

การศึกษาการจัดเส้นทางโครงข่ายหลักโดยการคำนวณพารามิเตอร์เชื่อมโยง

STUDY ON ROUTING OF BACKBONE NETWORK USING  
LINK COST PARAMETERS

อมรรัตน์ มหาพรหม  
AMORN RAT MAHAPROM

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

การศึกษาการจัดเส้นทางโครงข่ายหลักโดยการคำนวณพารามิเตอร์เชื่อมโยง

STUDY ON ROUTING OF BACKBONE NETWORK USING  
LINK COST PARAMETERS

อมรรัตน์ มหาพรหม

AMORNRAT MAHAPROM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**STUDY ON ROUTING OF BACKBONE NETWORK USING  
LINK COST PARAMETERS**

**AMORNRAT MAHAPROM**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการจัดเส้นทางโครงข่ายหลักโดยการคำนวณ  
พารามิเตอร์เชื่อมโยง

ชื่อนักศึกษา

นางสาวอมรรัตน์ มหาพรหม

รหัสประจำตัว

45061105

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมสารสนเทศ

พ.ศ.

2550

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ. นภพินธุ์ อนันตรศิริชัย

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวิธีการออกแบบโครงข่ายระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นผ่านใยแก้วนำแสง ตามความเหมาะสมทางด้านตรรกะของโครงข่ายหลักของบริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) ที่ใช้ในการเชื่อมโยงโครงข่ายท้องถิ่น ด้วยการพิจารณาใช้อัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด มาศึกษาเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมของดิกซ์สตรา โดยทำการวิเคราะห์ด้วยการจำลองโครงข่ายหลัก ศึกษาค้นหาความเหมาะสมของโครงข่ายโดยพิจารณาค่าเชื่อมโยงต่ำสุด เส้นทางที่สั้นที่สุด และทั้งการคำนวณหาเส้นทางใหม่ในกรณีเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับโครงข่ายเพื่อให้ได้เส้นทางที่สั้นที่สุด และเป็นเส้นทางที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง ทั้งการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองบนโครงข่ายในเชิงตรรกะ และในเชิงกายภาพของการกำหนดใช้งานความยาวคลื่นสำหรับองค์ประกอบที่นำมาเป็นข้อมูลนั้น ใช้โครงข่ายออปติคัลไฟเบอร์ที่มีอยู่เดิมของบริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) และนำข้อมูลเกี่ยวกับค่าทราฟฟิกที่ใช้ในโครงข่ายของทีโอทีมาประกอบการพิจารณาร่วมกัน ผลที่ได้จากการจำลองจะได้วิธีการเชื่อมโยงโครงข่ายระบบ WDM ที่จำนวนความยาวคลื่นสูงสุด 32 ความยาวคลื่นตามมาตรฐาน ITU-T G.692 ที่เหมาะสมกับแต่ละอัลกอริทึม

<b>Thesis Title</b>	Study on Routing of Backbone Network using Link Cost Parameters
<b>Student</b>	Ms. Amornrat Mahaprom
<b>Student ID.</b>	45061105
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Information Engineering
<b>Year</b>	2007
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Noppin Anantrasirichai

### **ABSTRACT**

This research studies the methodology of WDM networks logical design, by using TOT backbone network for connecting between sub-networks. Bellman-Ford and Dijkstra's Algorithms are used for computing and simulation for optimal design of WDM network. There are three main parameters are considered in this study including minimum cost, shortest-path and re-computing of minimum cost in case of link failure or unavailable for finds out the final shortest path. Furthermore, we have compared the results from Bellman-Ford and Dijkstra's algorithm in logical and physical computation weighted on wavelength assignment in each section. Existing backbone optical network and traffic require of TOT are used as raw data for this study. Simulation results can be obtained the shortest path routing in 32 channels WDM system.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำให้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความปรึกษาของ รศ.นภพินท์ อนันตรศิริชัย อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ตลอดจนข้อคิดต่างๆ อันก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการศึกษา ค้นคว้า และเป็นแนวทางในการจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณ บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) ที่ให้โอกาสด้านการศึกษาและข้อมูลในการจัดทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนการศึกษา

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาและทุนสนับสนุนการทำวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

อมรรัตน์ มหาพรหม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานระบบการมัลติเพิล็กซ์ทางความยาวคลื่น .....	4
2.1 หลักการเบื้องต้นของระบบการมัลติเพิล็กซ์ทางความยาวคลื่น .....	4
2.2 ชนิดของการมัลติเพิล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น.....	7
2.2.1 เทคนิคการเลือกความยาวคลื่น .....	7
2.2.2 เทคนิคแบบการกระจายและการเลือก .....	8
2.3 การมัลติเพิล็กซ์ .....	9
2.3.1 อุปกรณ์กระจายมุม.....	9
2.3.2 อุปกรณ์กรองแสง.....	11
2.4 แหล่งกำเนิดแสง .....	13
2.4.1 LED (Light Emitting Diode) .....	13
2.4.2 Fabry-perot Diode Laser:.....	14
2.4.3 DFB Diode laser: .....	15
2.4.4 Frequency-Locked Laser: .....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 โครงข่ายแบบหลายจุด หลายความยาวคลื่น.....	15
2.5.1 การส่งสัญญาณระบบบรอดแบนด์.....	15
2.5.2 โครงข่ายสื่อสัญญาณแบบ Wavelength-Routed .....	15
2.5.2.1 โครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสตาร์ .....	16
2.5.2.2 โครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบลูกโซ่.....	16
2.5.2.3 โครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบวงแหวน .....	19
2.6 โอเอสเอ็นอาร์ในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น .....	21
2.6.1 การออกแบบ Point-to-Point Link โดยใช้ค่า Q-Factor และ OSNR.....	22
2.6.2 การคำนวณ Q-factor จาก โอเอสเอ็นอาร์ .....	23
2.6.3 การคำนวณโอเอสเอ็นอาร์สำหรับการเชื่อมโยงจุดต่อจุด .....	24
2.6.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับ Margin.....	26
บทที่ 3 โครงสร้างของโครงข่ายหลัก .....	29
3.1 โครงสร้างของโครงข่ายหลัก .....	30
3.2 อุปกรณ์การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น.....	33
3.2.1 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ (MUX) และดีมัลติเพล็กซ์ (DMUX).....	34
3.2.2 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความยาวคลื่น.....	34
3.2.3 Optical amplifier, In-line/ Pre-amplifier/ Booster .....	36
3.3 วิธีการกำหนดเส้นทางในโครงข่าย .....	39
3.3.1 อัลกอริทึมสำหรับเลือกทางเดินข้อมูล.....	40
3.3.2 หลักการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด.....	41
3.4 การกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุด.....	42
3.4.1 อัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด .....	43
3.4.2 อัลกอริทึมของดิจิกส์ตรา.....	45
บทที่ 4 การออกแบบและวิเคราะห์ผล .....	48
4.1 การคำนวณหาค่าเชื่อมโยง (Link cost) ของโครงข่าย .....	48
4.1.1 กรณีให้ค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเท่ากัน .....	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 กรณีให้ค่าถ่วงน้ำหนักมากที่จำนวนความยาวคลื่น .....	52
4.1.3 กรณีให้ค่าถ่วงน้ำหนักมากที่ระยะทางระหว่างโหนด .....	53
4.1.4 กรณีให้ค่าถ่วงน้ำหนักมากที่ค่าการสูญเสีย .....	54
4.2 การคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest path) .....	56
4.2.1 การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยใช้อัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด .....	56
4.2.2 การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยใช้อัลกอริทึมของดิกซ์สตรา .....	63
4.2.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดและ อัลกอริทึมของดิกซ์สตรา.....	66
4.2.4 การจำลองหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยพิจารณาค่ากราฟิก.....	67
4.3 การคำนวณหาเส้นทางใหม่ในกรณีเกิดเหตุขัดข้องกับโครงข่าย.....	70
4.3.1 การหาเส้นทางใหม่โดยใช้อัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด .....	71
4.3.1.1 กรณีมีเหตุขัดข้องในโครงข่าย 1 จุด .....	71
4.3.1.2 กรณีมีเหตุขัดข้องในโครงข่ายมากกว่า 1 จุด .....	73
4.3.2 การหาเส้นทางใหม่โดยใช้อัลกอริทึมของดิกซ์สตรา.....	74
4.3.2.1 กรณีมีเหตุขัดข้องในโครงข่าย 1 จุด .....	75
4.3.2.2 กรณีมีเหตุขัดข้องในโครงข่ายมากกว่า 1 จุด .....	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	79
5.1 สรุปผล.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	80
เอกสารอ้างอิง .....	81
ภาคผนวก .....	83
ประวัติผู้เขียน .....	91

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณสำหรับเทคนิคการกรองแบบต่างๆ .....	12
2.2 ความกว้างของสเปกตรัมสำหรับแหล่งกำเนิดต่างๆ .....	14
2.3 จำนวนต่ำสุดของความยาวคลื่นที่ต้องการในการเชื่อมโยงกับช่องสัญญาณ N ช่องสัญญาณ ในโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น.....	24
2.4 Insertion loss และ loss อื่นๆสำหรับการใช้งานที่ 1550 nm.....	27
2.5 ข้อกำหนดเกี่ยวกับ margin.....	28
3.1 รายละเอียดการเชื่อมโยงของแต่ละส่วน (Section).....	31
3.2 Channel and wavelength spacing.....	35
4.1 ตารางการหาค่าเชื่อมโยง โดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากัน.....	51
4.2 ตารางการหาค่าเชื่อมโยง โดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่จำนวนความยาวคลื่น.....	52
4.3 ตารางการหาค่าเชื่อมโยง โดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่ระยะระหว่างโหนด .....	53
4.4 ตารางการหาค่าเชื่อมโยง โดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่ค่าการสูญเสีย .....	54
4.5 ตารางแสดงผลพัทธ์ของเส้นทางที่สั้นที่สุดของโหนดปลายทางที่ 14.....	61
4.6 ตารางแสดงผลพัทธ์ของเส้นทางที่สั้นที่สุดของโหนดปลายทางที่ 5.....	62
4.7 ตารางแสดงค่าเชื่อมโยง และช่วงที่ผ่านของเส้นทางที่สั้นที่สุดจากอัลกอริทึมของ เบลแมนฟอร์ด .....	63
4.8 ตารางแสดงค่าเชื่อมโยง และช่วงที่ผ่านของเส้นทางที่สั้นที่สุดจากอัลกอริทึมของ ดิจิกส์ตรา.....	66
4.9 ตารางเปรียบเทียบค่าเชื่อมโยง และช่วงที่ผ่านของเส้นทางที่สั้นที่สุดจากอัลกอริทึมของ เบลแมนฟอร์ดและดิจิกส์ตรา.....	67
4.10 ตารางแสดงค่าปริมาณกราฟฟิกของวงจรชุมสายตามเส้นทางโครงข่ายหลัก .....	67
4.11 ตารางแสดงผลของเส้นทางที่สั้นที่สุดของโหนดปลายทางที่ 14 พิจารณากราฟฟิก.....	69

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น .....	4
2.2 ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น แบบ Bidirectional .....	6
2.3 ย่านการใช้งานสเปกตรัมในเส้นใยแก้วนำแสงแบบชนิด โหมดเดี่ยว .....	7
2.4 (ก) Wavelength routed multiplexing. (ข) Broadcast and select multiplexing .....	8
2.5 การแยกความยาวคลื่นที่ใช้การกระจายของมุมและเลนส์ .....	10
2.6 เรขาคณิตสำหรับการสะท้อนของ grating ที่ด้านรับของ การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น	11
2.7 (ก) Distributed-feedback (DFB) amplifier, (ข) Distributed reflector (DFR).....	13
2.8 (ก) broadcast-and-select, broadband-transmission, star network (ข) การส่งสัญญาณ Broadband แบบ tree network.....	17
2.9 ตัวอย่างของโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสตาร์ที่ภาครับสามารถตรวจจับการรับ สัญญาณได้โดยตรงด้วย spectral filter.....	18
2.10 โครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบลูกโซ่ความยาวคลื่นถูกกำหนดเส้นทาง สัญญาณ add/ drop ไว้ที่ทุก ๆ โหนด ที่ โหนด 1 และ โหนด 5 จะมีการส่งสัญญาณที่เต็มความจุและ มีความความสามารถที่จะทำงานได้ในการส่งสัญญาณ ในทิศทางเดียว .....	18
2.11 เส้นทางของความยาวคลื่นที่ทำงานแบบ add/ drop ของ การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นใน โครงข่ายแบบวงแหวน (ring network).....	19
2.12 (ก)การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น แบบ star network ที่มี node 4 node และ 3 ความยาวคลื่น (ข) ตารางกำหนดความยาวคลื่น .....	20
2.13 จำนวนความยาวคลื่นต่ำสุดที่ต้องการในการเชื่อมโยง N node ของ โครงข่าย.....	21
2.14 ตัวอย่างของสวิตซ์การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น .....	21
2.15 ความสัมพันธ์ของ Q-Factor กับ BER.....	22
2.16 Q-Factor Penalty .....	24
3.1 โครงข่ายหลักที่ใช้ในการทดสอบ.....	30
3.2 อุปกรณ์ WDM MUX AND DMUX .....	35
3.3 โครงสร้างของ Double – stage amplifier .....	37
3.4 อุปกรณ์การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น Alcatel รุ่น 1686WMชนิด 32 ความยาวคลื่น ...	39

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ตัวอย่างโครงข่ายที่ประกอบด้วยค่าเชื่อมโยง.....	43
3.6 ขั้นตอนในการคำนวณเส้นทางที่สั้นที่สุดของดิจิทัลสตราอัลกอริทึม .....	47
4.1 โครงข่ายหลักระบบ WDM ของ TOT ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ WDM, Regenerator และ อุปกรณ์ SDH Multiplexer .....	49
4.2 โครงข่ายหลักระบบ WDM แสดงระยะทางและจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในแต่ละช่วง .....	50
4.3 กราฟเปรียบเทียบค่าเชื่อมโยงในการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักต่างกัน .....	55
4.4 โครงข่ายหลักระบบ WDM แสดงค่าเชื่อมโยงที่คำนวณได้ในแต่ละ section.....	56
4.5 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการสร้างเมทริกซ์เชื่อมโยง (Cost matrix) .....	57
4.6 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด .....	59
4.7 ลักษณะการเชื่อมโยงโครงข่ายหลัก WDM backbone กับโครงข่ายท้องถิ่น .....	60
4.8 เส้นทางที่สั้นที่สุด (ก) จากโหนดใดๆ ไปโหนด 14 (ข) จากโหนดใดๆ ไปโหนด 15 .....	61
4.9 บล็อกไดอะแกรมแสดงการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยอัลกอริทึมของดิจิทัลสตรา .....	64
4.10 (ก) โครงข่ายหลักระบบ WDM (ข) เส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 2 ถึง 14 .....	65
4.11 เส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่าง (ก) โหนด 7 ถึง 9 (ข) โหนด 11 ถึง 13 .....	65
4.12 กราฟเปรียบเทียบค่าเชื่อมโยงเมื่อพิจารณาค่าทราฟฟิก .....	69
4.13 กราฟเปรียบเทียบเส้นทางที่สั้นที่สุดของอัลกอริทึมเบลแมนฟอร์ด และอัลกอริทึมของดิจิทัลสตราเมื่อพิจารณาค่าทราฟฟิก.....	70
4.14 บล็อกไดอะแกรมแสดงการหาเส้นทางใหม่กรณีเกิดเหตุขัดข้องด้วยอัลกอริทึมของ เบลแมนฟอร์ด .....	71
4.15 ผลการจำลองเส้นทางที่สั้นที่สุดในโครงข่ายด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด (ก) โครงข่ายหลัก (ข) เส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10 ถึง 5 .....	72
4.16 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุเสีย 1 จุดด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด (ก) เหตุเสียระหว่างโหนด 5-6 (ข) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10-5 .....	72
4.17 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุเสีย 1 จุดด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด (ก) เหตุเสียระหว่างโหนด 11-12 (ข) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10-14.....	73

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุเสีย 2 จุดด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด	
(ก) เส้นทางสั้นที่สุดระหว่าง โหนด 4-11	
(ข) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่าง โหนด 10-14 เมื่อเกิดเหตุเสียครั้งที่ 1 ที่ 4-5	
(ค) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่าง โหนด 10-14 เมื่อเกิดเหตุเสียครั้งที่ 2 ที่ 13-14 .....	74
4.19 บล็อกไดอะแกรมการหาเส้นทางใหม่กรณีเกิดเหตุขัดข้องด้วยดิจิทัลตราอัลกอริทึม .....	74
4.20 ผลการจำลองเส้นทางที่สั้นที่สุดในโครงข่ายด้วยอัลกอริทึมของดิจิทัลตรา	
(ก) โครงข่ายหลัก (ข) เส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่าง โหนด 10 ถึง 5 .....	75
4.21 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุเสีย 1 จุดด้วยอัลกอริทึมของดิจิทัลตรา	
(ก) เหตุเสียระหว่าง โหนด 5-6 (ข) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่าง โหนด 10-5 .....	76
4.22 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุเสีย 1 จุดด้วยอัลกอริทึมของดิจิทัลตรา	
(ก) เหตุเสียระหว่าง โหนด 11-12 (ข) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่าง โหนด 10-14 .....	76
4.23 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุเสีย 2 จุดด้วยอัลกอริทึมของดิจิทัลตรา	
(ก) เส้นทางสั้นที่สุดระหว่าง โหนด 4-11	
(ข) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่าง โหนด 10-14 เมื่อเกิดเหตุเสียครั้งที่ 1 ที่ 4-5	
(ค) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่าง โหนด 10-14 เมื่อเกิดเหตุเสียครั้งที่ 2 ที่ 13-14 .....	77
4.24 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุขัดข้อง 2 จุดด้วย	
อัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดและอัลกอริทึมดิจิทัลตรา .....	77

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปริมาณความต้องการในการติดต่อสื่อสารข้อมูลในประเทศไทยได้มีอัตราการเจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นโครงข่ายของระบบการสื่อสารข้อมูลจะต้องมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้การรับส่งสัญญาณที่มีความเร็วที่สูงและมีระยะทางในการส่งสัญญาณที่ไกลขึ้นเพื่อสามารถรองรับการเจริญเติบโตที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งระบบหนึ่งที่ได้นำมาใช้ก็คือเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing: WDM) บนโครงข่ายใยแก้วนำแสง ในทางปฏิบัติโครงข่าย WDM ยังเป็นโครงข่ายที่เชื่อมโยงกันด้วยเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง ทั้งยังมีเรื่องของค่าการสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นให้ต้องพิจารณาร่วมด้วย การออกแบบโครงข่ายหลักทางตรรกะ (Logical) เพื่อใช้เชื่อมโยงโครงข่ายท้องถิ่นด้วยการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นจึงถูกนำมาศึกษาเป็นแนวทางในการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมกับวงจรใช้งานและมีประสิทธิภาพกับโครงข่ายที่ติดตั้งและใช้งานจริง หรือกับโครงข่ายที่จะมีการขยายให้ใหญ่ขึ้น โดยได้นำอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด (Bellman-Ford) และดิคส์ตรา (Dijkstra) มาพิจารณาหาเส้นทางที่สั้นที่สุดและเหมาะสมเพื่อการกำหนดใช้งาน โครงข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถที่จะเลือกเส้นทางที่เหมาะสมใหม่ในกรณีเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับโครงข่าย

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโครงข่ายหลักทางตรรกะ (Logical) ด้วยวิธีการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นผ่านใยแก้วนำแสง เพื่อที่จะศึกษาวิธีการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมกับวงจรใช้งานที่เชื่อมผ่านโครงข่าย WDM ไปยังโครงข่ายท้องถิ่นที่มีปริมาณการใช้งานมากให้มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับความจุ (Capacity) ของโครงข่าย ทั้งนี้เพื่อนำหลักการที่ได้มาเป็นเครื่องมือในการกำหนดวงจรใช้งานให้เหมาะสมกับรูปแบบโครงข่ายทั้งที่เป็นเส้นทางหลัก และเส้นทางสำรองในกรณีเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับโครงข่ายเพื่อหลีกเลี่ยงการกำหนดเส้นทางที่ซ้ำซ้อนและสิ้นเปลืองทรัพยากรโครงข่าย และการออกแบบโครงข่ายใหม่ การขยายหรือปรับเปลี่ยนลดจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่ายเดิมในปัจจุบันให้สอดคล้องกับการใช้งานและมีประสิทธิภาพมากที่สุด

### 1.3 ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในปัจจุบัน โครงข่ายที่ใหญ่มักจะนำเสนอการรับประกันการบริการกับลูกค้าหรือผู้ใช้บริการ โครงข่าย ถึงความมีเสถียรภาพ สภาพพร้อมใช้งานของพอร์ต (Port Availability) แม้จะมีเหตุขัดข้องเกิดขึ้นกับระบบโครงข่าย ฉะนั้นการออกแบบโครงข่ายทางตรรกะจึงเป็นรูปแบบของการพิจารณาเส้นทางที่เหมาะสมกับโครงข่ายที่ติดตั้งใช้งานอยู่จริง ให้มีประสิทธิภาพของวงจรที่ใช้งาน และมีการคำนวณหาเส้นทางที่เหมาะสมและสั้นที่สุดเพื่อรองรับการใช้งานทั้งเป็นเส้นทางหลัก และเส้นทางสำรอง เนื่องจากวิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดนี้ได้ประเมินจากโครงข่ายในสภาวะปกติ และสภาวะเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับโครงข่ายใยแก้วนำแสง ดังนั้นการศึกษาการออกแบบในทางตรรกะนี้จึงเป็นประโยชน์ทั้งในด้านประสิทธิภาพของวงจรใช้งานและยังเป็นประโยชน์ในการพิจารณาเพิ่มลดขนาดของโครงข่ายด้วย

### 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

พิจารณาโครงข่ายหลักทั่วประเทศ 18 ช่วงของระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นที่ใช้ในการเชื่อมโยงกับโครงข่ายท้องถิ่น โดยในแต่ละช่วงจะมีการปรับเปลี่ยนจำนวนความยาวคลื่น พิจารณาหาความเหมาะสมของโครงข่ายโดยพิจารณาค่าเชื่อมโยงน้อยสุด (Minimum cost) เส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-path) และการคำนวณเส้นทางใหม่ (Minimum cost re-computation) เพื่อหาเส้นทางที่สั้นที่สุด และเส้นทางที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง ทั้งการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณบนโครงข่ายในเชิงตรรกะ (Logical) และในเชิงกายภาพ (Physical) ของการกำหนดใช้งานความยาวคลื่น สำหรับองค์ประกอบที่นำมาเป็นข้อมูลนั้น ใช้โครงข่ายออปติคัลไฟเบอร์ที่มีอยู่เดิมและนำข้อมูลเกี่ยวกับค่าปริมาณการใช้ (Traffic) ที่ใช้ในโครงข่ายของทีโอทีมาประกอบการพิจารณาาร่วมกัน

### 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ปัญหาที่น่าสนใจ การเสนอหลักการใหม่

บทที่ 2 การสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วของระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น กล่าวถึงหลักการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงของระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น องค์ประกอบและรูปแบบโครงข่ายในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

บทที่ 3 โครงสร้างของโครงข่ายหลัก เสนอโครงสร้างของโครงข่ายหลักที่ใช้ในการทดสอบ วิธีการกำหนดเส้นทางในโครงข่าย การเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด อัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดและอัลกอริทึมของดิกซ์สตรา

บทที่ 4 การคำนวณการออกแบบโครงข่ายหลักทางตรรกะ การหาค่าเชื่อมโยง (Link cost) การหาค่าต่ำสุด (Minimum cost) เส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-path) การคำนวณค่าเชื่อมโยงใหม่ (Re-computation minimum cost) เปรียบเทียบความเหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดเส้นทางของวงจรใช้งาน

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการกล่าวสรุปผลของการวิจัยและนำเสนอข้อเสนอแนะ

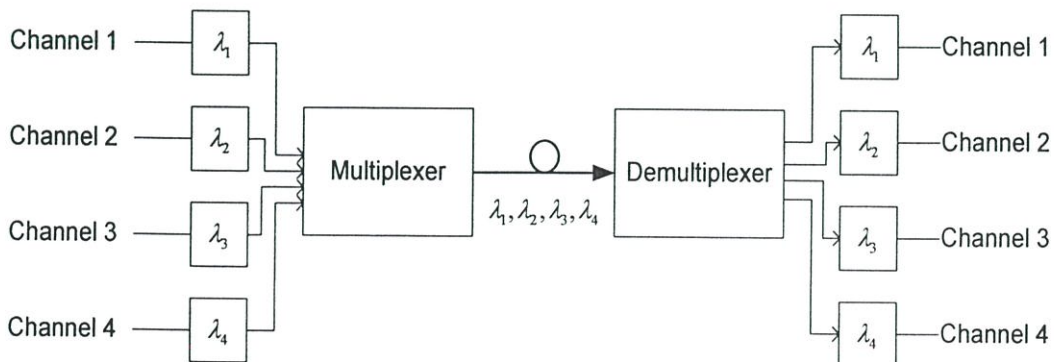
## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นที่เป็นความรู้พื้นฐานของการวิจัย เพื่อช่วยต่อการศึกษาในบทต่อไป เนื้อหาเริ่มจากทฤษฎีเบื้องต้นของระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น การใช้ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นในโครงข่ายสื่อสารสัญญาณในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น ซึ่งเป็นระบบที่นำมาใช้กันมากในปัจจุบันกับการเชื่อมโยงโครงข่ายสื่อสารสัญญาณที่มีขนาดใหญ่และระยะทางไกล โดยแสดงเป็นลำดับหัวข้อดังต่อไปนี้

### 2.1 หลักการเบื้องต้นของระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นเป็นระบบมัลติเพล็กซ์ที่ใช้คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันเป็นคลื่นพาห้สำหรับนำข้อมูล โดยแสงทั้งหมดจะถูกรวมกันก่อนส่งออกไปในเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวกันด้วยออปติคอลคัมเพลกซ์แสดงในรูปที่ 2.1 คลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าหนึ่งจะสามารถบรรจุข้อมูลได้หนึ่งชุดและข้อมูลแต่ละชุดนี้อาจเป็นข้อมูลเดี่ยวของหนึ่งช่องสัญญาณหรืออาจเป็นข้อมูลจำนวนมากที่มาจากหลายช่องสัญญาณที่ได้จากการจัดระบบข้อมูลด้วยเทคนิคของ TDM (Time Division Multiplexing) หรือ SCM (Sub-carrier Multiplexing) มาแล้วก็ได้ [1]



รูปที่ 2.1 เทคนิคการรับส่งสัญญาณในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

ที่ภาครับข้อมูลแสงจะถูกแยกออกในแต่ละช่วงของความยาวคลื่นด้วยระบบกรองแสง สัญญาณแสงที่ถูกแยกแล้วจะถูกตีโมดูเลตด้วยวิธีการที่เหมาะสมกับขบวนการทางอินพุท

ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นหรือดับเบิลยูดีเอ็มเป็นเทคนิคที่ใช้เฉพาะระบบการสื่อสารข้อมูลทางแสง สามารถส่งข้อมูลได้เป็นจำนวนมหาศาล อย่างไรก็ตามการส่งแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันหลายค่าเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวจะมีผลเสียในทางปฏิบัติอยู่สองประการใหญ่ ๆ คือ

1. ระยะระหว่างสถานีทวนสัญญาณของข้อมูลแต่ละช่องหรือแต่ละความยาวคลื่นแสงจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการกำหนดตำแหน่งของสถานีทวนสัญญาณ

2. การออกแบบระบบขยายสัญญาณทางออปติคัลอาจมีความซับซ้อนเพราะจำนวนช่องสัญญาณมีจำนวนมาก เช่นเดียวกับกรณีของสถานีทวนสัญญาณทางแสงที่ต้องทำการขยายสัญญาณทุกค่าความยาวคลื่นไปพร้อมกัน

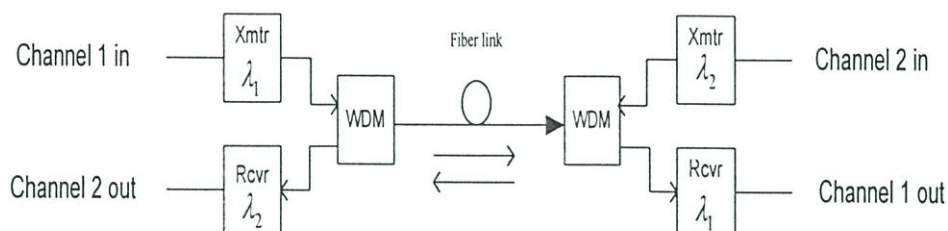
เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ในระบบจริงจึงใช้แสงที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกันมากในย่านความยาวคลื่น 1550 nm โดยแต่ละช่องสัญญาณอาจใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 1510 1530 1550 และ 1570 nm สำหรับการส่งข้อมูล 4 ช่องสัญญาณไปพร้อม ๆ กัน นอกจากนี้การเลือกใช้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 1550 nm จะทำให้การลดทอนสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนำแสงของแต่ละช่องสัญญาณมีค่าเกือบเท่ากัน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

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

อุปกรณ์ที่เป็นกุญแจสำคัญก็คืออุปกรณ์ที่รวมแสงจากหลาย ๆ แหล่งกำเนิดแสงที่ด้านส่ง (Couplers or multiplexers) และอุปกรณ์ที่ใช้แยกช่องสัญญาณออกจากกัน (Demultiplexers) ที่ด้านรับ นอกจากนี้ยังต้องการเทคนิคในการคงไว้ซึ่งความยาวคลื่นเดิมจากแหล่งกำเนิดที่มีการรวมความยาวคลื่นกันอีกด้วย [2]

การส่งสัญญาณแสงแบบสองทิศทาง (Bidirectional) สามารถใช้ในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นได้ด้วยการรวมแหล่งกำเนิดแสงและภาครับไว้ที่ปลายด้านเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.2 เส้นใยแก้วนำแสงมีย่านความยาวคลื่นใช้งานอยู่ประมาณ 800 nm ถึง 1600 nm (มีค่าการ

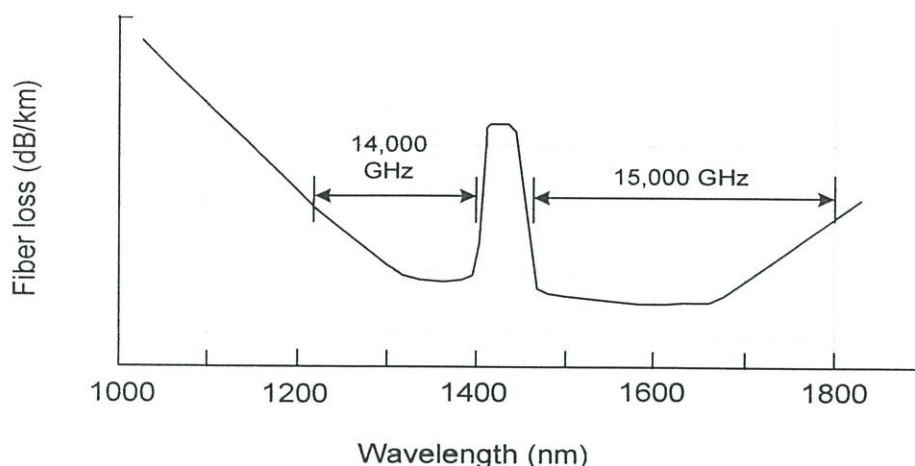
ลดทอนที่เกี่ยวข้องกับ OH<sup>-</sup> ion ที่ความยาวคลื่น 1400 nm และ 1250 nm ค่าการลดทอนเหล่านี้จะ  
 ไม่มีความสำคัญสำหรับการเชื่อมโยงที่มีระยะทางสั้น ๆ แต่ค่าการลดทอนเหล่านี้จะเพิ่ม  
 ความสำคัญขึ้นตามระยะทางของการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น) การส่งสัญญาณในเส้นใยแก้วมีการระบุ  
 ย่านการทำงานไว้ที่ช่วงความยาวคลื่น 850 nm 1300 nm และ 1550 nm [3]



รูปที่ 2.2 ระบบ การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น แบบ Bidirectional

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าย่านการทำงานของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (single-mode fiber) ที่มีค่าการสูญเสียของแบนด์วิดท์ (bandwidth loss) ต่ำ จะอยู่ที่ย่านความยาวคลื่น 1300 nm มีความถี่ประมาณ 14000 GHz มีค่าสูญเสียต่อระยะทางประมาณ 0.4 dB/km ค่าการแพร่กระจายแสง (Dispersion) ซึ่งหมายถึงลักษณะของการขยายออกของสเปกตรัมแสงที่ส่งผ่านไป  
 ไปในเส้นใยแก้วนำแสงทำให้รูปสัญญาณขาเข้าและขาออกมีรูปสัญญาณผิดเพี้ยนไปและค่า dispersion นี้จะทำให้มีแบนด์วิดท์ของสัญญาณลดลง dispersion มีหน่วยเป็น  $\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  และด้วยแกนของเส้นใยแก้วนำแสงชนิด single-mode ที่มีขนาด 10  $\mu\text{m}$  จะมีค่าการแพร่กระจายแสงที่  
 ย่านความยาวคลื่น 1260 - 1360 nm ประมาณ  $4 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  (ผลของ dispersion จะเห็นได้ชัดเมื่อ  
 ค่าเกินกว่า 20% ของ bit period) และจากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าที่ความยาวคลื่น 1550 nm ย่านการ  
 ทำงานของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวที่มีค่าการสูญเสียของแบนด์วิดท์ต่ำจะมีความถี่  
 ประมาณ 15000 GHz มีค่าสูญเสียต่อระยะทางประมาณ 0.2 dB/km ด้วยค่าการแพร่กระจายแสง  
 ประมาณ  $18 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$  ค่าการแพร่กระจายแสงนี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยใช้เทคนิค  
 dispersion shifting คือลักษณะการนำใยแก้วนำแสงที่เรียกว่า dispersion-shifted fiber (DSF) ที่มีการ  
 ดูดซับกำลังงานน้อยที่สุดสำหรับใยแก้วซิลิกา มาประยุกต์ใช้เพื่อทำให้ค่าการแพร่กระจายแสงมีค่า  
 ต่ำสุดในย่านความยาวคลื่น 1550 nm หรือโดยการลดระดับพลังงานของแหล่งกำเนิดพลังงานของ  
 ไลน์วิดท์ (Line width)

สำหรับการเชื่อมโยงที่มีระยะทางไกล ๆ และมีอัตราการส่งข้อมูลสูง สามารถใช้ย่าน  
 ความยาวคลื่นจาก 1250 ถึง 1350 nm และ 1450 nm ถึง 1600 nm โดยเมื่อรวมช่วงความยาวคลื่นใช้  
 งานทั้งสองย่านเข้าด้วยกันจะมีผลรวมของความยาวคลื่นเป็น 250 nm



รูปที่ 2.3 ย่านการใช้งานสเปกตรัมในเส้นใยแก้วนำแสงแบบชนิดโหมดเดี่ยว

ขอบเขตของการส่งสัญญาณสามารถใช้ประโยชน์ได้สูงสุดด้วยวิธีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing: WDM) โดยการรวมความยาวคลื่นที่มีหลากหลายแหล่งกำเนิดความยาวคลื่นที่ด้านส่งและแยกความยาวคลื่นเหล่านี้ที่ด้านรับ หลักที่สำคัญก็คือการที่สามารถนำสัญญาณที่เป็นทั้งสมมาตรและไม่สมมาตร (synchronous and asynchronous) และสัญญาณอานาล็อกส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงด้วยการใช้ประโยชน์แบนด์วิดท์ของเส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างสูงสุด [2]

## 2.2 ชนิดของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

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

### 2.2.1 เทคนิคการเลือกความยาวคลื่น (Wavelength – selective WDM)

กำลังงานทั้งหมดจะให้แก่ความยาวคลื่นใดคลื่นหนึ่งเพียงหนึ่งส่วนและกำลังงานที่เหลือก็จะถูกใช้ในความยาวคลื่นอื่น ๆ ที่ถูกแยกออกไป ถ้าไม่คิดรวมการสูญเสียที่เพิ่มขึ้น (Insertion loss) สามารถเชื่อมโยงได้ดังนี้

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

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

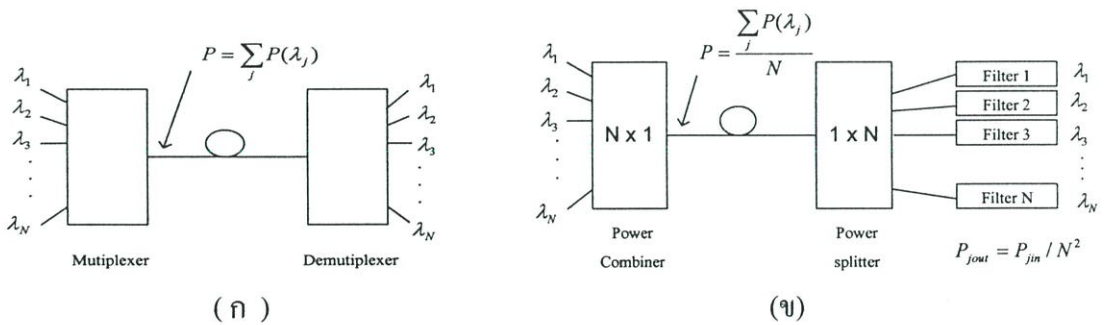
$$CT_{ij} = 10 \log (P_{ij} / P_{ii}) \quad (2.2)$$

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

เทคนิค wavelength – routed WDM อธิบายในรูปที่ 2.4 ก แห่่งกำเนิดความยาวคลื่นที่แยกจากกันจะถูกกำหนดความยาวคลื่นของแต่ละแห่่งกำเนิด กำลังงานของแต่ละแห่่งกำเนิดทั้งหมดจะรวมกันโดยปราศจากการสูญเสีย (ในอุดมคติ) คีมัลติเพล็กซ์ที่ด้านรับปลายทางจะมีความไวต่อความยาวคลื่น คีมัลติเพล็กซ์จะทำการแยกความยาวคลื่นแต่ละความยาวคลื่นออกจากกันและส่งไปยังเส้นทางที่แตกต่างกันที่ด้านรับ โดยแต่ละเส้นทางจะมีความยาวคลื่นที่ไม่เหมือนกัน (เป็นการแยกออกทางอุดมคติที่ไม่มีการสูญเสีย) การมัลติเพล็กซ์และคีมัลติเพล็กซ์จะมีประสิทธิภาพถ้่าค่าการสูญเสียที่แทรกเข้ามา (insertion loss) มีค่าต่ำ จากช่องสัญญาณ  $i$  ในขณะที่ช่องสัญญาณ  $j$  เท่านั้นที่มีแสงผ่าน  $P_{ii}$  คือกำลังงานในช่องสัญญาณ  $i$  เมื่อมีเพียงช่องสัญญาณ  $i$  เท่านั้นที่มีแสงผ่าน crosstalk สามารถหาได้ด้วยการแยกออกเป็นคู่ ๆ หรือหาจากผลรวมคือ

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

เมื่อ  $\sum_j$  คือ ผลรวมของพลังงานจากทุกช่องสัญญาณที่วัดได้จากช่องสัญญาณ  $i$



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

### 2.2.2 เทคนิคแบบการกระจายและการเลือก

เทคนิคแบบการกระจายและการเลือก (Broadcast- and -select Techniques) (รูปที่ 2.4 ข) เป็นการรวมกำลังงานของแห่่งกำเนิดที่ด้านส่งและแบ่งผลรวมของกำลังงานที่ถูกรวมนี้ด้วยจำนวนของแห่่งกำเนิดทั้งหมด โดยที่ด้านรับจะรวมสัญญาณที่ถูกแบ่งกำลังงานที่เท่า ๆ กันนี้ให้ได้ผลรวมของกำลังงานดั้งเดิม

ความยาวคลื่นแต่ละส่วนของด้านส่งจะถูกกำหนดไว้ก่อนอย่างแน่นอน ความยาวคลื่นทั้งหมดจะถูกส่งไปพร้อม ๆ กันไปยังด้านรับ ที่ด้านรับจะมีตัวกรองเป็นตัวแยกช่องสัญญาณ โดยกำลังงานที่ถูกแบ่งนี้จะไปถึงภาครับแต่ละตัวโดยผ่านการกรองให้มีความยาวคลื่นที่ต้องการ

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

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

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

## 2.3 การมัลติเพล็กซ์

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

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

### 2.3.1 อุปกรณ์กระจายมุม

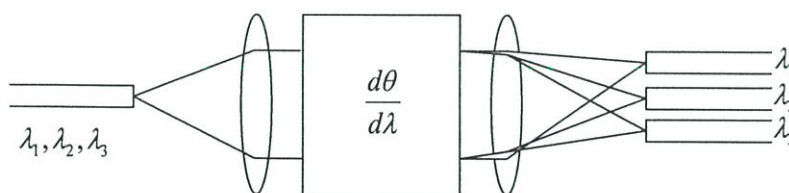
อุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายของมุม (Angular Dispersion Devices) (ตัวอย่างเช่น ปริซึม และ Gratings) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งแสงหรือสะท้อนแสงที่มุมต่างๆ เพื่อกำหนดความยาวคลื่น

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

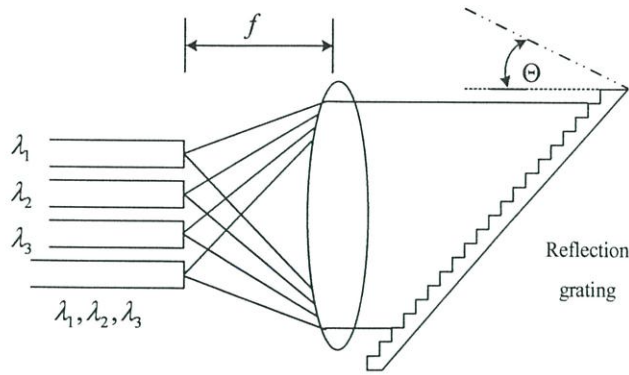
มุมการกระจายแสงของอุปกรณ์ (Angular dispersion) คือการวัดมุมเอียง  $d\theta$  ของลำแสงสองลำแสงที่เกิดขึ้นพร้อมกันที่อินพุทโดยแยกความยาวคลื่นด้วย  $d\lambda$  โดยจะได้มุมกระจายของแสงคือ  $d\theta/d\lambda$  การกระจายของมุมสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงมุมได้ด้วยการเพิ่มเลนส์เข้าไปดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการกระจายของมุมจะถูกวางหันหน้าไปในแนวจุดรวมแสงของเล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

อุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายมุมของแสงจะต้องมีการหักเหของลำแสงในตัวของมันเอง รูปที่ 2.5 แสดงเลนส์ที่ใช้ในการหักเหแสงจะวางกั้นลำแสงที่มาจากอินพุทของเส้นใยแก้วนำแสงปลายของเส้นใยแก้วนำแสงจะถูกวางหันหน้าไปในแนวจุดรวมแสงของเลนส์ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายของมุมจะอยู่ในด้านหลังของเลนส์ในแนวจุดรวมแสง

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



รูปที่ 2.5 การแยกความยาวคลื่นที่ใช้การกระจายของมุมและเลนส์



รูปที่ 2.6 เรขาคณิตสำหรับการสะท้อนของ grating ที่ด้านรับของการมอดิเฟอ์ลิคซ์ทางความยาวคลื่น

### 2.3.2 อุปกรณ์กรองแสง

อุปกรณ์กรองแสง (Filtering Devices) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสะท้อนแสงหรือส่งแสง โดยขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ต้องการกรอง อุปกรณ์กรองแสงที่สามารถใช้ในการแยกความยาวคลื่นมีหลายชนิด ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของอุปกรณ์กรองแสงและแบนด์วิดท์ที่สามารถใช้งานได้ของอุปกรณ์กรองแสงแต่ละชนิด

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

ตารางที่ 2.1 แบบคํวคท์ของช่องสัญญาณสำหรับเทคนิคการกรองแบบต่าง ๆ

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

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

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

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

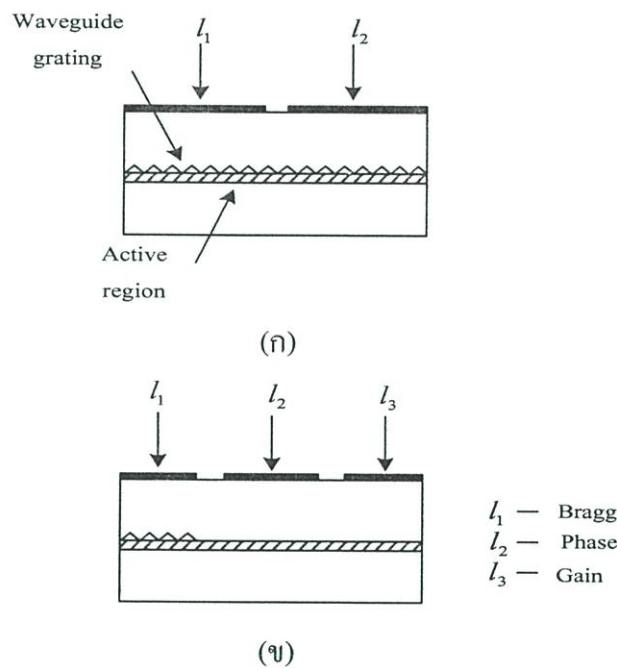
3. Semiconductor amplifier filter เป็นเลเซอร์ไดโอดที่มีการ pump ที่ต่ำกว่าค่า threshold และปรับแต่งการขยายแบนด์พาสด้วยพาสแบนด์แคบ ๆ ความถี่ศูนย์กลางกำหนดด้วยส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้ทำเลเซอร์ การใช้ distributed-feedback reflector (DFR) หรือ distributed-feedback reflector (DFR) เลเซอร์กับหลาย ๆ อิเล็กโทรด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

4. Coherent detector with electronic filter coherent detection เป็นเทคนิคที่ใช้แหล่งกำเนิดที่มี linewidth ที่เล็กกว่าแบนด์วิคท์ของสัญญาณ เทคนิคแบบนี้สัญญาณจะถูกผสมกับสัญญาณอ้างอิงที่มีความถี่เคลื่อนไปจากเดิม (frequency-shifted reference signal) ที่มาจากร่วมสัญญาณที่รวมกลุ่มกันจะกำเนิดความถี่ที่แตกต่างกันขึ้น (เรียกว่า intermediate frequency) ระยะห่างของช่องสัญญาณกำหนดด้วยแบนด์วิคท์ของสัญญาณมอดูเลต (ขึ้นอยู่กับชนิดของการมอดูเลตและอัตราการส่งข้อมูลที่ใช้) และลักษณะการจัดวางภาครับ

ที่ใช้วิธีการตรวจจับแสงจะยอมให้ใช้ช่องสัญญาณแคบ ๆ ได้ ซึ่งถูกแยกออกจากกันด้วยขบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ของภาครับ โดยใช้ตัวกรองอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความแม่นยำเที่ยงตรง ซึ่งจะดีกว่าการใช้ตัวกรองในรูปแบบแสง

## 2.4 แหล่งกำเนิดแสง

การสร้างระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นในทางอุดมคติจะต้องมีกำลังในการส่งที่เพียงพอมีเสถียรภาพและสามารถปรับแต่งความยาวคลื่นที่ต้องการได้รวดเร็วและแม่นยำ ตารางที่ 2.2 แสดงความกว้างของสเปคตรัมกับแหล่งกำเนิดที่เลือกมาใช้



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

### 2.4.1 LED (Light Emitting Diode)

โดยปกติการที่ Bandwidth ของ LED กว้างจะถือว่าเป็นข้อเสีย เนื่องจากผลของการแพร่กระจายของเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งอาจเกิดขึ้น โดยการให้ความกว้างของสเปคตรัมของแหล่งกำเนิดผ่านออกจากสเปคตรัมฟิลเตอร์ให้ได้ความกว้างที่แคบ ๆ เรียกเทคนิคแบบนี้ว่า สเปคตรัมสไลซิง (Spectral slicing) ด้วยวิธีนี้มีข้อได้เปรียบคือยินยอมให้ใช้แอลอีดีที่มีความสัมพันธ์ที่เหมือนกันได้หลากหลายมีราคาไม่แพง และใช้ตัวกรองที่แตกต่างกันในการเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการ การเลือกการกรองแบบนี้จะทำให้ระดับกำลังงานที่สามารถใช้สอยได้ของแหล่งกำเนิดของแอลอีดีมีไม่เพียงพอ ดังนั้นการลดลงของกำลังงานจะเป็นสัดส่วนกับการลดลงของแบนด์วิดท์ ทำ

ให้เทคนิคแบบนี้เป็นเพียงการศึกษาที่ระยะทางเส้นใยแก้วสั้น ๆ และมีอัตราการส่งข้อมูลในการเชื่อมโยงต่ำ

ตารางที่ 2.2 ความกว้างของสเปกตรัมสำหรับแหล่งกำเนิดต่าง ๆ

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

#### 2.4.2 Fabry-perot Diode Laser

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

#### 2.4.3 DFB Diode Laser

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

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

#### 2.4.4 Frequency-Locked Laser:

เลเซอร์สามารถทำงานได้ด้วย Automatic Resonance และด้วยอุณหภูมิและกระแสควบคุม ป้อนกลับสามารถทำให้ได้ linewidth เล็ก ๆ ประมาณ 5 MHz โลว์นิวทซ์ขนาดเล็ก ๆ นี้จึงทำให้กำหนด channel bandwidth ได้จาก signal bandwidth เท่านั้น โดยไม่ขึ้นกับ source linewidth ในกรณีนี้การดีมัลติเพล็กซ์เซอร์ไม่สามารถทำได้ด้วยตัวกรอง (filter) ที่ไม่สามารถปรับแต่งได้แต่จำเป็นต้องมีการปรับแต่งให้ bandwidth แคบเพื่อให้เหมาะสมกับ passband ของตัวกรองที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแต่เมื่อเป็น frequency-locked ก็ไม่สามารถจะทำการปรับแต่งเลเซอร์ได้ง่ายนัก แต่สามารถใช้เทคนิคอื่น คือ การชดเชยโดยใช้เลเซอร์ตัวที่สองจาก reference-locked laser มาทำการปรับแต่งแทน (หรือก็คือการกำหนดค่าเตรียมไว้ล่วงหน้า)

## 2.5 โครงข่ายแบบหลายจุด หลายความยาวคลื่น

ในบทนี้จะอธิบายตัวอย่างของโครงข่ายที่ใช้เทคนิคการส่งสัญญาณแบบ Broadband และ Wavelength-Selective

### 2.5.1 การส่งสัญญาณระบบบรอดแบนด์ (Broadband Transmission System)

ในโครงข่ายแบบ Broadcast และ Select network (ทั้งหมดรวมเรียกว่า broadband network) แสดงในรูปที่ 2.4 b ทุกสัญญาณที่ถูกส่งออกไปจะมีความถี่ที่แน่นอนและส่งกระจายออกไปเหมือน ๆ กันไปยังด้านรับทั้งหมด ที่ด้านรับจะเลือกสัญญาณที่ต้องการจากด้านส่ง ถ้า  $N$  คือจำนวนของสถานีในเส้นทาง ดังนั้น power จะถูกแบ่งออกเป็น  $1 / 2^N$  และค่าสูญเสียในการถูกแยกออกทั้งหมดคือ  $10 \log 2^N$  dB โครงข่ายสามารถมีโครงสร้างในแต่ละส่วนที่เป็นแบบ tree หรือแบบ star ได้ (รูปที่ 2.8)

### 2.5.2 โครงข่ายสื่อสัญญาณแบบ Wavelength-Routed (Wavelength-Routed Transmission network)

ระบบนี้จะรวมระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นในหลากหลายเส้นทาง กำลังงานในการส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่นใด ๆ โดยเฉพาะคือเส้นทางเฉพาะในการรับสัญญาณผ่าน

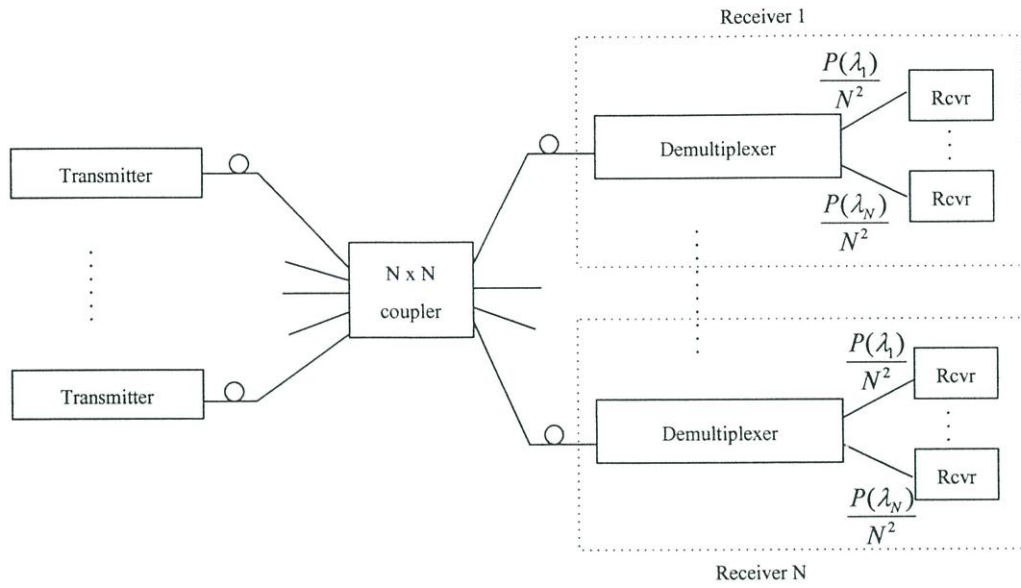
โครงข่ายโดยใช้อุปกรณ์ในการเลือกความยาวคลื่น ความยาวคลื่นหนึ่งจะถูกดึง (drop) ในภาครับที่ต้องการรับสัญญาณนั้น ความยาวคลื่นที่ถูก drop ไปสามารถถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกโดยการเพิ่มสัญญาณอื่นผสมเข้าไปแทนเพื่อเป็นการรักษาจำนวนของความยาวคลื่นที่ต้องการใช้ให้คงเดิม บางโครงข่ายมีการใช้อุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนความยาวคลื่นของสัญญาณภายในเส้นทางของโครงข่าย ซึ่งการใช้วิธีนี้มีผลทำให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายเพิ่มขึ้นทำให้ใช้ประโยชน์จากความยาวคลื่นและการใช้กำลังงานในเส้นใยแก้วนำแสงได้มากและมีประสิทธิภาพ แต่มีค่าใช้จ่ายลดลงและโครงข่ายมีความยืดหยุ่น โครงข่ายเหล่านี้ครอบคลุมถึงโครงข่ายแบบดาว (star network) โครงข่ายแบบลูกโซ่ (chain network) และโครงข่ายแบบวงแหวน (ring network)

#### 2.5.2.1 โครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสตาร์ (WDM star network)

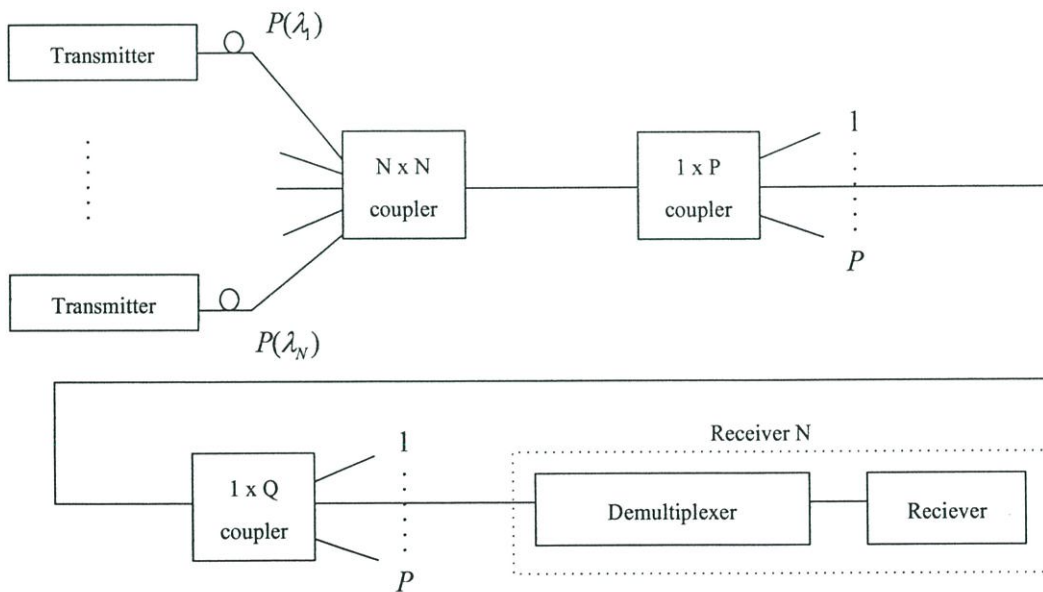
โครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบดาวเป็นหนึ่งในรูปแบบของ Wavelength-Selective WDM (รูป 2.9) ที่ภาครับจะมีการกำหนดความยาวคลื่นและมีแหล่งกำเนิดที่สามารถปรับค่าได้ (การกำหนดโครงสร้างที่มีแหล่งกำเนิดความยาวคลื่นที่กำหนดได้และภาครับที่ปรับแต่งได้มีความเป็นไปได้) ทุก ๆ แหล่งกำเนิดสามารถติดต่อกับทุก ๆ ภาครับด้วยการปรับแต่งภาครับให้มีความยาวคลื่นที่ตรงกันแหล่งกำเนิด .ารรับสัญญาณที่เป็นไปได้มี 2 แบบคือ การตรวจจับโดยตรงที่ภาครับโดยใช้ optical filter ในการเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการและการรับสัญญาณที่รวมกลุ่มกันแบบ FDM นั้นจะใช้การตรวจจับแบบ heterodyne ตรวจจับและปรับแต่งความถี่ที่ต้องการของภาครับ  $N \times N$  coupler ที่เชื่อมโยงกันด้วยอุปกรณ์แบบแบนด์กว้าง (wideband device) ที่รวมแหล่งกำเนิดกำลังงานและแยกมันออกมาเท่า ๆ กันจำนวนภาครับ

#### 2.5.2.2 โครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบลูกโซ่ (WDM Chain Network)

ในระบบ Wavelength-Selective WDM Chain Network (รูป 2.10) แต่ละ node มีอุปกรณ์เลือกและแยกความยาวคลื่น (wavelength-selective splitter) ที่ใช้ในการแยกความยาวคลื่นในกรณีเพิ่ม/ดรอป (add/drop) จะต้องแน่ใจว่าความยาวคลื่นมีเส้นทางไปยังภาครับ (ด.ย. drop จากโครงข่ายไปยังภาครับทั้งหมดในโครงข่าย) สัญญาณใหม่จะเพิ่มเข้าสู่โครงข่ายที่ความยาวคลื่นเหล่านี้ถูกดึงลง นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความยาวคลื่นในโครงข่ายได้อีกด้วย (จัดเตรียมไว้เพื่อเชื่อมโยงเอาท์พุทและอินพุทในโครงข่ายเข้าด้วยกัน) ข้อมูลสามารถเพิ่มและดึงลงที่แต่ละช่องสัญญาณความยาวคลื่นเนื่องจากโครงข่ายมีการติดต่อสื่อสารถึงกันในรูป 2.10 จะเห็นได้ว่าโหนด 1 และ 5 จะมีความสามารถในการส่งและรับอย่างเต็มกำลัง

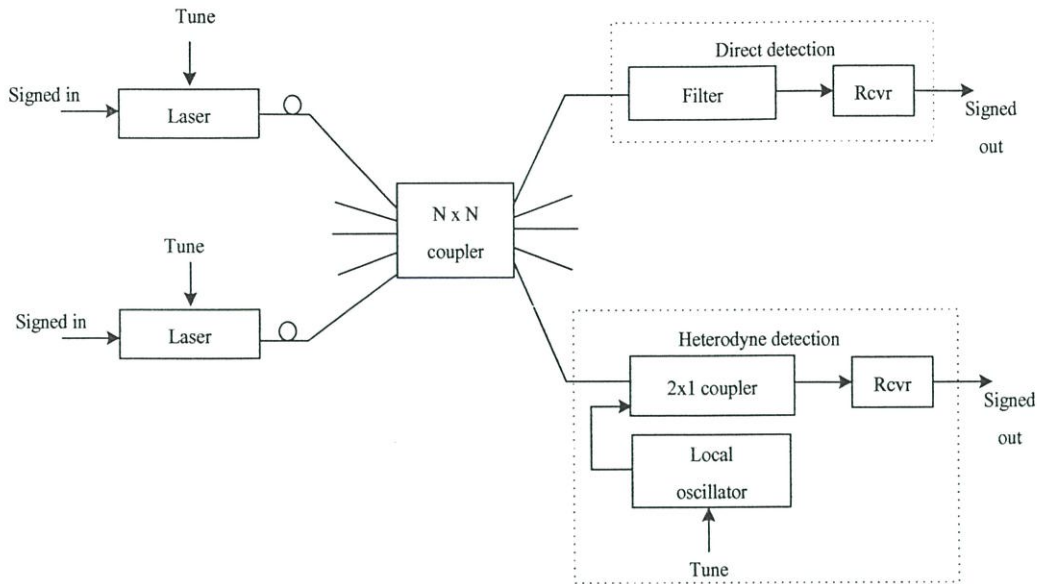


( ก )

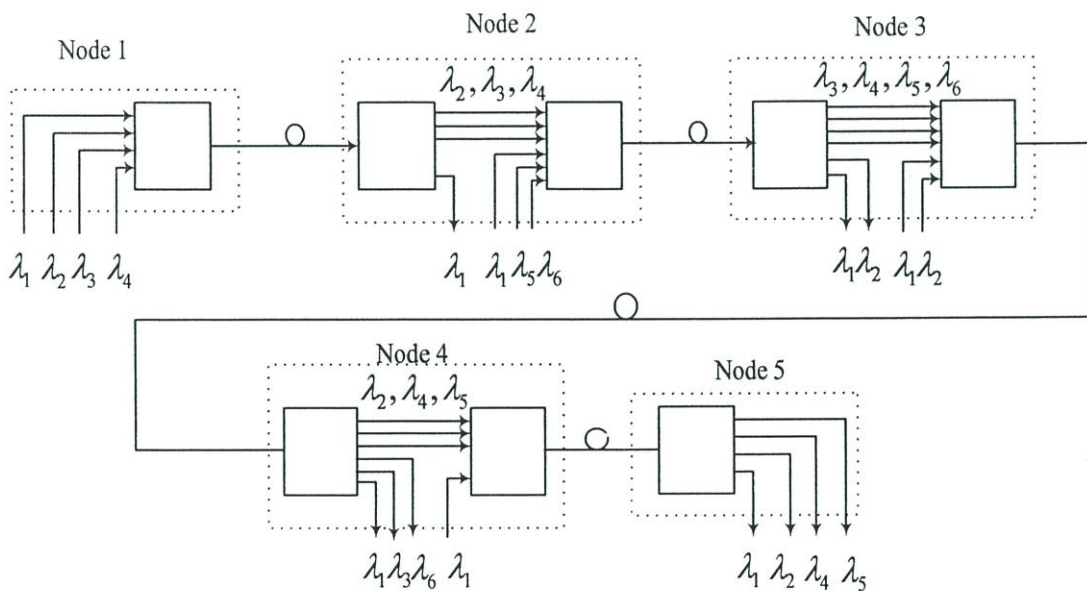


( ข )

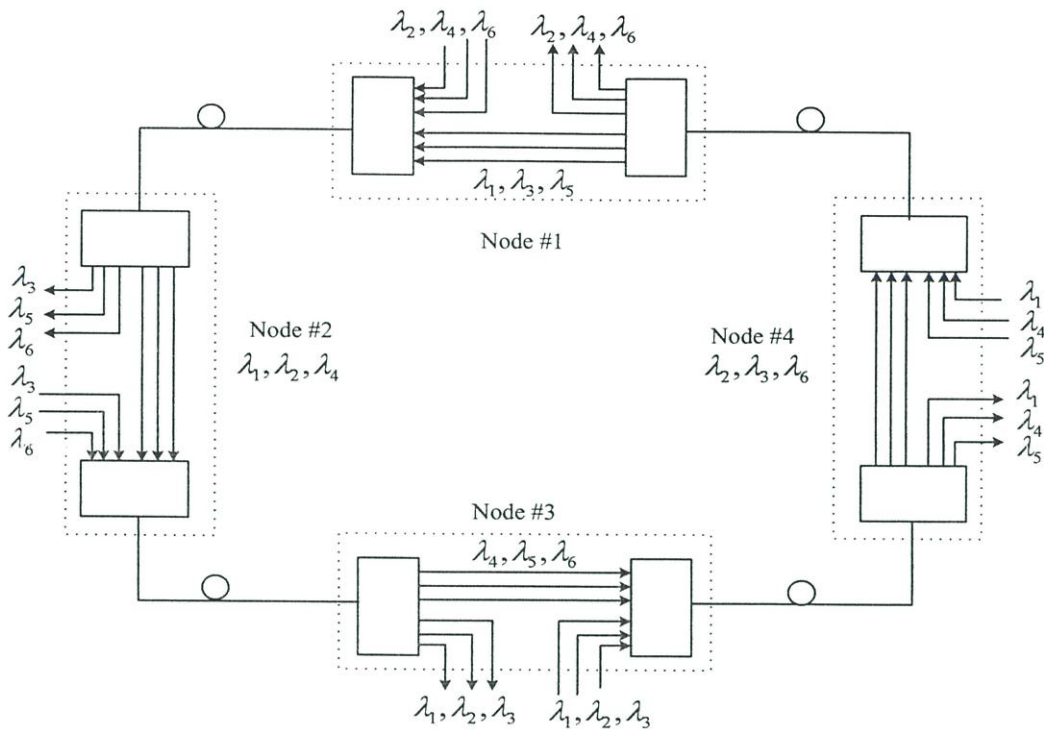
รูปที่ 2.8 (ก) Broadcast-and-Select Broadband-transmission Star Network (ข) การส่งสัญญาณ Broadband แบบ Tree Network



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของ โครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบสตาร์ (star network) ที่ภาครับสามารถตรวจจับการรับสัญญาณ ได้โดยตรงด้วย Spectral Filter หรือ การตรวจจับแบบ Heterodyne Detection FDM receivers



รูปที่ 2.10 โครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบลูกโซ่ (chain network) ความยาวคลื่น ถูกกำหนดเส้นทางของสัญญาณ add/drop ไว้ที่ทุก ๆ โหนด ที่ โหนด 1 และ โหนด 5 จะมีการส่งสัญญาณที่เต็มความจุและมีความสามารถที่จะทำงานได้ในการส่งสัญญาณ ในทิศทางเดียว



รูปที่ 2.11 เส้นทางของความยาวคลื่นที่ทำงานแบบ add/drop ของการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบวงแหวน (Ring Network)

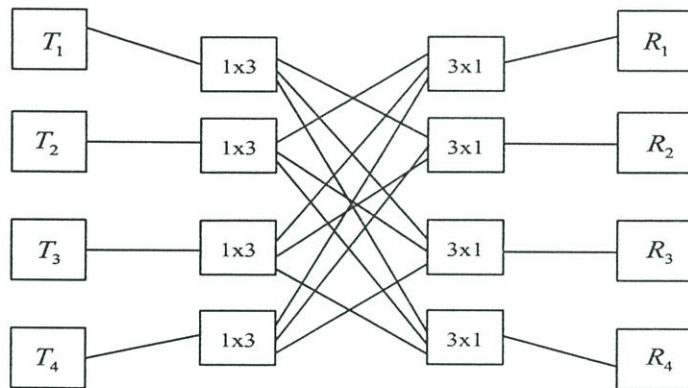
### 2.5.2.3 โครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบวงแหวน (WDM Ring Network)

ในระบบ Wavelength-Selective WDM Ring Network (รูป 2.11) มีโครงสร้างคล้ายกับโครงข่ายแบบลูกโซ่แต่ที่ปลายโครงข่ายจะรวมเข้าด้วยกันจากตัวอย่างจะเห็นได้ว่าจำนวนความยาวคลื่นที่เพิ่มเข้าที่โหนดจะมีจำนวนเท่ากับความยาวคลื่นที่ได้รับซึ่งความยาวคลื่นเหล่านี้จะถูกรวมเข้าด้วยกันและแยกออกจากกันเหมือนกัน

ความคิดพื้นฐานของโครงสร้างเหล่านี้คือการกำหนดอุปกรณ์การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นที่เหมือนกันทุกอย่างจัดเตรียมเส้นทางที่แน่นอนระหว่างภาคส่งและภาครับ ความยาวคลื่นที่ถูกใช้แล้วสามารถนำมาใช้ใหม่ในส่วนอื่นของโครงข่าย ด้วยเหตุนี้วิธีการลดจำนวนของความยาวคลื่นที่ต้องการของโครงข่ายสามารถแสดงได้จากการกำหนด  $N$  node ซึ่งจะต้องการ Optical channel เพียง  $N(N-1)$  มากไปกว่านั้นเราอาจคาดหวังได้ว่าความสามารถเชื่อมต่อ (Interconnection) ของทุกโหนดเข้าด้วยกันกำหนดได้จาก  $N^2$  (ต.ย. โหนดทุก ๆ โหนดสามารถติดต่อกันได้) รูป 2.12 แสดงโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแบบดาวที่สามารถเชื่อมต่อ (Interconnection) โหนด 4 โหนดด้วยการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นที่เหมือนกันทุกอย่าง 8 แบนด์วิดท์ แต่ต้องการความยาวคลื่นในการเชื่อมต่อเพียง 3 ความยาวคลื่น การระบุความยาวคลื่นในตารางที่ 2.3 (ต.ย. ในรูป

สมมุติว่า Tx 1 ไม่ต้องเชื่อมโยงกับ Rx 1) แสดงจำนวนความยาวคลื่นต่ำที่สุดที่ต้องการในการเชื่อมต่อระหว่างโหนดด้วยอุปกรณ์การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นรูป 2.13 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของตาราง 2.3

เมื่ออุปกรณ์มัลติเพล็กซ์เป็นแบบขั้นบันได (Cascade) ควรคำนึงว่าแบนด์วิดท์ของการรวมกันจะลดลงจากแบนด์วิดท์ของสัญญาณเดิม ตัวอย่าง ถ้าแบนด์วิดท์เดิมมีรูปร่างของ Gaussian และมีระดับแบนด์วิดท์คือ BW ดังนั้นการเชื่อมโยงแบนด์วิดท์จำนวน N แบนด์วิดท์ จะต้องการรูปร่างของ Gaussian ด้วยระดับของแบนด์วิดท์  $BW/N$  เนื่องจากจะต้องให้ความสำคัญกับการลดลงของแบนด์วิดท์ในการรวมกันของความยาวคลื่นและการรักษาความยาวคลื่นจากแหล่งกำเนิดให้คงเดิมเหมือนกับแหล่งกำเนิดของตัวเอง



(ก)

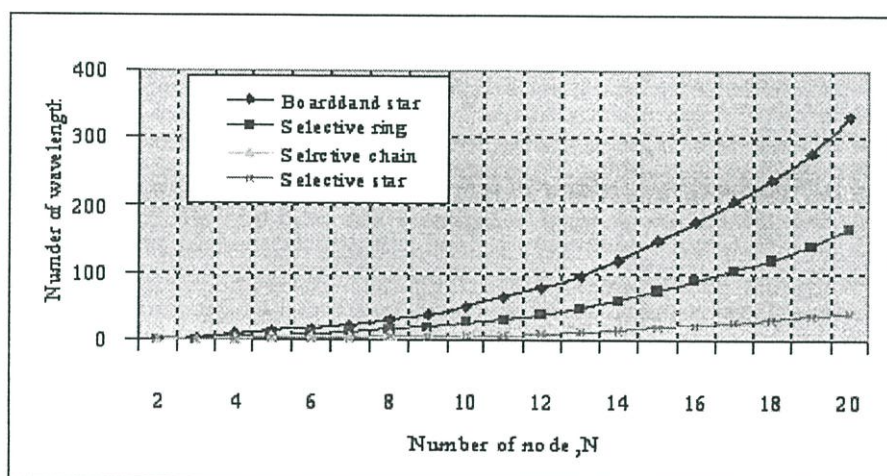
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
$T_1$	—	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
$T_2$	$\lambda_3$	—	$\lambda_1$	$\lambda_2$
$T_3$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	—	$\lambda_1$
$T_4$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	—

(ข)

รูปที่ 2.12 (ก) การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น แบบ star network ที่มีโหนด 4 โหนดและความยาวคลื่นจำนวน 3 ความยาวคลื่น (ข) ตารางกำหนดความยาวคลื่น

ตารางที่ 2.3 จำนวนต่ำสุดของความยาวคลื่นที่ต้องการในการเชื่อมโยงกับช่องสัญญาณ N ช่องสัญญาณในโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

Method	Minimum number of wavelengths
Star	$N - 1$
Chain	$\left(\frac{N}{2}\right)^2$ (if N is even)
	$\frac{(N - 1)(N + 1)}{4}$ (if N is odd)
Ring	$\frac{N(N - 1)}{2}$



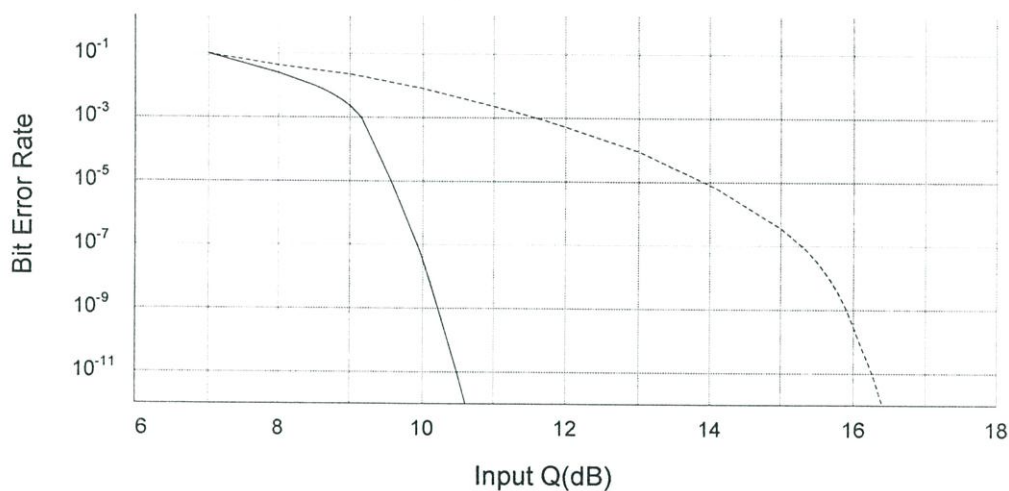
รูปที่ 2.13 จำนวนความยาวคลื่นต่ำสุดที่ต้องการในการเชื่อมโยง N โหนดของโครงข่าย

## 2.6 โอเอสเอ็นอาร์ในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

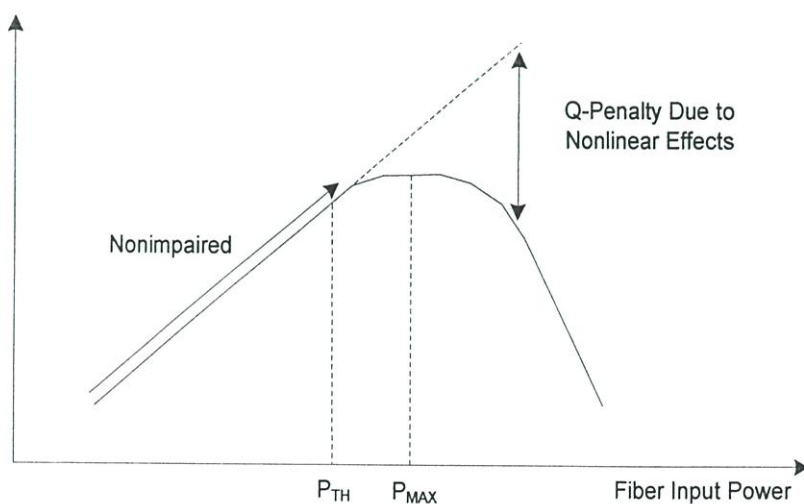
ในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นการวัดคุณภาพและประสิทธิภาพของสัญญาณในระบบค่าโอเอสเอ็นอาร์ (OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio) จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ชี้ว่าระบบมีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหน เนื่องจากค่าของโอเอสเอ็นอาร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า BER (Bit Error Rate) และ Q-Factor ซึ่ง Q-Factor เป็นตัวชี้ในเชิงคุณภาพของระบบแต่ค่าโอเอสเอ็นอาร์สามารถทำการวัดและทดสอบได้ง่ายกว่า ดังนั้นในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ การวัดและประมาณการค่าโอเอสเอ็นอาร์เพื่อการออกแบบหรือบำรุงรักษาระบบจึงทำได้สะดวกกว่าการหาค่า Q-Factor หรือ BER ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสามแบบนี้และสมการในการคำนวณโอเอสเอ็นอาร์ [8]

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

ในการออกแบบโครงข่ายนั้นเป็นเรื่องหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะต้องให้การออกแบบระบบเป็นไปตามข้อกำหนด BER ของโครงข่าย การคำนวณ BER เป็นงานที่น่าสนใจถ้าหากว่าผู้ออกแบบมีเครื่องมือเช่นตารางการคำนวณและเครื่องคิดเลข โดยที่ Q-factor นั้นเป็นการอธิบายเชิงคุณภาพของสมรรถนะของเครื่องรับเนื่องจากเป็นฟังก์ชันของ SNR (optical) ดังนั้น Q-factor จะเป็นตัวบอกถึง SNR ต่ำสุดที่ต้องการเพื่อให้ได้ค่า BER เฉพาะค่าหนึ่งสำหรับสัญญาณที่กำหนดให้ รูป 2.14 แสดงความสัมพันธ์ของ Q-factor กับ BER จะเห็นได้ว่ายิ่งค่าของ Q สูงขึ้นจะแสดงค่าเป็นเส้นประจะทำให้ค่า BER ก็จะมีค่าน้อยลง [10]



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของ Q-Factor กับ BER



รูปที่ 2.15 Q-Factor Penalty

สมการ 2.7 ใช้หาค่า Q-factor ของสัญญาณแสง

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

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

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

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

### 2.6.2 การคำนวณ Q-factor จากโอเอสเอ็นอาร์

โอเอสเอ็นอาร์เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณแสงที่กำหนดให้เป็นปริมาณที่วัดได้ (ในทางปฏิบัติ) สำหรับโครงข่ายที่กำหนดให้และสามารถคำนวณได้จากพารามิเตอร์ของระบบที่กำหนดให้ หัวข้อต่อไปนี้จะแสดงวิธีคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์และอธิบายถึงความสัมพันธ์ของโอเอสเอ็นอาร์กับ Q-factor

ค่าอัลกลอริทึมของ Q (หน่วย dB) นั้นมีความสัมพันธ์กับโอเอสเอ็นอาร์ตามสมการ 2.9

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

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

ดังนั้น  $Q$ (dB) จะแสดงได้ดังในสมการ 2.10

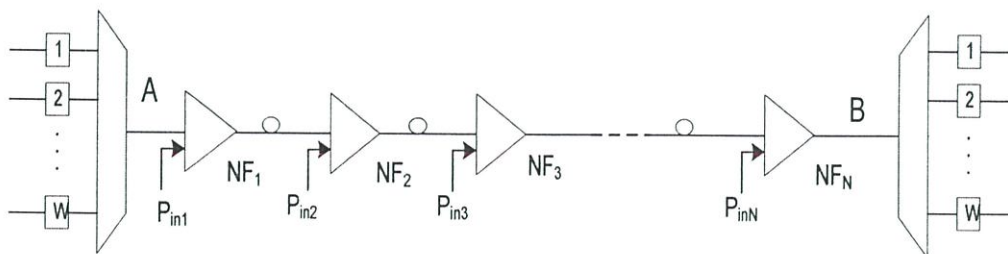
$$Q_{dB} = OSNR + 10 \log \frac{B_0}{B_c} \quad (2.10)$$

อาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า  $Q$  ก่อนข้างจะเป็นสัดส่วนกับโอเอสเอ็นอาร์ โดยทั่วไปแล้ว การคำนวณสัญญาณรบกวน (noise) จะใช้เครื่อง Optical spectrum analyzer (OSAs) หรือ Sampling oscilloscope และการวัดเหล่านี้จะถูกระทำในช่วงการวัดเฉพาะของ  $B_m$  โดยแท้จริงแล้ว  $B_m$  มีค่าประมาณ 0.1 nm หรือ 12.5 GHz สำหรับ OSA ที่กำหนด จากสมการ 2.10 แสดงให้เห็น  $Q$  มีหน่วยเป็น dB ในทอมของโอเอสเอ็นอาร์จะเห็นได้ว่าถ้า  $B_o < B_c$  แล้ว  $OSNR(dB) > Q(dB)$  สำหรับการออกแบบในทางปฏิบัตินั้น โอเอสเอ็นอาร์(dB)  $> Q(dB)$  อย่างน้อยที่สุด 1-2 dB ในขณะที่การออกแบบระบบที่มีบิตเรตสูงในทางปฏิบัตินั้นค่า margin หรือค่าขอบเขตของการชดเชยของเครื่องรับจะมีค่าประมาณ 2 dB เพื่อให้  $Q$  มีค่าน้อยกว่าโอเอสเอ็นอาร์(dB) ประมาณ 2 dB

### 2.6.3 การคำนวณโอเอสเอ็นอาร์สำหรับ Point-to-Point Link

พิจารณา physical link AB ดังแสดงในรูป 2.18 สมมติว่าเป็น เส้นทางการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นที่ใช้ในระยทางไกล แอมพลิฟายเออร์ถูกวางเป็นระยะ ๆ โดยมีระยะห่างเท่า ๆ กันเพื่อขยายกำลังของสัญญาณ ดังนั้นจะทำให้สัญญาณสามารถไปได้ไกลกว่าค่าการสูญเสียสะสมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของเส้นใยแก้วนำแสง อย่างไรก็ตามในการจะทำเช่นที่ว่าแอมพลิฟายเออร์แต่ละชั้นจะต้องเพิ่มองค์ประกอบของ Amplified Spontaneous Emission (ASE) สัญญาณรบกวน (noise) และทำให้การลดทอนโอเอสเอ็นอาร์มากขึ้นไปอีก ยิ่งไปกว่านั้นแอมพลิฟายเออร์ทุกตัวขยายสัญญาณรบกวนที่ปรากฏอยู่แล้วด้วย ให้สังเกตว่าสัญญาณรบกวนนี้แทรกแซงอยู่ทั่วไปตลอดทั้งสเปกตรัมและแทบจะเป็นไปไม่ได้ที่จะเอาออกไป ดังนั้นจึงเป็นเรื่องหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะคิดหาวิธีที่จะคำนวณ โอเอสเอ็นอาร์ (output) ที่จุดปลายของระบบที่มีการขยายสัญญาณ  $N$  ชั้นและหาว่ามีค่า  $N$  ที่สมเหตุสมผลหรือไม่

ในการออกแบบโดยใช้โอเอสเอ็นอาร์นั้นต้องให้แน่ใจว่าโอเอสเอ็นอาร์ของชั้นสุดท้ายนั้นตรงกันกับข้อกำหนดโอเอสเอ็นอาร์ของระบบและทำให้เป็นไปตามข้อกำหนด BER ด้วย ในการทำให้ระบบได้ BER ค่าที่ต้องการจึงเป็นเรื่องจำเป็นที่จะต้องออกแบบระบบโอเอสเอ็นอาร์ให้ตรงตามข้อกำหนด



รูปที่ 2.16 ระบบ DWDM ที่มีการขยายแบบหลายชั้นที่นำมาใช้ใน Point-to-Point topology

โอเอสเอ็นอาร์ ของแต่ละชั้นแสดงในสมการ 2.11

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

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

โอเอสเอ็นอาร์ ทั้งหมดของระบบสามารถพิจารณาได้จากวิธีเศษส่วนกลับและแสดงในสมการ 2.12

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

สำหรับระบบที่มี N ชั้น ผลรวมจะเป็นไปตามสมการ 2.12

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

การวิเคราะห์ในรายละเอียดเล็กน้อยทำให้ได้สมการของโอเอสเอ็นอาร์ที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้นสำหรับ gain ของแอมพลิฟายเออร์ตัวเดียว โอเอสเอ็นอาร์จะแสดงได้ในสมการ 2.14

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

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

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

ในสมการ 2.15  $N_2$  คือจำนวนของอิเล็กตรอนในสถานะที่สูงกว่าและ  $N_1$  คือจำนวนของอิเล็กตรอนในสถานะต่ำกว่า

Population inversion parameter ยังแสดงในสมการ 2.16 อีกด้วย

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

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

$$OSNR_{final} = \frac{P_{in}}{NF\Gamma hr \nabla f \cdot N} \quad (2.17)$$

หาค่าถือการริเริ่มฐาน 10 เราจะได้สมการ 2.18

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

จากหัวข้อก่อนหน้านี้ เราได้  $\nabla f = 0.1$  nm หรือ 12.5 GHz แทนค่าลงไป จะได้สมการ 2.19

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

มีข้อสมมติดังต่อไปนี้

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

#### 2.6.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับ Margin

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

พิจารณาโหนดสองโหนดแต่ละโหนดนั้นติดตั้ง AWGs (loss = 5dB) และ switching fabric (loss = 3 dB) นอกเหนือไปจากอุปกรณ์เชื่อมต่อ [connector loss (2 dB)] ถ้าระยะทางมีค่าเท่ากับ 50 กิโลเมตรและเป็นโหนด ( $\alpha = 0.2$  dB/km) การสูญเสียรวมเนื่องจากสื่อสัญญาณมีค่าเท่ากับ 10 dB ( $.2 \times 50$ ) อย่างไรก็ตามที่แต่ละโหนดค่าการสูญเสียเท่ากับ  $5+5+3+2$  หรือ 15 dB กล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าการสูญเสียที่โหนดนั้นสามารถมีค่าสูงกว่าได้เมื่อเทียบกับการสูญเสียในสื่อสัญญาณ สิ่งนี้กระทบต่อการออกแบบระบบและค่าโอเอสเอ็นอาร์เช่นกัน ผลกระทบนั้นเป็นทางอ้อมในลักษณะที่ว่ากำลังขาออกจากโหนดถูกกระทบเนื่องมาจากการสูญเสียดังกล่าวซึ่งมีผลต่อโอเอสเอ็นอาร์ต่อไปอีกเนื่องจากสมการ 2.19

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

ตาราง 2.4 Insertion loss และ loss อื่น ๆ สำหรับการใช้งานที่ 1550nm

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

ตาราง 2.5 แสดงข้อกำหนดเกี่ยวกับ margin สำหรับการออกแบบที่ดี ค่า margin เหล่านี้ยึดติดกับการเปลี่ยนแปลง optical signal budgeting โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับ dynamic โดยปกติ

จะเลือก margin โดยการหาค่าชดเชยของการอ่านที่แสดงจำนวนเหตุการณ์แบบ discrete ที่ครอบคลุม sample space ทั้งหมดของการออกแบบสัญญาณแสง

ตาราง 2.5 ข้อกำหนดเกี่ยวกับ margin

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

## บทที่ 3

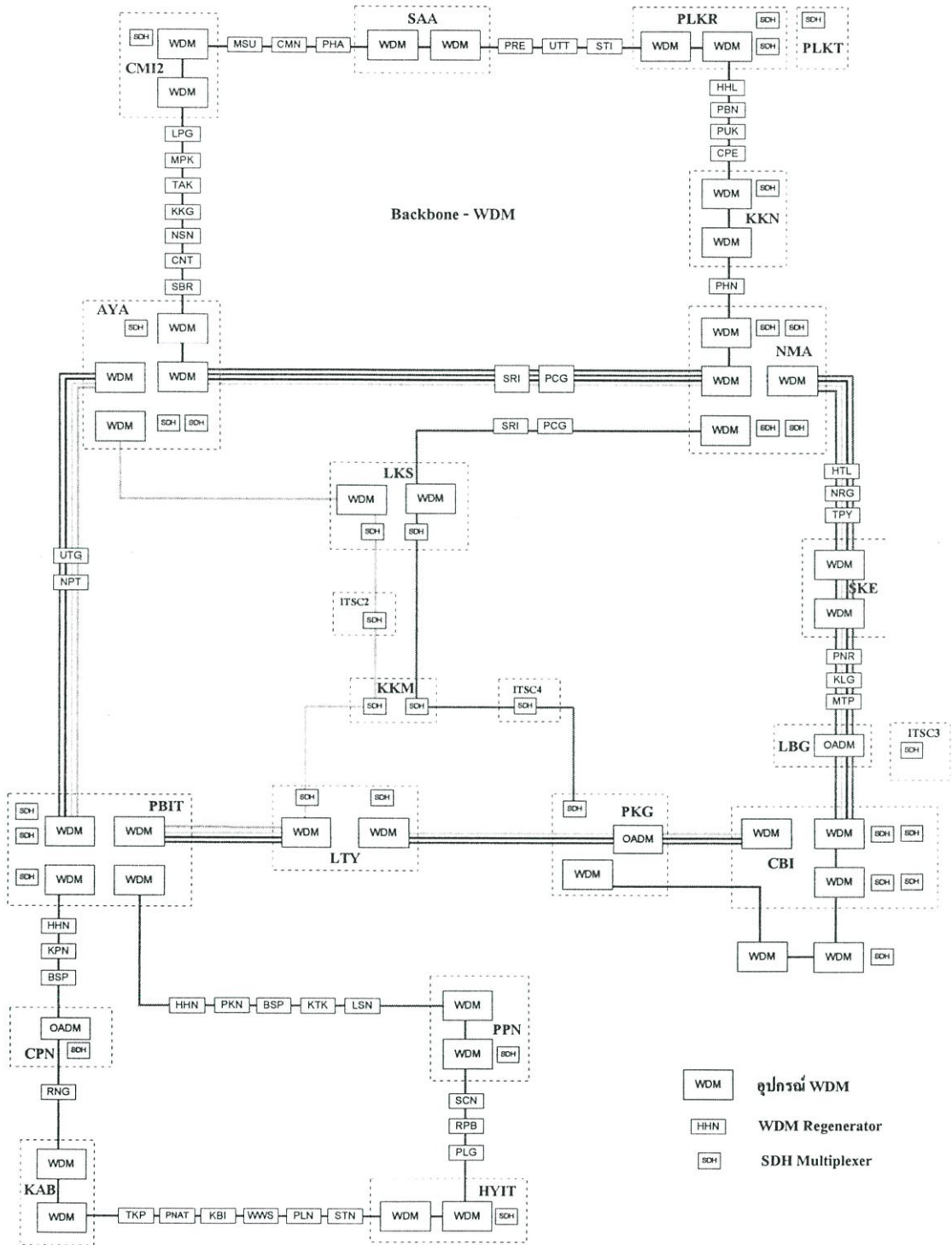
# โครงสร้างของโครงข่ายหลัก

ในบทนี้จะนำเสนอลักษณะการติดตั้งโครงสร้างของโครงข่ายหลักที่ใช้ในการศึกษา หลักการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ วิธีการศึกษาเรื่องกำหนดเส้นทางของโครงข่ายหลัก ทางตรง

### 3.1 โครงสร้างของโครงข่ายหลัก

โครงข่ายหลักที่ใช้ในการทดสอบนี้ ถูกออกแบบให้สามารถรองรับทราฟฟิกได้ครอบคลุมในทุก ๆ ภาคของประเทศไทยโดยใช้ระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นของบริษัทอัลคาเทล รุ่น 1686WM [11] เป็นอุปกรณ์หลักในการเชื่อมโยงโครงข่ายซึ่งถูกแบ่งออกทั้งหมด 18 ส่วน (Section) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยระยะทางและจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละส่วนจะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของแต่ละส่วนเช่น จำนวนสถานีฐานที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้ จำนวนความยาวคลื่นที่ต้องการใช้ เป็นต้น โดย 15 โหนดที่เป็นอุปกรณ์ WDM มีชื่อย่อในแต่ละโหนดหมายถึง

CMI2	หมายถึง เชียงใหม่
SAA	หมายถึง สว
PLKR	หมายถึง พิษณุโลก
KKN	หมายถึง ขอนแก่น
NMA	หมายถึง นครราชสีมา
AYA	หมายถึง อุดรธานี
LKS	หมายถึง หล่มสัก
SKE	หมายถึง สระแก้ว
CBI	หมายถึง ชลบุรี
PKG	หมายถึง พระโขนง
LTY	หมายถึง ลาดหญ้า
PBIT	หมายถึง เพชรบุรี
PPN	หมายถึง พุนพิน
HYIT	หมายถึง หาดใหญ่
KAB	หมายถึง คุระบุรี



รูปที่ 3.1 โครงข่ายหลักที่ใช้ในการทดสอบ

โครงข่ายหลักจะถูกแบ่งออกเป็น 6 Loop ครอบคลุมในส่วนภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 Loop ในส่วนภาคกลาง 2 Loop และในส่วนภาคใต้ตอนบนและตอนล่าง 2 Loop โดยการเชื่อมโยงของทุก ๆ Loop จะเชื่อมโยงด้วยระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

รายละเอียดของสถานีที่ติดตั้งอุปกรณ์ ระยะทางระหว่างสถานี ค่าการลดทอนของแต่ละช่วง (span) แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดการเชื่อมโยงของแต่ละส่วน (Section)

Section No.	Station			Distance (km)	Fiber Loss (dB/km)	Loss (dB)
	A	-	B			
1	CMI2	-	MSU	142.70	0.2525	36.0318
(16λ)	MSU	-	PHA	95.40	0.2525	24.0885
	PHA	-	CMN	134.28	0.2525	33.9057
	CMN	-	SAA	95.81	0.2525	24.1920
2	SAA	-	PRE	95.40	0.2525	24.0885
(16λ)	PRE	-	UTI	85.00	0.2525	21.4625
	UTI	-	STI	109.72	0.2525	27.7043
	STI	-	PLKR	61.92	0.2525	15.6348
3	PLKR	-	HHL	77.25	0.2525	19.5056
(16λ)	HHL	-	PBN	91.52	0.2525	23.1088
	PBN	-	PUK	83.47	0.2525	21.0762
	PUK	-	CPE	71.26	0.2525	17.9932
	CPE	-	KKN	84.56	0.2525	21.3514
4	KKN	-	PHN	79.68	0.2525	20.1192
(16λ)	PHN	-	NMA	119.96	0.2525	30.2899
5	AYA	-	SRI	97.20	0.2525	24.5430
(32λ)	SRI	-	PCG	66.30	0.2525	16.7408
	PCG	-	NMA	87.50	0.2525	22.0938
6 (16λ)	AYA	-	LKS	62.11	0.2525	15.6828
7	LKS	-	SRI	93.40	0.2525	23.5835
(32λ)	SRI	-	PCG	66.30	0.2525	16.7408
	PCG	-	NMA	87.50	0.2525	22.0938
8	NMA	-	HTL	71.73	0.2525	18.1118
(32λ)	HTL	-	NRG	120.05	0.2525	30.3126
	NRG	-	TPY	93.13	0.2525	23.5153
	TPY	-	SKE	102.59	0.2525	25.9040

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

Section No.	Station			Distance (km)	Fiber Loss (dB/km)	Loss (dB)
	A	-	B			
9	SKE	-	PNR	117.13	0.2525	29.5753
(32λ)	PNR	-	KLG	108.66	0.2525	27.4367
	KLG	-	MTP	66.55	0.2525	16.8039
	MTP	-	LBG	89.6	0.2525	22.6240
	LBG	-	CBIT	34.72	0.2525	8.7668
10	AYA	-	SBR	82.85	0.2525	20.9196
(16λ)	SBR	-	CNT	58.31	0.2525	14.7233
	CNT	-	NSN	103.13	0.2525	26.0403
	NSN	-	KKG	78.00	0.2525	19.6950
	KKG	-	TAK	116.86	0.2525	29.5072
	TAK	-	MPK	75.93	0.2525	19.1723
	MPK	-	LPG	117.97	0.2525	29.7874
	LPG	-	CMI II	112.34	0.2525	28.3659
11	PBIT	-	NPT	105.12	0.2525	26.5428
(32λ)	NPT	-	UTG	133.89	0.2525	33.8072
	UTG	-	AYA	96.43	0.2525	24.3486
12 (32λ)	CBIT	-	PKG	77.05	0.2525	19.4551
13 (32λ)	PKG	-	LTY	20.80	0.2525	5.2520
14 (32λ)	LTY	-	PBIT	137.85	0.2525	34.8071
15	PBIT	-	HHN	67.69	0.2525	17.0917
(16λ)	HHN	-	PKN	96.75	0.2525	24.4294
	PKN	-	BSP	88.35	0.2525	22.3084
	BSP	-	KTK	72.00	0.2525	18.1800
	KTK	-	LSN	127.27	0.2525	32.1357
	LSN	-	PPN	111.74	0.2525	28.2144

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดการเชื่อมโยงของแต่ละส่วน (Section) (ต่อ)

Section No.	Station			Distance (km)	Fiber Loss (dB/km)	Loss (dB)
	A	-	B			
16	PPN	-	SCN	87.31	0.2525	22.0458
(16λ)	SCN	-	RPB	106.19	0.2525	26.8130
	RPB	-	PLG	76.56	0.2525	19.3314
	PLG	-	HYIT	102.21	0.2525	25.8080
17	HYIT	-	STN	101.62	0.2525	25.6591
(16λ)	STN	-	PLN	110.68	0.2525	27.9467
	PLN	-	WWS	106.98	0.2525	27.0125
	WWS	-	KBI	86.14	0.2525	21.7504
	KBI	-	PNAT	94.30	0.2525	23.8108
	PNAT	-	TKP	63.55	0.2525	16.0464
	TKP	-	KAB	56.66	0.2525	14.3067
18	KAB	-	RNG	116.9	0.2525	29.5173
(16λ)	RNG	-	CPN	123.12	0.2525	31.0878
	CPN	-	BSP	116.53	0.2525	29.4238
	BSP	-	PKN	89.96	0.2525	22.7149
	PKN	-	HHN	95.65	0.2525	24.1516
	HHN	-	PBIT	67.24	0.2525	16.9781

### 3.2 อุปกรณ์การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น

การเชื่อมโยงในหนึ่งส่วน (section) หลัก ๆ จะมีส่วนที่เป็นเทอร์มินัล (Terminal: LT) A เทอร์มินัล (Terminal: LT) B และ In-line amplifier (ILA) ในเทอร์มินัล A หรือ B จะประกอบด้วย อุปกรณ์หลัก ๆ ได้แก่ มัลติเพล็กซ์เซอร์ (Multiplexers) ดีมัลติเพล็กซ์เซอร์ (Demultiplexers) เอกซ์แพนชัน (Expansion) บูสเตอร์ (Booster) และพรีแอมพลิฟายเออร์ (Preamplifier) ส่วนอุปกรณ์หลัก ๆ ใน ILA ได้แก่ ILA E-W และ ILA W-E จำนวนช่วง (Span) N ของการเชื่อมโยงลิงก์ (Link) จะสัมพันธ์กับจำนวนของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ต้องการใช้ในลิงก์โดยในหนึ่ง in-line amplifier จะแบ่งออกเป็น 2 span ดังนั้นจำนวนของของแอมพลิฟายเออร์เท่ากับ  $N+1 = 1$  booster (at transmitter) +  $N-1$  in-line amplifier + 1 preamplifier (ที่ด้านรับ) อุปสรรคในการเพิ่มกำลังส่งใน

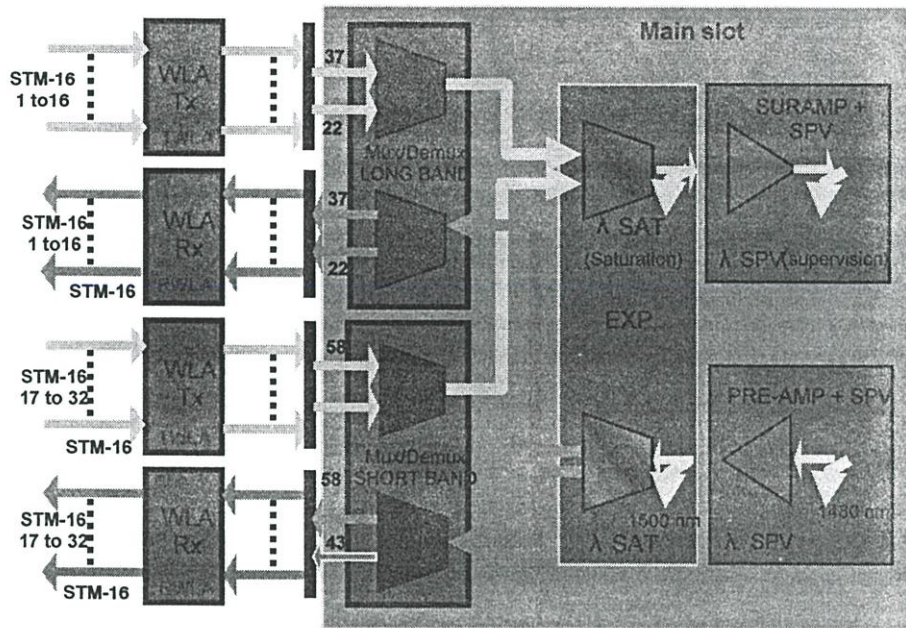
ช่องสัญญาณของแอมพลิฟายผ่านไปยัง fiber span ได้แก่การขยายสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเองจากธรรมชาติของเส้นใยแก้ว (Amplified Spontaneous Emission: ASE) บนแบนด์วิดท์ของสัญญาณ ซึ่งเป็นสาเหตุให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง (Degrading transmission) และจำกัดจำนวนของแอมพลิฟายที่ต่อกันแบบขั้นบันได (cascade) ในเส้นทางเชื่อมโยง [11]

### 3.2.1 อุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ (MUX) และดีมัลติเพล็กซ์ (DMUX)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการรวมและแยกความยาวคลื่น โดยใช้อุปกรณ์ชนิด passive wavelength sensitive device เป็นอุปกรณ์พื้นฐานในการทำหน้าที่เลือกความยาวคลื่นที่ใช้ในการรับและส่งสัญญาณ และทำหน้าที่ในการบล็อกความยาวคลื่นเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนซึ่งกันและกัน โดยอุปกรณ์ MUX/DMUX ที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นแบบ 16 และ 32 ช่องสัญญาณ (channel) โดยอุปกรณ์สามารถทำการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นได้ 16 และ 32 ช่องสัญญาณย่อย (tributaries) ในช่วงความยาวคลื่นแถบสีแดง (red band) และ 16 และ 32 ช่องสัญญาณย่อยในช่วงความยาวคลื่นแถบสีน้ำเงิน (blue band) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ของอุปกรณ์ชนิด 32 ช่อง สัญญาณ 1 ช่องสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วยช่องสัญญาณย่อยทั้งหมดของทั้ง red band และ blue band จะถูกรวมเข้าด้วยกันที่ expansion unit และในส่วนนี้จะทำการใส่ความยาวคลื่นที่ทำหน้าที่ในการควบคุมความสมดุลระดับกำลังงานของทุก ๆ ความยาวคลื่น เรียกว่า saturation wavelength เข้าไประหว่าง red band และ blue band หลังจากนั้นสัญญาณที่ออกจาก expansion unit จะถูกส่งไปที่ booster amplifier เพื่อทำการใส่สัญญาณที่ใช้ในการควบคุม (Optical Supervision Channel: OSC) และทำการขยายสัญญาณในการส่งออกไปยังสถานีปลายทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสงและในทิศทางกลับกันสัญญาณจะถูกรับจากเส้นใยแก้วนำแสงผ่าน preamplifier และเข้าสู่ expansion unit ซึ่งจะแยก red band และ blue band ออกจากกันและส่งไปยัง DMUX เพื่อทำการแยกออกเป็นแต่ละช่องสัญญาณย่อยต่อไป [11]

### 3.2.2 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนความยาวคลื่น (Wavelength Adaptation: WLA)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนความยาวคลื่นจากแถบความยาวคลื่น 1310 nm หรือ 1550 nm (black and white) ให้เป็นความยาวคลื่นต่าง ๆ ตามที่ต้องการในสเปกตัมของแสงตามมาตรฐาน ITU-T G.692 ซึ่งเป็นการแนะนำการใช้ colored aggregate หรือการใช้ wavelength adaptation (transponders) โดยมีระยะห่างระหว่างความยาวคลื่น (wavelength spacing) เท่ากับ 100 GHz สำหรับอุปกรณ์ดับเบิลยูดีเอ็ม ชนิด 32 channel และ 200 GHz สำหรับอุปกรณ์การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น ชนิด 16 channel ตารางที่ 3.2 เป็นการแสดงค่าความยาวคลื่น ความถี่และระยะห่างระหว่างความยาวคลื่นของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบโดยในการทดสอบนี้จะใช้อุปกรณ์ WLA\_TS16\_1 (short-haul receive interface WDM transmit interface) และ WLA\_RS16\_1 (WDM receive interface short-haul transmit interface) เปรียบเทียบได้กับ S-16.1 interface ที่กำหนดไว้ใน ITU-T G.957 โดยมีความเร็วในการส่ง 2.5 Gbit/s และมีค่า chromatic dispersion เท่ากับ 12800 ps/nm



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ WDM MUX AND DMUX

ตารางที่ 3.2 Channel and wavelength spacing

channel	lambda(nm)	frequency(THz)	channel	lambda(nm)	Frequency(THz)
1	1559.79	192.2	2	1558.98	192.3
3	1558.71	192.4	4	1557.36	192.5
5	1556.55	192.6	6	1555.75	192.7
7	1554.94	192.8	8	1554.13	192.9
9	1553.33	193.0	10	1552.52	193.1
11	1551.72	193.2	12	1550.92	193.3
13	1550.12	193.4	14	1549.32	193.5
15	1548.51	193.6	16	1547.72	193.7
17	1542.94	194.3	18	1542.14	194.4
19	1541.35	194.5	20	1540.56	194.6
21	1539.77	194.7	22	1538.98	194.8
23	1538.61	194.9	24	1537.40	195.0
25	1536.61	195.1	26	1535.82	195.2
27	1535.04	195.3	28	1534.25	195.4
29	1533.47	195.5	30	1532.68	195.6
31	1531.90	195.7	32	1531.12	195.8

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

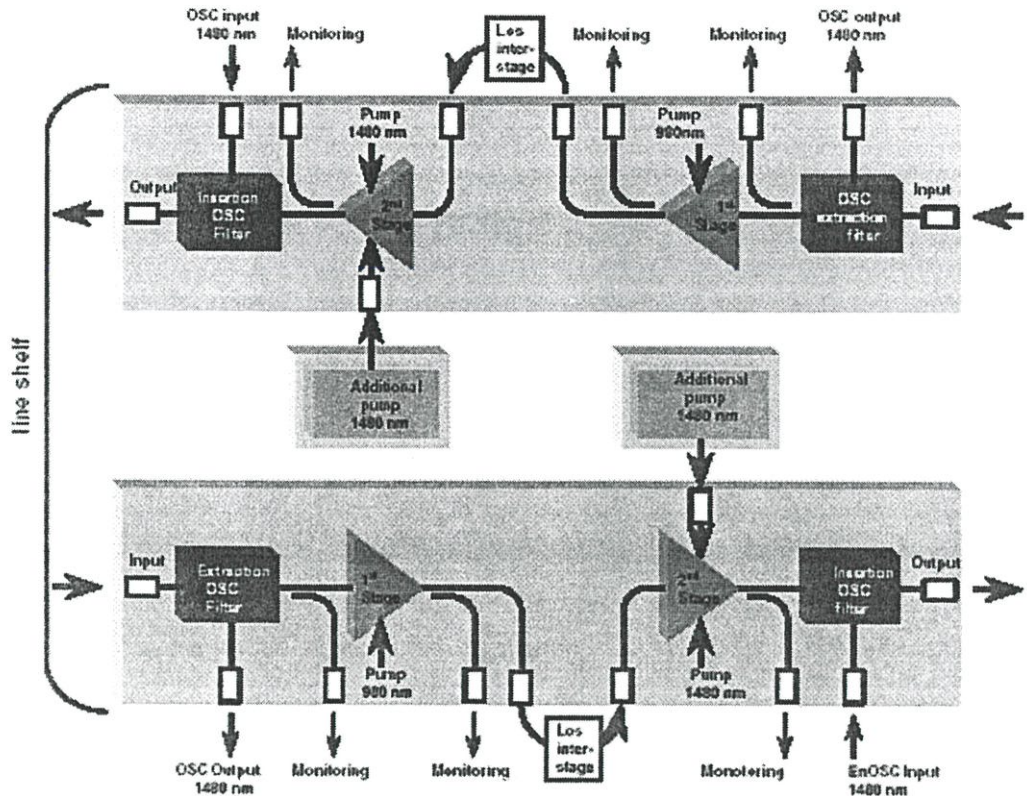
เป็นอุปกรณ์ออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ใช้ในการส่งสัญญาณโดยไม่ต้องใช้การทวนสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical regeneration) ในการส่งสัญญาณไปบนเส้นใยแก้วที่มีระยะทางไกล โดยอุปกรณ์ทั้ง 3 แบบมีความแตกต่างกันในการใช้งานดังนี้

- a). Booster จะใช้ในส่วนที่เป็นเทอร์มินัล
- b). Pre-amplifier จะใช้ในส่วนที่เป็นเทอร์มินัล
- c). In-line amplifier จะใช้ในส่วนที่เป็นสถานีทวนสัญญาณ

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

1. Double-stage optical amplifier with mid-stage access แบ่งออกเป็น 2 ส่วนในส่วนแรกเรียกว่า first-stage ถูกออกแบบให้มีหน้าที่ขยายสัญญาณ โดยให้มีการขยายสัญญาณรบกวน (noise) ให้น้อยที่สุดโดยทำการ pump ที่ความยาวคลื่น 980-nm สามารถปรับปรุงค่าของ first-stage noise figure ให้ดีขึ้น 2 dB ในส่วนที่สองเรียกว่า Second-stage ออกแบบให้มีการ pump ที่ความยาวคลื่น 1489-nm ซึ่งผลจากการขยายนี้ทำให้สามารถจัดเตรียมกำลังส่งออกในย่านจาก +14 dBm ถึง +20 dBm ด้วย noise figure ที่น้อยกว่า 5 dB

อัตราการขยายสัญญาณของแอมพลิฟายเออร์ของแต่ละช่องสัญญาณจะมีความเที่ยงตรงที่ไม่เท่ากันทุกช่องสัญญาณ ซึ่งความสม่ำเสมอของ EDFA passband จะเป็นจุดวิกฤตที่สำคัญของระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นที่ใช้แอมพลิฟายเออร์ที่ต่อกันแบบขั้นบันได (cascaded amplifier) การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในการขยายสัญญาณระหว่างช่องสัญญาณในสแตจสามารถเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากของกำลังงานที่แตกต่างกันระหว่างช่องสัญญาณที่เอาท์พุทของลูกโซ่ (chain) ตัวอย่างเช่น ถ้าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขยายระหว่างช่องสัญญาณที่แย่ที่สุดกับช่องสัญญาณที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 1 dB ที่แต่ละแอมพลิฟายเออร์หลังจากผ่านไป 10 ขั้นบันได (cascades) จะทำให้ความเปลี่ยนแปลงระหว่างช่องสัญญาณจะแตกต่างถึง 10 dB ด้วยสาเหตุนี้จะทำให้ช่องสัญญาณที่แย่ที่สุดมีค่าของโอเอสเอ็นอาร์ ที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ดังนั้นในการติดตั้งระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น การปรับแต่งอุปกรณ์ให้มีค่าตัวแปรต่าง ๆ ใกล้เคียง สม่ำเสมอกันมากที่สุดจะทำให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น [11]



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของ Double – stage amplifier

2. คุณลักษณะทางเทคนิคของ In-line amplifier / preamplifier / booster ของระบบ การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

2.1 แอมพลิฟายเออร์ที่ใช้เป็นชนิด EDFA (Erbium – Doped Fiber Amplifier)

2.2 กำลังงานขาออก (Output power) ของอุปกรณ์ที่ใช้มีหลายระดับคือ +14 dBm +17 dBm และ +20 dBm โดยค่ากำลังงานต่อช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับจำนวนของช่องสัญญาณที่ใช้

2.3 ย่านความยาวคลื่นที่ใช้คือ 1530 – 1560 nm

2.4 ค่าของ Polarization Mode Dispersion (PMD): 0.5 dB

2.5 ค่าของ Polarization Dependent Loss (PDL): 0.5 dB

2.6 ย่านกำลังงานขาเข้า (Input power range): -24 ถึง -4 dBm สำหรับแอมพลิฟายเออร์ชนิด Double-stage

2.7 ค่าของ Bandwidth flatness = 1.5 dBm

2.8 ค่าของ Noise figure: 6 dB สำหรับแอมพลิฟายเออร์ชนิด Double-stage

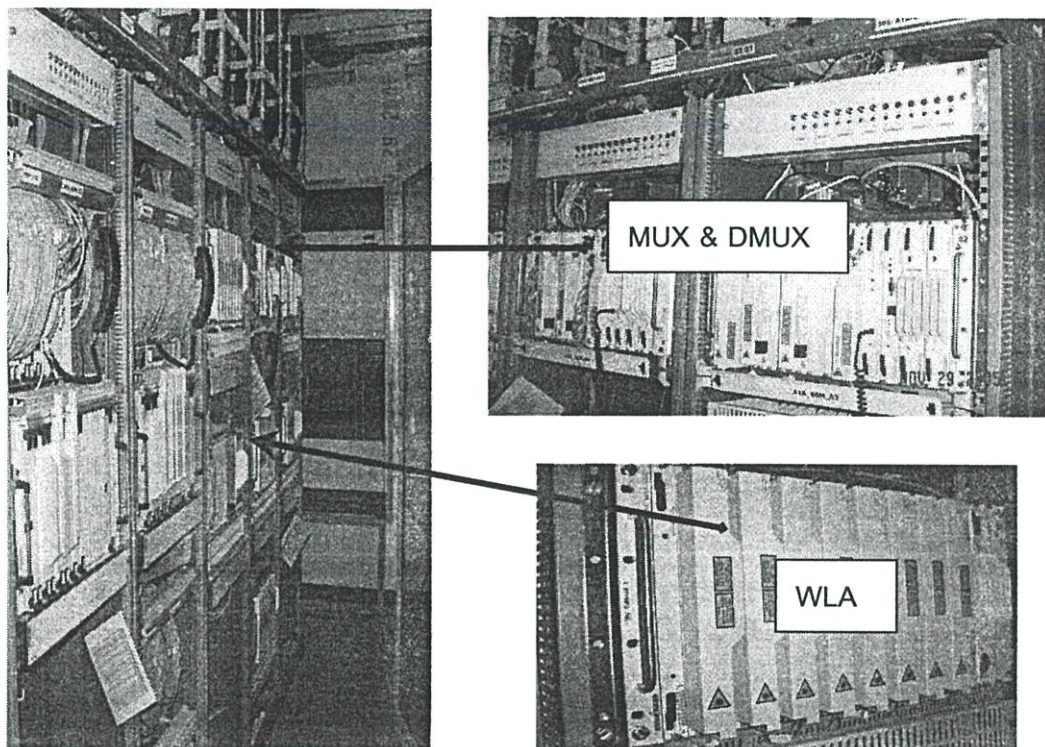
2.9 ค่าของ Max accommodated loss (ในกรณีที่ใช้อุปกรณ์ชนิด Double-stage): 9 dB

2.10 ชนิดของอุปกรณ์เชื่อมต่อ (connector) ที่ใช้ได้แก่ FC/PC และ SC

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

3. Saturation wavelength คุณลักษณะของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์อาจจะขึ้นอยู่กับผลรวมของอัตราการส่งบิต (bit rate) สาเหตุเนื่องมาจากผลรวมของ power optical จะขึ้นอยู่กับจำนวนช่องสัญญาณในการส่ง ตัวอย่างเช่น กำลังงานขาออก (output power) ของ multiplexing stage มีการเปลี่ยนแปลงของระดับกำลังงาน 3 dB ทุกครั้งที่มีจำนวนของความยาวคลื่นเป็นเท่าตัว ดังนั้นถ้ากำลังงานขาเข้า (input power) ของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการขยายสัญญาณจะทำให้ gain flatness และกำลังงานต่อช่องสัญญาณที่เอาท์พุทของแอมพลิฟายเออร์มีการเปลี่ยนด้วยโดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์สำหรับออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ใช้การควบคุมการขยาย (gain-controller) นั้นกำลังงานขาออกของแอมพลิฟายเออร์จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นและสำหรับ ออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ที่ใช้การควบคุมกำลังงานส่ง (output power control) อัตราการขยายจะถูกลดลงเนื่องจากจำนวนของช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นและทำให้กำลังงานต่อช่องสัญญาณลดลงด้วยซึ่งสาเหตุเหล่านี้จะทำให้คุณภาพในการส่งสัญญาณลดลงได้ ดังนั้นระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นจำเป็นจะต้องมีการวางแผนการใช้อุปกรณ์อย่างมีประสิทธิภาพที่สามารถควบคุมการเปลี่ยนของ optical power ที่อาจเกิดขึ้นเหล่านี้ได้ การใช้ saturation wavelength เป็นวิธีการในการควบคุมและจัดการกับการเปลี่ยนแปลงของ optical power ในเส้นทางเชื่อมโยงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนความยาวคลื่น ลักษณะเฉพาะของ saturation wavelength ก็คือคุณสมบัติที่เรียกว่า optical tank ซึ่งจะช่วยชดเชยทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานที่แปรผันตามความยาวคลื่น ในกรณีถ้าจำนวนช่องสัญญาณมีการเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัวอย่างทันทีทันใดกำลังงานขาออกของ saturation wavelength จะลดลง 3 dB เพื่อรักษากำลังงานขาออกของ multiplexing stage ให้คงที่ ดังนั้นกำลังงานขาออกของออปติคัลแอมพลิฟายเออร์จะมีค่าคงที่ถึงแม้ว่าจำนวนของความยาวคลื่นที่เข้ามาและ operating point จะมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องมาจากการควบคุมกำลังงานขาออกซึ่งจะเป็นผลให้การขยายยังคงมีค่าคงที่และ optical power ต่อช่องสัญญาณยังคงมีค่าคงที่อีกด้วย การใช้ saturation wavelength จะทำให้การทำงานมีความสะดวกขึ้น รวดเร็วขึ้นและมีความน่าเชื่อถือในการ upgrade ช่องสัญญาณ โดยที่ผู้ใช้งานสามารถทำงานได้ที่สถานีที่เป็นเทอร์มินัลและใส่

ช่องสัญญาณใหม่โดยปราศจากทุก ๆ สาเหตุที่ไปรบกวนกราฟฟิกที่มีอยู่ก่อนแล้ว (saturation wavelength) จะทำงานอยู่ที่ย่านความยาวคลื่น 1545 nm



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นอัลคาเทล รุ่น 1686WM ชนิด 32 ความยาวคลื่น

### 3.3 วิธีการกำหนดเส้นทางในโครงข่าย (Routing Algorithm in Network)

แนวความคิดหลักของการใช้วงจรเสมือนก็เพื่อต้องการหลีกเลี่ยงการค้นหาเส้นทางเดินข้อมูลในทุก ๆ ครั้งที่ส่งแพ็กเก็ต ดังนั้นตั้งแต่ตอนเริ่มต้นการติดต่อ โปรแกรมในชั้นควบคุมเครือข่ายจะต้องจัดการกำหนดเส้นทางเดินสำหรับการรับ-ส่งข้อมูลจากผู้ส่ง ไปยังผู้รับขึ้นมาใช้งาน จากนั้นข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งจากผู้ส่งไปยังผู้รับ โดยใช้เส้นทางนี้ตลอดช่วงของการสื่อสาร เมื่อการติดต่อสิ้นสุดลงเส้นทางนี้จะถูกยกเลิก การกำหนดเส้นทางเดินข้อมูลจึงเป็นการกำหนดขึ้นมาใช้งานเป็นการชั่วคราวซึ่งมีลักษณะการทำงานแบบเดียวกันกับวิธีการที่ใช้ในระบบโทรศัพท์ ส่วนที่เรียกว่าเป็นเส้นทางเสมือนนั้นก็เนื่องจากว่าเส้นทางสื่อสารชั่วคราวนี้จะไม่มีการกำหนดเป็นที่แน่นอน การกำหนดเส้นทางเดินข้อมูลแต่ละครั้งจึงไม่มีการรับประกันว่าจะจะเป็นเส้นทางเดิมที่เคยใช้ในการติดต่อครั้งที่แล้วมา

### 3.3.1 อัลกอริทึมสำหรับเลือกทางเดินข้อมูล (Routing Algorithms)

หน้าที่หลักของชั้นควบคุมเครือข่ายคือการจัดส่งแพ็กเก็ตเกิดจากเครื่องผู้ส่งไปยังเครื่องผู้รับ ในระบบเครือข่ายย่อยส่วนมากแพ็กเก็ตจะต้องถูก “รับแล้วส่งต่อ (hop)” หลายครั้งกว่าจะถึงจุดหมายปลายทาง ยกเว้นชั้นควบคุมเครือข่ายของระบบที่ใช้การส่งข้อมูลแบบกระจายที่ไม่ต้องจัดการปัญหานี้ แต่ก็ยังคงเกิดปัญหาค้างได้ถ้าผู้ส่งและผู้รับข้อมูลไม่ได้อยู่ในเครือข่ายเดียวกัน ดังนั้นอัลกอริทึมและโครงสร้างข้อมูลที่ทำหน้าที่เลือกเส้นทางเดินข้อมูลจึงเป็นส่วนประกอบหลักในการออกแบบชั้นควบคุมเครือข่าย

อัลกอริทึมสำหรับเลือกทางเดินข้อมูลทำหน้าที่ตัดสินใจให้โหนดว่าแพ็กเก็ตที่รับเข้ามาควรส่งต่อไปให้โหนดตัวใดเป็นลำดับต่อไป ถ้าเครือข่ายย่อยใช้ดาต้าแกรมในการส่งข้อมูลภายในแล้ว การตกลงใจของแต่ละโหนดตัวใดเป็นลำดับต่อไป ถ้าเครือข่ายย่อยใช้ดาต้าแกรมตัวใหม่เข้ามาเพราะทางเลือกที่ดีที่สุด (สำหรับปลายทางเดิม) อาจเปลี่ยนแปลงไปแล้ว ถ้าเครือข่ายย่อยใช้วงจรเสมือนในการส่งข้อมูลการเลือกเส้นทางเดินตลอดทั้งเครือข่ายจะเกิดขึ้นเพียงครั้งเดียว ในช่วงการจัดตั้งช่วงสื่อสาร แพ็กเก็ตที่ส่งมาในลำดับหลังจะถูกส่งไปยังโหนดที่แพ็กเก็ตแรก ๆ ถูกส่งไปเสมอ วิธีการเลือกเส้นทางเดินแบบนี้บางครั้งเรียกว่า “เซสชันเรอติง (session routing)” เนื่องจากเส้นทางเดินจะคงเดิมตลอดช่วงเวลาสื่อสารที่กำหนดขึ้น

ไม่ว่าเส้นทางเดินส่งผ่านข้อมูลจะได้รับการกำหนดขึ้นมาด้วยอัลกอริทึมใด ๆ ก็ตามควรจะต้องมีคุณลักษณะหกประการ คือ ความถูกต้อง (correctness) ความง่าย (simplicity) ความคงทน (robustness) ความแน่นอน (stability) ความเป็นธรรม (fairness) และความเหมาะสม (optimality) [15] ความถูกต้องและความง่ายเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญสองข้อแรกที่ทุกอัลกอริทึมจะต้องมีความคงทนของอัลกอริทึมสามารถพิจารณาได้จากการที่เครือข่ายใหม่ที่เพิ่งได้รับการจัดตั้งขึ้นมาใช้งานย่อมมีความต้องการที่ให้บริการคงอยู่โดยไม่ประสบปัญหาความล้มเหลวในระดับเครือข่าย แต่ความล้มเหลวของอุปกรณ์หรือโปรแกรมบางส่วนเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ตลอดเวลาสำหรับทุก ๆ ระบบฯ และไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เช่น โฮสต์ โหนด และสายสื่อสารอาจเกิดการเสียหายเมื่อใดก็ได้ซึ่งจะต้องได้รับการซ่อมแซมอยู่เสมอ หรือการจัดโครงสร้างของเครือข่าย (network topology) อาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน อัลกอริทึมสำหรับเลือกทางเดินข้อมูลจำเป็นจะต้องแก้ไขหรือสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพปัญหาและการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ได้ เมื่อเกิดปัญหาค้างโฮสต์ส่วนใหญ่จะต้องสามารถทำงานต่อไปได้โดยไม่ต้องเข้ามามีส่วนร่วมในการแก้ไขหรือจัดการกับปัญหาที่เกิดขึ้น

ความแน่นอนก็เป็นส่วนสำคัญมากเช่นกัน อัลกอริทึมสำหรับเลือกทางเดินข้อมูลจำนวนไม่น้อยที่ไม่สามารถจัดการให้เครือข่ายเข้าสู่สถานะความสมดุลในการกระจายปริมาณข้อมูล ทำให้ระบบอยู่ในสภาวะที่เกิดความไม่แน่นอนในการสื่อสารข้อมูลในระดับสูงซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ

ความเป็นธรรม และความเหมาะสมเป็นสิ่งที่ผู้ใช้ทุกคนในทุกระบบต้องการอย่างไม่ต้องสงสัย แต่ไม่ว่าจะอย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะต้องมีผู้ที่ไม่ได้รับความเป็นธรรมอยู่บ้าง

ความเหมาะสมประการหนึ่งที่ทุกระบบต้องการคือ การลดเวลารอคอยโดยเฉลี่ยของแพ็กเก็ตเกิดในขณะที่จะเพิ่มอัตราสัมฤทธิ์ผล (throughput) ของระบบเครือข่ายก็เป็นที่พึงประสงค์เช่นกัน ความต้องการทั้งสองข้อนี้ขัดแย้งซึ่งกันและกันเนื่องจากการเพิ่มอัตราสัมฤทธิ์ผลของระบบต้องการให้แพ็กเก็ตเกิดข้อมูลมารอคอยอยู่ใน โหนดให้มากที่สุดเพื่อจะได้รักษาความต่อเนื่องในการส่งข้อมูลให้อยู่ในระดับสูงตลอดเวลา แต่การทำงานนี้กลับทำให้เวลารอคอยโดยเฉลี่ยของแต่ละแพ็กเก็ตสูงขึ้น เพื่อลดความขัดแย้งดังกล่าวเครือข่ายหลายระบบ ได้พยายามลดจำนวน โหนดที่ใช้เป็นตัวกลางลงไปให้มากที่สุด ทั้งนี้จะทำให้เวลารอคอยของแพ็กเก็ตเกิดลดลงในขณะที่ช่วยเพิ่มอัตราสัมฤทธิ์ผลของระบบได้ในเวลาเดียวกัน

อัลกอริทึมสำหรับเลือกทางเดินข้อมูลแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ พวกที่ปรับตัวได้ (adaptive algorithms) และพวกที่ไม่มีการปรับตัว (nonadaptive algorithms) พวกที่ไม่มีการปรับตัวจะไม่นำสภาวะของเครือข่าย เช่น ปริมาณข้อมูลในระบบ หรือ รูปแบบ โครงสร้างเครือข่ายเข้ามาใช้ในการพิจารณาเลือกทางเดินข้อมูล ทางเดินข้อมูลทุกเส้นทางจะมีการวางแผนไว้ล่วงหน้าและจัดส่งแผนนี้ไปให้กับ โหนดทุกตัวในระบบ บางครั้งเรียกว่า การเลือกทางเดินแบบสถิตย์ (static routing algorithms)

การเลือกทางเดินแบบมีการปรับตัวจะเปลี่ยนแปลงการตัดสินใจเพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมของระบบในขณะที่จะส่งข้อมูล อัลกอริทึมประเภทนี้จะแตกต่างกันตรงวิธีการให้ได้ว่าซึ่งข้อมูลเมื่อมีการเปลี่ยนเส้นทางและกรรมวิธีที่ใช้ในการวัดความเหมาะสมของแต่ละเส้นทาง บางครั้งเรียกว่า การเลือกทางเดินแบบพลวัต (Dynamic routing algorithms)

### 3.3.2 หลักการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด

หลักการพื้นฐานของการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด (Optimality principle) ที่ไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบเครือข่ายแบบใดกล่าวไว้ว่าถ้า โหนดหนึ่ง (จุด B) อยู่บนเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดระหว่างผู้ส่ง (จุด A) และผู้รับข้อมูล (จุด C) แล้ว เส้นทางนั้นจะเป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดระหว่าง โหนดนั้น (จุด B) กับผู้รับข้อมูล (จุด C) ด้วย ข้อความนี้สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้หลักการตรรกศาสตร์ธรรมดา คือ สมมติให้  $r_1$ ,  $r_2$  คือเส้นทางที่ดีที่สุดระหว่างจุด A กับจุด C ถ้า  $r_1$  คือเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดระหว่างจุด A กับจุด B แล้ว ให้  $r_2$  เป็นเส้นทางระหว่างจุด B กับจุด C ถ้ามีเส้นทางอื่นที่เหมาะสมกว่าเส้นทาง  $r_2$  ก็ควรจะนำมาใช้เป็นเส้นทางที่ดีที่สุดระหว่างจุด A กับจุด C ซึ่งขัดกับข้อสมมุติฐานที่ว่า  $r_1$ ,  $r_2$  คือเส้นทางที่ดีที่สุด ดังนั้นเส้นทาง  $r_2$  จึงต้องเป็นเส้นทางที่ดีที่สุดระหว่างจุด B และจุด C ด้วย

### 3.4 การเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-path Routing)

การเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นวิธีการที่ถูกนำไปใช้มากที่สุดแบบหนึ่ง หลักการทำงาน เริ่มต้นด้วยการสร้างรูปกราฟของระบบเครือข่ายย่อย โดยให้แต่ละโหนดในรูปกราฟแทนโหนดแต่ละตัวในเครือข่ายและให้เส้นเชื่อมโหนด (arc) แทนสายสื่อสารที่เชื่อมต่อระหว่างโหนด การเลือกเส้นทางเนินระหว่างโหนดคู่หนึ่งทำได้โดยการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในรูปกราฟ

นิยามของคำว่าเส้นทางที่สั้นที่สุดอาจมีได้หลายความหมาย เช่นการใช้จำนวนครั้งของการรับส่งข้อมูลหรือจำนวนเส้นเชื่อมในรูปกราฟเป็นหลัก

อีกวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้แทนการนับจำนวนเส้นเชื่อมหรือการวัดระยะทาง คือการกำหนดให้ตัวเลขบนเส้นเชื่อมแต่ละเส้นเป็นตัวเลขที่บอกจำนวนแพ็กเก็ตที่รอการจัดส่งและเวลารอคอยโดยเฉลี่ยที่คำนวณมาจากการรับ-ส่งแพ็กเก็ตมาตรฐาน ด้วยวิธีการนี้เส้นทางที่สั้นที่สุดจึงหมายถึงเส้นทางที่ส่งข้อมูลได้เร็วที่สุด

วิธีการที่นำมาใช้กับกรณีทั่วไปนั้นจะกำหนดให้ตัวเลขบนเส้นเชื่อมคือผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยมีระยะทาง ความเร็วในการส่งข้อมูล ปริมาณข้อมูล โดยเฉลี่ย ค่าใช้จ่าย ค่าเฉลี่ยมาตรฐานของจำนวนแพ็กเก็ตที่รอการจัดส่ง ระยะเวลาอคอย และอื่น ๆ เป็นตัวประกอบ การเปลี่ยนค่าความสำคัญของตัวประกอบเหล่านี้ทำให้แต่ละโหนดสามารถใช้อัลกอริทึมเดียวกันในการคำนวณแต่ให้ความสำคัญกับตัวประกอบไม่เหมือนกันได้

อัลกอริทึมในการเลือกกำหนดเส้นทางหลาย ๆ อัลกอริทึมนั้นต่างมีพื้นฐานในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด ซึ่งใช้ค่าเชื่อมโยงในการพิจารณา เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจให้พิจารณารูปที่ 3.5 ตัวอย่างโครงข่ายที่ประกอบด้วยค่าเชื่อมโยง (Link cost) โดยที่ค่าเชื่อมโยงนั้นจะเป็นค่าที่นำมาใช้พิจารณาตามแต่วัตถุประสงค์ที่เหมาะสมในแต่ละโครงข่าย ตัวอย่างเช่น

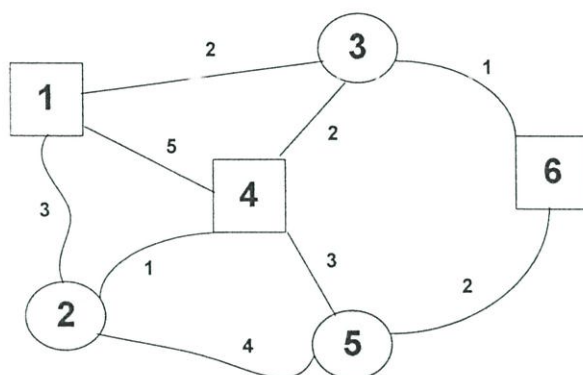
- $Cost \sim 1/capacity$  ค่าเชื่อมโยงที่เป็นส่วนกลับของค่าความจุของเส้นทาง โดยที่จะกำหนดให้ค่าเชื่อมโยงมีค่ามากในเส้นทางหรือลิงค์ที่มีค่าความจุน้อย โดยจุดประสงค์ต้องการส่งข้อมูลไปยังเส้นทางที่มีค่าความจุมากก่อน ถ้าแต่ละเส้นทางมีค่าเชื่อมโยงเท่ากันก็จะพิจารณาที่จำนวน hop ที่น้อยกว่าแทน

- $Cost \sim packet\ delay$  ค่าเชื่อมโยงที่เป็นสัดส่วนเดียวกันกับค่าเฉลี่ยการล่าช้า (average packet delay) ซึ่งก็รวมถึงการล่าช้าในการเข้าคิวใน switch buffer และความล่าช้าในการส่งผ่านข้อมูลของแต่ละเส้นทาง เพราะเส้นทางที่สั้นที่สุดก็ต้องเป็นเส้นทางที่มีความเร็วในการส่งจากต้นทางไปยังปลายทางด้วย

- $Cost \sim congestion$  ค่าเชื่อมโยงเป็นสัดส่วนเดียวกันกับค่าความคับคั่ง (congestion) เช่น ค่าทราฟฟิก (traffic load) [16] ดังนั้นเส้นทางที่สั้นที่สุดก็ย่อมหลีกเลี่ยงเส้นทางที่คับคั่งเช่นกัน

### 3.4.1 อัลกอริทึมของเบลแมน ฟอร์ด (The Bellman-Ford Algorithm)

อัลกอริทึมของเบลแมน ฟอร์ด (Bellman-Ford) หรือบ้างก็เรียกว่า Ford-Fulkerson algorithm นั้นใช้หลักการพื้นฐานที่เข้าใจง่าย ถ้าโหนดที่ใกล้เคียงทั้งหมดของโหนด A รู้ว่าเส้นทางที่สั้นที่สุดไปยังโหนด Z เป็นเส้นทางใด โหนด A ก็จะสามารถตัดสินใจเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยตัวเอง โดยการคำนวณค่าเชื่อมโยงหรือระยะทางไปยังโหนด Z ผ่านโหนดข้างเคียงของโหนด Z โดยใช้ค่าที่น้อยที่สุด



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างโครงข่ายที่ประกอบด้วยค่า Link cost

ถ้าคาดว่าจะหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโหนด 2 ไปยังปลายทางที่โหนด 6 (โหนดปลายทาง) ตามรูปที่ 3.5 นั้น ในครั้งแรกข้อมูลจากโหนด 2 จะต้องผ่านโหนด 1 โหนด 4 และโหนด 5 และสามารถกล่าวได้ว่าเส้นทางที่สั้นที่สุดจากโหนด 1, 4, 5 ไปยังโหนด 6 มีค่าเป็น 3, 3 และ 2 ตามลำดับ ถ้าข้อมูลเริ่มต้นผ่านโหนด 1 ค่าเชื่อมโยงรวมคือ 3+3 ซึ่งเท่ากับ 6 ถ้าผ่านโหนด 4 ค่าเชื่อมโยงรวมคือ 1+3 มีค่าเท่ากับ 4 ถ้าผ่านโหนด 5 ค่าเชื่อมโยงรวมคือ 4+2 ซึ่งเท่ากับ 6 ดังนั้นเส้นทางที่สั้นที่สุดจากโหนด 2 ไปยังโหนด 6 คือเส้นทางที่ผ่านโหนด 4

จากแนวคิดนี้ กำหนดโหนดปลายทางคงที่  $D_j$  แทนค่าต่ำสุดจากโหนด  $j$  ไปยังโหนดด้านปลายทาง  $C_{ij}$  แทนค่าต่ำสุดของลิงค์จากโหนด  $i$  ไปยังโหนด  $j$  ตัวอย่างเช่น  $C_{13}=C_{31}=2$  ค่าของลิงค์จากโหนด  $i$  ไปยังตัวมันเองกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ เช่น  $C_{ii}=0$  และค่าลิงค์ระหว่างโหนด  $i$  กับโหนด  $k$  มีค่าเป็นอนันต์ ถ้าโหนด  $i$  และโหนด  $k$  ไม่มีการเชื่อมต่อถึงกันโดยตรง เช่น จากรูปที่ 3.5 คือโหนดที่ 6 ดังนั้น ค่าต่ำสุดจากโหนด 2 ไปยังโหนด 6 สามารถคำนวณได้ในรูปแบบของค่าระยะทางที่ผ่านโหนดที่ 1 4 หรือ 5 ดังนี้

$$\begin{aligned}
 D_2 &= \min\{C_{21} + D_1, C_{24} + D_4, C_{25} + D_5\} \\
 &= \min\{3 + 3, 1 + 3, 4 + 2\} \\
 &= \min\{6, 4, 6\} \\
 &= 4
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

ดังนั้นค่าเชื่อมโยงที่ต่ำสุดจากโหนดที่ 2 ไปยังโหนดที่ 6 คือผ่านโหนดที่ 4 มีค่าเท่ากับ 4

ปัญหาอย่างหนึ่งของการคำนวณค่าเชื่อมโยงจากโหนดที่ 2 ไปยังโหนดที่ 6 คือ ต้องทำการสมมุติค่าเชื่อมโยงต่ำสุดจากโหนด 1 4 5 ไปยังโหนดที่ 6 ว่ามีค่าเท่าใด โดยทั่วไปแล้วโหนดปลายทางจะไม่วัดค่าเชื่อมโยงที่ต่ำสุดของมันเองโดยถ้าปราศจากการคำนวณค่าสมมุติ ตัวอย่างเช่นค่าเชื่อมโยงจากโหนดที่ 1 ไปยังปลายทางโหนดที่ 6 เป็นการหาจาก

$$D_1 = \min\{C_{12} + D_2, C_{13} + D_3, C_{14} + D_4\} \quad (3.2)$$

และในทำนองเดียวกันค่าเชื่อมโยงจากโหนดที่ 4 หาได้จาก

$$D_4 = \min\{C_{41} + D_1, C_{42} + D_2, C_{43} + D_3, C_{45} + D_5\} \quad (3.3)$$

มีข้อสังเกตอย่างหนึ่งว่าสมการมีลักษณะเป็นแบบวนรอบ นั่นคือ  $D_2$  ดังนั้น ถ้ามีการทำซ้ำและมีการอัปเดตสมการ อัลกอริทึมจะลู่ออกเข้าสู่ผลลัพธ์ที่ถูกต้องในตอนสุดท้าย เมื่อคุณผลลัพธ์ที่ได้แล้วสมมุติว่า  $D_1 = D_2 = \dots = D_5 = \infty$  สังเกตได้ว่าการทำซ้ำนั้นจะพบเส้นทางที่สั้นที่สุดไปยังปลายทาง ดังนั้นระยะทางจากโหนดทั้งหมดไปยังปลายทางโหนดที่ 6 คือ  $D_1, D_2, \dots, D_5$  จะไม่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ในตอนสุดท้ายอัลกอริทึมจะต้องลู่ออกเข้าสู่หาระยะที่ถูกต้องตรงกันกับเส้นทางที่สั้นที่สุดไปยังปลายทาง

ถ้ากำหนดให้  $d$  เป็นระยะทางไปยังโหนดด้านปลายทาง สามารถสรุปอัลกอริทึมของ Bellman-Ford ได้ดังต่อไปนี้

1. ภาวะเริ่มต้น (ที่โหนดปลายทาง  $d$  เป็นระยะทางเท่ากับศูนย์จากตัวมันเอง)

$$D_i = \infty \text{ โดยที่ } i \neq d \quad (3.4)$$

$$D_d = 0 \quad (3.5)$$

2. การอัปเดต (การหาระยะทางสั้นที่สุดไปยังปลายทางผ่านโหนดข้างเคียง) โดยที่  $i \neq d$

$$D_i = \min\{C_{ij} + D_j\} \text{ โดยทั้งหมด } j \text{ ไม่เท่ากับ } i \quad (3.6)$$

ให้ย้อนกลับไปลำดับสอง จนกว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของการทำซ้ำ (Iteration)

คุณลักษณะอย่างหนึ่งของ Bellman-Ford Algorithm คือสามารถปรับตัวมันเองได้อย่างรวดเร็วเพื่อยังการกระจายข้อมูลให้สมบูรณ์ การดำเนินการที่ยุ่งยากของโหนดทั้งหมดนั้นขึ้นอยู่กับ การคำนวณค่าเชื่อมโยงต่ำสุดของมัน ไปยังโหนดข้างเคียงของมัน การเปลี่ยนแปลงเส้นทางต้อง

พยายามให้โหนดนั้น ๆ กระจายเชื่อมโยงที่ต่ำสุดไปยังโหนดข้างเคียง ภายใต้สมมุติฐานที่ค่อนข้างจะเป็นจริงว่า การลู่เข้าหาผลลัพธ์ที่ถูกต้อง อัลกอริทึมจะกระจายเข้าหาผลลัพธ์ที่มีค่าเชื่อมโยงต่ำสุด โดยโหนดทั้งหมดจะรู้ค่าเชื่อมโยงต่ำสุดและความถูกต้องตรงกันของโหนดต่อไปที่จะไปยังโหนดปลายทางจะต้องผ่านเส้นทางที่สั้นที่สุด โพรโตคอลทำการกระจายอัลกอริทึมของ Bellman-Ford นั้น เป็นการเสนอรูปแบบ distance vector protocol (DVP) เพราะว่าค่าเวกเตอร์ หรือ เวกเตอร์ระยะทาง คือ การเปลี่ยนค่าเชื่อมโยงกันระหว่างโหนดข้างเคียงนั่นเอง การแบ่งในส่วนของโหนด  $i$  ทั้งหมดใน DVP นั้น กำหนดได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$D_{ij} = 0 \quad (3.7)$$

$$D_{ij} = \min(C_{ik} + D_{kj}) \text{ สำหรับ } k \neq i \quad (3.8)$$

$D_{ij}$  เป็นค่าที่ต่ำสุดจากโหนด  $i$  ไปยังปลายทางที่โหนด  $j$  เมื่อทำการอัปเดต โหนด  $i$  จะกระจายเวกเตอร์  $\{D_{i1}, D_{i2}, D_{i3}, \dots\}$  ไปยังโหนดข้างเคียงของมัน

### 3.4.2 อัลกอริทึมของดิกซ์สตรา (Dijkstra's Algorithm)

ดิกซ์สตราอัลกอริทึมเป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่เป็นทางเลือกในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากโหนดต้นทางไปยังโหนดต่าง ๆ ที่อยู่ในโครงข่าย โดยที่อัลกอริทึมนี้ค่อนข้างที่จะมีประสิทธิภาพมากกว่าอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดด้วย เพียงแต่เป็นอัลกอริทึมที่ต้องการค่า link เชื่อมโยงในแต่ละลิงค์ที่มีค่าเป็นบวก ซึ่งก็เหมาะสำหรับ โครงข่ายของการสื่อสารข้อมูล แนวความคิดหลักของวิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยอัลกอริทึมของดิกซ์สตราคือ การพิจารณาหาโหนดที่ใกล้เคียงที่สุดจากโหนดต้นทางโดยวิธีการเพิ่มค่าเชื่อมโยงโดยที่อัลกอริทึมเป็นรูปแบบการทำซ้ำ โดยในการทำซ้ำ (Iteration) ครั้งแรกจะเป็นการหาโหนดที่ใกล้ที่สุดจากโหนดต้นทาง ในการทำซ้ำครั้งที่สองอัลกอริทึมจะทำการหาโหนดที่อยู่ถัดไปจากโหนดข้างเคียงของโหนดต้นทางที่อยู่ติดกันหรือใกล้ที่สุด และทำการทำซ้ำไปเช่นนี้เรื่อย ๆ ดังนั้นในครั้งที่  $k_{th}$  ของการทำซ้ำ ก็จะได้เส้นทางที่สั้นที่สุดจากโหนดต้นทางนั่นเอง

จากอัลกอริทึมของดิกซ์สตราสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่เป็นเซตของ  $N$  โดย  $N$  จะประกอบไปด้วยโหนดต่าง ๆ ที่เปรียบเทียบแล้วได้ค่า shortest path กำหนดให้  $D_i$  เป็นค่า minimum cost จากโหนดต้นทาง (สัญลักษณ์  $s$ ) ไปยังโหนด  $i$

#### 1. ภาวะเริ่มต้น

$$N = \{s\} \quad (3.9)$$

$$D_j = C_{sj} \text{ โดยทุก } j \neq s \quad (3.10)$$

$$D_s = 0 \quad (3.11)$$

2. การหาโหนดถัดไปที่ใกล้ที่สุด โดยหาโหนดที่  $i \neq N$

$$D_i = \min_{j \in N} D_j \quad (3.12)$$

เพิ่มโหนด  $i$  เข้าไปในเซต  $N$

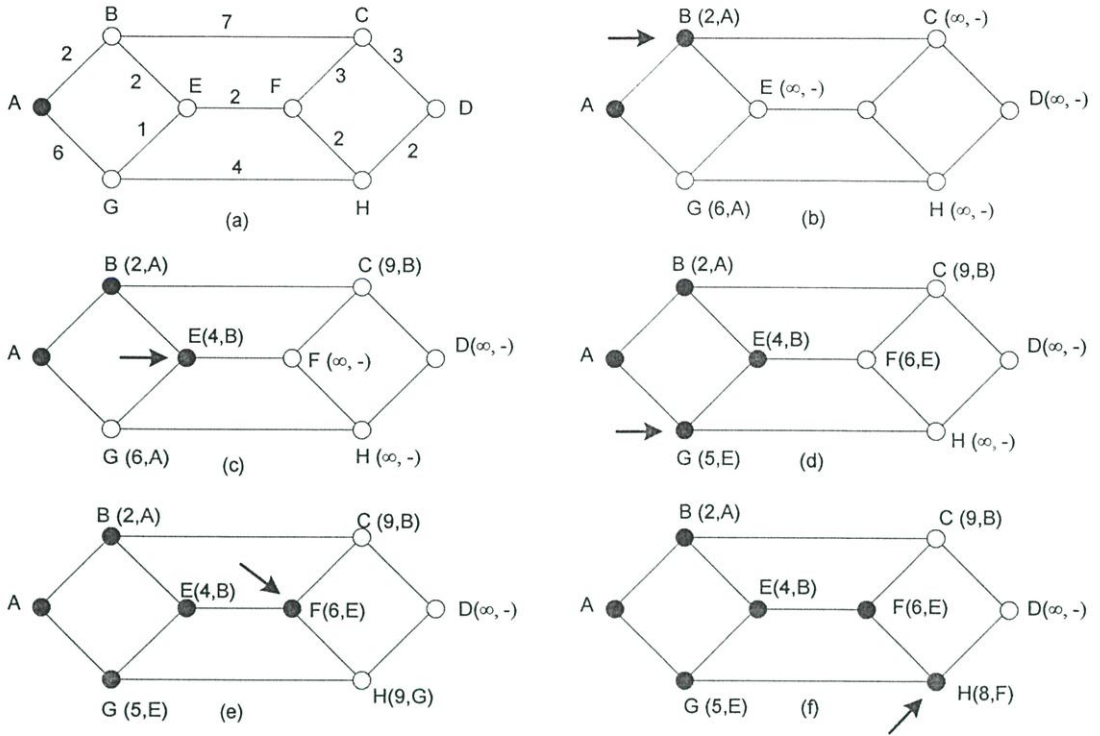
ถ้าเซต  $N$  มีครบทุกโหนด ถือว่าสิ้นสุดการคำนวณ

3. การอัปเดตค่า minimum cost หลังจากเพิ่มโหนด  $i$  เข้าในเซต  $N$  สำหรับโหนด  $j \neq N$

$$D_j = \min\{D_j, D_i + C_{ij}\} \quad (3.13)$$

ย้อนกลับไปทำลำดับขั้นที่ 2

ตัวอย่างในรูปที่ 3.6 [16] ต้องการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากจุด A ไปยังจุด D เริ่มด้วยการระบายสีที่บัพที่จุด A (เพื่อบอกให้ทราบว่าได้พิจารณาจุดนี้แล้ว) หาระยะทางของแต่ละจุดที่มีเส้นเชื่อมมาที่จุด A แล้วใส่ป้ายบอกระยะทางและโหนด กำกับเส้นเชื่อมเหล่านี้ คือ ใส่ (2, A) ไว้ที่จุด B และใส่ (6, A) ไว้ที่จุด G แล้วเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดจากตัวเลขทั้งหมดที่หาได้ ซึ่งก็คือจุด B ให้ระบายสีที่บัพที่จุด B แล้วใช้วิธีการเดิม จะได้ (4, B) ที่จุด E (9, B) ที่จุด C และของเดิม (6, A) ที่จุด G เลือกจุด E เป็นจุดต่อไปเพราะมีค่าต่ำที่สุด ระบายสีที่บัพที่จุด E แล้วใช้วิธีการเดิม จะได้ (5, E) ที่จุด G ซึ่งใช้แทน (6, A) เพราะมีค่าต่ำกว่า (6, E) ที่จุด F และของเดิม (9, B) ที่จุด C เลือกจุด G เป็นจุดต่อไป ระบายสีที่บัพที่จุด G แล้วใช้วิธีการเดิม จะได้ (9, G) ที่จุด H ของเดิม (6, E) ที่จุด F และของเดิม (9, B) ที่จุด C เลือกจุด F เป็นจุดต่อไป ระบายสีที่บัพที่จุด F แล้วใช้วิธีการเดิมจะได้ (8, F) ที่จุด H ซึ่งใช้แทน (9, G) เพราะมีค่าต่ำกว่า และของเดิม (9, B) ที่จุด C เลือกจุด H เป็นจุดต่อไป ให้ระบายสีที่บัพที่จุด H แล้วใช้วิธีการเดิมจะได้ (10, H) ที่จุด D และของเดิม (9, B) ที่จุด C แม้ว่าจะได้เส้นทางมาถึงยังจุดปลายทางแล้วก็ตามแต่ค่า (9, B) ที่จุด C มีค่าต่ำกว่าจึงต้องคำนวณต่อไปโดยเลือกจุด C เป็นจุดต่อไป ระบายสีที่บัพที่จุด C แล้วใช้วิธีการเดิม จะได้ (12, C) ที่จุด D แต่ค่าเดิม (10, H) มีค่าต่ำกว่าจึงใช้ค่าเดิม ผลลัพธ์ที่ได้คือเส้นทาง ABEFHD มีความยาว 10 หน่วย เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด [15]



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนในการคำนวณเส้นทางที่สั้นที่สุดของ Dijkstra's algorithm

## บทที่ 4

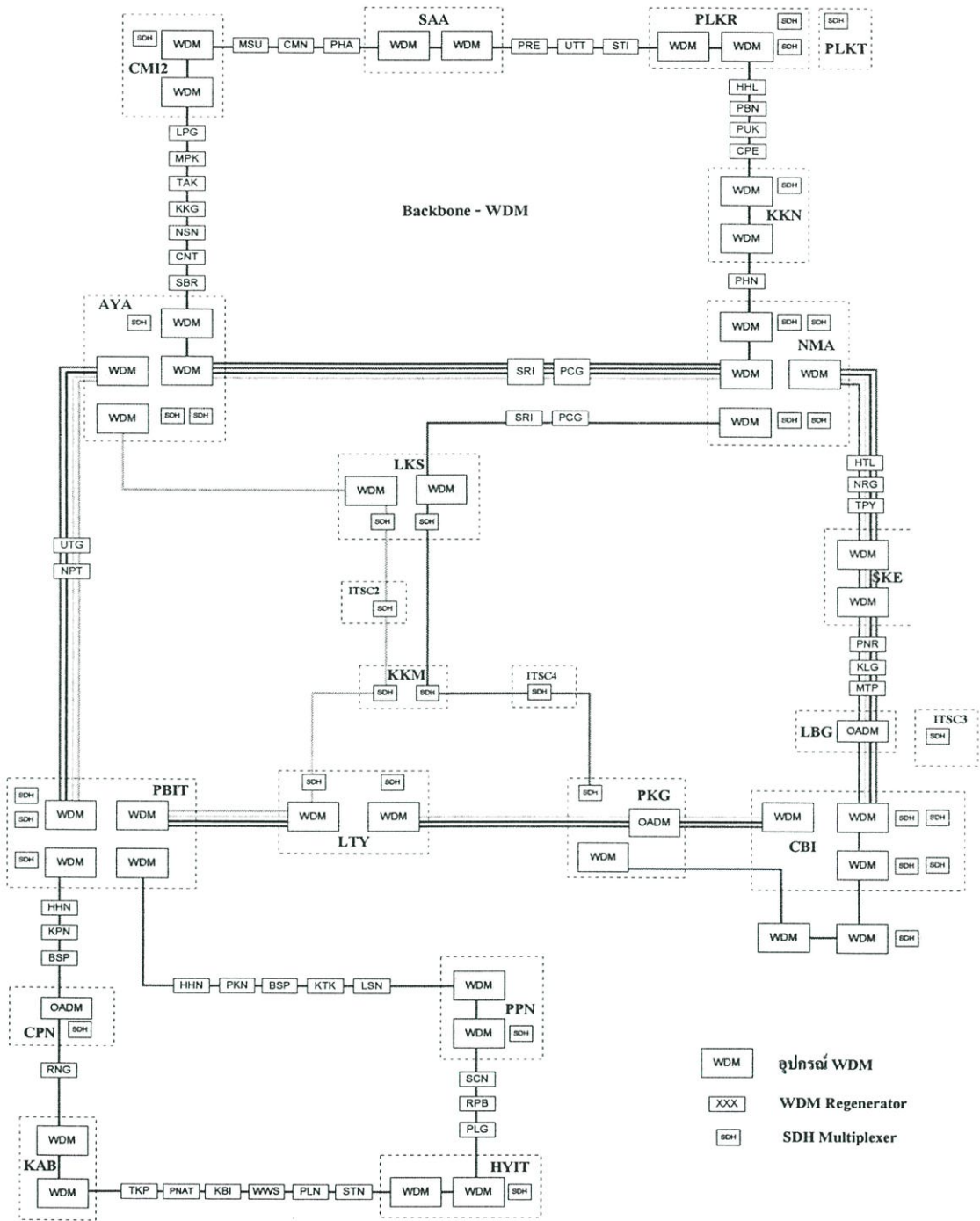
### การออกแบบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะนำเสนอการคำนวณหาค่าเชื่อมโยง (Link Cost) ในแต่ละเส้นทางที่เชื่อมโยงด้วยระบบมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplex: WDM) ที่จะพิจารณาตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายเช่น ระยะทาง ค่าการสูญเสียในสาย จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในการมัลติเพล็กซ์ ค่าการใช้งานทราฟฟิกสูงสุด (Peak traffic) ในแต่ละเส้นทาง ทั้งนี้การคำนวณหาค่าเชื่อมโยง ของแต่ละช่วงก็เพื่อที่จะนำมาพิจารณาในการคำนวณหาค่าเชื่อมโยงต่ำสุด และเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-path) เพื่อใช้ในการกำหนดเส้นทางของวงจร ตลอดจนการพิจารณาเงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงของโครงข่าย เช่น การเปลี่ยนแปลงจำนวนความยาวคลื่น การเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับโครงข่าย เป็นต้น โดยใช้ระยะทางจริงจากการออกแบบติดตั้งเส้นใยแก้วที่ใช้ในการเชื่อมโยงระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น โดยได้แบ่งการวิเคราะห์ดังนี้

1. คำนวณหาค่าเชื่อมโยง (Link cost) ของช่วงต่าง ๆ ในโครงข่าย WDM
2. คำนวณหาค่าเชื่อมโยงที่น้อยที่สุด (minimum cost) และเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-path) โดยอาศัยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดและดิจิกส์ตรา โดยพิจารณาร่วมกับค่าทราฟฟิกในแต่ละเส้นทาง
3. คำนวณหาค่าเชื่อมโยงน้อยที่สุดใหม่ (Re-computing minimum cost) เพื่อหาเส้นทางที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางที่เกิดเหตุขัดข้องหรือมีการใช้งานเต็มความจุ

#### 4.1 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เชื่อมโยง (Link cost parameter) ของโครงข่าย

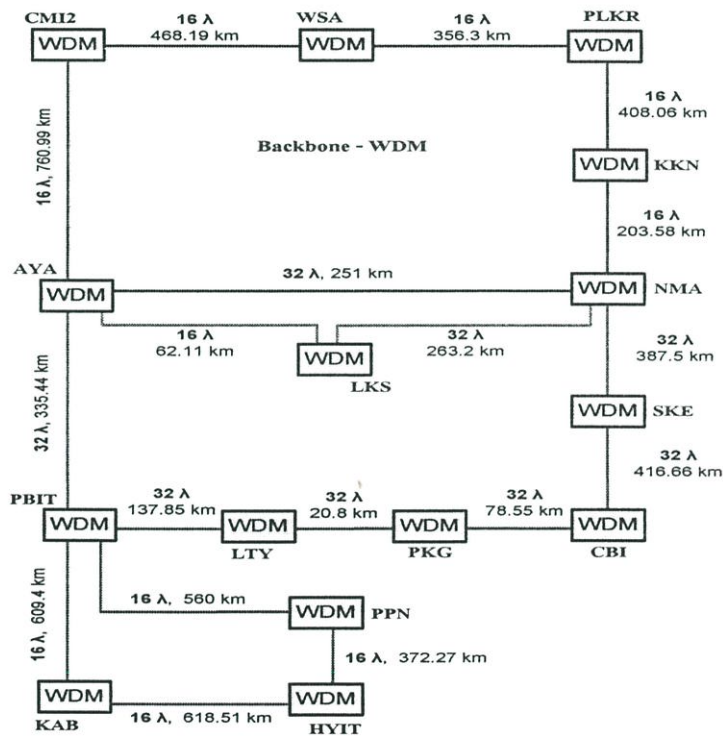
จากโครงสร้างของโครงข่ายหลัก วิธีการกำหนดเส้นทางในโครงข่ายที่พิจารณาคือการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-path routing) นั้น ต้องใช้ค่าเชื่อมโยง (Link cost) มาพิจารณาดังนั้นเมื่อทำการศึกษาโครงข่ายหลักระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นพารามิเตอร์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องก็คือ จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในการมัลติเพล็กซ์ ระยะทางที่เชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์ ค่าการสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง (Losses) ในแต่ละช่วง (section) บวกกับปัจจัยอื่น ๆ ที่สามารถคำนึงถึงเช่น ค่าทราฟฟิกในแต่ละเส้นทาง เป็นต้น จากรูปที่ 4.1 จะแสดงการเชื่อมโยงของโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นทั้งหมด 15 โหนด 18 ช่วง โดยจะทำการวิเคราะห์และคำนวณหาค่าเชื่อมโยงในแต่ละช่วง โดยมีโหนดต่าง ๆ เป็นโหนดที่เป็นปลายทาง (Terminal) ของการเชื่อมต่อกับโครงข่ายท้องถิ่นในแต่ละภูมิภาค ซึ่งมีระยะทาง และจำนวนความยาวคลื่นในแต่ละช่วงดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 โครงข่ายหลักระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นของ TOT ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ WDM, Regenerator และอุปกรณ์ SDH Multiplexer

ค่าเชื่อมโยงระหว่างโหนดนี้ได้พิจารณา 3 พารามิเตอร์ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่หนึ่ง จำนวนของความยาวคลื่น ( $N_\lambda$ ) พารามิเตอร์ที่สองค่าการสูญเสียในสาย (Total Losses : L) ซึ่งโดยปกติการสูญเสียเกิดจากหลายองค์ประกอบด้วยกันคือ การลดทอนกำลังงานในเส้นใยแก้วนำแสง (Optical fiber attenuation: 0.2525 dB/km) ค่าการดูดซับกำลังในเส้นใยแก้วนำแสง (Optical fiber

absorption: a) โดย  $a = a_c e^{\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)}$  เมื่อ  $a_c$  เป็นการคงที่มีค่าเท่ากับ  $4 \times 10^{-11}$  dB/km ค่า  $\lambda_c$  เป็นความยาวคลื่นคงที่ ( $48 \mu\text{m}$ ) และ  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นที่ใช้ ค่าการสูญเสียที่เกิดจากจุดต่อ (Connection Loss : 0.5 dB/1 connection point) ค่าการกระจายของแสง (Dispersion) ค่าการไขว้แทรกของสัญญาณแสง (Optical crosstalk) ค่าการสูญเสียอีกอย่างหนึ่งคือการสูญเสียอันเกิดจากการโค้งงอของเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber bend loss) เนื่องจากการโค้งงอจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังงานระหว่าง core กับ cladding หรือส่วนที่เป็นแกนและวัสดุที่เป็นชั้นนอกที่ล้อมรอบแกนของเส้นใยแก้วนำแสง พารามิเตอร์ที่สามคือระยะทาง (d) ระหว่างโหนด โดยมีวิธีการหาค่าเชื่อมโยงในรูปแบบของผลรวมของทั้ง 3 พารามิเตอร์ ดังสมการที่ (4.1)



รูปที่ 4.2 โครงข่ายหลักระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแสดงระยะทางและจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในแต่ละช่วง

$$\text{Link Cost} = A + B + C \quad (4.1)$$

โดยที่  $A = (1/N_\lambda) * w_1 \quad (4.2a)$

$$B = d * w_2 \quad (4.2b)$$

$$C = L * w_3 \quad (4.2c)$$

แทนค่าสมการ (4.2a)-(4.2c) ในสมการที่ (4.1) จะได้

$$\text{Link Cost} = ((1/N_\lambda) * w_1) + (d * w_2) + (L * w_3) \quad (4.3)$$

- เมื่อ  $N_\lambda$  คือจำนวนความยาวคลื่น  
 $L$  คือค่าการสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง  
 $d$  คือระยะทางในแต่ละช่วง  
 $w_1$  คือค่าถ่วงน้ำหนักในเทอม A (จำนวนความยาวคลื่น)  
 $w_2$  คือค่าถ่วงน้ำหนักในเทอม B (ระยะทาง)  
 $w_3$  คือค่าถ่วงน้ำหนักในเทอม C (ค่า Losses)

โดย  $w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad (4.4)$

โดยที่เทอม A เป็นตัวแปรของสัดส่วนผกผันของจำนวนความยาวคลื่น เทอม B เป็นตัวแปรของค่าการสูญเสียหรือ Losses ที่เกิดจากการสูญเสียในเส้นใยแก้วนำแสง และเทอม C เป็นตัวแปรของระยะทางระหว่างจุดที่เชื่อมโยงอุปกรณ์การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น โดยในสถานการณ์นี้พิจารณาการสูญเสียในสายโดยรวม (Total Losses) ได้มาจากการลดทอนกำลังงานในเส้นใยแก้วนำแสง (Optical fiber attenuation: 0.2525 dB/km) ค่าการสูญเสียที่เกิดจากจุดต่อ (Connection Loss : 0.5 dB/1 connection point) และบวกค่าชดเชย (Margin) สำหรับค่าการสูญเสียอื่น ๆ มีค่าเท่ากับ 4 dB/section และเพื่อให้ได้ค่าเชื่อมโยงที่น้อยและเหมาะสมที่สุดจึงได้พิจารณาที่ค่าถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกัน

#### 4.1.1 กรณีให้ค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเท่ากัน

จากสมการที่ (4.4) ผลรวมของ  $w_1$   $w_2$  และ  $w_3$  มีค่าเท่ากับหนึ่ง จึงกำหนดให้ค่าทั้งสามมีค่าเท่ากันคือเท่ากับ 1/3 นั่นคือ  $w_1 = 1/3$ ,  $w_2 = 1/3$ ,  $w_3 = 1/3$  เมื่อแทนค่าในสมการที่ (4.3) สามารถคำนวณหาค่าเชื่อมโยงได้ตามตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางการหาค่าเชื่อมโยงโดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากัน

sec	ต้นทาง	ปลายทาง	ระยะทาง (กม)	Loss	$N_\lambda$	Weight			A	B	C	Cost
						$w_1$	$w_2$	$w_3$				
1	LTY	PKG	20.80	10.25	32	0.3	0.3	0.3	0.010	6.93	3.42	<b>10.36</b>
2	AYA	LKS	62.11	20.68	16	0.3	0.3	0.3	0.021	20.70	6.89	<b>27.62</b>
3	PKG	CBIT	78.75	24.88	32	0.3	0.3	0.3	0.010	26.25	8.29	<b>34.56</b>
4	PBIT	LTY	137.85	39.81	32	0.3	0.3	0.3	0.010	45.95	13.27	<b>59.23</b>
5	KKN	NMA	199.64	55.41	16	0.3	0.3	0.3	0.021	66.55	18.47	<b>85.04</b>

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

sec	ต้น ทาง	ปลายทาง	ระยะทาง (กม)	Loss	$N_{\lambda}$	Weight			A	B	C	Cost
						$w_1$	$w_2$	$w_3$				
6	NMA	AYA	251.00	68.38	32	0.3	0.3	0.3	0.010	83.67	22.79	106.47
7	LKS	NMA	263.20	71.46	32	0.3	0.3	0.3	0.010	87.73	23.82	111.56
8	PBIT	AYA	335.44	89.70	32	0.3	0.3	0.3	0.010	111.81	29.90	141.72
9	SAA	PLKR	352.04	93.89	16	0.3	0.3	0.3	0.021	117.35	31.30	148.66
10	PPN	HYIT	372.27	99.00	16	0.3	0.3	0.3	0.021	124.09	33.00	157.11
11	NMA	SKE	387.50	102.84	32	0.3	0.3	0.3	0.010	129.17	34.28	163.46
12	PLKR	KKN	408.06	108.04	16	0.3	0.3	0.3	0.021	136.02	36.01	172.05
13	SKE	CBI	416.66	110.21	32	0.3	0.3	0.3	0.010	138.89	36.74	175.63
14	CMI2	SAA	468.19	123.22	16	0.3	0.3	0.3	0.021	156.06	41.07	197.16
15	PBIT	PPN	563.80	147.36	16	0.3	0.3	0.3	0.021	187.93	49.12	237.07
16	KAB	PBIT	609.40	158.87	16	0.3	0.3	0.3	0.021	203.13	52.96	256.11
17	HYIT	KAB	619.93	161.53	16	0.3	0.3	0.3	0.021	206.64	53.84	260.51
18	AYA	CMI2	760.99	197.15	16	0.3	0.3	0.3	0.021	253.66	65.72	319.40

## 4.1.2 กรณีให้ค่าถ่วงน้ำหนักมากที่จำนวนความยาวคลื่น

กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักมีค่า  $w_1 = 0.5$ ,  $w_2 = 0.2$ ,  $w_3 = 0.3$  เมื่อแทนค่าในสมการที่ (4.3) สามารถคำนวณหาค่าเชื่อมโยงได้ตามตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางการหาค่าเชื่อมโยงโดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักมากที่จำนวนความยาวคลื่น

sec	ต้น ทาง	ปลายทาง	ระยะทาง (กม)	Loss	$N_{\lambda}$	Weight			A	B	C	Cost
						$w_1$	$w_2$	$w_3$				
1	LTY	PKG	20.80	10.25	32	0.5	0.2	0.3	0.016	4.16	3.08	7.25
2	AYA	LKS	62.11	20.68	16	0.5	0.2	0.3	0.031	12.42	6.20	18.66
3	PKG	CBIT	78.75	24.88	32	0.5	0.2	0.3	0.016	15.75	7.47	23.23
4	PBIT	LTY	137.85	39.81	32	0.5	0.2	0.3	0.016	27.57	11.94	39.53
5	KKN	NMA	199.64	55.41	16	0.5	0.2	0.3	0.031	39.93	16.62	56.58
6	NMA	AYA	251.00	68.38	32	0.5	0.2	0.3	0.016	50.20	20.51	70.73
7	LKS	NMA	263.20	71.46	32	0.5	0.2	0.3	0.016	52.64	21.44	74.09
8	PBIT	AYA	335.44	89.70	32	0.5	0.2	0.3	0.016	67.09	26.91	94.01
9	SAA	PLKR	352.04	93.89	16	0.5	0.2	0.3	0.031	70.41	28.17	98.61
10	PPN	HYIT	372.27	99.00	16	0.5	0.2	0.3	0.031	74.45	29.70	104.18

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

sec	ต้น ทาง	ปลาย ทาง	ระยะทาง (กม)	Loss	$N_{\lambda}$	Weight			A	B	C	Cost
						$w_1$	$w_2$	$w_3$				
11	NMA	SKE	387.50	102.84	32	0.5	0.2	0.3	0.016	77.50	30.85	108.37
12	PLKR	KKN	408.06	108.04	16	0.5	0.2	0.3	0.031	81.61	32.41	114.05
13	SKE	CBI	416.66	110.21	32	0.5	0.2	0.3	0.016	83.33	33.06	116.41
14	CMI2	SAA	468.19	123.22	16	0.5	0.2	0.3	0.031	93.64	36.97	130.63
15	PBIT	PPN	563.80	147.36	16	0.5	0.2	0.3	0.031	112.76	44.21	157.00
16	KAB	PBIT	609.40	158.87	16	0.5	0.2	0.3	0.031	121.88	47.66	169.57
17	HYIT	KAB	619.93	161.53	16	0.5	0.2	0.3	0.031	123.99	48.46	172.48
18	AYA	CMI2	760.99	197.15	16	0.5	0.2	0.3	0.031	152.20	59.14	211.37

## 4.1.3 กรณีให้ค่าถ่วงน้ำหนักมากที่ระยะทางระหว่างโหนด

กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักมีค่า  $w_1 = 0.2$ ,  $w_2 = 0.5$ ,  $w_3 = 0.3$  เมื่อแทนค่าในสมการที่ (4.3) สามารถคำนวณหาค่าเชื่อมโยงได้ตามตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางการหาค่าเชื่อมโยงโดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักมากที่ระยะทางระหว่างโหนด

sec	ต้น ทาง	ปลาย ทาง	ระยะทาง (กม)	Loss	$N_{\lambda}$	Weight			A	B	C	Cost
						$w_1$	$w_2$	$w_3$				
1	LTY	PKG	20.80	10.25	32	0.2	0.5	0.3	0.006	10.40	3.08	13.48
2	AYA	LKS	62.11	20.68	16	0.2	0.5	0.3	0.013	31.06	6.20	37.27
3	PKG	CBIT	78.75	24.88	32	0.2	0.5	0.3	0.006	39.38	7.47	46.85
4	PBIT	LTY	137.85	39.81	32	0.2	0.5	0.3	0.006	68.93	11.94	80.87
5	KKN	NMA	199.64	55.41	16	0.2	0.5	0.3	0.013	99.82	16.62	116.46
6	NMA	AYA	251.00	68.38	32	0.2	0.5	0.3	0.006	125.50	20.51	146.02
7	LKS	NMA	263.20	71.46	32	0.2	0.5	0.3	0.006	131.60	21.44	153.04
8	PBIT	AYA	335.44	89.70	32	0.2	0.5	0.3	0.006	167.72	26.91	194.64
9	SAA	PLKR	352.04	93.89	16	0.2	0.5	0.3	0.013	176.02	28.17	204.20
10	PPN	HYIT	372.27	99.00	16	0.2	0.5	0.3	0.013	186.14	29.70	215.85
11	NMA	SKE	387.50	102.84	32	0.2	0.5	0.3	0.006	193.75	30.85	224.61
12	PLKR	KKN	408.06	108.04	16	0.2	0.5	0.3	0.013	204.03	32.41	236.45
13	SKE	CBI	416.66	110.21	32	0.2	0.5	0.3	0.006	208.33	33.06	241.40
14	CMI2	SAA	468.19	123.22	16	0.2	0.5	0.3	0.013	234.10	36.97	271.07
15	PBIT	PPN	563.80	147.36	16	0.2	0.5	0.3	0.013	281.90	44.21	326.12

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

sec	ต้น ทาง	ปลาย ทาง	ระยะทาง (กม)	Loss	$N_{\lambda}$	Weight			A	B	C	Cost
						$w_1$	$w_2$	$w_3$				
16	KAB	PBIT	609.40	158.87	16	0.2	0.5	0.3	0.013	304.70	47.66	352.37
17	HYIT	KAB	619.93	161.53	16	0.2	0.5	0.3	0.013	309.97	48.46	358.44
18	AYA	CMI2	760.99	197.15	16	0.2	0.5	0.3	0.013	380.50	59.14	439.65

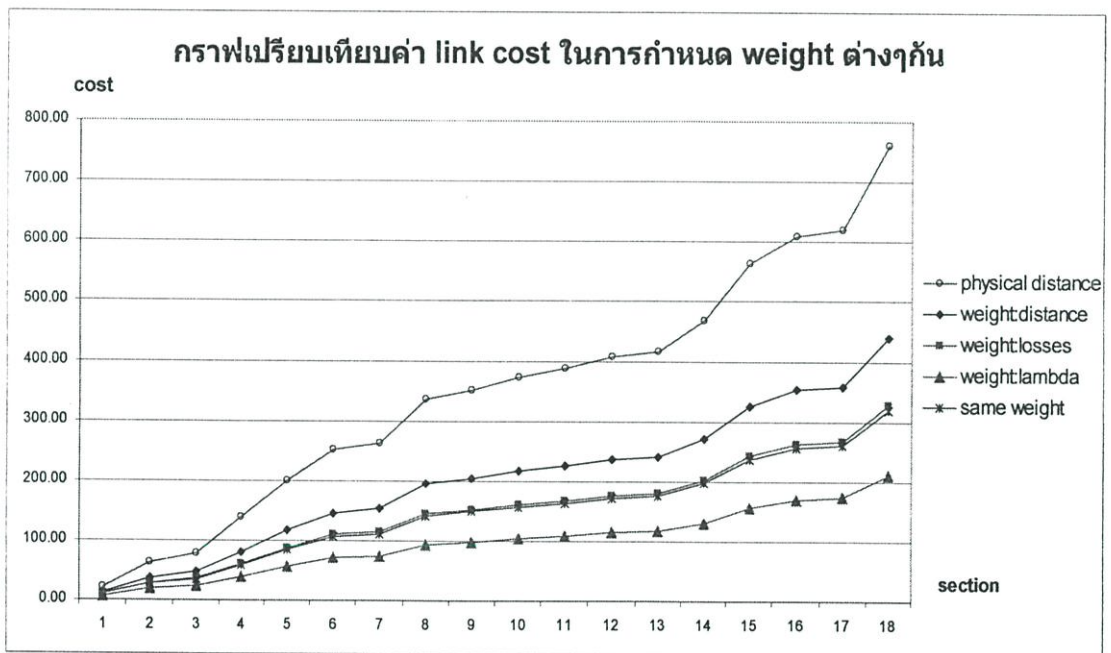
#### 4.1.4 กรณีให้ค่าถ่วงน้ำหนักมากกว่าค่าการสูญเสีย (Losses)

กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักมีค่า  $w_1 = 0.2$ ,  $w_2 = 0.3$ ,  $w_3 = 0.5$  เมื่อแทนค่าในสมการที่ (4.3) สามารถคำนวณหาค่าเชื่อมโยงได้ตามตารางที่ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ตารางการหาค่าเชื่อมโยงโดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักมากกว่าค่าการสูญเสีย (Losses)

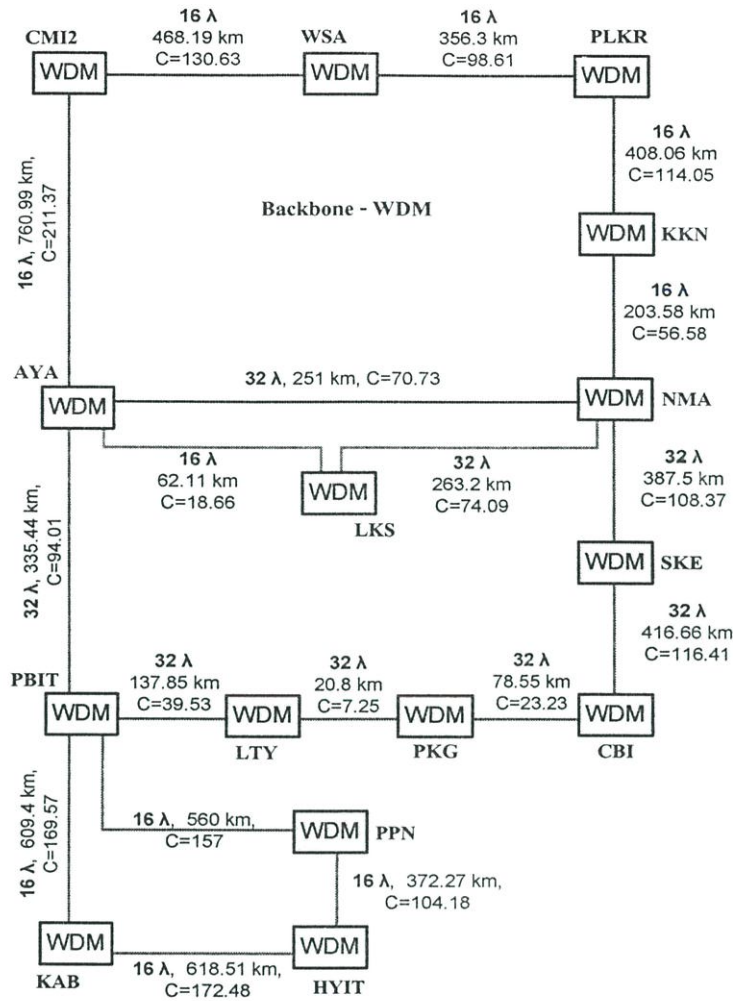
sec	ต้น ทาง	ปลาย ทาง	ระยะทาง (กม)	Loss	$N_{\lambda}$	Weight			A	B	C	กอสท์
						$w_1$	$w_2$	$w_3$				
1	LTY	PKG	20.80	10.25	32	0.2	0.3	0.5	0.006	6.24	5.13	11.37
2	AYA	LKS	62.11	20.68	16	0.2	0.3	0.5	0.013	18.63	10.34	28.99
3	PKG	CBIT	78.75	24.88	32	0.2	0.3	0.5	0.006	23.63	12.44	36.07
4	PBIT	LTY	137.85	39.81	32	0.2	0.3	0.5	0.006	41.36	19.90	61.26
5	KKN	NMA	199.64	55.41	16	0.2	0.3	0.5	0.013	59.89	27.70	87.61
6	NMA	AYA	251.00	68.38	32	0.2	0.3	0.5	0.006	75.30	34.19	109.50
7	LKS	NMA	263.20	71.46	32	0.2	0.3	0.5	0.006	78.96	35.73	114.70
8	PBIT	AYA	335.44	89.70	32	0.2	0.3	0.5	0.006	100.63	44.85	145.49
9	SAA	PLKR	352.04	93.89	16	0.2	0.3	0.5	0.013	105.61	46.95	152.57
10	PPN	HYIT	372.27	99.00	16	0.2	0.3	0.5	0.013	111.68	49.50	161.19
11	NMA	SKE	387.50	102.84	32	0.2	0.3	0.5	0.006	116.25	51.42	167.68
12	PLKR	KKN	408.06	108.04	16	0.2	0.3	0.5	0.013	122.42	54.02	176.45
13	SKE	CBI	416.66	110.21	32	0.2	0.3	0.5	0.006	125.00	55.10	180.11
14	CMI2	SAA	468.19	123.22	16	0.2	0.3	0.5	0.013	140.46	61.61	202.08
15	PBIT	PPN	563.80	147.36	16	0.2	0.3	0.5	0.013	169.14	73.68	242.83
16	KAB	PBIT	609.40	158.87	16	0.2	0.3	0.5	0.013	182.82	79.44	262.27
17	HYIT	KAB	619.93	161.53	16	0.2	0.3	0.5	0.013	185.98	80.77	266.76
18	AYA	CMI2	760.99	197.15	16	0.2	0.3	0.5	0.013	228.30	98.57	326.88

จากการพิจารณาค่าเชื่อมโยงทั้ง 4 กรณีสามารถนำมาแสดงเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.3 โดยจะแสดงค่าเชื่อมโยงในแต่ละกรณีและระยะทางจริงของแต่ละช่วงเรียงตามลำดับระยะทางในแต่ละช่วงจากน้อยไปมาก จะเห็นได้ว่าค่าเชื่อมโยงที่ต่ำที่สุดจะเป็นค่าเชื่อมโยงที่ได้จากการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักมากที่จำนวนความยาวคลื่น เมื่อเทียบกับเชื่อมโยงที่ถ่วงน้ำหนักมากที่ระยะทาง ค่าการสูญเสีย หรือแม้กระทั่งการให้ค่าถ่วงน้ำหนักที่เท่ากันในแต่ละตัวแปร ทั้งนี้ค่าที่ได้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการออกแบบโครงข่ายที่ต้องการปรับเพิ่มและลดความจุของโครงข่าย เนื่องจากความยาวคลื่นเป็นพารามิเตอร์ซึ่งสามารถที่จะทำการเพิ่มหรือลดได้ที่โหนดต้นทางและปลายทางใด ๆ ในขณะที่สามารถใช้เส้นใยแก้วนำแสงเดิม นั้นหมายถึงระยะทางและค่าการสูญเสียจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าเชื่อมโยงจะขึ้นอยู่กับจำนวนของความยาวคลื่นเป็นหลัก ซึ่งหากเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นในช่วงใด จะทำให้ค่าเชื่อมโยงในช่วงนั้นมีค่าน้อยลง เพราะจะสามารถรองรับความจุได้เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง



**รูปที่ 4.3** กราฟเปรียบเทียบค่าเชื่อมโยงในการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักต่างกัน

ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงได้นำค่าเชื่อมโยงที่ให้ค่าถ่วงน้ำหนักมากที่จำนวนความยาวคลื่นดังรูปที่ 4.4 มาพิจารณาคำนวณหาค่าเชื่อมโยงต่ำสุด (Minimum cost) และเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest-path)



รูปที่ 4.4 โครงข่ายหลักระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นแสดงค่าเชื่อมโยงที่คำนวณได้ในแต่ละช่วง

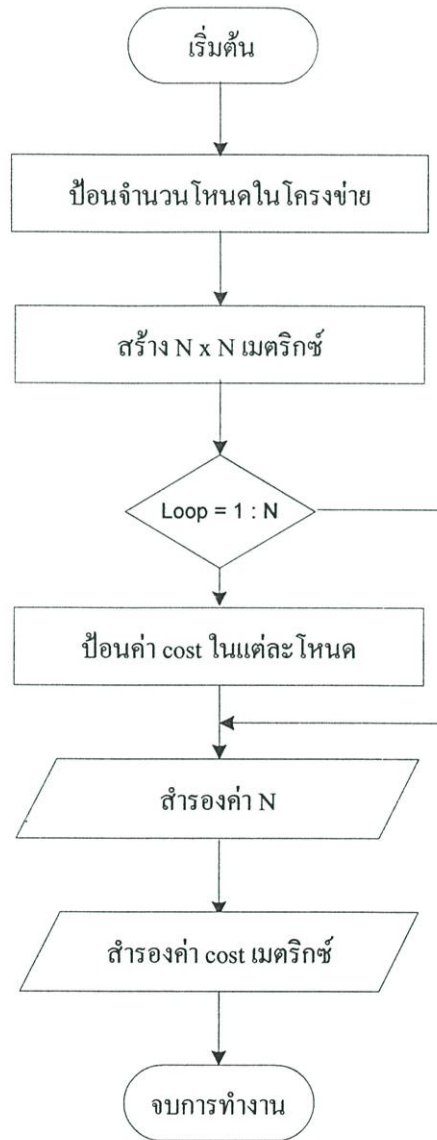
## 4.2 การคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-path calculation)

เมื่อได้ค่าเชื่อมโยงที่เหมาะสมกับโครงข่ายหลักที่จะศึกษาแล้วขั้นตอนต่อไปจะเป็นการหาค่าเชื่อมโยงต่ำสุดเพื่อที่จะนำไปสู่การหาเส้นทางที่สั้นที่สุด โดยอาศัยอัลกอริทึมในการกำหนดเส้นทาง 2 อัลกอริทึมคือ อัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดและอัลกอริทึมของดิกค์สตรา

### 4.2.1 การจำลองหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยใช้อัลกอริทึมของเบลแมน ฟอร์ด (Bellman-Ford Algorithm)

หลักการพื้นฐานที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4.1 ถ้าโหนดที่ใกล้เคียงทั้งหมดของโหนด A รู้ว่าเส้นทางที่สั้นที่สุดไปยังโหนด Z เป็นเส้นทางใด โหนด A ก็จะสามารถตัดสินใจเลือกเส้นทางที่สั้น

ที่สุดด้วยตัวเอง โดยการคำนวณค่าเชื่อมโยงหรือระยะทางไปยังโหนด Z ผ่านโหนดข้างเคียงของโหนด Z โดยใช้ค่าที่น้อยที่สุด โดยลำดับการทำงานของโปรแกรม Matlab ที่ใช้ในการพิจารณาค่าเชื่อมโยงต่ำสุด เริ่มต้นด้วยการสร้างคอสต์เมตริกซ์ (cost matrix) หมายถึงการนำการเชื่อมโยงที่ได้จากแต่ละช่วงมาสร้างเป็นเมตริกซ์ โคอะแกรมในรูปที่ 4.4 เป็นลำดับการทำงานซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนตามจำนวนโหนดหรือลักษณะของโครงข่ายที่แตกต่างกันได้



รูปที่ 4.5 บล็อกโคอะแกรมสำหรับการสร้างคอสต์เมตริกซ์ (cost matrix)

เมื่อทำการกำหนดคอสต์เมตริกซ์ (cost matrix) แล้วโปรแกรมจะเก็บข้อมูลเชื่อมโยงในรูปของเมตริกซ์ เพื่อจะรอรับค่าโหนดต้นทางและปลายทางในการประมวลผลคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุด โดยมีลำดับการทำงานในการสร้างคอสต์เมตริกซ์ดังรูปที่ 4.5 หลังจากนั้นจะทำการ

ประมวลผลหาค่าเชื่อมโยงต่ำสุด (minimum cost) เพื่อหาเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดดังสมการที่ (4.5)-(4.9)

ภาวะเริ่มต้น (ที่โหนดปลายทาง  $d$  เป็นระยะทางเท่ากับศูนย์จากตัวเอง)

$$D_i = \infty \text{ โดยที่ } i \neq d \quad (4.5)$$

$$D_d = 0 \quad (4.6)$$

การอัปเดต (การหาระยะทางสั้นที่สุดไปยังปลายทางผ่านโหนดข้างเคียง) โดยที่  $i \neq d$

$$D_i = \min\{C_{ij} + D_j\} \text{ โดยทั้งหมด } j \text{ ไม่เท่ากับ } i \quad (4.7)$$

$D_{ij}$  เป็นค่าที่ต่ำสุดจากโหนด  $i$  ไปยังปลายทางที่โหนด  $j$  เมื่อทำการอัปเดต โหนด  $i$  จะกระจายเวกเตอร์  $\{D_{i1}, D_{i2}, D_{i3}, \dots\}$  ไปยังโหนดข้างเคียงของมัน

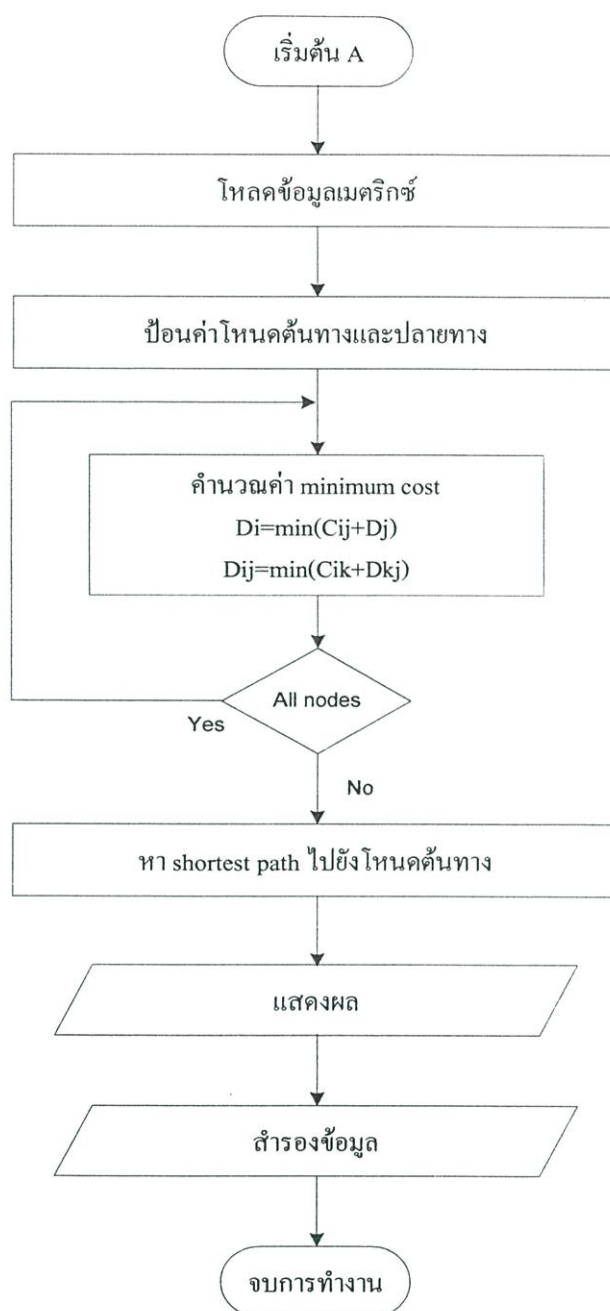
$$D_{ij} = 0 \quad (4.8)$$

$$D_{ij} = \min(C_{ik} + D_{kj}) \text{ สำหรับ } k \neq i \quad (4.9)$$

จากสมการข้างต้นสามารถนำการเขียนด้วยโปรแกรมเมทแล็บ (Matlab) ที่มีบล็อกไดอะแกรมสำหรับการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) ดังรูปที่ 4.6

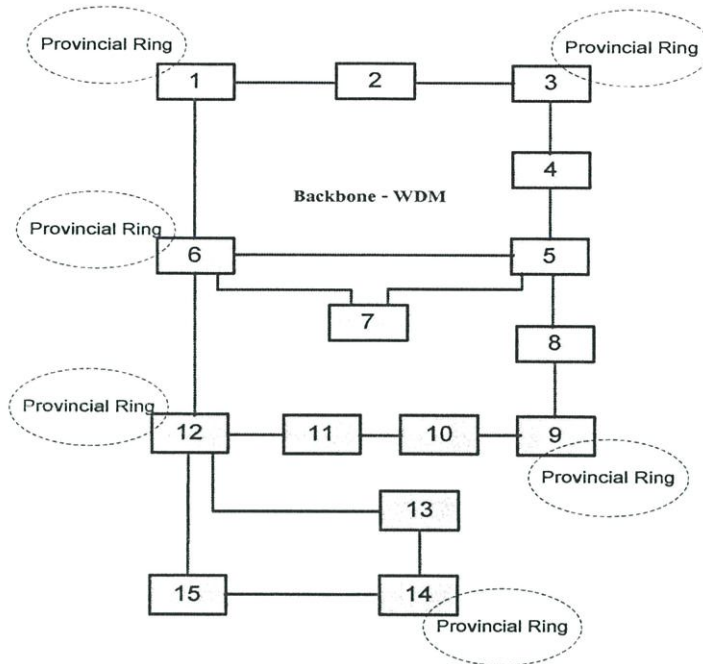
ในโครงสร้างของโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นของบริษัทที่โอทีจำกัดมหาชน ที่ได้้นำการพิจารณานี้จะเป็นรูปแบบของโครงข่ายที่มีโทโปโลยีแบบวงแหวน (Ring topology) โดยปกติระบบวงแหวนของ SDH เกิดจากการเชื่อมโยงโหนดต่าง ๆ เข้าด้วยกันเป็นลักษณะวนปิด (Closed loop) แต่ละโหนดก็คือ add-drop multiplexer (ADM) โดยแต่ละช่วงหรือบางที่เรียกว่าสแปน (span) นั้นจะมีความจุในการส่งสัญญาณเหมือนกัน (ตัวอย่างเช่น อาจเป็น STM-1 STM-4 หรือ STM-16) อุปกรณ์ ADM ควรจะสามารถติดต่อกับทราฟฟิกทั้งหมดที่อยู่บนสายส่งได้ และมีสวิตช์เมตริกซ์ (non-blocking switch matrix) อยู่ภายใน หน้าที่หลักของ ADM ก็คือการเพิ่มและดึงช่องสัญญาณย่อยจากสัญญาณรวม STM-N

เครือข่ายแบบวงแหวนแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือแบบทิศทางเดียว (uni-directional) และแบบสองทิศทาง (bi-directional) ขึ้นกับทิศทางการวิ่งของทราฟฟิกในภาวะปกติ ถ้าเป็นวงแหวนแบบทิศทางเดียว ทราฟฟิกใช้งานจะวิ่งรอบวงแหวนในทิศทางเดียวเท่านั้น (ตัวอย่างเช่น เซ็นนาฟิกา) นั่นคือ ทราฟฟิกที่รับและส่งระหว่างโหนดคู่หนึ่ง จะวิ่งอยู่คนละด้านของวงแหวน แต่ถ้าเป็นวงแหวนแบบสองทิศทาง ทราฟฟิกที่รับและส่งระหว่างโหนดคู่หนึ่งจะวิ่งทางด้านใดด้านหนึ่งของวงแหวนเท่านั้น



รูปที่ 4.6 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด

วิธีการป้องกัน (Protection) แบบต่าง ๆ มากมายได้ถูกเสนอขึ้นมาเพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้งานวงจรช่องสัญญาณได้ วิธีการป้องกันที่นิยมใช้กันมาก 2 วิธีในระบบวงกลมคือการป้องกันที่ระดับวงจรใช้งาน (path protection: SNCP) และการป้องกันระดับการเชื่อมต่อ (Bi-directional Self-Healing Ring protection: BSHR) ถ้าลองเปรียบเทียบกับเครือข่ายที่ใช้อุปกรณ์ต่อผ่านวงจรแล้ว จะพบว่าการใช้วงกลมนั้นจะลงทุนต่ำ พื้นคันทราฟฟิกได้เร็ว ควบคุมง่าย และสร้างเครือข่ายได้ง่ายอีกด้วย [16]



รูปที่ 4.7 ลักษณะการเชื่อมโยงโครงข่ายหลักการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น backbone กับโครงข่ายท้องถิ่น

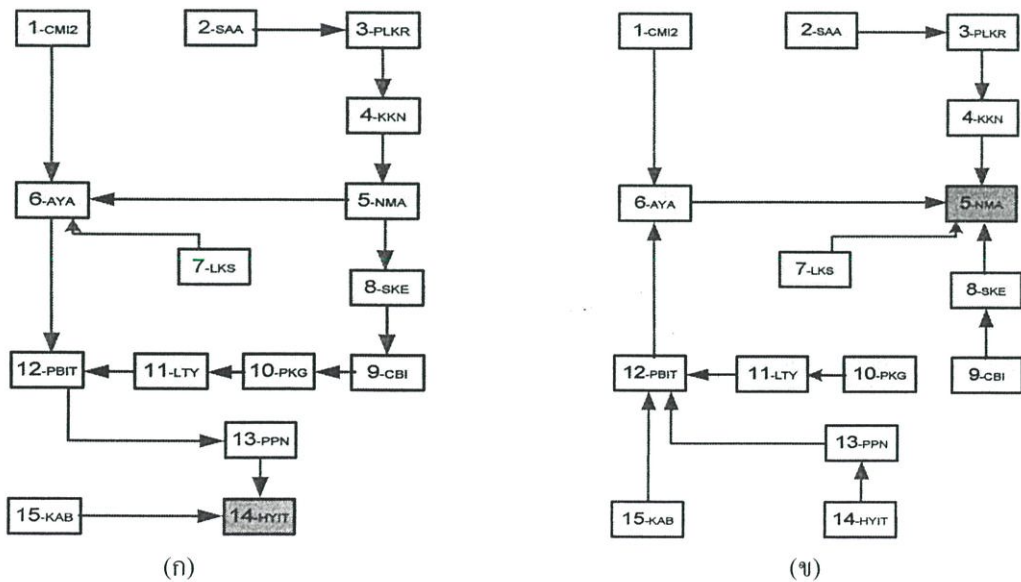
โดยโครงข่ายจริงได้มีการเชื่อมโยงโครงข่ายท้องถิ่น (Local network) หรือ (Provincial Loop) เข้ากับโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นโดยผ่านอุปกรณ์มัลติเพล็กซ์ (Multiplexer) ทั้งนี้การคิดค่าเชื่อมโยง ในทั้งสองโครงข่ายแตกต่างกันเนื่องจากในระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นเป็นระบบที่มีการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น โดยมีจำนวนของความยาวคลื่นเข้ามาเป็นพารามิเตอร์หลัก ในขณะที่โครงข่ายท้องถิ่นอาศัยระบบ SDH ในระดับความเร็ว 2.5 GHz (STM-16) ในการเชื่อมโยงโครงข่าย

#### 4.2.1.1 ผลการศึกษาโดยใช้อัลกอริทึมของเบลแมน ฟอร์ด

โดยผลจากการจำลอง การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่าง โหนด 1 (CMI2: เชียงใหม่) ไปยัง โหนดที่ 14 (HYIT: หาดใหญ่) และจาก โหนด 2 (SAA: सा) ไปยัง โหนดที่ 14 ดังรูปที่ 4.8(ก) มีค่าเชื่อมโยงต่ำสุดเท่ากับ 566.56 และ 695.16 ตามลำดับ และมีค่าเชื่อมโยงต่ำสุดในเส้นทางที่สั้นที่สุดจาก โหนดต้นทางไปยัง โหนด 14 ปลายทาง รวมถึงจำนวนช่วงที่ผ่านในแต่ละ path ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งนับว่าเป็นเส้นทางที่ได้ค่าเชื่อมโยง น้อยที่สุด ถึงแม้ว่าในบาง path ที่มีจำนวนช่วงที่ผ่านมากกว่า ถ้านับตามการเชื่อมต่อทางกายภาพ (physical connection) ตัวอย่างเช่น เส้นทางจาก โหนด 2 ไปยัง โหนด 14 ซึ่งมี เส้นทางที่สั้นที่สุด เป็น 2-3-4-5-6-12-13-14 รวมทั้งหมด 7 hop แต่ในทางกายภาพก็สามารถกำหนดเส้นทางผ่าน โหนด 2-1-6-12-13-14 ซึ่งจะมีจำนวน hop น้อยกว่าคือ 5 hop เท่านั้น แต่หากลองนับรวมค่าเชื่อมโยงตลอดเส้นทางที่สองจะได้ค่าเชื่อมโยงที่มากกว่า

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลลัพธ์ของเส้นทางที่สั้นที่สุดของโหนดปลายทางที่ 14

Node N to Node 14	Routing Table	Logical Link Cost	Hop count
1 to 14	1 6 12 13 14	566.56	4
2 to 14	2 3 4 5 6 12 13 14	695.16	7
3 to 14	3 4 5 6 12 13 14	596.55	6
4 to 14	4 5 6 12 13 14	482.50	5
5 to 14	5 6 12 13 14	425.92	4
6 to 14	6 12 13 14	355.19	3
7 to 14	7 6 12 13 14	373.85	4
8 to 14	8 9 10 11 12 13 14	447.60	6
9 to 14	9 10 11 12 13 14	331.19	5
10 to 14	10 11 12 13 14	307.96	4
11 to 14	11 12 13 14	300.71	3
12 to 14	12 13 14	261.18	2
13 to 14	13 14	104.18	1
15 to 14	15 14	172.48	1



รูปที่ 4.8 เส้นทางที่สั้นที่สุด (Bellman-Ford algorithm) (ก) จากโหนดใด ๆ ไปโหนด 14

(ข) จากโหนดใด ๆ ไปโหนด 5

สำหรับเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 12 ไปยังโหนดที่ 5 ดังรูปที่ 4.8(จ) มีค่าเชื่อมโยงต่ำสุดเท่ากับ 164.74 และมีค่าเชื่อมโยงต่ำสุดของจำนวนช่วงที่ผ่านในแต่ละเส้นทางดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงผลลัพธ์ของเส้นทางที่สั้นที่สุดของโหนดปลายทางที่ 5

Node N to Node 5	Routing Table	Logical Link Cost	Hop count
1 to 5	1 6 5	282.10	2
2 to 5	2 3 4 5	269.24	3
3 to 5	3 4 5	170.63	2
4 to 5	4 5	56.58	1
6 to 5	6 5	70.73	1
7 to 5	7 5	74.09	1
8 to 5	8 5	108.37	1
9 to 5	5 8 9	224.78	2
10 to 5	10 11 12 6 5	211.52	4
11 to 5	11 12 6 5	204.27	3
12 to 5	12 6 5	164.74	2
13 to 5	13 12 6 5	321.74	3
14 to 5	14 13 12 6 5	425.92	4
15 to 5	15 12 6 5	334.31	3

โดยผลการจำลองหาค่าเชื่อมโยงต่ำสุดจากเส้นทางที่สั้นที่สุดในแต่ละเส้นทางนั้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งจะเป็นตารางแสดงถึงค่าเชื่อมโยงและค่าช่วงที่ผ่านโดยในแกนแนวนอนและแนวตั้งจะเป็นตัวเลขระบุโหนดต่าง ๆ ตารางที่เป็นช่องร่วมในบริเวณสามเหลี่ยมด้านซ้ายจะเป็นค่าเชื่อมโยงระหว่างโหนดในแกนแนวตั้งมาตัดกับโหนดในแกนแนวนอน ส่วนพื้นที่สามเหลี่ยมบนขวาจะเป็นค่าช่วงที่ผ่านระหว่างโหนดในแกนแนวตั้งมาตัดกับโหนดในแกนแนวนอน จะเห็นได้ว่าค่าเชื่อมโยงและช่วงที่ผ่านจากโหนดตัวมันเองจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังในตารางที่ 4.7 ในแนวทแยงมุม

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าจำนวนช่วง (span) ระหว่างโหนด ในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด ที่มากที่สุดจะมีค่า 7 hop ในขณะที่จำนวนช่วงทั้งหมดของโครงข่ายที่พิจารณาคือ 15 ช่วง ซึ่งนับได้ว่าเป็นเส้นทางที่สั้นไม่เกิดการวนซ้ำ (looping) หรือไม่เกิดความสับสนในการกำหนดเส้นทาง

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าเชื่อมโยงและช่วงที่ผ่านของเส้นทางที่สั้นที่สุดที่ได้จากอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด

Hop Count: Bellman-Ford Algorithm															
Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	1	2	3	2	1	2	3	5	4	3	2	3	4	3
2	130.6	0	1	2	3	4	4	4	5	7	6	5	6	7	6
3	229.2	98.6	0	1	2	3	3	3	4	6	5	4	5	6	5
4	338.7	212.7	114.1	0	1	2	2	2	3	5	4	3	4	5	3
5	282.1	269.2	170.6	56.6	0	1	1	1	2	4	3	2	3	4	3
6	211.4	340.0	241.4	127.3	70.7	0	1	2	4	3	2	1	2	3	2
7	230.0	343.3	244.7	130.7	74.1	18.7	0	2	5	4	3	2	3	4	3
8	390.5	377.6	279.0	165.0	108.4	179.1	182.5	0	1	2	3	4	5	6	5
9	375.4	494.0	395.4	281.4	224.8	164.0	182.7	116.4	0	1	2	3	4	5	4
10	352.2	480.8	382.2	268.1	211.5	140.8	159.5	139.6	23.2	0	1	2	3	4	3
11	344.9	473.5	374.9	260.9	204.3	133.5	152.2	146.9	30.5	7.3	0	1	2	3	2
12	305.4	434.0	335.4	221.3	164.7	94.0	112.7	186.4	70.0	46.8	39.5	0	1	2	1
13	462.4	591.0	492.4	378.3	321.7	251.0	269.7	343.4	227.0	203.8	196.5	157.0	0	1	2
14	566.6	695.2	596.6	482.5	425.9	355.2	373.9	447.6	331.2	308.0	300.7	261.2	104.2	0	1
15	475.0	603.6	504.9	390.9	334.3	263.6	282.2	356.0	239.6	216.4	209.1	169.6	276.7	172.5	0

Link cost : Bellman-Ford Algorithm

#### 4.2.2 การจำลองหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยใช้อัลกอริทึมของดิกค์สตรา

##### (Dijkstra's Algorithm)

โดยลำดับการทำงานของโปรแกรม Matlab ที่ใช้ในการพิจารณาค่าเชื่อมโยงต่ำสุด เริ่มต้นด้วยการสร้าง cost matrix ก่อนดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.4 ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนเมตริกได้ตามจำนวนโหนดหรือลักษณะของโครงข่ายที่แตกต่างกันได้ โดยอาศัยหลักการของดิกค์สตราอัลกอริทึมดังสมการที่ (4.6)-(4.10)

ภาวะเริ่มต้น

$$N = \{s\} \quad (4.6)$$

$$D_j = C_{sj} \text{ โดยทุก } j \neq s \quad (4.7)$$

$$D_s = 0 \quad (4.8)$$

การหาโหนดถัดไปที่ใกล้ที่สุด โดยหาโหนดที่  $i \neq N$

$$D_i = \min_{j \in N} D_j \quad (4.9)$$

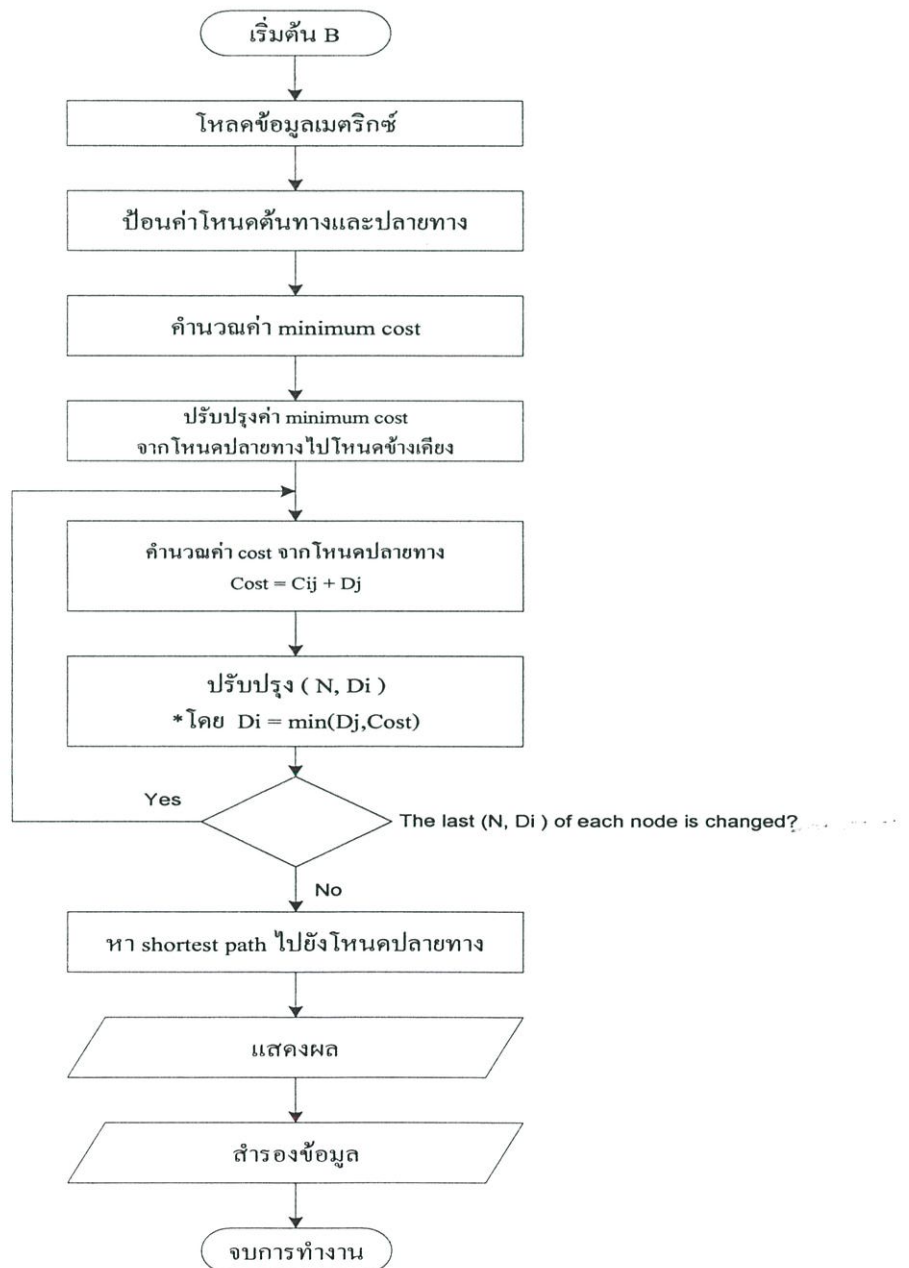
เพิ่มโหนด  $i$  เข้าไปในเซต  $N$

ถ้าเซต  $N$  มีครบทุกโหนด ถือว่าสิ้นสุดการคำนวณ

การอัปเดตค่าเชื่อมโยงต่ำสุดหลังจากที่เพิ่มโหนด  $i$  เข้าในเซต  $N$  สำหรับโหนด  $j \neq N$

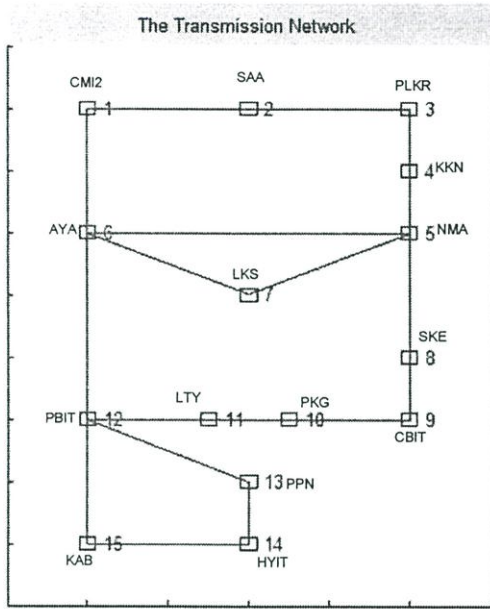
$$D_j = \min\{D_j, D_i + C_{ij}\} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.6)-(4.10) สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมสำหรับโปรแกรม Matlab ที่ใช้ในการคำนวณหาว่า เส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยดิจิทัลสตราอัลกอริทึมดังรูปที่ 4.10

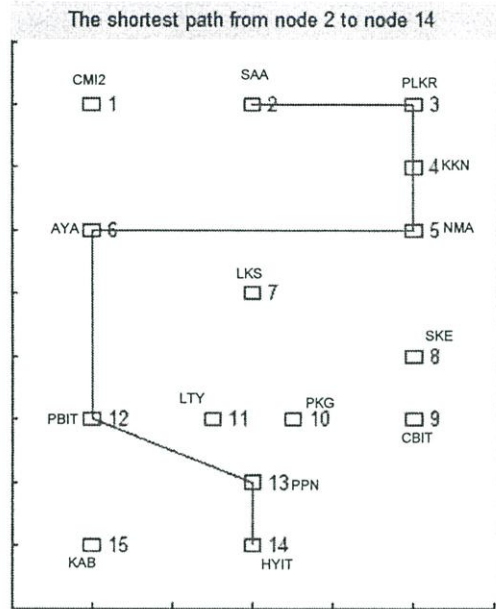


รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยอัลกอริทึมของดิจิทัลสตรา

สำหรับอัลกอริทึมของดิเจคส์ตรานี้จะแตกต่างจากเบลแมนฟอร์ดที่การพิจารณาค่าเริ่มต้นซึ่งดิเจคส์ตราอัลกอริทึมจะเริ่มที่ค่าเชื่อมโยงจากจุดเริ่มต้น (Source) เป็นศูนย์ แล้วคำนวณค่าเชื่อมโยงจากด้านต้นทางไปหาปลายทาง ซึ่งเป็นแนวคิดที่ตรงกันข้ามกับอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด จะได้ผลลัพธ์ของการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดได้ดังนี้

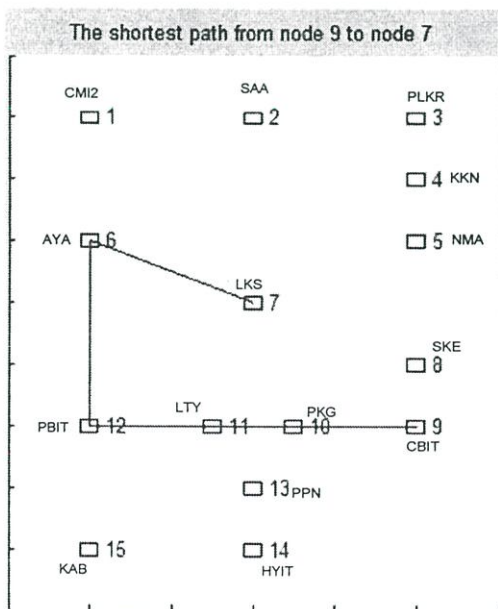


(ก)

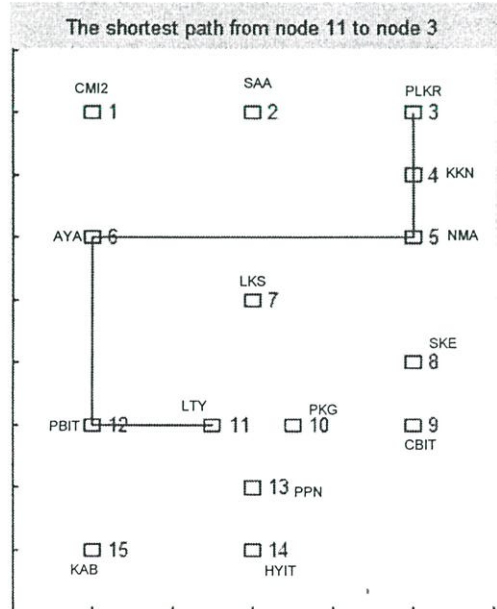


(ข)

รูปที่ 4.10 (ก) โครงข่ายหลักระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น  
(ข) เส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่าง โหนด 2 ถึง 14



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 เส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่าง (ก) โหนด 7 ถึง 9 (ข) โหนด 11 ถึง 3

จากผลการจำลองด้วยดิคส์ตราอัลกอริทึมในทุก ๆ โหนดและทุก ๆ ช่วง ได้ผลลัพธ์ดัง ตารางที่ 4.6 ที่แสดงถึงค่าเชื่อมโยงต่ำสุด (minimum cost) และจำนวนช่วงที่ผ่านในแต่ละเส้นทางที่สั้นที่สุด

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่าเชื่อมโยงและช่วงที่ผ่านของเส้นทางที่สั้นที่สุดที่ได้จากอัลกอริทึมของดิคส์ตรา

Hop Count: Dijkstra's Algorithm															
Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	1	2	3	2	1	2	3	5	4	3	2	3	4	3
2	130.6	0	1	2	3	4	4	4	5	7	6	5	6	7	6
3	229.2	98.6	0	1	2	3	3	3	4	6	5	4	5	6	5
4	338.7	212.7	114.1	0	1	2	2	2	3	5	4	3	4	5	3
5	282.1	269.2	170.6	56.6	0	1	1	1	2	4	3	2	3	4	3
6	211.4	340.0	241.4	127.3	70.7	0	1	2	4	3	2	1	2	3	2
7	230.0	343.3	244.7	130.7	74.1	18.7	0	2	5	4	3	2	3	4	3
8	390.5	377.6	279.0	165.0	108.4	179.1	182.5	0	1	2	3	4	5	6	5
9	375.4	494.0	395.4	281.4	224.8	164.0	182.7	116.4	0	1	2	3	4	5	4
10	352.2	480.8	382.2	268.1	211.5	140.8	159.5	139.6	23.2	0	1	2	3	4	3
11	344.9	473.5	374.9	260.9	204.3	133.5	152.2	146.9	30.5	7.3	0	1	2	3	2
12	305.4	434.0	335.4	221.3	164.7	94.0	112.7	186.4	70.0	46.8	39.5	0	1	2	1
13	462.4	591.0	492.4	378.3	321.7	251.0	269.7	343.4	227.0	203.8	196.5	157.0	0	1	2
14	566.6	695.2	596.6	482.5	425.9	355.2	373.9	447.6	331.2	308.0	300.7	261.2	104.2	0	1
15	475.0	603.6	504.9	390.9	334.3	263.6	282.2	356.0	239.6	216.4	209.1	169.6	276.7	172.5	0

Link cost : Dijkstra's Algorithm

#### 4.2.3 การเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดและดิคส์ตราอัลกอริทึม

ด้วยการหาค่า เส้นทางที่สั้นที่สุด จากอัลกอริทึมทั้งสอง ผลปรากฏว่าได้ค่าเชื่อมโยงต่ำสุดและวงจร เส้นทางที่สั้นที่สุด ที่ได้มีค่าเท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งแบ่งตารางออกเป็น 2 ส่วน โดยมีช่องแสดงค่าศูนย์ในแนวทแยงมุมเสมือนเป็นเส้นแบ่งตารางออกเป็นรูปสามเหลี่ยม 2 รูป คือ ส่วนสามเหลี่ยมบนขวาจะเป็นตารางแสดงค่าเชื่อมโยงของเส้นทางที่สั้นที่สุดในอัลกอริทึมดิคส์ตรา และส่วนล่างซ้ายจะเป็นค่าที่ได้จากเบลแมนฟอร์ดอัลกอริทึม

ตารางที่ 4.9 ตารางเปรียบเทียบเชื่อมโยงและจำนวนช่วงของเส้นทางที่สั้นที่สุดที่ได้จากอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดและดิกส์ตรา

**Dijkstra's Algorithm**

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	130.6	229.2	338.7	282.1	211.4	230.0	390.5	375.4	352.2	344.9	305.4	462.4	566.6	475.0
2	130.6	0	98.6	212.7	269.2	340.0	343.3	377.6	494.0	480.8	473.5	434.0	591.0	695.2	603.6
3	229.2	98.6	0	114.1	170.6	241.4	244.7	279.0	395.4	382.2	374.9	335.4	492.4	596.6	504.9
4	338.7	212.7	114.1	0	56.6	127.3	130.7	165.0	281.4	268.1	260.9	221.3	378.3	482.5	390.9
5	282.1	269.2	170.6	56.6	0	70.7	74.1	108.4	224.8	211.5	204.3	164.7	321.7	425.9	334.3
6	211.4	340.0	241.4	127.3	70.7	0	18.7	179.1	164.0	140.8	133.5	94.0	251.0	355.2	263.6
7	230.0	343.3	244.7	130.7	74.1	18.7	0	182.5	182.7	159.5	152.2	112.7	269.7	373.9	282.2
8	390.5	377.6	279.0	165.0	108.4	179.1	182.5	0	116.4	139.6	146.9	186.4	343.4	447.6	356.0
9	375.4	494.0	395.4	281.4	224.8	164.0	182.7	116.4	0	23.2	30.5	70.0	227.0	331.2	239.6
10	352.2	480.8	382.2	268.1	211.5	140.8	159.5	139.6	23.2	0	7.3	46.8	203.8	308.0	216.4
11	344.9	473.5	374.9	260.9	204.3	133.5	152.2	146.9	30.5	7.3	0	39.5	196.5	300.7	209.1
12	305.4	434.0	335.4	221.3	164.7	94.0	112.7	186.4	70.0	46.8	39.5	0	157.0	261.2	169.6
13	462.4	591.0	492.4	378.3	321.7	251.0	269.7	343.4	227.0	203.8	196.5	157.0	0	104.2	276.7
14	566.6	695.2	596.6	482.5	425.9	355.2	373.9	447.6	331.2	308.0	300.7	261.2	104.2	0	172.5
15	475.0	603.6	504.9	390.9	334.3	263.6	282.2	356.0	239.6	216.4	209.1	169.6	276.7	172.5	0

**Bellman-Ford Algorithm**

4.2.4 การจำลองหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยพิจารณาค่ากราฟฟิก

ในทางปฏิบัติโครงข่ายหลักจะมีการกำหนดใช้งานวงจรรอยู่โดยในแต่ละเส้นทางจะมีค่ากราฟฟิกมากน้อยแตกต่างกัน โดยค่ากราฟฟิกในแต่ละเส้นทางจะแสดงดังตารางที่ 4.10

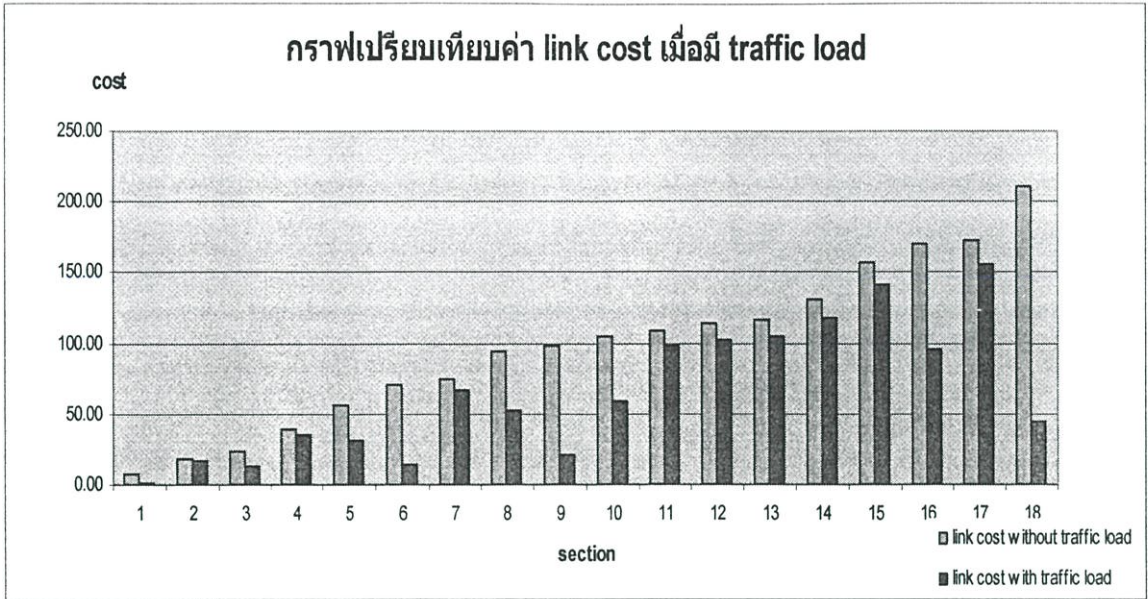
ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าปริมาณกราฟฟิกของวงจรรวมสายตามเส้นทางโครงข่ายหลัก

ต้นทาง (Exchange)	ปลายทาง (Route)	ปริมาณวงจร (WRKB)	การใช้งาน (BTC)	การใช้งาน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย
CMIS2	B7PLKA	390	62.39	16.00	20.78
PKGS2	B7LTYB	90	14.72	16.36	
LTYS2	B7PKGB	90	14.73	16.37	
PLKS2	B7CMIB	390	64.35	16.50	
CMIS2	B7AYAA	120	28.62	23.85	
AYAS2	B7CMIB	120	32.52	27.10	
NMAS2	B7AYAA	210	61.63	29.35	

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

ต้นทาง (Exchange)	ปลายทาง (Route)	ปริมาณวงจร (WRKB)	การใช้งาน (BTC)	การใช้งาน (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย
PBIS2	B7AYAA	240	111.89	46.62	56
PKGS2	B7CBIA	300	149.59	49.86	
PBIS2	B7LYYA	180	89.93	49.96	
HYIS2	B7PPNB	300	153	51.00	
PPNS2	B7HYIA	300	157.13	52.38	
LTYS2	B7CBIA	240	142.65	59.44	
CBIS2	B7PKGC	270	168.73	62.49	
NMAS2	B7KKNA	480	300.14	62.53	
KKNS2	B7NMAB	450	313.41	69.65	
PPNS2	B7PBIB	60	45.04	75.07	90
AYAS2	B7PBIB	240	182.93	76.22	
LTYS2	B7PBIA	180	147.09	81.72	
HYIS2	B7PBIB	60	53.9	89.83	
KKNS2	B7PLKB	150	136.55	91.03	
PLKS2	B7CBIA	120	117.96	98.30	
CBIS2	B7NMAA	240	238.56	99.40	
NMAS2	B7LKSB	510	507.07	99.43	
NMAS2	B7CBIB	240	239.01	99.59	

ค่ากราฟฟิคจากตารางที่ 4.10 จะถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่มีค่ากราฟฟิคน้อย กราฟฟิคปานกลางและกราฟฟิคค้ำกั้ตามลำดับ โดยในแต่ละกลุ่มจะนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อพิจารณาค่าเชื่อมโยงในโครงข่าย โดยมีค่าเฉลี่ยเรียงตามลำดับจากกลุ่มกราฟฟิคน้อยไปมาก คิดเป็นร้อยละ 20.78, 65, และ 90 ตามลำดับ จากค่ากราฟฟิคที่ได้นำไปคำนวณ โดยการนำค่ากราฟฟิคไปคูณเพื่อเป็นการกำหนดน้ำหนักของแต่ละช่วงของโครงข่ายหลัก ซึ่งผลจากการพิจารณาค่ากราฟฟิค ค่าเชื่อมโยงของโครงข่ายก็เปลี่ยนไปมีค่าดังรูปที่ 4.12 ซึ่งจะนำไปพิจารณาหาเส้นทางที่สั้นที่สุดที่เหมาะสม เนื่องจากในบางเส้นทางที่มีจำนวนความยาวคลื่นไม่มาก แต่มีการใช้งานหรือค่ากราฟฟิคน้อยก็จะมีค่าเชื่อมโยงน้อยลงตามอัตราส่วนของค่ากราฟฟิค



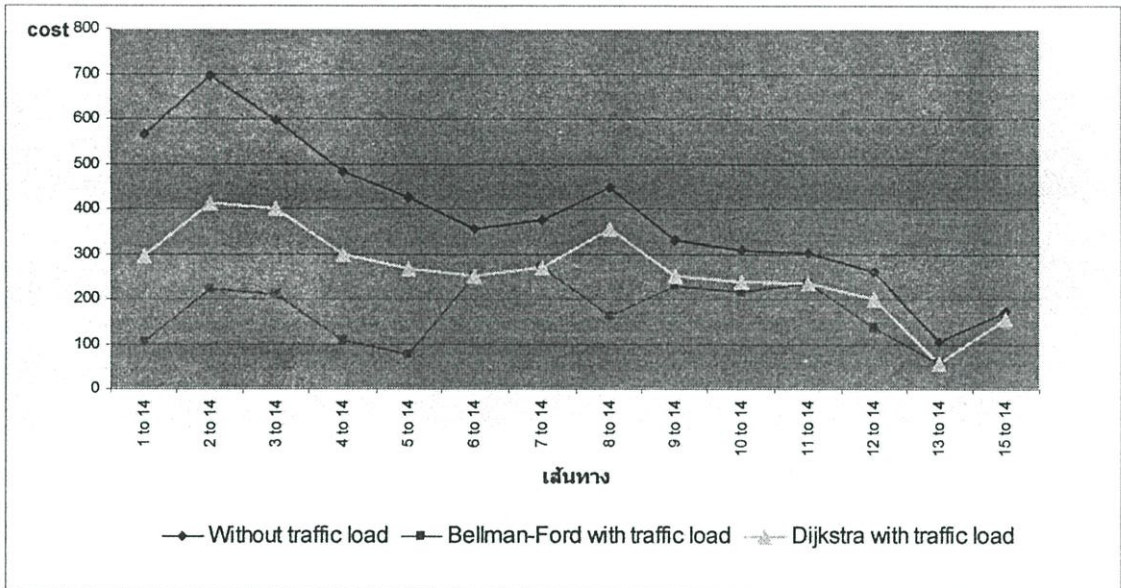
**รูปที่ 4.12** กราฟเปรียบเทียบค่าเชื่อมโยงเมื่อพิจารณาค่ากราฟฟิก

ค่าเชื่อมโยงที่ได้จากการนำกราฟฟิกมาพิจารณาสามารถนำมาคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุดของโหนดปลายทางที่ 14 โดยอาศัยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด ได้ดังตารางที่ 4.11

**ตารางที่ 4.11** ตารางแสดงผลของเส้นทางที่สั้นที่สุดของโหนดปลายทางที่ 14 พิจารณาค่ากราฟฟิก

Node N to Node 14	Routing Table	Logical Link Cost	Hop count
1 to 14	1 6 12 13 14	296.21	4
2 to 14	2 1 6 12 13 14	413.78	5
3 to 14	3 4 5 6 12 13 14	401.33	6
4 to 14	4 5 6 12 13 14	298.68	5
5 to 14	5 6 12 13 14	266.99	4
6 to 14	6 12 13 14	252.29	3
7 to 14	7 6 12 13 14	269.08	4
8 to 14	8 9 10 11 12 13 14	354.5	6
9 to 14	9 10 11 12 13 14	249.73	5
10 to 14	10 11 12 13 14	236.72	4
11 to 14	11 12 13 14	235.21	3
12 to 14	12 13 14	199.64	2
13 to 14	13 14	58.34	1
15 to 14	15 14	155.23	1

เมื่อนำอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดและอัลกอริทึมของดิกส์ตรามาหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยใช้ค่าเชื่อมโยงที่พิจารณากราฟฟิกจะได้ดังรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าค่าเชื่อมโยงที่สั้นที่สุดตามแกน y ซึ่งเป็นค่าระหว่างโหนดต่าง ๆ ไปยังโหนดปลายทางที่ 14 ตามแนวแกน x โดยพิจารณาค่ากราฟฟิกจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ไม่ได้พิจารณากราฟฟิก และระหว่าง 2 อัลกอริทึมที่นำมาใช้ในการคำนวณจะเห็นได้ว่าด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดจะให้ค่าเชื่อมโยงที่น้อยกว่าอัลกอริทึมดิกส์ตรามาก



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบเส้นทางที่สั้นที่สุดของอัลกอริทึมเบลแมนฟอร์ดและอัลกอริทึมของดิกส์ตรามากเมื่อพิจารณาค่ากราฟฟิก

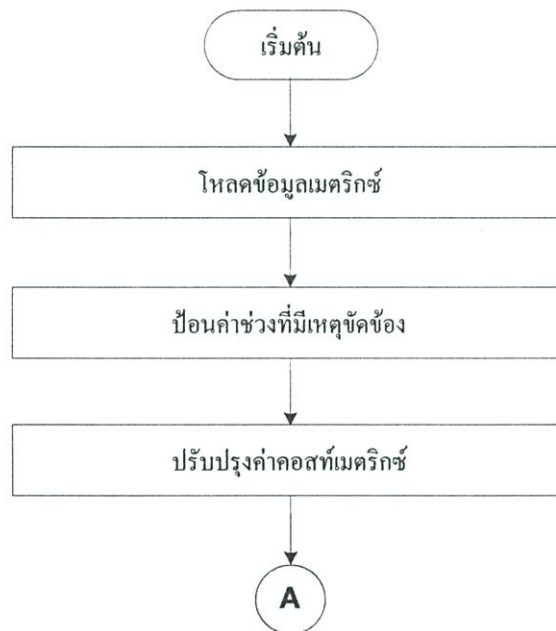
### 4.3 การคำนวณหาเส้นทางใหม่ในกรณีเกิดเหตุขัดข้องกับโครงข่าย (Minimum cost re-calculation)

ด้วยโครงข่ายระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นเป็นระบบสี่สัญญาณที่มีขนาดความจุสูง จำเป็นต้องใช้สายนำสัญญาณที่จะสามารถรองรับประสิทธิภาพของระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นได้ด้วย ซึ่งนั่นก็คือ สายเคเบิลใยแก้วนำแสง สายเคเบิลใยแก้วนำแสง (Optical fiber cable) นั้นถึงแม้ว่าจะรองรับค่าความจุสูงได้ดีแต่ก็มีข้อเสียคือแตกหักได้ง่าย หากแม้มีการหักหรือองจนทำให้ไม่เกิดการสะท้อนกลับหมดของแสง ตลอดจนมีผลกระทบจากค่าการสูญเสีย (Losses) ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เช่น ค่าการลดทอนจากการเชื่อมต่อ Splicing attenuation (0.05 dB/Point) ค่าของ Line attenuation (0.025 dB/Km) ค่าของ Connector loss (0.5 dB/connector) เป็นต้น ทำให้ในโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นที่เชื่อมโยงด้วยเคเบิลใยแก้วนำแสงนี้มีอัตราเสี่ยงต่อ

การเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับโครงข่าย ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษาถึงการป้องกันโครงข่ายโดยการทำ path protection จึงอาศัยอัลกอริทึมของการหา เส้นทางที่สั้นที่สุด ทั้ง 2 อัลกอริทึม มาคำนวณหาเส้นทางใหม่ในกรณีเกิดเหตุขัดข้องกับโครงข่าย

#### 4.3.1 การหาเส้นทางใหม่โดยใช้อัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด (Bellman-Ford algorithm)

การพิจารณาโครงข่ายทั้งหมดด้วยค่าเชื่อมโยงนั้นทำได้โดยการที่มีการปรับปรุงค่าเชื่อมโยงกันระหว่างโหนด ฉะนั้นหากมีการเปลี่ยนแปลงค่าเชื่อมโยงระบบจะทำการคำนวณค่าเชื่อมโยงที่เปลี่ยนไปใหม่โดยมีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.12

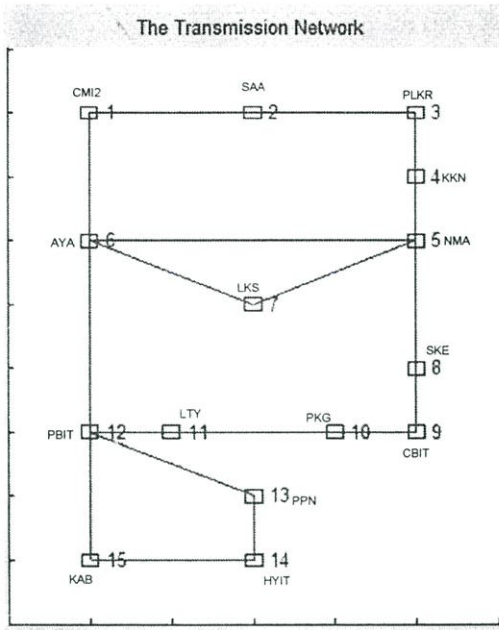


รูปที่ 4.14 บล็อกไดอะแกรมการหาเส้นทางใหม่กรณีเกิดเหตุขัดข้องด้วยอัลกอริทึมเบลแมนฟอร์ด

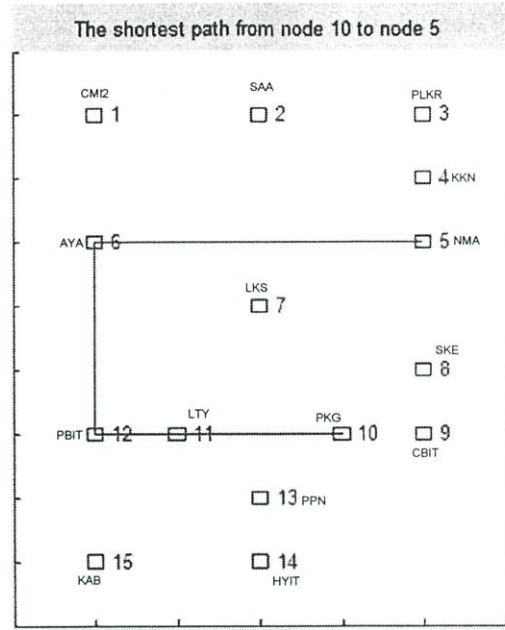
จุด A ในบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.12 นั้นหมายถึงการเชื่อมโยงไปยังบล็อกไดอะแกรมของการหาค่าเชื่อมโยงค่าสุดด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดในรูปที่ 4.6 เนื่องจากโปรแกรมจะรับค่าเป็นช่วงระหว่างโหนดสองโหนดที่มีเหตุขัดข้อง แล้วกำหนดค่าเชื่อมโยงในช่วงที่มีปัญหานั้นให้มีค่านันต์ แล้วทำการปรับปรุงคอสมติกซ์ใหม่ จึงดำเนินการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดใหม่ต่อไป

##### 4.3.1.1 กรณีมีเหตุขัดข้องในโครงข่าย 1 จุด

ผลการจำลองในกรณีที่มีเหตุขัดข้องเกิดขึ้นในโครงข่ายอาจเป็นผลเนื่องจากเคเบิลใยแก้วนำแสงขาด หรือมีสัญญาณลดทอนจนทำให้ไม่สามารถรับ-ส่งผ่านสัญญาณได้ ระหว่างโหนด 5 ไปยังโหนด 6



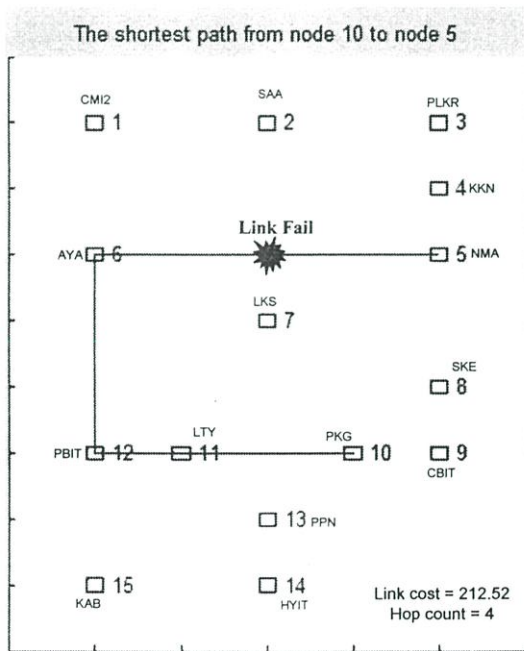
(ก)



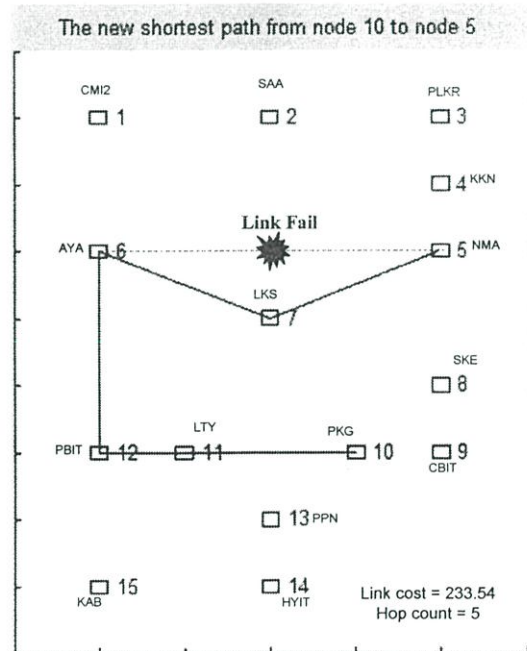
(ข)

รูปที่ 4.15 ผลการจำลองเส้นทางที่สั้นที่สุดในโครงข่ายด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด

(ก) โครงข่ายหลัก (ข) เส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10 ถึง 5



(ก)

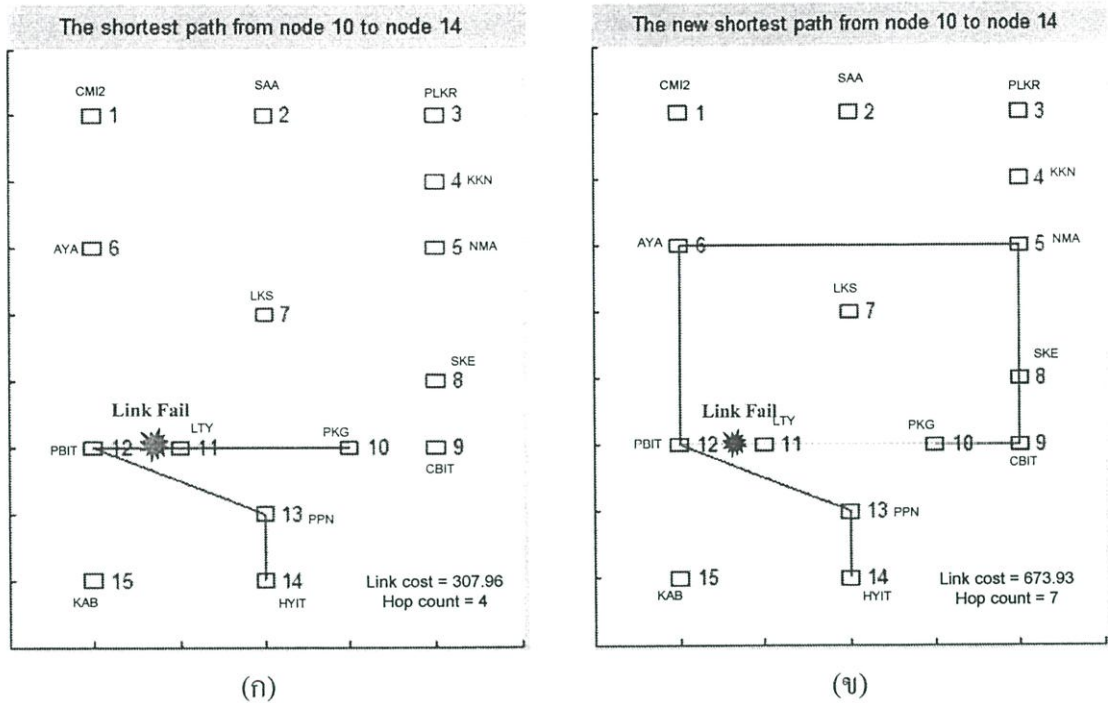


(ข)

รูปที่ 4.16 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุเสีย 1 จุดด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด

(ก) เหตุเสียระหว่างโหนด 5-6

(ข) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10 ถึง 5



รูปที่ 4.17 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุเสีย 1 จุดด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด

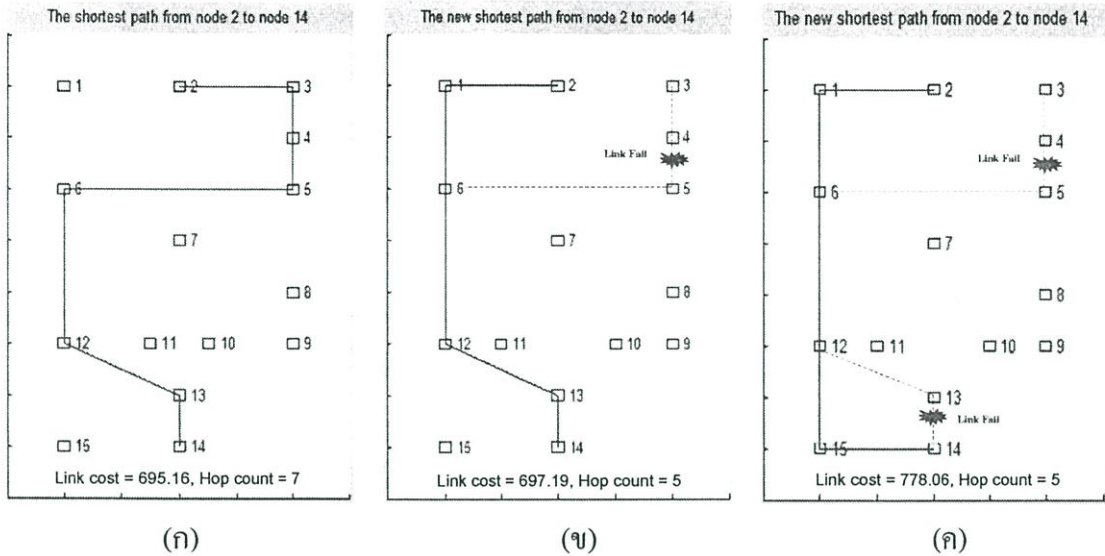
(ก) เหตุเสียระหว่างโหนด 11-12

(ข) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10 ถึง 14

#### 4.3.1.2 กรณีมีเหตุขัดข้องในโครงข่ายมากกว่า 1 จุด

ในกรณีที่มีการหาเส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดจากเหตุเสียที่เกิดขึ้นกับโครงข่ายตามหัวข้อ

4.3.1.1 จะได้ว่าจริงที่สามารถกำหนดเส้นทางใหม่ที่เหมาะสมโดยยึดค่าเชื่อมโยงที่ปรับปรุงใหม่มาทำการจำลอง และในหัวข้อนี้ได้ทำการจำลองเหตุเสียที่เกิดขึ้นกับโครงข่ายที่เกิดขึ้นมากกว่า 1 จุด เพราะเนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วสามารถเกิดขึ้นได้จริงหลาย ๆ จุดพร้อมกัน



รูปที่ 4.18 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุเสีย 2 จุดด้วยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด

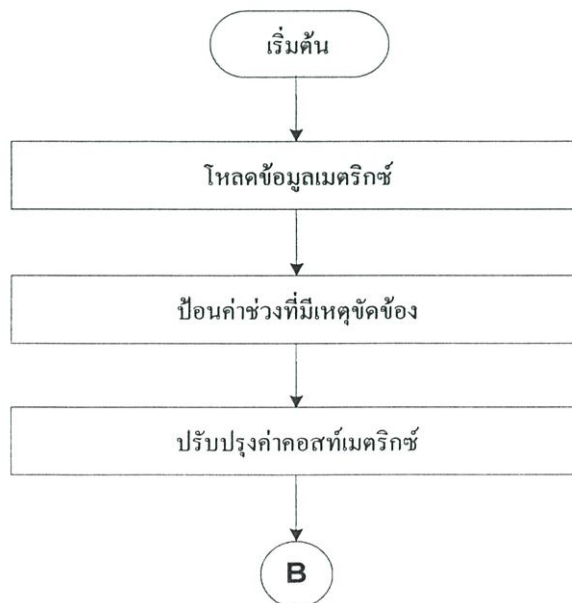
(ก) เส้นทางสั้นที่สุดจากโหนด 2-14

(ข) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10 ถึง 14 เมื่อเกิดเหตุเสียครั้งที่ 1 ที่ 4-5

(ค) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10 ถึง 14 เมื่อเกิดเหตุเสียครั้งที่ 2 ที่ 13-14

#### 4.3.2 การหาเส้นทางใหม่โดยใช้อัลกอริทึมของดijkstra (Dijkstra's Algorithm)

การพิจารณาโครงข่ายทั้งหมดด้วยค่าเชื่อมโยงนั้นทำได้โดยการที่มีการปรับปรุงค่าเชื่อมโยงกันระหว่างโหนด ฉะนั้นหากมีการเปลี่ยนแปลงค่าเชื่อมโยงระบบจะทำการคำนวณค่าเชื่อมโยงที่เปลี่ยนไปใหม่โดยมีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.17

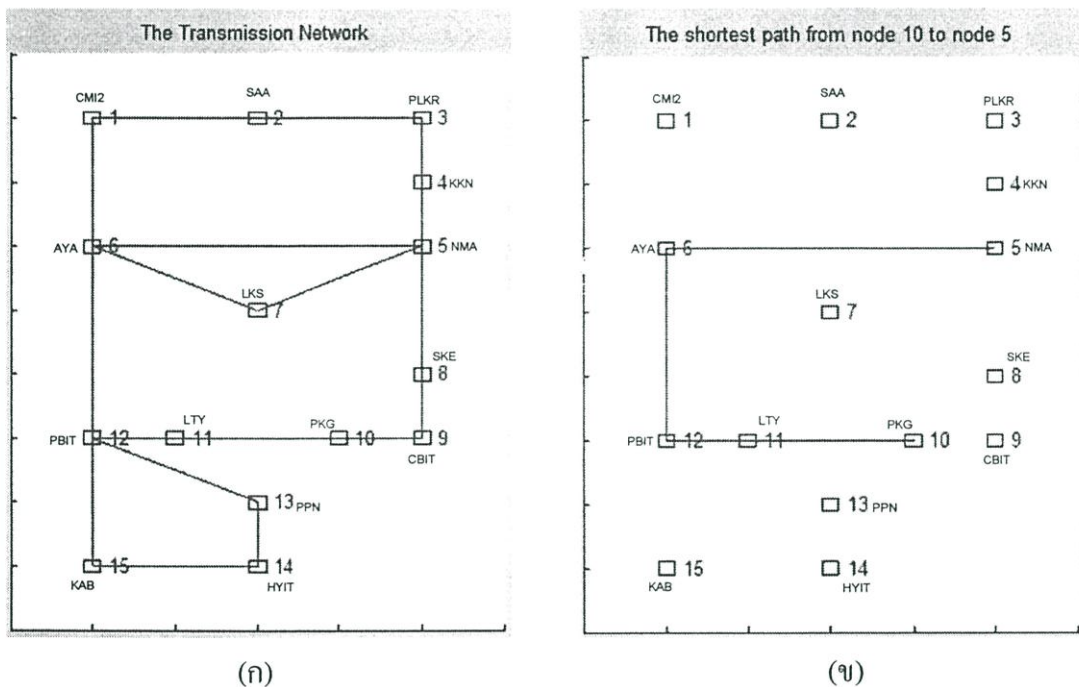


รูปที่ 4.19 บล็อกไดอะแกรมการหาเส้นทางใหม่กรณีเกิดเหตุขัดข้องด้วยดijkstraอัลกอริทึม

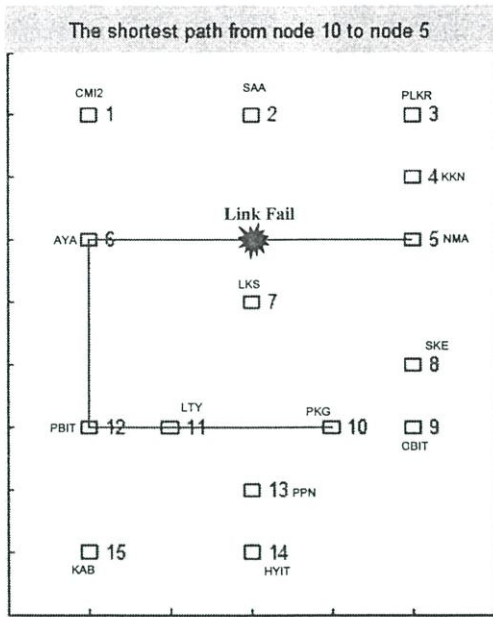
จุด B ในบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.17 นั้นหมายถึงการเชื่อมโยงไปยังบล็อกไดอะแกรมของการหาค่าเชื่อมโยงต่ำสุดด้วยอัลกอริทึมดิคัสตราในรูปที่ 4.9 เนื่องจากโปรแกรมจะรับค่าเป็นช่วงระหว่างโหนดสองโหนดที่มีเหตุขัดข้อง แล้วกำหนดค่าเชื่อมโยงในช่วงที่มีปัญหานั้นให้มีค่าอนันต์ แล้วทำการปรับปรุงคอสต์เมตริกซ์ใหม่ จึงดำเนินการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดใหม่ต่อไป

#### 4.3.2.1 กรณีมีเหตุขัดข้องในโครงข่าย 1 จุด

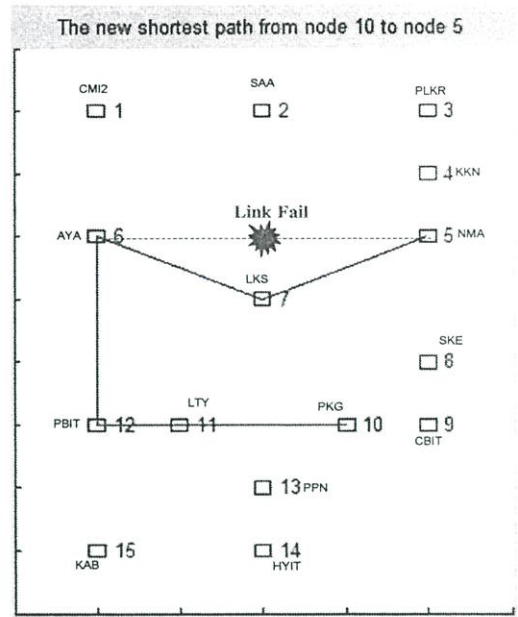
ผลการจำลองในกรณีที่มีเหตุขัดข้องเกิดขึ้นในโครงข่ายอาจเป็นผลเนื่องจากเคเบิลใยแก้วนำแสงขาดหรือมีสัญญาณลดทอนจนทำให้ไม่สามารถรับ-ส่งผ่านสัญญาณได้ระหว่างโหนด 5 และโหนด 6



รูปที่ 4.20 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุขัดข้อง 1 จุด (ก) โครงข่ายหลัก (ข) เส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10 ถึง 5

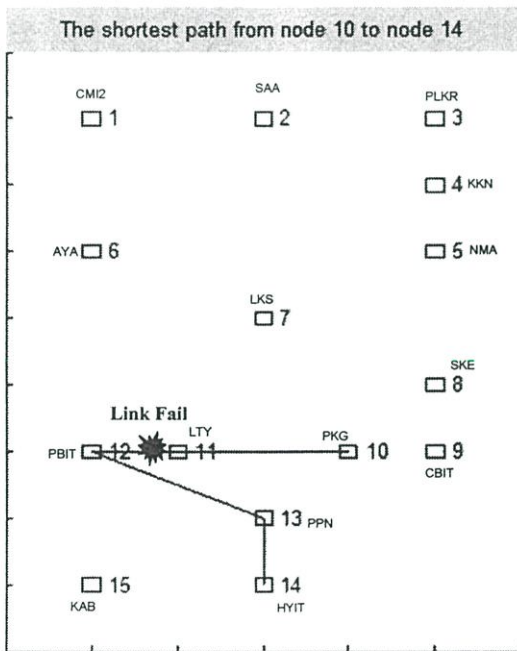


(ก)

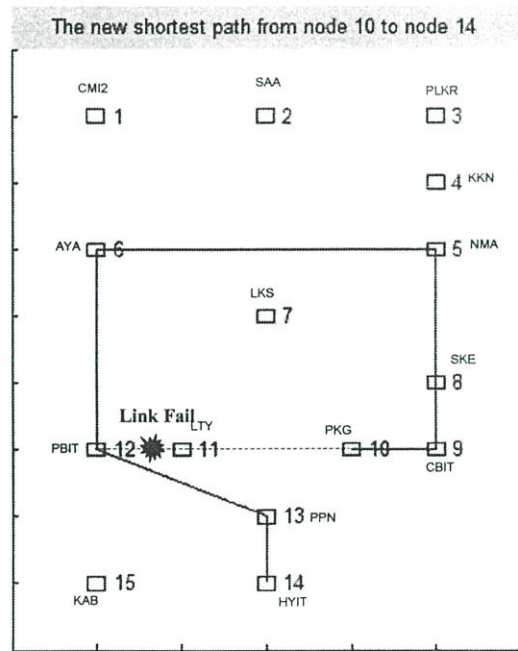


(ข)

รูปที่ 4.21 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุขัดข้อง 1 จุด (ก) เหตุเสียระหว่างโหนด 5-6 (ข) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10 ถึง 5



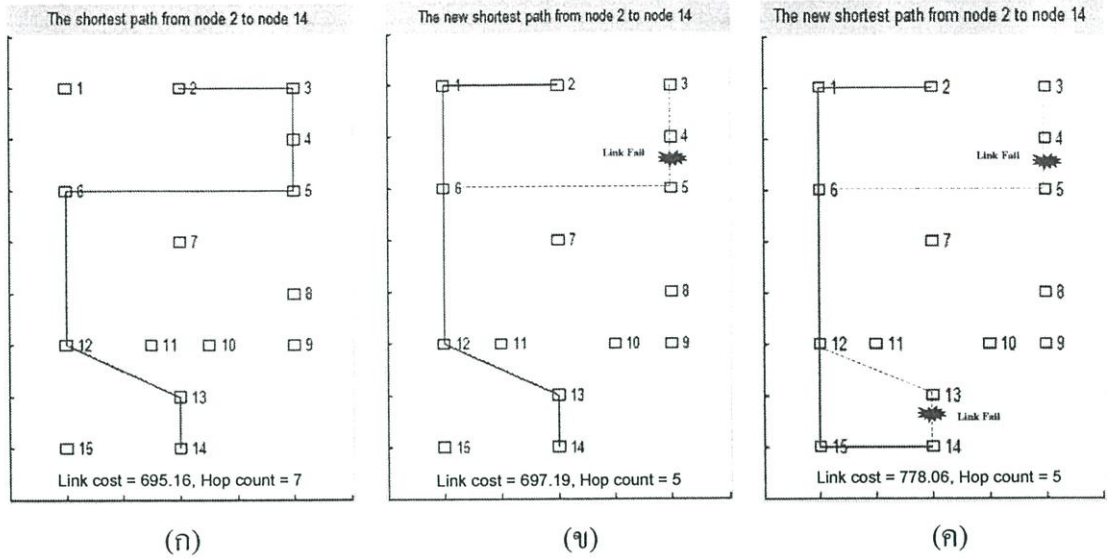
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.22 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุขัดข้อง 1 จุด (ก) เหตุเสียระหว่างโหนด 11-12 (ข) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10 ถึง 14

4.3.2.2 กรณีมีเหตุขัดข้องมากกว่า 1 จุดในโครงข่าย

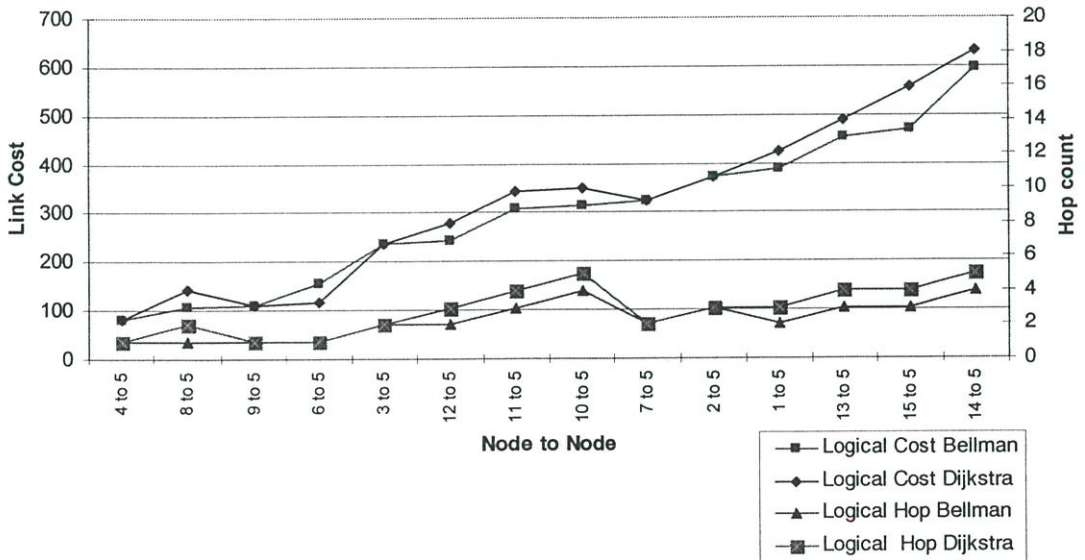


รูปที่ 4.23 ผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุขัดข้อง 2 จุดด้วยอัลกอริทึมของดิกค์สตรา

(ก) เส้นทางสั้นที่สุดจากโหนด 2-14

(ข) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10 ถึง 14 เมื่อเกิดเหตุเสียครั้งที่ 1 ที่ 4-5

(ค) เส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุดระหว่างโหนด 10 ถึง 14 เมื่อเกิดเหตุเสียครั้งที่ 2 ที่ 13-14



รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองโครงข่ายในกรณีมีเหตุขัดข้อง 2 จุดด้วยอัลกอริทึมของ

เบลแมนฟอร์ดและอัลกอริทึมดิกค์สตรา

จากผลการจำลองทั้งสองอัลกอริทึมสามารถนำมาสรุปได้ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับโครงข่าย 2 จุด โดยจะพิจารณาค่าเชื่อมโยง (Link cost) และจำนวนช่วง (Hop count) ผลจากการใช้อัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดจะให้ค่าเชื่อมโยงและจำนวนช่วงที่น้อยกว่าการใช้อัลกอริทึมของดิจค์สตราซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับวงจรที่ใช้งานจริงในโครงข่ายปัจจุบัน

การจำลองบนโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นที่นำเสนอนี้ สามารถรองรับการพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของการปรับเปลี่ยนจำนวนโหนดหรือสถานีที่เชื่อมโยงให้มีจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นได้ไม่จำกัด ตลอดจนการปรับเปลี่ยนจำนวนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการหาค่าเชื่อมโยงเพื่อหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากทั้งสองอัลกอริทึม

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 บทสรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาโครงข่ายหลักทางตรรกด้วยวิธีการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นผ่านใยแก้วนำแสงระบบการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น ซึ่งเป็นโครงข่ายหลักของบริษัท ทีโอที จำกัด มหาชน ที่ใช้เชื่อมโยงกับโครงข่ายท้องถิ่นทั่วประเทศในการรองรับความต้องการใช้งานที่มีเพิ่มมากขึ้น โดยระบบการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงมีข้อดีตรงที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูง สามารถนำไปใช้งานเชื่อมโยงโครงข่ายที่ต้องการแบนวิidth สูง ระยะทางไกลและมีการใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างคุ้มค่า โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบการกำหนดวงจรใช้งานบนโครงข่ายที่มีการติดตั้งแล้ว และมีการขยายขนาดความจุของโครงข่าย โดยการเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นเป็นชนิด 16 และ 32 ช่องสัญญาณในย่านความยาวคลื่น 1550 nm และมีสเปกตรัมของแสงตามมาตรฐาน ITU-T G.692 ซึ่งเป็นการแนะนำการใช้ความยาวคลื่น (Transponders) โดยมีระยะห่างระหว่างความยาวคลื่น (Wavelength spacing) มีค่าเท่ากับ 100 GHz สำหรับอุปกรณ์การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นชนิด 32 ช่องสัญญาณและ 200 GHz สำหรับอุปกรณ์การมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นชนิด 16 ช่องสัญญาณ

สำหรับการพิจารณาโครงข่ายทางตรรกได้พิจารณาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในแต่ละช่วง ระยะทางระหว่างโหนด และค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นกับใยแก้วนำแสง โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อคำนวณหาค่าเชื่อมโยงของแต่ละช่วงของโครงข่าย เพื่ออาศัยค่าเชื่อมโยงในการจำลองหาเส้นทางที่สั้นที่สุดของวงจรใช้งาน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์โดยอัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด (Bellman-Ford algorithm) เปรียบเทียบกับอัลกอริทึมของดิกซ์สตรา (Dijkstra's algorithm) โดยพิจารณาการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในเงื่อนไขการจำลองการเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับโครงข่ายเพื่อหาเส้นทางใหม่ ดังได้แสดงรายละเอียดมาแล้วในบทที่ 4

การศึกษากำหนดเส้นทางในโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นทางตรรกะทำให้สามารถเลือกเส้นทางที่เหมาะสม รวดเร็ว ทั้งยังสามารถวิเคราะห์ผลการจำลองในการหาเส้นทางสำรองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้เส้นทางหลักในกรณีเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับโครงข่าย และจากการจำลองทำให้ได้ผลซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

1. จำนวนความยาวคลื่นในแต่ละเส้นทางเป็นพารามิเตอร์หลักในการพิจารณาค่าเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด เนื่องจากเป็นปัจจัยในการเพิ่มหรือลดขนาด

ความจุของโครงข่ายได้ในขณะที่ค่าการสูญเสีย หรือแม้แต่ระยะทางในการเชื่อมโยงเกเบิลใยแก้วนำแสงไม่เปลี่ยนแปลงเพราะสามารถเพิ่มความยาวคลื่นได้บนสายใยแก้วนำแสงเดิม

2. ในสภาวะปกติของโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่นสามารถใช้อัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ด หรืออัลกอริทึมดิคัสตรามาวิเคราะห์หาเส้นทางที่สั้นที่สุดได้เนื่องจากทั้งสองอัลกอริทึมให้ผลลัพธ์ที่เท่ากันทั้งค่าเชื่อมโยงและจำนวนของช่วงที่ผ่าน

3. การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในกรณีเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับโครงข่าย ในกรณีที่มีเหตุขัดข้องเกิดกับโครงข่าย 1 จุด หรือมากกว่า 1 จุด การใช้อัลกอริทึมของเบลแมนฟอร์ดจะเหมาะสมในการหาเส้นทางใหม่ที่สั้นที่สุด เนื่องจากอัลกอริทึมของดิคัสตรามีข้อจำกัดเรื่องของค่าเชื่อมโยงที่ต้องมีค่าเป็นบวกเท่านั้น

4. การปรับเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นทำให้ค่าเชื่อมโยงรวมในโครงข่ายลดลงและยังทำให้เส้นทางที่สั้นที่สุดมีค่าเชื่อมโยงที่ต่ำใกล้เคียงกันจึงต้องพิจารณาที่จำนวนนับของช่วงที่ผ่าน (hop count) หากมีจำนวนนับของช่วงที่ผ่านน้อยก็จะเหมาะสมกับการกำหนดใช้งานวงจร

## 5.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

งานวิจัยในขั้นต่อไปที่น่าสนใจ

1. คือการปรับใช้วิธีการกำหนดเส้นทางในโครงข่ายหลักเพื่อทำระบบการป้องกันวงจรใช้งาน (Path protection) ควบคู่ไปกับการทำการป้องกันที่โครงข่ายหลักและทำให้โครงข่ายมีเสถียรภาพโดยพิจารณาจากผลการจำลองที่ได้ในการศึกษานี้พิจารณาสร้างเส้นทางใหม่เชื่อมโยงระหว่างโหนด (Interconnection) ที่จะทำให้ค่าเชื่อมโยงลดลง

2. เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนความยาวคลื่นจะทำให้มีระยะห่างระหว่างความยาวคลื่น (Wavelength spacing) สั้นลงทำให้มีอัตราการใช้สูญเสียมากขึ้นอาจต้องนำปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องมาพิจารณาร่วมด้วย เช่น การสูญเสียในสายใยแก้วนำแสง ระดับกำลังในการส่ง จำนวนอุปกรณ์ทวนสัญญาณในแต่ละช่วง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] อธิคม ฤกษ์บุตร. 2546. **เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งาน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [2] J.P. Laude, **Wavelength Division Multiplexing**. Paris: Simon & Schuster International Group. 1993.
- [3] G.P.Agrawal, **Fiber-Optic Communication System**. Third Edition. NY, John.Wiley & Son, Inc. 2002.
- [4] A.R.Chraplyvy. "Limitations on lightwave communications laser for optical communication." **J. Lightwave Technology**, vol.8, no.10, April, 1991. pp.1548-1557.
- [5] G.R.Waarts, A.Friesem, E.Lichtman, H.H.Yaffe, and R.P. Braum. "Nonlinear effects in coherent multichannel transmission through optical fibers." **J. Lightwave Technology**..., vol.78, no.8, May, 1990. pp.1344-1368.
- [6] A.E Wilner and S. Hwang. "Transmission of many WDM channel through a cascade of EDFA's in long-distance link and ring network." **J. Lightwave Technology**..., vol.13, no.5, July, 1995. pp.841-849.
- [7] G.R.Hill. "Wavelength domain optical network technique." **Proc. IEEE**., vol.77, no.1, August, 1990. pp.121-132.
- [8] T. Antony, A. Gumaste. **DWDM Network Designs and Engineering Solution**. Cisco Press, 2003.
- [9] A.Ehrhardt and Gladisch. "Test For WDM Field Trials Over 750 Km with Full Compensation of Chromatic Dispersion." **The Institution of Electrical Engineering, IEE Savoy Place**, London WC2R OBL, May, 1999. pp.5/1-5/5.
- [10] F.Pope, K. Wellington, G Keiser, GTE Government Systems Cooperation. "Bit Error-Rate Measurements in a WDM Network." **Proc IEEE**, May 1995. pp.1284-1287.
- [11] Alcatel University. **Alcatel 1686 WM R3.3 Operation and Maintenance**. Italy, 2000.
- [12] ITU-T rec.G.652. **Characteristics of a single-mode optical fiber cable**, ITU-T G series, 2002.
- [13] ITU-T rec.G.692. **Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers**., ITU-T G series, 2002.

- [14] ITU-T rec.G.661. **Definition and test methods for the relevant generic parameter of optical amplifier devices and sunsystem.** , ITU-T G series, 2002.
- [15] A.L.Garcia and I.Widjaja, “**Communication Networks: Shortest-Path Routing**”  
McGrawhill, 2001. pp.522-530.
- [16] พงษ์ศักดิ์ สุสัมพันธ์ไพฑูริย์. 2545. การวางแผนเครือข่าย SDH., **Computers & Electronics World.** หน้า 42-49

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

## คำย่อ

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

ภาคผนวก ข.

## บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

- [1] Mahaprom A., Anantrasirichai N., “Study on Backbone Network with WDM via Optical Fiber,” **ECTI\_CON2007**, vol. 2, May 9-12, 2007., pp. 619-622

# Study on Backbone Network with WDM Via Optical Fiber

Amornrat Mahaprom and Noppin Anantrasirichai  
 Research Center for Communications and Information Technology  
 And Department of Information Engineering, Faculty of Engineering  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
[s5061105@kmitl.ac.th](mailto:s5061105@kmitl.ac.th), [kanoppin@kmitl.ac.th](mailto:kanoppin@kmitl.ac.th)

**Abstract-** This paper studies the methodology of WDM Networks logical design, by using TOT (Telephone Organization of Thailand) backbone network for connecting between sub-networks. Bellman-Ford's algorithm is used for computing and simulation for optimal logical design of WDM network. There are three main parameters consider in this paper. Including minimum cost, shortest-path routing and re-computing of minimum cost to find out final shortest path. Furthermore, we have compared the result from logical computation with physical topology. Existing backbone optical network and traffic require of TOT are used as raw data for this study.

## I. INTRODUCTION

Design of WDM Backbone Network for connecting between Sub-networks is important. Not only considering about traffic of sub-networks all around Thailand but also the operating cost and losses in fiber optic also. Backbone network logical design is chosen for study how to make an optimal and efficiency routing in carrying increasing amounts of commercial traffic. Reliability and steady performances have become critical factors when designing and managing those networks. Large network today offer Service Level Agreements (SLAs) covering delay, port availability and losses across their network which must be maintained even if the network experiences congestion or failure. This provides strong incentives for designing conditions, i.e., fluctuating traffic patterns and intensities or topological changes caused by link and node failures [1].

In this paper, our focus is on logical design of TOT Backbone Network by considering three main parameters, Minimum Cost, Shortest-Path Routing and Re-computing of Minimum Cost in case of major category of failures,

## II. ROUTING ALGORITHM

### A. Bellman Ford Algorithm

Bellman-Ford Algorithm makes each node periodically broadcast its routing tables to all its neighbors. This algorithm have to maintain the distance tables (which is a one-dimension array—"a vector"), which tell the distances and shortest path to sending packets to each node in the network. The information in the distance table is always updated by exchanging information with the neighboring nodes [2]. The number of data in the table equals to that of all nodes in

networks (excluded itself). Each data contains the path for sending packets to each destination in the network and distance/ or time to transmit on that path (we call this as "cost"). The measurements in this algorithm are the number of hops, latency, the number of outgoing packets, etc.

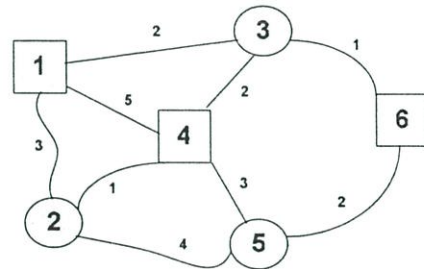


Figure 1. Sample Network with link cost

In Fig.1 if we would like to find the shortest-path between Node 2 to Node 6, from Node 2 that Node 1, 4 and 5 are neighbors and we can expect that the shortest link cost form Node 1, 4 and 5 to Node 6 are 3, 3 and 2 consequently. If we route through Node 1, the total cost is 3+3 which is equal to 6, on the other hand if we route through Node 4, the total cost is 1+3 which is equal to 4 and if we route through Node 5, the total cost is 4+2 which is equal to 6. Thus the shortest-path between Node 2 to Node 6 is routed through Node 4.

The starting assumption for distance-vector routing is each node knows the cost of the link of each of its directly connected neighbors. Next, every node sends a configured message to its directly connected neighbors containing its own distance table. Now, every node can learn and update its distance table with cost and next hops for all nodes network. Repeat exchanging until no more information between the neighbors.

Consider a node 2 to the destination node 6, the minimum cost can be found form

$$\begin{aligned}
 D_2 &= \min\{C_{21} + D_1, C_{24} + D_4, C_{25} + D_5\} \\
 &= \min\{3 + 3, 1 + 3, 4 + 2\} \\
 &= \min\{6, 4, 6\} \\
 &= 4
 \end{aligned} \tag{1}$$

Where  $C_{ij}$  is link cost between node  $i$  to node  $j$ , for example  $C_{13}=C_{31}=2$  and  $C_{ii}=0$ . So the minimum cost from node 2 to node 6 is equal 4. Thus, we can calculate the other routing as follow: From node 1 to node 6

$$D_1 = \min\{C_{12} + D_2, C_{13} + D_3, C_{14} + D_4\} \quad (2)$$

While form node 4 to node 6

$$D_4 = \min\{C_{41} + D_1, C_{42} + D_2, C_{45} + D_5\} \quad (3)$$

For  $d$ , the distance to destination, we can consider Bellman-Ford Algorithm as follow:

1. Initial state

$$D_i = \infty \quad \text{Where } i \neq d \quad (4)$$

$$D_d = 0 \quad (5)$$

2. Update state (to find out the shortest-path to destination via neighbors) where  $i \neq d$

$$D_i = \min\{C_{ij} + D_j\} \quad \text{FOR } j \neq i \quad (6)$$

This equation suggests that the form of neighbor-to-neighbor communication that will take place in the Distance-vector (DV) routing [3] - each node must know the cost of each of its neighbors' minimum-cost path to each destination. Hence, whenever a node computes a new minimum cost to some destination, it must inform its neighbors of this new minimum cost.

$$D_{ij} = 0 \quad (7)$$

$$D_{ij} = \min\{C_{ik} + D_{kj}\} \quad (8)$$

$D_{ij}$  is the minimum cost from node  $i$  to destination node  $j$ . When update state node  $i$  will distribute vector  $\{D_{i1}, D_{i2}, D_{i3}, \dots\}$  to its neighbors.

**B. Link Cost Calculation**

In this paper, we calculate the link cost from 3 factors: the number of wavelength in each physical link  $N_\lambda$ , Total losses (L), and Distance (d) between nodes. The formula can be represented as

$$\text{Link Cost} = A + B + C \quad (9)$$

Where  $A = (1/N_\lambda) * w_1$  (10a)

$B = L * w_2$  (10b)

$C = d * w_3$  (10c)

Replace A, B, C in (9) with (10a)-(10c), Thus

$$\text{Link Cost} = ((1/N_\lambda) * w_1) + (d * w_2) + (L * w_3) \quad (11)$$

where  $N_\lambda$  is Number of wavelength  
 $d$  is distance (km)  
 $L$  is Losses  
 $w_1$  is weight factor in term of number of wavelength  
 $w_2$  is weight factor in term of distance  
 $w_3$  is weight factor in term of losses

The total losses are from Fiber loss (0.2525 dB/km), Connection losses (0.5 dB/1 connection point) and Margin (4 dB/section). The weight setting are  $w_1+w_2+w_3=1$  and  $w_1=0.5, w_2=0.3, w_3=0.2$ . The major factor of this study is on number of wavelength because it provides the minimum link cost and it is the main parameter in expansion/reduction of WDM capacity while the physical distance is not changed.

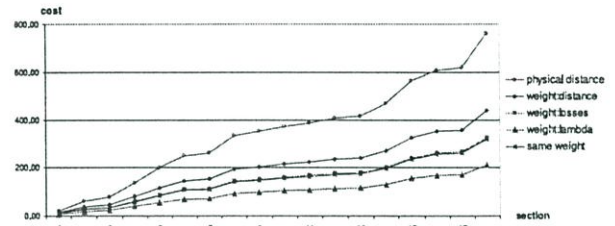


Figure 2. Link cost calculation in different weight setting

From (11) we will get backbone network with link cost as in Fig. 3

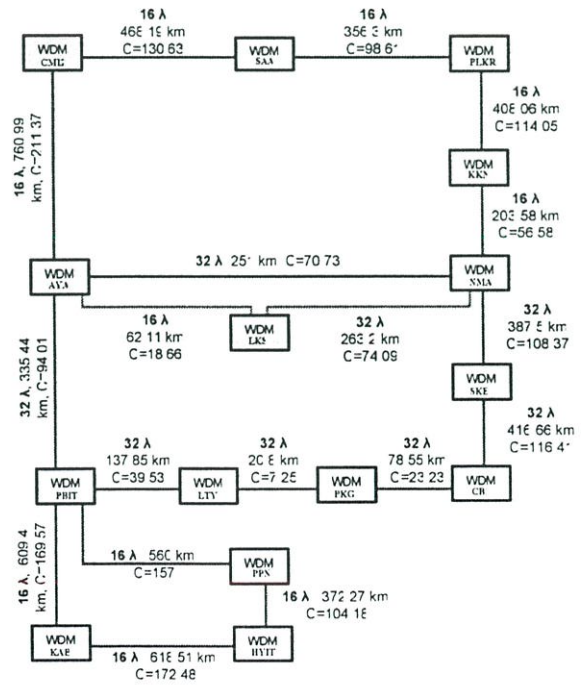


Figure 3. TOT Backbone Network with link cost

C. Minimum Cost Calculation

For all node  $i$ , the assign value are  $(n, D_i)$  where  $n$  is the shortest next hop and  $D_i$  is the minimum cost from node  $i$  to node  $j$  as (6). In case of none specific destination we have to assign  $n$  equal -1 for the first time calculation. The starting assumption for distance-vector routing is each node knows the cost of the link of each of its directly connected neighbors. Next, every node sends a configured message to its directly connected neighbors containing its own distance table. Now, every node can learn and update its distance table with cost and next hops for all nodes network. Repeat exchanging until no more information between the neighbors.

D. Shortest Path Routing

From section C, after exchanging cost until no more information between the neighbors, we will get shortest-path routing. In this paper we consider the condition from equation (7) and (8) and use Matlab to calculate Minimum Cost and Shortest-path.

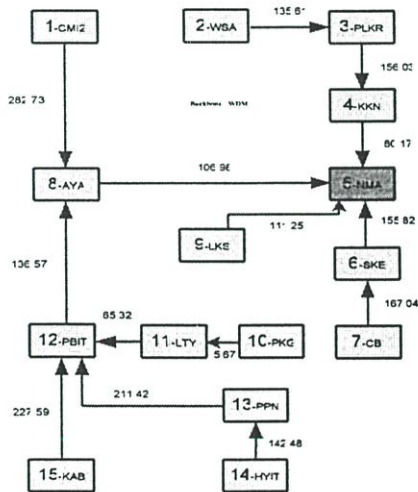


Figure 4. The shortest-path routing to destination Node 5

Fig. 3 show the example of calculate result to route a path connection between other nodes to destination node 5 with the shortest-path and minimum cost.

E. Minimum Cost Re-computation

It is beneficial to discuss the concept of critical links and our approach for finding them. Our goal is to compute a routing solution that protects the network performance against the failure of links that impact the network most on failure. In case of physical link failure, we have to re-routing path to the other route. We can follow up the process of section D by generate the link cost of failure to infinity and re-start

calculate shortest-path and update its distance table with cost and next hops for all nodes network.

Fig. 4 shows the new shortest-path routing to destination Node 5 when the link failure occur between node 8 and node 5. The new path will be routed to avoid the broken link but the re-calculation is still being base on Bellman-Ford algorithm with the minimum link cost.

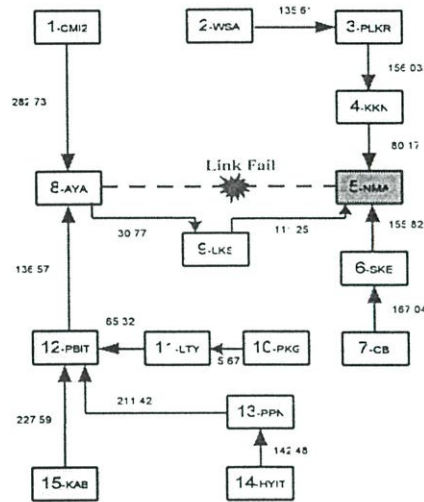


Figure 5. The new shortest-path routing to destination Node 5 with link failure

III. NUMERICAL RESULTS

In this section, we present the curves to compare the results of Physical distance and Logical Link Cost and between Logical and Physical Hop count. The parameters of node source to destination node, we have chosen node 5 and node 14 as destination nodes. Fig. 6 shows the comparison between Physical and Logical link cost of node  $i$  to node 5 and node 14 and Logical and Physical hop count. The same hop count on both techniques shows that the algorithm will provide the optimize path that match to the real network. Fig. 7 shows the Cost of distance and hop count in link failure between node 11 and node 12 that sorted by physical distance in each section. Fig. 8 shows the Cost of distance and hop count in link failure between node 5 and node 8 that sorted by physical distance in each section as shown.

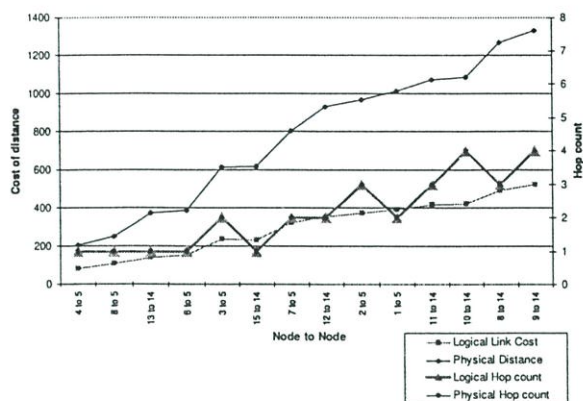


Figure 6. The comparison between Physical and Logical Cost Distance and Hop count

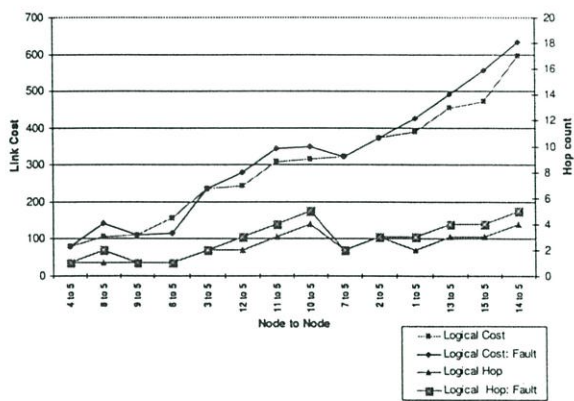


Figure 8. The new shortest-path routing to destination Node 5 with link failure

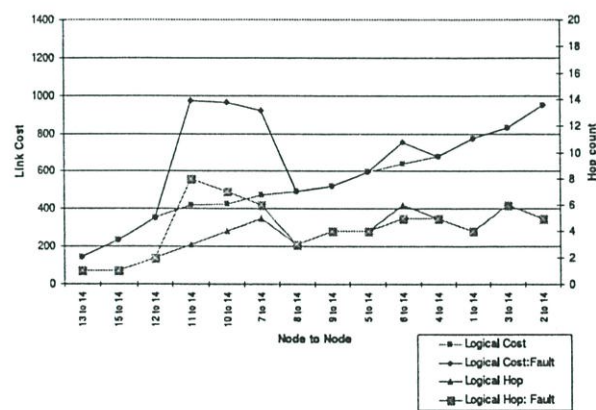


Figure 7. The new shortest-path routing to destination Node 5 with link failure

#### IV. CONCLUSIONS

Shortest-Path routing is introduced into design logical network for connecting between Sub-networks. Bellman-Ford's Algorithm is used for computing and simulation for optimal logical design of WDM network by considering in the link cost that can be calculated in term of number of wavelength in majority. Three main parameters consider in this paper including Minimum Cost, Shortest-Path Routing and Re-computing of Minimum Cost to find out final shortest path. Furthermore, the expansion or reduction of WDM network capacity can be changed by number of wavelength that updated link cost and new shortest-path.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Assoc.Prof. Noppin Anantrasirichai for reading and helpful discussions.

#### REFERENCES

- [1] Ashwin Sridharan, R. Guerin, and C. Diot. "Achieving Near-Optimal Traffic Engineering Solutions for Current OSPF/IS-IS Networks," *Proceeding of INFOCOM'2003*, April 2003.
- [2] Andrew S. Tanenbaum, "Computer Networks," *Pearson Education*, pp.294-302.
- [3] Martha E. Steenstrup, "Routing in Communications Networks" *Prentice Hall International, Inc.*, pp.136-145.
- [4] Alberto Leon-Garcia and Indra Widjaja, "Communication Networks: Shortest-Path Routing" *McGrawhill*, pp.552-530.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวอมรรัตน์ มหาพรหม
วัน เดือน ปีเกิด	2 ธันวาคม 2518 ที่อุตรธานี
ที่อยู่	38/728 หมู่ 5 บ้านสวนแจ้งวัฒนะอาคารซี ถนนแจ้งวัฒนะ แขวงสีกัน เขตดอนเมือง กรุงเทพฯ 10210 โทร. 0-2574-1168
ประวัติการศึกษา	2541 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2550 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2542-2543	ตำแหน่งผู้ช่วยสอนภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรธานี
ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกร 5 บริษัททีโอที จำกัด (มหาชน) สำนักงานใหญ่ แจ้งวัฒนะ