แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวงที่สามารถปกป้องความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง

นายวสันต์ ติระศิริกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0671-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MATHEMATICAL MODELS FOR DESIGNING MULTI-RING WDM NETWORK WITH LINK FAILURE PROTECTION

Mr. Wasan Tirasirikul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2001

ISBN 974-03-0671-3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวงที่สามารถปกป้องความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง

โดย นาย วสันต์ ติระศิริกุล

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงการณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วสันต์ ติระศิริกุล : แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวงที่สามารถปกป้องความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง (MATHEMATICAL MODELS FOR DESIGNING MULTI-RING WDM NETWORK WITH LINK FAILURE PROTECTION) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ, 107 หน้า, ISBN 974-03-0671-3

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่าย WDM ที่มีโครงสร้างรูปวงแหวนวงเดียวและวงแหวนหลายวง สำหรับสภาวะการทำงานปกติและสภาวะที่เกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ integer linear programming (ILP) ได้ถูกพัฒนาเพื่อหาต้นทุนซึ่งวัดจากจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตของโครงข่ายที่ต่ำที่สุด โดยแบบจำลองที่พิจารณาต้นทุนทั้ง 2 แบบในการศึกษาวิจัยนี้มีความคล้ายคลึงกันมาก โดยต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเปรียบได้กับจำนวนพอร์ตที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างโนดทางแสง นั่นคือ เป็นพอร์ตที่ใช้รองรับเส้นใยแก้วนำแสง ขณะที่ต้นทุนของพอร์ต คือจำนวนพอร์ตที่ใช้รองรับทั้งส่วนของเส้นใยแก้วนำแสงและพอร์ตที่ใช้สำหรับ Add-Drop ในโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียว การวิจัยนี้ได้เสนอค่าขอบเขตจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุดของโครงข่ายที่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหายแบบใหม่ ซึ่งค่าขอบเขตนี้ได้ถูกใช้เป็นมาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบโครงข่ายที่มีการปกป้องความเสียหายแบบ path protection และ line protection จากผลการทดสอบพบว่า เกือบทุกกรณีของโครงข่ายที่มีขนาด 4 โนดถึง 9 โนด ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยมีการปกป้องความเสียหายแบบ path protection จะมีค่าต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับค่าขอบเขตต่ำสุดที่คำนวณได้ อย่างไรก็ตามเมื่อโครงข่ายเดียวกันนี้ได้รับการปกป้องความเสียหายแบบ line protection ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายจะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าขอบเขตต่ำที่สุด

สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่มีโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการเปรียบเทียบแบบจำลองที่คำนึงถึงต้นทุนของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับแบบจำลองที่คำนึงถึงต้นทุนของพอร์ต เพื่อที่จะออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนรวมต่ำที่สุด จากผลการทดสอบพบว่า ต้นทุนรวมของโครงข่ายที่มีขนาด 4 โนดและวงแหวนที่เป็นไปได้ 3 วง เมื่อออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ตจะมีต้นทุนรวมที่ดีกว่าการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง เพราะสามารถลดทั้งจำนวนพอร์ตและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง ในขณะที่การออกแบบที่คำนึงถึงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสามารถลดได้เฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการออกแบบที่คำนึงต้นทุนของพอร์ตจึงเหมาะสมกับการออกแบบโครงข่าย WDM อย่างไรก็ตามแบบจำลองจะมีความซับซ้อนมากในเชิงของเวลาการคำนวณหาผลเฉลย จากผลการทดสอบพบว่าการหาผลเฉลยของการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนหลายวงจะใช้เวลาค่อนข้างนาน แม้โครงข่ายจะมีขนาดเล็กก็ตาม นอกจากนั้นในกรณีโครงข่ายที่มีการปกป้องความเสียหายแบบ path protection โดยไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ซึ่งโครงข่ายมีขนาด 5 โนดและวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมด 6 วงแหวน กรณีนี้ไม่สามารถหาผลเฉลยของแบบจำลองภายในระยะเวลาวันครึ่ง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2544

4270526621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD : ROUTING AND WAVELENGTH ALLOCATION / MULTI-RING NETWORK DESIGN / PATH PROTECTION / LINE PROTECTION / FIBER COST / PORT COST

WASAN TIRASIRIKUL: MATHEMATICAL MODELS FOR DESIGNING MULTI-RING WDM NETWORK WITH LINK FAILURE PROTECTION. THESIS ADVISOR: ASSIT PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ. Ph.D. 107 pp. ISBN 974-03-0671-3.

This thesis presents mathematical models for routing and wavelength allocation problems in single-ring and multi-ring WDM networks for normal operation and all single-link failure scenarios. The mathematical formulations based on the integer linear programming (ILP) are developed to determine the optimal network resource requirements measured in terms of fiber and port costs. These two cost models adopted in this study are almost the same. The fiber costs are defined as the number of ports interconnecting optical nodes, i.e. fiber ports whereas the port costs include both fiber ports as well as add-drop ports. In the single-ring network, this research proposes a new lower bound on the fiber cost for network protections. This lower bound is extensively used as a benchmark for comparison with line and path protection network systems. It is shown that in most cases the fiber cost of 4-9 node network with wavelength conversion using path protection technique is the same as that of the derived lower bound. However, when line protection is employed on the same network situation the fiber costs are either equal or more expensive than the lower bound.

For the multi-ring network design, this thesis presents the comparison of the fiber cost models with the port cost models in order to design the network that has minimum total cost. It appears that the total cost of 4-node-and-3-possible-ring network designed by considering the cost of port is better than the design considering cost of fiber because it can minimize both fiber and port while the fiber cost design can minimize only the number of fiber. So the port cost design is more suitable for WDM networks. However, it is more complex in term of computational time. From simulation results, it is shown that the computational time of the multi-ring network design appears to be excessive even with a small network. For example, in the case of the protection network without wavelength conversion, with 5 nodes and 6 total possible rings, it is impossible to solve model within one and a half day.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department of Electrical Engineering — Student's signature……

Field study Electrical Engineering — Advisor's signature……

Academic year 2001

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ.ดร. ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณอย่างสูงสำหรับคุณเจริญชัย บวรธรรมรัตน์ และคุณพรชัย ธนาคมสาคร ที่ช่วยให้คำแนะนำปรึกษา และข้อคิดเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ จึงขอบพระคุณ ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาและทุกๆคนในครอบครัว ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ต

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและเหตุผล 1

1.2 วัตถุประสงค์ 4

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 5

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 6

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 6

2 ความรู้พื้นฐาน 8

2.1 กล่าวนำ 8

2.2 ชนิดของโครงข่ายรูปวงแหวน 8

2.2.1 วงแหวนแบบ Uni-directional 8

2.2.2 วงแหวนแบบ Bi-directional 9

2.3 การออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวง 10

2.4 โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบวงแหวนที่คำนึงถึงความสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง 11

2.4.1 การจัดสรรเส้นทางสำรองเมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง 11

2.4.1.1 การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection 12

2.4.1.2 การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Line Protection 12

2.4.2 การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองเมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง 13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2.1 การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองบนเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน 14
2.4.2.2 การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองบนเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง 14
2.5 Integer Linear Programming (ILP) 15
3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนวงเดียวโดยพิจารณาต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง 17
3.1 กล่าวนำ 17
3.2 ค่าขอบเขตจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุดของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย (Lower Bound Fiber) 18
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงกรณีไม่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย 24
3.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (No Wavelength Conversion : NWC) 25
3.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Conversion : WC) **26**
3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงกรณีที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย **27**
3.4.1 Optimized spare fiber assignment **27**
3.4.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันวามยาวคลื่น (No Wavelength Conversion : NWC) 28
3.4.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Conversion : WC) 29
3.4.2 Jointly optimized working and spare fiber assignment **30**
3.4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันวามยาวคลื่น (No Wavelength Conversion : NWC) 31
3.4.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Conversion : WC) 31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ 34
3.5.1 การวิเคราะห์โครงข่ายกรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย 34
3.5.1.1 การวิเคราะห์โครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment 36
3.5.1.1.1 วิเคราะห์การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection 37
3.5.1.1.2 วิเคราะห์การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Line Protection 38
3.5.1.2 การวิเคราะห์โครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment 38
3.5.1.2.1 วิเคราะห์การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection 39
3.5.1.2.2 วิเคราะห์การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Line Protection 40
3.5.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณีการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection กับ Line Protection 42
4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวง 46
4.1 กล่าวนำ 46
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงกรณีไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง 47
4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (No Wavelength Conversion : NWC) 48
4.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Conversion : WC) **49**
4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงกรณีที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย **50**
4.3.1 Optimized spare fiber assignment **50**
4.3.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันวามยาวคลื่น (No Wavelength Conversion : NWC) 50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Conversion : WC) 52
4.4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ 55
4.4.1 การวิเคราะห์โครงข่ายกรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย 55
4.4.1.1 การวิเคราะห์โครงข่าย No Protection 64
4.4.1.1.1 วิเคราะห์ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น 64
4.4.1.1.2 วิเคราะห์จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 64
4.4.1.1.3 วิเคราะห์ความซับซ้อนของโครงข่าย 65
4.4.1.2 การวิเคราะห์โครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายโดยวิธี Optimized spare fiber assignment 66
4.4.1.2.1 วิเคราะห์ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น 66
4.4.1.2.2 วิเคราะห์จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 67
4.4.1.2.3 วิเคราะห์ความซับซ้อนของโครงข่าย 68
4.4.1.3 การวิเคราะห์โครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายโดยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment 69
4.4.1.3.1 วิเคราะห์ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น 69
4.4.1.3.2 วิเคราะห์จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 70
4.4.1.3.3 วิเคราะห์ความซับซ้อนของโครงข่าย 71
5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวงโดยพิจารณาต้นทุนในเชิงจำนวนพอร์ตของโครงข่าย 75
5.1 กล่าวนำ 75
5.2 ลักษณะโครงสร้างของโนด 75
5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 77
5.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง 78

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง 80
5.4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ 85
5.4.1 การวิเคราะห์ลักษณะทราฟฟิกในรูปแบบต่างๆ 85
5.4.2 ความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 92
5.4.3 วิเคราะห์ต้นทุนในเชิงจำนวนพอร์ตของโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย 93
5.4.3.1 เปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตกรณีโครงข่ายแบบ No Protection กับโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยวิเคราะห์การออกแบบที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย 97
5.4.3.2 เปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตกรณีโครงข่ายแบบ No Protection กับโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยวิเคราะห์การออกแบบที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย 98
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 101
6.1 บทสรุป 101
6.2 ข้อเสนอแนะ 104
รายการอ้างอิง 105
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 107

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงถึงปริมาณทราฟฟิกในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายรูปวงแหวน กรณีที่เกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (ก) โครงข่ายขนาด 4 โนด (ข) โครงข่ายขนาด 5 โนด (ค) โครงข่ายขนาด 6 โนด (ง) โครงข่ายขนาด 7 โนด (จ) โครงข่ายขนาด 8 โนด (ฉ) โครงข่ายขนาด 9 โนด 20

ตารางที่ 3.2 ปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่มีค่า Traffic Volume เท่ากับ 1 ของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่มีขนาด 4 โนด 22

ตารางที่ 3.3 แสดงถึงอักษรย่อของแต่ละวิธีการปกป้องโครงข่ายเสียหาย 32

ตารางที่ 3.4 แสดงถึงตัวแปรที่ต้องกำหนดให้กับระบบ และผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 32

ตารางที่ 3.5 จำนวนตัวแปร (number of variables, Nv) และจำนวน constraint (number of constraints, Nc) ของแบบจำลองทางคณิตศาตร์สำหรับการออกแบบโครงข่าย WDM ที่คำนึงและไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง กรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น 33

ตารางที่ 3.6 ปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มี Traffic Volume เท่ากับ 2 ของโครงข่ายขนาด 5 โนด 34

ตารางที่ 3.7 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ (ก) กรณีโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Proteciton Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment 35

ตารางที่ 3.8 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวขนาด 5 โนด โดยปกป้องความเสียหายด้วยวิธี PSW กรณี NWC สำหรับการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment และ Jointly optimized working and spare fiber assignment โดยจัดสรรความยาวคลื่นสำรองที่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น กับการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองที่ใช้ค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกับค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง 41

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 3.9 ค่าขอบเขตจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุด (Lower Bound Fiber) สำหรับการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยมีปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม พิจารณาที่ค่า M = 2 โดยมีขนาดโครงข่ายรูปวงแหวนต่าง ๆ กัน 42

ตารางที่ 3.10 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่โครงข่ายต้องการสำหรับการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ (ก) Path Protection (ข) Line Protection โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment และจัดสรรความยาวคลื่นแบบ Shared Wavelength พิจารณาที่ค่า M = 2 ซึ่งโครงข่ายรองรับทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มีขนาดต่าง ๆ 43

ตารางที่ 4.1 แสดงถึงตัวแปรที่ต้องกำหนดให้กับระบบ และผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 53

ตารางที่ 4.2 จำนวนตัวแปร (number of variables, Nv) และจำนวน constraint (number of constraints, Nc) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง ที่คำนึงและไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ในกรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น 54

ตารางที่ 4.3 วงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่าย (ก) โครงข่าย 6N_7R (ข) โครงข่าย 4N_3R 56

ตารางที่ 4.4 ปริมาณความต้องการทราฟฟิกของแต่ละคู่โนด (ก) ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่มี Traffic Volume เท่ากับ 1 ของโครงข่าย 6N_7R (ข) ทราฟฟิกนอนยูนิฟอร์มของโครงข่าย 4N_3R 56

ตารางที่ 4.5 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 6N_7R ต้องการ (ก) กรณีโครงข่ายที่ไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment 57

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.6 จำนวน constraint (Nc) และจำนวนตัวแปร (Nv) ของโครงข่าย 6N_7R (ก) กรณีโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment 58

ตารางที่ 4.7 เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย (run time) ของโครงข่าย 6N_7R ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาที (ก) กรณีโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment 59

ตารางที่ 4.8 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 4N_3R ต้องการ (ก) กรณีโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network)โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment 60

ตารางที่ 4.9 จำนวน constraint (Nc) และจำนวนตัวแปร (Nv) ของโครงข่าย 4N_3R (ก) กรณีโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment 61

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.10 เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย (run time) ของโครงข่าย 4N_3R ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาที (ก) กรณีโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network)โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment 63

ตารางที่ 4.11 การเลือกวงแหวนของโครงข่าย 6N_7R กรณี NWC เพื่อรองรับปริมาณความต้องการทราฟฟิกของทุกคู่โนดที่ค่า M ต่าง ๆ โดยค่า 1 แสดงถึงการเลือกวงแหวนของโครงข่าย 65

ตารางที่ 4.12 การเลือกวงแหวนของโครงข่าย 4N_3R กรณี NWC เพื่อรองรับปริมาณความต้องการทราฟฟิกของทุกคู่โนดที่ค่า M ต่าง ๆ โดยค่า 1 แสดงถึงการเลือกวงแหวนของโครงข่าย 65

ตารางที่ 4.13 การเลือกวงแหวนของโครงข่าย 6N_7R กรณี WC สำหรับโครงข่ายที่คำนึงและไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย พิจารณาที่ M = 8 โดยค่า 1 แสดงถึงการเลือกวงแหวนของโครงข่าย 71

ตารางที่ 4.14 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 6N_7R โดยปกป้องความเสียหายด้วยวิธี PSW กรณี NWC สำหรับการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment และ Jointly optimized working and spare fiber assignment โดยจัดสรรความยาวคลื่นสำรองที่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น กับ การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองที่ใช้ค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกับค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง 73

ตารางที่ 5.1 แสดงถึงตัวแปรที่ต้องกำหนดให้กับระบบและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณี NWC 83

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 5.2 จำนวนตัวแปร (number of variables, Nv) และจำนวน constraint (number of constraints, Nc) ของแบบจำลองทางคณิตศาตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงโดยพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย กรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง สำหรับโครงข่ายที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น 84

ตารางที่ 5.3 แสดงถึงโนดของวงแหวนแต่ละวง 85

ตารางที่ 5.4 จำนวนพอร์ตทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ (Total Port) และจำนวนพอร์ตเฉลี่ยต่อโนด (Node Scale) ซึ่งมีการกระจายปริมาณทราฟฟิกรูปแบบต่าง ๆ โดยมีจำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพลกซ์ลงบนเส้นใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้นเท่ากับ 2 (ก) ทราฟฟิกแบบ Single-star (ข) ทราฟฟิกแบบ Dual-star (ค) ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม กรณีการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย สำหรับโครงข่ายที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น 86

ตารางที่ 5.5 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จำนวน Inter-office Port และ จำนวน Intra-office Port ที่โครงข่ายต้องการ ซึ่งมีการกระจายปริมาณทราฟฟิกรูปแบบต่าง ๆ โดยมีจำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพลกซ์ลงบนเส้นใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้นเท่ากับ 2 (ก) ทราฟฟิกแบบ Single-star (ข) ทราฟฟิกแบบ Dual-star (ค) ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม กรณีการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย สำหรับโครงข่ายที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น 87

ตารางที่ 5.6 แสดงลักษณะการเลือกวงแหวนของการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตกรณี NWC โดยโครงข่ายรองรับทราฟฟิกแบบ Dual-star ซึ่งมีขนาดปริมาณความต้องการทราฟฟิกของคู่โนดเท่ากับ 2 91

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 5.7 เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยปกป้องความเสียหายแบบ PSW ซึ่งพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย กรณี NWC และรองรับปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มีขนาดเท่ากับ 2 ; * หมายถึงไม่สามารถหาผลเฉลยได้ในเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากกำหนดเวลาในการหาผลเฉลยไม่เกิน 1 วันครึ่ง และ Out of memory หมายถึง โปรแกรม CPLEX ไม่สามารถหาผลเฉลยของแบบจำลองภายใต้ข้อจำกัดหน่วยความจำที่ใช้ในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ 92

ตารางที่ 5.8 จำนวน Inter-office Port ทั้งหมดของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อออกแบบโดยพิจารณาต้นทุนของพอร์ต ซึ่งปกป้องความเสียหายแบบ PSW และ LSW 94

ตารางที่ 5.9 จำนวน Intra-office Port ทั้งหมดของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อออกแบบโดยพิจารณาต้นทุนของพอร์ต ซึ่งปกป้องความเสียหายแบบ PSW และ LSW 95

ตารางที่ 5.10 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย เมื่อปกป้องความเสียหายแบบ PSW และ LSW (ก) การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนเฉพาะเส้นใยแก้วนำแสง (ข) การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ต 95

ตารางที่ 5.11 เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย (run time) ของโครงข่ายขนาด 4 โนด และมีวงแหวนที่เป็นไปได้ 3 วงแหวน ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาที (ก) โครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (ข) โครงข่ายที่ปกป้องความเสียหายแบบ PSW และ LSW 96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น WDM 1

รูปที่ 1.2 โครงสร้างภายในโนดของโครงข่าย WDM (ก) กรณีที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น 2

รูปที่ 1.3 ประเภทของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง WP และ VWP 3

รูปที่ 2.1 (ก) วงแหวนแบบ Uni-directional (ข) วงแหวนแบบ Bi-directional 9

รูปที่ 2.2 การออกแบบโครงข่ายลักษณะที่ 1 10

รูปที่ 2.3 การออกแบบโครงข่ายลักษณะที่ 2 10

รูปที่ 2.4 การจัดสรรเส้นทางสำรองกรณีหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายแบบ Path Protection และ Line Protection 12

รูปที่ 2.5 การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองบนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง โดยจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection 14

รูปที่ 2.6 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นโดยใช้ Integer Linear Programming 16

รูปที่ 2.7 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นโดยใช้ Linear Programming 16

รูปที่ 3.1 (ก) โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงในสภาวะการทำงานปกติ (ข) โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงเมื่อได้รับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง 18

รูปที่ 3.2 เป็นแผนภาพแสดงถึงการจัดสรรเส้นทางของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง กรณีที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย (ก) โครงข่ายขนาด 4 โนด (ข) โครงข่ายขนาด 5 โนด 19

รูปที่ 3.3 โครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 5 โนด 34

รูปที่ 4.1 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) โครงข่าย 6N_7R (ข) โครงข่าย 4N_3R 55

รูปที่ 5.1 โครงสร้างภายในโนดของโครงข่ายรูปวงแหวน 76

รูปที่ 5.2 สถาปัตยกรรมโครงสร้างภายในโนด 76

รูปที่ 5.3 โครงข่ายขนาด 7 โนด 7 วงแหวน 85

รูปที่ 5.4 ลักษณะทราฟฟิกในรูปแบบต่าง ๆ 85

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.5 โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงขนาด 7 โนด ซึ่งรองรับทราฟฟิกแบบ Single-star โดยมีโนด 1 เป็น Hub เพื่อรวมปริมาณทราฟฟิกจากโนดอื่น ๆ (ก) กรณีการจัดสรรความยาวคลื่นสำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย (ข) กรณีการจัดสรรความยาวคลื่นสำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 90

รูปที่ 5.6 โครงข่ายขนาด 4 โนด และมีวงแหวน 3 วงแหวน 94

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

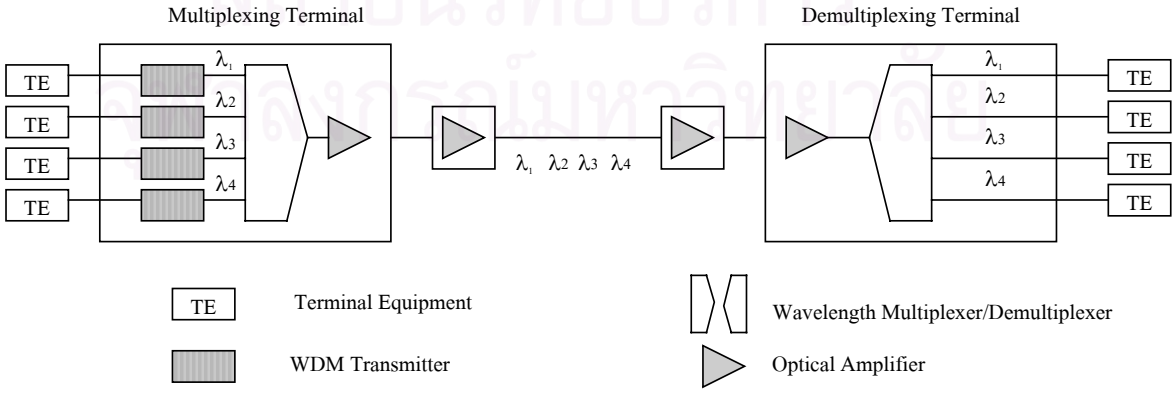
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและเหตุผล

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาโครงข่ายทางแสง (Optical Network) [1-3] บนพื้นฐานการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing : WDM) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากว่าการรับส่งข้อมูลระหว่างต้นทางและปลายทางจะทำการส่งข้อมูลโดยใช้แสงเป็นสื่อกลาง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ระหว่างเส้นทางของการสื่อสารทำให้สามารถส่งข้อมูลในอัตราที่สูงได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ประโยชน์จากแบนด์วิดท์ของเส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถนำมารองรับการสื่อสารในปัจจุบันที่ต้องการความจุและอัตราการส่งข้อมูลที่สูง เช่น อินเทอร์เน็ต และ LAN เป็นต้น จากที่กล่าวมาทำให้นักวิจัยหลายท่านเล็งเห็นถึงประโยชน์และข้อดีต่าง ๆ ของโครงข่ายประเภทนี้ จึงได้มีการพัฒนาและออกแบบโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นเพื่อสามารถนำมารองรับการสื่อสารที่มีความเร็วสูงในอนาคต

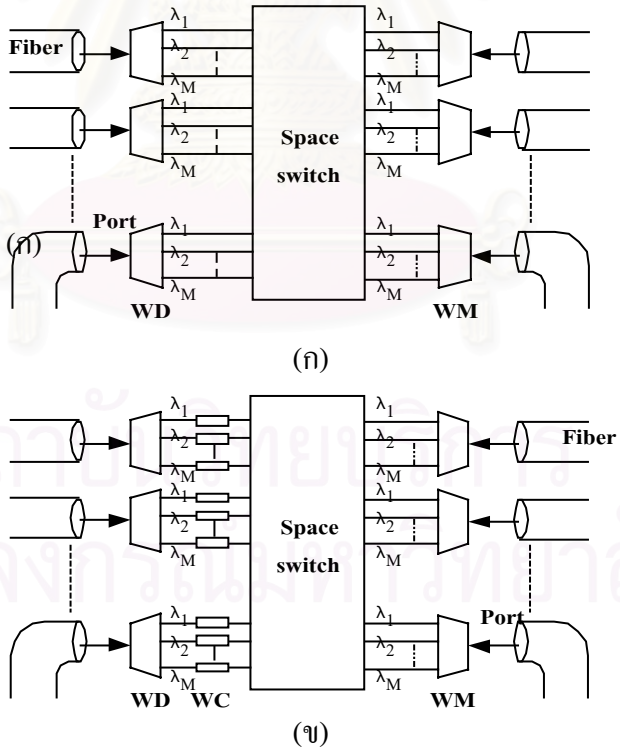
ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นเป็นวิธีการมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่นหลาย ๆ ความยาวคลื่นลงบนเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น โดยความยาวคลื่นค่าหนึ่งก็จะแทนสายข้อมูล 1 สาย (Data Stream) ในการรวมความยาวคลื่นหลาย ๆ ความยาวคลื่นลงบนเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้นจะใช้ตัวมัลติเพลกซ์เชิงความยาวคลื่น (Wavelength Multiplexer) และในการแยกความยาวคลื่นแต่ละความยาวคลื่นออกจากเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อให้ได้ข้อมูลกลับคืนมาจะใช้ตัวดีมัลติเพลกซ์เชิงความยาวคลื่น (Wavelength Demultiplexer) จากที่กล่าวมาจะเห็นว่า เทคโนโลยี WDM สามารถส่งข้อมูลหลาย ๆ ข้อมูลลงบนเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น จึงสามารถช่วยเพิ่มความจุให้กับเส้นใย



รูปที่ 1.1 ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น WDM

แก้วนำแสงได้ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการสื่อสารข้อมูลระยะไกล เนื่องจากไม่จำเป็นต้องวางเส้นใยแก้วนำแสงมากซึ่งสิ้นเปลืองทั้งค่าใช้จ่ายและเวลาในการวางเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย โดยรูปที่ 1.1 เป็นการส่งสัญญาณแบบจุดต่อจุดในระบบมัลติเพลกซ์แบบ WDM โดยภาคส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงและเครื่องส่งสัญญาณ (WDM Transmitter) เพื่อแปลงสัญญาณข้อมูลทางไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง และทำการมัลติเพลกซ์ลงบนเส้นใยแก้วนำแสงด้วยตัวมัลติเพลกซ์ (Wavelength Multiplexer) ส่วนเส้นทางการรับส่งข้อมูลอาจมีเครื่องขยายสัญญาณแสง (Optical Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณทางแสงเพื่อให้ส่งได้ไกลยิ่งขึ้น ภาครับประกอบด้วยตัวดีมัลติเพลกซ์ (Wavelength Demultiplexer) ทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงออกเป็นแต่ละความยาวคลื่น

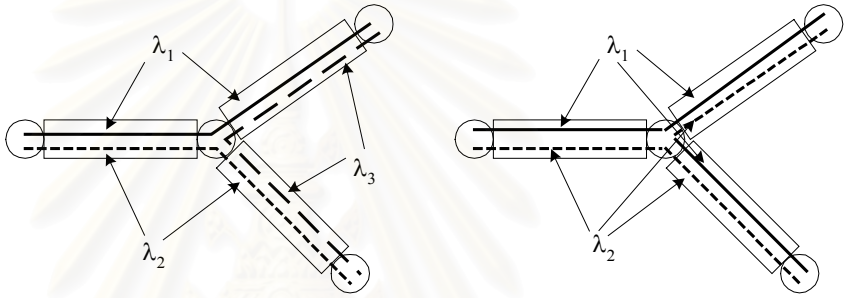
โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง (WDM) [4] ประกอบด้วยโนด (Node) และข่ายเชื่อมโยง (Link) โดยข่ายเชื่อมโยงจะเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อระหว่างโนดในโครงข่าย โนดจะทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลผ่านข่ายเชื่อมโยงซึ่งก็คือเส้นใยแก้วนำแสง อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโนดประกอบด้วย Wavelength Multiplexer (WM), Wavelength Demultiplexer (WD) และ Space Switch และอาจมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter) เพื่อเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นของช่องสัญญาณที่ส่งผ่านโนดในโครงข่าย อุปกรณ์ทั้งหมดภายในโนดของโครงข่ายที่กล่าวมานี้เรียกว่า Optical cross connect (OXCs) ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 โครงสร้างภายในโนดของโครงข่าย WDM (ก) กรณีที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท [5-6] ตามการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 1.3

1. Wavelength Path (WP) หมายถึง การที่เส้นทางการเชื่อมต่อจากโนดต้นทางไปถึงโนดปลายทางจะต้องมีการจัดสรรความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวตลอดเส้นทาง ไม่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นเมื่อเส้นทางผ่านโนดของโครงข่ายได้ ดังนั้นโครงข่ายประเภทนี้จึงไม่ต้องมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ OXCs
2. Virtual Wavelength Path (VWP) หมายถึง กรณีที่เส้นทางการเชื่อมต่อจากโนดต้นทางไปถึงโนดปลายทางสามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นที่โนดต่าง ๆ ในโครงข่ายได้ ไม่จำเป็นต้องใช้ความยาวคลื่นค่าเดียวตลอดเส้นทาง จึงจำเป็นที่จะต้องมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ OXCs



รูปที่ 1.3 ประเภทของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง WP และ VWP

การออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงมีทั้งการออกแบบโครงข่ายโดยมีพื้นฐานโครงสร้างแบบเมช (Mesh) [6-7] และแบบวงแหวน [8-9] ซึ่งการออกแบบโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมชนั้นมีลักษณะการเชื่อมต่อภายในของโครงข่ายที่สูงจึงมีประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์ค่อนข้างมากแต่ปัญหาที่พบในโครงข่ายประเภทนี้คือ โครงข่ายมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ดังนั้นในกรณีเกิดความเสียหายขึ้นภายในโครงข่าย เช่น อุปกรณ์บางส่วนภายในโครงข่ายไม่ทำงาน หรือ เส้นใยแก้วนำแสงขาด โครงข่ายแบบเมชจะมีขั้นตอนในการควบคุมและแก้ไขความเสียหายที่เกิดภายในโครงข่ายค่อนข้างยุ่งยาก เป็นเหตุให้นักวิจัยหลาย ๆ ท่านได้ทำการศึกษาวิจัยการออกแบบโครงข่ายที่มีโครงสร้างรูปวงแหวน ซึ่งโครงข่ายประเภทนี้มีข้อเสียในการใช้ประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ค่อนข้างต่ำ แต่ก็มีส่วนที่เป็นที่น่าสนใจในหลาย ๆ ด้านเมื่อคำนึงถึงประโยชน์และต้นทุนโดยรวมทั้งหมดของโครงข่าย สิ่งที่น่าสนใจของโครงข่ายที่มีโครงสร้างรูปวงแหวน คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายแบบวงแหวนมีความซับซ้อนน้อยกว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายแบบเมช โดยโครงข่ายแบบวงแหวนใช้เพียงตัว Add-Drop Multiplexers ในการรับส่งสัญญาณทางแสง ในขณะที่โครงข่ายแบบเมชต้องใช้ Optical Cross-connects ซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่า ถ้าพิจารณาโครงสร้างของโครงข่าย โครงสร้างแบบวงแหวนมีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่าแบบเมช ดังนั้นเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นในโครงข่าย ไม่ว่ากรณีที่เส้นใยแก้วนำแสงขาด หรืออุปกรณ์บางตัวไม่ทำงาน โครงข่ายแบบวงแหวนสามารถ

ควบคุมและแก้ไขความเสียหายต่าง ๆ ได้รวดเร็วและแน่นอนกว่าโครงข่ายแบบเมช เพราะโครงข่ายแบบวงแหวนมีเส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างคู่โนดหนึ่ง ๆ สองทาง ดังนั้นเมื่อเส้นทางหนึ่งเกิดความเสียหายจึงสามารถใช้อีกเส้นทางหนึ่งในการรับส่งข้อมูลระหว่างคู่โนดได้ อีกทั้งการควบคุมและจัดการเมื่อเกิดความเสียของโครงข่ายที่มีโครงสร้างรูปวงแหวนสามารถใช้อุปกรณ์ที่เป็นฮาร์ดแวร์เกือบทั้งหมด ซึ่งต่างจากโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมชจำเป็นต้องใช้ทั้งอุปกรณ์ที่เป็นฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์ทำให้มีความยุ่งยากและซับซ้อนค่อนข้างมาก ดังนั้นเมื่ออุปกรณ์ที่เป็นซอฟท์แวร์มีปัญหาผลเสียที่เกิดขึ้นในการควบคุมและจัดการ โครงข่ายแบบเมชย่อมมีมากกว่าโครงข่ายแบบวงแหวน จากที่กล่าวมาทั้งหมดนักวิจัย [16] หลายท่านจึงเล็งเห็นประโยชน์และข้อดีต่าง ๆ ของโครงข่ายที่มีโครงสร้างบนพื้นฐานรูปวงแหวนและได้ทำการพัฒนาและออกแบบโครงข่ายให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นเพื่อนำมาใช้งานในทางปฏิบัติได้อย่างเหมาะสม

เนื่องจากความเสียหายของโครงข่าย WDM นั้นมีหลายประเภท เช่น ความเสียหายของโนด (Node Failure) หรืออาจเกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง (Link Failure) ซึ่งส่วนนี้อาจทำให้การส่งข้อมูลเกิดการสูญหายได้ (Loss) และยังส่งผลกระทบถึงผู้ใช้บริการโครงข่ายเป็นอย่างมาก ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายจึงต้องพิจารณาไปถึงเหตุการณ์ที่เกิดความเสียหาย โดยในวิทยานิพนธ์จะพิจารณาการออกแบบโครงข่ายที่สามารถรองรับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Single Link Failure) และได้ศึกษาการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่มีพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนวงเดียวและวงแหวนหลายวง ซึ่งพิจารณาต้นทุนของโครงข่ายในส่วนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ สำหรับการออกแบบโครงข่ายเพื่อหาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงด้วยวิธีนี้ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงหรือจำนวนพอร์ตที่ได้จากการออกแบบจะมีค่าต่ำที่สุด และได้นิยามต้นทุนของโครงข่ายในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง (Network Fiber Cost) คือผลคูณของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดในการออกแบบโครงข่ายกับจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้น (M)

$$\text{Network cost} = \text{Total number of fiber requirement} \times M$$

1.2 วัตถุประสงค์

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่มีพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนวงเดียวและวงแหวนหลายวง ที่คำนึงถึงผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายโดยพิจารณาเฉพาะต้นทุนของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดในโครงข่าย สำหรับกรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่มีพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวง ที่คำนึงถึงผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยพิจารณาต้นทุนขนาดโนดของโครงข่าย ซึ่งโนดจะมีพอร์ตที่ใช้รองรับเส้นใยแก้วนำแสงและพอร์ตที่ใช้สำหรับ Add หรือ Drop ข้อมูล กรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวง โดยกระจายทราฟฟิกทั้งหมดของแต่ละคู่โนดลงบนวงแหวนเพียงวงเดียว ในกรณีที่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ทั้งที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยให้มีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายต่ำที่สุด
2. ศึกษาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่าสามารถลดต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่มีโครงสร้างบนพื้นฐานรูปวงแหวนหลายวง ในกรณีที่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย
3. ออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวง โดยกระจายทราฟฟิกทั้งหมดของแต่ละคู่โนดลงบนวงแหวนเพียงวงเดียว ในกรณีที่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ทั้งที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยให้มีขนาดโนดของโครงข่ายต่ำที่สุด ซึ่งโนดจะมีพอร์ตที่ใช้รองรับเส้นใยแก้วนำแสงและพอร์ตที่ใช้สำหรับ Add หรือ Drop ข้อมูล
4. ศึกษาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่าสามารถลดต้นทุนขนาดโนดของโครงข่ายที่มีโครงสร้างบนพื้นฐานรูปวงแหวนหลายวง ซึ่งโนดจะมีพอร์ตที่ใช้รองรับเส้นใยแก้วนำแสงและพอร์ตที่ใช้สำหรับ Add หรือ Drop ข้อมูล ในกรณีที่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย
5. เปรียบเทียบต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย ในกรณีการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่พิจารณาต้นทุนเฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบที่พิจารณาต้นทุนขนาดโนดของโครงข่าย ซึ่งโนดจะมีพอร์ตที่ใช้รองรับเส้นใยแก้วนำแสงและพอร์ตที่ใช้สำหรับ Add หรือ Drop ข้อมูล

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
   1.1 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing : WDM)
   1.2 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมชทั้งกรณีโครงข่ายปกติและโครงข่ายที่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย
   1.3 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายที่มีโครงสร้างบนพื้นฐานรูปวงแหวนวงเดียวและวงแหวนหลายวง ทั้งกรณีโครงข่ายปกติและโครงข่ายที่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematics Model) สำหรับโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนวงเดียวและวงแหวนหลายวง
   2.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาต้นทุนเฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับแบบจำลองที่พิจารณาจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย กรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
   2.2 หาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากหัวข้อ 2.1 ศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนในเชิงเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย กรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
   2.3 ศึกษาต้นทุนในเชิงเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่ายที่มีการรองรับทราฟฟิกรูปแบบต่าง ๆ
3. รวบรวมผลทั้งหมดพร้อมทั้งทำการวิเคราะห์และสรุปผลเพื่อนำไปเขียนวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนวงเดียวและวงแหวนหลายวงซึ่งสามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ทั้งกรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นให้มีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายต่ำที่สุดได้

2. สามารถออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวงซึ่งสามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ทั้งกรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นให้มีขนาดโนดของโครงข่ายต่ำที่สุด ซึ่งโนดจะมีพอร์ตที่ใช้รองรับเส้นใยแก้วนำแสงและพอร์ตที่ใช้สำหรับ Add หรือ Drop ข้อมูล
3. ทำให้ทราบถึงผลของการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในโครงข่ายที่มีโครงสร้างบนพื้นฐานรูปวงแหวนวงเดียวและวงแหวนหลายวง ในกรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย
4. ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐาน

2.1 กล่าวนำ

ในโครงข่าย WDM เมื่อระบบมีความต้องการรองรับปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดหนึ่ง โครงข่ายต้องทำการสร้างวิถี (Path) ให้กับคู่โนดนั้น โดยการจัดสรรเส้นทาง (Route) และช่องสัญญาณทางแสง (Optical Channel) ซึ่งจะกำหนดเป็นค่าความยาวคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสง (Wavelength) ให้แต่ละทราฟฟิกของคู่โนด ในสภาวะปกติของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่วางในระบบเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของแต่ละคู่โนดเรียกว่า เส้นใยแก้วนำแสงทำงาน (Working Fiber) และเมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Single Link Failure) เส้นใยแก้วนำแสงที่เพิ่มเพื่อให้โครงข่ายสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบเรียกว่า เส้นใยแก้วนำแสงสำรอง (Spare Fiber) ซึ่งในส่วนนี้โครงข่ายต้องมีขั้นตอนในการรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบโดยจะมีการปกป้องโครงข่าย (Protection) ในแบบต่าง ๆ

บทนี้จะกล่าวถึง ลักษณะขั้นตอนการออกแบบโครงข่ายที่มีโครงสร้างรูปวงแหวน การปกป้องโครงข่ายที่ได้รับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection) และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำไปใช้ออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง

2.2 ชนิดของโครงข่ายรูปวงแหวน

การส่งข้อมูลระหว่างโนดต้นทางและโนดปลายทางของโครงข่ายรูปวงแหวนจะมีทิศทางการส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับชนิดของวงแหวน ซึ่งทำให้การรับส่งข้อมูลของวงแหวนแต่ละแบบมีการส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งประเภทของวงแหวนได้เป็น 2 ประเภท [4] คือ วงแหวนแบบ Uni-directional กับวงแหวนแบบ Bi-directional ซึ่งวงแหวนทั้งสองแบบมีลักษณะการส่งข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้

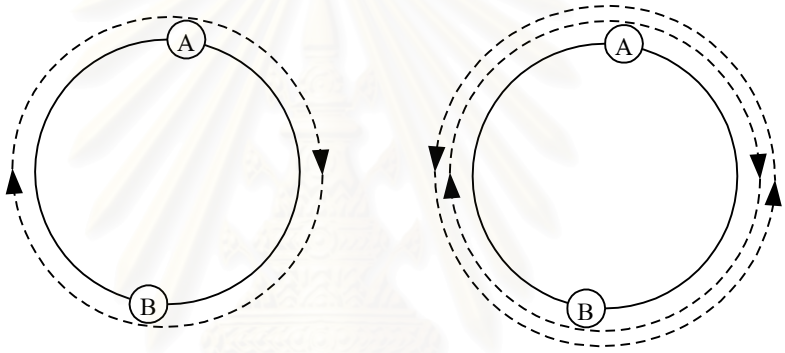
2.2.1 วงแหวนแบบ Uni-directional

การส่งข้อมูลจากโนดต้นทางไปถึงปลายทางของวงแหวนแบบ Uni-directional จะมีทิศทางการส่งข้อมูลเพียงทิศทางเดียว โดยจากรูปที่ 2.1 (ก) ถ้าต้องการส่งข้อมูลจากโนด A ไป B สามารถส่งข้อมูลในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเท่านั้น ไม่สามารถส่งข้อมูลในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาได้ ดังนั้น

การวางเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่มีโครงสร้างรูปวงแหวนแบบ Uni-directional จึงเป็นการวางเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อรองรับการส่งข้อมูลในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น

2.2.2 วงแหวนแบบ Bi-directional

สำหรับการส่งข้อมูลจากโนดต้นทางไปถึงปลายทางของวงแหวนแบบ Bi-directional จะมีการส่งข้อมูลได้สองทิศทาง จากรูปที่ 2.1 (ข) ถ้าต้องการส่งข้อมูลจากโนด A ไป B สามารถส่งข้อมูลในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกาก็ได้ ดังนั้นในการวางเส้นใยแก้วนำแสงของหนึ่งการเชื่อมต่อของคู่โนดจึงต้องวางเส้นใยแก้วนำแสงเป็นคู่ ๆ คือ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่วางเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่รองรับในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจะต้องเท่ากับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่วางเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาซึ่งทำให้การส่งข้อมูลบนเส้นทางเดียวกันระหว่างคู่โนดหนึ่ง ๆ ในโครงข่ายประเภทนี้สามารถส่งข้อมูลได้ทั้งไปและกลับ



รูปที่ 2.1 (ก) วงแหวนแบบ Uni-directional
(ข) วงแหวนแบบ Bi-directional

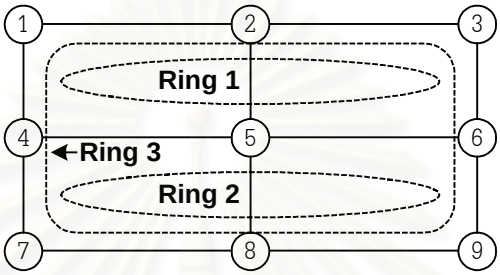
เนื่องจากว่าวงแหวนแบบ Bi-directional การส่งข้อมูลจากโนดต้นทางไปถึงปลายทางสามารถเลือกเส้นทางเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกได้ 2 เส้นทาง คือ เส้นทางในทิศตามเข็มนาฬิกาหรือเส้นทางในทิศทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นคู่โนดหนึ่งสามารถเลือกเส้นทางที่เหมาะสมเส้นทางใดเส้นทางหนึ่งเพื่อให้การออกแบบโครงข่ายมีต้นทุนต่ำที่สุด ซึ่งสามารถเลือกเส้นทางที่สั้นกว่าหรือยาวกว่าก็ได้ หรือเส้นทางทั้งสองเส้นอาจมีความยาวเท่ากัน จึงเป็นการใช้เส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าโครงข่ายรูปวงแหวนแบบ Uni-directional จากลักษณะที่กล่าวมาทั้งหมดในวิทยานิพนธ์จะทำการศึกษาโครงข่ายรูปวงแหวนแบบ Bi-directional เพื่อออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตของโครงข่ายต่ำที่สุด

ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนวงเดียวซึ่งมีประสิทธิภาพการใช้แบนด์วิดท์ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านได้เสนอการออกแบบ

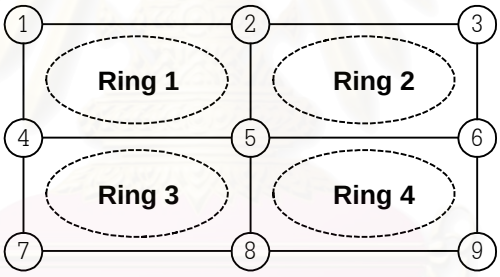
โครงข่ายโดยใช้วงแหวนหลายวงเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในส่วนต่อไป

2.3 การออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวง

การออกแบบโครงข่ายโดยใช้วงแหวนหลายวงในการรองรับปริมาณทราฟฟิก [10-12] ลักษณะการเลือกวงแหวนของโครงข่ายจะขึ้นอยู่กับการกระจายทราฟฟิกของหนึ่งคู่โนด ซึ่งสามารถแบ่งการออกแบบโครงข่าย [17] ได้ 2 ลักษณะ



รูปที่ 2.2 การออกแบบโครงข่ายลักษณะที่ 1



รูปที่ 2.3 การออกแบบโครงข่ายลักษณะที่ 2

การออกแบบโครงข่ายในลักษณะที่ 1 สามารถเลือกวงแหวนเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดได้ 2 วิธี คือ ให้ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของแต่ละคู่โนดถูกรองรับด้วยวงแหวนเพียงวงเดียว กับอีกวิธีคือสามารถแบ่งปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดให้กับวงแหวนหลาย ๆ วง จากรูปที่ 2.2 เมื่อต้องการส่งปริมาณ 5 ช่องสัญญาณจากโนดที่ 1 ไปโนดที่ 6 สามารถเลือกวงแหวนที่ 3 เพียงวงเดียวในการรองรับทราฟฟิกทั้งหมด หรืออาจจะแบ่งปริมาณทราฟฟิกเป็น 2 ช่องสัญญาณและ 3 ช่องสัญญาณ โดยให้ปริมาณทราฟฟิก 2 ช่องสัญญาณถูกรองรับด้วยวงแหวนที่ 1 และปริมาณทราฟฟิก 3 ช่องสัญญาณถูกรองรับด้วยวงแหวนที่ 3 ดังนั้นการออกแบบลักษณะนี้จึงต้องเลือกวงแหวนที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกแต่ละคู่โนดได้

การออกแบบโครงข่ายในลักษณะที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายมีความซับซ้อนมากขึ้น โนดต้องสามารถส่งผ่านปริมาณทราฟฟิกข้ามวงแหวนได้ ในขณะที่การออกแบบโครงข่ายใน

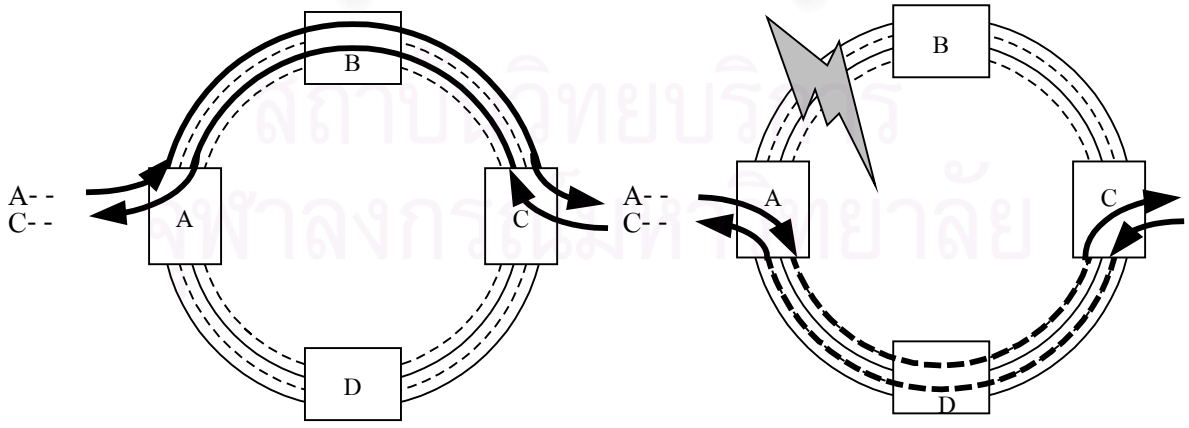
ลักษณะที่ 1 โนดไม่จำเป็นที่จะต้องส่งปริมาณทราฟฟิกข้ามวงแหวนจึงทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายมีความซับซ้อนน้อยกว่า อีกทั้งการจัดการและควบคุมโครงข่ายก็สามารถจัดการได้ง่ายกว่า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์จึงศึกษาวิจัยการออกแบบโครงข่ายในลักษณะที่ 1 และให้ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของแต่ละคู่โนดรองรับด้วยวงแหวนวงเดียว เพื่อออกแบบโครงข่ายให้มีการจัดการที่ง่ายและมีต้นทุนของโครงข่ายต่ำที่สุด

2.4 โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงแบบวงแหวนที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

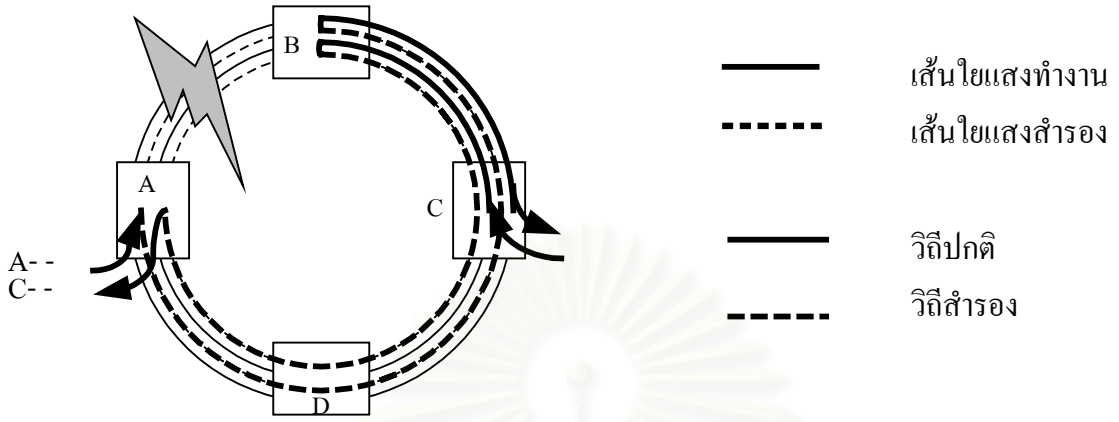
ในโครงข่ายปกติเมื่อมีการส่งข้อมูลจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทาง โครงข่ายจะต้องทำการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับคู่โนดนั้น ๆ ซึ่งปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดจะถูกรองรับด้วยเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน ในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายได้รับความเสียหายการติดต่อสื่อสารระหว่างคู่โนดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายนั้นย่อมได้รับผลกระทบ คือไม่สามารถส่งข้อมูลระหว่างคู่โนดได้ โครงข่ายจึงต้องทำการจัดสรรเส้นทางสำรองและความยาวคลื่นสำรองใหม่ให้กับคู่โนด ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายจึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง เพื่อให้โครงข่ายสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้ ต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดในการจัดสรรเส้นทางสำรองและความยาวคลื่นสำรองให้กับโครงข่าย [13]

2.4.1 การจัดสรรเส้นทางสำรองเมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

การจัดสรรเส้นทางสำรองให้กับโครงข่ายที่มีโครงสร้างรูปวงแหวนนั้นสามารถแบ่งการจัดการเส้นทางสำรองได้ 2 วิธี คือ Path Protection กับ Line Protection ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละวิธี [13] ดังนี้



(ก) โครงข่ายสภาวะปกติ (ข) Path Protection



(ค) Line Protection

รูปที่ 2.4 การจัดสรรเส้นทางสำรองกรณีหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายแบบ Path Protection และ Line Protection

2.4.1.1 การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection

เนื่องจากในการส่งข้อมูลจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางในโครงข่ายรูปวงแหวนสามารถส่งข้อมูลได้ 2 เส้นทาง คือเส้นทางในทิศตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นเมื่อโนดต้นทางไม่สามารถส่งข้อมูลบนเส้นทางที่ได้รับผลกระทบของความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยงโนดต้นทางยังสามารถส่งข้อมูลได้อีกเส้นทางหนึ่ง จากรูปที่ 2.4 (ก) เป็นโครงข่ายที่มีสภาวะการทำงานปกติ เมื่อมีการส่งข้อมูลจากโนด A ไปยังโนด C โดยใช้เส้นทาง A-B-C รองรับปริมาณทราฟฟิกของคู่โนด จากรูปที่ 2.4 (ข) เมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงที่ตำแหน่ง A-B โนด A ไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังโนด C โดยใช้เส้นทางเดิมได้ ดังนั้นโนด A จึงต้องเปลี่ยนเส้นทางที่ใช้รองรับทราฟฟิกเป็น A-D-C เพื่อทำการส่งข้อมูลไปยังโนด C จากที่กล่าวมาเมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหาย โนดต้นทางจะทำการส่งข้อมูลในอีกเส้นทางหนึ่งซึ่งโนดปลายทางจำเป็นต้องทราบผลของความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงและทำการเปลี่ยนเส้นทางในการรับข้อมูล จะเห็นว่าโครงข่ายมีความซับซ้อนในการจัดการและแก้ไขค่อนข้างมาก หัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงการจัดเส้นทางสำรองอีกวิธีหนึ่งซึ่งมีการจัดการโครงข่ายได้ง่ายกว่า

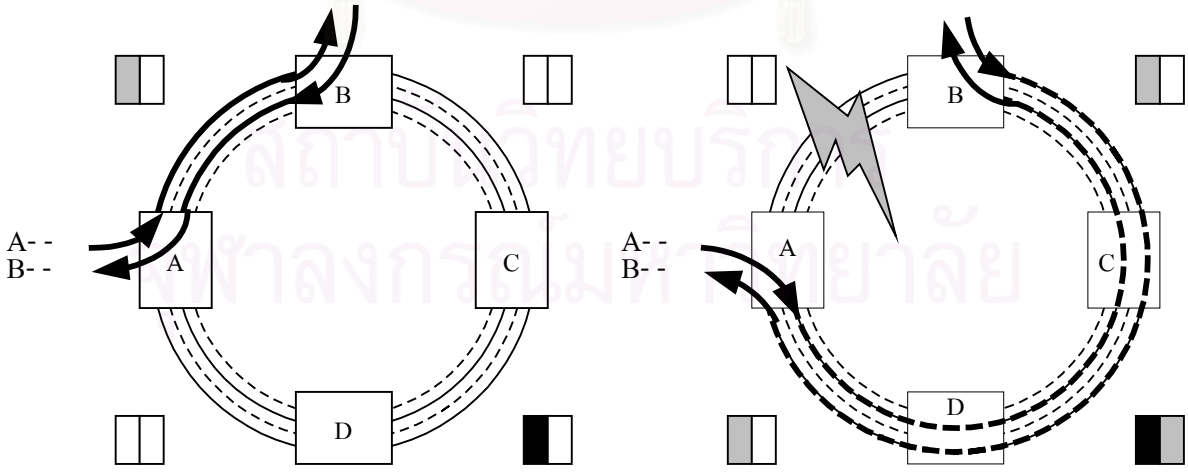
2.4.1.2 การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Line Protection

การจัดเส้นทางสำรองของโครงข่ายด้วยวิธี Line protection จะมีการจัดการโครงข่ายซับซ้อนน้อยกว่า Path Protection โดยในสภาวะโครงข่ายปกติเมื่อโนดต้นทางต้องการส่งข้อมูลไปยังโนดปลายทาง โครงข่ายจะทำการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับคู่โนดนั้น ๆ เมื่อเส้นทาง

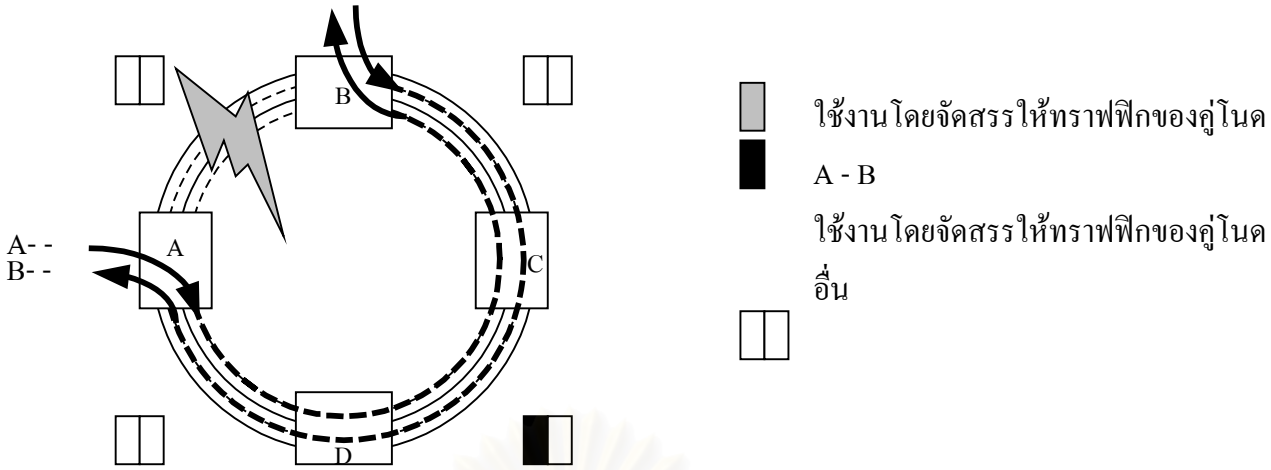
ที่ใช้รองรับข้อมูลได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โนดต้นทางยังคงส่งข้อมูลไปยังโนดปลายทางโดยใช้เส้นทางเดิมแต่ตรงตำแหน่งที่ข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย โครงข่ายจะทำการจัดสรรเส้นทางสำรองเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกในทิศทางตรงกันข้ามซึ่งมีความยาวของเส้นทางสำรองคงที่ตลอดเท่ากับ N – 1 โดย N คือ จำนวนโนดทั้งหมดในโครงข่าย จากรูปที่ 2.4 (ค) สามารถแสดงตัวอย่างการจัดเส้นทางสำรองของโครงข่าย โดยในสภาวะโครงข่ายปกติโนด A จะทำการส่งข้อมูลไปยัง โนด C ซึ่งส่งข้อมูลบนเส้นทาง A-B-C เมื่อข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายที่ตำแหน่ง A-B โครงข่ายจะทำการจัดเส้นทางสำรอง A-D-C-B เพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายซึ่งเป็นทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นทางปกติ จะเห็นได้ว่าโนดต้นทางและโนดปลายทางไม่มีความจำเป็นต้องเปลี่ยนเส้นทางในการรับส่งข้อมูล ดังนั้นการจัดการของโครงข่ายโดยใช้การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Line Protection จึงมีความยุ่งยากน้อยกว่า Path Protection แต่มีข้อเสียเรื่องการประวิงเวลาในการส่งข้อมูล เพราะต้องส่งผ่านบนเส้นทางสำรองที่มีความยาวค่อนข้างมาก

2.4.2 การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองเมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

เมื่อโครงข่ายทำการจัดสรรเส้นทางสำรองให้กับทราฟฟิกของคู่โนดที่ได้รับผลกระทบของข่ายเชื่อมโยงเสียหายแล้ว ต่อไปจึงทำการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองให้กับทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบ ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองได้ 2 วิธี [13] คือ การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองบนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานกับอีกวิธีหนึ่ง คือ การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองบนเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง โดยมีรายละเอียดแต่ละวิธีการดังนี้



(ก) โครงข่ายสภาวะปกติ (ข) จัดสรรบนเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน



(ค) จัดสรรบนเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง

รูปที่ 2.5 การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองบนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง โดยจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection

2.4.2.1 การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองบนเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน

โครงข่ายปกติที่มีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกของทุกคู่โนด ความจุของเส้นใยแก้วนำแสงทำงานอาจมีเหลือเนื่องจากไม่สามารถจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้เหมาะสมเพื่อใช้ความจุของเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดได้ ดังนั้นในกรณีที่เกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงโครงข่ายจะทำการจัดสรรเส้นทางสำรองให้กับทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบ ซึ่งในการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางสำรองจะพิจารณาความจุของช่องสัญญาณบนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานก่อน ในกรณีที่ความจุของช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงทำงานไม่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิก จึงค่อยจัดสรรความยาวคลื่นลงบนเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง จากรูปที่ 2.5 (ก) เป็นโครงข่ายสภาวะปกติที่มีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นโดยมีจำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพล็กซ์ลงบนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับ 2 เมื่อข่ายเชื่อมโยง A-B ได้รับความเสียหาย โครงข่ายจะทำการจัดสรรเส้นทางสำรองให้กับคู่โนด A และ B ดังในรูปที่ 2.5 (ข) โดยมีเส้นทางสำรองเป็น A-D-C-B ในการจัดสรรความยาวคลื่นจะพิจารณาความจุของช่องสัญญาณที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานก่อน ซึ่งจากรูปที่ 2.5 (ข) จะเห็นว่าความจุของช่องสัญญาณที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานเพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกดังกล่าว

2.4.2.2 การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองบนเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง

สำหรับการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองบนเส้นใยแก้วนำแสงด้วยวิธีนี้จะไม่พิจารณาความจุของช่องสัญญาณที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน ดังนั้นเมื่อข่ายเชื่อมโยงได้รับความ

เสียหายโครงข่ายจะจัดสรรความยาวคลื่นลงบนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบดังรูปที่ 2.5 (ค)

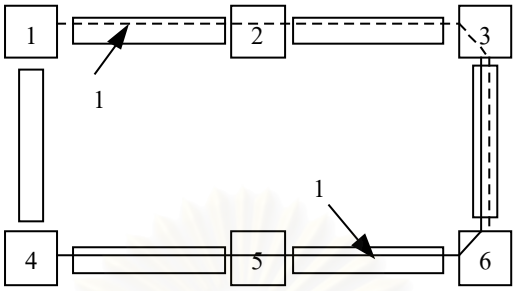
จากที่กล่าวมาทั้งหมดในวิทยานิพนธ์จึงทำการศึกษาวิจัยโครงข่ายรูปวงแหวน ซึ่งแบ่งการปกป้องความเสียหายของโครงข่ายเป็น 4 วิธีดังนี้

1. Path Protection on Shared Fiber (PSF)
   - เป็นการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection
   - โดยมีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองลงบนเส้นใยแก้วนำแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก
2. Path Protection on Shared Wavelength (PSW)
   - เป็นการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection
   - โดยมีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองลงบนความจุที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานก่อน
3. Line Protection on Shared Fiber (LSF)
   - เป็นการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Line Protection
   - โดยมีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองลงบนเส้นใยแก้วนำแสงอีกชุดหนึ่งต่างหาก
4. Line Protection on Shared Wavelength (LSW)
   - เป็นการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Line Protection
   - โดยมีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองลงบนความจุที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานก่อน

2.5 Integer Linear Programming (ILP)

การออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงในวิทยานิพนธ์จะใช้ Integer Linear Programming (ILP) ในการแก้ปัญหา เนื่องจากผลเฉลยที่ได้ในการแก้ปัญหาจะสามารถออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนต่ำที่สุด ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาต้นทุนในเชิงเส้นใยแก้วนำแสง และจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย เหตุที่ใช้ ILP เนื่องจากว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง เช่น จำนวนความยาวคลื่น จำนวนช่องสัญญาณ และจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม Integer Linear Programming จึงมีความเหมาะสมกับปัญหามากกว่า Linear Programming เนื่องจากว่า Linear Programming จะทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการแก้ปัญหามีค่าเป็นเลขทศนิยมได้ ซึ่งเป็นผลเฉลยที่ไม่ถูกต้อง ยกตัวอย่างเช่น ถ้าคู่โนด (1,6) และ (3,4) มีความต้องการปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดเท่ากับ 1 โครงข่ายจะต้องจัดสรรเส้นทาง (Route) และความยาวคลื่น (Wavelength) ให้กับปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โนด โดยถ้าใช้ Integer Linear Programming จะต้องใช้ความยาวคลื่นทั้งสิ้น 2 ความยาวคลื่นดังในรูปที่ 2.6 แต่ถ้าใช้ Linear

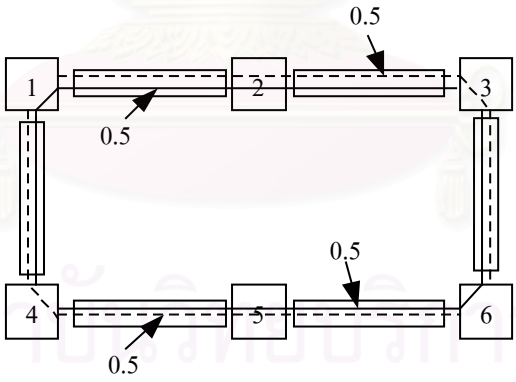
Programming อาจแบ่งปริมาณทราฟฟิกลงบนเส้นทางทั้งสองเส้นทางละ 0.5 เนื่องจากว่าคู่โนดหนึ่งในโครงข่ายรูปวงแหวนมีสองเส้นทาง ดังนั้นจึงสามารถเลือกกระจายทราฟฟิกลงบนแต่ละเส้นทางโดยมีปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 0.5 ซึ่งทำให้ผลที่ได้ใช้ความยาวคลื่นเพียง 1 ความยาวคลื่นจึงเป็นคำ



ตอบที่ไม่ถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 2.7

รูปที่ 2.6 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นโดยใช้ Integer Linear Programming

รูปที่ 2.7 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นโดยใช้ Linear Programming



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนวงเดียว โดยพิจารณาต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง

3.1 กล่าวนำ

การออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงจะต้องจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดทั้งหมดในโครงข่าย อีกทั้งยังต้องมีการวางเส้นใยแก้วนำแสงให้มีจำนวนเพียงพอที่จะรองรับปริมาณความต้องการทราฟฟิกทั้งหมด จากเหตุผลและปัญหาการออกแบบโครงข่ายดังกล่าว ในบทนี้จึงมีการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานรูปวงแหวนวงเดียวให้อยู่ในรูปตัวแปรทางคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น พร้อมทั้งทราบถึงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่จะต้องวางในโครงข่าย โดยเรียกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายนี้ว่า Integer Linear Programming (ILP) ซึ่งเป็นชุดอสมการเชิงเส้นโดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการแก้อสมการจะต้องเป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

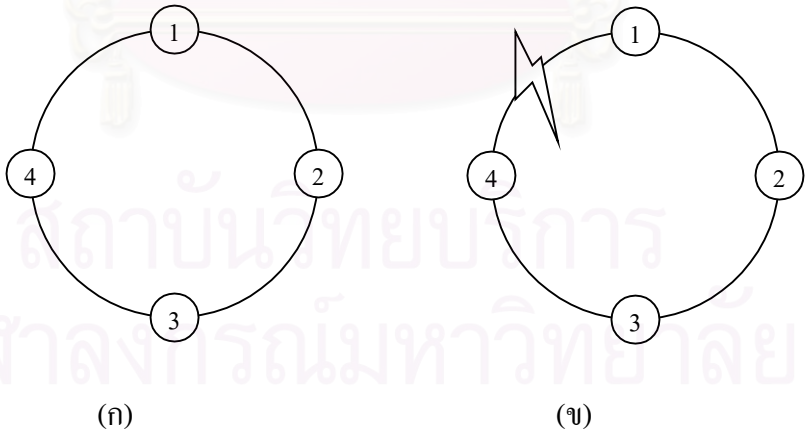
การออกแบบโครงข่ายบนพื้นฐานรูปวงแหวนวงเดียวสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับโครงข่ายกรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายกรณีที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงจะมีการออกแบบโครงข่ายอยู่ 2 ลักษณะ คือ Optimized spare fiber assignment กับ Joint optimized working and spare fiber assignment โดยรายละเอียดของแบบจำลองจะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.4

บทนี้จะวิเคราะห์ต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment กับ Joint optimized working and spare fiber assignment โดยเปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของการออกแบบโครงข่ายทั้ง 2 วิธีว่าให้ผลจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงแตกต่างกันอย่างไร และวิเคราะห์วิธีการปกป้องความเสียหายของโครงข่ายกรณี PSW กับ LSW เมื่อโครงข่ายรองรับทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มีขนาดแตกต่างกัน และทำการเปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วแสงของการปกป้องโครงข่ายแบบ PSW และ LSW กับค่าขอบเขตจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุดของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย (Lower Bound Fiber) ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะนำเสนอวิธีการหาค่า LBF

3.2 ค่าขอบเขตจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุดของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย (Lower Bound Fiber)

สำหรับโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงรูปวงแหวนวงเดียว จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการเท่ากับ ผลคูณของจำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดในโครงข่ายกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่รองรับปริมาณทราฟฟิกหนาแน่นที่สุด (Congestion Link) [9] นั่นก็คือหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความหนาแน่นของปริมาณทราฟฟิกมากที่สุด เพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องวางในข่ายเชื่อมโยงนั้นๆ

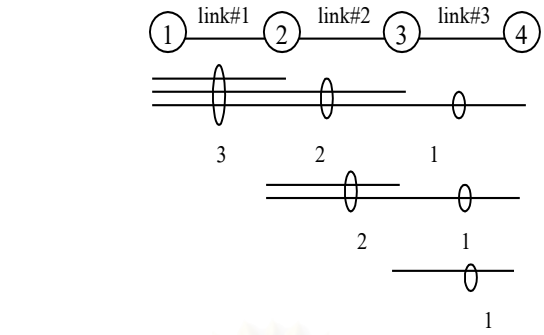
ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอวิธีการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่มีความหนาแน่นปริมาณทราฟฟิกมากที่สุดของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียว ในกรณีที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยพิจารณารูปแบบทราฟฟิกยูนิฟอร์ม ซึ่งเป็นรูปแบบทราฟฟิกที่แต่ละคู่โนดของโครงข่ายมีความต้องการปริมาณทราฟฟิกเท่ากัน เช่น แต่ละคู่โนดต้องการปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 2 ช่องสัญญาณ (Traffic Volume = 2) หรือแต่ละคู่โนดต้องการปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 3 ช่องสัญญาณ (Traffic Volume = 3) เหตุที่พิจารณารูปแบบทราฟฟิกยูนิฟอร์ม เนื่องจากเป็นกรณีที่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุดของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวกับจำนวนโนดและ Traffic Volume ของโครงข่ายได้ ดังนั้นเมื่อทราบถึงขนาดของโครงข่ายว่ามีกี่โนดและต้องรองรับปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มีขนาด Traffic Volume เป็นปริมาณเท่าใด ก็จะทราบถึงต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุดของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียว กรณีที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง



(ก) (ข)

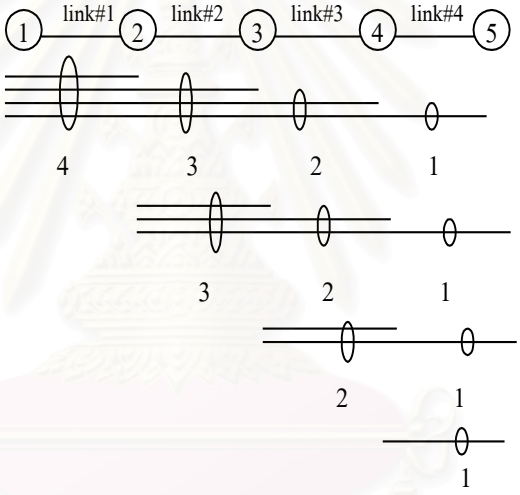
รูปที่ 3.1 (ก) โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงในสภาวะการทำงานปกติ
(ข) โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงเมื่อได้รับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Total Traffic in each link: 3 4 3

(ก) โครงข่ายขนาด 4 โนด



Total Traffic in each link: 4 6 6 4

(ข) โครงข่ายขนาด 5 โนด

รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงถึงการจัดสรรเส้นทางของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง กรณีที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย (ก) โครงข่ายขนาด 4 โนด (ข) โครงข่ายขนาด 5 โนด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 แสดงถึงปริมาณทราฟฟิกในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายรูปวงแหวน กรณีที่เกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (ก) โครงข่ายขนาด 4 โนด (ข) โครงข่ายขนาด 5 โนด (ค) โครงข่ายขนาด 6 โนด (ง) โครงข่ายขนาด 7 โนด (จ) โครงข่ายขนาด 8 โนด (ฉ) โครงข่ายขนาด 9 โนด

Link	1	2	3
Node#1	3	2	1
Node#2	-	2	1
Node#3	-	-	1
Total Traffic in each link	3	4	3

(ก) โครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 4 โนด

Link	1	2	3	4
Node#1	4	3	2	1
Node#2	-	3	2	1
Node#3	-	-	2	1
Node#4	-	-	-	1
Total traffic in each link	4	6	6	4

(ข) โครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 5 โนด

Link	1	2	3	4	5
Node#1	5	4	3	2	1
Node#2	-	4	3	2	1
Node#3	-	-	3	2	1
Node#4	-	-	-	2	1
Node#5	-	-	-	-	1
Total traffic in each link	5	8	9	8	5

(ค) โครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 6 โนด

Link	1	2	3	4	5	6
Node#1	6	5	4	3	2	1
Node#2	-	5	4	3	2	1
Node#3	-	-	4	3	2	1
Node#4	-	-	-	3	2	1
Node#5	-	-	-	-	2	1
Node#6	-	-	-	-	-	1
Total traffic in each link	6	10	12	12	10	6

(ง) โครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 7 โนด

Link	1	2	3	4	5	6	7
Node#1	7	6	5	4	3	2	1
Node#2	-	6	5	4	3	2	1
Node#3	-	-	5	4	3	2	1
Node#4	-	-	-	4	3	2	1
Node#5	-	-	-	-	3	2	1
Node#6	-	-	-	-	-	2	1
Node#7	-	-	-	-	-	-	1
Total traffic in each link	7	12	15	16	15	12	7

(จ) โครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 8 โนด

Link	1	2	3	4	5	6	7	8
Node#1	8	7	6	5	4	3	2	1
Node#2	-	7	6	5	4	3	2	1
Node#3	-	-	6	5	4	3	2	1
Node#4	-	-	-	5	4	3	2	1
Node#5	-	-	-	-	4	3	2	1
Node#6	-	-	-	-	-	3	2	1
Node#7	-	-	-	-	-	-	2	1
Node#8	-	-	-	-	-	-	-	1
Total traffic in each link	8	14	18	20	20	18	14	8

(ฉ) โครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 9 โนด

ต่อไปเป็นขั้นตอนการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุดของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวกรณีที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยขั้นตอนการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุดที่โครงข่ายต้องการ จะพิจารณาโครงข่ายกรณีที่ได้รับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง เนื่องจากว่ากรณีนี้โครงข่ายจะวางจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่ากรณีโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด จากรูปที่ 3.1 พิจารณาโครงข่ายที่มีสภาวะการทำงานปกติกับโครงข่ายเมื่อได้รับความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเห็นได้ว่า ในสภาวะการทำงานปกติแต่ละคู่โนดสามารถจัดสรรเส้นทางได้ 2 เส้นทาง ยกตัวอย่างเช่น พิจารณาคู่โนด 1 กับ 3 สามารถจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกได้ 2 เส้นทาง คือ เส้นทางที่ผ่านโนด 1, 4 และ 3 หรือเส้นทางที่ผ่านโนด 1, 2, 3 แต่เมื่อเกิดข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งในรูปคือข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อโนด 1 กับโนด 4 แต่ละคู่โนดในโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ 2 เส้นทางตามเดิม แต่เหลือการจัดสรรเส้นทางได้เพียงเส้นทางเดียวเพื่อรองรับปริมาณความต้องการทราฟฟิกของคู่โนด กรณีนี้คู่โนด 1 กับ 3 สามารถจัดสรรเส้นทางผ่านโนด 1, 2 และ 3 ได้เส้นทางเดียวเท่านั้น เห็นได้ว่าเมื่อเกิดข่ายเชื่อมโยงเสียหายทุกคู่โนดในโครงข่ายสามารถจัดเส้นทางได้เพียงเส้นทางเดียว ดังนั้นกรณีนี้จึงเป็นการศึกษาโครงข่ายที่สามารถรองรับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง เพราะมีการจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ต่อไปจะพิจารณาลักษณะการจัดสรรเส้นทางของทุก ๆ คู่โนด เมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการจัดสรรเส้นทางกับจำนวนโนดของโครงข่าย กรณีที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยโครงข่ายรองรับปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์มเท่ากับ 1

ตารางที่ 3.2 ปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่มีค่า Traffic Volume เท่ากับ 1 ของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่มีขนาด 4 โนด

Node	1	2	3	4
1	-	1	1	1
2	1	-	1	1
3	1	1	-	1
4	1	1	1	-

จากรูปที่ 3.1 เพื่อความสะดวกในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการจัดเส้นทางกับจำนวนโนดทั้งหมดในโครงข่ายจึงนำรูปที่ 3.1 (ข) มาคลี่โครงข่ายให้มีรูปร่างดังรูปที่ 3.2 (ก) พิจารณาตารางที่ 3.2 เห็นได้ว่าโนดที่ 1 มีการเชื่อมต่อกับโนด 2 ,3 และ 4 และถัดมาโนดที่ 2 ก็จะมีการเชื่อมต่อกับโนด 3 และ 4 ท้ายสุดพิจารณาโนดที่ 3 ซึ่งเหลือการเชื่อมต่อเพียงการเชื่อมต่อเดียว คือ เชื่อมต่อกับโนดที่ 4 นำการเชื่อมต่อของทุก ๆ คู่โนดมาเขียนแผนภาพการจัดเส้นทางจะได้ดังรูปที่ 3.2 (ก) และสามารถนำแผนภาพมาเขียนตารางได้ดังตารางที่ 3.1 (ก) เห็นได้ว่าข่ายเชื่อมโยงที่

1, 2 และ 3 ต้องรองรับปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 3 ทราฟฟิก 4 ทราฟฟิกและ 3 ทราฟฟิกตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจำนวนโนดของโครงข่ายที่มีขนาด 5 โนด นำมาเขียนแผนภาพและตารางการจัดสรรเส้นทางเมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้ดังรูปที่ 3.2 (ข) และตารางที่ 3.1 (ข) ตามลำดับ ซึ่งการจัดสรรเส้นทางของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวกรณีที่เกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง เมื่อโครงข่ายรองรับปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์มเท่ากับ 1 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโนดของโครงข่ายกับปริมาณทราฟฟิกในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโนด 4 โนดถึง 9 โนดได้ดังตารางที่ 3.2 นั่นคือ เมื่อทราบจำนวนโนดของโครงข่ายก็สามารถทราบถึงปริมาณทราฟฟิกในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายรูปวงแหวนได้

ต่อไปพิจารณา Congestion Link ของโครงข่ายที่มีจำนวนโนดเท่ากับ 4 โนด 6 โนด และ 8 โนด ซึ่งมีจำนวนโนดเป็นเลขคู่ จะมีปริมาณทราฟฟิกผ่าน Congestion Link เท่ากับ 4 ทราฟฟิก 9 ทราฟฟิก และ 16 ทราฟฟิกตามลำดับ และเมื่อพิจารณา Congestion Link ของโครงข่ายที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคี่ คือ 5 โนด 7 โนด และ 9 โนด ก็จะมีปริมาณทราฟฟิกผ่าน Congestion Link เท่ากับ 6 ทราฟฟิก 12 ทราฟฟิกและ 20 ทราฟฟิก ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโนดทั้งหมดของโครงข่ายกับ Congestion Link กรณีโครงข่ายมีจำนวนโนดเป็นเลขคู่และเลขคี่ได้ดังนี้คือ

กรณีที่โครงข่ายมีจำนวนโนดเป็นเลขคี่

$$\text{Congestion Link} = \frac{(N^2 - 1)}{4} \tag{3.1}$$

กรณีที่โครงข่ายมีจำนวนโนดเป็นเลขคู่

$$\text{Congestion Link} = \frac{N^2}{4} \tag{3.2}$$

โดยโครงข่ายมีรูปแบบทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มี Traffic Volume เท่ากับ 1

ดังนั้นโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวกรณีที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงโดยโครงข่ายรองรับปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์ม ซึ่งมีขนาด Traffic Volume เท่ากับ T และมีจำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพลกซ์ลงในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้นเท่ากับ M จะต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ผ่าน Congestion Link เท่ากับ

กรณีที่โครงข่ายมีจำนวนโนดเป็นเลขคี่

$$\text{Fiber of congestion link} = \frac{(N^2 - 1)T}{4M} \tag{3.3}$$

กรณีที่โครงข่ายมีจำนวนโนดเป็นเลขคู่

$$\text{Fiber of congestion link} = \frac{N^2 T}{4M} \tag{3.4}$$

เนื่องจากจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดของโครงข่ายเท่ากับผลคูณของจำนวนโนดทั้งหมดในโครงข่ายกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่รองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีความหนาแน่นมากที่สุด (Congestion Link) ดังนั้นโครงข่ายต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดเท่ากับ

กรณีที่โครงข่ายมีจำนวนโนดเป็นเลขคี่

$$\text{Total fiber} = N^* \text{ Fiber of congestion link}$$

$$= \frac{N(N^2-1)T}{4M} \tag{3.5}$$

กรณีที่โครงข่ายมีจำนวนโนดเป็นเลขคู่

$$\text{Total fiber} = N^* \text{ Fiber of congestion link}$$

$$= \frac{N^3T}{4M} \tag{3.6}$$

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงกรณีไม่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำโดยจำลองปัญหาการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่มีโครงสร้างบนพื้นฐานรูปวงแหวนวงเดียวให้อยู่ในรูปตัวแปรและสัญลักษณ์ต่าง ๆ ในรูปของอสมการเชิงเส้น ซึ่งแบบจำลองจะมีการกำหนดสัญลักษณ์และตัวแปรต่าง ๆ กรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงดังนี้

N	จำนวนโนดทั้งหมดในโครงข่าย
L	จำนวนข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย สำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียว L = N
D	จำนวนคู่โนดทั้งหมดซึ่งมีค่าเท่ากับ N(N – 1)/2
M	จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น
t_i	ปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่ i ซึ่งวัดในหน่วยของจำนวนการเชื่อมต่อของช่องสัญญาณ (connections)
W	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมากที่สุดในวงแหวน
S	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมากที่สุดในวงแหวน

$x_{i,k,m}$ จำนวนช่องสัญญาณของคู่โนดที่ i เส้นทางที่ k โดยใช้ความยาวคลื่นที่ m สำหรับกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

$x_{i,k}$ จำนวนช่องสัญญาณของคู่โนดที่ i เส้นทางที่ k สำหรับกรณีใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

$\delta_{i,k,l}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ k ของคู่โนดที่ i ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l
มีค่าเป็น 0 เมื่อเส้นทางที่ k ของคู่โนดที่ i ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l

$\gamma_{i,m}^{l'}$ จำนวนช่องสัญญาณบนเส้นทางสำรองของคู่โนดที่ i เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ l' ขาด โดยใช้ความยาวคลื่นที่ m สำหรับกรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

$\gamma_{i}^{l'}$ จำนวนช่องสัญญาณบนเส้นทางสำรองของคู่โนดที่ i เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ l' ขาด สำหรับกรณีใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

$\beta_{i,l}^{l'}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางสำรองของคู่โนดที่ i ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l
มีค่าเป็น 0 เมื่อเส้นทางสำรองของคู่โนดที่ i ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l
โดยที่ข่ายเชื่อมโยงที่ l' ขาด

$N, D, M, t_i, \delta_{i,k,l}$ และ $\beta_{i,l}^{l'}$ เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้กับแบบจำลอง W, S $x_{i,k,m}, x_{i,k}, \gamma_{i,m}^{l'}$ และ $\gamma_{i}^{l'}$ เป็นตัวแปรในแบบจำลอง โดยตัวแปรทุกตัวจะต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

จากตัวแปรและพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ข้างต้น สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง ทั้งกรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

3.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (No Wavelength Conversion : NWC)

objective function ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง คือ หาต้นทุนโครงข่ายให้มีค่าต่ำที่สุด

$$\text{Min} : MNW \tag{3.7}$$

โดยมี constraint ต่าง ๆ ดังนี้

1. ปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่ i สามารถกระจายลงบนเส้นทางที่ k และมีความยาวคลื่นค่าใดก็ได้

$$\sum_{k=1}^{2}\sum_{m=1}^{M} x_{i,k,m} = t_i \quad \forall i = 1,2,\ldots,D \tag{3.8}$$

2. จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่มากที่สุดของวงแหวนต้องสามารถรองรับจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l และมีความยาวคลื่นที่ m โดยจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวเป็นจำนวนครั้งที่สามารถใช้ความยาวคลื่นค่าเดิมซ้ำได้

$$W - \sum_{i=1}^{D} \sum_{k=1}^{2} x_{i,k,m} \delta_{i,k,l} \geq 0 \quad \forall l = 1,2,...,L \; ; \forall m = 1,2,...,M \tag{3.9}$$

3. โดยที่ W, $x_{i,k,m}$ เป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

และ W, $x_{i,k,m} \in \{0,1,2,...\}$ $\forall i = 1,2,...,D; \forall k = 1,2; \forall m = 1,2,...,M$ (3.10)

3.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Conversion : WC)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น objective function ของแบบจำลอง คือ หาค่าต้นทุนโครงข่ายให้มีค่าต่ำที่สุด

$$\text{Min} : MNW \tag{3.11}$$

โดยมี constraint ต่าง ๆ ดังนี้

1. ปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่ i สามารถกระจายลงบนเส้นทางใดก็ได้ซึ่งมีเส้นทางดังกล่าวอยู่ 2 เส้นทาง

$$\sum_{k=1}^{2} x_{i,k} = t_i \qquad \forall i = 1,2,...,D \tag{3.12}$$

2. จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่มากที่สุดของวงแหวนต้องเพียงพอที่จะรองรับจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l โดยค่าของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่มากที่สุดคูณกับจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น จะเป็นค่าจำนวนการเชื่อมต่อที่มากที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในข่ายเชื่อมโยงที่ l

$$MW - \sum_{i=1}^{D} \sum_{k=1}^{2} x_{i,k} \delta_{i,k,l} \geq 0 \qquad \forall l = 1,2,...,L \tag{3.13}$$

3. โดยที่ W, $x_{i,k}$ เป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

และ W, $x_{i,k} \in \{0,1,2,...\}$ $\forall i = 1,2,...,D$; $\forall k = 1,2$ (3.14)

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงกรณีที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

การออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงโดยคำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายมีวิธีการออกแบบ 2 วิธี

1. Optimized spare fiber assignment คือ วิธีการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงโดยหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองให้กับโครงข่ายกรณีที่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งวิธีนี้ต้องกำหนดการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายในสภาวะการทำงานปกติ พร้อมทั้งกำหนดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน
2. Jointly optimized working and spare fiber assignment คือ วิธีการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานกับเส้นใยแก้วนำแสงสำรองไปพร้อม ๆ กัน โดยไม่ต้องกำหนดการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายในสภาวะการทำงานปกติ

วิธีการออกแบบโครงข่ายทั้ง 2 วิธีนำมาออกแบบโครงข่ายในลักษณะที่แตกต่างกัน คือ การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธีแรกเป็นการออกแบบโครงข่ายที่มีการทำงานในทางปฏิบัติ แต่โครงข่ายไม่มีการวางจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง ดังนั้นการออกแบบด้วยวิธีแรกจึงเป็นการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพียงอย่างเดียว เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ส่วนการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธีที่สอง เป็นการออกแบบโครงข่ายโดยพิจารณาหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดก่อนการวางโครงข่าย ทำให้ทราบถึงต้นทุนก่อนการวางโครงข่ายจริง เนื่องจากประโยชน์ของการออกแบบโครงข่ายทั้งสองวิธีมีลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนั้นในบทนี้จึงนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหายทั้งสองวิธี โดยจะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละวิธีในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

3.4.1 Optimized spare fiber assignment

การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธีนี้เป็นการหาจำนวนเส้นใยแก้วสำรองเท่านั้น อีกทั้งยังต้องทราบถึงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายปกติ เพื่อที่จะนำมาออกแบบโครงข่ายกรณีที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะจำลองโครงข่ายในกรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นซึ่งมีแบบจำลองต่าง ๆ ดังนี้

3.4.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (No Wavelength Conversion : NWC)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นการหาต้นทุนต่ำที่สุดของโครงข่าย โดยเป็นการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง เพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายซึ่งมี objective function ดังนี้

$$\text{Min : MNS} \tag{3.15}$$

โดยมี constraint ต่าง ๆ ดังนี้

1. พิจารณาทุก ๆ ข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ l' ในแต่ละคู่โนดทำการจัดสรรเส้นทางสำรองให้กับเส้นทางปกติที่ถูกรบกวนโดยข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ l'

$$\gamma_{i,m}^{l'} = \sum_{k=1}^{2} x_{i,k,m}\delta_{i,k,l'}, \forall l' = 1,2,..., L; \forall i = 1,2,..., D; \forall m = 1,2,..., M \tag{3.16}$$

ตัวแปร $\gamma_{i,m}^{l'}$ เป็นการจัดสรรเส้นทางสำรองซึ่งขึ้นกับวิธีการปกป้องโครงข่าย โดยมีการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection และแบบ Line Protection ปกติการจัดสรรความยาวคลื่นสำรอง กรณีการปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ Path Protection จะจัดสรรความยาวคลื่นสำรอง โดยใช้ค่าความยาวคลื่นสำรองค่าเดียวกันกับการจัดสรรความยาวคลื่นของเส้นทางที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายดังสมการที่ (3.16) แต่ในกรณีที่การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองสามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น จากกรณีการจัดสรรความยาวคลื่นของเส้นทางที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย จะมีรูปแบบสมการดังสมการที่ (3.17) โดยในตารางที่ 3.5 แสดงถึงตัวแปรและ constraint กรณี Path Protection ตามสมการที่ (3.16)

$$\sum_{m=1}^{M}\gamma_{i,m}^{l'} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{2} x_{i,k,m}\delta_{i,k,l'}, \forall l' = 1,2,..., L; \forall i = 1,2,..., D \tag{3.17}$$

2. พิจารณาทุก ๆ ข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ l' จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่มากที่สุดของวงแหวน จะต้องเพียงพอที่รองรับจำนวนช่องสัญญาณของเส้นทางสำรองที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l

กรณี PSW

$$S - \sum_{i=1}^{D}\gamma_{i,m}^{l'}\beta_{i,l}^{l'} + \left(W - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,k,m}\delta_{i,k,l} \right) + \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2}(x_{i,k,m}\delta_{i,k,l})\delta_{i,k,l'} \tag{3.18}$$

กรณี PSF

$$S-\sum_{i=1}^{D}\gamma_{i,m}^{l'}\beta_{i,l}^{l'}\geq 0 \tag{3.19}$$

กรณี LSW

$$S-\sum_{i=1}^{D}\gamma_{i,m}^{l'}\beta_{i,l}^{l'}+\left(W-\sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2}x_{i,k,m}\delta_{i,k,l}\right)\geq 0 \tag{3.20}$$

กรณี LSF

$$S-\sum_{i=1}^{D}\gamma_{i,m}^{l'}\beta_{i,l}^{l'}\geq 0 \tag{3.21}$$

$$\forall l'=1,2,...,L;\ \forall l=1,2,...,L \text{ โดยที่ } l\neq l';\ \ \forall m=1,2,...,M$$

กรณี PSW และ LSW เป็นการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shard Wavelength ซึ่งเป็นการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองโดยพิจารณาช่องสัญญาณที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานก่อน จากสมการ (3.18) และ (3.20) พจน์ที่ 3 จึงเป็นช่องสัญญาณที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน และเมื่อพิจารณาการจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection จะเห็นได้ว่า การปกป้องความเสียหายของโครงข่ายด้วยวิธีนี้จะทำการจัดสรรเส้นทางสำรองให้กับเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยจัดสรรเส้นทางในทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นทางในสภาวะการทำงานปกติ ดังนั้นจึงมีการปลดปล่อยช่องสัญญาณของเส้นทางเกิดขึ้น และสามารถแสดงการปลดปล่อยช่องสัญญาณได้ในพจน์ที่ 4 ของสมการ (3.18) แต่ในการจัดเส้นทางสำรองแบบ Line Protection จะเห็นว่าไม่มีพจน์ปลดปล่อยเช่นเดียวกับ PSW เนื่องจากโนดที่ติดกับข่ายเชื่อมโยงเสียหายจะทำการวนสัญญาณไปยังโนดอีกโนดหนึ่งซึ่งเป็นคู่โนดที่ได้รับผลกระทบจากความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ทำให้ไม่มีการปลดปล่อยช่องสัญญาณของเส้นทางในสภาวะการทำงานปกติ สำหรับกรณี PSF และ LSF เป็นการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองบนเส้นใยแก้วนำแสงอีกชุดหนึ่ง จึงไม่มีการพิจารณาช่องสัญญาณที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน ทำให้ไม่มีพจน์ที่ 3 และพจน์ที่ 4 ดังกรณี PSW และ LSW

3. โดยที่ $S,\ \gamma_{i,m}^{l'}$ เป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และ

$$S,\ \gamma_{i,m}^{l'}\in\{0,1,2,...\}\ \ \forall i=1,2,...,D;\ \forall m=1,2,...,M;\ \forall l'=1,2,...,L \tag{3.22}$$

3.4.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Conversion : WC)

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายกรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเป็นการสร้างแบบจำลองเพื่อหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองต่ำที่สุดของโครงข่าย กรณีที่เกิดหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งเป็นการหาต้นทุนต่ำที่สุดโดยมี objective function ดังนี้

$$\text{Min : MNS} \tag{3.23}$$

โดยมี constraint ต่าง ๆ ดังนี้

1. พิจารณาทุก ๆ ข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ l' ในแต่ละคู่โนดทำการจัดสรรเส้นทางสำรองให้กับเส้นทางปกติที่ถูกรบกวนโดยข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ l'

$$\gamma_i^{l'} = \sum_{k=1}^{2} x_{i,k}\delta_{i,k,l'}, \quad \forall l' = 1,2,...,L; \forall i = 1,2,...,D \tag{3.24}$$

2. พิจารณาทุก ๆ ข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ l' จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่มากที่สุดของวงแหวน จะต้องเพียงพอรองรับจำนวนช่องสัญญาณของเส้นทางสำรองที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l

กรณี PSW

$$MS - \sum_{i=1}^{D} \gamma_i^{l'} \beta_{i,l}^{l'} + \left(MW - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,k}\delta_{i,k,l} \right) + \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} (x_{i,k}\delta_{i,k,l})\delta_{i,k,l'} \geq 0 \tag{3.25}$$

กรณี PSF

$$MS - \sum_{i=1}^{D} \gamma_i^{l'} \beta_{i,l}^{l'} \geq 0 \tag{3.26}$$

กรณี LSW

$$MS - \sum_{i=1}^{D} \gamma_i^{l'} \beta_{i,l}^{l'} + \left(MW - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,k}\delta_{i,k,l} \right) \geq 0 \tag{3.27}$$

กรณี LSF

$$MS - \sum_{i=1}^{D} \gamma_i^{l'} \beta_{i,l}^{l'} \geq 0$$

$$\forall l' = 1,2,...,L; \forall l = 1,2,...,L \text{ โดยที่ } l \neq l'; \quad \forall i = 1,2,...,D \tag{3.28}$$

4. โดยที่ S, $\gamma_i^{l'}$ เป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และ

$$S, \gamma_i^{l'} \in \{0,1,2,...\} \quad \forall i = 1,2,...,D; \forall l' = 1,2,...,L \tag{3.29}$$

3.4.2 Jointly optimized working and spare fiber assignment

การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธีนี้เป็นการหาทั้งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน และจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองไปพร้อม ๆ กัน เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งผลเฉลยของแบบจำลองทำให้ทราบถึงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่าย ไม่ว่าโครงข่ายจะได้รับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงหรือไม่

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทั้งกรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

3.4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

(No Wavelength Conversion : NWC)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นการหาทั้งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน และเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต่ำที่สุดของโครงข่ายซึ่งมี objective function ดังนี้

$$\text{Min} : MN(W + S) \tag{3.30}$$

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ การนำ constraint ที่ (3.8)-(3.10) และ (3.16)-(3.22) มารวมกัน เพื่อออกแบบโครงข่ายกรณีที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง พร้อมทั้งทราบการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายในสภาวะการทำงานปกติ

3.4.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

(Wavelength Conversion : WC)

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน และจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต่ำที่สุดของโครงข่ายซึ่งมี objective function ดังนี้

$$\text{Min} : MN(W + S) \tag{3.31}$$

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ การนำ constraint ที่ (3.12)-(3.14) และ (3.24)-(3.29) มารวมกัน เพื่อจำลองโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เพื่อการนำเสนอวิทยานิพนธ์เป็นไปอย่างสะดวกจึงได้กำหนดอักษรย่อของแต่ละวิธีการปกป้องความเสียหายโครงข่ายดังตารางที่ 3.3 ส่วนตารางที่ 3.4 บอกถึงตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้กับระบบ และผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอ ส่วนตารางที่ 3.5 แสดงถึงจำนวนตัวแปร (number of variables, Nv) และจำนวน constraint (number of constraints, Nc) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 3.3 แสดงถึงอักษรย่อของแต่ละวิธีการปกป้องโครงข่ายเสียหาย

Protection Schemes	**Optimized spare fiber assignment**	**Jointly optimized spare and working fiber assignment**
Path Protection	**OPSW,OPSF**	**JPSW,JPSF**
Line Protection	**OLSW,OLSF**	**JLSW,JLSF**

ตารางที่ 3.4 แสดงถึงตัวแปรที่ต้องกำหนดให้กับระบบ และผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Protection Schemes	**Input**	**Output**
OPSW,OPSF **OLSW,OLSF**	$t_i, W, x_{i,k,m}$ $, x_{i,k}\ \delta_{i,k,l}, \beta^{l'}_{i,k,l}, M$	$S, \gamma^{l'}_{i,m}, \gamma^{l'}_{i}$
JPSW,JPSF **JLSW,JLSF**	$t_i, \delta_{i,k,l}, \beta^{l'}_{i,k,l}, M$	$W, S, x_{i,k,m}$, $x_{i,k}$ $\gamma^{l'}_{i,m}, \gamma^{l'}_{i}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 จำนวนตัวแปร (number of variables, Nv) และจำนวน constraint (number of constraints, Nc) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่าย WDM ที่คำนึงและไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง กรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

Protection Schemes	**Nv**		**Nc**	
	NWC	**WC**	**NWC**	**WC**
No Protection	$1+\frac{2MN(N-1)}{2}$	$1+\frac{2N(N-1)}{2}$	$MN+\frac{N(N-1)}{2}$	$N+\frac{N(N-1)}{2}$
OPSW,OPSF **OLSW,OLSF**	$1+\frac{MN(N-1)}{2}$	$1+\frac{N(N-1)}{2}$	$\frac{MN^2(N-1)}{2}$ $+MN(N-1)$	$\frac{N^2(N-1)}{2}$ $+N(N-1)$
JPSW,JPSF **JLSW,JLSF**	$2+\frac{3MN(N-1)}{2}$	$2+\frac{3N(N-1)}{2}$	$MN^2+\frac{MN^2(N-1)}{2}$ $+\frac{N(N-1)}{2}$	$N^2+\frac{N^2(N-1)}{2}$ $+\frac{N(N-1)}{2}$

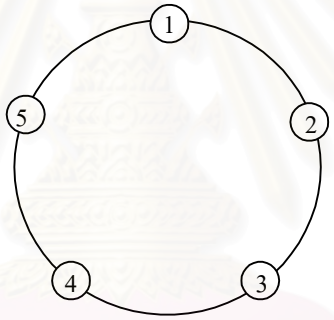
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

การหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 3.3 และ 3.4 สามารถหาผลเฉลยได้โดยใช้ Integer Linear Programing ซึ่งใช้ CPLEX 6.60 [14] สำหรับหาผลตอบและใช้คอมพิวเตอร์ Pentium 667 MHz โดยมี RAM ขนาด 128 MB ในการรันโปรแกรม

3.5.1 การวิเคราะห์โครงข่ายกรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

หัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์ต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของการออกแบบโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด กับโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง พร้อมทั้งศึกษาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่าสามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้หรือไม่ โดยโครงข่ายรูปวงแหวนที่ทำการทดสอบมีจำนวน 5 โนด ดังรูปที่ 3.3 และรองรับปริมาณทราฟฟิกรูปแบบยูนิฟอร์มที่มีขนาดเท่ากับ 2 ดังแสดงในตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.3 โครงข่ายรูปวงแหวนขนาด 5 โนด

ตารางที่ 3.6 ปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มี Traffic Volume เท่ากับ 2 ของโครงข่ายขนาด 5 โนด

Node	1	2	3	4	5
1	-	2	2	2	2
2	2	-	2	2	2
3	2	2	-	2	2
4	2	2	2	-	2
5	2	2	2	2	-

ตารางที่ 3.7 เป็นผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั่นคือ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของการออกแบบโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด กับ โครงข่ายที่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยสามารถออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment กับ Jointly optimized working and spare fiber assignment

ตารางที่ 3.7 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ (ก) กรณีโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment ; เปอร์เซ็นต์ หมายถึง จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องใช้ เทียบกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่ไม่ได้คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

M	No Protection Network	
	NWC	WC
1	30	30
2	15	15
4	10	10
8	5	5

(ก)

M	Optimized spare fiber assignment							
	Path Protection				Line Protection			
	Shared Wavelength		Shared Fiber		Shared Wavelength		Shared Fiber	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
1	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)
2	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)
4	20 (100%)	15 (50%)	20 (100%)	20 (100%)	20 (100%)	15 (50%)	20 (100%)	20 (100%)
8	10 (100%)	10 (100%)	10 (100%)	10 (100%)	10 (100%)	10 (100%)	10 (100%)	10 (100%)

(ข)

M	Jointly optimized working and spare fiber assignment							
	Path Protection				Line Protection			
	Shared Wavelength		Shared Fiber		Shared Wavelength		Shared Fiber	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
1	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)	60 (100%)
2	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)
4	20 (100%)	15 (50%)	20 (100%)	20 (100%)	20 (100%)	15 (50%)	20 (100%)	20 (100%)
8	10 (100%)	10 (100%)	10 (100%)	10 (100%)	10 (100%)	10 (100%)	10 (100%)	10 (100%)

(ค)

เนื่องจากการออกแบบโครงข่ายในทางปฏิบัติสามารถออกแบบได้ 2 วิธี คือ Optimized spare fiber assignment และ Jointly optimized working and spare fiber assignment ดังนั้น การวิเคราะห์โครงข่ายที่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย จึงแบ่งไปตามวิธีการออกแบบโครงข่ายดังนี้

3.5.1.1 การวิเคราะห์โครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment

โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงมีทั้งกรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งในส่วนแรกที่จะทำการวิเคราะห์ คือ โครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด แล้วจึงค่อยวิเคราะห์การออกแบบโครงข่ายที่สามารถปกป้องความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยส่วนต่อไปจะวิเคราะห์ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เพื่อศึกษาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่าสามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายไม่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้หรือไม่ จากตารางที่ 3.7 (ก) เห็นได้ว่าจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี NWC และ WC มีค่าเท่ากันทุกค่าของ M โดยที่ค่า M เท่ากับ 1 จะมีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง 30 เส้น และเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2, 4 และ 8 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายจะมีค่าลดลงเป็น 15 เส้น, 10 เส้น, และ 5 เส้นตามลำดับ จากผลการทดลองสังเกตได้ว่า เมื่อเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ลงบนเส้นใยแก้วนำแสงให้สูงถึงค่าหนึ่ง จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในการออกแบบโครงข่ายเพื่อรองรับความต้องการปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของแต่ละคู่โนดจะมีค่าลดลง ซึ่งจากผลการทดลอง ที่ M เท่ากับ 8 การออกแบบโครงข่ายจะมีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุดเพียง 5 เส้น เหตุผลเมื่อ M สูงขึ้นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้มีจำนวนลดลงเนื่องจากว่า เมื่อ M มีค่าสูงขึ้น เส้นใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้นจะมีจำนวนช่องสัญญาณเพิ่มขึ้น จึงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกได้มากขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อ M มีค่าเท่ากับ 8 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง 5 เส้นจึงเพียงพอที่จะรองรับปริมาณความต้องการทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลได้ว่า สำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่มีขนาด 5 โนด อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้ โดยในการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวกรณีไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับปริมาณทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุดได้

3.5.1.1.1 วิเคราะห์การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection

เมื่อพิจารณาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นต่อต้นทุนโครงข่ายในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง สำหรับการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength จากตารางที่ 3.7 (ข) จะเห็นว่า อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในการออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย พิจารณาที่ค่า M = 4 โครงข่ายกรณี NWC จะมีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมด 20 เส้น แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงให้เหลือ 15 เส้น แต่กรณีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Fiber จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายทั้งที่มีและไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากันทุก ๆ ค่าของ M ดังนั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณีที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Fiber ได้ จึงสรุปได้ว่า สำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่มีขนาด 5 โนด การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection โดยมีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ในบางค่าของ M ขณะที่การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Fiber อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้

ต่อไปพิจารณาถึงต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง กับโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด จากตารางที่ 3.7 (ก) และ (ข) สำหรับการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength กรณี NWC และ WC ที่ค่า M = 1, 2, 8 โครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มจากโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด ถึง 100 % แต่ที่ค่า M = 4 อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี NWC จาก 100 %ให้มีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นเพียง 50 % เหตุผลที่ M = 4 โครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายไม่ต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจากโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดถึง 100% เนื่องจากว่า การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength เป็นการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองบนช่องสัญญาณที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานก่อน ดังนั้นเมื่อช่องสัญญาณที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานไม่เพียงพอ จึงค่อยเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองให้กับโครงข่าย เพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ทำให้ที่ค่า M เท่ากับ 4 ไม่ต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองจากโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดถึง 100 %

3.5.1.1.2 วิเคราะห์การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Line Protection

วิเคราะห์ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่าสามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้หรือไม่ สำหรับการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength จากตารางที่ 3.7 (ข) ที่ค่า M = 4 กรณี NWC โครงข่ายมีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมด 20 เส้น แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โครงข่ายมีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลงเหลือ 15 เส้น ส่วนการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Fiber จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายกรณี NWC และ WC มีค่าเท่ากันทุกค่าของ M ดังนั้นสำหรับโครงข่ายที่มีขนาด 5 โนด การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้ในบางค่าของ M แต่ไม่สามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย กรณีที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Fiber

ต่อไปวิเคราะห์จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อเกิดข่ายเชื่อมโยงเสียหาย กับโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด จากตารางที่ 3.7 (ก) และ (ข) พิจารณาการจัดเส้นทางสำรองแบบ Line Protection และจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength กรณี NWC จะต้องวางจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มจากโครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย 100 % ทุก ๆ ค่าของ M ยกเว้นกรณี WC ที่ M = 4 อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ จึงส่งผลให้โครงข่ายมีการเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง จากโครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายเพียง 50 %

สำหรับการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment เมื่อจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Fiber พิจารณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย กับโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด จากตารางที่ 3.7 (ก) และ (ข) เห็นได้ว่า เมื่อออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจากโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด 100% ทุก ๆ ค่าของ M ไม่ว่าจะปกป้องความเสียหายของโครงข่ายด้วยวิธี Path Protection หรือ Line Protection ก็ตาม

3.5.1.2 การวิเคราะห์โครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment

สำหรับการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธีนี้ไม่ต้องทราบถึงการจัดสรรเส้นทางของโครงข่ายในสภาวะการทำงานปกติ ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4.2 โดยผลเฉลยของแบบจำลองทำให้ทราบถึงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายในสภาวะการทำงานปกติ รวมไปถึงสามารถจัดสรร

เส้นทางได้ใหม่เมื่อเส้นใยแก้วนำแสงในโครงข่ายขาด ส่วนต่อไปที่จะทำการวิเคราะห์คือ ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่าสามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้หรือไม่

จากตารางที่ 3.7 (ค) จะเห็นว่าการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment เมื่อพิจารณาวิธีการปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ PSF และ LSF กรณี NWC กับ WC ผลการทดสอบจะเห็นว่า จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายกรณี NWC และ WC มีค่าเท่ากันทุก ๆ ค่าของ M ดังนั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถลดต้นทุนของโครงข่ายกรณี NWC ได้ แต่สำหรับการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection และ Line Protection กรณีจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength พิจารณาที่ค่า M เท่ากับ 4 สำหรับโครงข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โครงข่ายต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมด 20 เส้น แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ลดลงเหลือเพียง 15 เส้น ดังนั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดต้นทุนของโครงข่ายในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ กล่าวโดยสรุปคือ การออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่มีขนาด 5 โนด ด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment โดยปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ PSW และ LSW อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดต้นทุนของโครงข่ายในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ในบางค่าของ M ส่วนกรณีปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ PSF และ LSF อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถลดต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้

ต่อไปทำการเปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่ กับโครงข่ายไม่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยวิเคราะห์แต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางสำรองซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

3.5.1.2.1 วิเคราะห์การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายกับโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด พิจารณาการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength จากตารางที่ 3.7 (ก) และ (ค) จะเห็นว่า การออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ค่า M = 1, 2, 8 กรณี NWC จะต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจากโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด ถึง 100 % ส่วนในกรณี WC ที่ค่า M เท่ากับ 4 จะมีการเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วจากโครงข่ายไม่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายเพียง 50 % โดยกรณีนี้การออกแบบโครงข่ายไม่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย จะมีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมด 10 เส้น ส่วนการออกแบบโครงข่ายเพื่อรองรับความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง สามารถออกแบบโดยเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจากกรณีโครงข่ายไม่

สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดเพียง 5 เส้น ก็สามารถรองรับปริมาณความต้องการทราฟฟิกทั้งหมดที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

3.5.1.2.2 วิเคราะห์การจัดเส้นทางสำรองแบบ Line Protection

หัวข้อนี้วิเคราะห์จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย กับโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด โดยพิจารณาการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength จากตารางที่ 3.7 (ก) และ (ค) จะเห็นว่า โครงข่ายกรณี NWC ที่ค่า M = 1, 2 และ 8 การออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายจะต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจากโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดถึง 100% ส่วนโครงข่ายกรณี WC จะมีค่า M = 4 เพียงค่าเดียวที่ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย เพิ่มขึ้นจากโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงขาดไม่ถึง 100% นั่นคือ มีการเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจากโครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายเพียง 50%

ส่วนการออกแบบด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment โดยจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Fiber จากตารางที่ 3.7 (ก) และ (ค) เห็นได้ว่า โครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยปกป้องความเสียหายแบบ Path Protection หรือแบบ Line Protection จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มจากโครงข่ายไม่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย 100% ทุก ๆ ค่าของ M ซึ่งผลสรุปนี้ได้ตรงกับกรณีการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment

เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายโดยจัดเส้นทางสำรองด้วยวิธี Path Protection กับ Line Protection จากตารางที่ 3.7 (ข) จะเห็นได้ว่า ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่ปกป้องความเสียหายแบบ PSW กับ LSW มีค่าเท่ากันทุก ๆ ค่าของ M เช่นเดียวกันกับกรณี PSF และ LSF และเมื่อพิจารณาการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment ก็ให้ผลเช่นเดียวกันกับ Optimized spare fiber assignment ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลได้ว่า สำหรับโครงข่ายขนาด 5 โนด การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment หรือวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment เมื่อพิจารณาการปกป้องโครงข่ายแบบ PSW กับ LSW และ PSF กับ LSF ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่มีการปกป้องความเสียหายแบบ PSW กับ LSW และ PSF กับ LSF จะมีค่าเท่ากัน

ต่อไปวิเคราะห์ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment กับ Jointly optimized working and spare fiber assignment จากตารางที่ 3.7 (ข) และ (ค) จะเห็นว่าการออกแบบโครงข่ายทั้ง 2 วิธี ให้ค่าต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำ

แสงเท่ากันทุก ๆ ค่าของ M ถึงแม้ว่าการออกแบบโครงข่ายทั้ง 2 วิธี จะให้ค่าจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายเท่ากัน แต่ในทางปฏิบัติการออกแบบโครงข่ายทั้ง 2 วิธี มีประโยชน์ที่แตกต่างกัน คือ การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment ใช้สำหรับออกแบบโครงข่ายที่ไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ดังนั้นการออกแบบด้วยวิธีนี้จึงเป็นการเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรอง เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ในขณะที่วิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment เป็นการออกแบบโครงข่ายที่ยังไม่มีการวางจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง ดังนั้นการออกแบบจึงต้องออกแบบโครงข่ายทั้งในสภาวะการทำงานปกติ กับกรณีที่อาจเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ซึ่งเป็นการออกแบบเพื่อทราบต้นทุนของโครงข่ายก่อนการวางระบบจริง สำหรับเวลาในการหาผลเฉลยของโครงข่าย NWC และ WC ไม่ว่าออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment หรือ Optimized spare fiber assignment เวลาในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าน้อยกว่า 2 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ไม่นานนัก

ตารางที่ 3.8 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวขนาด 5 โนด โดยปกป้องความเสียหายด้วยวิธี PSW กรณี NWC สำหรับการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment และ Jointly optimized working and spare fiber assignment โดยจัดสรรความยาวคลื่นสำรองที่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น กับ การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองที่ใช้ค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกับค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

M	JPSW		OPSW	
	เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นสำรอง	ไม่เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นสำรอง	เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นสำรอง	ไม่เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นสำรอง
1	60	60	60	60
2	30	30	30	30
4	20	20	20	20
8	10	10	10	10

สำหรับการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection ที่กล่าวไว้ข้างต้นเป็นการจัดสรรความยาวคลื่น โดยค่าความยาวคลื่นสำรองเป็นค่าเดียวกันกับค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งเมื่อทดสอบกับโครงข่ายเดียวกันนี้ แต่เปลี่ยนการจัดสรรค่าความยาวคลื่นสำรองโดยสามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นสำรอง จากค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ปรากฏว่าต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายเมื่อจัดสรรความยาวคลื่นสำรองทั้ง 2 วิธีมีค่าเท่ากันดังตารางที่ 3.8 โดยพิจารณาการปกป้องโครงข่ายแบบ PSW

3.5.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกับค่า Lower Bound Fiber เมื่อโครงข่ายจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection และ Line Protection

หัวข้อนี้วิเคราะห์ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายในแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางสำรอง โดยปริมาณทราฟฟิกที่ใช้ในโครงข่ายมีลักษณะรูปแบบยูนิฟอร์มพร้อมทั้งศึกษาถึงขนาดโครงข่ายว่าส่งผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในแต่ละวิธีการปกป้องความเสียหายของโครงข่ายอย่างไร สำหรับการทดสอบโครงข่ายจะเพิ่มปริมาณทราฟฟิกให้กับโครงข่ายโดยมี Traffic Volume ตั้งแต่ค่า 1 ถึง 6 และศึกษาขนาดของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่มีจำนวนโนดตั้งแต่ 4 โนด ถึง 9 โนด โดยพิจารณาที่ค่า M = 2 และออกแบบด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment กรณีที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength สำหรับการจัดสรรเส้นทางสำรองของ Path Protection นั้น วิเคราะห์กรณีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรอง โดยค่าความยาวคลื่นสำรองต้องเป็นค่าเดียวกันกับค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบจากหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ต่อไปเป็นตารางที่ 3.9 แสดงถึงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุดของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งได้กล่าวถึงวิธีการหาค่า Lower Bound Fiber ไว้ในหัวข้อ 3.2 และตารางที่ 3.10 แสดงถึงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่โครงข่ายต้องการในแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางสำรอง

ตารางที่ 3.9 ค่าขอบเขตจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุด (Lower Bound Fiber) สำหรับการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยมีปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม พิจารณาที่ค่า M = 2 โดยมีขนาดโครงข่ายรูปวงแหวนต่าง ๆ กัน

Node	Traffic Volume					
	1	2	3	4	5	6
4	8	16	24	32	40	48
5	15	30	45	60	75	90
6	27	54	81	108	135	162
7	42	84	126	168	210	252
8	64	128	192	256	320	384
9	90	180	270	360	450	540

ตารางที่ 3.10 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่โครงข่ายต้องการสำหรับการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ (ก) Path Protection (ข) Line Protection โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment และจัดสรรความยาวคลื่นแบบ Shared Wavelength พิจารณาที่ค่า M = 2 ซึ่งโครงข่ายรองรับทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มีขนาดต่าง ๆ

Node	Traffic Volume											
	1		2		3		4		5		6	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
4	8	8	16	16	24	24	32	32	40	40	48	48
5	20	15	30	30	50	45	60	60	80	75	90	90
6	30	30	54	54	84	84	108	108	138	138	162	162
7	42	42	84	84	126	126	168	168	210	210	252	252
8	64	64	128	128	192	192	256	256	320	320	384	384
9	90	90	180	180	270	270	360	360	450	450	540	540

(ก) Path Protection

Node	Traffic Volume											
	1		2		3		4		5		6	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
4	12	12	16	16	28	28	32	32	44	44	48	48
5	20	15	30	30	50	45	60	60	80	75	90	90
6	36	30	60	54	84	84	108	108	142	138	168	162
7	42	42	84	84	126	126	168	168	210	210	252	252
8	72	72	128	128	200	200	256	256	328	328	384	384
9	90	90	180	180	270	270	360	360	450	450	540	540

(ข) Line Protection

วิเคราะห์อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่าส่งผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่ปกป้องความเสียหายแบบ PSW หรือไม่ จากตารางที่ 3.10 (ก) จะเห็นว่าเมื่อโครงข่ายมีขนาด 5 โนด และรองรับปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มีขนาด 1 ทราฟฟิก 3 ทราฟฟิก และ 5 ทราฟฟิก โครงข่าย NWC จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับ 20 เส้น 50 เส้น และ 80 เส้น เมื่อติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้มีจำนวนลดลงเป็น 15 เส้น 45 เส้น และ 80 เส้น ตามลำดับ ดังนั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายขนาด 5 โนด กรณี NWC เมื่อโครงข่ายรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีขนาด 1, 3 และ 5

เปรียบเทียบจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ออกแบบโครงข่ายกรณี PSW กับ Lower Bound Fiber จากตารางที่ 3.9 และ 3.10 (ก) การออกแบบโครงข่ายกรณี PSW มีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายเท่ากับค่า Lower Bound Fiber เกือบทุกกรณี ยกเว้น กรณีโครงข่าย NWC ที่มีจำนวน 5 โนด และรองรับ Traffic Volume เท่ากับ 1, 3 และ 5 จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสูงกว่าค่า Lower Bound Fiber เป็นจำนวน 5 เส้น ส่วนอีกกรณี คือ โครงข่ายขนาด 6 โนด เมื่อรองรับทราฟฟิกที่มีขนาด 1, 3 และ 5 กรณีนี้ไม่สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับค่า Lower Bound Fiber เนื่องจากว่าค่า Lower Bound Fiber ที่คำนวณได้ไม่สามารถนำมาออกแบบโครงข่ายได้จริงในทางปฏิบัติ ยกตัวอย่างเช่น พิจารณาโครงข่ายที่มีขนาด 6 โนดและรองรับปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์มโดยมี Traffic Volume เท่ากับ 1 โครงข่ายจะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมด 30 เส้น แต่ค่า Lower Bound Fiber ที่คำนวณได้กลับมีค่า 27 เส้น เมื่อพิจารณาสมการ (3.4) ซึ่งเป็นสูตร Fiber of congestion link สำหรับโครงข่ายขนาด 6 โนด เมื่อแทนค่าในสูตรสามารถคำนวณจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่มีความหนาแน่นของปริมาณทราฟฟิกสูงสุดได้เท่ากับ 4.5 เส้น แต่ในทางปฏิบัติต้องวางจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเป็นจำนวน 5 เส้น จึงทำให้โครงข่ายขนาด 6 โนดต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดเท่ากับ 6x5 = 30 เส้น ต่อไปพิจารณาต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายขนาด 4 โนด 7 โนด 8 โนด และ 9 โนด และรองรับปริมาณทราฟฟิกค่าต่าง ๆ โดยมีค่าปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 เห็นได้ว่า เมื่อปริมาณความต้องการทราฟฟิกมีอัตราการเพิ่มขึ้นเป็นเท่า ๆ ความต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายก็มีลักษณะเพิ่มขึ้นเป็นเท่า ๆ เช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับสูตร Total Fiber ตามสมการที่ (3.5) และ (3.6) สำหรับกรณีจำนวนโนดเป็นเลขคี่และเลขคู่ตามลำดับ โดยมีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายแปรผันตรงกับปริมาณความต้องการทราฟฟิก จากผลการทดสอบโครงข่ายที่มีขนาด 4 โนด ถึง 9 โนด สามารถสรุปได้ว่าการจัดเส้นทางสำรองแบบ PSW สามารถออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวให้มีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายเท่ากับ Lower Bound Fiber กรณีค่าที่คำนวณได้จากสูตร Fiber of congestion link เป็นเลขจำนวนเต็ม

สำหรับกรณี LSW จากตารางที่ 3.10 (ข) จะเห็นว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นส่งผลต่อจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายขนาด 5 โนดและ 6 โนด ยกตัวอย่างเช่น พิจารณาโครงข่ายขนาด 5 โนด เมื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่มีค่าเป็นคี่ คือ 1, 3 และ 5 จะเห็นว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ โดยในกรณี NWC จะมีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายเท่ากับ 20 เส้น 50 เส้น และ 80 เส้น และเมื่อติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้มีจำนวนลดลงเหลือ 15 เส้น 45 เส้น และ 75 เส้น ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถ

ส่งผลต่อต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี LSW เมื่อโครงข่ายมีขนาด 5 โนด และ 6 โนด และรองรับปริมาณทราฟฟิก 1, 3 และ 5

ต่อไปเปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่ปกป้องความเสียหายแบบ LSW กับ Lower Bound Fiber จากตารางที่ 3.9 และ 3.10 (ข) ผลการทดสอบพบว่า โครงข่ายที่มีขนาด 7 โนดและ 9 โนดเท่านั้น ที่ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายมีค่าเท่ากับ Lower Bound Fiber เมื่อโครงข่ายรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีขนาดเท่ากับ 1 ถึง 6 ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายที่ปกป้องความเสียหายแบบ LSW ต้นทุนของโครงข่ายมักมีค่าสูงกว่า Lower Bound Fiber เมื่อโครงข่ายมีขนาดและรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เปลี่ยนไป

เปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี PSW กับ LSW จากตารางที่ 3.10 (ก) และ (ข) พิจารณาโครงข่ายรูปวงแหวนที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคี่ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ออกแบบโครงข่ายกรณี PSW จะเท่ากับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี LSW โดยทดสอบโครงข่ายที่มีขนาด 3 โนด 5 โนด 7 โนด และ 9 โนด ซึ่งรองรับปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มีขนาด 1 ถึง 6 ทราฟฟิก และต่อไปวิเคราะห์โครงข่ายที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคู่ พิจารณาโครงข่ายที่มีขนาด 4 โนดกับ 8 โนด ซึ่งรองรับทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มีค่าเป็นเลขคู่ การออกแบบโครงข่ายกรณี PSW มีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในการออกแบบโครงข่ายเท่ากับ LSW ส่วนกรณีที่ทราฟฟิกเป็นเลขคี่นั้นการออกแบบโครงข่าย LSW จะต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า PSW เมื่อพิจารณาการออกแบบโครงข่ายที่มีจำนวน 6 โนด กรณี NWC สำหรับการจัดเส้นทางใหม่แบบ LSW จะใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า PSW เมื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่ค่า 1, 2, 5, 6 ในขณะที่กรณี WC การออกแบบโครงข่าย PSW กับ LSW ใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากัน

กล่าวโดยสรุปสำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่มีขนาด 4 โนด ถึง 9 โนด และรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีขนาด 1 ถึง 6 การออกแบบโครงข่ายที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคี่ กรณี LSW สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับกรณี PSW ส่วนการออกแบบโครงข่ายที่มีจำนวนโนดเป็นเลขคู่ และปกป้องความเสียหายแบบ LSW มักส่งผลให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายมากกว่า PSW ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายที่ปกป้องความเสียหายแบบ PSW จึงให้ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำกว่าหรือเท่ากับการปกป้องความเสียหายแบบ LSW

บทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวง

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นการแก้ปัญหาให้ได้ผลตอบที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด จากที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 เป็นการนำเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ของโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียว ซึ่งมีการใช้ทรัพยากรของโครงข่ายไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ดังนั้นในบทนี้จึงกล่าวถึงการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนหลายวง โดยในการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนหลายวงจะทำการเลือกวงแหวน 1 วงจากวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่าย เพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดของแต่ละคู่โนด หลังจากนั้นจึงทำการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับปริมาณทราฟฟิก จากที่กล่าวมาทั้งหมดทำการจำลองปัญหาให้อยู่ในรูปของ Integer Linear Programming (ILP) ซึ่งเป็นชุดอสมการเชิงเส้น (constraint) โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการแก้สมการจะต้องเป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะจำลองโครงข่ายในสภาวะการทำงานปกติและโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ซึ่งจะพิจารณาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่ามีผลต่อต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนหลายวงหรือไม่ สำหรับแบบจำลองของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงสามารถออกแบบโครงข่ายได้ 2 วิธีดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

ต่อไปจะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยจำลองโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่มีโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวง ในหัวข้อ 4.2 กล่าวถึงโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่ไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย และหัวข้อที่ 4.3 กล่าวถึงโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงหนึ่งขาด

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงกรณีไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นการจำลองโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง ให้อยู่ในรูปตัวแปร โดยมีลักษณะเป็นอสมการเชิงเส้น เพื่อหาผลเฉลยในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นพร้อมทั้งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงให้กับโครงข่าย โดยมีการกำหนดตัวแปรและสัญลักษณ์สำหรับโครงข่ายที่มีโครงสร้างบนพื้นฐานรูปวงแหวนหลายวง ทั้งกรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายดังนี้

N	จำนวนโนดทั้งหมดในโครงข่าย
D	จำนวนคู่โนดทั้งหมดซึ่งมีค่าเท่ากับ $N(N-1)/2$
C	จำนวนวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดของโครงข่าย
M	จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น
t_i	ปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่ i ซึ่งวัดในหน่วยจำนวนการเชื่อมต่อของช่องสัญญาณ (connections)
n_j	จำนวนโนดหรือจำนวนข่ายเชื่อมโยงของวงแหวนที่ j
W_j	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมากที่สุดในวงแหวนวงที่ j
S_j	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองของข่ายเชื่อมโยงที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมากที่สุดในวงแหวนวงที่ j
$z_{i,j}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อคู่โนดที่ i เลือกวงแหวนที่ j ในการรองรับปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่ i มีค่าเป็น 0 เมื่อคู่โนดที่ i ไม่เลือกวงแหวนที่ j ในการรองรับปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่ i
$r_{i,j}$	ปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่ i ที่ถูกรองรับด้วยวงแหวนที่ j
$x_{i,j,k,m}$	ปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่ i บนเส้นทางที่ k โดยใช้ความยาวคลื่นที่ m และถูกรองรับด้วยวงแหวนที่ j สำหรับกรณีที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
$x_{i,j,k}$	ปริมาณทราฟฟิกของคู่โนดที่ i บนเส้นทางที่ k และถูกรองรับด้วยวงแหวนที่ j สำหรับกรณีใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น
$\delta_{i,j,k,l}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ k ของคู่โนดที่ i บนวงแหวนที่ j ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l มีค่าเป็น 0 เมื่อเส้นทางที่ k ของคู่โนดที่ i บนวงแหวนที่ j ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l
$\gamma_{i,j,m}^{l'}$	จำนวนช่องสัญญาณที่รองรับด้วยเส้นทางสำรองของคู่โนดที่ i บนวงแหวนที่ j เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ l' ขาด โดยใช้ความยาวคลื่นที่ m สำหรับกรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

$\gamma_{i,j}^{l'}$ จำนวนช่องสัญญาณที่รองรับด้วยเส้นทางสำรองของคู่โนดที่ i บนวงแหวนที่ j เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ l' ขาด สำหรับกรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

$\beta_{i,j,l}^{l'}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางสำรองของคู่โนดที่ i ของวงแหวนที่ j ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l มีค่าเป็น 0 เมื่อเส้นทางสำรองของคู่โนดที่ i ของวงแหวนที่ j ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l โดยที่ข่ายเชื่อมโยงที่ l' ขาด

$N, D, C, M, n_j, t_i, \delta_{i,j,k,l}$ และ $\beta_{i,j,l}^{l'}$ เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้กับแบบจำลอง $z_{i,j}, r_{i,j}, W_j, S_j, x_{i,j,k,m}, x_{i,j,k}, \gamma_{i,j,m}^{l'}$ และ $\gamma_{i,j}^{l'}$ เป็นตัวแปรในแบบจำลอง โดยตัวแปรทุกตัวจะต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

จากการกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ข้างต้น สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับออกแบบโครงข่ายที่มีโครงสร้างรูปแหวนหลายวง กรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ทั้งที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (No Wavelength Conversion : NWC)

objective function ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น คือหาต้นทุนโครงข่ายให้มีค่าต่ำที่สุด

$$\text{Min} : M\sum_{j=1}^{C} n_j W_j \tag{4.1}$$

โดยมี constraint ต่าง ๆ ดังนี้

1. พิจารณาแต่ละคู่โนดของโครงข่ายทำการเลือกวงแหวน 1 วงจากวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดให้กับคู่โนด

$$\sum_{j=1}^{C} z_{i,j} = 1 \qquad \forall i = 1,2,...,D \tag{4.2}$$

2. พิจารณาแต่ละคู่โนดทำการกระจายทราฟฟิกทั้งหมดลงบนวงแหวนที่เลือก

$$r_{i,j} = t_i z_{i,j} \qquad \forall i = 1,2,...,D; \forall j = 1,2,...,C \tag{4.3}$$

3. ปริมาณความต้องการทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดที่กระจายลงบนวงแหวนที่เลือกสามารถกระจายทราฟฟิกดังกล่าวได้ 2 เส้นทางโดยใช้ความยาวคลื่นค่าใดก็ได้

$$\sum_{k=1}^{2}\sum_{m=1}^{M} x_{i,j,k,m} = r_{i,j} \quad \forall i = 1,2,...,D; \forall j = 1,2,...,C \tag{4.4}$$

4. สำหรับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่มากที่สุดของแต่ละวงแหวนที่กำลังพิจารณา ต้องสามารถรองรับจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ *l* และมีความยาวคลื่นที่ m โดยจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวเป็นจำนวนครั้งที่สามารถใช้ความยาวคลื่นค่าเดิมซ้ำได้

$$W_j - \sum_{i=l}^{D} \sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k,m}\delta_{i,j,k,l} \geq 0 \quad \forall j = 1,2,...,C\ ; \forall l = 1,2,...,n_j; \forall m = 1,2,...,M \quad (4.5)$$

5. โดยที่ $W_j, x_{i,j,k,m}, z_{i,j}, r_{i,j}$ เป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$W,\ x_{i,j,k,m},\ r_{i,j} \in \{0,1,2,...\} \text{ และ } z_{i,j} \in \{0,1\}$$

$$\forall i = 1,2,...,D; \forall j = 1,2,...,C; \quad \forall k = 1,2; \forall m = 1,2,...,M \quad (4.6)$$

4.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Conversion : WC)

objective function ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น คือหาต้นทุนของโครงข่ายให้มีค่าต่ำที่สุด

$$\text{Min} : M\sum_{j=1}^{C} n_j W_j \quad (4.7)$$

โดยมี constraint ต่าง ๆ ดังนี้

1. พิจารณาแต่ละคู่โนดของโครงข่ายทำการเลือกวงแหวน 1 วงจากวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดให้กับคู่โนด

$$\sum_{j=1}^{C} z_{i,j} = 1 \qquad \forall i = 1,2,...,D \quad (4.8)$$

2. พิจารณาแต่ละคู่โนดทำการกระจายทราฟฟิกทั้งหมดลงบนวงแหวนที่เลือก

$$r_{i,j} = t_i z_{i,j} \qquad \forall i = 1,2,...,D; \forall j = 1,2,...,C \quad (4.9)$$

3. ปริมาณความต้องการทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดที่กระจายลงบนวงแหวนที่เลือกสามารถกระจายทราฟฟิกดังกล่าวได้ 2 เส้นทาง

$$\sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k} = r_{i,j} \quad \forall i = 1,2,...,D; \forall j = 1,2,...,C \quad (4.10)$$

4. สำหรับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่มากที่สุดของแต่ละวงแหวนที่กำลังพิจารณา ต้องสามารถรองรับจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ *l* โดยค่าของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่มากที่สุดคูณกับจำนวนความยาวคลื่นที่มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น จะเป็นค่าจำนวนการเชื่อมต่อที่มากที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในข่ายเชื่อมโยงที่ *l*

$$MW_j - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k}\delta_{i,j,k,l} \geq 0 \quad \forall j = 1,2,...,C;\ \forall l = 1,2,...,n_j \tag{4.11}$$

5. โดยที่ W_j, $x_{i,j,k}$, $z_{i,j}$, $r_{i,j}$ เป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

W, $x_{i,j,k}$, $r_{i,j} \in \{0,1,2,...\}$ และ $z_{i,j} \in \{0,1\}$

$$\forall i = 1,2,...,D; \forall j = 1,2,...,C; \forall k = 1,2 \tag{4.12}$$

4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงกรณีที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

เนื่องจากการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงเมื่อคำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายมี 2 ลักษณะ คือ optimized spare fiber assignment กับ jointly optimized working and spare fiber assignment ซึ่งรายละเอียดการออกแบบทั้ง 2 วิธีได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอการออกแบบ optimized spare fiber assignment เพียงวิธีเดียว เนื่องจากการออกแบบโครงข่ายแบบ jointly optimized working and spare fiber assignment เป็นการนำชุดอสมการการออกแบบโครงข่ายในสภาวะการทำงานปกติกับชุดอสมการของ optimized spare fiber assignment มารวมกัน

4.3.1 Optimized spare fiber assignment

จากที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 การออกแบบด้วยวิธีนี้เป็นการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเท่านั้น อีกทั้งยังต้องทราบการจัดเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายในสภาวะการทำงานปกติ ซึ่งในหัวข้อนี้จะนำเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง กรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

4.3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (No Wavelength Conversion : NWC)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นการหาต้นทุนที่ต่ำที่สุดของโครงข่าย โดยวิธีการออกแบบโครงข่ายแบบ optimized spare fiber assignment เป็นการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต่ำที่สุดซึ่งมี objective function ดังนี้

$$\text{Min} : M\sum_{j=1}^{C} n_j S_j \tag{4.13}$$

โดยมี constraint ต่าง ๆ ดังนี้

1. พิจารณาทุก ๆ ข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ l' ของวงแหวนแต่ละวง สำหรับแต่ละคู่โนดทำการจัดสรรเส้นทางสำรองให้กับเส้นทางปกติที่ถูกรบกวนโดยข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ l'

$$\gamma_{i,j,m}^{l'} = \sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k,m}\delta_{i,j,k,l'}$$
$$\forall j = 1,2...,C; \forall l' = 1,2,...,n_j; \forall i = 1,2,...,D; \ \forall m = 1,2,...,M \qquad (4.14)$$

ตัวแปร $\gamma_{i,j,m}^{l'}$ เป็นการจัดสรรเส้นทางสำรองขึ้นกับวิธีการปกป้องโครงข่าย ซึ่งมีการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection และแบบ Line Protection โดยปกติการจัดสรรความยาวคลื่นสำรอง กรณีปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ Path Protection จะจัดสรรความยาวคลื่นสำรองโดยใช้ค่าความยาวคลื่นสำรองค่าเดียวกับค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายดังสมการที่ (4.14) แต่ในกรณีที่การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองสามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นจากค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย จะมีรูปแบบสมการดังสมการที่ (4.15) ส่วนตารางที่ 4.2 เป็นการนำเสนอตัวแปรและ constraint ของ Path Protection ตามสมการ (4.14)

$$\sum_{m=1}^{M} \gamma_{i,j,m}^{l'} = \sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k,m}\delta_{i,j,k,l'}$$
$$\forall j = 1,2...,C; \forall l' = 1,2,...,n_j; \forall i = 1,2,...,D \qquad (4.15)$$

2. พิจารณาทุก ๆ ข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ l' ของวงแหวนแต่ละวง จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่มากที่สุดของวงแหวนจะต้องเพียงพอที่รองรับจำนวนช่องสัญญาณของเส้นทางสำรองที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l

กรณี PSW

$$S - \sum_{i=1}^{D} \gamma_{i,j,m}^{l'} \beta_{i,j,l}^{l'} + \left(W - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k,m}\delta_{i,j,k,l} \right)$$
$$+ \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} (x_{i,j,k,m}\delta_{i,j,k,l})\delta_{i,j,k,l'} \geq 0 \qquad (4.16)$$

กรณี PSF

$$S - \sum_{i=1}^{D} \gamma_{i,j,m}^{l'} \beta_{i,j,l}^{l'} \geq 0 \qquad (4.17)$$

กรณี LSW

$$S-\sum_{i=1}^{D}\gamma_{i,j,m}^{l'}\beta_{i,j,l}^{l'}+\left(W-\sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2}x_{i,j,k,m}\delta_{i,j,k,l}\right)\geq 0 \qquad (4.18)$$

กรณี LSF

$$S-\sum_{i=1}^{D}\gamma_{i,j,m}^{l'}\beta_{i,j,l}^{l'}\geq 0$$

$$\forall j=1,2,...,C;\ \forall l'=1,2,...,n_j;\ \forall l=1,2,...,n_j \text{ โดยที่ } l\neq l'$$

$$\forall m=1,2,...,M \qquad (4.19)$$

3. โดยที่ $S_j,\gamma_{i,j,m}^{l'}$ เป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$S_j,\gamma_{i,j,m}^{l'}\in\{0,1,2,...\}$$

$$\forall i=1,2,...,D\ ;\forall j=1,2,...,C;\forall l'=1,2,...,n_j\ ;\forall m=1,2,...,M \qquad (4.20)$$

4.3.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Conversion : WC)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจะมีความซับซ้อนของจำนวนสมการและตัวแปรน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยแบบจำลองเป็นการหาต้นทุนที่ต่ำที่สุดของโครงข่ายซึ่งมี objective function ดังนี้

$$\text{Min}: M\sum_{j=1}^{C}n_jS_j \qquad (4.21)$$

โดยมี constraint ต่าง ๆ ดังนี้

1. พิจารณาทุก ๆ ข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ l' ของวงแหวนแต่ละวง สำหรับแต่ละคู่โนดทำการจัดสรรเส้นทางสำรองให้กับเส้นทางปกติที่ถูกรบกวนโดยข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ l'

$$\gamma_{i,j}^{l'}=\sum_{k=1}^{2}x_{i,j,k}\delta_{i,j,k,l'},\ \forall j=1,2...,C;\forall l'=1,2,...,n_j;\forall i=1,2,...,D \qquad (4.22)$$

2. พิจารณาทุก ๆ ข่ายเชื่อมโยงเสียหายที่ l' ของวงแหวนแต่ละวง จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของข่ายเชื่อมโยงที่มากที่สุดของวงแหวนจะต้องเพียงพอที่รองรับจำนวนช่องสัญญาณของเส้นทางสำรองที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ l

กรณี PSW

$$MS-\sum_{i=1}^{D}\gamma_{i,j}^{l'}\beta_{i,j,l}^{l'}+\left(MW-\sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2}x_{i,j,k}\delta_{i,j,k,l}\right)$$
$$+\sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2}(x_{i,j,k}\delta_{i,j,k,l})\delta_{i,j,k,l'}\geq 0 \qquad (4.23)$$

กรณี PSF

$$S-\sum_{i=1}^{D}\gamma_{i,j}^{l'}\beta_{i,j,l}^{l'}\geq 0 \qquad (4.24)$$

กรณี LSW

$$S-\sum_{i=1}^{D}\gamma_{i,j}^{l'}\beta_{i,j,l}^{l'}+\left(W-\sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2}x_{i,j,k}\delta_{i,j,k,l}\right)\geq 0 \qquad (4.25)$$

กรณี LSF

$$S-\sum_{i=1}^{D}\gamma_{i,j}^{l'}\beta_{i,j,l}^{l'}\geq 0$$
$$\forall j=1,2,...,C;\ \forall l'=1,2,...,n_j;\ \forall l=1,2,...,n_j \text{ โดยที่ } l\neq l' \qquad (4.26)$$

3. โดยที่ $S_j,\gamma_{i,j}^{l'}$ เป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$S_j,\gamma_{i,j}^{l'}\in\{0,1,2,...\}$$
$$\forall i=1,2,...,D;\ \forall j=1,2,...,C;\ \forall l'=1,2,...,n_j \qquad (4.27)$$

ต่อไปตารางที่ 4.1 แสดงถึงตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้กับระบบ และผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอ ส่วนตารางที่ 4.2 แสดงถึงจำนวนตัวแปร (number of variables, Nv) และจำนวน constraint (number of constraints, Nc) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 4.1 แสดงถึงตัวแปรที่ต้องกำหนดให้กับระบบและผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์

Protection schemes	**Input**	**Output**
OPSW,OPSF, OLSW,OLSF	$t_i, W_j, z_i, r_i, x_{i,j,k,m}$ $x_{i,j,k}\ \delta_{i,j,k,l}, \beta_{i,j,l}^{l'}, M$	$S_j, \gamma_{i,j,m}^{l'}, \gamma_{i,j}^{l'}$
JPSW,JPSF, JLSW,JLSF	$t_i, \delta_{i,j,k,l}, \beta_{i,j,l}^{l'}, M$	$W_j, S_j, z_i, r_i, x_{i,j,k,m}$ $x_{i,j,k}, \gamma_{i,j,m}^{l'}, \gamma_{i,j}^{l'}$

ตารางที่ 4.2 จำนวนตัวแปร (number of variables, Nv) และจำนวน constraint (number of constraints, Nc) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง ที่คำนึงและไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ในกรณีที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

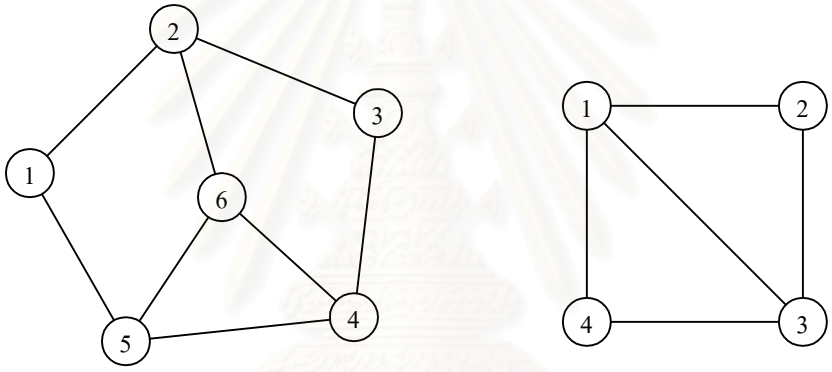
Protection Schemes	**Nv**		**Nc**	
	NWC	**WC**	**NWC**	**WC**
No Protection	$(2M+1)\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j(n_j-1)}{2}+C$	$3\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j(n_j-1)}{2}+C$	$\frac{N(N-1)}{2}+\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j(n_j-1)}{2}+M\sum_{j=1}^{C}n_j$	$\frac{N(N-1)}{2}+\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j(n_j-1)}{2}+\sum_{j=1}^{C}n_j$
OPSW,OPSF **OLSW,OLSF**	$M\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j^2(n_j-1)}{2}+C$	$\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j^2(n_j-1)}{2}+C$	$M\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j^2(n_j-1)}{2}+M\sum_{j=1}^{C}n_j(n_j-1)$	$\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j^2(n_j-1)}{2}+\sum_{j=1}^{C}n_j(n_j-1)$
JPSW,JPSF **JLSW,JLSF**	$(2M+1)\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j(n_j-1)}{2}+M\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j^2(n_j-1)}{2}+2C$	$3\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j(n_j-1)}{2}+\sum_{j=1}^{R}\frac{n_j^2(n_j-1)}{2}+2C$	$\frac{N(N-1)}{2}+\sum_{j=1}^{c}\frac{n_j(n_j-1)}{2}+M\sum_{j=1}^{C}n_j+M\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j^2(n_j-1)}{2}+M\sum_{j=1}^{C}n_j(n_j-1)$	$\frac{N(N-1)}{2}+\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j(n_j-1)}{2}+\sum_{j=1}^{C}n_j+\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j^2(n_j-1)}{2}+\sum_{j=1}^{C}n_j(n_j-1)$

4.4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

สำหรับการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กล่าวในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 สามารถหาผลเฉลยได้โดย Integer Linear Programing ซึ่งใช้ CPLEX 6.60 [14] ในการหาผลตอบ และใช้คอมพิวเตอร์ Pentium 667 MHz โดยมี RAM ขนาด 128 MB ในการรันโปรแกรม

4.4.1 การวิเคราะห์โครงข่ายกรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

หัวข้อนี้ศึกษาวิเคราะห์ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่คำนึงและไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย พร้อมทั้งศึกษาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่าสามารถช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้หรือไม่ และวิเคราะห์ความซับซ้อนของโครงข่าย โดยโครงข่ายที่พิจารณามี 2 ขนาด (ก) โครงข่าย 6N_7R (ข) โครงข่าย 4N_3R



(ก) (ข)

รูปที่ 4.1 โครงข่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) โครงข่าย 6N_7R (ข) โครงข่าย 4N_3R

1. โครงข่ายรูปที่ 4.1 (ก) เป็นโครงข่ายที่มีจำนวนโนดทั้งหมด 6 โนด และมีวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่าย 7 วงแหวน ซึ่งโครงข่ายรองรับทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มีขนาด Traffic Volume เท่ากับ 1 เพื่อความสะดวกในการนำเสนอจึงขอเรียกโครงข่ายนี้ว่า โครงข่าย 6N_7R
2. โครงข่ายข่ายรูปที่ 4.1 (ข) เป็นโครงข่ายที่มีขนาดเล็กกว่าโครงข่ายแรก โดยมีจำนวนโนดทั้งหมด 4 โนดและมีจำนวนวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมด 3 วงแหวน โดยโครงข่ายรองรับทราฟฟิกแบบนอนยูนิฟอร์ม (non–uniform) นั่นคือ แต่ละคู่โนดมีความต้องการปริมาณทราฟฟิกไม่เท่ากัน และเพื่อความสะดวกในการนำเสนอจึงขอเรียกโครงข่ายนี้ว่า โครงข่าย 4N_3R

ตารางที่ 4.3 วงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่าย (ก) โครงข่าย 6N_7R (ข) โครงข่าย 4N_3R

Ring	Number of nodes	Description
1	3	4-5-6
2	4	2-3-4-6
3	5	2-3-4-5-6
4	4	1-2-6-5
5	5	1-2-6-4-5
6	6	1-2-3-4-6-5
7	5	1-2-3-4-5

(ก)

Ring	Number of nodes	Description
1	3	1-2-3
2	3	1-3-4
3	4	1-2-3-4

(ข)

ตารางที่ 4.4 ปริมาณความต้องการทราฟฟิกของแต่ละคู่โนด (ก) ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่มี Traffic Volume เท่ากับ 1 ของโครงข่าย 6N_7R (ข) ทราฟฟิกนอนยูนิฟอร์มของโครงข่าย 4N_3R

Node	1	2	3	4	5	6
1	-	1	1	1	1	1
2	1	-	1	1	1	1
3	1	1	-	1	1	1
4	1	1	1	-	1	1
5	1	1	1	1	-	1
6	1	1	1	1	1	-

(ก)

Node	1	2	3	4
1	-	2	1	1
2	2	-	1	5
3	1	1	-	3
4	1	5	3	-

(ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนต่อไปตารางที่ 4.4 แสดงถึงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่โครงข่ายต้องการ ทั้งที่คำนึงและไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายของโครงข่าย 6N_7R และตารางที่ 4.5 แสดงถึงความซับซ้อนของโครงข่ายซึ่งอยู่ในรูปของจำนวนตัวแปรและจำนวน constraint ทั้งกรณี Optimized spare fiber assignment กับ Jointly optimized working and spare fiber assignment โดยพิจารณาความซับซ้อนของโครงข่าย 6N_7R

ตารางที่ 4.5 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 6N_7R ต้องการ (ก) กรณีโครงข่ายที่ไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment ; เปอร์เซ็นต์ หมายถึง จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องใช้ เทียบกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่ไม่ได้คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

M	No Protection Network	
	NWC	WC
1	25	25
2	13	13
4	10	10
8	6	6

(ก)

M	Optimized spare fiber assignment							
	Path Protection				Line Protection			
	Shared Wavelength		Shared Fiber		Shared Wavelength		Shared Fiber	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
1	50 (100%)	50 (100%)	50 (100%)	50 (100%)	50 (100%)	50 (100%)	50 (100%)	50 (100%)
2	26 (100%)	26 (100%)	26 (100%)	26 (100%)	26 (100%)	26 (100%)	26 (100%)	26 (100%)
4	20 (100%)	16 (60%)	20 (100%)	20 (100%)	20 (100%)	20 (100%)	20 (100%)	20 (100%)
8	12 (100%)	12 (100%)	12 (100%)	12 (100%)	12 (100%)	12 (100%)	12 (100%)	12 (100%)

(ข)

M	Jointly optimized working and spare fiber assignment							
	Path Protection				Line Protection			
	Shared Wavelength		Shared Fiber		Shared Wavelength		Shared Fiber	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
1	45 (80%)	45 (80%)	50 (100%)	50 (100%)	49 (96%)	49 (96%)	50 (100%)	50 (100%)
2	26 (100%)	23(76.92%)	26 (100%)	26 (100%)	26 (100%)	25 (92.3%)	26 (100%)	26 (100%)
4	16 (60%)	13 (30%)	20 (100%)	20 (100%)	16 (60%)	13 (30%)	20 (100%)	20 (100%)
8	11 (83.33%)	10 (66.66%)	12 (100%)	12 (100%)	12 (100%)	10 (66.67%)	12 (100%)	12 (100%)

(ค)

ตารางที่ 4.6 จำนวน constraint (Nc) และจำนวนตัวแปร (Nv) ของโครงข่าย 6N_7R (ก) กรณีโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment

M	No Protection Network			
	NWC		WC	
	Nc	Nv	Nc	Nv
1	107	187	107	187
2	139	307	107	187
4	203	547	107	187
8	331	1027	107	187

(ก)

M	Optimized spare fiber assignment															
	Path Protection								Line Protection							
	Shared Wavelength				Shared Fiber				Shared Wavelength				Shared Fiber			
	NWC		WC		NWC		WC		NWC		WC		NWC		WC	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	417	304	417	304	417	304	417	304	417	304	417	304	417	304	417	304
2	834	601	417	304	834	601	417	304	834	601	417	304	834	601	417	304
4	1668	1195	417	304	1668	1195	417	304	1668	1195	417	304	1668	1195	417	304
8	3336	2383	417	304	3336	2383	417	304	3336	2383	417	304	3336	2383	417	304

(ข)

M	Jointly optimized working and spare fiber assignment															
	Path Protection								Line Protection							
	Shared Wavelength				Shared Fiber				Shared Wavelength				Shared Fiber			
	NWC		WC		NWC		WC		NWC		WC		NWC		WC	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	524	491	524	491	524	491	524	491	524	491	524	491	524	491	524	491
2	973	908	524	491	973	908	524	491	973	908	524	491	973	908	524	491
4	1871	1742	524	491	1871	1742	524	491	1871	1742	524	491	1871	1742	524	491
8	3667	3410	524	491	3667	3410	524	491	3667	3410	524	491	3667	3410	524	491

(ค)

ตารางที่ 4.7 เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย (run time) ของโครงข่าย 6N_7R ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาที (ก) กรณีโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment

M	No Protection Network	
	NWC	WC
1	0.25	0.94
2	2.04	0.33
4	33.03	0.22
8	12.26	0.15

(ก)

M	Optimized spare fiber assignment							
	Path Protection				Line Protection			
	Shared Wavelength		Shared Fiber		Shared Wavelength		Shared Fiber	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.15	0.01	0.01	0.03
2	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
4	0.02	0.01	0.08	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03
8	0.22	0.01	0.27	0.01	0.04	0.01	0.04	0.03

(ข)

M	Jointly optimized working and spare fiber assignment							
	Path Protection				Line Protection			
	Shared Wavelength		Shared Fiber		Shared Wavelength		Shared Fiber	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
1	0.14	0.16	1.24	1.23	0.94	0.5	0.45	0.03
2	72.78	0.37	249.34	1.33	8.3	0.77	3.1	0.03
4	10186.13	0.53	2636.58	1.24	380.19	0.66	7236.66	0.03
8	8600.71	0.52	86341.97	0.84	5252.25	0.35	41.56	0.03

(ค)

ตารางที่ 4.8 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดที่โครงข่าย 4N_3R ต้องการ (ก) กรณีโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment ; เปอร์เซ็นต์ หมายถึง จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องใช้ เทียบกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่ไม่ได้คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

M	No Protection Network	
	NWC	WC
1	21	21
2	11	11
4	7	7
8	4	4

(ก)

M	Optimized spare fiber assignment							
	Path Protection				Line Protection			
	Shared Wavelength		Shared Fiber		Shared Wavelength		Shared Fiber	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
1	42 (100%)	42 (100%)	42 (100%)	42 (100%)	42 (100%)	42 (100%)	42 (100%)	42 (100%)
2	22 (100%)	22 (100%)	22 (100%)	22 (100%)	22 (100%)	22 (100%)	22 (100%)	22 (100%)
4	11 (57.14%)	11 (57.14%)	14 (100%)	14 (100%)	11 (57.14%)	11 (57.14%)	14 (100%)	14 (100%)
8	8 (100%)	8 (100%)	8 (100%)	8 (100%)	8 (100%)	8 (100%)	8 (100%)	8 (100%)

(ข)

M	Jointly optimized working and spare fiber assignment							
	Path Protection				Line Protection			
	Shared Wavelength		Shared Fiber		Shared Wavelength		Shared Fiber	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
1	41 (95.24%)	41 (95.24%)	42 (100%)	42 (100%)	41 (95.24%)	41 (95.24%)	42 (100%)	42 (100%)
2	21 (90.91%)	21 (90.91%)	22 (100%)	22 (100%)	22 (100%)	21 (90.91%)	22 (100%)	22 (100%)
4	11 (57.14%)	11 (57.14%)	14 (100%)	14 (100%)	11 (57.14%)	11 (57.14%)	14 (100%)	14 (100%)
8	7 (75%)	7 (75%)	8 (100%)	8 (100%)	8 (100%)	7 (75%)	8 (100%)	8 (100%)

(ค)

ตารางที่ 4.9 จำนวน constraint (Nc) และจำนวนตัวแปร (Nv) ของโครงข่าย 4N_3R (ก) กรณีโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment

M	No Protection Network			
	NWC		WC	
	Nc	Nv	Nc	Nv
1	28	39	28	39
2	38	63	28	39
4	58	111	28	39
8	98	207	28	39

(ก)

M	Optimized spare fiber assignment															
	Path Protection								Line Protection							
	Shared Wavelength				Shared Fiber				Shared Wavelength				Shared Fiber			
	NWC		WC		NWC		WC		NWC		WC		NWC		WC	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	54	33	54	33	54	33	54	33	54	33	54	33	54	33	54	33
2	108	63	54	33	108	63	54	33	108	63	54	33	108	63	54	33
4	216	123	54	33	216	123	54	33	216	123	54	33	216	123	54	33
8	432	243	54	33	432	243	54	33	432	243	54	33	432	243	54	33

(ข)

M	Jointly optimized working and spare fiber assignment															
	Path Protection								Line Protection							
	Shared Wavelength				Shared Fiber				Shared Wavelength				Shared Fiber			
	NWC		WC		NWC		WC		NWC		WC		NWC		WC	
	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv	Nc	Nv
1	82	72	82	72	82	72	82	72	82	72	82	72	82	72	82	72
2	146	126	82	72	146	126	82	72	146	126	82	72	146	126	82	72
4	274	234	82	72	274	234	82	72	274	234	82	72	274	234	82	72
8	530	450	82	72	530	450	82	72	530	450	82	72	530	450	82	72

(ค)

ตารางที่ 4.10 เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย (run time) ของโครงข่าย 4N_3R ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาที (ก)กรณีโครงข่ายไม่ได้คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (No Protection Network) (ข) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network)โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment (ค) กรณีโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Protection Network) โดยออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment

M	No Protection Network	
	NWC	WC
1	0.05	0.16
2	0.07	0.05
4	0.11	0.06
8	0.31	0.05

(ก)

M	Optimized spare fiber assignment							
	Path Protection				Line Protection			
	Shared Wavelength		Shared Fiber		Shared Wavelength		Shared Fiber	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
1	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
2	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
4	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
8	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.01

(ข)

M	Jointly optimized working and spare fiber assignment							
	Path Protection				Line Protection			
	Shared Wavelength		Shared Fiber		Shared Wavelength		Shared Fiber	
	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC	NWC	WC
1	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.02	0.03	0.01
2	0.04	0.02	0.03	0.03	0.09	0.02	0.07	0.01
4	0.1	0.01	0.05	0.03	0.27	0.01	0.1	0.03
8	1.04	0.01	1	0.02	0.95	0.02	0.8	0.02

(ค)

4.4.1.1 การวิเคราะห์โครงข่ายไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

4.4.1.1.1 วิเคราะห์ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

การออกแบบโครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย เพื่อศึกษาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่ามีผลต่อต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายรูปวงแหวนหลายวงหรือไม่ จากตารางที่ 4.5 (ก) และตารางที่ 4.8 (ก) จะเห็นว่าค่าต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 6N_7R และโครงข่าย 4N_3R กรณี NWC และ WC มีค่าเท่ากันทุก ๆ ค่าของ M ไม่ว่าโครงข่ายจะรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มหรือนอนยูนิฟอร์ม แสดงว่าในการออกแบบโครงข่ายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณี NWC การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่เหมาะสมสามารถออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุดได้ โดยไม่จำเป็นที่ต้องใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเพื่อลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย

4.4.1.1.2 วิเคราะห์จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย

ต่อไปพิจารณาจำนวนวงแหวนที่ใช้สำหรับรองรับปริมาณความต้องการทราฟฟิกทั้งหมดของทุกคู่โนด เมื่อออกแบบโครงข่าย 6N_7R กรณี NWC โดยมีค่าความยาวคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสงเป็น 1,2,4,8 จากตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าเมื่อ M มีค่ามากขึ้น จำนวนวงแหวนทั้งหมดที่ใช้รองรับทราฟฟิกจะมีจำนวนลดลง พิจารณาการเลือกวงแหวนของโครงข่ายเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ค่า M ต่าง ๆ จะเห็นว่าที่ค่า M = 1 และ 2 โครงข่ายจะทำการเลือกวงแหวนขนาดกลางและขนาดเล็กเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิก และเมื่อ M มีค่าสูงขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 8 โครงข่ายจะเลือกใช้วงแหวนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดเพียงวงเดียวเพื่อรองรับทราฟฟิก (วงแหวนที่ 6) และเมื่อวิเคราะห์ถึงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมดในการออกแบบโครงข่าย 6N_7R จากตารางที่ 4.5 (ก) จะเห็นได้ว่า เมื่อ M มีค่าสูงขึ้น จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้จะมีจำนวนลดลง โดยที่ค่า M = 1 มีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในการออกแบบโครงข่ายทั้งหมด 25 เส้น แต่เมื่อ M มีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 8 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจะมีจำนวนลดลงเหลือเพียง 6 เส้น เหตุที่เมื่อ M มีค่าสูงขึ้นจำนวนวงแหวนและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมีจำนวนลดลง เนื่องจากว่าเมื่อค่า M สูงขึ้นความจุช่องสัญญาณของเส้นใยแก้วนำแสงจะมีค่ามากขึ้น ส่งผลเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้นสามารถรองรับทราฟฟิกในปริมาณที่สูงขึ้นด้วย ดังนั้นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่โครงข่ายต้องการจึงมีค่าลดลง และเมื่อ M มีค่ามากจนถึงค่าหนึ่งวงแหวนเพียงวงเดียวก็เพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกได้ทั้งหมด

สำหรับโครงข่าย 4N_3R ซึ่งมีการรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบนอนยูนิฟอร์ม พิจารณาจำนวนวงแหวนและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จากตารางที่ 4.8 (ก) และตารางที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่โครงข่ายต้องการและจำนวนวงแหวนที่ใช้รองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดมีจำนวนลดลงเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งข้อสังเกตนี้สอดคล้องกับข้อสังเกตกรณีโครงข่าย 6N_7R ที่มีการรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม แต่เนื่องจากโครงข่าย 6N_7R มีขนาดใหญ่กว่า อีกทั้ง

ต้องรองรับความต้องการปริมาณทราฟฟิกมากกว่า ดังนั้นจึงต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าโครงข่าย 4N_3R

ตารางที่ 4.11 การเลือกวงแหวนของโครงข่าย 6N_7R กรณี NWC เพื่อรองรับปริมาณความต้องการทราฟฟิกของทุกคู่โนดที่ค่า M ต่าง ๆ โดยค่า 1 แสดงถึงการเลือกวงแหวนของโครงข่าย

Ring	Number of nodes	Description	M = 1	M = 2	M = 4	M = 8
1	3	4-5-6	1	-	-	-
2	4	2-3-4-6	1	1	1	-
3	5	2-3-4-5-6	1	-	-	-
4	4	1-2-6-5	1	1	-	-
5	5	1-2-6-4-5	-	-	-	-
6	6	1-2-3-4-6-5	-	-	1	1
7	5	1-2-3-4-5	1	1	-	-
Total Ring			5	3	2	1

ตารางที่ 4.12 การเลือกวงแหวนของโครงข่าย 4N_3R กรณี NWC เพื่อรองรับปริมาณความต้องการทราฟฟิกของทุกคู่โนดที่ค่า M ต่าง ๆ โดยค่า 1 แสดงถึงการเลือกวงแหวนของโครงข่าย

Ring	Number of nodes	Description	M = 1	M = 2	M = 4	M = 8
1	3	1-2-3	1	-	-	-
2	3	1-3-4	1	1	1	-
3	4	1-2-3-4	1	1	1	1
Total Ring			3	2	2	1

4.4.1.1.3 วิเคราะห์ความซับซ้อนของโครงข่าย

เมื่อพิจารณาจำนวน constraint และจำนวนตัวแปร เมื่อ M มีค่าต่าง ๆ ของโครงข่าย 6N_7R จากตารางที่ 4.6 (ก) จะเห็นว่ากรณี WC จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสงไม่ส่งผลต่อจำนวน constraint และจำนวนตัวแปร โดยเมื่อ M มีค่าเป็น 1,2,4,8 จะมีจำนวน Nc = 107 และ Nv = 187 เท่ากัน ทุก ๆ ค่าของ M แต่ในกรณี NWC จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพลกซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสงส่งผลต่อจำนวน constraint และตัวแปร โดยเมื่อ M มีค่าสูงขึ้น จำนวน constraint และตัวแปรก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งจะเห็นว่าที่ค่า M = 1 จะมี Nc = 107

และ Nv = 187 แต่เมื่อ M มีค่าเป็น 8 จำนวน constraint และตัวแปรจะสูงขึ้นมาก คือ มีค่า Nc = 331 และ Nv = 1027 ดังนั้นเมื่อพิจารณาในแง่เวลาการคำนวณ จากตารางที่ 4.7 (ก) เห็นได้ว่า กรณี WC ใช้เวลาในการคำนวณผลเฉลยไม่เกิน 1 วินาทีซึ่งน้อยมาก ต่างจากกรณี NWC ซึ่งใช้เวลาการคำนวณเพิ่มขึ้นตามค่า M ที่มากขึ้น โดยใช้เวลาในการคำนวณมากที่สุดที่ค่า M = 4 คือ 33.03 วินาที ดังนั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดความซับซ้อนของโครงข่ายให้มีจำนวน constraint และจำนวนตัวแปรลดน้อยลง ทำให้เวลาในการหาผลเฉลยของแบบจำลองได้เร็วขึ้น แต่ไม่สามารถช่วยลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้

และเมื่อพิจารณาโครงข่าย 4N_3R ซึ่งรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบนอนยูนิฟอร์ม จากตารางที่ 4.9 (ก) จะเห็นว่า กรณี WC จำนวน constraint และจำนวนตัวแปรไม่ขึ้นอยู่กับค่า M แต่ในกรณี NWC จำนวน constraint และจำนวนตัวแปรจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ M สูงขึ้น ซึ่งข้อสรุปที่ได้นี้ตรงกับข้อสรุปของโครงข่าย 6N_7R ที่มีการรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม แต่เนื่องจากโครงข่าย 6N_7R มีขนาดใหญ่กว่า จึงมีจำนวน constraint และจำนวนตัวแปรซับซ้อนมากกว่าโครงข่าย 4N_3R ดังนั้นเวลาในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 6N_7R จึงใช้เวลาหาผลเฉลยนานกว่าโครงข่าย 4N_3R

4.4.1.2 การวิเคราะห์โครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายโดยวิธี Optimized spare fiber assignment

4.4.1.2.1 วิเคราะห์ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

พิจารณาโครงข่าย 6N_7R ซึ่งมีการรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม ศึกษาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่าสามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้หรือไม่ จากตารางที่ 4.5 (ข) จะเห็นว่า การปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ PSF, LSW และ LSF ต้นทุนของโครงข่ายกรณี NWC และ WC มีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากันทุกค่าของ M ดังนั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถช่วยลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้ แต่กรณีโครงข่าย NWC ที่ปกป้องความเสียหายแบบ PSW ที่ค่า M = 4 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้สำหรับออกแบบโครงข่ายมีจำนวนเท่ากับ 20 เส้น แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้มีค่าลดลงเหลือ 15 เส้น ดังนั้นโครงข่าย 6N_7R สำหรับการออกแบบด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย NWC กรณี Path Protection โดยจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength ได้เพียงกรณีเดียว

เมื่อพิจารณาโครงข่าย 4N_3R ซึ่งมีการรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบนอนยูนิฟอร์ม จากตารางที่ 4.8 (ข) จะเห็นว่าการปกป้องโครงข่ายแบบ PSW, PSW, LSW, และ LSF กรณี NWC และ WC ค่าต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายมีค่าเท่ากันทุก ๆ ค่าของ M แสดงว่าการออก

แบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถช่วยลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 4N_3R ได้

4.4.1.2.2 วิเคราะห์จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย

ส่วนต่อไปพิจารณาโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด กับโครงข่ายที่คำนึงถึงผลข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยพิจารณาโครงข่าย 6N_7R ซึ่งมีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Fiber จากตารางที่ 4.5 (ก) กับตารางที่ 4.5 (ข) จะเห็นว่าต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณีที่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหายมีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสูงขึ้นจากโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดถึง 100% ไม่ว่าจะจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection หรือแบบ Line Protection และเมื่อพิจารณาถึงการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Share Wavelength ที่ค่า M = 1,2,8 จะมีค่าต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายสูงขึ้นจากโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด 100% เช่นเดียวกัน ยกเว้นกรณี PSW ที่ M = 4 โดยมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ซึ่งกรณีนี้ต้นทุนของโครงข่ายเพิ่มขึ้นเพียง 60% สาเหตุที่ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายสูงขึ้น 100% เกือบทุก ๆ ค่าของ M เนื่องจากว่าการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment เป็นการออกแบบโครงข่ายให้สามารถจัดเส้นทางได้ใหม่เมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยออกแบบโครงข่ายที่มีการทำงานอยู่ก่อนแล้ว ดังนั้นการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายที่มีสภาวะการทำงานปกติ จึงเป็นการจัดสรรที่ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งไม่ใช่การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุด ทำให้การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment ต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจากโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเสียหายเกือบ 100% ทุก ๆ ค่าของ M แม้ว่ากรณีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength จะสามารถใช้ช่องสัญญาณที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานได้ก็ตาม

สำหรับโครงข่าย 4N_3R จากตารางที่ 4.8 (ก) และ (ข) เมื่อพิจารณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Fiber ต้นทุนของโครงข่ายจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเสียหาย 100% ทุก ๆ ค่าของ M และ เมื่อพิจารณาการปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ PSW และ LSW กรณี NWC และ WC จะมี M เพียงค่าเดียวเท่านั้น คือ M เท่ากับ 4 ที่ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายสูงขึ้นจากโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเสียหายไม่ถึง 100% คือ มีต้นทุนเพิ่มขึ้นเพียง 57.14% จากผลการทดสอบโครงข่ายจะเห็นได้ว่า การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment โครงข่ายจะมีการวางเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มจากโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยง

เสียหาย 100% เกือบทุกค่าของ M แม้กรณีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength เป็นการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองที่สามารถจัดสรรความยาวคลื่นลงบนช่องสัญญาณที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงานได้ก่อนก็ตาม ก็ยังไม่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งข้อสรุปที่ได้นี้ตรงกับกรณีโครงข่าย 6N_7R

4.4.1.2.3 วิเคราะห์ความซับซ้อนของโครงข่าย

เมื่อพิจารณาจำนวน constraint และจำนวนตัวแปรของการออกแบบโครงข่าย 6N_7R ซึ่งรองรับทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มจากตารางที่ 4.6 (ข) พบว่าการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment โดยปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ PSW, LSW, PSF และ LSF ทั้ง 4 วิธี จะมีจำนวน constraint และจำนวนตัวแปรเท่ากันเมื่อพิจารณาในแต่ละค่าของ M โดยโครงข่ายกรณี WC จำนวน constaint และจำนวนตัวแปรไม่ขึ้นอยู่กับค่าของ M ในขณะที่กรณี NWC จำนวน constraint และจำนวนตัวแปรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของ M เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น กรณี PSW และ PSF จะมีจำนวน constraint และจำนวนตัวแปรเท่ากันในแต่ละค่าของ M โดยกรณี WC พิจารณา M ที่ค่า 1, 2, 4 และ 8 จะมีจำนวน contraint และจำนวนตัวแปรคงที่ คือ Nc= 417 และ Nv = 304 แต่ในกรณี NWC จำนวน constarint และตัวแปรมีค่าไม่คงที่ คือ เมื่อ M มีค่าเท่ากับ 1 จะมี Nc = 417 และ Nv = 304 และเมื่อ M ค่าเท่ากับ 8 จะมี Nc = 3336 และ Nv = 2383 เห็นได้ว่าจำนวน constraint และตัวแปรสูงขึ้นตามค่าของ M สำหรับเวลาในการคำนวณหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จาก ตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยของแบบจำลองน้อยกว่า 1 วินาที ซึ่งเป็นเวลาคำนวณหาผลเฉลยไม่นานนัก สาเหตุเนื่องจากว่าการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimize spare fiber assignment นั้นเป็นการออกแบบโดยต้องทราบถึงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายในสภาวะการทำงานปกติ ดังนั้นจำนวน constraint และจำนวนตัวแปรในแบบจำลองจึงมีจำนวนไม่สูงมาก ทำให้การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยของแบบจำลองไม่มากนัก

สำหรับโครงข่าย 4N_3R จากตารางที่ 4.9 (ข) จะเห็นว่ากรณี WC จำนวน constraint และจำนวนตัวแปรมีค่าคงที่ทุก ๆ ของ M ในทางตรงกันข้ามกับกรณี NWC จำนวน constraint และตัวแปรจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งข้อสรุปที่ได้ตรงกับโครงข่าย 6N_7R จากตารางที่ 4.9 (ข) เห็นได้ว่า เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยทั้ง 2 โครงข่ายมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แม้ว่าโครงข่าย 6N_7R จะมีจำนวน constraint และจำนวนตัวแปรมากกว่าโครงข่าย 4N_3R ก็ตาม

4.4.1.3 การวิเคราะห์โครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายโดยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment

4.4.1.3.1 วิเคราะห์ผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เพื่อศึกษาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่าสามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 6N_7R ที่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้หรือไม่ จากตารางที่ 4.5 (ค) พิจารณา M ที่ค่า 2, 4 และ 8 กรณี PSW และ LSW อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี NWC ได้ แต่ในกรณีที่ M = 1 ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากัน เนื่องจากว่าจำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพลกซ์ลงในเส้นใยแก้วนำแสงมีเพียงค่าเดียว โครงข่ายจึงไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น เพื่อเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นให้กับสัญญาณที่มัลติเพล็กซ์ในเส้นใยแก้วนำแสง อีกทั้งถ้าพิจารณาในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพบว่า โครงข่าย NWC และ WC จะมี constraint ต่าง ๆ ในแบบจำลองเหมือนกัน ทำให้ผลเฉลยที่ได้ทั้งสองกรณีมีค่าต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายเท่ากัน และเมื่อพิจารณา M ที่ค่าอื่น ๆ ยกตัวอย่าง กรณี LSW พิจารณาค่า M ที่ 2, 4 และ 8 เมื่อติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายพบว่าสามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้ โดยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับ 2 เส้น 3 เส้นและ 2 เส้นตามลำดับ สำหรับกรณี PSF และ LSF อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้ เนื่องจากโครงข่ายกรณี NWC และ WC ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายจะมีค่าเท่ากันทุก ๆ ค่าของ M ดังนั้นโครงข่าย 6N_7R ที่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง และมีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้ ในขณะที่การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Fiber อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย

ต่อไปทำการวิเคราะห์โครงข่าย 4N_3R จากตารางที่ 4.8 (ค) พบว่าเมื่อโครงข่ายมีการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Line Protection โดยจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength ที่ M = 2 และ 8 ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี NWC มีจำนวน 22 เส้นและ 8 เส้นตามลำดับ แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายมีค่าลดลงเป็น 21 เส้นและ 7 เส้น ซึ่งกรณี PSW, PSF และ LSF ต้นทุนของโครงข่ายกรณี NWC และ WC มีค่าเท่ากันทุก ๆ ค่าของ M ดังนั้นสำหรับโครงข่าย 4N_3R กรณี LSW เป็นกรณีเดียวที่อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายได้

4.4.1.3.2 วิเคราะห์จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง

ต่อไปทำการวิเคราะห์จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 6N_7R กรณีโครงข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด กับกรณีที่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายจากตารางที่ 4.5 (ก) และตารางที่ 4.5 (ค) เมื่อพิจารณาการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Fiber ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเสียหาย100% ทุก ๆ ค่าของ M ทั้งกรณีการจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection และแบบ Line Protection แต่กรณีโครงข่ายมีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength โดยปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ Path Protection และแบบ Line Protection ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายจะเพิ่มขึ้น 100% เพียงค่าเดียวที่ M = 2 กรณี NWC ส่วนกรณีอื่นการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength ไม่จำเป็นต้องวางจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นจากโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเสียหายถึง 100% อีกทั้งเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้น จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เพิ่มให้กับโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเสียหายเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบของเหตุการณ์ที่เกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงมีแนวโน้มลดลง ยกตัวอย่างเช่น การปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ PSW กรณี WC เมื่อค่า M สูงขึ้นเป็น 1,2 และ 4 เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายที่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย กับต้นทุนของโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเสียขาด ผลต่างของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายทั้งสองมีค่าลดลงเป็น 80%, 76.92% และ 30% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อ M มีค่าสูงขึ้น จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องใช้ในโครงข่ายที่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายจะมีจำนวนใกล้เคียงกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเสียขาด ทำให้ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในการออกแบบทั้งสองโครงข่ายไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ที่ M = 8 ผลต่างของต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งสองโครงข่ายกลับมีค่าสูงขึ้นเป็น 66.66% เนื่องจากว่าการเลือกวงแหวนของโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเสียหายมีการเลือกวงแหวนเพื่อรองรับทราฟฟิกทั้งหมดเพียงวงเดียว (วงแหวนที่ 6) ซึ่งแสดงการเลือกวงแหวนในตารางที่ 4.13 แต่ในโครงข่ายที่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายนั้นวงแหวนวงที่ 6 เพียงวงเดียวไม่สามารถรองรับทราฟฟิกได้ทั้งหมด จึงจำเป็นต้องเพิ่มวงแหวนวงที่ 4 ให้กับโครงข่าย ทำให้โครงข่ายมีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเสียหายถึง 4 เส้น ผลที่ตามมาทำให้ต้นทุนของโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายสูงขึ้นมากแม้ว่า M จะมีค่าเท่ากับ 8 ก็ตาม

ตารางที่ 4.13 การเลือกวงแหวนของโครงข่าย 6N_7R กรณี WC สำหรับโครงข่ายที่คำนึงและไม่คำนึงถึงผลของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย พิจารณาที่ M = 8 โดยค่า 1 แสดงถึงการเลือกวงแหวนของโครงข่าย

Ring	Number of nodes	Description	No Protection Network	Protection Network
1	3	4-5-6	-	-
2	4	2-3-4-6	-	-
3	5	2-3-4-5-6	-	-
4	4	1-2-6-5	-	1
5	5	1-2-6-4-5	-	-
6	6	1-2-3-4-6-5	1	1
7	5	1-2-3-4-5	-	-
Total Ring			1	2

สำหรับโครงข่าย 4N_3R ซึ่งรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบนอนยูนิฟอร์ม จากตารางที่ 4.8 (ก) และตารางที่ 4.8 (ค) เมื่อโครงข่ายที่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหายมีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Fiber ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายจะมีค่าสูงขึ้นจากโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงเสียขาดถึง 100% ทุก ๆ ค่าของ M และเมื่อพิจารณาถึงการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength โครงข่ายไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงถึง 100% ทุกค่า ๆ ของ M เพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบของข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ผลสรุปที่ได้ตรงกับผลสรุปของโครงข่าย 6N_7R ซึ่งมีการรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม

4.4.1.3.3 วิเคราะห์ความซับซ้อนของโครงข่าย

เมื่อพิจารณาความซับซ้อนของโครงข่าย 4N_3R และโครงข่าย 6N_7R โดยแสดงความซับซ้อนอยู่ในรูปของจำนวน constraint และจำนวนตัวแปรจากตารางที่ 4.6 (ค) และตารางที่ 4.9 (ค) จะเห็นว่า ไม่ว่าโครงข่ายปกป้องความเสียหายแบบ Path Protection หรือแบบ Line Protection โดยจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength หรือ Shared Fiber กรณี WC จำนวน constraint และจำนวนตัวแปรมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับค่าของ M ในทางตรงกันข้ามกรณี NWC จำนวน constraint และจำนวนตัวแปรมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ M มีค่าสูงขึ้น ซึ่งข้อสรุปที่ได้นี้สอดคล้องกับการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment แต่ในการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment จำนวน contraint และจำนวนตัวแปรจะมากกว่าวิธี Optimized spare fiber assignment ค่อนข้างมาก เนื่องจากว่าการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธีนี้ จะต้อง

ทำการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายที่มีการทำงานปกติ พร้อมกับหาเส้นทางสำรองและความยาวคลื่นสำรองเมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ดังนั้นจึงใช้เวลาในการหาผลเฉลยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มากกว่าวิธี Optimized spare fiber assignment ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.7 (ค) และ 4.10 (ค) ยกตัวอย่างเช่น พิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 6N_7R โดยปกป้องความเสียหายแบบ PSW กรณี NWC ที่ M = 4 โดยใช้วิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment จะใช้เวลาในการหาผลเฉลยของแบบจำลอง 2.83 ช.ม. ในขณะที่ถ้าออกแบบด้วยวิธี Optimize spare fiber assignment จะใช้เวลาเพียง 0.02 วินาที

เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่คำนึงถึงผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยมีการปกป้องโครงข่ายแบบ PSW, PSF, LSW และ LSF จากตารางที่ 4.6 (ค) เมื่อพิจารณาถึงความซับซ้อนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่าย 6N_7R จะพบว่าทั้ง 4 วิธี มีจำนวน constaint และจำนวนตัวแปรเท่ากัน ซึ่งในกรณี WC จากตารางที่ 4.7 (ค) จะใช้เวลาคำนวณในการหาผลเฉลยของแบบจำลองใกล้เคียงกัน คือ ไม่เกิน 2 วินาที แต่เมื่อพิจารณากรณี NWC จะพบว่าการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection ใช้เวลาในการหาผลเฉลยของแบบจำลองมากกว่าการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Line Protection เนื่องจากว่ากรณีการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายในสมการที่ (4.16) จะมีพจน์ที่ 4 ซึ่งเป็นพจน์ของการปลดปล่อยช่องสัญญาณเมื่อข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย แต่กรณีจัดเส้นทางสำรองแบบ Line Protection จะไม่มีพจน์ปลดปล่อย จึงทำให้ระยะเวลาในการคำนวณหาผลเฉลยของแบบจำลองกรณี Path Protection ใช้ระยะเวลานานกว่ากรณี Line Protection ยกตัวอย่างเช่น จากตารางที่ 4.7 (ค) พิจารณาโครงข่าย 6N_7R ซึ่งปกป้องความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงด้วยวิธี JPSW กับ JLSW ที่ M = 4 กรณี NWC การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection จะใช้เวลาในการหาผลเฉลยเท่ากับ 10186.13 วินาที ในขณะที่การจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Line Protection จะใช้เวลาในการคำนวณเพียง 380.19 วินาทีเท่านั้น ส่วนโครงข่าย 4N_3R ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีขนาดเล็ก การปกป้องความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงแบบ PSW, PSF, LSW และ LSF ใช้เวลาในการคำนวณผลเฉลยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใกล้เคียงกัน ทั้งกรณี NWC และ WC โดยใช้เวลาคำนวณหาผลเฉลยไม่เกิน 2 วินาที

สำหรับวิธีการปกป้องความเสียหาย กรณีการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection ของโครงข่าย NWC ที่กล่าวมาเป็นการจัดสรรความยาวคลื่นสำรอง โดยค่าความยาวคลื่นสำรองต้องเป็นค่าเดียวกันกับค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย แต่การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองกรณี Path Protection สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นสำรอง จากกรณีการจัดสรรค่าความยาวคลื่นของปริมาณทราฟฟิกบนเส้นทางปกติที่ได้รับผล

กระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งได้ผลจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในการออกแบบโครงข่ายกรณี PSW โดยจัดสรรความยาวคลื่นสำรองทั้ง 2 วิธี ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย 6N_7R โดยปกป้องความเสียหายด้วยวิธี PSW กรณี NWC สำหรับการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment และ Jointly optimized working and spare fiber assignment โดยจัดสรรความยาวคลื่นสำรองที่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่น กับ การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองที่ใช้ค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกับค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

M	JPSW		OPSW	
	เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นสำรอง	ไม่เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นสำรอง	เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นสำรอง	ไม่เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นสำรอง
1	45	45	25	25
2	23	26	26	26
4	13	16	16	20
8	10	11	12	12

จากตารางที่ 4.14 เมื่อพิจารณากรณี JPSW เห็นได้ว่าการออกแบบโครงข่ายโดยสามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นสำรอง จากค่าความยาวคลื่นของปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบจากหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย สามารถลดต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจากกรณีที่ต้องใช้ค่าความยาวคลื่นเดียวกันกับค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง เมื่อพิจารณาที่ค่า M = 2, 4 และ 8 เห็นได้ว่าสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ 3 เส้น 3 เส้น และ 1 เส้นตามลำดับ แต่กรณี OPSW การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองที่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นจากกรณีค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติ สามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จากกรณีที่ต้องใช้ความยาวคลื่นสำรองค่าเดียวกันกับค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติ ซึ่งจะมีเพียงกรณีเดียว คือ ที่ M = 4 เท่านั้น โดยสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ 4 เส้น

ต่อไปวิเคราะห์การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment กับ Jointly optimized working and spare fiber assignment จากตารางที่ 4.5 (ข) และ (ค) แสดงถึงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่โครงข่าย 6N_7R ต้องการ จากผลการทดสอบเห็นได้ว่า การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีผลเฉลยจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำกว่าหรือเท่ากับกรณี Optimized spare fiber assignment ทุก ๆ ค่าของ M ยกตัวอย่างเช่น กรณีการปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ Path Protection โดยจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength เห็นได้อย่างชัดเจนว่า กรณี JPSW

สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำกว่ากรณี OPSW ที่ค่า M เท่ากับ 1, 4 และ 8 แต่จะมีเพียงกรณีเดียว สำหรับโครงข่าย NWC โดยมีค่า M = 2 ที่การออกแบบทั้ง 2 วิธี ให้ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายเท่ากัน และเมื่อพิจารณาผลเฉลยของโครงข่าย 4N_3R ก็ได้ผลสรุปตรงกับข้อสรุปของโครงข่าย 6N_7R ดังนั้นสำหรับโครงข่าย 6N_7R และ 4N_3R การออกแบบโครงข่าย Jointly optimized working and spare fiber assignment จะให้ผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่ำกว่าหรือเท่ากับการออกแบบโครงข่าย Optimized spare fiber assignment ไม่ว่าโครงข่ายจะรองรับทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มหรือนอนยูนิฟอร์มก็ตาม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

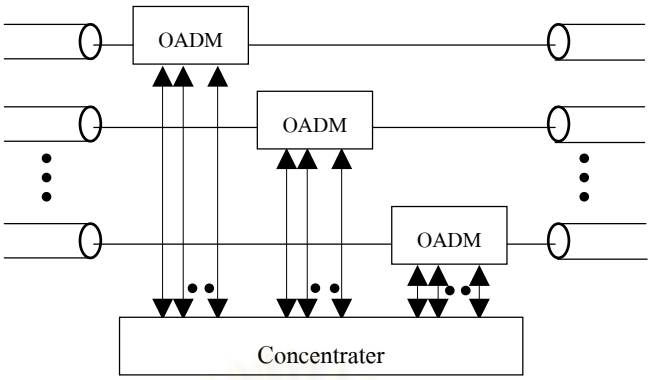
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงบนพื้นฐานโครงสร้างรูปวงแหวนหลายวง โดยพิจารณาต้นทุนในเชิงจำนวนพอร์ตของโครงข่าย

5.1 กล่าวนำ

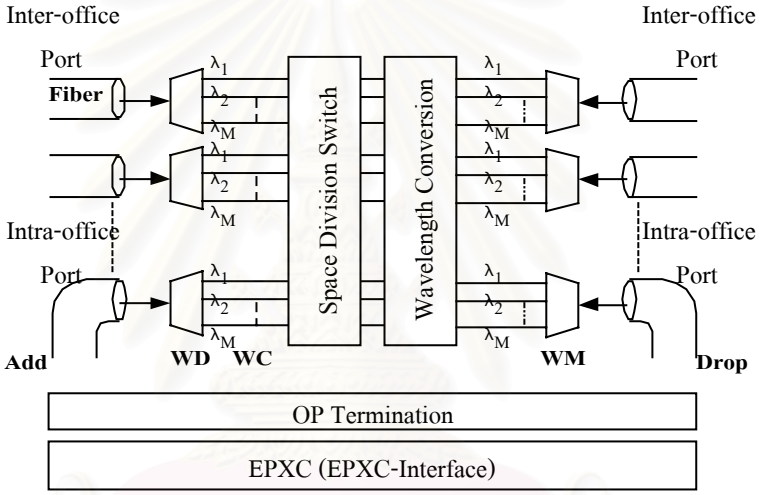
บทนี้จะนำเสนอการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย ทั้งที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยสามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย สำหรับการออกแบบโครงข่ายจะจำลองปัญหาให้อยู่ในรูปของ Integer Linear Programming (ILP) ซึ่งเป็นชุดอสมการเชิงเส้น (constraint) โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการแก้สมการจะต้องเป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะออกแบบให้มีต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายต่ำที่สุด เนื่องจากบทนี้กล่าวถึงต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย ดังนั้นส่วนต่อไปจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างภายในโนดของโครงข่ายรูปวงแหวน

5.2 ลักษณะโครงสร้างของโนด

บทที่ 1 ได้กล่าวถึงลักษณะโครงสร้างภายในโนดของโครงข่ายแบบเมซ ซึ่งเรียกอุปกรณ์ภายในโนดของโครงข่ายแบบเมซว่า Optical Cross Connect (OXCs) แต่โครงข่ายที่มีโครงสร้างรูปวงแหวนจะมีอุปกรณ์ภายในโนดของโครงข่ายแตกต่างกับแบบเมซ คือ มีการใช้ตัว Add-Drop Multiplexers ในการรับส่งสัญญาณทางแสง จึงทำให้มีความซับซ้อนของอุปกรณ์น้อยกว่าโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมซ และมีลักษณะโครงสร้างโนดของโครงข่ายรูปวงแหวนดังรูปที่ 5.1 โดยพื้นฐานการทำงานของโนดสำหรับโครงข่ายรูปวงแหวนและโครงข่ายแบบเมซมีการทำงานต่าง ๆ ที่คล้ายกัน [4] ต่างกันที่ OXCs มีความสามารถในการส่งข้อมูลข้ามวงแหวนได้ ดังนั้นสถาปัตยกรรมภายในโนดของโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมซและแบบวงแหวนจึงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 โดย Inter-office Port ทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลระหว่างโนด ซึ่งเป็นพอร์ตที่ใช้สำหรับวางเส้นใยแก้วนำแสงระหว่างคู่โนดที่อยู่ติดกัน และส่วนของ Intra-office Port ใช้สำหรับ Add ข้อมูลที่ต้องการส่ง หรือ Drop ข้อมูลที่มีการสิ้นสุดที่โนด โดยเรียกรวมจำนวนพอร์ตทั้งหมดภายในโนดว่า Node Scale ดังนั้นต้นทุนของ Node Scale จึงขึ้นกับ Intra-office Port และ Inter-office Port



รูปที่ 5.1 โครงสร้างภายในโนดของโครงข่ายรูปวงแหวน



รูปที่ 5.2 สถาปัตยกรรมโครงสร้างภายในโนด

สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาการออกแบบโครงข่ายจะพิจารณาต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งเป็นการออกแบบเพื่อให้โครงข่ายมีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำที่สุด และเนื่องจาก Inter-office Port เป็นพอร์ตที่ใช้รองรับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง ดังนั้นการออกแบบด้วยวิธีนี้จึงเป็นการ minimize Inter-office Port เพียงอย่างเดียว โดยไม่คำนึงถึงส่วนของ Intra-office Port จึงส่งผลให้ไม่สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนจำนวนพอร์ตต่ำที่สุด ดังนั้นในบทนี้จึงศึกษาการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่พิจารณาทั้งในส่วนของ Inter-office Port และ Intra-office Port โดยส่วนต่อไปจะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่ายให้มีค่าต่ำที่สุด

5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงด้วย Integer Linear Programming มีขั้นตอนการออกแบบโครงข่าย โดยเริ่มจากจำลองปัญหาการออกแบบโครงข่ายให้อยู่ในรูปพารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนหลายวง กรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง เมื่อพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายให้มีค่าต่ำที่สุด มีการกำหนดพารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

$Ninter_p$ จำนวน Inter-office Port ของโนด p ซึ่งเป็นพอร์ตที่ใช้รองรับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อกับโนด p

$Nadd_{p,j}$ จำนวนพอร์ตทั้งหมดที่ใช้สำหรับ Add ข้อมูล ณ โนด p โดยส่งข้อมูลผ่านวงแหวนที่ j

$Ndrop_{p,j}$ จำนวนพอร์ตทั้งหมดที่ใช้สำหรับ Drop ข้อมูล ณ โนด p โดยรับข้อมูลผ่านวงแหวนที่ j

$\alpha add_{p,i,j}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อปริมาณทราฟฟิกของคู่โนด i ถูกรองรับด้วยวงแหวนที่ j โดยมีโนด p เป็นโนดที่ทำการ Add ข้อมูล

มีค่าเป็น 0 เมื่อปริมาณทราฟฟิกของคู่โนด i ถูกรองรับด้วยวงแหวนที่ j โดยโนด p ไม่ได้เป็นโนดที่ทำการ Add ข้อมูล

$\alpha drop_{p,i,j}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อปริมาณทราฟฟิกของคู่โนด i ถูกรองรับด้วยวงแหวนที่ j ทำการ Drop ข้อมูลที่โนด p

มีค่าเป็น 0 เมื่อปริมาณทราฟฟิกของคู่โนด i ถูกรองรับด้วยวงแหวนที่ j ไม่มีการ Drop ข้อมูลที่โนด p

และรวมกับพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2

$N, D, C, M, n_j, t_i, \delta_{i,j,k,l}, \beta'_{i,j,l}, \alpha add_{p,i,j}$ และ $\alpha drop_{p,i,j}$ เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้กับแบบจำลอง $z_{i,j}, r_{i,j}, W_j, S_j, x_{i,j,k,m}, x_{i,j,k}, Ninter_p$, $Nadd_{p,j}$, $Ndrop_{p,j}$, $\gamma'_{i,j,m}$ และ $\gamma'_{i,j}$ เป็นตัวแปรในแบบจำลอง โดยตัวแปรทุกตัวจะต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

จากการกำหนดตัวแปรและสัญลักษณ์ข้างต้นจึงสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง ที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ดังนี้

5.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมี objective function ของแบบจำลอง โดยเป็นการหาต้นทุนจำนวนพอร์ตรวมต่ำที่สุดของโครงข่าย ซึ่งมี objective function ดังนี้

$$\text{Min}: \sum_{p=1}^{N}\sum_{j=1}^{C}(\text{Ninter}_p + \text{Nadd}_{p,j} + \text{Ndrop}_{p,j}) \tag{5.1}$$

กรณี NWC

โดยมี constraint ต่าง ๆ ดังนี้

1. จำนวนพอร์ตของโนดที่ p ต้องเพียงพอที่จะรองรับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของทุก ๆ วงแหวนที่เชื่อมต่อกับโนดที่ p

$$\text{Ninter}_p + 2\sum_{j=1}^{C} W_j = 0 \quad \forall\, p = 1,2,...,N \tag{5.2}$$

สมการที่ (5.2) เมื่อพิจารณาวงแหวนที่ j โดยที่โนด p เป็นสมาชิกหนึ่งในวงแหวนที่ j จะเห็นได้ว่า โนด p มีการเชื่อมต่อกับโนดข้างเคียง 2 โนด ดังนั้น โนด p จึงต้องใช้ Inter-office Port ทั้งหมดเพื่อรองรับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของวงแหวนที่ j เท่ากับ $2W_j$

2. เมื่อพิจารณาวงแหวนที่ j จำนวนพอร์ตของโนดที่ p ต้องเพียงพอที่จะส่งปริมาณทราฟฟิกที่ทำการ Add ข้อมูล ณ โนดที่ p และมีความยาวคลื่นที่ m โดยจำนวนพอร์ตดังกล่าว คือ จำนวนครั้งที่สามารถใช้ความยาวคลื่นค่าเดิมซ้ำได้

$$\text{Nadd}_{p,j} - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k,m}\,\alpha\text{add}_{p,i,j} \geq 0$$
$$\forall j = 1,2,...,C; \forall\, p = 1,2,...,n_j; \forall m = 1,2,...,M \tag{5.3}$$

3. เมื่อพิจารณาวงแหวนที่ j จำนวนพอร์ตของโนดที่ p ต้องเพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ drop ณ โนดที่ p และมีความยาวคลื่นที่ m โดยจำนวนพอร์ตดังกล่าว คือ จำนวนครั้งที่สามารถใช้ความยาวคลื่นค่าเดิมซ้ำได้

$$\text{Ndrop}_{p,j} - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k,m}\,\alpha\text{drop}_{p,i,j} \geq 0$$
$$\forall j = 1,2,...,C; \forall\, p = 1,2,...,n_j; \forall m = 1,2,...,M \tag{5.4}$$

4. โดยที่ Ninter_p, $\text{Nadd}_{p,j}$, $\text{Ndrop}_{p,j}$ เป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$\text{Ninter}_p, \text{Nadd}_{p,j}, \text{Ndrop}_{p,j} \in \{0,1,2,...\}$$
$$\forall\, p = 1,2,...,N; \forall j = 1,2,...,C \tag{5.5}$$

รวมสมการ (5.2)-(5.5) กับสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่ไม่ได้คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย กรณี NWC นั่นก็คือ สมการที่ (4.2)-(4.6) ในบทที่ 4

กรณี WC

เนื่องจากโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงกรณี WC เป็นโครงข่ายที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น เพื่อเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นจากค่าหนึ่งเป็นอีกค่าหนึ่ง ดังนั้นในการพิจารณาหาจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย จึงมีวิธีการหาจำนวนพอร์ตต่างจากโครงข่ายกรณี NWC โดยในการหาจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย จะพิจารณาในส่วนของ Inter-office Port และ Intra-office Port ซึ่งแต่ละส่วนมีวิธีการดังนี้

1. ออกแบบโครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหายกรณี WC โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (4.8)-(4.12) ในบทที่ 4 ทำให้ทราบถึงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่าย พร้อมทั้งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องวางในแต่ละข่ายเชื่อมโยง
2. สำหรับส่วนของ Inter-office Port ของแต่ละโนดสามารถหาได้ โดยสมการ (5.6)

$$\text{Inter-office Port} = 2\sum_{j=1}^{C} W_j \qquad (5.6)$$

โดย W_j เป็นตัวแปรที่ทราบค่าเมื่อผ่านขั้นตอนที่ 1 นั่นก็คือ เป็นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของวงแหวนที่ j ที่เชื่อมต่อกับโนดที่ p

3. สำหรับส่วนของ Intra-office Port ซึ่งเป็นจำนวนพอร์ตที่ใช้ในการส่งข้อมูล (Add Port) และเป็นจำนวนพอร์ตที่ใช้ในการรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มาสิ้นสุด ณ โนดที่ p (Drop Port) สามารถหาจำนวนพอร์ตของแต่ละโนดได้ตามสมการ (5.7) – (5.8)

$$\text{Add Port} = (\text{ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ Add ณ โนดที่ p})/M \qquad (5.7)$$

$$\text{Drop Port} = (\text{ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ Drop ณ โนดที่ p})/M \qquad (5.8)$$

โดย Add Port และ Drop Port เป็นจำนวนเต็มบวก

เห็นได้ว่ากรณี WC จำนวน Intra-office Port ของโครงข่ายจะมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในการเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นจากค่าหนึ่งเป็นอีกค่าหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถใช้ช่องสัญญาณของแต่ละพอร์ตได้มีประสิทธิภาพ จากขั้นตอนการหาจำนวนพอร์ตของ Inter-office Port และ Intra-office Port ตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 จะเห็นว่า กรณี WC การหาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 4 ซึ่งเป็นการออกแบบที่พิจารณาเฉพาะต้นทุน

จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง โดยบทที่ 4 ไม่ได้พิจารณาในส่วนของ Intra-office Port หลังจากนั้นจึงค่อยหาจำนวนพอร์ตของ Intra-office Port ตามสมการ (5.7) และ (5.8) จากที่กล่าวมา จำนวนพอร์ตรวมทั้งหมดของโครงข่ายกรณี WC จะมีค่าดังนี้ คือ

Total Port = ผลรวม (Inter-office Port + Add Port + Drop Port)ของแต่ละโนด (5.9)

5.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่ เมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยแบบจำลองเป็นการหาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมี objective function ดังนี้

$$\text{Min}: \sum_{p=1}^{N}\sum_{j=1}^{C}(\text{Ninter}_p + \text{Nadd}_{p,j} + \text{Ndrop}_{p,j}) \tag{5.10}$$

กรณี NWC

โดยมี constraint ต่าง ๆ ดังนี้

1. จำนวนพอร์ตของโนดที่ p ต้องเพียงพอที่จะรองรับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองของทุก ๆ วงแหวนที่เชื่อมต่อกับโนดที่ p

$$\text{Ninter}_p + 2\sum_{j=1}^{C}(W_j + S_j) = 0 \quad \forall\, p = 1,2,...,N \tag{5.11}$$

2. เมื่อพิจารณาวงแหวนที่ j จำนวนพอร์ตของโนดที่ p ต้องเพียงพอที่จะส่งปริมาณทราฟฟิกที่ทำการ Add ณ โนดที่ p และมีความยาวคลื่นที่ m โดยจำนวนพอร์ตดังกล่าว คือ จำนวนครั้งที่สามารถใช้ความยาวคลื่นค่าเดิมซ้ำได้

กรณี PSW

$$\text{Nadd}_{p,j} - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k,m}\,\alpha\text{add}_{p,i,j} - \sum_{i=1}^{D}\gamma^{l'}_{i,j,m}\,\alpha\text{add}_{p,i,j} + \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2}(x_{i,j,k,m}\,\alpha\text{add}_{p,i,j})\delta_{i,j,k,l'} \geq 0$$
$$\forall j = 1,2,...,C;\ \forall l' = 1,2,...,n_j;\ \forall p = 1,2,...,n_j;\ \forall m = 1,2,...,M \tag{5.12}$$

กรณี PSF

$$\text{Nadd}_{p,j} - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k,m}\,\alpha\text{add}_{p,i,j} - \sum_{i=1}^{D}\gamma^{l'}_{i,j,m}\,\alpha\text{add}_{p,i,j} \geq 0$$
$$\forall j = 1,2,...,C;\ \forall l' = 1,2,...,n_j;\ \forall p = 1,2,...,n_j;\ \forall m = 1,2,...,M \tag{5.13}$$

กรณี LSWและ LSF

$$\text{Nadd}_{p,j} - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k,m}\,\alpha\text{add}_{p,i,j} \geq 0$$

$$\forall j = 1,2,...,C;\ \forall p = 1,2,...,n_j;\ \forall m = 1,2,...,M \qquad (5.14)$$

พิจารณาสมการ (5.12) และ (5.13) การจัดเส้นทางสำรองแบบ Path Protection เป็นการจัดเส้นทางสำรองในทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ดังนั้นในการจัดเส้นทางสำรอง โนดต้นทางจึงต้องทำการ Add ปริมาณทราฟฟิกในทิศทางตรงกันข้ามกับเส้นทางปกติ ซึ่งสามารถแสดงได้ในพจน์ที่ 3 ของสมการ (5.12) และ (5.13) หลังจากจัดสรรปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบของข่ายเชื่อมโยงเสียหายลงบนเส้นทางสำรอง เห็นได้ว่าเกิดการปลดปล่อยช่องสัญญาณของเส้นทางปกติ ดังนั้นพอร์ต Add จึงมีช่องสัญญาณปลดปล่อยขึ้น ซึ่งสามารถแสดงการปลดปล่อยช่องสัญญาณของเส้นทางปกติได้ในพจน์ที่ 4 ของสมการ (5.12) แต่กรณี PSF เป็นการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองบนเส้นใยแก้วนำแสงอีกชุดหนึ่ง ดังนั้นจึงไม่มีพจน์ปลดปล่อยช่องสัญญาณดังสมการที่ (5.13) ส่วนกรณีการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Line Protection ตามสมการที่ (5.14) เมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โนดต้นทางไม่ต้องทำการ Add ข้อมูลในทิศทางตรงกันข้ามเหมือนกรณี Path Protection แต่โนดต้นทางยังคงส่งปริมาณทราฟฟิกเหมือนกรณีโครงข่ายในสภาวะการทำงานปกติ เพียงแต่มีการวนปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายตรงตำแหน่งข่ายเชื่อมโยงที่ขาด ดังนั้นจึงไม่มีการ Add ข้อมูลและปลดปล่อยช่องสัญญาณเกิดขึ้นที่โนดต้นทาง ทั้งกรณี LSW และ LSF

3. เมื่อพิจารณาวงแหวนที่ j จำนวนพอร์ตของโนดที่ p ต้องเพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ drop ณ โนดที่ p และมีความยาวคลื่นที่ m โดยจำนวนพอร์ตดังกล่าว คือ จำนวนครั้งที่สามารถใช้ความยาวคลื่นค่าเดิมซ้ำได้

   กรณี PSW

$$\text{Ndrop}_{p,j} - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k,m}\,\alpha\text{drop}_{p,i,j} - \sum_{i=1}^{D}\gamma_{i,j,m}^{l'}\,\alpha\text{drop}_{p,i,j} + \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2}(x_{i,j,k,m}\,\alpha\text{drop}_{p,i,j})\delta_{i,j,k,l'} \geq 0$$

$$\forall j = 1,2,...,C;\ \forall l' = 1,2,...,n_j;\ \forall p = 1,2,...,n_j;\ \forall m = 1,2,...,M \qquad (5.15)$$

   กรณี PSF

$$\text{Ndrop}_{p,j} - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k,m}\,\alpha\text{drop}_{p,i,j} - \sum_{i=1}^{D}\gamma_{i,j,m}^{l'}\,\alpha\text{drop}_{p,i,j} \geq 0$$

$$\forall j = 1,2,...,C;\ \forall l' = 1,2,...,n_j;\ \forall p = 1,2,...,n_j;\ \forall m = 1,2,...,M \qquad (5.16)$$

กรณี LSW, LSF

$$\mathrm{Ndrop}_{p,j} - \sum_{i=1}^{D}\sum_{k=1}^{2} x_{i,j,k,m}\,\alpha\mathrm{drop}_{p,i,j} \geq 0$$

$$\forall j = 1,2,...,C;\ \forall p = 1,2,...,N;\ \forall m = 1,2,...,M \qquad (5.17)$$

4. โดยที่ Ninter_p, $\mathrm{Nadd}_{p,j}$, $\mathrm{Ndrop}_{p,j}$ เป็นจำนวนเต็มบวกที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

$$\mathrm{Ninter}_p,\ \mathrm{Nadd}_{p,j}, \mathrm{Ndrop}_{p,j} \in \{0,1,2,...\}$$

$$\forall p = 1,2,...,N;\ \forall j = 1,2,...,C \qquad (5.18)$$

รวมสมการ (5.11)-(5.18) กับสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย กรณี NWC นั่นก็คือ สมการที่ (4.2)-(4.6) และ (4.14)-(4.20) ในบทที่ 4

กรณี WC

การหาจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่ายกรณีที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง สามารถแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของ Inter-office Port และส่วนของ Intra-office Port เช่นเดียวกับโครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยมีวิธีการหาจำนวนพอร์ตในแต่ละส่วนดังนี้

1. ออกแบบโครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อเกิดความเสียเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงกรณี WC โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (4.8)-(4.12) และ (4.22)-(4.27) ซึ่งทำให้ทราบถึงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่าย พร้อมทั้งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองที่ต้องวางในแต่ละข่ายเชื่อมโยง
2. สำหรับส่วนของ Inter-office Port ของแต่ละโนดสามารถหาได้ โดยสมการ (5.19)

$$\text{Inter-office Port} = 2\sum_{j=1}^{C}(W_j + S_j) \qquad (5.19)$$

โดย W_j, S_j เป็นตัวแปรที่ทราบค่าเมื่อผ่านขั้นตอนที่ 1 นั่นก็คือ เป็นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและเส้นใยแก้วนำแสงสำรองของวงแหวนที่ j ที่เชื่อมต่อกับโนดที่ p

3. สำหรับส่วนของ Intra-office Port ซึ่งเป็นจำนวนพอร์ตที่ใช้ในการส่งข้อมูล (Add Port) และเป็นจำนวนพอร์ตที่ใช้ในการรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มาสิ้นสุดของโนดที่ p (Drop Port) สามารถหาโดยสมการ (5.20) และ (5.21)

$$\text{Add Port} = (\text{ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ Add ณ โนดที่ p})/M \qquad (5.20)$$

$$\text{Drop Port} = (\text{ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่ Drop ณ โนดที่ p})/M \qquad (5.21)$$

โดย Add Port และ Drop Port เป็นจำนวนเต็มบวก

ดังนั้นจะได้จำนวนพอร์ตรวมทั้งหมดของโครงข่ายดังนี้

Total Port = ผลรวม (Inter-office Port + Add Port + Drop Port)ของแต่ละโนด (5.22)

ต่อไปตารางที่ 5.1 แสดงถึงตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ต้องกำหนดให้กับระบบ และผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอ ส่วนตารางที่ 5.2 แสดงถึงจำนวนตัวแปร (number of variables, Nv) และจำนวน constraint (number of constraints, Nc)ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 5.1 แสดงถึงตัวแปรที่ต้องกำหนดให้กับระบบและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณี NWC

Schemes	Input	Output
No Protection	$t_i, \delta_{i,j,k,l}, M$ $\alpha add_{p,i,j}, \alpha drop_{p,i,j}$	$W_j, z_i, r_i, x_{i,j,k,m}, x_{i,j,k}$ $Ninter_p, Nadd_{p,j}, Ndrop_{p,j}$
PSW,PSF **LSW,LSF**	$t_i, \delta_{i,j,k,l}, \beta^{l'}_{i,j,l}, M$ $\alpha add_{p,i,j}, \alpha drop_{p,i,j}$	$W_j, S_j, z_i, r_i, x_{i,j,k,m}$ $\gamma^{l'}_{i,j,m}, Ninter_p$ $Nadd_{p,j}, Ndrop_{p,j}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.2 จำนวนตัวแปร (number of variables, Nv) และจำนวน constraint (number of constraints, Nc) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงโดยพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย กรณีที่คำนึงและไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง สำหรับโครงข่ายที่ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

Schemes	Nv	Nc
No Protection	$(2M+1)\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j(n_j-1)}{2}+C+N+2\sum_{j=1}^{C}n_j$	$\frac{N(N-1)}{2}+\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j(n_j-1)}{2}+3M\sum_{j=1}^{C}n_j+N$
PSW,PSF **LSW,LSF**	$(2M+1)\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j(n_j-1)}{2}+M\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j^2(n_j-1)}{2}+2C$ $N+2\sum_{j=1}^{C}n_j$	$\frac{N(N-1)}{2}+\sum_{j=1}^{c}\frac{n_j(n_j-1)}{2}+3M\sum_{j=1}^{C}n_j+M\sum_{j=1}^{C}\frac{n_j^2(n_j-1)}{2}$ $+M\sum_{j=1}^{C}n_j(n_j-1)+N$

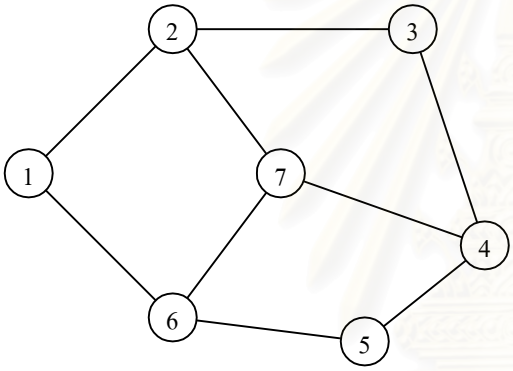
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

สำหรับการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่กล่าวในหัวข้อ 5.3.1 และ 5.3.2 สามารถหาผลเฉลยได้โดย Integer Linear Programing ซึ่งใช้ CPLEX 6.60 [14] ในการหาผลตอบ และใช้คอมพิวเตอร์ Pentium 700 MHz โดยมี RAM ขนาด 512 MB ในการรันโปรแกรม

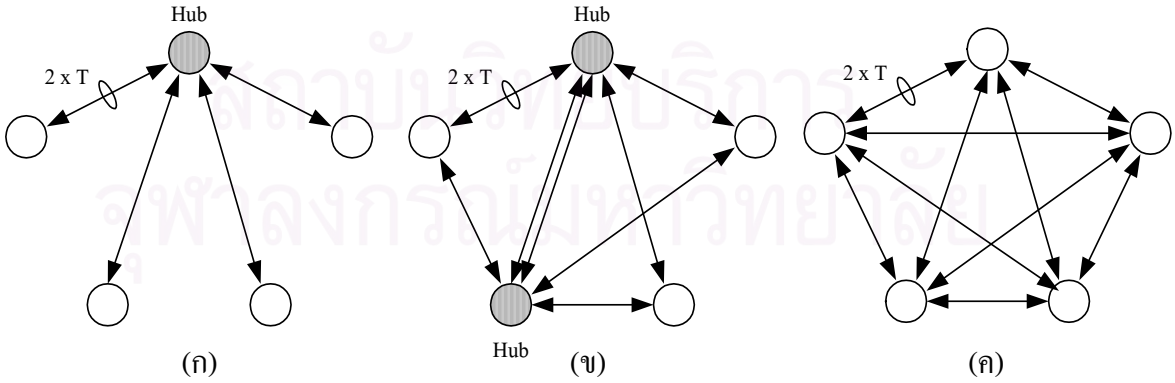
5.4.1 การวิเคราะห์ลักษณะทราฟฟิกในรูปแบบต่างๆ

การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จะศึกษาต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย โดยศึกษาการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงกับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาจำนวนพอร์ตรวมทั้งหมดของโครงข่าย ว่าการออกแบบทั้งสองลักษณะให้ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตของโครงข่ายแตกต่างกันอย่างไร โดยทราฟฟิกที่ใช้ทดสอบโครงข่ายมี 3 รูปแบบดังรูปที่ 5.4 และทดสอบกับโครงข่ายดังรูปที่ 5.3



Ring	Number of nodes	Description
1	4	4-5-6-7
2	4	2-3-4-7
3	6	2-3-4-5-6-7
4	4	1-2-7-6
5	6	1-2-7-4-5-6
6	6	1-2-3-4-7-6
7	6	1-2-3-4-5-6

รูปที่ 5.3 โครงข่ายขนาด 7 โนด 7 วงแหวน **ตารางที่ 5.3** แสดงถึงโนดของวงแหวนแต่ละวง



รูปที่ 5.4 ลักษณะทราฟฟิกในรูปแบบต่าง ๆ

(ก) ทราฟฟิกแบบ Single-star เป็นลักษณะของทราฟฟิกที่นิยมใช้ในโครงข่ายที่มีโครงสร้างรูปวงแหวน โดยมีโนดที่เป็น Hub ทำหน้าที่รวมปริมาณทราฟฟิก

(ข) ทราฟฟิกแบบ Dual-star มีลักษณะเช่นเดียวกันกับ Single-star ต่างกันตรงที่มี Hub อยู่สองโนด เพื่อป้องกันกรณีโนดที่เป็น Hub เกิดความเสียหายไม่สามารถทำหน้าที่ในการรวมข้อมูล ดังนั้นทราฟฟิกแบบ Dual-star จึงมีความแน่นอนในการรับส่งข้อมูลมากกว่ากรณี Single-star

(ค) ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มเป็นลักษณะทราฟฟิกที่แต่ละคู่โนดมีการส่งปริมาณทราฟฟิกถึงกันในปริมาณที่เท่ากัน

โดย T คือ ปริมาณความต้องการทราฟฟิกของแต่ละคู่โนด จากรูปเป็นการส่งข้อมูลไปกลับสองทิศทาง (Full Duplex) ซึ่งในหัวข้อนี้จะพิจารณาขนาดปริมาณความต้องการทราฟฟิกของคู่โนด (T) เท่ากับ 2, 4, 6, 8, 10, 12 โดยมีรูปแบบทราฟฟิก Single-star, Dual-star และ ยูนิฟอร์ม

ตารางที่ 5.4 จำนวนพอร์ตทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ (Total Port) และจำนวนพอร์ตเฉลี่ยต่อโนด (Node Scale) ซึ่งมีการกระจายปริมาณทราฟฟิกรูปแบบต่าง ๆ โดยมีจำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพลกซ์ลงบนเส้นใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้นเท่ากับ 2 (ก) ทราฟฟิกแบบ Single-star (ข) ทราฟฟิกแบบ Dual-star (ค) ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม กรณีการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย สำหรับโครงข่ายที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

Traffic Volume	Network Design				Lower Bound กรณี WC	
	พิจาณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี NWC		พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายกรณี NWC			
	Total Port	Node Scale	Total Port	Node Scale	Total Port	Node Scale
2	50	7.14	44	6.29	44	6.29
4	88	12.57	84	12	84	12
6	150	21.43	132	18.86	132	18.86
8	184	26.29	168	24	168	24
10	250	35.71	220	31.43	220	31.43
12	276	39.43	252	36	252	36

(ก) Single-star

Traffic Volume	Network Design				Lower Bound กรณี WC	
	พิจาณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี NWC		พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายกรณี NWC			
	Total Port	Node Scale	Total Port	Node Scale	Total Port	Node Scale
2	80	11.43	72	10.29	72	10.29
4	148	21.14	136	19.43	136	19.43
6	228	32.57	212	30.29	212	30.29
8	288	41.14	272	38.86	272	38.86
10	372	53.14	348	49.71	348	49.71
12	432	61.71	408	58.29	408	58.29

(ข) Dual-star

Traffic Volume	Network Design				Lower Bound กรณี WC	
	พิจาณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี NWC		พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายกรณี NWC			
	Total Port	Node Scale	Total Port	Node Scale	Total Port	Node Scale
2	130	18.57	114	16.29	114	16.29
4	252	36	228	32.57	228	32.57
6	408	58.29	342	48.86	342	48.86
8	456	65.14	456	65.14	456	65.14
10	680	97.14	570	81.43	570	81.43
12	804	114.86	684	97.71	684	97.71

(ค) ยูนิฟอร์ม

ตารางที่ 5.5 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จำนวน Inter-office Port และ จำนวน Intra-office Port ที่โครงข่ายต้องการ ซึ่งมีการกระจายปริมาณทราฟฟิกรูปแบบต่าง ๆ โดยมีจำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพลกซ์ลงบนเส้นใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้นเท่ากับ 2 (ก) ทราฟฟิกแบบ Single-star (ข) ทราฟฟิกแบบ Dual-star (ค) ทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม กรณีการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย สำหรับโครงข่ายที่มีและไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

Traffic Volume	Network Design						Lower Bound กรณี WC		
	พิจาณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี NWC			พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายกรณี NWC					
	Fiber	Inter-office	Intra-office	Fiber	Inter-office	Intra-office	Fiber	Inter-office	Intra-office
2	16	32	18	16	32	12	16	32	12
4	30	60	28	30	60	24	30	60	24
6	48	96	54	48	96	36	48	96	36
8	60	120	64	60	120	48	60	120	48
10	80	160	90	80	160	60	80	160	60
12	90	180	96	90	180	72	90	180	72

(ก) Single-star

Traffic Volume	Network Design						Lower Bound กรณี WC		
	พิจาณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี NWC			พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายกรณี NWC					
	Fiber	Inter-office	Intra-office	Fiber	Inter-office	Intra-office	Fiber	Inter-office	Intra-office
2	24	48	32	24	48	24	24	48	24
4	44	88	60	44	88	48	44	88	48
6	70	140	88	70	140	72	70	140	72
8	88	176	112	88	176	96	88	176	96
10	114	228	144	114	228	120	114	228	120
12	132	264	168	132	264	144	132	264	144

(ข) Dual-star

Traffic Volume	Network Design						Lower Bound กรณี WC		
	พิจาณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่ายกรณี NWC			พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายกรณี NWC					
	Fiber	Inter-office	Intra-office	Fiber	Inter-office	Intra-office	Fiber	Inter-office	Intra-office
2	36	72	58	36	72	42	36	72	42
4	72	144	108	72	144	84	72	144	84
6	108	216	192	108	216	126	108	216	126
8	144	288	168	144	288	168	144	288	168
10	180	360	320	180	360	210	180	360	210
12	216	432	372	216	432	252	216	432	252

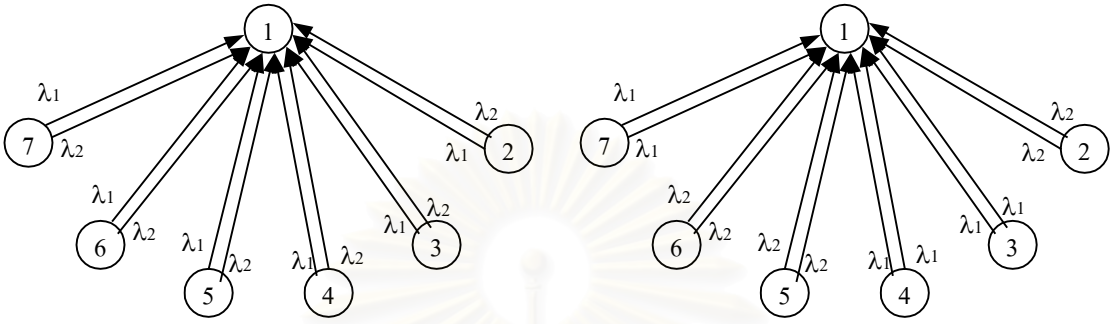
(ค) ยูนิฟอร์ม

เมื่อพิจารณาขนาด Node Scale ของโครงข่ายกรณี NWC และ WC จากตารางที่ 5.4 เพื่อศึกษาผลของอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่ามีผลต่อขนาดของ Node scale สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงต้นทุนจำนวนพอร์ตในกรณี NWC หรือไม่ เมื่อโครงข่ายรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีรูปแบบต่าง ๆ จะเห็นว่าสามารถออกแบบโครงข่ายให้มีขนาด Node Scale เท่ากับกรณี WC ได้ ไม่ว่าโครงข่ายจะรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบ Single-star, Dual-star หรือ รองรับปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์ม ยกตัวอย่างเช่น สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเพียงต้นทุนเฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กรณีทราฟฟิกแบบ Single-star เมื่อโครงข่ายรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีขนาด 2 และ 4 จะเห็นว่า กรณี NWC จะมีขนาด Node Scale เท่ากับ 7.14 และ 12.57 ซึ่งมีขนาดของ Node scale มากกว่ากรณี WC โดยกรณี WC จะมีขนาดของ Node scale เท่ากับ 6.29 และ 12 ซึ่งเมื่อทำการออกแบบโครงข่ายโดยคำนึงถึงต้นทุนจำนวนพอร์ต จะสามารถออกแบบโครงข่ายให้มีขนาดของ Node scale เท่ากับกรณี WC ทุก ๆ ค่าของปริมาณทราฟฟิก 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดขนาดของ Node scale สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนเฉพาะเส้นใยแก้วนำแสงเพียงอย่างเดียว แต่สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ต อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นผันความยาวคลื่นไม่ส่งผลต่อขนาด Node scale เนื่องจากการออกแบบด้วยวิธีนี้สามารถออกแบบโครงข่ายกรณี NWC ให้มีขนาด Node Scale ต่ำเท่ากับกรณี WC ซึ่งเป็นกรณีที่มีจำนวนพอร์ตของโครงข่ายต่ำที่สุด

ต่อไปทำการวิเคราะห์ส่วนของ Inter-office Port โดยโครงข่ายรองรับปริมาณทราฟฟิกรูปแบบต่าง ๆ สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงต้นทุนของพอร์ต กับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพียงอย่างเดียว จากตารางที่ 5.5 กรณี NWC จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาส่วนของ Inter-office Port ของการออกแบบทั้งสองวิธี จะได้ค่า Inter-office Port เท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น โครงข่ายกรณี NWC เมื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบ Single-star ที่มีขนาดความต้องการทราฟฟิกเท่ากับ 2 การออกแบบโครงข่ายที่คำนึงเฉพาะเส้นใยแก้วนำแสงต้องใช้ Inter-office Port เท่ากับ 32 ซึ่งเท่ากันกับ การออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงต้นทุนของพอร์ต เนื่องจาก Inter-office Port เป็นพอร์ตที่ใช้รองรับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง แสดงว่าการออกแบบที่คำนึงถึงจำนวนพอร์ตของโครงข่ายกรณี NWC สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำเท่ากับ การออกแบบโครงข่ายที่คำนึงเฉพาะเส้นใยแก้วนำแสงเพียงอย่างเดียว พร้อมทั้งลดต้นทุนขนาด Node scale ของโครงข่ายให้มีขนาดต่ำที่สุด

เมื่อพิจารณาส่วน Intra-office Port จากตารางที่ 5.5 กรณี NWC จะเห็นว่า การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนเฉพาะเส้นใยแก้วนำแสงจะมีจำนวน Intra-office Port สูงกว่า การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ต ไม่ว่าโครงข่ายจะรองรับทราฟฟิกแบบใดก็ตาม โดยการออกแบบโครงข่ายกรณี NWC เมื่อพิจารณาต้นทุนของพอร์ตสามารถออกแบบให้มีจำนวน Intra-office Port ของโครงข่ายเท่ากับกรณี WC ยกตัวอย่างเช่น โครงข่ายที่รองรับปริมาณทราฟฟิก

แบบ Dual-star ที่มีการรองรับทราฟฟิกเท่ากับ 8 เมื่อออกแบบโครงข่ายกรณี NWC โดยพิจารณาต้นทุนเฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จะต้องใช้จำนวน Intra-office Port เท่ากับ 112 แต่เมื่อออกแบบโครงข่ายโดยพิจารณาต้นทุนของพอร์ตจะใช้จำนวนพอร์ตลดลงเหลือ 96 พอร์ต ซึ่งมีจำนวนพอร์ตเท่ากับโครงข่ายกรณี WC



(ก) Total Port = 44
Inter-office Port = 32
Intra-office Port = 18

(ข) Total Port = 50
Inter-office Port = 32
Intra-office Port = 12

รูปที่ 5.5 โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงขนาด 7 โนด ซึ่งรองรับทราฟฟิกแบบ Single-star โดยมีโนด 1 เป็น Hub เพื่อรวมปริมาณทราฟฟิกจากโนดอื่น ๆ (ก) กรณีการจัดสรรความยาวคลื่นสำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย (ข) กรณีการจัดสรรความยาวคลื่นสำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของโครงข่าย

ต่อไปวิเคราะห์ต้นทุนในเชิงจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจาณาต้นทุนของพอร์ต กับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จากตารางที่ 5.4 เห็นได้ว่า เมื่อความต้องการปริมาณทราฟฟิกของโครงข่ายสูงขึ้น การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจะใช้จำนวนพอร์ตรวมของโครงข่ายสูงกว่าการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ตมากขึ้นตามด้วย ยกตัวอย่างเช่น เมื่อพิจารณาทราฟฟิกแบบ Single-star กรณี NWC โดยโครงข่ายรองรับปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 และรองรับปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 10 การออกแบบที่พิจารณาต้นทุนเฉพาะเส้นใยแก้วนำแสง จะต้องใช้จำนวนพอร์ตรวมของโครงข่ายเท่ากับ 88 พอร์ตและ 250 พอร์ต ในขณะที่การออกแบบโดยคำนึงถึงต้นทุนของพอร์ตจะมีการใช้จำนวนพอร์ตลดลงเท่ากับ 84 พอร์ตและ 220 พอร์ตตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อโครงข่ายรองรับปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 4 การออกแบบโครงข่ายเมื่อพิจารณาต้นทุนของพอร์ต สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีจำนวนพอร์ตลดลง จากกรณีที่ออกแบบโครงข่ายโดยพิจารณาต้นทุนเฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงอยู่ 4 พอร์ต แต่เมื่อโครงข่ายมีการรองรับทราฟฟิกในปริมาณที่สูงขึ้นเป็น 10 การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ตสามารถออกแบบ

โครงข่ายให้มีจำนวนพอร์ตลดลง จากกรณีการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนเฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้ถึง 30 พอร์ต แสดงว่าเมื่อปริมาณความต้องการทราฟฟิกของโครงข่ายมีปริมาณที่สูงขึ้น การออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงต้นทุนของพอร์ตสามารถช่วยลดจำนวนพอร์ตรวมของโครงข่ายได้มากขึ้นตามลำดับ จากรูปที่ 5.5 เป็นตัวอย่างการจัดสรรความยาวคลื่นของการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ต ว่ามีการจัดสรรโครงข่ายอย่างไรจึงทำให้จำนวนพอร์ตของโครงข่ายมีจำนวนลดลง พิจารณาที่โนด 1 กับโนด 2 จะเห็นว่ามีจำนวนการเชื่อมต่อระหว่างคู่โนดเท่ากับ 2 ซึ่งจากรูปสำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จะมีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับปริมาณทราฟฟิกระหว่างคู่โนดโดยใช้ความยาวคลื่น $\lambda 1$ ซึ่งทำให้โนดที่ 2 ต้องใช้พอร์ต Add เท่ากับ 2 พอร์ต ในขณะที่การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายกรณีเดียวกัน ที่โนด 2 จะมีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับปริมาณทราฟฟิกโดยใช้ $\lambda 1$ และ $\lambda 2$ ดังนั้นจึงใช้พอร์ต Add เพียงพอร์ตเดียวในการส่งปริมาณทราฟฟิกจากโนด 2 ไปยังโนด 1 จึงทำให้ผลรวมจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่ายกรณีออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงต้นทุนของพอร์ตมีจำนวนพอร์ตรวมน้อยกว่า กรณีการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะเส้นใยแก้วนำแสงอยู่ 6 พอร์ต

ตารางที่ 5.6 แสดงลักษณะการเลือกวงแหวนของการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตกรณี NWC โดยโครงข่ายรองรับทราฟฟิกแบบ Dual-star ซึ่งมีขนาดปริมาณความต้องการทราฟฟิกของคู่โนดเท่ากับ 2

Ring	Number of nodes	Description	Network Design			
			พิจารณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง		พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ต	
			Traffic	Fiber	Traffic	Fiber
1	4	4-5-6-7	-	-	-	-
2	4	2-3-4-7	-	-	-	-
3	6	2-3-4-5-6-7	-	-	-	-
4	4	1-2-7-6	-	-	-	-
5	6	1-2-7-4-5-6	12	12	12	12
6	6	1-2-3-4-7-6	-	-	-	-
7	6	1-2-3-4-5-6	12	12	12	12
Total			24	24	24	24

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะการเลือกวงแหวนของโครงข่าย สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตกับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จากผลการทดสอบโครงข่าย กรณี NWC ไม่ว่าโครงข่ายจะรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบ Single-star, Dual-star หรือ ยูนิฟอร์ม การออกแบบทั้งสองวิธีมีลักษณะการเลือกวงแหวนของโครงข่ายเหมือนกันทุก ๆ ค่าของปริมาณทราฟฟิก โดยการออกแบบที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ตมีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นเพื่อให้ขนาด Node Scale ของโครงข่ายมีขนาดต่ำที่สุด ในขณะที่การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจะไม่คำนึงถึงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น ดังนั้นจำนวนพอร์ตรวมในโครงข่ายที่ได้จึงมีจำนวนสูงกว่ากรณีการออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงต้นทุนของพอร์ต ยกตัวอย่างเช่น จากตารางที่ 5.6 เป็นกรณีโครงข่ายรองรับทราฟฟิกแบบ Dual-star ที่มีขนาดเท่ากับ 2 กรณี NWC สำหรับการออกแบบโครงข่ายโดยคำนึงถึงต้นทุนจำนวนพอร์ต กับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง ทั้ง 2 วิธีมีการเลือกวงแหวนเพื่อรองรับปริมาณความต้องการทราฟฟิกเหมือนกัน คือ เลือกวงแหวนวงที่ 5 และ 7 ในการรองรับปริมาณทราฟฟิก ดังนั้นการออกแบบโครงข่ายทั้ง 2 วิธี จึงมีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากัน

5.4.2 ความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หัวข้อนี้ศึกษาถึงความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ต โดยโครงข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง กรณี NWC ซึ่งมีการปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ PSW โดยการจัดสรรความยาวคลื่นสำรอง ศึกษากรณีที่ไม่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นสำรองจากค่าความยาวคลื่นของเส้นทางปกติที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งหัวข้อนี้วิเคราะห์เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยของแบบจำลอง โดยทดสอบโครงข่ายที่มีขนาด 5 โนด และรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มที่มีขนาดเท่ากับ 2 สำหรับวงแหวนที่เป็นไปได้ในโครงข่ายมีทั้งหมด 6 วงแหวน และหาเวลาในการคำนวณหาผลเฉลยของแบบจำลอง

ตารางที่ 5.7 เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยปกป้องความเสียหายแบบ PSW ซึ่งพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย กรณี NWC และรองรับปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มีขนาดเท่ากับ 2 ; * หมายถึงไม่สามารถหาผลเฉลยได้ในเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากกำหนดเวลาในการหาผลเฉลยไม่เกิน 1 วันครึ่ง และ Out of memory หมายถึง โปรแกรม CPLEX ไม่สามารถหาผลเฉลยของแบบจำลองภายใต้ข้อจำกัดหน่วยความจำที่ใช้ในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์

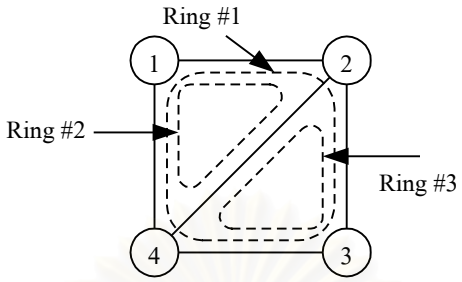
M	Run Time
1	0.02 sec
2	0.05 sec
3	* 1 วันครึ่ง
4	Out of memory

การหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับออกแบบโครงข่ายที่สามารถปกป้องความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง มีข้อจำกัดการหาผลเฉลยของแบบจำลองในเรื่องเวลาการหาผลเฉลยให้ได้ผลตอบในช่วงเวลาที่เหมาะสม ยกตัวอย่างเช่น จากตารางที่ 5.7 พิจารณาที่ M = 3 เห็นได้ว่าไม่สามารถหาผลเฉลยภายใต้ระยะเวลาที่เหมาะสม ซึ่งในที่นี้กำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมในการหาผลเฉลยไว้ 1 วันครึ่ง อีกทั้งการหาผลเฉลยของแบบจำลองยังมีปัญหาเกี่ยวกับหน่วยความจำในการประมวลผล คือ หน่วยความจำในการประมวลผลไม่เพียงพอสำหรับคำนวณหาผลเฉลยเพื่อให้ได้ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตของโครงข่ายต่ำที่สุด จากตารางที่ 5.7 จะเห็นได้ว่า การหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยสามารถมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่นลงบนเส้นใยแก้วนำแสงเพียง 4 ความยาวคลื่น จากผลการทดสอบไม่สามารถหาผลเฉลยเพื่อให้ได้ค่าต้นทุนของโครงข่ายต่ำที่สุดได้ เนื่องจากเกิด Out of memory ขึ้น จากที่กล่าวมาเห็นได้ว่า แม้การวิเคราะห์นี้จะพิจารณาโครงข่ายที่มีขนาดเพียง 5 โนด และมีจำนวนวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่ายเพียง 6 วงแหวน ก็ยังไม่สามารถหาผลเฉลยของแบบจำลองได้ ทำให้ไม่สามารถศึกษาวิเคราะห์ลักษณะต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่ายที่ค่า M ต่าง ๆ เพื่อให้สามารถศึกษาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย สำหรับการออกแบบที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ต กรณีโครงข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจึงนำเสนอการวิเคราะห์โครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่มีขนาดเล็ก

5.4.3 วิเคราะห์ต้นทุนในเชิงจำนวนพอร์ตของโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

ในหัวข้อนี้วิเคราะห์การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะต้นทุนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย โดยเปรียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่ายของการออกแบบทั้ง 2 วิธี ซึ่งโครงข่ายที่พิจารณาสามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง และวิเคราะห์วิธีปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ PSW และ LSW สำหรับกรณี PSW ศึกษากรณีที่การจัดสรรความยาวคลื่นสำรองต้องมีค่าความยาวคลื่นค่าเดียวกันกับค่าความยาวคลื่นของเส้นทางที่ได้รับผลกระทบของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย เหตุที่ศึกษาการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ Shared

Wavelength เนื่องจากสามารถออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตของโครงข่ายให้มีค่าต่ำที่สุด โดยโครงข่ายที่ทำการทดสอบมีขนาด 4 โนด และรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มเท่ากับ 1 ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 โครงข่ายขนาด 4 โนด และมีวงแหวน 3 วงแหวน

ตารางที่ 5.8 จำนวน Inter-office Port ทั้งหมดของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อออกแบบโดยพิจารณาต้นทุนของพอร์ต ซึ่งปกป้องความเสียหายแบบ PSW และ LSW

M	No Protection Network	
	NWC	WC
1	20	20
2	14	14
4	8	8
8	8	8

(ก)

M	Protection Scheme			
	PSW		LSW	
	NWC	WC	NWC	WC
1	30	30	34	34
2	16	16	22	20
4	16	8	16	14
8	8	8	16	8

(ข)

ตารางที่ 5.9 จำนวน Intra-office Port ทั้งหมดของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อออกแบบโดยพิจารณาต้นทุนของพอร์ต ซึ่งปกป้องความเสียหายแบบ PSW และ LSW

M	No Protection Network	
	NWC	WC
1	12	12
2	8	8
4	4	4
8	4	4

(ก)

M	Protection Scheme			
	PSW		LSW	
	NWC	WC	NWC	WC
1	12	12	12	12
2	8	8	8	8
4	4	4	4	4
8	4	4	4	4

(ข)

ตารางที่ 5.10 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย เมื่อปกป้องความเสียหายแบบ PSW และ LSW (ก) การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนเฉพาะเส้นใยแก้วนำแสง (ข) การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ต

M	Protection Scheme							
	PSW				LSW			
	NWC		WC		NWC		WC	
	Fiber	Port	Fiber	Port	Fiber	Port	Fiber	Port
1	15	42	15	42	17	46	17	46
2	8	24	8	24	11	31	10	28
4	8	23	4	12	8	25	7	18
8	4	12	4	12	8	20	4	12

(ก)

M	Protection Scheme							
	PSW				LSW			
	NWC		WC		NWC		WC	
	Fiber	Port	Fiber	Port	Fiber	Port	Fiber	Port
1	15	42	15	42	17	46	17	46
2	8	24	8	24	11	30	10	28
4	8	20	4	12	8	20	7	18
8	4	12	4	12	8	20	4	12

(ข)

ตารางที่ 5.11 เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย (run time) ของโครงข่ายขนาด 4 โนด และมีวงแหวนที่เป็นไปได้ 3 วงแหวน ซึ่งมีหน่วยเป็นวินาที (ก) โครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (ข) โครงข่ายที่ปกป้องความเสียหายแบบ PSW และ LSW

M	No Protection Network	
	NWC	WC
1	0.05	0.02
2	0.1	0.1
4	1	0.5
8	2	1

(ก)

M	Protection Scheme			
	PSW		LSW	
	NWC	WC	NWC	WC
1	0.1	0.1	0.1	0.1
2	0.5	0.2	0.8	0.1
4	1.5	0.2	1	0.2
8	1.67	0.7	1.34	0.5

(ข)

5.4.3.1 เปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ต กรณีโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด กับโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยวิเคราะห์การออกแบบที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย

ส่วนแรกวิเคราะห์จำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย กับโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด เนื่องจากจำนวนพอร์ตรวมของโครงข่ายประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Inter-office Port กับ Intra-office Port ดังนั้นการวิเคราะห์จึงแยกพิจารณาทีละส่วน จากตารางที่ 5.8 (ก) และ (ข) ได้แสดงจำนวน inter-office port ที่โครงข่ายต้องการ จากตารางเห็นได้ว่าส่วนของ Inter-office Port ที่ค่า M เท่ากับ 1, 2 กรณีโครงข่าย NWC และ WC โดยปกป้องความเสียหายแบบ PSW และ LSW จะต้องใช้จำนวน inter-office port สูงกว่ากรณีโครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย สาเหตุเนื่องจากว่า การออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่อาจได้รับผลกระทบของข่ายเชื่อมโยงที่ขาด เนื่องจาก Inter-office Port เป็นพอร์ตที่ใช้รองรับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อระหว่างโนด ดังนั้นเมื่อโครงข่ายที่ปกป้องความเสียหายต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด ผลที่ตามมาคือ จำนวน Inter-office Port ของโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายจำเป็นต้องมีจำนวนพอร์ตมากกว่าโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดด้วย ยกตัวอย่างเช่น โครงข่ายกรณี NWC ที่ M = 2 ซึ่งมีการปกป้องโครงข่ายแบบ LSW จะมีการใช้จำนวน Inter-office Port ทั้งหมดของโครงข่ายเท่ากับ 22 แต่ในกรณีโครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย จะใช้จำนวน Inter-office Port น้อยกว่า คือ ใช้จำนวนพอร์ตทั้งหมด 14 พอร์ต แต่ที่ค่า M = 4 และ 8 มีบางกรณีที่จำนวน Inter-office Port ของโครงข่ายที่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย เท่ากับกรณีโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด ยกตัวอย่างเช่น ที่ค่า M = 8 โครงข่ายที่ปกป้องความเสียหายแบบ PSW ทั้งกรณี NWC และ WC จะใช้จำนวน inter-office port เท่ากับโครงข่ายที่ไม่ได้คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ซึ่งใช้จำนวน inter-office port เท่ากับ 8 สาเหตุเนื่องจากว่าการปกป้องโครงข่ายโดยจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength สามารถจัดสรรความยาวคลื่นสำรองลงบนความจุที่เหลือในเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน ดังนั้นจึงมีบางกรณี โครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายจะใช้จำนวนพอร์ตเท่ากับโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด

ต่อไปศึกษาอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นว่าส่งผลต่อต้นทุนในส่วนของ Intra-office Port สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงหรือไม่ โดยการออกแบบพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย จากตารางที่ 5.9 (ข) จะพบว่า เมื่อโครงข่ายปกป้องความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงแบบ PSW หรือ LSW จำนวน Intra-office Port ของ

โครงข่าย กรณี NWC และ WC จะมี Intra-office Port เท่ากันทุก ๆ ค่าของ M แสดงว่า ในการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงโดยพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย กรณี NWC การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นอย่างเหมาะสม โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีการใช้จำนวน Intra-office Port ต่ำที่สุดเท่ากับกรณี WC ได้ ดังนั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจึงไม่ส่งผลต่อต้นทุนจำนวน Intra-office Port ของโครงข่าย และเมื่อพิจารณาจำนวน Intra-office Port ของโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงโดยมีการปกป้องโครงข่ายแบบ PSW และ LSW กับโครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย จากตารางที่ 5.9 (ก) และ (ข) จะเห็นว่าจำนวน Intra-office Port ของโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด มีจำนวนเท่ากับโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายทุก ๆ ค่าของ M โดยจะมีจำนวน Intra-office Port เท่ากับ 12, 8, 4, 4 เมื่อ M มีค่า 1, 2, 4 และ 8 ตามลำดับ

ดังนั้นจากโครงข่ายที่ทำการทดสอบ การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ตสำหรับโครงข่ายที่สามารถจัดเส้นทางได้ใหม่ โดยปกป้องความเสียหายแบบ PSW และ LSW จำนวน Inter-office Port ของโครงข่ายจะมีจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับการออกแบบโครงข่ายที่ไม่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย และเมื่อพิจารณาจำนวน Intra-office Port ของโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถลดต้นทุนจำนวน Intra-office Port ของโครงข่ายกรณี NWC ได้ อีกทั้งจำนวน Intra-office Port ของการออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงข่ายเชื่อมโยงเสียหาย จะมีจำนวนพอร์ตเท่ากับโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดทุก ๆ ค่า ของ M

และเมื่อพิจารณาจำนวนพอร์ตรวมทั้งหมดของโครงข่าย จากตารางที่ 5.10 (ข) จะพบว่ากรณี NWC เมื่อโครงข่ายปกป้องความเสียหายแบบ PSW ที่ค่า M เท่ากับ 4 จะมีจำนวนพอร์ตทั้งหมดเท่ากับ 20 พอร์ต แต่เมื่อติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นจำนวนพอร์ตรวมลดลงเหลือ 12 พอร์ต ส่วนในกรณี LSW ที่ค่า M เท่ากับ 2, 4 และ 8 โครงข่าย NWC จะใช้จำนวนพอร์ตรวมเท่ากับ 30, 20 และ 20 พอร์ตตามลำดับ แต่กรณี WC จำนวนพอร์ตมีค่าลดลงเท่ากับ 28, 18 และ 12 ตามลำดับ ดังนั้นจากโครงข่ายที่ทำการทดสอบ อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นส่งผลต่อจำนวนพอร์ตรวมทั้งหมดของโครงข่ายกรณี NWC เมื่อออกแบบโครงข่ายโดยพิจารณาต้นทุนของพอร์ต

5.4.3.2 เปรียบเทียบการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ต

เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ต สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบที่พิจารณาจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย จากตารางที่ 5.10 (ก) และ (ข) กรณี WC จะมีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตของโครงข่ายเท่ากัน ดังที่ได้กล่าววิธีการหาต้นทุนไว้ในหัวข้อที่ 5.3.2 แต่

สำหรับกรณีโครงข่าย NWC การหาต้นทุนเมื่อพิจารณาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการหาต้นทุนเมื่อพิจารณาถึงพอร์ตมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาการออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงต้นทุนจำนวนพอร์ต กรณี NWC ที่ค่า M = 1, 2, 4 และ 8 จะเห็นได้ว่า มีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำหรับการออกแบบโครงข่าย เท่ากับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง ไม่ว่าโครงข่ายจะปกป้องความเสียหายแบบ PSW หรือ LSW ยกตัวอย่างเช่น พิจารณาการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย โดยปกป้องความเสียหายแบบ LSW ที่ M = 2 กรณี NWC มีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทั้งหมด 11 เส้น ซึ่งมีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนเฉพาะเส้นใยแก้วนำแสงเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการออกแบบโดยพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย สามารถออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย ให้มีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำเท่ากับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง

และเมื่อพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย สำหรับการออกแบบที่พิจารณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบที่พิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ต จากตารางที่ 5.10 (ก) และ (ข) จะเห็นว่า การออกแบบโครงข่ายโดยปกป้องความเสียหายแบบ PSW กรณี NWC ที่ค่า M =1, 2, 8 การออกแบบทั้ง 2 วิธีให้ต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายมีค่าเท่ากัน นั่นก็คือมีจำนวนพอร์ตรวมทั้งหมดของโครงข่ายเท่ากับ 42, 24 และ 12 ตามลำดับ แต่ที่ค่า M เท่ากับ 4 การออกแบบโดยพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีจำนวนพอร์ตรวมเท่ากับ 20 ซึ่งน้อยกว่าการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนในเชิงเส้นใยแก้วนำแสงเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีการใช้จำนวนพอร์ตทั้งหมด 23 พอร์ต ส่วนกรณี LSW ที่ค่า M = 2 และ 4 การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ตสามารถออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนจำนวนพอร์ตรวมต่ำกว่า การออกแบบที่พิจารณาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงอยู่ 1 พอร์ตและ 5 พอร์ต ตามลำดับ ดังนั้นจากการวิเคราะห์จึงสรุปได้ว่า สำหรับโครงข่ายที่มีขนาด 4 โนด 3 วงแหวน เมื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกยูนิฟอร์มที่มีขนาดเท่ากับ 1 การออกแบบที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ต กรณีที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยปกป้องความเสียหายของโครงข่ายแบบ PSW และ LSW สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีการใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำเท่ากับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพียงอย่างเดียว อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่ายให้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกรณีการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะเส้นใยแก้วนำแสงได้อีกด้วย

เมื่อพิจารณาเวลาการคำนวณหาผลเฉลยจากตารางที่ 5.11 (ก) และ (ข) จะเห็นว่า โครงข่ายขนาด 4 โนด 3 วงแหวน ใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยไม่ถึง 1 นาที แต่เมื่อมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 5 โนด และมีจำนวนวงแหวน 6 วงแหวน เวลาในการหาผลเฉลยของแบบจำลองจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 5.4.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาวิจัยการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่มีพื้นฐานโครงสร้าง รูปวงแหวนวงเดียวและวงแหวนหลายวง โดยโครงข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ซึ่งศึกษาการจัดสรรเส้นทางสำรองแบบ Path Protection และ Line Protection และมีวิธีการจัดสรรความยาวคลื่นสำรองแบบ Shared Wavelength และ Shared Fiber วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ คือ สามารถออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงให้มีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตของโครงข่ายให้มีค่าต่ำที่สุด สำหรับการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง มีทั้งการออกแบบที่คำนึงถึงเฉพาะต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง กับการออกแบบที่คำนึงถึงจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่าย ซึ่งจะศึกษาวิจัยเปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่ายของการออกแบบทั้ง 2 วิธี รวมถึงศึกษาความซับซ้อนของโครงข่าย กับข้อจำกัดในการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พร้อมทั้งความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

การออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสง ในวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากว่าสามารถออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนในเชิงจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตของโครงข่ายได้ต่ำที่สุด โดยสร้างแบบจำลองให้อยู่ในรูปอสมการเชิงเส้น ซึ่งเรียกว่า Integer Linear Programming (ILP) สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่คำนึงถึงความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงนั้นมีการออกแบบโครงข่ายอยู่ 2 วิธี คือ Optimized spare fiber assignment ซึ่งการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธีนี้ต้องทราบถึงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายที่มีสภาวะการทำงานปกติ พร้อมทั้งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงาน ส่วนอีกวิธีหนึ่งคือ Jointly optimized working and spare fiber assignment การออกแบบโครงข่ายด้วยวิธีนี้เป็นการหาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงทำงานและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองไปพร้อม ๆ กัน โดยไม่จำเป็นต้องทราบถึงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นของโครงข่ายในสภาวะการทำงานปกติ

สำหรับการออกแบบโครงข่ายทั้ง 2 วิธี ได้ศึกษาวิเคราะห์การออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวและวงแหวนหลายวง โดยการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวนั้นได้เปรียบเทียบค่าต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของการออกแบบโครงข่ายที่ปกป้องความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงกรณี PSW และ LSW กับค่า Lower Bound Fiber ซึ่งผลการทดสอบเห็นได้ว่าการปกป้องความเสียหายของโครงข่ายด้วยวิธี PSW สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำเท่ากับ Lower Bound Fiber ได้เกือบทุกกรณี ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณี LSW ที่ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในการออกแบบโครงข่ายมักมีค่าสูงกว่า Lower Bound Fiber เมื่อพิจารณาถึงความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนหลายวง ไม่ว่าจะออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment หรือ Jointly optimized working and spare fiber assignment แบบจำลองของโครงข่ายกรณี WC จะมีความซับซ้อนแบบจำลองน้อยกว่าโครงข่ายกรณี NWC เนื่องจากว่าจำนวนตัวแปรและ constraint ของแบบจำลองไม่ขึ้นอยู่กับค่าของ M แต่กรณี NWC ค่าของ M ส่งผลต่อจำนวนตัวแปรและ constraint โดยเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้นจำนวนตัวแปรและ constraint ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามด้วย ดังนั้นเวลาในการหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายกรณี NWC จึงใช้เวลาในการหาผลเฉลยของแบบจำลองนานกว่ากรณี WC อีกทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment จะมีความซับซ้อนมากกว่า Optimized spare fiber assignment ดังนั้นวิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment จึงใช้เวลาในการคำนวณหาผลเฉลยนานกว่าวิธี Optimized spare fiber assignment แต่ถ้าพิจารณาในแง่ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของการออกแบบโครงข่ายทั้ง 2 วิธี เมื่อออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนวงเดียวที่มีขนาด 5 โนด จะให้ค่าต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากันทั้ง 2 วิธี แต่กรณีการออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนหลายวง โดยทดสอบกับโครงข่าย 6N_7R และ 4N_3R วิธี Jointly optimized working and spare fiber assignment สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำกว่าหรือเท่ากับการออกแบบโครงข่ายด้วยวิธี Optimized spare fiber assignment

ส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงรูปวงแหวนหลายวง โดยพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ตของโครงข่าย ผลการทำสอบเห็นได้ว่า โครงข่ายกรณี WC ทั้งที่คำนึงและไม่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย เป็นการออกแบบโครงข่ายที่ได้ต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตของโครงข่ายต่ำที่สุด และส่วนแรกที่ศึกษาวิเคราะห์เป็นการทดสอบโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่ เมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยทดสอบโครงข่ายขนาด 7 โนด 7 วงแหวน และรองรับปริมาณทราฟฟิก Single-star, Dual-star, ยูนิฟอร์ม จากผลการทดสอบเห็นว่า การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนในเชิงจำนวนพอร์ต กรณี NWC สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำเท่ากับ การออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพียงอย่างเดียว พร้อมทั้งลดขนาด

Node Scale ของโครงข่าย ไม่ว่าโครงข่ายจะรองรับปริมาณทราฟฟิกแบบ Single-star, Dual-star หรือยูนิฟอร์ม โดยขนาด Node scale สำหรับการออกแบบที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ตจะมีขนาด Node Scale เท่ากับกรณี WC ซึ่งเป็นกรณีที่มีขนาด Node scale ต่ำที่สุด และได้ศึกษาข้อจำกัดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ซึ่งในที่นี้ได้ทดสอบโครงข่าย 5 โนด 6 วงแหวน จากผลการทดสอบเห็นได้ว่า ไม่สามารถหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อโครงข่ายมีจำนวนความยาวคลื่นที่ มัลติเพลกซ์ในเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับ 4 ความยาวคลื่น เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความซับซ้อนของโครงข่ายมาก ส่งผลให้หน่วยความจำในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ไม่เพียงพอหาผลเฉลยของแบบจำลองที่ค่า M = 4 จึงเกิด out of memory แม้โครงข่ายที่ทดสอบมีขนาดไม่ใหญ่มากก็ตาม

ดังนั้นเพื่อศึกษาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตของโครงข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อเกิดความเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง จึงศึกษาโครงข่ายขนาด 4 โนด 3 วงแหวน ซึ่งเป็นโครงข่ายขนาดเล็ก และได้ผลการทดสอบสำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ต โดยปกป้องความเสียหายแบบ PSW และ LSW กรณี NWC ผลที่ได้สามารถออกแบบโครงข่ายให้มีจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงต่ำเท่ากับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนเฉพาะเส้นใยแก้วนำแสง อีกทั้งจำนวนพอร์ตทั้งหมดของโครงข่ายยังมีจำนวนต่ำกว่า หรือเท่ากับจำนวนพอร์ตรวมของการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาเฉพาะเส้นใยแก้วนำแสงเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาจำนวน Intra-office Port ของโครงข่ายกรณีที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายเมื่อออกแบบโครงข่ายโดยพิจารณาต้นทุนของพอร์ต ผลการทดสอบโครงข่ายกรณี NWC และ WC จะมีจำนวน Intra-office Port เท่ากัน ดังนั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถลดต้นทุนจำนวน Intra-office Port ของโครงข่ายกรณีที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้ โดยจำนวน Intra-office Port ของโครงข่ายที่คำนึงถึงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายจะมีจำนวน Intra-office Port เท่ากับโครงข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางได้ใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงขาด และเมื่อพิจารณาจำนวนพอร์ตรวมทั้งหมดของโครงข่าย พบว่า กรณี NWC จะมีจำนวนพอร์ตรวมมากกว่าหรือเท่ากับโครงข่ายกรณี WC ดังนั้นอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดต้นทุนจำนวนพอร์ตรวมของโครงข่ายกรณี NWC เมื่อออกแบบโครงข่ายโดยพิจารณาต้นทุนจำนวนพอร์ต

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรจะมีการศึกษาโครงข่ายรูปวงแหวนหลายวงที่มีการใช้อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเพียงบางโนดในโครงข่าย
2. ควรศึกษาโครงข่ายรูปวงแหวนหลายวงกรณีที่โนดเกิดความเสียหาย พร้อมกับศึกษาต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบกับกรณีโครงข่ายที่พิจารณาความเสียหายเฉพาะข่ายเส้นใยแก้วนำแสง
3. สำหรับการออกแบบโครงข่ายที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ต กรณีที่ออกแบบโครงข่ายรูปวงแหวนหลายวง ควรศึกษากรณีโครงข่ายที่มีโครงสร้างแบบเมช พร้อมกับเปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตของโครงข่ายแบบเมช กับแบบวงแหวนว่ามีต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตรวมทั้งหมดของโครงข่ายแตกต่างกันมากน้อยอย่างไร
4. ควรมีการออกแบบโครงข่ายเส้นใยแก้วนำแสงที่พิจารณาต้นทุนของพอร์ต กรณีที่ทราฟฟิกของแต่ละคู่โนดสามารถรองรับด้วยวงแหวนวงเดียว กับกรณีที่ทราฟฟิกของคู่โนดหนึ่งสามารถส่งสัญญาณข้ามวงแหวนได้ เพื่อเปรียบเทียบต้นทุนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนพอร์ตรวมทั้งหมดของการออกแบบแต่ละวิธี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] I. P. Kaminow, et al., "A Wideband All-Optical WDM Network," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, pp. 780-799, 1996.

[2] V. W. S. chan, K. L. Hall, E. Modiano and K. A. Rauschenbach, "Architectures and Technologies for High-Speed Optical Data Networks," *Journal of Lightwave Technology,* Vol. 16, No. 12, December 1998

[3] E. Modiano, "WDM-Based Packet Networks," *IEEE Communications Magazine*, pp 130-135, March 1999

[4] N. Nagatsu, A. Watanbe, S. Okamoto and K. Sato, "Architectural Analysis of Multiple Fiber Ring Networks Employing Optical Paths," *Journal of Lightwave Technology,* Vol. 15, No. 10, October 1997

[5] N. Nagatsu, S. Okamoto and K. Sato, "Optical Path Cross-Connect System Scale evaluation Using Path Accommodation Design for Restricted Wavelength Multiplexing," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications,* Vol. 14, pp 893-902, June 1996.

[6] N. Nagatsu, S. Okamoto and K. Sato, "Large Scale Photonic Transport Network Design Based on Optical Paths," *IEEE Proceedings of GLOBECOM'96*, pp. 321-327, 1996

[7] เจริญชัย บวรธรรมรัตน์. การออกแบบโครงข่าย WDM ที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อมีความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อโยง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543

[8] L. Wuttisittikulkij and M.J. O'Mahony, "Design of an Efficient and Practical Algorithm for Wavelength Assignment in Multi-Wavelength Ring Transport Networks," *IEEE Proceedings of GLOBECOM'97*, pp 571-575, November 1997

[9] L. Wuttisittikulkij, S. Leelanunnukul and S. Arreewanit, "Routing and Wavelength Allocation in Multi-wavelength All-optical Ring Networks," *Proceedings of ICC'99*, pp 2018-2022, June 1997

[10] L. Wuttisittikulkij, "An Algorithm for the Design of a Multi-Wavelength All-Optical Transport Network using a Multiple Ring Approach," *Proceedings of 20th Electrical Engineering Conference*, pp 219-222, 1997

[11] L. Wuttisittikulkij and M.J. O'Mahony, "Design of a WDM Network using a Multiple Ring Approach," *IEEE Proceedings of GLOBECOM'97*, pp 551-555, November 1997

[12] ศิริชัย อารีวานิช. การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในโครงข่ายใยแก้งนำแสงแบบหลายความยาวคลื่นที่มีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวนหนึ่งวงและแบบวงแหวนหลายวง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543

[13] ธัญพร เอี่ยมวสันต์. การออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานของโครงสร้างวงแหวนหลายวงโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543

[14] http://www.cplex.com/

[15] B.Ramamurthy and B. Mukherjee, “Wavelength Conversion in WDM Networking,” IEEE JSAC,16(7), 1998, pp. 1061-1073

[16] T. Iamvasant, C. Baworntummarat, L. Wuttisittikulkij, “A Comparative Study of Mesh and Multi-ring Designs for Survivable WDM Networks,” *Proceedings of Network 2000*, pp.109-119, May2000

[17] พรชัย ธนาคมสาคร. การจัดสรรวงแหวน และความยาวคลื่นในโครงข่ายแบบหลายความยาวคลื่นที่มีการป้องกันโครงข่ายจากข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายวสันต์ ติระศิริกุล เกิดวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดกรุงเทพ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย