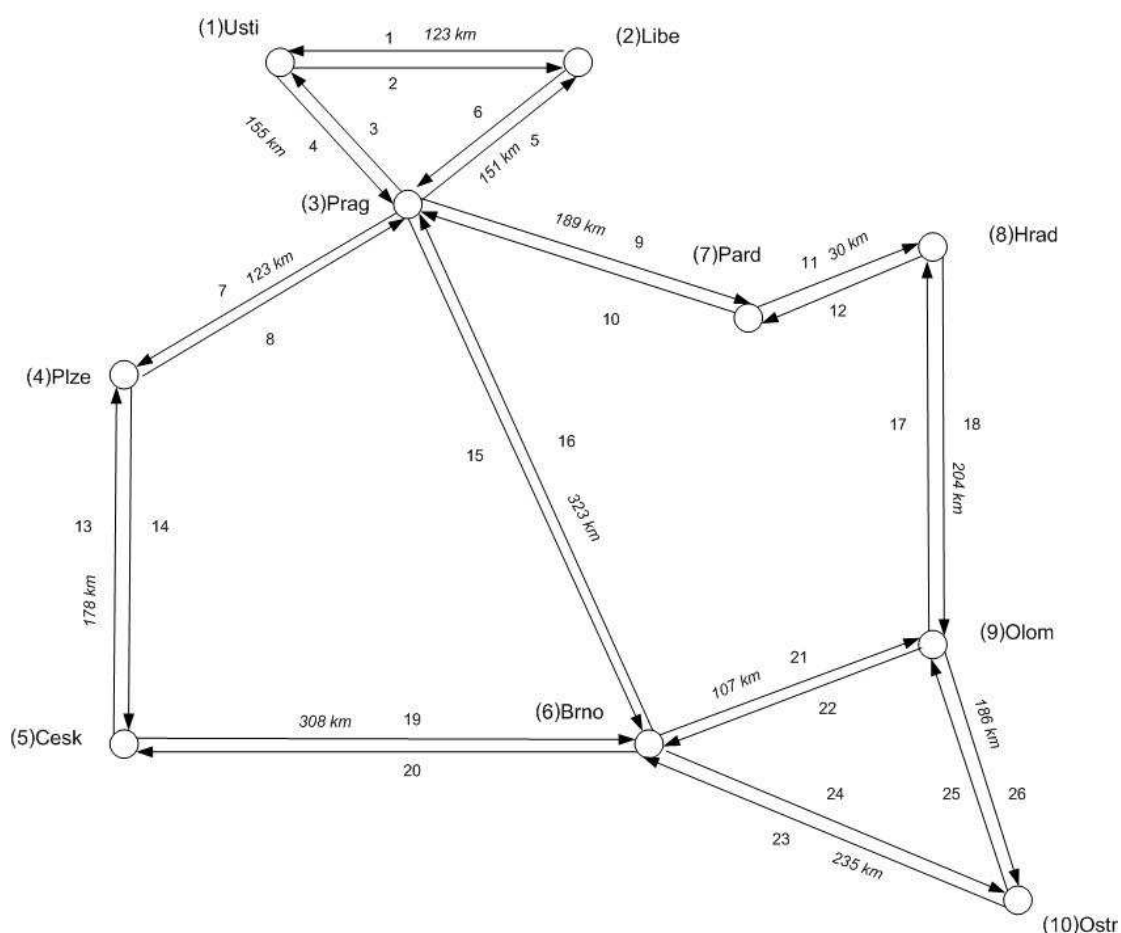


รูปที่ 4.6 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น
ในโครงข่าย NARNet

จากรูปที่ 4.6 แต่ละจุดที่แสดงในรูปคือ ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกเมื่อวางที่ขอบเขตด้านซ้ายและขวาตามลำดับ พบว่าค่าดังกล่าวมีค่าไม่เกิน 800 ps/nm สำหรับทุกๆคู่โหนดใดๆ ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ตั้งไว้ของระบบ และทำให้ลดจำนวนการใช้งาน OPC จากวิธีการวางไว้ ณ กึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงลงได้จำนวนเท่ากับ $48 - 14 = 34$ ตัว แสดงว่าระเบียบวิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้ผลกับโครงข่ายนี้

4.3 ตัวอย่างที่ 3 โครงข่าย Optical Pan European Network (OPEN)

โครงข่าย OPEN ประกอบด้วย 10 โหนด 26 ข่ายเชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.7 โดยวิธีการปกติหากใช้ระเบียบวิธีการวาง OPC โดยวางไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของทุกๆข่ายเชื่อมโยงนั้น จะต้องใช้ OPC เป็นจำนวน 26 ตัวเท่ากับจำนวนของข่ายเชื่อมโยงในระบบ แต่หากมีการใช้ระเบียบวิธีที่จะนำเสนอต่อไปนี้ประยุกต์กับโครงข่าย จะสามารถลดจำนวนการใช้งาน OPC ลงได้โดยที่ค่าดิสเพอร์ชันสะสมในระบบไม่เกิดขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน โดยระเบียบวิธีการวาง OPC จะกระทำในรูปแบบเดียวกันกับตัวอย่างโครงข่าย ERNet และ NARNet ที่ผ่านมา ซึ่งรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่าย OPEN จะแสดงไว้ในภาคผนวก ส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์



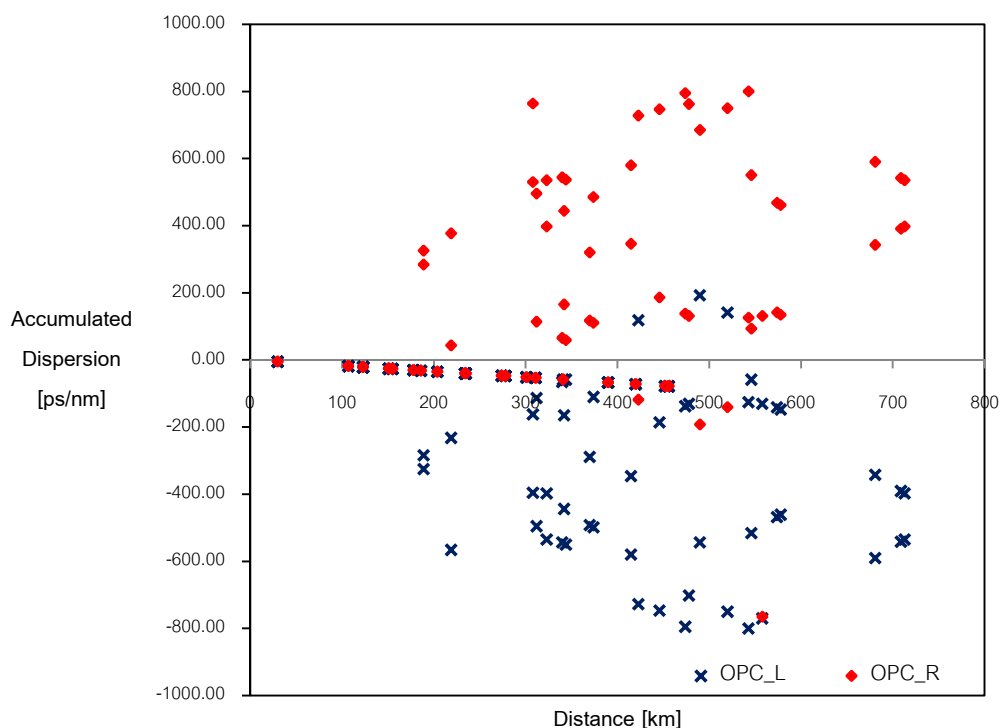
รูปที่ 4.7 โครงข่าย Optical Pan European Network (OPEN)

จากรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของระเบียบวิธีซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก สามารถสรุปตำแหน่งการวาง OPC ได้ตามตารางที่ 4.5 ดังนี้

ตารางที่ 4.5 สรุปช่วงการวาง OPC ในโครงข่าย OPEN

ข่าย เชื่อมโยง	ช่วงการวาง OPC (กิโลเมตร)	ข่าย เชื่อมโยง	ช่วงการวาง OPC (กิโลเมตร)
9	0-177	19	39-308
10	12-189	20	0-269
15	46-317		
16	6-277		

จากนั้นจึงพิจารณาทดสอบค่าดิสเพอร์ชันสะสมสำหรับการสื่อสารระหว่างทุกๆคู่โหนด โดยใช้สมการที่ (3.1), (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ ในการคำนวณแต่ละกราฟฟิกนั้นจะพิจารณาค่าดิสเพอร์ชันสะสมจากการวางที่ขอบเขตด้านซ้ายและขวาเท่านั้น ระยะทางระหว่างช่วงข่ายไปถึงขวาจะไม่ได้พิจารณา เนื่องจากการพิจารณาที่ขอบเขตด้านซ้ายและขวาจะครอบคลุมระยะทางดังกล่าวแล้ว ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกกราฟฟิกสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น
ในโครงข่าย OPEN

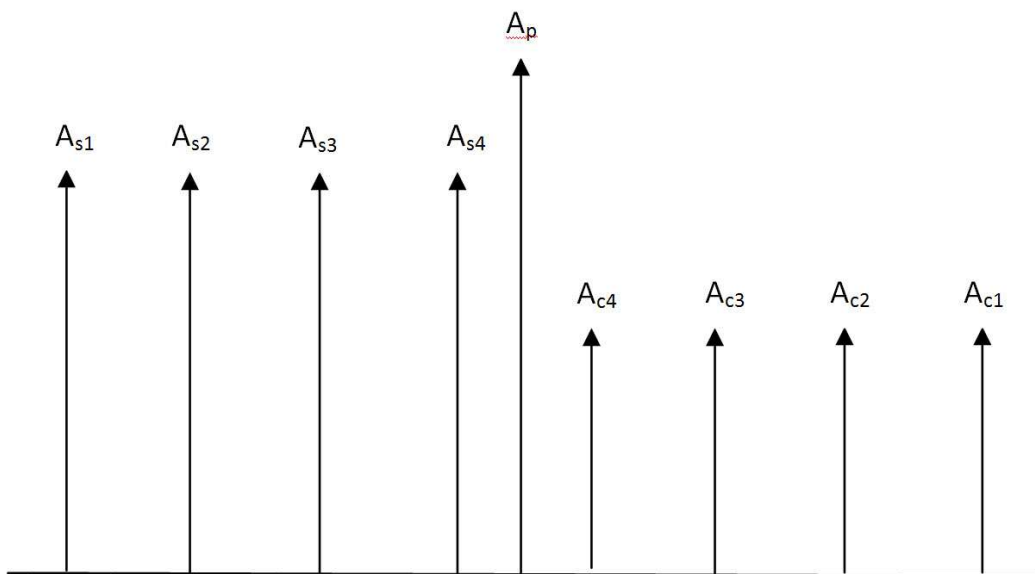
จากรูปที่ 4.8 แต่ละจุดที่แสดงในรูปคือ ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกเมื่อวางที่ขอบเขตด้านซ้ายและขวาตามลำดับ พบว่าค่าดังกล่าวมีค่าไม่เกิน 800 ps/nm สำหรับทุกๆจุดใด ๆ ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ตั้งไว้ของระบบ และทำให้ลดจำนวนการใช้งาน OPC จากวิธีการวางไว้ ณ กึ่งกลางซ้ายเชื่อมโยงลงได้จำนวนเท่ากับ $24 - 6 = 18$ ตัว แสดงว่าระเบียบวิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้ผลกับโครงข่ายนี้

บทที่ 5

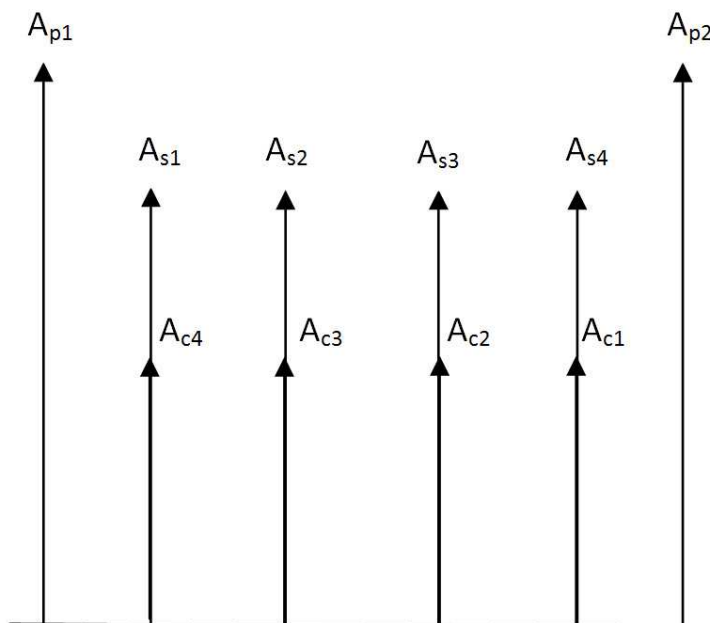
การวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น ในโครงข่าย wavelength-routed แบบเมซ

จากบทที่ 4 ข้างต้น เป็นการแสดงระเบียบวิธีในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น บน 3 โครงข่ายตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้ผลกับโครงข่ายดังกล่าว อย่างไรก็ตาม OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นนั้นเป็นไปได้ในทางอุดมคติเท่านั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงศึกษาการออกแบบ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นเช่นกัน ซึ่งการออกแบบระเบียบวิธีการใช้งาน OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นมีความซับซ้อนมากกว่าแบบไม่เลื่อนความยาวคลื่น เพราะต้องพิจารณาค่าดิสเพอร์ชันของแต่ละช่องสัญญาณทั้งก่อนเข้าและหลังออกจาก OPC ซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน

สำหรับระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นนั้นจะแตกต่างจากชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในขั้นตอนการพิจารณาการหาช่วงดิสเพอร์ชันที่จะใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R เนื่องจากความยาวคลื่นขาเข้าและขาออกจะอยู่ ณ ตำแหน่งที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.20 และ รูปที่ 2.21 ดังนี้



รูปที่ 2.20 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น
ลักษณะเลื่อนแบนด์วิดท์



รูปที่ 2.21 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น
ลักษณะไม่เลื่อนแบนด์วิดท์

จากความยาวคลื่นขาเข้าและขาออกเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างกันเช่นนี้ จะส่งผลให้ค่าดิสเพอร์ชันขาเข้าและขาออกเป็นคนละค่าเช่นเดียวกัน ซึ่งหลักการของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นในการสื่อสารหลายช่องสัญญาณนั้น ลักษณะของสัญญาณคอนจูเกตจะเกิดสลับลำดับที่ตำแหน่งความยาวคลื่นแตกต่างไปจากสัญญาณตั้งต้นเดิม จะเห็นได้ว่า OPC ชนิดนี้มีทั้งลักษณะที่เลื่อนแบนด์วิดท์และลักษณะที่ไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ ดังนั้นในขั้นตอนการพิจารณาการหาช่วงดิสเพอร์ชันที่ใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R จึงต้องใช้ค่าดิสเพอร์ชัน 2 ค่า เพื่อเป็นการง่ายต่อความเข้าใจ ในหัวข้อต่อไปจะเป็นตัวอย่างการทดลองระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์บน 3 โครงข่ายตัวอย่าง ซึ่งเป็นโครงข่ายเดียวกับที่ใช้กับบทที่ 4 ที่ผ่านมา

ตัวอย่างการคำนวณ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ (wavelength shifted-bandwidth shifted OPC)

5.1 ตัวอย่างที่ 1 โครงข่าย (European Reference Network: ERNet)

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่า โครงข่าย ERNet ประกอบด้วย 15 โหนด 42 ข่ายเชื่อมโยง ซึ่งหากวาง OPC ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของทุกๆข่ายเชื่อมโยงนั้น จะต้องใช้ OPC เป็นจำนวน 42 ตัว แต่

หากมีการใช้ระเบียบวิธีที่จะนำเสนอต่อไปนี้จะประยุกต์กับโครงข่าย จะสามารถลดจำนวนการใช้งาน OPC ลงได้โดยที่ค่าดิสเพอร์ชันสะสมในระบบไม่เกิดขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน โดยระเบียบวิธีการวาง OPC แบ่งได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การคำนวณระยะทางระหว่างทุกคูโนดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ในโครงข่าย ERNet

สำหรับขั้นตอนการคำนวณระยะทางระหว่างทุกคูโนดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด จะมีผลลัพธ์ที่ได้เหมือนกับระเบียบวิธีการวาง OPC แบบไม่เลื่อนความยาวคลื่นทุกประการ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

5.1.2 การคำนวณช่วงดิสเพอร์ชันที่ใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ในโครงข่าย ERNet

สำหรับหลักการคำนวณพารามิเตอร์ R นั้น จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์บนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบ ซึ่งสมการกำหนดขอบเขตด้านซ้ายและขวาของช่วงการวางสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์เป็นดังสมการที่ ตามสมการที่ (3.21)

$$-800 = -D_{in} X_{OPC_L} + D_{out} (LP - X_{OPC_L}) \quad (5.1)$$

จากสมการ (5.1) ข้างต้น จะได้ว่ากำหนดขอบเขตด้านซ้ายคือ

$$X_{OPC_L} = \frac{D_{out} (LP) + 800}{D_{in} + D_{out}} \quad (3.23)$$

เมื่อใช้สมการกำหนดขอบเขตด้านซ้ายประกอบกับสมมติฐานในการกำหนดพารามิเตอร์ R ดังนี้

$$LP_R = \frac{LP}{R} \quad (3.24)$$

$$X_{OPC_L} = \frac{X_1}{R} \quad (3.25)$$

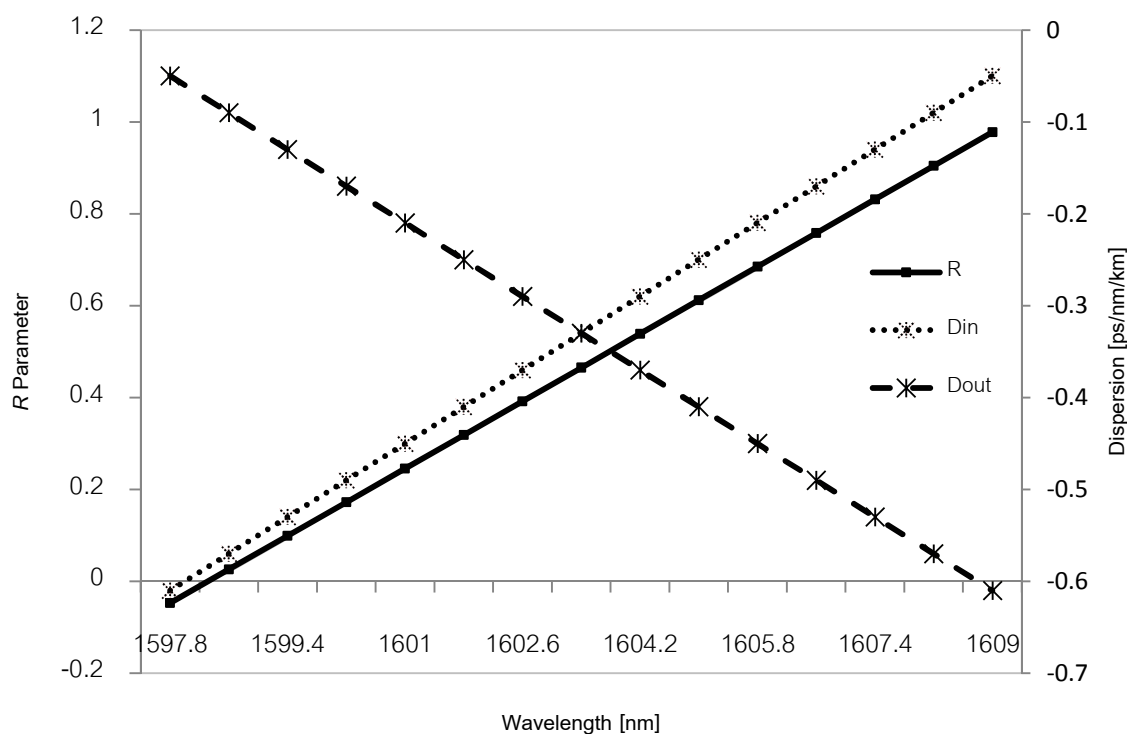
เมื่อทำการแทนสมการที่ (3.22) และ (3.22) ลงในสมการที่ (3.22) จะได้สมการของพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์บนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบ ดังนี้

$$R = \frac{(D_{in} + D_{out}) X_1 - D_{out} (LP)}{800} \quad (3.21)$$

เพื่อเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวคลื่น ดิสเพอร์ชันและพารามิเตอร์ R จึงต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิสเพอร์ชันกับความยาวคลื่นตามประเภทของเส้นใยแสงที่ใช้ในโครงข่ายเช่นกัน ตามสมการที่ (3.22) ดังนี้

$$D_\lambda = -3 + 0.05 \times (\lambda - 1550) \quad (3.22)$$

จากสมการที่ (3.21) และ (3.22) ข้างต้น แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ R กับค่าดิสเพอร์ชันขาเข้า/ขาออก และค่าดิสเพอร์ชันขาเข้า/ออกกับความยาวคลื่นตามลำดับ เมื่อให้ตัวแปรความยาวคลื่นเป็นตัวแปรอิสระเพื่อเปลี่ยนค่าแล้วนั้น จะเห็นได้ว่าค่า R จะเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่นที่เปลี่ยนเช่นกัน ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R , ดิสเพอร์ชันขาเข้า/ขาออกและความยาวคลื่นสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ในโครงข่าย ERNet

จากรูปที่ 5.1 พบว่าค่าที่พารามิเตอร์ $|R| \leq 1$ เป็นดังนี้

- ช่วงความยาวคลื่น 1597.8 nm ถึง 1609 nm

จากช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวนี้ คิดเป็นความยาวคลื่นจำนวน 15 ความยาวคลื่น แบ่งตามมาตรฐาน ITU-T 100 GHz Channel Spacing

โดยช่วงค่าดิสเพอร์ชันขาเข้า/ขาออกเป็นดังนี้

- ช่วงดิสเพอร์ชัน -0.05 ps/nm/km ถึง -0.61 ps/nm/km

โดยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้า -0.61 ps/nm/km และดิสเพอร์ชันขาออก -0.05 ps/nm/km ที่ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนั้น จะนำไปใช้ในขั้นตอนการคำนวณช่วงในการวาง OPC สำหรับการสื่อสารระหว่างทุกๆ โหนดต่อไป

5.1.3 การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ สำหรับการสื่อสารทุกๆ โหนดในโครงข่าย ERNet

สำหรับการคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์นั้น มีหลักการเดียวกับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น แตกต่างกันเพียงการใช้สมการที่ต่างกัน ในการหาระยะขอบเขตด้านซ้ายและขอบเขตด้านขวา เนื่องจากมีค่าดิสเพอร์ชันขาออกเป็นตัวแปรที่เพิ่มขึ้นมา โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) ดังนี้

$$X_{OPC_L} = \frac{D_{out}(LP) + 800}{D_{in} + D_{out}} \quad (3.14)$$

$$X_{OPC_R} = \frac{D_{out}(LP) - 800}{D_{in} + D_{out}} \quad (3.15)$$

จากสมการข้างต้นนั้นเป็นระยะขอบเขตในการวาง OPC ทางด้านซ้ายและด้านขวา ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระยะดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะทางทั้งหมดของการสื่อสาร (LP) และค่าดิสเพอร์ชันในระบบ ทั้งดิสเพอร์ชันขาเข้า (D_{in}) และขาออก (D_{out}) โดยในส่วนของค่าดิสเพอร์ชันของระบบนั้นจะเลือกจากค่าดิสเพอร์ชันในขั้นตอนที่ผ่านมา โดยช่วงการวาง OPC สำหรับการสื่อสารทุกๆ โหนดเป็นไปตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์
สำหรับการสื่อสารทุกๆคู่โนดในโครงข่าย ERNet

โนด 1	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 2	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
2	336	1	-1,187	1,238	1	336	2	-1,187	1,238
3	408	3	-1,181	1,243	3	624	7,10	-1,165	1,259
4	720	5	-1,158	1,267	4	816	7,11	-1,150	1,274
5	1080	5,13	-1,130	1,294	5	1176	7,11,13	-1,123	1,301
6	564	3,9	-1,169	1,255	6	468	7	-1,177	1,248
7	900	5,15	-1,144	1,280	7	996	7,11,15	-1,137	1,288
8	1068	5,15,20	-1,131	1,293	8	1164	7,11,15,20	-1,124	1,300
9	1248	5,15,20,22	-1,118	1,307	9	1344	7,11,15,20,22	-1,110	1,314
10	924	3,9,23	-1,142	1,282	10	828	7,23	-1,149	1,275
11	1296	3,9,23,27	-1,114	1,310	11	1200	7,23,27	-1,121	1,303
12	1428	3,9,23,31	-1,104	1,320	12	1332	7,23,31	-1,111	1,313
13	1560	3,9,23,33,39	-1,094	1,330	13	1464	7,23,33,39	-1,101	1,323
14	1308	3,9,23,33	-1,113	1,311	14	1212	7,23,33	-1,120	1,304
15	1464	3,9,23,27,35	-1,101	1,323	15	1368	7,23,27,35	-1,108	1,316
โนด 3	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 4	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	408	4	-1,181	1,243	1	720	6	-1,158	1,267
2	624	9,8	-1,165	1,259	2	816	12,8	-1,150	1,274
4	504	9,11	-1,174	1,250	3	504	12,10	-1,174	1,250
5	864	9,11,13	-1,147	1,278	5	360	13	-1,185	1,239
6	156	9	-1,200	1,224	6	348	12	-1,186	1,238
7	684	9,11,15	-1,160	1,264	7	180	15	-1,198	1,226
8	852	9,11,15,20	-1,148	1,277	8	348	15,20	-1,186	1,238
9	1032	9,11,15,20,22	-1,134	1,290	9	528	15,20,22	-1,172	1,252
10	516	9,23	-1,173	1,251	10	432	15,25	-1,179	1,245
11	888	9,23,27	-1,145	1,279	11	708	15,20,22,29	-1,158	1,266
12	1020	9,23,31	-1,135	1,289	12	936	15,25,31	-1,141	1,283
13	1152	9,23,33,39	-1,125	1,299	13	1068	15,25,33,39	-1,131	1,293
14	900	9,23,33	-1,144	1,280	14	816	15,25,33	-1,150	1,274
15	1056	9,23,27,35	-1,132	1,292	15	876	15,20,22,29,35	-1,146	1,278

(ก) โหนดที่ 1-4

โนด 5	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 6	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	1080	14,6	-1,130	1,294	1	564	10,4	-1,169	1,255
2	1176	14,12,8	-1,123	1,301	2	468	8	-1,177	1,248
3	864	14,12,10	-1,147	1,278	3	156	10	-1,200	1,224
4	360	14	-1,185	1,239	4	348	11	-1,186	1,238
6	708	14,12	-1,158	1,266	5	708	11,13	-1,158	1,266
7	540	14,15	-1,171	1,253	7	528	11,15	-1,172	1,252
8	564	17,21	-1,169	1,255	8	696	11,15,20	-1,159	1,265
9	384	17	-1,183	1,241	9	876	11,15,20,22	-1,146	1,278
10	792	14,15,25	-1,152	1,272	10	360	23	-1,185	1,239
11	564	17,29	-1,169	1,255	11	732	23,27	-1,157	1,268
12	1296	14,15,25,31	-1,114	1,310	12	864	23,31	-1,147	1,278
13	1308	17,29,35,41,39	-1,113	1,311	13	996	23,33,39	-1,137	1,288
14	1056	17,29,35,41	-1,132	1,292	14	744	23,33	-1,156	1,268
15	732	17,29,35	-1,157	1,268	15	900	23,27,35	-1,144	1,280
โนด 7	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 8	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	900	16,6	-1,144	1,280	1	1068	19,16,6	-1,131	1,293
2	996	16,12,8	-1,137	1,288	2	1164	19,16,12,8	-1,124	1,300
3	684	16,12,10	-1,160	1,264	3	852	19,16,12,10	-1,148	1,277
4	180	16	-1,198	1,226	4	348	19,16	-1,186	1,238
5	540	16,13	-1,171	1,253	5	564	22,18	-1,169	1,255
6	528	16,12	-1,172	1,252	6	696	19,16,12	-1,159	1,265
8	168	20	-1,199	1,225	7	168	19	-1,199	1,225
9	348	20,22	-1,186	1,238	9	180	22	-1,198	1,226
10	252	25	-1,193	1,231	10	420	19,25	-1,180	1,244
11	528	20,22,29	-1,172	1,252	11	360	22,29	-1,185	1,239
12	756	25,31	-1,155	1,269	12	924	19,25,31	-1,142	1,282
13	888	25,33,39	-1,145	1,279	13	1056	19,25,33,39	-1,132	1,292
14	636	25,33	-1,164	1,260	14	804	19,25,33	-1,151	1,273
15	696	20,22,29,35	-1,159	1,265	15	528	22,29,35	-1,172	1,252

(ข) โหนดที่ 5-8

โนด 9	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 10	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	1248	21,19,16,6	-1,118	1,307	1	924	24,10,4	-1,142	1,282
2	1344	21,19,16,12,8	-1,110	1,314	2	828	24,8	-1,149	1,275
3	1032	21,19,16,12,10	-1,134	1,290	3	516	24,10	-1,173	1,251
4	528	21,19,16	-1,172	1,252	4	432	26,16	-1,179	1,245
5	384	18	-1,183	1,241	5	792	26,16,13	-1,152	1,272
6	876	21,19,16,12	-1,146	1,278	6	360	24	-1,185	1,239
7	348	21,19	-1,186	1,238	7	252	26	-1,193	1,231
8	180	21	-1,198	1,226	8	420	26,20	-1,180	1,244
10	552	29,28	-1,170	1,254	9	552	27,30	-1,170	1,254
11	180	29	-1,198	1,226	11	372	27	-1,184	1,240
12	1056	29,28,31	-1,132	1,292	12	504	31	-1,174	1,250
13	924	29,35,41,39	-1,142	1,282	13	636	33,39	-1,164	1,260
14	672	29,35,41	-1,161	1,263	14	384	33	-1,183	1,241
15	348	29,35	-1,186	1,238	15	540	27,35	-1,171	1,253
โนด 11	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 12	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	1296	28,24,10,4	-1,114	1,310	1	1428	32,24,10,4	-1,104	1,320
2	1200	28,24,8	-1,121	1,303	2	1332	32,24,8	-1,111	1,313
3	888	28,24,10	-1,145	1,279	3	1020	32,24,10	-1,135	1,289
4	708	30,21,19,16	-1,158	1,266	4	936	32,26,16	-1,141	1,283
5	564	30,18	-1,169	1,255	5	1296	32,26,16,13	-1,114	1,310
6	732	28,24	-1,157	1,268	6	864	32,24	-1,147	1,278
7	528	30,21,19	-1,172	1,252	7	756	32,26	-1,155	1,269
8	360	30,21	-1,185	1,239	8	924	32,26,20	-1,142	1,282
9	180	30	-1,198	1,226	9	1056	32,27,30	-1,132	1,292
10	372	28	-1,184	1,240	10	504	32	-1,174	1,250
12	876	28,31	-1,146	1,278	11	876	32,27	-1,146	1,278
13	744	35,41,39	-1,156	1,268	13	480	37	-1,176	1,248
14	492	35,41	-1,175	1,249	14	732	37,40	-1,157	1,268
15	168	35	-1,199	1,225	15	1044	32,27,35	-1,133	1,291

(ค) โหนดที่ 9-12

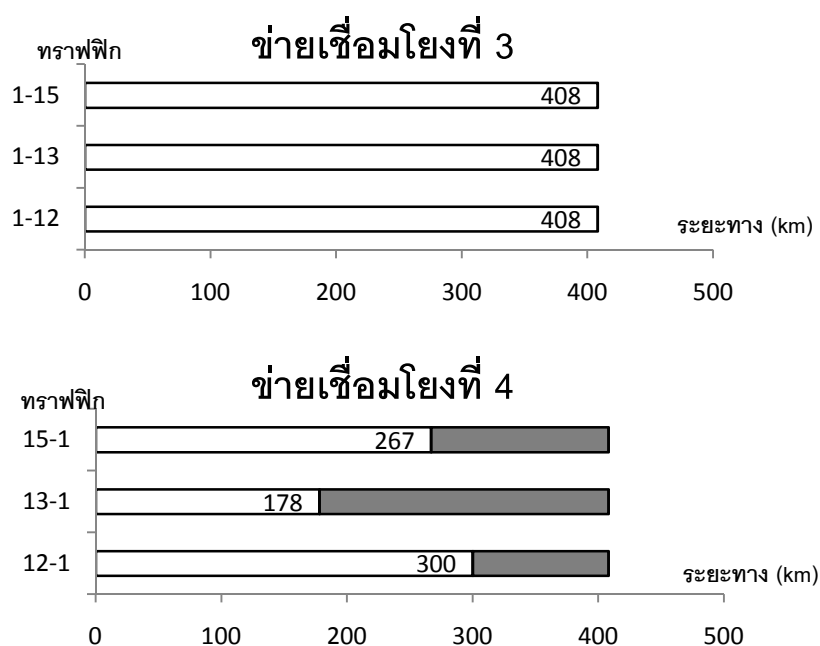
โนด 13	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 14	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	1560	40,34,24,10,4	-1,094	1,330	1	1308	34,24,10,4	-1,113	1,311
2	1464	40,34,24,8	-1,101	1,323	2	1212	34,24,8	-1,120	1,304
3	1152	40,34,24,10	-1,125	1,299	3	900	34,24,10	-1,144	1,280
4	1068	40,34,26,16	-1,131	1,293	4	816	34,26,16	-1,150	1,274
5	1308	40,42,36,30,18	-1,113	1,311	5	1056	42,36,30,18	-1,132	1,292
6	996	40,34,24	-1,137	1,288	6	744	34,24	-1,156	1,268
7	888	40,34,26	-1,145	1,279	7	636	34,26	-1,164	1,260
8	1056	40,34,26,20	-1,132	1,292	8	804	34,26,20	-1,151	1,273
9	924	40,42,36,30	-1,142	1,282	9	672	42,36,30	-1,161	1,263
10	636	40,34	-1,164	1,260	10	384	34	-1,183	1,241
11	744	40,42,36	-1,156	1,268	11	492	42,36	-1,175	1,249
12	480	38	-1,176	1,248	12	732	39,38	-1,157	1,268
14	252	40	-1,193	1,231	13	252	39	-1,193	1,231
15	576	40,42	-1,168	1,256	15	324	42	-1,188	1,237
โนด 15	ระยะทาง	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R					
1	1464	36,28,24,10,4	-1,101	1,323					
2	1368	36,28,24,8	-1,108	1,316					
3	1056	36,28,24,10	-1,132	1,292					
4	876	36,30,21,19,16	-1,146	1,278					
5	732	36,30,18	-1,157	1,268					
6	900	36,28,24	-1,144	1,280					
7	696	36,30,21,19	-1,159	1,265					
8	528	36,30,21	-1,172	1,252					
9	348	36,30	-1,186	1,238					
10	540	36,28	-1,171	1,253					
11	168	36	-1,199	1,225					
12	1044	36,28,31	-1,133	1,291					
13	576	41,39	-1,168	1,256					
14	324	41	-1,188	1,237					

(ง) โหนดที่ 13-15

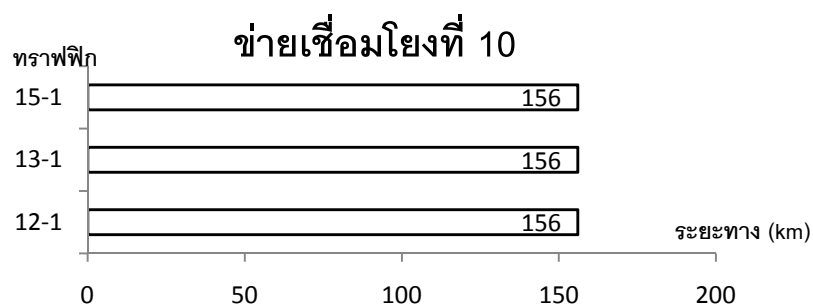
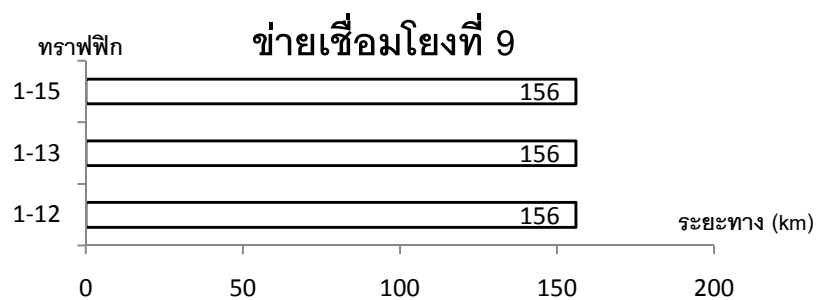
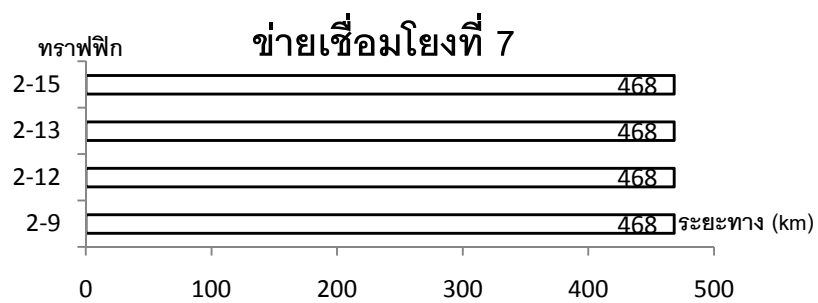
จากตารางที่ 5.1 แสดงถึงระยะขอบเขตทางซ้ายและขวาของการวาง OPC ชนิดเลื่อน ความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์สำหรับกราฟฟิการสื่อสารทั้งหมดในโครงข่าย จะเห็นว่าจะมี บางกราฟฟิกที่ไม่จำเป็นต้องใช้ OPC ในการจำกัดผลของดิสเพอร์ชัน เนื่องจากระยะทางที่มากที่สุดที่จะต้องพิจารณาการวาง OPC คือ $800/|-0.61|=1,311\text{ km}$ ดังนั้นระยะทางของกราฟฟิก ใดๆที่น้อยกว่าค่าดังกล่าว จึงไม่ต้องพิจารณาผลของดิสเพอร์ชันสะสมและไม่จำเป็นต้องพิจารณา การวาง OPC

5.1.4 การกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบ เลื่อนแบนด์วิดท์สำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย ERNet โดยใช้วิธีซ้อนทับ

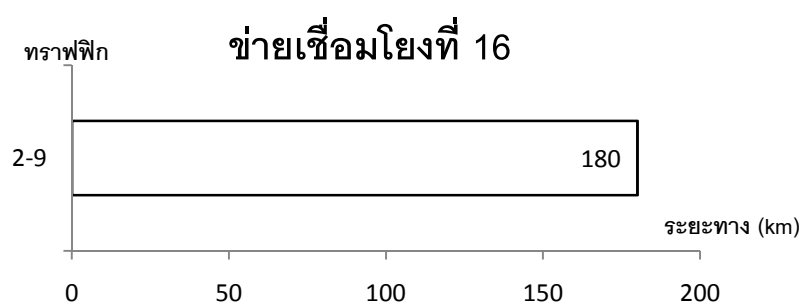
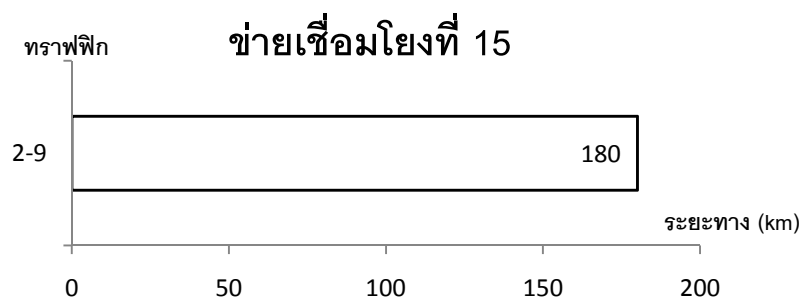
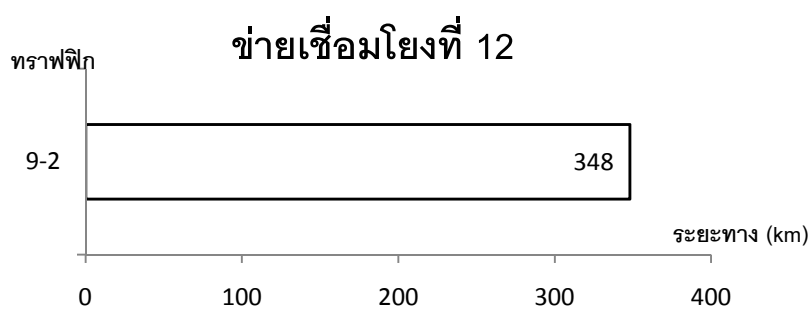
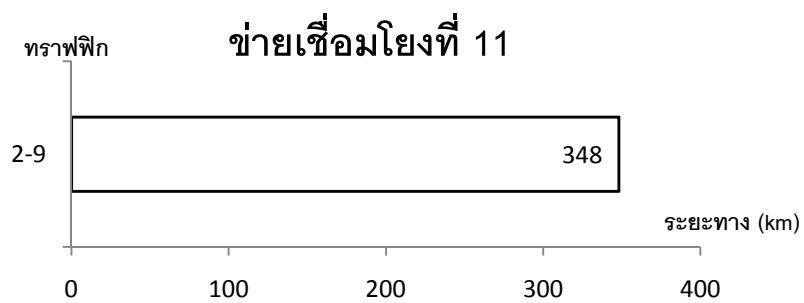
จากขั้นตอนที่ผ่านมา เราจะได้ตำแหน่งขอบเขตด้านซ้ายและด้านขวาในการวาง OPC สำหรับทุกๆกราฟฟิกดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งจากตารางดังกล่าว เราสามารถสรุปช่วงการวาง OPC สำหรับข่ายเชื่อมโยงได้ดังรูปที่ 5.2



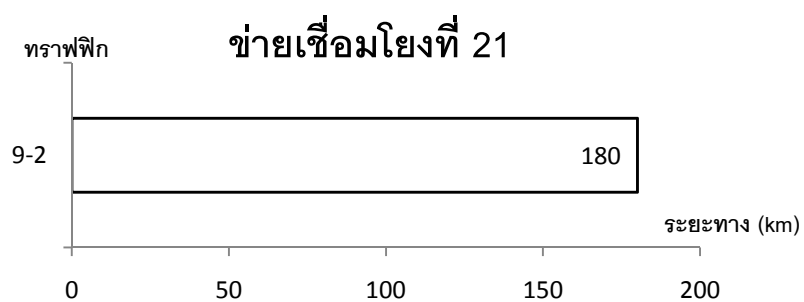
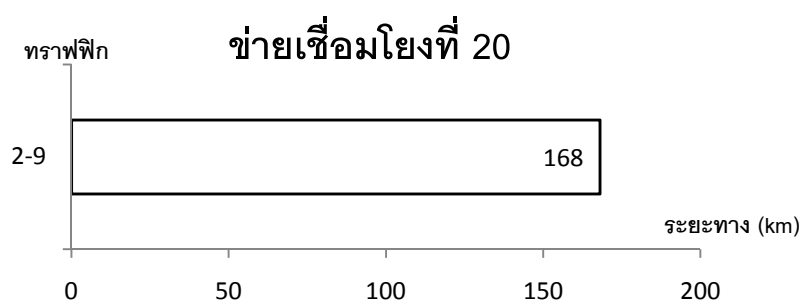
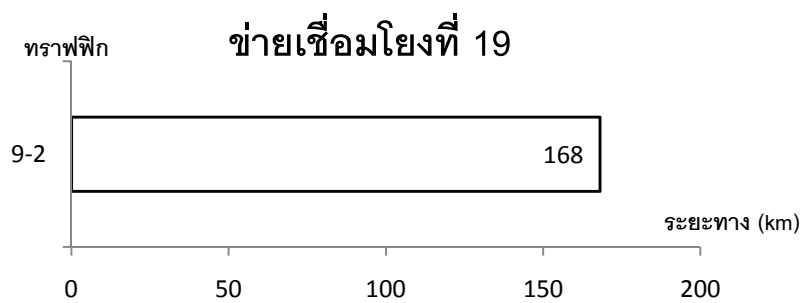
(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 3-4



(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 7-10

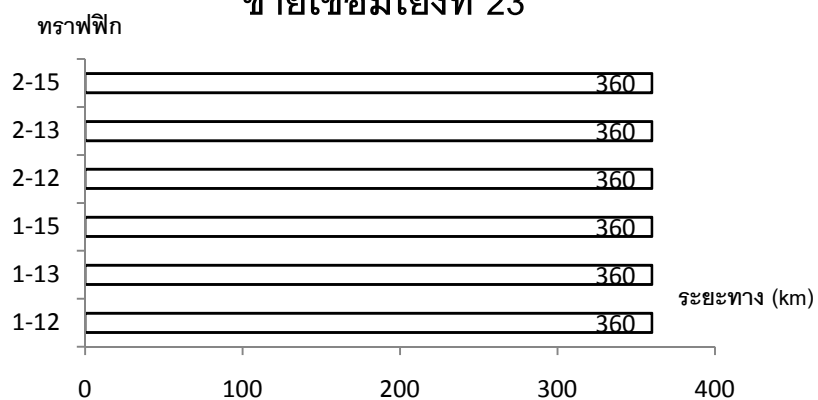


(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 11-12, 15-16

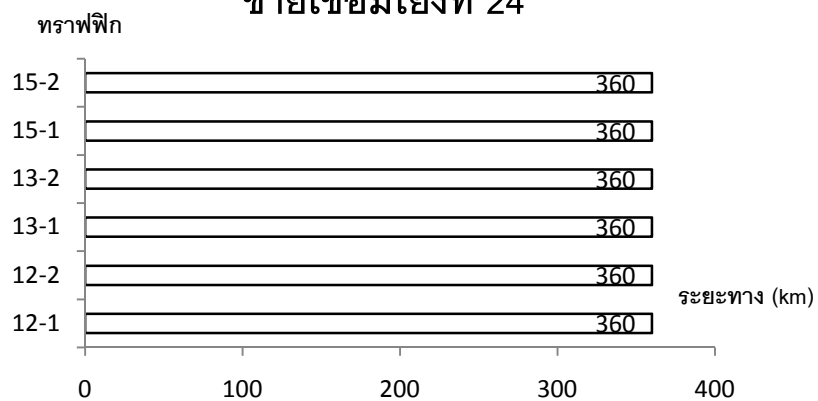


(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 19-22

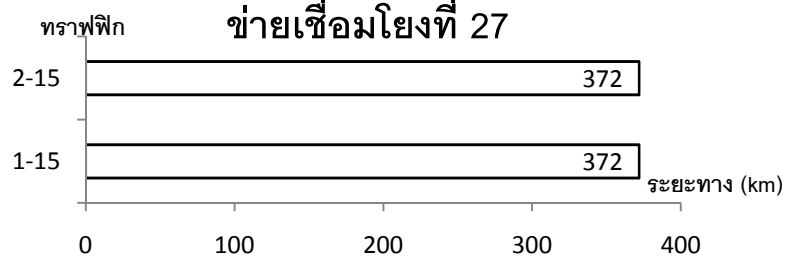
ข่ายเชื่อมโยงที่ 23



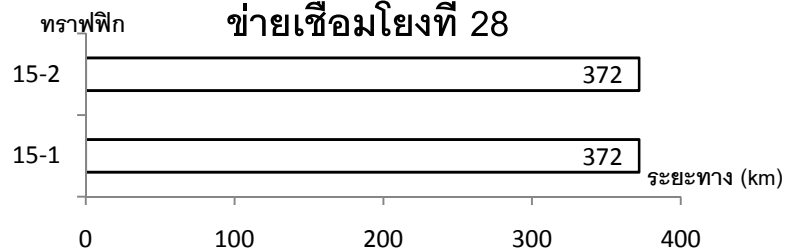
ข่ายเชื่อมโยงที่ 24



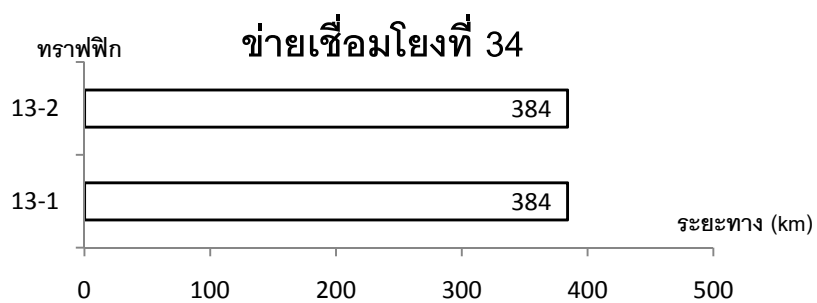
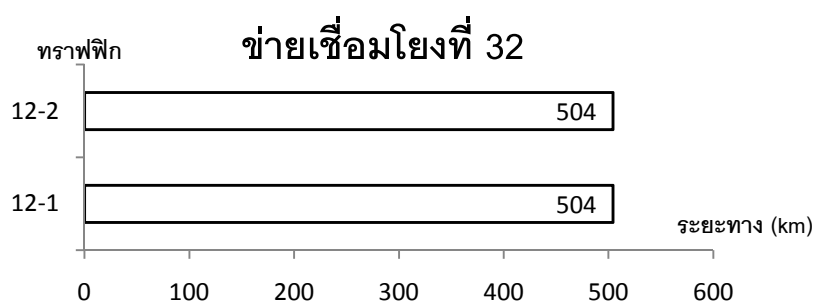
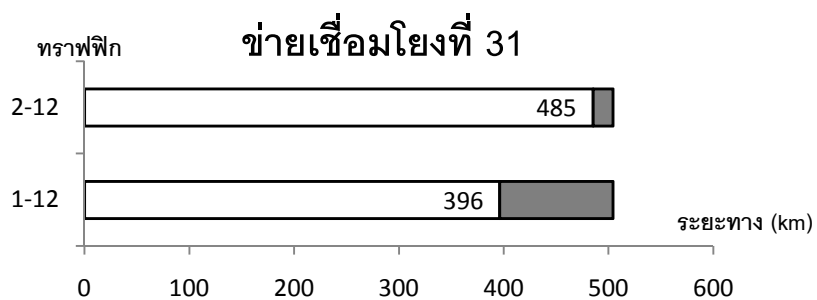
ข่ายเชื่อมโยงที่ 27



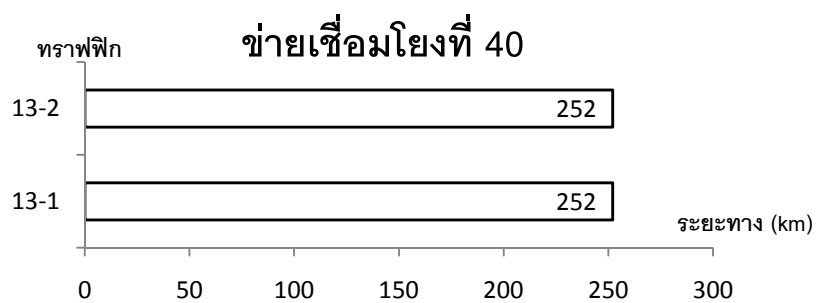
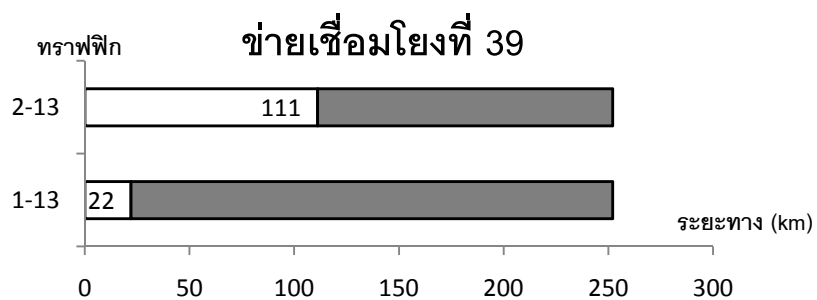
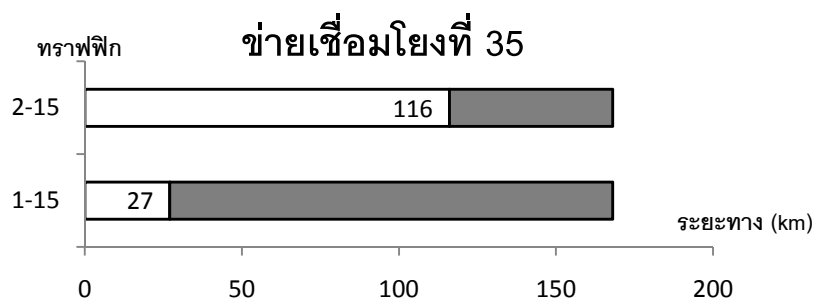
ข่ายเชื่อมโยงที่ 28



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 23-24, 27-28



(ฉ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 31-34



(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 35-36, 39-40

รูปที่ 5.2 ช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์สำหรับทุกข่ายเชื่อมโยง
ในโครงข่าย ERNet

รูปที่ 5.2 แสดงถึงช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์บนข่ายเชื่อมโยงที่แตกต่างกันในโครงข่าย ERNet โดยในช่วงแถบสีขาของแต่ละข่ายเชื่อมโยงนั้น แสดงถึงช่วงที่สามารถวาง OPC ได้ และในขั้นตอนต่อไปคือหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC โดยจะใช้การพิจารณาเดียวกันกับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น ดังนี้

1. จากรูปที่ 5.2 พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกในการวาง OPC มากที่สุด ในที่นี้คือข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 ซึ่งประกอบด้วยช่วงการวาง OPC สำหรับ 6 ทราฟฟิก (รูปที่ 5.2 จ) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 0-360 กิโลเมตร
2. พิจารณาตัดข่ายเชื่อมโยงที่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกมากที่สุดตามข้อ 1 โดยให้หลักการสำหรับโครงข่ายที่เกี่ยวข้องใดๆ ดังนี้

จำนวนทราฟฟิกที่เหลือ = จำนวนทราฟฟิกที่ต้องวาง OPC (แถบในรูปที่ 5.2) – จำนวนทราฟฟิกที่เกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24

ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 3 และ 4 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 7 และ 8 เหลือทราฟฟิก = $4 - 4 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 9 และ 10 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 27 และ 28 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 31 และ 32 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 33 และ 34 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 39 และ 40 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

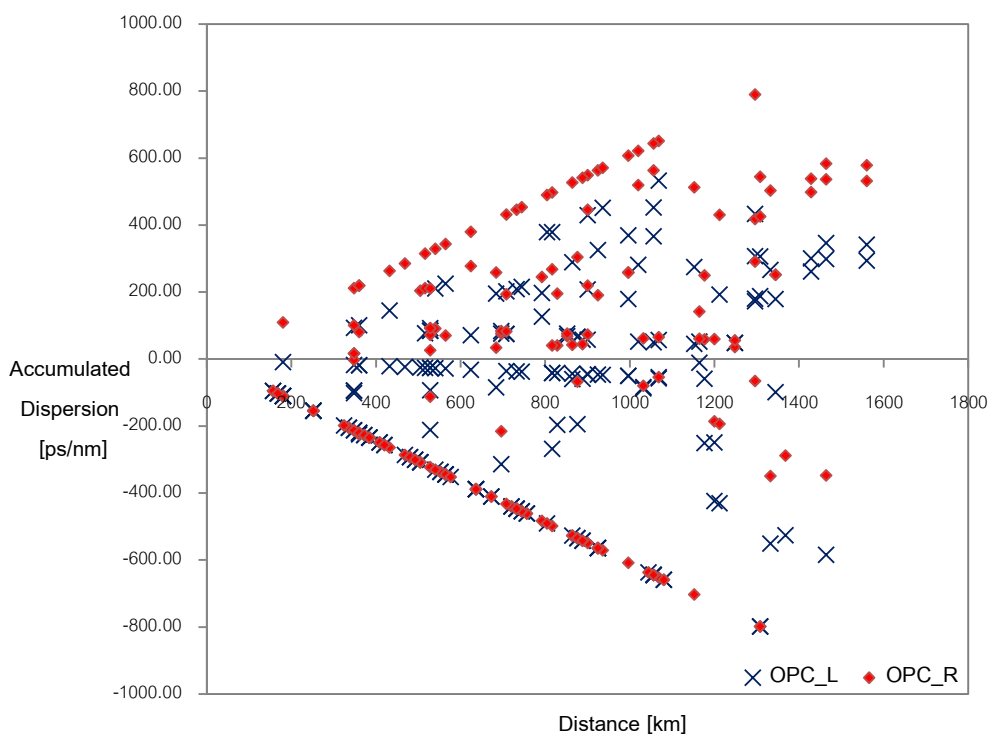
3. เมื่อทำการพิจารณาตัดทราฟฟิกตามข้อ 2 จนเหลือข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกที่เหลือเท่ากันแล้วนั้น ขั้นตอนต่อมาคือ พิจารณามูลของดีสเพอร์ชันสะสมบนข่ายเชื่อมโยงที่ไม่มีมีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 23, 24 ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 11, 12 ข่ายเชื่อมโยงที่ 15, 16 ข่ายเชื่อมโยงที่ 19, 20 และข่ายเชื่อมโยงที่ 21, 22 ตามลำดับ จึงจะทำให้ดีสเพอร์ชันสะสมไม่เกินขีดจำกัดในทุกๆทราฟฟิก
4. จากหลักพิจารณาทั้งหมด ประกอบกับช่วงการวาง OPC จากรูปที่ 5.2 สามารถสรุปตำแหน่งการวาง OPC ได้ตามตารางที่ 5.2 ดังนี้

ตารางที่ 5.2 สรุปช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์
ในโครงข่าย ERNet

ข่าย เชื่อมโยง	ช่วงการวาง OPC (กิโลเมตร)	ข่าย เชื่อมโยง	ช่วงการวาง OPC (กิโลเมตร)
11	0-348	21	0-180
12	0-348	22	0-180
15	0-180	23	0-360
16	0-180	24	0-150
19	0-168		
20	0-168		

5.1.5 การทดสอบค่าดิสเพอร์ชันสะสมในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์สำหรับการสื่อสารระหว่างทุก ๆ คู่โหนดในโครงข่าย ERNet

ในการทดสอบค่าดิสเพอร์ชันสะสมสำหรับการสื่อสารระหว่างทุก ๆ คู่โหนด โดยใช้สมการที่ (3.1), (3.10) และ (3.11) ตามลำดับ ในการคำนวณแต่ละทราฟฟิกนั้นจะพิจารณาค่าดิสเพอร์ชันสะสมจากการวางที่ขอบเขตด้านซ้ายและขวาเท่านั้น ระยะทางระหว่างช่วงซ้ายไปถึงขวาจะไม่ได้พิจารณา เนื่องจากการพิจารณาที่ขอบเขตด้านซ้ายและขวาจะครอบคลุมระยะทางดังกล่าวแล้ว และการคำนวณดิสเพอร์ชันสะสมสำหรับแต่ละทราฟฟิกนั้น ต้องพิจารณาค่าดิสเพอร์ชันด้วย โดยใช้หลักการที่ว่าค่าดิสเพอร์ชันเมื่อออกจาก OPC แล้วจะเป็นค่าที่เปลี่ยนไปจากค่าดิสเพอร์ชันเดิมก่อนเข้า OPC ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบ
เลื่อนแบนด์วิดท์ในโครงข่ายERNet

จากรูปที่ 5.3 แต่ละจุดที่แสดงในรูปคือ ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกเมื่อวางที่
ขอบเขตด้านซ้ายและขวาตามลำดับ พบว่าค่าดังกล่าวมีค่าไม่เกิน 800 ps/nm สำหรับทุกๆจุด
ใดๆ ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่ตั้งไว้ของระบบ และทำให้ลดจำนวนการใช้งาน OPC จากวิธีการวางไว้ ณ
กึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงลงได้จำนวนเท่ากับ $42-10 = 32$ ตัว

5.2 ตัวอย่างที่ 2 โครงข่าย North-American Reference Network (NARNet) สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์

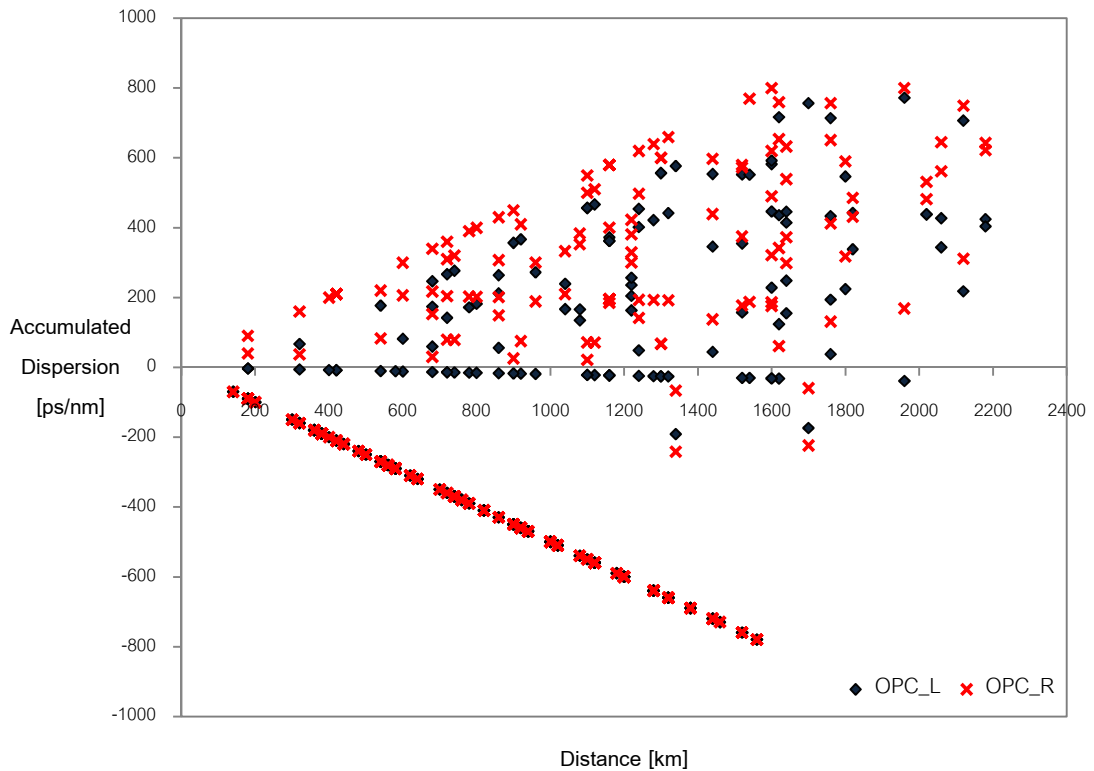
จากรูปที่ 4. จะเห็นว่า โครงข่าย NARNet ประกอบด้วย 17 โหนด 48 ข่ายเชื่อมโยง ซึ่งหากวาง OPC ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของทุกๆข่ายเชื่อมโยงนั้น จะต้องใช้ OPC เป็นจำนวน 48 ตัว แต่หากมีการใช้ระเบียบวิธีที่จะนำเสนอต่อไปนี้จะประยุกต์กับโครงข่าย จะสามารถลดจำนวนการใช้งาน OPC ลงได้โดยที่ค่าดิสเพอร์ชันสะสมในระบบไม่เกิดขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน ซึ่งรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์บนโครงข่าย NARNet จะแสดงไว้ในภาคผนวก ส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์

จากรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของระเบียบวิธีซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก สามารถสรุปตำแหน่งการวาง OPC ได้ตามตารางที่ 5.3 ดังนี้

ตารางที่ 5.3 สรุปช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ในโครงข่าย NARNet

ข่ายเชื่อมโยง	ช่วงการวาง OPC (กิโลเมตร)	ข่ายเชื่อมโยง	ช่วงการวาง OPC (กิโลเมตร)
15	0-84	21	0-420
16	0-180	22	0-420
33	0-400		
34	0-54		

ในการทดสอบค่าดิสเพอร์ชันสะสมสำหรับการสื่อสารระหว่างทุกๆโหนด จะใช้สมการที่ (3.1), (3.10) และ (3.11) ตามลำดับ นอกจากนี้การคำนวณดิสเพอร์ชันสะสมสำหรับแต่ละทราฟฟิกนั้น ต้องพิจารณาค่าดิสเพอร์ชันขาเข้า/ขาออก ตามลำดับด้วย โดยใช้หลักการที่ว่าค่าดิสเพอร์ชันเมื่อออกจาก OPC แล้วจะเป็นค่าที่เปลี่ยนไปจากค่าดิสเพอร์ชันเดิมก่อนเข้า OPC ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น แบบเลื่อนแบนด์วิดท์ในโครงข่าย NARNet

จากรูปที่ 5.4 แต่ละจุดที่แสดงในรูปคือ ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกเมื่อวางที่ขอบเขตด้านซ้ายและขวาตามลำดับ โดยมีค่าไม่เกิน 800 ps/nm สำหรับทุกๆคู่โหนด และทำให้ลดจำนวนการใช้งาน OPC จากวิธีการวางไว้ ณ กึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงลงได้จำนวนเท่ากับ $48-6 = 42$ ตัว แสดงว่าระเบียบวิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้ผลกับโครงข่ายนี้ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพมากกว่าการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น เนื่องจากระเบียบวิธีดังกล่าวต้องอาศัยการวาง OPC จำนวน 14 ตัวจึงจะสามารถจัดการดิสเพอร์ชันในระบบได้ ในขณะที่หากใช้งาน OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์แล้วจะใช้จำนวนเพียง 6 ตัวเท่านั้น

5.3 ตัวอย่างที่ 3 โครงข่าย Optical Pan European Network (OPEN)

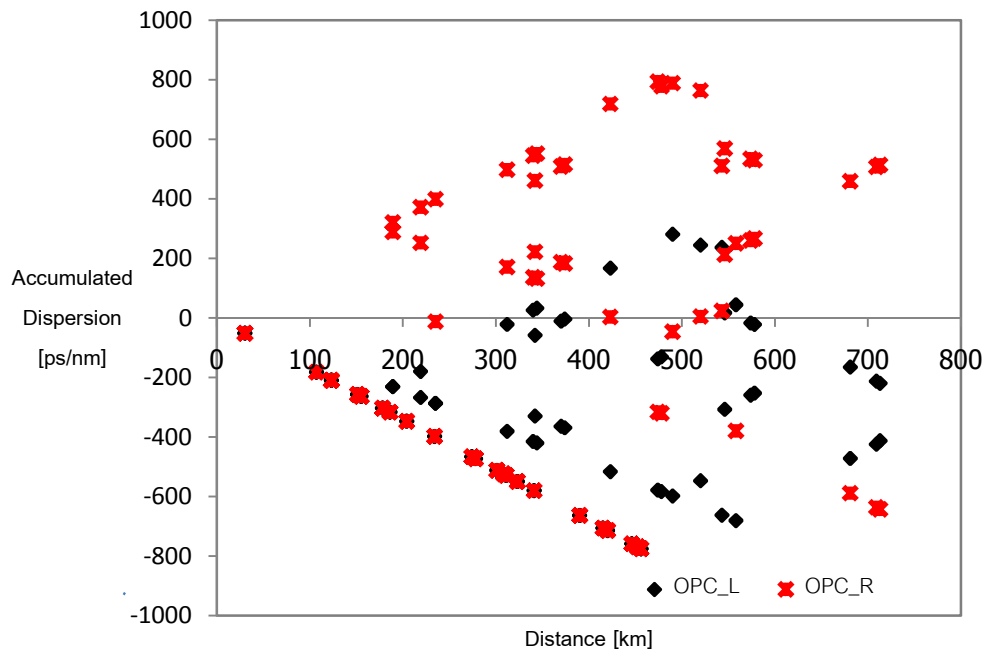
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า โครงข่าย OPEN ประกอบด้วย 10 โหนด 26 ข่ายเชื่อมโยง ซึ่งหากวาง OPC ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของทุกๆข่ายเชื่อมโยงนั้น จะต้องใช้ OPC เป็นจำนวน 26 ตัว แต่หากมีการใช้ระเบียบวิธีที่จะนำเสนอต่อไปนี้ประยุกต์กับโครงข่าย จะสามารถลดจำนวนการใช้งาน OPC ลงได้โดยที่ค่าดิสเพอร์ชันสะสมในระบบไม่เกิดขีดจำกัดดิสเพอร์ชัน ซึ่งรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์บนโครงข่าย OPEN จะแสดงไว้ในภาคผนวก ส่วนท้ายของวิทยานิพนธ์

จากรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของระเบียบวิธีซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก สามารถสรุปตำแหน่งการวาง OPC ได้ตามตารางที่ 5.4 ดังนี้

ตารางที่ 5.4 สรุปช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น
แบบเลื่อนแบนด์วิดท์ในโครงข่าย OPEN

ข่าย เชื่อมโยง	ช่วงการวาง OPC (กิโลเมตร)	ข่าย เชื่อมโยง	ช่วงการวาง OPC (กิโลเมตร)
9	0-178	15	0-319
10	0-189	16	0-90
23	0-235		
24	0-94		

ในการทดสอบค่าดิสเพอร์ชันสะสมสำหรับการสื่อสารระหว่างทุกๆโหนด จะใช้สมการที่ (3.1), (3.10) และ (3.11) ตามลำดับ ในการคำนวณดิสเพอร์ชันสะสมสำหรับแต่ละทราฟฟิกนั้น ต้องพิจารณาค่าดิสเพอร์ชันด้วย โดยใช้หลักการที่ว่าค่าดิสเพอร์ชันเมื่อออกจาก OPC แล้วจะเป็นค่าที่เปลี่ยนไปจากค่าดิสเพอร์ชันเดิมก่อนเข้า OPC ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปดังรูปที่ 5.5

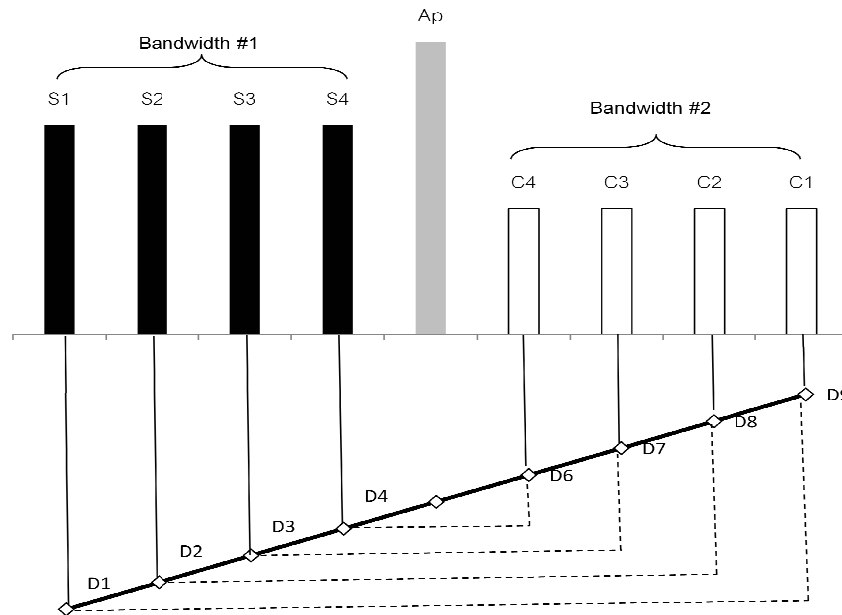


รูปที่ 5.5 ดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ในโครงข่าย OPEN

จากรูปที่ 5.5 แสดงถึงดิสเพอร์ชันสะสมของทุกทราฟฟิกเมื่อวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นที่ขอบเขตด้านซ้ายและขวาตามลำดับ พบว่าค่าดังกล่าวมีค่าไม่เกิน 800 ps/nm สำหรับทุกๆ โหนดใดๆ ทำให้ลดจำนวนการใช้งาน OPC จากวิธีการวางไว้ ณ กึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงลงได้จำนวนเท่ากับ $24-6 = 18$ ตัว แสดงว่าระเบียบวิธีดังกล่าวสามารถใช้ได้ผลกับโครงข่ายนี้

5.4 การวิเคราะห์การออกแบบ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์และแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์

สำหรับ 3 ตัวอย่างที่ผ่านมา เป็นตัวอย่างระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ ในส่วนที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็น การวิเคราะห์การออกแบบระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ เพื่อเป็นการง่ายต่อการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ ในที่นี้จะยกตัวอย่างรูปที่ 5.6 มาประกอบการอธิบาย



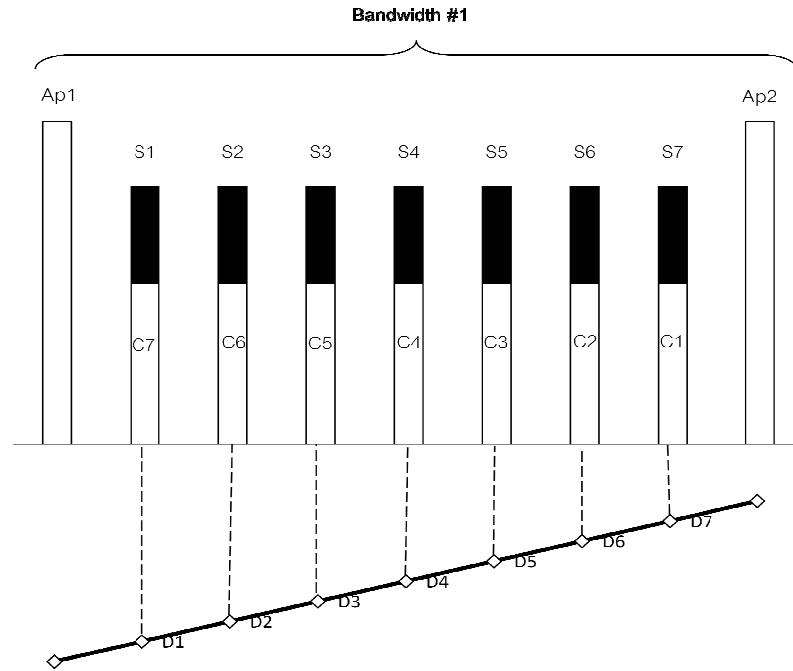
รูปที่ 5.6 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตเทียบกับค่าดีสเพอร์ชันของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์

การสร้างสัญญาณคอนจูเกตของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 สัญญาณ C1-C4 จะเกิดขึ้นฝั่งตรงกันข้ามและสลับลำดับกับสัญญาณตั้งต้น S1-S4 ค่าดีสเพอร์ชันขาเข้า/ขาออกของคู่สัญญาณตั้งต้นและสัญญาณคอนจูเกตแสดงได้ดังสมการที่ (3.21) ดังนี้

$$R = \frac{(D_{in} + D_{out}) X_1 - D_{out} (LP)}{800} \quad (3.21)$$

ค่าดีสเพอร์ชันของสัญญาณจะจับคู่กันดังแสดงในส่วนล่างของรูปที่ xxx ดังนี้ 1) D1 ของสัญญาณตั้งต้น S1 จับคู่กับ D9 ของสัญญาณตั้งต้น C1 2) D2 ของสัญญาณตั้งต้น S2 จับคู่กับ D8 ของสัญญาณตั้งต้น C2 3) D3 ของสัญญาณตั้งต้น S3 จับคู่กับ D7 ของสัญญาณตั้งต้น C3 และ 4) D4 ของสัญญาณตั้งต้น S4 จับคู่กับ D6 ของสัญญาณตั้งต้น C4

จากลักษณะการจับคู่ของดีสเพอร์ชันขาเข้า/ออกข้างต้น ได้นำไปสู่ขั้นตอนการคำนวณช่วงดีสเพอร์ชันที่ใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่น ดังที่ได้แสดงไว้แล้วในหัวข้อ 5.1.2 ในขณะที่ระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์นั้นจะมีรูปแบบการคอนจูเกตสัญญาณที่ต่างออกไป ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 การสร้างสัญญาณคอนจูเกตเทียบกับค่าดิสเพอร์ชันของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์

การสร้างสัญญาณคอนจูเกตของของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์นั้นจะมีลักษณะที่แตกต่างไปจากแบบเลื่อนแบนด์วิดท์คือ ใช้สัญญาณบีบ 2 ตัว สัญญาณคอนจูเกตและสัญญาณตั้งต้นจะเกิดขึ้นแค่ในช่วงแบนด์วิดท์เดียวเท่านั้น ซึ่งสิ่งที่มีลักษณะเหมือนกันคือ ลำดับการเกิดขึ้นของสัญญาณคอนจูเกต สัญญาณ C1-C7 จะเกิดขึ้นสลับลำดับกับสัญญาณตั้งต้น S1-S7 ดังแสดงในรูปที่ 5.7

ในส่วนของการออกแบบระเบียบวิธีนั้น จะใช้การจับคู่ดิสเพอร์ชันที่ต่างกับ OPC แบบก่อนหน้า ค่าดิสเพอร์ชันของสัญญาณจะจับคู่กันดังแสดงในส่วนล่างของรูปที่ xxx โดยค่าดิสเพอร์ชันของสัญญาณคอนจูเกตที่อยู่ตำแหน่งความยาวคลื่นเดียวกับสัญญาณตั้งต้น จะใช้ค่าเดียวกันกับค่าดิสเพอร์ชันของสัญญาณตั้งต้นนั้น เช่น สัญญาณคอนจูเกต C7 และสัญญาณตั้งต้น S1 จะใช้การจับคู่ในค่าดิสเพอร์ชัน D1 ในขณะที่ สัญญาณคอนจูเกต C1 และสัญญาณตั้งต้น S7 จะใช้การจับคู่ในดิสเพอร์ชัน D7 เป็นต้น ซึ่งเนื่องจากทั้ง 2 สัญญาณใช้ค่าดิสเพอร์ชันค่าเดียวกัน ดังนั้นจากสมมติฐานดังกล่าวจะได้ว่าค่าดิสเพอร์ชันขาเข้า/ออก เป็นดังสมการที่ (5.2)

$$D_{in} = D_{out} = D_{\lambda} \tag{5.2}$$

เมื่อแทนค่าดังกล่าวในสมการที่ (3.21) ได้ดังนี้

$$R = \frac{(D_{\lambda} + D_{\lambda})X_1 - D_{\lambda}(LP)}{800} \tag{3.21}$$

จากสมการข้างต้นจะมีรูปแบบเหมือนกับความสัมพันธ์ของการคำนวณค่าพารามิเตอร์ R ของ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นตามสมการที่ (3.19) ดังนี้

$$R = \frac{2D_\lambda X_1 - D_\lambda (LP)}{800} \quad (3.19)$$

จากความสัมพันธ์ที่เหมือนกันข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จะมีการออกแบบเหมือนกับระเบียบการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นทุกประการ เนื่องจากด้วยลักษณะการสร้างสัญญาณคอนจูเกตและการจับคู่ค่าดิสเพอร์ชันของ OPC ชนิดนี้ส่งผลให้ความสัมพันธ์ในขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ R มีลักษณะเดียวกัน ซึ่งหากคำนวณตามความสัมพันธ์ดังกล่าวสำหรับ 3 โครงข่ายตัวอย่างแล้วนั้น จะได้ว่าช่วงความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าวจะเหมือนกับระเบียบการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นเช่นกัน ดังนั้นขั้นตอนต่อไปจนกระทั่งขั้นตอนสุดท้ายที่ได้ซึ่งผลลัพธ์ในการวาง OPC ก็จะไม่เหมือนกันและมีผลลัพธ์เดียวกัน

ข้อเปรียบเทียบระหว่าง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นทั้ง 2 แบบ สามารถอธิบายได้ด้วยความคุ้มค่าในการใช้งานช่วงแบนด์วิดท์ กล่าวคือ ตามรูปที่ 5.6 และ 5.7 OPC ทั้ง 2 แบบได้จองช่วงความยาวคลื่นไว้ 9 ช่องเท่ากัน แต่เนื่องจากการคอนจูเกตสัญญาณแตกต่างกัน ทำให้มีการใช้งานช่วงแบนด์วิดท์ที่ต่างกัน โดยแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ใช้ 2 ช่องและแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ใช้แค่ 1 ช่อง ทำให้จำนวนช่องสัญญาณในการสื่อสารแตกต่างกัน และ xxx OPC แบบเลื่อนแบนด์วิดท์จะสามารถส่งข้อมูลเป็นจำนวน 4 ช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 5.6 ในขณะที่แบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์สามารถส่งข้อมูลได้ถึงจำนวน 7 ช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นว่ากรณีของช่วงความยาวคลื่นไว้เท่ากัน OPC แบบไม่เลื่อนความยาวคลื่นจะสามารถส่งข้อมูลได้จำนวนช่องสัญญาณที่มากกว่า OPC แบบเลื่อนความยาวคลื่น

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอกระบวนการจัดการปัญหาดีสเพอร์ชัน ด้วยการปรับปรุงและออกแบบระเบียบวิธีการวาง OPC บนโครงข่ายเส้นใยแสง wavelength-routed-network แบบเมช โดยไม่ต้องลดขนาดโครงข่ายซึ่งรองรับอัตราการส่งข้อมูล 40 Gbps แบบจำลองของ OPC ที่จะใช้ในการวิจัยนั้นใช้ 3 ประเภทคือ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น OPC แบบเลื่อนความยาวคลื่น พร้อมทั้งเลื่อนแบนด์วิดท์และ OPC แบบเลื่อนความยาวคลื่นแต่ไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ ระเบียบวิธีที่นำเสนอขึ้นนี้ พิจารณาเฉพาะการชดเชยดีสเพอร์ชันเท่านั้น ไม่พิจารณาผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงจาก Kerr effect โดยระเบียบวิธีทดลองบนโครงข่าย wavelength-routed-network แบบเมช 3 ตัวอย่างที่แตกต่างกันคือ โครงข่าย European reference network (ERNet), โครงข่าย North American reference network (NARNet) และ โครงข่าย Optical Pan-European Network (OPEN) ซึ่งผลลัพธ์จากระเบียบวิธีมีดังนี้ 1. ช่วงความยาวคลื่นตาม ITU-T 100 GHz Channel Spacing ที่สามารถใช้ได้ในโครงข่ายตัวอย่าง 2. ค่าดีสเพอร์ชันที่ได้จากช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว และ 3. จำนวนและช่วงการวาง OPC บนข่ายเชื่อมโยงใดๆในโครงข่ายตัวอย่าง

การศึกษาในขั้นแรกคือ การออกแบบระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น บน 3 โครงข่ายตัวอย่างบนอัตราการส่งข้อมูล 40 Gbps ซึ่งลักษณะของ OPC ชนิดนี้เป็นเพียงแต่หลักการในอุดมคติเท่านั้น เพราะในการประยุกต์ใช้สำหรับการสื่อสาร WDM มีความจำเป็นที่จะต้องมีการใช้อุปกรณ์แยกสัญญาณด้วย เนื่องจากสัญญาณคอนจูเกตที่เกิดขึ้นจะมีตำแหน่งความถี่ตรงกันกับสัญญาณตั้งต้นเดิม ทั้งนี้ผลลัพธ์จากการออกแบบระเบียบวิธีในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลลัพธ์ของระเบียบวิธีในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น
บน 3 โครงข่ายตัวอย่าง

โครงข่าย	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	จำนวนความยาว คลื่น ITU-T 100 GHz Channel Spacing	ช่วงค่าดิสเพอร์ชัน (ps/nm/km)	จำนวน OPC
ERNet	1592.6 ถึง 1623.4	35	-0.69 ถึง 0.67	8
NARNet	1599.6 ถึง 1620.4	27	-0.53 ถึง 0.52	14
OPEN	1575.6 ถึง 1644.4	87	-1.72 ถึง 1.72	6

จากตารางที่ 6.1 พบว่าในแต่ละโครงข่ายตัวอย่างจะให้ผลลัพธ์ของช่วงความยาวคลื่นค่าดิสเพอร์ชัน และจำนวน OPC ที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้ผลลัพธ์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับลักษณะที่แตกต่างกันของโครงข่ายนั้น ซึ่งประกอบด้วย จำนวนโนด จำนวนข่ายเชื่อมโยงและระยะทางระหว่างโนด อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีสามารถลดจำนวน OPC จากวิธีการวางไว้ ณ กึ่งกลางข่ายเชื่อมโยงลงได้ โดยที่ดิสเพอร์ชันสะสมในระบบไม่เกินที่ค่าตั้งไว้และไม่ต้องลดขนาดโครงข่าย ดังนั้นการออกแบบระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นที่น่าเสนอข้างต้นเป็นระเบียบวิธีที่ได้ผลสำเร็จและสามารถประยุกต์ใช้กับโครงข่าย wavelength-routed-network แบบเมชได้

การศึกษาในขั้นต่อมาคือ การออกแบบระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่าย 3 ตัวอย่างเช่นเดียวกับการศึกษาในขั้นแรก โดย OPC ชนิดนี้สามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ประเภทคือ ประเภทเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์และประเภทเลื่อนความยาวคลื่นแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์ ซึ่งทั้ง 2 ประเภทจะมีหลักการในการสร้างสัญญาณคอนจูเกตต่างกันเนื่องจากสัญญาณคอนจูเกตของ OPC แบบเลื่อนแบนด์วิดท์จะเกิดขึ้นในลำดับที่สลับกับสัญญาณตั้งต้น ทำให้สัญญาณขาเข้าและขาออกของทั้ง 2 ประเภท เกิดขึ้นที่ความถี่และความยาวคลื่นคนละค่า ดังนั้นในการออกแบบระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ จึงต้องพิจารณาความยาวคลื่นขาเข้า/ออกและดิสเพอร์ชันขาเข้า/ออกอย่างเหมาะสม โดยผลลัพธ์จากการออกแบบระเบียบวิธีในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ผลลัพธ์ของระเบียบวิธีในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบเลื่อนแบนด์วิดท์บน 3 โครงข่ายตัวอย่าง

โครงข่าย	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	จำนวนความยาวคลื่น ITU-T 100 GHz Channel Spacing	ช่วงค่าดิสเพอร์ชัน (ps/nm/km)	จำนวน OPC
ERNet	1597.8 ถึง 1609.0	15	-0.05 ถึง -0.61	10
NARNet	1600.0 ถึง 1604.8	7	-0.02 ถึง -0.50	6
OPEN	1576.0 ถึง 1585.6	13	-1.22 ถึง -1.70	6

ในขณะที่ระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นแบบไม่เลื่อนแบนด์วิดท์จะได้ผลลัพธ์เหมือนกับระเบียบการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในการสื่อสาร WDM ทุกประการดังแสดงในตารางที่ 6.1 เนื่องจากด้วยลักษณะการสร้างสัญญาณคอนจูเกตของ OPC ที่มีลักษณะเดียวกัน ทำให้ได้ช่วงความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันที่เป็นช่วงเดียวกันสำหรับทั้ง 3 โครงข่าย นอกจากนี้สำหรับ OPC แบบดังกล่าว ยังพบว่า แม้ว่าสัญญาณตั้งต้นกับสัญญาณคอนจูเกตจะอยู่ ณ ตำแหน่งความยาวคลื่นไม่ตรงกัน แต่สัญญาณทั้ง 2 ยังคงอาศัยอยู่ในช่วงแบนด์วิดท์เดียวกัน ซึ่งข้อดีของการใช้ช่วงแบนด์วิดท์เดียวกันนี้ สามารถช่วยให้ระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบ WDM ประหยัดช่วงแบนด์วิดท์ที่จะต้องใช้งานได้มากขึ้นเพราะอาศัยช่วงแบนด์วิดท์เพียงช่วงเดียวเท่านั้น

สำหรับระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นจะแตกต่างจากชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในขั้นตอนการพิจารณาหาช่วงดิสเพอร์ชันที่ใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R นอกจากนี้กระบวนการสุดท้ายในการทดสอบค่าดิสเพอร์ชันสะสมของระบบก็แตกต่างกัน เนื่องจากค่าดิสเพอร์ชันก่อนเข้าและหลังออกจาก OPC มีค่าไม่เท่ากัน จึงต้องมีการใช้ค่าดิสเพอร์ชัน 2 ค่าประกอบการทดสอบ จากตารางที่ 6.2 แสดงผลลัพธ์ของระเบียบวิธีในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบน 3 โครงข่ายตัวอย่างพบว่าระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นดังกล่าวสามารถใช้ได้ผลกับ 3 โครงข่ายตัวอย่าง

จากผลลัพธ์ของระเบียบวิธีในการวาง OPC ทั้ง 2 ชนิดจะเห็นได้ว่า สำหรับทุกๆโครงข่ายระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นจะใช้ OPC เป็นจำนวนที่น้อยกว่าระเบียบ

วิธีการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นซึ่งเป็น OPC ในทางอุดมคติเท่านั้น แสดงว่าระเบียบวิธีของ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นมีประสิทธิภาพมากกว่า แต่ด้วยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้าและขาออกที่ไม่เท่ากันนั้น ส่งผลให้ช่วงความยาวคลื่นที่สามารถใช้ได้ในระบบโดยไม่ต้องลดขนาดโครงข่ายมีช่วงที่แคบลงมา ทำให้จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถใช้ได้ตาม ITU-T 100 GHz Channel Spacing มีจำนวนน้อยกว่า OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น ดังนั้นจำนวนช่องสัญญาณในการสื่อสารสำหรับระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นจึงอาจมีจำนวนจำกัด

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การขยายขอบเขตอัตราการส่งข้อมูลเป็น 100 Gbps

จากที่กล่าวไว้เบื้องต้นว่า การสื่อสารผ่านเส้นใยแสงในอนาคตนั้นจะมีอัตราการส่งข้อมูลถึงระดับ 100 Gbps ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและออกแบบอัลกอริทึมสำหรับใช้ OPC สำหรับโครงข่ายเส้นใยแสง wavelength-routed ที่ใช้อัตราการรับส่งข้อมูลที่ 40 Gbps ต่อช่องสัญญาณเท่านั้น ในงานวิจัยต่อไปในอนาคตจึงควรจะศึกษาและออกแบบระเบียบวิธีที่รองรับอัตราการส่งข้อมูลในระดับ 100 Gbps ซึ่งมีขีดจำกัดดิสเพอร์ชันและคุณลักษณะต่างๆที่เปลี่ยนไป

2. การศึกษาผลความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงจาก Kerr effect

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาผลของดิสเพอร์ชันเท่านั้น งานวิจัยในอนาคตจึงควรพิจารณาผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสงจาก Kerr effect ด้วย เนื่องจากลักษณะขอ OPC สามารถจัดการกับปัญหาทั้งสองไปได้พร้อมๆกัน

รายการอ้างอิง

- [1] Chomycz, B. Fiber optic installer's field manual. Singapore: McGraw Hill, 2000.
- [2] Keiser, G. Optical fiber communications 3rd ed. Singapore: McGraw Hill, 2000.
- [3] Ramamurthy, B., Iness, J.,and Mukherjee, B. Minimizing the Number of Optical Amplifiers Needed to Support a Multi-Wavelength Optical LAN/MAN. In Proceedings International Conference on IEEE INFOCOM '97, 261-268. 1997.
- [4] Ramamurthy, B., Iness, J.,and Mukherjee, B. Optimizing Amplifier Placements in a Multiwavelength Optical LAN/MAN: The Equally Powered-Wavelengths Case. Journal of Lightwave Technology 16 (1998) : 1560-1569.
- [5] Ramamurthy, B., Iness, J.,and Mukherjee, B. Optimizing Amplifier Placements in a Multiwavelength Optical LAN/MAN: The Unequally Powered-Wavelengths Case. Journal of Lightwave Technology 6 (1998) : 755-767.
- [6] Kaewplung, P., Ketmanee, P., Lolurlert, T. Dispersion Compensation in Broadcast-and-Selective Optical Network. In Proceedings International Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO /Pacific Rim 2005. Pacific Rim Conference, 2005.
- [7] Agrawal, G. Nonlinear Fiber Optics (Optics and Photonics). Rochester, NY: Academic Press, 2001.
- [8] Li, C.S., Tong, F.F., Georgiou, C.J.,and Cheng, M. Gain equalization in metropolitan and wide area optical networks using optical amplifiers. In Proceedings International Conference on IEEE INFOCOM '94, 130-137. 1994.
- [9] Tachibana, M., Laming, R.L., Morkel, P.R.,and Payne, D.N. Erbium-doped fiber amplifier with flattened gain spectrum. IEEE Photonics Technology Letters 3 (1991) : 118-120.
- [10] Potenza, M. Optical fiber amplifiers for telecommunication system. IEEE Communications Magazine 34 (1996) : 96-102.
- [11] Petruzzi, P., et al. Dispersion Compensation Using Only Fiber Bragg Gratings. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics : 1339-1344.

- [12] Watanabe, S., and Shirasak, M. Exact Compensation for Both Chromatic Dispersion and Kerr Effect in a Transmission Fiber Using Optical Phase Conjugation. Journal of Lightwave Technology 14 (March 1996) : 243–238.
- [13] Mezhoudi, M., Ying Hu. Economical Analysis of NG-Optical Backbone Transport Network. In Wireless and Optical Communications Conference (WOCC) 2011 20th Annual, 2011.
- [14] Mezhoudi, M., Ying Hu. Optical Backbone Network Evolution: Design, Optimization and Evaluation of NG-OTN. In Wireless and Optical Communications Conference (WOCC) 2011 20th Annual, 2011.
- [15] Forzati, J. Martensson, Berntson A., Djupsjobacka A., and Johannisson P. Reduction of intrachannel four-wave mixing using the alternate- phase RZ modulation format. IEEE Photon. Technol. Lett. vol. 14 no. 9 (September 2002) : 1285–1287.
- [16] Liu X., et al. Suppression of intrachannel four-wave-mixing-induced ghost pulses in high-speed transmissions by phase inversion between adjacent marker blocks. Opt. Lett. vol. 27 no. 13 (July 2002) : 1177–1179.
- [17] Zou, M. Chen, and Xie, S. Suppression of ghost pulses in 40 Gb/s optical transmission systems with fixed-pattern phase modulation. Opt. Express vol. 13 no.7 (February 2005) : 2251–2255.
- [18] Charlet, G. Fiber characteristics for next-generation ultra-long-haul transmission systems. In Proceedings of ECOC2010, 2010.
- [19] Yan Tang, Yiran Ma, Shiew, W. 107 Gb/s CO-OFDM Transmission with inline Chromatic Dispersion Compensation. In Proc.Opt. Fiber Commun. (OFC2009), 2009.
- [20] Miyana, T. Suppression of Degradation Induced by SPM/XPM+GVD in WDM Transmission Using a bit-synchronous Intensity Modulated DPSK Signal. In Proceedings of OptoElectronics and Communications Conference (2000), 2000.
- [21] Wree, C. RZ-DQPSK Format with High Spectral Efficiency and High Robustness towards Fiber Nonlinearities. In Proceedings of the 28th European Conference and Exhibition on Optical Communication (2002), 2002.

- [22] Xu, C. Comparison of Return-to-zero phase shift keying and OOK in long haul dispersion managed transmission. In Proceedings of the 4th Optical Fiber Communication Conference (2003), 2003.
- [23] Yariv, A., Fekete, D., and Pepper, D.M. Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation. Optics Letters vol. 4 (October 1979) : 52–54.
- [24] Kikuchi, K., Lorattanasane, C. Design of Highly Efficient Four-Wave Mixing Devices Using Optical Fibers. IEEE Photonics Technology Letters vol. 6 (August 1994) : 992-994.
- [25] Hedekvist, P.O., Karlsson, M., and Andrekson, P.A. Polarization Dependence and Efficiency in a Fiber Four-Wave Mixing Phase Conjugator with Orthogonal Pump Waves. IEEE Photonics Technology Letters vol. 8 (June 1996) : 776-778.
- [26] Lim, H.C., Futami, F., and Kikuchi, K. Polarization-Independent, Wavelength-Shift-Free Optical Phase Conjugator Using a Nonlinear Fiber Sagnac Interferometer. IEEE Photonics Technology Letters vol. 11 (May 1999) : 578-580.
- [27] Lim, H.C., and Kikuchi, K. a Filter-Free Scheme for Orthogonally Pumped Polarization-Insensitive Optical Phase Conjugation of Broad-Band Optical Signals. IEEE Photonics Technology Letters vol. 13 (May 2001) : 481-483.
- [28] Lim, H.C., Futami, F., Taira, K., and Kikuchi, K. Broad-Band Mid-Span Spectral Inversion Without Wavelength Shift of 1.7-ps Optical Pulses Using a Highly Nonlinear Fiber Sagnac Interferometer. IEEE Photonics Technology Letters vol. 11 (November 1999) : 1405-1407.
- [29] Kikuchi, K., Lorattanasane, C. Design of Highly Efficient Four-Wave Mixing Devices Using Optical Fibers. IEEE Photonics Technology Letters vol. 6 (August 1994) : 992-994.
- [30] Lee, J.H., Nagashima, T., Hasegawa, T., Ohara, S., Sugimoto, N., and Kikuchi, K. Four-Wave-Mixing-Based Wavelength Conversion of 40-Gb/s Nonreturn-to-Zero Signal Using 40-cm Bismuth Oxide Nonlinear Optical Fiber. IEEE Photonics Technology Letters vol. 17 (July 2005) : 1474-1476.

- [31] 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 Letters vol. 42 (March 2006) : 298–299.
- [32] Watanabe, S.; Shirasaki, M. Exact Compensation for Both Chromatic Dispersion and Kerr Effect in a Transmission Fiber Using Optical Phase Conjugation. Journal of Lightwave Technology vol. 14 : 1996.
- [33] Jansen, S.L., et al. Optical Phase Conjugation for Ultra Long-Haul Phase-Shift-Keyed Transmission. Journal of Lightwave Technology vol. 24 : 2006.
- [34] Jansen, S.L., et al. 16x40 Gb/s Over 800 km of SSMF Using Mid-Link Spectral Inversion. IEEE Photonics Technology Letters vol. 16 (July 2004) : 1,763-1,765.
- [35] Vladimir P., Ivan J. Fair. On Four Wave Mixing Suppression in Dispersion-Managed Fiber Optic OFDM Systems With an Optical Phase Conjugation Module. Journal of Lightwave Technology vol. 29 (JUNE 2001).
- [36] Chuenprasertsuk, N., Kaewplung, P. Employment of Optical Phase Conjugators in Transparent DWDM Single-Ring Network. In Proc. (OECC/IOOC2007), 2007.
- [37] Mukdasanit, K., Kaewplung, P. Employment of Optical Phase Conjugators in Transparent WDM Broadcast-and-Select Network. In Proc. Photonics Global (IPGC2008), 2008.
- [38] กานต์ มุกดาสนิท. การวางตำแหน่งเครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายเส้นใยแสงที่ใช้การมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นอย่างมีประสิทธิภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [39] Tomizawa, M., Miyamoto Y., Ishida, O. Recent Advances in 100G OTN. In Proceedings of Opt. Fiber Commun (OFC2009), 2009.
- [40] Mukherjee, B. Optical Communication Networks. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [41] Xiao, X.S., Yang, C.X., and Shum, P. Analytical Design of SPM-Limited Systems With Optical Phase Conjugation. IEEE Photonics Technology Letters vol. 20 (April 2008) : 472-474.

ภาคผนวก

ระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่าย NARNet

1. การคำนวณระยะทางระหว่างทุกคู่โหนดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ในโครงข่าย NARNet

ตารางที่ 1 ระยะทางและข่ายเชื่อมโยงสำหรับการสื่อสารของทุกคู่โหนดในโครงข่าย NARNet

โหนด 1	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 2	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 3	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง
2	420	2	1	420	1	1	540	4
3	540	3	3	940	5,7	2	940	8,6
4	780	2,5	4	360	5	4	580	8
5	900	3,9	5	1180	5,12,23	5	360	9
6	1080	3,9,24	6	1000	5,12	6	540	9,24
7	920	2,5,13	7	500	5,13	7	720	8,13
8	1100	2,5,13,16	8	680	5,13,16	8	900	8,13,16
9	1280	3,9,24,17	9	1040	5,13,16,20	9	740	9,24,17
10	1320	3,9,21	10	1600	5,12,23,21	10	780	9,21
11	1460	3,9,24,26	11	1380	5,12,26	11	920	9,24,26
12	1620	3,9,21,29	12	1560	5,12,26,27	12	1080	9,21,29
13	1760	3,9,21,31	13	1960	5,12,26,27,34	13	1220	9,21,31
14	1640	2,5,13,16,36	14	1220	5,13,16,36	14	1440	8,13,16,36
15	2060	3,9,21,29,39	15	1800	5,13,16,36,38	15	1520	9,21,29,39
16	2180	3,9,21,31,41	16	2120	5,13,16,36,38,43	16	1640	9,21,31,41
17	2020	2,5,13,16,36,47	17	1600	5,13,16,36,47	17	1820	8,13,16,36,47
โหนด 4	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 5	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 6	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง
1	780	6,1	1	900	10,4	1	1080	23,10,4
2	360	6	2	1180	24,11,6	2	1000	11,6
3	580	7	3	360	10	3	540	23,10
5	820	12,23	4	820	24,11	4	640	11
6	640	12	6	180	24	5	180	23
7	140	13	7	920	24,17,19,15	7	740	17,19,15
8	320	13,16	8	740	24,17,19	8	560	17,19
9	680	13,16,20	9	380	24,17	9	200	17
10	1240	12,23,21	10	420	21	10	600	23,21
11	1020	12,26	11	560	24,26	11	380	26
12	1200	12,26,27	12	720	21,29	12	560	26,27
13	1600	12,26,27,34	13	860	21,31	13	960	26,27,34
14	860	13,16,36	14	1280	24,17,19,36	14	1100	17,19,36
15	1440	13,16,36,38	15	1160	21,29,39	15	1000	26,27,39
16	1760	13,16,36,38,43	16	1280	21,31,41	16	1320	26,27,39,43

17	1240	13,16,36,47	17	1540	21,29,39,46	17	1380	26,27,39,46
----	------	-------------	----	------	-------------	----	------	-------------

(ก) โหนดที่ 1-6

โนด 7	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 8	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 9	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง
1	920	14,6,1	1	1100	15,14,6,1	1	1280	18,23,10,4
2	500	14,6	2	680	15,14,6	2	1040	19,15,14,6
3	720	14,7	3	900	15,14,7	3	740	18,23,10
4	140	14	4	320	15,14	4	680	19,15,14
5	920	16,20,18,23	5	740	20,18,23	5	380	18,23
6	740	16,20,18	6	560	20,18	6	200	18
8	180	16	7	180	15	7	540	19,15
9	540	16,20	9	360	20	8	360	19
10	1340	16,20,18,23,21	10	1160	20,18,23,21	10	800	18,23,21
11	1120	16,20,18,26	11	940	20,18,26	11	580	18,26
12	1300	16,20,18,26,27	12	1120	20,18,26,27	12	760	18,26,27
13	1700	16,20,18,26,27,34	13	1520	20,18,26,27,34	13	1160	18,26,27,34
14	720	16,36	14	540	36	14	900	19,36
15	1300	16,36,38	15	1120	36,38	15	1200	18,26,27,39
16	1620	16,36,38,43	16	1440	36,38,43	16	1520	18,26,27,39,43
17	1100	16,36,47	17	920	36,47	17	1280	19,36,47
โนด 10	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 11	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 12	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง
1	1320	22,10,4	1	1460	25,23,10,4	1	1620	30,22,10,4
2	1600	22,24,11,6	2	1380	25,11,6	2	1560	28,25,11,6
3	780	22,10	3	920	25,23,10	3	1080	30,22,10
4	1240	22,24,11	4	1020	25,11	4	1200	28,25,11
5	420	22	5	560	25,23	5	720	30,22
6	600	22,24	6	380	25	6	560	28,25
7	1340	22,24,17,19,15	7	1120	25,17,19,15	7	1300	28,25,17,19,15
8	1160	22,24,17,19	8	940	25,17,19	8	1120	28,25,17,19
9	800	22,24,17	9	580	25,17	9	760	28,25,17
11	480	29,28	10	480	27,30	10	300	30
12	300	29	12	180	27	11	180	28
13	440	31	13	580	27,34	13	400	34
14	1320	29,39,37	14	1200	27,39,37	14	1020	39,37
15	740	29,39	15	620	27,39	15	440	39
16	860	31,41	16	940	27,39,43	16	760	39,43
17	1120	29,39,46	17	1000	27,39,46	17	820	39,46

(ข) โหนดที่ 7-12

โนด 13	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 14	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 15	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง
1	1760	32,22,10,4	1	1640	35,15,14,6,1	1	2060	40,30,22,10,4
2	1960	33,28,25,11,6	2	1220	35,15,14,6	2	1800	37,35,15,14,6
3	1220	32,22,10	3	1440	35,15,14,7	3	1520	40,30,22,10
4	1600	33,28,25,11	4	860	35,15,14	4	1440	37,35,15,14
5	860	32,22	5	1280	35,20,18,23	5	1160	40,30,22
6	960	33,28,25	6	1100	35,20,18	6	1000	40,28,25
7	1700	33,28,25,17,19,15	7	720	35,15	7	1300	37,35,15
8	1520	33,28,25,17,19	8	540	35	8	1120	37,35
9	1160	33,28,25,17	9	900	35,20	9	1200	40,28,25,17
10	440	32	10	1320	38,40,30	10	740	40,30
11	580	33,28	11	1200	38,40,28	11	620	40,28
12	400	33	12	1020	38,40	12	440	40
14	1320	41,44,37	13	1320	38,43,42	13	740	43,42
15	740	41,44	15	580	38	14	580	37
16	420	41	16	900	38,43	16	320	43
17	1120	41,44,46	17	380	47	17	380	46
โนด 16	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง	โนด 17	ระยะทาง(km)	ข่ายเชื่อมโยง			
1	2180	42,32,22,10,4	1	2020	48,35,15,14,6,1			
2	2120	44,37,35,15,14,6	2	1600	48,35,15,14,6			
3	1640	42,32,22,10	3	1820	48,35,15,14,7			
4	1760	44,37,35,15,14	4	1240	48,35,15,14			
5	1280	42,32,22	5	1540	45,40,30,22			
6	1320	44,40,28,25	6	1380	45,40,28,25			
7	1620	44,37,35,15	7	1100	48,35,15			
8	1440	44,37,35	8	920	48,35			
9	1520	44,40,28,25,17	9	1280	48,35,20			
10	860	42,32	10	1120	45,40,30			
11	940	44,40,28	11	1000	45,40,28			
12	760	44,40	12	820	45,40			
13	420	42	13	1120	45,43,42			
14	900	44,37	14	380	48			
15	320	44	15	380	45			
17	700	44,46	16	700	45,43			

(ค) โหนดที่ 13-17

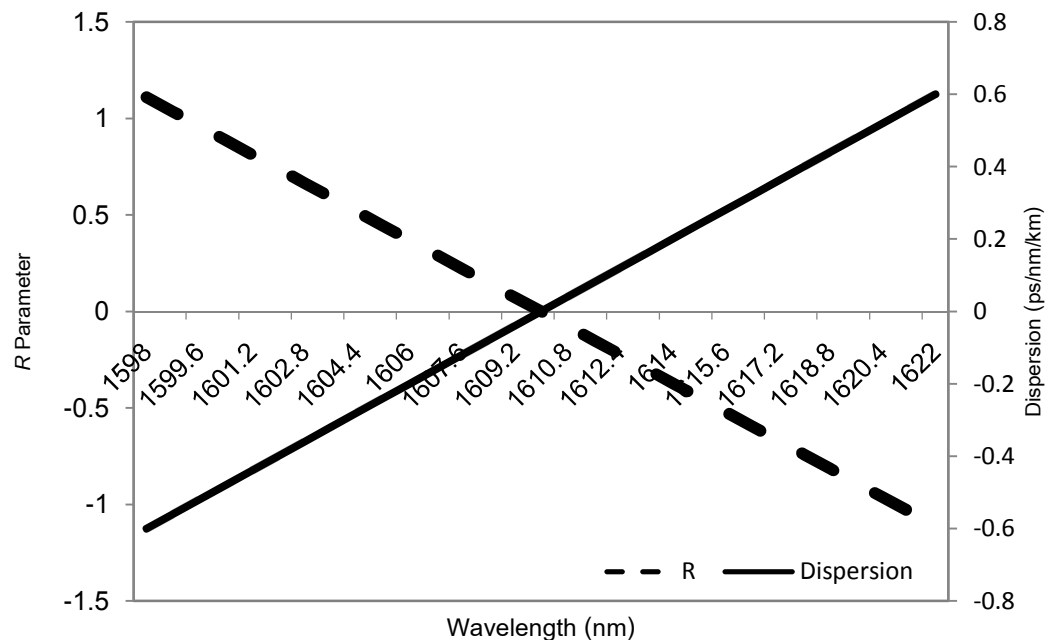
2. การหาช่วงดิสเพอร์ชันที่ใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย NARNet

ในขั้นตอนนี้จะใช้รูปแบบการคำนวณเหมือนกับโครงข่าย ERNet ตามหัวข้อที่ 4.1.2 จะแตกต่างกันที่การแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เป็นค่าเฉพาะของแต่ละโครงข่าย เช่น X_1, LP เป็นต้น โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบ ตามสมการที่ (3.19) และ (3.22) ตามลำดับ ดังนี้

$$R = \frac{2D_\lambda X_1 - D_\lambda(LP)}{800} \quad (3.19)$$

$$D_\lambda = -3 + 0.05 \times (\lambda - 1550) \quad (3.22)$$

จากการให้ตัวแปรความยาวคลื่นเป็นตัวแปรอิสระเพื่อเปลี่ยนค่า จะเห็นได้ว่าค่า R จะเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปเช่นกัน ซึ่งความสัมพันธ์ข้างต้นสำหรับโครงข่าย NARNet สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R , ดิสเพอร์ชันและความยาวคลื่นสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย NARNet

จากรูปที่ 1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R , ดิสเพอร์ชันและความยาวคลื่นสำหรับโครงข่าย NARNet พบว่าช่วงความยาวคลื่นที่ทำให้ค่า $|R| \leq 1$ คือ

- ช่วงความยาวคลื่น 1599.6 nm ถึง 1620.4 nm

จากช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวนี้ คิดเป็นความยาวคลื่นจำนวน 27 ความยาวคลื่น แบ่งตามมาตรฐาน ITU-T 100 GHz Channel Spacing

โดยในช่วงความยาวคลื่นช่วงนี้จะได้ค่าดิสเพอร์ชันเป็นดังนี้

- ช่วงดิสเพอร์ชัน -0.53 ps/nm/km ถึง 0.52 ps/nm/km

ซึ่งการใช้งานค่าดิสเพอร์ชันช่วงดังกล่าวนี้ จะทำให้ค่า R มีค่าไม่เกิน ± 1 นั้นหมายความว่าโครงข่ายดังกล่าวสามารถใช้ระเบียบวิธีนี้ได้ โดยไม่ต้องลดขนาดโครงข่าย และช่วงค่าดิสเพอร์ชันข้างต้นจะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปของระเบียบวิธีการวาง OPC

3. การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดไม่เลือกความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารทุก ๆ คู่โหนดในโครงข่าย NARNet

การหาระยะขอบเขตด้านซ้ายและด้านขวาสำหรับสำหรับโครงข่าย NARNet จะกระทำรูปแบบเดียวกับหัวข้อที่ 4.1.3 โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) ตามลำดับ โดยในส่วนของค่าดิสเพอร์ชันของระบบจะเลือกจากช่วงดิสเพอร์ชันจากขั้นตอนในการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ R โดยใช้ค่าที่ทำให้เกิดดิสเพอร์ชันสะสมที่มากที่สุดคือ -0.52 ps/nm/km ในการคำนวณ โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระยะขอบเขตทางด้านซ้ายและด้านขวาในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นใน
โครงข่าย NARNet

โนด 1	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมต่อ	OPC_L	OPC_R	โนด 2	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมต่อ	OPC_L	OPC_R
2	420	2	-559	979	1	420	1	-559	979
3	540	3	-499	1,039	3	940	5,7	-299	1,239
4	780	2,5	-379	1,159	4	360	5	-589	949
5	900	3,9	-319	1,219	5	1180	5,12,23	-179	1,359
6	1080	3,9,24	-229	1,309	6	1000	5,12	-269	1,269
7	920	2,5,13	-309	1,229	7	500	5,13	-519	1,019
8	1100	2,5,13,16	-219	1,319	8	680	5,13,16	-429	1,109
9	1280	3,9,24,17	-129	1,409	9	1040	5,13,16,20	-249	1,289
10	1320	3,9,21	-109	1,429	10	1600	5,12,23,21	31	1,569
11	1460	3,9,24,26	-39	1,499	11	1380	5,12,26	-79	1,459
12	1620	3,9,21,29	41	1,579	12	1560	5,12,26,27	11	1,549
13	1760	3,9,21,31	111	1,649	13	1960	5,12,26,27,34	211	1,749
14	1640	2,5,13,16,36	51	1,589	14	1220	5,13,16,36	-159	1,379
15	2060	3,9,21,29,39	261	1,799	15	1800	5,13,16,36,38	131	1,669
16	2180	3,9,21,31,41	321	1,859	16	2120	5,13,16,36,38,43	291	1,829
17	2020	2,5,13,16,36,47	241	1,779	17	1600	5,13,16,36,47	31	1,569
โนด 3	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมต่อ	OPC_L	OPC_R	โนด 4	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมต่อ	OPC_L	OPC_R
1	540	4	-499	1,039	1	780	6,1	-379	1,159
2	940	8,6	-299	1,239	2	360	6	-589	949
4	580	8	-479	1,059	3	580	7	-479	1,059
5	360	9	-589	949	5	820	12,23	-359	1,179
6	540	9,24	-499	1,039	6	640	12	-449	1,089
7	720	8,13	-409	1,129	7	140	13	-699	839
8	900	8,13,16	-319	1,219	8	320	13,16	-609	929
9	740	9,24,17	-399	1,139	9	680	13,16,20	-429	1,109
10	780	9,21	-379	1,159	10	1240	12,23,21	-149	1,389
11	920	9,24,26	-309	1,229	11	1020	12,26	-259	1,279
12	1080	9,21,29	-229	1,309	12	1200	12,26,27	-169	1,369
13	1220	9,21,31	-159	1,379	13	1600	12,26,27,34	31	1,569
14	1440	8,13,16,36	-49	1,489	14	860	13,16,36	-339	1,199
15	1520	9,21,29,39	-9	1,529	15	1440	13,16,36,38	-49	1,489
16	1640	9,21,31,41	51	1,589	16	1760	13,16,36,38,43	111	1,649
17	1820	8,13,16,36,47	141	1,679	17	1240	13,16,36,47	-149	1,389

(ก) โหนดที่ 1-4

โนด 5	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 6	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	900	10,4	-319	1,219	1	1080	23,10,4	-229	1,309
2	1180	24,11,6	-179	1,359	2	1000	11,6	-269	1,269
3	360	10	-589	949	3	540	23,10	-499	1,039
4	820	24,11	-359	1,179	4	640	11	-449	1,089
6	180	24	-679	859	5	180	23	-679	859
7	920	24,17,19,15	-309	1,229	7	740	17,19,15	-399	1,139
8	740	24,17,19	-399	1,139	8	560	17,19	-489	1,049
9	380	24,17	-579	959	9	200	17	-669	869
10	420	21	-559	979	10	600	23,21	-469	1,069
11	560	24,26	-489	1,049	11	380	26	-579	959
12	720	21,29	-409	1,129	12	560	26,27	-489	1,049
13	860	21,31	-339	1,199	13	960	26,27,34	-289	1,249
14	1280	24,17,19,36	-129	1,409	14	1100	17,19,36	-219	1,319
15	1160	21,29,39	-189	1,349	15	1000	26,27,39	-269	1,269
16	1280	21,31,41	-129	1,409	16	1320	26,27,39,43	-109	1,429
17	1540	21,29,39,46	1	1,539	17	1380	26,27,39,46	-79	1,459
โนด 7	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 8	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	920	14,6,1	-309	1,229	1	1100	15,14,6,1	-219	1,319
2	500	14,6	-519	1,019	2	680	15,14,6	-429	1,109
3	720	14,7	-409	1,129	3	900	15,14,7	-319	1,219
4	140	14	-699	839	4	320	15,14	-609	929
5	920	16,20,18,23	-309	1,229	5	740	20,18,23	-399	1,139
6	740	16,20,18	-399	1,139	6	560	20,18	-489	1,049
8	180	16	-679	859	7	180	15	-679	859
9	540	16,20	-499	1,039	9	360	20	-589	949
10	1340	16,20,18,23,21	-99	1,439	10	1160	20,18,23,21	-189	1,349
11	1120	16,20,18,26	-209	1,329	11	940	20,18,26	-299	1,239
12	1300	16,20,18,26,27	-119	1,419	12	1120	20,18,26,27	-209	1,329
13	1700	16,20,18,26,27,34	81	1,619	13	1520	20,18,26,27,34	-9	1,529
14	720	16,36	-409	1,129	14	540	36	-499	1,039
15	1300	16,36,38	-119	1,419	15	1120	36,38	-209	1,329
16	1620	16,36,38,43	41	1,579	16	1440	36,38,43	-49	1,489
17	1100	16,36,47	-219	1,319	17	920	36,47	-309	1,229

(ข) โหนดที่ 5-8

โนด 9	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 10	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	1280	18,23,10,4	-129	1,409	1	1320	22,10,4	-109	1,429
2	1040	19,15,14,6	-249	1,289	2	1600	22,24,11,6	31	1,569
3	740	18,23,10	-399	1,139	3	780	22,10	-379	1,159
4	680	19,15,14	-429	1,109	4	1240	22,24,11	-149	1,389
5	380	18,23	-579	959	5	420	22	-559	979
6	200	18	-669	869	6	600	22,24	-469	1,069
7	540	19,15	-499	1,039	7	1340	22,24,17,19,15	-99	1,439
8	360	19	-589	949	8	1160	22,24,17,19	-189	1,349
10	800	18,23,21	-369	1,169	9	800	22,24,17	-369	1,169
11	580	18,26	-479	1,059	11	480	29,28	-529	1,009
12	760	18,26,27	-389	1,149	12	300	29	-619	919
13	1160	18,26,27,34	-189	1,349	13	440	31	-549	989
14	900	19,36	-319	1,219	14	1320	29,39,37	-109	1,429
15	1200	18,26,27,39	-169	1,369	15	740	29,39	-399	1,139
16	1520	18,26,27,39,43	-9	1,529	16	860	31,41	-339	1,199
17	1280	19,36,47	-129	1,409	17	1120	29,39,46	-209	1,329
โนด 11	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 12	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	1460	25,23,10,4	-39	1,499	1	1620	30,22,10,4	41	1,579
2	1380	25,11,6	-79	1,459	2	1560	28,25,11,6	11	1,549
3	920	25,23,10	-309	1,229	3	1080	30,22,10	-229	1,309
4	1020	25,11	-259	1,279	4	1200	28,25,11	-169	1,369
5	560	25,23	-489	1,049	5	720	30,22	-409	1,129
6	380	25	-579	959	6	560	28,25	-489	1,049
7	1120	25,17,19,15	-209	1,329	7	1300	28,25,17,19,15	-119	1,419
8	940	25,17,19	-299	1,239	8	1120	28,25,17,19	-209	1,329
9	580	25,17	-479	1,059	9	760	28,25,17	-389	1,149
10	480	27,30	-529	1,009	10	300	30	-619	919
12	180	27	-679	859	11	180	28	-679	859
13	580	27,34	-479	1,059	13	400	34	-569	969
14	1200	27,39,37	-169	1,369	14	1020	39,37	-259	1,279
15	620	27,39	-459	1,079	15	440	39	-549	989
16	940	27,39,43	-299	1,239	16	760	39,43	-389	1,149
17	1000	27,39,46	-269	1,269	17	820	39,46	-359	1,179

(ค) โหนดที่ 9-12

โนด 13	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 14	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	1760	32,22,10,4	111	1,649	1	1640	35,15,14,6,1	51	1,589
2	1960	33,28,25,11,6	211	1,749	2	1220	35,15,14,6	-159	1,379
3	1220	32,22,10	-159	1,379	3	1440	35,15,14,7	-49	1,489
4	1600	33,28,25,11	31	1,569	4	860	35,15,14	-339	1,199
5	860	32,22	-339	1,199	5	1280	35,20,18,23	-129	1,409
6	960	33,28,25	-289	1,249	6	1100	35,20,18	-219	1,319
7	1700	33,28,25,17,19,15	81	1,619	7	720	35,15	-409	1,129
8	1520	33,28,25,17,19	-9	1,529	8	540	35	-499	1,039
9	1160	33,28,25,17	-189	1,349	9	900	35,20	-319	1,219
10	440	32	-549	989	10	1320	38,40,30	-109	1,429
11	580	33,28	-479	1,059	11	1200	38,40,28	-169	1,369
12	400	33	-569	969	12	1020	38,40	-259	1,279
14	1320	41,44,37	-109	1,429	13	1320	38,43,42	-109	1,429
15	740	41,44	-399	1,139	15	580	38	-479	1,059
16	420	41	-559	979	16	900	38,43	-319	1,219
17	1120	41,44,46	-209	1,329	17	380	47	-579	959
โนด 15	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด 16	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	2060	40,30,22,10,4	261	1,799	1	2180	42,32,22,10,4	321	1,859
2	1800	37,35,15,14,6	131	1,669	2	2120	44,37,35,15,14,6	291	1,829
3	1520	40,30,22,10	-9	1,529	3	1640	42,32,22,10	51	1,589
4	1440	37,35,15,14	-49	1,489	4	1760	44,37,35,15,14	111	1,649
5	1160	40,30,22	-189	1,349	5	1280	42,32,22	-129	1,409
6	1000	40,28,25	-269	1,269	6	1320	44,40,28,25	-109	1,429
7	1300	37,35,15	-119	1,419	7	1620	44,37,35,15	41	1,579
8	1120	37,35	-209	1,329	8	1440	44,37,35	-49	1,489
9	1200	40,28,25,17	-169	1,369	9	1520	44,40,28,25,17	-9	1,529
10	740	40,30	-399	1,139	10	860	42,32	-339	1,199
11	620	40,28	-459	1,079	11	940	44,40,28	-299	1,239
12	440	40	-549	989	12	760	44,40	-389	1,149
13	740	43,42	-399	1,139	13	420	42	-559	979
14	580	37	-479	1,059	14	900	44,37	-319	1,219
16	320	43	-609	929	15	320	44	-609	929
17	380	46	-579	959	17	700	44,46	-419	1,119

(ง) โหนดที่ 13-16

โนด 17	ระยะทาง (km)	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
1	2020	48,35,15,14,6,1	241	1,779
2	1600	48,35,15,14,6	31	1,569
3	1820	48,35,15,14,7	141	1,679
4	1240	48,35,15,14	-149	1,389
5	1540	45,40,30,22	1	1,539
6	1380	45,40,28,25	-79	1,459
7	1100	48,35,15	-219	1,319
8	920	48,35	-309	1,229
9	1280	48,35,20	-129	1,409
10	1120	45,40,30	-209	1,329
11	1000	45,40,28	-269	1,269
12	820	45,40	-359	1,179
13	1120	45,43,42	-209	1,329
14	380	48	-579	959
15	380	45	-579	959
16	700	45,43	-419	1,119

(จ) โหนดที่ 17

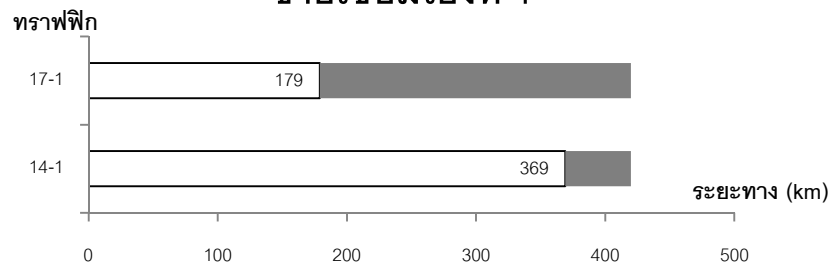
จากตารางที่ 2 แสดงถึงระยะขอบเขตทางซ้ายและขวาของการวาง OPC สำหรับกราฟฟิก การสื่อสารทั้งหมดในโครงข่าย พบว่าจะมีบางกราฟฟิกที่มีช่วงการวาง OPC ยาวกว่าความยาวรวมของกราฟฟิก ซึ่งหมายความว่าเราสามารถกำหนดจุดวาง OPC ในตำแหน่งใดๆก็ได้บนกราฟฟิกนั้นๆ

ในขณะเดียวกันจะมีบางกราฟฟิกที่ไม่จำเป็นต้องใช้ OPC ในการจำกัดผลของดีสเพอร์ชัน เนื่องจากระยะทางที่มากที่สุดที่ต้องพิจารณาการวาง OPC คือ $800/|-0.52|=1,538$ km ดังนั้นระยะทางของกราฟฟิกใดๆที่น้อยกว่าค่าดังกล่าว จึงไม่ต้องพิจารณาผลของดีสเพอร์ชันสะสมและไม่จำเป็นต้องพิจารณาการวาง OPC

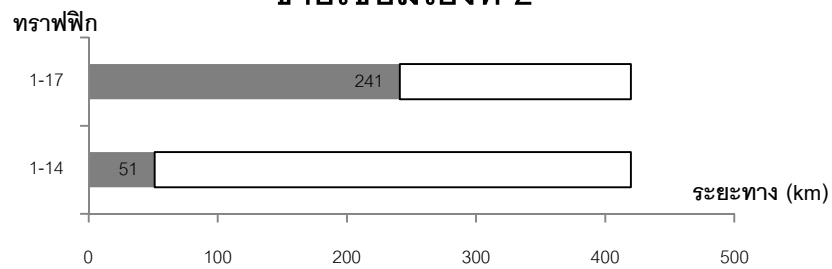
4. การกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น สำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย NARNet โดยใช้วิธีซ้อนทับ

จากขั้นตอนที่ผ่านมา เราจะได้ตำแหน่งขอบเขตด้านซ้ายและด้านขวาในการวาง OPC สำหรับทุกๆกราฟฟิกดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจากตารางดังกล่าว เราสามารถสรุปช่วงการวาง OPC สำหรับข่ายเชื่อมโยงได้ดังรูปที่ 2

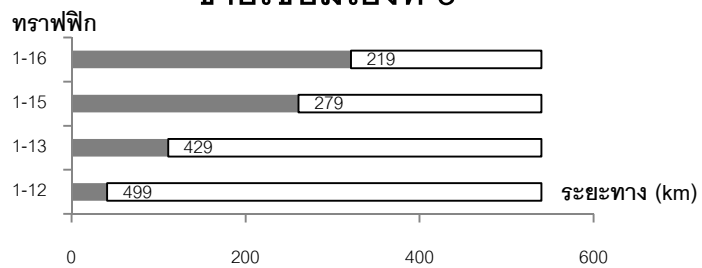
ข่ายเชื่อมโยงที่ 1



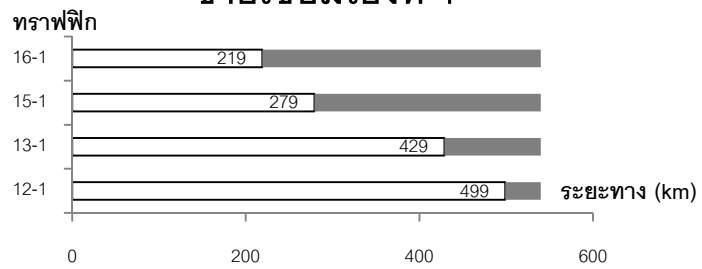
ข่ายเชื่อมโยงที่ 2



ข่ายเชื่อมโยงที่ 3



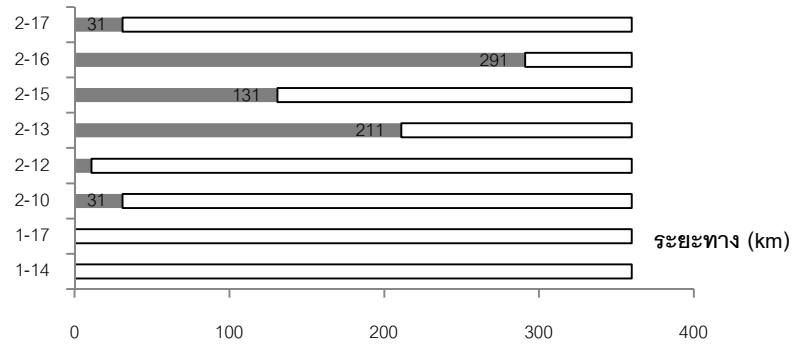
ข่ายเชื่อมโยงที่ 4



(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 1-4

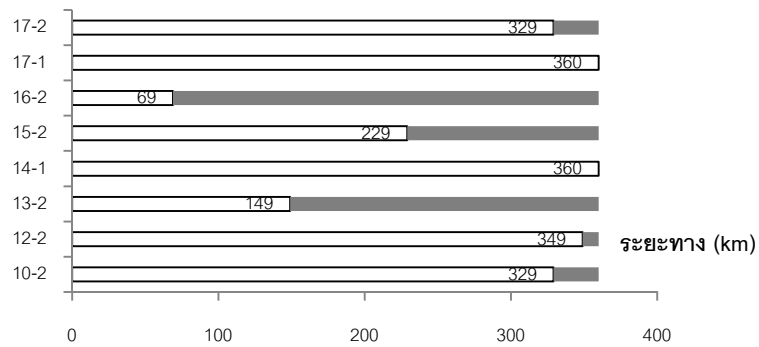
ข่ายเชื่อมโยงที่ 5

ทราฟฟิก



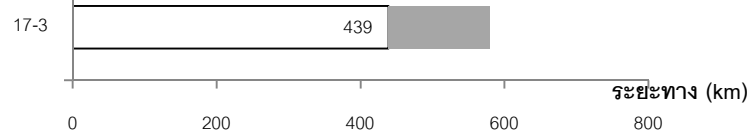
ข่ายเชื่อมโยงที่ 6

ทราฟฟิก



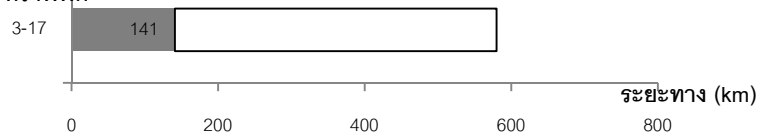
ข่ายเชื่อมโยงที่ 7

ทราฟฟิก



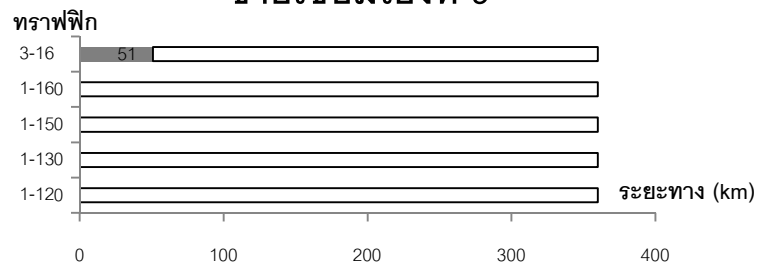
ข่ายเชื่อมโยงที่ 8

ทราฟฟิก

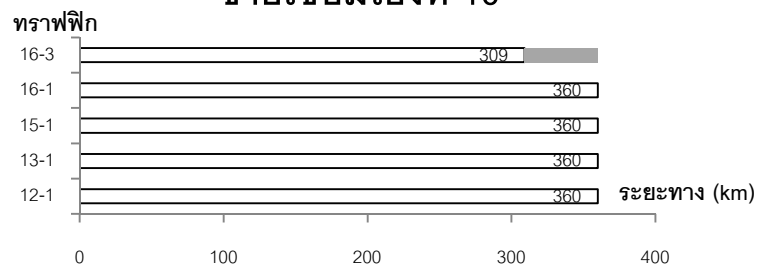


(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 5-8

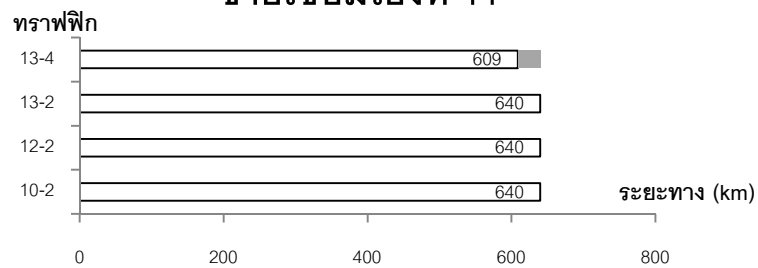
ข่ายเชื่อมโยงที่ 9



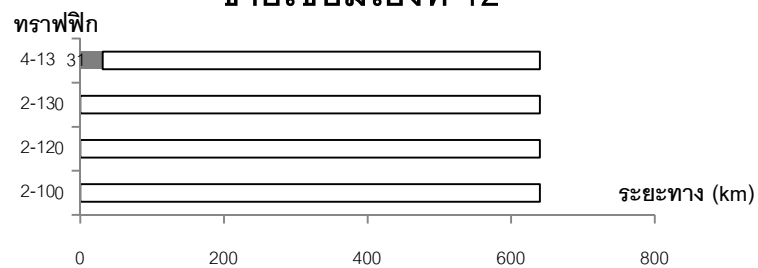
ข่ายเชื่อมโยงที่ 10



ข่ายเชื่อมโยงที่ 11

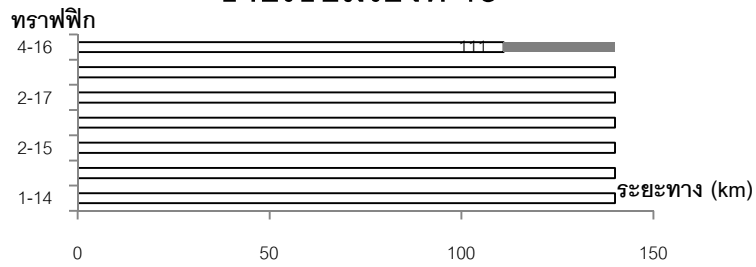


ข่ายเชื่อมโยงที่ 12

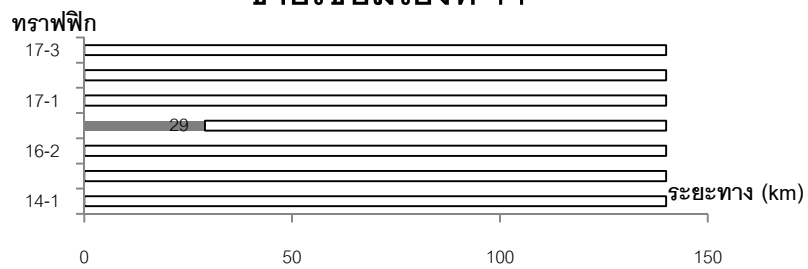


(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 9-12

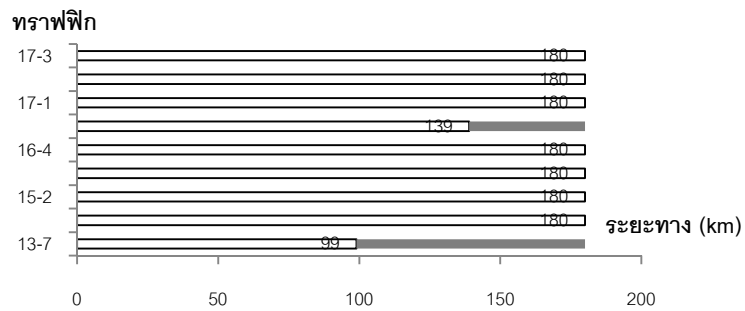
ข่ายเชื่อมโยงที่ 13



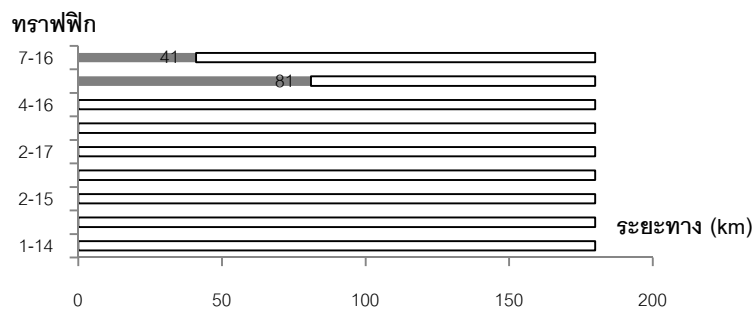
ข่ายเชื่อมโยงที่ 14



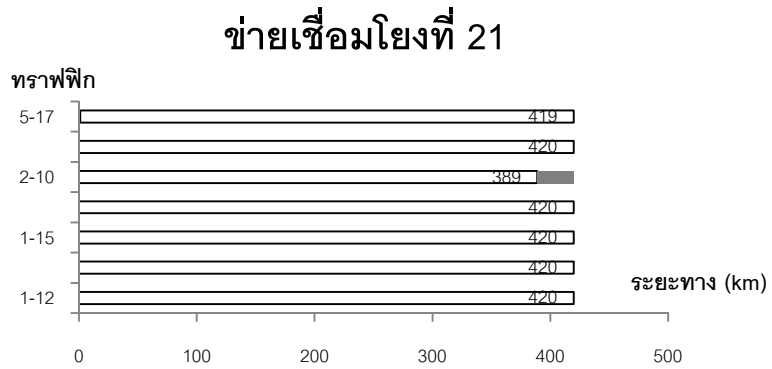
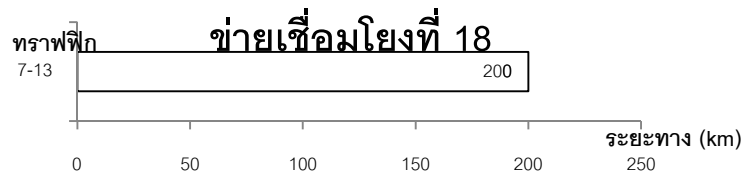
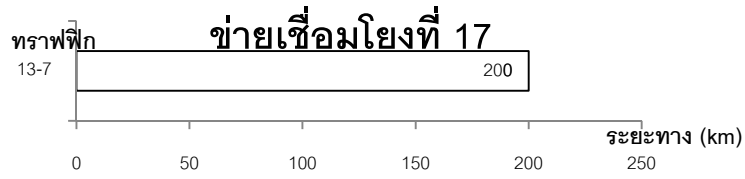
ข่ายเชื่อมโยงที่ 15



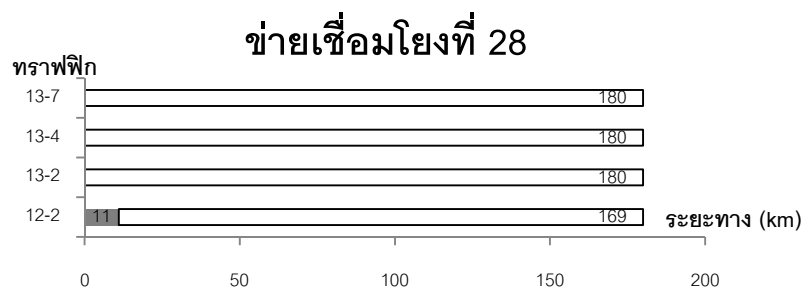
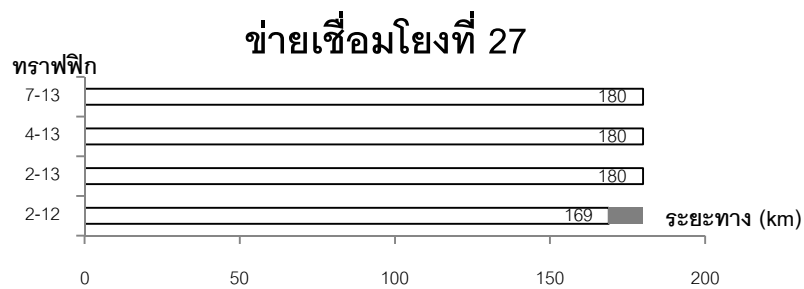
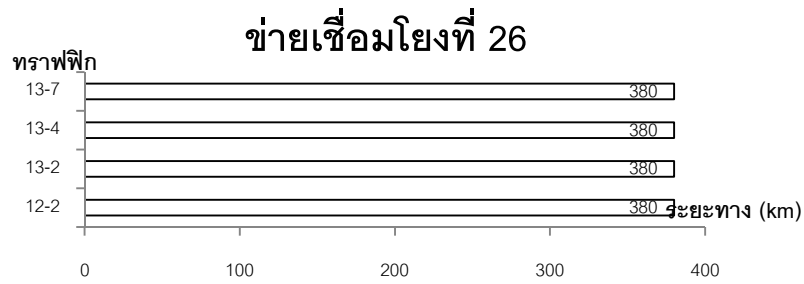
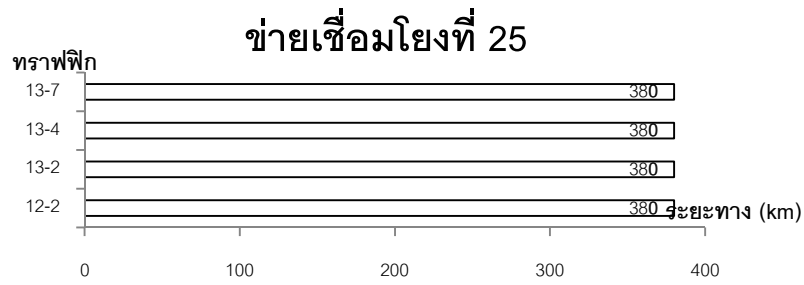
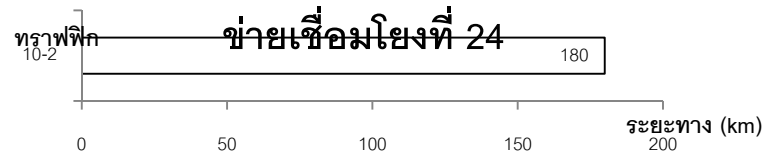
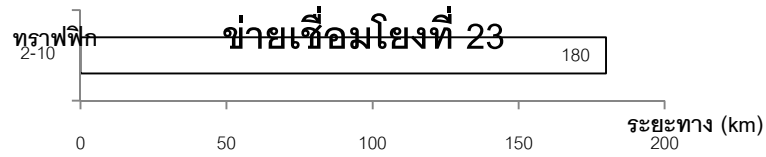
ข่ายเชื่อมโยงที่ 16



(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13-16

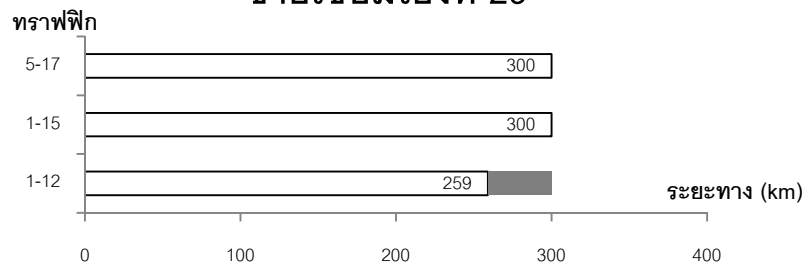


(จ) ข้ายเชื่อมโยงที่ 17-22

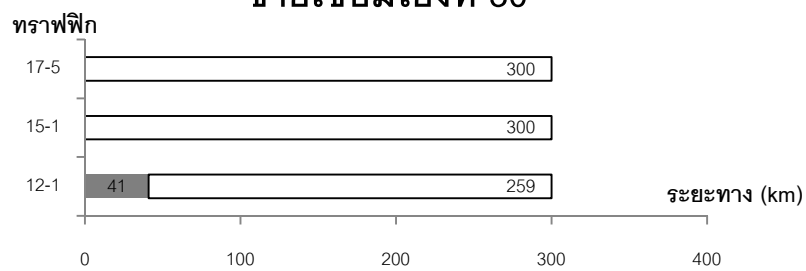


(ฉ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 23-28

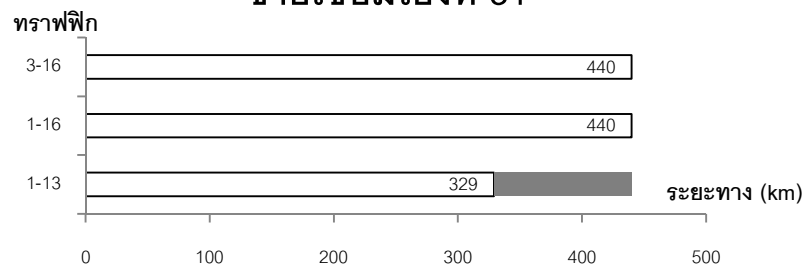
ข่ายเชื่อมโยงที่ 29



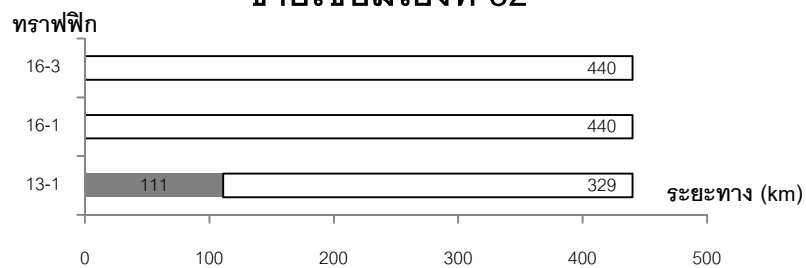
ข่ายเชื่อมโยงที่ 30



ข่ายเชื่อมโยงที่ 31

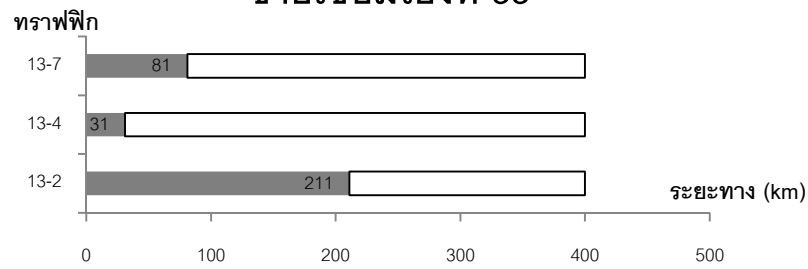


ข่ายเชื่อมโยงที่ 32

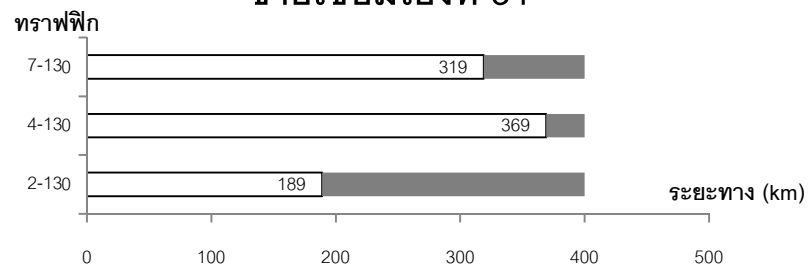


(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 29-32

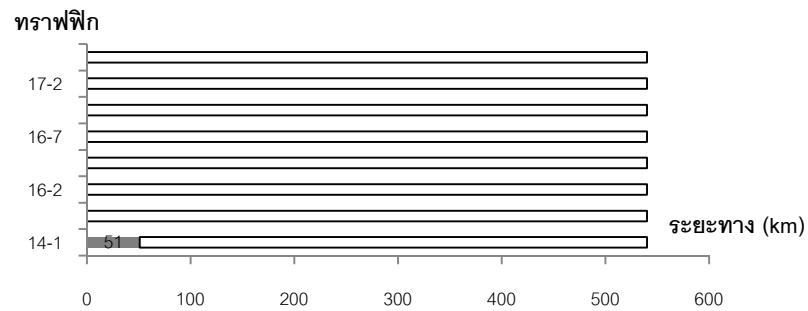
ข่ายเชื่อมโยงที่ 33



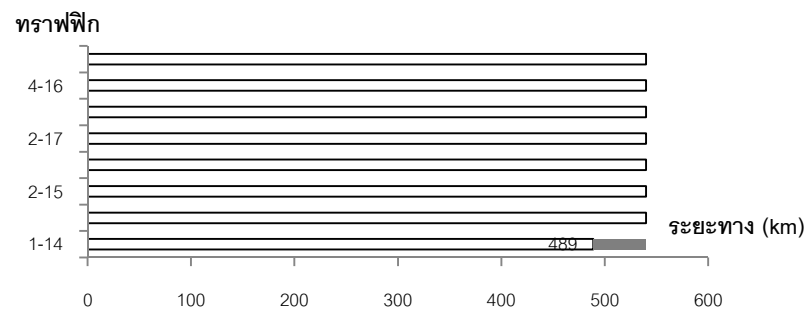
ข่ายเชื่อมโยงที่ 34



ข่ายเชื่อมโยงที่ 35

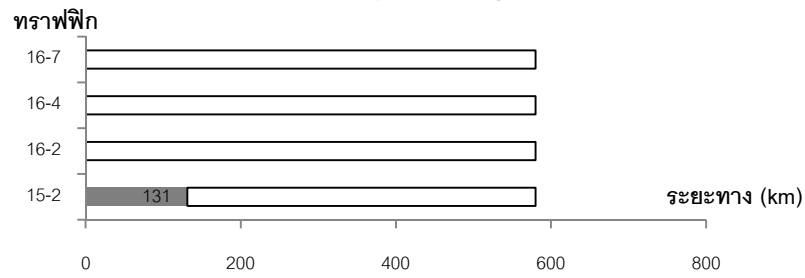


ข่ายเชื่อมโยงที่ 36

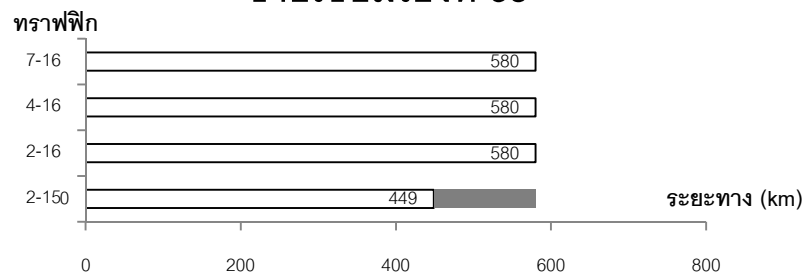


(ช) ข่ายเชื่อมโยงที่ 33-36

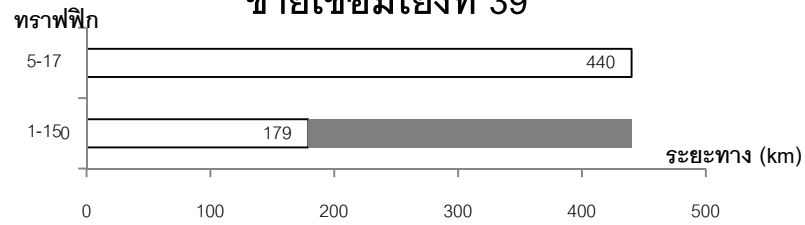
ข่ายเชื่อมโยงที่ 37



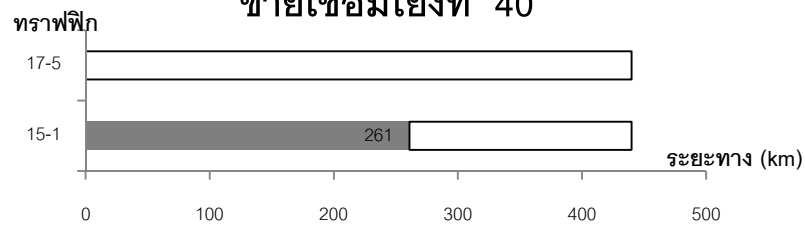
ข่ายเชื่อมโยงที่ 38



ข่ายเชื่อมโยงที่ 39

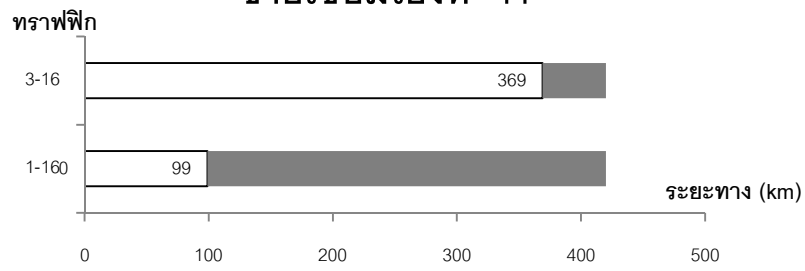


ข่ายเชื่อมโยงที่ 40

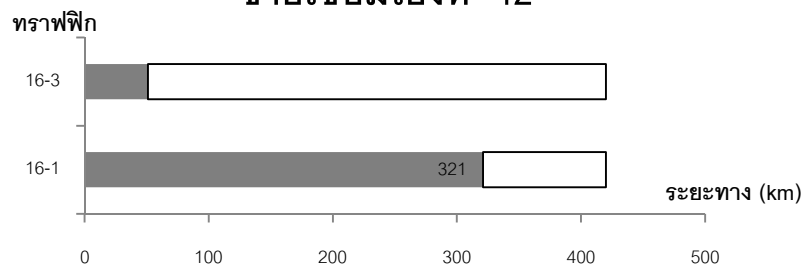


(ฉ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 37-40

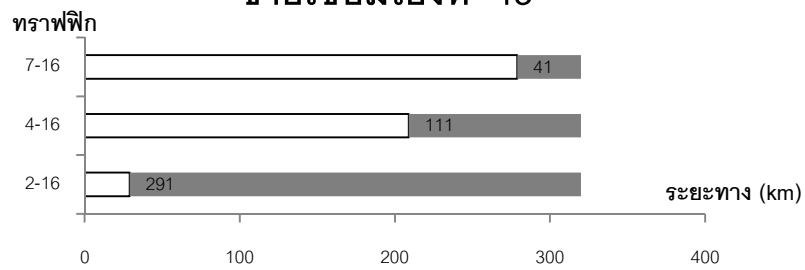
ข่ายเชื่อมโยงที่ 41



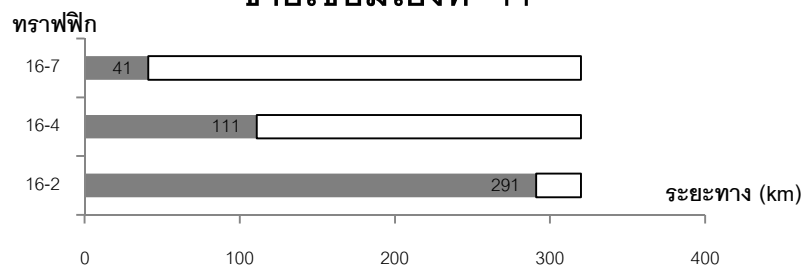
ข่ายเชื่อมโยงที่ 42



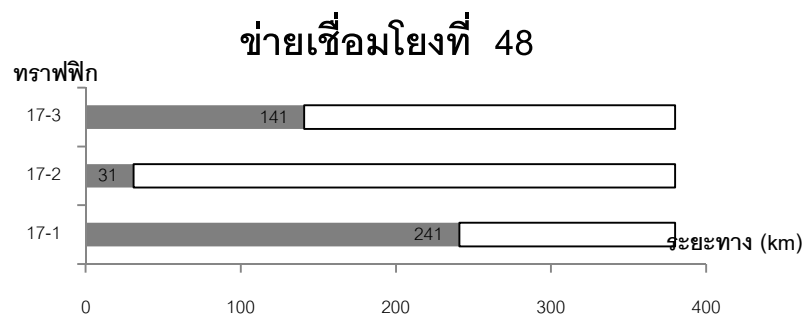
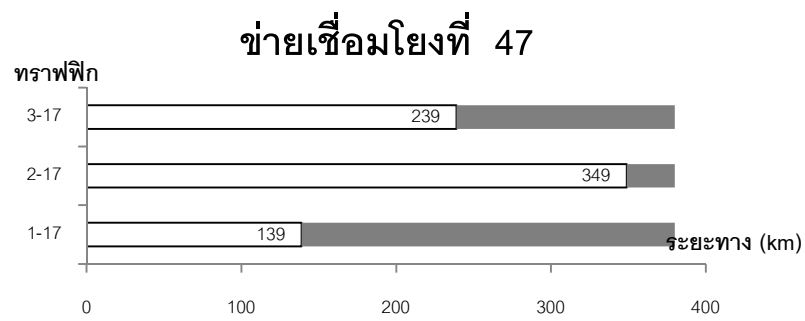
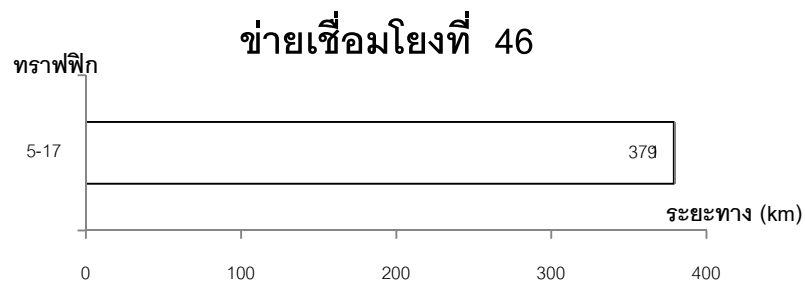
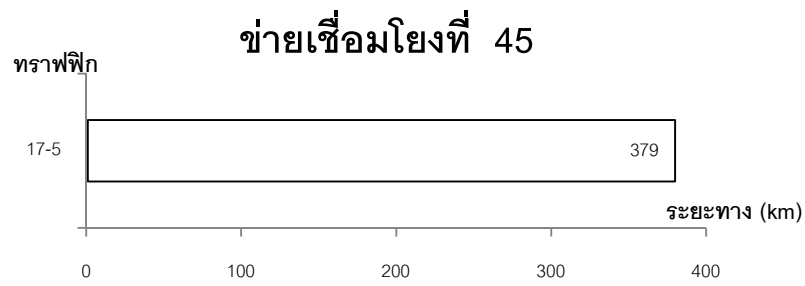
ข่ายเชื่อมโยงที่ 43



ข่ายเชื่อมโยงที่ 44



(ญ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 41-44



(ฎ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 45-48

รูปที่ 2 ช่วงการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับทุกข่ายเชื่อมโยง
ในโครงข่าย NARNet

รูปที่ 2 แสดงถึงช่วงการวาง OPC บนข่ายเชื่อมโยงที่แตกต่างกันในโครงข่าย NARNet โดยในช่วงแถบสีขาวของแต่ละข่ายเชื่อมโยงนั้น แสดงถึงช่วงที่สามารถวาง OPC ได้ และในขั้นตอนต่อไปคือหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC โดยจะใช้การพิจารณาดังนี้

1. จากรูปที่ 2 พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกในการวาง OPC มากที่สุด ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16 ซึ่งประกอบด้วยช่วงการวาง OPC สำหรับ 9 ทราฟฟิก (รูปที่ ง) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 0-99 กิโลเมตรและ 81-180 กิโลเมตร ตามลำดับ
2. พิจารณาตัดข่ายเชื่อมโยงที่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกมากที่สุดตามข้อ 1 โดยใช้หลักการสำหรับโครงข่ายที่เกี่ยวข้องใดๆ ดังนี้

จำนวนทราฟฟิกที่เหลือ = จำนวนทราฟฟิกที่ต้องวาง OPC (แถบในรูปที่ 2) – จำนวนทราฟฟิกที่เกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16

ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 1 และ 2 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 และ 6 เหลือทราฟฟิก = $8 - 5 = 3$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 7 และ 8 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 13 และ 14 เหลือทราฟฟิก = $7 - 7 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 17 และ 18 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 19 และ 20 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 เหลือทราฟฟิก = $1 - 0 = 1$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 25 และ 26 เหลือทราฟฟิก = $4 - 1 = 3$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 27 และ 28 เหลือทราฟฟิก = $4 - 1 = 3$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 33 และ 34 เหลือทราฟฟิก = $3 - 1 = 2$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 37 และ 38 เหลือทราฟฟิก = $4 - 4 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 43 และ 44 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 47 และ 48 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

จากนั้นจึงพิจารณาการตัดทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงที่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกมากที่สุดอันดับรองลงมา ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 35 และ 36 ซึ่งประกอบด้วยช่วงการวาง OPC สำหรับ 8 ทราฟฟิก (รูปที่ ช) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 51-489 กิโลเมตร และ 0 - 489 กิโลเมตร ตามลำดับ ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 และ 6 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 เหลือทราฟฟิก = $1 - 0 = 1$ ทราฟฟิก

จำนวนทราฟฟิกที่มากที่สุดอันดับถัดไป คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 21 และ 22 ซึ่งประกอบด้วย ช่วงการวาง OPC สำหรับ 7 ทราฟฟิก (รูปที่ จ) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 0-389 กิโลเมตร และ 31 - 389 กิโลเมตร ตามลำดับ ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 11 และ 12 เหลือทราฟฟิก = $4 - 1 = 3$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 29 และ 30 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 31 และ 32 เหลือทราฟฟิก = $3 - 0 = 3$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 39 และ 40 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 41 และ 42 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 45 และ 46 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

จำนวนทราฟฟิกที่มากที่สุดอันดับถัดไป คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 29 และ 30 ซึ่งประกอบด้วย ช่วงการวาง OPC สำหรับ 3 ทราฟฟิก (รูปที่ ข) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 0-259 กิโลเมตร และ 41 - 259 กิโลเมตร ตามลำดับ ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 27 และ 28 เหลือทราฟฟิก = $3 - 0 = 3$ ทราฟฟิก

จำนวนทราฟฟิกที่มากที่สุดอันดับถัดไป คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 33 และ 34 ซึ่งประกอบด้วย ช่วงการวาง OPC สำหรับ 3 ทราฟฟิก (รูปที่ ซ) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 211-400 กิโลเมตร และ 0 - 189 กิโลเมตร ตามลำดับ ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 11 และ 12 เหลือทราฟฟิก = $3 - 2 = 1$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 25 และ 26 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 27 และ 28 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

- เมื่อทำการพิจารณาตัดทราฟฟิกตามข้อ 2 จนเหลือข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกที่เหลือเท่ากันแล้วนั้น ขั้นตอนต่อมาคือ พิจารณาผลของดิสเพอร์ชันสะสมบนข่ายเชื่อมโยงที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16, 35 และ 36, 21 และ 22, 29 และ 30, 33 และ 34 ตามลำดับ ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 11, 12 และข่าย

เชื่อมโยงที่ 35, 36 ตามลำดับ จึงจะทำให้ดีสเพอร์ชันสะสมไม่เกินขีดจำกัดในทุกๆ
ทราฟฟิก

ระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่าย OPEN

1. การคำนวณระยะทางระหว่างทุกคู่โหนดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ในโครงข่าย OPEN

ตารางที่ 3 ระยะทางและข่ายเชื่อมโยงสำหรับการสื่อสารของทุกคู่โหนด

โหนด 1	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 2	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 3	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง
2	123	2	1	123	1	1	155	3
3	155	4	3	151	6	2	151	5
4	278	4,7	4	274	6,7	4	123	7
5	456	4,7,14	5	452	6,7,14	5	301	7,14
6	478	4,15	6	474	6,15	6	323	15
7	344	4,9	7	340	6,9	7	189	9
8	374	4,9,11	8	370	6,9,11	8	219	9,11
9	578	4,9,11,18	9	574	6,9,11,18	9	423	9,11,18
10	713	4,15,24	10	709	6,15,24	10	558	15,24
โหนด 4	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 5	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 6	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง
1	278	8,3	1	456	13,8,3	1	478	16,3
2	274	8,5	2	452	13,8,5	2	474	16,5
3	123	8	3	301	13,8	3	323	16
5	178	14	4	178	13	4	446	16,7
6	446	8,15	6	308	19	5	308	20
7	312	8,9	7	490	13,8,9	7	341	21,17,12
8	342	8,9,11	8	520	13,8,9,11	8	311	21,17
9	546	8,9,11,18	9	415	19,21	9	107	21
10	681	8,15,24	10	543	19,24	10	235	24
โหนด 7	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 8	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	โหนด 9	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง
1	344	10,3	1	374	12,10,3	1	578	17,12,10,3
2	340	10,5	2	370	12,10,5	2	574	17,12,10,5
3	189	10	3	219	12,10	3	423	17,12,10
4	312	10,7	4	342	12,10,7	4	546	17,12,10,7
5	490	10,7,14	5	520	12,10,7,14	5	415	22,20
6	341	11,18,22	6	311	18,22	6	107	22
8	30	11	7	30	12	7	234	17,12
9	234	11,18	9	204	18	8	204	17
10	420	11,18,26	10	390	18,26	10	186	26

(ก) โหนดที่ 1-9

โหนด	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง
10		
1	713	23,16,3
2	709	23,16,5
3	558	23,16
4	681	23,16,7
5	543	23,20
6	235	23
7	420	25,17,12
8	390	25,17
9	186	25

(ข) โหนดที่ 10

จากตารางที่ 3 แสดงถึงระยะทางและข่ายเชื่อมโยงของการสื่อสารระหว่างทุกคู่โหนด ขั้นตอนต่อไปในระเบียบวิธีคือ การหาช่วงดิสเพอร์ชันที่จะใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R

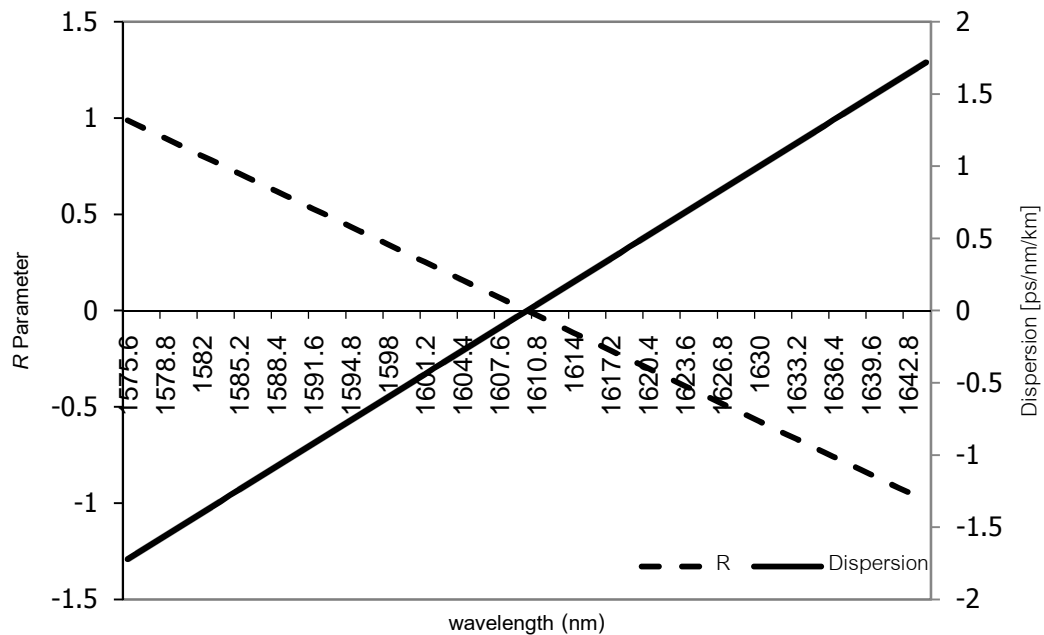
2. การหาช่วงดิสเพอร์ชันที่ใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย OPEN

ในขั้นตอนนี้จะใช้รูปแบบการคำนวณเหมือนกับโครงข่าย OPEN ตามหัวข้อที่ 4.1.2 จะแตกต่างกันที่การแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เป็นค่าเฉพาะของแต่ละโครงข่าย เช่น X_1, LP เป็นต้น โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบ ตามสมการที่ (3.19) และ (3.22) ตามลำดับ ดังนี้

$$R = \frac{2D_\lambda X_1 - D_\lambda(LP)}{800} \quad (3.19)$$

$$D_\lambda = -3 + 0.05 \times (\lambda - 1550) \quad (3.22)$$

จากการให้ตัวแปรความยาวคลื่นเป็นตัวแปรอิสระเพื่อเปลี่ยนค่า จะเห็นได้ว่าค่า R จะเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปเช่นกัน ซึ่งความสัมพันธ์ข้างต้นสำหรับโครงข่าย OPEN สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R , ดิสเพอร์ชันและความยาวคลื่นสำหรับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย OPEN

จากรูปที่ 3 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า R และดิสเพอร์ชันกับความยาวคลื่นสำหรับโครงข่าย OPEN พบว่าช่วงความยาวคลื่นที่ทำให้ค่า $|R| \leq 1$ คือ

- ช่วงความยาวคลื่น 1575.6 nm ถึง 1644.4 nm

จากช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวนี้ คิดเป็นความยาวคลื่นจำนวน 87 ความยาวคลื่น แบ่งตามมาตรฐาน ITU-T 100 GHz Channel Spacing

โดยในช่วงความยาวคลื่นช่วงนี้จะได้ค่าดิสเพอร์ชันเป็นดังนี้

- ช่วงดิสเพอร์ชัน -1.72 ps/nm/km ถึง 1.72 ps/nm/km

ซึ่งการใช้งานค่าดิสเพอร์ชันช่วงดังกล่าวนี้ จะทำให้ค่า R มีค่าไม่เกิน ± 1 นั้นหมายความว่าโครงข่ายดังกล่าวสามารถใช้ระเบียบวิธีนี้ได้ โดยไม่ต้องลดขนาดโครงข่าย และช่วงค่าดิสเพอร์ชันข้างต้นจะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปของระเบียบวิธีการวาง OPC

3. การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารทุก ๆ จุดในโครงข่าย OPEN

การหาระยะขอบเขตด้านซ้ายและด้านขวาสำหรับสำหรับโครงข่าย OPEN จะกระทำรูปแบบเดียวกับหัวข้อที่ 4.1.3 โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) ตามลำดับ โดยในส่วนของคุณค่าดิสเพอร์ชันของระบบจะเลือกจากช่วงดิสเพอร์ชันจากขั้นตอนในการหา

ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ R โดยใช้ค่าที่ทำให้เกิดดิสเพอร์ชันสะสมที่รุนแรงที่สุด (worst case) คือ -1.72 ps/nm/km ในการคำนวณ โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ระยะขอบเขตทางด้านซ้ายและด้านขวาในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นใน
โครงข่าย OPEN

โนด	ระยะทาง [km]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด	ระยะทาง [km]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
2	123	2	-171	294	1	123	1	-171	294
3	155	4	-155	310	3	151	6	-157	308
4	278	4,7	-94	372	4	274	6,7	-96	370
5	456	4,7,14	-5	461	5	452	6,7,14	-7	459
6	478	4,15	6	472	6	474	6,15	4	470
7	344	4,9	-61	405	7	340	6,9	-63	403
8	374	4,9,11	-46	420	8	370	6,9,11	-48	418
9	578	4,9,11,18	56	522	9	574	6,9,11,18	54	520
10	713	4,15,24	124	589	10	709	6,15,24	122	587
โนด	ข่าย เชื่อมโยง	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด	ระยะทาง [km]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
3	155	3	-155	310	4	278	8,3	-155	310
1	151	5	-157	308	2	274	8,5	-157	308
2	123	7	-171	294	3	123	8	-171	294
4	301	7,14	-82	383	5	178	14	-82	383
5	323	15	-71	394	6	446	8,15	-71	394
6	189	9	-138	327	7	312	8,9	-138	327
7	219	9,11	-123	342	8	342	8,9,11	-123	342
8	423	9,11,18	-21	444	9	546	8,9,11,18	-21	444
9	558	15,24	46	512	10	681	8,15,24	46	512

(ก) โหนดที่ 1-4

โนด	ระยะทาง [km]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R	โนด	ระยะทาง [km]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L	OPC_R
5	456	13,8,3	-5	461	6	478	16,3	6	472
1	452	13,8,5	-7	459	2	474	16,5	4	470
2	301	13,8	-82	383	3	323	16	-71	394
3	178	13	-144	322	4	446	16,7	-10	456
4	308	19	-79	387	5	308	20	-79	387
6	490	13,8,9	12	478	7	341	21,17,12	-62	403

8	520	13,8,9,11	27	493	8	311	21,17	-77	388
9	415	19,21	-25	440	9	107	21	-179	286
10	543	19,24	39	504	10	235	24	-115	350
โนด	ระยะทาง	ข่าย	OPC_L	OPC_R	โนด	ระยะทาง	ข่าย	OPC_L	OPC_R
7	[km]	เชื่อมโยง			8	[km]	เชื่อมโยง		
1	344	10,3	-5	461	1	374	12,10,3	-46	420
2	340	10,5	-7	459	2	370	12,10,5	-48	418
3	189	10	-82	383	3	219	12,10	-123	342
4	312	10,7	-144	322	4	342	12,10,7	-62	404
5	490	10,7,14	-79	387	5	520	12,10,7,14	27	493
6	341	11,18,22	12	478	6	311	18,22	-77	388
8	30	11	27	493	7	30	12	-218	248
9	234	11,18	-25	440	9	204	18	-131	335
10	420	11,18,26	39	504	10	390	18,26	-38	428
โนด	ระยะทาง	ข่าย	OPC_L	OPC_R	โนด	ระยะทาง	ข่าย	OPC_L	OPC_R
9	[km]	เชื่อมโยง			10	[km]	เชื่อมโยง		
1	578	17,12,10,3	56	522	1	713	23,16,3	-61	405
2	574	17,12,10,5	54	520	2	709	23,16,5	-63	403
3	423	17,12,10	-21	444	3	558	23,16	-138	327
4	546	17,12,10,7	40	506	4	681	23,16,7	-77	389
5	415	22,20	-25	440	5	543	23,20	12	478
6	107	22	-179	286	6	235	23	-62	403
7	234	17,12	-116	350	7	420	25,17,12	-218	248
8	204	17	-131	335	8	390	25,17	-116	350
10	186	26	-140	326	9	186	25	-23	443

(ข) โหนดที่ 5-10

จากตารางที่ 4 แสดงถึงระยะขอบเขตทางข่ายและขวาของการวาง OPC สำหรับกราฟฟิกการสื่อสารทั้งหมดในโครงข่าย พบว่าจะมีบางกราฟฟิกที่มีช่วงการวาง OPC ยาวกว่าความยาวรวมของกราฟฟิก ซึ่งหมายความว่าเราสามารถกำหนดจุดวาง OPC ในตำแหน่งใดๆก็ได้บนกราฟฟิกนั้นๆ

ในขณะที่เดียวกันจะมีบางกราฟฟิกที่ไม่จำเป็นต้องใช้ OPC ในการจำกัดผลของดิสเพอร์ชันเนื่องจากระยะทางที่มากที่สุดที่จะต้องพิจารณาการวาง OPC คือ $800/|-1.72|=465$ km ดังนั้นระยะทางของกราฟฟิกใดๆที่น้อยกว่าค่าดังกล่าว จึงไม่ต้องพิจารณาผลของดิสเพอร์ชันสะสมและไม่จำเป็นต้องพิจารณาการวาง OPC

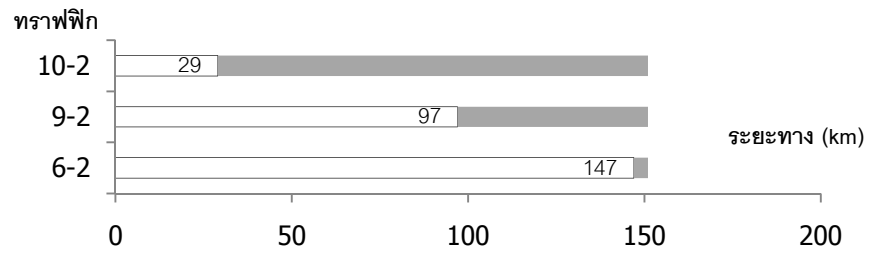
4. การกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น สำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย OPEN โดยใช้วิธีซ้อนทับ

จากขั้นตอนที่ผ่านมา เราจะได้ตำแหน่งขอบเขตด้านซ้ายและด้านขวาในการวาง OPC สำหรับทุกๆกราฟฟิคดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งจากตารางดังกล่าว เราสามารถสรุปช่วงการวาง OPC สำหรับข่ายเชื่อมโยงได้ดังรูปที่ 4

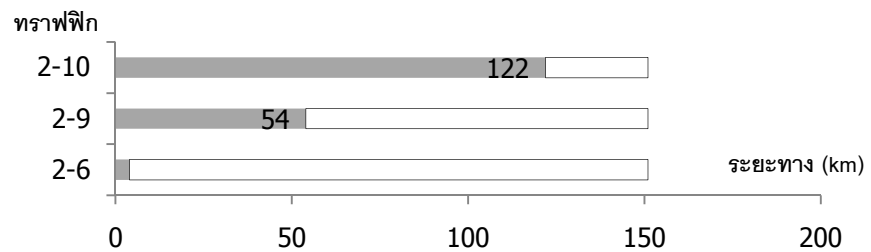


(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 3-4

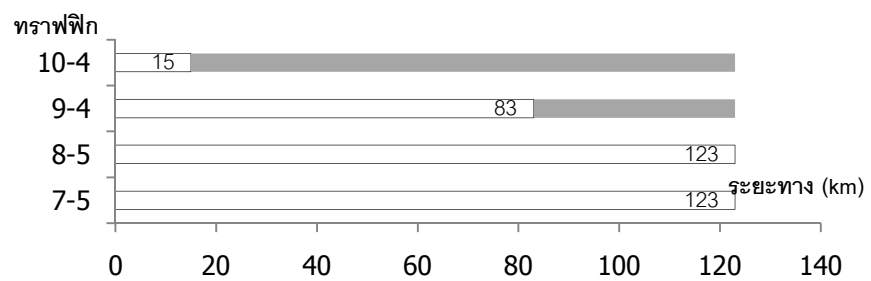
ข่ายเชื่อมโยงที่ 5



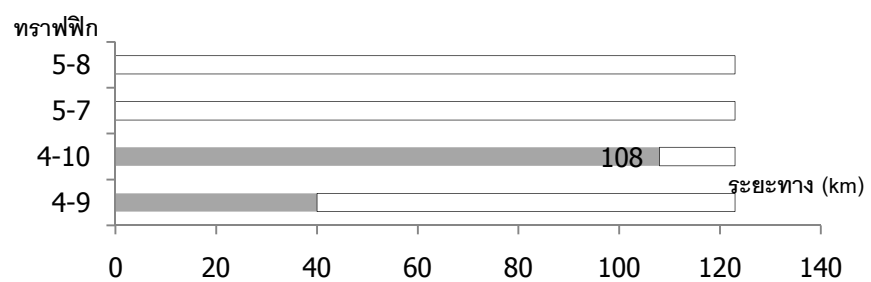
ข่ายเชื่อมโยงที่ 6



ข่ายเชื่อมโยงที่ 7

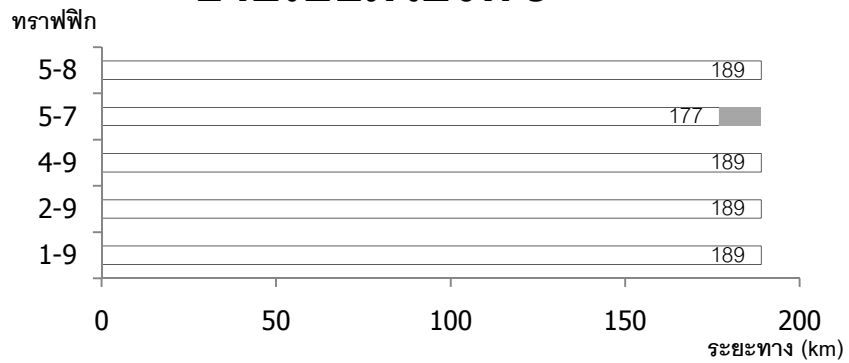


ข่ายเชื่อมโยงที่ 8

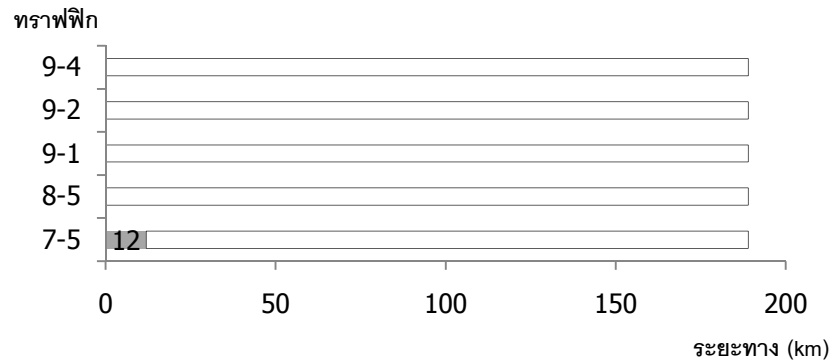


(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 5-8

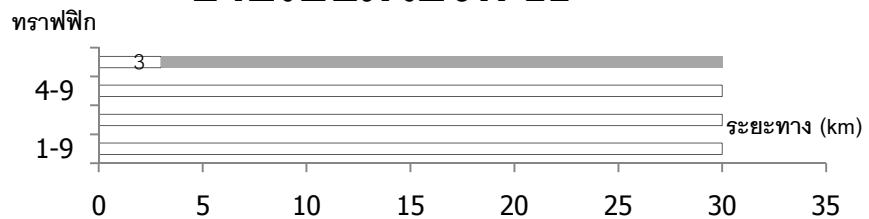
ข่ายเชื่อมโยงที่ 9



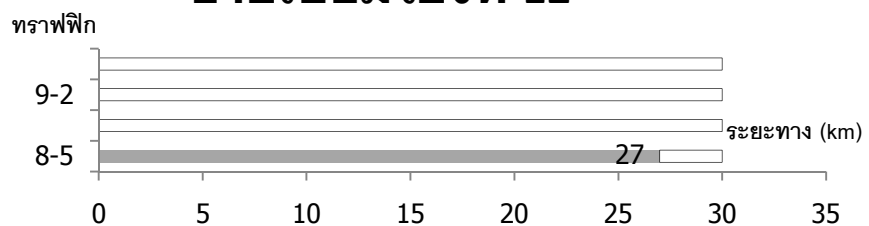
ข่ายเชื่อมโยงที่ 10



ข่ายเชื่อมโยงที่ 11

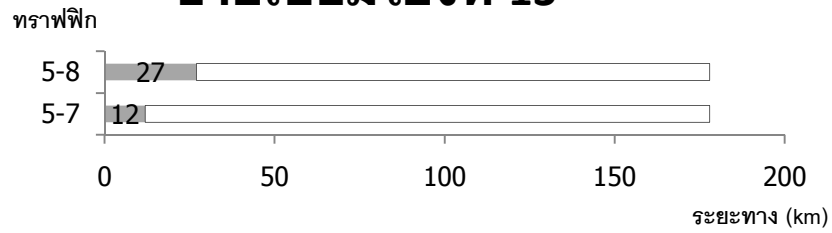


ข่ายเชื่อมโยงที่ 12

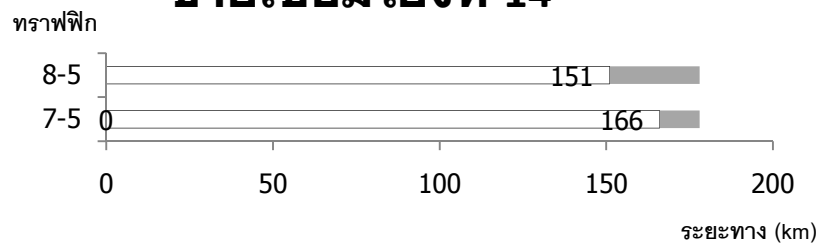


(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 9-12

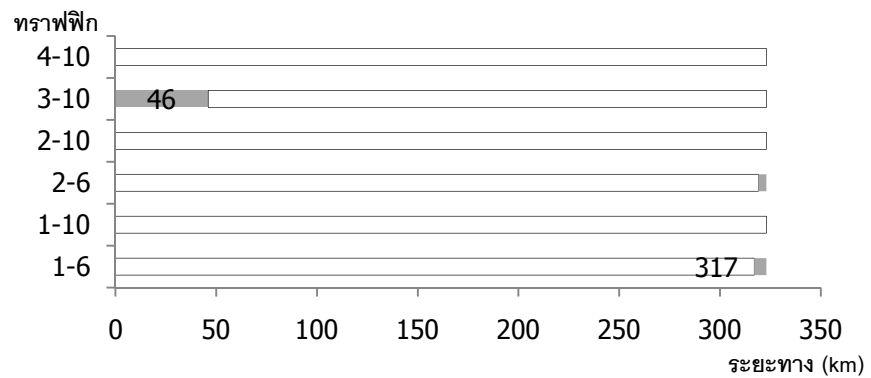
ข่ายเชื่อมโยงที่ 13



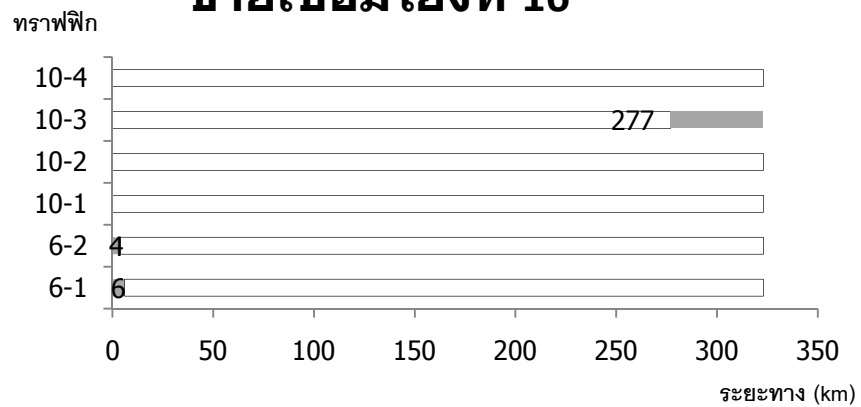
ข่ายเชื่อมโยงที่ 14



ข่ายเชื่อมโยงที่ 15

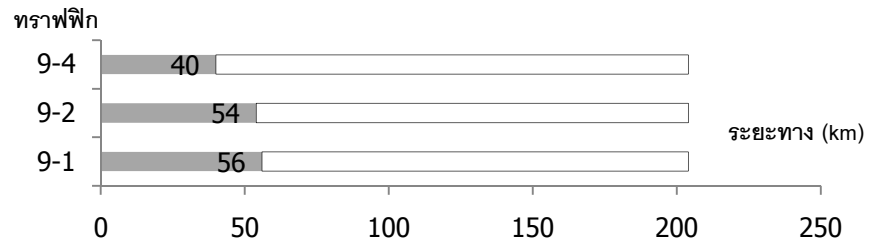


ข่ายเชื่อมโยงที่ 16

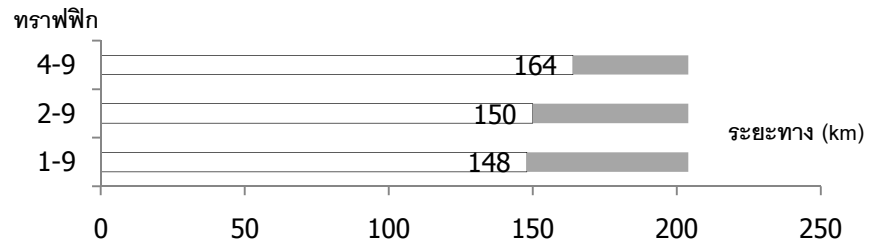


(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 13-16

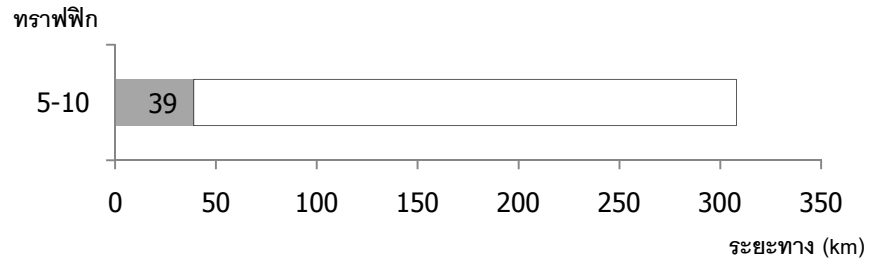
ข่ายเชื่อมโยงที่ 17



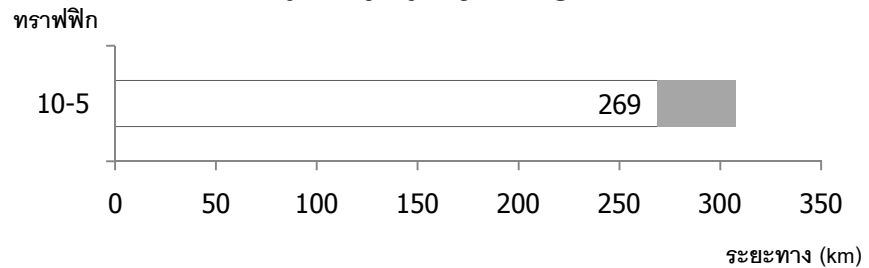
ข่ายเชื่อมโยงที่ 18



ข่ายเชื่อมโยงที่ 19

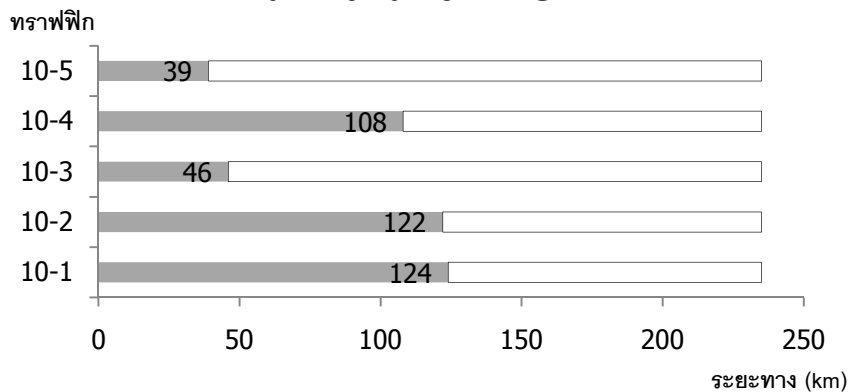


ข่ายเชื่อมโยงที่ 20

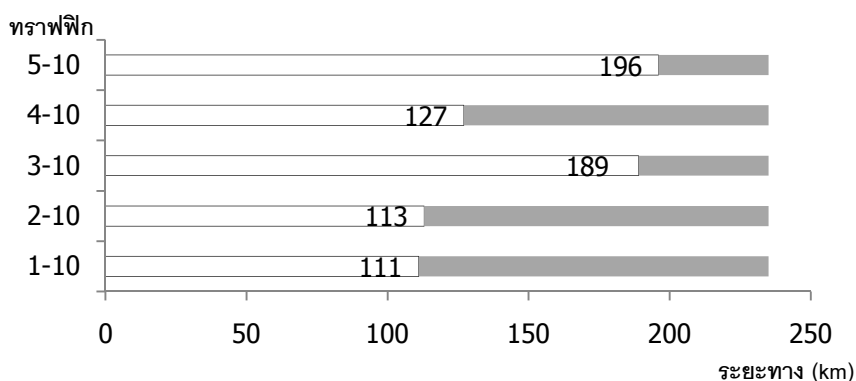


(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 17-20

ข่ายเชื่อมโยงที่ 23



ข่ายเชื่อมโยงที่ 24



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 23-24

รูปที่ 4 ช่วงการวาง OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่นสำหรับทุกข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย OPEN

รูปที่ 4 แสดงถึงช่วงการวาง OPC บนข่ายเชื่อมโยงที่แตกต่างกันในโครงข่าย OPEN โดยในช่วงแถบสีขาของแต่ละข่ายเชื่อมโยงนั้น แสดงถึงช่วงที่สามารถวาง OPC ได้ และในขั้นตอนต่อไปคือหาดำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC โดยจะใช้การพิจารณาดังนี้

1. จากรูปที่ 4 พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟีกในการวาง OPC มากที่สุด ในที่นี้คือข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16 ซึ่งประกอบด้วยช่วงการวาง OPC สำหรับ 6 ทราฟฟีก (รูปที่ 4 ง) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 46-317 กิโลเมตรและ 6-277 กิโลเมตร ตามลำดับ
2. พิจารณาตัดข่ายเชื่อมโยงที่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟีกมาก

ที่สุดตามข้อ 1 โดยใช้หลักการสำหรับโครงข่ายที่เกี่ยวข้องใดๆ ดังนี้

จำนวนทราฟฟิกที่เหลือ = จำนวนทราฟฟิกที่ต้องวาง OPC (แถบในรูปที่ 4) – จำนวนทราฟฟิกที่เกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16

ในที่นี่จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 3 และ 4 เหลือทราฟฟิก = $3 - 1 = 2$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 และ 6 เหลือทราฟฟิก = $3 - 2 = 1$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 7 และ 8 เหลือทราฟฟิก = $4 - 1 = 3$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 เหลือทราฟฟิก = $5 - 4 = 1$ ทราฟฟิก

จากนั้นจึงพิจารณาการตัดทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงที่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกมากที่สุดอันดับรองลงมา ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 9 และ 10 ซึ่งประกอบด้วยช่วงการวาง OPC สำหรับ 5 ทราฟฟิก (รูปที่ 4 ค) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 0-177 กิโลเมตร และ 12-189 กิโลเมตร ตามลำดับ ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 3 และ 4 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 และ 6 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 7 และ 8 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 11 และ 12 เหลือทราฟฟิก = $4 - 4 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 13 และ 14 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 17 และ 18 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

- เมื่อทำการพิจารณาตัดทราฟฟิกตามข้อ 2 จนเหลือข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกที่เหลือเท่ากันแล้วนั้น ขั้นตอนต่อมาคือ พิจารณาผลของดีสเพอร์ชันสะสมบนข่ายเชื่อมโยงที่ไม่มีมีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16, 9 และ 10 ตามลำดับ ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 19, จึงจะทำให้ดีสเพอร์ชันสะสมไม่เกินขีดจำกัดในทุกๆ ทราฟฟิก

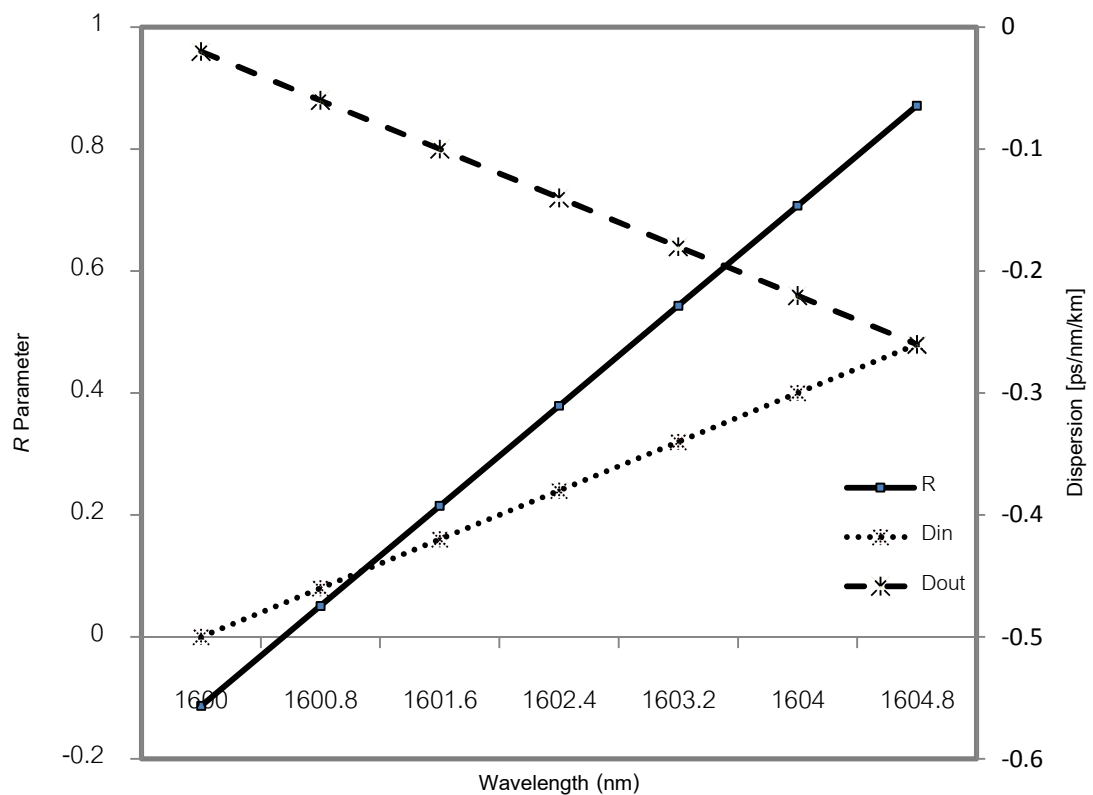
ระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่าย NARNet

1. การคำนวณระยะทางระหว่างทุกคูโนดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ในโครงข่าย NARNet

สำหรับขั้นตอนการคำนวณระยะทางระหว่างทุกคูโนดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด จะมีผลลัพธ์ที่ได้เหมือนกับระเบียบวิธีการวาง OPC แบบไม่เลื่อนความยาวคลื่นทุกประการ ดังแสดงในตารางที่ 1

2. การคำนวณช่วงดิสเพอร์ชันที่ใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย NARNet

เช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 5.1 การคำนวณพารามิเตอร์ R นั้น จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบตามสมการที่ (3.21) และความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิสเพอร์ชันกับความยาวคลื่นตามประเภทของเส้นใยแสงที่ใช้ในโครงข่ายตามสมการที่ (3.22) จากความสัมพันธ์ทั้งสอง จะเห็นได้ว่าค่า R จะเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปและจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R , ดิสเพอร์ชันขาเข้า/ขาออกและความยาวคลื่นสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย NARNet

จากรูปที่ พบว่าค่าที่พารามิเตอร์ $|R| \leq 1$ เป็นดังนี้

- ช่วงความยาวคลื่น 1600 nm ถึง 1604.8 nm

จากช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวนี้ คิดเป็นความยาวคลื่นจำนวน 7 ความยาวคลื่น แบ่งตามมาตรฐาน ITU-T 100 GHz Channel Spacing

โดยช่วงค่าดิสเพอร์ชันขาเข้า/ขาออกเป็นดังนี้

- ช่วงดิสเพอร์ชัน -0.5 ps/nm/km ถึง -0.02 ps/nm/km

โดยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้า -0.5 ps/nm/km และดิสเพอร์ชันขาออก -0.02 ps/nm/km ที่ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ จะนำไปใช้ในขั้นตอนการคำนวณช่วงในการวาง OPC สำหรับการสื่อสารระหว่างทุกๆ โหนดต่อไป

3. การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารทุกๆ โหนดในโครงข่าย NARNet

โดยอาศัยความสัมพันธ์ในการกำหนดขอบเขตด้านซ้ายและขวา จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) ดังนี้

$$X_{OPC_L} = \frac{D_{out}(LP) + 800}{D_{in} + D_{out}} \quad (3.14)$$

$$X_{OPC_R} = \frac{D_{out}(LP) - 800}{D_{in} + D_{out}} \quad (3.15)$$

จากสมการข้างต้นนั้นเป็นระยะขอบเขตในการวาง OPC ทางด้านซ้ายและด้านขวาตามลำดับ เมื่อแทนค่าดิสเพอร์ชันขาเข้า (D_{in}) และขาออก (D_{out}) ในขั้นตอนที่ผ่านมา จะได้ช่วงการวาง OPC สำหรับการสื่อสารทุกๆ โหนดเป็นไปตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารทุกๆ โหนด
ในโครงข่าย NARNet

โหนด 1	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โหนด 2	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
2	420	2	-1522	1555	1	420	1	-1522	1555
3	540	3	-1518	1559	3	940	5,7	-1502	1575
4	780	2,5	-1508	1568	4	360	5	-1525	1552
5	900	3,9	-1504	1573	5	1180	5,12,23	-1493	1584
6	1080	3,9,24	-1497	1580	6	1000	5,12	-1500	1577
7	920	2,5,13	-1503	1574	7	500	5,13	-1519	1558
8	1100	2,5,13,16	-1496	1581	8	680	5,13,16	-1512	1565
9	1280	3,9,24,17	-1489	1588	9	1040	5,13,16,20	-1498	1578
10	1320	3,9,21	-1488	1589	10	1600	5,12,23,21	-1477	1600
11	1460	3,9,24,26	-1482	1595	11	1380	5,12,26	-1485	1592
12	1620	3,9,21,29	-1476	1601	12	1560	5,12,26,27	-1478	1598
13	1760	3,9,21,31	-1471	1606	13	1960	5,12,26,27,34	-1463	1614
14	1640	2,5,13,16,36	-1475	1602	14	1220	5,13,16,36	-1492	1585
15	2060	3,9,21,29,39	-1459	1618	15	1800	5,13,16,36,38	-1469	1608
16	2180	3,9,21,31,41	-1455	1622	16	2120	5,13,16,36,38,43	-1457	1620
17	2020	2,5,13,16,36,47	-1461	1616	17	1600	5,13,16,36,47	-1477	1600

(ก) โหนดที่ 1-2

โนด 3	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โนด 4	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
1	540	4	-1518	1559	1	780	6,1	-1508	1568
2	940	8,6	-1502	1575	2	360	6	-1525	1552
4	580	8	-1516	1561	3	580	7	-1516	1561
5	360	9	-1525	1552	5	820	12,23	-1507	1570
6	540	9,24	-1518	1559	6	640	12	-1514	1563
7	720	8,13	-1511	1566	7	140	13	-1533	1544
8	900	8,13,16	-1504	1573	8	320	13,16	-1526	1551
9	740	9,24,17	-1510	1567	9	680	13,16,20	-1512	1565
10	780	9,21	-1508	1568	10	1240	12,23,21	-1491	1586
11	920	9,24,26	-1503	1574	11	1020	12,26	-1499	1578
12	1080	9,21,29	-1497	1580	12	1200	12,26,27	-1492	1585
13	1220	9,21,31	-1492	1585	13	1600	12,26,27,34	-1477	1600
14	1440	8,13,16,36	-1483	1594	14	860	13,16,36	-1505	1572
15	1520	9,21,29,39	-1480	1597	15	1440	13,16,36,38	-1483	1594
16	1640	9,21,31,41	-1475	1602	16	1760	13,16,36,38,43	-1471	1606
17	1820	8,13,16,36,47	-1468	1608	17	1240	13,16,36,47	-1491	1586
โนด 5	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โนด 6	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
1	900	10,4	-1504	1573	1	1080	23,10,4	-1497	1580
2	1180	24,11,6	-1493	1584	2	1000	11,6	-1500	1577
3	360	10	-1525	1552	3	540	23,10	-1518	1559
4	820	24,11	-1507	1570	4	640	11	-1514	1563
6	180	24	-1532	1545	5	180	23	-1532	1545
7	920	24,17,19,15	-1503	1574	7	740	17,19,15	-1510	1567
8	740	24,17,19	-1510	1567	8	560	17,19	-1517	1560
9	380	24,17	-1524	1553	9	200	17	-1531	1546
10	420	21	-1522	1555	10	600	23,21	-1515	1562
11	560	24,26	-1517	1560	11	380	26	-1524	1553
12	720	21,29	-1511	1566	12	560	26,27	-1517	1560
13	860	21,31	-1505	1572	13	960	26,27,34	-1502	1575
14	1280	24,17,19,36	-1489	1588	14	1100	17,19,36	-1496	1581
15	1160	21,29,39	-1494	1583	15	1000	26,27,39	-1500	1577
16	1280	21,31,41	-1489	1588	16	1320	26,27,39,43	-1488	1589
17	1540	21,29,39,46	-1479	1598	17	1380	26,27,39,46	-1485	1592

(ข) โหนดที่ 3-6

โนด 7	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โนด 8	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
1	920	14,6,1	-1503	1574	1	1100	15,14,6,1	-1496	1581
2	500	14,6	-1519	1558	2	680	15,14,6	-1512	1565
3	720	14,7	-1511	1566	3	900	15,14,7	-1504	1573
4	140	14	-1533	1544	4	320	15,14	-1526	1551
5	920	16,20,18,23	-1503	1574	5	740	20,18,23	-1510	1567
6	740	16,20,18	-1510	1567	6	560	20,18	-1517	1560
8	180	16	-1532	1545	7	180	15	-1532	1545
9	540	16,20	-1518	1559	9	360	20	-1525	1552
10	1340	16,20,18,23,21	-1487	1590	10	1160	20,18,23,21	-1494	1583
11	1120	16,20,18,26	-1495	1582	11	940	20,18,26	-1502	1575
12	1300	16,20,18,26,27	-1488	1588	12	1120	20,18,26,27	-1495	1582
13	1700	16,20,18,26,27,34	-1473	1604	13	1520	20,18,26,27,34	-1480	1597
14	720	16,36	-1511	1566	14	540	36	-1518	1559
15	1300	16,36,38	-1488	1588	15	1120	36,38	-1495	1582
16	1620	16,36,38,43	-1476	1601	16	1440	36,38,43	-1483	1594
17	1100	16,36,47	-1496	1581	17	920	36,47	-1503	1574
โนด 9	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โนด 10	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
1	1280	18,23,10,4	-1489	1588	1	1320	22,10,4	-1488	1589
2	1040	19,15,14,6	-1498	1578	2	1600	22,24,11,6	-1477	1600
3	740	18,23,10	-1510	1567	3	780	22,10	-1508	1568
4	680	19,15,14	-1512	1565	4	1240	22,24,11	-1491	1586
5	380	18,23	-1524	1553	5	420	22	-1522	1555
6	200	18	-1531	1546	6	600	22,24	-1515	1562
7	540	19,15	-1518	1559	7	1340	22,24,17,19,15	-1487	1590
8	360	19	-1525	1552	8	1160	22,24,17,19	-1494	1583
10	800	18,23,21	-1508	1569	9	800	22,24,17	-1508	1569
11	580	18,26	-1516	1561	11	480	29,28	-1520	1557
12	760	18,26,27	-1509	1568	12	300	29	-1527	1550
13	1160	18,26,27,34	-1494	1583	13	440	31	-1522	1555
14	900	19,36	-1504	1573	14	1320	29,39,37	-1488	1589
15	1200	18,26,27,39	-1492	1585	15	740	29,39	-1510	1567
16	1520	18,26,27,39,43	-1480	1597	16	860	31,41	-1505	1572
17	1280	19,36,47	-1489	1588	17	1120	29,39,46	-1495	1582

(ค) โหนดที่ 7-10

โนด 11	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โนด 12	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
1	1460	25,23,10,4	-1482	1595	1	1620	30,22,10,4	-1476	1601
2	1380	25,11,6	-1485	1592	2	1560	28,25,11,6	-1478	1598
3	920	25,23,10	-1503	1574	3	1080	30,22,10	-1497	1580
4	1020	25,11	-1499	1578	4	1200	28,25,11	-1492	1585
5	560	25,23	-1517	1560	5	720	30,22	-1511	1566
6	380	25	-1524	1553	6	560	28,25	-1517	1560
7	1120	25,17,19,15	-1495	1582	7	1300	28,25,17,19,15	-1488	1588
8	940	25,17,19	-1502	1575	8	1120	28,25,17,19	-1495	1582
9	580	25,17	-1516	1561	9	760	28,25,17	-1509	1568
10	480	27,30	-1520	1557	10	300	30	-1527	1550
12	180	27	-1532	1545	11	180	28	-1532	1545
13	580	27,34	-1516	1561	13	400	34	-1523	1554
14	1200	27,39,37	-1492	1585	14	1020	39,37	-1499	1578
15	620	27,39	-1515	1562	15	440	39	-1522	1555
16	940	27,39,43	-1502	1575	16	760	39,43	-1509	1568
17	1000	27,39,46	-1500	1577	17	820	39,46	-1507	1570
โนด 13	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โนด 14	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
1	1760	32,22,10,4	-1471	1606	1	1640	35,15,14,6,1	-1475	1602
2	1960	33,28,25,11,6	-1463	1614	2	1220	35,15,14,6	-1492	1585
3	1220	32,22,10	-1492	1585	3	1440	35,15,14,7	-1483	1594
4	1600	33,28,25,11	-1477	1600	4	860	35,15,14	-1505	1572
5	860	32,22	-1505	1572	5	1280	35,20,18,23	-1489	1588
6	960	33,28,25	-1502	1575	6	1100	35,20,18	-1496	1581
7	1700	33,28,25,17,19,15	-1473	1604	7	720	35,15	-1511	1566
8	1520	33,28,25,17,19	-1480	1597	8	540	35	-1518	1559
9	1160	33,28,25,17	-1494	1583	9	900	35,20	-1504	1573
10	440	32	-1522	1555	10	1320	38,40,30	-1488	1589
11	580	33,28	-1516	1561	11	1200	38,40,28	-1492	1585
12	400	33	-1523	1554	12	1020	38,40	-1499	1578
14	1320	41,44,37	-1488	1589	13	1320	38,43,42	-1488	1589
15	740	41,44	-1510	1567	15	580	38	-1516	1561
16	420	41	-1522	1555	16	900	38,43	-1504	1573
17	1120	41,44,46	-1495	1582	17	380	47	-1524	1553

(ง) โหนดที่ 11-14

โนด 15	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โนด 16	ระยะทาง [km]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
1	2060	40,30,22,10,4	-1459	1618	1	2180	42,32,22,10,4	-1455	1622
2	1800	37,35,15,14,6	-1469	1608	2	2120	44,37,35,15,14,6	-1457	1620
3	1520	40,30,22,10	-1480	1597	3	1640	42,32,22,10	-1475	1602
4	1440	37,35,15,14	-1483	1594	4	1760	44,37,35,15,14	-1471	1606
5	1160	40,30,22	-1494	1583	5	1280	42,32,22	-1489	1588
6	1000	40,28,25	-1500	1577	6	1320	44,40,28,25	-1488	1589
7	1300	37,35,15	-1488	1588	7	1620	44,37,35,15	-1476	1601
8	1120	37,35	-1495	1582	8	1440	44,37,35	-1483	1594
9	1200	40,28,25,17	-1492	1585	9	1520	44,40,28,25,17	-1480	1597
10	740	40,30	-1510	1567	10	860	42,32	-1505	1572
11	620	40,28	-1515	1562	11	940	44,40,28	-1502	1575
12	440	40	-1522	1555	12	760	44,40	-1509	1568
13	740	43,42	-1510	1567	13	420	42	-1522	1555
14	580	37	-1516	1561	14	900	44,37	-1504	1573
16	320	43	-1526	1551	15	320	44	-1526	1551
17	380	46	-1524	1553	17	700	44,46	-1512	1565
โนด 17	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่ายเชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]					
1	2020	48,35,15,14,6,1	-1461	1616					
2	1600	48,35,15,14,6	-1477	1600					
3	1820	48,35,15,14,7	-1468	1608					
4	1240	48,35,15,14	-1491	1586					
5	1540	45,40,30,22	-1479	1598					
6	1380	45,40,28,25	-1485	1592					
7	1100	48,35,15	-1496	1581					
8	920	48,35	-1503	1574					
9	1280	48,35,20	-1489	1588					
10	1120	45,40,30	-1495	1582					
11	1000	45,40,28	-1500	1577					
12	820	45,40	-1507	1570					
13	1120	45,43,42	-1495	1582					
14	380	48	-1524	1553					
15	380	45	-1524	1553					
16	700	45,43	-1512	1565					

(จ) โหนดที่ 15-17

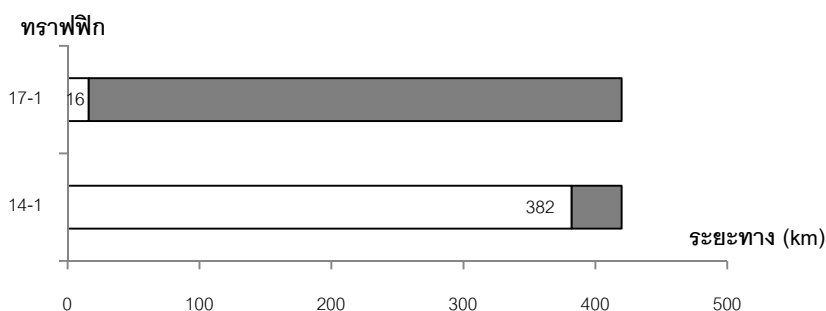
จากตารางที่ 5 แสดงถึงระยะขอบเขตทางซ้ายและขวาของการวาง OPC สำหรับกราฟฟิกรการสื่อสารทั้งหมดในโครงข่าย พบว่าจะมีบางกราฟฟิกที่มีช่วงการวาง OPC ยาวกว่าความยาวรวมของกราฟฟิก ซึ่งหมายความว่าเราสามารถกำหนดจุดวาง OPC ในตำแหน่งใดๆก็ได้บนกราฟฟิกนั้นๆ

ในขณะที่เดียวกันจะมีบางกราฟฟิกที่ไม่จำเป็นต้องใช้ OPC ในการจำกัดผลของดีสเพอร์ชันเนื่องจากระยะทางที่มากที่สุดที่จะต้องพิจารณาการวาง OPC คือ $800/|-0.5|=1,600$ km ดังนั้นระยะทางของกราฟฟิกใดๆที่น้อยกว่าค่าดังกล่าว จึงไม่ต้องพิจารณาผลของดีสเพอร์ชันสะสมและไม่จำเป็นต้องพิจารณาการวาง OPC

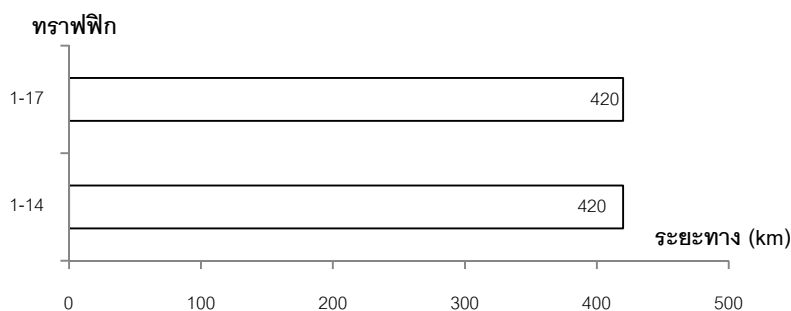
4. การกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นสำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย NARNet โดยใช้วิธีขั้นตอนที่ 6

จากขั้นตอนที่ผ่านมา เราจะได้ตำแหน่งขอบเขตด้านซ้ายและด้านขวาในการวาง OPC สำหรับทุกๆกราฟฟิกดังแสดงในตารางที่ 5 เราสามารถสรุปช่วงการวาง OPC สำหรับข่ายเชื่อมโยงได้ดังรูปที่ 6

ข่ายเชื่อมโยงที่ 1

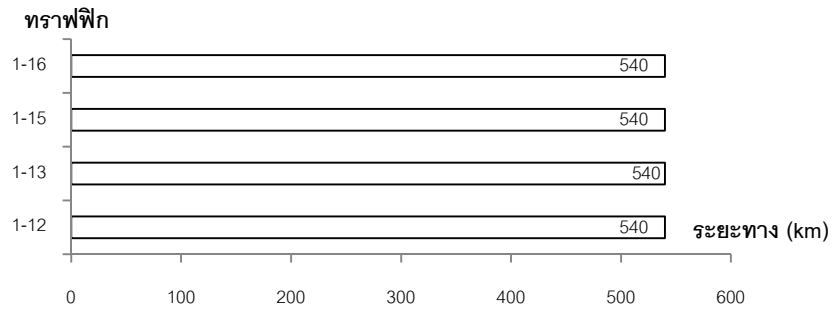


ข่ายเชื่อมโยงที่ 2

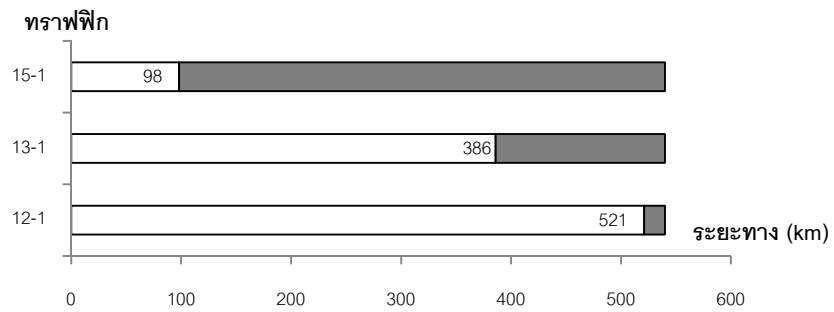


(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 1-2

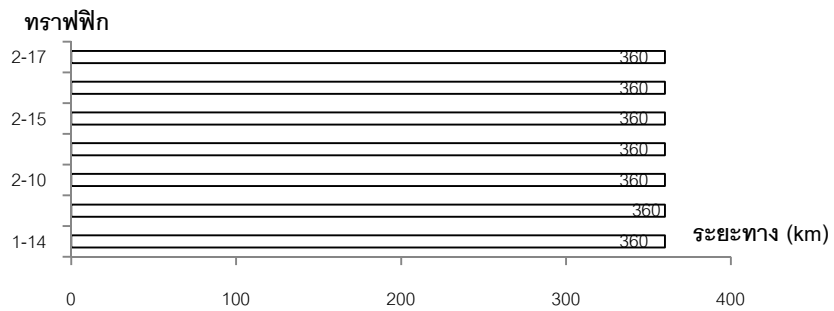
ข่ายเชื่อมโยงที่ 3



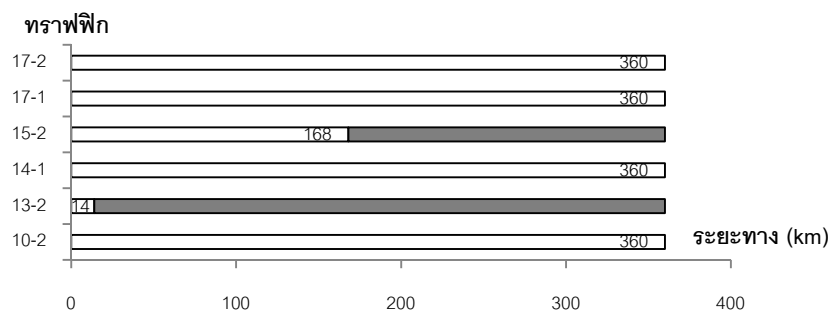
ข่ายเชื่อมโยงที่ 4



ข่ายเชื่อมโยงที่ 5

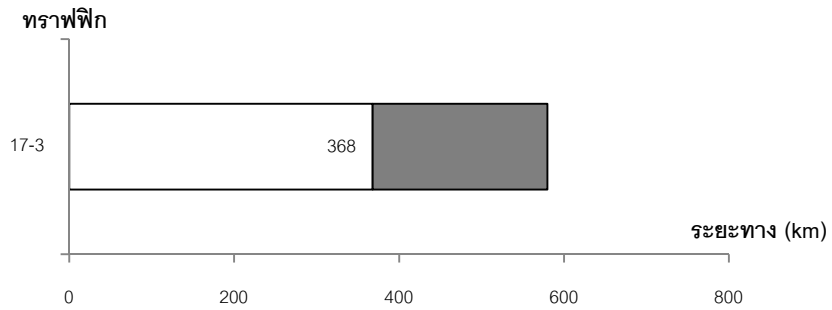


ข่ายเชื่อมโยงที่ 6

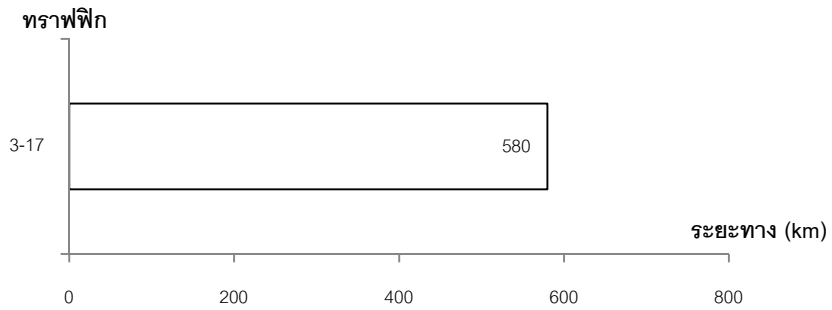


(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 3-6

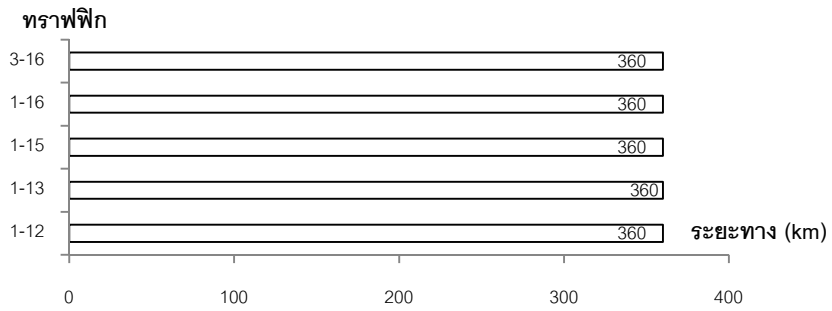
ข่ายเชื่อมโยงที่ 7



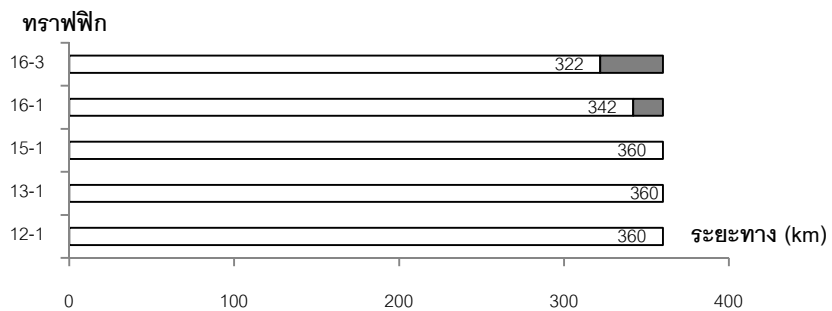
ข่ายเชื่อมโยงที่ 8



ข่ายเชื่อมโยงที่ 9

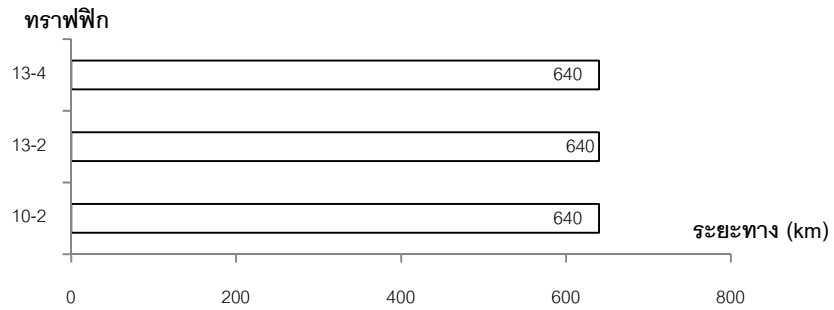


ข่ายเชื่อมโยงที่ 10

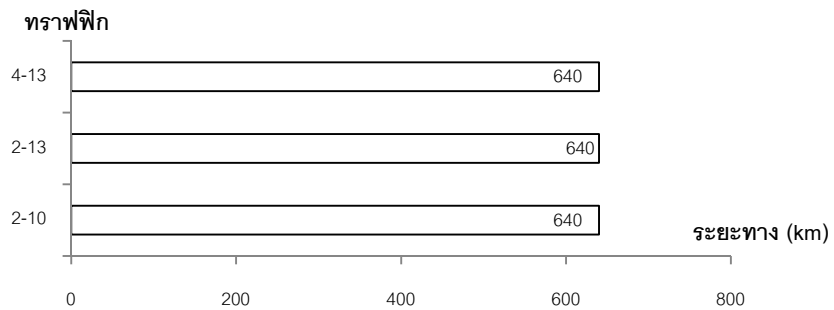


(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 7-10

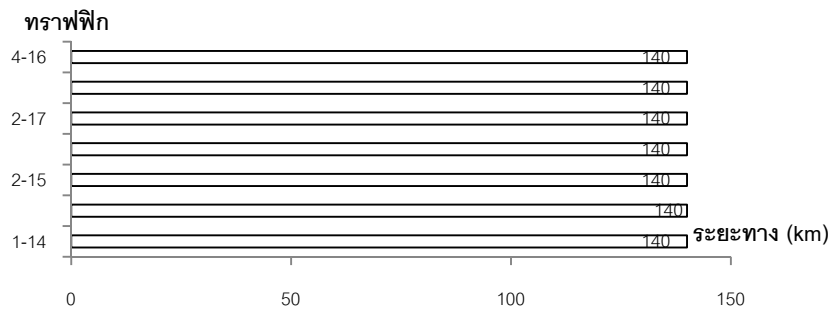
ข่ายเชื่อมโยงที่ 11



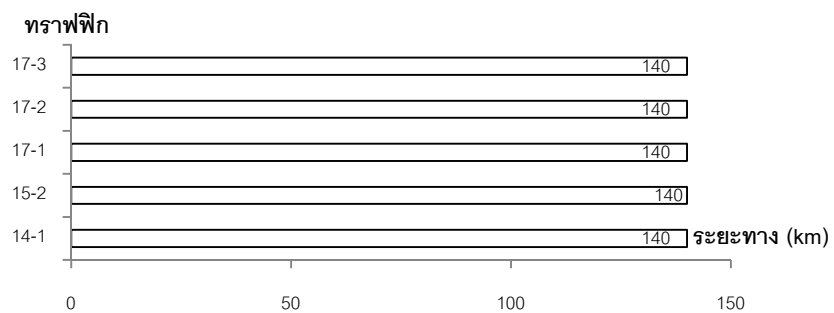
ข่ายเชื่อมโยงที่ 12



ข่ายเชื่อมโยงที่ 13

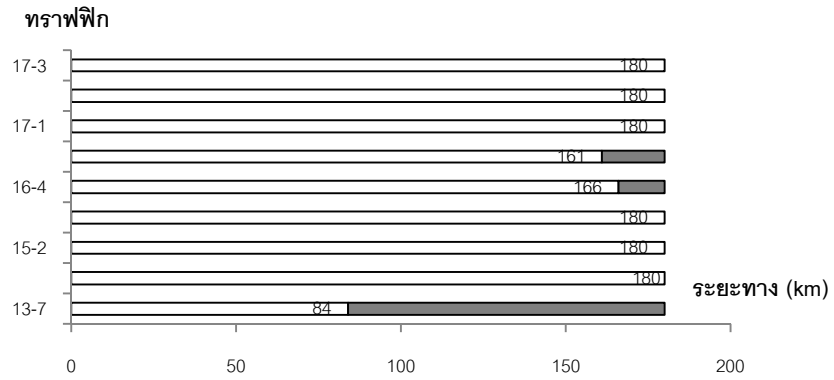


ข่ายเชื่อมโยงที่ 14

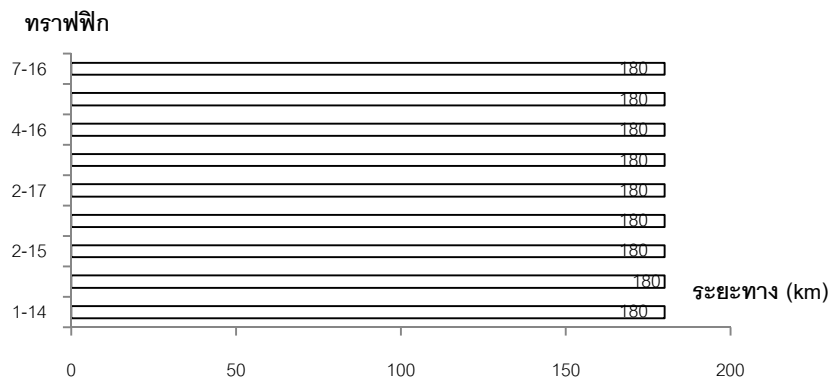


(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 11-14

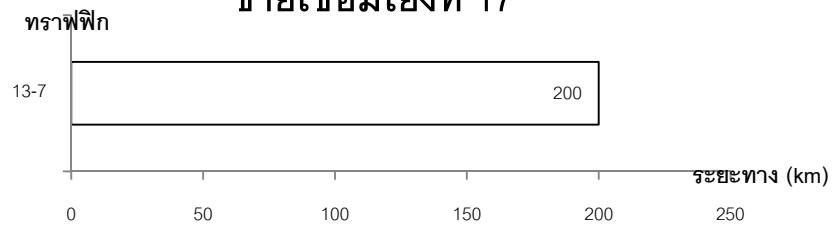
ข่ายเชื่อมโยงที่ 15



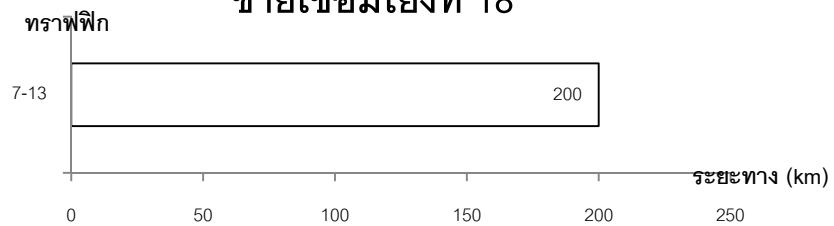
ข่ายเชื่อมโยงที่ 16



ข่ายเชื่อมโยงที่ 17

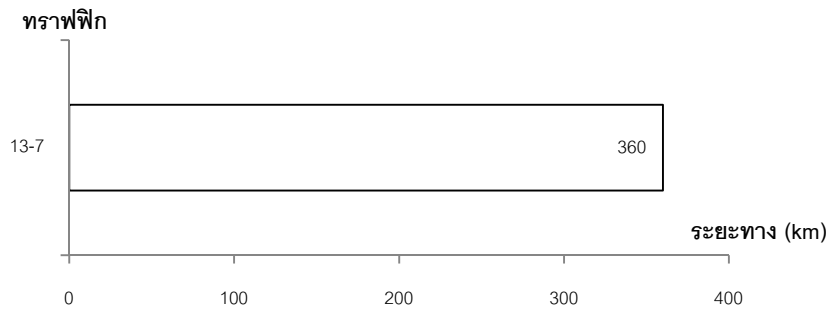


ข่ายเชื่อมโยงที่ 18

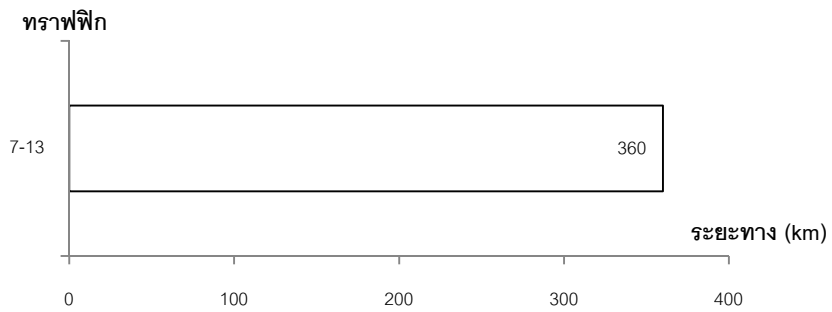


(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 15-18

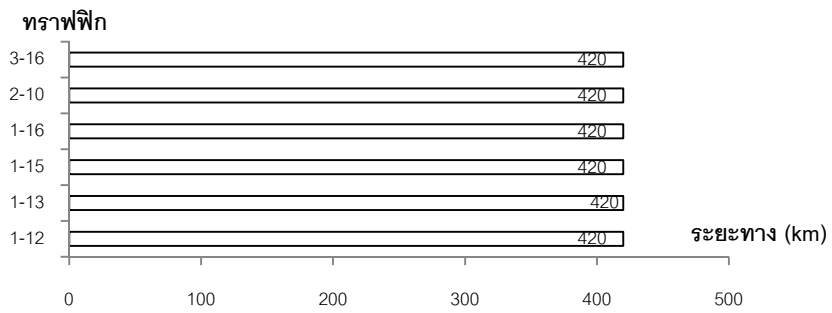
ข่ายเชื่อมโยงที่ 19



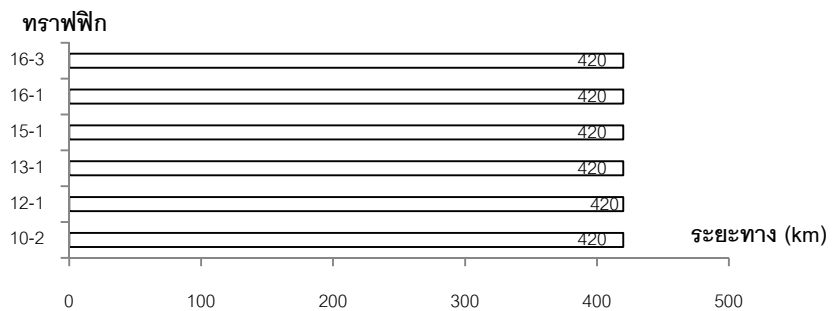
ข่ายเชื่อมโยงที่ 20



ข่ายเชื่อมโยงที่ 21

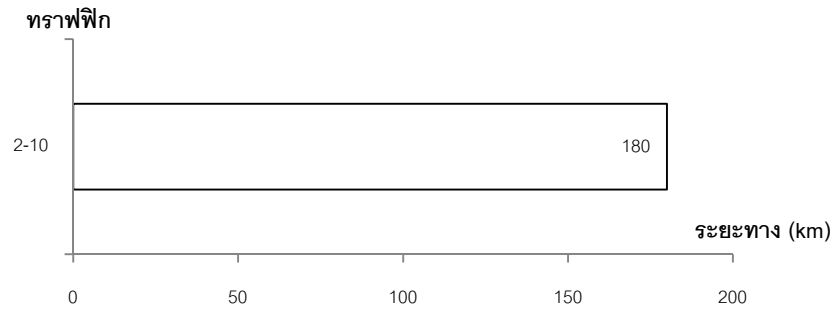


ข่ายเชื่อมโยงที่ 22

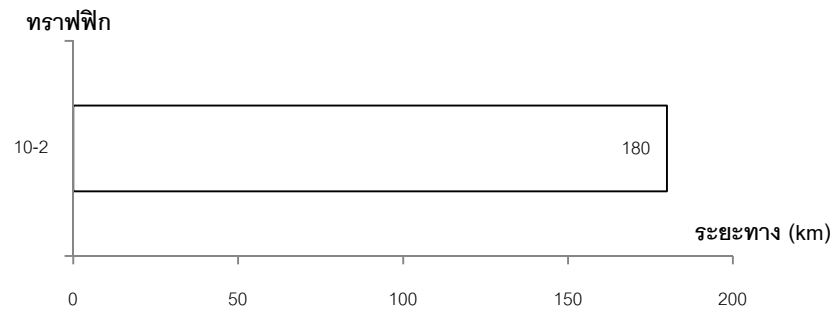


(ฉ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 19-22

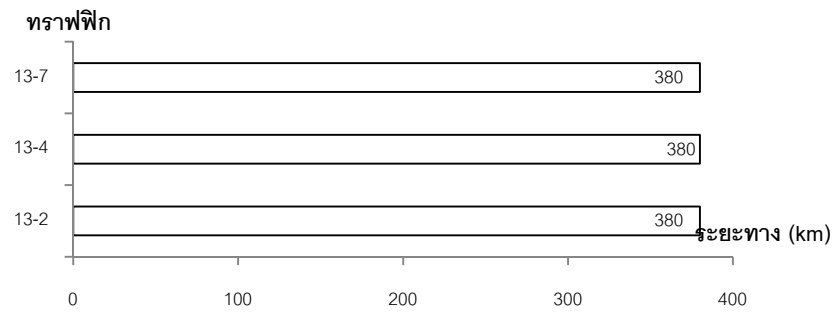
ข่ายเชื่อมโยงที่ 23



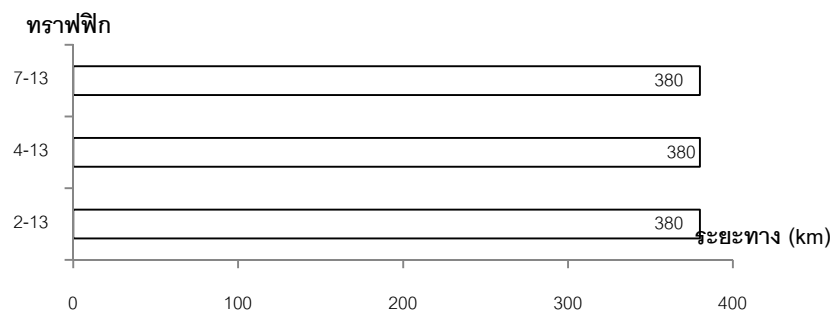
ข่ายเชื่อมโยงที่ 24



ข่ายเชื่อมโยงที่ 25

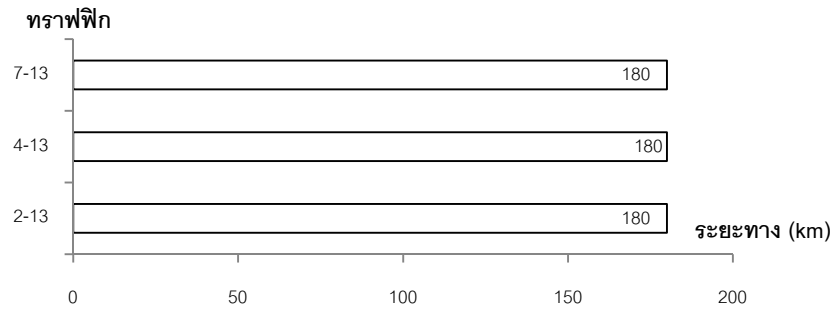


ข่ายเชื่อมโยงที่ 26

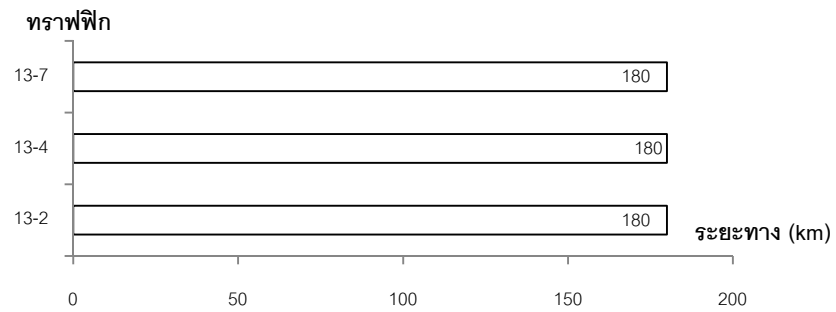


(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 23-26

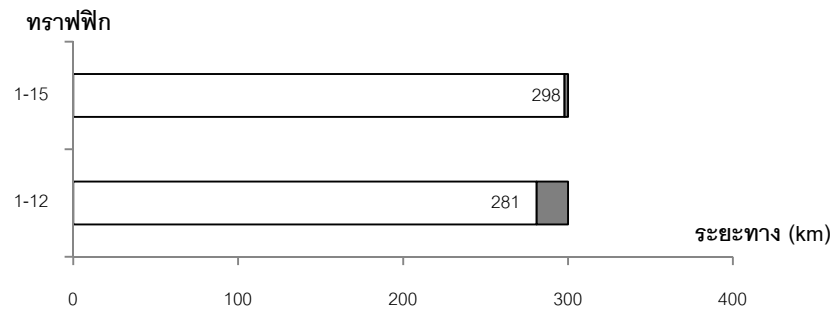
ข่ายเชื่อมโยงที่ 27



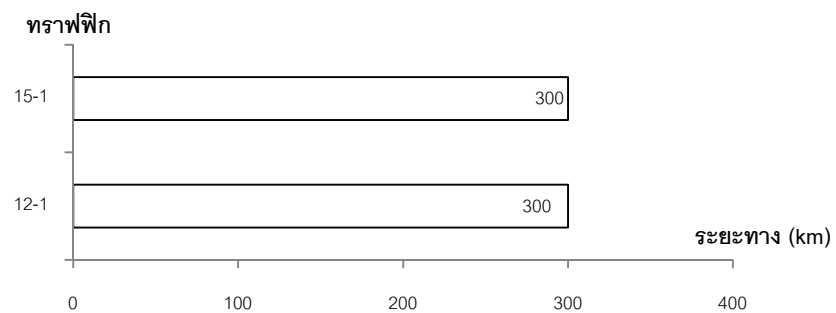
ข่ายเชื่อมโยงที่ 28



ข่ายเชื่อมโยงที่ 29

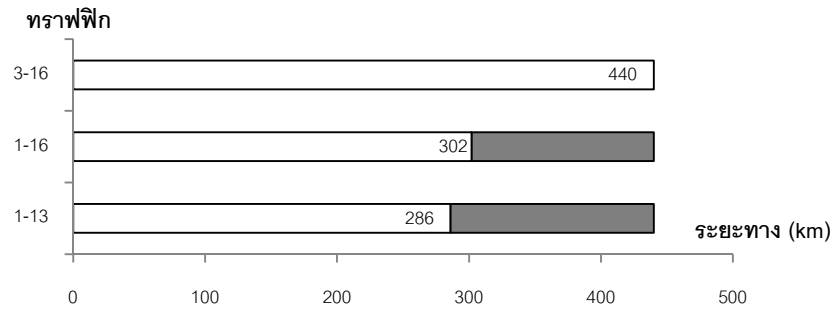


ข่ายเชื่อมโยงที่ 30

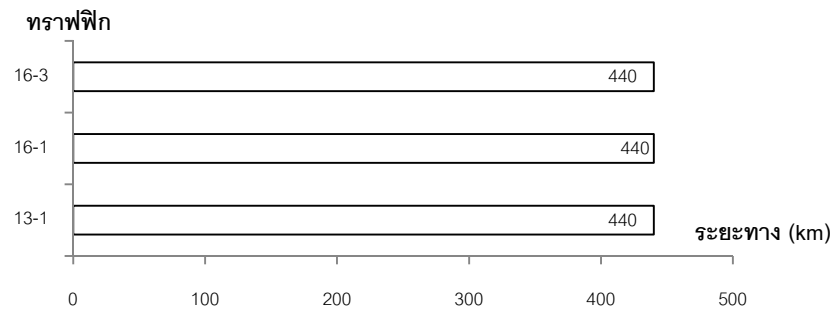


(ช) ข่ายเชื่อมโยงที่ 27-30

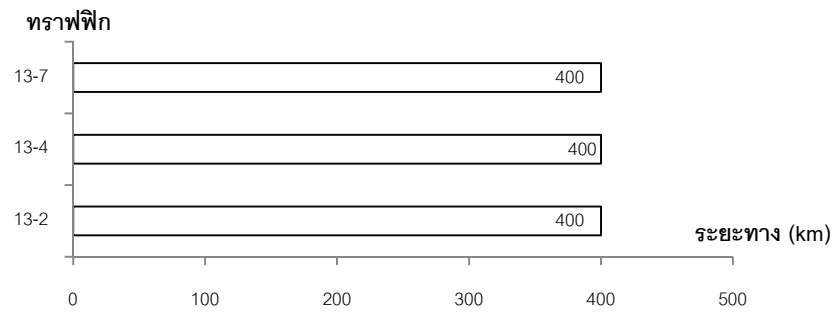
ข่ายเชื่อมโยงที่ 31



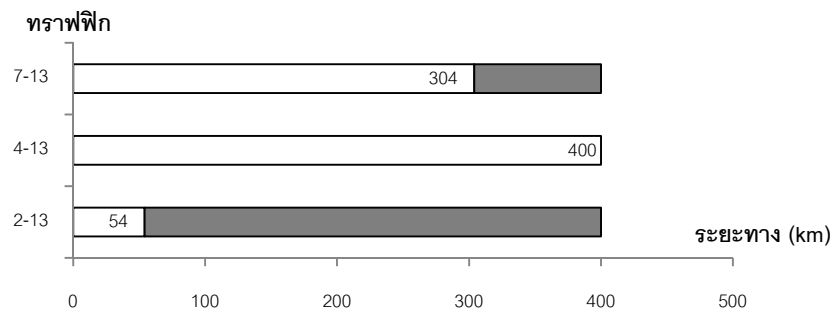
ข่ายเชื่อมโยงที่ 32



ข่ายเชื่อมโยงที่ 33

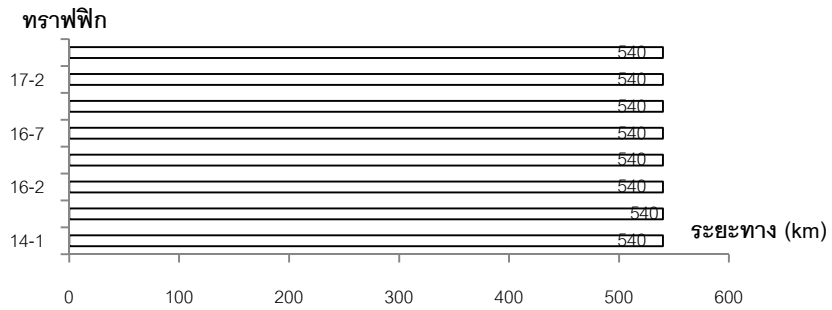


ข่ายเชื่อมโยงที่ 34

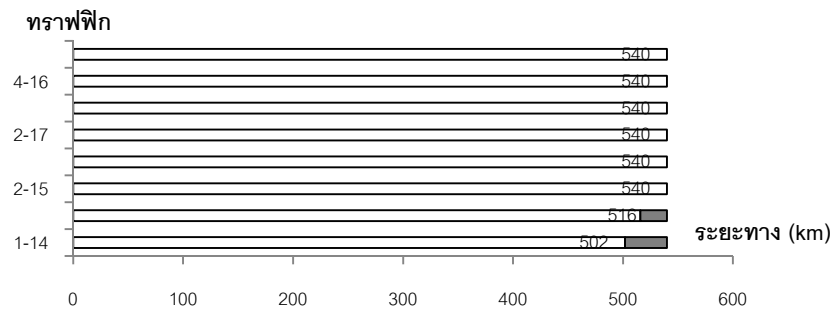


(ณ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 31-34

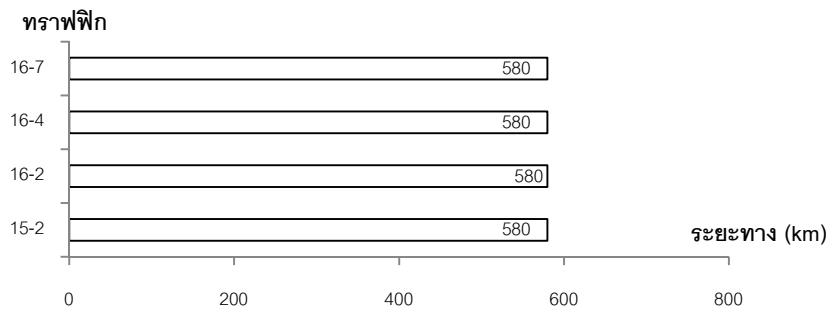
ข่ายเชื่อมโยงที่ 35



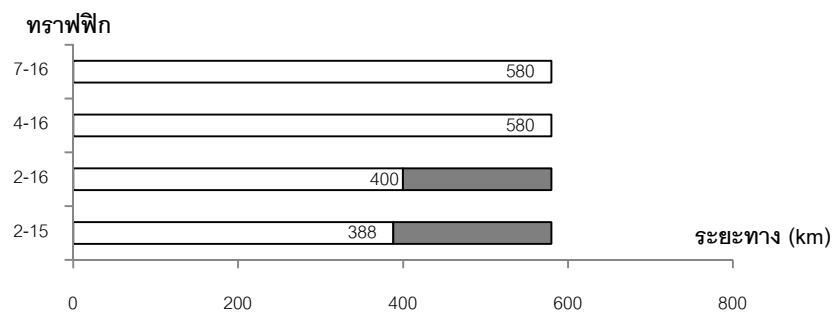
ข่ายเชื่อมโยงที่ 36



ข่ายเชื่อมโยงที่ 37

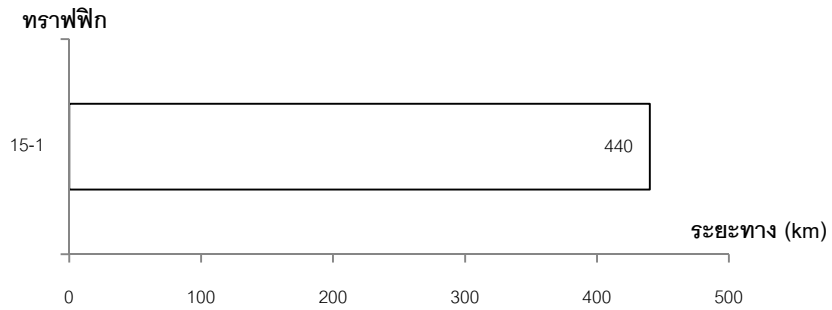


ข่ายเชื่อมโยงที่ 38

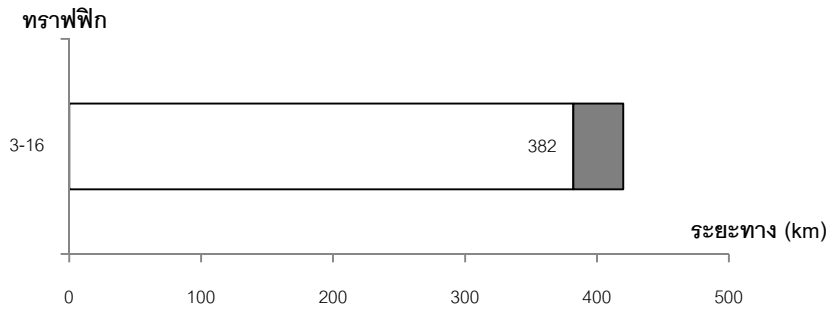


(ญ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 35-38

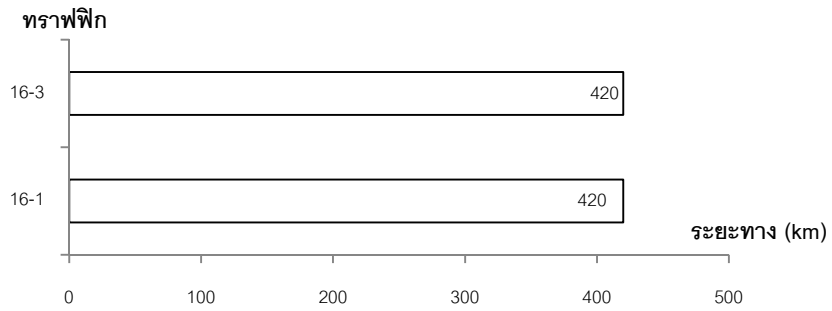
ข่ายเชื่อมโยงที่ 40



ข่ายเชื่อมโยงที่ 41

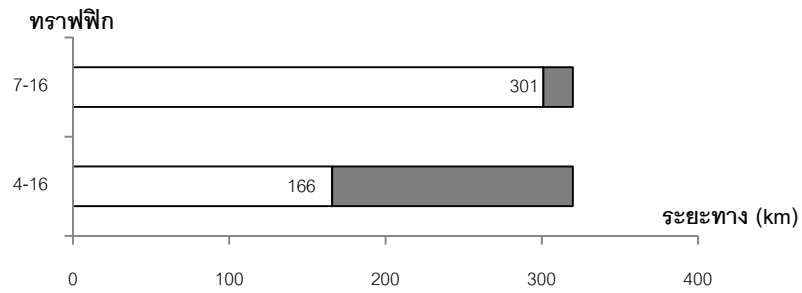


ข่ายเชื่อมโยงที่ 42

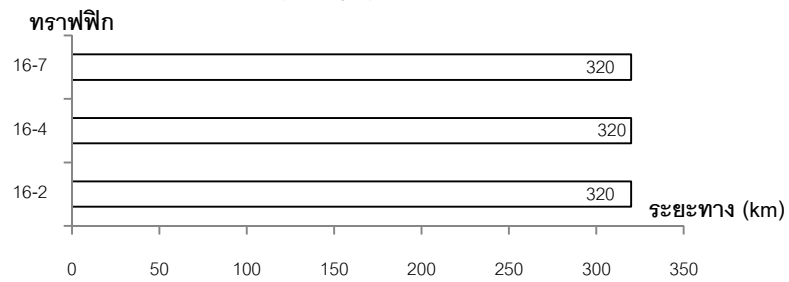


(ฎ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 40-42

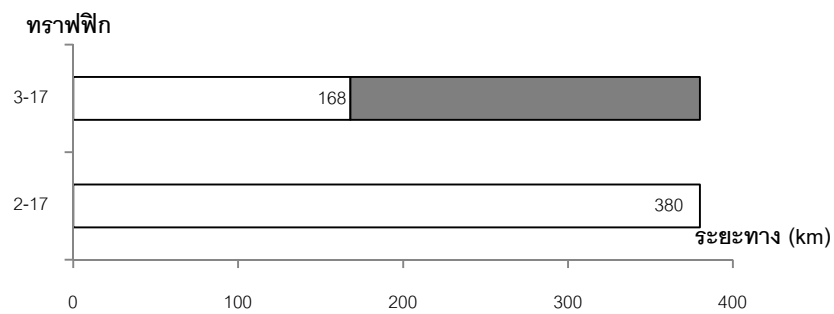
ข่ายเชื่อมโยงที่ 43



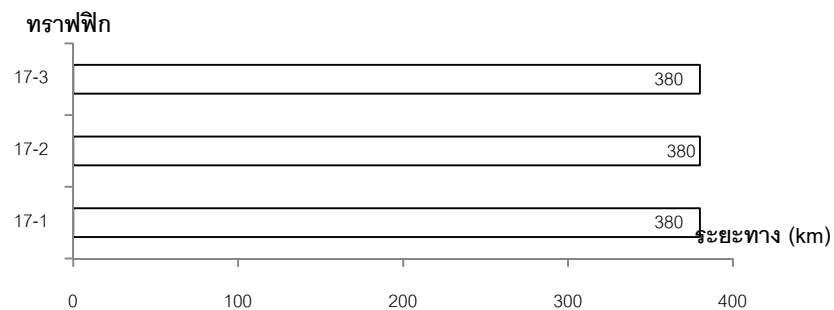
ข่ายเชื่อมโยงที่ 44



ข่ายเชื่อมโยงที่ 47



ข่ายเชื่อมโยงที่ 48



(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 43-44, 47-48

รูปที่ 6 ช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นสำหรับทุกข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย NARNet

รูปที่ 3 แสดงถึงช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนข่ายเชื่อมโยงที่แตกต่างกันในโครงข่าย NARNet ขั้นตอนต่อไปคือการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC โดยจะใช้การพิจารณาเดียวกันกับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น ดังนี้

1. จากรูปที่ 3 พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกในการวาง OPC มากที่สุด ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16 ซึ่งประกอบด้วยช่วงการวาง OPC สำหรับ 9 ทราฟฟิก (รูปที่ 3 จ) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 0-84 กิโลเมตร และ 0-180 กิโลเมตร ตามลำดับ
2. พิจารณาตัดข่ายเชื่อมโยงที่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกมากที่สุดตามข้อ 1 โดยใช้หลักการสำหรับโครงข่ายที่เกี่ยวข้องใดๆ ดังนี้

จำนวนทราฟฟิกที่เหลือ = จำนวนทราฟฟิกที่ต้องวาง OPC (แถบในรูปที่ 3) – จำนวน ทราฟฟิกที่เกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16

ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 1 และ 2 เหลือทราฟฟิก	$= 2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 เหลือทราฟฟิก	$= 7 - 5 = 2$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 6 เหลือทราฟฟิก	$= 6 - 4 = 2$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 7 และ 8 เหลือทราฟฟิก	$= 1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 13 เหลือทราฟฟิก	$= 7 - 5 = 2$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 14 เหลือทราฟฟิก	$= 6 - 4 = 2$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 17 และ 18 เหลือทราฟฟิก	$= 1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 19 และ 20 เหลือทราฟฟิก	$= 1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 เหลือทราฟฟิก	$= 1 - 0 = 1$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 25 และ 26 เหลือทราฟฟิก	$= 3 - 1 = 2$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 27 และ 28 เหลือทราฟฟิก	$= 3 - 1 = 2$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 33 และ 34 เหลือทราฟฟิก	$= 3 - 1 = 2$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 35 และ 36 เหลือทราฟฟิก	$= 8 - 8 = 0$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 37 และ 38 เหลือทราฟฟิก	$= 4 - 4 = 0$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 43 เหลือทราฟฟิก	$= 2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 44 เหลือทราฟฟิก	$= 3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก
ข่ายเชื่อมโยงที่ 47 เหลือทราฟฟิก	$= 2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 48 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

จำนวนทราฟฟิกที่มากที่สุดอันดับถัดไป คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 21 และ 22 ซึ่งประกอบด้วย ช่วงการวาง OPC สำหรับ 6 ทราฟฟิก (รูปที่ 3 ข) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสอง คือ 0-420 ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 3 เหลือทราฟฟิก = $4 - 4 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 4 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 และ 6 เหลือทราฟฟิก = $2 - 1 = 1$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 9 และ 10 เหลือทราฟฟิก = $5 - 5 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 11 และ 12 เหลือทราฟฟิก = $3 - 1 = 2$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 29 และ 30 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 31 และ 32 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 39 เหลือทราฟฟิก = $0 - 0 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 40 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 41 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 42 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 45 และ 46 เหลือทราฟฟิก = $0 - 0 = 0$ ทราฟฟิก

จำนวนทราฟฟิกที่มากที่สุดอันดับถัดไป คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 33 และ 34 ซึ่งประกอบด้วย ช่วงการวาง OPC สำหรับ 3 ทราฟฟิก (รูปที่ 3 ฉ) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสอง คือ 0-400 กิโลเมตร และ 0 - 54 กิโลเมตร ตามลำดับ ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 และ 6 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 11 และ 12 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 25 และ 26 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 27 และ 28 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

- เมื่อทำการพิจารณาตัดทราฟฟิกตามข้อ 2 จนเหลือข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกที่เหลือเท่ากันแล้วนั้น จะเห็นว่าไม่มีข่ายเชื่อมโยงใดเลยที่ยังไม่ถูกพิจารณา

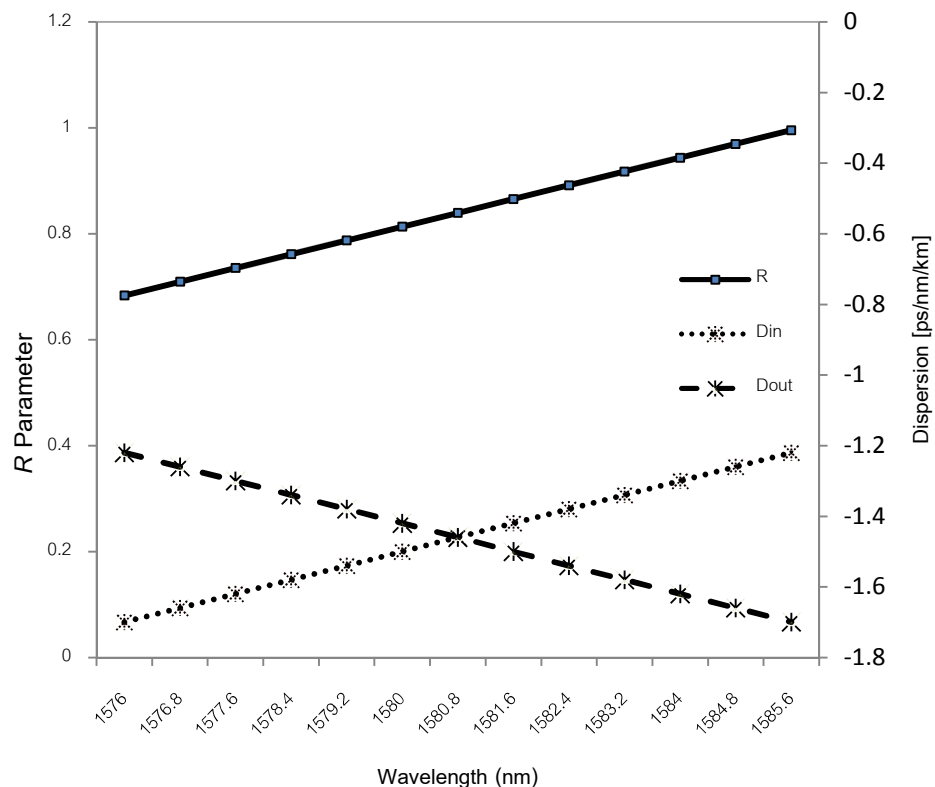
ระเบียบวิธีการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่าย OPEN

1. การคำนวณระยะทางระหว่างทุกคูโนดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ในโครงข่าย OPEN

สำหรับขั้นตอนการคำนวณระยะทางระหว่างทุกคูโนดโดยใช้ระเบียบวิธีหาเส้นทางที่สั้นที่สุด จะมีผลลัพธ์ที่ได้เหมือนกับระเบียบวิธีการวาง OPC แบบไม่เลื่อนความยาวคลื่นทุกประการ ดังแสดงในตารางที่ 3

2. การคำนวณช่วงดิสเพอร์ชันที่ใช้ในโครงข่ายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย OPEN

สำหรับหลักการคำนวณพารามิเตอร์ R นั้น จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพารามิเตอร์ R สำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนโครงข่ายที่ใช้ดิสเพอร์ชันค่าลบ ตามสมการที่ (3.21) และ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดิสเพอร์ชันกับความยาวคลื่นตามประเภทของเส้นใยแสงที่ใช้ในโครงข่ายเช่นกัน ตามสมการที่ (3.22) ตามลำดับ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า R , ดิสเพอร์ชันขาเข้า/ขาออกและความยาวคลื่นสำหรับ OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นในโครงข่าย OPEN

จากรูปที่ 7 พบว่าค่าที่พารามิเตอร์ $|R| \leq 1$ เป็นดังนี้

- ช่วงความยาวคลื่น 1576 nm ถึง 1585.6 nm

จากช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวนี้ คิดเป็นความยาวคลื่นจำนวน 13 ความยาวคลื่น แบ่งตามมาตรฐาน ITU-T 100 GHz Channel Spacing

โดยช่วงค่าดิสเพอร์ชันขาเข้า/ขาออกเป็นดังนี้

- ช่วงดิสเพอร์ชัน -1.22 ps/nm/km ถึง -1.7 ps/nm/km

โดยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้า -1.22 ps/nm/km และดิสเพอร์ชันขาออก -1.7 ps/nm/km ที่ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ จะนำไปใช้ในขั้นตอนการคำนวณช่วงในการวาง OPC สำหรับการสื่อสารระหว่างทุกๆ โหนดต่อไป

3. การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารทุกๆ โหนดในโครงข่าย OPEN

โดยอาศัยความสัมพันธ์ในการกำหนดขอบเขตด้านซ้ายและขวา จากสมการที่ (3.14) และ (3.15) ดังนี้

$$X_{OPC_L} = \frac{D_{out}(LP) + 800}{D_{in} + D_{out}} \quad (3.14)$$

$$X_{OPC_R} = \frac{D_{out}(LP) - 800}{D_{in} + D_{out}} \quad (3.15)$$

จากสมการข้างต้นนั้นเป็นระยะขอบเขตในการวาง OPC ทางด้านซ้ายและด้านขวาตามลำดับ เมื่อแทนค่าดิสเพอร์ชันขาเข้า (D_{in}) และขาออก (D_{out}) ในขั้นตอนที่ผ่านมา จะได้ช่วงการวาง OPC สำหรับการสื่อสารทุกๆ โหนดเป็นไปตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การคำนวณช่วงในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นสำหรับการสื่อสารทุกๆ โหนดในโครงข่าย OPEN

โนด 1	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โนด 2	ระยะทาง [km]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
2	123	2	-223	325	1	123	1	-223	325
3	155	4	-209	339	3	151	6	-211	337
4	278	4,7	-158	390	4	274	6,7	-159	388
5	456	4,7,14	-83	464	5	452	6,7,14	-85	463
6	478	4,15	-74	474	6	474	6,15	-76	472
7	344	4,9	-130	418	7	340	6,9	-132	416

8	374	4,9,11	-118	430	8	370	6,9,11	-119	429
9	578	4,9,11,18	-32	515	9	574	6,9,11,18	-34	514
10	713	4,15,24	24	572	10	709	6,15,24	22	570

(ก) โหนดที่ 1-2

โนด 3	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โนด 4	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
1	155	3	-209	339	1	278	8,3	-158	390
2	151	5	-211	337	2	274	8,5	-159	388
4	123	7	-223	325	3	123	8	-223	325
5	301	7,14	-148	400	5	178	14	-200	348
6	323	15	-139	409	6	446	8,15	-88	460
7	189	9	-195	353	7	312	8,9	-144	404
8	219	9,11	-182	365	8	342	8,9,11	-131	417
9	423	9,11,18	-97	451	9	546	8,9,11,18	-46	502
10	558	15,24	-41	507	10	681	8,15,24	11	559
โนด 5	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โนด 6	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
1	456	13,8,3	-83	464	1	478	16,3	-74	474
2	452	13,8,5	-85	463	2	474	16,5	-76	472
3	301	13,8	-148	400	3	323	16	-139	409
4	178	13	-200	348	4	446	16,7	-88	460
6	308	19	-145	403	5	308	20	-145	403
7	490	13,8,9	-69	479	7	341	21,17,12	-132	416
8	520	13,8,9,11	-57	491	8	311	21,17	-144	404
9	415	19,21	-101	447	9	107	21	-229	319
10	543	19,24	-47	501	10	235	24	-176	372
โนด 7	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โนด 8	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
1	344	10,3	-130	418	1	374	12,10,3	-118	430
2	340	10,5	-132	416	2	370	12,10,5	-119	429
3	189	10	-195	353	3	219	12,10	-182	365
4	312	10,7	-144	404	4	342	12,10,7	-131	417
5	490	10,7,14	-69	479	5	520	12,10,7,14	-57	491

6	341	11,18,22	-132	416	6	311	18,22	-144	404
8	30	11	-261	287	7	30	12	-261	287
9	234	11,18	-176	372	9	204	18	-189	359
10	420	11,18,26	-98	449	10	390	18,26	-111	437

(ข) โหนดที่ 3-8

โนด 9	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]	โนด 10	ระยะทาง [กิโลเมตร]	ข่าย เชื่อมโยง	OPC_L [กิโลเมตร]	OPC_R [กิโลเมตร]
1	578	17,12,10,3	-32	515	1	713	23,16,3	24	572
2	574	17,12,10,5	-34	514	2	709	23,16,5	22	570
3	423	17,12,10	-97	451	3	558	23,16	-41	507
4	546	17,12,10,7	-46	502	4	681	23,16,7	11	559
5	415	22,20	-101	447	5	543	23,20	-47	501
6	107	22	-229	319	6	235	23	-176	372
7	234	17,12	-176	372	7	420	25,17,12	-98	449
8	204	17	-189	359	8	390	25,17	-111	437
10	186	26	-196	352	9	186	25	-196	352

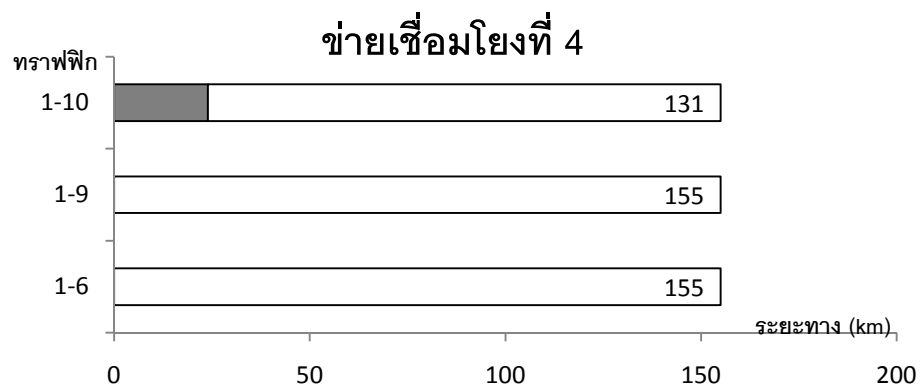
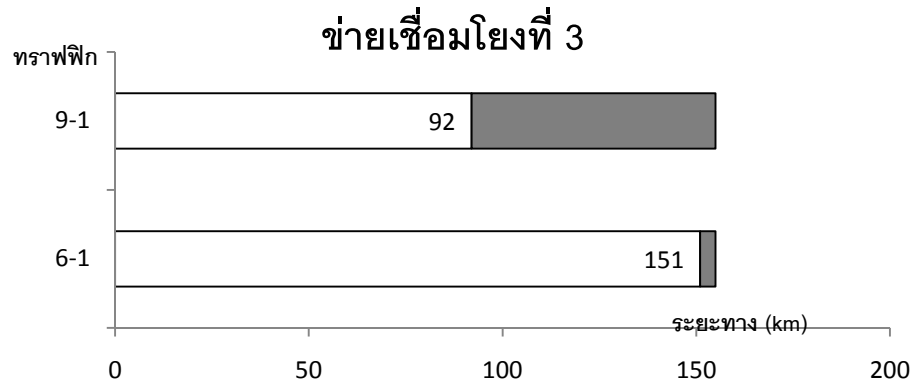
(ค) โหนดที่ 9-10

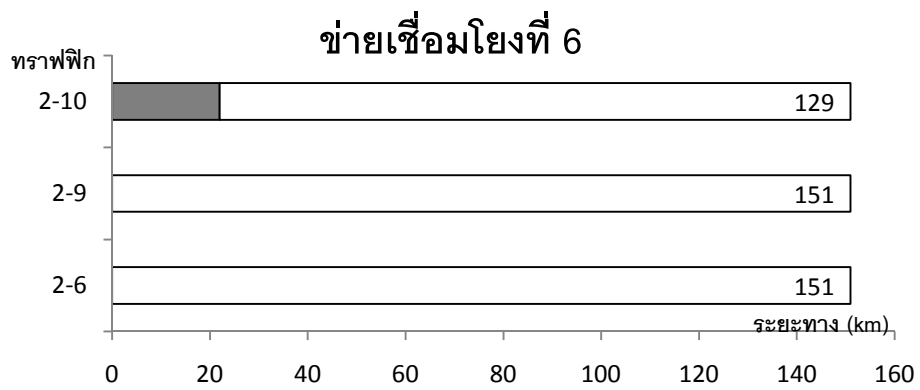
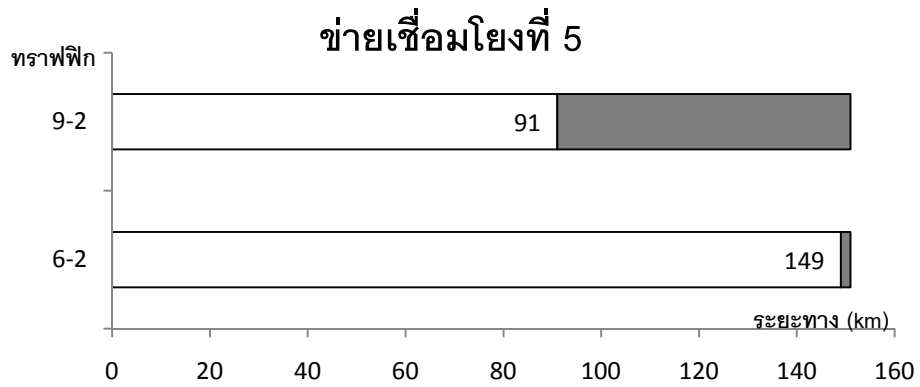
จากตารางที่ 6 แสดงถึงระยะขอบเขตทางข่ายและขวาของการวาง OPC สำหรับทราฟฟิกการสื่อสารทั้งหมดในโครงข่าย พบว่าจะมีบางทราฟฟิกที่มีช่วงการวาง OPC ยาวกว่าความยาวรวมของทราฟฟิก ซึ่งหมายความว่าเราสามารถกำหนดจุดวาง OPC ในตำแหน่งใดๆก็ได้บนทราฟฟิกนั้นๆ

ในขณะเดียวกันจะมีบางทราฟฟิกที่ไม่จำเป็นต้องใช้ OPC ในการจำกัดผลของดิสเพอร์ชันเนื่องจากระยะทางที่มากที่สุดที่จะต้องพิจารณาการวาง OPC คือ $800/|-1.7|=471\text{ km}$ ดังนั้นระยะทางของทราฟฟิกใดๆที่น้อยกว่าค่าดังกล่าว จึงไม่ต้องพิจารณาผลของดิสเพอร์ชันสะสมและไม่จำเป็นต้องพิจารณาการวาง OPC

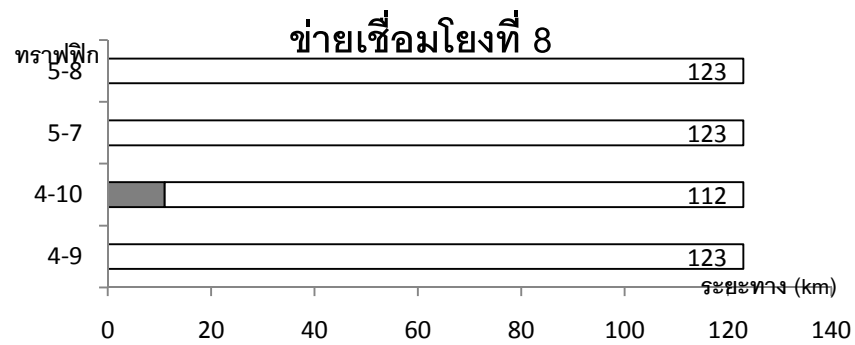
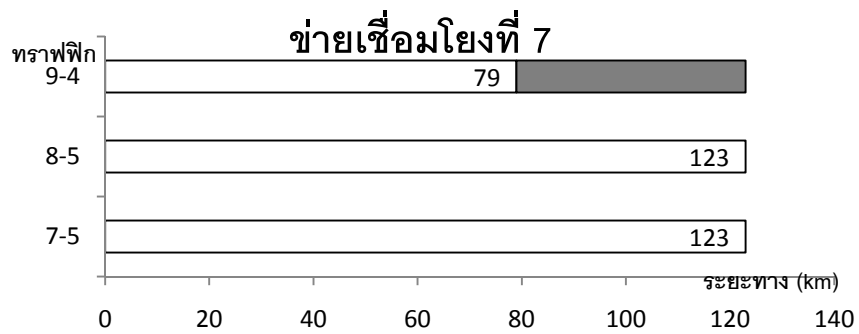
4. การกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นสำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย OPEN โดยใช้วิธีซ้อนทับ

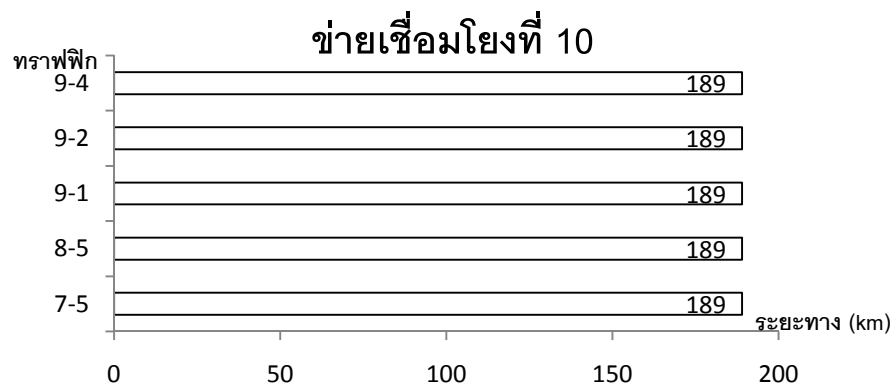
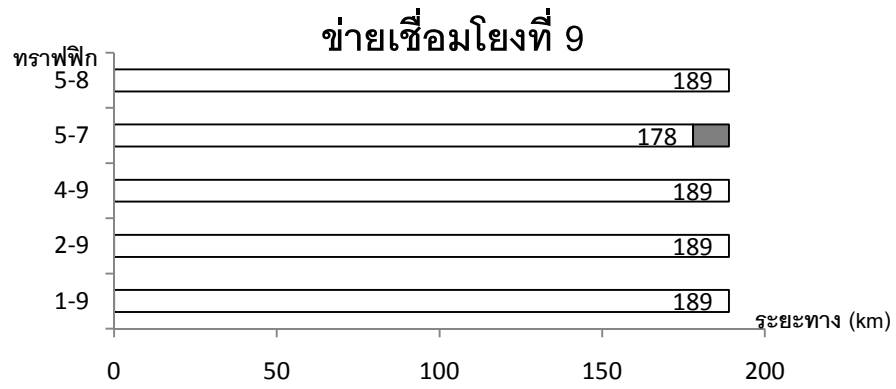
จากขั้นตอนที่ผ่านมา เราจะได้ตำแหน่งขอบเขตด้านซ้ายและด้านขวาในการวาง OPC สำหรับทุกๆ ทราฟฟิกดังแสดงในตารางที่ 6 เราสามารถสรุปช่วงการวาง OPC สำหรับข่ายเชื่อมโยงได้ดังรูปที่ 8



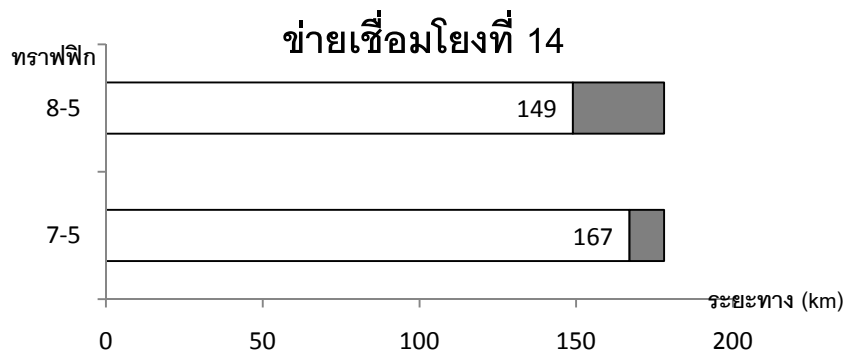
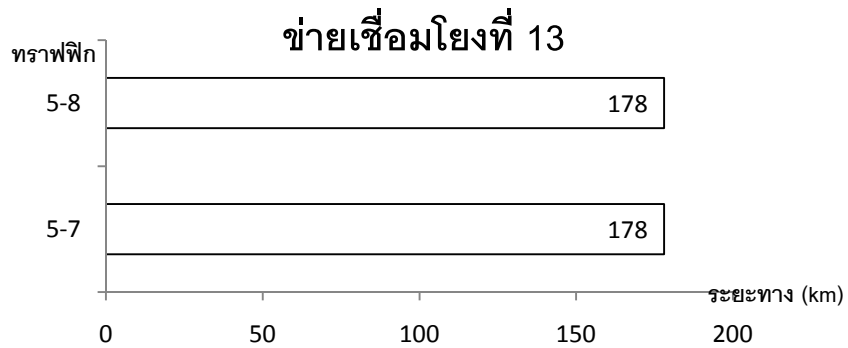
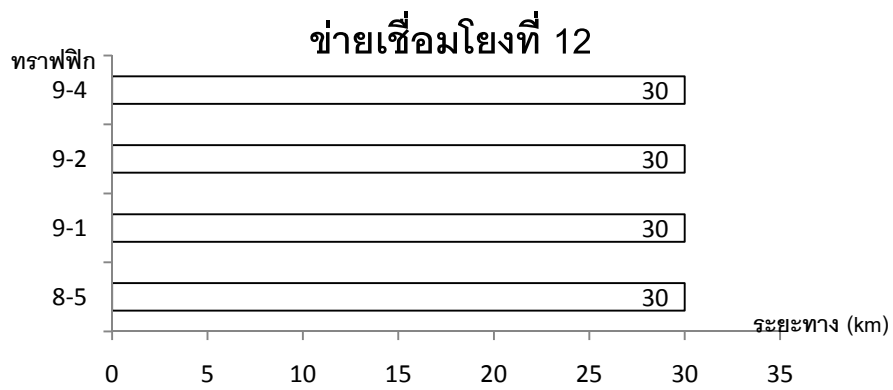
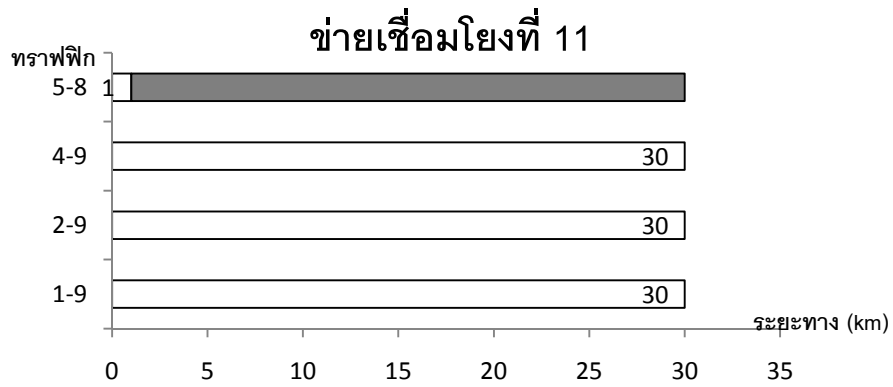


(ก) ข่ายเชื่อมโยงที่ 3-6

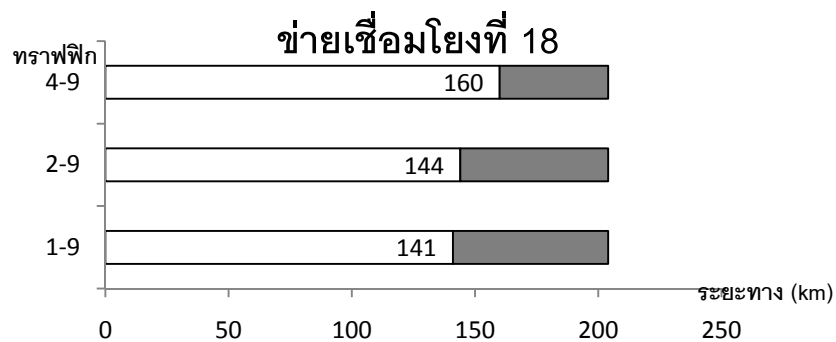
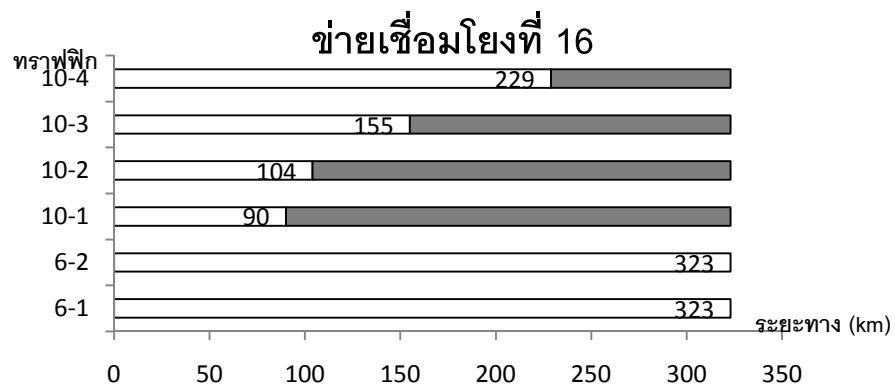




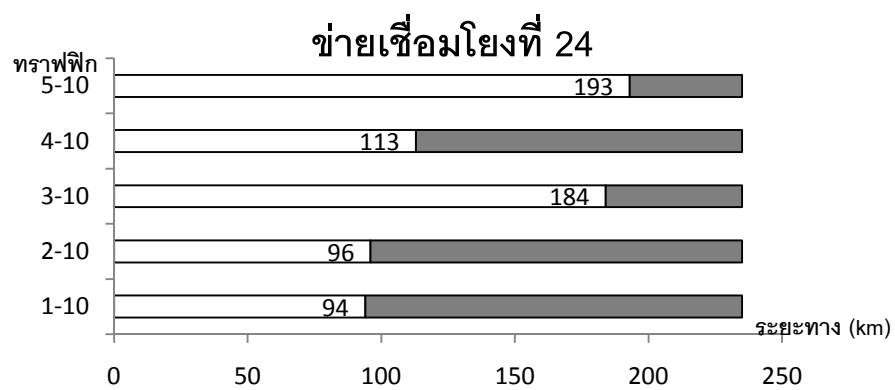
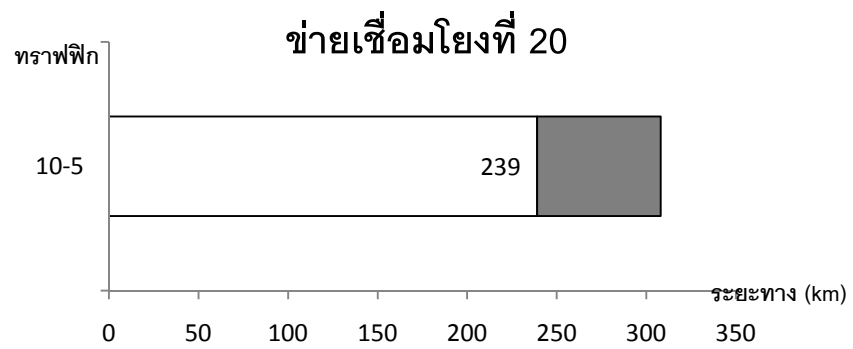
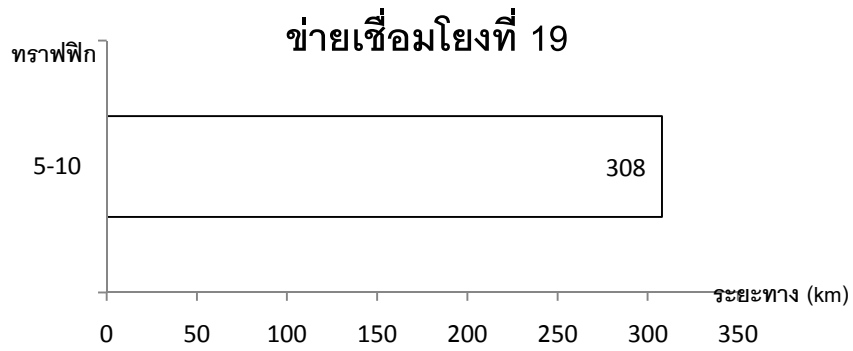
(ข) ข่ายเชื่อมโยงที่ 8-10



(ค) ข่ายเชื่อมโยงที่ 11-14



(ง) ข่ายเชื่อมโยงที่ 15-18



(จ) ข่ายเชื่อมโยงที่ 19-20, 23-24

รูปที่ 8 ช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นสำหรับทุกข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย OPEN

รูปที่ 8 แสดงถึงช่วงการวาง OPC ชนิดเลื่อนความยาวคลื่นบนข่ายเชื่อมโยงที่แตกต่างกันในโครงข่าย OPEN ขั้นตอนต่อไปคือการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง OPC โดยจะใช้การพิจารณาเดียวกันกับ OPC ชนิดไม่เลื่อนความยาวคลื่น ดังนี้

1. จากรูปที่ 8 พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่มีทราฟฟิกในการวาง OPC มากที่สุด ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16 ซึ่งประกอบด้วยช่วงการวาง OPC สำหรับ 6 ทราฟฟิก (รูปที่ 9) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 0-319 กิโลเมตร และ 0-90 กิโลเมตร ตามลำดับ
2. พิจารณาตัดข่ายเชื่อมโยงที่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกมากที่สุดตามข้อ 1 โดยใช้หลักการสำหรับโครงข่ายที่เกี่ยวข้องใดๆ ดังนี้

จำนวนทราฟฟิกที่เหลือ = จำนวนทราฟฟิกที่ต้องวาง OPC (แถบในรูปที่ 8) - จำนวน ทราฟฟิกที่เกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่ 15 และ 16

ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

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

ข่ายเชื่อมโยงที่ 4 เหลือทราฟฟิก = $3 - 2 = 1$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 เหลือทราฟฟิก = $2 - 1 = 1$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 6 เหลือทราฟฟิก = $3 - 2 = 1$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 7 เหลือทราฟฟิก = $3 - 0 = 3$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 8 เหลือทราฟฟิก = $4 - 1 = 3$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 23 และ 24 เหลือทราฟฟิก = $5 - 4 = 1$ ทราฟฟิก

จากนั้นจึงพิจารณาการตัดทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงที่มีความเกี่ยวข้องกับข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกมากที่สุดอันดับรองลงมา ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 9 และ 10 ซึ่งประกอบด้วยช่วงการวาง OPC สำหรับ 5 ทราฟฟิก (รูปที่ 10) ซึ่งจะได้ช่วงการวางสำหรับข่ายเชื่อมโยงทั้งสองคือ 0-178 กิโลเมตร และ 0-189 กิโลเมตร ตามลำดับ ในที่นี้จะมีข่ายเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องคือ

ข่ายเชื่อมโยงที่ 3 และ 4 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 5 และ 6 เหลือทราฟฟิก = $1 - 1 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 7 และ 8 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 11 และ 12 เหลือทราฟฟิก = $4 - 4 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 13 และ 14 เหลือทราฟฟิก = $2 - 2 = 0$ ทราฟฟิก

ข่ายเชื่อมโยงที่ 17 และ 18 เหลือทราฟฟิก = $3 - 3 = 0$ ทราฟฟิก

3. เมื่อทำการพิจารณาตัดทราฟฟิกตามข้อ 2 จนเหลือข่ายเชื่อมโยงที่มีจำนวนทราฟฟิกที่เหลือเท่ากันแล้วนั้น ขั้นตอนต่อมาคือ พิจารณาผลของดีสเพอร์ชันสะสมบนข่ายเชื่อมโยงที่ยังเหลืออยู่ ในที่นี้คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 23, 24 จึงจะทำให้ดีสเพอร์ชันสะสมไม่เกินขีดจำกัดในทุกๆทราฟฟิก

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายदनุศ แดงประดิษฐ์ เกิดวันที่ 16 เมษายน พ.ศ. 2531 ที่อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

เนื่องจากส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการทั้งหมด 1 ฉบับ โดยเป็นบทความวิชาการในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34 (EECON 34) จัดขึ้นที่ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา ชลบุรี ประเทศไทย ในวันที่ 30 พฤศจิกายน - 02 ธันวาคม 2554 ในชื่อบทความเรื่อง “อัลกอริทึมสำหรับการประยุกต์ใช้เครื่องสังยุคเฟสแสงในโครงข่ายเส้นใยแสงแบบเมช Algorithm For Applying Optical Phase Conjugator In Mesh Optical Fiber” โดยบทความฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ในเอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34 ปี พ.ศ. 2554 ฉบับที่ 2 หน้า 1,117-1,120