

การออกแบบการจัดสรรเส้นทางใหม่ในโครงข่าย WDM สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์เมื่อ
โครงข่ายเกิดความเสียหายหนึ่งโนด



นาย คุณนันท์ ลือกิจนา

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

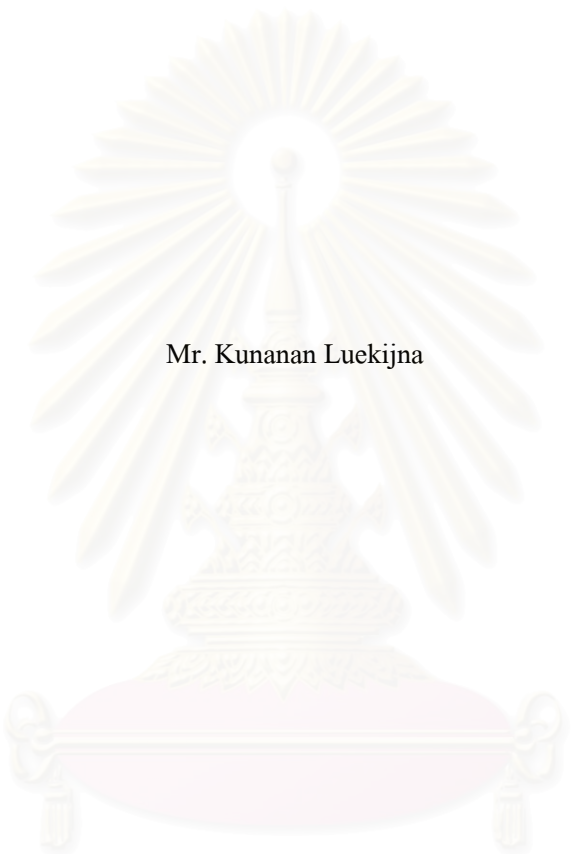
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MULTICAST TRAFFIC RECONFIGURATION IN WDM NETWORK FOR SINGLE NODE
FAILURE DESIGN



Mr. Kunanan Luekijna

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบการจัดสรรเส้นทางใหม่ในโครงข่าย WDM
สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคลาสต์เมื่อโครงข่ายเกิดความเสียหาย
หนึ่งโหนด

โดย

นาย คุณนันท์ ลือกิจนา

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. คิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย จิตะพันธ์กุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญฉกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ)

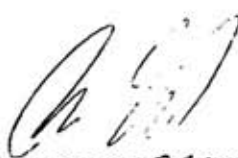
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขวณันต์ อัสวกุล)

คุณนันท ลือภักจินา : การออกแบบการจัดสรรเส้นทางใหม่ในโครงข่าย WDM สำหรับ
 ทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์เมื่อโครงข่ายเกิดความเสียหายหนึ่งโหนด (MULTICAST
 TRAFFIC RECONFIGURATION IN WDM NETWORK FOR SINGLE NODE
 FAILURE DESIGN) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร, จำนวน 133 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอปัญหาผลการศึกษาสองปัญหาที่สำคัญของโครงข่าย W D M (Wavelength Division Multiplexing) ที่รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ สำหรับปัญหาแรกที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอคือ ปัญหาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ของโครงข่าย W D M และปัญหาที่สองที่วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอคือ ปัญหาการป้องกันโครงข่าย W D M จากความเสียหายหนึ่งโหนด ซึ่งได้นำวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ Reconfiguration of entire network ที่ได้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้แล้ว[22] และนำเสนอแนวทางการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี Reconfiguration of traffic traversing through failure node และ Reconfiguration of traffic adjacent to failure node โดยการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่น่าเสนอนี้จะหลีกเลี่ยงโหนดที่ขัดข้องในเส้นทางที่ไม่ซ้ำโหนด(Node Disjoint) ซึ่งทั้งสองปัญหานี้มีวัตถุประสงค์ร่วมในการศึกษาคือ เพื่อทำการออกแบบโครงข่าย W D M ให้สามารถรองรับการใช้งานได้ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่โครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด โดยพิจารณาในประเด็นของจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ และวิทยานิพนธ์นี้ยังได้พิจารณาถึงความสำคัญของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสงหนึ่งเส้น รวมไปถึงลักษณะการวางเส้นใยนำแสงในโครงข่ายว่ามีผลอย่างไรต่อจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมของระบบ ดังนั้น เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์จะใช้เทคนิค Integer linear programming (ILP) ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด หรือจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายมีค่าต่ำที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต 
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

4770283521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

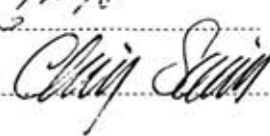
KEYWORD : MULTICASTING/ WDM NETWORK/ ROUTING AND WAVELENGTH
ASSIGNMENT/ ILP/ NODE FAILURE.

KUNANAN LUEKIJNA : MULTICAST TRAFFIC RECONFIGURATION IN WDM
NETWORK FOR SINGLE NODE FAILURE DESIGN.THESIS ADVISOR : ASST.
PROF.DR CHAIYACHET SAIVICHIT , 133 PP

The thesis studies two problems in optical WDM networks design that supports multicast traffic. Firstly, the multicast routing and wavelength assignment (MC-RWA) problem that are studied . Whereas, the second problem studies the problem of provisioning protection systems to enable WDM network to survive a single node failure. The study was based on previously proposed algorithm; Reconfiguration of entire network. In this thesis two reconfiguration methods are proposed; namely; Reconfiguration of traffic traversing through failure node and Reconfiguration of traffic adjacent to failure node. Both proposed methods consider node disjoint protection.

As started, work in this thesis is concerned with the design WDM network to support multicast traffic in normal or single node failure of conditions. Not only this thesis considers the number of fiber requirement but also the influence of the maximum wavelengths multiplexed per fiber and wavelength conversion on fiber requirement. Integer linear programming (ILP) technique are used to obtain the fiber requirement of each reconfigure method.

Department Electrical Engineering Student's Signature 

Field of study Electrical Engineering Advisor's Signature 

Academic Year 2006

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ สายวิจิตรอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เซาว์นดิศ อัสกุล ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม ให้คำแนะนำต่างๆรวมไปถึงคำวิจารณ์ในเชิงสร้างสรรค์ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยด้วยดี ตลอดจนความเมตตา และเอาใจใส่ต่อผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คุณเจริญชัย บวรธรรมรัตน์ คุณกมล วรดิษฐ์ คุณอนุชิต มั่นจิรังกูร คุณกนกภรณ์ วิสเพ็ญและคุณวราภรณ์ วัฒนวรกุล สำหรับคำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนความช่วยเหลือที่มีให้มาโดยตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณความคิดเห็นดีๆและข้อเสนอแนะในมุมมองที่แตกต่าง กำลังใจ และแรงสนับสนุนจากเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆทุกคน ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ชั้น 13 ตึกวิศวกรรมไฟฟ้า4 ที่ทำให้การศึกษาค้นคว้าหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยของข้าพเจ้าเต็มไปด้วยความทรงจำที่ดีและมีคุณค่า

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความรักความอบอุ่น ความเอาใจใส่ ในทุกเรื่องของข้าพเจ้าอย่างบริสุทธิ์ใจ และขอบคุณพี่สาวที่คอยห่วงใยและคอยเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าตลอดการทำวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....		จ
กิตติกรรมประกาศ.....		ฉ
สารบัญ.....		ช
สารบัญตาราง.....		ญ
สารบัญภาพ.....		ฎ
บทที่		
1	บทนำ.....	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์.....	5
	1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
	1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	6
	1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2	การออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับทราฟฟิกชนิคมัลติคลาสต์.....	7
	2.1 โครงข่าย DWDM.....	7
	2.2 การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิคมัลติคลาสต์บนโครงข่ายWDM.....	10
	2.2.1 การจัดเส้นทาง (Routing Assignment).....	11
	2.2.2 การกำหนดความยาวคลื่น (Wavelength Assignment).....	12
	2.2.2.1 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light-Tree method, LT).....	12
	2.2.2.2 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-Tree method, VLT).....	13
	2.3 การจัดเส้นทางใหม่เพื่อความปลอดภัยของโครงข่าย (Reconfiguration for Network Survival).....	13
	2.4 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นหนึ่ง โหนดภายในโครงข่าย.....	18
	2.4.1 Reconfiguration of entire network.....	19
	2.4.2 Reconfiguration of traffic traversing through failure node.....	20
	2.4.3 Reconfiguration of traffic adjacent to failure node.....	21

บทที่	หน้า
3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์23
3.1	แบบจำลองของโครงข่าย (Network model).....23
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ26
3.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง.....22
3.4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายทำงานในสถานะปกติ27
3.5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด29
3.5.1	Reconfiguration of entire network29
3.5.1.1	กรณี VLT.....30
3.5.1.2	กรณี LT.....31
3.5.2	Reconfiguration of traffic traversing through failure node32
3.5.2.1	กรณี VLT.....32
3.5.2.2	กรณี LT.....33
3.5.3	Reconfiguration of traffic adjacent to failure node34
3.5.3.1	กรณี VLT.....35
3.5.3.2	กรณี LT.....36
4	ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยการทดสอบและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้38
4.1	ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์38
4.2	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ41
4.2.1	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดในกรณีโครงข่ายทำงานในสถานะปกติ41
4.2.2	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด43
4.3	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่าย46
4.3.1	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายทำงานในสถานะปกติ46
4.3.2	การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด48

4.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	49
4.4.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. ในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ.....	49
4.4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. ในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด	52
4.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ.....	56
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการวิจัย	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
รายการอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการในกรณีโครงข่ายมีความเสียหาย หนึ่งโหนด	63
ภาคผนวก ข อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายมีความเสียหาย หนึ่งโหนด	84
ภาคผนวก ค ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด.....	105
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	133

สารบัญตาราง

ตารางประกอบ	หน้า
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ.....	42
ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด.....	44
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ	47
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด.....	49
ตารางที่ 4.5 จำนวนตัวแปรในกรณีโครงข่ายทำงานสภาวะการใช้งานปกติ.....	51
ตารางที่ 4.6 จำนวนสมการในกรณีโครงข่ายทำงานสภาวะการใช้งานปกติ.....	52
ตารางที่ 4.7 จำนวนตัวแปรในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด.....	54
ตารางที่ 4.8 จำนวนสมการในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด	55
ตารางที่ ก.1 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 1 เสียหาย	77
ตารางที่ ก.2 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 2 เสียหาย	77
ตารางที่ ก.3 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 3 เสียหาย	78
ตารางที่ ก.4 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 4 เสียหาย	78
ตารางที่ ก.5 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 5 เสียหาย	79
ตารางที่ ก.6 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 6 เสียหาย	79
ตารางที่ ก.7 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 7 เสียหาย	80
ตารางที่ ก.8 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 8 เสียหาย	80
ตารางที่ ก.9 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 9 เสียหาย	81
ตารางที่ ก.10 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 10 เสียหาย	81
ตารางที่ ก.11 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 11 เสียหาย	82
ตารางที่ ก.12 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 12 เสียหาย	82
ตารางที่ ก.13 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 13 เสียหาย	83
ตารางที่ ก.14 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 14 เสียหาย	83
ตารางที่ ข.1 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 1 เสียหาย(%).....	98
ตารางที่ ข.2 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 2 เสียหาย(%).....	98
ตารางที่ ข.3 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 3 เสียหาย(%).....	99
ตารางที่ ข.4 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 4 เสียหาย(%).....	99
ตารางที่ ข.5 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 5 เสียหาย(%).....	100
ตารางที่ ข.6 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 6 เสียหาย(%).....	100

ตารางประกอบ	หน้า
ตารางที่ ข.7 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โนด 7 เสียหาย(%).....	101
ตารางที่ ข.8 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โนด 8 เสียหาย(%).....	101
ตารางที่ ข.9 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โนด 9 เสียหาย(%).....	102
ตารางที่ ข.10 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โนด 10 เสียหาย(%).....	102
ตารางที่ ข.11 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โนด 11 เสียหาย(%).....	103
ตารางที่ ข.12 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โนด 12 เสียหาย(%).....	103
ตารางที่ ข.13 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โนด 13 เสียหาย(%).....	104
ตารางที่ ข.14 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โนด 14 เสียหาย(%).....	104
ตารางที่ ค.1 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 1 เสียหาย(%).....	119
ตารางที่ ค.2 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 2 เสียหาย(%).....	119
ตารางที่ ค.3 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 3 เสียหาย(%).....	120
ตารางที่ ค.4 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 4 เสียหาย(%).....	120
ตารางที่ ค.5 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 5 เสียหาย(%).....	121
ตารางที่ ค.6 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 6 เสียหาย(%).....	121
ตารางที่ ค.7 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 7 เสียหาย(%).....	122
ตารางที่ ค.8 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 8 เสียหาย(%).....	122
ตารางที่ ค.9 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 9 เสียหาย(%).....	123
ตารางที่ ค.10 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 10 เสียหาย(%).....	123
ตารางที่ ค.11 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 11 เสียหาย(%).....	124
ตารางที่ ค.12 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 12 เสียหาย(%).....	124
ตารางที่ ค.13 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 13 เสียหาย(%).....	125
ตารางที่ ค.14 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 14 เสียหาย(%).....	125

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงข่ายที่รองรับมัลติคาสต์และข่ายเชื่อมโยงแบบต้นไม้เชิงแสงระหว่างกลุ่ม โหนด	2
รูปที่ 2.1 ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น	8
รูปที่ 2.2 โครงข่าย WDM แบบมัลติคาสต์กับต้นไม้เชิงแสง	8
รูปที่ 2.3 สถาปัตยกรรมของ MC-OXC	9
รูปที่ 2.4 สถาปัตยกรรมของ MC-OXC กับความสามารถในการเปลี่ยนความยาวคลื่น	10
รูปที่ 2.5 ลักษณะการจัดเส้นทางบนโครงข่าย WDM โดยอยู่บนพื้นฐานของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง	11
รูปที่ 2.6 ลักษณะการจัดเส้นทางบนโครงข่าย WDM โดยอยู่บนพื้นฐานของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง	11
รูปที่ 2.7 ลักษณะการจัดเส้นทางบนโครงข่าย WDM โดยอยู่บนพื้นฐานของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง	12
รูปที่ 2.8 ลักษณะการกำหนดความยาวคลื่นบน โครงข่าย WDMแบบวิธี โครงสร้างต้นไม้เชิงแสง	13
รูปที่ 2.9 ลักษณะการกำหนดความยาวคลื่นบน โครงข่าย WDMแบบวิธี โครงสร้างต้นไม้เชิงแสง	13
รูปที่ 2.10 แสดงวิธีการบูรณะความเสียหายภายใน โครงข่าย	14
รูปที่ 2.11 การเตรียมเส้นทางสำรองไว้รองรับระดับเส้นทาง	15
รูปที่ 2.12 การเตรียมเส้นทางสำรองไว้รองรับระดับการเชื่อมต่อ	16
รูปที่ 2.13 เส้นทางสำรองที่เส้นทางอื่นไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้	16
รูปที่ 2.14 เส้นทางสำรองสามารถใช้งานร่วมกันได้ในเวลาที่ต่างกัน	17
รูปที่ 2.15 เส้นทางหลักสามารถใช้งานร่วมกับเส้นทางหลักและเส้นทางสำรองเส้นอื่น	17
รูปที่ 2.16 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายที่ โหนดแบบ Reconfiguration of entire network	19
รูปที่ 2.17 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายที่ โหนดแบบ Reconfiguration of traffic traversing through failure node	20
รูปที่ 2.18 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายที่ โหนดแบบ Reconfiguration of traffic adjacent to failure node	21

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.1 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ 14 โหนด 21 ข่ายเชื่อมโยง.....	38
รูปที่ 4.2 ทราฟฟิกที่ใช้สำหรับหาผลเฉลี่ย.....	39
รูปที่ 4.2 ทราฟฟิกที่ใช้สำหรับหาผลเฉลี่ย(ต่อ).....	39
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ.....	42
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด	44
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ	47
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด.....	48
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบจำนวนตัวแปรในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ.....	50
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบจำนวนสมการในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ	51
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบจำนวนตัวแปรในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด.....	53
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบจำนวนสมการในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด.....	55
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการกระจายทราฟฟิกออกจากบริเวณที่เสียหายของโครงข่ายระหว่างวิธีการจัดเส้นทางใหม่ที่น่าเสนอวิธี TT และ AD.....	56
รูปที่ ก.1 โหนด1เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	63
รูปที่ ก.2 โหนด1เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	63
รูปที่ ก.3 โหนด2เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	64
รูปที่ ก.4 โหนด2เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	64
รูปที่ ก.5 โหนด3เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	65
รูปที่ ก.6 โหนด3เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	65
รูปที่ ก.7 โหนด4เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	66
รูปที่ ก.8 โหนด4เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	66
รูปที่ ก.9 โหนด5เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	67
รูปที่ ก.10 โหนด5เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	67
รูปที่ ก.11 โหนด6เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	68
รูปที่ ก.12 โหนด6เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	68
รูปที่ ก.13 โหนด7เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	69
รูปที่ ก.14 โหนด7เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	69
รูปที่ ก.15 โหนด8เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	70
รูปที่ ก.16 โหนด8เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	70
รูปที่ ก.17 โหนด9เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	71
รูปที่ ก.18 โหนด9เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	71

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ ค.25 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนค13เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลง ผันความยาวคลื่น.....	117
รูปที่ ค.26 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนค13เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ แปลงผันความยาวคลื่น	117
รูปที่ ค.27 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนค14เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลง ผันความยาวคลื่น.....	118
รูปที่ ค.28 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนค14เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ แปลงผันความยาวคลื่น	118



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น[1,2] (Wavelength Division Multiplexing, WDM) เป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้กับโครงข่ายความเร็วสูง (High-Speed Network) ซึ่งสามารถส่งผ่านข้อมูลได้หลายประเภทพร้อมๆ กัน เช่น ข้อมูล ภาพ หรือ เสียงภายในโครงข่ายเดียว ลักษณะเด่นของ WDM คือเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงซึ่งสามารถใช้ประโยชน์จากความกว้างของช่องสัญญาณหรือแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของเส้นใยนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับการใช้ออกแบบโครงข่ายความเร็วสูงในอนาคตอย่างมาก ซึ่งจะสามารถส่งข้อมูลได้สูงถึงระดับ Terrabits per second (Tbps) หลักการทำงานของ WDM คือ การมัลติเพล็กซ์ช่องสัญญาณหลายๆ ช่องรวมกันเพื่อส่งข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียว โดยช่องสัญญาณแต่ละช่องอาศัยคลื่นพาห์ (Carrier) ที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน

ในปัจจุบันนี้ การเจริญเติบโตของเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นและการใช้งานของเส้นใยนำแสง ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อตอบสนองความต้องการการบริโภคข้อมูลข่าวสารของผู้ใช้งาน เช่นการให้บริการ E-Business การศึกษาทางไกล (Distance Learning) การประชุมทางไกล (Teleconference) การสัมมนาผ่านทางวิดีโอ (Video Conference) การประมูลที่มีการถ่ายทอดสด (Live Auction) การถ่ายทอดสดทางอินเทอร์เน็ต การส่งข้อมูลวิดีโอไปยังผู้รับที่ร้องขอ (Video on Demand) และ เกมออนไลน์ เป็นต้น ดังนั้น โครงข่ายต้องสามารถรองรับทราฟฟิกที่มีการส่งจาก โหนดต้นทางไปยังกลุ่มของโหนดปลายทางได้ในเวลาเดียวกันหรือที่เรียกว่ามัลติคาสต์ (Multicast) [3] ได้

ในอดีตที่ผ่านมาเน้นการออกแบบโครงข่าย WDM โดยมากเป็นงานวิจัยเพื่อรองรับการให้บริการแบบยูนิคาสต์ (Unicast) ซึ่งเป็นทราฟฟิกที่มีลักษณะเชื่อมต่อระหว่างโหนดต้นทางและ โหนดปลายทางในการส่งข้อมูลเป็นการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point) แต่ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยี และ พฤติกรรมของผู้ใช้บริการพบว่า ในอนาคตการบริการแบบมัลติคาสต์ มีแนวโน้มที่จะได้รับการตอบสนองจากผู้ใช้เพิ่มมากขึ้น เพราะสามารถตอบสนองความต้องการบริการรูปแบบเดียวกันสำหรับผู้ใช้งานจำนวนมากได้ในช่วงเวลาเดียวกัน โดยอาศัยการเชื่อมต่อแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-Multipoint) ในการส่งข้อมูลด้วยรูปแบบของการบริการที่เปลี่ยนไป จึงจำเป็นต้องมีการประยุกต์ปรับเปลี่ยนโครงข่ายให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัย [4] เสนอลักษณะการส่งข้อมูลแบบ โครงสร้างต้นไม้เชิง

แสง (Light-Tree) ดังรูปที่ 1.1 เพื่อสนับสนุนบริการแบบมัลติคาสต์ โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณ (Wavelength Splitter) ลงบนโครงข่าย WDM เพื่อทำหน้าที่แยกสัญญาณขาเข้าออกเป็นสัญญาณย่อยขาออกหลาย ๆ สัญญาณ ทำให้สามารถส่งข้อมูลเพียงชุดเดียวจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางหลาย ๆ โหนดในเวลาเดียวกันได้ ข้อดีของการนำโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงมาใช้เป็นรูปแบบในการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์คือ การส่งข้อมูลลักษณะนี้จะใช้จำนวนเครื่องส่งน้อยกว่าการส่งข้อมูลโดยตรงจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางแต่ละโหนดแบบจุดต่อจุด อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณ ทราฟฟิกที่ออกจากโหนดต้นทางอีกด้วย



รูปที่ 1.1 โครงข่ายที่รองรับมัลติคาสต์และข่ายเชื่อมโยงแบบต้นไม้เชิงแสงระหว่างกลุ่มโหนด

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่พิจารณาถึงการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (Multicast Routing and Wavelength Assignment, MC-RWA) บนโครงข่าย WDM งานวิจัย [5] เป็นการเสนอใช้ขั้นตอนวิธีฮิวริสติกในการจัดสร้างและปลดเส้นทางเชิงแสง (Lightpath) สำหรับการจัดเส้นทางในโครงข่าย WDM งานวิจัย [6] เป็นการออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับการใช้งานแบบมัลติคาสต์ โดยพิจารณาการจัดเส้นทาง การกำหนดความยาวคลื่น และการออกแบบเส้นทางเชิงแสงบนโทโพโลยีแบบตรรกะ (Logical Topology) งานวิจัย [7] เป็นการศึกษาการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (Multicast Wavelength Assignment, MC-WA) บนโครงข่าย WDM โดยพิจารณาถึงการติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณ (Wavelength Splitter) และอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter) ในโครงข่าย งานวิจัย [8] เป็นการศึกษาการออกแบบต้นไม้เชิงแสงให้เหมาะสมที่สุดบนโทโพโลยีแบบตรรกะเพื่อรองรับการใช้งานแบบมัลติคาสต์ โดยพิจารณาการออกแบบออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะเป็นการจัดเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นของต้นไม้เชิงแสง ในส่วนที่สองจะเป็นการออกแบบต้นไม้เชิงแสงบนโทโพโลยีแบบตรรกะ งานวิจัย [9,10] เป็นการพิจารณาค่าใช้จ่ายในการออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับการใช้งานแบบมัลติคาสต์ ค่าใช้จ่ายในแต่ละเซชันจะ

ประกอบไปด้วย การใช้งานของความยาวคลื่น (Wavelength Cost) อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และค่าใช้จ่ายในการเริ่มต้นเชื่อมต่อ (Initial Transmission Cost) ในการออกแบบจะพิจารณาออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเป็นการกำหนดความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่าย ส่วนที่สองเป็นการจัดเส้นทางของมัลติคาสต์ในโครงข่าย งานวิจัย [11] เป็นการออกแบบโครงข่าย WDM โดยการจัดเส้นทางของมัลติคาสต์ให้มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุด ซึ่งจะมีการกำหนด โทโพโลยีของโครงข่าย ความจุของช่องสัญญาณในแต่ละข่ายเชื่อมโยง และกลุ่มของโหนดปลายทางมาให้ งานวิจัย [12] นำเสนอ Bounded Shortest Multicast Algorithm (BSMA) ในการจัดสร้างต้นไม้เชิงแสงให้มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขบังคับของค่าหน่วยเวลา ซึ่ง BSMA แบ่งการทำงานออกเป็นสองกระบวนการ กระบวนการแรกจะเป็นการหาค่าหน่วยเวลาในต้นไม้เชิงแสงให้มีค่าต่ำที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีที่สั้นที่สุด (Shortest Path Algorithm) กระบวนการที่สองจะเป็นการวนซ้ำ (Iterative) เพื่อปรับปรุงหาค่าใช้จ่ายภายใต้เงื่อนไขบังคับของค่าหน่วยเวลา งานวิจัย [13] พิจารณาเงื่อนไขบังคับในการจัดเส้นทางของมัลติคาสต์ในโครงข่ายให้บางโหนดไม่สามารถแยกสัญญาณที่เข้ามาได้ (Sparse Light-Splitting) จากเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ ทีมวิจัยได้เสนอขั้นตอนวิธีการจัดเส้นทางของมัลติคาสต์ 4 วิธีคือ 1) Reroute-to-Source 2) Reroute-to-Any 3) Member-First และ 4) Member only ซึ่งจะมีการกำหนดโทโลยีของโครงข่าย ข้อมูลสมาชิกของมัลติคาสต์ และสวิตช์ที่มีความสามารถในการแยกสัญญาณมาให้ งานวิจัย [14] เป็นการออกแบบโครงข่าย WDM ภายใต้เงื่อนไขบังคับของอุปกรณ์แยกสัญญาณแบบ Sparse Splitting Capable Network โดยใช้ขั้นตอนวิธีฮิวริสติกในการคำนวณให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยข้างต้นโดยส่วนมากจะเป็นการใช้ขั้นตอนวิธีฮิวริสติก (Heuristic Algorithm) ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงข่ายหนึ่ง ๆ ในการจัดเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นสำหรับโครงข่าย WDM ที่รองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์

ในการออกแบบโครงข่าย WDM นั้น นอกจากจะต้องพิจารณาถึงปัญหาทางด้านการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายแล้ว การจัดเส้นทางเมื่อโครงข่ายเกิดความเสียหายก็ยังเป็นประเด็นสำคัญที่ควรคำนึงถึง เนื่องจากโครงข่าย WDM เป็นโครงข่ายความเร็วสูง หากเกิดความขัดข้องขึ้นในโครงข่าย ย่อมทำให้ข้อมูลที่ส่งผ่านโครงข่ายเกิดการสูญหาย (Loss) ขึ้น โดยผลเสียนี้จะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงกว่าในกรณีการส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายความเร็วต่ำ ดังนั้น ในการออกแบบโครงข่าย WDM ควรออกแบบให้โครงข่ายสามารถจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายในโครงข่ายได้

ในงานวิจัย [15-20] เป็นการศึกษาการจัดเส้นทางเมื่อโครงข่ายเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Single Link Failure) โดยใช้วิธีจัดเส้นทางแบบใช้เส้นทางสำรองร่วมกัน 2 วิธีคือ 1) วิธีไม่ซ้ำเส้นทางเดิมแบบพิจารณาทิศทาง (Arc Disjoint) วิธีนี้เส้นทางหลักและเส้นทางสำรองสามารถใช้งานร่วมกันบนเส้นใยนำแสงเดียวกันได้ในคนละทิศทาง และ 2) วิธีไม่ซ้ำเส้นทางเดิมแบบไม่

พิจารณาทิศทาง (Link Disjoint) วิธีนี้เส้นทางสำรองสามารถใช้เส้นทางร่วมกับเส้นทางหลักของเซสชันอื่นหรือเส้นทางสำรองของเซสชันอื่นได้ และใช้วิธีการของ ILP ในการคำนวณค่าใช้จ่ายในการจัดเส้นทางใหม่ในโครงข่ายให้มีค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด งานวิจัย [21] เสนอวิธีการจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย 4 วิธีคือ

1) Light-Tree Reconfiguration วิธีนี้จะเป็นการจัดเส้นทางใหม่หมดทุกเซสชัน ทั้งเซสชันที่เกิดความเสียหายในข่ายเชื่อมโยงและเซสชันที่ไม่เกิดความเสียหายในข่ายเชื่อมโยง

2) Light-Tree Interrupted Reconfiguration วิธีนี้จะทำการจัดเส้นทางใหม่ให้เฉพาะกับเซสชันที่เกิด ความเสียหายในข่ายเชื่อมโยง

3) Optical Branch เมื่อเกิดความเสียหายในข่ายเชื่อมโยง การจัดเส้นทางใหม่วิธีนี้จะปลดในส่วนที่เกิด ความเสียหายออกและจัดสร้างข่ายเชื่อมโยงขึ้นมา

4) Optical Branch Fixed วิธีนี้จะเป็นการกำหนดเส้นทางสำรองไว้รองรับการจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิด ความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายในโครงข่ายนั้นส่วนมากจะเป็นการพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยง ซึ่งจะเกิดผลเสียหายต่อโครงข่ายไม่มากนัก แต่ถ้าเกิดความเสียหายขึ้นที่โหนดจะเกิดความเสียหายต่อโครงข่ายมากกว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโหนดในโครงข่าย โดยใช้วิธีการของ Integer Linear Programming (ILP) ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ 1) กรณีทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ 2) กรณีทุกโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ โดยให้แต่ละเซสชันของมัลติคลาสต์ที่พิจารณาแต่ละกลุ่มมีโหนดต้นทางแตกต่างกัน และลักษณะการติดต่อสื่อสารภายในกลุ่มสมาชิกมัลติคลาสต์เป็นแบบโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง อีกทั้งกำหนดให้ข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายเป็นชนิดสองทิศทาง (Bidirectional)

วิธีการจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโหนดในโครงข่ายที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ มี 3 วิธีคือ

1) Reconfiguration of entire network วิธีนี้จะเป็นการจัดเส้นทางจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง ทุกเซสชันทั้งเซสชันที่มีเส้นทางผ่าน โหนดที่เสียหายและเซสชันที่ไม่ได้มีเส้นทางผ่าน โหนดที่เสียหาย

2) Reconfiguration of traffic traversing through failure node วิธีนี้จะเป็นการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้เฉพาะเซสชันที่มีเส้นทางผ่าน โหนดที่เสียหายแบบเส้นทางที่ไม่ซ้ำโหนด (Node Disjoint)

3) Reconfiguration of traffic adjacent to failure node วิธีนี้นอกจากจะจัดสรรเส้นทางใหม่ให้เฉพาะเซชันที่มีเส้นทางผ่าน โหนดที่เสียหายแล้วยังจะจัดสรรเส้นทางใหม่ให้เซชันที่มีโหนดระหว่างทางเชื่อมต่อมายัง โหนดที่เสียหายด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นในโครงข่าย WDM สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์(Multicast traffic) และเสนอวิธีการป้องกันโครงข่ายเมื่อเกิดความขัดข้องหนึ่งโหนด 3 วิธี ได้แก่ 1.Reconfiguration of entire network 2. Reconfiguration of traffic traversing through failure node และ 3. Reconfiguration of traffic adjacent to failure node โดยพิจารณาถึงจำนวนของเส้นใยนำแสงทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1) เสนอเทคนิคแบบ Integer linear programming (ILP) ในการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ในการจำลองปัญหาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นในโครงข่าย WDM สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ โดยพิจารณาในด้านของจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และ กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

2) เสนอเทคนิค ILP ในการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการจำลองปัญหาการจัดสรรเส้นทางใหม่ เมื่อ โหนดในโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด 3 วิธี ได้แก่

- 1) Reconfiguration of entire network
- 2) Reconfiguration of traffic traversing through failure node
- 3) Reconfiguration of traffic adjacent to failure node

3) เปรียบเทียบจำนวนช่องสัญญาณที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทางใหม่ในแต่ละวิธีเมื่อ โหนดในโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด โดยพิจารณาในด้านของจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และ กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

- 4) เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ โดยพิจารณาในด้านของจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และ กรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ

- 1) ศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
 - 1.1) ศึกษาบทความเกี่ยวกับเทคโนโลยี WDM
 - 1.2) ศึกษาโครงสร้างของโครงข่ายเชิงแสงที่ใช้รองรับทราฟฟิกแบบมัลติคลาสต์
 - 1.3) ศึกษาบทความเกี่ยวกับการจัดเส้นทางและความยาวคลื่นที่ใช้ในการรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคลาสต์ของโครงข่ายเชิงแสง
 - 1.4) ศึกษาวิธีการจัดเส้นทางใหม่ในโครงข่ายที่ใช้รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคลาสต์เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งโหนด
- 2) ศึกษาวิธีการของ Integer Linear Programming (ILP) ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดสรรเส้นทางในโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งโหนด
- 3) ออกแบบวิธีการจัดสรรเส้นทางในโครงข่ายจากความเสียหายของโหนด 3 วิธีที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น
- 4) ทดสอบวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ในโครงข่ายจากความเสียหายของโหนดที่ได้ออกแบบไว้และวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น
- 5) รวบรวมและสรุปผลการวิจัยเพื่อเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถจัดสรรเส้นทางในโครงข่าย WDM ที่ใช้รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคลาสต์ได้เมื่อโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด
- 2) สามารถจัดสรรเส้นทางในโครงข่าย WDM ให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในโครงข่าย
- 3) ทราบถึงข้อดีข้อเสียของวิธีการจัดสรรเส้นทางโครงข่าย WDM ในแต่ละวิธีและสามารถนำไปใช้ได้เหมาะสม

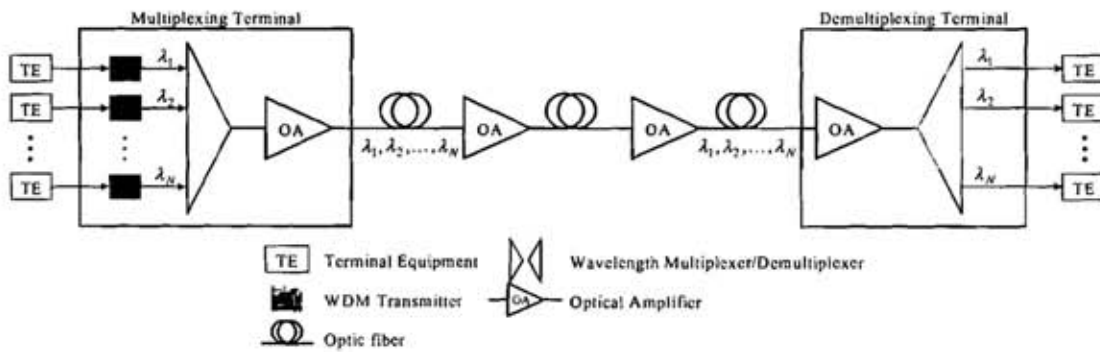
บทที่ 2

การออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคลาสต์

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM การพิจารณาถึงต้นทุนของโครงข่ายจากจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ต้องติดตั้งให้กับโครงข่าย และการป้องกันโครงข่ายจากความขัดข้องหนึ่งโหนด โดยจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานทั่วไปที่เป็นความรู้เบื้องต้นในการออกแบบโครงข่ายอันประกอบไปด้วย ลักษณะและโครงสร้างของโครงข่าย WDM รายละเอียดเกี่ยวกับคุณลักษณะของอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องในโครงข่าย และการจัดสรรเส้นทางในการรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคลาสต์ในโครงข่าย เนื่องจากโครงข่าย WDM เป็นโครงข่ายเชิงแสง ดังนั้นการจัดสรรเส้นทางภายในโครงข่ายจะต้องกำหนดค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางนั้นด้วย และแต่ละเส้นทางที่ได้รับการจัดสรรนี้จะต้องสามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ได้ เมื่อโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด

2.1 โครงข่าย WDM

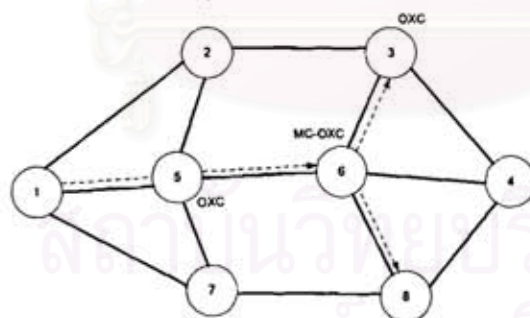
โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM ประกอบด้วยโหนดจำนวนหนึ่งที่ต้องเชื่อมโยงกันด้วยข่ายเชื่อมโยง โดยจัดและกำหนดให้มีลักษณะที่เหมาะสมกับสภาพภูมิศาสตร์ และ การกระจายของปริมาณทราฟฟิกในพื้นที่ของการให้บริการ โหนดมีหน้าที่ติดต่อกับแหล่งกำเนิดทราฟฟิกเพื่อรวบรวมข้อมูลของผู้ใช้ที่จะส่งออก และในทางกลับกันก็ส่งผ่านทราฟฟิกไปยังจุดหมายปลายทาง ข่ายเชื่อมโยงทำหน้าที่เชื่อมต่อโหนดและเป็นตัวกลางในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดภายในโครงข่าย อุปกรณ์ภายในโหนดของโครงข่ายประกอบไปด้วยตัวมัลติเพลกซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Multiplexer) ตัวดีมัลติเพลกซ์ทางความยาวคลื่น (Wavelength Demultiplexer) และ สวิตช์ (Switch) ซึ่งทำหน้าที่ร่วมกันเป็นตัวกำหนดเส้นทางในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทางของโครงข่าย อุปกรณ์ทั้งหมดภายในโหนดของโครงข่ายจะเรียกรวมกันว่า OXCs (Optical Cross Connect) นอกจากนี้ ในบางโครงข่ายอาจจะมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นให้กับ OXCs เพื่อทำหน้าที่แปลงผันค่าความยาวคลื่นให้กับช่องสัญญาณสื่อสารที่วิ่งผ่าน โหนดของโครงข่ายซึ่งจะทำให้การจัดเส้นทางง่ายขึ้น โดยระบบการส่งข้อมูลด้วยการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น

ในภาคส่งของระบบประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง และ เครื่องส่งสัญญาณแบบ WDM (WDM Transmitter) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้ให้เป็นสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน จากนั้นสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่นจะถูกมัลติเพล็กซ์ให้เป็นลำแสงเดียวกัน โดยอาศัยตัวมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น ซึ่งสัญญาณที่ถูกมัลติเพล็กซ์นี้จะถูกส่งไปยังเส้นใยนำแสง โดยในระหว่างที่ส่งสัญญาณอาจจะต้องมีการขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (Optical Amplifier) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการลดทอนพลังงานของสัญญาณ ส่วนที่ภาครับของระบบจะประกอบด้วยตัวดีมัลติเพล็กซ์ทางความยาวคลื่น ซึ่งทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงที่รับได้ให้เป็นสัญญาณแต่ละความยาวคลื่นก่อนที่จะแปลงกลับเป็นสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้ดั้งเดิม

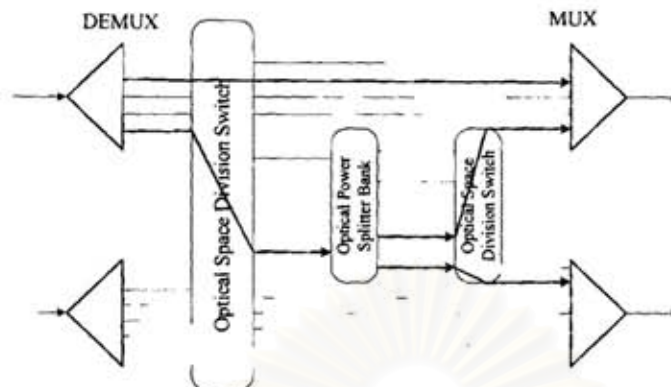
ในการนำโครงข่าย WDM มาใช้รองรับการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์นั้น โครงสร้างแบบต้นไม้เชิงแสงจะถูกนำมาใช้ในโครงข่ายดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงข่าย WDM แบบมัลติคาสต์กับต้นไม้เชิงแสง

โครงข่ายจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ได้ นั่นคือ โหนดที่ทำหน้าที่คัดลอก และ แยกสัญญาณแสงจะต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถคัดลอก และ แยกสัญญาณแสงเพื่อส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางจำนวนมากพร้อมกันได้ ซึ่งในโครงข่าย WDM ที่รองรับทราฟฟิก

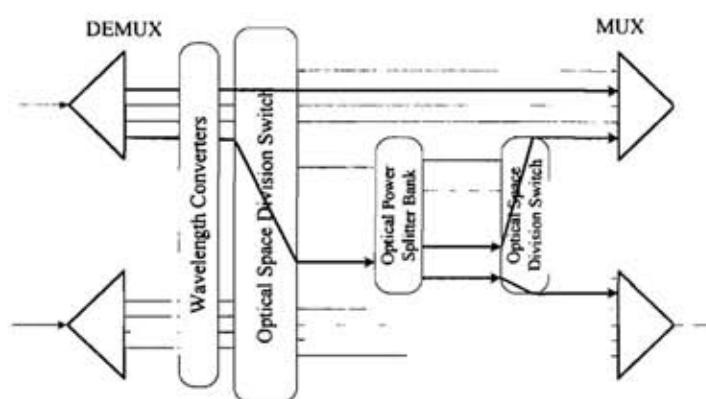
แบบมัลติคาสต์จะใช้สวิตช์ (Multicast-Capable OXCs, MC-OXC) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.3 [22] เข้ามาทำหน้าที่ดังกล่าว



รูปที่ 2.3 สถาปัตยกรรมของ MC-OXC

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าข้อมูลที่มาถึงด้านอินพุตของ MC-OXC จะถูกคีมัลติเพล็กซ์ให้ ความยาวคลื่นแยกออกจากกัน แต่ละความยาวคลื่นที่แยกออกจากกันนั้นจะบรรจุสัญญาณแตกต่างกัน ถ้าสัญญาณใดไม่ได้ถูกนำไปใช้สำหรับการส่งข่าวสารแบบมัลติคาสต์ สัญญาณดังกล่าวจะถูก ส่งตรงไปยังด้านเอาต์พุต แต่ถ้าสัญญาณใดที่ถูกนำไปใช้สำหรับการส่งข่าวสารแบบมัลติคาสต์ สัญญาณดังกล่าวจะถูกส่งไปยังด้านอินพุตของตัวแยกกำลังทางแสง ซึ่งจะทำสำเนาของสัญญาณ และส่งต่อสัญญาณไปยังสเปซสวิตช์เชิงแสง (Optical Space Switch) เพื่อที่จะส่งออกไปยังด้าน เอาต์พุตที่เหมาะสม แต่เนื่องจากสัญญาณที่ผ่านตัวแยกกำลังทางแสงกำลังงานจะลดลง ดังนั้น จำเป็นต้องนำวงจรขยายทางแสง (Optical Amplifier) ไปติดตั้งภายในตัวแยกแสง (Optical Splitter) เพื่อที่จะขยายสัญญาณให้ดีขึ้น

สถาปัตยกรรมของ MC-OXC อีกแบบหนึ่งจะมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ MC-OXC ด้านอินพุต ดังรูปที่ 2.4 จุดมุ่งหมายหลักในการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ MC-OXC คือเพื่อที่จะลดการชนกันของความยาวคลื่น ซึ่งเป็นผลมาจากสองสัญญาณแสงที่ใช้ความ ยาวคลื่นเดียวกันจำเป็นต้องออกจากเอาต์พุตของเส้นใยนำแสงเดียวกัน ดังนั้นการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะทำให้ลดการชนกันของความยาวคลื่นและลดจำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้เชื่อมต่อกับ MC-OXCs ด้วยเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้จำนวนเส้นใยนำแสงสำหรับการรองรับทราฟฟิกใน โครงข่ายทั้งหมดลดลง



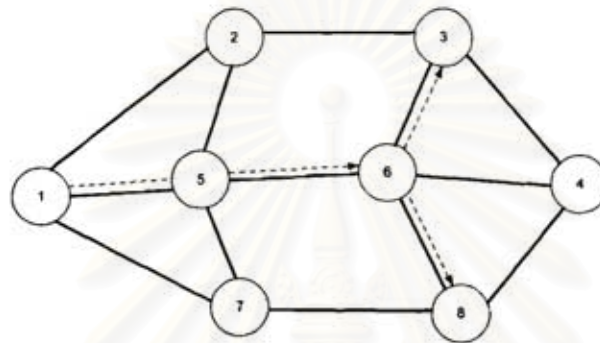
รูปที่ 2.4 สถาปัตยกรรมของ MC-OXC กับความสามารถในการเปลี่ยนความยาวคลื่น

2.2 การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์บนโครงข่าย WDM

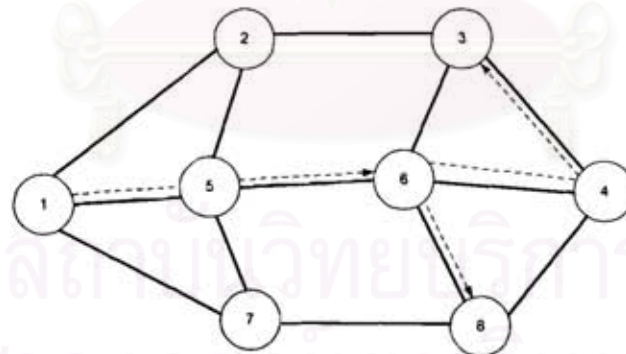
การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นบนโครงข่าย WDM จะเป็นการสร้างวิถี (Path) ข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนดต่าง ๆ ในโครงข่ายที่ต้องการติดต่อกันในระบบที่ใช้ช่องสัญญาณ WDM เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของผู้ใช้ในระบบได้ทั้งหมด ในการสร้างวิถีดังกล่าว จะต้องมีการกำหนดเส้นทาง และ ช่องสัญญาณให้กับทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกด้วย โดยในกรณีนี้แต่ละช่องสัญญาณในเส้นใยนำแสงจะถูกกำหนดเป็นค่าความยาวคลื่นในเส้นใยนำแสง ดังนั้น การกำหนดเส้นทาง และ ช่องสัญญาณให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายจึงถูกเรียกเป็นการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่น (Routing and Wavelength Assignment, RWA) และหากทราฟฟิกที่พิจารณาเป็นชนิดมัลติคาสต์ จะเรียกการกำหนดเส้นทาง และ ช่องสัญญาณให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ว่า การจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (Multicast Routing and Wavelength Assignment, MC-RWA) ซึ่งเงื่อนไขบังคับในการกำหนดช่องสัญญาณคือ หากเส้นทางมากกว่าหนึ่งเส้นทางมีการใช้งานข่ายเชื่อมโยงร่วมกัน เส้นทางนั้นจะต้องใช้ค่าความยาวคลื่นที่ไม่ซ้ำกัน เงื่อนไขบังคับนี้ทำให้จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่ายมีความสำคัญ หากในโครงข่ายมีปริมาณทราฟฟิกมากก็จำเป็นที่จะต้องใช้อำนาจความยาวคลื่นมากตามไปด้วย ซึ่งหากจำนวนความยาวคลื่นมีไม่เพียงพอ จะทำให้โครงข่ายไม่สามารถรองรับปริมาณ ทราฟฟิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้

2.2.1 การจัดเส้นทาง (Routing Assignment)

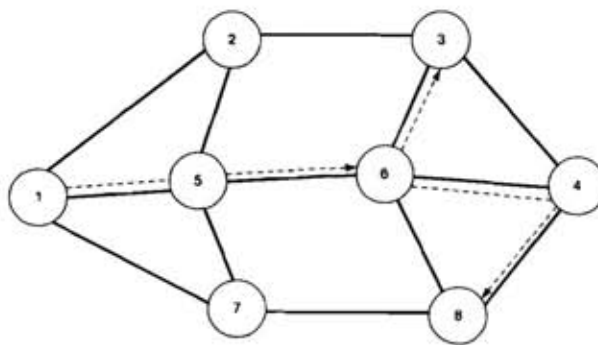
การจัดเส้นทางจะอยู่บนพื้นฐานของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง นั่นคือ โนดสมาชิกในมัลติคาสต์เซตชั้นเดียวกันทุก โนดจะต้องเชื่อมต่อถึงกันในลักษณะที่ไม่ทำให้เกิดวงปิด และ เส้นทางข้ามเชื่อมโงต้องมีทิศทางออกจากโนดต้นทางไปสิ้นสุดยังกลุ่ม โนดปลายทาง โดยเรียกข้ามเชื่อม โงระหว่างคู่โนดใดๆในกลุ่มมัลติคาสต์ชั้นเดียวกันว่า กิ่งเชิงแสง (Optical Branch) [21, 22] ลักษณะโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับโครงข่ายตัวอย่างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5-2.7



รูปที่ 2.5 ลักษณะการจัดเส้นทางบน โครงข่าย WDM โดยอยู่บนพื้นฐานของ โครงสร้างต้นไม้เชิงแสง



รูปที่ 2.6 ลักษณะการจัดเส้นทางบน โครงข่าย WDM โดยอยู่บนพื้นฐานของ โครงสร้างต้นไม้เชิงแสง



รูปที่ 2.7 ลักษณะการจัดเส้นทางบนโครงข่าย WDM โดยอยู่บนพื้นฐานของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

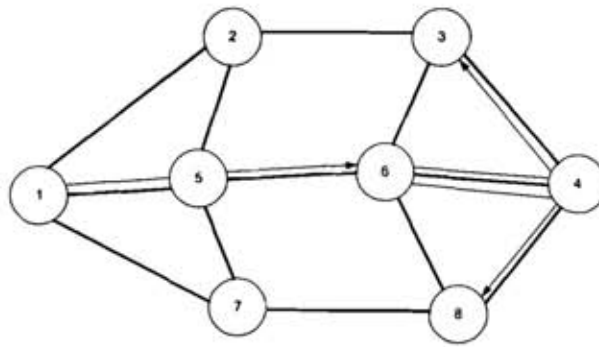
รูปที่ 2.5 เป็นการจัดเส้นทางสำหรับกราฟฟิสิกนิคมัลติคาสต์ที่มีโนด 1 เป็นโนดต้นทาง และมีโนด 3 6 และ 8 เป็นโนดปลายทาง โดยโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เลือกจะประกอบด้วยกิ่งเชิงแสง 3 กิ่งคือ กิ่งเชิงแสงจากโนด 1 ไปโนด 6 กิ่งเชิงแสงจากโนด 6 ไปโนด 3 และ กิ่งเชิงแสงจากโนด 6 ไปโนด 8 และเนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้โนดที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณได้ต้องเป็นสมาชิกของกลุ่มมัลติคาสต์เท่านั้น ดังนั้น ในตัวอย่างนี้จึงอนุญาตให้โนด 6 ติดตั้งอุปกรณ์แยกสัญญาณได้ และจากรูปที่ 6 จะพบว่า โครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เลือกสามารถมีเส้นทางทางกายภาพที่เป็นไปได้มากกว่า 1 เส้นทางดังรูปที่ 2.5 ถึง 2.7

2.2.2 การกำหนดความยาวคลื่น (Wavelength Assignment)

การกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM ที่รองรับกราฟฟิสิกนิคมัลติคาสต์นั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี [22] ดังนี้

2.2.2.1 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light-Tree method, LT)

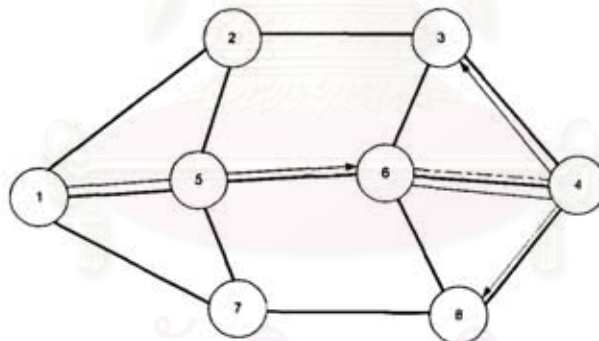
วิธีนี้ความยาวคลื่นที่ถูกกำหนดให้กับกิ่งเชิงแสงทุกกิ่งในโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะเป็นความยาวคลื่นค่าเดียวกัน นั่นคือ จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้จะเท่ากับจำนวนโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะการกำหนดความยาวคลื่นบนโครงข่าย WDMแบบวิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

2.2.2.2 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-Tree method, VLT)

วิธีนี้การกำหนดความยาวคลื่นจะพิจารณาแยกแต่ละข่ายเชื่อมโยง นั่นคือความยาวคลื่นที่ถูกกำหนดให้กับโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพนั้นสามารถมีค่าแตกต่างกันได้ ดังนั้นวิธีนี้จึงอนุญาตให้ทุกโหนดของโครงข่ายสามารถติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะการกำหนดความยาวคลื่นบนโครงข่าย WDMแบบวิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน

2.3 การจัดเส้นทางใหม่เพื่อความอยู่รอดของโครงข่าย (Reconfiguration for Network Survival)

ความต้องการในการติดต่อสื่อสารข้อมูลที่มากขึ้นในปัจจุบัน และความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วนี้ ส่งผลให้โครงข่ายสื่อสารมีบทบาทสำคัญในการดำเนินชีวิต

ของมนุษย์ การออกแบบโครงข่ายให้สามารถรองรับกับปริมาณความต้องการของผู้ใช้บริการอย่างเพียงพอเป็นหน้าที่ของผู้ออกแบบโครงข่าย แต่สิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งที่ผู้ออกแบบโครงข่ายจำเป็นต้องพิจารณาควบคู่ไปด้วย คือความน่าเชื่อถือได้ของโครงข่ายสื่อสาร เพราะผู้ให้บริการต้องการความต่อเนื่องของการติดต่อสื่อสารข้อมูล ถึงแม้ในกรณีที่อุปกรณ์ของโครงข่ายเกิดความเสียหายหรือชำรุดขึ้น ก็ยังสามารถให้บริการต่อไปได้โดยที่คุณภาพการบริการไม่ได้ลดลง ความสามารถในการให้บริการได้ของโครงข่ายหลังจากเกิดความเสียหายนี้เรียกว่า Network Survivability [2]

ในโครงข่ายความเร็วสูง (High Speed Network) เมื่อมีอุปกรณ์ของโครงข่ายได้รับความเสียหาย จะส่งผลกระทบต่อปริมาณข้อมูลจำนวนมาก ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายที่ดีต้องทำให้โครงข่ายมีความทนทานต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น (Fault-Tolerant Network)

ความเสียหายในโครงข่ายสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี

1) กรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย (Link Failure) โดยส่วนมากจะเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นกับ เส้นใยนำแสง ซึ่งอาจจะเกิดจากภัยธรรมชาติหรือถูกตัดขาดจากการขุดเจาะถนน

2) กรณีที่โหนดเกิดความเสียหาย (Node Failure) ซึ่งจะเกิดจากความเสียหายของอุปกรณ์ภายในโหนดหรือ Optical Cross Connect (OXC)

ดังนั้นวิธีการจัดเส้นทางใหม่เมื่อโครงข่ายมีความเสียหายเกิดขึ้น จะต้องมีการบูรณะ (Restoration) ความเสียหายนี้ โดยการสร้างเส้นทางสำรอง (Backup Path) ไว้รองรับกราฟฟิที่เส้นทางหลัก (Primary Path) ที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายภายในโครงข่าย



รูปที่ 2.10 แสดงวิธีการบูรณะความเสียหายภายใน โครงข่าย

จากรูปที่ 2.10 วิธีการบูรณะความเสียหายแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

1) วิธีการบูรณะความเสียหายแบบReactive ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและเร็วเมื่อเกิดความเสียหายในโครงข่าย

การบูรณะความเสียหายจะเริ่มค้นหาเส้นทางใหม่ที่ไม่ได้ใช้ในงานอุปกรณ์ที่เสียหายในโครงข่าย อย่างไรก็ตาม วิธีการบูรณะความเสียหายแบบReactive ไม่รับประกันว่าสามารถบูรณะความเสียหายได้สำเร็จเนื่องจากทรัพยากรในโครงข่ายไม่เพียงพอจะทำการบูรณะภายในเวลาที่กำหนดได้

2) วิธีการบูรณะความเสียหายแบบProactive วิธีการนี้จะเป็นการเตรียมเส้นทางสำรองไว้รองรับความ

เสียหายที่เกิดขึ้นในโครงข่าย 2 แบบ

2.1) การเตรียมเส้นทางสำรองไว้รองรับระดับเส้นทาง (Path Based)

2.2) การเตรียมเส้นทางสำรองไว้รองรับระดับการเชื่อมต่อ (Link Based)

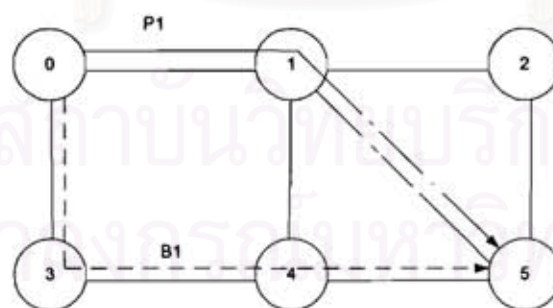
ซึ่งเส้นทางสำรองทั้งสองระดับนี้จะแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท

1) เส้นทางสำรองที่เส้นทางอื่นไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้ (Dedicated Backup)

2) เส้นทางสำรองที่เส้นทางสำรองอื่นสามารถใช้งานร่วมกันได้ (Backup Multiplexing)

3) เส้นทางสำรองที่เส้นทางหลักหรือเส้นทางสำรองอื่นสามารถใช้งานร่วมกันได้ (Primary- Backup Multiplexing)

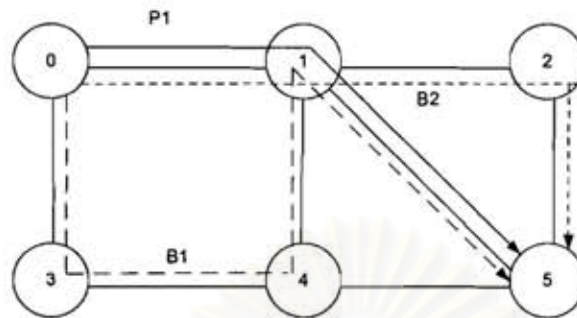
การเตรียมเส้นทางสำรองไว้รองรับระดับเส้นทางที่แสดงในรูปที่ 11 จะกำหนดให้ P_1 หมายถึง เส้นทางหลักที่หนึ่ง B_1 หมายถึง เส้นทางสำรองที่หนึ่ง จะเห็นได้ว่าเส้นทางสำรองที่หนึ่งถูกจัดเตรียมไว้ระหว่างโนดต้นทางและโนดปลายทาง



รูปที่ 2.11 การเตรียมเส้นทางสำรองไว้รองรับระดับเส้นทาง

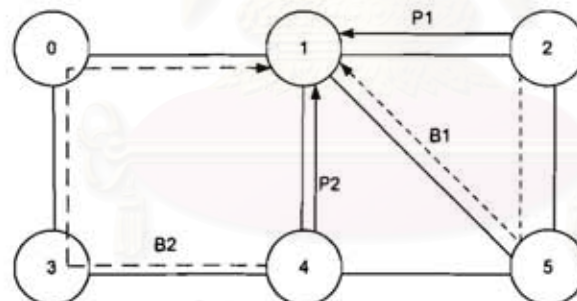
การเตรียมเส้นทางสำรองไว้รองรับระดับการเชื่อมต่อที่แสดงในรูปที่ 2.12 จะกำหนดให้ P_1 หมายถึง เส้นทางหลักที่หนึ่ง B_1 และ B_2 หมายถึง เส้นทางสำรองที่หนึ่งและเส้นทางสำรองที่สอง

เมื่อข้ามเชื่อมโยง $0 \rightarrow 1$ เกิดความเสียหาย เส้นทางสำรองที่หนึ่งจะถูกใช้งานซึ่งมีเส้นทางอยู่รอบข้ามเชื่อมโยง $0 \rightarrow 1$ และเมื่อข้ามเชื่อมโยง $1 \rightarrow 5$ เกิดความเสียหายเส้นทางสำรองที่สองจะถูกใช้งานซึ่งมีเส้นทางอยู่รอบข้ามเชื่อมโยง $1 \rightarrow 5$



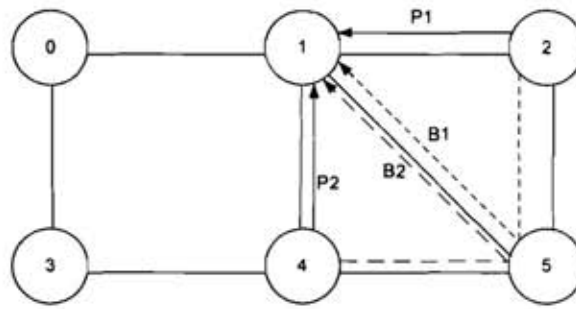
รูปที่ 2.12 การเตรียมเส้นทางสำรองไว้รองรับระดับการเชื่อมต่อ

เส้นทางสำรองที่เส้นทางอื่นไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้ที่แสดงในรูปที่ 2.13 จะกำหนดให้ P_1 และ P_2 หมายถึง เส้นทางหลักที่หนึ่งและเส้นทางหลักที่สอง B_1 และ B_2 หมายถึง เส้นทางสำรองที่หนึ่งและเส้นทางสำรองที่สอง จากรูปจะเห็นได้ว่าเส้นทางสำรองที่หนึ่งและเส้นทางสำรองที่สองไม่ได้ใช้เส้นทางร่วมกัน



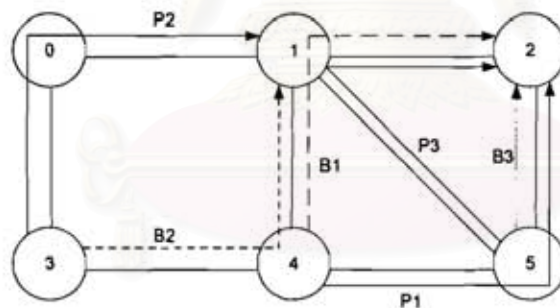
รูปที่ 2.13 เส้นทางสำรองที่เส้นทางอื่นไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้

สำหรับการใช้งานทรัพยากรที่มีอยู่ในโครงข่ายให้เกิดประโยชน์มากที่สุด ในกรณีที่เส้นทางหลักไม่ได้เสียหายในเวลาเดียวกัน เทคนิคการมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing Technique) จะถูกนำมาใช้เพื่อให้เส้นทางสำรองสามารถใช้งานร่วมกันได้ในเวลาที่ต่างกัน (Backup Multiplexing) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ เส้นทางหลักสามารถใช้งานร่วมกับเส้นทางหลักและเส้นทางสำรองเส้นอื่นได้ในเวลาที่ต่างกัน (Primary-Backup Multiplexing) ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 เส้นทางสำรองสามารถใช้งานร่วมกันได้ในเวลาที่ต่างกัน

ในรูปที่ 2.14 จะกำหนดให้ P_1 และ P_2 หมายถึง เส้นทางหลักที่หนึ่งและเส้นทางหลักที่สอง B_1 และ B_2 หมายถึง เส้นทางสำรองที่หนึ่งและเส้นทางสำรองที่สอง เส้นทางหลักที่หนึ่งและเส้นทางหลักที่สองเป็นเส้นทางที่ไม่ซ้ำกันและเสียหายในเวลาที่ต่างกัน ดังนั้นเส้นทางสำรองที่หนึ่งและเส้นทางสำรองที่สองสามารถใช้งานร่วมกันในข้อเชื่อมต่อ $5 \rightarrow 1$ ได้ เส้นทางสำรองที่หนึ่งจะถูกใช้งานเมื่อข้อเชื่อมต่อ $2 \rightarrow 1$ เกิดความเสียหาย และเส้นทางสำรองที่สองจะถูกใช้งานเมื่อข้อเชื่อมต่อ $4 \rightarrow 1$ เกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.15 เส้นทางหลักสามารถใช้งานร่วมกับเส้นทางหลักและเส้นทางสำรองเส้นอื่น

ในรูปที่ 2.15 จะกำหนดให้ P_1 , P_2 และ P_3 หมายถึง เส้นทางหลักที่หนึ่ง เส้นทางหลักที่สอง และเส้นทางหลักที่สามตามลำดับ B_1 , B_2 และ B_3 หมายถึง เส้นทางสำรองที่หนึ่ง เส้นทางสำรองที่สอง และเส้นทางสำรองที่สามตามลำดับ เส้นทางสำรองที่หนึ่งและเส้นทางสำรองที่สองสามารถใช้งานร่วมกันในข้อเชื่อมต่อ $4 \rightarrow 1$ เมื่อเส้นทางหลักที่หนึ่งและเส้นทางหลักที่สองไม่ได้ใช้เส้นทางร่วมกัน ข้อเชื่อมต่อ $1 \rightarrow 2$ จะเป็นการใช้งานร่วมกันระหว่างเส้นทางหลักที่สามและเส้นทางสำรองที่หนึ่ง และ ข้อเชื่อมต่อ $5 \rightarrow 2$ จะเป็นการใช้งานร่วมกันระหว่างเส้นทางหลักที่หนึ่งและเส้นทางสำรองที่สาม

การเตรียมเส้นทางสำรองไว้รองรับระดับเส้นทางที่มีการนำเทคนิคการมัลติเพล็กซ์มาใช้จะแบ่งความเสียหายออกเป็น 2 ประเภท

1) Failure Dependent เมื่อเส้นทางหลักมีความเสียหายเกิดขึ้น เส้นทางสำรองจะถูกนำมาใช้งาน โดยเส้นทางสำรองสามารถใช้งานได้ทุกเส้นทางที่ได้จัดเตรียมไว้รวมทั้งการใช้งานของเส้นทางหลักแต่ละหลักเพียงในข้อเชื่อมโยงหลักที่เกิดความเสียหาย

2) Failure Independent เมื่อเส้นทางหลักมีความเสียหายเกิดขึ้น เส้นทางสำรองจะถูกนำมาใช้งาน เส้นทางที่เส้นทางสำรองใช้งานจะไม่ซ้ำกันกับเส้นทางหลัก เส้นทางสำรองนี้จะไม่พิจารณาว่าข้อเชื่อมโยงใดเกิดความเสียหายในเส้นทาง โหนดต้นทางจึงไม่จำเป็นต้องรู้ว่าเกิดความเสียหายที่ข้อเชื่อมโยงใด เส้นทางสำรองอื่นจะไม่สามารถใช้งานข้อเชื่อมโยงที่ไม่เสียหายในเส้นทางนี้ได้ ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรในโครงข่ายแบบไม่คุ้มค่า

2.4 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นหนึ่งโหนดภายในโครงข่าย

ในการออกแบบโครงข่ายให้มีความน่าเชื่อถือ (Reliability) และมีความอยู่รอด (Survivability) ในสภาวะที่มีความเสียหายเกิดขึ้น โครงข่ายที่ถูกออกแบบจะต้องมีความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากอุปกรณ์บางส่วน of โครงข่ายเช่น โหนดและเส้นใยนำแสงได้รับความเสียหาย มาตรการที่ใช้ป้องกันความเสียหายของโครงข่าย (Protection) คือ การจัดเส้นทางใหม่ให้กับทราฟฟิกในโครงข่าย กล่าวคือ เมื่อโหนดได้รับความเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ เส้นทางหลักของทราฟฟิกที่ผ่านโหนดที่เสียหายจะต้องเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงโหนดที่เสียหาย เรียกเส้นทางที่โครงข่ายจัดสรรให้ใหม่นี้ว่าเส้นทางสำรอง ดังนั้นการจัดเส้นทางใหม่เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นจำเป็นที่จะต้องมีการเผื่อความจุเพิ่มให้กับโครงข่ายเพื่อรองรับเส้นทางสำรอง เรียกความจุนี้ว่า ความจุสำรอง (Spare Capacity) และเนื่องจากการเผื่อความจุสำรองให้กับโครงข่าย ดังนั้นต้นทุนของโครงข่ายที่สามารถจัดเส้นทางใหม่เมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายจึงสูงกว่าต้นทุนของโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดเส้นทางใหม่ได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสนอวิธีการจัดเส้นทางสำรองให้กับมัลติคาสต์เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งโหนดในโครงข่าย โดยจัดเส้นทางให้โครงข่ายสามารถบรรเทาความเสียหายได้ทั้งหมดและมีค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด วิธีการจัดเส้นทางในโครงข่าย WDM เพื่อรองรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งโหนดมี 3 วิธีคือ

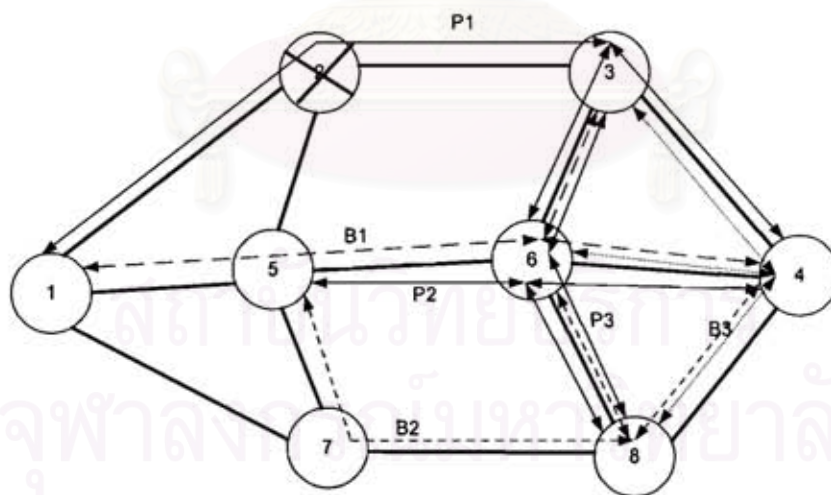
- 1) Reconfiguration of entire network
- 2) Reconfiguration of traffic traversing through failure node
- 3) Reconfiguration of traffic adjacent to failure node

ในการจัดเส้นทางในโครงข่ายที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการจัดเส้นทางในโครงข่าย WDM เพื่อรองรับกราฟฟิคนิคมัลติคาสต์ ซึ่งกราฟฟิกที่พิจารณาจะเป็นกราฟฟิกแบบคงที่ ซึ่งการจัดเส้นทางสำรองในโครงข่ายจะพิจารณาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายเพื่อให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้โครงข่ายมีค่าน้อยที่สุด ปัญหาในการออกแบบโครงข่ายจะถูกจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) และเงื่อนไขบังคับ (Constraint) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งการจัดเส้นทางใหม่ในโครงข่าย WDM ออกเป็น 2 กรณีคือ 1) กรณีที่โครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และ 2) กรณีที่โครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

2.4.1 Reconfiguration of entire network

สำหรับวิธีการจัดเส้นทางเมื่อเกิดความเสียหายที่โนดแบบ Reconfiguration of entire network

นี้ ต้นไม้เชิงแสงของทุกเซตชั้นจะถูกปลดออกและจะได้รับการจัดเส้นทางใหม่หมดเพื่อหลีกเลี่ยงโนดที่เสียหาย ถึงแม้ว่าบางเซตชั้นจะไม่ได้ใช้เส้นทางที่ผ่าน โหนดที่เสียหายด้วยก็ตาม ต้นไม้เชิงแสงทุกเซตชั้นจะต้องได้รับการจัดเส้นทางใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.16

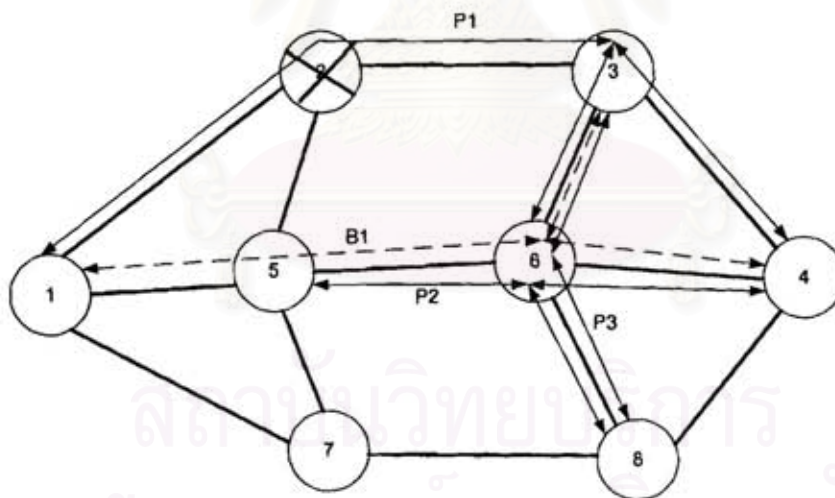


รูปที่ 2.16 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายที่โนดแบบ Reconfiguration of entire network

จากรูปที่ 2.16 จะกำหนดให้ P_1, P_2 และ P_3 หมายถึง เส้นทางหลักที่หนึ่ง เส้นทางหลักที่สอง และเส้นทางหลักที่สามตามลำดับ B_1, B_2 และ B_3 หมายถึง เส้นทางสำรองที่หนึ่ง เส้นทางสำรองที่สอง และเส้นทางสำรองที่สามตามลำดับ โครงข่ายรองรับการใช้งานแบบมัลติคาสต์ 3 เซสชัน โดยกำหนดให้ต้นไม้มิงแสงของเซสชันที่หนึ่งใช้เส้นทางหลัก $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 6, 4$ ต้นไม้มิงแสงของเซสชันที่สองใช้เส้นทางหลัก $5 \rightarrow 6 \rightarrow 4, 8$ และต้นไม้มิงแสงของเซสชันที่สามใช้เส้นทางหลัก $8 \rightarrow 6 \rightarrow 3$ เมื่อ โหนด 2 เกิดความเสียหายขึ้น ต้นไม้มิงแสงทุกเซสชันจะถูกปลดออก และได้รับการจัดเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงโหนดที่เสียหาย โดยให้ต้นไม้มิงแสงของเซสชันที่หนึ่งใช้เส้นทางสำรอง $1 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 3, 4$ ต้นไม้มิงแสงของเซสชันที่สองใช้เส้นทางสำรอง $5 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 4, 6$ และต้นไม้มิงแสงของเซสชันที่สามใช้เส้นทางสำรอง $8 \rightarrow 4 \rightarrow 3, 6$

2.4.2 Reconfiguration of traffic traversing through failure node

สำหรับการจัดเส้นทางเมื่อเกิดความเสียหายที่โหนดแบบ Reconfiguration of failure nodes นี้ จะทำการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้เฉพาะต้นไม้มิงแสงของเซสชันที่มีเส้นทางที่ผ่าน โหนดที่เสียหายจะถูกปลดออกและได้รับการจัดเส้นทางใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายที่โหนดแบบ Reconfiguration of traffic traversing through failure node

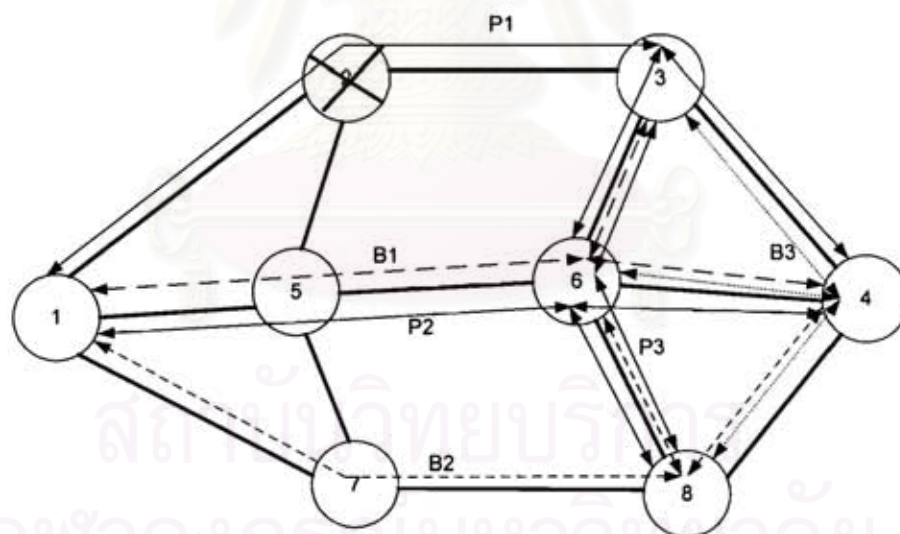
จากรูปที่ 2.17 จะกำหนดให้ P_1, P_2 และ P_3 หมายถึง เส้นทางหลักที่หนึ่ง เส้นทางหลักที่สอง และเส้นทางหลักที่สามตามลำดับ B_1 หมายถึง เส้นทางสำรองที่หนึ่ง โครงข่ายรองรับการใช้งานแบบมัลติคาสต์ 3 เซสชัน โดยกำหนดให้ต้นไม้มิงแสงของเซสชันที่หนึ่งใช้เส้นทาง

หลัก $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4,6$ ต้นไม้เชิงแสงของเซตชั้นที่สองใช้เส้นทางหลัก $5 \rightarrow 6 \rightarrow 4,8$ และ ต้นไม้เชิงแสงของเซตชั้นที่สามใช้เส้นทางหลัก $8 \rightarrow 6 \rightarrow 3$ เมื่อโหนด 2 เกิดความเสียหายขึ้น ซึ่งมีผลกระทบเฉพาะเซตชั้นที่หนึ่ง ดังนั้นต้นไม้เชิงแสงของเซตชั้นที่หนึ่งจะถูกปลดออกและได้รับการจัดเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงโหนดที่เสียหาย โดยให้ต้นไม้เชิงแสงของเซตชั้นที่หนึ่งใช้เส้นทางสำรอง $1 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 3,4$

2.4.3 Reconfiguration of traffic adjacent to failure node

สำหรับวิธีการจัดเส้นทางเมื่อเกิดความเสียหายที่โหนดแบบ Reconfiguration of traffic adjacent to failure node นี้ จะมีการการจัดเส้นทางใหม่ 2 กรณี

- 1) ต้นไม้เชิงแสงของเซตชั้นที่มีเส้นทางผ่าน โหนดที่เสียหายจะถูกปลดออกและได้รับการจัดเส้นทางใหม่
- 2) ต้นไม้เชิงแสงของเซตชั้นที่มีโหนดระหว่างทางเชื่อมต่อยัง โหนดที่เสียหายจะได้รับการจัดเส้นทางใหม่ด้วย



รูปที่ 2.18 การจัดเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายที่โหนดแบบ Reconfiguration of traffic adjacent to failure node

จากรูปที่ 2.18 จะกำหนดให้ P_1 , P_2 และ P_3 หมายถึง เส้นทางหลักที่หนึ่ง เส้นทางหลักที่สอง และเส้นทางหลักที่สามตามลำดับ B_1 และ B_2 หมายถึง เส้นทางสำรองที่หนึ่งและ เส้นทางสำรองที่สอง โครงข่ายรองรับการใช้งานแบบมัลติคาสต์ 3 เซสชัน โดยกำหนดให้ต้นไม้เชิงแสงของเซสชันที่หนึ่งใช้เส้นทางหลัก $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4,6$ ต้นไม้เชิงแสงของเซสชันที่สองใช้เส้นทางหลัก $1 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 4,8$ และต้นไม้เชิงแสงของเซสชันที่สามใช้เส้นทางหลัก $8 \rightarrow 6 \rightarrow 3$ เมื่อ โหนด 2 เกิดความเสียหายขึ้น ต้นไม้เชิงแสงจะถูกปลดออกและได้รับการจัดเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงโหนดที่เสียหาย โดยให้ต้นไม้เชิงแสงของเซสชันที่หนึ่งใช้เส้นทางสำรอง $1 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 3,4$ และจากการที่โหนด 5 มีข้อเชื่อมต่อไปยังโหนด 2 ซึ่งมีผลให้ต้นไม้เชิงแสงของเซสชันที่สองจะถูกปลดออกและได้รับการจัดเส้นทางใหม่ด้วย โดยให้ต้นไม้เชิงแสงของเซสชันที่สองใช้เส้นทางสำรอง $1 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 4,6$ ส่วนต้นไม้เชิงแสงของเซสชันที่สามใช้เส้นทางเดิม $8 \rightarrow 6 \rightarrow 3$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองปัญหาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM โดยวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองคือการหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการเพื่อรองรับทราฟฟิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ ทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยใช้เทคนิคแบบ Integer linear programming (ILP) ในการสร้างแบบจำลอง

3.1 แบบจำลองของโครงข่าย (Network model)

กำหนดให้โครงข่าย WDM ที่พิจารณาถูกแทนที่ด้วยกราฟแบบไม่แสดงทิศทาง (Unidirected graph) $G(V,E)$ ซึ่งประกอบไปด้วยเซตของโหนด (V) จำนวน N โหนด, $|V|=N$ และเซตของขั้วเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical link) (E) แบบไม่แสดงทิศทาง (Unidirected link) จำนวน L ขั้วเชื่อมโยง, $|E|=L$ โดยแต่ละขั้วเชื่อมโยงจะประกอบไปด้วยกลุ่มของเส้นใยนำแสงที่ทำหน้าที่รองรับเส้นทางที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทาง โดยกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นมีจำนวนเท่ากับ M อีกทั้งยังกำหนดให้แต่ละโหนดมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการทำมัลติคาสต์เพื่อคัดลอกและแยกสัญญาณแสงออกเป็นสัญญาณย่อยจำนวนหนึ่ง ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางที่ร้องขอข้อมูลดังกล่าวได้เป็นจำนวนมาก และยังกำหนดให้ปริมาณทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกชนิดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ

โครงข่าย WDM เส้นใยนำแสงที่ใช้ช่องสัญญาณหลายๆช่องสัญญาณซึ่งขึ้นอยู่กับค่า M ของเส้นใยนำแสง โดยช่องสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการใช้งานดังนี้

- 1) ความจุใช้งาน (Working capacity) คือความจุที่ใช้รองรับเส้นทางที่เป็นวิถีทำงาน (Active path) ซึ่งเป็นเส้นทางใช้งานทั่วไปเมื่อโครงข่ายทำงานในสถานะปกติหรือสถานะที่ไม่มีความขัดข้องเกิดขึ้นภายในโครงข่าย

- 2) ความจุสำรอง (Spare capacity) คือความจุที่ใช้รองรับเส้นทางที่เป็นวิธีสำรอง (Protection path) ซึ่งเป็นเส้นทางที่ถูกเปลี่ยนมาใช้งานเมื่อโครงข่ายเกิดความขัดข้องขึ้นหนึ่ง โหนด

ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองปัญหาการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

- 1) Optimized Spare Capacity Assignment เป็นวิธีการหาจำนวนความจุสำรองทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อให้โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาเมื่อมีความเสียหายหนึ่ง โหนด ในกรณีนี้จะต้องมีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นของวิธีทำงานมาให้ รวมทั้งกำหนดจำนวนความจุทำงานมาให้อีก เพื่อนำมาพิจารณาร่วมกับความจุสำรองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ
- 2) Jointly Optimized Working and Spare Capacity Assignment เป็นวิธีการหาความจุทำงานทั้งหมดที่ใช้รองรับทราฟฟิกเมื่อโครงข่ายอยู่ในสภาวะปกติ และจำนวนความจุสำรองทั้งหมดที่ใช้ที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อให้โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาเมื่อมีความเสียหายหนึ่ง โหนดพร้อมกัน โดยไม่ต้องมีการกำหนดเส้นทาง ความยาวคลื่น และจำนวนความจุทำงานมาให้เหมือนกับวิธีแรก

เมื่อพิจารณาจะพบว่าการจำลองปัญหาในกรณีแรกจะเป็นการจำลองปัญหาสำหรับโครงข่ายที่มีการใช้งานจริงในทางปฏิบัติแล้ว แต่ว่าโครงข่ายดังกล่าวยังไม่ได้มีการคำนึงถึงกรณีที่โครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด นั่นคือ ยังไม่มีการติดตั้งความจุสำรองเพิ่มเติมให้กับโครงข่าย ดังนั้น สามารถใช้วิธีการจำลองแบบแรกมาออกแบบหาจำนวนความจุสำรองที่โครงข่ายต้องการได้ ส่วนในกรณีของการจำลองปัญหาในกรณีที่สองนั้น จะเหมาะสมสำหรับการออกแบบโครงข่ายที่ต้องการทราบถึงต้นทุนของโครงข่ายก่อนที่จะมีการพิจารณาวาง โครงข่ายจริงในทางปฏิบัติ โดยค่าต้นทุนของโครงข่ายจะเป็นค่าจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ต้องทำการติดตั้งให้กับโครงข่ายซึ่งจะประกอบไปด้วยความจุทำงานและความจุสำรอง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีแรกเท่านั้น โดยกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ดังนี้

พารามิเตอร์ และ ตัวแปรสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
N	จำนวน โหนดทั้งหมดใน โครงข่าย
L	จำนวน ข่ายเชื่อมต่อทั้งหมดใน โครงข่าย
i	ดัชนีของมัลติคาสต์
S_i	มัลติคาสต์เซตชั้นที่ i โดยมี โหนดต้นทางคือ s_i และจุดโหนดปลายทางคือ d_i
l_i	กราฟฟิคของมัลติคาสต์เซตชั้นที่ i
Δ	จำนวนสัญญาณที่มากที่สุดที่อนุญาตให้ออกจากตัวแยกสัญญาณได้ (fanout)
M	จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ลงบนเส้นใยนำแสงได้
$\delta_{m,p}^{sd}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางหลักที่ p ของกิ่งเชิงแสง sd ผ่านข่ายเชื่อมต่อ mn ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0
p_{sd}	ชุดเส้นทางหลักที่เป็นไปได้ทั้งหมดของคู่โหนด sd
I_s	ค่าคงที่จำนวนเต็มที่มีค่ามาก

ตัวแปร	คำอธิบาย
X_i^m	มีค่าเป็น 1 เมื่อกิ่งเชิงแสงของเส้นทางหลักที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโหนด m ไปยัง โหนด n ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างต้นไม้งเชิงแสงสำหรับมัลติคาสต์เซตชั้นที่ i ถ้า ไม่ถูกใช้จะมีค่าเป็น 0
$I_{i,p}^{sd}$	เส้นทางทางกายภาพของเส้นทางหลัก(physical route) ลำดับที่ p ของคู่โหนด sd ของมัลติคาสต์เซตชั้นที่ i (สำหรับวิธี VLT)
$I_{i,\lambda}^{sd}$	เส้นทางทางกายภาพของเส้นทางหลัก (physical route) ลำดับที่ p ของคู่โหนด sd ของมัลติคาสต์เซตชั้นที่ i ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ (สำหรับวิธี LT)
u_i	มีค่าเป็น 1 เมื่อค่าความยาวคลื่น λ ถูกเลือกเพื่อใช้ส่งข้อมูลสำหรับมัลติคาสต์ เซตชั้นที่ i ถ้าไม่ถูกเลือกจะมีค่าเป็น 0
l_p	จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อมต่อ mn ในสภาวะปกติ

พารามิเตอร์ และ ตัวแปรสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
u_i^f	ดัชนีของมัลติคาสต์ที่มีเส้นทางผ่าน โหนดที่เสียหาย
mn^f	ดัชนีของมัลติคาสต์ที่โหนดระหว่างทางเชื่อมต่อยัง โหนดที่เสียหาย
h	ชุดเส้นทางสำรองที่เป็นไปได้ทั้งหมดของคู่โหนด sd เมื่อโหนด f เกิดความเสียหาย

ตัวแปร	คำอธิบาย
$\mu_{m,f}^{sd}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางสำรองที่ p ของกิ่งเชิงแสง sd ผ่านข่ายเชื่อมโยง mn เมื่อ โหนด f เกิดความเสียหาย ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0
$f b_m$	จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อม โยง mn กรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด(สำหรับวิธีET)
$f i_m$	จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อม โยง mn กรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด(สำหรับวิธีTT)
$f a_m$	จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อม โยง mn กรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด(สำหรับวิธีAD)
$x b_{i,f}^m$	มีค่าเป็น 1 เมื่อกิ่งเชิงแสงของเส้นทางสำรองที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโหนด m ไปยังโหนด n ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ i เมื่อ โหนด f เกิดความเสียหายถ้าไม่ถูกใช้จะมีค่าเป็น 0
$B_{i,p}^{sd,f}$	เส้นทางทางกายภาพของเส้นทางสำรอง(physical route) ลำดับที่ p ของคู่โหนด sd ของมัลติคาสต์เซสชันที่ i เมื่อ โหนด f เกิดความเสียหาย(สำหรับวิธี VLT)
$B_{i,p,\lambda}^{sd,f}$	เส้นทางทางกายภาพของเส้นทางสำรอง (physical route) ลำดับที่ p ของคู่โหนด sd ของมัลติคาสต์เซสชันที่ i ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ เมื่อ โหนด f เกิดความเสียหาย (สำหรับวิธี LT)
$NDJ(P_{i,p,f}^{sd})$	ชุดของเส้นทางสำรองทางกายภาพที่ไม่ซ้ำโหนดกับเส้นทางหลักทางกายภาพ ($P_{i,p,f}^{sd}$) ที่ผ่าน โหนดที่เสียหาย
$NDJ(P_{i,p,\lambda}^{sd})$	ชุดของเส้นทางสำรองทางกายภาพที่ไม่ซ้ำโหนดกับเส้นทางหลักทางกายภาพ ($P_{i,p,f}^{sd}$) ที่โหนดระหว่างทางเชื่อมต่อไปยังที่เสียหาย

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

ในการหาต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด (optimal light-tree) T_i เพื่อรองรับมัลติคาสต์เซสชันที่ i นั้น จะต้องแทนที่โครงข่าย WDM ที่พิจารณาด้วยกราฟแบบสองทิศทาง $G_i = (N_i, A_i)$ โดยชุดของโหนด N_i จะประกอบไปด้วยโหนดต้นทางคือ s_i และชุดโหนดปลายทางคือ d_i ซึ่งสามารถแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $N_i = \{m \in N_i \mid m = s_i, \vee m = d_i\}$ รวมทั้งสิ้น $|N_i|$ โหนด และชุดของเส้นเชื่อมเชิงตรรกะ (logical arcs) ซึ่งสามารถแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $A_i = \{mn \in A_i \mid m, n \in N_i, \wedge m \neq n\}$ แล้วเปลี่ยนกราฟแบบสองทิศทาง G_i ที่ได้ให้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด T_i โดยโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องประกอบด้วยกิ่งเชิงแสงจำนวน $|N_i| - 1$ กิ่ง โดยมีเงื่อนไขบังคับดังนี้

$$\sum_{mn \in L} X_i^{mn} = |N_i| - 1 \quad \forall i, \forall mn \in L \quad (1)$$

$$X_i^{mn} \in \{0, 1\} \quad \forall m, n \in A_i, \forall i \quad (2)$$

เพื่อเป็นการแน่ใจว่าทุกโนดที่เป็นสมาชิกของมัลติกาสต์สามารถเชื่อมต่อถึงกันได้และโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องไม่มีลักษณะเป็นวงปิด เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sum_{mn \in \partial(S)} X_i^{mn} \geq 1 \quad \forall i, \forall S \subset N, S \neq \emptyset, N \quad (3)$$

เมื่อ S คือเซตย่อย(subset) ของ N_i และ $\partial(S)$ คือเซตตัด(cutset) ของเซตย่อย S โดยสามารถแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $\partial(S) = \{mn \in A_i | m \in S, n \notin S\}$ และเมื่อพิจารณาขาออกของแต่ละโนด จะพบว่าจำนวนเส้นเชื่อมขาออกของแต่ละโนดจะถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์แยกสัญญาณทางแสงที่สามารถแยกสัญญาณออกเป็นสัญญาณขนาดเล็กได้เท่ากับ Δ ดังนั้นเงื่อนไขบังคับข้อที่ (4) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sum_{mn \in A_i} X_i^{mn} \leq \Delta \quad \forall m \in N_i, \forall i \quad (4)$$

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายทำงานในสถานะปกติ

ในการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติกาสต์ในสถานะทำงานปกติ จะเป็นการจัดสรรความจุใช้งานเพื่อรองรับเส้นทางที่เป็นวิธีทำงานให้กับโครงข่าย โดยสามารถใช้เทคนิค ILP ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

3.4.1 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-Tree method, VLT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$\text{Min} : \sum_{mn \in L} fp_{mn} \quad (5)$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) และ

$$\sum_{p \in P_s} P_{i,p}^{sd} = txX_i^{sd} \quad \forall sd \in A_i, \forall i \quad (6)$$

$$Mxsp_{mn} - \sum_i \sum_{sd} \sum_{p \in P_s} P_{i,p}^{sd} \delta_{mn,p}^{sd} \geq 0 \quad \forall mn \in L \quad (7)$$

$$P_{i,p}^{sd} \in Z^+ \quad \forall p \in P_s, \forall sd \in A_i, \forall i \quad (8)$$

$$fp_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \quad (9)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (5) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) และ (6) ถึง (9) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด เงื่อนไขบังคับข้อ (6) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงทุกกิ่งของโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (7) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (8) และ (9) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรเป็นจำนวนเต็มที่ไม่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.4.2 วิธีโครงข่ายต้นไม้เชิงแสง (Light-Tree method, LT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$\text{Min} : \sum_{mn \in L} fp_{mn} \quad (10)$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) และ

$$\sum_{\lambda=1}^M \sum_{p \in P_s} P_{i,p,\lambda}^{sd} = txX_i^{sd} \quad \forall sd \in A_i, \forall i \quad (11)$$

$$fp_{mn} - \sum_i \sum_{sd} \sum_{p \in P_s} P_{i,p,\lambda}^{sd} \delta_{mn,p}^{sd} \geq 0 \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall mn \in L \quad (12)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{i,\lambda} = 1 \quad \forall i \quad (13)$$

$$P_{i,p,\lambda}^{sd} \leq I_{\alpha} W_{i,\lambda} \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall p \in P_s, \forall sd \in A_i, \forall i \quad (14)$$

$$W_{i,\lambda} \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall i \quad (15)$$

$$P_{i,p,\lambda}^{sd} \in Z^+ \quad \forall p \in P_s, \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall sd \in A_i, \forall i \quad (16)$$

$$fp_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \quad (17)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (10) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) และ (11) ถึง (17) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด เงื่อนไขบังคับข้อ (11) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้ถึงเชิงแสงทุกกิ่งของโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (12) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโหนดทุกข่ายเชื่อมโหนดสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (13) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้แต่ละมัลติคาสต์เซตเลือกใช้ความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียวและความยาวคลื่นที่ถูกเลือกมาใช้งานนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางทางกายภาพจากเงื่อนไขบังคับข้อ (14) เงื่อนไขบังคับข้อ (15) ถึง (17) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด

ความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่โหนดจะเกิดความเสียหายขึ้นในโครงข่ายนั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับความเสียหายที่จะเกิดขึ้นที่ข่ายเชื่อมโหนดเนื่องจากการใช้ระบบการทำงานสำรองของอุปกรณ์ในโครงข่าย แต่อย่างไรก็ตามโอกาสที่โหนดจะเกิดความเสียหายขึ้นในโครงข่ายนั้นก็เป็นไปได้ และก่อให้เกิดความเสียหายร้ายแรงกับการให้บริการสื่อสารโทรคมนาคมได้ เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโหนดในโครงข่าย ทราฟฟิกในโครงข่ายจะถูกจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการกำหนดว่าถ้าโหนดที่เสียหายเป็นโหนดต้นทางหรือโหนดปลายทางจะไม่สามารถบูรณะได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ในโครงข่ายเมื่อโหนดมีความเสียหายเกิดขึ้น 3 วิธี

- 1). Reconfiguration of entire network (ET)
- 2). Reconfiguration of traffic traversing through failure node (TT)
- 3). Reconfiguration of traffic adjacent to failure node (AD)

ซึ่งสามารถแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆดังนี้

3.5.1 Reconfiguration of entire network

การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้ เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโหนดในโครงข่าย การจัดสรรเส้นทางใหม่จะกำหนดให้ทุกมัลติคาสต์เซตจะถูกปลดออกและจัดสร้างขึ้นมาใหม่โดยเปลี่ยนไป

ใช้เส้นทางสำรองเพื่อหลีกเลี่ยงโหนดที่เสียหาย ถึงแม้ว่าเซตชั้นเหล่านั้นจะไม่มีเส้นทางผ่านโหนดที่เสียหายก็ตาม ทำให้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้มีความยืดหยุ่นสูง และใช้ทรัพยากรในโครงข่ายต่ำ

3.5.1.1 กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$\text{Min} : \sum_{mn \in L} fb_{mn} \quad (18)$$

และมีเงื่อนไขบังคับดังนี้

$$\sum_{mn \in A_i} Xb_{i,f}^{mn} = |N_i| - 1 \quad \forall i, \forall mn \in L, \forall f \in N \quad (19)$$

$$\sum_{mn \in O(S)} Xb_{i,f}^{mn} \geq 1 \quad \forall i, \forall S \subset N, S \neq \emptyset, N, \forall f \in N \quad (20)$$

$$\sum_{mn \in A_i} Xb_{i,f}^{mn} \leq \Delta \quad \forall m \in N_i, \forall i, \forall f \in N \quad (21)$$

$$Xb_{i,f}^{mn} \in \{0, 1\} \quad \forall m, n \in A_i, \forall i, \forall f \in N \quad (22)$$

$$\sum_{r \in B_f^{sd}} B_{i,r,f}^{sd} = tx Xb_{i,f}^{sd} \quad \forall sd \in A_i, \forall i, \forall f \in N \quad (23)$$

$$Mx fb_{mn} - \sum_i \sum_{sd} \sum_{r \in B_f^{sd}} B_{i,r,f}^{sd} \mu_{mn,f}^{sd} \geq 0 \quad \forall r \in B_f^{sd}, \forall f \in N, \forall mn \in L \quad (24)$$

$$fb_{mn} \geq fp_{mn} \quad \forall mn \in L \quad (25)$$

$$B_{i,r,f}^{sd} \in Z^+ \quad \forall r \in B_f^{sd}, \forall sd \in A_i, \forall f \in N, \forall i \quad (26)$$

$$fb_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \quad (27)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (18) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดให้แก่โครงข่ายในการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคลาสต์ทั้งหมดจากสถานะการทำงานปกติ โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงสำรองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงโหนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (23) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงสำรองจะต้องมีเส้นทางสำรองทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (24) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงสำรองทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่

เกิดขึ้นได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (25) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองสามารถรองรับการใช้งานของโครงข่ายทั้งในสภาวะการใช้งานปกติและสภาวะที่เกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโนดในโครงข่าย เงื่อนไขบังคับข้อ (26) และ (27) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.1.2 กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$\text{Min} : \sum_{mn \in L} fb_{mn} \quad (28)$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) และ

$$\sum_{r \in B_f^w} \sum_{\lambda=1}^M B_{i,r,\lambda,f}^w = txXb_{i,f}^w \quad \forall sd \in A_i, \forall i, \forall f \in N \quad (29)$$

$$fb_{mn} - \sum_i \sum_{sd} \sum_{r \in B_f^w} B_{i,r,\lambda,f}^w \mu_{mn,f}^{w,f} \geq 0 \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall f \in N \quad (30)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{i,\lambda} = 1 \quad \forall i \quad (31)$$

$$B_{i,r,\lambda,f}^w \leq I_{\sigma} W_{i,\lambda} \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r \in B_f^w, \forall sd \in A_i, \forall i, \forall f \in N \quad (32)$$

$$fb_{mn} \geq fp_{mn} \quad \forall mn \in L \quad (33)$$

$$B_{i,r,\lambda,f}^w \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r \in B_f^w, \forall i, \forall f \in N \quad (34)$$

$$W_{i,\lambda} \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall i \quad (35)$$

$$fb_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \quad (36)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (28) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดให้แก่โครงข่ายในการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคลาสต์ทั้งหมดจากสภาวะการทำงานปกติ โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) และ (29) ถึง (36) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาดันไม้เชิงแสงสำรองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงโนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (29) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้ถึงเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงสร้างดันไม้เชิงแสงสำรองจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (30) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงสำรองทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (31) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้

แต่ละมัลติคาสต์เซสชันที่จัดสรรเส้นทางใหม่เลือกใช้ความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียวและความยาวคลื่นที่ถูกเลือกมาใช้งานนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางสำรองทางกายภาพจากเงื่อนไขบังคับข้อ (32) เงื่อนไขบังคับข้อ (33) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองสามารถรองรับการใช้งานของโครงข่ายทั้งในสภาวะการใช้งานปกติและสภาวะที่เกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโหนดในโครงข่าย เงื่อนไขบังคับที่ (34) ถึง (36) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.2 Reconfiguration of traffic traversing through failure node

การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จะเป็นการจัดสรรเส้นทางทางกายภาพใหม่ให้เฉพาะกับเส้นทางหลักทางกายภาพของมัลติคาสต์เซสชันที่มีโหนดระหว่างทางเป็นโหนดที่เสียหาย โดยวิธีการแบบเส้นทางไม่ซ้ำโหนด ซึ่งหมายความว่า โหนดระหว่างทางของเส้นทางกายภาพเส้นทางหลักและเส้นทางกายภาพเส้นทางสำรองจะต้องไม่ซ้ำกัน

3.5.2.1 กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$\text{Min} : \sum_{m \in L} (fp_{mn} + ft_{mn}) \quad (37)$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4), (6) ถึง (9) และ (19) ถึง (22)

$$P_{if,p,f}^{sd} \delta_{p,f}^{sd} - \sum_{ra \in NDJ(P_{if,p,f}^{sd})} B_{i,ra,f}^{sd} = 0 \quad \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall if, \forall f \in N \quad (38)$$

$$\sum_{ra \in NDJ(P_{if,p,f}^{sd})} B_{i,ra,f}^{sd} = \alpha \chi b_{if,f}^{sd} \quad \forall sd \in A_i, \forall if, \forall f \in N \quad (39)$$

$$Mxft_{mn} - \sum_{if} \sum_{sd} \sum_{ra \in NDJ(P_{if,p,f}^{sd})} B_{i,ra,f}^{sd} \mu_{mn,ra}^{sd,f} \geq 0$$

$$\forall ra \in NDJ(P_{if,p,f}^{sd}), \forall f \in N, \forall mn \in L \quad (40)$$

$$B_{i,ra,f}^{sd} \in Z^+ \quad \forall ra \in NDJ(P_{if,p,f}^{sd}), \forall sd \in A_i, \forall if, \forall f \in N \quad (41)$$

$$ft_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \quad (42)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (37) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงหลักและเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดให้แก่โครงข่าย โดยจำนวนเส้นใยนำแสงหลักหาได้จากสภาวะการทำงานปกติ และจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองหาได้จากการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้เฉพาะกับเส้นทางกายภาพ เส้นทางหลักของมัลติคาสต์เซชันที่มีโนดระหว่างทางเป็นโนดที่เสียหาย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) และ (6) ถึง (9) เป็นเงื่อนไขบังคับของการทำงานสภาวะปกติ เงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงสำรองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสรรเส้นทางใหม่สำหรับเส้นทางทางกายภาพเส้นทางหลักที่มีเส้นทางผ่านโนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (38) เป็นเงื่อนไขบังคับที่โครงข่ายเลือกเส้นทางสำรองเป็นเส้นทางไม่ซ้ำโนดกับเส้นทางหลัก เงื่อนไขบังคับข้อ (39) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงสำรองจะต้องมีเส้นทางสำรองทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (40) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงสำรองทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของเส้นทางหลักที่ผ่านโนดที่เสียหายได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (41) และ (42) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่ไม่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.2.2 กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$\text{Min} : \sum_{m \in L} (fp_m + ft_m) \quad (43)$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) , (11), (12) , (14) ถึง (17) และ (19) ถึง (22)

$$\sum_{\lambda=1}^M P_{if-p,\lambda,f}^{sd} \delta_{p,f}^{sd} - \sum_{ra \in NDJ(P_{if,\lambda,f}^{sd})} B_{if-ra,\lambda,f}^{sd} = 0 \quad \forall p \in P_{if}^{sd}, \forall sd \in A, \forall if, \forall f \in N \quad (44)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M \sum_{ra \in NDJ(P_{if,\lambda,f}^{sd})} B_{if-ra,\lambda,f}^{sd} = \alpha \chi b_{if,f}^{sd} \quad \forall sd \in A, \forall if, \forall f \in N \quad (45)$$

$$ft_m - \sum_{if} \sum_{sd} \sum_{ra \in NDJ(P_{if,\lambda,f}^{sd})} B_{if-ra,\lambda,f}^{sd} \mu_{mn,ra}^{sd,f} \geq 0 \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ra \in NDJ(P_{if,\lambda,f}^{sd}), \forall f \in N, \forall mn \in L \quad (46)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{if,\lambda} = 1 \quad \forall if \quad (47)$$

$$B_{if-ra,\lambda,f}^{sd} \leq I_a W_{if,\lambda} \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ra \in NDJ(P_{if,\lambda,f}^{sd}), \forall sd \in A, \forall if, \forall f \in N \quad (48)$$

$$B_{if,m,\lambda,f}^{sd} \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ra \in NDJ(P_{if,s,f}^{sd}) \quad (49)$$

$$W_{if,\lambda} \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall if \quad (50)$$

$$f_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \quad (51)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (43) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงหลักและเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดให้แก่โครงข่าย โดยจำนวนเส้นใยนำแสงหลักหาได้จากสภาวะการทำงานปกติ และจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองหาได้จากการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้เฉพาะกับเส้นทางกายภาพ เส้นทางหลักของมัลติคาสต์เซสชันที่มีโนดระหว่างทางเป็นโนดที่เสียหาย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4), (11), (12), (14) ถึง (17) เป็นเงื่อนไขบังคับของการทำงานสภาวะปกติ เงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงสำรองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสรรเส้นทางใหม่สำหรับเส้นทางทางกายภาพเส้นทางหลักที่มีเส้นทางผ่าน โนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (44) เป็นเงื่อนไขบังคับที่โครงข่ายเลือกเส้นทางสำรองเป็นเส้นทางไม่ซ้ำโนดกับเส้นทางหลัก เงื่อนไขบังคับข้อ (45) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำรองจะต้องมีเส้นทางสำรองทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (46) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงสำรองทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของเส้นทางหลักที่ผ่าน โนดที่เสียหายได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (47) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้แต่ละมัลติคาสต์เซสชันที่จัดสรรเส้นทางใหม่เลือกใช้ความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียวและความยาวคลื่นที่ถูกเลือกมาใช้งานนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางสำรองทางกายภาพจากเงื่อนไขบังคับข้อ (48) เงื่อนไขบังคับข้อ (49) ถึง (51) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่ไม่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.3 Reconfiguration of traffic adjacent to failure node

การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้ ไม่เพียงแต่จัดสรรเส้นทางทางกายภาพใหม่ให้เฉพาะกับเส้นทางกายภาพเส้นทางหลักของมัลติคาสต์เซสชันที่มีโนดระหว่างทางเป็นโนดที่เสียหาย แต่ยังจัดสรรเส้นทางทางกายภาพใหม่ให้กับเส้นทางกายภาพเส้นทางหลักของมัลติคาสต์เซสชันที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อมายังโนดที่เสียหายด้วย โดยวิธีการแบบเส้นทางไม่ซ้ำโนด ซึ่งหมายความว่าโนดระหว่างทางของเส้นทางกายภาพเส้นทางหลักและเส้นทางกายภาพเส้นทางสำรองจะต้องไม่ซ้ำกัน

3.5.3.1 กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$\text{Min} : \sum_{mn \in L} (fp_{mn} + ft_{mn} + fa_{mn}) \quad (52)$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) , (6) ถึง (9) , (19) ถึง (22) และ (38) ถึง (42)

$$P_{iaf, p, af}^{sd} \delta_{p, af}^{sd} - \sum_{rb \in NDJ(P_{iaf, p, af}^{sd})} B_{i, rb, af}^{sd} = 0 \quad \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall ia, f \in N \quad (53)$$

$$\sum_{rb \in NDJ(P_{iaf, p, af}^{sd})} B_{iaf, rb, af}^{sd} = txXb_{iaf, f}^{sd} \quad \forall sd \in A_i, \forall ia, f \in N \quad (54)$$

$$Mxfa_{mn} - \sum_{iaf} \sum_{sd} \sum_{rb \in NDJ(P_{iaf, p, af}^{sd})} B_{iaf, rb, af}^{sd} \mu_{mn, rb}^{sd, af} \geq 0 \quad \forall rb \in NDJ(P_{iaf, p, af}^{sd}), \forall af \in N, \forall mn \in L \quad (55)$$

$$B_{iaf, rb, af}^{sd} \in Z^+ \quad \forall rb \in NDJ(P_{iaf, p, af}^{sd}), \forall sd \in A_i, \forall ia, f \in N \quad (56)$$

$$fa_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \quad (57)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (52) คือ หาจำนวนเส้นโยนนำแสงหลักและเส้นโยนนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดให้แก่โครงข่าย โดยจำนวนเส้นโยนนำแสงหลักหาได้จากสภาวะการทำงานปกติ จำนวนเส้นโยนนำแสงสำรองที่เส้นทางหลักผ่าน โหนดที่เสียหายหาได้จากเงื่อนไขบังคับข้อ (38) ถึง (42) และจำนวนเส้นโยนนำแสงสำรองหาได้จากการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางกายภาพ เส้นทางหลักของมัลติคาสต์เซชันที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อมายังโหนดที่เสียหาย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) และ (6) ถึง (9) เป็นเงื่อนไขบังคับของการทำงานสภาวะปกติ เงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงสำรองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสรรเส้นทางใหม่สำหรับเส้นทางทางกายภาพเส้นทางหลักที่มีเส้นทางผ่าน โหนดที่เสียหายและเส้นทางทางกายภาพเส้นทางหลักที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อมายังโหนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (53) เป็นเงื่อนไขบังคับที่โครงข่ายเลือกเส้นทางสำรองเป็นเส้นทางไม่ซ้ำ โหนดกับเส้นทางหลักที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อไปยังโหนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (54) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงข่ายต้นไม้เชิงแสงสำรองจะต้องมีเส้นทางสำรองทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (55) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงสำรองทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของเส้นทางหลักที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อ

มายังโนดที่เสียหายได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (56) และ (57) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่ไม่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.3.2 กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$\text{Min} : \sum_{mn \in L} (fp_{mn} + ft_{mn} + fa_{mn}) \quad (58)$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4), (11), (12), (14), (16), (17), (19) ถึง (22), (44) ถึง (47), (49), (51) และ

$$\sum_{\lambda=1}^M P_{iaf, p, \lambda, af}^{sd} \delta_{p, af}^{sd} - \sum_{rb \in NDJ(P_{iaf, p, af}^{sd})} B_{iaf, rb, \lambda, af}^{sd} = 0 \quad \forall p \in P_{iaf}, \forall sd \in A, \forall ia, \forall af \in N \quad (59)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M \sum_{rb \in NDJ(P_{iaf, p, af}^{sd})} B_{iaf, rb, \lambda, af}^{sd} = txXb_{iaf, af}^{sd} \quad \forall sd \in A, \forall ia, \forall af \in N \quad (60)$$

$$fa_{mn} - \sum_{iaf} \sum_{sd} \sum_{rb \in NDJ(P_{iaf, p, af}^{sd})} B_{iaf, rb, \lambda, af}^{sd} \mu_{mn, rb}^{sd, af} \geq 0 \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall rb \in NDJ(P_{iaf, p, af}^{sd}), \forall af \in N, \forall mn \in L \quad (61)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{iaf, \lambda} = 1 \quad \forall ia, \forall af \quad (62)$$

$$B_{iaf, rb, \lambda, af}^{sd} \leq I_a W_{iaf, \lambda} \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall rb \in NDJ(P_{iaf, p, af}^{sd}), \forall sd \in A, \forall ia, \forall af \in N \quad (63)$$

$$B_{iaf, rb, \lambda, af}^{sd} \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall rb \in NDJ(P_{iaf, p, af}^{sd}) \quad (64)$$

$$W_{iaf, \lambda} \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ia, \forall af \quad (65)$$

$$fa_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \quad (66)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (58) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงหลักและเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดให้แก่โครงข่าย โดยจำนวนเส้นใยนำแสงหลักหาได้จากสภาวะการทำงานปกติ จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่เส้นทางหลักผ่านโนดที่เสียหายหาได้จากเงื่อนไขบังคับข้อ (44) ถึง (51) และจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองหาได้จากการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางกายภาพ เส้นทางหลักของมัลติคาสต์เซสชันที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อยังโนดที่เสียหาย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4), (11), (12), (14) ถึง (17) เป็นเงื่อนไขบังคับของการทำงานสภาวะปกติ

เงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงสำรองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสรรเส้นทางใหม่สำหรับเส้นทางทางกายภาพเส้นทางหลักที่มีเส้นทางผ่านโนดที่เสียหายและเส้นทางทางกายภาพเส้นทางหลักที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อกับโนดที่เสียหาย

เงื่อนไขบังคับข้อ (59) เป็นเงื่อนไขบังคับที่โครงข่ายเลือกเส้นทางสำรองเป็นเส้นทางไม่ซ้ำโนดกับเส้นทางหลัก

เงื่อนไขบังคับข้อ (60) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำรองจะต้องมีเส้นทางสำรองทางกายภาพรองรับ

เงื่อนไขบังคับข้อ (61) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงสำรองทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของเส้นทางหลักที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อกับโนดที่เสียหายได้

เงื่อนไขบังคับข้อ (62) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้แต่ละมัลติคาสต์เซชันที่จัดสรรเส้นทางใหม่เลือกใช้ความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียวและความยาวคลื่นที่ถูกเลือกมาใช้งานนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางสำรองทางกายภาพจากเงื่อนไขบังคับข้อ (63)

เงื่อนไขบังคับข้อ (64) ถึง (66) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

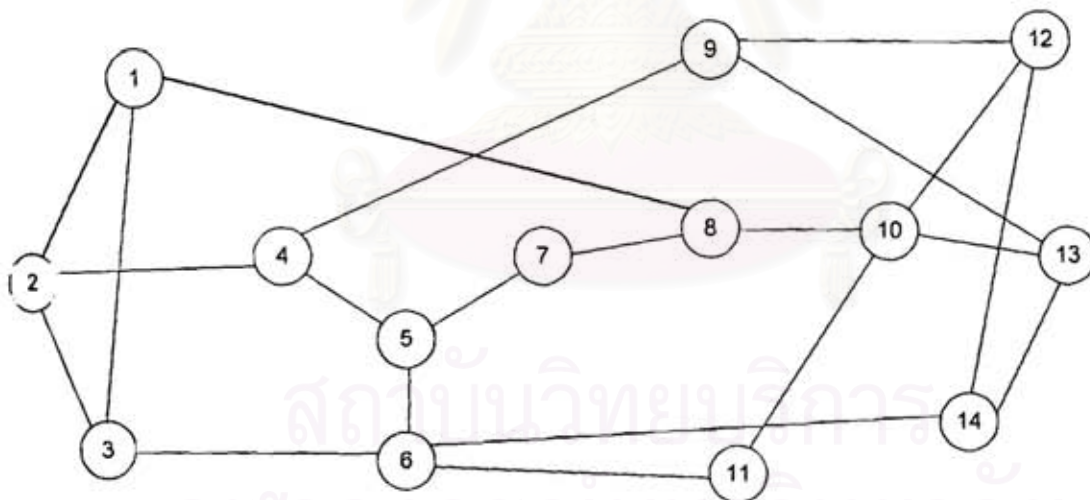
บทที่ 4

ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย

เนื้อหาในส่วนนี้ จะเป็นการกล่าวถึงผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ในเนื้อหาบทที่ 3 ทั้งในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติและโครงข่ายเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโหนด

4.1 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้ จะเป็นการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไว้ทั้งในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติและโครงข่ายเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโหนด ซึ่งในการวิเคราะห์ จะใช้โครงข่ายที่มีการใช้งานอยู่จริงของอเมริกา(NFSnet) เป็นโครงข่าย 14 โหนด 21 ข่ายเชื่อมโยง ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ 14 โหนด 21 ข่ายเชื่อมโยง

ในการกำหนดการใช้งานของการสื่อสารข้อมูลของกราฟฟิสิกคณิตศาสตร์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดการใช้งานทั้งหมด 56 เซสชัน ซึ่งแต่ละโหนดจะเป็นต้นทาง 4 เซสชัน โดยแต่ละเซสชันจะมีกลุ่มของโหนดปลายทาง 4 โหนด และกำหนดให้ปริมาณกราฟฟิสิกของแต่ละเซสชันเท่ากับ 1 และเลือกใช้เส้นทางระหว่างโหนดทุกคู่โหนด 5 เส้นทาง โดยมีการใช้งานดังตารางต่อไปนี้

เซตชั้น	ปริมาณกราฟฟิก	โน้ตดนตรีทาง	โน้ตปลายทาง
1	1	1	2,3,4,5
2	1	1	6,7,8,9
3	1	1	9,10,12,13
4	1	1	6,10,11,14
5	1	2	1,8,9,10
6	1	2	3,5,7,11
7	1	2	4,12,13,14
8	1	2	6,8,10,12
9	1	3	1,9,12,13
10	1	3	2,8,10,14
11	1	3	4,5,7,11
12	1	3	6,8,12,14
13	1	4	1,8,9,10
14	1	4	2,6,11,14
15	1	4	3,5,7,12
16	1	4	8,9,13,14
17	1	5	1,2,3,4
18	1	5	6,10,11,14
19	1	5	7,8,9,12
20	1	5	10,12,13,14
21	1	6	1,2,3,4
22	1	6	8,12,13,14
23	1	6	5,7,9,10
24	1	6	8,11,12,13
25	1	7	1,2,3,4
26	1	7	5,9,12,13
27	1	7	1,6,11,14
28	1	7	8,10,12,13

รูปที่ 4.2 กราฟฟิกที่ใช้สำหรับหาผลเฉลย

เลขชั้น	ปริมาณกราฟฟิก	โน้ตต้นทาง	โน้ตปลายทาง
29	1	8	1,2,3,5
30	1	8	4,6,9,10
31	1	8	6,7,11,14
32	1	8	10,12,13,14
33	1	9	1,2,3,5
34	1	9	4,6,7,11
35	1	9	10,12,13,14
36	1	9	8,10,11,13
37	1	10	1,2,3,7
38	1	10	9,12,13,14
39	1	10	4,5,7,8
40	1	10	3,4,6,11
41	1	11	1,2,3,6
42	1	11	4,5,7,8
43	1	11	10,12,13,14
44	1	11	1,4,9,14
45	1	12	1,2,3,4
46	1	12	5,6,7,8
47	1	12	10,11,13,14
48	1	12	1,4,9,10
49	1	13	10,11,12,14
50	1	13	1,2,3,5
51	1	13	4,5,6,7
52	1	13	4,6,8,9
53	1	14	10,11,12,13
54	1	14	1,2,3,9
55	1	14	6,7,8,9
56	1	14	4,5,6,8

รูปที่ 4.2 กราฟฟิกที่ใช้สำหรับหาผลเฉลย (ต่อ)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CPLEX6.6 ซึ่งทำงานอยู่บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ XP ในการคำนวณค่าผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานคือ เครื่อง Pentium 4 ความเร็ว 2.66 กิกะเฮิร์ตซ์ และมีหน่วยความจำเท่ากับ 512 เมกะไบต์

4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ

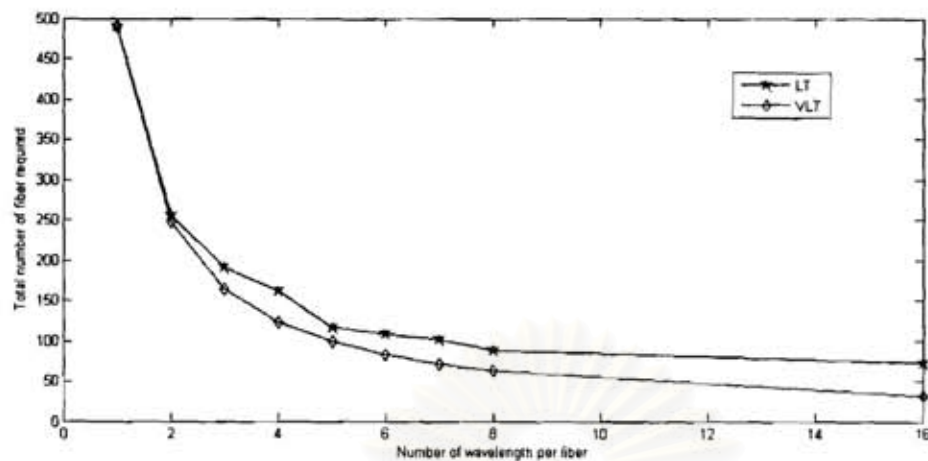
ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ โดยจะแสดงกราฟจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ และกรณีที่โครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้เทคนิควิธีการวางเส้นใยนำแสงทั้งหมดแบบ Optimized Spare Capacity Assignment สำหรับการป้องกันโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งโหนด จึงต้องมีการจัดเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นในสภาวะการทำงานปกติก่อน โดยอาศัยโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับกราฟฟิสิกซ์คณิตศาสตร์ แล้วจึงออกแบบการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อโครงข่ายเกิดความเสียหายหนึ่งโหนด โดยการนำเส้นทางและความยาวคลื่นของสภาวะการทำงานปกติมาพิจารณาด้วยกัน

4.2.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลเฉลยของการจัดสรรเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นในสภาวะปกติ โดยจะแปรค่าจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ลงในเส้นใยนำแสงหรือค่า M จำนวน 9 ค่า ได้แก่ 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 16 และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงในสภาวะการใช้งานปกติ

จำนวนเส้นใยนำแสง		
M	VLT	LT
1	490	490
2	247	256
3	165	191
4	124	162
5	99	117
6	83	109
7	71	102
8	63	89
16	32	73

เมื่อพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นของโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ จะพบว่า จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการจะมีค่าลดลงเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้นโดยจำนวนเส้นใยนำแสงจะลดลงอย่างมากเมื่อ M มีค่าน้อยๆ (1 2

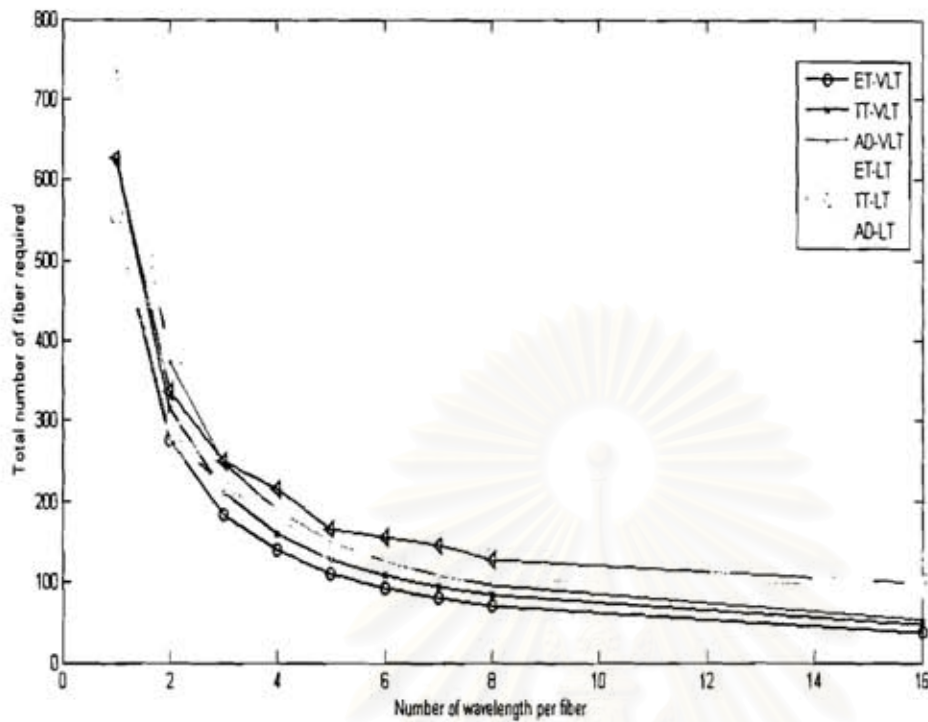
3 4) และเมื่อ M มีค่ามากขึ้น (5 6 7 8 16) จำนวนเส้นใยนำแสงจะลดลงน้อยกว่า เนื่องจากจากเมื่อ M มีค่ามากขึ้นจะทำให้แต่ละเส้นใยนำแสงมีช่องสัญญาณเป็นจำนวนมากขึ้นด้วย จึงทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการที่ M มีค่าต่ำกว่า เช่น จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการเมื่อ M มีค่าเท่ากับ 2 จะประมาณเป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการเมื่อ M มีค่าเท่ากับ 1

เมื่อพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงเปรียบเทียบกับระหว่างโครงข่ายที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และโครงข่ายที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จะพบว่าจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการจะมีค่าลดลงเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้น โดยโครงข่ายที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะมีจำนวนเส้นใยนำแสงลดลงมากกว่า เนื่องจากกรณีที่ทุกโนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นระหว่างทุกคู่โนดสามารถเปลี่ยนไปใช้ความยาวคลื่นค่าใดก็ได้ ส่วนกรณีที่ทุกโนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ทั้งเซชันนั้นจะต้องใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวกันและค่าความยาวคลื่นนี้ซึ่งอาจไปซ้ำกันกับเซชันอื่น จึงเป็นเหตุให้ต้องใช้จำนวนเส้นใยนำแสงเพิ่มขึ้น

4.2.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด

หลังจากที่ได้ผลเฉลยของการจัดเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ ผลเฉลยนี้จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด ทั้งในกรณีที่ทุกโนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และในกรณีที่ทุกโนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ซึ่งผลเฉลยของการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อแต่ละโนดเสียหายทั้งหมด 14 โหนด แสดงในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนดเสียหายใน โครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	550	622	734	550	626	726
2	275	315	375	285	337	393
3	183	212	248	217	250	297
4	140	160	189	182	215	248
5	111	128	149	140	166	196
6	92	109	127	134	155	180
7	80	94	109	119	145	167
8	71	84	97	106	129	151
16	37	47	52	92	113	129

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงระหว่างวิธีการจัดเส้นทางใหม่ 3 วิธี ET TT และ AD ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2 จะพบว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ ET ใช้จำนวนเส้นใยนำแสงน้อยกว่าวิธี TT และ AD ทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น เนื่องจากวิธีการจัดเส้นทางใหม่แบบ ET จะทำการปลดสถานะการทำงานทุกมัลติคาสต์เซสชันออกและทำการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นใหม่ให้กับเส้นทางสำรอง โดยไม่พิจารณาว่าเซสชันนั้นจะมีโหนดที่เสียหายอยู่ในเส้นทางหรือไม่ จึงทำให้วิธีนี้มีความยืดหยุ่นในการจัดเส้นทางมากกว่าวิธี TT และ AD ที่ทำการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเซสชันที่มีเส้นทางผ่านโหนดที่เสียหายและเซสชันที่มีโหนดระหว่างทางเชื่อมต่อยังโหนดที่เสียหาย ดังนั้นวิธีการจัดเส้นทางใหม่แบบ ET จึงเป็นวิธีที่ใช้เส้นใยนำแสงน้อยที่สุด

และเมื่อเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงระหว่างวิธีการจัดเส้นทางใหม่วิธี TT และ AD ทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จะพบว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TT ใช้จำนวนเส้นใยนำแสงน้อยกว่าวิธี AD เนื่องจากวิธี TT จะจัดเส้นทางใหม่ให้เฉพาะเส้นทางหลักที่ผ่านโหนดที่เสียหาย แต่วิธี AD นั้นนอกจากจัดเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางหลักที่ผ่านโหนดที่เสียหายแล้วยังจัดเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางหลักที่มีโหนดระหว่างทางเชื่อมต่อยังโหนดที่เสียหายด้วย เพื่อเป็นการกระจายทราฟฟิกออกจากโหนดที่เสียหาย จึงเป็นเหตุผลที่วิธี AD ใช้จำนวนเส้นใยนำแสงมากกว่าวิธี TT

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ ET เป็นวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่โครงข่ายต้องการเส้นใยนำแสงน้อยที่สุด ถัดมาได้แก่วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TT ส่วนวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ AD เป็นวิธีที่ใช้เส้นใยนำแสงมากที่สุด

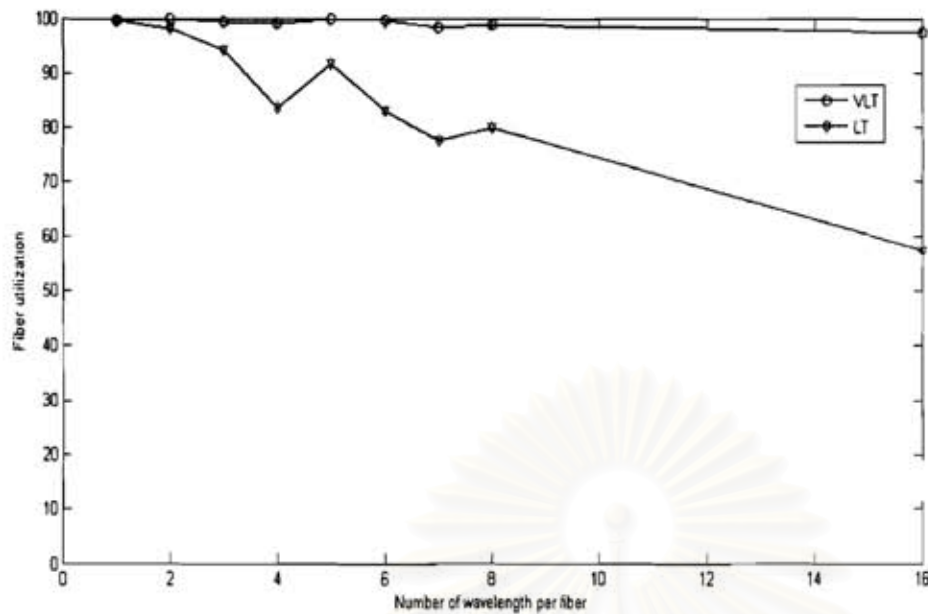
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่าย

ประสิทธิภาพที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนิยามให้มีค่าเท่ากับอัตราร้อยละของช่องสัญญาณที่ถูกใช้งานต่อจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดในโครงข่าย

4.3.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายในสภาวะการทำงานปกติ ทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.3 จะพบว่ากรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นประสิทธิภาพของโครงข่ายจะลดลงไม่มากนักเมื่อ M มีค่ามากขึ้นเนื่องจากโครงข่ายประเภท VLT จะกำหนดให้ระหว่างทุกคู่โหนดสามารถเปลี่ยนไปใช้ความยาวคลื่นค่าใดก็ได้ แต่ในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะกำหนดให้ใช้ความยาวคลื่นเดียวกันตลอดทั้งเส้นทาง ซึ่งอาจจะไปซ้ำกับเซสชันก่อนหน้านี้ จึงต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยนำแสงขึ้นในโครงข่ายสำหรับเซสชันหลังอันนี้จึงทำให้มีช่องสัญญาณในเส้นใยนำแสงเหลือเพิ่มขึ้น จึงทำให้เนื่องจากจำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้งานจริงในแต่ละค่าของ M มีจำนวนใกล้เคียงกัน แต่เมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่คำนวณออกมาเพิ่มขึ้น จึงทำให้อัตราส่วนการใช้งานจริงต่อการคำนวณได้ลดลงประสิทธิภาพของโครงข่ายประเภท LT ลดลง



รูปที่ 4.5ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

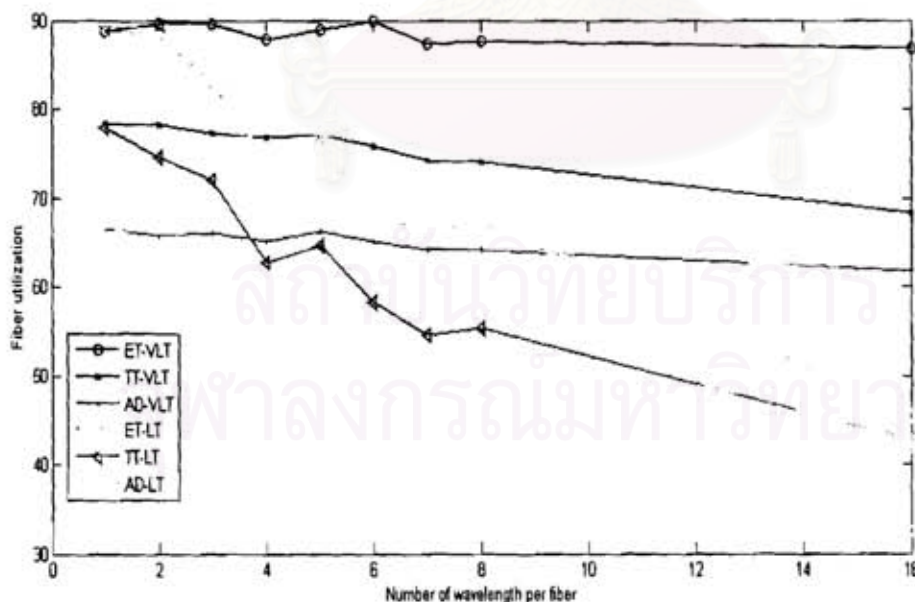
ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

ประสิทธิภาพของโครงข่าย(%)		
M	VLT	LT
1	99.59	99.59
2	99.78	98.24
3	99.40	94.24
4	99.14	83.49
5	99.80	91.80
6	99.60	82.89
7	98.40	77.59
8	98.80	80.10
16	97.34	57.45

4.3.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด

จากการพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด ทั้งในกรณีที่ทุก โหนดใน โครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และในกรณีที่ทุก โหนดใน โครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นก่อนหน้านี้ จะพบว่า ประสิทธิภาพของโครงข่ายประเภท VLT จะมากกว่าประเภท LT เนื่องจากโครงข่ายประเภท VLT จะกำหนดให้ระหว่างทุกโหนดสามารถเปลี่ยนไปใช้ความยาวคลื่นค่าใดก็ได้แต่โครงข่ายประเภท LTจะกำหนดให้ใช้ความยาวคลื่นเดียวกันตลอดทั้งเส้นทาง

ก่อนที่จะพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายระหว่างวิธีการจัดเส้นทางใหม่ 3 วิธี ET TT และ AD ทั้งในกรณีที่ทุก โหนดใน โครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และในกรณีที่ทุก โหนดใน โครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.4 พบว่าหลังจากการจัดสรรเส้นทางใหม่แล้วจำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้งานจริงทั้งวิธีมีจำนวนใกล้เคียงกัน แต่จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องใช้ในแต่ละวิธีนั้น ET ใช้น้อยที่สุด และ AD ใช้นามากที่สุด จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพของโครงข่ายที่หาจากอัตราส่วนจำนวนเส้นใยนำแสงที่ใช้งานจริงต่อจำนวนเส้นใยนำแสงที่คำนวณได้ในแต่ละวิธี จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพของโครงข่ายของวิธีการจัดเส้นทางใหม่ แบบET มีค่าสูงที่สุด ตามมาด้วย TT และ AD



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โหนดเสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	88.73	78.46	66.49	88.73	77.96	67.23
2	89.64	78.26	65.73	88.25	74.63	64.00
3	89.62	77.36	66.13	82.95	72.00	60.61
4	87.86	76.86	65.08	74.18	62.79	54.44
5	89.01	77.19	66.31	76.71	64.70	54.80
6	89.86	75.84	65.09	67.41	58.28	50.19
7	87.32	74.32	64.09	66.51	54.58	47.39
8	87.67	74.11	64.18	67.33	55.33	47.27
16	86.82	68.35	61.78	45.58	42.79	32.51

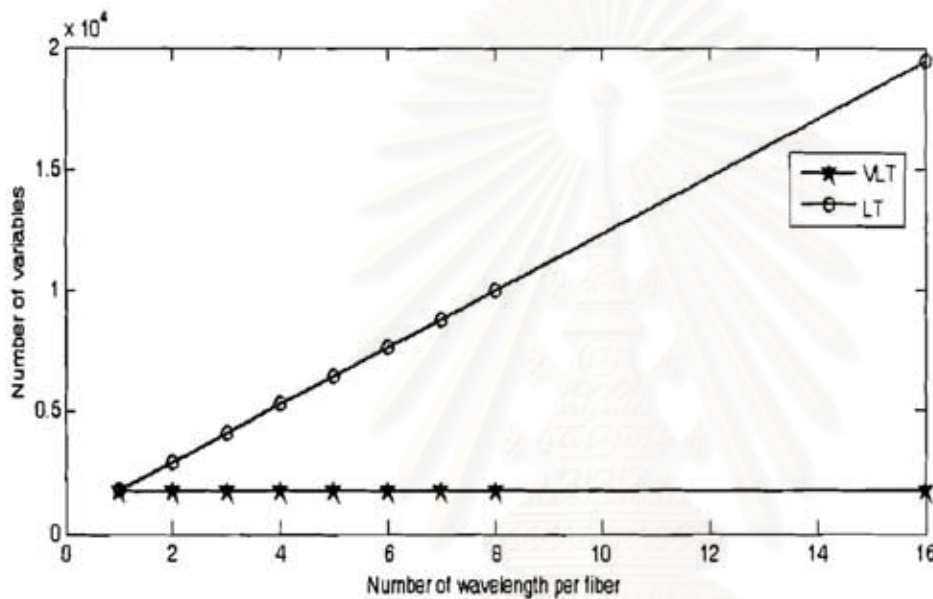
4.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการออกแบบเพื่อให้ได้โครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นได้อย่างเหมาะสมนั้น ปัจจัยที่ใช้เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของแต่ละวิธีนอกจากจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายแล้วแล้ว ความซับซ้อนของวิธีที่ใช้ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการพิจารณา เนื้อหาในส่วนนี้จะใช้กราฟแสดงจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติและในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนดด้วยวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธี

4.4.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นของโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ จะพบว่ากรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จำนวนตัวแปร

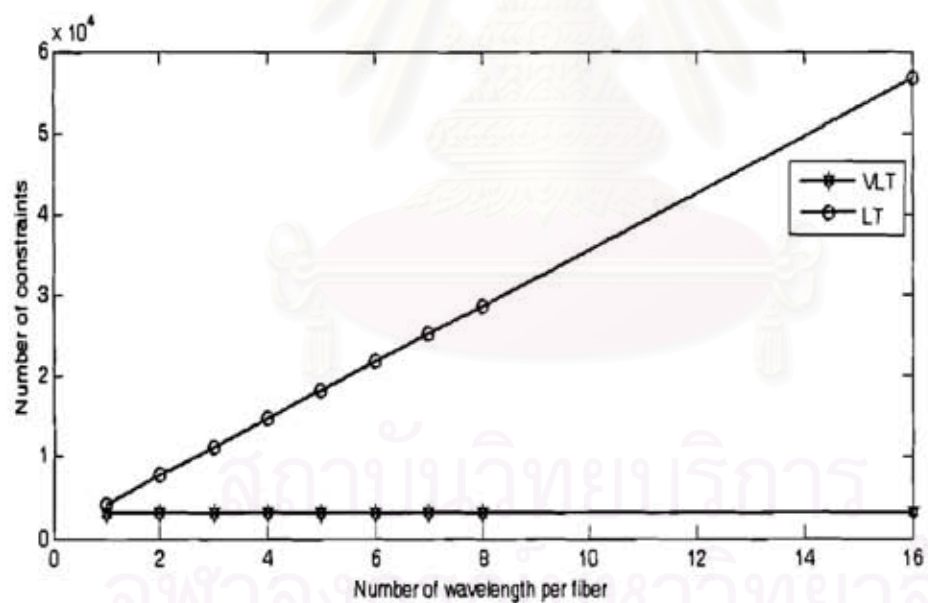
และจำนวนสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนความยาวคลื่นที่สามารถผลิตเพลกซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.5 ถึง ตารางที่ 4.6 จะมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 1701 และจำนวนสมการเท่ากับ 3066 แต่เมื่อพิจารณาในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น พบว่าจำนวนตัวแปรและจำนวนสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น เช่น ที่ $M=2$ จะมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 2933 และจำนวนสมการเท่ากับ 7791 ที่ $M=16$ จะมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 19397 และจำนวนสมการเท่ากับ 56693



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบจำนวนตัวแปรในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

ตารางที่ 4.5 จำนวนตัวแปรในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

จำนวนตัวแปรในสภาวะทำงานปกติ		
M	VLT	LT
1	1,701	1,753
2	1,701	2,933
3	1,701	4,109
4	1,701	5,285
5	1,701	6,461
6	1,701	7,637
7	1,701	8,813
8	1,701	9,989
16	1,701	19,397



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบจำนวนสมการในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

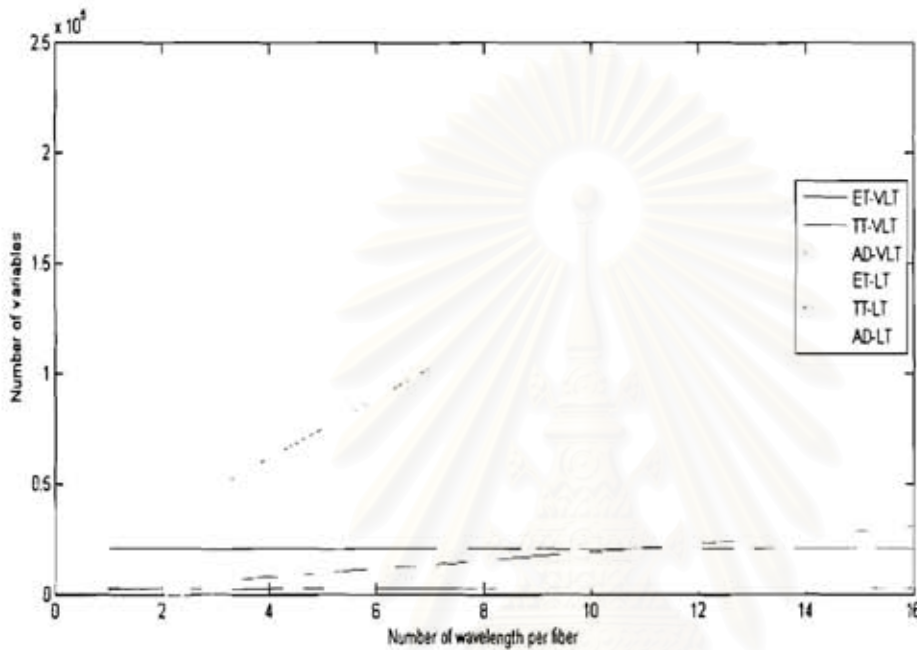
ตารางที่ 4.6 จำนวนสมการในกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

จำนวนสมการในสภาวะทำงานปกติ		
M	VLT	LT
1	784	4,298
2	784	7,791
3	784	11,284
4	784	14,777
5	784	18,270
6	784	21,463
7	784	25,256
8	784	28,749
16	784	56,693

4.4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีโครงข่ายที่มีความเสียหายหนึ่งโหนด

เมื่อพิจารณาจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสภาวะโครงข่ายเกิดความเสียหายหนึ่งโหนด โครงข่ายระหว่างวิธีการจัดเส้นทางใหม่ 3 วิธี ET TT และ AD ทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.7 จะพบว่ากรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะไม่ขึ้นกับค่า M แต่ขึ้นอยู่กับจำนวนเซตชั้นที่ต้องจัดสรรเส้นทางใหม่ ซึ่งวิธี ET จะมีเซตชั้นที่ต้องจัดสรรเส้นทางใหม่ทุกค่า M 52 เซตชั้นจึงมีจำนวนตัวแปรเท่ากับ 20601 แต่วิธี TT และ AD จะมีจำนวนตัวแปรไม่คงนี้เนื่องจากแต่ละค่าของ M มีจำนวนเซตชั้นที่ต้องจัดสรรเส้นทางใหม่ไม่เท่ากัน แต่ในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จะมีจำนวนตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นตามค่า M และจำนวนเซตชั้นที่ต้องจัดสรรเส้นทางใหม่ ทั้ง 3 วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดเส้นทางใหม่ 3 วิธี ET TT และ AD ทั้งในกรณีที่ทุกโนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และในกรณีที่ทุกโนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะพบว่า ET มีจำนวนเซตชั้นที่ต้องจัดสรรเส้นทางใหม่มากที่สุด รองลงมา คือ AD และ TT ตามลำดับจึงทำให้จำนวนตัวแปรของ ET มากที่สุด รองลงมา คือ AD และ TT ตามลำดับ



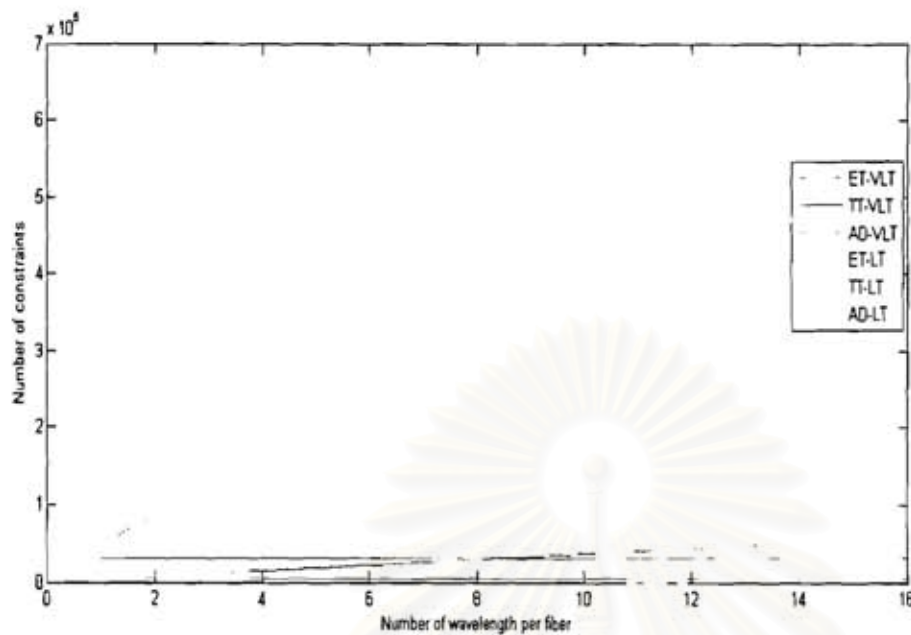
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบจำนวนตัวแปรในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด

ตารางที่ 4.7 จำนวนตัวแปรในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่ง โหนด

จำนวนตัวแปรเมื่อโหนดเสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	20,601	2,142	2,583	20,653	2,741	3,144
2	20,601	2,112	2,583	34,215	4,320	5,188
3	20,601	2,172	2,553	47,777	6,085	7,387
4	20,601	2,112	2,583	61,339	7,726	9,462
5	20,601	2,112	2,523	74,901	9,522	11,692
6	20,601	2,142	2,553	88,463	11,380	13,412
7	20,601	2,112	2,553	102,025	13,083	15,904
8	20,601	2,112	2,583	115,587	15,034	18,204
16	20,601	2,142	2,553	224,083	30,394	37,338

เมื่อพิจารณาจำนวนสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสภาวะโครงข่ายเกิดความเสียหายหนึ่ง โหนด โครงข่ายระหว่างวิธีการจัดเส้นทางใหม่ 3 วิธี ET TT และ AD ทั้งในกรณีที่ทุก โหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.8 จะพบว่ากรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจำนวนสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะไม่ขึ้นกับค่า M แต่ขึ้นอยู่กับจำนวนเซสชันที่ต้องจัดสรรเส้นทางใหม่ ซึ่งวิธี ET จะมีเซสชันที่ต้องจัดสรรเส้นทางใหม่ทุกค่า M 52 เซสชันจึงมีจำนวนสมการเท่ากับ 31456 แต่วิธี TT และ AD จะมีจำนวนสมการไม่คงนี้เนื่องจากแต่ละค่าของ M มีจำนวนเซสชันที่ต้องจัดสรรเส้นทางใหม่ไม่เท่ากัน แต่ในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จะมีจำนวนสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นตามค่า M และจำนวนเซสชันที่ต้องจัดสรรเส้นทางใหม่ ทั้ง 3 วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดเส้นทางใหม่ 3 วิธี ET TT และ AD ทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น จะพบว่า ET มีจำนวนเซสชันที่ต้องจัดสรรเส้นทางใหม่มากที่สุด รองลงมา คือ AD และ TT ตามลำดับจึงทำให้จำนวนสมการของ ET มากที่สุด รองลงมา คือ AD และ TT ตามลำดับ



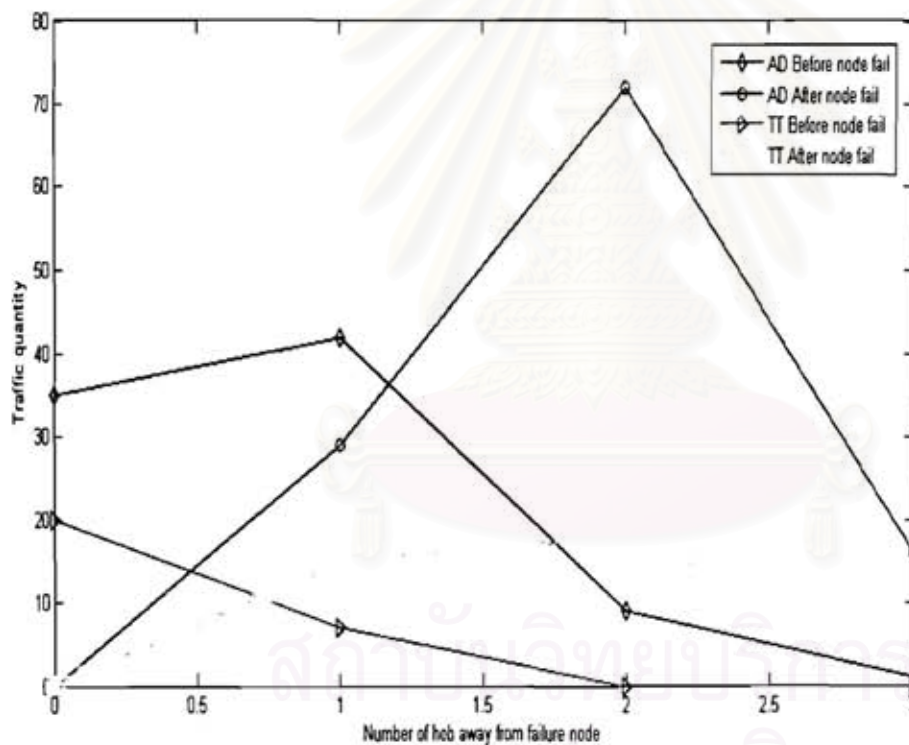
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบจำนวนสมการในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด

ตารางที่ 4.8 จำนวนสมการในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด

จำนวนเงื่อนไขบังคับเมื่อ โหนดเสียหายใน โครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	31,456	4,228	5,348	47,767	4,319	4,410
2	31,456	4,148	5,348	88,422	7,833	8,029
3	31,456	4,308	5,268	129,077	11,389	11,683
4	31,456	4,148	5,348	169,732	14,917	15,309
5	31,456	4,148	5,188	210,387	18,480	18,970
6	31,456	4,228	5,268	251,042	22,057	22,561
7	31,456	4,148	5,268	291,697	25,599	26,236
8	31,456	4,148	5,348	332,352	29,197	29,925
16	31,456	4,228	5,268	657,952	57,925	59,493

4.5 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอ

จากการพิจารณาเปรียบเทียบการกระจายกราฟฟีกออกจากบริเวณที่เสียหายของโครงข่ายระหว่างวิธีการจัดเส้นทางใหม่ที่นำเสนอวิธี TT และ AD ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จะพบว่าวิธี AD จะกระจายกราฟฟีกออกจากบริเวณที่โหนดเสียหายภายในโครงข่ายมากกว่าวิธี TT เนื่องจากวิธี AD จะทำการจัดสรรใหม่ให้กับเซสชันที่มีเส้นทางผ่าน โหนดที่เสียหายและเซสชันที่มีโหนดระหว่างทางเชื่อมต่อนายัง โหนดที่เสียหาย แต่วิธี TT จะทำการจัดสรรใหม่ให้กับเฉพาะเซสชันที่มีเส้นทางผ่าน โหนดที่เสียหายเท่านั้น จึงเป็นสาเหตุที่วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ AD เป็นวิธีที่ใช้เส้นใยนำแสงมากที่สุด



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบการกระจายกราฟฟีกออกจากบริเวณที่เสียหายของโครงข่ายระหว่างวิธีการจัดเส้นทางใหม่ที่นำเสนอวิธี TT และ AD

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ศึกษาการออกแบบโครงข่าย WDM ระบบหลายเส้นใยนำแสงเพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ ทั้งในกรณีที่โครงข่ายทำงานในสภาวะปกติและโครงข่ายมีโหนดเสียหายหนึ่งโหนด โดยในกรณีที่โครงข่ายทำงานในสภาวะปกตินั้น จะเป็นการศึกษาการจัดเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ ส่วนในกรณีที่โครงข่ายมีโหนดเสียหายหนึ่งโหนด จะเป็นการศึกษาการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงโหนดที่เสียหาย ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ 3 วิธี 1). Reconfiguration of entire network (ET) 2). Reconfiguration of traffic traversing through failure node (TT) และ 3). Reconfiguration of traffic adjacent to failure node (AD) โดยมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ พิจารณาคำนวณที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย ซึ่งก็คือจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ เพื่อให้โครงข่ายสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกได้ทั้งหมด และเปรียบเทียบแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ในด้านจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย ทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่และในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่

การออกแบบโครงข่ายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย โดยใช้เทคนิค Integer linear programming (ILP) ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะให้ได้ผลเฉลยที่ดีที่สุด หรือจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายมีค่าต่ำที่สุด การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาผลเฉลยของปัญหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธี Optimized Spare Capacity Assignment ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งเป็นวิธีการหาความจุสำรองที่โครงข่ายต้องการ โดยจะมีกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นของสภาวะการทำงานปกติของโครงข่ายมาให้

จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เสนอไว้กับโครงข่ายที่มีการใช้งานอยู่จริงของอเมริกา 14 โหนด 21 ข่ายเชื่อมโยง (NSFNet) เพื่อทดสอบหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมด สามารถสรุปผลการทดสอบในแง่ของความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งได้แก่ จำนวนตัวแปรและจำนวนตัวแปรได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท VLT จะมีความ

ซับซ้อนน้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท LT เนื่องจากจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท VLT ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์บนลงเส้นใยนำแสง (M) ส่วนจำนวนสมการและจำนวนตัวแปรของโครงข่ายประเภท LT จะเพิ่มขึ้นตามค่า M ของเส้นใยนำแสง และอีกทั้งเงื่อนไขของการเลือกค่าความยาวคลื่นสำหรับแต่ละมัลติคาสต์เซชันด้วย และเมื่อพิจารณาในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย (Computational time) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท LT จะใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยนานกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประเภท VLT

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโนดในโครงข่ายจากการจำลองปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 3 วิธี ทั้งทั้งในกรณีที่ทุกโนดในโครงข่ายมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่และในกรณีที่ทุกโนดในโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ ET เป็นวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ใช้จำนวนเส้นใยนำแสงน้อยที่สุด ส่วนวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ TT ใช้จำนวนเส้นใยนำแสงน้อยรองลงมา และ วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ AD เป็นวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ใช้จำนวนเส้นใยนำแสงมากที่สุด

จากการศึกษาอิทธิพลของจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสง (M) ที่มีต่อจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ว่า เมื่อทำการพิจารณาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในกรณีโครงข่ายแบบ VLT และ LT จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสงจะช่วยลดจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการได้ โดยจำนวนเส้นใยนำแสงจะลดลงตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการที่ M มีค่าเพิ่มขึ้น จำนวนช่องสัญญาณในการรองรับทราฟฟิกของโครงข่ายก็จะมีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากการพิจารณาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อต้นทุนของโครงข่าย เพื่อสรุปถึงข้อดีและข้อเสียของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่าย WDM ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาต้นทุนของโครงข่ายประเภท VLT และ LT สามารถสรุปได้ว่า อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดจำนวนเส้นใยนำแสงในโครงข่ายได้ ซึ่งจำนวนเส้นใยนำแสงที่ลดลงจะขึ้นอยู่กับค่า M ที่เพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในขั้นต่อไปที่น่าสนใจ

1. วัตถุประสงค์ในการออกแบบปกป้องโครงข่ายในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อจัดสรรความจุสำรองที่โครงข่ายขนาดใหญ่ต้องการ แต่เนื่องจากข้อกำหนดของโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึง ต้นทุนของอุปกรณ์อื่นๆที่โครงข่ายต้องนำมาใช้ในกระบวนการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น ดังนั้น หากมีการออกแบบโดยคำนึงถึงราคาของอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อการออกแบบปกป้องโครงข่ายด้วยก็จะทำให้การออกแบบสมบูรณ์ยิ่งขึ้น
2. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขั้นตอนการหาเส้นทางสำรองเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นหลังจากการจัดสรรเส้นทางในสถานะการใช้งานปกติ (Optimized Spare Capacity Assignment) งานวิจัยขั้นต่อไปควรพัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถจัดสรรเส้นทางสำรองพร้อมกับการจัดสรรเส้นทางในสถานะการใช้งานปกติ (Jointly Optimized Working and Spare Capacity Assignment) ซึ่งอาจทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการมีจำนวนลดลง
3. แม้ว่าข้อดีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาดำเนินทุนของโครงข่ายจะได้ค่าต้นทุนที่ต่ำที่สุด แต่ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ยังมีข้อเสียคือ ใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยนาน ดังนั้น งานวิจัยขั้นต่อไปคือ การเสนอขั้นตอนวิธีฮิวริสติกสำหรับออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยลดลง
4. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ ซึ่งในการใช้งานจริงต้นทุนของโครงข่ายจะพิจารณาถึงความยาวของเส้นใยนำแสงที่ต้องติดตั้งในโครงข่ายด้วย งานวิจัยขั้นต่อไปควรมีการพิจารณาระยะทางระหว่างตู้ในโครงข่ายเพื่อหาความยาวของเส้นใยนำแสงที่ต้องติดตั้งให้โครงข่าย

รายการอ้างอิง

- [1] ดัชนีกร วุฒิสถิตกุลกิจ, วิศวกรรมโทรคมนาคม . กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2544.
- [2] C. Siva Ram Murthy. WDM optical networks: Concepts, design, and algorithms. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002
- [3] L. H. Sahasrabudde and B. Mukherjee Multicast Routing Algorithms and Protocols : A Tutorial”, IEEE Network, Vol. 14, pp.90-102, January 2000
- [4] L. H. Sahasrabudde and B. Mukherjee, “Light-trees: Optical multicasting for improved performance in wavelength-routed networks,” *IEEE Communication Magazine*, vol. 37, no. 2, pp. 67-73, February 1999
- [5] K. Tseng and J. Huang, “An Efficient Multicast Routing Algorithm in WDM Network”, Communication, Circuit and System International Conference 2004, Vol.1, pp. 714-717, 2004
- [6] A. Khalil, C. Assi, A. Hadjiantonis, Nasser Abdellatif and M. A. Ali, “Multicast Traffic Grooming in WDM Network”, Electrical and Computer Engineering 2004, Vol.2, pp. 785-88, May 2004
- [7] Y. Zhou and G. Poo, “A New Multi-wavelength Multicast Wavelength Assignment (MMWA) Algorithm in Wavelength-Route WDM Network”, IEEE International Conference 2004, Vol.3 , pp.1786-1790, 2004
- [8] D. Yang and W. Liao, “Design of Light-Tree Based Logical Topologies for Multicast Stream in Wavelength Route Optical Network”, IEEE Computer and Communication Conference 2003, Vol.1 , pp.3241, 2003
- [9] B. Chen and J. Wang, “Efficient Routing and Wavelength Assignment for Multicast in WDM Network”, IEEE Journal , Vol.20, pp.97-106, 2002
- [10] B. Chen and J. Wang, “Constrained Wavelength Assignment for Multicast in WDM Network”, Computer and Communication Network 2001 International Conference, pp. 388-394, October 2001
- [11] H. Cheng and F. Lin, “A Capacitated Minimum-Cost Multicast Routing Algorithm for Multirate Multimedia Distribution”, Intelligent Signal Processing and Communication System 2004, pp. 211- 216, November 2004

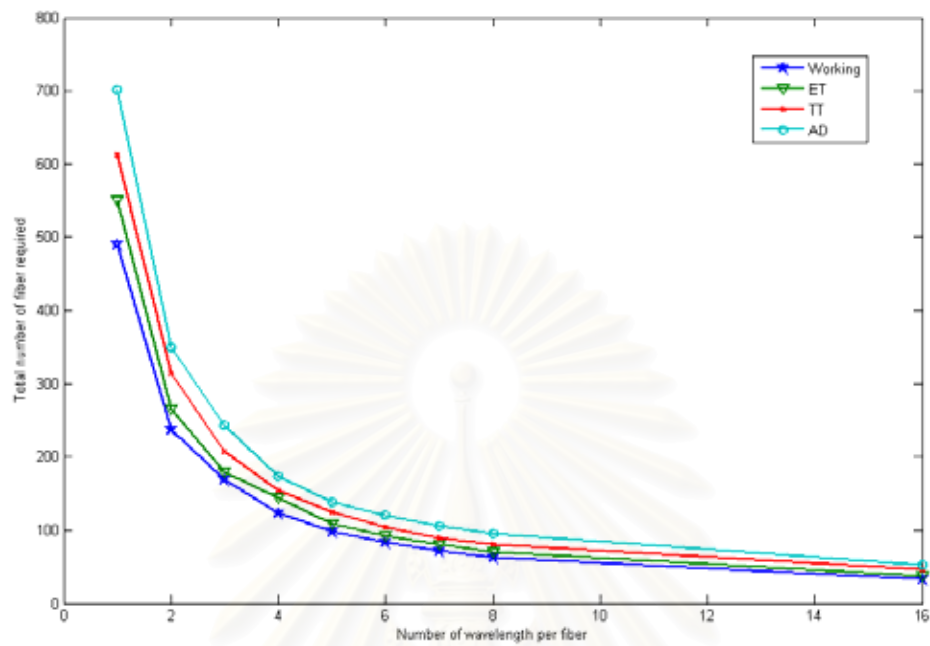
- [12] Mehrdad Parsa, Qing Zhu and Garcia-Luna-Aceves, "An Iterative Algorithm for Delay-Constrained Minimum-Cost Multicasting", IEEE Transaction , Vol.6, pp.461-474, 1998
- [13] X. Zhang, J. Wei, C. Qiao, "Constrained Multicast Routing in WDM Networks with Sparse Light Splitting," IEEE INFOCOM 2000, no. 1, pp. 1781-1790, March 2000.
- [14] A. Zsigri, A. Guitton and M. Molnar, "Construction of Light-Tree for WDM Multicasting under Splitter Capability Constraints", Telecommunication International Conference 2003, Vol.1, pp. 171- 175, 2003
- [15] N. Singhal, C. Ou and B. Mukherjee, "Share Protection for Multicast Sessions in Mesh Networks", Optical Fiber Communication Conference 2005, Vol.6, 2005
- [16] N. Singhal and B. Mukherjee, "Architecture and Algorithm for Multicast in WDM Optical Mesh Networks using Opaque and Transparent Optical Cross Connect", Optical Fiber Communication Conference 2005, Vol.6, 2005
- [17] N. Singhal and B. Mukherjee, "Protecting Multicast Sessions in WDM Optical Mesh Networks", Light wave Technology Journal, Vol.21, No.4, April 2003
- [18] N. Singhal, L. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, "Provision of Survivable Multicast Sessions Against Single Failures in Optical WDM Mesh Networks", Light wave Technology Journal, Vol.21, No.11, pp.2587-2594, November 2003
- [19] N. Singhal, L. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, "Protecting a Multicast Sessions Against Single Failures in a Mesh Network", IEEE International Conference, Vol. 2, pp. 1504-1508, May 2003
- [20] A.Khalil, A. Hadjiantonis and M.A. Ali, "Pre-planned Multicast Protection Approaches in WDM Networks", Optical Communication ECOC 2005, pp. 25-26, September 2005
- [21] C. Boworntummarat, S. Segkhoontod and L. Wuttisittikulkij, "Light-Tree Based Protection Strategies for Multicast Traffic in Transport WDM Networks with Multi-Fiber System", IEEE Communication Society, pp. 1791-1795, 2004
- [22] C. Boworntummarat, "Wavelength Routing and Optical Layer Network Protection Approaches Against Single Link Failures for Multicast Traffic on WDM Networks," *A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University, 2003.*



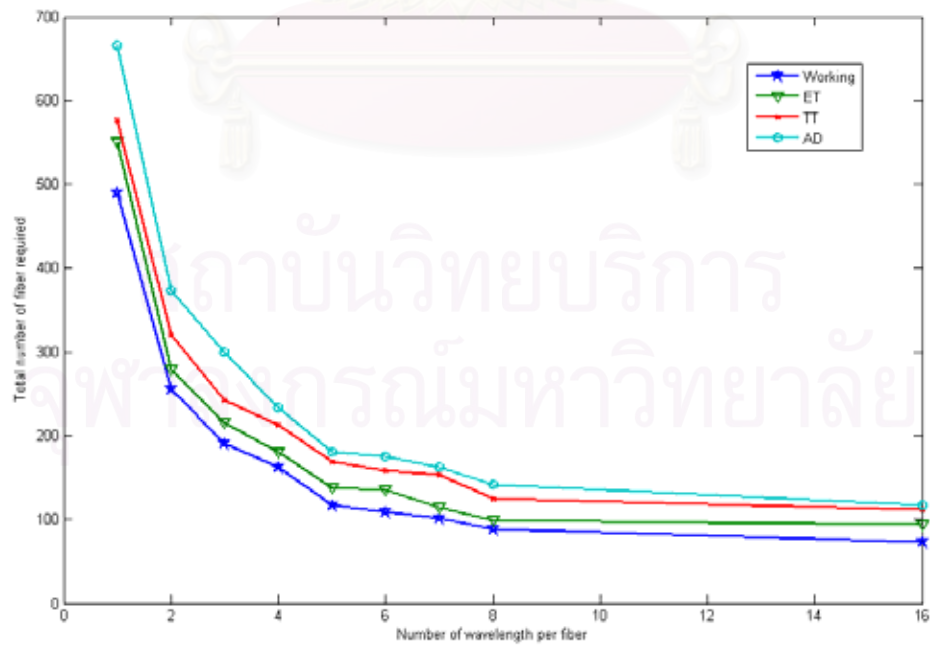
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

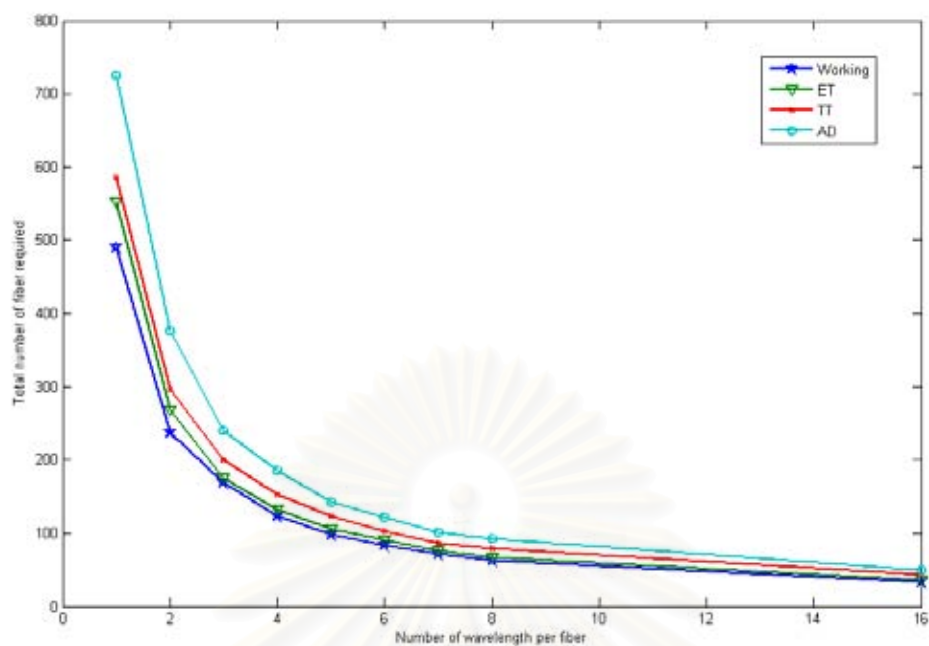
ภาคผนวก ก จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด



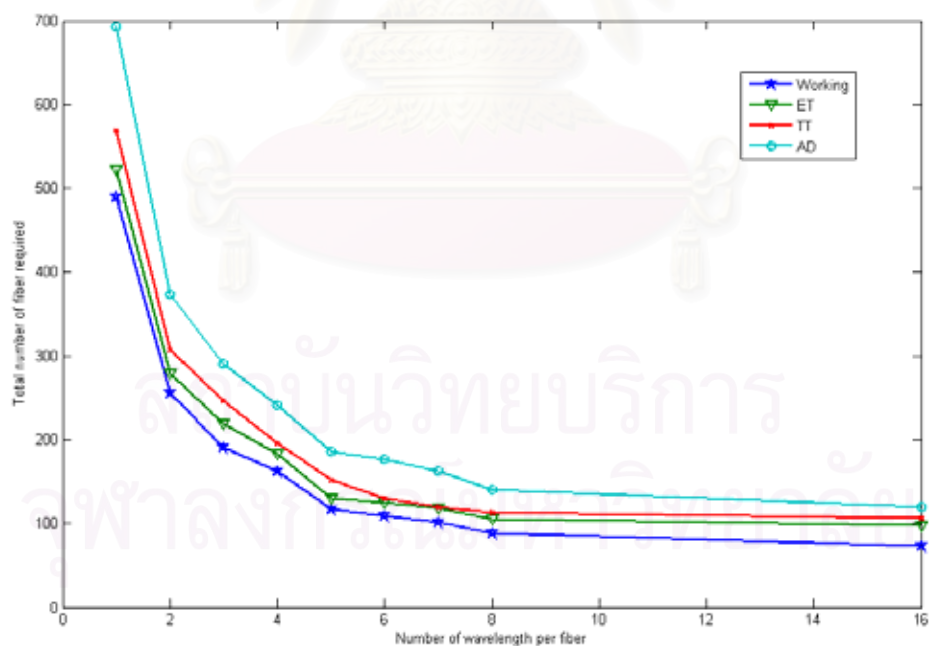
รูปที่ ก.1 โหนดเสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



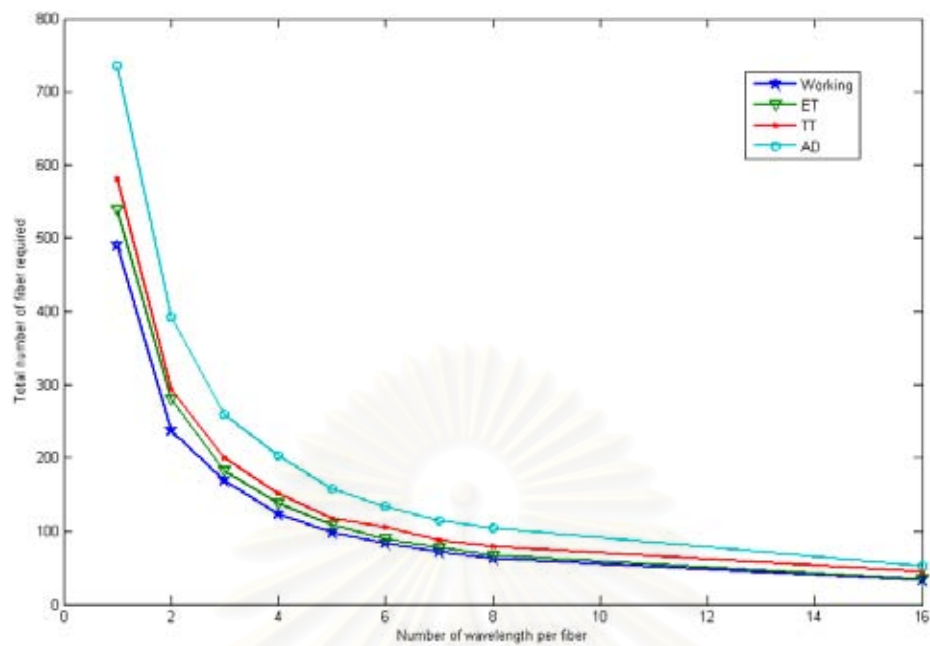
รูปที่ ก.2 โหนดเสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



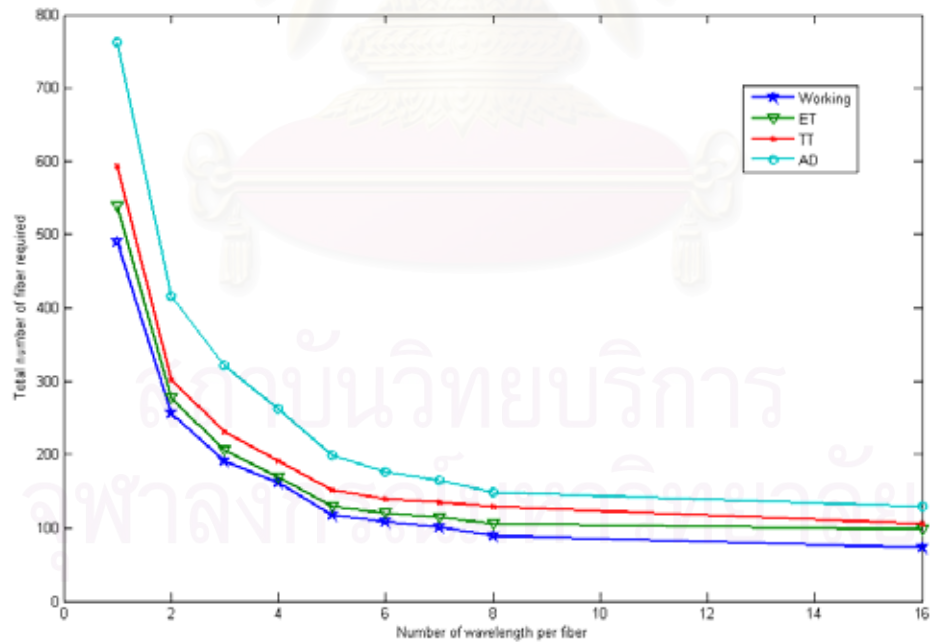
รูปที่ ก.3 โหนด2เสี้ยวหกกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



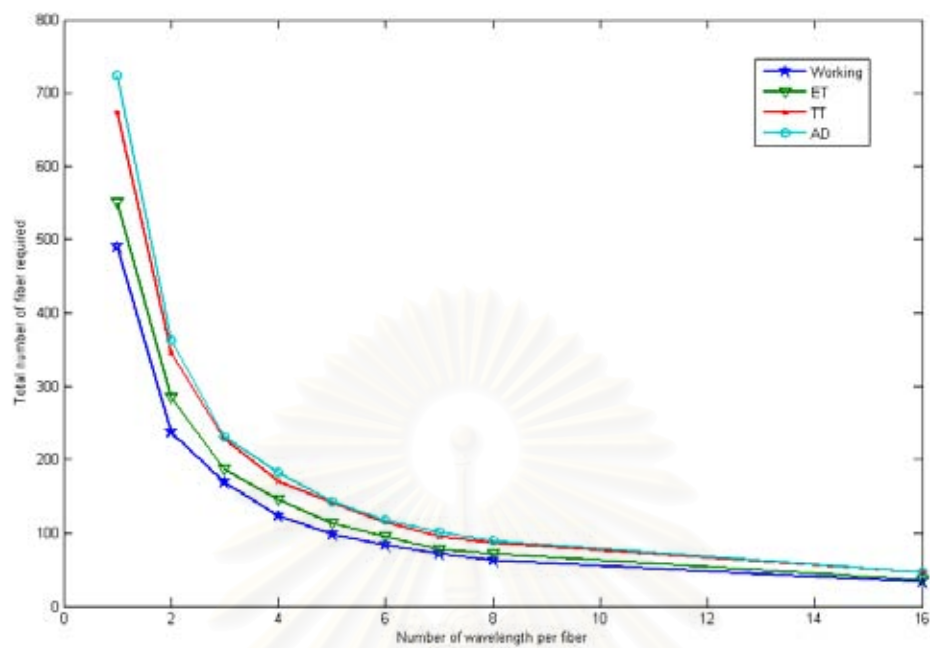
รูปที่ ก.4 โหนด2เสี้ยวหกกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



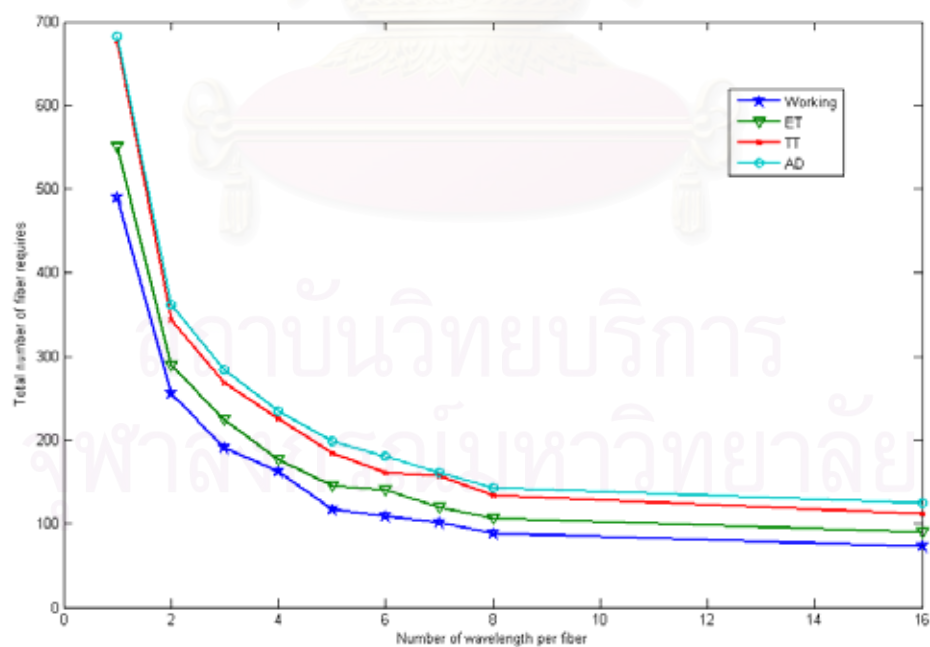
รูปที่ ก.5 โนค3เสียบายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



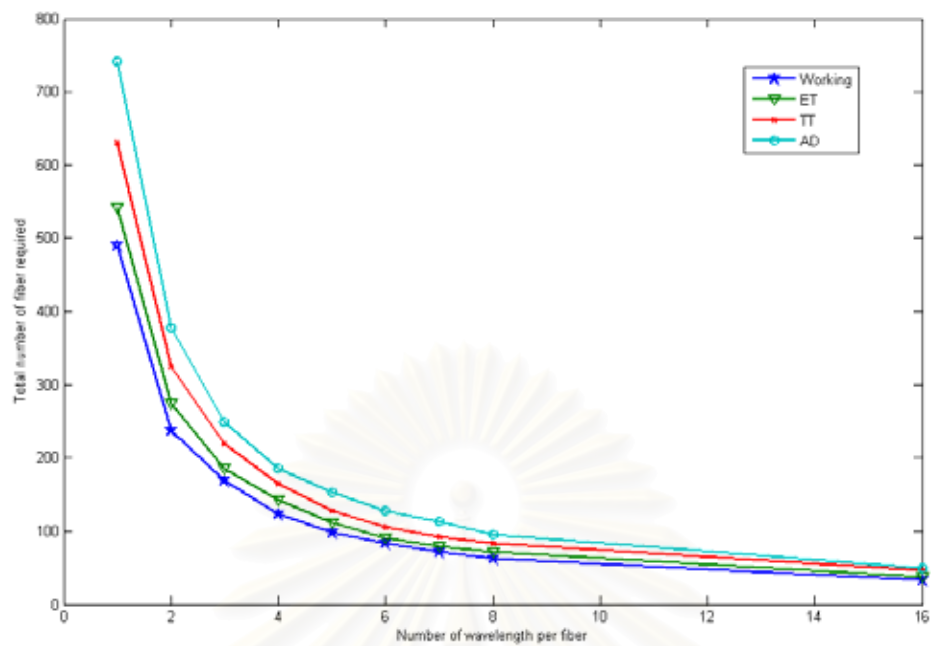
รูปที่ ก.6 โนค3เสียบายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



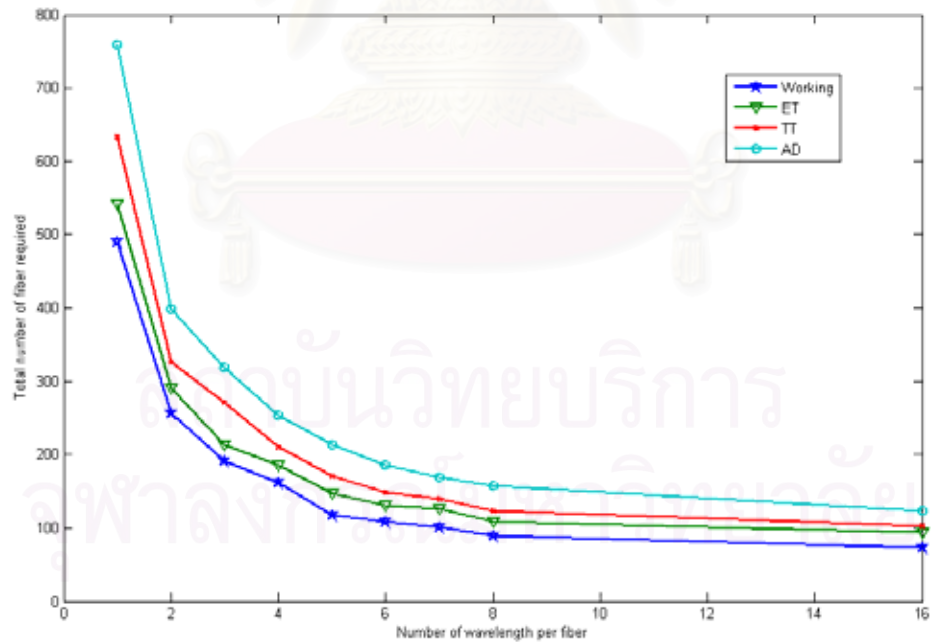
รูปที่ ก.7 โหนด4เสี้ยวหากรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



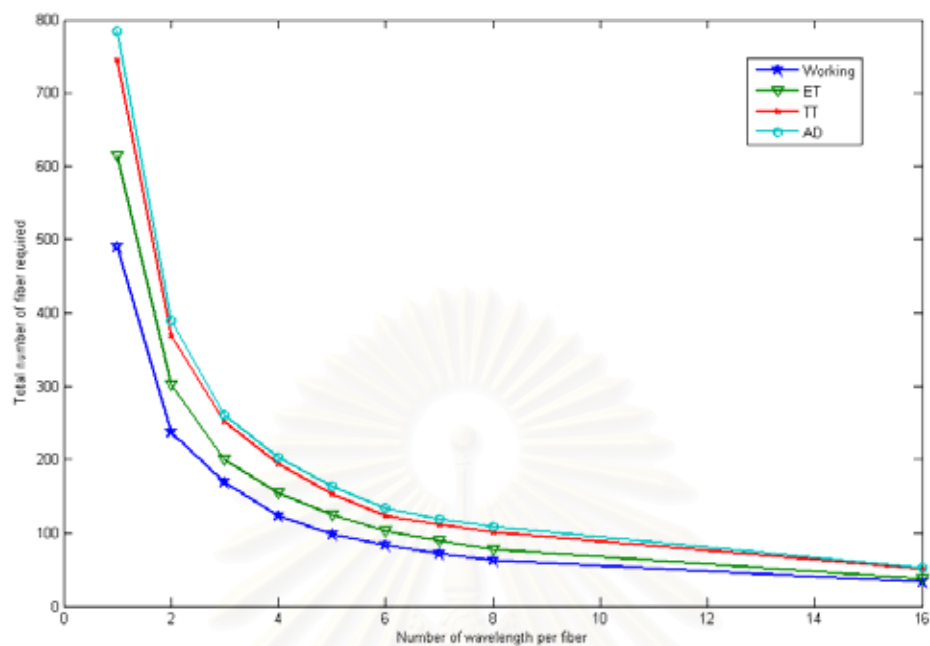
รูปที่ ก.8 โหนด4เสี้ยวหากรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



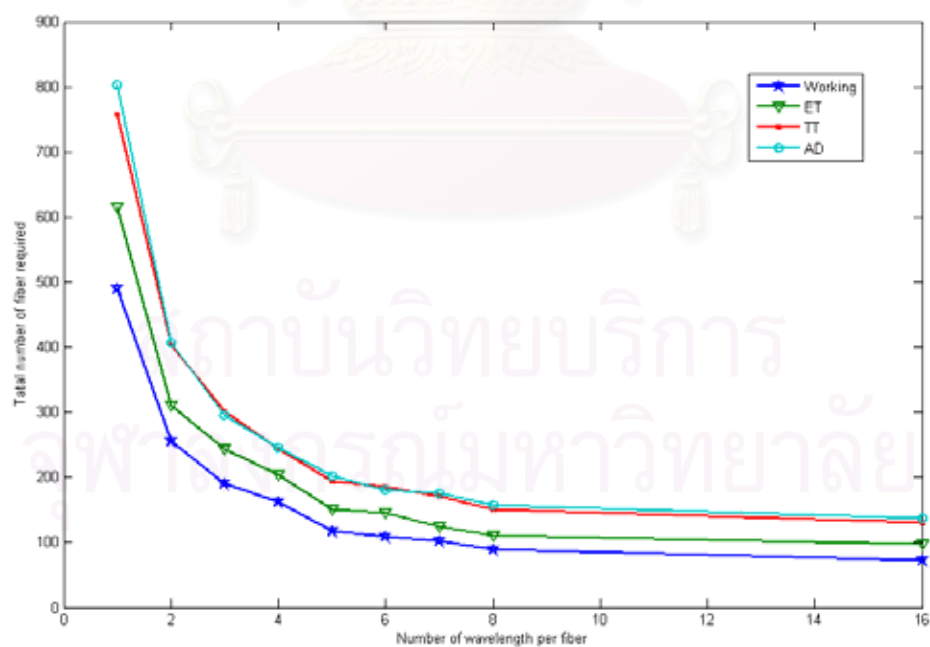
รูปที่ ก.9 โนดเสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



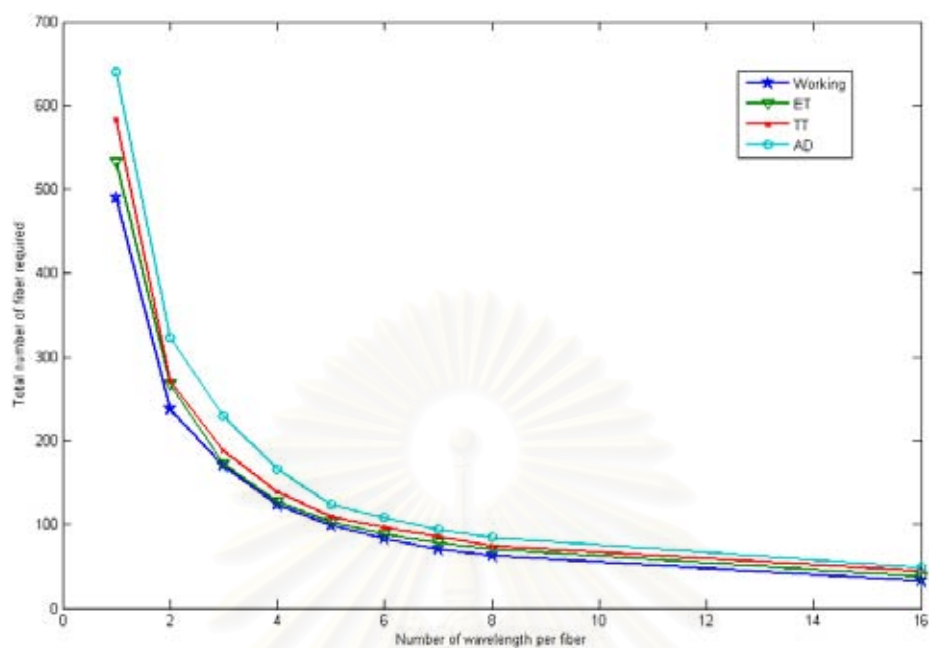
รูปที่ ก.10 โนดเสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



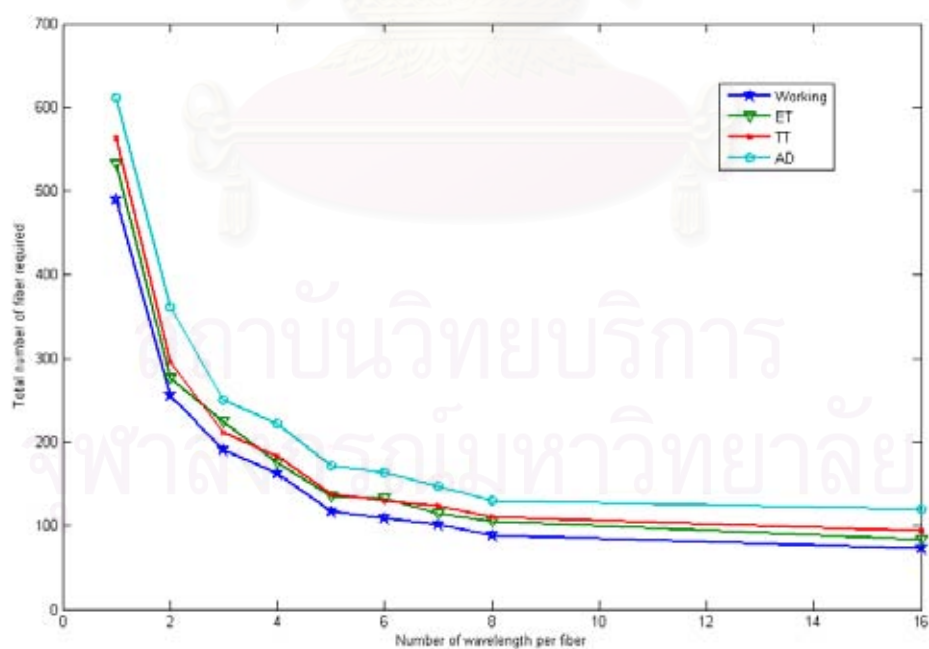
รูปที่ ก.11 โหนด6เสี้ยวกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



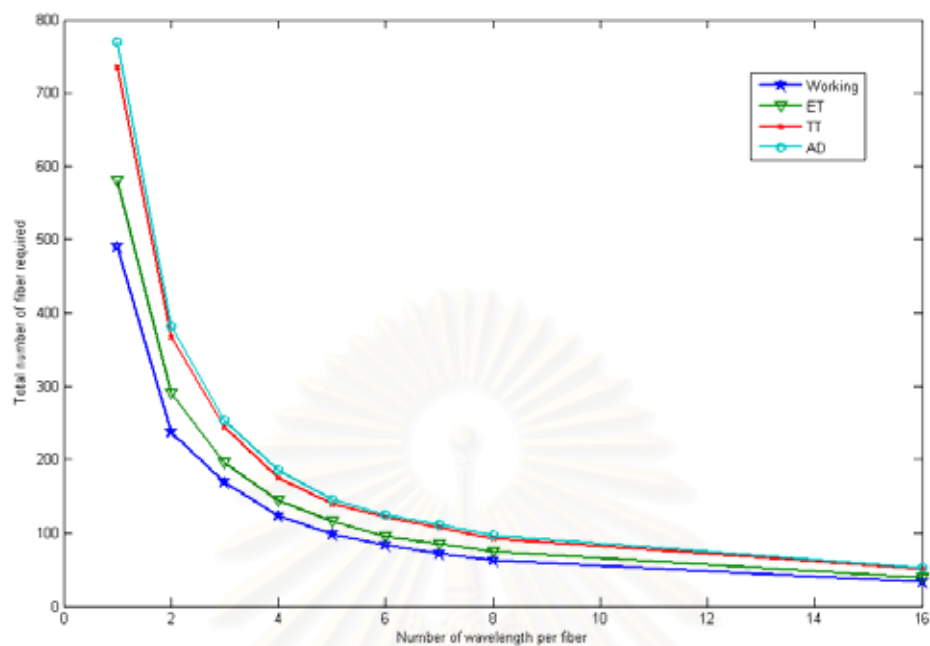
รูปที่ ก.12 โหนด6เสี้ยวกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



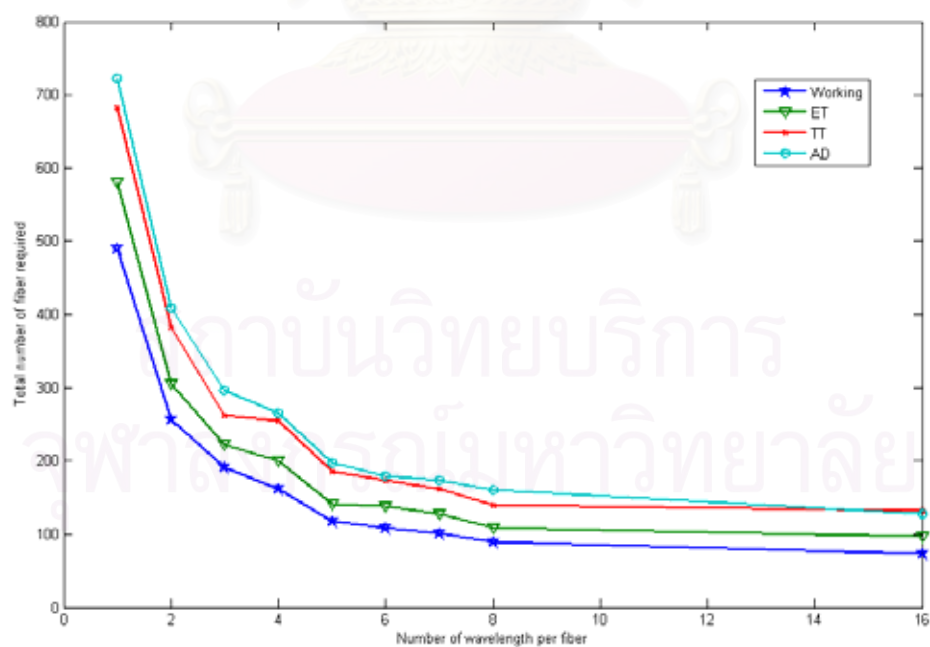
รูปที่ ก.13 โหนด 7 เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



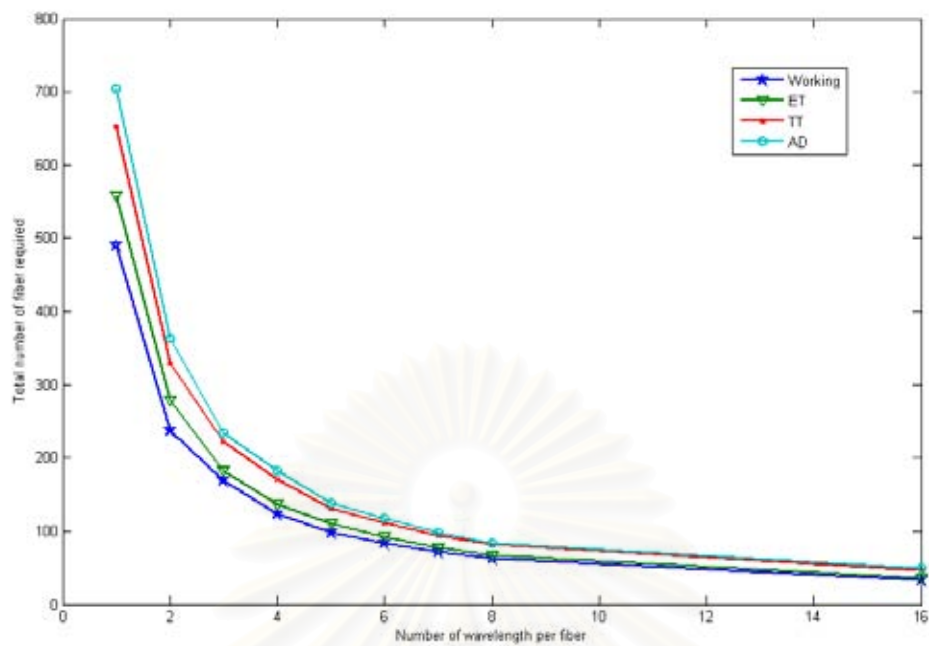
รูปที่ ก.14 โหนด 7 เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



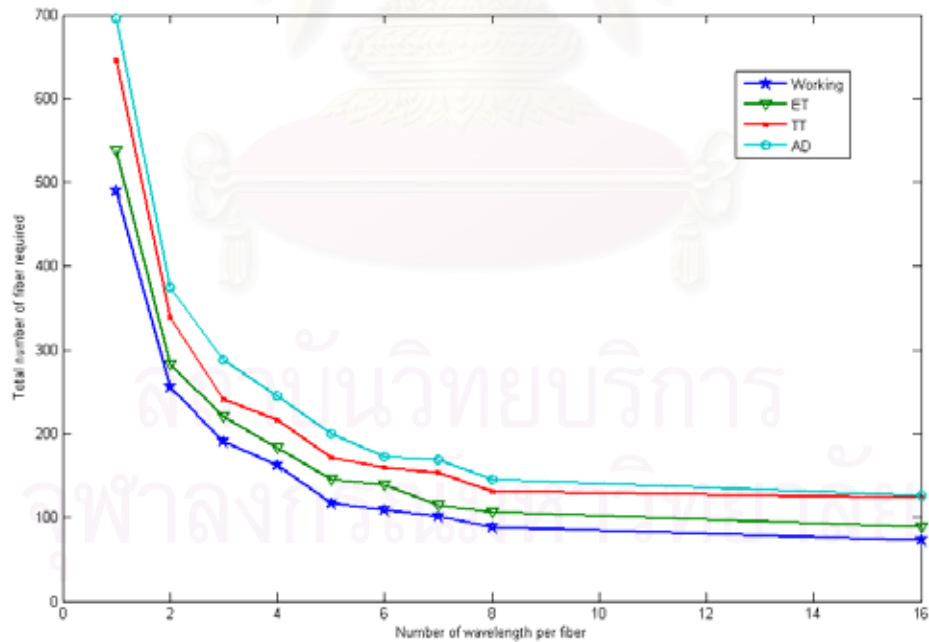
รูปที่ ก.15 โนคสเสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



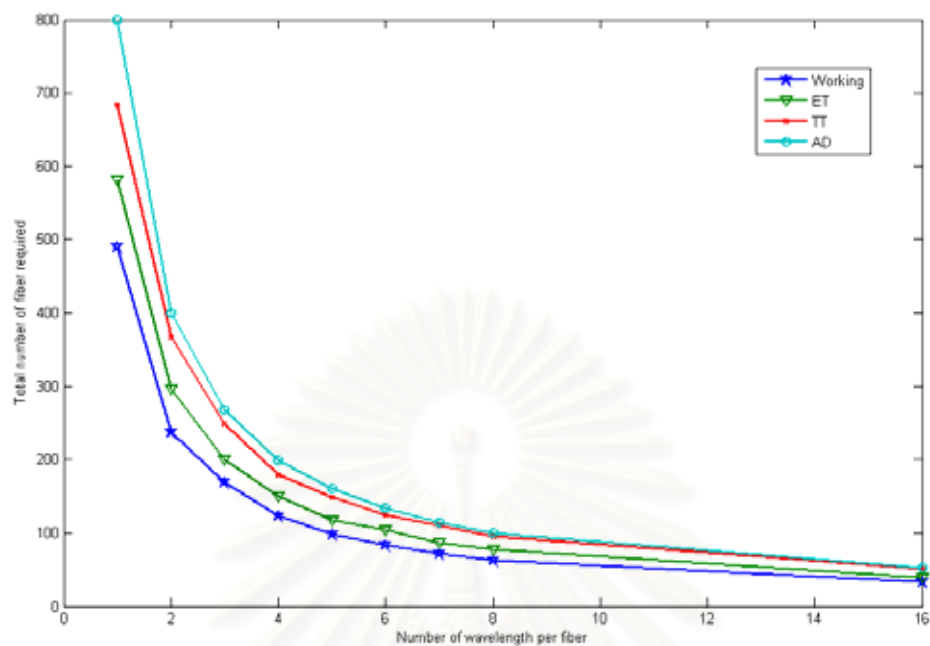
รูปที่ ก.16 โนคสเสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



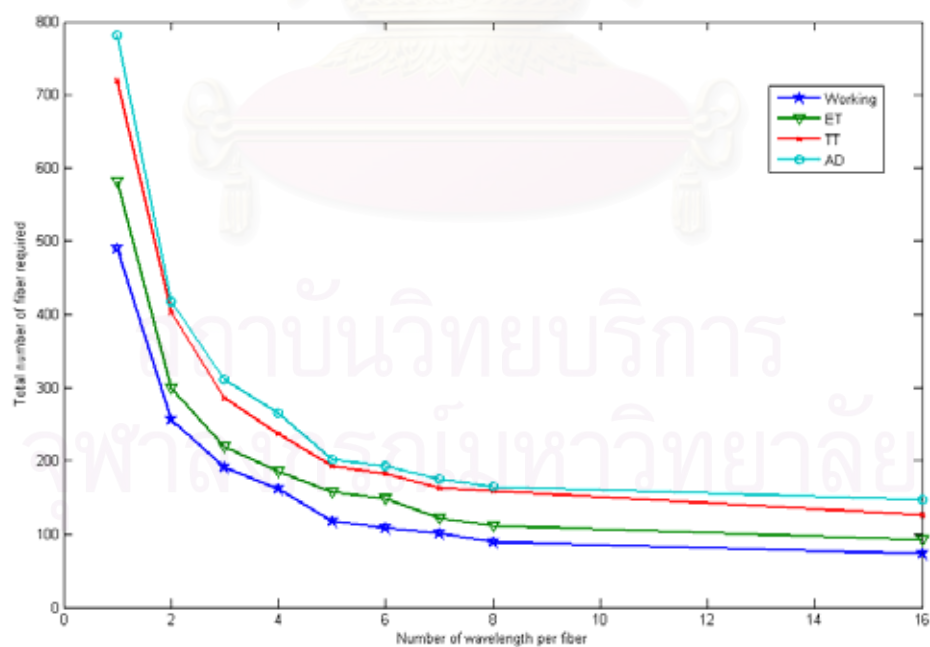
รูปที่ ก.17 โนค9เสียบายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



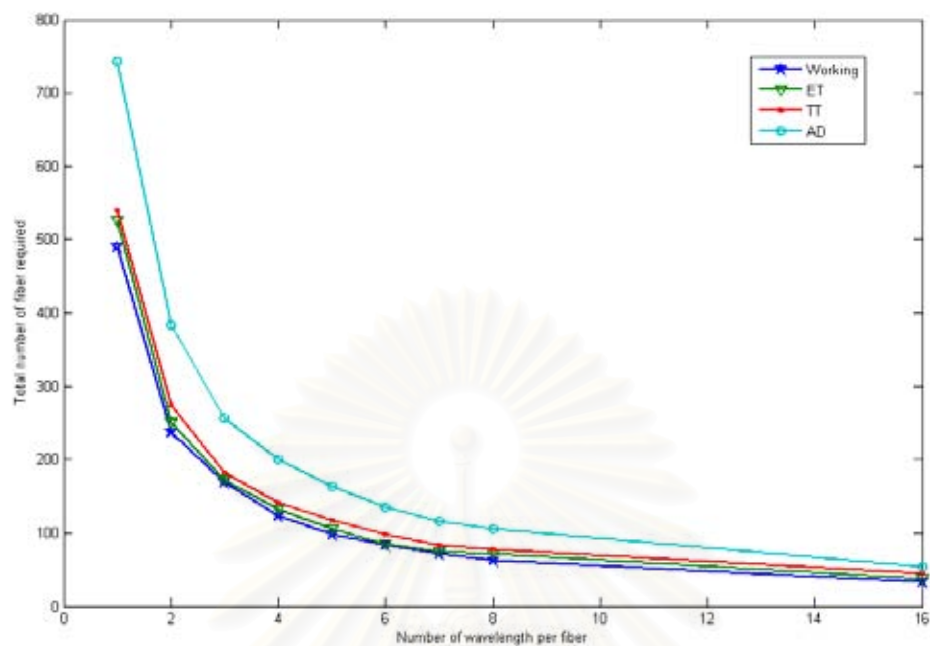
รูปที่ ก.18 โนค9เสียบายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



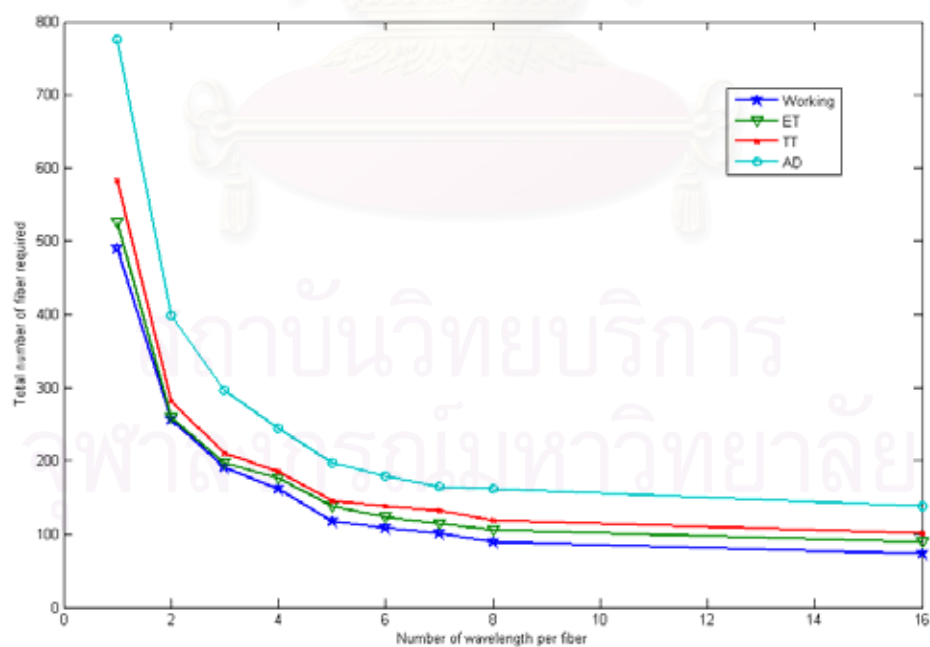
รูปที่ ก.19 โหนด10เสี้ยวหากรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



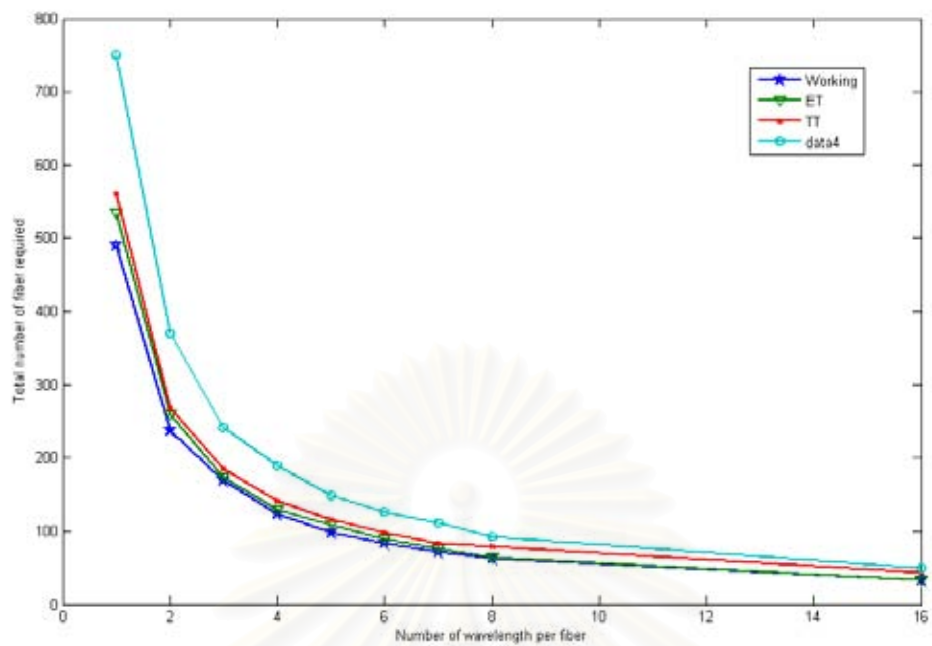
รูปที่ ก.20 โหนด10เสี้ยวหากรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



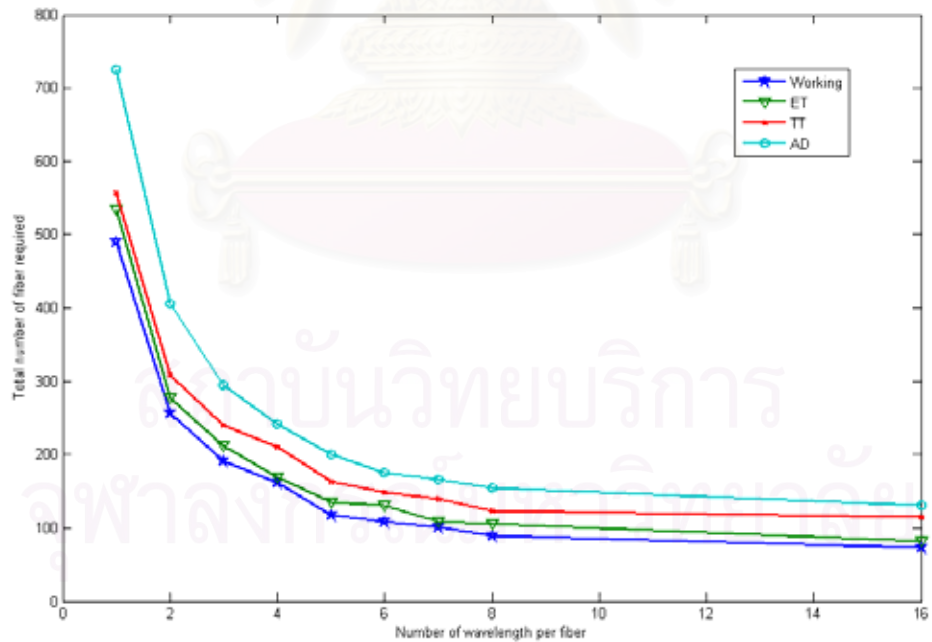
รูปที่ ก.21 โหนด11เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



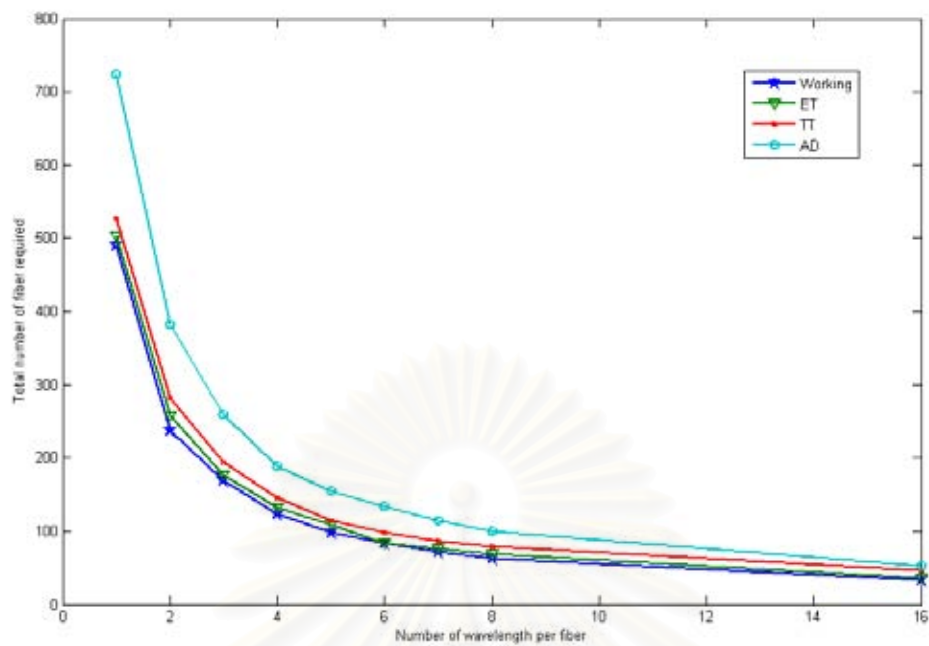
รูปที่ ก.22 โหนด11เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



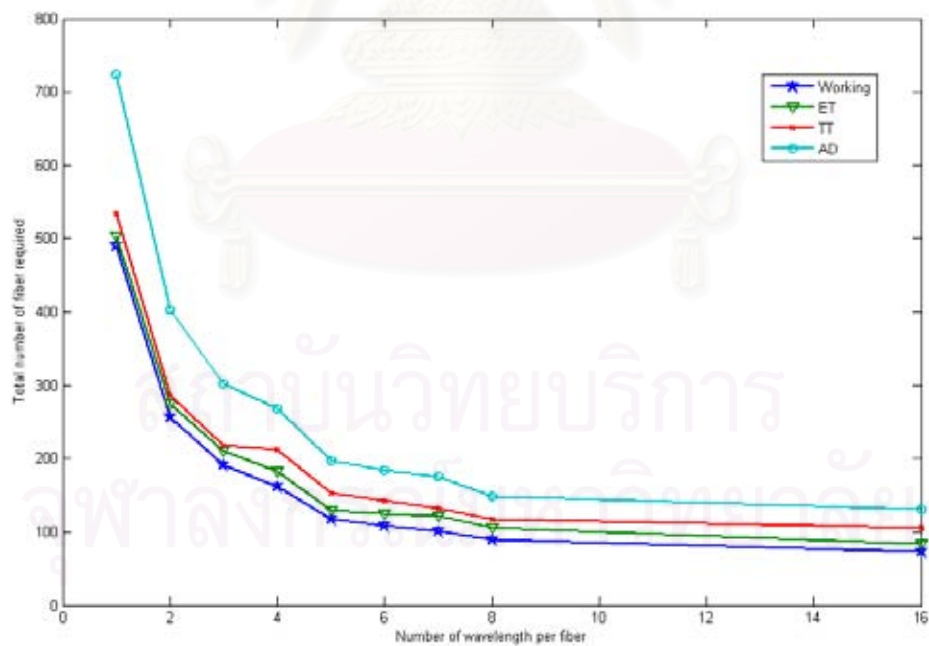
รูปที่ ก.23 โหนด 12 เสียหาย กรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



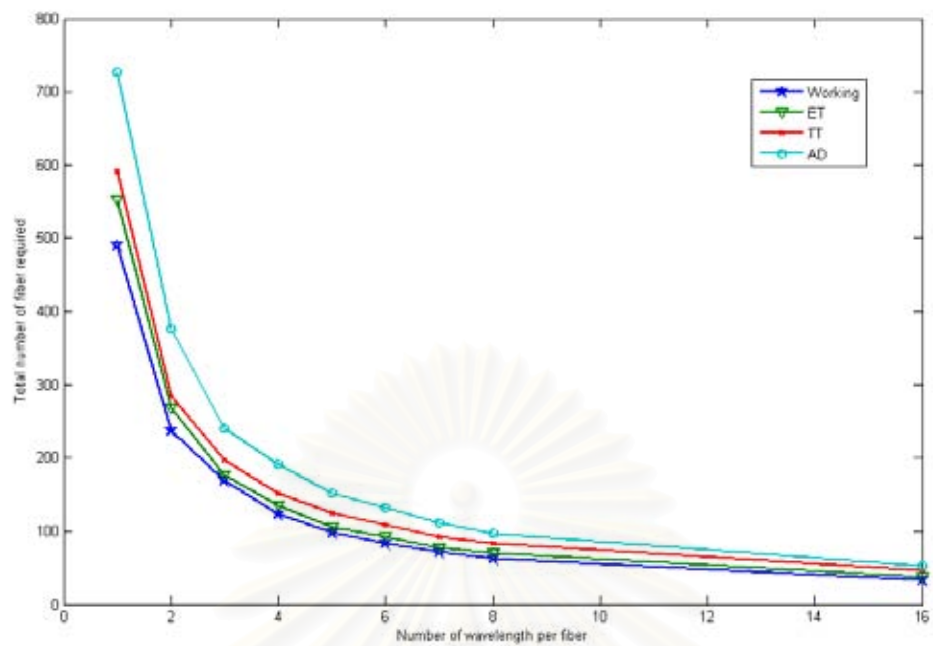
รูปที่ ก.24 โหนด 12 เสียหาย กรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



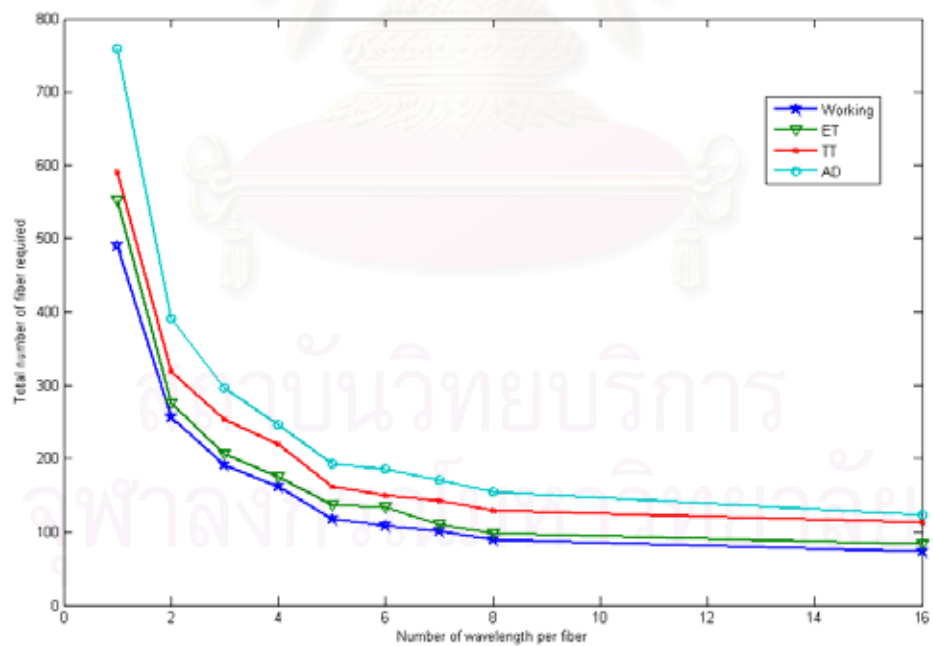
รูปที่ ก.25 โหนด 13 เสียหาย กรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ก.26 โหนด 13 เสียหาย กรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ก.27 โนค14เสียบายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ก.28 โนค14เสียบายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

ตารางที่ ก.1 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 1 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่1 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	551	613	702	551	576	666
2	266	324	360	279	320	373
3	179	203	238	216	242	299
4	144	154	174	180	213	234
5	103	125	139	138	169	180
6	92	104	121	135	159	175
7	80	88	105	114	153	162
8	70	80	96	99	125	142
16	38	45	51	94	112	117

ตารางที่ ก.2 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 2 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่2 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	522	587	726	522	569	693
2	268	297	377	279	307	373
3	175	201	241	219	246	291
4	133	153	186	183	196	241
5	106	123	142	130	152	186
6	91	103	122	125	130	176
7	76	86	101	118	120	162
8	68	79	93	105	113	141
16	36	44	49	98	107	120

ตารางที่ ก.3 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 3 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่3 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	539	582	736	539	594	762
2	286	294	393	278	302	416
3	183	200	260	207	232	321
4	138	151	204	170	191	262
5	109	118	157	129	151	199
6	90	106	134	121	150	176
7	77	88	115	115	135	165
8	67	79	104	105	129	149
16	35	45	52	99	105	130

ตารางที่ ก.4 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด4 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่4 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	551	673	724	551	676	683
2	284	345	363	289	343	362
3	187	228	231	224	269	284
4	146	171	183	177	226	235
5	113	141	142	145	185	198
6	95	114	118	140	161	181
7	77	96	101	120	157	161
8	71	87	89	107	134	143
16	36	46	47	90	112	125

ตารางที่ ก.5 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 5 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนดที่5 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	542	631	741	542	633	759
2	274	324	378	290	326	399
3	185	220	249	214	272	319
4	143	165	186	186	211	254
5	111	128	153	147	161	214
6	91	105	128	131	149	186
7	79	92	113	127	140	170
8	72	83	96	108	124	157
16	37	46	50	94	103	123

ตารางที่ ก.6 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนด 6 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อ โหนดที่6 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	614	744	784	614	758	803
2	302	369	390	311	404	404
3	201	252	261	244	302	296
4	155	194	203	204	243	246
5	125	153	164	151	193	202
6	103	124	134	146	186	181
7	90	111	119	124	170	175
8	78	102	108	111	151	157
16	38	51	53	97	131	138

ตารางที่ ก.7 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 7 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่7 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	533	583	640	533	563	611
2	267	271	323	276	396	362
3	173	188	230	224	211	251
4	128	139	166	175	183	222
5	103	109	124	132	138	172
6	84	96	108	130	130	164
7	75	86	94	115	123	147
8	67	75	85	106	110	130
16	36	45	48	84	94	120

ตารางที่ ก.8 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 8 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่8 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	580	735	770	580	683	723
2	291	167	382	305	382	409
3	196	244	253	222	263	296
4	144	175	186	200	255	265
5	116	140	142	141	186	197
6	95	122	125	139	174	180
7	85	107	111	128	162	174
8	75	92	97	109	140	161
16	39	51	53	97	132	128

ตารางที่ ก.9 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 9 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่9 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	558	653	704	558	646	695
2	279	329	363	283	339	375
3	183	222	235	221	241	288
4	137	171	183	183	217	245
5	110	131	139	146	171	200
6	92	111	117	139	160	173
7	78	94	98	115	153	169
8	68	82	83	107	131	145
16	36	46	49	89	123	126

ตารางที่ ก.10 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 10 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่10 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	582	684	799	582	719	781
2	297	367	400	300	403	418
3	201	249	268	220	286	312
4	150	180	199	185	238	266
5	117	149	160	157	193	202
6	104	125	134	149	183	193
7	87	110	115	122	163	175
8	77	96	100	112	159	165
16	39	51	53	93	127	147

ตารางที่ ก.11 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 11 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่11 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	525	540	743	525	584	776
2	250	274	383	259	281	398
3	172	183	257	198	211	297
4	133	141	200	177	185	245
5	106	118	163	138	145	197
6	85	98	135	124	138	179
7	75	84	116	115	133	165
8	71	77	106	105	119	162
16	37	45	54	89	101	138

ตารางที่ ก.12 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 12 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่12 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	535	561	751	535	557	725
2	260	269	371	278	309	406
3	174	186	242	212	240	295
4	129	141	190	170	210	242
5	108	116	148	135	164	200
6	89	99	126	131	148	175
7	76	84	111	108	140	167
8	65	79	92	105	124	155
16	34	44	50	82	114	131

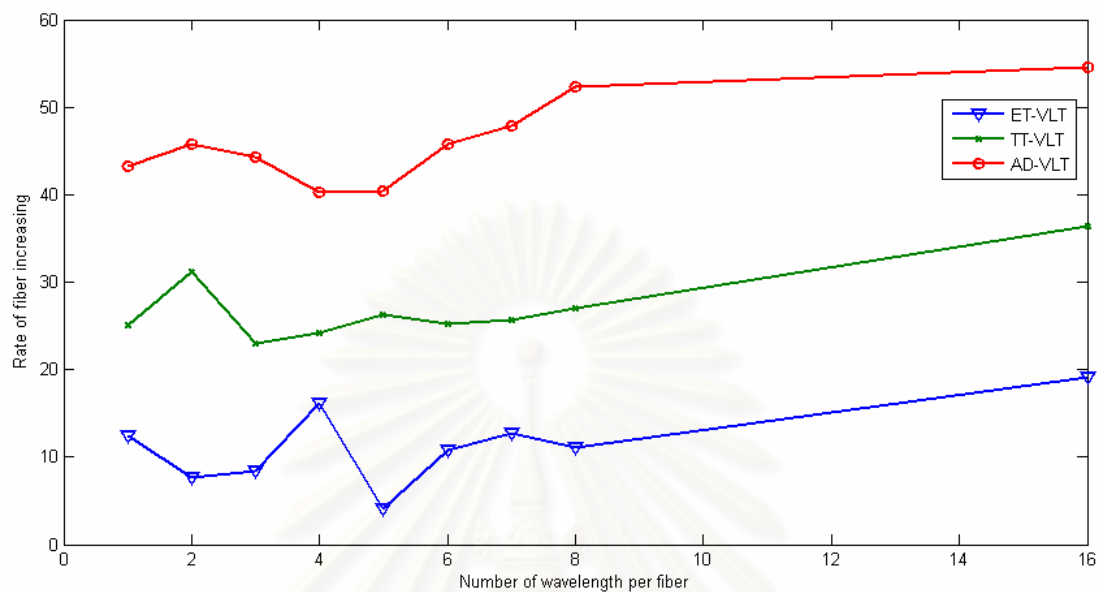
ตารางที่ ก.13 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 13 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่13 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	503	527	724	503	534	724
2	258	282	382	274	286	403
3	177	195	260	210	218	303
4	133	145	189	182	212	268
5	109	115	154	130	153	197
6	84	99	134	125	143	184
7	76	84	114	122	133	175
8	69	79	100	105	117	148
16	36	46	53	84	105	131

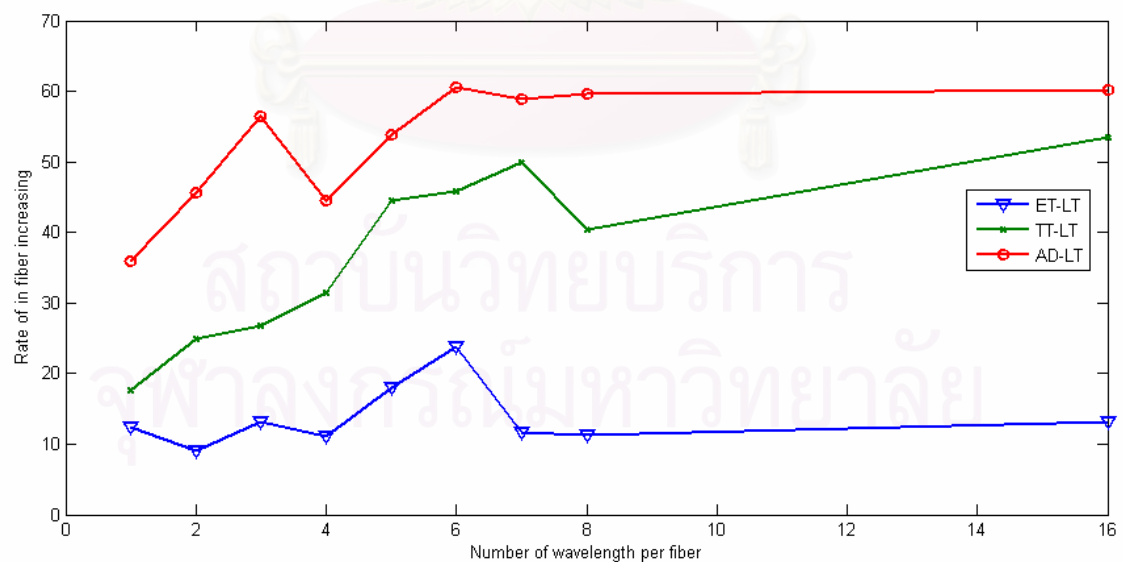
ตารางที่ ก.14 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 14 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่14 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	552	592	727	552	591	759
2	268	285	376	276	319	391
3	176	197	241	207	253	296
4	136	151	192	175	219	246
5	106	125	152	137	162	193
6	92	109	132	134	150	185
7	78	93	111	110	142	171
8	70	83	97	99	129	154
16	38	46	53	89	113	124

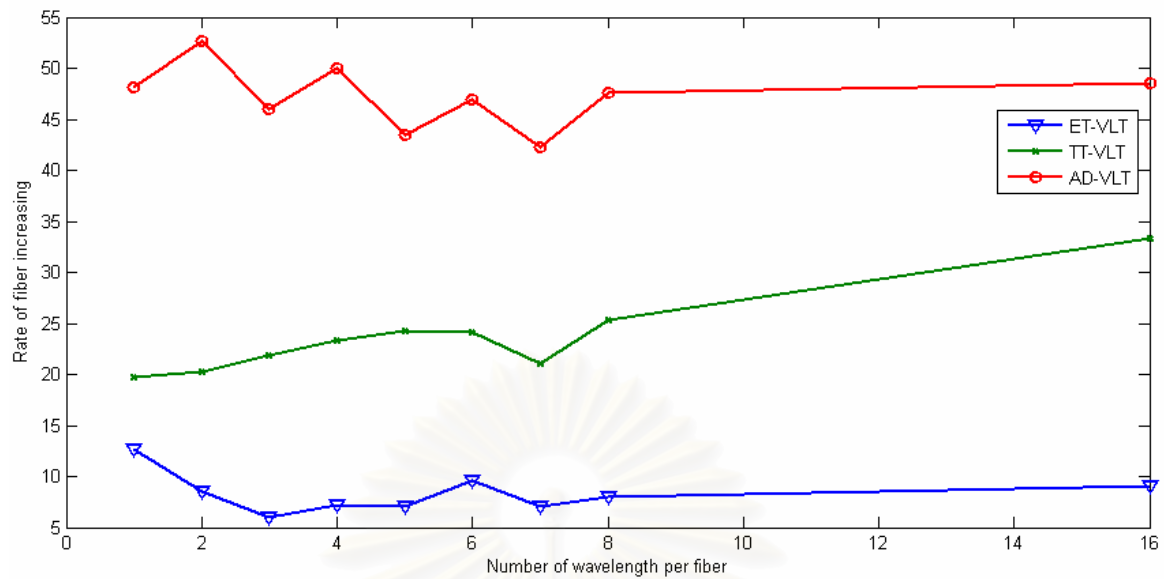
ภาคผนวก ข อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด



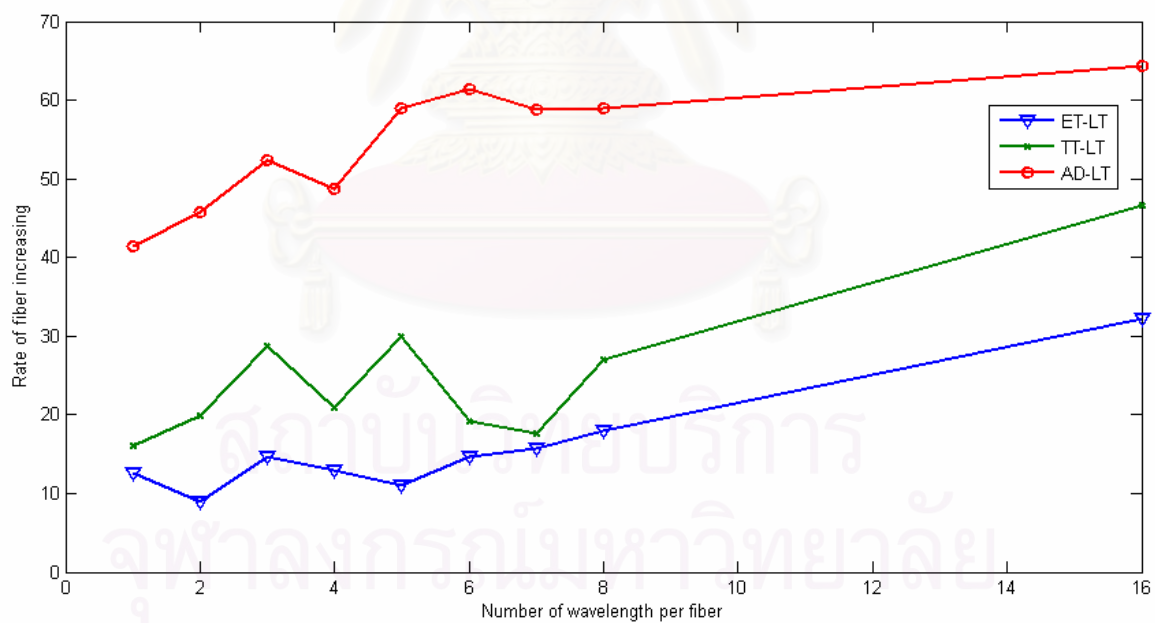
รูปที่ ข.1 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโหนดเสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



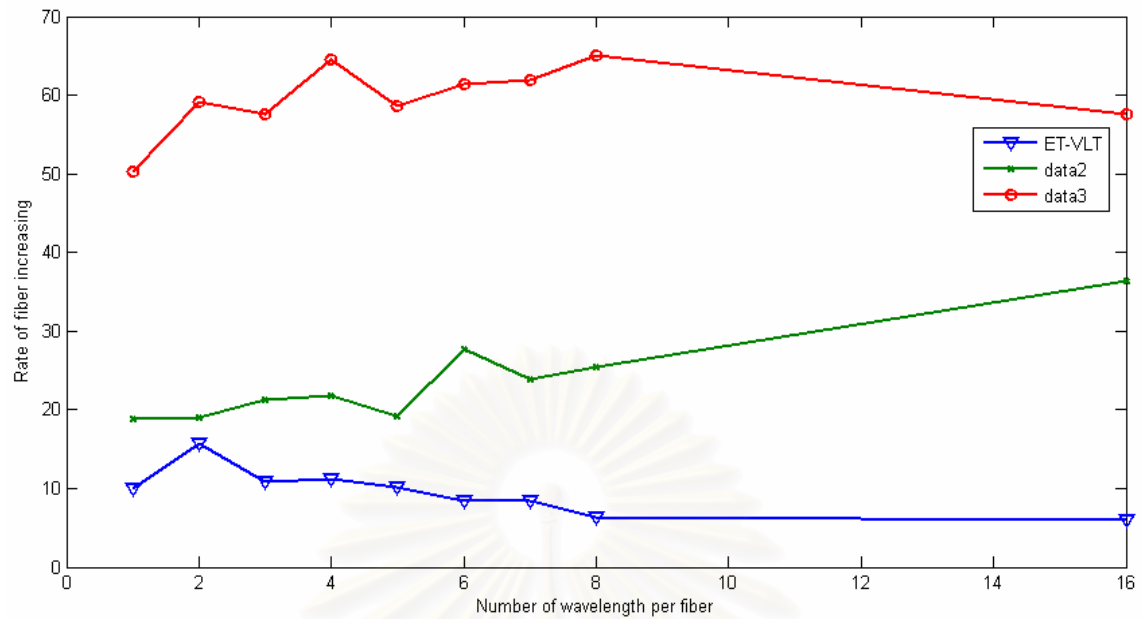
รูปที่ ข.2 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโหนดเสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



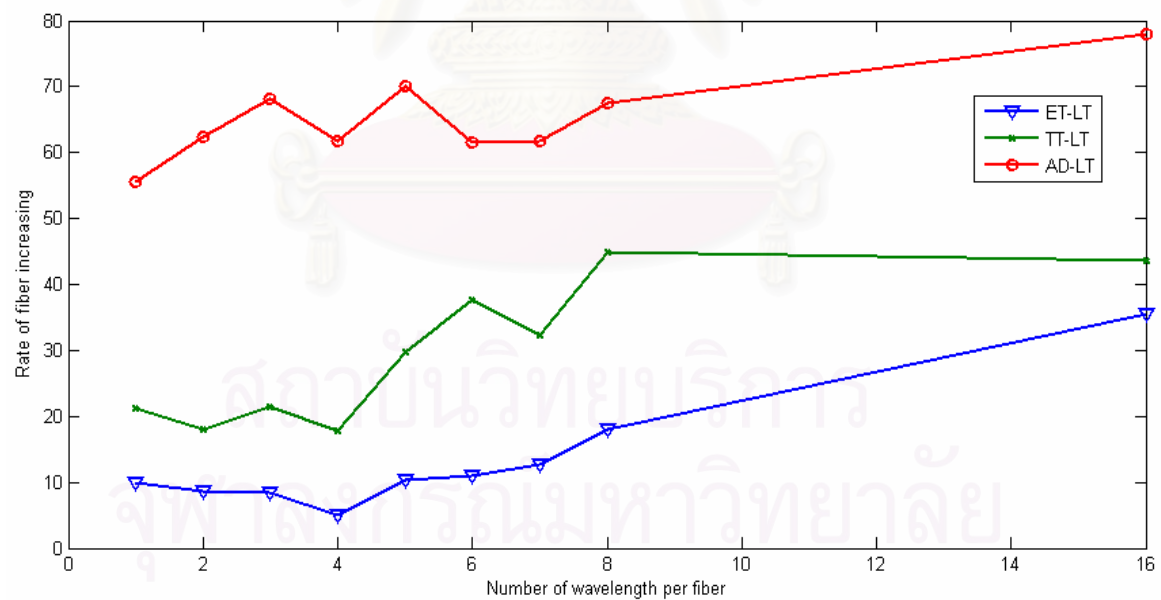
รูปที่ ข.3 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนค2เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



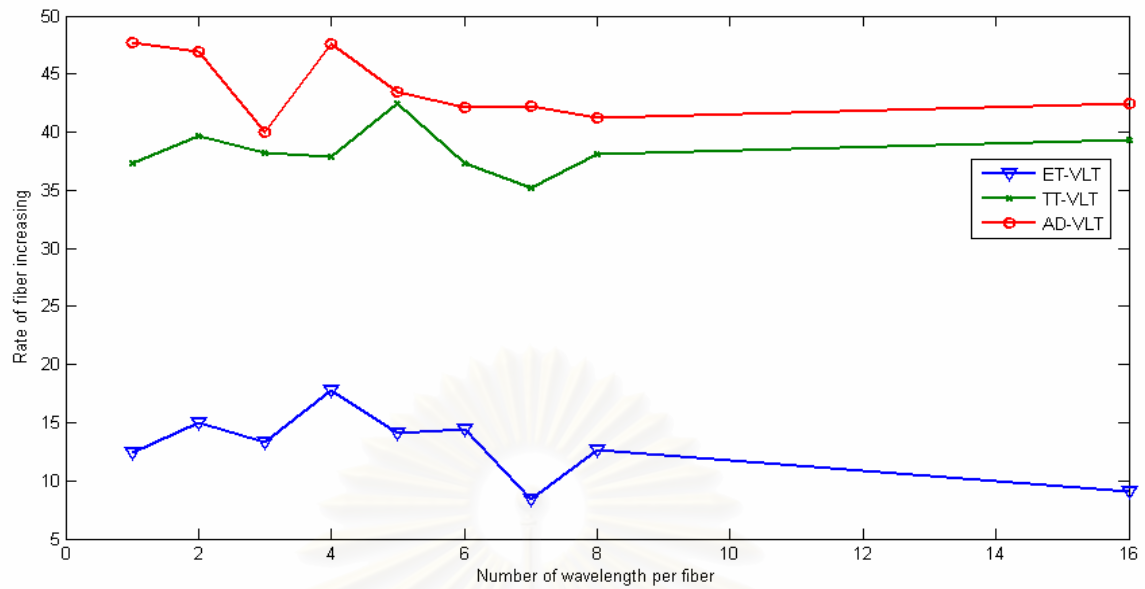
รูปที่ ข.4 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนค2เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



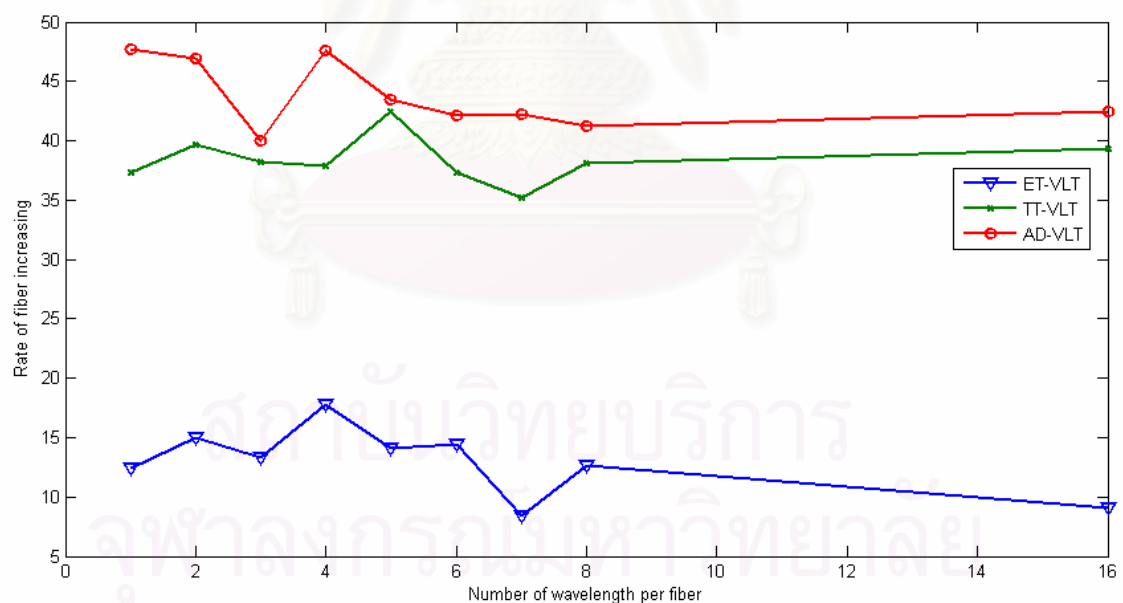
รูปที่ ข.5 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนค3เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



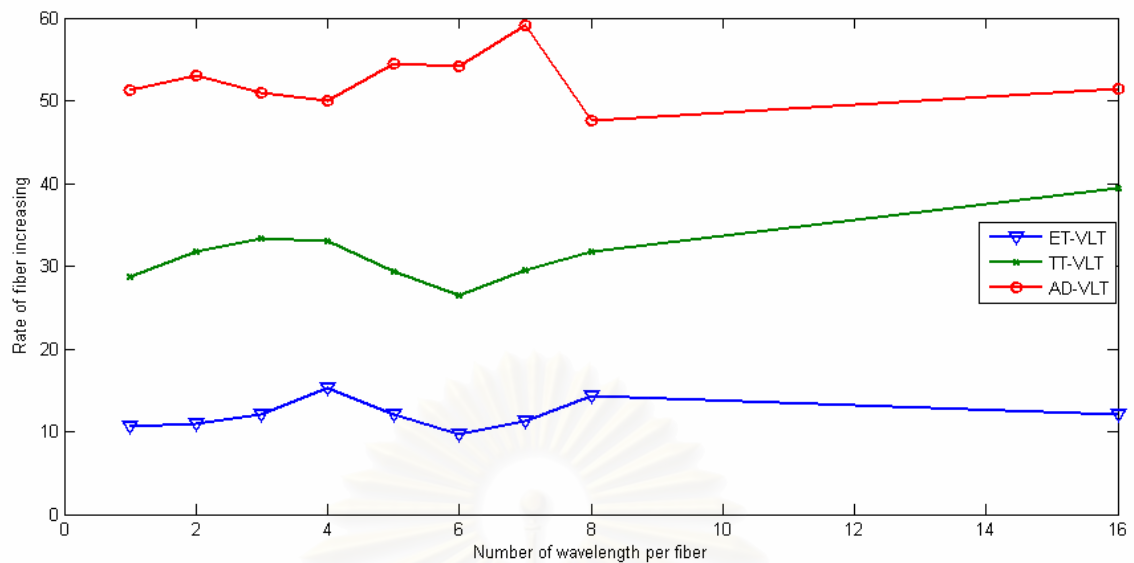
รูปที่ ข.6 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนค3เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



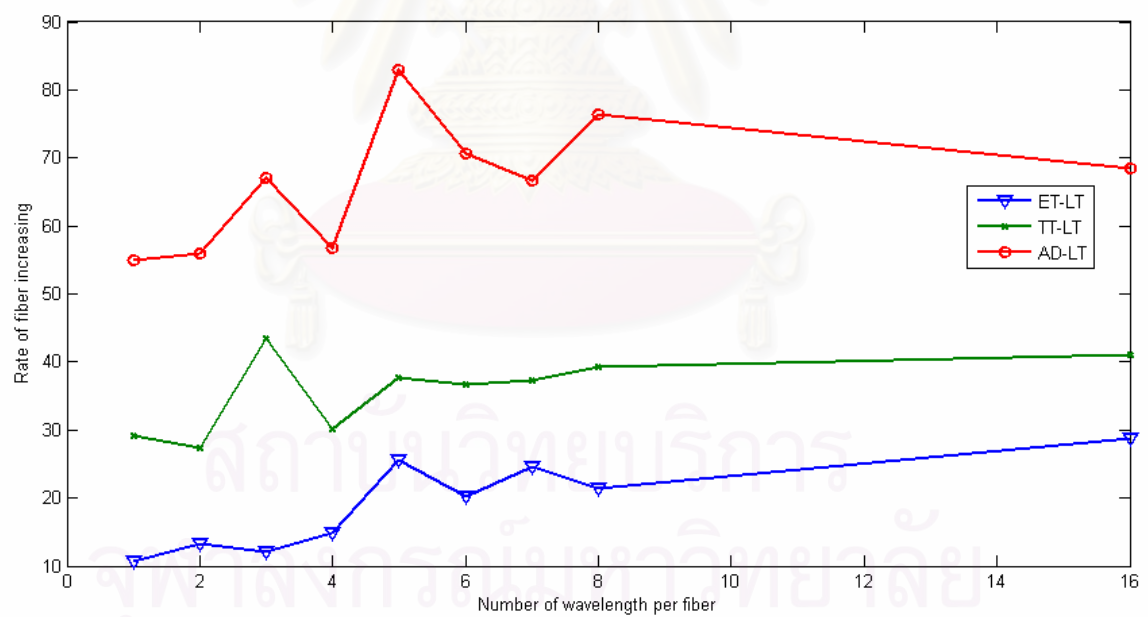
รูปที่ ข.7 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อ โนค4 เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



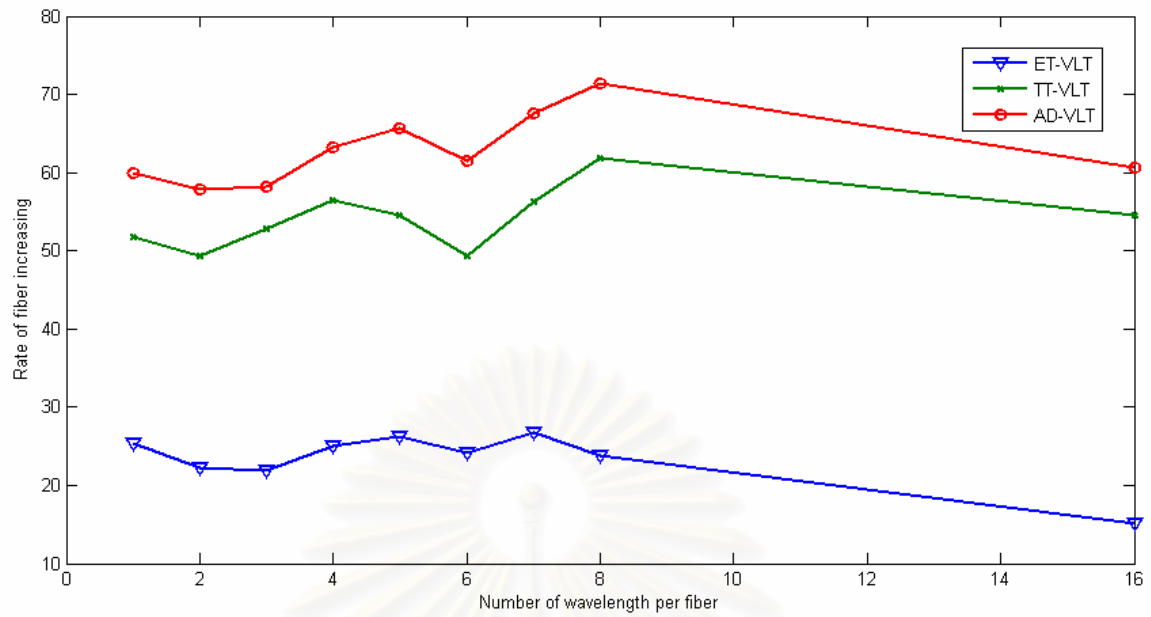
รูปที่ ข.8 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อ โนค4 เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



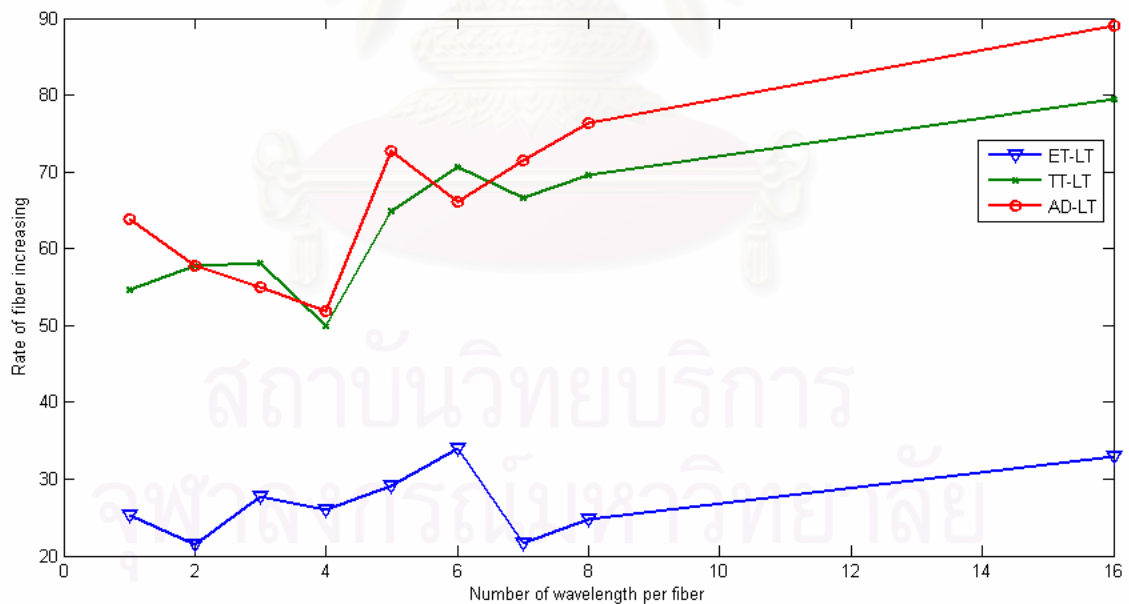
รูปที่ ข.9 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด5เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



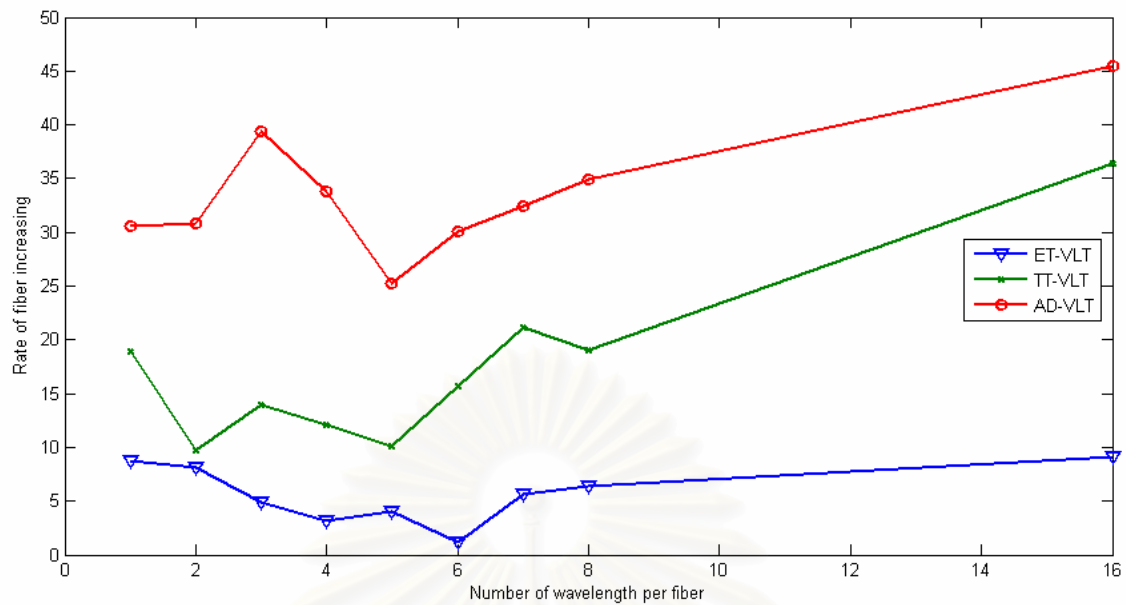
รูปที่ ข.10 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด5เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



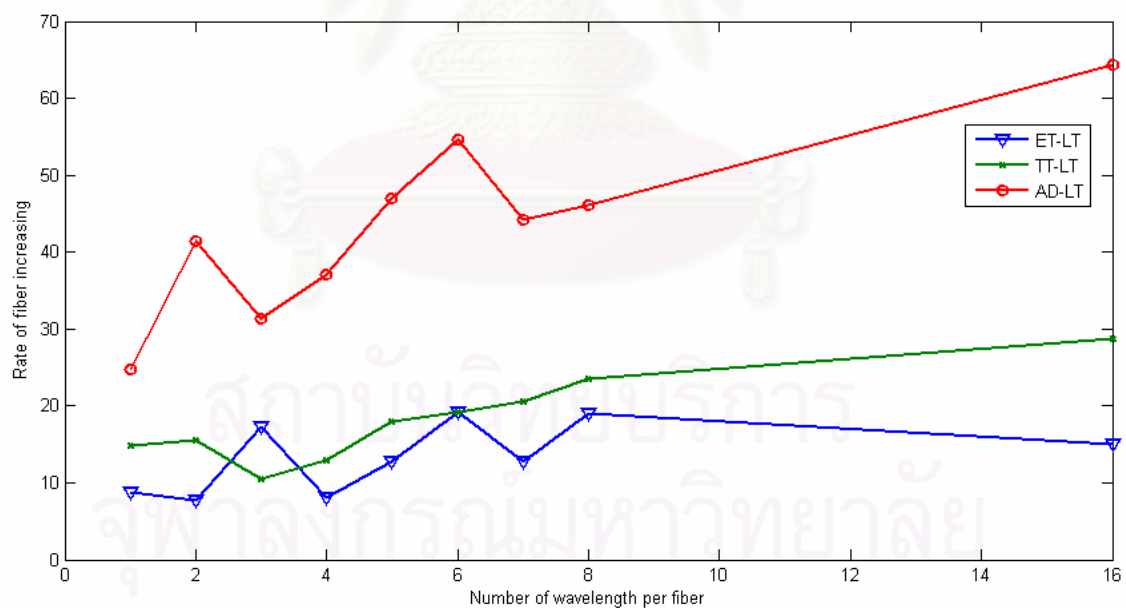
รูปที่ ข.11 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนดเสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



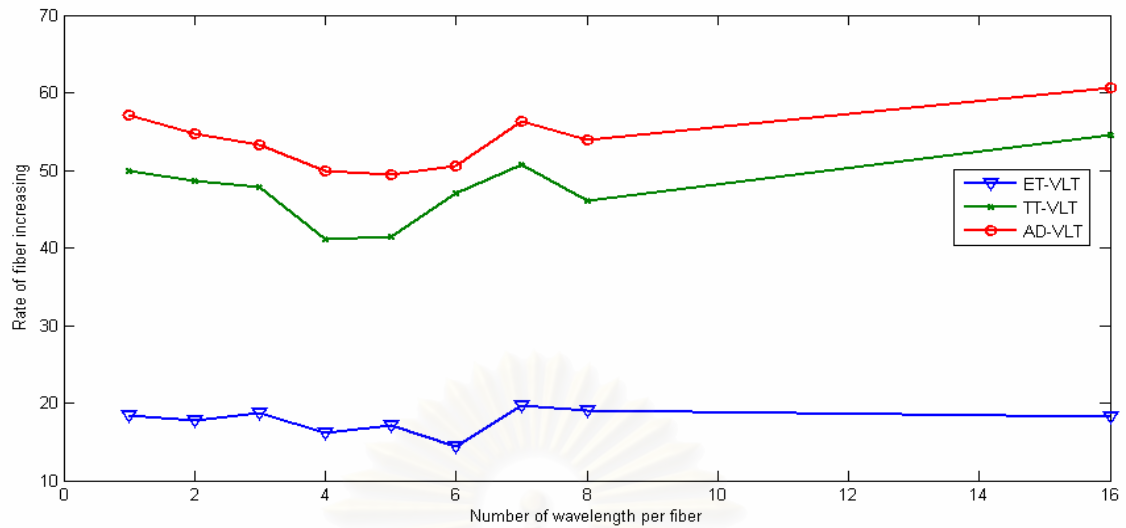
รูปที่ ข.12 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนดเสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



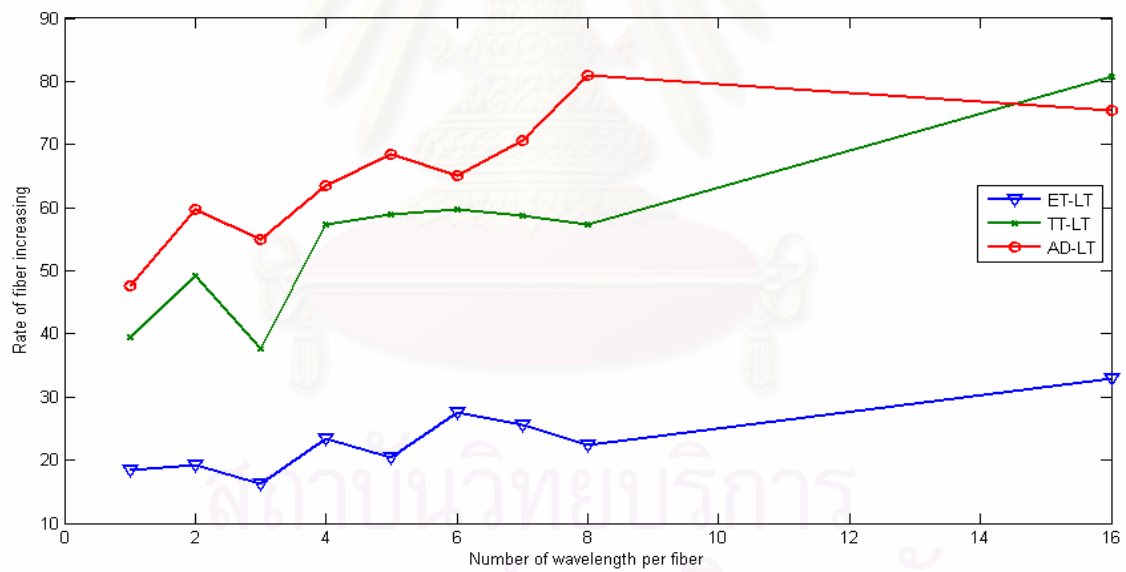
รูปที่ ข.13 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด7เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



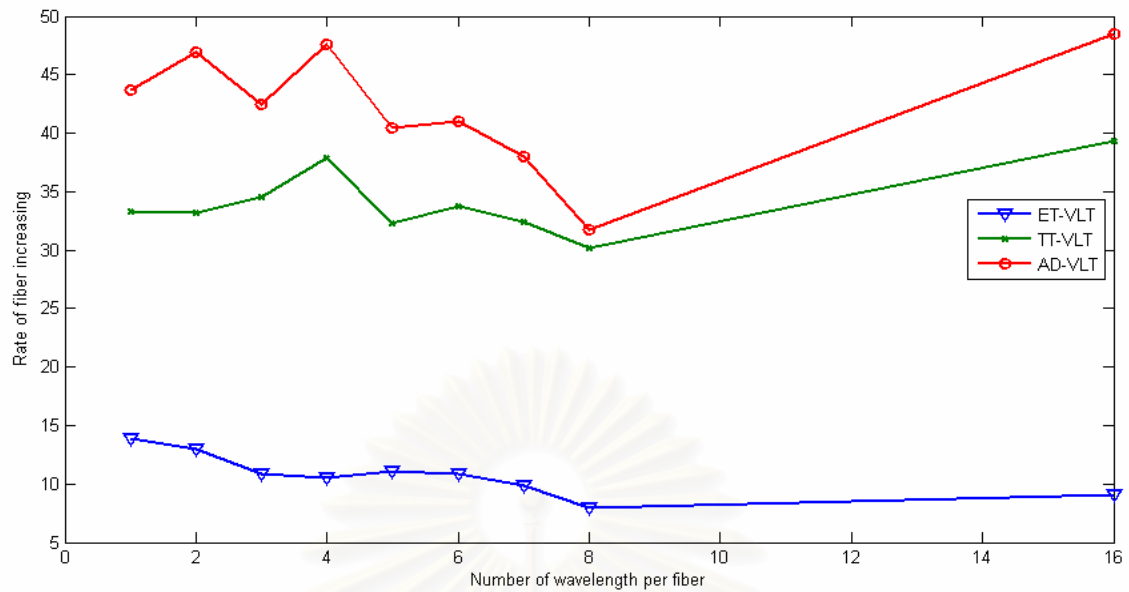
รูปที่ ข.14 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด7เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



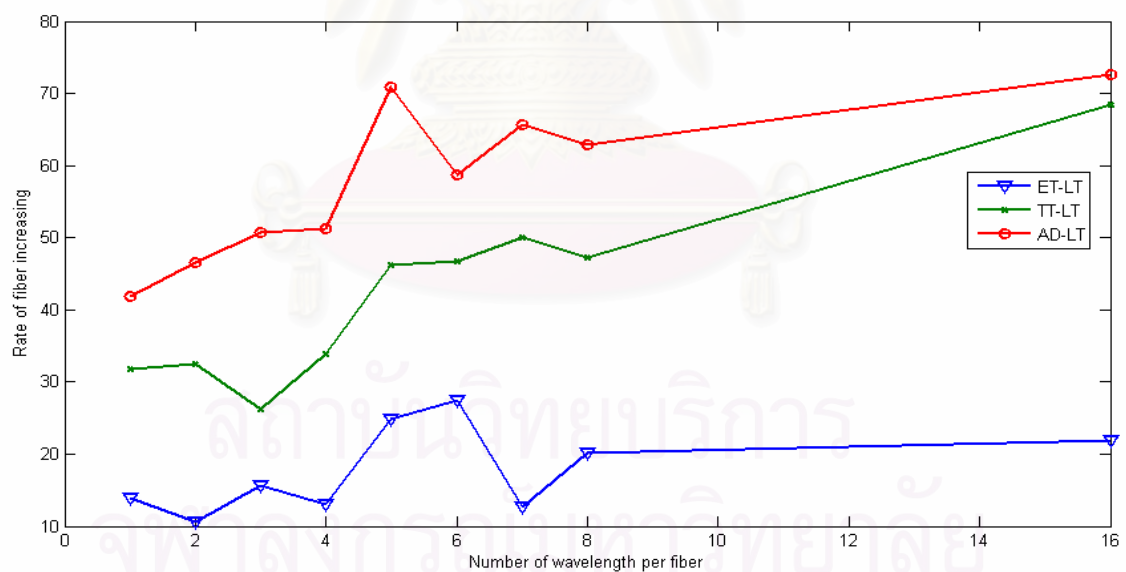
รูปที่ ข.15 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด8เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



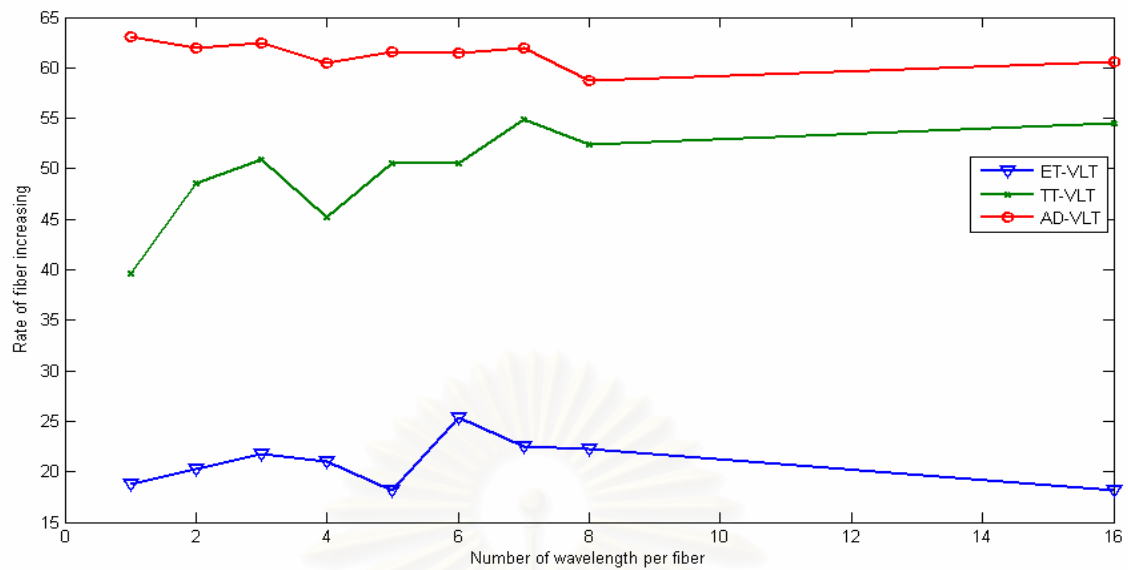
รูปที่ ข.16 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด8เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



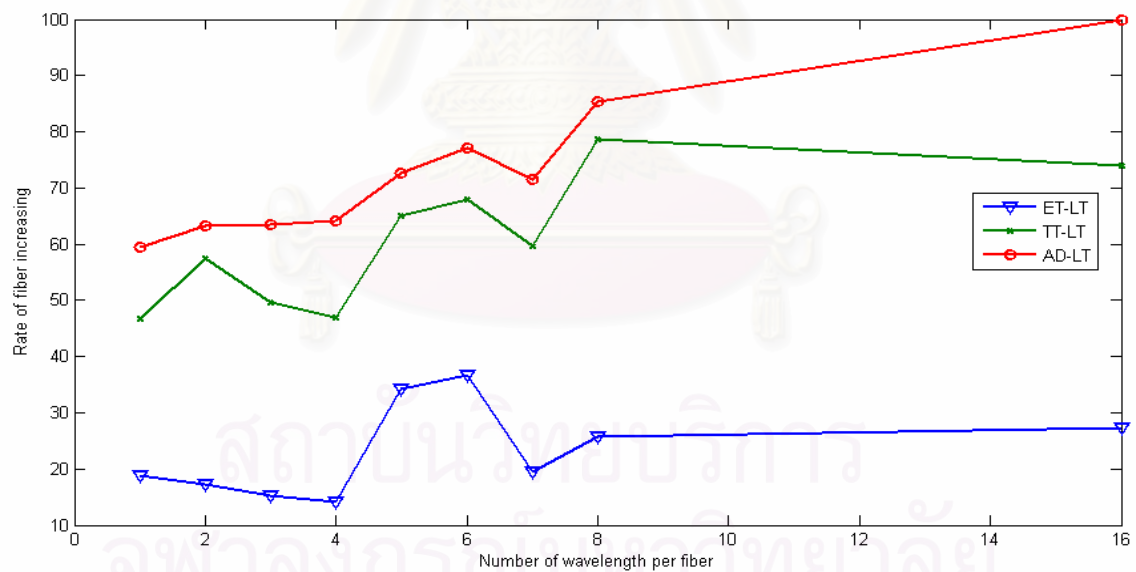
รูปที่ ข.17 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด9เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



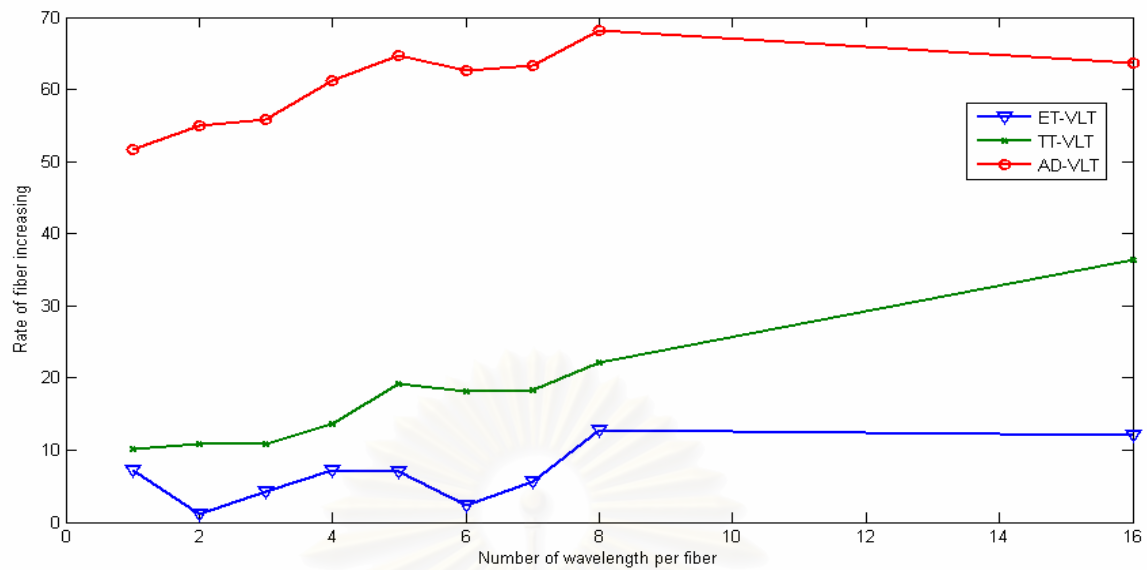
รูปที่ ข.18 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด9เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



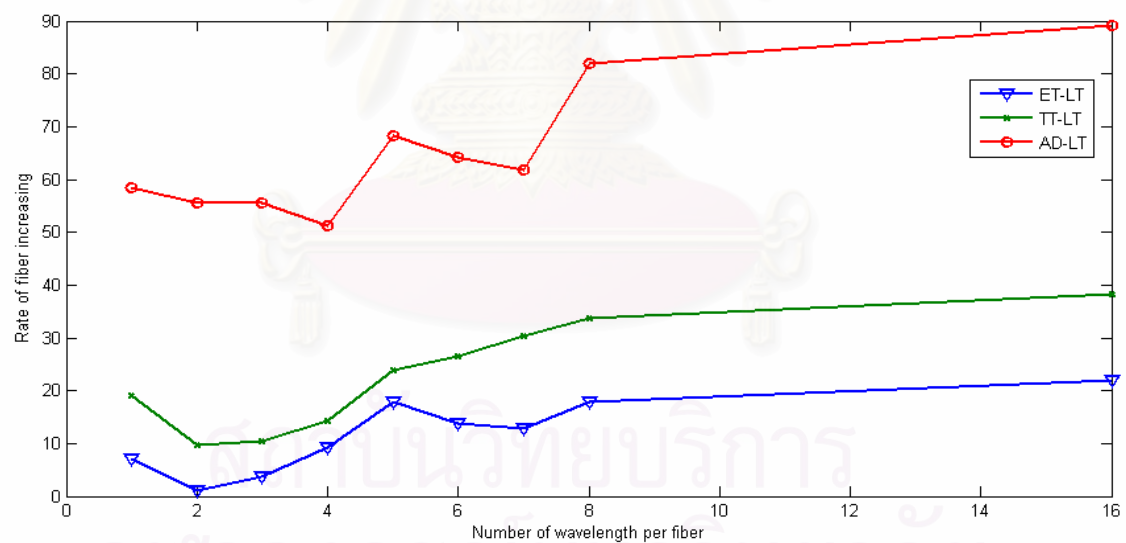
รูปที่ ข.19 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด10เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



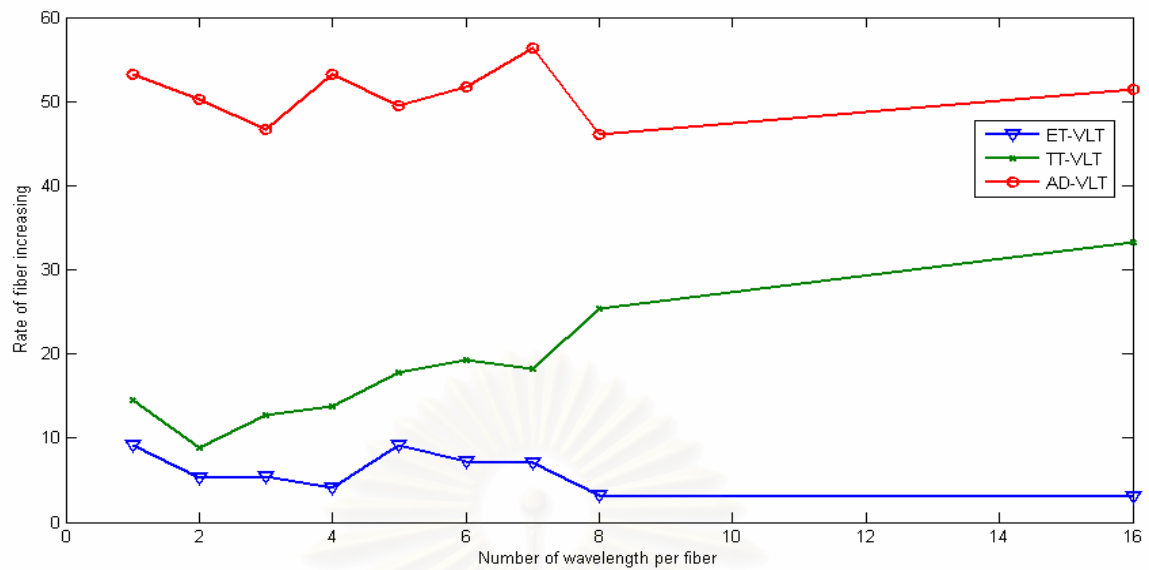
รูปที่ ข.20 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด10เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



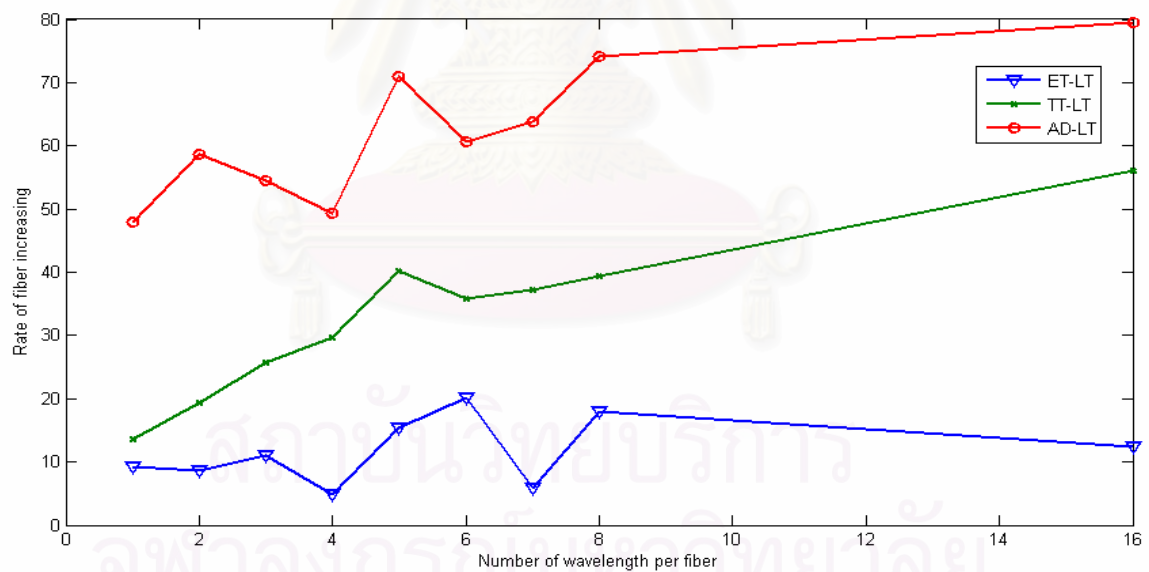
รูปที่ ข.21 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด11เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



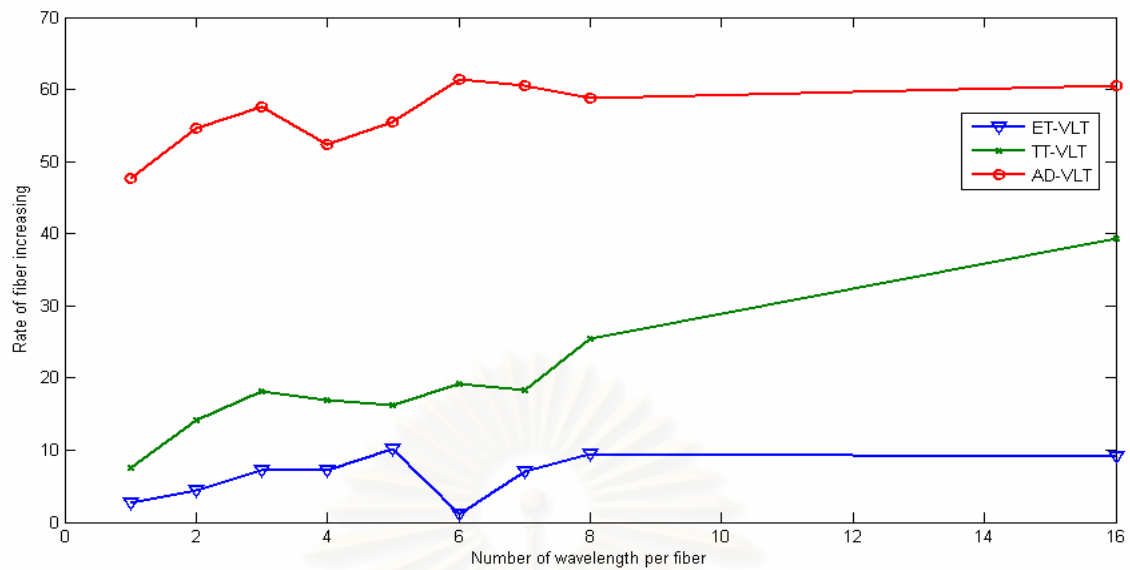
รูปที่ ข.22 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด11เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



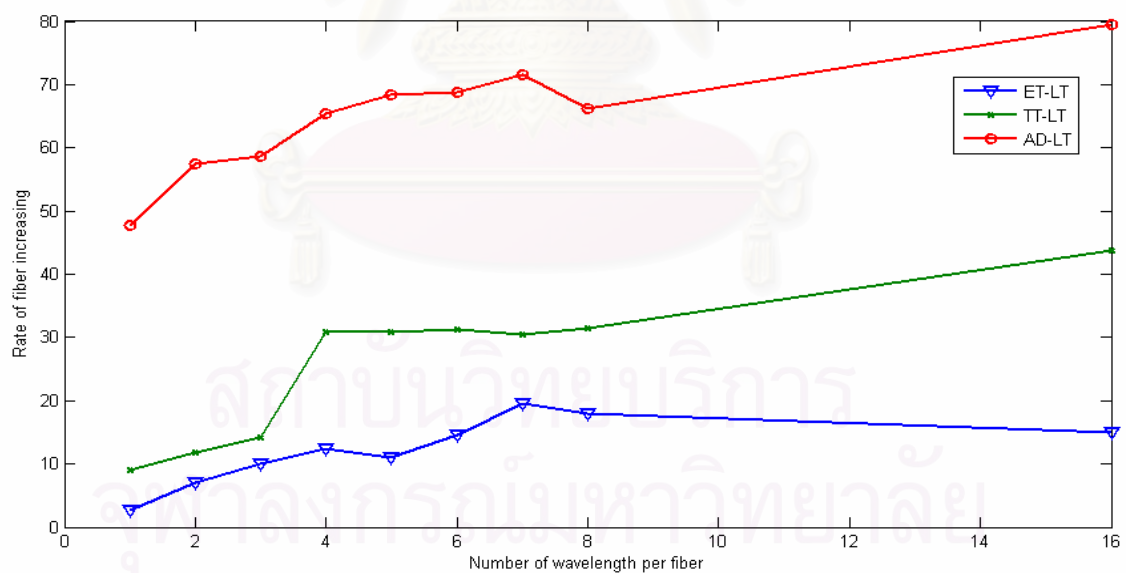
รูปที่ ข.23 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด12เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



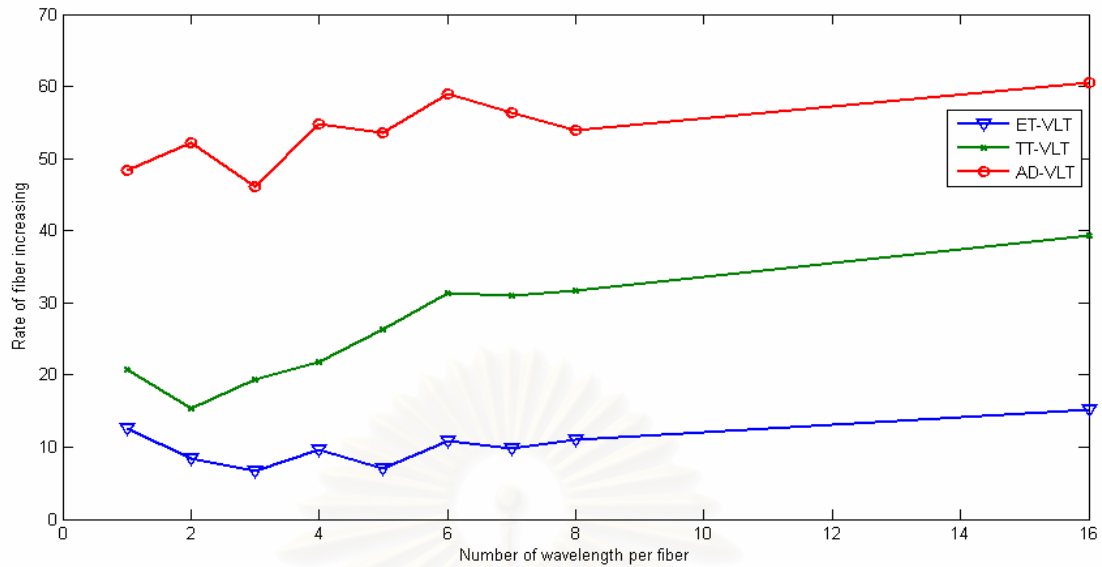
รูปที่ ข.24 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด12เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



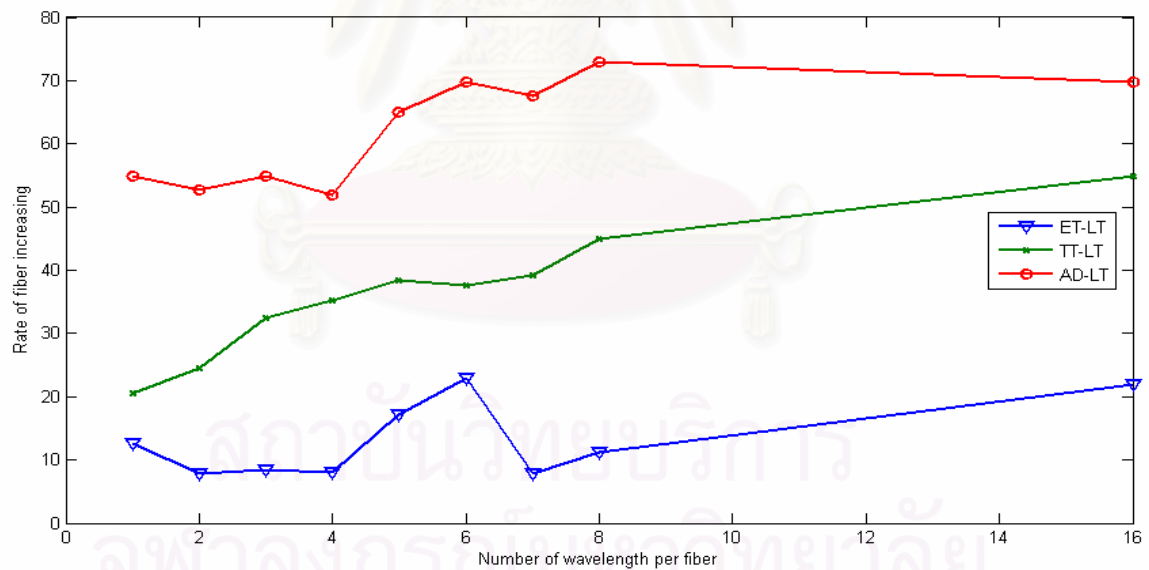
รูปที่ ข.25 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด13เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ข.26 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด13เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ข.27 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด14เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ข.28 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด14เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

ตารางที่ ข.1 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 1 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 1 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	12.44	25.10	43.26	12.44	17.25	35.92
2	7.69	31.17	45.75	8.98	25.00	45.70
3	8.48	23.03	44.24	13.09	26.70	56.54
4	16.13	24.19	40.32	11.11	31.48	44.44
5	4.04	26.26	40.40	17.95	44.44	53.85
6	10.84	25.30	45.78	23.85	45.87	60.55
7	12.68	25.71	47.89	11.76	50.00	58.82
8	11.11	26.98	52.38	11.23	40.44	59.55
16	15.15	36.36	54.54	13.25	53.42	60.27

ตารางที่ ข.2 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 2 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 2 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	12.65	19.79	48.16	12.65	16.12	41.43
2	8.50	20.24	52.63	8.99	19.92	45.70
3	6.06	21.81	46.06	14.66	28.80	52.35
4	7.26	23.39	50.00	12.96	20.99	48.76
5	7.07	24.24	43.43	11.11	29.91	58.97
6	9.64	24.10	46.99	14.68	19.27	61.46
7	7.04	21.12	42.25	15.69	17.65	58.82
8	7.94	25.39	47.61	17.98	26.97	58.93
16	9.09	33.33	48.48	34.24	46.58	64.38

ตารางที่ ข.3 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 3 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 3 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	10.00	18.77	50.20	10.00	21.22	55.51
2	15.79	19.03	59.11	8.59	17.97	62.50
3	10.91	21.21	57.57	8.37	21.46	68.06
4	11.29	21.77	64.52	4.93	17.90	61.73
5	10.10	19.19	58.59	10.25	29.66	70.09
6	8.43	27.71	61.45	11.01	37.61	61.47
7	8.45	23.94	61.97	12.75	32.55	61.76
8	6.35	25.40	65.08	17.98	44.94	67.42
16	6.06	36.36	57.58	35.62	43.84	78.08

ตารางที่ ข.4 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 4 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 4 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	12.45	37.34	47.76	12.45	37.96	39.38
2	14.98	39.68	46.96	12.89	33.95	41.40
3	13.33	38.18	40.00	17.28	40.84	48.69
4	17.74	37.90	47.58	9.25	39.51	45.06
5	14.14	42.42	43.43	13.93	58.11	69.23
6	14.46	37.35	42.17	28.44	47.71	66.06
7	8.45	35.21	42.25	17.65	53.92	57.84
8	12.70	38.90	41.27	20.22	50.56	60.67
16	9.09	39.39	42.42	27.40	53.42	71.23

ตารางที่ ข.5 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 5 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 5 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	10.61	28.78	51.22	10.61	29.18	54.90
2	10.93	31.74	53.04	13.28	27.34	55.86
3	12.12	33.33	50.90	12.04	42.41	67.02
4	15.32	33.06	50.00	14.82	30.24	56.79
5	12.12	29.29	54.54	25.64	37.61	82.90
6	9.64	26.51	54.22	20.18	36.70	70.64
7	11.27	29.58	59.16	24.51	37.26	66.67
8	14.29	31.75	47.62	21.35	39.33	76.40
16	12.12	39.39	51.51	28.76	41.10	68.49

ตารางที่ ข.6 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 6 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 6 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	25.31	51.84	60.00	25.31	54.69	63.88
2	22.27	49.39	57.90	21.48	57.81	57.81
3	21.82	52.73	58.18	27.75	58.11	54.97
4	25.00	56.45	63.71	25.93	50.00	51.85
5	26.26	54.54	65.65	29.06	64.96	72.64
6	24.10	49.40	61.45	33.94	70.64	66.66
7	26.76	56.34	67.61	21.57	66.67	71.57
8	23.81	61.90	71.43	24.72	69.66	76.40
16	15.15	54.54	60.61	32.88	79.45	89.04

ตารางที่ ข.7 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 7 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 7 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	8.76	18.98	30.61	8.76	14.90	24.69
2	7.09	9.72	30.77	7.81	15.03	41.40
3	4.84	13.94	39.39	17.28	10.47	31.41
4	3.22	12.10	33.87	8.02	12.96	37.04
5	4.04	10.10	25.25	12.82	17.95	47.01
6	1.20	15.66	30.12	19.27	19.27	54.71
7	5.63	21.13	32.39	12.75	20.59	44.12
8	6.35	19.05	34.92	19.10	23.60	46.06
16	9.09	36.36	45.45	15.07	28.77	64.38

ตารางที่ ข.8 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 8 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 8 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	18.37	50.00	57.14	18.37	39.39	47.55
2	17.81	48.58	54.66	19.14	49.22	59.77
3	18.79	47.87	53.33	16.23	37.70	54.97
4	16.13	41.13	50.00	23.46	57.41	63.58
5	17.17	41.41	43.43	20.51	58.97	68.37
6	14.46	46.99	50.60	27.53	59.63	65.14
7	19.72	50.70	56.34	25.49	58.82	70.59
8	19.05	46.03	53.97	22.47	53.30	80.90
16	18.18	54.54	60.60	32.88	80.82	75.34

ตารางที่ ข.9 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 9 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 9 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	13.88	33.27	43.67	13.88	31.84	41.84
2	12.96	33.20	46.96	10.55	32.42	46.48
3	10.91	34.55	42.42	15.71	26.18	50.79
4	10.48	37.90	47.58	12.96	33.95	51.23
5	11.11	32.32	40.40	24.78	46.15	70.94
6	10.84	33.73	40.96	27.52	46.79	58.71
7	9.86	32.39	38.03	12.75	50.00	65.67
8	7.94	30.16	31.75	20.22	47.19	62.92
16	9.09	39.39	48.48	21.42	68.49	72.60

ตารางที่ ข.10 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 10 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 10 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	18.78	39.59	63.06	18.78	46.73	59.39
2	20.24	48.58	61.94	17.19	57.42	63.28
3	21.82	50.91	62.42	15.18	49.74	63.35
4	20.97	45.16	60.48	14.20	46.91	64.20
5	18.18	50.51	61.62	34.19	64.96	72.65
6	25.36	50.60	61.45	16.70	67.89	77.06
7	22.54	54.93	61.97	19.60	59.80	71.57
8	22.22	52.38	58.73	25.84	78.65	85.39
16	18.18	54.54	60.61	27.40	73.97	101.36

ตารางที่ ข.11 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 11 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 11 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	7.14	10.20	51.63	7.14	19.18	58.37
2	1.21	10.93	55.06	1.17	9.77	55.47
3	4.24	10.91	55.76	3.66	10.47	55.50
4	7.26	13.71	61.29	9.26	14.19	51.23
5	7.07	19.19	64.64	17.94	23.93	68.37
6	2.41	18.07	62.65	13.76	26.61	64.22
7	5.63	18.31	63.38	12.75	30.39	61.75
8	12.70	22.22	68.25	17.98	33.71	82.02
16	12.12	36.36	63.63	21.92	38.36	89.04

ตารางที่ ข.12 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 12 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 12 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	9.18	14.49	53.27	9.18	13.67	47.96
2	5.26	8.91	50.20	8.59	19.31	58.59
3	5.45	12.73	46.67	11.00	25.65	54.45
4	4.03	13.71	53.23	4.94	29.63	49.38
5	9.09	17.17	49.50	15.39	40.17	70.94
6	7.22	19.28	51.81	20.18	35.78	60.55
7	7.04	18.31	56.34	5.88	37.26	63.73
8	3.17	25.40	46.03	17.98	39.33	74.16
16	3.03	33.33	51.51	12.33	56.16	79.45

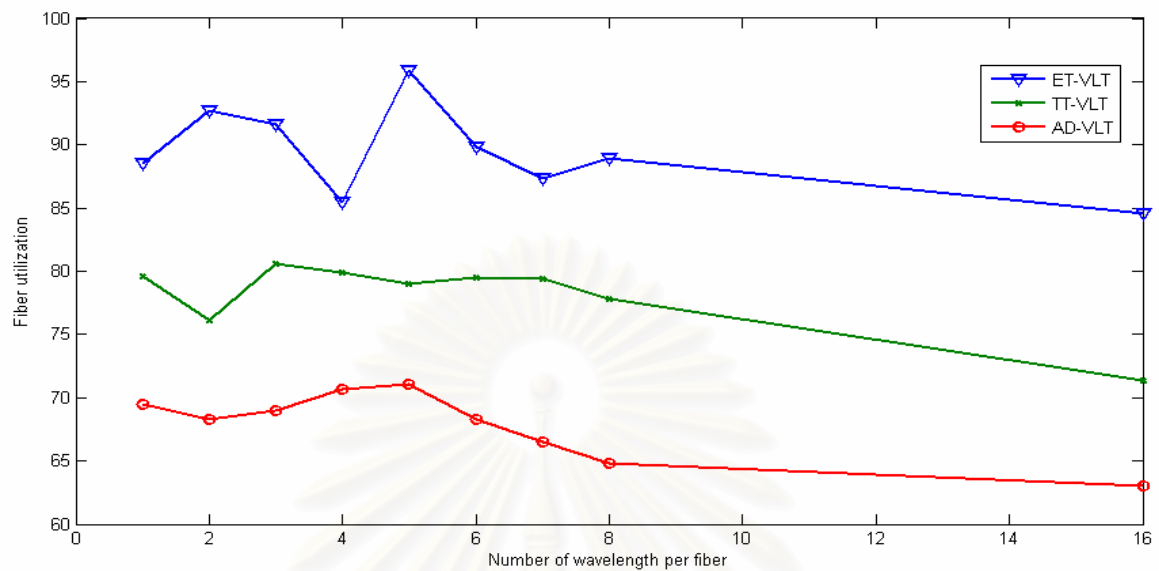
ตารางที่ ข.13 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 13 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 13 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	2.65	7.55	4.75	2.65	8.98	47.76
2	4.45	14.17	54.65	7.03	11.72	57.42
3	7.27	18.18	57.58	9.95	14.14	58.65
4	7.26	16.94	52.42	12.35	30.87	65.43
5	10.10	16.16	55.56	11.11	30.77	68.38
6	1.20	19.28	61.44	14.68	31.19	68.81
7	7.04	18.31	60.56	19.61	30.39	71.57
8	9.52	25.40	58.73	17.98	31.46	66.30
16	9.09	39.39	60.61	15.07	43.84	79.45

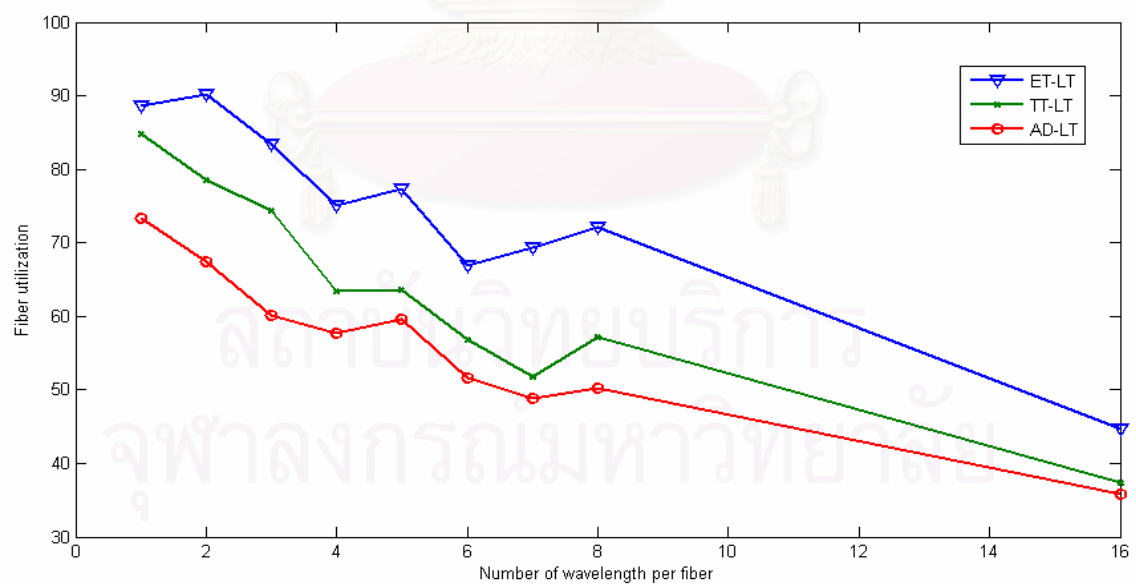
ตารางที่ ข.14 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 14 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 14 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	12.65	20.82	48.75	12.65	20.61	54.90
2	8.50	15.38	52.23	7.81	24.61	52.73
3	6.67	19.40	46.06	8.38	32.46	54.97
4	9.68	21.77	54.84	8.02	35.19	51.85
5	7.07	26.26	53.53	17.09	38.46	64.96
6	10.84	31.33	59.04	22.94	35.19	69.72
7	9.86	30.99	56.34	7.84	39.21	67.65
8	11.11	31.75	53.97	11.24	44.94	73.03
16	15.15	39.39	60.61	21.92	54.79	69.86

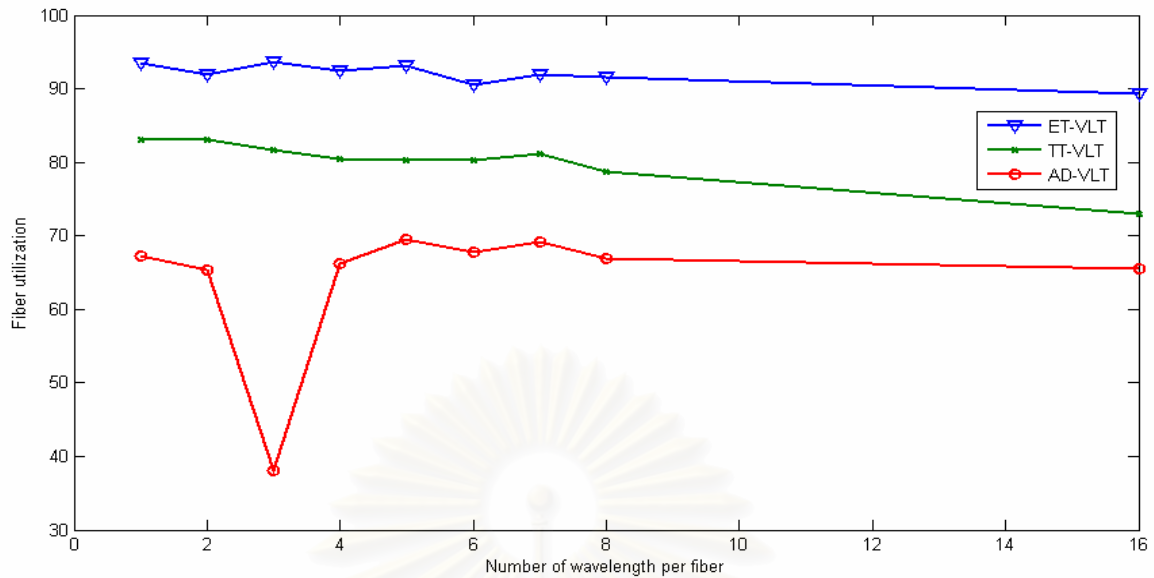
ภาคผนวก ค ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโหนด



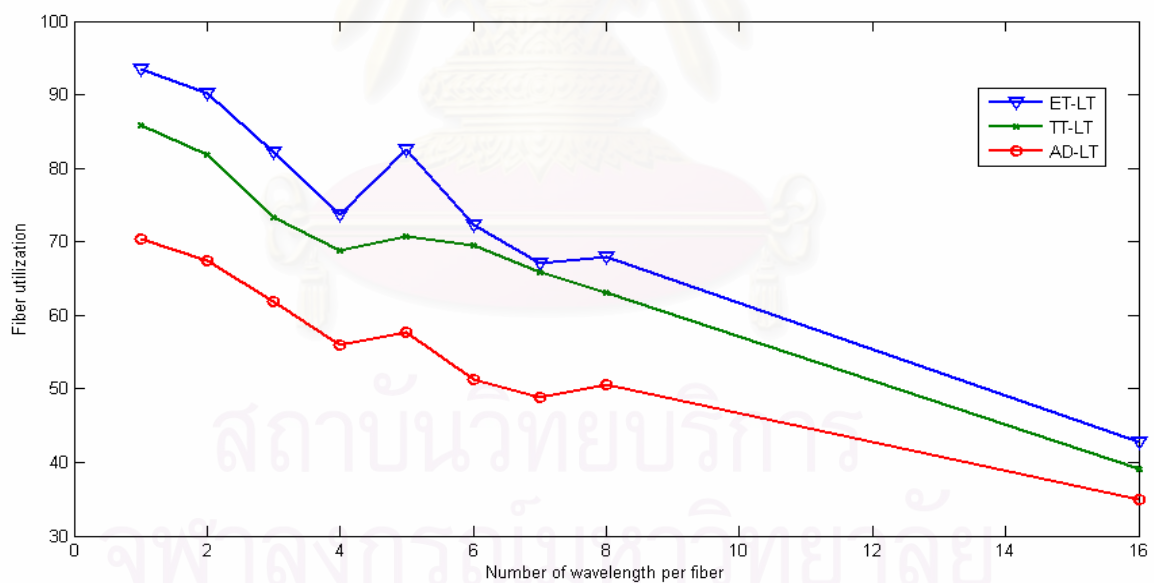
รูปที่ ค.1 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหนดเสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



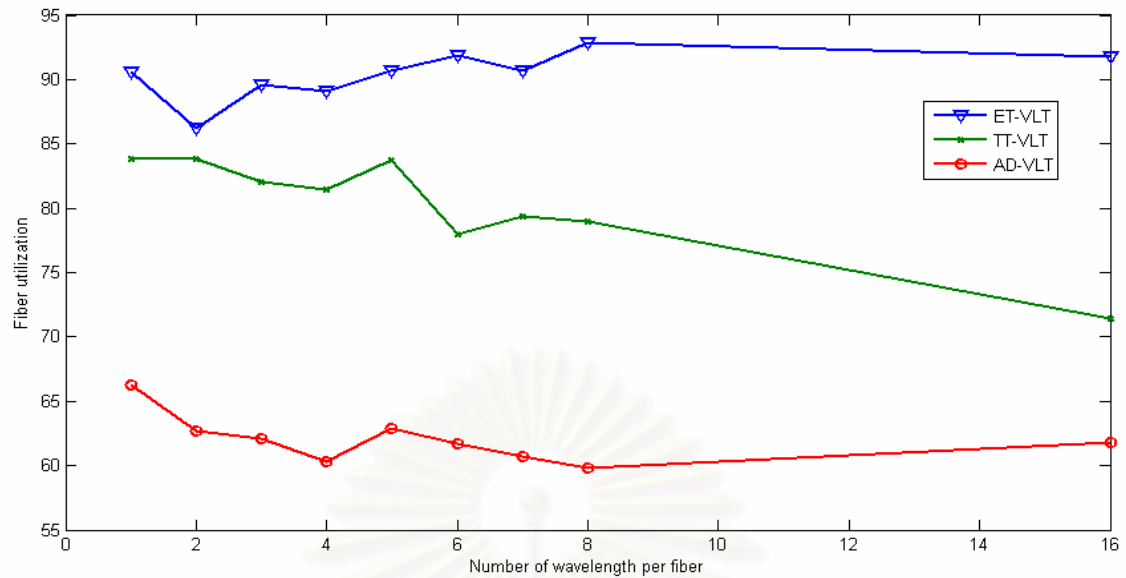
รูปที่ ค.2 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหนดเสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



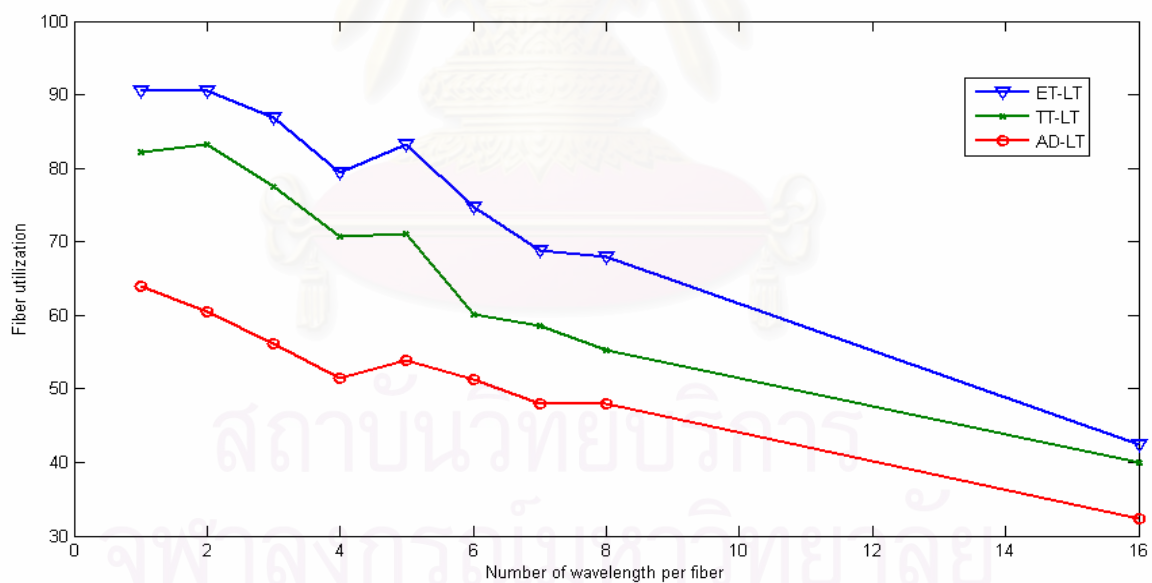
รูปที่ ก.3 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนค2เสียหายกรณี โครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



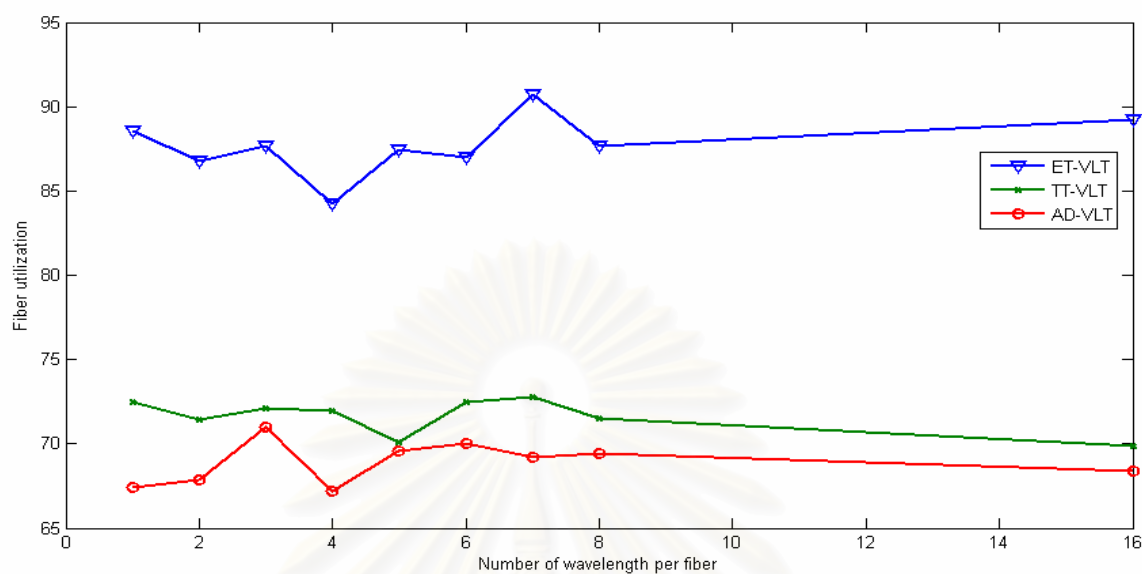
รูปที่ ก.4 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนค2เสียหายกรณี โครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



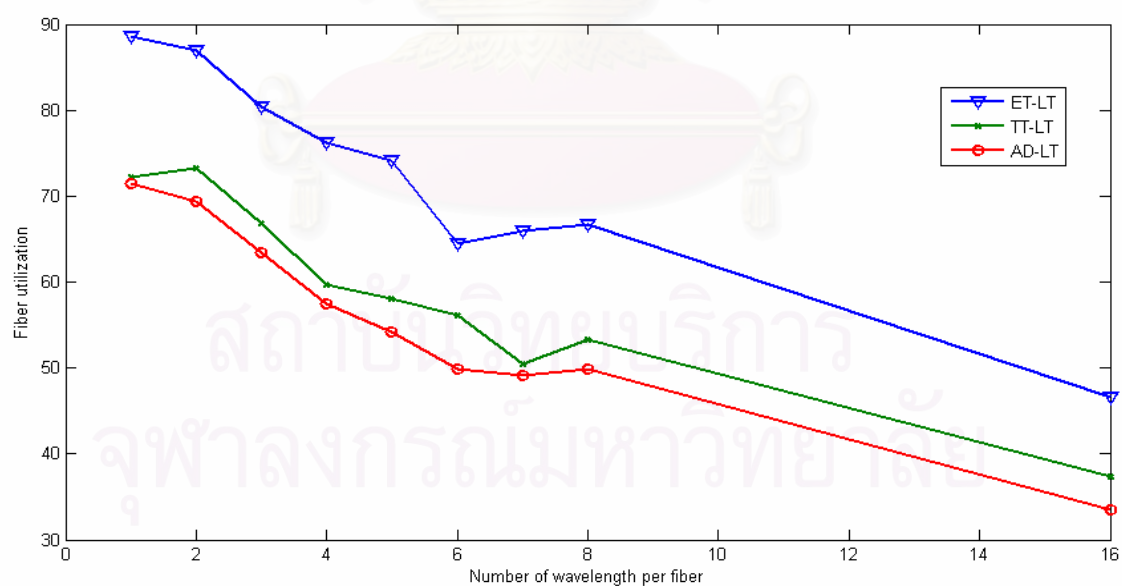
รูปที่ ค.5 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด3เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



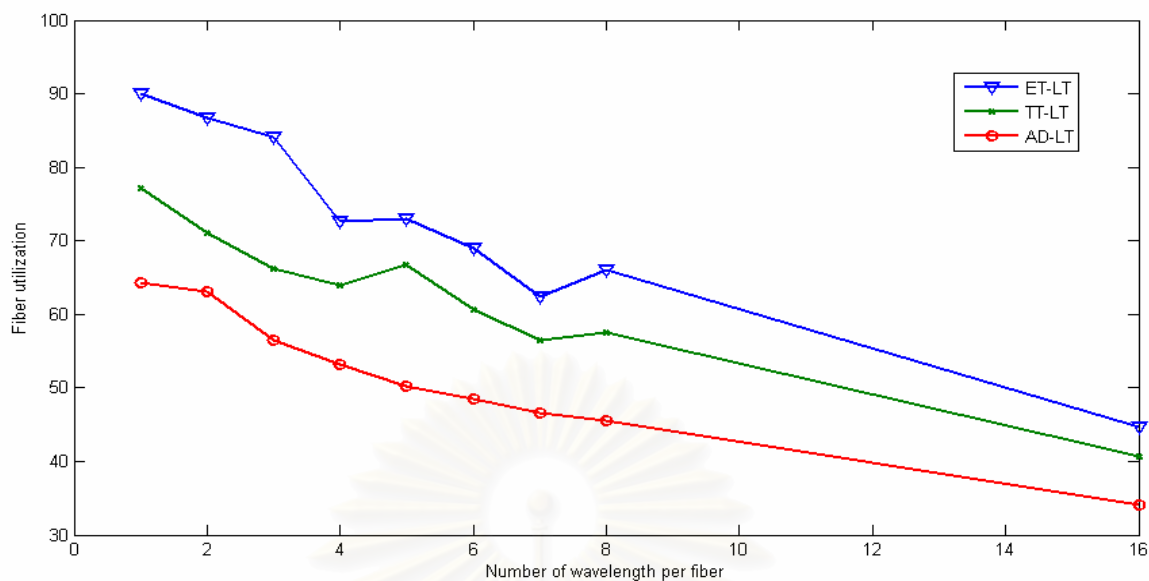
รูปที่ ค.6 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด3เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



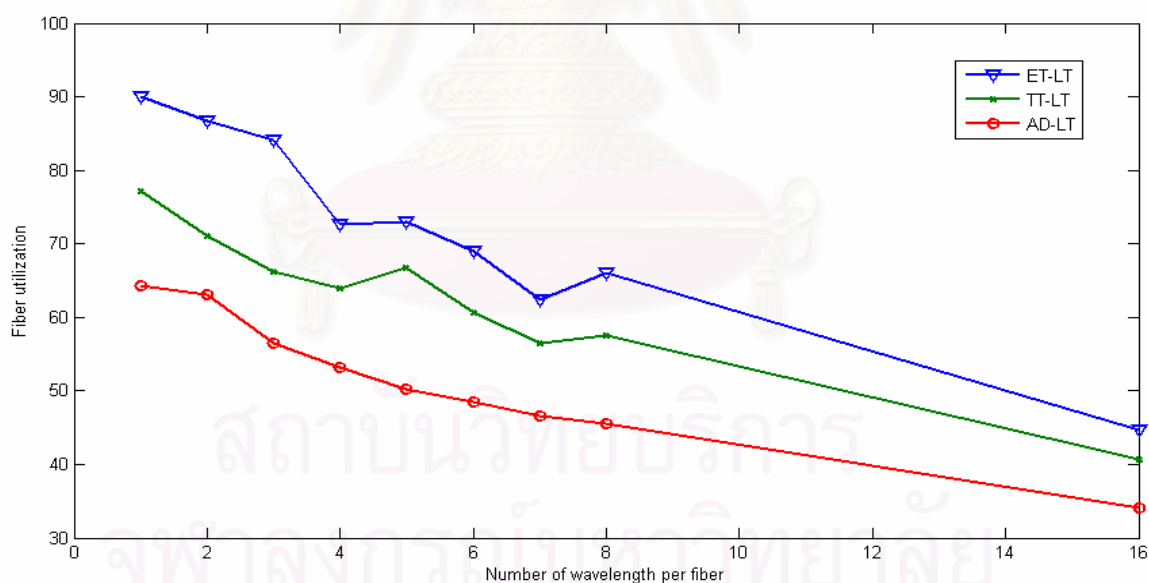
รูปที่ ค.7 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด4เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



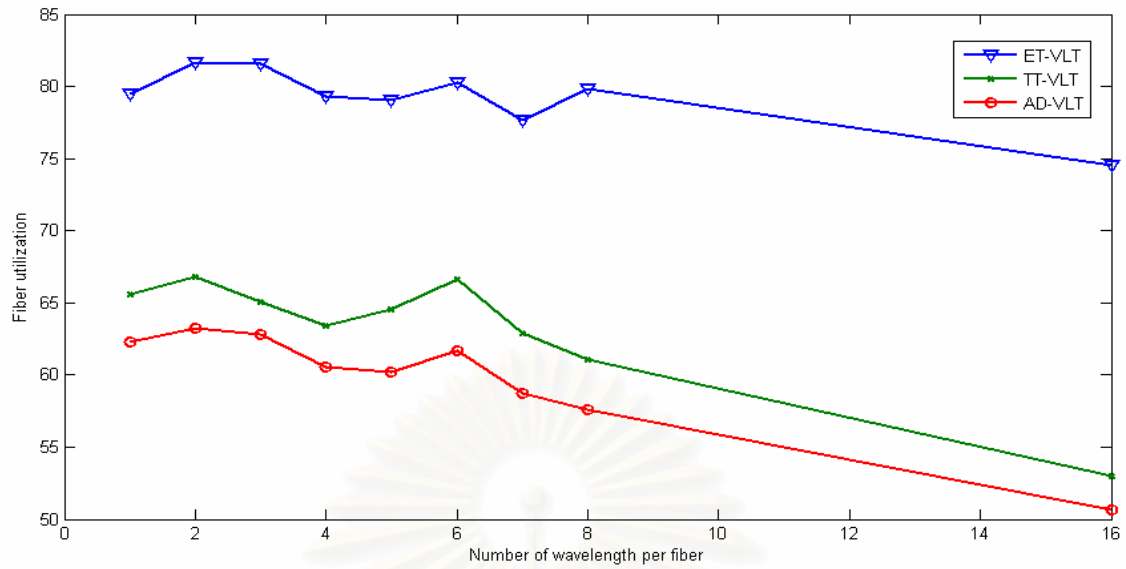
รูปที่ ค.8 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด4เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



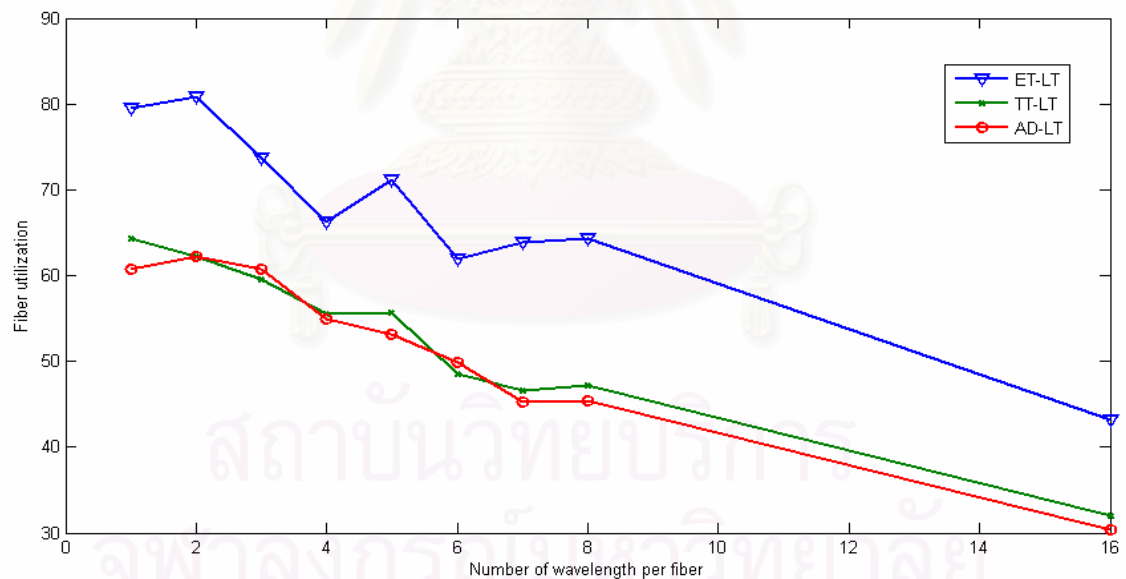
รูปที่ ก.9 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนดเสียหายกรณี โครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผัน ความยาวคลื่น



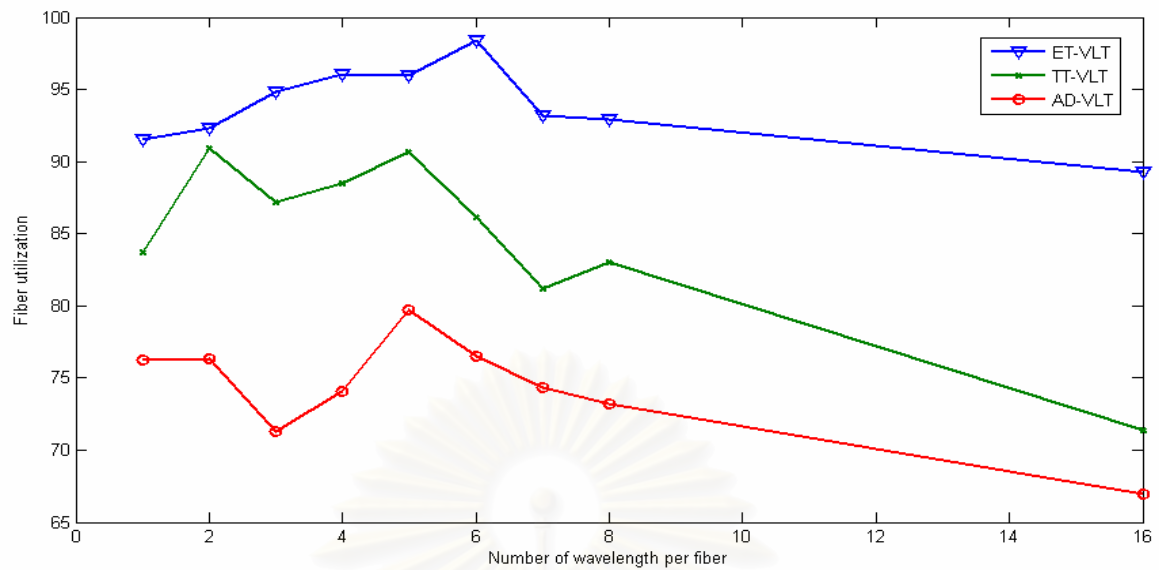
รูปที่ ก.10 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนดเสียหายกรณี โครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผัน ความยาวคลื่น



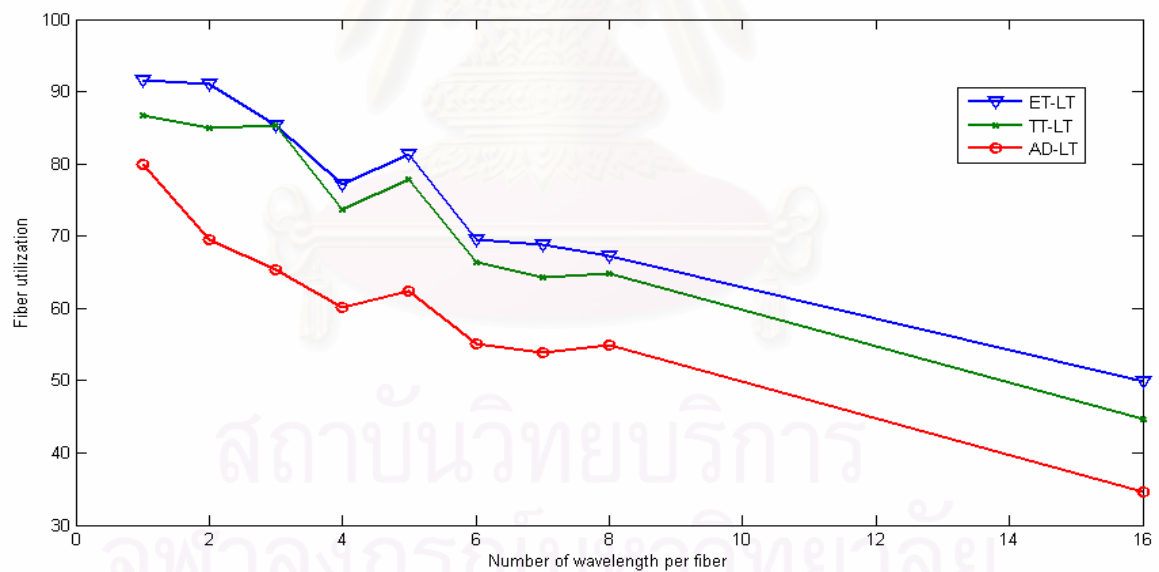
รูปที่ ค.11 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนค6 เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



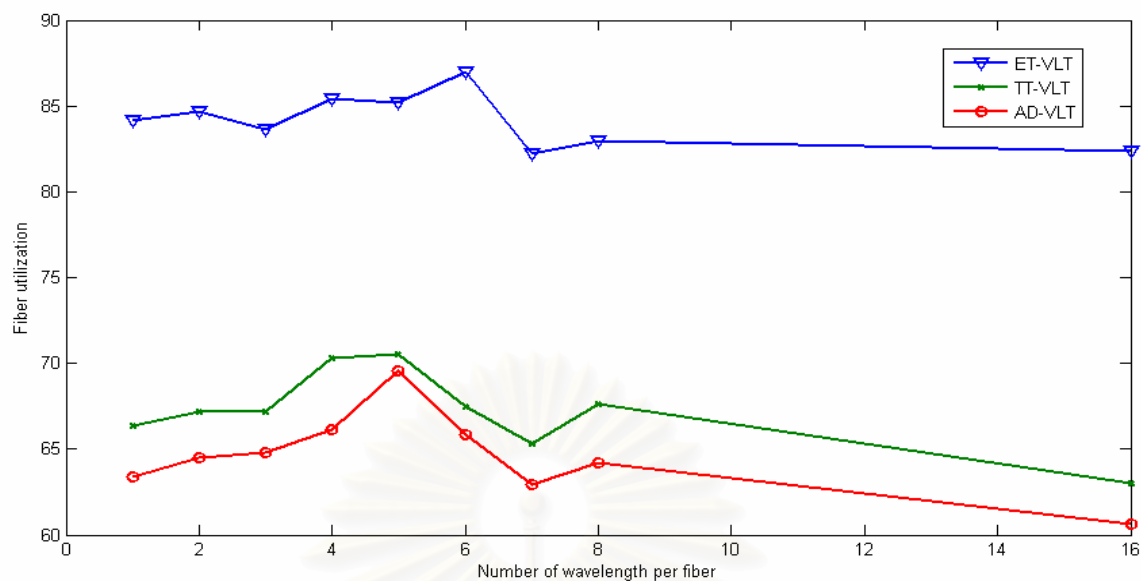
รูปที่ ค.12 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนค6 เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



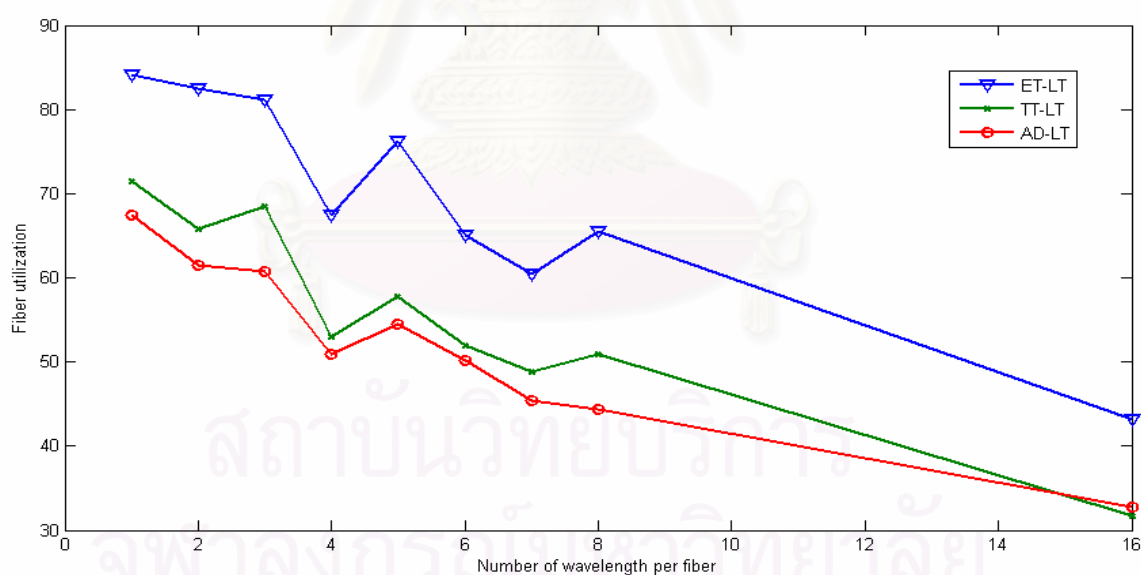
รูปที่ ค.13 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด7เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



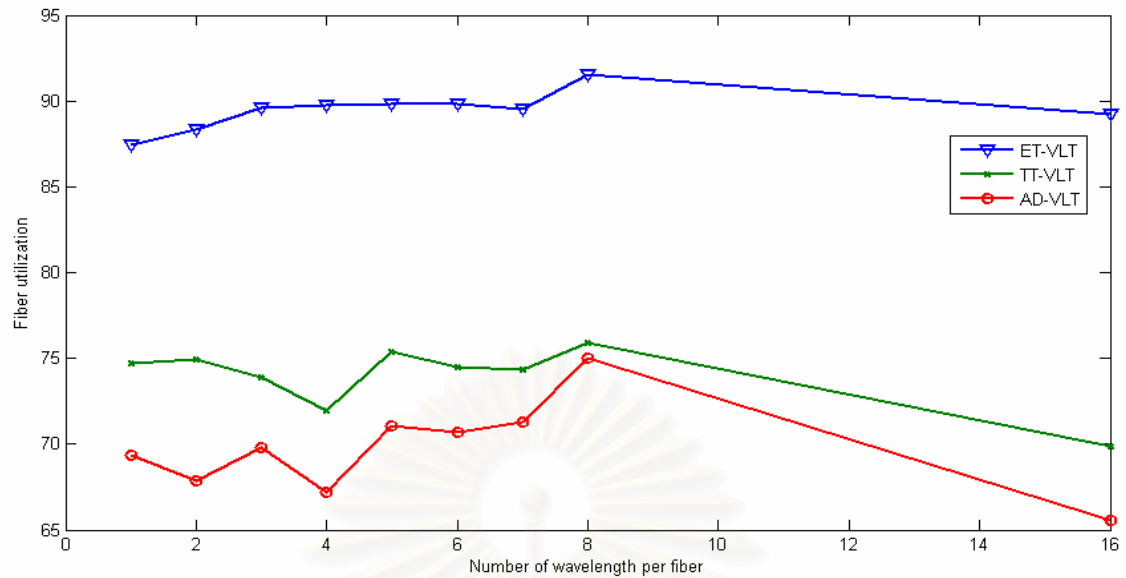
รูปที่ ค.14 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด7เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



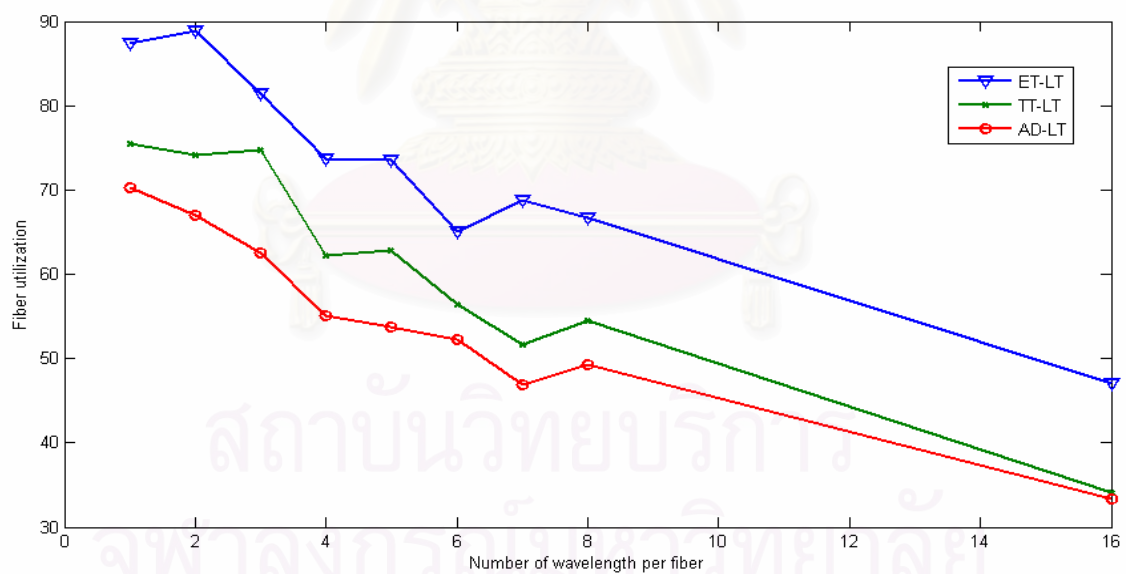
รูปที่ ค.15 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด8เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



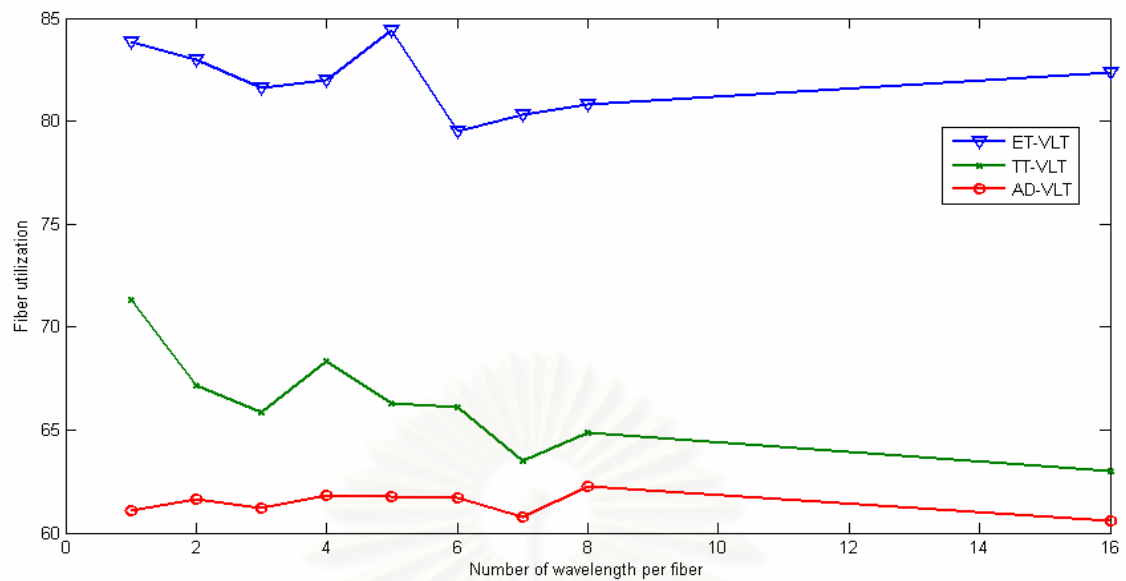
รูปที่ ค.16 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด8เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



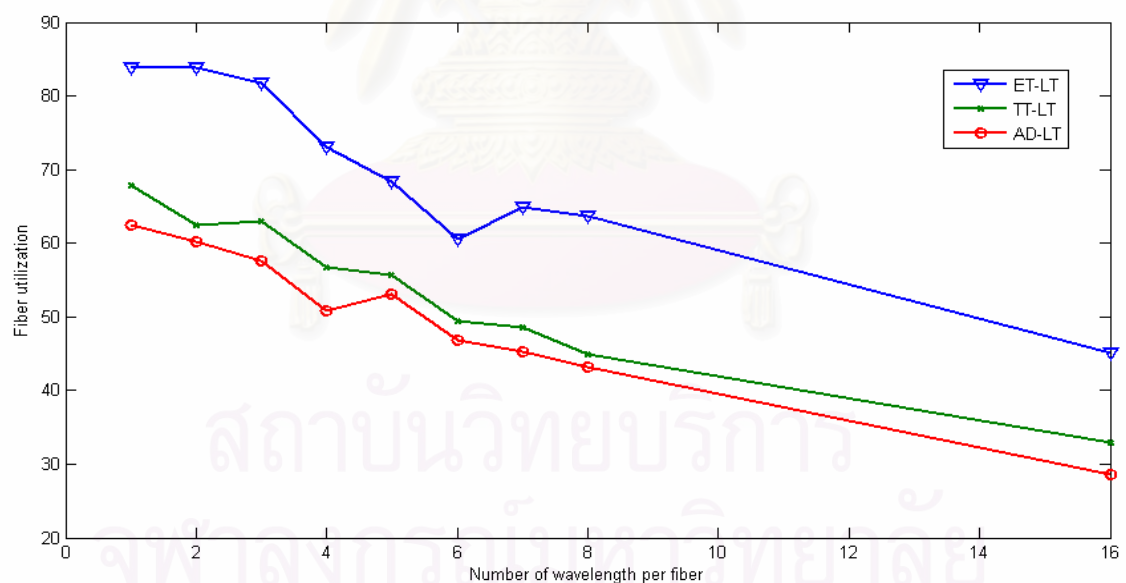
รูปที่ ค.17 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 9 เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



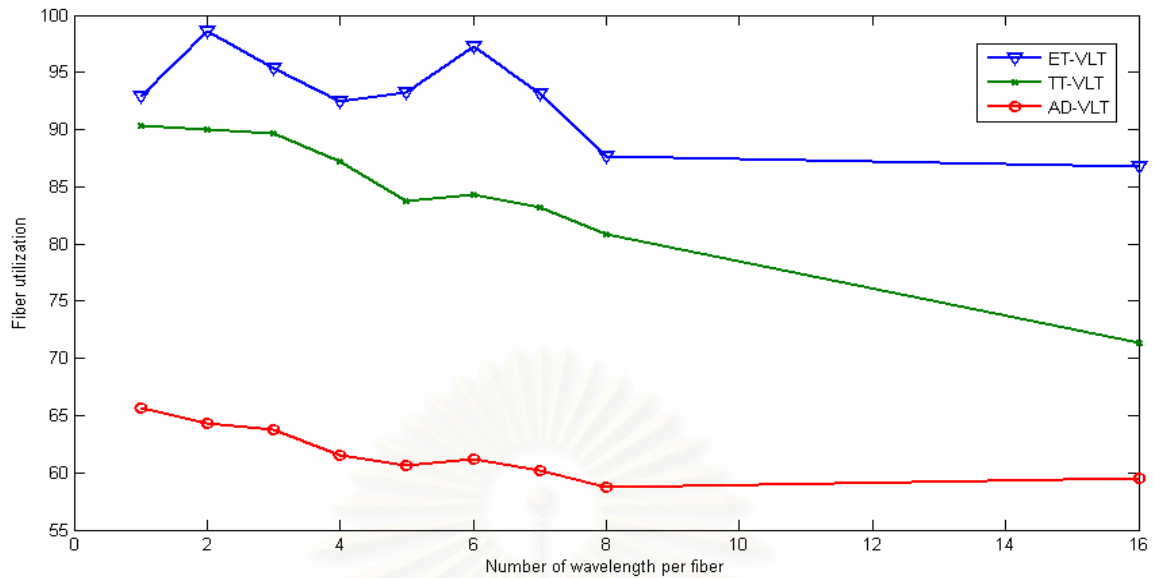
รูปที่ ค.18 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด 9 เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



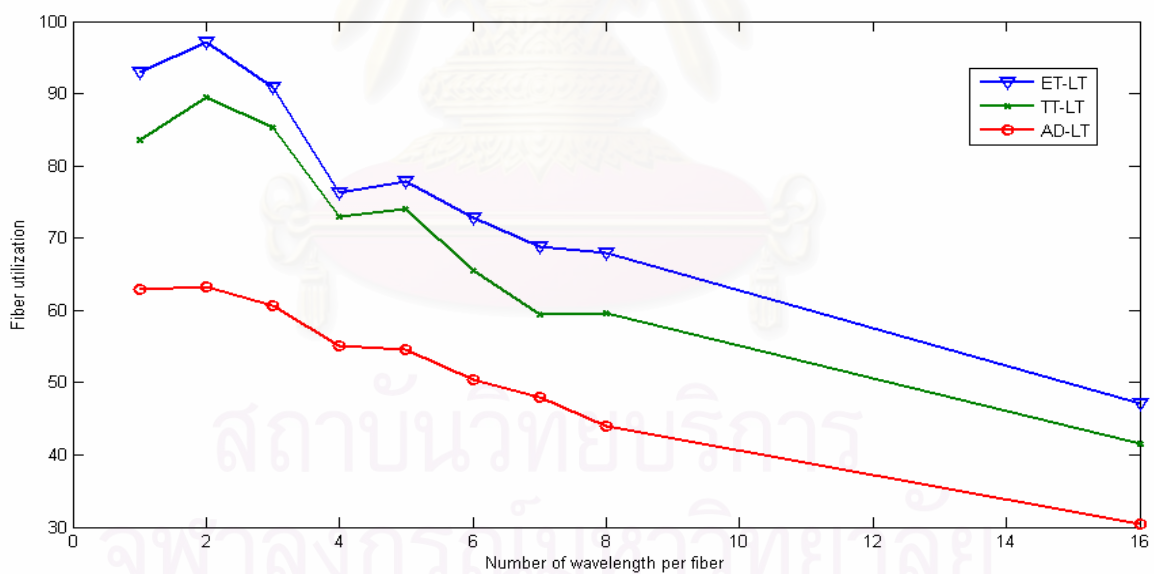
รูปที่ ค.19 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด10เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลง
ผันความยาวคลื่น



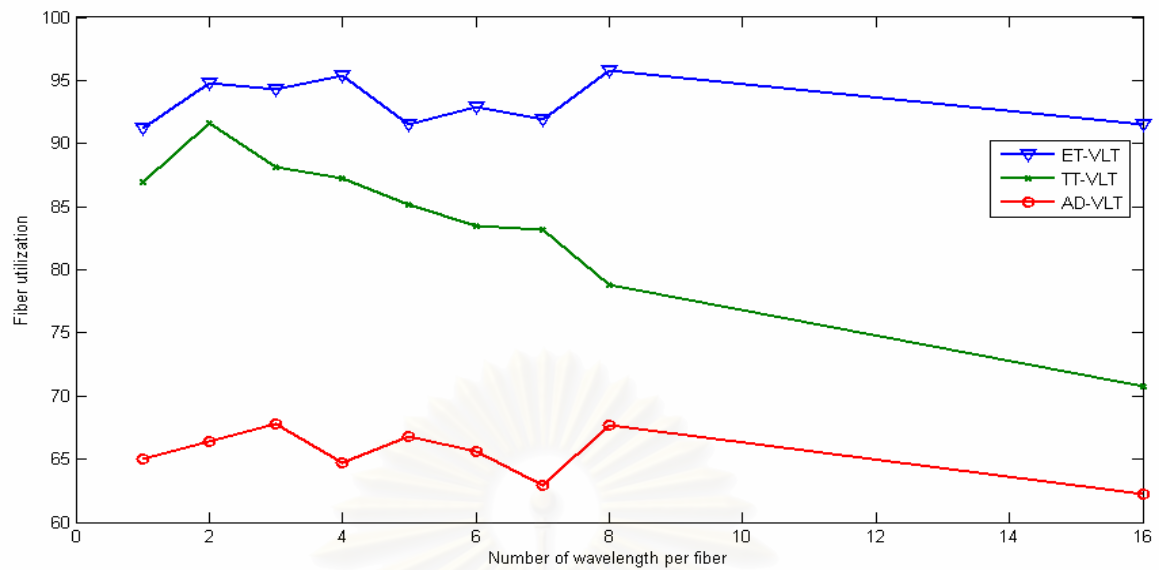
รูปที่ ค.20 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โนด10เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์
แปลงผันความยาวคลื่น



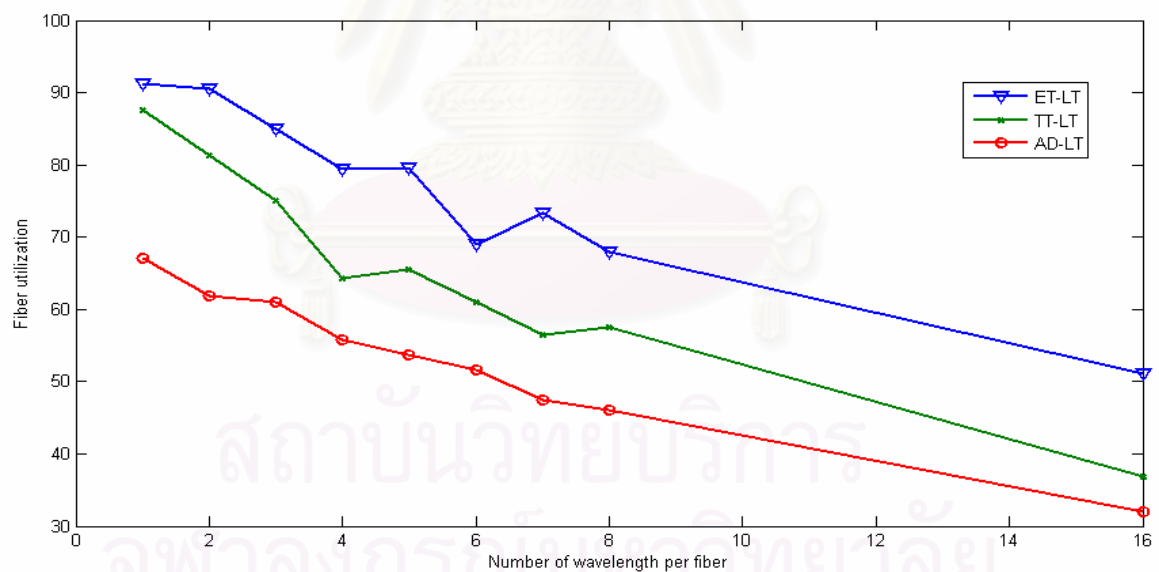
รูปที่ ค.21 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด11เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลง
ผันความยาวคลื่น



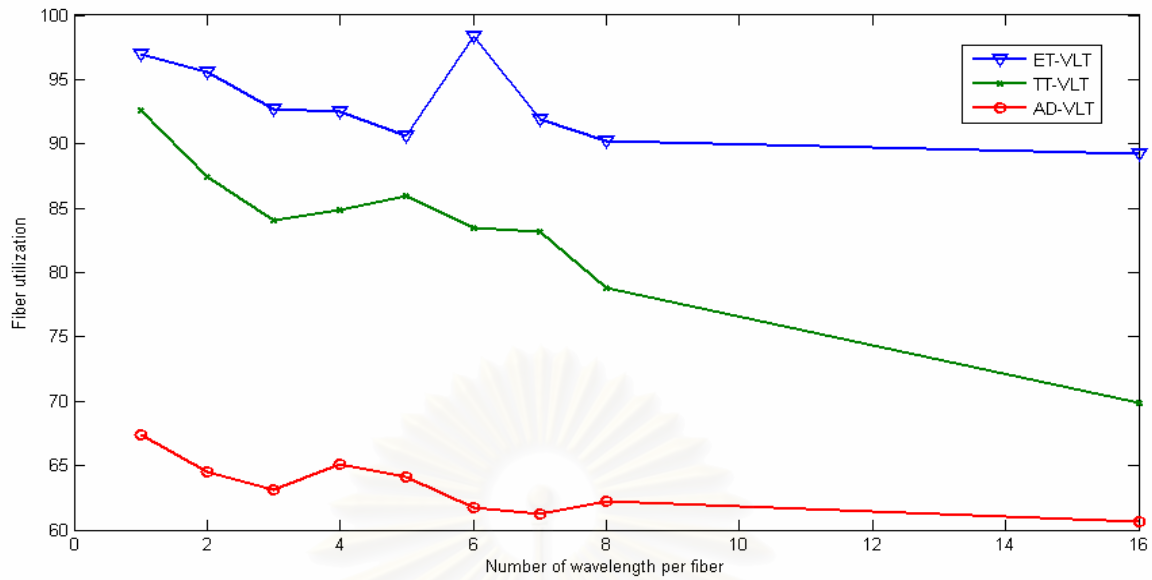
รูปที่ ค.22 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด11เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์
แปลงผันความยาวคลื่น



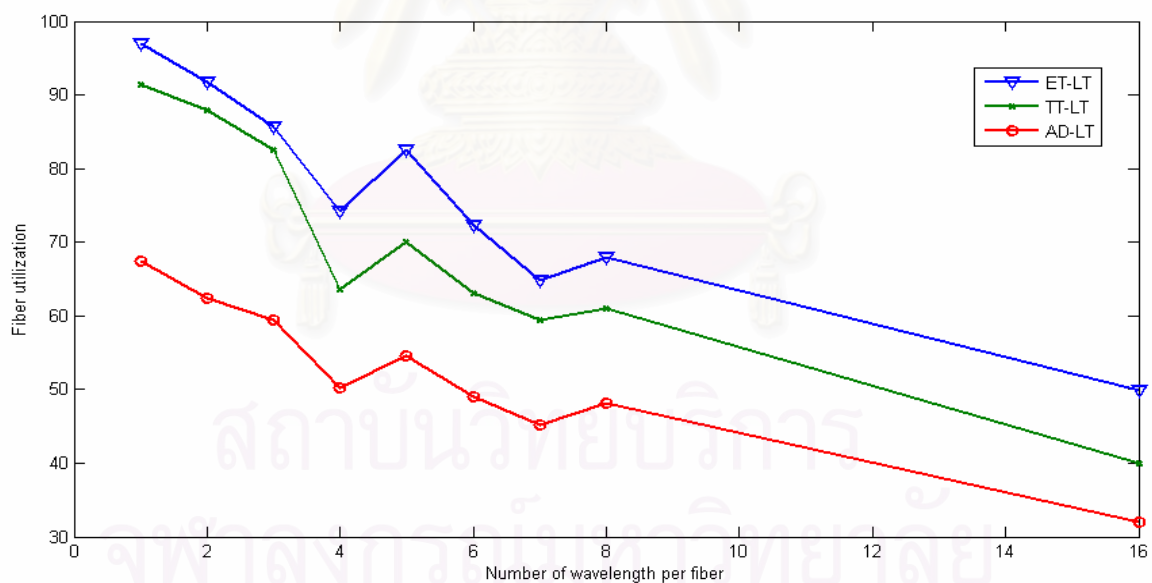
รูปที่ ค.23 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด12เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลง
ผันความยาวคลื่น



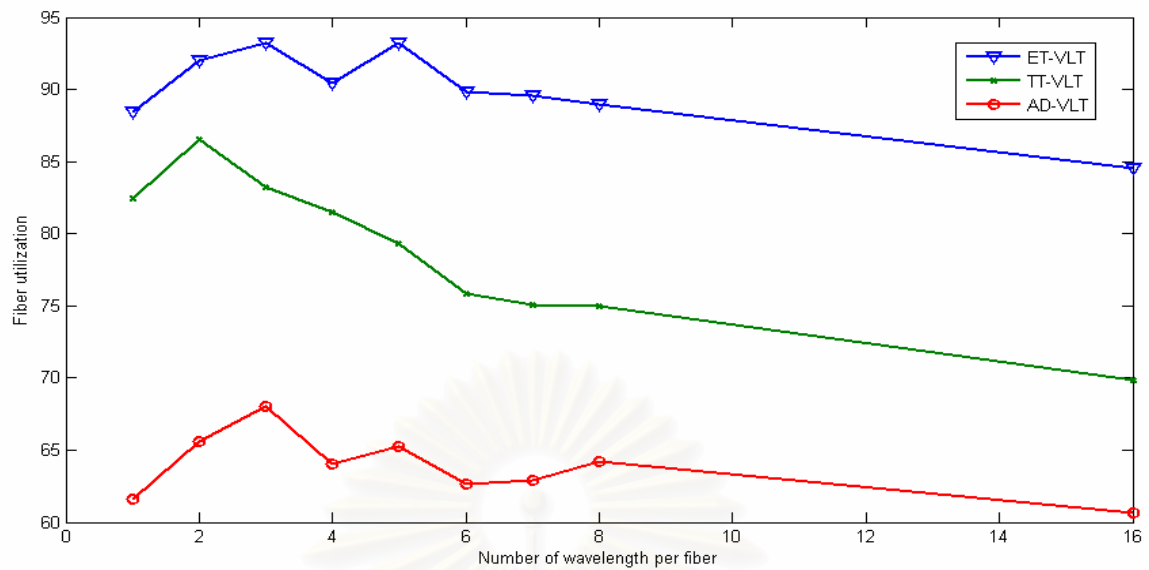
รูปที่ ค.24 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด12เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์
แปลงผันความยาวคลื่น



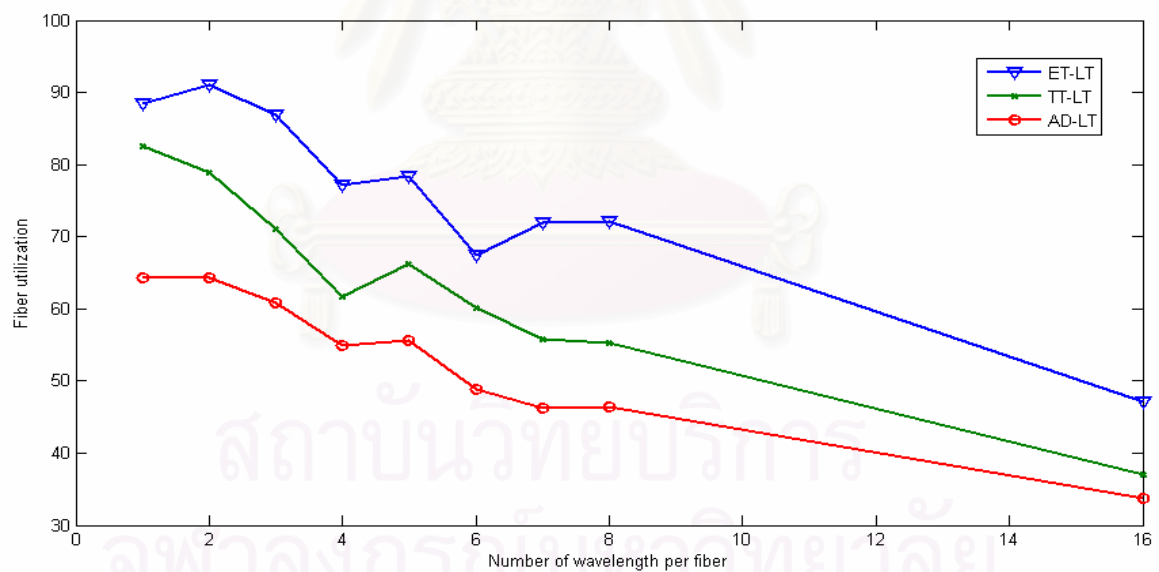
รูปที่ ค.25 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โหนด 13 เสียหาย กรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลง
ผันความยาวคลื่น



รูปที่ ค.26 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อ โหนด 13 เสียหาย กรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์
แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ค.27 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด14เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลง
ผันความยาวคลื่น



รูปที่ ค.28 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด14เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์
แปลงผันความยาวคลื่น

ตารางที่ ค.1 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 1 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 1 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	88.56	79.61	69.52	88.56	84.72	73.27
2	92.66	76.08	68.33	90.14	78.59	67.43
3	91.62	80.62	68.97	83.33	74.38	60.20
4	85.42	79.84	70.69	75.00	63.38	57.69
5	95.92	79.04	71.07	77.39	63.55	59.67
6	89.86	79.49	68.32	66.91	56.81	51.61
7	87.32	79.38	66.53	69.42	51.72	48.85
8	88.93	77.82	64.85	72.09	51.70	50.26
16	84.54	71.39	62.99	44.61	37.44	35.84

ตารางที่ ค.2 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 2 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 2 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	93.48	83.13	67.22	93.48	85.76	70.42
2	91.98	83.00	65.38	90.14	81.92	67.43
3	93.71	81.59	68.05	82.19	73.31	61.86
4	92.48	80.39	66.13	73.77	68.88	56.02
5	93.20	80.32	69.58	82.62	70.66	57.74
6	90.84	80.26	67.76	72.27	69.49	51.32
7	91.92	81.23	69.17	67.07	65.95	48.84
8	91.54	78.79	66.94	67.98	63.16	50.62
16	89.24	73.01	65.56	42.79	39.19	34.95

ตารางที่ ค.3 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 3 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 3 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	90.54	83.85	66.30	90.54	82.16	64.04
2	86.19	83.84	62.72	90.46	83.28	60.46
3	89.62	82.00	63.08	86.96	77.59	56.07
4	89.13	81.46	60.29	79.41	70.68	51.53
5	90.64	83.72	92.93	83.26	71.13	53.97
6	91.85	77.99	61.69	74.66	60.22	51.33
7	90.72	79.38	60.75	68.82	58.62	47.97
8	92.91	79.00	59.86	67.98	55.33	47.90
16	91.78	71.39	61.78	42.36	39.94	32.26

ตารางที่ ค.4 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 4 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 4 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	88.57	72.51	67.40	88.57	72.19	71.45
2	86.80	71.45	67.90	87.02	73.32	69.48
3	87.70	72.08	70.99	80.36	66.91	63.38
4	84.25	71.93	67.21	76.27	59.73	57.45
5	87.43	70.07	69.58	74.07	58.05	54.24
6	87.01	72.51	70.06	64.52	56.11	49.91
7	90.72	72.77	69.17	65.95	50.41	49.16
8	87.68	71.55	69.94	66.70	53.26	49.91
16	89.24	69.84	68.35	46.60	37.44	33.55

ตารางที่ ค.5 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 5 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 5 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	90.04	77.34	65.86	90.04	77.09	64.29
2	89.97	76.08	65.21	86.72	71.15	63.03
3	88.65	74.55	66.00	84.11	66.18	56.43
4	86.01	74.55	66.13	72.58	63.98	53.15
5	89.00	77.19	64.58	73.06	66.71	50.19
6	90.84	78.73	64.58	68.96	60.63	48.57
7	88.43	66.44	61.82	62.32	56.53	46.59
8	86.46	75.00	64.84	66.09	57.56	45.46
16	86.82	69.84	64.25	44.61	40.72	34.10

ตารางที่ ค.6 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 6 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 6 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	79.48	65.59	62.25	79.48	64.38	60.77
2	81.62	66.80	63.21	80.87	62.25	62.25
3	81.59	65.08	62.84	73.77	59.60	60.81
4	79.35	63.40	60.59	66.18	55.56	54.88
5	79.04	64.58	60.24	71.13	55.65	53.17
6	80.26	66.67	61.69	61.87	48.57	49.91
7	77.62	62.93	58.70	63.82	46.55	45.22
8	79.81	61.03	57.64	64.30	47.27	45.46
16	84.54	62.99	60.61	43.23	32.01	30.39

ตารางที่ ค.7 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 7 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 7 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	91.56	83.71	76.25	91.56	86.68	79.87
2	92.32	90.96	76.32	91.12	84.97	69.48
3	94.80	87.23	71.30	85.36	86.36	65.34
4	96.09	88.49	74.10	77.14	73.77	60.18
5	95.93	90.64	79.68	81.36	77.83	62.44
6	98.41	86.11	76.54	69.49	66.42	55.08
7	92.14	81.23	74.32	68.82	64.34	53.84
8	92.91	83.00	73.24	67.33	64.87	54.90
16	89.24	71.39	66.93	49.93	44.61	34.95

ตารางที่ ค.8 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 8 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 8 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	84.14	66.40	63.38	84.14	71.45	67.50
2	84.71	67.17	64.53	82.46	65.84	61.49
3	83.67	67.21	64.82	81.08	68.44	60.81
4	85.42	70.29	66.13	67.50	52.94	50.94
5	85.17	70.57	69.58	76.17	57.74	54.52
6	87.01	67.49	65.87	64.99	51.91	50.19
7	82.19	65.29	62.93	60.49	48.85	45.48
8	83.00	67.66	64.18	65.48	50.98	44.33
16	82.37	62.99	60.61	43.23	31.77	32.76

ตารางที่ ค.9 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 9 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 9 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	87.46	74.73	69.32	87.46	75.54	70.21
2	88.35	74.92	67.90	88.87	74.19	67.07
3	89.62	73.87	69.79	81.45	74.69	62.50
4	89.78	71.93	67.21	73.77	62.21	55.10
5	89.82	75.42	71.08	73.56	62.81	53.70
6	89.86	74.47	70.66	64.99	56.46	52.21
7	89.56	74.32	71.28	68.82	51.73	46.83
8	91.54	75.91	75.00	66.70	54.48	49.22
16	89.24	69.84	65.56	47.12	34.10	33.28

ตารางที่ ค.10 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 10 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 10 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	83.85	71.35	61.07	83.85	67.87	62.48
2	82.99	67.17	61.63	83.83	62.41	60.17
3	81.59	65.86	61.19	81.82	62.94	57.69
4	82.00	68.33	61.80	72.98	56.72	50.75
5	84.44	66.30	61.75	68.40	55.65	53.17
6	79.49	66.13	61.69	60.63	49.36	46.80
7	80.30	63.51	60.75	64.87	48.55	45.22
8	80.84	64.84	62.25	93.73	44.89	43.26
16	82.37	62.99	60.61	45.09	33.02	28.53

ตารางที่ ค.11 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 11 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 11 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	92.95	90.37	65.68	92.95	83.56	62.87
2	98.60	89.96	64.36	97.10	89.50	63.19
3	95.34	89.62	63.18	90.91	85.31	60.61
4	92.48	87.23	61.50	76.27	72.97	55.10
5	93.20	83.73	60.61	77.83	74.07	54.52
6	97.25	84.35	61.23	72.85	65.46	50.47
7	93.14	83.16	60.22	68.82	59.51	47.96
8	87.68	80.84	58.73	67.98	59.98	44.05
16	86.82	71.39	59.49	47.12	41.52	30.39

ตารางที่ ค.12 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 12 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 12 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	91.21	86.99	64.98	91.21	87.61	67.31
2	94.80	91.64	66.44	90.46	81.39	61.95
3	94.25	88.17	67.77	84.91	75.00	61.02
4	95.34	87.23	64.74	79.41	64.29	55.79
5	91.48	85.17	66.76	79.56	65.49	53.70
6	92.88	83.50	65.61	68.96	61.04	51.62
7	91.92	83.16	62.93	73.28	56.53	47.39
8	95.77	79.80	67.66	67.98	57.56	46.04
16	91.54	70.74	62.25	51.14	36.79	32.01

ตารางที่ ค.13 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 13 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 13 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	97.02	92.60	67.40	97.02	91.38	67.40
2	95.54	87.41	64.53	91.79	87.94	62.41
3	92.66	74.10	63.08	85.71	82.57	59.41
4	92.48	84.83	65.08	74.18	63.68	50.37
5	90.64	85.91	64.16	82.62	70.20	54.52
6	98.41	83.50	61.70	72.27	63.17	49.09
7	91.92	83.16	61.28	64.87	59.51	45.22
8	90.21	78.80	62.25	67.98	61.00	48.22
16	89.24	69.84	60.61	49.93	39.94	32.01

ตารางที่ ค.14 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 14 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโหลดที่ 14 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	88.41	82.43	61.62	88.41	82.57	64.30
2	91.98	86.49	65.56	91.12	78.84	64.32
3	93.18	83.25	68.05	86.96	71.15	60.81
4	90.44	81.46	64.06	77.14	61.64	54.88
5	93.20	79.36	65.26	78.39	66.30	55.65
6	89.86	75.84	62.62	67.41	60.22	48.83
7	89.56	75.11	62.93	71.95	55.73	46.28
8	88.93	75.00	64.18	72.10	55.33	46.34
16	84.54	69.84	60.61	47.12	37.11	33.82

ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

1. Kunanan Luekijna and Chaiyachet Saivichit. Multicast Traffic Reconfiguration in WDM Network for Single Node Failure Design. The 9th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2007) (February 2007).:1833-1838



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Multicast Traffic Reconfiguration in WDM Network for Single Node Failure Design

Kunanan Luekijna and Chaichachet Saivichit

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering

Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand 10330

E-mail:chaichachet.S@chula.ac.th

Abstract — Until recently, the problem of how to design survivable optical networks under single link failure has been studied quite extensively. However, the study on the design of optical networks for single node failure has been rarely discussed. This paper proposes 3 methods to reconfigure multicast traffic in WDM network for single node failure based on Integer Linear Programming (ILP) technique by reconfiguration of entire network, reconfiguration of traffic traversing through failure node and reconfiguration of traffic adjacent to failure node.

The last two methods, we used node-disjoint share protection path between primary path and backup path to reconfigure multicast traffic. We used multicast routing and wavelength assignment (MC-RWA) namely, Light-Tree(LT) and Virtual Light-tree(VLT) to design multicast traffic in WDM network for a single node failure. The objective of this paper is to design WDM network which supports multicast traffic for a single node failure in order to minimize fiber for survival network, given a static multicast traffic set, the number of wavelength per fiber can support and the network design approach (LT and VLT).

Keywords — Multicasting, WDM network, Routing and wavelength assignment, ILP, Node failure

1. Introduction

In the last few year, Optical fiber technology has become the dominant transport medium in telecommunication system, because of its advantage in capacity, reliability, cost and scalability. Such technology is expected to serve as a broadband transport network that support various emerging multimedia service over the internet such as interactive distance learning, e-business, teleconference, video conference, live auction,, video on demand and game online. An attractive feature of optical fiber is its potential to offer extremely large transmission capacity in the order of Tb/s. In order to utilize fiber capacity effectively, Wavelength Division Multiplexing (WDM) technique [1,2] was introduced as a technology of expanding the bandwidth capacity of existing of optical fiber. WDM technology enables network to transmit several information, each at different wavelength, simultaneously on a single optical fiber.

Multicasting [3] is defined as point-to-multipoint communication from a source node to the set of destination nodes. According to the physical layer of a network, the essential equipment needed to successfully construct light-tree on the network is an optical power splitter which is

established within an optical cross connects (OXC) of the network.

Network survivability is a major concern of network operators. Resiliency is generally achieved by means of protection or restoration. Protection is a technique that uses pre-assigned capacity to ensure survivability while restoration reroutes the affected traffic after a network element fail.

In literature, there are numerous research paper [4-8] in the area of single link failure. However, the study on the design of optical networks for single node failure has been rarely discussed. The probability of a node failure is generally much smaller than a link failure due to the build-in redundancy of many network equipments but node failure is still possible and will cause severe service disruption. In a typical protection scheme against node failure, the primary and the backup paths need to be node-disjoint along their routes. This requirement guarantees that no single node failure except the source or destination node can affect the primary and backup path simultaneously. Here, we assume that the source or destination node failure is not restorable. The node-disjoint requirement for intermediate node ensures that the primary and backup paths do not pass through the same link, in other word, they can also protect against a link failure.

In this paper, we propose MC-RWA [9] problem formulations in multi-fiber network environment with the objective of minimize the total number of fiber needed to support multicast traffic. Two wavelength assignment strategies namely Light-tree (LT) and Virtual Light-tree (VLT) are examined for protection network design three methods. Firstly, the whole network is entirely reconfigured for all light-Tree. Secondly, only light-Tree that traverses through a failure node are reconfigured. The last method , not only light-Tree traversing through a failure node but also light-Tree traversing through adjacent nodes connected to failure node are reconfigured with node-disjoint protection.

The rest of this paper is organized as follows. In section II, the strategies of MC-RWA in two method of WDM network are introduced. Multicast formulation for working and protection based on ILP for single node failure is presented in section III. Simulation results and discussions are presented in section IV. Finally, the conclusion is given in section V.

2. Multicast routing and wavelength assignment (MC-RWA)

In this paper, a concept of light-tree[10] is applied to serve multicast session is defined as a combination of optical branch. An optical branch is defined as a lightpath provided to connected between two nodes (source and destination or destination and destination) which are the members of the same multicast session. Therefore, in order to reach all member of the multicast session, the optical branches needed to form the light-tree must cover all members of the multicast session and the root node of a light-tree is the source node, while the end nodes of each optical branch are the destination nodes of the light-tree.

A. Wavelength assignment strategy[4]

From the wavelength assignment perspective, there are several distinct assignment policies that can be employed. In this paper, two different wavelength allocation method are discussed according to the wavelength conversion capability of each node.

1). Light-Tree (LT) strategy:

This strategy does not utilize wavelength converter in WDM network. When setting up a light-tree on an optical network only one wavelength is used for each multicast session.

2). Virtual Light-Tree (VLT) strategy:

On the other hand, this strategy does utilize wavelength converter in WDM network in every node. Therefore, the optical branches in a light-tree can use different values of wavelengths.

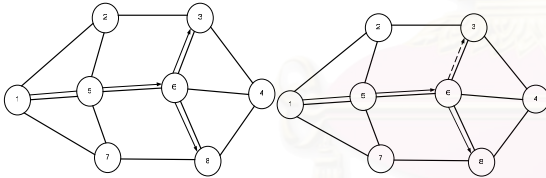


Figure 1A

Figure 1B

Wavelength assignment strategy (LT(1A) and VLT(1B))

As illustrated, Figure 1 shows wavelength assignment strategy of which LT is shown in 1A and VLT is shown in 1B. This multicast session has node 1 as the source node and node 3, 6 and 8 as the destination nodes. Therefore, one possible light-tree composes of three optical branches; $1 \rightarrow 6$, $6 \rightarrow 3$ and $6 \rightarrow 8$. We assume the node of light-tree which are replicating and splitting the data information must be the member of multicasting session. In this example, optical power splitter must be used at node 6.

3. Problem description and multicast formulation

A. Network model

The WDM network is modeled by undirected graph $G = (N, L)$, where N denotes a set of optical nodes, $i = \{1, 2, 3, \dots, N\}$, with $|N| = N$. Meanwhile, the physical link are represented by a set of undirected links, $L \subseteq N \times N$, where a physical link mn is in the set L if there exists a link from node m to n . In the model, we assume that each physical link is bi-directional and may consist of more than one optical fiber to serve the traffic demand of the network. Each optical fiber is limited to multiplexing the number of wavelength up to M .

Notations:

N	Total number of node in network;
L	Total number of physical link in network;
i	Index of session;
itf	Index of session traverse through failure node;
iaf	Index of session adjacent to failure node;
S_i	Set of multicast session i $\{s_i, d_1, d_2, \dots, d_j\}$;
t_i	Traffic demand of multicast session i ;
Δ	The fanout of optical splitter;
M	A maximum number of wavelength per fiber;
$\delta_{mn,p}^{sd}$	take the value of one if route p of node pair sd passes through link mn , and zero, otherwise;
P_{sd}	A set of candidate routes of node pair sd ;
X_i^{mn}	A boolean variable, an optical branch between node m and n to form a light-tree for carrying multicast demand t_i ;
$P_{i,p}^{sd}$	A candidate physical route p of node pair sd for multicast demand t_i (For VLT system);
$P_{i,p,\lambda}^{sd}$	A candidate physical route p of node pair sd occupying wavelength λ for multicast demand t_i (For LT system);
I_α	An arbitrarily high constant integer;
$W_{i,\lambda}$	A Boolean variable, a wavelength channel λ occupied by multicast demand t_i (For LT system);
B_f^{sd}	A set of candidate backup route of node pair sd upon the failure of node f ;
$\mu_{mn,r}^{sd,f}$	Take the value of one if backup route r of node pair sd passes through link mn upon the failure of node f , and zero, otherwise;
fp_{mn}	Total number of primary fiber on physical link mn ;
fb_{mn}	Total number of backup fiber on physical link mn ;

- ft_{mn} Total number of backup fiber that primary traverse through failure node;
- fa_{mn} Total number of backup fiber that primary adjacent to failure node;
- $xb_{i,f}^{mn}$ A boolean variable, a backup optical branch between node m and n to form a backup light-tree for carrying multicast demand t_i upon the failure of node f ;

B. Light-Tree creation formulation

To determine an optimal light-tree T_i for supporting multicast request $S_i = \{s_i, d_1, d_2, \dots, d_j\}$, we construct an bidirected graph $G_i = (N_i, A_i)$ corresponding to $S_i = \{s_i, d_1, d_2, \dots, d_j\}$. The set of node N_i has elements consisting of S_i and the set of destinations $|d_j|$, namely $N_i = \{m \in N_i \mid m = s_i \vee m = d_j\}$. Meanwhile, the set of logical arcs A_i is defined as $A_i = \{mn \in A_i \mid m, n \in N_i \wedge m \neq n\}$. Based on the graph, $G_i = (N_i, A_i)$, we develop the light-tree formulation by employing a concept of transforming the graph G_i to the optimal light-tree T_i . Since the light-tree should have $|N_i| - 1$ optical branches, the first two constraints of the formulation are

$$\sum_{mn \in A_i} X_i^{mn} = |N_i| - 1 \quad \forall i, \forall mn \in L \quad (1)$$

$$X_i^{mn} \in \{0, 1\} \quad \forall m, n \in A_i, \forall i \quad (2)$$

Moreover, based on the definition of a tree, the light-tree T_i should not contain a cycle and should be connected. Given a subset S of N_i , we can express the tree definition in term of the constraint

$$\sum_{mn \in \partial(S)} X_i^{mn} \geq 1 \quad \forall i, \forall S \subset N, S \neq \emptyset, N \quad (3)$$

For optical network, due to the limitation of the performance of the optical splitter which is characterized by the fanout Δ . Therefore, the light-tree solution should satisfy this limit by using the constraint.

$$\sum_{n: mn \in A_i} X_i^{mn} \leq \Delta \quad \forall m \in N_i, \forall i \quad (4)$$

C. Working network design formulation

For the MC-RWA problem definition of the working network design, we can describe the corresponding formulation based on an optical network $G = (N, L)$ and the light-tree constraint introduced above as follow.

1). VLT wavelength assignment strategy

The objective is to minimize the total number of primary fiber requirements:

$$\text{Min} : \sum_{mn \in L} fp_{mn} \quad (5)$$

Subject to the constraint (1)-(4) and:

$$\sum_{p \in P_{sd}} P_{i,p}^{sd} = tx X_i^{sd} \quad \forall sd \in A_i, \forall i \quad (6)$$

$$Mx fp_{mn} - \sum_i \sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} P_{i,p}^{sd} \delta_{mn,p}^{sd} \geq 0 \quad \forall mn \in L \quad (7)$$

$$P_{i,p}^{sd} \in Z^+ \quad \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall i \quad (8)$$

$$fp_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \quad (9)$$

As formulated for the VLT wavelength allocation strategy, the objective function (5) is the minimization of the total number of optical primary fiber needed to support the multicast demand t_i . Constraint set (1)-(4) as introduced in the previous subsection are contained in the formulation to find the optimal light-trees. Constraint (6) ensures that exactly physical routes are selected for optical branches of the light-trees. Constraint (7) states that the wavelength capacity of each physical link should be sufficient to meet the multicast traffic load crossing to it. Finally, constraint (8) and (9) limit the network variables of the physical routes and optical fiber to be in the nonnegative integer.

2). LT wavelength assignment strategy

The objective is to minimize the total number of primary fiber requirements:

$$\text{Min} : \sum_{mn \in L} fp_{mn} \quad (10)$$

Subject to the constraint (1)-(4) and:

$$\sum_{\lambda=1}^M \sum_{p \in P_{sd}} P_{i,p,\lambda}^{sd} = tx X_i^{sd} \quad \forall sd \in A_i, \forall i \quad (11)$$

$$fp_{mn} - \sum_i \sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} P_{i,p,\lambda}^{sd} \delta_{mn,p}^{sd} \geq 0 \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall mn \in L \quad (12)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{i,\lambda} = 1 \quad \forall i \quad (13)$$

$$P_{i,p,\lambda}^{sd} \leq I_{\alpha} W_{i,\lambda} \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall i \quad (14)$$

$$W_{i,\lambda} \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall i \quad (15)$$

$$P_{i,p,\lambda}^{sd} \in Z^+ \quad \forall p \in P_{sd}, \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall sd \in A_i, \forall i \quad (16)$$

$$fp_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \quad (17)$$

As formulated for the LT wavelength allocation strategy, the objective function (10) is the minimization of the total number of optical primary fiber needed to support the multicast demand t_i . Constraint set (1)-(4) as introduced in the previous subsections are contained in the formulation to find the optimal light-trees. Constraint (11) ensures that exactly primary physical routes are selected and wavelength must be assign to them. Constraint (12) ensures that for any primary physical link, the channel capacity of each wavelength can accommodate the traffic route on it. . Constraint (13) states that only a single wavelength must be selected to support each multicast session. Constraint (14) enforce that no physical path from constraint (11) is permitted to route on wavelength λ , unless the multicast session selects wavelength λ . Finally, constraints (15)-(17) limit the network variables of the wavelength variables, the physical routes and optical fiber to be in the nonnegative integer.

D. Protection network design formulation.

As network survivability is now a serious concern for high-speed optical WDM network. This section presents three multicast protection strategies to protect multicast session against single node failure in WDM network. Firstly, the whole network is entirely reconfigured for all light-Tree. Secondly, only light-Trees that traverse through a failure node are reconfigured. The last method, not only light-Tree traversing through a failure node but also light-Tree traversing through adjacent nodes connect to failure node are reconfigured with node-disjoint protection. In this section we will describe only VLT wavelength assignment strategy because LT wavelength assignment strategy is different from VLT on specify wavelength in optical fiber.

1). Reconfiguration of entire network

As described, under normal operation, an optical network employs light-tree to support multicast traffic. For the reconfiguration of entire network, in the event of single node failure all outgoing light-tree are released and reconfigured to avoid a failure node. Although there is a number of light-tree not directly interrupted by the failure, a network using this protection is capable of rearranging them in the restoration process. Accordingly, this protection strategy is, in principle, considered very flexible to handle any interruption, resulting in the minimal requirement of capacity to resource.

1.1) VLT wavelength assignment strategy

$$\text{Min} : \sum_{mn \in L} fb_{mn} \quad (18)$$

$$\sum_{mn \in A_i} Xb_{i,f}^{mn} = |N_i| - 1 \quad \forall i, \forall mn \in L, \forall f \in N \quad (19)$$

$$\sum_{mn \in \partial(S)} Xb_{i,f}^{mn} \geq 1 \quad \forall i, \forall S \subset N, S \neq \emptyset, N, \forall f \in N \quad (20)$$

$$\sum_{n: mn \in A_i} Xb_{i,f}^{mn} \leq \Delta \quad \forall m \in N_i, \forall i, \forall f \in N \quad (21)$$

$$Xb_{i,f}^{mn} \in \{0,1\} \quad \forall m, n \in A_i, \forall i, \forall f \in N \quad (22)$$

$$\sum_{r \in B_f^{sd}} B_{i,r,f}^{sd} = txXb_{i,f}^{sd} \quad \forall sd \in A_i, \forall i, \forall f \in N \quad (23)$$

$$Mxft_{mn} - \sum_i \sum_{sd} \sum_{r \in B_f^{sd}} B_{i,r,f}^{sd} \mu_{mn,r}^{sd,f} \geq 0$$

$$\forall r \in B_f^{sd}, \forall f \in N, \forall mn \in L \quad (24)$$

$$fb_{mn} \geq fp_{mn} \quad \forall mn \in L \quad (25)$$

$$B_{i,r,f}^{sd} \in Z^+ \quad \forall r \in B_f^{sd}, \forall sd \in A_i, \forall f \in N, \forall i \quad (26)$$

$$fb_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \quad (27)$$

The objective function (18) is to minimize the total number of spare fiber of a network with the reconfiguration of entire network. Constraints (19)-(22) are provided to ensure that, in an event of node failure, all light-tree of the network are able to reconfigure to avoid the failure. Constraints (23) ensure that, upon the node failure the exactly backup physical routes are selected for optical branches of the light-trees. Constraints (24) ensure that upon the node failure, the number of fiber assigned to the link mn is high enough accommodate the restoration routes of all reconfigure light-trees. Constraints (25) ensure that after node f is failure, number of spare fiber can be support traffic for working and protection method. Finally, constraint (26) and (27) express that the variable of restoration routes of light-trees and the number of fibers of each network link must be nonnegative integers.

2).Reconfiguration of traffic traversing through affected node

For this protection strategy, some part of this protection mechanism is identical to the first strategy. Employing this strategy, the protection permits only light-tree traversing a failure node to reconfigure with node-disjoint protection.

Node-disjoint protection is only require the arrangement of the physical route that are pass through a failure node. However, in this protection strategy, the intermediate node in primary route and backup route must be chosen from different nodes. This mean that the network must chosen a backup route that do not pass intermediate node in primary route.

2.1) VLT wavelength assignment strategy

$$\text{Min} : \sum_{mn \in L} (fp_{mn} + ft_{mn}) \quad (28)$$

Subject to the constraint (1)-(4),(6)-(9),(19)-(22) and

$$P_{itf,p,f}^{sd} \delta_{p,f}^{sd} - \sum_{ra \in NDJ(P_{i,p,f}^{sd})} B_{i,ra,f}^{sd} = 0 \quad (29)$$

$$\forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall itf, \forall f \in N$$

$$\sum_{ra \in NDJ(P_{i,p,f}^{sd})} B_{itf,ra,f}^{sd} = txXb_{itf,f}^{sd} \quad \forall sd \in A_i, \forall itf, \forall f \in N \quad (30)$$

$$Mxft_{mn} - \sum_{itf} \sum_{sd} \sum_{ra \in NDJ(P_{i,p,f}^{sd})} B_{itf,ra,f}^{sd} \mu_{mn,ra}^{sd,f} \geq 0$$

$$\forall ra \in NDJ(P_{i,p,f}^{sd}), \forall f \in N, \forall mn \in L \quad (31)$$

$$B_{i,p,f}^{sd} \in \mathbb{Z}^+$$

$$\forall ra \in NDJ(P_{i,p,f}^{sd}), \forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall f \in N \quad (32)$$

$$ft_{mn} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall mn \in L \quad (33)$$

The objective function (28) is the minimization of the number of working and spare fibers. Constraints (1)-(4) and (6)-(9) are used to obtain the working light-tree structure of multicast traffic. Before explaining constraint (29)-(31), a new terminology is introduced. For each primary path $P_{i,p,f}^{sd}$,

$NDJ(P_{i,p,f}^{sd})$ is denoted as a set of candidate node disjoint backup path with respect to path $P_{i,p,f}^{sd}$ which traverses through failure node. Constraint (29) ensures that upon a failure node, the network selects node-disjoint backup path for protection. Constraint (30) ensures that exactly physical backup are selected for optical branches of the light-tree. Constraint (31) is formulated to determine the spare capacity enough to support backup path. Finally, Constraint (32) and (33) are provided to limit the network variables to be only nonnegative integer.

3). Reconfiguration of traffic adjacent to affected node.

For this protection strategy, some part of this protection mechanism is identical to the second strategy. Employing the protection permits the light-tree not only traverses a failure node but also has intermediate nodes connected to failed node. This strategy is reconfigured with node-disjoint protection scheme.

3.1) VLT wavelength assignment strategy

$$\text{Min} : \sum_{mn \in L} (fp_{mn} + ft_{mn} + fa_{mn}) \quad (34)$$

Subject to the constraint (1)-(4), (6)-(9), (19)-(22), (29)-(33) and

$$P_{i,p,f}^{sd} \delta_{p,af}^{sd} - \sum_{rb \in NDJ(P_{i,p,f}^{sd})} B_{i,rb,af}^{sd} = 0$$

$$\forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall f \in N \quad (35)$$

$$\sum_{rb \in NDJ(P_{i,p,f}^{sd})} B_{i,rb,af}^{sd} = txXb_{i,af}^{sd}$$

$$\forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall f \in N \quad (36)$$

$$Mxfa_{mn} - \sum_{iaf} \sum_{sd} \sum_{rb \in NDJ(P_{i,p,f}^{sd})} B_{i,rb,af}^{sd} \mu_{mn,rb}^{sd,af} \geq 0$$

$$\forall rb \in NDJ(P_{i,p,f}^{sd}), \forall af \in N, \forall mn \in L \quad (37)$$

$$B_{i,rb,af}^{sd} \in \mathbb{Z}^+$$

$$\forall rb \in NDJ(P_{i,p,f}^{sd}), \forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall af \in N \quad (38)$$

$$fa_{mn} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall mn \in L \quad (39)$$

The objective function (34) is the minimization of number of working and spare fibers. Constraints (1)-(4), (6)-(9) and (29)-(33) are used to obtain working light-tree structure and reconfiguration of multicast traffic only session traversing through a failure node. Before explaining constraint (35)-(37), a new terminology is introduced. For each primary path $P_{i,p,f}^{sd}$, $NDJ(P_{i,p,f}^{sd})$ is denoted as a set of candidate node-disjoint backup paths with respect to path $P_{i,p,f}^{sd}$ which has intermediate nodes connected to the failed node. Such intermediate node shall be called Adjacent node. Constraint (35) ensure that to adjacent node, the network selects node-disjoint backup path to distribute traffic away from the failed node. Constraint (36) ensures that exactly physical backup paths are selected for optical branches of light-tree. Constraint (37) is formulated to determine the spare capacity enough to support backup path. Finally, constraint (38) and (39) are provided to limit the network variables to be only nonnegative integer.

4. Simulation result

In this section, we present the simulation result obtained from the ILP formulations by using realistic network structure of 14 nodes and 21 links, referred to as a National Science Foundation Network (NSFNet) as shown in Figure 2. We simulate 56 sessions multicast traffic that each node is determined to be the source node of 4 sessions. Each session has 4 destination nodes. We used fanout parameter (Δ) of 3 and traffic for each sessions is one. All the ILP models implemented for discussion are solved by the CPLEX optimization package [11] with CPU 2.8 GHz, 512 MB of RAM.

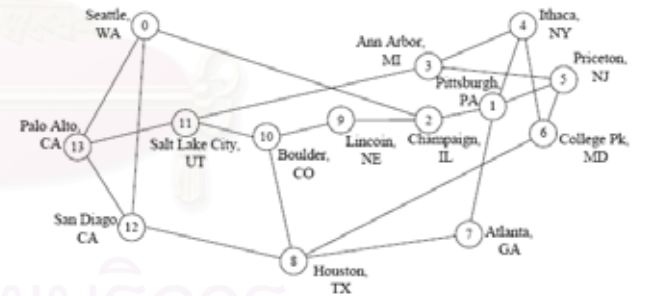


Figure 2. NSFNet

We investigated the result for three protection design approaches. Figure 3 show the total number of fiber required and the number of wavelength per fiber (M). It is shown that the graph characteristic for three protection design approaches exhibits similar trend. Fiber requirement tends to decrease when the value of wavelength per fiber (M) is increased. This is expected because when M increases the channel capacity per fiber is increased and thus more multicast session can be simultaneously supported in the same fiber, exemplifying the key advantage of WDM technology. For example, if network employs fiber with $M=2$ and $M=16$, the total number of fibers can be reduced to approximately half of $M=1$ and $M=8$.

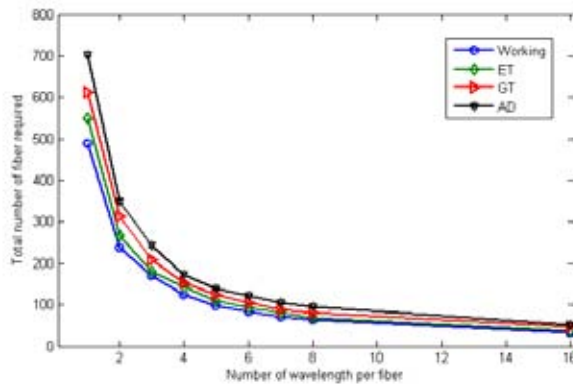


Figure 3. Result for NSFNET

5. Conclusion

In this paper, we have presented ILP formulation for three protection designs in WDM network for single node failure with the objective of minimization total number of fiber required to support multicast traffic. Three protection design approaches namely reconfiguration of entire network (ET), reconfiguration of traffic traversing through failure node (GT) and reconfiguration of traffic adjacent to failure node (AD). We simulated on the proposed work network structure of 14 nodes and 21 links (NSFNet). The results indicate that, for multicast WDM network after node failure occurred, all multicast sessions are released and reestablishment used number of fiber less than the method that considers only the session traversing through the failed node and the method that considers the session traversing through the failed node and adjacent nodes. In AD method, it distributes traffic away from failure node, implying that it reconfigures more sessions than GT method. That is the reason that why AD required more fiber than GT method.

Acknowledgement

This work was supported by the Cooperation Project between Department of Electrical Engineering and Private Sector for Research and Development, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

References

- [1] C. Siva Ram Murthy. WDM optical networks: Concepts, design, and algorithms. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002.
- [2] B. Mukherjee, "WDM optical communication network: Progress and challenges", IEEE J. Select. Areas Commun., vol.18, pp 1810-1824, Sept 1998. M. Young, The technical writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [3] L. H. Sahasrabuddhe and B., "Multicast Routing Algorithms and Protocols : A Tutorial", IEEE Network, Vol. 14, pp.90-102, January 2000.
- [4] N. Singhal, C. Ou and B. Mukherjee, "Share Protection for Multicast Sessions in Mesh Networks", Optical Fiber Communication Conference 2005, Vol.6, 2005.
- [5] N. Singhal and B. Mukherjee, "Protecting Multicast Sessions in WDM Optical Mesh Networks", Light wave Technology Journal, Vol.21, No.4, April 2003.
- [6] N. Singhal, L. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, "Provision of Survivable Multicast Sessions Against Single Failures in Optical WDM Mesh Networks", Light wave Technology Journal, Vol.21, No.11, pp.2587-2594, November 2003.
- [7] N. Singhal, L. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, "Protecting a Multicast Sessions Against Single Failures in a Mesh Network", IEEE International Conference, Vol. 2, pp. 1504-1508, May 2003.
- [8] A. Khalil, A. Hadjiantonis and M.A. Ali, "Pre-planned Multicast Protection Approaches in WDM Networks", Optical Communication ECOC 2005, pp. 25-26, September 2005.
- [9] C. Boworntummarat, "Wavelength Routing and Optical Layer Network Protection Approaches Against Single Link Failures for Multicast Traffic on WDM Networks," A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University, 2003.
- [10] L. H. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, "Light-trees: Optical multicasting for improved performance in wavelength-routed networks," IEEE Communication Magazine, vol. 37, no. 2, pp. 67-73, February 1999
- [11] ILOG CPLEX User's manual. Available: <http://www.cplex.com>

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย คุณนันท์ ลือภักดา เกิดวันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดสระบุรี เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย