

การพัฒนาเทคนิคการออกแบบโทโปโลยีของเครือข่าย WDM ที่สามารถป้องกันการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง



นาย สติตพงศ์ พุทธิประเสริฐ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

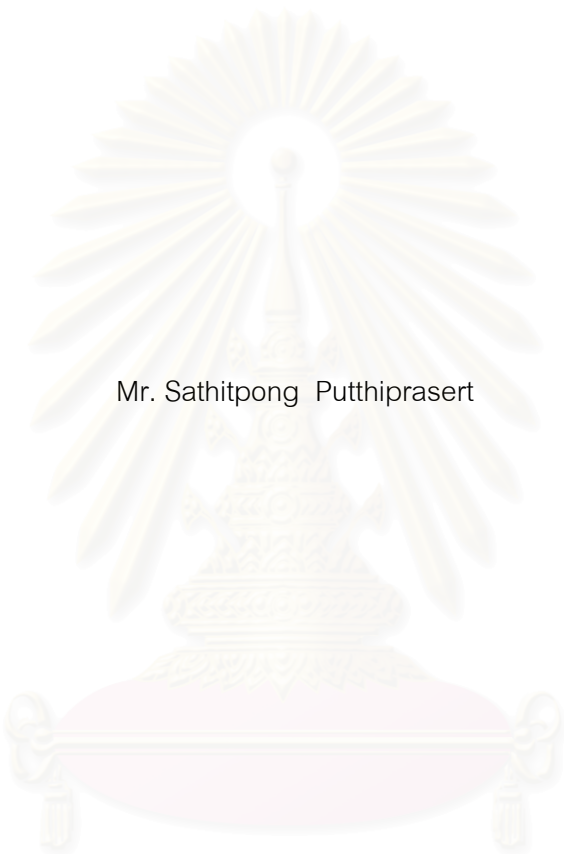
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1753-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF TECHNIQUES FOR TOPOLOGICAL DESIGN OF WDM NETWORKS WITH SINGLE
LINK FAILURE PROTECTION



Mr. Sathitpong Putthiprasert

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2002

ISBN 974-17-1753-9

สถิตพงศ์ พุทธิประเสริฐ : การพัฒนาเทคนิคการออกแบบโทโปโลยีของเครือข่าย WDM ที่สามารถป้องกันการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (DEVELOPMENT OF TECHNIQUES FOR TOPOLOGICAL DESIGN OF WDM NETWORKS WITH SINGLE LINK FAILURE PROTECTION) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ธัญฉกร วุฒิสถิตกุลกิจ, 112 หน้า. ISBN 974-17-1753-9.

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาปัญหาการออกแบบโทโปโลยี, การจัดสรรเส้นทาง และการจัดสรรความยาวคลื่นสำหรับเครือข่าย WDM ที่สามารถป้องกันการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้ วิธีการป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณามีด้วยกันหลายวิธีโดยอาศัยหลักการของการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration และ link restoration วัตถุประสงค์หลักในการออกแบบคือเพื่อลดต้นทุนของเครือข่ายให้ต่ำที่สุดซึ่งรวมทั้งต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสง ในขณะที่ต้องสามารถรองรับทราฟฟิกและฟื้นคืนจากสภาวะที่มีการเสียหายได้ วิธีการออกแบบจะผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้เทคนิค ILP เพื่อให้สามารถรับประกันได้ว่าเป็นผลการออกแบบที่ดีที่สุดประเด็นหลักของงานวิจัยนี้คือปัญหาทั้งหมดในกระบวนการออกแบบได้ถูกพิจารณาไปพร้อมกันเพื่อให้ได้ผลเฉลยจากการออกแบบที่มีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้เป็นสาเหตุให้ความซับซ้อนของปัญหาเพิ่มขึ้นอย่างมาก จึงทำให้ต้องการเวลาในการคำนวณหาผลเฉลยมากเกินความเหมาะสมแม้ว่าเป็นเครือข่ายขนาดเล็ก ดังนั้นฮิวริสติกอัลกอริทึมจึงได้ถูกนำเสนอและนำมาประยุกต์ใช้กับเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

จากผลการทดลองของเครือข่ายตัวอย่างพบว่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการป้องกันการเสียหาย, จำนวนความยาวคลื่น และความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่น โดยทั่วไปแล้ววิธีการป้องกันการเสียหายที่อาศัยหลักการของ path restoration ต้องการต้นทุนต่ำกว่าวิธี link restoration เป็นที่ชัดเจนว่าการเพิ่มจำนวนความยาวคลื่นสามารถช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลงได้ อย่างไรก็ตามถึงกระนั้นการแปลงผันความยาวคลื่นไม่จำเป็นว่าจะมีผลในการช่วยให้ประหยัดต้นทุนได้ สิ่งที่น่าสนใจประการสุดท้ายคือโทโปโลยีและค่า connectivity ของระบบที่แตกต่างกัน เช่น วิธีการป้องกันการเสียหาย, จำนวนความยาวคลื่น และความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่น สามารถเปลี่ยนแปลงไปได้อย่างหลากหลาย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา...2545.....

4270572421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: WDM / TOPOLOGY DESIGN / ROUTING / WAVELENGTH ASSIGNMENT / PROTECTION

SATHITPONG PUTTHIPRASERT : DEVELOPMENT OF TECHNIQUES FOR TOPOLOGICAL DESIGN OF WDM NETWORKS WITH SINGLE LINK FAILURE PROTECTION. THESIS ADVISOR : ASSIST.PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ. Ph.D., 112 pp. ISBN 974-17-1753-9.

This thesis studied the problems of physical topological design, routing, and wavelength assignment for wavelength division multiplexing (WDM) networks with full protection against all single link failures. Several distinct protection schemes based on path and link restorations are investigated. The main objective of this design is to minimize the overall network costs which include both link and fiber costs, while satisfying the traffic requirement and providing complete recovery from failures. The design approach taken in this study is through mathematical formulation using the integer linear programming (ILP) technique in order to ensure the optimality of the resulting design. A key aspect of this research work is that all problems encountered in the design process are considered simultaneously in order to achieve globally efficient design solution. However, this approach causes dramatically increase in problem complexity, leading to excessive computation time requirement even with a small network. As a result, some heuristic algorithms are also proposed and applied to larger sizes of networks.

Based on the results of some sample network problems, it is found that the resulting cost depends on protection schemes, the number of wavelengths and wavelength conversion capability. In general, protection schemes based on path restoration are more cost-effective than those based on link restoration. It is also clear that increasing the number of wavelengths can help reduce the total number of fibers. Nonetheless, the existence of wavelength conversion does not necessarily result in the overall cost savings. Finally, it is interesting to mention that the resulting topology and its connectivity of different system scenarios, i.e. protection schemes, number of wavelength and wavelength conversion capability, can vary significantly.

Department.....Electrical..Engineering.....Student's Signature.....

Field of Study....Electrical..Engineering....Advisor's Signature.....

Academic Year...2002.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ ผศ. ดร. ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยด้วยดีเสมอมาและต้องขอขอบคุณ คุณ เจริญชัย บวรธรรมรัตน์ รวมทั้งเพื่อนและรุ่นพี่ในกลุ่มงานวิจัยเดียวกัน ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดที่ดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกๆ ท่านในครอบครัว พุทธิประเสริฐ ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการเงินและผู้วิจัยตลอดมาจนสามารถสำเร็จการศึกษา

สถิตพงษ์ พุทธิประเสริฐ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เครือข่าย WDM.....	5
2.2 การออกแบบโทโปโลยี.....	6
2.3 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นบนเครือข่าย WDM.....	10
2.4 วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง.....	11
3 แบบจำลองคณิตศาสตร์.....	20
3.1 แบบจำลองและต้นทุนของเครือข่าย WDM.....	20
3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง.....	21
3.3 ความซับซ้อนของแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	30
3.4 ผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์.....	35
3.4.1 ผลของการจัดสรรเส้นทางใหม่และการแปลงผันความยาวคลื่น....	35
3.4.2 ผลของทราฟฟิก.....	46
3.4.3 ผลของค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสง.....	50

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4.4	ผลเฉลยของการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเครือข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย..... 53
4	อีวิริสติกอัลกอริทึม..... 57
4.1	อัลกอริทึมในการปรับปรุงผลเฉลย..... 58
4.1.1	อีวิริสติกอัลกอริทึมแบบที่ 1..... 59
4.1.2	อัลกอริทึมในการปรับปรุงโทโปโลยี..... 63
4.1.3	อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทาง active path..... 64
4.1.4	อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทาง protection path..... 65
4.1.5	อัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่น..... 69
4.2	ผลเฉลยของอีวิริสติกอัลกอริทึมและการวิเคราะห์..... 70
4.2.1	ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากอีวิริสติกอัลกอริทึม..... 70
4.2.2	ผลของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่..... 76
4.2.3	ผลของการแปลงผันความยาวคลื่น..... 82
4.2.4	ผลของทราฟฟิก..... 84
4.2.5	ผลของขนาดเครือข่าย..... 90
4.2.6	ผลของค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสง..... 94
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... 96
5.1	บทสรุป..... 96
5.2	ข้อเสนอแนะ..... 99
รายการอ้างอิง..... 100	
ภาคผนวก..... 103	
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 112	

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 3.1	ชุดสมการของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆ ทั้งในกรณีที่เครือข่ายสามารถและไม่สามารถแปลงผันความคลื่อน.....	30
ตารางที่ 3.2	ตัวแปรในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆ ทั้งในกรณีที่เครือข่ายสามารถและไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่อน.....	30
ตารางที่ 3.3	จำนวน Constraint ของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆ ทั้งในกรณีที่สามารถและไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่อน.....	33
ตารางที่ 3.4	จำนวนตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆ ทั้งในกรณีที่สามารถและไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่อน.....	34
ตารางที่ 3.5	ค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครือข่าย 4 โหนด	36
ตารางที่ 3.6	ค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครือข่าย 5 โหนด	36
ตารางที่ 3.7	จำนวนข่ายเชื่อมโยงของผลเฉลยจากแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 4 โหนด.....	37
ตารางที่ 3.8	จำนวนข่ายเชื่อมโยงของผลเฉลยจากแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 5 โหนด.....	38
ตารางที่ 3.9	จำนวน constraint และตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 4 โหนด.....	42
ตารางที่ 3.10	จำนวน constraint และตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 5 โหนด.....	43
ตารางที่ 3.11	เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครือข่าย 4 โหนด	45
ตารางที่ 3.12	เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครือข่าย 5 โหนด	45
ตารางที่ 3.13	ค่าต้นทุนของผลเฉลยสำหรับเครือข่าย 5 โหนดที่มีรูปแบบกราฟฟิกต่างกัน....	47
ตารางที่ 3.14	จำนวนข่ายเชื่อมโยงของผลเฉลยสำหรับเครือข่าย 5 โหนดที่มีรูปแบบกราฟฟิกต่างกัน.....	47

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 3.15	ค่าต้นทุนและจำนวนข่ายเชื่อมโยงของผลเฉลยสำหรับเครือข่าย 5 โหนดที่มีปริมาณกราฟฟิกต่างกัน เมื่อกำหนดให้ $M=6$	48
ตารางที่ 3.16	ค่าต้นทุนของเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB และ LR โดยมีค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยง ($\alpha_{i,j}$) ต่างกัน และกำหนดให้ $\beta_{i,j}=50$	53
ตารางที่ 3.17	ค่าต้นทุนของผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้จากการหาผลเฉลยโดยวิธี Joint และ 2-step.....	55
ตารางที่ 3.18	เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยการหาผลเฉลยวิธี Joint และ 2-step.....	55
ตารางที่ ค	โทโปโลยีของผลเฉลยจากแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 5 โหนด...	108
ตารางที่ ง	กราฟฟิกแบบแรนดอมและแบบสตาร์ของเครือข่าย 5 โหนดในการทดลองหัวข้อที่ 3.4.2.....	110
ตารางที่ จ.1	ค่าต้นทุนของผลเฉลยของเครือข่าย 4 โหนดที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และฮิวริสติกอัลกอริทึม โดยที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี SLB.....	111
ตารางที่ จ.2	ค่าต้นทุนของผลเฉลยของเครือข่าย 5 โหนดที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และฮิวริสติกอัลกอริทึม โดยที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี SLB.....	111

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
รูปที่ 2.1	Optical cross connect (OXCs).....	5
รูปที่ 2.2	ความแตกต่างระหว่างเครือข่ายประเภท WP กับ VWP.....	6
รูปที่ 2.3	ประเภทของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย.....	12
รูปที่ 2.4	การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ Path restoration และ Link restoration.....	13
รูปที่ 2.5	ตัวอย่างอธิบาย Shared path restoration และ Dedicated path Restoration.....	13
รูปที่ 2.6	ความแตกต่างระหว่างวิธี MC กับวิธี Path Restoration แบบต่างๆ ไป.....	16
รูปที่ 2.7	ความแตกต่างระหว่างวิธี SLB กับ DJP.....	18
รูปที่ 3.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าต้นทุนและค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง ($\beta_{i,j}$) โดยกำหนด $\alpha_{i,j} = 500$ สำหรับเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB.....	52
รูปที่ 3.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าต้นทุนและค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง ($\beta_{i,j}$) โดยกำหนด $\alpha_{i,j} = 500$ สำหรับเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR.....	52
รูปที่ 4.1	แผนผังแสดงขั้นตอนในการยอมรับการปรับปรุงผลเฉลยของฮิวริสติกอัลกอริทึม.....	58
รูปที่ 4.2	แผนผังแสดงขั้นตอนในการปรับปรุงโทโปโลยีของอัลกอริทึม H1.....	59
รูปที่ 4.3	แผนผังแสดงขั้นตอนในการปรับปรุงการจัดสรรเส้นทางที่เป็น active path และความยาวคลื่นของอัลกอริทึม H1.....	60
รูปที่ 4.4	แผนผังแสดงขั้นตอนในการปรับปรุงการจัดสรรเส้นทาง protection path และความยาวคลื่นของอัลกอริทึม H1.....	62
รูปที่ 4.5	แผนผังแสดงอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทาง active path.....	64
รูปที่ 4.6	แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB	66
รูปที่ 4.7	แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP	67
รูปที่ 4.8	แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR	68
รูปที่ 4.9	แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่น.....	70

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึม H1 กับค่า P โดยพิจารณาที่ค่า M ต่างๆ.....	71
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าต้นทุนกับจำนวนเส้นทาง ที่ค่า M ต่างๆ โดยจะเป็นผลเฉลยจากอัลกอริทึม H1 และอัลกอริทึม H1 ที่ถูกปรับปรุง โดยการใช้อัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่น.....	73
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมที่ใช้อัลกอริทึมในการ จัดสรรเส้นทางและการจัดสรรเส้นทางใหม่ซึ่งมีวิธีการกำหนดค่าต้นทุนให้ กับข่ายเชื่อมโยงต่างกัน ที่ค่า M ต่างๆ.....	74
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมที่มีวิธีการปรับปรุง โทโปโลยีวิธีต่างๆ ที่ค่า M แตกต่างกัน โดยที่ใช้อัลกอริทึมในการจัดสรร เส้นทางและการจัดสรรเส้นทางใหม่ รวมทั้งอัลกอริทึมในการจัดสรรความ ยาวคลื่น.....	76
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวน ความยาวคลื่น (M) เมื่อเครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆ.....	77
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนช่องสัญญาณและจำนวนความ ยาวคลื่น (M).....	79
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Utilization กับจำนวนความยาวคลื่น (M)	79
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ spare fiber ต่อ active fiber และจำนวนความยาวคลื่น (M).....	80
รูปที่ 4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Connectivity และจำนวนความยาว คลื่น (M).....	81
รูปที่ 4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของเครือข่าย WP ต่อ VWP และจำนวนความยาวคลื่น (M).....	83
รูปที่ 4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนข่ายเชื่อมโยงของเครือ ข่าย WP ต่อ เครือข่าย VWP และค่าจำนวนความยาวคลื่น (M).....	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและปริมาณ ทราฟฟิก..... 85
รูปที่ 4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Connectivity กับปริมาณทราฟฟิก.... 87
รูปที่ 4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงกับปริมาณ ทราฟฟิก เมื่อเครือข่ายมีรูปแบบทราฟฟิกต่างกัน..... 89
รูปที่ 4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Connectivity กับปริมาณทราฟฟิก เมื่อเครือข่ายมีรูปแบบทราฟฟิกต่างกัน..... 90
รูปที่ 4.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าต้นทุนต่อโนดกับจำนวนโนด..... 92
รูปที่ 4.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและจำนวนโนด..... 93
รูปที่ 4.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าต้นทุนและต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อ $M=1,4$ และ 16 โดยกำหนดให้ค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงเท่ากับ 500 95
รูปที่ ก	แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึม Dijkstra..... 105
รูปที่ ข	แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึม Yen..... 107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการแบนด์วิธของเครือข่ายมีเพิ่มขึ้นอย่างมากเพื่อรองรับการให้บริการของเครือข่ายในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การส่งข้อมูลมัลติมีเดีย การส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ การโอนย้ายไฟล์ขนาดใหญ่ เป็นต้น เครือข่ายหนึ่งที่สามารถสร้างเครือข่ายความเร็วสูงได้คือเครือข่ายทางแสงซึ่งสามารถให้ความเร็วอยู่ในระดับ Gbps เทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจสำหรับนำมาประยุกต์ในการสร้างเครือข่ายทางแสงให้มีความเร็วสูงขึ้นคือ Wavelength Division Multiplexing (WDM) เครือข่าย WDM จะสามารถมัลติเพล็กซ์รวมช่องสัญญาณจำนวนหนึ่งเพื่อส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกันได้ทำให้สามารถเพิ่มความเร็วได้สูงถึงในระดับ Tbps ซึ่งแต่ละช่องสัญญาณบนเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกันจะต้องเลือกใช้ความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เพื่อป้องกันการรบกวนระหว่างช่องสัญญาณ โดยที่ในการสื่อสารบนเครือข่าย WDM จะต้องมีการกำหนดเส้นทางระหว่างปลายทางของข้อมูล รวมทั้งจะต้องมีการกำหนดความยาวคลื่นให้กับช่องสัญญาณที่ใช้ระหว่างปลายทางนั้นด้วย

การออกแบบโทโปโลยีของเครือข่ายเป็นปัญหาสำคัญปัญหาหนึ่งซึ่งมีผู้สนใจทำงานวิจัยเป็นจำนวนมาก เนื่องจากว่าโทโปโลยีของเครือข่ายจะเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของเครือข่ายซึ่งที่เห็นได้ชัดคือเส้นทางระหว่างคูโนดบนเครือข่าย รวมทั้งต้นทุนของเครือข่าย จึงทำให้ต้องมีการออกแบบโทโปโลยีเพื่อให้ได้โทโปโลยีที่สอดคล้องกับเงื่อนไขและเป็นไปตามวัตถุประสงค์มากที่สุด ในการออกแบบโทโปโลยีโดยทั่วไปแล้วจะเป็นการออกแบบโทโปโลยีเพื่อรองรับทราฟฟิกของเครือข่ายซึ่งทำให้ต้องมีการจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับทราฟฟิกนั้นด้วย ในกรณีของเครือข่าย WDM จะแตกต่างกันออกไปคือ นอกจากจะต้องกำหนดเส้นทางแล้วยังต้องกำหนดความยาวคลื่นด้วย ซึ่งทำให้ปัญหาในการออกแบบโทโปโลยีมีความซับซ้อนมากกว่าเครือข่ายสื่อสารอื่น ในการที่จะทำให้เครือข่ายสามารถรองรับทราฟฟิกได้ เครือข่ายจะต้องมีช่องสัญญาณเพียงพอ สำหรับเครือข่าย WDM จะต้องมีการวางเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อให้ช่องสัญญาณเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากว่าจำนวนช่องสัญญาณบนแต่ละเส้นใยแก้วนำแสงจะมีจำนวนจำกัด จึงต้องมีการวางเส้นใยแก้วนำแสงให้เพียงพอที่จะรองรับทราฟฟิกของเครือข่าย ต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงจึงเป็นส่วนหนึ่งของต้นทุนที่สำคัญของเครือข่าย WDM

เนื่องจากเครือข่าย WDM เป็นเครือข่ายความเร็วสูง ปัญหาสำคัญปัญหาหนึ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้คือ เมื่อเกิดการเสียหายขององค์ประกอบบางส่วนภายในเครือข่าย เช่น โหนดหรือข่ายเชื่อมโยง จะทำให้ข้อมูลบางส่วนสูญหายไปซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออย่างมาก ดังนั้นในการออกแบบเครือข่าย WDM จะต้องพิจารณาถึงปัญหานี้ด้วย ในการแก้ปัญหาวิธีการหนึ่งที่ได้คือการเปลี่ยนเส้นทางที่ถูกกระทบจากการเสียหายไปใช้เส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงส่วนของเครือข่ายที่เกิดการเสียหาย ซึ่งเครือข่ายจะต้องมีช่องสัญญาณเพียงพอ จึงทำให้อาจจะต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มเติมจากปกติ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องวางเพิ่มนี้จะขึ้นอยู่กับการจัดสรรเส้นทางให้กับทราฟฟิกซึ่งจะทำให้มีผลต่อต้นทุนของเครือข่ายด้วย โดยทั่วไปเครือข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหานี้จึงมีต้นทุนสูงกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถแก้ปัญหานี้ได้

จากงานวิจัยตามที่ทำวิจัยได้ศึกษามา ได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโพลีโพลีของเครือข่ายสื่อสารต่างๆ รวมทั้งเครือข่าย WDM ซึ่งยังไม่ได้พิจารณาถึงการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นบนเครือข่าย จากความสำคัญของปัญหาในการป้องกันการเสียหายบนเครือข่าย WDM ที่ต้องคำนึงถึง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษารออกแบบโพลีโพลีของเครือข่าย WDM พร้อมทั้งจัดสรรทรัพยากรเพื่อให้สามารถป้องกันการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ที่ให้ต้นทุนที่ต่ำที่สุด โดยในส่วนต้นทุนจะประกอบไปด้วย ต้นทุนของข่ายเชื่อมโยง, ต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง และเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้ในการป้องกันการเสียหาย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาถึงต้นทุนและหาวิธีการในการออกแบบโพลีโพลี และจัดสรรทรัพยากรของเครือข่าย WDM เพื่อรองรับทราฟฟิกของเครือข่าย รวมทั้งสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ที่มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด โดยใช้การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration และแบบ link restoration ในวิทยานิพนธ์นี้การจัดสรรทรัพยากรจะเป็นการจัดสรรช่องสัญญาณหรือความยาวคลื่นบนเส้นใยแก้วนำแสง

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งใช้เทคนิค Integer linear programming (ILP) ในการหาผลเฉลย เพื่อออกแบบโพลีโพลีและจัดสรรทรัพยากรบนเครือข่าย WDM ที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อมีการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยใช้การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration และ link restoration ทั้งในกรณีที่มีการแปลงผันความยาวคลื่นและไม่มี ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด

2. ออกแบบอัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบโทโลยีและจัดสรรทรัพยากรบนเครือข่าย WDM ที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อมีการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยใช้การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration และ link restoration ทั้งในกรณีที่มีการแปลงผันความยาวคลื่นและไม่มี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด สำหรับอัลกอริทึมนี้จะเป็นการพัฒนาเพื่อนำไปใช้กับเครือข่ายที่มีขนาดกลาง
3. ศึกษาผลของการแปลงผันความยาวคลื่นและวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration และ link restoration ในแง่ของต้นทุนและโทโปโลยีที่ได้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
 - 1.1 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโทโปโลยี
 - 1.2 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับเครือข่าย WDM
 - 1.3 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อมีการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
2. พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบโทโปโลยีและจัดสรรทรัพยากรเพื่อให้เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อมีการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
 - 2.1 ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบโทโปโลยีและจัดสรรทรัพยากรเพื่อให้เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ โดยการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration และ link restoration ทั้งในกรณีที่มีการแปลงผันความยาวคลื่นและไม่มี
 - 2.2 ทดสอบและตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์
 - 2.3 นำแบบจำลองคณิตศาสตร์ไปใช้ในการออกแบบเครือข่ายและทำการวิเคราะห์ผลที่ได้
3. พัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบโทโปโลยีและจัดสรรทรัพยากรเพื่อให้เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อมีการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
 - 3.1 พัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบโทโปโลยีและจัดสรรทรัพยากรเพื่อให้เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ โดยใช้การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration และ link restoration ทั้งในกรณีที่มีการแปลงผันความยาวคลื่นและไม่มี สำหรับใช้กับเครือข่ายขนาดกลาง

3.2 ทดสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่ได้จากการออกแบบโดยอัลกอริทึม

3.3 นำอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นไปใช้ในการออกแบบ และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้

4. รวบรวม วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

5. ทำการเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

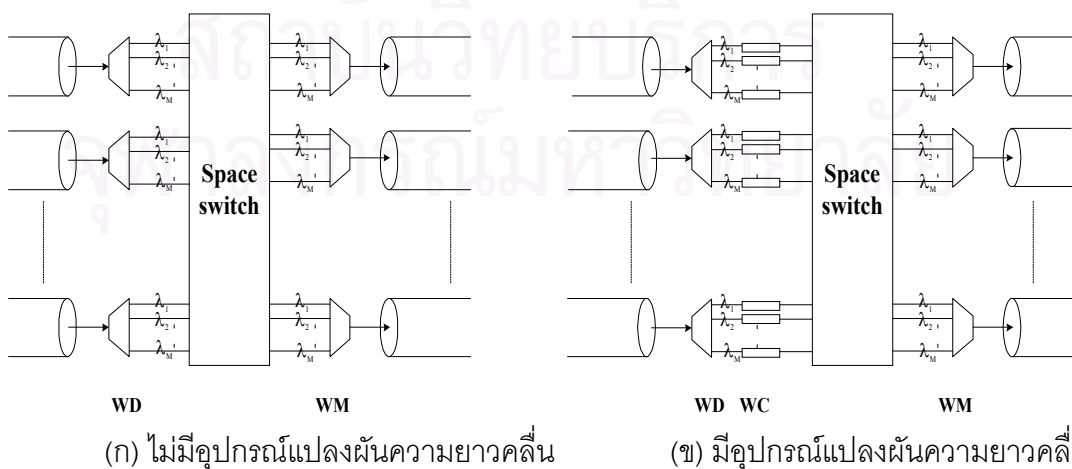
1. แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ในการออกแบบโทโปโลยีและจัดสรรทรัพยากรของเครือข่าย WDM ที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อมีการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ทั้งในกรณีที่มีการแปลงผันความยาวคลื่นและไม่มี โดยใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration และ link restoration ที่ให้ต้นทุนต่ำสุด
2. อัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบโทโปโลยีและจัดสรรทรัพยากรบนเครือข่าย WDM ที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อมีการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ทั้งในกรณีที่มีการแปลงผันความยาวคลื่นและไม่มี โดยใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration และ link restoration

บทที่ 2

หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครือข่าย WDM

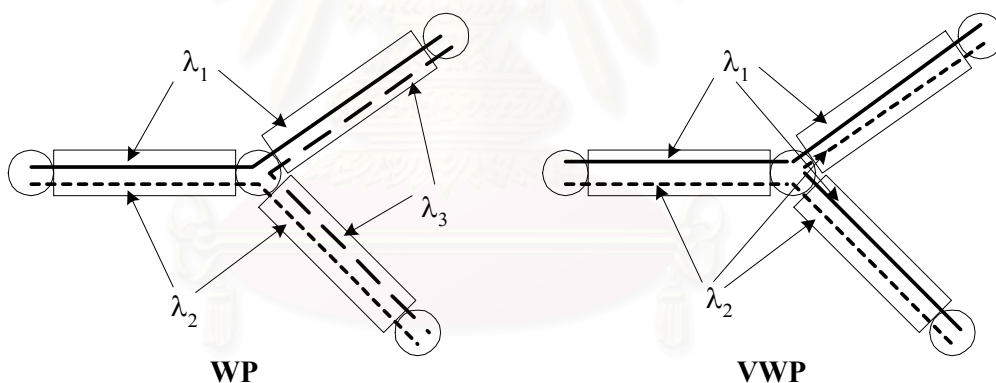
โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายทั่วไปประกอบด้วยโหนด (node) และสายเชื่อมโยง (link) โดยสายเชื่อมโยงทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างโหนดของเครือข่าย และทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านข้อมูลภายในเครือข่าย เครือข่าย WDM จะอาศัยหลักการมัลติเพลกซ์รวมช่องสัญญาณแสงหรือค่าความยาวคลื่นจำนวนหนึ่งไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกัน จึงทำให้สามารถสร้างเครือข่ายที่มีความเร็วสูงได้ถึงในระดับ Tbps [1,2] อุปกรณ์ภายในโหนดของเครือข่าย WDM จะประกอบด้วย Wavelength Multiplexer (WM), Wavelength Demultiplexer (WD) และ Space Switch ที่ซึ่งทำหน้าที่ร่วมกันเป็นตัวกำหนดเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทางของเครือข่าย โดยเรียกอุปกรณ์ทั้งหมดภายในโหนดของเครือข่ายว่า Optical cross connect (OXC) [3-5] ดังรูปที่ 2.1 (ก) ซึ่งในบางเครือข่าย OXC อาจจะมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter, WC) เพิ่มเติม เพื่อทำหน้าที่ในการเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นให้กับช่องสัญญาณสื่อสารที่ผ่านโหนดของเครือข่าย ดังรูปที่ 2.1(ข) ในการติดต่อสื่อสารภายในเครือข่าย WDM เครือข่ายจะต้องมีการกำหนดเส้นทางที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างโหนดต้นทางกับปลายทางของเครือข่ายที่ต้องการติดต่อสื่อสาร รวมทั้งจะต้องกำหนดค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางที่ใช้เชื่อมต่อนั้นด้วย ซึ่งในเครือข่าย WDM จะเรียกเส้นทางที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างโหนดซึ่งเครือข่ายได้กำหนดให้เรียกว่า Lightpath [2,6] เนื่องจากสัญญาณที่ติดต่อระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทางเป็นสัญญาณแสง (optical signal)



รูปที่ 2.1 Optical cross connect (OXC)

เครือข่าย WDM สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท [4,7] ตามความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่นของเครือข่าย ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2

1. Wavelength Path (WP) หมายถึง ตลอดทั้งเส้นทางที่เชื่อมต่อโนดต้นทางกับปลายทางของเครือข่ายจะกำหนดค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางได้เพียงค่าเดียวเท่านั้น ไม่สามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้เมื่อวิ่งผ่านโนดของเครือข่าย ทำให้ช่องสัญญาณในแต่ละข่ายเชื่อมโยงที่ใช้รองรับทราฟฟิกของเส้นทางจะต้องมีความยาวคลื่นเดียวกัน ดังนั้นเครือข่ายประเภทนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ OXCs
2. Virtual Wavelength Path (VWP) หมายถึง เส้นทางที่เชื่อมต่อโนดต้นทางกับปลายทางของเครือข่ายสามารถเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้เมื่อเส้นทางนั้นวิ่งผ่านโนดของเครือข่าย ช่องสัญญาณในแต่ละข่ายเชื่อมโยงที่ใช้รองรับทราฟฟิกของเส้นทางจะสามารถมีความยาวคลื่นต่างกันได้ ดังนั้นในเครือข่ายประเภทนี้จึงจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นที่ OXCs เพื่อใช้ในการเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นให้กับเส้นทางของเครือข่าย



รูปที่ 2.2 ความแตกต่างระหว่างเครือข่ายประเภท WP กับ VWP

2.2 การออกแบบโทโปโลยี

เครือข่ายจะประกอบไปด้วยโนดและข่ายเชื่อมโยงดังนั้นก่อนที่เครือข่ายจะสามารถทำงานได้จึงต้องมีการวางข่ายเชื่อมโยงเพื่อเชื่อมต่อระหว่างคุโนดก่อน โดยที่แต่ละข่ายเชื่อมโยงจะต้องมีช่องสัญญาณเพียงพอในการรองรับทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้น รูปแบบในการวางข่ายเชื่อมโยงหรือโทโปโลยีของเครือข่ายสามารถมีได้หลายรูปแบบ โทโปโลยีแต่ละแบบจะมีต้นทุนหรือคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบโทโปโลยีเพื่อให้ได้โทโปโลยีที่มีต้นทุนต่ำหรือมีคุณสมบัติตามต้องการมากที่สุด ปัญหาการออกแบบโทโปโลยีสำหรับเครือข่ายสื่อสารเป็นปัญหา

ที่มีผู้สนใจทำงานวิจัยเป็นจำนวนมากในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา [8-14] ซึ่งการแก้ปัญหาจะเป็นไปในลักษณะของ Optimization ในการออกแบบจะเลือกวางสายเชื่อมโยงจากชุดของสายเชื่อมโยงซึ่งมีได้มากที่สุดเท่ากับ $\frac{n}{2}(n-1)$ เมื่อ n คือจำนวนโหนดของเครือข่าย รูปแบบของปัญหา Optimization จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) และ constraint ซึ่งแสดงเงื่อนไขของคำตอบที่เป็นไปได้ ผลเฉลยที่ได้จะเป็นผลเฉลยที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากหรือน้อยที่สุด โดยที่ต้องสอดคล้องกับ constraint ที่กำหนด เมื่อพิจารณาปัญหาการออกแบบโทโปโลยีจะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์แตกต่างกันเช่นอาจจะเป็นค่าต้นทุนหรือค่าดีเลย์ ส่วน constraint อาจจะเป็นค่าดีเลย์มากที่สุดหรือ reliability ของเครือข่ายซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของเครือข่าย วัตถุประสงค์หนึ่งที่สำคัญในการออกแบบโทโปโลยีคือการออกแบบเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกของเครือข่าย ในกรณีนี้นอกจากจะต้องมีการเลือกวางสายเชื่อมโยงแล้ว จะต้องมีการจัดสรรทรัพยากรเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกของเครือข่ายด้วย ปัญหาในการออกแบบจึงสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน [8] คือ การวางสายเชื่อมโยง(topology configuration), การจัดสรรเส้นทาง (routing) และการจัดสรรความจุของช่องสัญญาณ (capacity assignment) ปัญหาในการออกแบบโทโปโลยีจะไม่สามารถหาผลเฉลยที่ดีที่สุด (optimal) ได้ในเวลาอันเหมาะสมเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ เนื่องจากจำนวนสายเชื่อมโยงและเส้นทางที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนโหนดอย่างรวดเร็วทำให้ปัญหามีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ปัญหาการออกแบบโทโปโลยีจึงได้ถูกจัดอยู่ในระดับ NP-Hard ด้วยเหตุนี้นักวิจัยหลายท่านจึงได้พัฒนาฮิวริสติกอัลกอริทึมเพื่อสำหรับใช้ในการหาผลเฉลยของเครือข่ายขนาดใหญ่ในเวลาที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามผลเฉลยที่ได้จากฮิวริสติกอัลกอริทึมจะไม่สามารถรับประกันได้ว่าเป็นผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่เป็นผลเฉลยที่ดีในระดับหนึ่งซึ่งสามารถหาได้ในเวลาที่เหมาะสม (sub optimal)

โทโปโลยีของเครือข่ายจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ physical topology และ logical topology สำหรับ physical topology จะหมายถึงการเชื่อมต่อของโหนดและสายเชื่อมโยงของเครือข่าย ส่วน logical topology จะหมายถึงการเชื่อมต่อระหว่างโหนดผ่านสายเชื่อมโยงของเครือข่าย โดยที่แต่ละการเชื่อมต่อระหว่างโหนดจะเป็น logical link ของ logical topology ซึ่งจะเสมือนเป็นโทโปโลยีที่ให้บริการกับเครือข่ายในชั้นที่สูงกว่า สำหรับคำจำกัดความที่สำคัญซึ่งเกี่ยวข้องกับโทโปโลยีได้แก่ node degree ซึ่งหมายถึงจำนวนสายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่ออยู่กับแต่ละโหนด, d-link-connected หมายถึงแต่ละโหนดจะถูกเชื่อมต่อด้วยเส้นทางที่ไม่ผ่านสายเชื่อมโยงร่วมกันอย่างน้อย d เส้นทาง, d-node-connected หมายถึงแต่ละโหนดจะถูกเชื่อมต่อด้วยเส้นทางที่ไม่ผ่านโหนดร่วมกันอย่างน้อย d เส้นทาง และ reliability หมายถึงความน่าจะเป็นที่แต่ละโหนดจะสามารถเชื่อมต่อกันได้ [9,10] ในการออกแบบโทโปโลยีเงื่อนไขหนึ่งที่สำคัญคือ reliability ของเครือข่ายซึ่ง

เป็นการแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือในการให้บริการของเครือข่าย สำหรับการคำนวณหาค่า reliability จะมีความซับซ้อนในการคำนวณค่อนข้างมากซึ่งมีผลทำให้เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลย นานมากขึ้น ดังนั้นนักวิจัยหลายท่านจึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการคำนวณหาค่า reliability ของเครือข่าย เพื่อให้สามารถคำนวณได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้เงื่อนไขของค่า reliability แล้ว constraint หนึ่งที่ใช้ในงานวิจัยจำนวนมาก ซึ่งเป็น constraint ที่ทำให้สามารถรับประกันในเรื่อง การให้บริการของเครือข่ายได้ในระดับหนึ่งคือ 2-connected เครือข่ายที่เป็นไปตาม constraint นี้ จะสามารถรับประกันได้ว่าในกรณีที่มีการเสียหายของอุปกรณ์ภายในเครือข่าย เครือข่ายจะมีเส้นทางสำรองที่สามารถใช้งานได้อย่างน้อยหนึ่งเส้นทาง เพื่อใช้ในการรองรับทราฟฟิกบนเส้นทางที่ถูก กระทบจากการเสียหายของอุปกรณ์ (สำหรับในที่นี้ 2-connected จะหมายถึง 2-link-connected เนื่องจากว่าในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะการป้องกันการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงซึ่ง 2-link-connected เป็นเงื่อนไขที่เพียงพอในการให้การรับประกัน)

งานวิจัยจำนวนมากได้นำเสนอวิธีการปรับโครงสร้างเครือข่ายเพื่อใช้ในการออกแบบโทโปโลยีของ เครือข่ายสื่อสารซึ่งจะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์และ constraint ของปัญหาแตกต่างกันไป วิธีการปรับ โครงสร้างที่ทั่วไปจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือการปรับปรุงผลเฉลยและการยอมรับการปรับปรุงผล เฉลย วิธีโดยทั่วไปจะเริ่มจากการหาโทโปโลยีเริ่มต้น แล้วจึงทำการเปลี่ยนแปลงโทโปโลยีบางส่วน ถ้าโทโปโลยีที่ได้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีขึ้นจะยอมรับการเปลี่ยนแปลงนั้น ซึ่งจะทำซ้ำจนไม่ สามารถหาโทโปโลยีที่ดีขึ้นได้อีก สำหรับในกรณีที่เป็นการออกแบบโทโปโลยีเพื่อรองรับทราฟฟิก ของเครือข่ายจะต้องมีการจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับทราฟฟิกด้วย ซึ่งทำให้ขั้นตอนในการปรับปรุง โทโปโลยีใหม่จะต้องมีวิธีการจัดสรรเส้นทางหรือปรับปรุงเส้นทางที่ถูกจัดสรรด้วย ด้วยเหตุผลนี้ จึงทำให้การออกแบบโทโปโลยีของเครือข่าย WDM แตกต่างจากเครือข่ายสื่อสารอื่นๆ คือ จากที่ได้ กล่าวแล้วเครือข่าย WDM แบ่งเป็น 2 ประเภทตามความสามารถในการแปลงผันความยาวคลื่น ในกรณีที่เครือข่ายสามารถแปลงผันความยาวคลื่นการจัดสรรเส้นทางจะไม่ต้องคำนึงถึงการจัด สรรความยาวคลื่นซึ่งในกรณีนี้การออกแบบจะคล้ายการออกแบบโทโปโลยีของเครือข่ายสื่อสาร อื่น แต่ในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นจะต้องมีการจัดสรรความยาวคลื่นให้ กับเส้นทางที่ถูกจัดสรรเพื่อใช้รองรับทราฟฟิกด้วย ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการในการจัดสรร ความยาวคลื่นด้วยซึ่งทำให้มีความซับซ้อนมากกว่าการออกแบบโทโปโลยีของเครือข่ายสื่อสารอื่น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโทโปโลยีส่วนหนึ่งมีดังนี้

ในบทความ [8] ได้เสนอวิธีการปรับปรุงโทโปโลยีที่เรียกว่า Branch X-change (BXC) ซึ่ง จะประกอบด้วยการดึงเอาข่ายเชื่อมโยงจำนวนหนึ่งออกและวางข่ายเชื่อมโยงจำนวนหนึ่งเพิ่มเข้า ไป เพื่อให้โทโปโลยีที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไข 2-connected วิธีนี้จะพิจารณาโทโปโลยีที่ได้จากการ

เปลี่ยนแปลงโดยวิธีนี้ทุกรูปแบบซึ่งจะมีจำนวนมากเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น วิธีนี้จึงไม่เหมาะสมกับเครือข่ายที่มีจำนวนโหนดมากกว่า 30 โหนด ผลเฉลยที่ได้จะเป็น local minimum เนื่องจากว่าการเปลี่ยนแปลงโทโปโลยีโดยวิธีนี้ไม่สามารถพบโทโปโลยีที่เป็นไปได้ทุกรูปแบบ นอกจากวิธี BXC แล้ว [8] ได้เสนอวิธีการเปลี่ยนแปลงโทโปโลยีอีกวิธีหนึ่งคือ Concave Branch Elimination (CBE) โดยจะกำหนดให้โทโปโลยีเริ่มต้นเป็นแบบ Full mesh และจะดึงเอาสายเชื่อมโยงที่มีการใช้งานไม่คุ้มค่าออก จนกระทั่งการเอาสายเชื่อมโยงถัดไปออกจะทำให้โทโปโลยีที่ได้ไม่เป็น 2-connected ผลเฉลยสุดท้ายที่ได้จะเป็นผลเฉลยซึ่งเป็น local minimum เช่นเดียวกัน

สำหรับอีกวิธีหนึ่งที่ได้เสนอไว้ใน [8] คือ Cut-saturated (CS) ในวิธีนี้จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การหา saturated cut ซึ่งคือการหาเซตของสายเชื่อมโยงจำนวนน้อยที่สุดที่มีการใช้งานมากที่สุด ซึ่งถ้าเอาออกแล้วจะทำให้เครือข่ายถูกแยกออกจากกัน, การเพิ่มสายเชื่อมโยงตามแนวของ cut และการเอาสายเชื่อมโยงที่มีการใช้งานน้อยที่สุดออก วิธี CS แตกต่างจาก BXC โดยอาศัยหลักการที่ว่าแทนที่จะหาการเปลี่ยนแปลงโทโปโลยีทุกรูปแบบ จะทำการเลือกเปลี่ยนแปลงสายเชื่อมโยงบางสายเชื่อมโยงที่คาดว่าจะทำให้ได้ผลเฉลยที่ดีขึ้น บทความ [11] ได้นำเสนออัลกอริทึม MENTOR ในการออกแบบโทโปโลยีเพื่อรองรับกราฟฟิคที่มีต้นทุนต่ำที่สุด โดยโทโปโลยีที่ได้จากออกแบบจะมีลักษณะผสมของโทโปโลยีแบบ star และ tree ซึ่งอาจจะไม่เป็นไปตามเงื่อนไข 2-connected

นอกจากงานวิจัยที่ได้พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการออกแบบโทโปโลยีดังกล่าวข้างต้น ยังมีงานวิจัยที่ได้นำฮิวริสติกอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับแก้ปัญหา combinatorial optimization ซึ่งจะเป็นอัลกอริทึมในการยอมรับการปรับปรุงผลเฉลย เช่น Simulated Annealing (SA), Genetic Algorithm (GA), Tabu search รวมทั้ง Hybrid มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโทโปโลยี งานวิจัยส่วนหนึ่งได้แก่ [10] ได้พิจารณาปัญหาการออกแบบโทโปโลยีที่มีต้นทุนต่ำที่สุด โดยที่ต้องมี reliability อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาผลเฉลยคือ GA บทความ [9] ได้ใช้อัลกอริทึม tabu search ในการออกแบบโทโปโลยีที่มีต้นทุนต่ำที่สุดเพื่อรองรับกราฟฟิคของเครือข่าย โดยที่ค่าประวิงเวลา (delay) จะต้องอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ในบทความ [12] ได้เสนอวิธีการออกแบบโทโปโลยีเพื่อรองรับกราฟฟิคของเครือข่ายที่ให้ต้นทุนต่ำสุดโดยการใช้ GA ซึ่งโทโปโลยีจะต้องเป็น 2-connected ส่วนการจัดสรรเส้นทางระหว่างคู่โหนดจะทำการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (shortest path) บทความ [13] ได้เสนออัลกอริทึมในการออกแบบโทโปโลยีที่เป็น 2-connected และมีค่าประวิงเวลาอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งอัลกอริทึมที่เสนอจะเป็นอัลกอริทึม Hybrid ระหว่าง GA และ CS

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นงานวิจัยที่ศึกษาการออกแบบโทโปโลยีของเครือข่ายสื่อสาร สำหรับงานวิจัยส่วนหนึ่งที่เสนอวิธีการออกแบบโทโปโลยีของเครือข่าย WDM ได้แก่ [1] ได้เสนอการออกแบบเครือข่าย WDM ทั้ง physical และ logical topology โดยที่คำนึงถึงค่าประวิงเวลาของเครือข่าย ในขั้นตอนแรกจะใช้อัลกอริทึมในการออกแบบ physical topology ซึ่งจะจำกัดเฉพาะโทโปโลยีแบบ tree (โทโปโลยีที่ได้จึงไม่เป็น 2-connected) จากนั้นจึงทำการออกแบบ logical topology ที่ให้ค่าประวิงเวลาดำต่ำที่สุด โดยการใช้ SA และ GA ในบทความ [14] ได้เสนอวิธีการออกแบบโทโปโลยีพร้อมกับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่มีต้นทุนต่ำที่สุด โดยเครือข่ายจะเป็นแบบ single fiber (แต่ละข่ายเชื่อมโยงจะมีเส้นใยแก้วนำแสง 1 เส้น) อัลกอริทึมที่ใช้ในการหาผลเฉลยจะได้ออกมาจากการนำอัลกอริทึม CS มาประยุกต์ ร่วมกับการใช้อัลกอริทึม first-fit [6] ในการจัดสรรความยาวคลื่น บทความ [15] ได้เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบ logical topology ที่มี node degree ตามที่กำหนดพร้อมกับการจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โหนด ส่วนในการหาผลเฉลยจะหาผลเฉลยโดยการนำอัลกอริทึม SA มาประยุกต์

2.3 การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นบนเครือข่าย WDM

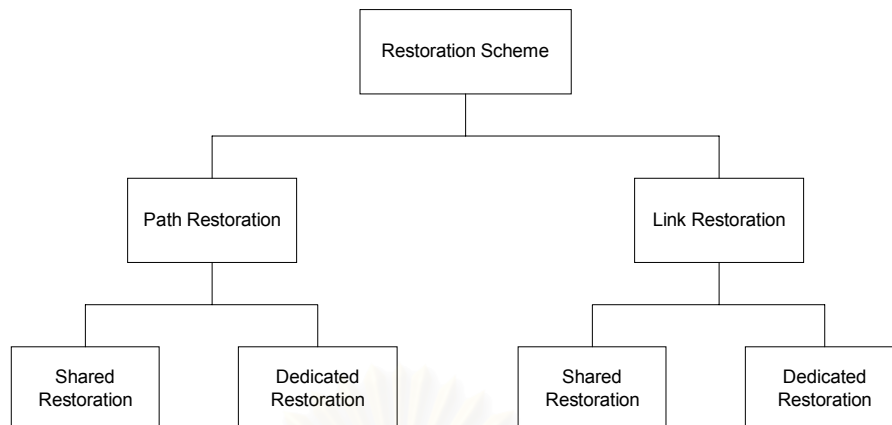
สำหรับเครือข่ายที่ได้มีการวางข่ายเชื่อมโยงแล้ว ในการสื่อสารระหว่างคู่โหนดจะต้องมีการจัดสรรเส้นทางเพื่อใช้รองรับทราฟฟิกซึ่งในการหาผลเฉลยจะเป็นการแก้ปัญหา Optimization เช่นเดียวกับการออกแบบโทโปโลยี ในกรณีที่เครือข่ายไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (WP) จะต้องมีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางที่ใช้รองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดด้วย ทำให้การหาผลเฉลยสำหรับเครือข่าย WP มีความซับซ้อนมากขึ้น สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้เส้นทางที่ใช้รองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดจะเรียกว่า active path ในงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้เสนอวิธีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่ให้ต้นทุนต่ำที่สุดหรือสามารถรองรับทราฟฟิกได้มากที่สุด [2,6,7,16,17] ซึ่งในกรณีเครือข่าย WDM ต้นทุนที่สำคัญคือจำนวนความยาวคลื่นหรือเส้นใยแก้วนำแสง ในการหาผลเฉลยอาจจะทำได้โดยการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์แล้วใช้เทคนิค Integer Linear Programming (ILP) แต่เนื่องจากจำนวนเส้นทางจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้การใช้เทคนิค ILP ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ในเวลาที่เหมาะสมจึงทำให้มีงานวิจัยที่ได้เสนอฮิวริสติกอัลกอริทึมมาใช้ในการหาผลเฉลยสำหรับเครือข่ายใหญ่เช่นเดียวกับการออกแบบโทโปโลยีดังที่กล่าวมาแล้ว สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นคือจะต้องไม่มีการใช้ความยาวคลื่นเดียวกันบนเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกัน ดังนั้นในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นและเป็นเครือข่ายแบบ single fiber เส้นทางใดๆ ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงเดียวกันจะไม่สามารถใช้ความยาวคลื่นเดียวกัน แบบจำลองคณิตศาสตร์

ที่ใช้สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นจะสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ คือ path formulation และ flow formulation [16] แบบจำลองทั้งสองจะมีความแตกต่างกันทั้งตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ (design variable) และ constraint สำหรับแบบจำลองแบบแรกตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบจะเป็นปริมาณทราฟฟิกบนแต่ละเส้นทาง ส่วนแบบจำลองแบบที่สองตัวแปรในการออกแบบจะเป็นปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนดบนแต่ละข่ายเชื่อมโยง แต่อย่างไรก็ตามผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองหนึ่งจะสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของผลเฉลยของแบบจำลองอีกแบบหนึ่งได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นบนเครือข่าย WDM ได้แก้บทความ [6] ได้เสนออัลกอริทึม first fit ในการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับ lightpath (หรือเส้นทางที่ใช้รองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โหนด) ที่ใช้จำนวนความยาวคลื่นที่ต่ำที่สุด โดยที่เป็นเครือข่ายแบบ single fiber บทความ [7] ได้เสนอการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นที่ให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุด โดยได้เสนอวิธีการหาผลเฉลยไว้ 2 วิธี คือการใช้ ILP และอัลกอริทึม SA บทความ [2] ได้เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดได้มากที่สุด และได้ใช้ Linear Programming (LP) ในการหาค่าขอบเขตบน (upper bound) ของทราฟฟิกที่รองรับได้ บทความ [16] ได้เสนอฮิวริสติกอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกได้มากที่สุด บทความ [17] ได้เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นเพื่อรองรับทราฟฟิกโดยใช้จำนวนความยาวคลื่นน้อยที่สุด ซึ่งแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอจะอยู่ในรูปของ flow formulation โดยจะใช้เทคนิค LP ร่วมกับฮิวริสติกอัลกอริทึมในการหาผลเฉลย

2.4 วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

จากที่กล่าวไว้แล้วว่าเครือข่าย WDM เป็นเครือข่ายที่มีความเร็วสูงดังนั้นการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงเพียงหนึ่งข่ายเชื่อมโยงจะทำให้ข้อมูลสูญหายไปเป็นจำนวนมาก จึงทำให้ต้องคำนึงถึงการป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น ซึ่งวิธีหนึ่งที่ทำได้คือการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับทราฟฟิกที่ถูกรบกวนเพื่อหลีกเลี่ยงข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย สำหรับเส้นทางใหม่ที่ใช้ในการป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้จะเรียกว่า restoration path หรือ protection path ส่วนเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องวางเพิ่มเพื่อให้เครือข่ายมีช่องสัญญาณเพียงพอในการจัดสรรเส้นทางใหม่ได้จะเรียกว่า spare fiber จากการศึกษาถึงบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับเรื่องนี้ วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายสามารถเขียนเป็นแผนภูมิได้ [18-20] ดังรูปที่ 2.3



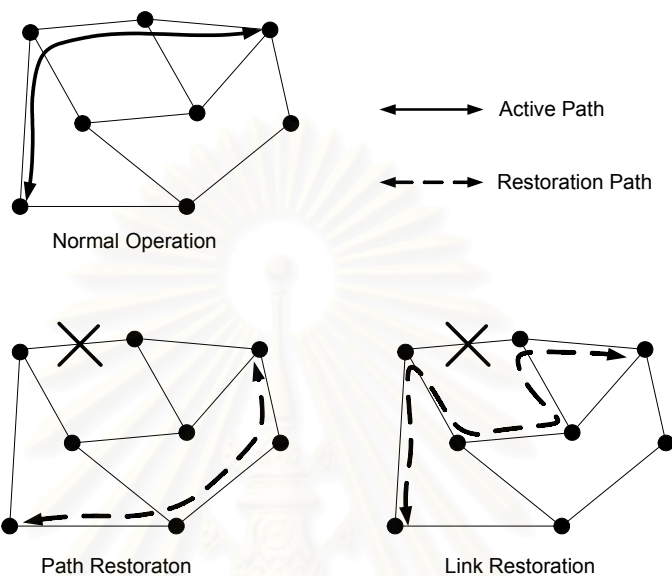
รูปที่ 2.3 ประเภทของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะวิธีการเลือกเส้นทางที่เป็น restoration path ให้กับเส้นทางที่ต้องการจัดสรรเส้นทางใหม่ วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งสองประเภทได้แก่

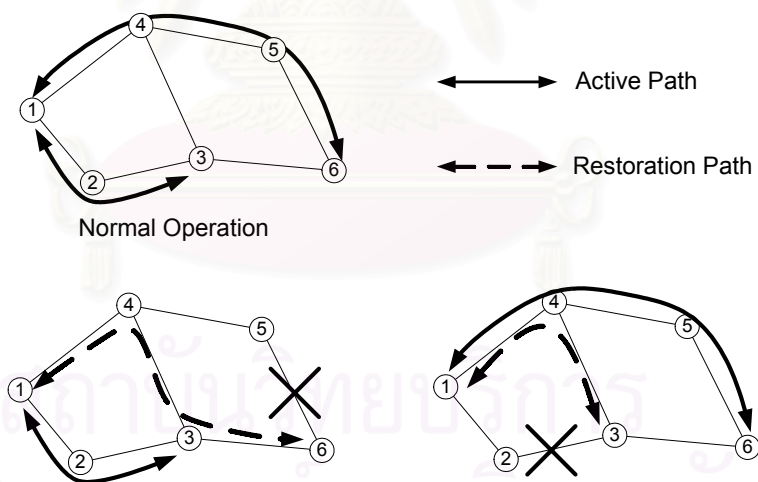
1. **Path Restoration (PR)** หมายถึง การจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงจะจัดสรรเส้นทางที่เป็น restoration path ระหว่างจุดที่เป็นต้นทางและปลายทางของกราฟฟิก ดังรูปที่ 2.4 และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.3 วิธีนี้ยังสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้ช่องสัญญาณบน spare fiber ได้เป็น 2 วิธีดังต่อไปนี้

- **Shared path restoration** คือ วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration โดย spare fiber ที่วางให้กับ restoration path เส้นทางหนึ่งสามารถนำไปใช้เป็น spare fiber ให้กับ restoration path เส้นทางอื่นได้ ดังเช่นตัวอย่างในรูป 2.5 เมื่อเส้นทาง 1-4-5-6 ซึ่งเป็นเส้นทางที่เครือข่ายใช้เมื่อเครือข่ายทำงานปกติ (ในวิทยานิพนธ์นี้เรียกเส้นทางนี้ว่า active path ดังที่กล่าวมาแล้ว) ถูกรบกวนจากข่ายเชื่อมโยง 5-6 ขาด เครือข่ายจะเปลี่ยนมาใช้เส้นทาง 1-4-3-6 แทน และถ้าข่ายเชื่อมโยง 2-3 ขาด เส้นทาง 1-2-3 จะเปลี่ยนมาใช้เส้นทาง 1-4-3 แทน ซึ่งจากรูป 2.5 restoration path ทั้ง 2 เส้นทางวิ่งผ่านข่ายเชื่อมโยง 1-4 และ 4-3 เหมือนกัน ดังนั้น spare fiber ที่วางให้กับ restoration path 1-4-3-6 ที่ข่ายเชื่อมโยง 1-4 และ 4-3 สามารถนำไปใช้เป็น spare fiber ให้กับ restoration path 1-4-3 ได้
- **Dedicated path restoration** คือ วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration โดย spare fiber ที่วางให้กับ restoration path เส้นทางหนึ่งไม่สามารถเป็น spare fiber ให้กับ restoration path เส้นทางอื่นได้ ดังนั้น จากตัวอย่างในรูป 2.5 spare fiber ที่วางให้กับ restoration path 1-4-3-6 ที่ข่ายเชื่อมโยง 1-4 และ 4-3 ไม่

สามารถเป็น spare fiber ให้กับ restoration path 1-4-3 ได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องวางเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มอีกสองเส้นที่ข่ายเชื่อมโยง 1-4 และ 4-3 ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ต้นทุนของเครือข่ายที่ใช้วิธีการนี้สูงกว่าต้นทุนของวิธี shared path restoration



รูปที่ 2.4 การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ Path restoration และ Link restoration



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างอธิบาย Shared path restoration และ Dedicated path restoration

2. Link Restoration (LR) หมายถึง การจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงจะจัดสรรเส้นทางที่เป็น restoration path ระหว่างจุดทั้งสองของข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายดังรูป 2.4 เมื่อพิจารณาจากแผนภูมิที่ 2.3 วิธีนี้ยังสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้ช่องสัญญาณของ spare fiber ได้เป็น 2 วิธีดังนี้

- Shared link restoration คือ การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ link restoration โดยที่ spare fiber ที่วางให้กับ restoration path เส้นทางหนึ่งสามารถใช้เป็น spare fiber ให้กับ restoration path เส้นทางอื่นได้ ซึ่งวิธีการนี้จะมีการใช้งาน spare fiber เหมือนกับวิธี shared path restoration
- Dedicated path restoration คือ การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ link restoration โดยที่ spare fiber ที่วางให้กับ restoration path เส้นทางหนึ่งไม่สามารถเป็น spare fiber ให้กับ restoration path เส้นทางอื่นได้ ซึ่งวิธีการนี้จะมีการใช้งาน spare fiber เหมือนกับวิธี dedicated path restoration

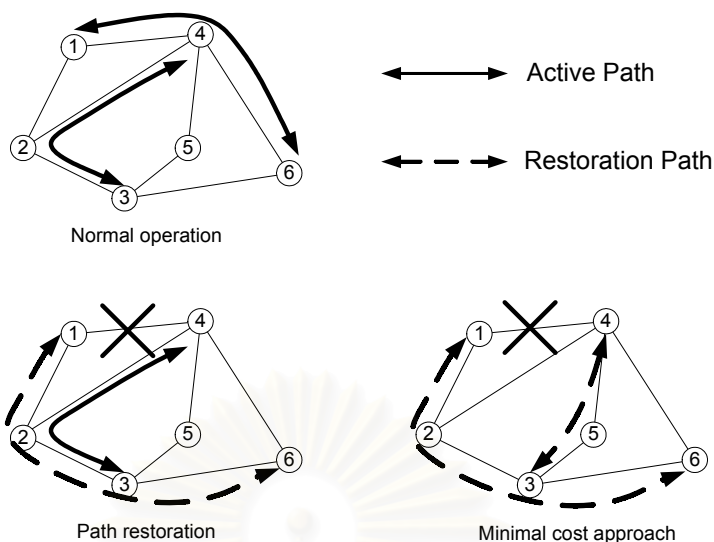
จากวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ได้กล่าวมา สามารถสรุปข้อดีของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ link restoration ได้ คือ การจัดการของเครือข่าย (network management) เมื่อมีข่ายเชื่อมโยงหนึ่งได้รับความเสียหายจะมีลักษณะการจัดการที่เรียกว่า เป็นการจัดการแบบท้องถิ่น (local management) กล่าวคือ ไม่จำเป็นที่จะต้องส่งสัญญาณหรือข่าวสาร (message) ไปแจ้งให้กับต้นทางและปลายทางของเส้นทางที่ถูกกระทบจนทราบเพื่อเปลี่ยนไปใช้อีกเส้นทางหนึ่งเหมือนกับวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ path restoration ดังนั้น ความเร็วในการเปลี่ยนเส้นทางของวิธี link restoration จึงเร็วกว่าวิธี path restoration และส่งผลให้ปริมาณข้อมูลที่สูญหายไประหว่างการเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ของวิธี link restoration น้อยกว่าวิธี path restoration แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความยืดหยุ่น (flexibility) ในการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความเสียหายของวิธี path restoration มีมากกว่าวิธี link restoration โดยทั่วไปจึงเป็นผลให้เครือข่ายที่ใช้การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี path restoration ต้องการทรัพยากรน้อยกว่าวิธี link restoration สำหรับความแตกต่างของทรัพยากรที่ต้องจัดสรรให้กับเครือข่ายของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งสองวิธีจะได้ทำการศึกษาในบทต่อไป โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาเฉพาะ shared restoration เท่านั้นทั้งนี้เนื่องจากในกรณี shared restoration ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงไม่ถึง 100 % หรือสองเท่าของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้งานเมื่อเครือข่ายทำงานปกติเหมือนกับกรณีของ dedicated restoration ซึ่งในบางเครือข่ายวิธี dedicated restoration อาจต้องการต้นทุนมากกว่าสองเท่าของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้งานเมื่อเครือข่ายทำงานปกติ

สำหรับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration [21] สามารถแบ่งได้ 3 วิธีดังนี้

1. วิธีต้นทุนต่ำสุด (Minimal Cost Approach, MC)

โดยปกติวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ง่ายที่สุดสำหรับการแก้ไขปัญหาเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายได้รับความเสียหาย คือ การจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางที่ถูกครอบงวนหรือผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย ในขณะที่เส้นทางที่ไม่ถูกรอบกวนจากข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายจะไม่มีการจัดสรรเส้นทางให้ใหม่ แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าเครือข่ายใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบต้นทุนต่ำสุดในการแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย เครือข่ายจะอนุญาตให้เส้นทางทั้งหมดภายในเครือข่ายสามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ได้ เมื่อเกิดเหตุการณ์หนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย โดยเครือข่ายที่ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบนี้จะไม่มีพิจารณาว่าเส้นทางนั้นจะเป็นเส้นทางที่ถูกครอบงวนจากข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายหรือไม่ ซึ่งจากแนวความคิดนี้น่าจะส่งผลให้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายน้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบอื่นๆ

เพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบต้นทุนต่ำสุด (MC) กับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเครือข่ายแบบทั่วไปให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น จึงขอยกตัวอย่าง ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 จากรูปเมื่อเครือข่ายทำงานปกติ (normal operation) เครือข่ายจะใช้เส้นทาง 1-4-6 และ 3-2-4 ในการเชื่อมต่อระหว่างโหนดที่ 1 และ 6, 3 และ 4 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อระหว่างโหนดที่ 1 และ 4 ขาด ในกรณีวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบทั่วไป เส้นทาง 1-4-6 เท่านั้นที่สามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ได้ เพราะเป็นเส้นทางที่ถูกครอบงวนจากข่ายเชื่อมโยงที่ขาด จากรูปจึงเปลี่ยนมาใช้เส้นทาง 1-2-3-6 แทน แต่ในทางตรงกันข้าม วิธี MC อนุญาตให้ทั้งสองเส้นทางสามารถไปใช้เส้นทางใหม่ได้ กล่าวคือ จากรูปจะเปลี่ยนไปใช้เส้นทาง 1-2-3-6 และ 3-5-4 แทน ซึ่งเมื่อพิจารณาจะเห็นว่า ไม่จำเป็นที่จะต้องเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงให้กับเครือข่ายอีกเมื่อใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC แต่ในทางตรงกันข้ามกลับจำเป็นต้องเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงที่ข่ายเชื่อมโยง 2-3 ในกรณีของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบทั่วไป ดังนั้นจากรูปจึงสามารถสรุปข้อดีของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC ได้ คือต้องการต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับเครือข่ายเพื่อจะสร้างเครือข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้ต่ำกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC จะมีข้อเสียคือ เนื่องจากเครือข่ายสามารถเปลี่ยนแปลงเส้นทางได้ทั้งหมดเมื่อมีเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงขาด การจัดการและควบคุมเครือข่ายของวิธี MC จึงมีความซับซ้อนมากกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบอื่นและยังทำให้ขนาดของฐานข้อมูลที่ต้องเก็บไว้เพื่อใช้ในการกำหนดเส้นทางเมื่อมีหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบอื่น



รูปที่ 2.6 ความแตกต่างระหว่างวิธี MC กับวิธี Path Restoration แบบทั่วๆ ไป

2. วิธีไม่ซ้ำเส้นทางเดิม (Disjoint Path Approach, DJP)

หลักเกณฑ์ของวิธีนี้ [21] สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ซ้ำเชื่อมโยงหนึ่งในเครือข่ายได้รับความเสียหาย เส้นทางที่ต้องเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ คือ เส้นทางที่วิ่งผ่านซ้ำเชื่อมโยงที่ขาด โดยที่เส้นทางที่เปลี่ยนไปนั้นจะต้องไม่ซ้อนทับกับเส้นทางเดิม (disjoint path) ซึ่งเป็นเส้นทางที่เครือข่ายใช้เมื่อเครือข่ายทำงานปกติ (active path) เช่น รูปที่ 2.6 เส้นทาง 1-2-3-6 เป็นเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกับเส้นทาง 1-4-6 ซึ่งจากรูปสังเกตได้ว่า เส้นทางที่จัดสรรให้ใหม่นี้สามารถใช้หลบหลีกเลี่ยงซ้ำเชื่อมโยงที่ขาดได้ไม่ว่าตำแหน่งที่ซ้ำเชื่อมโยงขาดจะเกิดขึ้นบนส่วนใดของเส้นทางที่ใช้งานตามปกติ ดังนั้น สำหรับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP แต่ละเส้นทางที่ใช้ในกรณีเครือข่ายทำงานปกติมีเพียงหนึ่งเส้นทางที่ใช้สำหรับหลบหลีกเลี่ยงซ้ำเชื่อมโยงที่เสียหายก็จะเพียงพอสำหรับใช้หลบหลีกเลี่ยงได้ทุกๆ เหตุการณ์ที่มีหนึ่งซ้ำเชื่อมโยงเสียหาย

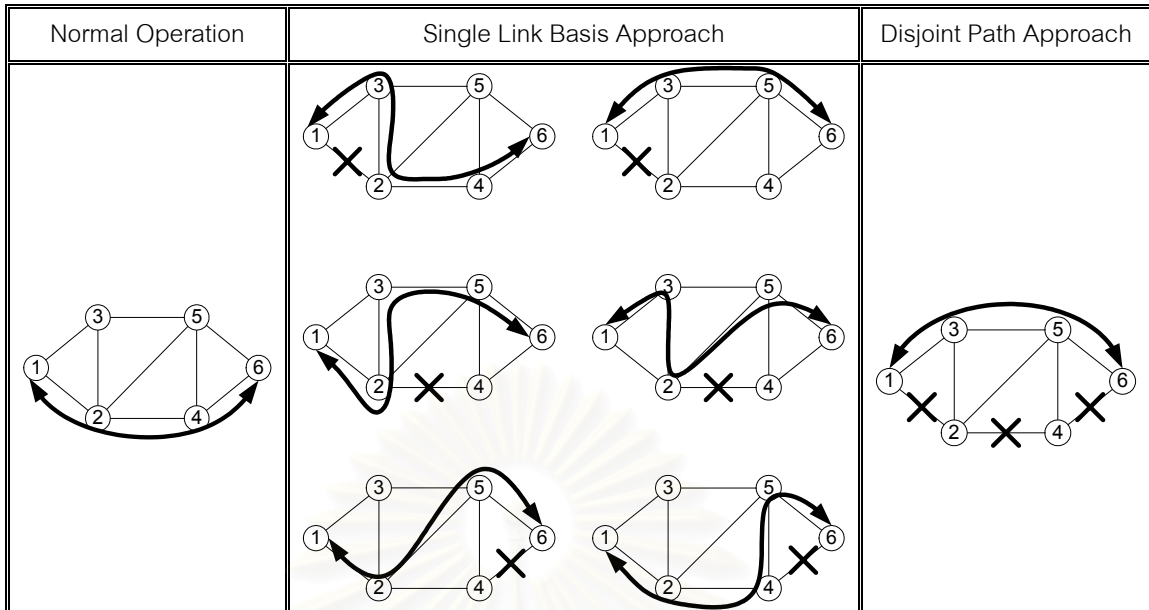
เส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกับเส้นทางที่ใช้งานในสภาวะปกติ สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท ประเภทแรก คือ เส้นทางที่ไม่ซ้อนทับทั้งซ้ำเชื่อมโยงและโหนด (node disjoint path) ส่วนประเภทที่สอง คือ เส้นทางที่ไม่ซ้อนทับเฉพาะซ้ำเชื่อมโยง (link disjoint path) ซึ่งจากทั้งสองประเภทสังเกตได้ว่า เส้นทางแบบแรกมีข้อจำกัดในการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางที่ผ่านซ้ำเชื่อมโยงที่ขาดมากกว่าแบบที่สอง แต่ถ้าพิจารณาเส้นทางแบบแรกอย่างละเอียดแล้ว จะเห็นว่าเส้นทางแบบแรกสามารถแก้ไขปัญหาเครือข่ายจากการที่โหนดของเครือข่ายเสียหายได้นอกเหนือจากการแก้ไขปัญหาของเครือข่ายเนื่องจากซ้ำเชื่อมโยงขาด แต่เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะการเสียหายของหนึ่งซ้ำเชื่อมโยง รวมทั้งเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับเฉพาะซ้ำเชื่อมโยงมีความยืดหยุ่นมากกว่า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกันเฉพาะซ้ำเชื่อมโยง

จากหลักการของวิธี DJP ที่กล่าวไว้ข้างต้น เราสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของวิธีนี้ได้คือ เนื่องจากเฉพาะเส้นทางที่มีผลกระทบโดยตรงจากข่ายเชื่อมโยงเท่านั้น จึงจะสามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่ได้ ดังนั้น ความซับซ้อนในการควบคุมและจัดการเครือข่ายของวิธีการนี้จึงน้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC และเมื่อเครือข่ายที่ใช้วิธีจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP สามารถตรวจพบว่ามีข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในเครือข่ายขาด เส้นทางที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ขาดสามารถเปลี่ยนไปใช้อีกเส้นทางหนึ่งได้ทันที โดยไม่จำเป็นต้องรู้ถึงตำแหน่งที่แน่นอนของข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากวิธีการนี้มีความยืดหยุ่นในการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเครือข่ายน้อยกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วทรัพยากรที่ต้องจัดสรรให้กับวิธี DJP จึงมากกว่าวิธี MC

3. วิธีบนพื้นฐานของข่ายเชื่อมโยงเดียว (Single Link Basis Approach, SLB)

วิธีการนี้ [21] มีความคล้ายคลึงกับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP คือ เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายเสียหาย เครือข่ายจะจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเท่านั้น โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางอื่นที่ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย แต่ข้อแตกต่างระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB กับ DJP คือ เส้นทางที่จัดสรรให้ใหม่นั้นไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกับเส้นทางที่ใช้อยู่เมื่อเครือข่ายมีการทำงานปกติ เหมือนกับวิธี DJP รวมทั้งเส้นทางที่จัดสรรให้ใหม่นี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของข่ายเชื่อมโยงที่ขาดได้ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7

จากรูปที่ 2.7 ในการทำงานปกติเครือข่ายจะใช้เส้นทาง 1-2-4-6 เพื่อเชื่อมต่อระหว่างโหนดที่ 1 และ 6 เมื่อใช้วิธี DJP ในการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย เครือข่ายจะเลือกใช้ได้เพียงเส้นทางเดียวเพื่อเป็น restoration path ของเส้นทาง 1-2-4-6 คือ ใช้เส้นทาง 1-3-5-6 เพราะจากหลักการของวิธี DJP เส้นทางที่จัดสรรให้ใหม่จะต้องไม่ซ้อนทับกับเส้นทางเดิม (สังเกตได้ว่าเส้นทางนี้สามารถใช้ได้ในทุกกรณีไม่ว่าตำแหน่งข่ายเชื่อมโยงที่ขาดจะเกิดที่ส่วนใดของเส้นทางเดิมก็ตาม) ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาวิธี SLB จะมีเส้นทางที่สามารถหลบหลีกข่ายเชื่อมโยงที่ขาดได้หลายเส้นทาง โดยจะเลือกใช้เส้นทางใดนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งข่ายเชื่อมโยงที่ขาด และนอกจากนี้ในแต่ละเหตุการณ์ที่ข่ายเชื่อมโยงขาดจะมีมากกว่าสองเส้นทางที่สามารถเลือกใช้เป็นเส้นทางใหม่ได้ เช่น ถ้าข่ายเชื่อมโยง 1-2 ขาด เราสามารถเลือกใช้เส้นทาง 1-3-2-4-6 หรือ 1-3-5-6 เป็น restoration path ของเส้นทาง 1-2-4-6 ได้ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วข้อดีของวิธีนี้เมื่อเทียบกับวิธี DJP คือ ต้นทุนที่จะต้องจัดสรรให้กับวิธี SLB น้อยกว่าวิธี DJP อันเนื่องมาจากวิธี SLB มีความยืดหยุ่นในการจัดสรรเส้นทางสูงกว่าวิธี DJP



รูปที่ 2.7 ความแตกต่างระหว่างวิธี SLB กับ DJP

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration ทั้งสามวิธี และแบบ link restoration ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยทั่วไปสามารถเรียงลำดับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ต้องการต้นทุนต่ำสุดไปยังวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ต้องการต้นทุนสูงสุดได้ดังนี้ วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC ต้องการต้นทุนต่ำสุด ตามด้วยวิธี SLB และวิธี DJP ส่วนวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR น่าจะเป็นวิธีที่ต้องการต้นทุนสูงสุด สำหรับความแตกต่างของต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้กับเครือข่ายตามแต่ละวิธีจะได้ทดลองในบทต่อไป จากหลักการของการจัดสรรเส้นทางใหม่แต่ละวิธี เส้นทางที่สามารถใช้ในการจัดสรรของแต่ละวิธีอาจจะมีมากกว่าหนึ่งเส้นทาง การเลือกเส้นทางที่แตกต่างกันจะทำให้มีต้นทุนที่แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงทำให้ต้องมีการเลือกเส้นทางที่สามารถใช้ทรัพยากรได้คุ้มค่าที่สุด ซึ่งเป็นปัญหา Optimization เช่นเดียวกับการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นเพื่อรองรับทราฟฟิกของเครือข่ายในสภาวะปกติ แต่ในกรณีของปัญหาการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อให้เครือข่ายสามารถป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงจะมีความซับซ้อนมากกว่าเนื่องจากจะต้องพิจารณาการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงที่เป็นไปได้ในทุกกรณี

งานวิจัยส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางใหม่และความยาวคลื่นเพื่อป้องกันการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ได้แก่ [7] ได้เสนอการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อป้องกันการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงที่ใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุด โดยใช้เทคนิค ILP และ SA ในการหาผลเฉลย บทความ [21] ได้เสนอฮิวริสติกอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางที่ใช้ป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงพร้อมกับจัดสรรความยาวคลื่นที่ใช้จำนวนความยาวคลื่นน้อยที่สุด โดยการใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration บทความ [22] ได้เสนอการจัดสรรเส้นทางและ

ความยาวคลื่นที่ให้ความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุดซึ่งได้พิจารณาถึงการป้องกันการเสียหายของหนึ่งขั้วเชื่อมโยงเอาไว้ด้วย คือในการจัดสรรเส้นทางจะเลือกคู่ของเส้นทางที่เป็นเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกัน (link disjoint) ให้กับคู่โหนด โดยการนำอัลกอริทึม GA มาประยุกต์ใช้ในการหาผลเฉลย บทความ [23] ได้เสนอวิธีการจัดสรรเส้นทางเพื่อให้ logical topology ยังคงสามารถเชื่อมต่อกันได้เมื่อเกิดการเสียหายของหนึ่งขั้วเชื่อมโยง โดยใช้หลักการของเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกันและได้นำอัลกอริทึม tabu search มาประยุกต์ใช้ในการหาผลเฉลย บทความ [24] ได้เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางให้กับ light path เพื่อให้ logical topology สามารถป้องกันการเสียหายของหนึ่งขั้วเชื่อมโยงที่ใช้จำนวนความยาวคลื่นรวมน้อยที่สุด โดยมีข้อจำกัดในการจัดสรรเส้นทางคือจะต้องเป็นเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกัน จากบทความ [23-24] ได้นำหลักการของการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ logical topology เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางที่ซ้อนทับกันให้กับแต่ละ lightpath ในบางกรณีการเสียหายของหนึ่งขั้วเชื่อมโยงอาจจะทำให้ logical topology แยกออกจากกันได้

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่างานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาและพัฒนาอัลกอริทึมในการออกแบบโทโปโลยีของเครือข่าย WDM จะพิจารณาแต่เพียงการออกแบบโทโปโลยีซึ่งมีรูปแบบที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้หรือเป็นโทโปโลยีที่ยังคงสามารถเชื่อมต่อกันเมื่อมีการเสียหายของหนึ่งขั้วเชื่อมโยง โดยไม่ได้พิจารณาถึงการจัดสรรเส้นทางใหม่ในแต่ละกรณีที่มีการเสียหายของหนึ่งขั้วเชื่อมโยงเกิดขึ้น เส้นใยแก้วนำแสงที่ได้ติดตั้งจึงอาจจะมีช่องสัญญาณไม่เพียงพอในการรองรับการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับทราฟฟิกที่ถูกกระทบจากการเสียหายของขั้วเชื่อมโยง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้ศึกษาการออกแบบโทโปโลยี การจัดสรรเส้นทางและการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อมีการเสียหายของหนึ่งขั้วเชื่อมโยงไปพร้อมกัน เพื่อให้ได้เครือข่ายที่สามารถรองรับการทำงานได้ทั้งในสภาวะการทำงานปกติหรือสภาวะที่มีการเสียหายของหนึ่งขั้วเชื่อมโยง โดยที่มีต้นทุนต่ำที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แบบจำลองคณิตศาสตร์

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาการออกแบบโทโปโลยีและการจัดสรรทรัพยากรเพื่อให้ได้เครือข่ายที่สามารถป้องกันการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยใช้การจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลบหลีกข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย ในการจัดสรรทรัพยากรจะเป็นการจัดสรรเส้นทางเพื่อรองรับทราฟฟิกทั้งในกรณีที่เครือข่ายทำงานปกติและมีการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ซึ่งในการหาผลเฉลยสามารถทำได้หลายวิธี สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงการใชแบบจำลองคณิตศาสตร์ในการหาผลเฉลยโดยก่อนที่จะกล่าวถึงแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใชจำลองปัญหา ในส่วนแรกจะอธิบายถึงแบบจำลองต้นทุนของเครือข่ายและคำจำกัดความที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ หลังจากนั้นในส่วนต่อไปจึงจะกล่าวถึงแบบจำลองคณิตศาสตร์ และในส่วนสุดท้ายจะเป็นการแสดงผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์รวมทั้งการวิเคราะห์

3.1 แบบจำลองและต้นทุนของเครือข่าย WDM

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองและต้นทุนของเครือข่าย รวมทั้งข้อตกลงที่ใชในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้เครือข่ายถูกแทนด้วยกราฟ $G(N, L)$ ซึ่งประกอบด้วยเซตของโหนด (N) และเซตของข่ายเชื่อมโยง (L) ทั้งนี้ข่ายเชื่อมโยงจะเป็นแบบ bidirectional link และทราฟฟิกระหว่างแต่ละโหนดจะเท่ากันทั้ง 2 ทิศทาง ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงประกอบด้วยกลุ่มของเส้นใยแก้วนำแสงจำนวนหนึ่ง จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้นจะมีจำนวนจำกัดเท่ากับ M สำหรับปริมาณทราฟฟิกระหว่างโหนดจะถูกกำหนดให้เป็นจำนวนเท่าของช่องสัญญาณทางแสงหรือจำนวนความยาวคลื่น

เส้นใยแก้วนำแสงแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

1. working fiber คือเส้นใยแก้วนำแสงที่ใชรองรับทราฟฟิกของเส้นทางที่เป็น active path ซึ่งเป็นเส้นทางที่ใชระหว่างโหนดในสถานะที่เครือข่ายมีการทำงานปกติ
2. spare fiber คือเส้นใยแก้วนำแสงที่ต้องวางเพิ่มให้กับเครือข่ายเพื่อให้สามารถเปลี่ยนไปใช้เส้นทางที่เป็น protection path เพื่อหลบหลีกข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายได้ ซึ่งช่องสัญญาณในส่วนนี้จะมีการใช้งานเมื่อมีข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเสียหาย

ในวิทยานิพนธ์นี้ต้นทุนของเครือข่ายประกอบไปด้วยต้นทุนของสายเชื่อมใยและเส้นใยแก้วนำแสง (เส้นใยแก้วนำแสงรวมทั้ง working fiber และ spare fiber) สำหรับต้นทุนในการวางสายเชื่อมใยแต่ละสายเชื่อมใยเป็นต้นทุนในการเตรียมสายเชื่อมใยก่อนที่จะสามารถวางเส้นใยแก้วนำแสง เช่น ต้นทุนในการขุด, ในการเช่า หรือในการดูแลรักษา ซึ่งกำหนดให้ต้นทุนของสายเชื่อมใยระหว่างโหนด i และ j เป็น $\alpha_{i,j}$ ส่วนต้นทุนในการวางเส้นใยแก้วนำแสง เช่น อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสง (optical amplifiers), multiplexer/demultiplexer, ค่าต้นทุนในการใช้ช่องสัญญาณ รวมทั้งต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง ต้นทุนในการวางเส้นใยแก้วนำแสงระหว่างโหนดที่ i และ j กำหนดให้เป็น $\beta_{i,j}$ ซึ่งต้นทุนในการวางเส้นใยแก้วนำแสงระหว่างโหนดที่ i และ j จะเท่ากับ (จำนวน working fiber + จำนวน spare fiber) $\times \beta_{i,j}$

ปัญหาที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการออกแบบก่อนที่จะมีการใช้งานเครือข่าย ข้อมูลของเครือข่ายที่ถูกพิจารณาประกอบไปด้วย โหนดและสายเชื่อมใยระหว่างโหนด, จำนวนความยาวคลื่น, ค่าต้นทุนของสายเชื่อมใยและเส้นใยแก้วนำแสง และกราฟฟิกของเครือข่าย

3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดการเสียหายของหนึ่งสายเชื่อมใย

ในส่วนนี้จะเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งสายเชื่อมใยเสียหายตามแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ โดยวิธีที่ศึกษาในบทนี้มีด้วยกัน 4 วิธีได้แก่ MC, SLB, DJP และ LR ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4 แบบจำลองประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ constraint ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในที่นี้เป็นค่าต้นทุนของเครือข่ายซึ่งประกอบด้วยต้นทุนของสายเชื่อมใยและเส้นใยแก้วนำแสงดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.1 สำหรับ constraint จะแบ่งเป็นเงื่อนไขสำหรับการจัดสรรทรัพยากรของเครือข่ายในส่วนต่างๆ ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์จะเป็นการหาผลเฉลยที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำที่สุด (Minimization) โดยที่ตัวแปรทั้งหมดในแบบจำลองเป็นจำนวนเต็ม ดังนั้นจึงได้นำเทคนิคของ ILP มาใช้ในการหาผลเฉลย ในส่วนต่อไปจะอธิบายความหมายของตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ จากนั้นจึงจะอธิบายถึงแบบจำลองคณิตศาสตร์ในส่วนถัดไป

3.2.1 ความหมายของตัวแปรในแบบจำลอง

n	จำนวนโหนด
N	เซตของโหนด
M	จำนวนค่าความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพล็กซ์บนเส้นใยแก้วนำแสง
A	เซตของคู่โหนด

N_a	จำนวนคูโนด
L	เซตของข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาทั้งหมด
ML	จำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดที่เป็นไปได้
d_a	ทราฟฟิกระหว่างคูโนดที่ a
$MF_{i,j}$	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากที่สุดที่สามารถวางได้บนแต่ละข่ายเชื่อมโยง
$\alpha_{i,j}$	ต้นทุนในการวางข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนดที่ i และ j
$\beta_{i,j}$	ต้นทุนในการวางเส้นใยแก้วนำแสงระหว่างโนดที่ i และ j
$x_{i,j}$	มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีการวางข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนดที่ i และ j มิฉะนั้นเท่ากับ 0
$w_{i,j}$	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง (working fiber) ระหว่างโนดที่ i และ j ที่ใช้รองรับ ทราฟฟิกของ active path
$s_{i,j}$	จำนวนเส้นใยแก้วนำแสง (spare fiber) ระหว่างโนดที่ i และ j ที่ใช้รองรับทราฟ ฟิกของ protection path
P_a	จำนวนเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ระหว่างคูโนดที่ a
$p_{a,b}$	ทราฟฟิกบนเส้นทาง active path ที่ b ของคูโนดที่ a
$\delta_{a,b,i,j}$	มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเส้นทาง active path ที่ b ระหว่างคูโนดที่ a ผ่านข่ายเชื่อมโยง ระหว่างโนดที่ i และ j มิฉะนั้นเท่ากับ 0
$R_{a,k,l}$	จำนวนเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ระหว่างคูโนดที่ a ในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยง ระหว่างโนด k และ l เสียหาย (วิธี MC, SLB)
$r_{a,b,k,l}$	ปริมาณทราฟฟิกบนเส้นทางที่ b ของคูโนดที่ a ในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงระหว่างโน ด k และ l เสียหาย
$\delta_{a,b,k,l,i,j}$	มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเส้นทางที่ b ของคูโนดที่ a ในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด k และ l เสียหาย ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนดที่ i และ j มิฉะนั้นเท่ากับ 0
$R_{a,b}$	จำนวนเส้นทางทั้งหมดที่ไม่ซ้อนทับกัน (disjoint) กับเส้นทาง active path ที่ b ของคูโนดที่ a (วิธี DJP)
$r_{a,b,c}$	ปริมาณทราฟฟิกบนเส้นทางที่ c ซึ่งเป็นเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกันกับเส้นทาง active path ที่ b ของคูโนดที่ a
$\delta_{a,b,c,i,j}$	มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเส้นทางที่ c ซึ่งไม่ซ้อนทับกับเส้นทาง active path ที่ b ของคู โนดที่ a ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนดที่ i และ j มิฉะนั้นเท่ากับ 0
$R_{k,l}$	จำนวนเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ระหว่างโนดที่ k และ l ซึ่งไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยง ระหว่างโนดที่ k และ l (วิธี LR)

$r_{b,k,l}$	ปริมาณกราฟฟิกบนเส้นทางที่ b ระหว่างโหนดที่ k และ l ซึ่งไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนดที่ k และ l
$\delta_{b,k,l,i,j}$	มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเส้นทางที่ b ระหว่างโหนดที่ k และ l ซึ่งไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนดที่ k และ l ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j มิฉะนั้นเท่ากับ 0
$p_{a,b,\lambda}$	กราฟฟิกบนเส้นทาง active path ที่ b ของโหนดที่ a ซึ่งใช้ความยาวคลื่นที่ λ
$r_{a,b,k,l,\lambda}$	กราฟฟิกบนเส้นทางที่ b ของโหนดที่ a ในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนดที่ k และ l เสียหาย ซึ่งใช้ความยาวคลื่นที่ λ
$r_{a,b,c,\lambda}$	กราฟฟิกบนเส้นทางที่ c ซึ่งเป็นเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกันกับเส้นทาง active path ที่ b ของโหนดที่ a ที่ใช้ความยาวคลื่น λ
$r_{b,k,l,\lambda}$	กราฟฟิกบนเส้นทางที่ b ระหว่างโหนดที่ k และ l ที่ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนดที่ k และ l ซึ่งใช้ความยาวคลื่น λ

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) สมการที่ (3.1) แสดงค่าต้นทุนของเครือข่ายดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น โดยมีวัตถุประสงค์ในการหาเครือข่ายที่มีต้นทุนต่ำที่สุด

$$\text{Minimize: } \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \alpha_{i,j} x_{ij} + \beta_{i,j} w_{i,j} + \beta_{i,j} s_{i,j} \quad (3.1)$$

ในหัวข้อถัดไปจะแสดง constraint ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโทโปโลยี การจัดสรรเส้นทางและการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี MC, SLB, DJP และ LR รวมทั้งการจัดสรรความยาวคลื่นในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น ดังต่อไปนี้

3.2.2 สมการแสดง constraint ในการวางข่ายเชื่อมโยงและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง

$$n \leq \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n x_{i,j} \leq ML \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,j} \geq 2 \quad 1 \leq j \leq n \quad (3.3)$$

$$MF_{i,j} w_{i,j} \geq s_{i,j} \quad 1 \leq i \leq n-1, \quad i+1 \leq j \leq n \quad (3.4)$$

$$MF_{i,j} x_{i,j} \geq w_{i,j} + s_{i,j} \quad 1 \leq i \leq n-1, \quad i+1 \leq j \leq n \quad (3.5)$$

สมการที่ (3.2) - (3.5) เป็นเงื่อนไขในการออกแบบโทโปโลยีและการวางเส้นใยแก้วนำแสง สมการที่ (3.2) แสดงจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่วางต้องมากกว่าจำนวนโหนด n และต้องน้อยกว่าจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่มากที่สุด เพราะเครือข่ายที่มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่น้อยที่สุดที่สามารถป้องกันการใช้สายได้คือเครือข่ายแบบวงแหวนซึ่งมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงเท่ากับจำนวนโหนด จำนวน

ข่ายเชื่อมโยงที่มากที่สุดโดยทั่วไปจะเท่ากับ $\frac{n}{2}(n-1)$ สมการที่ (3.3) เป็นการกำหนดให้จำนวน ข่ายเชื่อมโยงที่ต่ออยู่กับโหนดใดๆ ต้องมากกว่า 2 เพื่อให้สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ในกรณีที่มีการ เสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้ สมการที่ (3.4) เป็นการกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมคือควรมีการวาง working fiber ก่อนที่จะวาง spare fiber บนข่ายเชื่อมโยง สมการที่ (3.5) แสดงเงื่อนไขว่าจะ สามารถวางเส้นใยแก้วนำแสงระหว่างโหนดได้ก็ต่อเมื่อต้องมีการวางข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด นั้นก่อน และจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่วางได้ต้องไม่เกินค่ามากที่สุด

3.2.3 สมการแสดง constraint ในการจัดสรรเส้นทาง เมื่อเครือข่ายสามารถแปลงผัน ความยาวคลื่น (VWP)

$$\sum_{b=1}^{P_a} p_{a,b} = d_a \quad 1 \leq a \leq N_a \quad (3.6)$$

$$Mw_{i,j} \geq \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} p_{a,b} \delta_{a,b,i,j} \quad 1 \leq i \leq n-1, i+1 \leq j \leq n \quad (3.7)$$

สมการที่ (3.6) แสดงถึงผลรวมของทราฟฟิกบนทุกเส้นทางระหว่างโหนดที่ a ใดๆ จะต้อง เท่ากับทราฟฟิกของโหนดนั้น สมการที่ (3.7) แสดงจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดบนข่ายเชื่อมโยง ระหว่างโหนด i และ j ต้องมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณทราฟฟิกของเส้นทางทั้งหมดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยง นั้น

3.2.4 สมการแสดง constraint ในการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อป้องกันการเสียหายของหนึ่ง ข่ายเชื่อมโยง เมื่อเครือข่ายสามารถแปลงผันความยาวคลื่นได้ (VWP)

3.2.4.1 การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC

$$\sum_{b=1}^{R_{a,k,l}} r_{a,b,k,l} = d_a x_{k,l} \quad 1 \leq a \leq N_a, 1 \leq k \leq n-1, k+1 \leq l \leq n \quad (3.8)$$

$$Mw_{i,j} \geq \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{R_{a,k,l}} r_{a,b,k,l} \delta_{a,b,k,l,i,j} \quad 1 \leq i \leq n-1, i+1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq n-1, k+1 \leq l \leq n, i \neq k, j \neq l \quad (3.9)$$

สมการที่ (3.8) แสดงถึงผลรวมทราฟฟิกบนเส้นทาง protection path ระหว่างโหนดที่ a เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหายเท่ากับทราฟฟิกระหว่างโหนดนั้น สมการที่ (3.9) แสดงจำนวนช่องสัญญาณบนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j จะต้องเพียงพอในการรองรับ จำนวนช่องสัญญาณที่ต้องการใช้เพื่อจัดสรรเส้นทางให้กับทราฟฟิกของทุกๆ โหนดในกรณีที่ข่าย เชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหายทุกๆ กรณี เนื่องจากว่าในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบนี้จะ

จัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับทุกคู่โหนดในกรณีที่มีการเสียหายของสายเชื่อมโยงไม่ว่าเส้นทางนั้นถูกกระทบหรือไม่ ดังนั้นเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้พิจารณาเป็นชุดเดียวกันกับ working fiber

3.2.4.2 การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB

$$\sum_{b=1}^{R_{a,k,l}} r_{a,b,k,l} = \sum_{b=1}^{P_a} p_{a,b} \delta_{a,b,k,l} \quad 1 \leq a \leq N_a, \quad 1 \leq k \leq n-1, \quad k+1 \leq l \leq n \quad (3.10)$$

$$Ms_{i,j} \geq \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{R_{a,k,l}} r_{a,b,k,l} \delta_{a,b,k,l,i,j} - \left(\sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} p_{a,b} \delta_{a,b,k,l} \delta_{a,b,i,j} \right) - \left(Mw_{i,j} - \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} p_{a,b} \delta_{a,b,i,j} \right)$$

$$1 \leq i \leq n-1, \quad i+1 \leq j \leq n, \quad 1 \leq k \leq n-1, \quad k+1 \leq l \leq n, \quad i \neq k, j \neq l \quad (3.11)$$

สมการที่ (3.10) แสดงเงื่อนไขว่าผลรวมของปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการจัดเส้นทางใหม่บนเส้นทาง protection path ระหว่างคู่โหนดที่ a เมื่อสายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหายต้องเท่ากับผลรวมของทราฟฟิกบนเส้นทาง active path ของคู่โหนดนั้นที่ผ่านสายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l สมการที่ (3.11) เป็นเงื่อนไขแสดงจำนวนช่องสัญญาณของ spare fiber บนสายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j ต้องมากกว่าหรือเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณที่ต้องการใช้ในการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อสายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหายทุกๆ กรณี พจน์แรกเป็นผลรวมทราฟฟิกของ protection path เมื่อสายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหายซึ่งผ่านสายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j พจน์ที่สองคือช่องสัญญาณบนสายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j ที่ได้จากการปลดเส้นทาง active path ที่ผ่านสายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l พจน์สุดท้ายหมายถึงช่องสัญญาณที่เหลือจากการใช้งานของ active path บนสายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j

3.2.4.3 การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP

$$p_{a,b} = \sum_{c=1}^{R_{a,b}} r_{a,b,c} \quad 1 \leq a \leq N_a, \quad 1 \leq b \leq P_a \quad (3.12)$$

$$Ms_{i,j} \geq \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} \delta_{a,b,k,l} \left(\sum_{c=1}^{R_{a,b}} r_{a,b,c} \delta_{a,b,c,i,j} \right) - \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} p_{a,b} \delta_{a,b,i,j} \delta_{a,b,k,l} - \left(Mw_{i,j} - \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} p_{a,b} \delta_{a,b,i,j} \right)$$

$$1 \leq i \leq n-1, \quad i+1 \leq j \leq n, \quad 1 \leq k \leq n-1, \quad k+1 \leq l \leq n, \quad i \neq k, j \neq l \quad (3.13)$$

สมการที่ (3.12) แสดงผลรวมทราฟฟิกบนเส้นทาง protection path ทุกเส้นทางซึ่งเป็นเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกับเส้นทาง active path ที่ b ของคู่โหนด a จะต้องเท่ากับทราฟฟิกของเส้นทาง

นั้น สมการที่ (3.13) แสดงถึงจำนวนช่องสัญญาณบนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j ต้องมากกว่าจำนวนช่องสัญญาณที่ต้องการบนข่ายเชื่อมโยงในการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหาย พจน์แรกเป็นผลรวมกราฟฟิกของเส้นทาง protection path ซึ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j ที่ใช้ในการรองรับเส้นทาง active path ซึ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l พจน์ที่สองคือช่องสัญญาณบนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j ซึ่งได้จากการปลดเส้นทาง active path ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l พจน์ที่สามแสดงถึงช่องสัญญาณที่เหลือจาก active path บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j

3.4.2.4 การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR

$$\sum_{b=1}^{R_{k,l}} r_{b,k,l} = \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} P_{a,b} \delta_{a,b,k,l} \quad 1 \leq k \leq n-1, k+1 \leq l \leq n \quad (3.14)$$

$$Ms_{i,j} \geq \sum_{b=1}^{R_{k,l}} r_{b,k,l} \delta_{b,k,l,i,j} - \left(Mw_{i,j} - \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} P_{a,b} \delta_{a,b,i,j} \right) \\ 1 \leq i \leq n-1, i+1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq n-1, k+1 \leq l \leq n, i \neq k, j \neq l \quad (3.15)$$

สมการที่ (3.14) แสดงผลรวมกราฟฟิกบนเส้นทาง protection path ระหว่างโหนด k และ l เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหาย เท่ากับผลรวมกราฟฟิกของเส้นทาง active path ของทุกๆ คู่โหนดซึ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l สมการที่ (3.15) แสดงถึงจำนวนช่องสัญญาณบนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณที่ต้องการใช้ในการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหายในทุกๆ กรณี พจน์แรกจะเป็นปริมาณกราฟฟิกรวมของ protection path ระหว่างโหนด k และ l เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหายซึ่งผ่านโหนด i และ j พจน์ที่สองจะเป็นช่องสัญญาณที่เหลือจาก active path บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j

3.2.5 สมการแสดง constraint ในการจัดสรรเส้นทาง เมื่อเครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น (WP)

$$\sum_{\lambda=1}^M \sum_{b=1}^{P_a} P_{a,b,\lambda} = d_a \quad 1 \leq a \leq N_a \quad (3.16)$$

$$w_{i,j} \geq \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} P_{a,b,\lambda} \delta_{a,b,i,j} \quad 1 \leq i \leq n-1, i+1 \leq j \leq n, 1 \leq \lambda \leq M \quad (3.17)$$

สมการที่ (3.16) แสดงผลรวมกราฟฟิกบนเส้นทาง active path ระหว่างโหนดที่ a ในทุกๆ ความยาวคลื่นต้องเท่ากับกราฟฟิกระหว่างโหนด a สมการที่ (3.17) หมายถึงจำนวนช่องสัญญาณบนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j ที่ความยาวคลื่น λ ใดๆ ซึ่งจะเท่ากับจำนวนของเส้น

ใยแก้วนำแสงบนข่ายเชื่อมโยงนั้นต้องมากกว่าหรือเท่ากับผลรวมทราฟฟิกของเส้นทาง active path ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j ที่ความยาวคลื่น λ เดียวกัน

3.2.6 สมการแสดง constraint ในการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อป้องกันการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง เมื่อเครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น (WP)

3.2.6.1 การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC

$$\sum_{\lambda=1}^M \sum_{b=1}^{R_{a,k,l}} r_{a,b,k,l,\lambda} = d_a x_{k,l} \quad 1 \leq a \leq N_a, 1 \leq k \leq n-1, k+1 \leq l \leq n \quad (3.18)$$

$$w_{i,j} \geq \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{R_{a,k,l}} r_{a,b,k,l,\lambda} \delta_{a,b,k,l,i,j}$$

$$1 \leq i \leq n-1, i+1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq n-1, k+1 \leq l \leq n, i \neq k, j \neq l, 1 \leq \lambda \leq M \quad (3.19)$$

สมการที่ (3.18) เป็นเงื่อนไขแสดงผลรวมทราฟฟิกบนเส้นทาง protection path ทุกเส้นทางในทุกๆ ความยาวคลื่นของโหนด a เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหาย ต้องเท่ากับทราฟฟิกของโหนด a ในทุกๆ กรณี สมการที่ (3.19) แสดงถึงจำนวนช่องสัญญาณที่ความยาวคลื่น λ ใดๆ บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับผลรวมทราฟฟิกบนเส้นทาง protection path ของทุกๆ โหนดเมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหายซึ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j ที่ความยาวคลื่น λ เดียวกัน ในการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้เส้นใยแก้วนำแสงที่พิจารณาจะเป็น working fiber เพราะว่าการจัดสรรเส้นทางใหม่จะจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับทุกๆ โหนดเมื่อมีการเสียหายของข่ายเชื่อมโยง ดังนั้นจึงพิจารณาเส้นใยแก้วนำแสงที่ใช้เป็นชุดเดียวกัน

3.2.6.2 การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB

$$\sum_{\lambda=1}^M \sum_{b=1}^{R_{a,k,l}} r_{a,b,k,l,\lambda} = \sum_{\lambda=1}^M \sum_{b=1}^{P_a} p_{a,b,\lambda} \delta_{a,b,k,l} \quad (3.20)$$

$$s_{i,j} \geq \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{R_{a,k,l}} r_{a,b,k,l,\lambda} \delta_{a,b,k,l,i,j} - \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} p_{a,b,\lambda} \delta_{a,b,k,l} \delta_{a,b,i,j} - \left(w_{i,j} - \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{R_{a,k,l}} p_{a,b,\lambda} \delta_{a,b,i,j} \right)$$

$$1 \leq i \leq n-1, i+1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq n-1, k+1 \leq l \leq n, i \neq k, j \neq l, 1 \leq \lambda \leq M \quad (3.21)$$

สมการที่ (3.20) แสดงผลรวมทราฟฟิกทุกความยาวคลื่นของเส้นทาง protection path ของคูโนด a เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด k และ l เสียหายต้องเท่ากับผลรวมทราฟฟิกทุกความยาวคลื่นบนเส้นทาง active path ของคูโนด a ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด k และ l สมการที่ (3.21) แสดงถึงจำนวนช่องสัญญาณบนความยาวคลื่น λ ระหว่างโนด i และ j จะต้องเพียงพอในการรองรับจำนวนช่องสัญญาณที่ต้องการใช้ในการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อมีการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด k และ l ที่ความยาวคลื่น λ เดียวกันในทุกๆ กรณี พจน์แรกเป็นผลรวมทราฟฟิกที่ความยาวคลื่น λ ของ protection path ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด i และ j เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด k และ l เสียหาย พจน์ที่สองคือช่องสัญญาณที่ความยาวคลื่น λ บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด i และ j ที่ได้จากการปลดเส้นทาง active path ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด k และ l ที่ความยาวคลื่น λ เดียวกัน พจน์ที่สามแสดงถึงช่องสัญญาณที่ความยาวคลื่น λ บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด i และ j ที่เหลือจากการใช้งานของ active path

3.2.6.3 การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP

$$\sum_{\lambda=1}^M \sum_{c=1}^{R_{a,b}} r_{a,b,c,\lambda} = \sum_{\lambda=1}^M p_{a,b,\lambda} \quad 1 \leq a \leq N_a, 1 \leq b \leq P_a \quad (3.22)$$

$$s_{i,j} \geq \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} \delta_{a,b,k,l} \left(\sum_{c=1}^{R_{a,b}} r_{a,b,c,\lambda} \delta_{a,b,c,i,j} \right) - \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} p_{a,b,\lambda} \delta_{a,b,k,l} \delta_{a,b,i,j} - \left(w_{i,j} - \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} p_{a,b,\lambda} \delta_{a,b,i,j} \right)$$

$$1 \leq i \leq n-1, i+1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq n-1, k+1 \leq l \leq n, i \neq k, j \neq l, 1 \leq \lambda \leq M \quad (3.23)$$

สมการที่ (3.22) แสดงถึงผลรวมของทราฟฟิกทุกความยาวคลื่นบนเส้นทาง protection path ทุกเส้นทางซึ่งไม่ซ้อนทับกับเส้นทาง active path ที่ b ของคูโนด a ต้องเท่ากับทราฟฟิกทุกความยาวคลื่นบนเส้นทาง active path นั้น สมการที่ (3.23) หมายถึงจำนวนช่องสัญญาณที่ความยาวคลื่น λ บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด i และ j จะต้องเพียงพอในการรองรับจำนวนช่องสัญญาณที่ต้องการใช้เพื่อจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด k และ l เสียหายที่ความยาวคลื่น λ เดียวกัน พจน์แรกแสดงผลรวมทราฟฟิกที่ความยาวคลื่น λ ของเส้นทางที่เป็น protection path ของเส้นทาง active path ซึ่งผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด k และ l พจน์ที่สองแสดงถึงช่องสัญญาณที่ความยาวคลื่น λ บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด i และ j ซึ่งได้จากการปลดช่องสัญญาณที่ความยาวคลื่น λ เดียวกันบนเส้นทาง active path ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนดที่ k และ l พจน์ที่สามแสดงถึงช่องสัญญาณที่ความยาวคลื่น λ บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนด i และ j ที่เหลือจากการใช้งานของเส้นทาง active path

3.2.6.4 การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR

$$\sum_{b=1}^{R_{k,l}} r_{b,k,l,\lambda} = \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} P_{a,b,\lambda} \delta_{a,b,k,l}$$

$$1 \leq k \leq n-1, k+1 \leq l \leq n, 1 \leq \lambda \leq M \quad (3.24)$$

$$s_{i,j} \geq \sum_{b=1}^{R_{k,l}} r_{b,k,l,\lambda} \delta_{b,k,l,i,j} - \left(w_{i,j} - \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} P_{a,b,\lambda} \delta_{a,b,i,j} \right)$$

$$1 \leq i \leq n-1, i+1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq n-1, k+1 \leq l \leq n, i \neq k, j \neq l, 1 \leq \lambda \leq M \quad (3.25)$$

สมการที่ (3.24) แสดงผลรวมทราฟฟิกที่ความยาวคลื่น λ บนเส้นทาง protection path ระหว่างโหนด k และ l เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหายต้องเท่ากับผลรวมทราฟฟิกบนเส้นทาง active path ของทุกๆ คู่โหนดที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l ที่ความยาวคลื่น λ เดียวกัน สมการที่ (3.25) หมายถึงจำนวนช่องสัญญาณที่ความยาวคลื่น λ บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j ต้องมากกว่าหรือเท่ากับจำนวนช่องสัญญาณที่ความยาวคลื่น λ เดียวกันที่ต้องการใช้เพื่อจัดสรรเส้นทางใหม่ เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหายในทุกกรณี พจน์ที่หนึ่งหมายถึงผลรวมทราฟฟิกที่ความยาวคลื่น λ ของเส้นทาง protection path ระหว่างโหนด k และ l บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j เมื่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด k และ l เสียหาย พจน์ที่สองคือจำนวนช่องสัญญาณที่ความยาวคลื่น λ ซึ่งเหลือจากการใช้งานของ active path บนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด i และ j

จากที่กล่าวมาทั้งหมดในหัวข้อที่ 3.2 นี้ จะเห็นว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ประกอบด้วยสมการในส่วนต่างๆ ในการหาผลเฉลยจะหาผลเฉลยจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้จากการรวมชุดสมการในแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน โดยต้องกำหนดพารามิเตอร์บางตัวรวมทั้งหาเส้นทางระหว่างโหนดให้กับแบบจำลองด้วย ชุดสมการและตัวแปรที่ต้องการหาผลเฉลย (design variable) สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆ ทั้งในกรณีที่เครือข่ายสามารถและไม่สามารเปลี่ยนแปลงผันความยาวคลื่นแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ชุดสมการของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่
วิธีต่างๆ ทั้งในกรณีที่เครือข่ายสามารถและไม่สามารถแปลงผันความคลื่น

Protection Scheme	VWP	WP
No Protection	(3.2) - (3.3), (3.5) - (3.7)	(3.2) - (3.3), (3.5), (3.16) - (3.17)
MC	(3.2) - (3.3), (3.5) - (3.9)	(3.2) - (3.3), (3.5), (3.16) - (3.19)
SLB	(3.2) - (3.7), (3.10) - (3.11)	(3.2) - (3.5), (3.16) - (3.17), (3.20) - (3.21)
DJP	(3.2) - (3.7), (3.12) - (3.13)	(3.2) - (3.5), (3.16) - (3.17), (3.22) - (3.23)
LR	(3.2) - (3.7), (3.14) - (3.15)	(3.2) - (3.5), (3.16) - (3.17), (3.24) - (3.25)

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัด
สรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆ ทั้งในกรณีที่เครือข่ายสามารถและไม่สามารถแปลงผัน
ความยาวคลื่น

Protection Scheme	VWP	WP
No Protection	$x_{i,j}, w_{i,j}, p_{a,b}$	$x_{i,j}, w_{i,j}, p_{a,b,\lambda}$
MC	$x_{i,j}, w_{i,j}, p_{a,b}, r_{a,b,k,l}$	$x_{i,j}, w_{i,j}, p_{a,b,\lambda}, r_{a,b,k,l,\lambda}$
SLB	$x_{i,j}, w_{i,j}, s_{i,j}, p_{a,b}, r_{a,b,k,l}$	$x_{i,j}, w_{i,j}, s_{i,j}, p_{a,b,\lambda}, r_{a,b,k,l,\lambda}$
DJP	$x_{i,j}, w_{i,j}, s_{i,j}, p_{a,b}, r_{a,b,c}$	$x_{i,j}, w_{i,j}, s_{i,j}, p_{a,b,\lambda}, r_{a,b,c,\lambda}$
LR	$x_{i,j}, w_{i,j}, s_{i,j}, p_{a,b}, r_{b,k,l}$	$x_{i,j}, w_{i,j}, s_{i,j}, p_{a,b,\lambda}, r_{b,k,l,\lambda}$

3.3 ความซับซ้อนของแบบจำลองคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความซับซ้อนของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์มีความซับซ้อนแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรและจำนวนของ constraint รวมทั้งค่าคงที่ต่าง ๆ ในแบบจำลอง สำหรับเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆ กันจะมีจำนวน constraint และตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์ต่างกั้ดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ ทั้งนี้จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาเท่ากับ $\frac{n}{2}(n-1)$ ข่ายเชื่อมโยง จากตารางที่ 3.3 เมื่อพิจารณาเครือข่ายที่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น (VWP) จะเห็นได้ว่าจำนวน constraint ขึ้นอยู่กับจำนวนโหนดของเครือข่าย สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่จะต้องการ constraint เพิ่มขึ้นในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลบหลีกข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย ซึ่ง constraint ที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางใหม่นี้ทำให้เครือข่ายที่มีการจัดสรร

เส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีมีจำนวน constraint แตกต่างกันในกรณีเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP จะเห็นว่านอกจากมีจำนวน constraint ขึ้นอยู่กับจำนวนโหนดแล้วยังขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นทางระหว่างคูโหนดอีกด้วย เนื่องจากว่าในการจัดสรรเส้นทางใหม่จะพิจารณาการคุ้มครอง protection path ให้กับทุกๆ active path เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีสามารถเรียงลำดับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่มีจำนวน constraint จากน้อยไปมากได้ดังนี้คือ LR, MC และ SLB เนื่องจากว่าวิธี MC และ SLB มีวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่คล้ายกัน จึงทำให้จำนวน constraint แตกต่างกันเฉพาะสมการที่เกี่ยวข้องกับ spare fiber ซึ่งวิธี MC พิจารณาเส้นใยแก้วนำแสงเป็น working fiber เท่านั้น วิธี SLB จึงมีจำนวน constraint มากกว่า ส่วนวิธี LR จะจัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างคูโหนดของข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย ซึ่งต่างจากวิธี MC หรือ SLB ที่จัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างคูโหนดที่เป็นปลายทางของทราฟฟิกจึงทำให้วิธี LR มีจำนวน constraint น้อยกว่าวิธี MC และ SLB สำหรับวิธี DJP นั้น จำนวน constraint ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นทางด้วยทำให้ไม่สามารถแสดงการเปรียบเทียบได้ชัดเจน แต่โดยทั่วไปแล้วเส้นทางที่ใช้ในกรณี DJP มีจำนวนไม่มากจึงทำให้จำนวน constraint ของวิธี DJP มักจะน้อยกว่าวิธี MC และ SLB

เมื่อพิจารณาเครือข่ายที่ไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น (WP) จะเห็นได้ว่าจำนวน constraint ของเครือข่าย WP แตกต่างกับเครือข่าย VWP โดยมีจำนวนขึ้นอยู่กับค่า M ด้วยซึ่งทำให้เครือข่าย WP มีจำนวน constraint มากกว่า เนื่องจากว่าในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นจะต้องมีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางที่ใช้รองรับทราฟฟิกจึงทำให้ต้องพิจารณาการวางเส้นใยแก้วนำแสงให้เพียงพอกับความต้องการของสัญญาณในแต่ละความยาวคลื่น จากการที่จำนวน constraint ขึ้นอยู่กับค่า M จึงทำให้เครือข่าย WP มีจำนวน constraint เพิ่มขึ้นตามค่า M ซึ่งต่างจากเครือข่าย VWP ที่มีจำนวน constraint คงที่ไม่่ว่าค่า M เป็นเท่าใด แต่ในกรณีที่ $M=1$ แบบจำลองสำหรับเครือข่าย VWP และ WP จะเป็นแบบจำลองเดียวกัน ด้วยเหตุนี้แบบจำลองของเครือข่าย WP จึงมีจำนวน constraint มากกว่าแบบจำลอง VWP ตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับเครือข่าย VWP ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

จากตารางที่ 3.4 ซึ่งแสดงจำนวนตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์ เมื่อพิจารณาเครือข่าย VWP จะเห็นได้ว่าจำนวนตัวแปรขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นทางระหว่างคูโหนดและจำนวนโหนดภายในเครือข่าย เครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ต้องการจำนวนตัวแปรเพิ่มเพื่อใช้ในการเลือกเส้นทางเพื่อหลบหลีกข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายรวมทั้งต้องกำหนดจำนวน spare fiber ที่ต้องวางเพิ่มในแต่ละข่ายเชื่อมโยงซึ่งจำนวนตัวแปรที่เพิ่มขึ้นนี้จะแตกต่างกันตามวิธีที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทางใหม่ เมื่อพิจารณาเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่สามารถเรียงลำดับวิธีที่ต้องการจำนวนตัวแปรจากน้อยไปมากได้ดังนี้คือ LR, MC และ SLB เนื่องจากวิธี MC และ SLB มีเส้นทาง

ที่ใช้ในการจัดสรรเพื่อหลบหลีกชายเชื่อมโยงที่เสียหายเหมือนกัน แต่วิธี MC ไม่ได้พิจารณาการวาง spare fiber จึงทำให้มีจำนวนตัวแปรน้อยกว่าวิธี SLB สำหรับวิธี LR จะจัดสรรเส้นทางเฉพาะระหว่างคูโนดของชายเชื่อมโยงที่เสียหายซึ่งมีจำนวนเส้นทางน้อยกว่าเส้นทางที่ใช้ในวิธี MC และ SLB จึงทำให้มีจำนวนตัวแปรน้อยกว่า ส่วนในกรณีของวิธี DJP จะพิจารณาจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับแต่ละ active path ทำให้จำนวนตัวแปรขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกัน ซึ่งโดยทั่วไปจำนวนเส้นทางที่สามารถใช้ในวิธีนี้มีจำนวนน้อย จึงทำให้มีจำนวนตัวแปรน้อยกว่าวิธี MC และ SLB ในกรณีที่เปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี LR และ DJP จะไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าวิธีใดมีจำนวนตัวแปรน้อยกว่ากัน เมื่อพิจารณาเครือข่าย WP จากตารางจะเห็นว่า มีจำนวนตัวแปรขึ้นอยู่กับจำนวนโนดและเส้นทางระหว่างคูโนดเช่นเดียวกับเครือข่าย VWP แต่สิ่งที่ต่างกันคือจะมีค่า M เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยซึ่งทำให้จำนวนตัวแปรสำหรับเครือข่าย WP เพิ่มขึ้นตามค่า M ในขณะที่เครือข่าย VWP จะมีจำนวนตัวแปรเท่าเดิมไม่ว่า M เป็นเท่าใด เนื่องจากต้องมีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางที่ใช้ระหว่างคูโนดด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แบบจำลองสำหรับเครือข่าย WP มีจำนวนตัวแปรมากกว่าแบบจำลองสำหรับเครือข่าย VWP ตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น สำหรับเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับเครือข่าย VWP ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้คือแบบจำลองคณิตศาสตร์มีจำนวน constraint ขึ้นอยู่กับจำนวนโนด และจำนวนตัวแปรขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นทาง จำนวน constraint และจำนวนตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย WP จะแปรตามค่า M ด้วยโดยที่มีจำนวนมากกว่า VWP ตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น ในกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่จะมีจำนวน constraint และตัวแปรเพิ่มขึ้นจากเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีจะได้ว่าวิธี MC มีจำนวนน้อยกว่า SLB ส่วนวิธี LR และ DJP มีจำนวนน้อยกว่าทั้ง MC และ SLB แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่มีจำนวนตัวแปรและ constraint มากกว่าก็ไม่จำเป็นว่าต้องใช้เวลาในการหาคำเฉลยมากกว่าเสมอไป (ดังที่ได้แสดงผลการทดลองในหัวข้อต่อไป) ซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการและค่าคงที่ต่างๆ ของสมการด้วย แต่โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีจำนวนตัวแปรและ constraint มากกว่าน่าจะใช้เวลาในการหาคำเฉลยมากกว่า สำหรับจำนวนตัวแปรและ constraint ของแบบจำลองคณิตศาสตร์รวมทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองจริงจะกล่าวถึงและวิเคราะห์ในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 3.3 จำนวน Constraint ของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆ ทั้งในกรณีที่สามารและไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น

Protection Scheme	VWP	WP
No Protection	$\frac{3}{2}n^2 - \frac{n}{2} + 2$	$\frac{(M+2)}{2}n^2 - \frac{M}{2}n + 2$
MC	$\frac{n^4}{2} - n^3 + \frac{3}{2}n^2 + 2$	$\frac{(M+1)}{4}n^4 - \frac{(M+1)}{2}n^3 + \frac{(M+5)}{4}n^2 + 2$
SLB	$\frac{n^4}{2} - n^3 + 2n^2 - \frac{n}{2} + 2$	$\frac{(M+1)}{4}n^4 - \frac{(M+1)}{2}n^3 + \frac{(M+7)}{4}n^2 - \frac{n}{2} + 2$
DJP	$\frac{n^4}{4} - \frac{n^3}{2} + \frac{7}{4}n^2 - \frac{n}{2} + 2 + \sum_{a=1}^{N_a} P_a$	$\frac{M}{4}n^4 - \frac{M}{2}n^3 + \frac{(M+6)}{4}n^2 - \frac{n}{2} + 2 + \sum_{a=1}^{N_a} P_a$
LR	$\frac{n^4}{4} - \frac{n^3}{2} + \frac{9}{4}n^2 - n + 2$	$\frac{M}{4}n^4 - \frac{M}{2}n^3 + \frac{(3M+6)}{4}n^2 - \frac{(M+1)}{2}n + 2$

ตารางที่ 3.4 จำนวนตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆ ทั้งในกรณีที่สามารรถและไม่สามารรถแปลงผันความยาวคลื่น

Protection Scheme	VWP	WP
No Protection	$n(n-1) + \sum_{a=1}^{N_a} P_a$	$n(n-1) + M \sum_{a=1}^{N_a} P_a$
MC	$n(n-1) + \sum_{a=1}^{N_a} P_a + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n \sum_{a=1}^{N_a} R_{a,k,l}$	$n(n-1) + M \sum_{a=1}^{N_a} P_a + M \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n \sum_{a=1}^{N_a} R_{a,k,l}$
SLB	$3 \frac{n}{2} (n-1) + \sum_{a=1}^{N_a} P_a + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n \sum_{a=1}^{N_a} R_{a,k,l}$	$3 \frac{n}{2} (n-1) + M \sum_{a=1}^{N_a} P_a + M \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n \sum_{a=1}^{N_a} R_{a,k,l}$
DJP	$3 \frac{n}{2} (n-1) + \sum_{a=1}^{N_a} P_a + \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} R_{a,b}$	$3 \frac{n}{2} (n-1) + M \sum_{a=1}^{N_a} P_a + M \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{b=1}^{P_a} R_{a,b}$
LR	$3 \frac{n}{2} (n-1) + \sum_{a=1}^{N_a} P_a + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n R_{k,l}$	$3 \frac{n}{2} (n-1) + M \sum_{a=1}^{N_a} P_a + M \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n R_{k,l}$

3.4 ผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.2 การหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CPLEX6.6 [25] ซึ่งทำงานอยู่บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ XP สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานคือเครื่อง Pentium 4 ความเร็ว 2GHz หน่วยความจำ 512 MHz

3.4.1 ผลของการจัดสรรเส้นทางใหม่และการแปลงผันความยาวคลื่น

ในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธี ทั้งในกรณีที่เครือข่ายสามารถและไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นได้ เครือข่ายที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครือข่ายขนาด 4 โหนด และ 5 โหนด โดยสายเชื่อมโยงที่พิจารณาในแบบจำลองจะเป็นสายเชื่อมโยงที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างทุกคู่โหนด และกำหนดให้ค่าต้นทุนของสายเชื่อมโยง ($\alpha_{i,j}$) และค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง ($\beta_{i,j}$) มีค่าเท่ากับ 1 ทุกๆ ค่า i และ j (ต้นทุนในการทดลองนี้จะเป็นจำนวนรวมของสายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสงที่เครือข่ายต้องการ) ทราฟฟิกของเครือข่ายทั้งสองเป็นแบบยูนิฟอร์มขนาดเท่ากับ 1 ค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 4 และ 5 โหนดเป็นดังตารางที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ

จากตารางที่ 3.5 เมื่อพิจารณาเครือข่าย VWP จะเห็นว่าเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีมีต้นทุนสูงกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ เนื่องจากเครือข่ายต้องการทรัพยากรเพิ่มขึ้นเพื่อสำรองใช้ในการรองรับทราฟฟิกที่ถูกกระทบจากการเสียหายของสายเชื่อมโยง เมื่อเปรียบเทียบการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีจะเห็นได้ว่าวิธี MC และ SLB มีค่าต้นทุนเท่ากันที่ทุกค่า M และมีค่าน้อยกว่าวิธี LR สำหรับวิธี DJP จะมีค่าต้นทุนมากที่สุด เป็นเพราะว่า วิธี MC และ SLB มีเส้นทางที่สามารถใช้ในการจัดสรรเส้นทางใหม่ได้มากกว่าวิธี DJP ที่เลือกใช้ได้เฉพาะเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกันและวิธี LR ที่จัดสรรเส้นทางใหม่เฉพาะระหว่างคู่โหนดของสายเชื่อมโยงที่เสียหาย ส่วนวิธี MC และ SLB มีเส้นทางที่ใช้ในการจัดสรรเป็นเส้นทางเดียวกันจะแตกต่างกันที่ปริมาณทราฟฟิกที่ต้องจัดสรรเส้นทางใหม่ในแต่ละกรณีจึงทำให้มีต้นทุนเท่ากันที่ทุกค่า M เมื่อพิจารณาถึงผลของค่า M ที่เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าทำให้ต้นทุนมีค่าลดลง เนื่องจากว่าในที่นี้ต้นทุนเป็นจำนวนรวมของสายเชื่อมโยงและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อค่า M มากขึ้นจำนวนของสัญญาณบนเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละเส้นมากขึ้นจึงทำให้ต้องการเส้นใยแก้วนำแสงน้อยลง ต้นทุนจึงน้อยลงตาม จากตารางในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อค่า $M=4$ มีค่าต้นทุนเท่ากับ 7 ซึ่งจะมีบางสายเชื่อมโยงที่ไม่ต้องการเส้นใยแก้วนำแสงเลย นั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อ

M มีค่ามากพอบางข่ายเชื่อมโยงอาจจะไม่ต้องการเส้นใยแก้วนำแสงเลยก็ได้ เมื่อพิจารณาในกรณีเครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้จะเห็นว่าเป็นไปในลักษณะเดียวกัน แต่ค่าต้นทุนจะลดได้ต่ำสุดเท่ากับ 8 ไม่ว่าจะเพิ่มค่า M ให้มากขึ้นเท่าใด เนื่องจากว่าในกรณีนี้เครือข่ายต้องสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ในกรณีที่มีการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้ในทุกกรณี เครือข่ายที่มีต้นทุนต่ำสุดจึงเป็นเครือข่ายวงแหวนที่มีเส้นใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้นบนแต่ละข่ายเชื่อมโยงซึ่งในกรณีของเครือข่าย 4 โหนดจึงมีต้นทุนต่ำสุดได้เท่ากับ 8 แต่สำหรับวิธี DJP จะเห็นว่าค่าต้นทุนลดต่ำลงได้ถึง 10 น่าจะเป็นผลจากข้อจำกัดของเส้นทางที่ใช้ในการจัดสรรต้องเป็นเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกันจึงทำให้การจัดสรรเส้นทางมีความจำกัดมากกว่า สำหรับเครือข่าย 5 โหนดค่าต้นทุนเป็นดังตารางที่ 3.6 เมื่อพิจารณาเครือข่าย VWP จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกับตารางที่ 3.5 แต่มีต้นทุนสูงกว่า ส่วนการเพิ่มค่า M ทำให้ค่าต้นทุนของเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ลดลงได้ต่ำสุดเท่ากับ 9 สำหรับในกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ต้นทุนลดลงได้ต่ำสุดเท่ากับ 10 ซึ่งจะเป็นเครือข่ายวงแหวนเช่นเดียวกับเครือข่าย 4 โหนด

ตารางที่ 3.5 ค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครือข่าย 4 โหนด

M	Protection Scheme (VWP)					Protection Scheme (WP)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	12	16	16	17	16	12	16	16	17	16
2	9	12	12	12	12	9	12	12	12	12
3	8	10	10	10	10	8	10	10	10	12
4	7	8	8	10	10	7	8	8	10	10
5	7	8	8	10	8	7	8	8	10	10
6	7	8	8	10	8	7	8	8	10	10

ตารางที่ 3.6 ค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครือข่าย 5 โหนด

M	Protection Scheme (VWP)					Protection Scheme (WP)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	20	24	24	26	25	20	24	24	26	25
2	13	16	16	18	18	13	16	16	18	19
3	10	15	15	16	15	10	15	15	16	15
4	10	12	12	14	14	10	12	12	14	15
5	10	12	12	14	14	10	12	12	14	14
6	9	10	10	14	10	9	10	10	14	14

เมื่อพิจารณาค่าต้นทุนของเครือข่าย WP จากตารางที่ 3.5 และ 3.6 จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์เช่นเดียวกันกับเครือข่าย VWP แต่มีความแตกต่างกันที่ในบางค่า M ค่าต้นทุนของวิธี LR มากกว่า DJP เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเครือข่าย VWP และ WP จะเห็นว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่และเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่โดยใช้วิธี MC, SLB และ DJP การแปลงผันความยาวคลื่นไม่สามารถช่วยลดต้นทุนได้ในช่วงค่า M ที่ได้ทำการทดลอง ส่วนวิธี LR นั้นการแปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดต้นทุนได้ที่ค่า M เพียงบางค่า คือจากตารางที่ 3.5 การแปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดต้นทุนได้ 20% เมื่อ M=5,6 และจากตารางที่ 3.6 สามารถช่วยลดต้นทุนได้ประมาณ 5.26% เมื่อ M=2, 6.67% เมื่อ M=4 และ 28.57% เมื่อ M=6 โดยทั่วไปเครือข่าย WP น่าจะมีต้นทุนสูงกว่าเพราะว่าต้องมีการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับทุกๆ เส้นทางที่ใช้รองรับทราฟฟิกให้ใช้ความยาวคลื่นเดียวกันตลอดทั้งเส้นทางจึงมีข้อจำกัดในการจัดสรรความยาวคลื่นมากกว่าเครือข่าย VWP จึงทำให้มีต้นทุนสูงกว่า จากตารางจะเห็นว่ามีเพียงวิธี LR เท่านั้นที่การแปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดต้นทุนให้ต่ำลงได้ น่าจะเป็นเพราะวิธี LR จะต้องจัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างคู่โหนดของข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายซึ่งในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นทำให้ต้องใช้ความยาวคลื่นเดิม แต่สำหรับวิธีอื่นจะจัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างคู่โหนดที่เป็นปลายทางของทราฟฟิกจึงทำให้สามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นได้ วิธี LR จึงมีข้อจำกัดในการจัดสรรความยาวคลื่นมากกว่าวิธีอื่น และน่าจะเป็นเหตุผลนี้ที่ทำให้ต้นทุนของวิธี LR มากกว่าวิธี DJP ที่บางค่า M ดังนั้นจากตารางทำให้สรุปได้ว่าการแปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดต้นทุนได้ที่บางค่า M และบางวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่

ตารางที่ 3.7 จำนวนข่ายเชื่อมโยงของผลเฉลยจากแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 4 โหนด

M	Protection Scheme (VWP)					Protection Scheme (WP)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	4	6	6	6	6	4	6	6	6	6
2	4	4	6	6	6	4	4	4	6	6
3	4	5	5	5	5	4	5	5	5	4
4	4	4	4	5	5	4	4	4	5	5
5	4	4	4	5	4	4	4	4	5	5
6	4	4	4	5	4	4	4	4	5	5

ตารางที่ 3.8 จำนวนข่ายเชื่อมโยงของผลเฉลยจากแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 5 โหนด

M	Protection Scheme (VWP)					Protection Scheme (WP)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	8	8	8	10	10	8	8	8	10	10
2	6	8	8	9	9	6	8	8	9	7
3	5	5	5	8	5	5	5	5	8	5
4	5	6	6	7	7	6	6	6	7	6
5	5	6	6	7	7	6	6	6	7	7
6	5	5	5	7	5	5	5	5	7	5

ตารางที่ 3.7 และ 3.8 แสดงจำนวนข่ายเชื่อมโยงของผลเฉลยสำหรับเครือข่าย 4 และ 5 โหนดตามลำดับ จากตารางที่ 3.7 เมื่อพิจารณาเครือข่าย VWP จะเห็นว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ ผลเฉลยที่ได้เป็นเครือข่ายวงแหวนไม่ว่าค่า M เป็นเท่าใด ส่วนในกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงมากกว่า เช่นที่ M=1 เครือข่ายเป็นแบบ full-mesh เป็นเพราะว่าเครือข่ายที่พิจารณามีขนาดเล็ก เมื่อเกิดการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงปริมาณกราฟฟิคที่ถูกรบกวนมีปริมาณค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับช่องสัญญาณ รวมทั้งเส้นทางภายในเครือข่ายมีจำนวนน้อย เครือข่ายจึงมีแนวโน้มใช้เส้นทางสั้นในการรองรับกราฟฟิค จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่เครือข่ายต้องการจึงเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้สามารถใช้เส้นทางสั้นได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ M มีค่ามากขึ้นจำนวนข่ายเชื่อมโยงมีแนวโน้มว่าจะลดลงเพราะว่าจำนวนช่องสัญญาณมีมากขึ้นทำให้เส้นทางที่ใช้รองรับกราฟฟิคสามารถใช้เส้นทางใยแก้วนำแสงร่วมกันได้ เครือข่ายจึงมีแนวโน้มในการเลือกใช้เส้นทางที่ยาวขึ้น ซึ่งจากตารางจะเห็นว่าเมื่อ M มากพอจะทำให้จำนวนข่ายเชื่อมโยงลดลงจนเป็นแบบวงแหวนได้ เช่น เมื่อ M=4 ในกรณีที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC และ SLB หรือเมื่อ M=5 ในกรณีที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR เครือข่ายวงแหวนเป็นรูปแบบของโทโปโลยีที่มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อยที่สุดที่สามารถป้องกันการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้ ดังนั้นจะไม่สามารถทำให้จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่เครือข่ายต้องการลดน้อยลงได้อีกไม่ว่าเพิ่ม M ให้มากขึ้นเท่าใด

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีสามารถเรียงวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ตามจำนวนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายจากมากไปน้อยได้ดังนี้ DJP, LR, SLB และ MC เป็นเพราะว่าในการหาผลเฉลยต้องกำหนดเส้นทางทั้งหมดให้กับแบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งในกรณีของ DJP เส้นทางที่ใช้ต้องเป็นเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกันทำให้เส้นทางที่กำหนดให้กับแบบจำลองเป็นเส้นทางที่มีความยาวน้อย แต่สำหรับวิธีอื่นไม่มีข้อจำกัดในการเลือกเส้นทาง ดังนั้นวิธี

DJP จึงต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงมากกว่าเพื่อให้สามารถใช้เส้นทางนั้นได้ เมื่อพิจารณาเครือข่าย WP จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันคือวิธี DJP มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงมากที่สุด แต่จะมีข้อแตกต่างคือที่บางค่า M วิธี LR มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อยกว่าทั้งวิธี MC และ SLB เมื่อพิจารณาถึงผลของค่า M ที่เพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มทำให้จำนวนข่ายเชื่อมโยงลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาวิธี LR จะเห็นว่า การเพิ่มค่า M ยังไม่สามารถทำให้จำนวนข่ายเชื่อมโยงลดน้อยลงจนเป็นวงแหวนได้ดังเช่นเครือข่าย VWP น่าจะเป็นผลมาจากข้อจำกัดในการจัดสรรความยาวคลื่นของวิธี LR ที่ทำให้ต้องใช้ความยาวคลื่นเดิมในการจัดสรรเส้นทางใหม่

สำหรับในกรณีของเครือข่าย 5 โหนดดังตารางที่ 3.8 จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะที่คล้ายกับเครือข่าย 4 โหนด เมื่อ $M=1$ เครือข่ายที่ไม่สามารถและสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่โดยใช้วิธี MC และ SLB ต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงเท่ากันซึ่งต่างจากกรณีของเครือข่าย 4 โหนดน่าจะเป็นผลมาจากจำนวนเส้นทางที่มากขึ้นเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงทำให้มีความยืดหยุ่นในการจัดสรรเส้นทางมากกว่า ในกรณีของเครือข่าย 5 โหนดจะเห็นว่าค่า M ที่ทำให้จำนวนข่ายเชื่อมโยงลดน้อยลงจนเป็นวงแหวนจะมากกว่าเครือข่าย 4 โหนด และมีเพียงเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP เท่านั้นที่ไม่ได้เป็นวงแหวน จากตารางจะเห็นว่า การเพิ่มค่า M ในบางช่วงอาจทำให้จำนวนข่ายเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นได้ เช่นในกรณีของเครือข่าย WP ที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR ที่ค่า $M=3$ มีข่ายเชื่อมโยงเท่ากับ 5 แต่เมื่อ $M=4$ มีข่ายเชื่อมโยงเท่ากับ 6 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ M เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อยลง และเมื่อ M เพิ่มจนถึงค่าหนึ่งจะทำให้ได้เครือข่ายที่มีต้นทุนต่ำที่สุดซึ่งไม่สามารถลดลงได้อีกโดยการเพิ่มค่า M ซึ่งจะเป็นเครือข่ายวงแหวนที่มีหนึ่งเส้นใยแก้วนำแสงบนแต่ละข่ายเชื่อมโยง ทั้งนี้อาจจะมีข้อยกเว้นสำหรับเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP เนื่องจากข้อจำกัดของเส้นทางที่ใช้ในการจัดสรร

ในส่วนต่อไปจะพิจารณาถึงความซับซ้อนของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในแง่ของจำนวน constraint และตัวแปรซึ่งได้กล่าวถึงแล้วไว้ในหัวข้อที่ 3.2 แต่ในที่นี้จะพิจารณาจากแบบจำลองสำหรับเครือข่าย 4 และ 5 โหนดซึ่งใช้ในการทดลองข้างต้น ตารางที่ 3.9 และ 3.10 แสดงจำนวน constraint และจำนวนตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 4 และ 5 โหนดตามลำดับ จากตารางที่ 3.9ก, 3.9ข จะเห็นว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่มีจำนวน constraint และตัวแปรมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ซึ่ง constraint และตัวแปรที่เพิ่มขึ้นมานี้เป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆ กัน โดยมีจำนวน constraint และตัวแปรเพิ่มขึ้นจากเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ 2.57-4.86 เท่า และ 1.62-4.48 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเครือข่าย VWP จะเห็นว่าจำนวน constraint และตัวแปรมีจำนวนคงที่ไม่ว่า M มีค่าเท่าใด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดสรร

เส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธี วิธี SLB มีจำนวน constraint และตัวแปรมากที่สุดตามด้วย MC ส่วน DJP มีจำนวน constraint มากกว่า LR แต่มีจำนวนตัวแปรเท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2 สำหรับกรณีเครือข่าย WP จำนวน constraint และตัวแปรจะเพิ่มขึ้นตามค่า M จึงทำให้มีจำนวนมากกว่าเครือข่าย VWP เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครือข่ายที่ไม่สามารถและสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ จะเห็นว่าเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่มีจำนวน constraint และตัวแปรเพิ่มขึ้นจากเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจาก constraint และตัวแปรสำหรับการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้มีจำนวนเพิ่มขึ้นตามค่า M ได้เร็วกว่า เมื่อพิจารณาการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีจะเห็นว่าวิธี SLB มีจำนวน constraint และตัวแปรมากที่สุด ตามด้วยวิธี MC ส่วนวิธี DJP และ LR มีจำนวนตัวแปรเท่ากัน สำหรับจำนวน constraint ขึ้นอยู่กับค่า M ด้วยคือเมื่อ $M < 3$ จำนวน constraint ของวิธี DJP จะมากกว่า แต่เมื่อ $M > 3$ วิธี LR มีจำนวน constraint มากกว่า DJP เนื่องจากว่าในการจัดสรรเส้นทางใหม่ของวิธี LR ต้องพิจารณาที่แต่ละค่าความยาวคลื่นทำให้จำนวน constraint เพิ่มขึ้นตามค่า M ดังนั้นเมื่อ M เพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งจะทำให้จำนวน constraint ของวิธี LR มากกว่า DJP และยังเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีจำนวนเท่ากับวิธี SLB ด้วย เมื่อ $M=6$ ดังตารางที่ 3.9

สำหรับจำนวน constraint และตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 5 โหนดดังที่แสดงในตารางที่ 3.10 จำนวน constraint และตัวแปรมีความสัมพันธ์คล้ายกับเครือข่าย 4 โหนดในตารางที่ 3.9 ในกรณีของเครือข่าย 5 โหนดเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้มีจำนวน constraint และตัวแปรมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ 3.48-7.86 เท่า และ 1.01-7.73 เท่า ตามลำดับ ในกรณีเครือข่าย VWP จากตารางจะเห็นว่าในกรณีที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP มีจำนวนตัวแปรมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เพียงเล็กน้อย เป็นเพราะว่าความแตกต่างของจำนวนเส้นทางที่กำหนดให้กับแบบจำลองคณิตศาสตร์ กล่าวคือกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP เส้นทางที่กำหนดให้กับแบบจำลองต้องเป็นเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกันซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าเส้นทางที่กำหนดให้กับแบบจำลองของเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ซึ่งไม่มีข้อจำกัดใดๆ ในการจัดสรรเส้นทาง แต่อย่างไรก็ตามจากการที่เครือข่ายจะต้องสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้จึงทำให้แบบจำลอง DJP มีจำนวนตัวแปรมากกว่าเล็กน้อย และด้วยเหตุผลเดียวกันจึงทำให้จำนวนตัวแปรของ DJP น้อยกว่าจำนวนตัวแปรของวิธี LR เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีจะมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับเครือข่าย 4 โหนด แต่ต่างกันที่จำนวนตัวแปรของวิธี DJP น้อยกว่าวิธี LR ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว ในกรณีเครือข่าย WP จะมีความสัมพันธ์ที่คล้ายกัน จะมีข้อแตกต่างเพียงเล็กน้อยคือจำนวน constraint ของวิธี DJP มากกว่าวิธี LR เมื่อ $M < 4$ และน้อยกว่าเมื่อ $M > 4$ และ

ไม่ว่าค่า M เป็นเท่าใดจำนวนตัวแปรของวิธี DJP จะมากกว่าจำนวนตัวแปรของเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เพียงเล็กน้อยเท่านั้นเช่นเดียวกับเครือข่าย VWP

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเครือข่าย 4 และ 5 โหนดจากตารางที่ 3.9 และ 3.10 จะเห็นว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 5 โหนดมีจำนวน constraint และตัวแปรมากกว่าเครือข่าย 4 โหนด สำหรับเครือข่าย VWP เครือข่าย 5 โหนดมีจำนวน constraint มากกว่าเครือข่าย 4 โหนดประมาณ 1.61-2.47 เท่าโดยเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้มีส่วนการเพิ่มขึ้นของ constraint มากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ กล่าวคือแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่มี constraint เพิ่มขึ้นประมาณ 1.61 เท่าและเมื่อเครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้จะเพิ่มขึ้นประมาณ 2.18-2.47 เท่า เมื่อพิจารณาการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธี วิธี MC มีส่วนในการเพิ่ม constraint ขึ้นมากที่สุดตามด้วย SLB, DJP และ LR ตามลำดับ สำหรับจำนวนตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 5 โหนดจะมากกว่าเครือข่าย 4 โหนดประมาณ 2.56-8.02 เท่า ซึ่งจะเห็นว่ามีส่วนเพิ่มขึ้นมากกว่าจำนวน constraint เนื่องจากจำนวน constraint ขึ้นอยู่กับจำนวนโหนดและสายเชื่อมโยงเท่านั้น แต่จำนวนตัวแปรขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นทางระหว่างโหนดด้วย สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่จะมีส่วนในการเพิ่มจำนวนตัวแปรมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ ยกเว้นในกรณีที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี DJP จำนวนตัวแปรที่เพิ่มขึ้นกลับน้อยกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ ซึ่งเป็นเพราะข้อจำกัดในเรื่องของเส้นทางดังที่กล่าวมาแล้ว ส่วนวิธี MC มีส่วนการเพิ่มมากที่สุดคือ 8.02 เท่า ตามด้วยวิธี SLB, LR ตามลำดับ

สำหรับในกรณีของเครือข่าย WP การเพิ่มขึ้นของจำนวน constraint ตามจำนวนโหนดของเครือข่ายจาก 4 โหนด เป็น 5 โหนด มีลักษณะเช่นเดียวกับเครือข่าย VWP โดยมีสัดส่วนเพิ่มประมาณ 1.61-2.67 เท่า ซึ่งวิธี MC มีส่วนการเพิ่มขึ้นมากที่สุด ตามด้วย SLB, DJP และ LR เช่นเดียวกัน แต่ในกรณีของ WP นี้การเพิ่มขึ้นของค่า M มีผลทำให้การเพิ่มขึ้นของ constraint มีส่วนเพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับจำนวนตัวแปรของแบบจำลองสำหรับเครือข่าย 5 โหนดจะมีมากกว่าเครือข่าย 4 โหนดประมาณ 2.56-8.67 เท่า โดยวิธี MC มีส่วนการเพิ่มมากที่สุด ตามด้วย SLB, LR และ DJP ตามลำดับ การเพิ่มค่า M มากขึ้นก็ส่งผลต่อสัดส่วนการเพิ่มจำนวนตัวแปรให้มากตามเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นเดียวกับจำนวน constraint ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จากที่กล่าวมาทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเครือข่ายมีจำนวนโหนดเพิ่มขึ้นจำนวน constraint และจำนวนตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์จะเพิ่มขึ้นตาม โดยสัดส่วนในการเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับวิธีในการจัดสรรเส้นทางใหม่ รวมทั้งค่า M ที่เพิ่มขึ้นก็มีผลทำให้สัดส่วนดังกล่าวเพิ่มขึ้นด้วยในกรณีที่เครือข่าย WP และเมื่อ

เปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธี การจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC มีอัตราส่วนการเพิ่มของจำนวน constraint และตัวแปรมากที่สุดตามด้วยวิธี SLB ส่วนวิธี LR มีอัตราส่วนการเพิ่มของจำนวน constraint น้อยที่สุด และวิธี DJP มีอัตราส่วนการเพิ่มของจำนวนตัวแปรน้อยที่สุด ส่วนเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่จะมีอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของจำนวน constraint และตัวแปรน้อยกว่าเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ ยกเว้นเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี DJP ที่มีอัตราส่วนการเพิ่มจำนวนตัวแปรน้อยกว่า

ตารางที่ 3.9 จำนวน constraint และตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 4 โหนด

(ก) จำนวน constraint

M	Protection Scheme (VWP)					Protection Scheme (WP)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	28	96	102	84	72	28	96	102	84	72
2	28	96	102	84	72	34	132	138	120	114
3	28	96	102	84	72	40	168	174	156	156
4	28	96	102	84	72	46	204	210	192	198
5	28	96	102	84	72	52	240	246	228	240
6	28	96	102	84	72	58	276	282	264	282

(ข) จำนวนตัวแปร

M	Protection Scheme (VWP)					Protection Scheme (WP)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	48	162	168	78	78	48	162	168	78	78
2	48	162	168	78	78	78	306	312	132	132
3	48	162	168	78	78	108	450	456	186	186
4	48	162	168	78	78	138	594	600	240	240
5	48	162	168	78	78	168	738	744	294	294
6	48	162	168	78	78	198	882	888	348	348

ตารางที่ 3.10 จำนวน constraint และตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 5 โหนด

(ก) จำนวน constraint

M	Protection Scheme (VWP)					Protection Scheme (WP)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	45	237	247	187	157	45	237	247	187	157
2	45	237	247	187	157	55	337	347	287	267
3	45	237	247	187	157	65	437	447	387	377
4	45	237	247	187	157	75	537	547	487	487
5	45	237	247	187	157	85	637	647	587	597
6	45	237	247	187	157	95	737	747	687	707

(ข) จำนวนตัวแปร

M	Protection Scheme (VWP)					Protection Scheme (WP)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	190	1300	1310	200	350	190	1300	1310	200	350
2	190	1300	1310	200	350	350	2570	2580	360	660
3	190	1300	1310	200	350	510	3840	3850	520	970
4	190	1300	1310	200	350	670	5110	5120	680	1280
5	190	1300	1310	200	350	830	6380	6390	840	1590
6	190	1300	1310	200	350	990	7650	7660	1000	1900

ตารางที่ 3.11 และ 3.12 แสดงเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 4 และ 5 โหนดตามลำดับ จากตารางที่ 3.11 ในกรณีเครือข่าย VWP จะเห็นได้ว่าเมื่อเครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้จะต้องใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ซึ่งสอดคล้องกับที่ได้กล่าวไว้ก่อนนี้คือแบบจำลองมีจำนวน constraint และตัวแปรเพิ่มขึ้น ซึ่งในบางกรณีใช้เวลานานขึ้นมากถึง 51 เท่า เช่นเมื่อ M=1 ในกรณีที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีจะเห็นว่า โดยรวมแล้ววิธี SLB ใช้เวลามากที่สุด ตามด้วย MC, DJP และ LR ซึ่งสอดคล้องกับตารางที่ 3.9 เมื่อพิจารณาที่ค่า M ต่างกันจะเห็นว่าในบางกรณีต้องการเวลาในการหาผลเฉลยต่างกัน ทั้งที่มีจำนวน constraint และตัวแปรเท่ากัน เช่นกรณีที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC เมื่อ M=1 และ 2 เมื่อพิจารณาเครือข่าย WP จะเห็นว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ใช้เวลาในการหาผลเฉลยน้อยกว่าเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เช่นเดียวกับเครือข่าย

ข่าย VWP เมื่อเปรียบเทียบการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์ต่างจากเครือข่าย VWP คือไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่าการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีใดใช้เวลามากที่สุดในการหาผลเฉลย เช่นเมื่อ $M=2$ วิธี MC ใช้เวลานานที่สุด แต่ที่ $M=5$ วิธี LR ใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานที่สุด ซึ่งที่ $M=5$ เมื่อพิจารณาตารางที่ 3.9 จะเห็นว่าจำนวน constraint และตัวแปรของวิธี LR น้อยกว่าวิธี SLB ซึ่งทำให้วิธี SLB น่าจะใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานกว่า สำหรับวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่มีแนวโน้มว่าใช้เวลาในการหาผลเฉลยน้อยที่สุดคือวิธี DJP เมื่อพิจารณาผลของค่า M ที่เพิ่มขึ้นจะเห็นว่าแนวโน้มว่าทำให้แบบจำลองต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานขึ้น แต่ในบางกรณีค่า M ที่เพิ่มขึ้นก็กลับทำให้แบบจำลองต้องการเวลาในการหาผลเฉลยน้อยลง เช่น เมื่อเครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC ในกรณีที่ M เพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 3 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเครือข่าย VWP กับ WP จะเห็นว่าเครือข่าย WP ต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานกว่า ประมาณ 1-1567 เท่า

จากตารางที่ 3.12 ซึ่งแสดงเวลาที่ต้องการใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 5 โหนด จะเห็นว่า ในกรณีเครือข่าย VWP แบบจำลองสำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ต้องการเวลาในการหาผลเฉลยมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เช่นเดียวกับเครือข่าย 4 โหนด เมื่อเปรียบเทียบการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธี จะไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าวิธีใดใช้เวลามากกว่ากัน แต่มีแนวโน้มว่าวิธี MC และ SLB ต้องการเวลาในการหาผลเฉลยมากกว่าวิธี DJP และ LR สำหรับแบบจำลองสำหรับเครือข่ายที่มีค่า M ต่างกันจะเห็นว่าต้องการเวลาในการหาผลเฉลยไม่เท่ากันเช่นเดียวกับเครือข่าย 4 โหนด จากตารางกรณีที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ MC เมื่อ $M=3$ ซึ่งต้องการเวลาในการหาผลเฉลยมากกว่า 1 ชั่วโมง ในขณะที่ $M=2$ ใช้เวลาประมาณ 2 นาที สำหรับกรณีเครือข่าย WP จะเห็นว่าเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานขึ้น และเมื่อพิจารณาการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีจะไม่สามารถระบุได้เช่นกันว่าการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีใดใช้เวลามากกว่ากัน เมื่อพิจารณาถึงผลของค่า M จากตารางจะเห็นว่าค่า M มีแนวโน้มทำให้ต้องใช้เวลาในการหาผลเฉลยนานขึ้นในกรณีที่ M มีค่าต่างกันมาก สำหรับเครือข่าย WP จะเห็นว่าต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานกว่าเครือข่าย VWP ค่อนข้างชัดเจนโดยเฉพาะเมื่อ M มีค่ามากขึ้น จากที่กล่าวมาทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่มีจำนวน constraint และตัวแปรมากกว่าน่าจะต้องใช้เวลาในการหาผลเฉลยมากกว่าแต่ในบางกรณีอาจไม่เป็นจริงซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองด้วย แต่ความแตกต่างที่ค่อนข้างจะเห็นได้ชัดคือการทำให้เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ และในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นจะทำให้แบบจำลองคณิตศาสตร์ต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของเครือข่าย 4 และ 5 โหนดจะเห็นว่าเครือข่าย 5 โหนดต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานกว่าค่อนข้างมาก ดังเช่นในกรณีที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR เมื่อ $M=4$ เครือข่าย 4 โหนดใช้เวลาเพียง 3.42 วินาที แต่เครือข่าย 5 โหนดใช้เวลาถึง 1 วันทั้งๆ ที่มีจำนวนโหนดเพิ่มขึ้นเพียง 1 โหนดเท่านั้น ซึ่งถ้าพิจารณาจากตารางที่ 3.9 และ 3.10 จะเห็นว่าแบบจำลองสำหรับเครือข่าย 5 โหนดจะมีจำนวน constraint และตัวแปรมากกว่าเครือข่าย 4 โหนดดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งเป็นเพราะจำนวนข่ายเชื่อมโยงและจำนวนเส้นทางที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีจำนวนโหนดเพิ่มขึ้น จึงทำให้ต้องใช้เวลาในการหาผลเฉลยเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น แบบจำลองคณิตศาสตร์จะมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ทำให้ต้องใช้เวลาในการหาผลเฉลยเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอาจจะนานเกินความเหมาะสม ด้วยเหตุนี้แบบจำลองคณิตศาสตร์จึงไม่เหมาะกับการหาผลเฉลยของเครือข่ายที่มีขนาดกลางหรือขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นในบทต่อไปของวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาและพัฒนาฮิวริสติกอัลกอริทึมเพื่อให้สามารถหาผลเฉลยสำหรับเครือข่ายขนาดกลางได้

ตารางที่ 3.11 เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครือข่าย 4 โหนด (sec)

M	Protection Scheme (VWP)					Protection Scheme (WP)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	0.01	0.51	0.35	0.09	0.04	0.01	0.51	0.34	0.09	0.04
2	0.02	0.39	0.46	0.12	0.04	0.04	57.61	2.10	0.51	0.66
3	0.02	0.37	0.44	0.12	0.05	0.05	21.89	56.72	1.10	11.65
4	0.01	0.24	0.34	0.11	0.06	0.05	4.07	10.64	2.01	3.42
5	0.01	0.31	0.42	0.14	0.04	0.10	11.06	9.79	3.14	16.59
6	0.01	0.32	0.43	0.15	0.05	0.15	25.46	78.10	4.56	78.38

ตารางที่ 3.12 เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครือข่าย 5 โหนด

M	Protection Scheme (VWP)					Protection Scheme (WP)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	0.11s	2.29m	1.59m	3.68s	1.09s	0.11s	2.31m	1.58m	3.72s	1.11s
2	0.04s	1.78m	15.71m	3.95s	6.61s	0.22s	19.07m	4.85m	13.33m	2.93m
3	0.03s	1.44hr	40.39m	3.93s	2.17s	0.19s	1.70hr	19.41m	48.51m	1.55m
4	0.17s	48.53s	7.16m	3.3s	3.3s	1.31s	38.54m	16.65hr	22.16m	>1 day
5	0.25s	11.25m	24.62m	3.5s	23.07s	5.61s	19.31m	2.02hr	23.69m	8.39hr
6	0.06s	5.2s	17.19s	3.4s	1.2s	0.92s	10.67m	3.50hr	1.66hr	1.12hr

3.4.2 ผลของกราฟฟิค

ในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของกราฟฟิคที่มีต่อผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ เครือข่ายที่ใช้ในการทดลองเป็นเครือข่ายขนาด 5 โหนด 10 ข่ายเชื่อมโยง โดยที่เครือข่ายสามารถแปลงผันความยาวคลื่นได้ ทั้งนี้กำหนดให้ค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยง ($\alpha_{i,j}$) และเส้นใยแก้วนำแสง ($\beta_{i,j}$) มีค่าเท่ากับ 1 ในส่วนแรกจะศึกษาถึงผลของรูปแบบกราฟฟิคที่แตกต่างกัน รูปแบบกราฟฟิคที่ใช้ในการทดสอบมีด้วยกัน 3 รูปแบบคือ แบบยูนิฟอร์ม, แบบแรนดอม และแบบสตาร์ซึ่งหมายถึงรูปแบบกราฟฟิคที่มีปริมาณกราฟฟิคไปยังโหนดหนึ่งมากกว่าโหนดอื่น โดยกราฟฟิคทั้ง 3 แบบมีปริมาณกราฟฟิครวมเท่ากัน ตารางที่ 3.13 แสดงค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เมื่อเครือข่ายมีกราฟฟิคแบบต่างๆ กัน (สำหรับผลเฉลยของกราฟฟิคแบบยูนิฟอร์มเป็นดังตารางที่ 3.6) จากตารางจะเห็นได้ว่าเครือข่ายที่มีกราฟฟิคต่างกันทั้ง 3 รูปแบบ เครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้มีต้นทุนสูงกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธี จะเห็นว่าเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี DJP มีต้นทุนสูงที่สุดตามด้วยวิธี LR, SLB และ MC ตามลำดับ และค่าต้นทุนมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า M มากขึ้น จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าไม่ว่าเครือข่ายมีรูปแบบกราฟฟิคเป็นแบบใดก็จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนของกราฟฟิคแต่ละแบบ จะเห็นว่าต้นทุนอาจจะเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า M และวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ เช่นในกรณีที่ $M=1$ เมื่อเครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR กราฟฟิคแบบยูนิฟอร์มมีต้นทุนเท่ากับ 25 ในขณะที่กราฟฟิคแบบแรนดอมและสตาร์มีต้นทุนเท่ากับ 24 และ 27 ตามลำดับ หรือในกรณีที่ $M=5$ เมื่อเครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB กราฟฟิคทั้ง 3 แบบมีต้นทุนเท่ากัน รวมทั้งในบางกรณีกราฟฟิครูปแบบหนึ่งมีต้นทุนมากที่สุดแต่ในบางกรณีกราฟฟิคอีกรูปแบบหนึ่งกลับมีต้นทุนมากกว่า ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ทุกๆ ค่า M และวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธี จะเห็นว่าไม่สามารถสรุปได้ว่าเครือข่ายที่มีกราฟฟิคแบบใดต้องการต้นทุนมากกว่าแบบใด

ตารางที่ 3.14 แสดงจำนวนข่ายเชื่อมโยงของผลเฉลยเมื่อเครือข่ายมีรูปแบบกราฟฟิคแตกต่างกัน (สำหรับผลเฉลยของกราฟฟิคแบบยูนิฟอร์มเป็นดังตารางที่ 3.8) เมื่อพิจารณาผลเฉลยของเครือข่ายที่มีกราฟฟิคต่างกันทั้ง 3 แบบจะเห็นว่าจำนวนข่ายเชื่อมโยงมีแนวโน้มว่ามีจำนวนลดลงเมื่อค่า M มากขึ้น เมื่อพิจารณาในกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้จะเห็นว่าจำนวนข่ายเชื่อมโยงมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ ในกรณีที่เปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีจะได้ว่าวิธี DJP ต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงมากที่สุด จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าไม่ว่ากราฟฟิคมีรูปแบบใดความสัมพันธ์ของจำนวนข่ายเชื่อมโยงจะเป็นไปในลักษณะเดียวกันเช่นเดียวกับในกรณีที่พิจารณาถึงค่าต้นทุนดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

เมื่อเปรียบเทียบจำนวนข่ายเชื่อมโยงของผลเฉลยสำหรับเครือข่ายที่มีกราฟฟิกแบบต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อค่า M เท่ากันและใช้การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีเดียวกันจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ต้องการในบางกรณีอาจจะไม่เท่ากัน แสดงให้เห็นว่ารูปแบบกราฟฟิกมีผลต่อจำนวนข่ายเชื่อมโยงหรือ connectivity ของเครือข่าย แต่อย่างไรก็ตามจากตารางไม่สามารถสรุปได้ว่ากราฟฟิกแบบใดต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงมากกว่าแบบใดเช่นเดียวกับในกรณีที่พิจารณาถึงต้นทุนของเครือข่ายที่มีรูปแบบกราฟฟิกต่างกัน ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 3.13 ค่าต้นทุนของผลเฉลยสำหรับเครือข่าย 5 โหนดที่มีรูปแบบกราฟฟิกต่างกัน

M	Protection Scheme (RANDOM TRAFFIC)					Protection Scheme (STAR TRAFFIC)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	18	24	24	26	24	16	27	27	28	27
2	13	18	18	18	18	12	18	18	19	18
3	10	14	14	14	14	10	15	15	16	16
4	10	12	12	14	14	10	14	14	14	14
5	9	12	12	14	12	9	12	12	12	12
6	9	10	10	14	10	9	12	12	12	12

ตารางที่ 3.14 จำนวนข่ายเชื่อมโยงของผลเฉลยสำหรับเครือข่าย 5 โหนดที่มีรูปแบบกราฟฟิกต่างกัน

M	Protection Scheme (RANDOM TRAFFIC)					Protection Scheme (STAR TRAFFIC)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	7	9	9	9	9	6	8	7	9	7
2	5	7	8	9	7	6	7	7	8	7
3	5	7	7	7	7	6	6	6	7	7
4	5	6	6	7	6	6	6	6	7	7
5	5	6	6	7	6	5	6	6	6	6
6	5	5	5	7	5	5	6	6	6	6

ในส่วนนี้จะศึกษาถึงผลของปริมาณกราฟฟิกรวมของเครือข่าย เครือข่ายที่ใช้ในการทดลองเป็นเครือข่ายเดียวกันกับการทดลองข้างต้น โดยกราฟฟิกของเครือข่ายเป็นแบบยูนิฟอร์มที่มีขนาดต่างกัน และกำหนดให้ค่า $M=6$ ตารางที่ 3.15ก แสดงค่าต้นทุนของเครือข่ายที่มีปริมาณกราฟฟิกต่างกัน ขนาดของกราฟฟิกที่แสดงในตารางเป็นปริมาณกราฟฟิกของแต่ละโหนด จากตารางจะเห็นว่าทั้งเครือข่ายที่สามารถและไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่มีต้นทุนเพิ่มขึ้นตามปริมาณกราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น เมื่อกราฟฟิกมีขนาดเท่ากับ 1 ต้นทุนของเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทาง

ทางใหม่วิธี MC, SLB และ LR จะมีค่าเท่ากับและมีค่าใกล้เคียงกับเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ แต่เมื่อทราฟฟิกมีขนาดมากกว่า 1 เครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่มีต้นทุนสูงกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ค่อนข้างมาก เช่น เมื่อทราฟฟิกมีขนาดเท่ากับ 2 จะมีต้นทุนสูงกว่าประมาณ 50-60% เป็นเพราะว่าเมื่อขนาดทราฟฟิกเท่ากับ 1 ปริมาณทราฟฟิกรวมค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับจำนวนช่องสัญญาณในเส้นใยแก้วนำแสงซึ่งจะเห็นได้จากตารางว่าเครือข่ายมีต้นทุนเท่ากับ 10 ในกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ (ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้) และเท่ากับ 9 ในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ จึงทำให้เครือข่ายทั้งสองมีต้นทุนต่างกันไม่มาก แต่เมื่อปริมาณทราฟฟิกรวมมากขึ้นการใช้งานช่องสัญญาณมากขึ้น ช่องสัญญาณว่างบนเส้นใยแก้วนำแสงจึงน้อยลง ทำให้ต้นทุนของเครือข่ายทั้งสองจึงแตกต่างกันค่อนข้างมาก สำหรับเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP จะเห็นว่าเมื่อขนาดทราฟฟิกเท่ากับ 1 ต้นทุนสูงกว่าวิธีอื่นเนื่องมาจากข้อจำกัดในเรื่องเส้นทางดังที่กล่าวมาแล้ว แต่เมื่อปริมาณทราฟฟิกสูงขึ้นการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีกลับมีต้นทุนเท่ากัน เป็นเพราะว่าเมื่อปริมาณทราฟฟิกมากขึ้นเส้นทางที่ใช้ในการจัดสรรมีแนวโน้มจะเป็นเส้นทางที่มีความยาวน้อย (ดังตารางที่ 3.15x ที่กล่าวต่อไป) ค่าต้นทุนของวิธี DJP จึงเท่ากับวิธีอื่น ดังจะเห็นได้จากตารางเมื่อทราฟฟิกมีขนาดเท่ากับ 4 และ 5

ตารางที่ 3.15 ค่าต้นทุนและจำนวนข่ายเชื่อมต่อของผลเฉลยสำหรับเครือข่าย 5 โหนดที่มีปริมาณทราฟฟิกต่างกัน เมื่อกำหนดให้ $M=6$

(ก) ค่าต้นทุน

Traffic volume	Protection Scheme				
	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	9	10	10	14	10
2	10	15	15	16	15
3	13	16	16	18	18
4	15	20	20	20	20
5	18	24	24	24	24

(ข) จำนวนข่ายเชื่อมโยง

Traffic volume	Protection Scheme				
	NO	MC	SLB	DJP	LR
1	5	5	5	7	5
2	5	5	5	8	5
3	6	8	8	9	9
4	5	8	8	10	10
5	5	8	8	8	8

ตารางที่ 3.15x ซึ่งแสดงจำนวนข่ายเชื่อมโยงของผลเฉลยสำหรับเครือข่ายที่มีปริมาณจราจรต่างกัน จากตารางจะเห็นว่าที่ปริมาณจราจรทุกขนาด เครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ต้องการข่ายเชื่อมโยงจำนวนมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ และเมื่อพิจารณาระหว่างเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธี วิธี DJP ต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงมากที่สุดดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว สำหรับเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่จะเห็นว่าในกรณีที่จราจรของเครือข่ายมีปริมาณเพิ่มขึ้น จำนวนข่ายเชื่อมโยงจะเพิ่มขึ้นเพียง 1 ข่ายเชื่อมโยงเมื่อจราจรมีขนาดเท่ากับ 3 แล้วจึงกลับลดลงไปมีจำนวนเป็นเท่าเดิม เป็นเพราะว่าเมื่อขนาดของจราจรมากขึ้นปริมาณจราจรเมื่อเทียบกับจำนวนช่องสัญญาณบนเครือข่ายมากขึ้น การจัดสรรเส้นทางเพื่อให้สามารถใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงร่วมกันจึงทำได้น้อย การวางข่ายเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถจัดสรรเส้นทางที่ความยาวน้อยลงจึงทำให้ได้ต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงที่ดีกว่า แต่ว่าการวางข่ายเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นก็ทำให้ต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงสูงขึ้นด้วย ซึ่งการวางข่ายเชื่อมโยงเพิ่มจะทำให้ได้ต้นทุนที่ดีขึ้นหรือไม่นั้นก็ขึ้นอยู่กับค่า M ของเส้นใยแก้วนำแสงด้วย ในการทดลองนี้ได้กำหนดค่า $M=6$ ซึ่งค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับปริมาณจราจรของเครือข่าย ดังนั้นจึงทำให้จำนวนข่ายเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแล้วจึงกลับลดลง

เมื่อพิจารณาเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ จะเห็นว่าเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่โดยใช้วิธี MC และ SLB ต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น และจะคงที่เมื่อขนาดของจราจรมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่วิธี DJP และ LR ต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นจนเครือข่ายเป็นแบบ full-mesh เมื่อขนาดจราจรเพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับ 4 และจำนวนข่ายเชื่อมโยงจะลดลงเมื่อขนาดจราจรมีค่าเพิ่มขึ้นอีก ในกรณีนี้การวางข่ายเชื่อมโยงเพิ่มถึงแม้ว่าจะช่วยให้สามารถจัดสรรเส้นทางที่มีความยาวน้อยลงได้ แต่ก็ต้องคำนึงถึงการป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงนั้นด้วย จึงทำให้ออกนอกจะมีต้นทุนเพิ่มจากข่ายเชื่อมโยงที่วางเพิ่มแล้ว อาจจะต้องการเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มเพื่อใช้ในการป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงที่วางเพิ่ม แต่ต้นทุนที่เพิ่ม

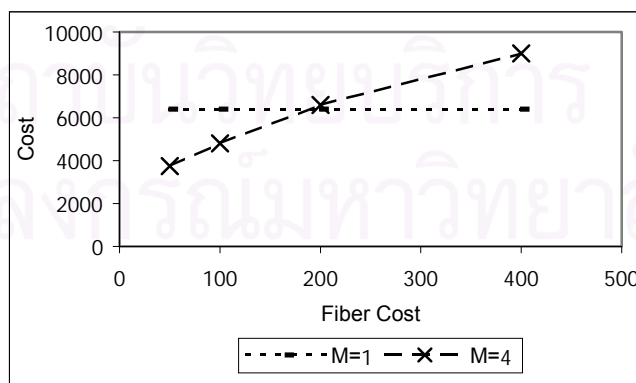
ขึ้นนี้อาจน้อยกว่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงที่ลดลงได้จากการวางขายเชื่อมโยงเพิ่ม ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับค่า M ด้วย แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้นี้ มีแนวโน้มว่าเครือข่ายต้องการขายเชื่อมโยงจำนวนมากขึ้นเมื่อปริมาณทราฟฟิกเพิ่มขึ้นซึ่งต่างจากเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ที่มีแนวโน้มในการเพิ่มจำนวนขายเชื่อมโยงเพียงเล็กน้อย จากที่กล่าวมาสรุปได้ว่าเมื่อปริมาณทราฟฟิกของเครือข่ายเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนขายเชื่อมโยงมากขึ้น โดยที่เครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่มีแนวโน้มในการเพิ่มจำนวนขายเชื่อมโยงมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ แต่ในบางกรณีการเพิ่มของทราฟฟิกอาจจะทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนขายเชื่อมโยงลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า M รวมทั้งความสามารถและวิธีในการจัดสรรเส้นทางใหม่ของเครือข่าย

3.4.3 ผลของค่าต้นทุนของขายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสง

จากในหัวข้อที่ผ่านมาได้กำหนดให้ค่าต้นทุนของขายเชื่อมโยง ($\alpha_{i,j}$) และเส้นใยแก้วนำแสง ($\beta_{i,j}$) มีค่าเท่ากับ 1 ในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของค่า $\alpha_{i,j}$ และ $\beta_{i,j}$ โดยกำหนดให้ทุกขายเชื่อมโยงมีค่า $\alpha_{i,j}$ และ $\beta_{i,j}$ เท่ากัน เครือข่ายที่ใช้ในการทดลองเป็นเครือข่าย 5 โหนด 10 ขายเชื่อมโยง ทราฟฟิกของเครือข่ายเป็นแบบยูนิฟอর্মขนาดเท่ากับ 3 และกำหนดให้เครือข่ายสามารถแปลงผันความยาวคลื่นได้ รูปที่ 3.1 และ 3.2 แสดงต้นทุนของผลเฉลยสำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB และ LR ตามลำดับที่ค่า $\beta_{i,j}$ ต่างกันโดยกำหนดให้ $\alpha_{i,j}=500$ จากที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้วว่าต้นทุนของเครือข่ายจะลดลงเมื่อ M มากขึ้นโดยที่กำหนดให้ค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากับทุกค่า M ดังนั้นในการเลือกใช้เครือข่ายที่มีค่า M สูงกว่าอาจจะมีค่าต้นทุนมากกว่าเครือข่ายที่มีค่า M ต่ำกว่าได้ ถ้าหากค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงที่มีค่า M สูงกว่ามีค่ามากกว่าเส้นใยแก้วนำแสงที่มี M ต่ำกว่า จากรูปที่ 3.1ก จะเห็นว่าเครือข่ายที่มีค่า $M=4$ มีค่าต้นทุนต่ำกว่าเครือข่ายที่มีค่า $M=1$ เมื่อค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงที่มี $M=4$ สูงกว่าเส้นใยแก้วนำแสงที่มี $M=1$ ได้ไม่เกินประมาณ 4 เท่า แต่ในกรณีที่พิจารณา ระหว่างเครือข่ายที่มีค่า $M=4$ และ $M=16$ ดังรูปที่ 3.1ข ค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงที่ค่า $M=16$ จะสูงกว่าได้ประมาณ 3 เท่าจึงยังให้ค่าต้นทุนที่ต่ำกว่า ซึ่งจะเห็นว่าอัตราส่วนต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงดังกล่าวลดลงทั้งๆ ที่ค่า M เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่ากัน เป็นเพราะว่าเมื่อ $M=1$ การจัดสรรช่องสัญญาณบนเส้นใยแก้วนำแสงสามารถทำได้ดีกว่าเมื่อ $M=4$ การเปลี่ยนจากเครือข่ายที่มี $M=1$ เป็นเครือข่ายที่มี $M=4$ จึงสามารถลดต้นทุนในกรณีที่ค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงคงที่ได้มากกว่าการเปลี่ยนจากเครือข่ายที่มี $M=4$ ไปเป็นเครือข่ายที่มี $M=16$ สำหรับในกรณีที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR จากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับ

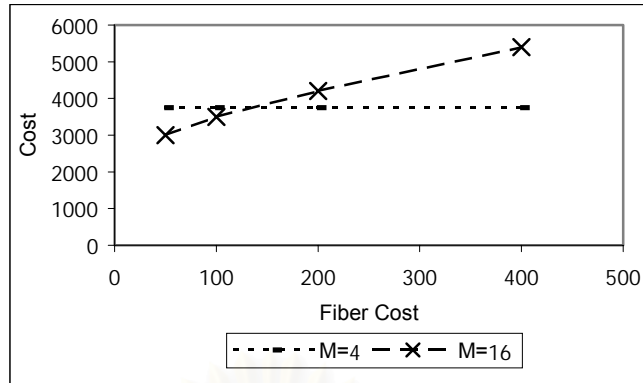
เครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB ดังที่กล่าวมา เมื่อพิจารณาที่ค่า M คงที่ค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ต้นทุนของเครือข่ายเพิ่มขึ้น ถ้าพิจารณาถึงผลของค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงที่มีต่อจำนวนข่ายเชื่อมโยงและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจะได้ว่า ต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลง แต่กลับทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงมากขึ้น เป็นเพราะว่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงที่สูงขึ้นทำให้ในการหาผลเฉลยพยายามลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงให้น้อยลง ซึ่งการวางข่ายเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นทำให้เครือข่ายมีจำนวนเส้นทางมากขึ้น จึงสามารถจัดสรรเส้นทางให้ใช้เส้นใยแก้วนำแสงน้อยลงได้ ดังนั้นเครือข่ายจึงต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.16 แสดงต้นทุนของเครือข่ายที่มีค่า $\alpha_{i,j}$ ต่างกัน โดยกำหนดให้ค่า $\beta_{i,j}=50$ จากตารางจะเห็นว่าต้นทุนของเครือข่ายมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่า $\alpha_{i,j}$ มากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงผลที่มีต่อจำนวนข่ายเชื่อมโยง จะเห็นว่าการเพิ่มค่า $\alpha_{i,j}$ ทำให้เครือข่ายมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อยลง เนื่องจากค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงที่สูงขึ้น ดังนั้นในการหาผลเฉลยจึงพยายามจะวางข่ายเชื่อมโยงให้น้อย เช่น เมื่อ $\alpha_{i,j}=50$ จะได้เครือข่ายเป็นแบบ full-mesh แต่เมื่อ $\alpha_{i,j}=1000$ จะได้เครือข่ายเป็นแบบวงแหวน เมื่อพิจารณาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เครือข่ายต้องการ ค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงที่สูงขึ้นจะทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากขึ้น เพราะว่าจากการที่เครือข่ายมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อยลง แต่ว่าเครือข่ายต้องสามารถรองรับทราฟฟิกปริมาณเท่าเดิมได้ ปริมาณทราฟฟิกที่ผ่านแต่ละข่ายเชื่อมโยงจึงมากขึ้น ทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงบนแต่ละข่ายเชื่อมโยงมากขึ้น เช่น เมื่อ $\alpha_{i,j}=50$ จะมีเส้นใยแก้วนำแสง 4 เส้นบนแต่ละข่ายเชื่อมโยง และเมื่อ $\alpha_{i,j}=1000$ จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงบนแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะเพิ่มขึ้นเป็น 18 เส้น ดังนั้นจึงทำให้เครือข่ายต้องการเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้น เมื่อต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงสูงขึ้น



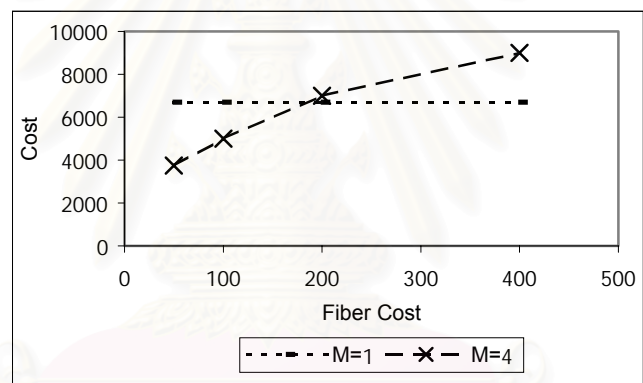
(ก) $M=1,4$

รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าต้นทุนและค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง ($\beta_{i,j}$) โดยกำหนด $\alpha_{i,j}=500$ สำหรับเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB

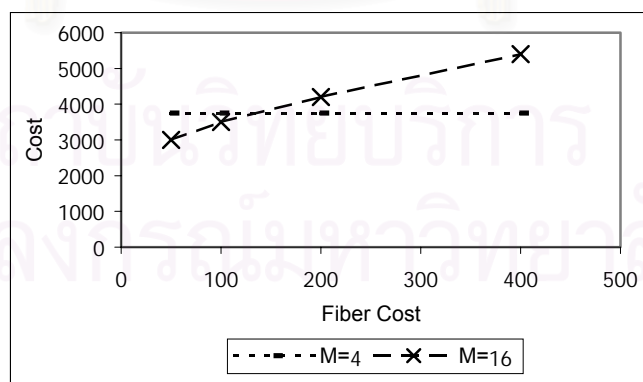


(ข) M=4,16

รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าต้นทุนและค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง ($\beta_{i,j}$) โดยกำหนด $\alpha_{i,j}=500$ สำหรับเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB (ต่อ)



(ก) M=1,4



(ข) M=4,16

รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าต้นทุนและค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง ($\beta_{i,j}$) โดยกำหนด $\alpha_{i,j}=500$ สำหรับเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR

ตารางที่ 3.16 ค่าต้นทุนของเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB และ LR โดยมีค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยง ($\alpha_{i,j}$) ต่างกัน และกำหนดให้ $\beta_{i,j}=50$

Link Cost	SLB			LR		
	Cost	Link	Fiber	Cost	Link	Fiber
50	2500	10	40	2500	10	40
250	4400	8	48	4500	10	40
500	6400	8	48	6700	8	54
750	8100	6	72	8250	5	90
1000	9500	5	90	9500	5	90

3.4.4 ผลเฉลยของการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเครือข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย

จากที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นการออกแบบโทโปโลยี การจัดสรรเส้นทางที่เป็น active path และ protection path (รวมทั้งการจัดสรรความยาวคลื่น ในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น) ในขั้นตอนเดียว สำหรับในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างการหาผลเฉลยหรือ Optimize ในขั้นตอนเดียว ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า Joint-Optimization (ดังที่ได้ใช้ในการหาผลเฉลยของหัวข้อที่ 3.4.1-3.4.3) และการ Optimize ใน 2 ขั้นตอนซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า 2-step Optimization สำหรับการหาผลเฉลยแบบ Joint-Optimization เป็นการออกแบบสำหรับเครือข่ายที่ยังไม่มีการวางข่ายเชื่อมโยง ข้อมูลที่ต้องการสำหรับการหาผลเฉลยได้แก่ ชุดของโหนด, ชุดของข่ายเชื่อมโยง และกราฟฟิกของเครือข่าย ส่วนในกรณีของการหาผลเฉลยแบบ 2-step Optimization จะพิจารณาการหาผลเฉลยเป็น 2 ขั้นตอนคือ ส่วนแรกเป็นการออกแบบโทโปโลยีรวมทั้งการจัดสรรเส้นทางที่เป็น active path และในส่วนที่สองเป็นการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อให้เครือข่ายสามารถป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงได้ ในการหาผลเฉลยแบบ 2-step เป็นการหาผลเฉลยสำหรับเครือข่ายที่มีการวางข่ายเชื่อมโยงพร้อมกับการจัดสรรเส้นทาง (active path) ไว้แล้วเพื่อจัดสรรให้เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้เมื่อเกิดการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับหาผลเฉลยขั้นตอนแรกของวิธี 2-step ได้แก่ชุดสมการในหัวข้อที่ 3.2.2 และ 3.2.3 (หรือ 3.2.5 สำหรับเครือข่าย WP) ซึ่งเครือข่ายที่เป็นผลเฉลยอาจมีทรัพยากรไม่เพียงพอในการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลบหลีกเลี่ยงข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย ส่วนการหาผลเฉลยในขั้นตอนที่สองจะได้จากการหาผลเฉลยของชุดสมการในหัวข้อที่ 3.2.4 (หรือ 3.2.6 สำหรับเครือข่าย WP) ซึ่งข้อมูลที่ต้องการใช้ในการหาผลเฉลยในขั้นตอนนี้ได้แก่รูปแบบของ

โทโปโลยีและ active path ที่ใช้รองรับทราฟฟิกระหว่างคูโนดที่ได้จากผลเฉลยในขั้นตอนแรก เครือข่ายที่ใช้ในการทดลองเป็นเครือข่าย 4 โนด 6 ข่ายเชื่อมโยง และเครือข่าย 5 โนด 10 ข่ายเชื่อมโยง โดยทั้งสองเครือข่ายมีทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์มขนาดเท่ากับ 1 และกำหนดให้เครือข่ายสามารถแปลงผันความยาวคลื่นได้ (VWP)

ตารางที่ 3.17 แสดงค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากการหาผลเฉลยแบบ Joint และ 2-step จากตารางเมื่อพิจารณาผลเฉลยของเครือข่าย 4 โนดที่ได้จากวิธี 2-step จะเห็นว่าค่าต้นทุนจะลดลงตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น และต้นทุนของเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR มีค่าสูงกว่าวิธี SLB ซึ่งจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกับผลเฉลยที่ได้จากวิธี Joint เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนที่ได้จากการหาผลเฉลยโดยวิธี Joint และ 2-step ค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากวิธี 2-step มีค่ามากกว่าเป็นเพราะว่าผลเฉลยที่ได้ในขั้นตอนแรกจากวิธี 2-step ซึ่งเป็นผลเฉลยที่มีโทโปโลยีและการจัดสรร active path ที่ไม่ได้คำนึงถึงการจัดสรรเส้นทางใหม่อาจจะไม่ใช่ผลเฉลยที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณารวมการจัดสรรเส้นทางใหม่เข้าไปด้วย แต่ว่าการหาผลเฉลยแบบ Joint จะพิจารณาทั้งหมดไปพร้อมกันทำให้สามารถปรับปรุงโทโปโลยีและการจัดสรร active path ให้เหมาะสมได้จึงทำให้ผลเฉลยที่ได้มีต้นทุนต่ำกว่า ซึ่งจากตารางวิธี 2-step ให้ค่าต้นทุนสูงกว่าประมาณ 0-50% เมื่อพิจารณาระหว่างการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งสองวิธีจะเห็นว่าวิธี LR มีความแตกต่างของต้นทุนที่ได้จากวิธีการหาผลเฉลยทั้งสองวิธีมากกว่าโดยมากถึง 50% ในบางกรณี เช่นเมื่อ M=3 ส่วนในกรณีวิธี SLB มีความแตกต่างของต้นทุนมากที่สุด 25% รวมทั้งวิธี SLB นี้มีจำนวนผลเฉลยที่มีค่าต้นทุนแตกต่างกันน้อยกว่าด้วย เป็นเพราะว่าการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี LR มีเส้นทางที่ใช้ในการจัดสรรจำกัดกว่า

เมื่อพิจารณาผลเฉลยสำหรับเครือข่าย 5 โนดจะเห็นว่าผลเฉลยที่ได้จากวิธี 2-step มีค่าต้นทุนลดลงเมื่อ M เพิ่มขึ้น และต้นทุนของวิธี LR มากกว่าวิธี SLB เช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลเฉลยของทั้งสองวิธีจะได้ว่าวิธี 2-step ให้ต้นทุนมากกว่าดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว ในกรณีของเครือข่าย 5 โนดนี้ผลเฉลยจากวิธี 2-step จะมีต้นทุนมากกว่าประมาณ 0-40% เมื่อพิจารณาการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งสองวิธี วิธี LR มีความแตกต่างของต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากทั้งสองวิธีมากกว่า เช่นเดียวกับเครือข่าย 4 โนด โดยวิธี LR แตกต่างกันประมาณ 0-40% ส่วนวิธี SLB มีต้นทุนแตกต่างกันประมาณ 0-25% แต่อย่างไรก็ตามเมื่อ M มีค่ามากพอต้นทุนที่ได้จากการหาผลเฉลยทั้งสองวิธีจะมีค่าใกล้เคียงหรืออาจจะเท่ากันเป็นเพราะว่าเมื่อจำนวนช่องสัญญาณมากพอ เครือข่ายที่ได้จะเป็นเครือข่ายวงแหวนดังที่กล่าวมาแล้ว โทโปโลยีที่ได้จากการหาผลเฉลยโดยที่เครือข่ายสามารถหรือไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้จึงไม่มีความแตกต่างกัน และเมื่อจำนวนช่องสัญญาณมากพอ การจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อป้องกันการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง

ไม่จำเป็นต้องวางเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่ม ดังนั้นต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากวิธี Joint และ 2-step จะมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากันเมื่อ M มีค่ามาก

ตารางที่ 3.17 ค่าต้นทุนของผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้จากการหาผลเฉลยโดยวิธี

Joint และ 2-step

M	4 node				5 node			
	Joint		2-step		Joint		2-step	
	SLB	LR	SLB	LR	SLB	LR	SLB	LR
1	16	16	20	23	24	25	28	30
2	12	12	12	15	16	18	19	21
3	10	10	12	15	15	15	15	15
4	8	10	8	11	12	14	15	15
5	8	8	8	11	12	14	15	15
6	8	8	8	11	10	10	10	14

ตารางที่ 3.18 เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์โดยการหาผลเฉลยวิธี

Joint และ 2-step (sec)

M	4 node				5 node			
	Joint		2-step		Joint		2-step	
	SLB	LR	SLB	LR	SLB	LR	SLB	LR
1	0.35	0.04	0.05	0.01	95.24	1.09	0.11	0.13
2	0.46	0.04	0.03	0.02	942.79	6.61	0.04	0.05
3	0.44	0.05	0.02	0.02	2423.18	2.17	0.03	0.03
4	0.34	0.06	0.01	0.01	429.73	3.3	0.17	0.17
5	0.42	0.04	0.01	0.01	1477.41	23.07	0.25	0.25
6	0.43	0.05	0.01	0.01	17.19	1.2	0.07	0.06

ตารางที่ 3.18 แสดงเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยสำหรับการหาผลเฉลยวิธี Joint และ 2-step เมื่อพิจารณาเครือข่าย 4 โหนด เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของวิธี Joint จะมากกว่าวิธี 2-step ถึงแม้ว่าในวิธี 2-step ได้แบ่งการพิจารณาการหาผลเฉลยเป็น 2 ขั้นตอน เป็นเพราะว่าในกรณีของการหาผลเฉลยแบบ Joint แบบจำลองคณิตศาสตร์ได้รวม constraint ที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางใหม่ซึ่งทำให้ความซับซ้อนของแบบจำลองเพิ่มขึ้นมาก แต่ในกรณีของการหาผลเฉลยแบบ 2-step ได้แบ่งการหาผลเฉลยเป็น 2 ขั้นตอน แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาผลเฉลยทั้ง 2

ขั้นตอนคือแบบจำลองสำหรับการออกแบบโทโปโลยีและการจัดสรรเส้นทาง และแบบจำลองสำหรับการจัดสรรเส้นทางใหม่ การแยกพิจารณาแบบจำลองออกเป็น 2 ส่วนทำให้ความซับซ้อนของแบบจำลองน้อยลง จึงทำให้ใช้เวลาในการหาผลเฉลยน้อยลง เมื่อพิจารณาจากตารางจะเห็นว่าเวลาที่ใช้แตกต่างกันค่อนข้างมาก นั้นแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสำหรับการหาผลเฉลยแบบ Joint มีความซับซ้อนมากกว่าแบบ 2-step มาก เมื่อพิจารณาผลเฉลยสำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB และ LR ที่ได้จากการหาผลเฉลยแบบ 2-step จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยแตกต่างกันไม่มากซึ่งต่างจากในกรณีที่มีการหาผลเฉลยแบบ Joint เป็นเพราะว่าเครือข่ายที่พิจารณาเป็นเครือข่ายขนาดเล็ก เมื่อใช้วิธีการหาผลเฉลยแบบ 2-step แบบจำลองที่ใช้มีความซับซ้อนน้อย เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจึงน้อยมาก ดังที่แสดงไว้ในตาราง ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยสำหรับการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งสองวิธีจึงแตกต่างกันไม่มาก ซึ่งความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้งสองวิธีนี้น่าจะมีมากขึ้นเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาเครือข่าย 5 โหนดจะเห็นว่าเวลาในการหาผลเฉลยแบบ Joint ใช้เวลามากกว่าการหาผลเฉลยแบบ 2-step เช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB และ LR การหาผลเฉลยแบบ 2-step มีความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยน้อยกว่าการหาผลเฉลยแบบ Joint สำหรับในกรณีของเครือข่าย 5 โหนดจะเห็นว่าความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบ Joint และ 2-step จะมากกว่าเครือข่าย 4 โหนด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นความซับซ้อนของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบ Joint จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก จากที่กล่าวมาทำให้สามารถสรุปได้ว่าถึงแม้ว่าการหาผลเฉลยแบบ Joint ให้ค่าต้นทุนที่ต่ำกว่าการหาผลเฉลยแบบ 2-step แต่ก็ต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานกว่าค่อนข้างมาก เนื่องจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบ Joint มีความซับซ้อนมากกว่ามาก

บทที่ 4

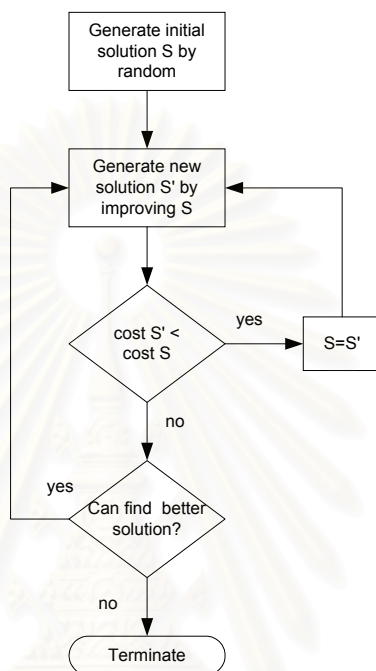
ฮิวริสติกอัลกอริทึม

ในบทนี้จะศึกษาและพัฒนาฮิวริสติกอัลกอริทึมเพื่อนำมาใช้ในการหาผลเฉลยแทนการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แล้วว่าเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจำนวนตัวแปรและสมการจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยจะมากขึ้นตามจนไม่สามารถหาผลเฉลยได้ในเวลาที่เหมาะสม เพราะว่าเทคนิคของ ILP ที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์จะพิจารณาหาผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งหมด วิธีการหาผลเฉลยโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์จึงเหมาะกับเครือข่ายขนาดเล็กเท่านั้น ดังนั้นในบทนี้จึงได้พัฒนาฮิวริสติกอัลกอริทึมเพื่อให้สามารถใช้ในการหาผลเฉลยสำหรับเครือข่ายขนาดกลางได้ เนื่องจากว่าฮิวริสติกอัลกอริทึมไม่ได้พิจารณาผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งหมด จึงทำให้ไม่สามารถให้การรับประกันได้ว่าผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยที่ดีที่สุด เช่นเดียวกับผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ แต่อย่างไรก็ตามผลเฉลยที่ได้จะเป็นผลเฉลยที่ดีในระดับหนึ่งที่สามารถหาได้ในเวลาที่เหมาะสม

หลักการทั่วไปของฮิวริสติกอัลกอริทึม คือ เริ่มจากการหาผลเฉลยเริ่มต้นซึ่งอาจจะได้จากการหาแบบสุ่มหรือจากฮิวริสติกอัลกอริทึมวิธีอื่น จากนั้นทำการปรับปรุงผลเฉลยนั้น ซึ่งถ้าผลเฉลยใหม่ที่ได้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีขึ้นก็จะยอมรับการปรับปรุงผลเฉลยนั้น แล้วปรับปรุงผลเฉลยนั้นต่อไปจนกระทั่งไม่สามารถหาผลเฉลยที่ดีขึ้นได้อีก ผลเฉลยนั้นก็จะเป็ผลเฉลยสุดท้ายของฮิวริสติกอัลกอริทึม หลักการดังกล่าวเป็นวิธีการทั่วไปในการยอมรับการปรับปรุงผลเฉลย ส่วนวิธีในการปรับปรุงผลเฉลยนั้นเป็นวิธีการเฉพาะซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของแต่ละปัญหา จากหลักการดังกล่าวจะนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโทโปโลยีโดยมีแผนผังการทำงาน (Flowchart) ดังรูปที่ 4.1 และมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. หาผลเฉลยเริ่มต้น (Initial Solution) โดยการเลือกวางข่ายเชื่อมต่อโยง จัดสรรเส้นทาง (active path) และเส้นทางที่ใช้ในการป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมต่อโยง (protection path) แบบสุ่ม (รวมทั้งจัดสรรความยาวคลื่นในกรณีนี้ที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น)
2. ทำการสร้างผลเฉลยใหม่โดยการเปลี่ยนแปลงโทโปโลยี และการจัดสรรทรัพยากรบางส่วน ของผลเฉลย (ซึ่งได้แก่ การจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่น รวมทั้งเส้นทางที่ใช้ในการป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมต่อโยง) สำหรับวิธีในการเปลี่ยนแปลงจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไปในหัวข้อ 4.1

3. คำนวณหาต้นทุนของผลเฉลยใหม่ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนที่ 2 ประเมินผลของการเปลี่ยนแปลงนั้นว่าให้ผลเฉลยที่มีค่าต้นทุนที่ต่ำลงหรือไม่
4. ในกรณีที่ต้นทุนต่ำลงจะยอมรับการเปลี่ยนแปลงผลเฉลยนั้น แล้วจึงกลับไปทำในขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งไม่สามารถปรับปรุงผลเฉลยให้มีต้นทุนที่ต่ำลงได้อีก



รูปที่ 4.1 แผนผังแสดงขั้นตอนในการยอมรับการปรับปรุงผลเฉลยของฮิวริสติกอัลกอริทึม

จากหลักการที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งของฮิวริสติกอัลกอริทึมคือจะต้องมีการกำหนดวิธีการปรับปรุงหรือหาผลเฉลยใหม่จากผลเฉลยเริ่มต้น ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไปในหัวข้อที่ 4.1

4.1 อัลกอริทึมในการปรับปรุงผลเฉลย

ในหัวข้อนี้จะเสนอวิธีการปรับปรุงหาผลเฉลยใหม่จากผลเฉลยใดๆ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ 2 ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ขั้นตอนในการออกแบบสามารถแบ่งได้เป็น การกำหนดโทโปโลยีหรือการวางข่ายเชื่อมโยง, การจัดสรรเส้นทาง active path, การจัดสรรเส้นทาง protection path รวมทั้งการจัดสรรความยาวคลื่นในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น ในหัวข้อที่ 4.1.1 จะกล่าวถึงฮิวริสติกอัลกอริทึมแบบที่ 1 ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบทุกขั้นตอน หลังจากนั้นในหัวข้อที่ 4.1.2-4.1.5 จะกล่าวถึงอัลกอริทึมที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนซึ่งได้แก่ การปรับปรุงโทโปโลยี การจัดสรรเส้นทาง active path และ protection path รวมทั้ง

การจัดสรรความยาวคลื่น โดยอัลกอริทึมนี้สามารถนำมาใช้แทนอัลกอริทึมในบางขั้นตอนของ อัลกอริทึมแบบที่ 1 เพื่อปรับปรุงให้อัลกอริทึมสามารถหาผลเฉลยที่ดีกว่าได้

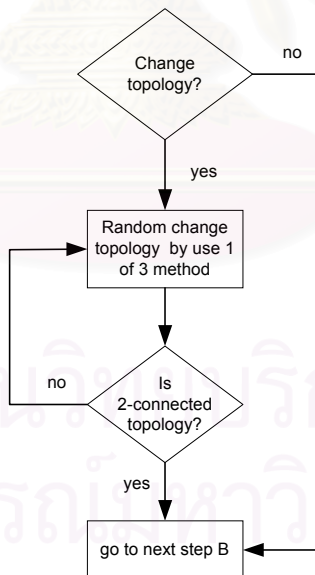
4.1.1 อัลกอริทึมแบบที่ 1 (H1)

สำหรับอัลกอริทึม H1 สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนดังนี้

A. การกำหนดโทโปโลยี

ในการปรับปรุงโทโปโลยีจะใช้วิธีการปรับปรุงแบบสุ่มเพื่อให้มีโอกาสในการเปลี่ยนแปลง ไปสู่โทโปโลยีในรูปแบบต่างกันได้มากที่สุด โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 4.2 สำหรับรายละเอียดในแต่ละ ขั้นตอนเป็นดังนี้

1. เลือกเปลี่ยนแปลงโทโปโลยีด้วยความน่าจะเป็น $P1$ ในกรณีที่ไม่มีเปลี่ยนจะไปยังขั้นตอน B
2. เลือกวิธีการในการปรับปรุงโทโปโลยี 1 ใน 3 วิธีโดยการสุ่มด้วยความน่าจะเป็นเท่าๆกัน ซึ่งได้แก่การเพิ่มข่ายเชื่อมโยง, การดึงเอาข่ายเชื่อมโยงออก และการเปลี่ยนข่ายโยงคือการเอาข่ายเชื่อมโยงออกแล้วเพิ่มข่ายโยงอื่นเข้า โดยที่ข่ายเชื่อมโยงที่เลือกในทั้ง 3 วิธีจะเลือกแบบสุ่ม
3. ตรวจสอบว่าโทโปโลยีที่ได้เป็น 2-Connected หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะกลับไปยังขั้นตอนที่ 2 แต่ถ้าใช่จะไปยังขั้นตอน B ต่อไป



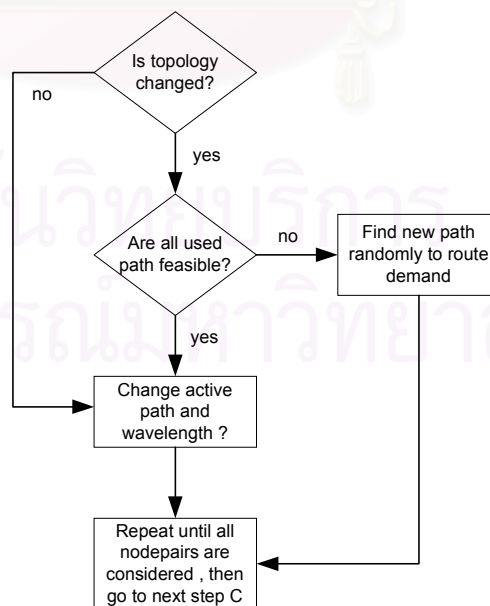
รูปที่ 4.2 แผนผังแสดงขั้นตอนในการปรับปรุงโทโปโลยีของอัลกอริทึม H1

B. การจัดสรรเส้นทาง active path และความยาวคลื่น

ในการปรับปรุงการจัดสรรเส้นทางที่เป็น active path และการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อรองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดจะใช้วิธีการเลือกเส้นทางและความยาวคลื่นอย่างสุ่ม แผนผังการ

ทำงานเป็นดังรูปที่ 4.3 ส่วนรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้ โดยการพิจารณาที่แต่ละคูโนดซึ่งจะทำซ้ำจนกระทั่งครบทุกคูโนด

1. ตรวจสอบว่าในขั้นตอน A มีการเปลี่ยนแปลงโทโปโลยีหรือไม่ ถ้าไม่เปลี่ยนไปขั้นตอนที่ 3
2. ในกรณีที่โทโปโลยีมีการเปลี่ยนแปลงข่ายเชื่อมโยงบางข่ายเชื่อมโยงบางจะถูกนำออกไปจากเครือข่าย ทำให้เส้นทางที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงบางดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาทุกเส้นทางที่ถูกจัดสรรระหว่างคูโนดว่าใช้งานได้หรือไม่ (เส้นทางที่พิจารณาเป็นเส้นทางของผลเฉลี่ยที่จะปรับปรุง) โดยการพิจารณาทุกข่ายเชื่อมโยงบนเส้นทางว่ามีการติดตั้งบนเครือข่ายหรือไม่ ในกรณีที่มิบบางข่ายเชื่อมโยงบนเส้นทางไม่ได้ถูกติดตั้ง เส้นทางนั้นจึงไม่สามารถใช้งานได้ ทำให้ต้องมีการจัดสรรเส้นทางอื่นแทน โดยหาทราฟฟิกรวมบนเส้นทางที่ใช้ไม่ได้ แล้วจึงเลือกเส้นทางและความยาวคลื่นเพื่อรองรับทราฟฟิกนั้นโดยการสุ่ม (สำหรับเครือข่าย VWP ไม่ต้องการจัดสรรความยาวคลื่น) จากนั้นจะทำซ้ำในขั้นตอนนี้โดยพิจารณาคูโนดต่อไปจนกระทั่งครบทุกคูโนด แล้วจึงไปยังขั้นตอน C
3. เลือกเปลี่ยนเส้นทางที่ใช้รองรับทราฟฟิกระหว่างคูโนดด้วยความน่าจะเป็น P2 ในกรณีที่เปลี่ยนเส้นทางจะเลือกหาเส้นทางใหม่เพื่อรองรับทราฟฟิกเท่ากับบนเส้นทางเดิม โดยการเลือกเส้นทางแบบสุ่ม ในกรณีเครือข่าย WP จะเลือกเปลี่ยนความยาวคลื่นที่ใช้รองรับทราฟฟิกด้วยความน่าจะเป็น P4 โดยการเลือกความยาวคลื่นใหม่แบบสุ่มเพื่อรองรับทราฟฟิกปริมาณเท่ากันที่ความยาวคลื่นเดิม จากนั้นจะทำซ้ำในขั้นตอนนี้เพื่อพิจารณาคูโนดต่อไปจนกระทั่งครบทุกคูโนด แล้วไปยังขั้นตอน C

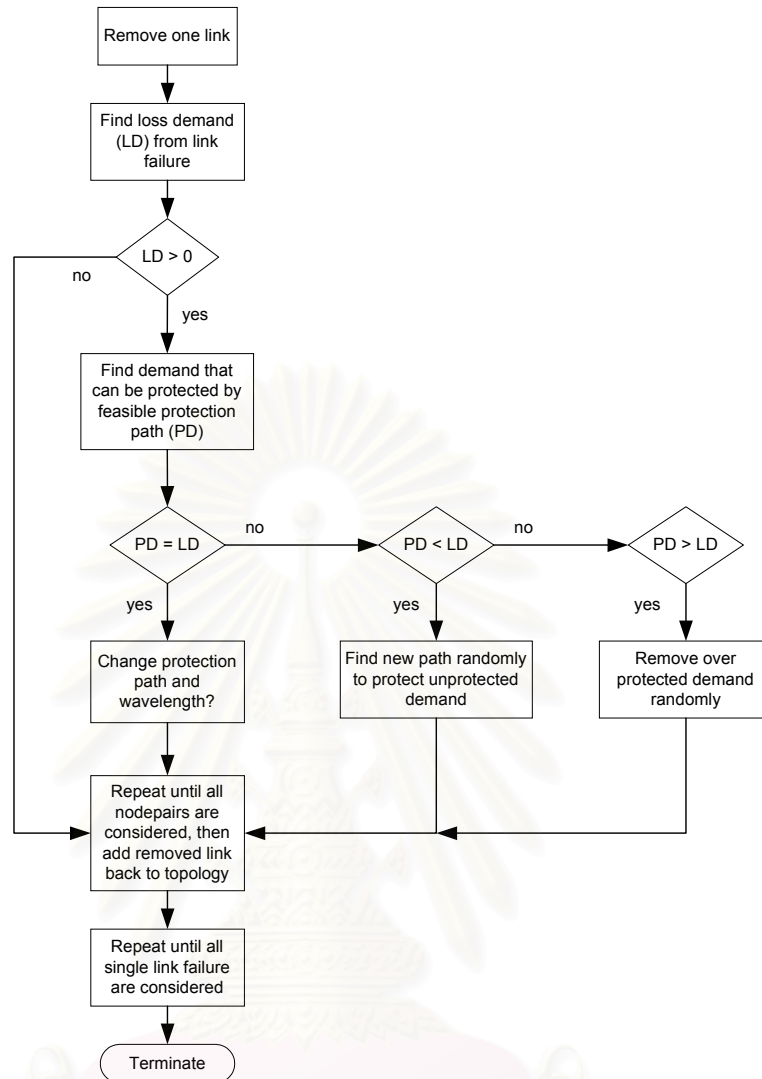


รูปที่ 4.3 แผนผังแสดงขั้นตอนในการปรับปรุงการจัดสรรเส้นทางที่เป็น active path และความยาวคลื่นของอัลกอริทึม H1

C. การจัดสรรเส้นทาง protection path และความยาวคลื่น

ในขั้นตอนนี้จะสมมติว่าเกิดการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงที่ละข่ายเชื่อมโยง แล้วพิจารณาการปรับปรุงการจัดสรร protection path และความยาวคลื่นแบบสุ่มสำหรับแต่ละคู่โหนด จนกระทั่งครบทุกคู่โหนด จากนั้นจึงพิจารณาการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงถัดไปจนกระทั่งครบทุกข่ายเชื่อมโยง แผนผังการทำงานเป็นดังรูปที่ 4.4 โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. สมมุติเหตุการณ์เสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยเอาข่ายเชื่อมโยงออกจากเครือข่ายชั่วคราว
2. หาลมรวมทราฟฟิกของโหนดที่ถูกกระทบจากการเสียหายของข่ายเชื่อมโยง โดยพิจารณาจากเส้นทางที่ได้จัดสรรในขั้นตอน B กำหนดให้มีค่าเท่ากับ LD
3. ถ้าในกรณีที่ LD เท่ากับศูนย์ไปยังขั้นตอนที่ 9
4. หาทราฟฟิกรวมบน protection path ที่ยังสามารถใช้งานได้ซึ่งเส้นทางที่พิจารณาเป็นของผลเฉลยที่จะปรับปรุง (โดยการพิจารณาจากข่ายเชื่อมโยงที่ติดตั้งบนเครือข่ายดังที่ได้กล่าวถึงในขั้นตอน B) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ PD
5. ในกรณีที่ PD เท่ากับ LD จะไปที่ข้อ 6 เมื่อ PD น้อยกว่า LD ไปที่ข้อ 7 และเมื่อ PD มากกว่า LD ไปที่ข้อ 8
6. เลือกเปลี่ยนเส้นทางที่ใช้ด้วยความน่าจะเป็น P3 โดยจะเลือกหาเส้นทางใหม่แบบสุ่มเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกเท่ากับทราฟฟิกบนเส้นทางเดิม ในกรณีที่เครือข่าย WP จะเลือกเปลี่ยนความยาวคลื่นด้วยความน่าจะเป็น P5 โดยการเลือกเปลี่ยนความยาวคลื่นใหม่เพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกเท่ากันบนความยาวคลื่นเดิมแบบสุ่ม จากนั้นไปทำในขั้นตอนที่ 9
7. เลือกเส้นทาง (และความยาวคลื่นสำหรับเครือข่าย WP) ใหม่เพื่อใช้รองรับทราฟฟิกที่มีค่าเท่ากับ LD-PD โดยการเลือกแบบสุ่ม จากนั้นไปทำในขั้นตอนที่ 9
8. ลดปริมาณทราฟฟิกบนเส้นทาง (สำหรับเครือข่าย WP ต้องลดปริมาณทราฟฟิกในบางความยาวคลื่นด้วย) ที่ใช้รองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดออกจนกระทั่ง PD มีค่าเท่ากับ LD โดยการเลือกแบบสุ่ม จากนั้นไปทำในขั้นตอนที่ 9
9. กลับไปยังขั้นตอนที่ 2 เพื่อพิจารณาคู่โหนดต่อไป ในกรณีที่ได้พิจารณาครบทุกคู่โหนดแล้ว จะวางข่ายเชื่อมโยงที่ได้เอาออกในขั้นตอนที่ 1 แล้วกลับไปยังขั้นตอนที่ 1 เพื่อพิจารณาข่ายเชื่อมโยงต่อไป จนกระทั่งครบทุกข่ายเชื่อมโยง



รูปที่ 4.4 แผนผังแสดงขั้นตอนในการปรับปรุงการจัดสรรเส้นทาง protection path และความยาวคลื่นของอัลกอริทึม H1

อัลกอริทึมในขั้นตอน C นี้เป็นอัลกอริทึมสำหรับการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB เมื่อทำซ้ำขั้นตอนจนครบทุกคู่โหนดและทุกข่ายเชื่อมโยง จะเป็นการเสร็จสิ้นขั้นตอนในการปรับปรุงผลเฉลย จากนั้นจึงกลับไปทำยังอัลกอริทึมหลักซึ่งเป็นอัลกอริทึมในการยอมรับการปรับปรุงผลเฉลย ตามรูปที่ 4.1 ซึ่งขั้นตอนต่อไปเป็นการคำนวณหาค่าต้นทุนของผลเฉลย สำหรับเส้นทางที่ใช้ในการจัดสรรในขั้นตอน B และ C จะเลือกจากเส้นทางที่สั้นที่สุด k เส้นทาง (k-shortest paths) ซึ่งจะหาโดยการใช้อัลกอริทึมของ Yen (Yen's Algorithm) [27]

4.1.2 อัลกอริทึมในการปรับปรุงโทโปโลยี

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในการปรับปรุงรูปแบบการวางข่ายเชื่อมโยงหรือโทโปโลยีของเครือข่าย ซึ่งจะถูกนำไปใช้แทนวิธีการที่ใช้ในขั้นตอน A ของอัลกอริทึม H1 รวมทั้งบางวิธีมีเงื่อนไขในการหยุดการทำงานต่างจากแผนผังรูปที่ 4.1 วิธีการปรับปรุงโทโปโลยีสามารถทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

4.1.2.1 วิธี T0 สำหรับวิธีนี้จะหมายถึงวิธีการปรับปรุงโทโปโลยีของอัลกอริทึม H1 ที่ได้กล่าวถึงไว้ในหัวข้อ 4.1.1 ขั้นตอนที่ A

4.1.2.2 วิธี T1 มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดให้โทโปโลยีเริ่มต้นเป็นแบบวงแหวน โดยการสุ่ม
2. วางข่ายเชื่อมโยงเพิ่มให้กับโทโปโลยีเครือข่าย ถ้าให้ต้นทุนที่ต่ำลงจะยอมรับการเพิ่มข่ายเชื่อมโยงนั้น แต่ถ้าไม่พิจารณาข่ายเชื่อมโยงอื่นต่อไป โดยที่จะหยุดการทำงานเมื่อได้พิจารณาการเพิ่มข่ายเชื่อมโยงทุกๆ ข่ายเชื่อมโยงให้กับโทโปโลยีของเครือข่าย

4.1.2.3 วิธี T2 มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดให้โทโปโลยีเริ่มต้นเป็นแบบ Full Mesh
2. เอาข่ายเชื่อมโยงออกจากโทโปโลยีของเครือข่าย โดยที่โทโปโลยีใหม่ต้องเป็นไปตามเงื่อนไข 2-Connected ถ้าโทโปโลยีใหม่ให้ต้นทุนที่ต่ำลงจะยอมรับโทโปโลยีนั้น ถ้าไม่พิจารณาข่ายเชื่อมโยงอื่นต่อไปและจะหยุดการทำงานเมื่อได้พิจารณาการดึงเอาข่ายเชื่อมโยงทุกๆ ข่ายเชื่อมโยงที่เป็นไปได้ออกจากโทโปโลยีของเครือข่าย

4.1.2.4 วิธี T3 มีขั้นตอนดังนี้

1. หาโทโปโลยีเริ่มต้น โดยการสุ่ม (โทโปโลยีดังกล่าวต้องเป็น 2-connected)
2. ทำการปรับปรุงโทโปโลยีใหม่โดยการเอาข่ายเชื่อมโยงออกจากโทโปโลยี และเพิ่มข่ายเชื่อมโยงอื่นเข้าไป โดยที่โทโปโลยีของเครือข่ายต้องเป็นไปตามเงื่อนไข 2-connected
3. ถ้าโทโปโลยีใหม่ให้ต้นทุนที่ต่ำลง จะยอมรับการปรับปรุงโทโปโลยีนั้น และกลับไปขั้นตอนที่ 2 แต่ถ้าให้ต้นทุนสูงขึ้นจะกลับไปขั้นตอนที่ 2 โดยที่จะหยุดการทำงานเมื่อได้พิจารณาโทโปโลยีที่เป็นไปได้ทุกรูปแบบซึ่งได้จากการปรับปรุงในขั้นตอนที่ 2

4.1.2.5 วิธี T4

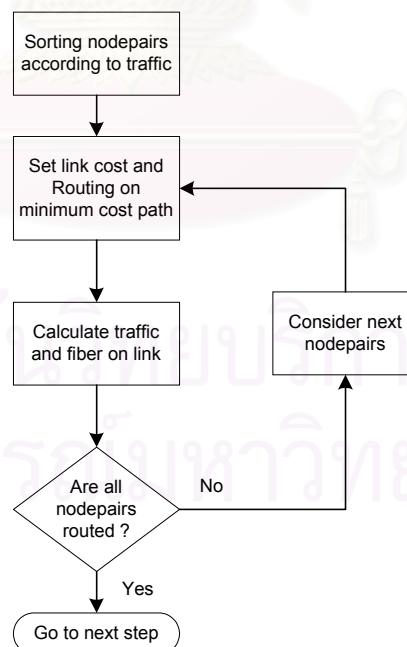
วิธีนี้มีวิธีการคล้ายกับวิธี T0 แต่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยในขั้นตอนที่ 2 คือ วิธี T4 นี้มีค่าความน่าจะเป็นในการเลือกวิธีการปรับปรุงโทโปโลยีทั้ง 3 วิธี และจะใช้ความน่าจะเป็นนี้ในการ

สุ่มเลือกวิธีการปรับปรุงโทโปโลยี ซึ่งเริ่มต้นกำหนดให้มีค่าความน่าจะเป็นเท่ากันทั้ง 3 วิธี ถ้าผลเฉลี่ยที่ได้จากการปรับปรุงโดยวิธีใดให้ต้นทุนที่ต่ำลงจึงเพิ่มความน่าจะเป็นสำหรับการปรับปรุงโทโปโลยีวิธีนั้น และในกรณีที่ได้พิจารณาการปรับปรุงโทโปโลยีจำนวนหนึ่งซึ่งมีค่าต้นทุนที่ไม่ดีขึ้นก็จะลดความน่าจะเป็นของวิธีการปรับปรุงโทโปโลยีที่มีค่ามากที่สุดให้ต่ำลง สำหรับเงื่อนไขในการหยุดการทำงานจะเหมือนกับวิธี T0

4.1.3 อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทาง active path

แผนผังแสดงขั้นตอนในการจัดสรรเส้นทาง active path เป็นดังรูปที่ 4.5 และมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้ (อัลกอริทึมนี้จะนำไปใช้แทนอัลกอริทึมในขั้นตอน B ในหัวข้อ 4.1.1)

1. เรียงคู่โหนดตามปริมาณทราฟฟิกของคู่โหนด โดยเรียงจากมากไปน้อย
2. กำหนดค่าต้นทุนให้กับแต่ละข่ายเชื่อมโยง
3. จัดสรรเส้นทางที่มีต้นทุนที่ต่ำที่สุดเพื่อรองรับทราฟฟิกของคู่โหนดที่พิจารณาโดยการใช้อัลกอริทึมของ Yen (Yen's Algorithm) [27]
4. คำนวณหาปริมาณทราฟฟิกและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงบนแต่ละข่ายเชื่อมโยง
5. กลับไปทำในขั้นตอนที่ 2 เพื่อพิจารณาคู่โหนดถัดไปและจะหยุดเมื่อได้พิจารณาจัดสรรเส้นทางให้กับทุกๆ คู่โหนด



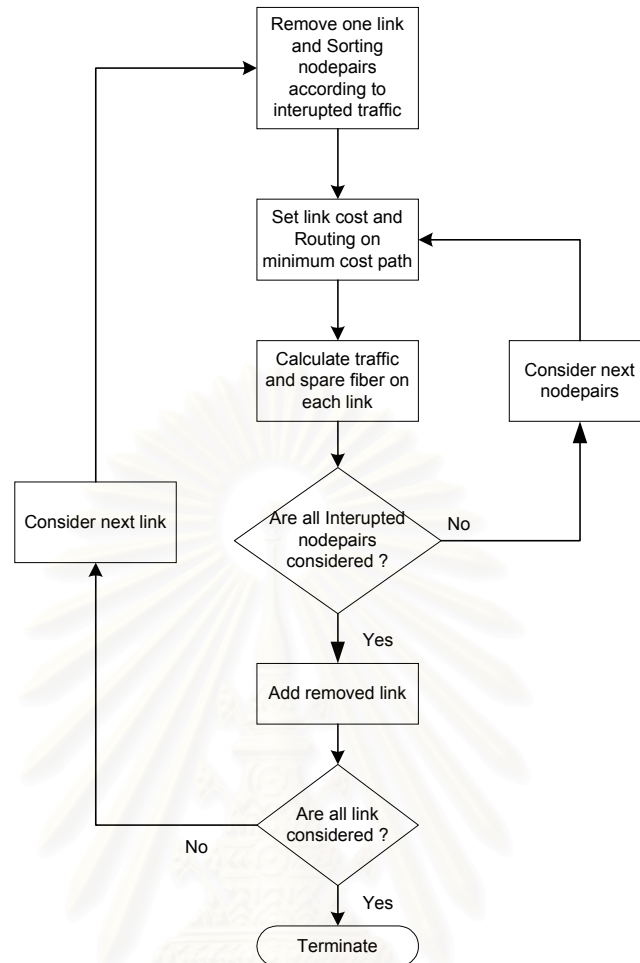
รูปที่ 4.5 แผนผังแสดงอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทาง active path

4.1.4 อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทาง protection path

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อแก้ปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหาย วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ศึกษาในบทนี้มีด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่ SLB, DJP และ LR ซึ่งแต่ละวิธีจะมีอัลกอริทึมแตกต่างกันไป สำหรับอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้จะนำไปใช้ในขั้นตอน C ของหัวข้อที่ 4.1.1 อัลกอริทึมที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี SLB, DJP และ LR มีขั้นตอนดังในหัวข้อที่ 4.1.4.1-4.1.4.3 ตามลำดับ โดยการใช้อัลกอริทึมของ Yen ในการจัดสรรเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุด

4.1.4.1 อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ และมีแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4.6

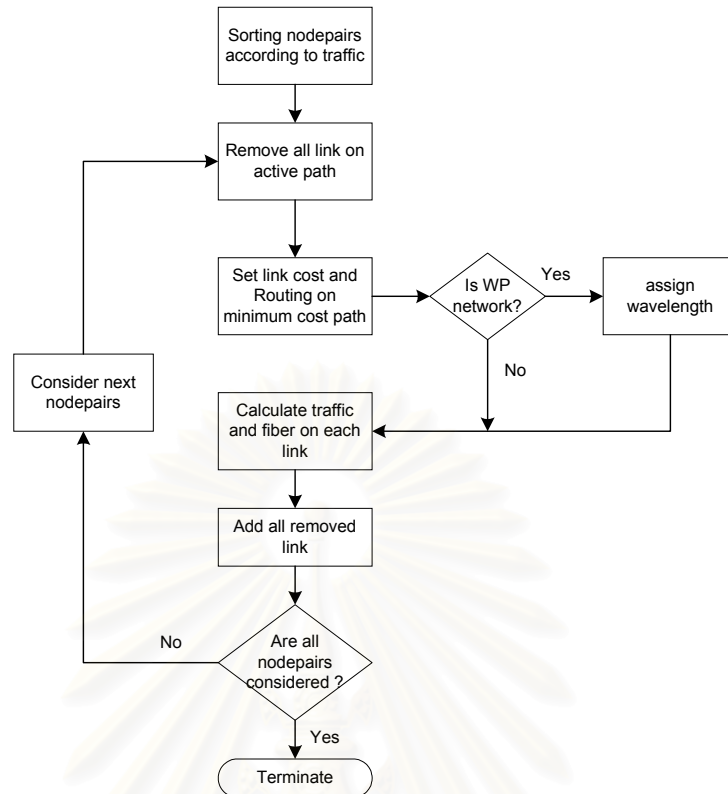
1. เอาข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาออกจากเครือข่าย
2. หาปริมาณกราฟฟิกของแต่ละโหนดที่ถูกรบกวนจากการเอาข่ายเชื่อมโยงในขั้นตอนที่ 1 ออก
3. เรียงโหนดตามลำดับปริมาณกราฟฟิกที่ถูกรบกวนซึ่งได้หาไว้ในขั้นตอนที่ 2 จากมากไปน้อย
4. กำหนดต้นทุนให้กับแต่ละข่ายเชื่อมโยง
5. จัดสรรเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดเพื่อรองรับกราฟฟิกในขั้นตอนที่ 2 ของโหนดที่พิจารณา
6. คำนวณหาค่าปริมาณกราฟฟิกและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองบนแต่ละข่ายเชื่อมโยง
7. กลับไปทำขั้นตอนที่ 4 เพื่อพิจารณายังโหนดถัดไปตามลำดับที่ได้เรียงไว้ตามขั้นตอนที่ 3 ในกรณีที่ได้พิจารณาครบทุกโหนดจะไปยังขั้นตอนที่ 8
8. เพิ่มข่ายเชื่อมโยงในขั้นตอนที่ 1 กลับเข้าไปในเครือข่าย และกลับไปทำขั้นตอนที่ 1 พิจารณาข่ายเชื่อมโยงต่อไปจนกระทั่งครบทุกข่ายเชื่อมโยงจึงหยุดการทำงาน



รูปที่ 4.6 แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB

4.1.4.2 อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ และมีแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4.7

1. เรียงคู่โหนดตามลำดับปริมาณทราฟฟิกของแต่ละโหนดจากมากไปน้อย
2. นำเอาข่ายเชื่อมโยงบนเส้นทางที่เป็น active path ของโหนดที่พิจารณาออกจากเครือข่าย
3. กำหนดค่าต้นทุนให้กับแต่ละข่ายเชื่อมโยง
4. จัดสรรเส้นทางที่ให้ต้นทุนต่ำที่สุดเพื่อใช้ในการรองรับทราฟฟิกของโหนด เมื่อเส้นทางที่เป็น active path ถูกกระทบจากการเสียหายของข่ายเชื่อมโยง สำหรับในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นจะจัดสรรความยาวคลื่นที่มีช่องสัญญาณเหลือมากที่สุดบนเส้นทางนั้น
5. คำนวณหาค่าทราฟฟิกและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงบนแต่ละข่ายเชื่อมโยง
6. เพิ่มข่ายเชื่อมโยงที่เอาออกในขั้นตอนที่ 2 กลับเข้าไปในเครือข่าย
7. กลับไปทำขั้นตอนที่ 2 เพื่อพิจารณาโหนดถัดไปตามลำดับในขั้นตอน 1 จนกระทั่งครบทุกโหนด

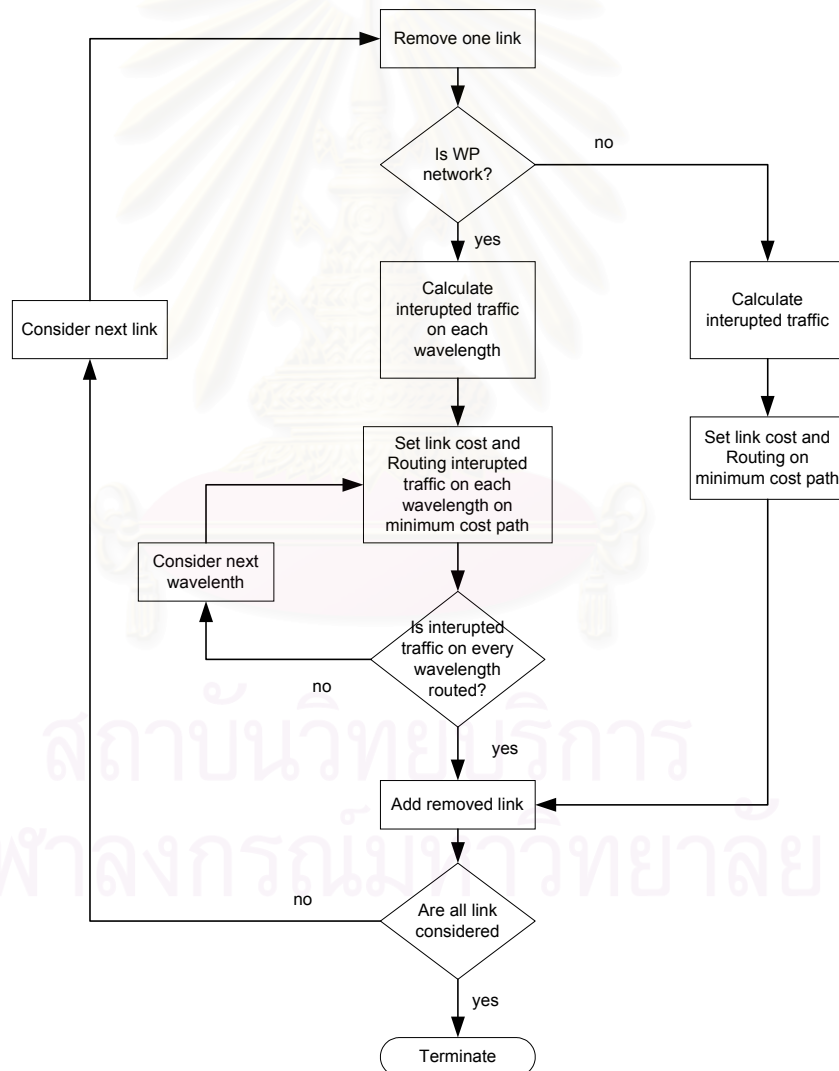


รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP

4.1.4.3 อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ และมีแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4.8

1. เอาข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาออกจากเครือข่าย ในกรณีที่เครือข่ายสามารถแปลงผันความยาวคลื่นไปที่ขั้นตอนที่ 2 มิฉะนั้นไปที่ขั้นตอนที่ 3
2. คำนวณหากราฟพิกทั้งหมดของทุกคู่โหนดที่ถูกกระทบจากการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงในขั้นตอนที่ 1 ไปที่ขั้นตอนที่ 4
3. คำนวณหากราฟพิกทั้งหมดของทุกคู่โหนดที่ถูกกระทบจากการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงในขั้นตอนที่ 1 ในแต่ละความยาวคลื่น
4. กำหนดค่าต้นทุนให้กับแต่ละข่ายเชื่อมโยง เมื่อเครือข่ายสามารถแปลงผันความยาวคลื่นไปที่ขั้นตอนที่ 5 มิฉะนั้นไปที่ขั้นตอนที่ 6
5. จัดสรรเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดระหว่างโหนดที่เป็นปลายทางของข่ายเชื่อมโยงในขั้นตอนที่ 1 เพื่อรองรับกราฟพิกในขั้นตอนที่ 2 โดยจะเลือกเส้นทางที่มีช่องสัญญาณว่างมากที่สุด ในกรณีที่ มีเส้นทางที่มีต้นทุนเท่ากันหลายเส้นทาง แล้วไปที่ขั้นตอนที่ 7
6. จัดสรรเส้นทางที่มีต้นทุนที่ต่ำที่สุดระหว่างโหนดที่เป็นปลายทางของข่ายเชื่อมโยงในขั้นตอนที่ 1 เพื่อรองรับกราฟพิกในขั้นตอนที่ 3 ในความยาวคลื่นที่กำลังพิจารณา โดยจะเลือกเส้นทางที่มี

- ช่องว่างเหลือมากที่สุดที่ความยาวคลื่นที่พิจารณา ในกรณีที่มีเส้นทางที่ต้นทุนเท่ากันหลายเส้นทาง แล้วไปที่ขั้นตอนที่ 7
7. คำนวณค่าทราฟฟิกและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงสำรองบนแต่ละข่ายเชื่อมโยง กลับไปทำขั้นตอนที่ 4 จนกระทั่งทราฟฟิกทั้งหมดในขั้นตอนที่ 2 ได้ถูกจัดสรรเส้นทางในกรณีที่เครือข่ายสามารถแปลงผันความยาวคลื่น ส่วนในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นจะกลับไปทำขั้นตอนที่ 4 จนกระทั่งทราฟฟิกทั้งหมดในขั้นตอนที่ 3 ทุกความยาวคลื่นได้ถูกจัดสรรเส้นทาง
 8. เพิ่มข่ายเชื่อมโยงในขั้นตอนที่ 1 กลับเข้าไปในเครือข่าย และกลับไปทำขั้นตอนที่ 1 พิจารณาข่ายเชื่อมโยงต่อไปจนกระทั่งครบทุกข่ายเชื่อมโยงจึงหยุดการทำงาน

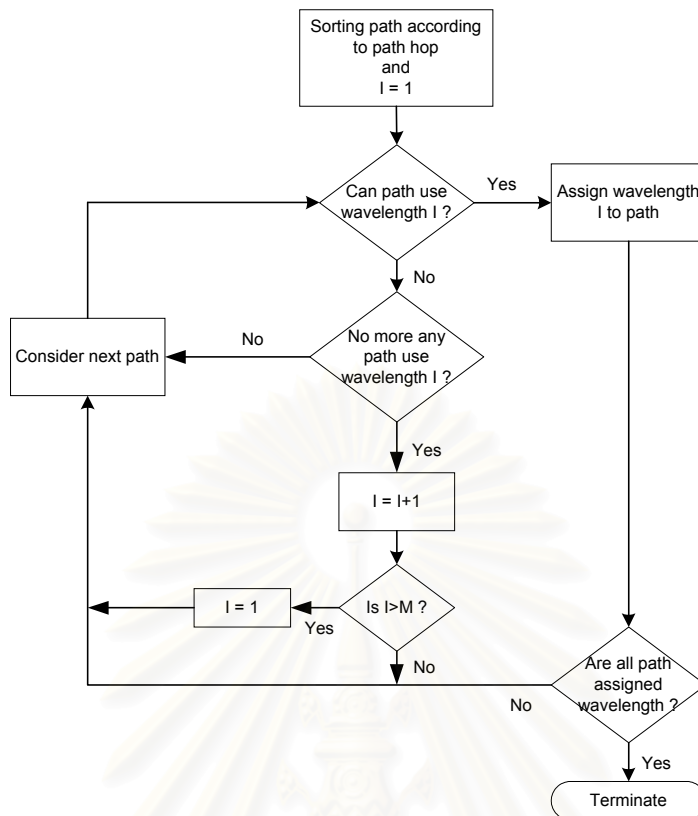


รูปที่ 4.8 แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR

4.1.5 อัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่น (Wavelength Assignment Algorithm, wa)

ในส่วนนี้จะ เป็นอัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่นสำหรับเครือข่ายที่ไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น อัลกอริทึมนี้ใช้ในการจัดสรรความยาวคลื่นสำหรับเส้นทาง active path และเส้นทาง protection path ที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB (สำหรับวิธี DJP และ LR จะทำการจัดสรรความยาวคลื่นพร้อมกับการจัดสรรเส้นทาง) โดยจะทำการจัดสรรความยาวคลื่นหลังจากที่ได้มีการจัดสรรเส้นทางแล้ว (การจัดสรรเส้นทางอาจจะใช้อัลกอริทึมในขั้นตอน B และ C ของหัวข้อ 4.1.1 โดยไม่พิจารณาการจัดสรรความยาวคลื่น หรืออาจจะใช้อัลกอริทึมในหัวข้อ 4.1.3 และ 4.1.4.1 ในการจัดสรรเส้นทาง) ขั้นตอนในการจัดสรรความยาวคลื่นเป็นดังรูปที่ 4.9 โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เรียงเส้นทางทั้งหมดที่ถูกจัดสรรให้กับทุกคูโหนดตามจำนวนขั้วเชื่อมโยงของเส้นทางจากมากไปน้อย กำหนดให้ความยาวคลื่น $l = 1$ (เส้นทางที่พิจารณาอาจจะ เป็น active path หรือ protection path)
2. ตรวจสอบว่าเส้นทางที่พิจารณาสามารถใช้ความยาวคลื่นที่ l ได้หรือไม่ โดยตรวจสอบว่าเส้นทางที่พิจารณาใช้ขั้วเชื่อมโยงร่วมกับเส้นทางทั้งหมดที่ใช้ความยาวคลื่น l หรือไม่ ถ้าไม่มีขั้วเชื่อมโยงใดร่วมกันจะจัดสรรความยาวคลื่น l ให้กับเส้นทางนั้น
3. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งไม่มีเส้นทางใดใช้ความยาวคลื่น l ได้อีก จากนั้นจึงพิจารณาที่ความยาวคลื่นถัดไป ($l=l+1$) ในกรณีที่ความยาวคลื่นถัดไปมากกว่าจำนวนค่าความยาวคลื่นสูงสุด (M) จะกำหนดให้ $l=1$ ซึ่งเป็นการพิจารณาความยาวคลื่นในเส้นใยแก้วนำแสงเส้นถัดไป ดังนั้นเส้นทางที่พิจารณาการใช้ขั้วเชื่อมโยงร่วมกันในขั้นตอนที่ 2 จะพิจารณาเฉพาะเส้นทางที่ใช้ความยาวคลื่นที่ l ในรอบเดียวกันเท่านั้น (เส้นใยแก้วนำแสงเดียวกัน) อัลกอริทึมจะหยุดการทำงานเมื่อเส้นทางทั้งหมดถูกจัดสรรความยาวคลื่น



รูปที่ 4.9 แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่น

4.2 ผลเฉลยของฮิวริสติกอัลกอริทึมและการวิเคราะห์

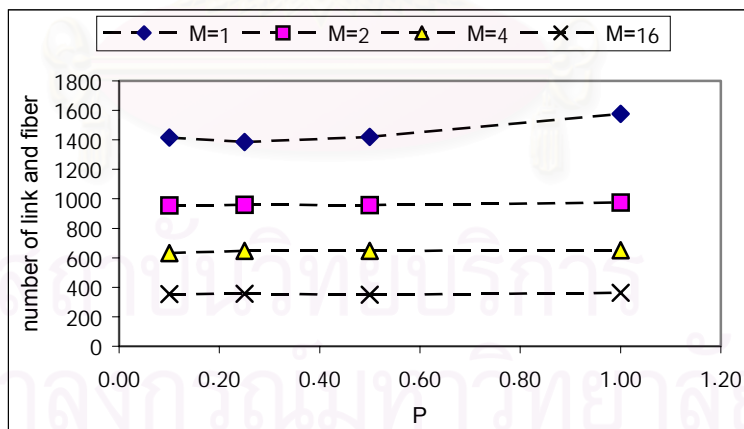
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมในหัวข้อที่ 4.1 สำหรับอัลกอริทึมทั้งหมดได้ถูกพัฒนาโดยใช้ภาษา C ซึ่งทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Pentium 4 ความเร็ว 2.0 GHz หน่วยความจำ 512 MB ที่ใช้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ XP

4.2.1 ผลการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากฮิวริสติกอัลกอริทึม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมแบบต่างๆ ในหัวข้อที่ 4.1 รวมทั้งการเปรียบเทียบผลของการปรับพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม โดยพิจารณาจากค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้ สำหรับเครือข่ายที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครือข่ายขนาด 25 โหนด 300 ข่าย เชื่อมโยง และมีกราฟฟิกแบบยูนิฟอรมขนาดเท่ากับ 1 โดยกำหนดให้ค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยง $(\alpha_{i,j})$ และต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง $(\beta_{i,j})$ มีค่าเท่ากับ 1 ทำให้ต้นทุนมีค่าเท่ากับจำนวนรวมของข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสง ในการทดลองจะพิจารณาเฉพาะเครือข่ายที่ไม่มีการแปลงผันความยาวคลื่นและสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี SLB ในส่วนแรกเป็นการเปรียบเทียบผลของการปรับพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม H1 ซึ่งคือความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนแปลงการจัดสรรทรัพยากรในขั้นตอนต่างๆ โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากันในทุกขั้นตอนและมีค่าเท่ากับ P สำหรับ

จำนวนเส้นทางทั้งหมดระหว่างคูโนดกำหนดให้เท่ากับ 50 เส้นทาง กราฟแสดงจำนวนรวมข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสง (ซึ่งในที่นี้ก็คือค่าต้นทุนรวม) ของผลเฉลยและค่าความน่าจะเป็น (P) ที่ค่า M ต่างๆ เป็นดังรูปที่ 4.10

จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อ P มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลกระทบต่อค่าต้นทุนไม่มากนัก ยกเว้นในกรณีที่ $M=1$ ซึ่งค่อนข้างเห็นได้ชัดว่าที่ $P=1$ ให้ค่าต้นทุนสูงกว่าที่ $P=0.25$ ประมาณ 13% ส่วนที่ M ค่าอื่นค่าต้นทุนมากที่สุดมีค่าต่างจากค่าต้นทุนที่ต่ำสุดไม่เกิน 4% สาเหตุที่ต้นทุนของผลเฉลยมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักน่าจะเป็นเพราะว่าอัลกอริทึม $H1$ ใช้วิธีการสุ่มในการปรับปรุงผลเฉลยทำให้มีโอกาสหาผลเฉลยที่แตกต่างกันได้หลากหลาย การปรับค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนแปลงการจัดสรรทรัพยากรของผลเฉลยจึงไม่มีผลมากนัก แต่อย่างไรก็ตามจากกราฟจะเห็นว่าที่ค่า $P=1$ ให้ค่าต้นทุนที่สูงกว่าค่าอื่นๆ เป็นเพราะว่าเมื่อ $P=1$ ผลเฉลยที่ได้จากการปรับปรุงในแต่ละรอบจะแตกต่างจากเดิมมากทำให้มีโอกาสพบผลเฉลยที่ดีขึ้นได้ค่อนข้างยาก ซึ่งจากการพิจารณาค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้ในแต่ละรอบการทำงาน ค่าต้นทุนมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมากทำให้ต้นทุนมีค่าลดลงเร็วในช่วงแรก แต่การพบผลเฉลยที่ดีกว่ามีน้อยครั้งเมื่อเทียบกับเมื่อ P มีค่าต่ำกว่า แต่ถ้าหากใช้ค่า P ที่น้อยมากผลเฉลยที่ได้จะเปลี่ยนไปจากเดิมเพียงเล็กน้อย ค่าต้นทุนจึงเปลี่ยนแปลงช้าจึงทำให้ต้องใช้เวลาานาน แต่อย่างไรก็ตามมีโอกาสที่จะพบผลเฉลยที่ดีขึ้นได้ง่ายกว่าเมื่อ P มีค่ามาก ดังนั้นในที่นี้จึงได้เลือกใช้ค่า P ที่มีค่าน้อยสำหรับการทดสอบในส่วนต่อไป โดยกำหนดให้ P มีค่าเท่ากับ 0.1

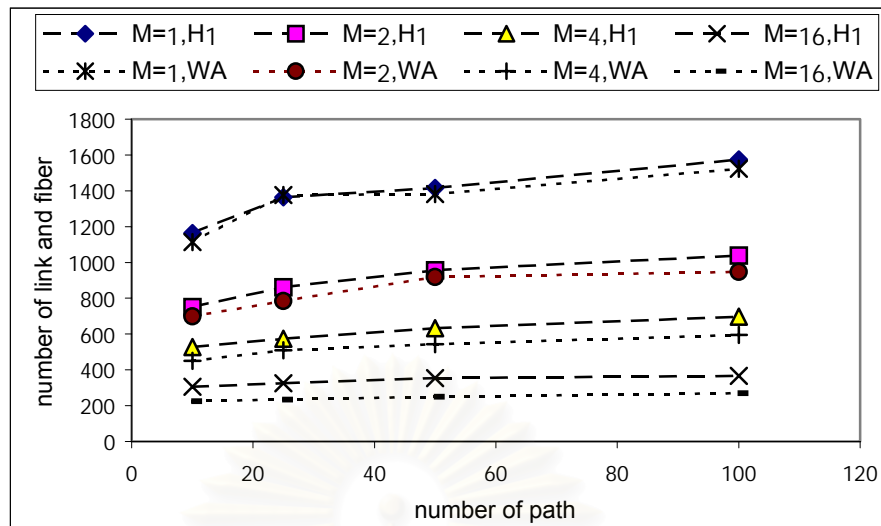


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึม $H1$ กับค่า P โดยพิจารณาที่ค่า M ต่างๆ

สำหรับความสัมพันธ์ของค่าต้นทุนกับจำนวนเส้นทางระหว่างคูโนดที่ค่า M แตกต่างกัน เป็นดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อลดจำนวนเส้นทางลงค่าต้นทุนจะลดลงตาม โดยลดลงได้ประมาณ 20-27% เมื่อลดจำนวนเส้นทางจาก 100 เส้นทางเป็น 10 เส้นทาง ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเมื่อมีเส้นทางจำนวนมาก ในการจัดสรรเส้นทางสามารถเลือกเส้นทางที่ยาวได้ (โดยพิจารณา

จากจำนวนข่ายเชื่อมโยงบนเส้นทาง) ซึ่งในการจัดสรรเส้นทางที่ยาวถ้าไม่สามารถจัดสรรให้สามารถใช้เส้นใยแก้วนำแสงร่วมกันได้อย่างเหมาะสมแล้วจะทำให้ต้องใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าเส้นทางสั้น ในการทำงานแต่ละรอบของอัลกอริทึมสามารถเปลี่ยนแปลงโทโปโลยีของเครือข่ายได้ตลอด ทำให้แต่ละรูปแบบโทโปโลยีที่ได้จึงไม่ได้มีการจัดสรรเส้นทางที่ดีที่สุด การมีเส้นทางจำนวนมากจึงทำให้การจัดสรรเส้นทางให้สามารถใช้เส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างคุ้มค่าจึงเป็นไปได้ยากเมื่อมีการปรับปรุงการจัดสรรเส้นทางเพียงไม่กี่ครั้ง ตรงกันข้ามเมื่อเส้นทางมีจำนวนน้อย เส้นทางที่ใช้มีความยาวไม่มากทำให้ใช้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่าการเลือกเส้นทางที่ยาวกว่าในกรณีที่ยังไม่ได้มีการปรับปรุงจัดสรรเส้นทางที่เหมาะสม

จากรูปที่ 4.11 ได้แสดงผลของการปรับปรุงอัลกอริทึม H1 โดยการใช้อัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่น (wa) โดยพิจารณาที่จำนวนเส้นทางและค่า M แตกต่างกัน จากการเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากทั้งสองวิธีจะเห็นได้ว่าการใช้อัลกอริทึม wa ช่วยในการจัดสรรความยาวคลื่นทำให้ได้ผลเฉลยที่มีต้นทุนต่ำลง ซึ่งก็เป็นเพราะว่าในแต่ละรอบการทำงานของอัลกอริทึมเส้นทางที่ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ ทำให้การเลือกใช้ความยาวคลื่นแบบสุ่มมีโอกาสที่จะจัดสรรให้สามารถใช้ความยาวคลื่นได้อย่างคุ้มค่าเป็นไปได้ยาก การจัดสรรความยาวคลื่นโดยใช้อัลกอริทึม wa จึงทำให้ได้ผลเฉลยที่มีต้นทุนต่ำกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลของการใช้อัลกอริทึม wa และผลของจำนวนเส้นทาง จะเห็นได้ว่าผลของการลดจำนวนเส้นทางให้น้อยลงสามารถลดต้นทุนได้มากกว่าการใช้อัลกอริทึม wa ช่วยในการจัดสรรความยาวคลื่น เป็นเพราะว่าการจัดสรรความยาวคลื่นจะจัดสรรให้กับเส้นทางที่ใช้ในการรองรับทราฟฟิกของแต่ละคู่โหนด จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เครือข่ายต้องการจึงขึ้นกับเส้นทางที่ใช้ในการรองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดเป็นหลัก

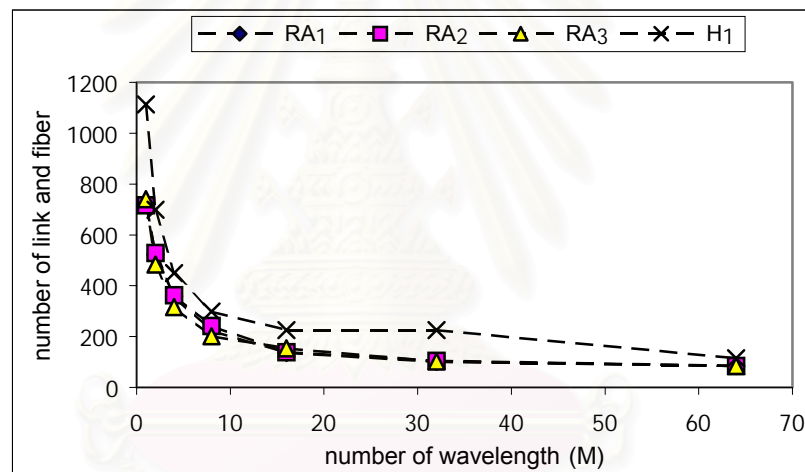


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าต้นทุนกับจำนวนเส้นทาง ที่ค่า M ต่างๆ โดยจะเป็นผลเฉลยจากอัลกอริทึม H1 และอัลกอริทึม H1 ที่ถูกปรับปรุงโดยการใช้อัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่น (wa)

จากผลของจำนวนเส้นทางและการใช้อัลกอริทึม wa ที่ได้กล่าวข้างต้นทำให้สรุปได้ว่าถึงแม้ว่าอัลกอริทึม H1 จะสามารถหาผลเฉลยได้หลากหลาย แต่เนื่องจากความซับซ้อนของปัญหามีมาก การปรับปรุงผลเฉลยโดยวิธีการสุ่มในทุกขั้นตอนพร้อมกันทำให้โอกาสหาผลเฉลยที่ดีขึ้นเป็นไปได้ค่อนข้างจะยาก ดังนั้นการใช้อัลกอริทึมเพื่อช่วยทำงานในบางขั้นตอนแทนการปรับปรุงผลเฉลยโดยวิธีการสุ่มเล็กลงเช่นอัลกอริทึม H1 น่าจะให้ผลเฉลยที่ดีกว่าในกรณีที่พิจารณาจำนวนรอบการทำงานของอัลกอริทึมที่จำกัด ดังนั้นในส่วนถัดไปจะศึกษาการปรับปรุงอัลกอริทึม H1 โดยการนำอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางและการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.1.3 และ 4.1.4.1 รวมทั้งอัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่นมาใช้แทนในส่วนของการจัดสรรเส้นทาง, การจัดสรรเส้นทางใหม่ และการจัดสรรความยาวคลื่นของอัลกอริทึม H1 ซึ่งก็คือขั้นตอน B,C ในหัวข้อที่ 4.1.1

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมที่ใช้อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางและการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB ดังได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.1.3 และ 4.1.4.1 แทนอัลกอริทึมในขั้นตอน B และ C ของอัลกอริทึม H1 โดยพิจารณาที่ค่า M ต่างๆ ในการทดลองนี้จะใช้อัลกอริทึม wa ในการจัดสรรความยาวคลื่น จากในหัวข้อที่ 4.1.3 และ 4.1.4 ไม่ได้กล่าวถึงวิธีการกำหนดค่าต้นทุนให้กับข่ายเชื่อมโยง สำหรับในที่นี้ได้พิจารณาวิธีการกำหนดค่าต้นทุน 3 วิธีซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า RA1, RA2 และ RA3 โดยมีรายละเอียดของแต่ละวิธีดังนี้ วิธี RA1 จะกำหนดให้ข่ายเชื่อมโยงมีต้นทุนค่าต่ำค่าหนึ่งเมื่อมีช่องสัญญาณว่างบนเส้นใยแก้วนำแสง และกำหนดให้มีต้นทุนค่าสูงค่าหนึ่งเมื่อไม่มีช่องสัญญาณบนเส้นใยแก้วนำแสง วิธี RA2 จะกำหนดให้ต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงคืออัตรา

ส่วนการใช้ช่องสัญญาณบนข่ายเชื่อมโยงนั้น และวิธี RA3 จะกำหนดให้ทุกๆ ข่ายเชื่อมโยงมีค่าต้นทุนเท่ากัน สำหรับ H1 ในที่นี้หมายถึงอัลกอริทึม H1 ที่ใช้อัลกอริทึม wa ในการจัดสรรความยาวคลื่น และกำหนดให้จำนวนเส้นทางระหว่างคู่โหนดเท่ากับ 10 เส้นทาง จากรูปจะเห็นได้ว่าการใช้อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางและการจัดสรรเส้นทางใหม่โดยมีวิธีการกำหนดค่าต้นทุนทั้ง 3 วิธีให้ค่าต้นทุนที่ต่ำกว่าอัลกอริทึม H1 ดังเหตุผลคล้ายกับที่กล่าวไว้ข้างต้นคือในแต่ละรอบการทำงานของ H1 โทโพลยีสามารถเปลี่ยนแปลงไปได้ทำให้เส้นทางที่เลือกอย่างสุ่มไม่ได้มีการปรับปรุงให้ดีขึ้นได้มากนักสำหรับแต่ละโทโพลยีที่พิจารณา แต่ในกรณีที่ใช้อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางอัลกอริทึมพยายามที่จะเลือกเส้นทางโดยอาศัยหลักการจัดสรรเส้นทางไปบนข่ายเชื่อมโยงที่มีช่องสัญญาณเหลือ (RA1), จัดสรรเส้นทางไปบนข่ายเชื่อมโยงที่มีการใช้งานช่องสัญญาณน้อย (RA2) หรือจัดสรรเส้นทางที่ใช้จำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อย (RA3) ซึ่งให้ต้นทุนต่ำกว่าการจัดสรรเส้นทางแบบสุ่มของ H1 ที่มีการปรับปรุงการจัดสรรเส้นทางสำหรับแต่ละโทโพลยีได้ไม่มากนัก



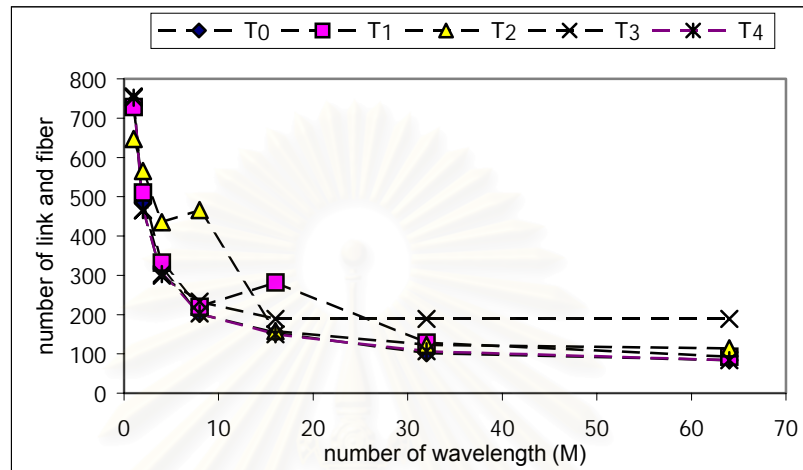
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมที่ใช้อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางและการจัดสรรเส้นทางใหม่ซึ่งมีวิธีการกำหนดค่าต้นทุนให้กับข่ายเชื่อมโยงต่างกันที่ค่า M ต่างๆ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางที่มีวิธีการกำหนดค่าต้นทุนให้กับข่ายเชื่อมโยงที่แตกต่างกันทั้ง 3 วิธี จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อ $M < 16$ วิธี RA3 ให้ผลเฉลยที่มีค่าต้นทุนต่ำที่สุด และเมื่อ $M > 16$ วิธี RA1 ให้ต้นทุนที่ต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามวิธีทั้ง 3 มีแนวโน้มว่าให้ผลเฉลยที่มีค่าต้นทุนใกล้เคียงกันเมื่อ M มากขึ้นและเท่ากันเมื่อ $M=64$ ส่วนวิธี RA1 และ RA2 ให้ค่าต้นทุนที่ใกล้เคียงกันในทุกค่า M ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าวิธี RA1 และ RA2 จะมีการจัดสรรเส้นทางที่คล้ายกันคือพยายามจัดสรรเส้นทางไปบนข่ายเชื่อมโยงที่มีการใช้งานช่องสัญญาณน้อยก่อน แต่สำหรับวิธี RA3 จะเลือกใช้เส้นทางที่สั้น (มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อย) โดยไม่ได้คำนึงถึงการใช้งานช่องสัญญาณจึงทำให้ได้ต้นทุนที่ต่ำกว่าในช่วงที่ M มีค่าน้อย เพราะว่าเมื่อ M มีค่าน้อย

ทำให้จำนวนช่องสัญญาณบนเส้นใยแก้วนำแสงมีจำนวนน้อย การจัดสรรเส้นทางให้สามารถใช้เส้นใยแก้วนำแสงร่วมกันทำได้น้อยประกอบกับวิธี RA1 และ RA2 มีการจัดสรรเส้นทางให้สามารถใช้เส้นใยแก้วนำแสงร่วมกันได้ไม่มากนัก การใช้เส้นทางที่สั้นดังวิธี RA3 จึงทำให้ได้ต้นทุนต่ำกว่า แต่เมื่อค่า M มากขึ้นเส้นใยแก้วนำแสงจะมีจำนวนช่องสัญญาณมากขึ้น การจัดสรรเส้นทางให้สามารถใช้เส้นใยแก้วนำแสงร่วมกันทำได้มากขึ้น วิธี RA1 และ RA2 ซึ่งพิจารณาการจัดสรรเส้นทางจากการใช้งานช่องสัญญาณจึงให้ต้นทุนที่ต่ำกว่าวิธี RA3 จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าเมื่อ M มีค่ามาก ผลเฉลี่ยที่ได้จากทั้ง 3 วิธีมีค่าต้นทุนใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มว่าจะเท่ากัน และจากวิธี RA3 ให้ต้นทุนต่ำกว่าค่อนข้างมากในช่วงแรกของค่า M ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะเลือกใช้วิธี RA3 เป็นวิธีกำหนดค่าต้นทุนให้กับข่ายเชื่อมโยงสำหรับอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางและการจัดสรรเส้นทางใหม่

ในส่วนต่อไปจะทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้วิธีการปรับปรุงโทโปโลยีแบบต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1.2 โดยได้ใช้อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางและการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่มีการกำหนดค่าต้นทุนแบบ RA3 ร่วมกับอัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่น (wa) ค่าต้นทุนของผลเฉลี่ยซึ่งได้จากอัลกอริทึมที่มีวิธีการปรับปรุงโทโปโลยีแบบต่างๆ ที่ค่า M แตกต่างกันเป็นดังรูปที่ 4.13 จากรูปจะเห็นว่าวิธี T2 ให้ค่าต้นทุนต่ำกว่าวิธีอื่นที่ $M=1$ ส่วนที่ M ค่าอื่นมีต้นทุนสูงกว่าวิธีอื่น โดยเฉพาะที่ $M=4,8$ วิธี T2 ให้ค่าต้นทุนสูงกว่าค่าที่ดีที่สุดถึงประมาณ 30% สำหรับวิธี T1 ให้ค่าต้นทุนค่อนข้างใกล้เคียงค่าที่ดีที่สุด ยกเว้นที่ $M=16$ ส่วนวิธี T3 ให้ค่าต้นทุนใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดที่ค่า M ในช่วงแรกแต่เมื่อ $M=32, 64$ จะให้ค่าต้นทุนที่สูงกว่าวิธีอื่นถึงประมาณ 40% ส่วนวิธี T0, T4 ให้ค่าต้นทุนที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุดในทุกช่วงค่า M ยกเว้นที่ $M=1$ ที่มีความแตกต่างประมาณ 16% ทั้งหมดนี้เป็นเพราะว่าวิธี T1 และ T2 สามารถปรับปรุงโทโปโลยีได้เพียงแต่การเพิ่มหรือลบข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายเท่านั้น ไม่ได้พิจารณาถึงการแลกเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงซึ่งอาจจะสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้อีกเมื่อโทโปโลยีมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงค่าหนึ่ง สำหรับวิธี T3 ได้พิจารณาเฉพาะการแลกเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงเท่านั้น ดังนั้นจำนวนข่ายเชื่อมโยงจึงคงที่ ซึ่งในบางกรณีสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้อีกโดยการเพิ่มหรือลบข่ายเชื่อมโยง ดังนั้นทั้ง 3 วิธีจึงให้ต้นทุนที่ดีในเฉพาะบางช่วงของค่า M ซึ่งมีความสัมพันธ์กับจำนวนข่ายเชื่อมโยง (จะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป) สำหรับวิธี T0, T4 ได้รวมวิธีการของทั้งวิธี T1, T2, T3 จึงสามารถให้ค่าต้นทุนที่ดีได้ทุกช่วงค่า M ส่วนที่ $M=1$ วิธี T0, T4 ให้ผลเฉลี่ยที่มีค่าต้นทุนสูงกว่าวิธี T2 ค่อนข้างมากน่าจะเป็นผลมาจากผลเฉลี่ยที่เป็น local optimum เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธี T0, T4 จะเห็นได้ว่าให้ค่าต้นทุนใกล้เคียงกันมาก โดยจากกราฟมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 5% ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าวิธีการทั้ง 2 มีหลักการเหมือนกัน จะแตกต่างกันเพียงโอกาสในการเลือกวิธีการปรับ

ปรุ้งโทโปลอยี่ในแต่ละรอบการทำงาน ซึ่งวิธี T4 มีแนวโน้มเลือกวิธีการปรุ้งโทโปลอยี่ที่น่าจะทำได้ต้นทุนที่ดีขึ้นโดยการพิจารณาจากค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากการทำงานรอบก่อนหน้า ดังนั้นจากที่กล่าวมาในนี้จึงได้เลือกวิธี T0 เป็นวิธีการในการปรุ้งโทโปลอยี่ เพราะว่าสามารถให้ค่าต้นทุนที่ดีโดยไม่ขึ้นกับค่า M และเลือกวิธีการปรุ้งโทโปลอยี่แต่ละวิธีด้วยโอกาสที่เท่ากัน

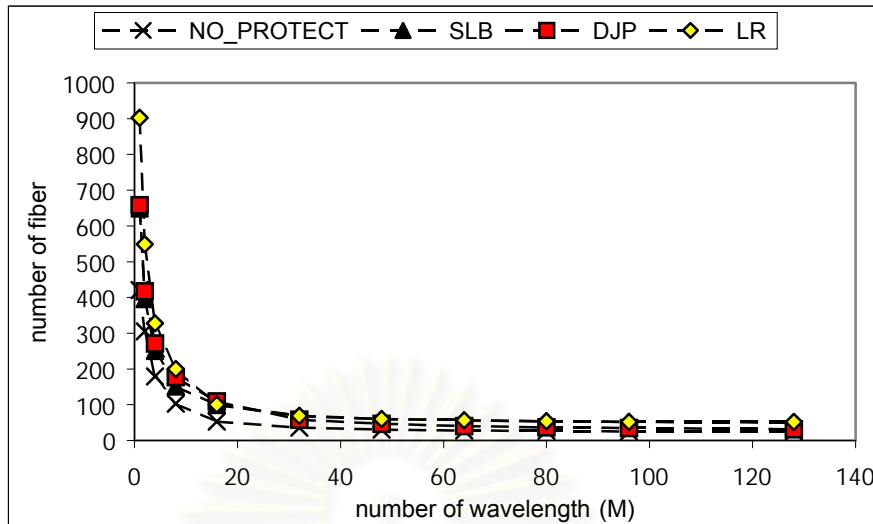


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าต้นทุนของผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมที่มีวิธีการปรุ้งโทโปลอยี่วิธีต่างๆ ที่ค่า M แตกต่างกัน โดยที่ใช้อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางและการจัดสรรเส้นทางใหม่ รวมทั้งอัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่น

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในหัวข้อนี้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้การทดลองในส่วนต่อไปทั้งหมดจะกำหนดให้ใช้อัลกอริทึมที่ประกอบด้วยวิธี T0 สำหรับการปรุ้งโทโปลอยี่อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางและการจัดสรรเส้นทางใหม่ โดยใช้ในการกำหนดค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงแบบ RA3 (การจัดสรรเส้นทางที่มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อยที่สุดหรือเส้นทางที่สั้นที่สุด) รวมทั้งอัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่นในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น

4.2.2 ผลของวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่

ในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลเฉลยของเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี SLB, DJP และ LR โดยการพิจารณาจากผลเฉลยของฮิวริสติกอัลกอริทึม เครือข่ายที่ใช้ในการทดลองเป็นเครือข่ายขนาด 25 โหนด จำนวนข่ายเชื่อมโยง 300 ข่ายเชื่อมโยง โดยที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น และมีทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอรมที่มีขนาดเท่ากับ 1 กำหนดให้ค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากันเท่ากับ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและค่า M เป็นดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและจำนวนความยาวคลื่น (M) เมื่อเครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆ

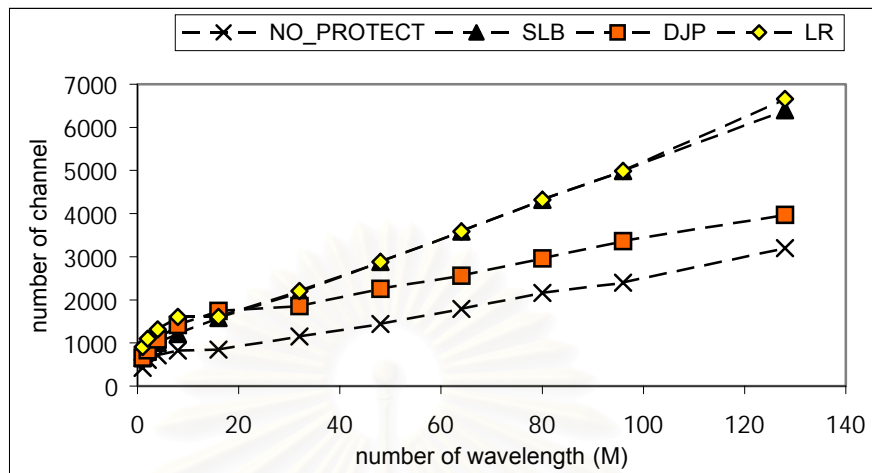
จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าเมื่อค่า M เพิ่มขึ้น จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจะลดลง และมีแนวโน้มคงที่เมื่อ M มีค่ามากพอ เป็นเพราะว่าเมื่อ M มากขึ้นจำนวนช่องสัญญาณบนแต่ละเส้นใยแก้วนำแสงมากขึ้นจึงทำให้เครือข่ายต้องการเส้นใยแก้วนำแสงจำนวนน้อยลง และเมื่อ M มากจนถึงค่าหนึ่ง จำนวนช่องสัญญาณมีมากพอจนกระทั่งการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณหรือค่า M ไม่สามารถทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดน้อยลงได้อีก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่กับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ จะเห็นได้ว่าเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้น โดยในบางกรณีต้องการเพิ่มขึ้นถึง 100% เพื่อใช้ในการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับทราฟฟิกที่ถูกกระทบจากการเสียหายของข่ายเชื่อมโยง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีจะสามารถเรียงลำดับตามจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เครือข่ายต้องการจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือวิธี LR, DJP และ SLB เมื่อ $M < 8$ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าวิธี SLB และ DJP จะจัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างคู่โหนดที่เป็นปลายทางของทราฟฟิก ส่วนวิธี LR จะจัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างคู่โหนดของข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเพื่อรองรับทราฟฟิกทั้งหมดที่ถูกกระทบ จากวิธีการกำหนดค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงทำให้เส้นทางที่ใช้เป็นเส้นทางที่มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อยที่สุด ซึ่งมีจำนวนเส้นทางไม่มาก ดังนั้นทราฟฟิกที่ถูกกระทบจึงไม่สามารถกระจายไปยังเส้นทางอื่นๆ ได้ ดังเช่นวิธี SLB หรือ DJP ซึ่งได้จัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างทุกคู่โหนดที่เป็นปลายทางของเส้นทางที่ถูกกระทบจากการเสียหายของข่ายเชื่อมโยง จึงทำให้วิธี LR ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า เมื่อพิจารณาในกรณีที่ $M > 32$ วิธี DJP ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุด ส่วนวิธี SLB และ LR ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน เป็นเพราะว่าเมื่อ M มากขึ้น จำนวนช่องสัญญาณจะมีมากพอจนทำ

ให้เครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลงจนใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางที่สั้นที่สุดเพื่อใช้รองรับทราฟฟิกอาจจะไม่ใช้การจัดสรรเส้นทางที่ดีที่สุด รวมทั้งความเป็น sub-optimal ของผลเฉลย วิธี DJP จึงต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุด

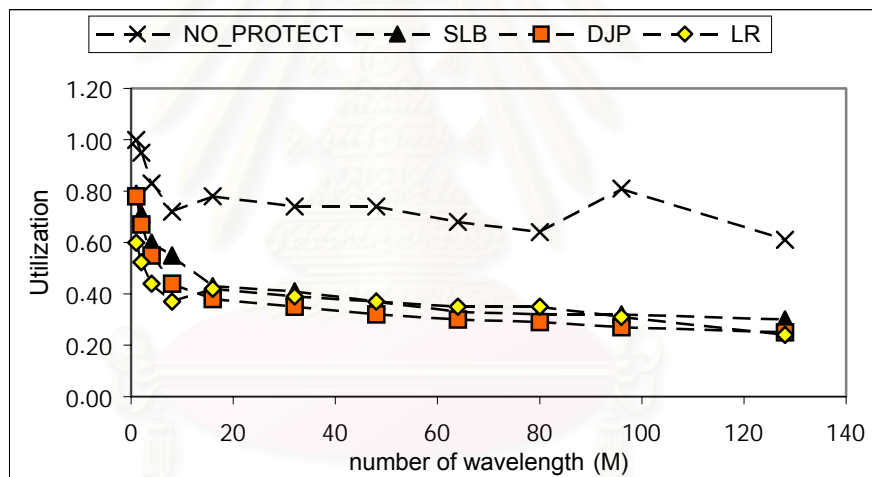
สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนช่องสัญญาณและจำนวนความยาวคลื่น ดังรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าจำนวนช่องสัญญาณที่เครือข่ายต้องการเพิ่มขึ้นตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าจากรูปที่ 4.14 จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจะลดลง เป็นเพราะว่าเมื่อ M มีค่ามาก การจัดสรรเส้นทางให้สามารถใช้ช่องสัญญาณบนเส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างคุ้มค่าเป็นไปได้ยาก ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.16 สำหรับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ต้องการจำนวนช่องสัญญาณมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.14 คือในช่วงที่ค่า $M < 8$ สามารถเรียงลำดับความต้องการจำนวนช่องสัญญาณของเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือวิธี LR, DJP และ SLB เมื่อ $M > 32$ วิธี DJP ต้องการจำนวนช่องสัญญาณน้อยสุด ส่วนวิธี SLB และ LR ต้องการจำนวนช่องสัญญาณเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน เป็นเพราะว่าจำนวนช่องสัญญาณที่แต่ละค่า M จะขึ้นกับจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง จึงทำให้มีความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับในกรณีที่พิจารณาจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง

รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า utilization และค่า M โดย utilization มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของจำนวนช่องสัญญาณที่มีการใช้งานต่อจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมดบนเครือข่าย จากรูปจะเห็นได้ว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้มีค่า utilization สูงกว่าเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เนื่องจากว่าเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ต้องมีการวางเส้นใยแก้วนำแสงสำรองเพื่อใช้รองรับทราฟฟิกในการหลบหลีกข้อขัดข้องที่เสียหาย ซึ่งเส้นใยแก้วนำแสงส่วนนี้ไม่ได้มีการใช้งานในสภาวะปกติ จากกราฟ utilization ลดลงถึงประมาณ 50% ในบางกรณี เมื่อค่า M เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าค่า utilization มีแนวโน้มลดลงเพราะว่าเมื่อ M มากขึ้นการจัดสรรเส้นทางให้สามารถใช้ช่องสัญญาณได้อย่างคุ้มค่าทำได้ยากจึงทำให้มีช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งานเหลือมาก โดยเฉพาะช่องสัญญาณบน spare fiber ซึ่งในบางกรณี utilization มีค่าต่ำมากเหลือเพียง 25% เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธี วิธี SLB มีค่า utilization สูงกว่าวิธีอื่น เมื่อ $M < 16$ วิธี LR มีค่าต่ำที่สุด แต่เมื่อ $M > 16$ วิธี DJP มีค่าต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามจากกราฟจะเห็นว่าค่า utilization ของเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีมีแนวโน้มว่าใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อ M มากขึ้น เป็นเพราะว่าจำนวนช่องสัญญาณมีมากพอ

เมื่อเทียบกับทราฟฟิกจนทำให้เครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลงจนใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.14



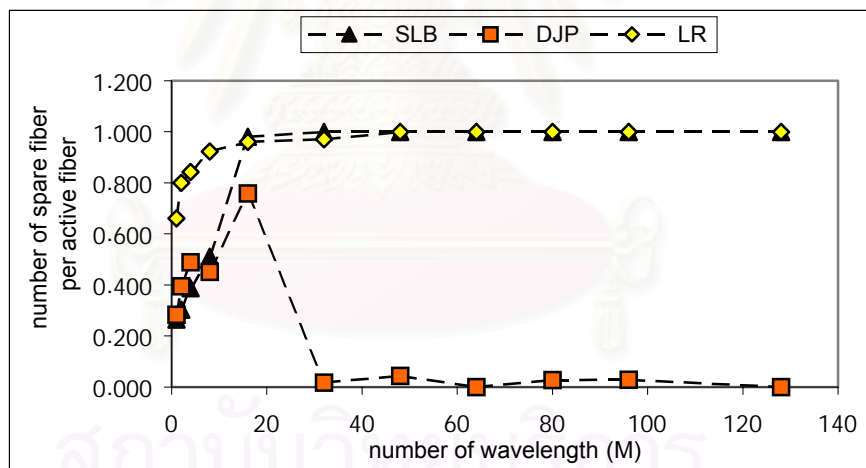
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนช่องสัญญาณและจำนวนความยาวคลื่น (M)



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Utilization กับจำนวนความยาวคลื่น (M)

จากรูปที่ 4.17 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของ spare ต่อ active fiber และค่า M จะเห็นได้ว่าในช่วงที่ค่า $M < 16$ ค่าอัตราส่วนเพิ่มขึ้นตามค่า M โดยเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR มีอัตราส่วนมากที่สุด ส่วนวิธี SLB และ DJP มีค่าอัตราส่วนใกล้เคียงกัน เป็นเพราะว่าวิธี LR ทำการจัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างคูโหนดของข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย เส้นทางที่ใช้ในการรองรับทราฟฟิกที่ถูกรบกวนจึงเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดซึ่งมีจำนวนน้อย จำนวน spare fiber ที่ต้องการจึงมากกว่าวิธี SLB และ DJP แต่เมื่อ $M > 16$ เครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี SLB และ LR มีค่าอัตราส่วนเพิ่มขึ้นจนเป็น 1 รวมทั้งยังมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่วิธี DJP กลับมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ เป็นเพราะว่าในการหาผลเฉลยของอัลกอริทึมจะพยายามลดค่าต้นทุน (ในที่นี้คือจำนวนรวมของข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสง) ให้น้อยที่สุด เมื่อ M มากขึ้นจำนวนเส้นใยแก้ว

นำแสงและข่ายเชื่อมโยงจะลดลง เมื่อพิจารณาถึงการเสียหายของแต่ละข่ายเชื่อมโยง เนื่องจากจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่น้อยลงดังรูปที่ 4.18 การเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงจึงมีผลกระทบต่อปริมาณทราฟฟิกที่มากขึ้น จึงทำให้ spare fiber ลดลงในสัดส่วนที่น้อยกว่า active fiber อัตราส่วนจึงสูงขึ้นจนถึง 1 สำหรับวิธี DJP มีข้อจำกัดในการจัดสรรเส้นทางใหม่มากกว่าวิธี SLB คือเส้นทางที่จัดสรรต้องเป็นเส้นทางที่ไม่ซ้อนทับกัน เส้นทางจึงมีความยาวมากกว่าเส้นทางของวิธี SLB เมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้น จำนวนช่องสัญญาณบนเส้นใยแก้วนำแสงมีมาก การใช้เส้นทางที่ยาวมีแนวโน้มทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่า ด้วยเหตุนี้จึงทำให้วิธี DJP ต้องการจำนวน spare fiber น้อยกว่าวิธี SLB และลดน้อยลงจนเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาการเพิ่มค่า M ให้เพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าหนึ่งจำนวนช่องสัญญาณจะมีมากพอ การวางเพียง active fiber น่าจะมีช่องสัญญาณเพียงพอในการหลบหลีกข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย เครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่จึงไม่ต้องการ spare fiber ค่าอัตราส่วนของ spare ต่อ active fiber จึงน่าจะลดลงจนเป็นศูนย์ เช่นเดียวกับวิธี DJP แต่เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางที่สั้นที่สุดไม่ได้เป็นการจัดสรรเส้นทางที่ดีที่สุด จึงอาจทำให้การเพิ่มค่า M ไม่สามารถลดจำนวน spare fiber ให้น้อยลงจนเป็นศูนย์ ดังเช่นวิธี SLB และ LR

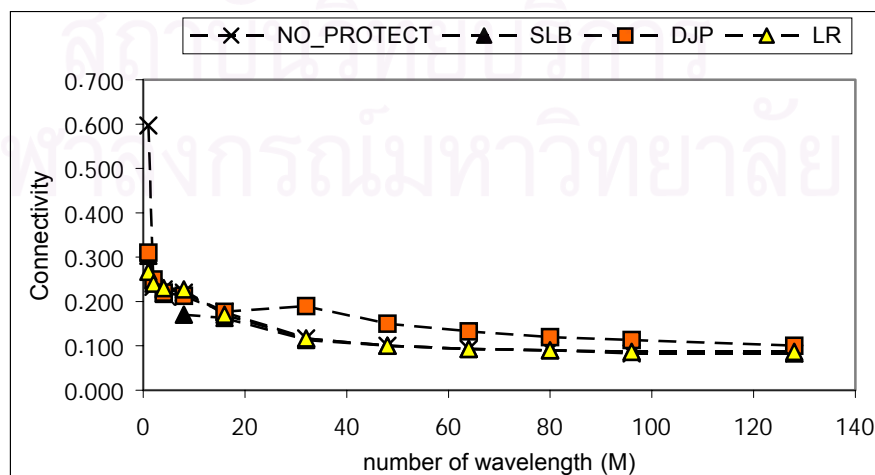


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ spare fiber ต่อ active fiber และจำนวนความยาวคลื่น (M)

กำหนดให้ค่า connectivity เท่ากับอัตราส่วนจำนวนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายต่อจำนวนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายแบบ full-mesh จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า connectivity กับค่า M ดังรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าเมื่อ M มากขึ้น ค่า connectivity มีแนวโน้มลดลง เป็นเพราะว่าเมื่อ M มีค่าน้อยจำนวนช่องสัญญาณบนเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละเส้นมีน้อย การใช้เส้นทางสั้นจะทำให้ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่า จึงต้องมีการวางข่ายเชื่อมโยงมากขึ้นเพื่อให้สามารถใช้เส้นทางสั้นได้ แต่เมื่อ M มากขึ้นจำนวนช่องสัญญาณบนเส้นใยแก้วนำแสงแต่ละเส้นมี

มาก เส้นทางที่ใช้รองรับทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดสามารถใช้เส้นใยแก้วนำแสงร่วมกันได้มากขึ้น การใช้เส้นทางยาวจะทำให้ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยลง เครือข่ายจึงต้องการจำนวนสายเชื่อมใยน้อยลง และเมื่อค่า M เพิ่มขึ้นจนมากพอมีแนวโน้มทำให้ได้เครือข่ายรูปร่างแบนเช่นเดียวกับผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ ดังเช่นเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่และสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่โดยใช้วิธี SLB เมื่อ $M=128$ ซึ่งมีค่า connectivity เท่ากับ 0.833 ในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ เมื่อ $M=1$ ค่า connectivity เท่ากับ 0.6 ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับค่าอื่น แต่เมื่อ $M>1$ จะเห็นว่าไม่ว่าเครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้หรือไม่ หรือใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบใดก็จะมีค่า connectivity ใกล้เคียงกัน ส่วนเมื่อ $M>32$ วิธี DJP มีค่า connectivity มากกว่าวิธีอื่น

เมื่อพิจารณาย้อนกลับไปที่ตารางที่ 3.7 และ 3.8 จากที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ต้องการจำนวนสายเชื่อมใยมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ และเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP มีจำนวนสายเชื่อมใยมากที่สุด ตามด้วยวิธี LR และ SLB ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างจากความสัมพันธ์ตามรูปที่ 4.18 สาเหตุหนึ่งน่าจะเป็นเพราะว่าผลเฉลยในหัวข้อนี้ได้จากการหาผลเฉลยโดยฮิวริสติกอัลกอริทึมซึ่งทำการค้นหาและประเมินค่าผลเฉลยเพียงบางส่วน ผลเฉลยที่ได้จึงเป็น sub-optimal แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และฮิวริสติกอัลกอริทึมจะมีความสัมพันธ์ในแง่ของค่า connectivity หรือจำนวนสายเชื่อมใยที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่าผลของค่า M ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เครือข่ายมี connectivity น้อยลงและเมื่อเพิ่มค่า M จนมากพอเครือข่ายจะมีค่า connectivity ต่ำสุดที่สามารถแก้ไขปัญหานี้สายเชื่อมใยเสียหายได้ นั่นก็คือเครือข่ายวงแหวน รวมทั้งวิธี DJP น่าจะเป็นวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่มี connectivity หรือจำนวนสายเชื่อมใยมากที่สุด

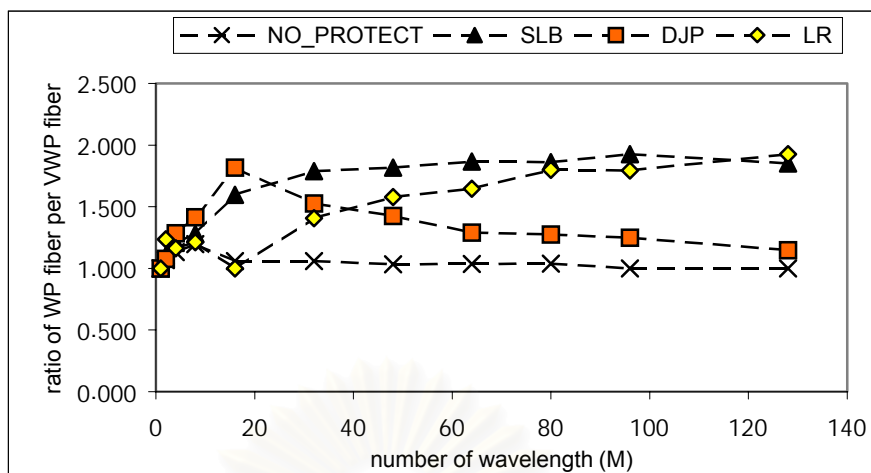


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Connectivity และจำนวนความยาวคลื่น (M)

4.2.3 ผลของการแปลงผันความยาวคลื่น

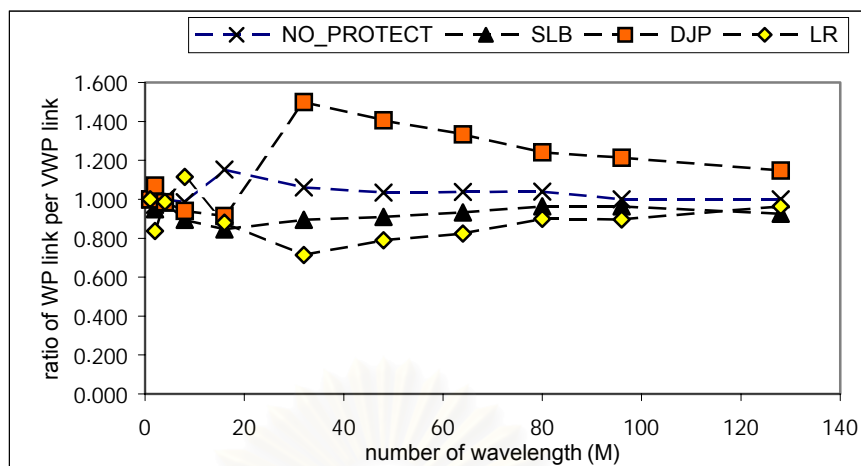
ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงผลของการแปลงผันความยาวคลื่น โดยเครือข่ายที่ใช้ในการทดลองเป็นเครือข่ายขนาด 25 โหนด 300 ข่ายเชื่อมโยง และมีทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์มขนาดเท่ากับ 1 กำหนดให้ค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากันเท่ากับ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของเครือข่าย WP ต่อเครือข่าย VWP และค่า M เป็นดังรูปที่ 4.19 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อ $M=1$ อัตราส่วนเป็น 1 ไม่ว่าจะเครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้หรือไม่ และไม่ว่าใช้การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีใด สำหรับเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ เมื่อ M เพิ่มขึ้นจนถึง $M=8$ อัตราส่วนจะเพิ่มขึ้นตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อ $M > 8$ อัตราส่วนจะลดลงจนเข้าใกล้ 1 เป็นเพราะว่าเครือข่าย WP ซึ่งไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นต้องใช้ความยาวคลื่นเดียวกันตลอดทั้งเส้นทางทำให้มีข้อจำกัดในการจัดสรรความยาวคลื่นมากกว่า จึงต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าเครือข่าย VWP ซึ่งสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นได้ตลอดทั้งเส้นทาง เมื่อ M มากขึ้นจึงทำให้ความแตกต่างของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของเครือข่ายทั้งสองประเภทมากตาม แต่เมื่อ M เพิ่มจนถึงค่าหนึ่งที่เหมาะสม จำนวนความยาวคลื่นจะมากพอจนทำให้ผลของการแปลงผันความยาวคลื่นลดลงได้ จนกระทั่งไม่มีผลในที่สุด ดังเช่นจากกราฟเมื่อ $M > 96$ ซึ่งมีค่าอัตราส่วนเท่ากับ 1 และในกรณีนี้การแปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้สูงสุดประมาณ 20%

ในกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่จะเห็นได้ว่าการแปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้มากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ เนื่องจากผลของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เครือข่ายต้องการเพื่อรองรับทราฟฟิกในการหลบหลีกข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย สำหรับวิธี DJP จะเห็นว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้คืออัตราส่วนจะเพิ่มขึ้นจนถึง $M=16$ และเมื่อ $M > 16$ อัตราส่วนจะลดลง ด้วยเหตุผลเดียวกับเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ แต่ในกรณีนี้ค่าอัตราส่วนไม่สามารถลดลงจนเป็นศูนย์ อาจจะเป็นเพราะว่าค่า M ไม่มากพอและผลเฉลยที่ได้เป็น sub-optimal โดยสามารถลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงได้สูงสุดประมาณ 80% เมื่อพิจารณาเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี SLB และ LR อัตราส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งและมีค่าใกล้เคียงกันไม่ได้มีการลดลงเช่นเดียวกับวิธี DJP น่าจะเป็นเพราะว่าค่า M ยังไม่มากพอและผลเฉลยที่ได้เป็น sub optimal เช่นเดียวกัน สำหรับวิธี SLB และ LR จากกราฟการแปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดเส้นใยแก้วนำแสงได้สูงสุดถึงประมาณ 93% จากที่กล่าวมาทำให้สรุปได้ว่าการแปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เครือข่ายต้องการได้ โดยขึ้นอยู่กับค่า M และวิธีในการจัดสรรเส้นทางใหม่



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของเครือข่าย WP ต่อ VWP และจำนวนความยาวคลื่น (M)

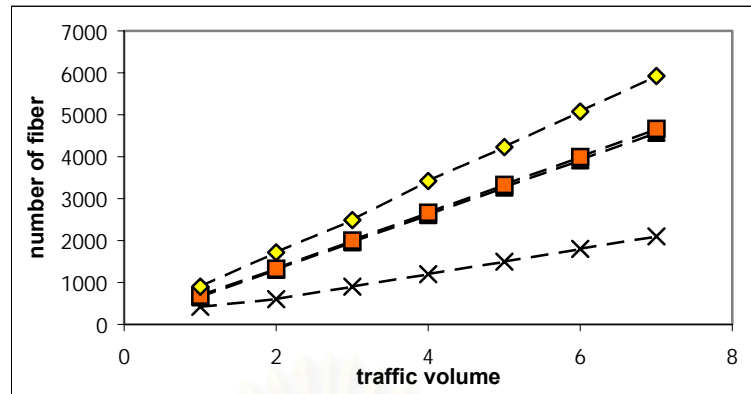
สำหรับความสัมพันธ์ของอัตราส่วนจำนวนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่าย WP ต่อ VWP และค่า M เป็นดังรูปที่ 4.20 จากรูปที่ค่า $M=1$ มีอัตราส่วนเท่ากับ 1 แต่เมื่อ M มากขึ้นค่าอัตราส่วนจะแตกต่างกันไป ซึ่งมีทั้งที่ค่าอัตราส่วนน้อยกว่าและมากกว่า 1 แสดงให้เห็นได้ว่าในกรณีที่เครือข่ายสามารถแปลงผันความยาวคลื่นอาจจะไม่สามารถลดค่า connectivity หรือจำนวนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายให้น้อยลงได้ แต่ในบางกรณีอาจจะมีแนวโน้มที่ทำให้ค่า connectivity เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะวิธี SLB ซึ่งให้ค่าอัตราส่วนต่ำกว่า 1 ทั้งหมด และวิธี LR เมื่อ $M > 16$ ส่วนเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้และเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่โดยวิธี DJP มีผลเฉลยส่วนใหญ่ที่มีอัตราส่วนมากกว่า 1 แต่อย่างไรก็ตามจากกราฟแสดงอัตราส่วนจำนวนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่าย WP ต่อ VWP ค่าอัตราส่วนมีแนวโน้มว่าจะมีค่าเข้าใกล้ 1 เมื่อ M มีค่ามากพอ เป็นเพราะว่าเมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้นเครือข่ายต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงลดน้อยลงจนใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.18 และทำให้ได้เครือข่ายวงแหวนเมื่อ M มีค่ามากพอ ไม่ว่าเครือข่ายสามารถแปลงผันความยาวคลื่นหรือไม่ก็ตาม



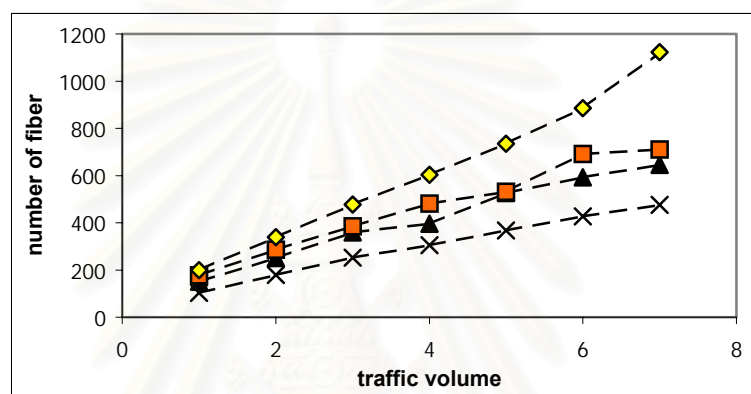
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนจำนวนข่ายเชื่อมต่อโยงของเครือข่าย WP ต่อเครือข่าย VWP และค่าจำนวนความยาวคลื่น (M)

4.2.4 ผลของทราฟฟิก

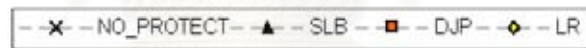
ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น และผลของรูปแบบทราฟฟิกที่แตกต่างกัน เครือข่ายที่ใช้ในการทดลองเป็นเครือข่าย 25 โหนด 300 ข่ายเชื่อมต่อโยง โดยที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น และกำหนดให้ค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมต่อโยงและเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากันเท่ากับ 1 ในส่วนแรกจะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของปริมาณทราฟฟิก โดยที่ทราฟฟิกของเครือข่ายเป็นแบบยูนิฟอร์ม กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและปริมาณทราฟฟิกเมื่อ $M=1,8$ เป็นดังรูปที่ 4.21ก, 4.21ข ตามลำดับ จากรูปที่ 4.21ก จะเห็นได้ว่าจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นตามปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น โดยความสัมพันธ์มีลักษณะใกล้เคียงกับเชิงเส้น เครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ และจากกราฟจะเห็นว่าเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นตามปริมาณทราฟฟิกเร็วกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ เป็นเพราะว่าเครือข่ายต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มเพื่อรองรับทราฟฟิกที่ถูกรบกวนในการหลบหลีกข่ายเชื่อมต่อโยงที่เสียหายซึ่งปริมาณทราฟฟิกที่ถูกรบกวนจะมากขึ้นตามปริมาณทราฟฟิกของเครือข่ายที่เพิ่มขึ้น ในกรณีที่ปริมาณทราฟฟิกของเครือข่ายเพิ่มขึ้น จึงทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงของเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่เพิ่มขึ้นเร็วกว่า เช่น ที่ปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 1 เครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ประมาณ 154-214% และเมื่อปริมาณทราฟฟิกเท่ากับ 5 ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าประมาณ 217-282%



(ก) M=1



(ข) M=8

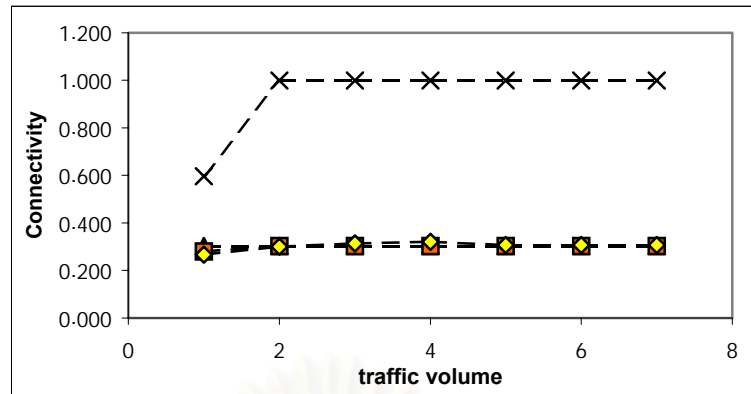


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงและปริมาณทราฟฟิก

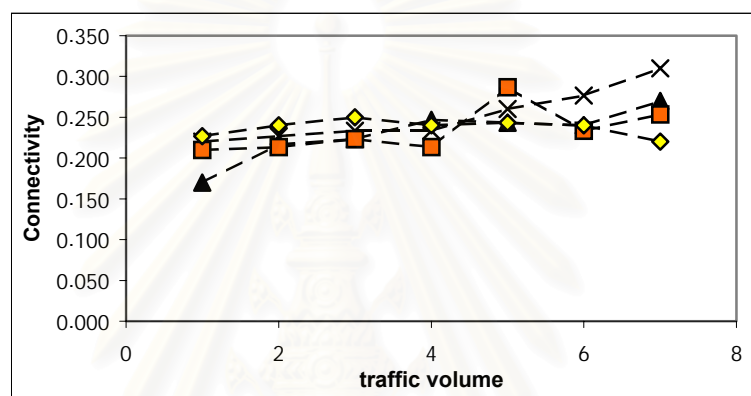
เมื่อพิจารณาวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธี วิธี LR ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นตามปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นเร็วกว่าวิธีอื่น ส่วนวิธี SLB และ DJP ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงใกล้เคียงกันมาก เป็นเพราะว่าการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR จะจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับทราฟฟิกทั้งหมดที่ถูกรบกวนจากการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงไปบนเส้นทางที่สั้นที่สุดซึ่งมีเพียงไม่กี่เส้นทาง เครือข่ายจะต้องการเส้นใยแก้วนำแสงจำนวนมาก จึงทำให้จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่เครือข่ายต้องการเพิ่มขึ้นตามปริมาณทราฟฟิกมากกว่าวิธีอื่น แต่สำหรับวิธี SLB และ DJP ทราฟฟิกที่ถูกรบกวนสามารถถูกจัดสรรเส้นทางโดยกระจายไปบนเส้นทางที่มีจำนวนมากกว่า จึงทำให้ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่า และการเพิ่มของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงตามทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นจึงน้อยกว่า ในกรณีที่ M=8 มีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.21ข จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะคล้ายกับรูปที่ 4.21ก แต่การเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงกับปริมาณทราฟฟิกจะเพิ่มขึ้นช้ากว่า เป็นเพราะว่าที่ M=8 เครือข่ายมีจำนวนช่องสัญญาณว่างมากขึ้น เมื่อ

ปริมาณทราฟฟิกเพิ่มขึ้นจะสามารถใช้งานช่องสัญญาณในส่วนนี้ได้ เครือข่ายจึงต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้นน้อยกว่าเมื่อ $M=1$ ซึ่งมีช่องสัญญาณว่างน้อยกว่า

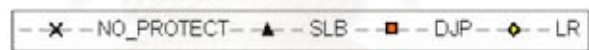
สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า connectivity และปริมาณทราฟฟิก เมื่อ $M=1,8$ เป็นดังรูปที่ 4.22ก, 4.22ข ตามลำดับ จากรูปที่ 4.22ก จะเห็นว่าในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ ค่า connectivity เพิ่มขึ้นจนเป็น 1 เมื่อปริมาณทราฟฟิกเพิ่มขึ้น เป็นเพราะว่าเมื่อปริมาณทราฟฟิกเพิ่มมากขึ้น การจัดสรรเส้นทางให้สามารถใช้เส้นใยแก้วนำแสงร่วมกันทำได้น้อย การจัดสรรเส้นทางที่สั้นลงจึงทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยลง ดังนั้นจำนวนสายเชื่อมโยงที่เครือข่ายต้องการจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณทราฟฟิกมากกว่า 2 ค่า connectivity เท่ากับ 1 นั่นคือจะได้เครือข่ายเป็นแบบ full-mesh เมื่อพิจารณาเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้จะเห็นว่าผลของปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า connectivity เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแล้วมีค่าคงที่ประมาณ 0.3 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้มาก เป็นเพราะว่าในกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ เมื่อปริมาณทราฟฟิกของเครือข่ายเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าการวางสายเชื่อมโยงเพิ่มอาจจะช่วยให้เครือข่ายต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยลง แต่ก็ต้องคำนึงถึงการป้องกันการเสียหายของสายเชื่อมโยงที่ได้อ่างเพิ่ม ซึ่งอาจจะทำให้โดยรวมแล้วเครือข่ายต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากขึ้นได้ จำนวนสายเชื่อมโยงของเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่จึงมีจำนวนไม่มากและเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อทราฟฟิกเพิ่มขึ้น จากกราฟจะเห็นได้ว่าเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีมีค่า connectivity ที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 0.26-0.32 เมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังตารางที่ 3.15ข ซึ่งเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ต้องการจำนวนสายเชื่อมโยงมากกว่าและผลของปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนสายเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์ที่แตกต่างจากผลเฉลยที่ได้จากอีวิริสติกอัลกอริทึม เป็นเพราะว่าอีวิริสติกอัลกอริทึมได้ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยไม่ได้มีการปรับปรุงการจัดสรรเส้นทาง แต่การหาผลเฉลยโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถจัดสรรเส้นทางให้ใช้เส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างคุ้มค่า จึงทำให้การจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อป้องกันการเสียหายของสายเชื่อมโยงที่วางเพิ่มสามารถทำได้ดีกว่า



(ก) M=1



(ข) M=8



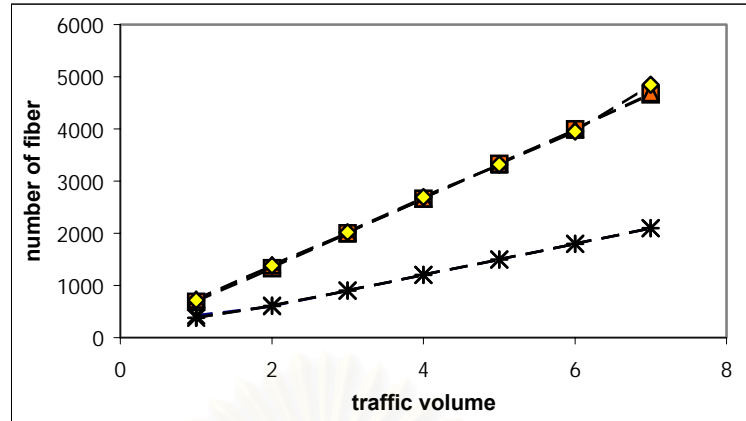
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า connectivity กับปริมาณทราฟฟิก

เมื่อพิจารณาที่ค่า $M=8$ จากรูปที่ 4.22ข จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์แตกต่างจากเมื่อ $M=1$ คือในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่มีค่า connectivity ใกล้เคียงกันกับเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ทั้ง 3 วิธี จากกราฟค่า connectivity มีแนวโน้มว่าจะเพิ่มตามปริมาณทราฟฟิกโดยเฉพาะเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ และเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ SLB เป็นเพราะว่าเมื่อ $M=8$ มีช่องสัญญาณว่างมากกว่าเมื่อ $M=1$ ในกรณีที่ปริมาณทราฟฟิกเพิ่มมากขึ้น การวางข่ายเชื่อมโยงเพิ่มจึงอาจทำให้ได้ต้นทุนต่ำลงเนื่องจากสามารถใช้ช่องสัญญาณว่างบนเส้นใยแก้วนำแสงในการรองรับทราฟฟิกที่ถูกกระทบจากการเสียหายได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่า connectivity มีไม่มากนักเนื่องจากเหตุผลเดียวกับเมื่อ $M=1$ ส่วนในกรณีที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ LR และ DJP มีแนวโน้มการเพิ่มของค่า connectivity ไม่ชัดเจนนัก ส่วนหนึ่งอาจจะเนื่องมาจากผลของการใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางที่สั้นที่สุดและความเป็น sub-optimal ของผลเฉลย สำหรับอีกสาเหตุที่ทำให้ปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่ม connectivity ไม่ชัดเจน น่าจะเป็นเพราะการที่ $M=8$ จะมีช่อง

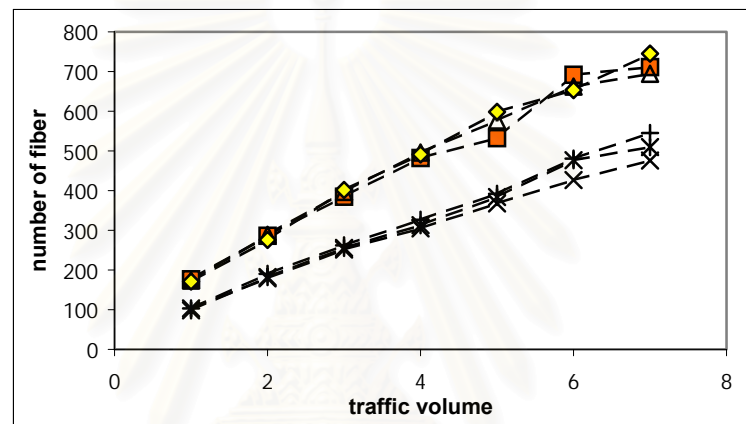
สัญญาณว่างเหลือมากกว่าเมื่อ $M=1$ ซึ่งช่องสัญญาณในส่วนนี้สามารถนำมาใช้ในการรองรับ ทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นได้ การวางข่ายเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นเพื่อช่วยให้สามารถจัดสรรเส้นทางที่สั้นลงจึงอาจ จะไม่จำเป็น

ในส่วนต่อไปจะทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของรูปแบบทราฟฟิก โดยรูปแบบทราฟฟิก ที่พิจารณามี 3 รูปแบบดังนี้คือ แบบยูนิฟอร์ม, แบบแรนดอม และแบบสตาร์ซึ่งมีปริมาณทราฟฟิก ไปยังโนดหนึ่งที่กำหนดมากกว่าโนดอื่น โดยจะพิจารณาเฉพาะเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทาง ใหม่และเครือข่ายที่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ DJP รูปที่ 4.23ก, 4.23ข แสดงความ สัมพันธ์ของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงกับปริมาณทราฟฟิกเมื่อ $M=1,8$ ตามลำดับ จากรูปที่ 4.23ก จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์เป็นไปในลักษณะเดียวกับรูปที่ 4.21ก คือจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงเพิ่ม ขึ้นในลักษณะเชิงเส้นกับปริมาณทราฟฟิกไม่ว่าทราฟฟิกเป็นรูปแบบใด และทราฟฟิกทั้ง 3 แบบมี จำนวนเส้นใยแก้วนำแสงใกล้เคียงกัน ทั้งในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่หรือ สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี DJP เมื่อพิจารณากรณีที่ $M=8$ ดังรูปที่ 4.23ข จะเห็นว่ามี ความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกับรูปที่ 4.23ก นั่นแสดงว่ารูปแบบของทราฟฟิกจะมีผลต่อจำนวนเส้นใย แก้วนำแสงที่เครือข่ายต้องการแต่ก็มีความแตกต่างกันไม่มากนัก รวมทั้งไม่สามารถระบุได้ว่า ทราฟฟิกแบบใดต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่า ซึ่งก็สอดคล้องกับผลที่ได้จากแบบ จำลองคณิตศาสตร์

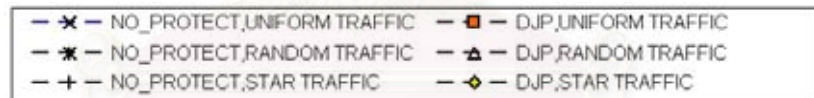
กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า connectivity กับปริมาณทราฟฟิกเมื่อ $M=1,8$ เป็นดังรูป ที่ 4.24ก, 4.24ข ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าเครือข่ายที่มีรูปแบบทราฟฟิกต่างกันทั้ง 3 แบบมี ความสัมพันธ์ระหว่างค่า connectivity และปริมาณทราฟฟิกในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 4.22ก, 4.22ข คือในกรณีที่ปริมาณทราฟฟิกเพิ่มขึ้น เมื่อ $M=1$ ค่า connectivity มีค่าค่อนข้างคงที่ และ เมื่อ $M=8$ มีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างทราฟฟิกทั้ง 3 แบบ เมื่อ $M=1$ ในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ เครือข่ายที่มีทราฟฟิกแบบยูนิฟอร์มมีค่า connectivity มากที่สุดตามด้วยแบบสตาร์และแรนดอมตามลำดับ แต่เมื่อปริมาณทราฟฟิกมาก กว่า 4 เครือข่ายที่มีทราฟฟิกต่างกันทั้ง 3 แบบจะมีค่า connectivity เท่ากัน ในกรณีที่เครือข่าย สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี DJP ค่า connectivity มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับเครือข่ายที่มี ทราฟฟิกแตกต่างกันทั้ง 3 รูปแบบ ส่วนเมื่อ $M=8$ ผลเฉลยของเครือข่ายที่มีรูปแบบทราฟฟิกต่าง กัน จะมีค่า connectivity ใกล้เคียงกันไม่ว่าเป็นเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่หรือจัด สรรเส้นทางใหม่วิธี DJP จึงอาจกล่าวได้ว่ารูปแบบของทราฟฟิกมีผลทำให้เครือข่ายต้องการค่า connectivity ต่างกันแต่ก็มีความแตกต่างที่ไม่ชัดเจนนัก ซึ่งเมื่อ M มากขึ้นน่าจะทำให้ผลของรูปแบบ ทราฟฟิกที่มีต่อค่า connectivity ลดน้อยลงไป



(ก) M=1

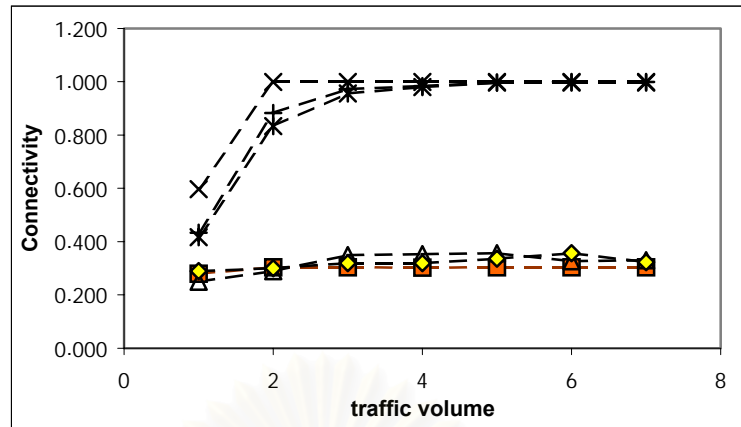


(ข) M=8

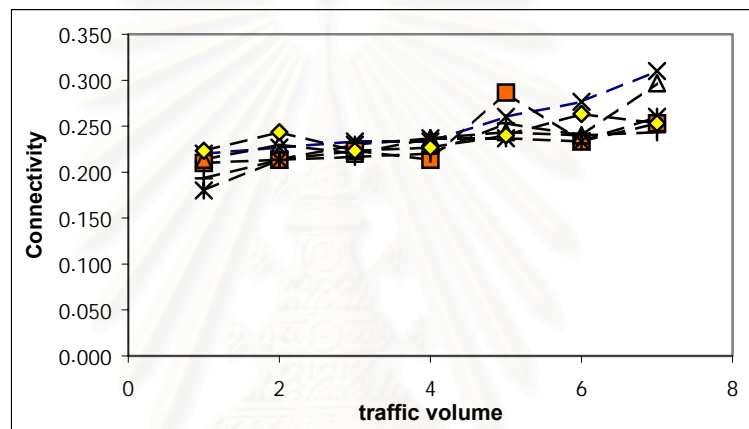


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงกับปริมาณทราฟฟิก เมื่อเครือข่ายมีรูปแบบทราฟฟิกต่างกัน

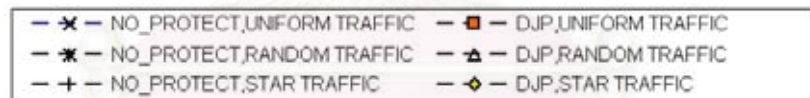
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) M=1



(ข) M=8



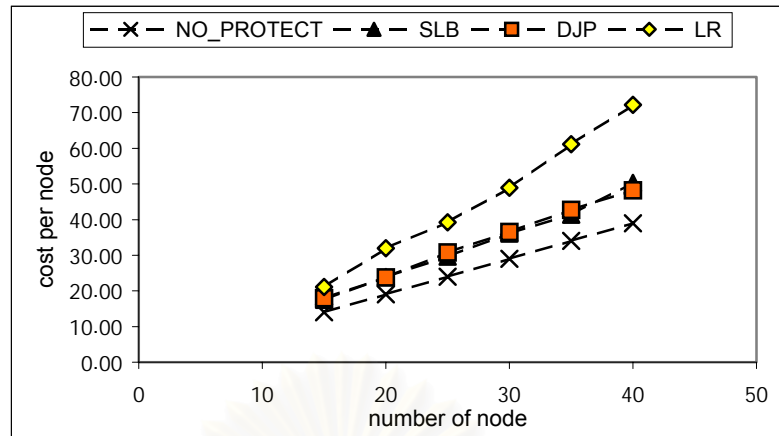
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Connectivity กับปริมาณทราฟฟิก เมื่อเครือข่ายมีรูปแบบทราฟฟิกต่างกัน

4.2.5 ผลของขนาดเครือข่าย

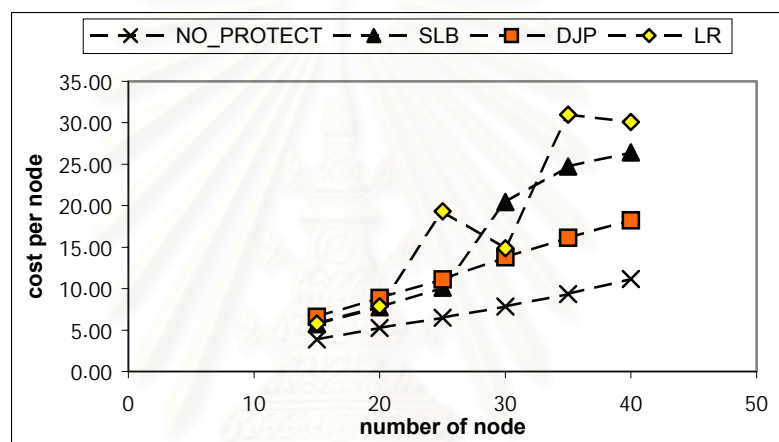
ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงผลของขนาดของเครือข่าย โดยขนาดของเครือข่ายพิจารณาจากจำนวนโหนด ส่วนจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ใช้ในการออกแบบพิจารณาจากทุกๆ ข่ายเชื่อมโยงซึ่งมีจำนวนเท่ากับ $\frac{n}{2}(n-1)$ เมื่อ n คือจำนวนโหนด โดยกำหนดให้ค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากันเท่ากับ 1 ทั้งนี้ทุกเครือข่ายมีทราฟฟิกเป็นแบบยูนิฟอร์มขนาดเท่ากับ 1 และเครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าต้นทุนต่อโหนดและจำนวนโหนดเมื่อ $M=1,8$ เป็นดังรูปที่ 4.25ก, 4.25ข ตามลำดับ จากรูปที่ 4.25ก จะเห็นว่าค่าต้นทุนต่อโหนดเพิ่มขึ้นตามจำนวนโหนดในลักษณะเชิงเส้นเป็นเพราะว่าเมื่อเครือข่ายมีจำนวนโหนด

เพิ่มขึ้น 1 โหนด เช่น เพิ่มจาก n โหนดเป็น $n+1$ โหนด จำนวนคูโหนดของเครือข่ายเพิ่มขึ้น n คูโหนด ปริมาณทราฟฟิกของเครือข่ายซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนคูโหนดก็จะเพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่มากกว่าจำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้เครือข่ายมีต้นทุนต่อโหนดเพิ่มขึ้นเพื่อรองรับทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น ในกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้จะเห็นว่ามีความต้นทุนต่อโหนดสูงกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ เมื่อพิจารณาระหว่างเครือข่ายที่มีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีจะเห็นว่าเมื่อจำนวนโหนดเพิ่มขึ้นวิธี LR มีความต้นทุนต่อโหนดเพิ่มขึ้นมากกว่าวิธี SLB และ DJP เพราะว่าวิธี LR จะจัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างคูโหนดของข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย ปริมาณทราฟฟิกที่ถูกกระทบทั้งหมดถูกจัดสรรไปบนเส้นทางที่สั้นที่สุดซึ่งมีจำนวนเส้นทางไม่มาก ทำให้ทราฟฟิกไม่สามารถกระจายไปบนเส้นทางที่หลากหลายเช่นเดียวกับวิธี SLB และ DJP ที่จัดสรรเส้นทางใหม่ระหว่างคูโหนดที่เป็นปลายทางของทราฟฟิก เมื่อจำนวนโหนดมากขึ้นจำนวนคูโหนดก็มากขึ้นตามทำให้ปริมาณทราฟฟิกที่ถูกกระทบจำนวนมากถูกจัดไปบนเส้นทางที่มีความจำกัด ค่าต้นทุนต่อโหนดของวิธี LR จึงเพิ่มขึ้นเร็วกว่า สำหรับวิธี SLB และ DJP มีวิธีการจัดสรรเส้นทางที่คล้ายคลึงกันจึงทำให้มีความต้นทุนต่อโหนดใกล้เคียงกัน

ในกรณีที่ $M=8$ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์เป็นดังรูปที่ 4.25x จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าต้นทุนต่อโหนดเพิ่มขึ้นตามจำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับเมื่อ $M=1$ ยกเว้นวิธี SLB และ LR ที่การเพิ่มขึ้นของค่าต้นทุนต่อโหนดไม่ได้มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับจำนวนโหนด ในกรณีที่ $M=8$ ค่าต้นทุนต่อโหนดจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนโหนดช้ากว่าเมื่อ $M=1$ เนื่องจากว่าเมื่อ $M=8$ มีจำนวนช่องสัญญาณเหลือมากกว่าซึ่งช่องสัญญาณในส่วนนี้สามารถนำมาใช้รองรับปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของเครือข่ายได้ จึงทำให้การเพิ่มขึ้นของค่าต้นทุนต่อโหนดน้อยกว่าเมื่อ $M=1$ สำหรับวิธี LR เมื่อขนาดของเครือข่ายเพิ่มจาก 25 โหนดเป็น 30 โหนด ต้นทุนต่อโหนดกลับมีค่าลดลง และจากกราฟจะเห็นว่าเมื่อจำนวนโหนดมากกว่า 30 โหนด ค่าต้นทุนต่อโหนดของวิธี SLB และ DJP จะแตกต่างกันค่อนข้างมาก น่าจะเป็นผลมาจากในการหาผลเฉลยได้ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางที่สั้นที่สุดเพื่อรองรับทราฟฟิกซึ่งอาจจะไม่ใช่วิธีการจัดสรรเส้นทางที่ดีที่สุด รวมทั้งความเป็น sub-optimal ของผลเฉลย



(ก) M=1

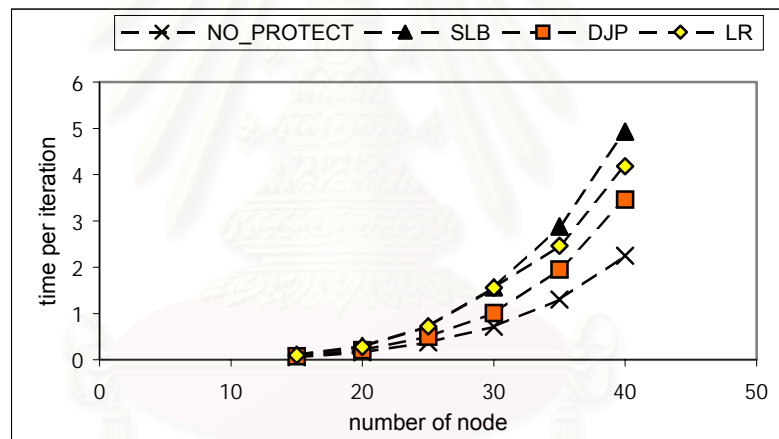


(ข) M=8

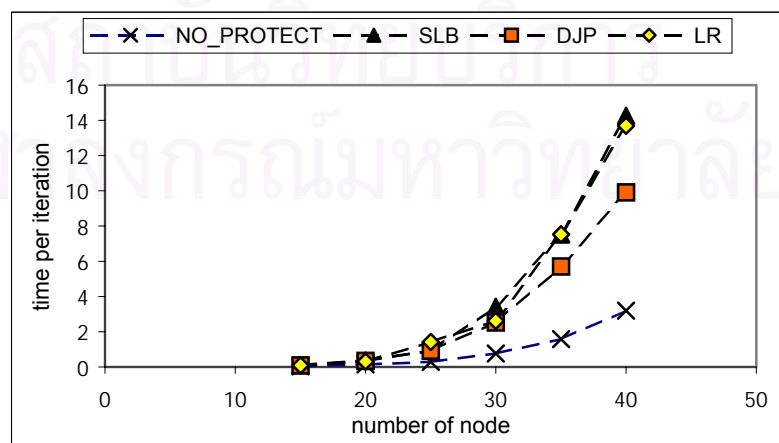
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าต้นทุนต่อโนดกับจำนวนโนด

ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบการทำงานของอัลกอริทึมกับจำนวนโนดเป็นดังรูปที่ 4.26 จากรูปจะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อจำนวนโนดมากขึ้น เมื่อเครือข่ายมีขนาด 40 โหนดใช้เวลาถึงประมาณ 45 เท่าของเครือข่าย 15 โหนด เมื่อ M=1 และประมาณ 130 เท่าเมื่อ M=8 เป็นเพราะว่าในแต่ละรอบการทำงานของอัลกอริทึมต้องจัดสรรเส้นทางที่เป็น active path ให้กับทุกคู่โนดซึ่งมีจำนวนเท่ากับ $\frac{n}{2}(n-1)$ และในกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ต้องมีการจัดสรรเส้นทางที่เป็น protection path ด้วย ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้จะเพิ่มเร็วกว่า จากรูปที่ 4.26 ก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีสามารถเรียงลำดับตามเวลาที่ใช้ต่อบนจากน้อยไปมากได้ดังนี้คือวิธี DJP, LR และ SLB สำหรับวิธี DJP ใช้เวลาน้อยที่สุดเพราะจะพิจารณาจัดสรรเส้นทางที่เป็น protection path ให้กับแต่ละ active path ของทุกคู่โนด ซึ่งจำนวนครั้งในการคำนวณหาเส้นทางขึ้นอยู่กับจำนวน active path ของทุกคู่โนด แต่เพราะว่า active path ระหว่างคู่โนดมีจำนวนไม่

มากจึงทำให้ใช้เวลาน้อยกว่าวิธีอื่น ส่วนวิธี LR จะจัดสรรเส้นทางใหม่เฉพาะระหว่างคูนิดของข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย จึงทำให้จำนวนครั้งในการคำนวณหาเส้นทางขึ้นอยู่กับจำนวนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่าย โดยเวลาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับปริมาณกราฟฟิกที่ต้องการการจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วย จึงทำให้ใช้เวลามากกว่าวิธี DJP ในกรณีของวิธี SLB จะจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับทุกๆ คูนิดที่เป็นปลายทางของเส้นทางที่ถูกกระทบจากการเสียหายของข่ายเชื่อมโยง จึงทำให้จำนวนครั้งในการคำนวณหาเส้นทางขึ้นอยู่กับจำนวนคูนิดที่ถูกกระทบจากการเสียหาย และจำนวนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่าย เวลาที่ใช้สำหรับวิธี SLB จึงมากกว่าวิธี LR ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าความแตกต่างมีความชัดเจนขึ้นเมื่อจำนวนโนดมากขึ้น สำหรับในกรณีที่ $M=8$ จะเห็นได้ว่าโดยรวมแล้วความสัมพันธ์มีลักษณะคล้ายกัน ยกเว้นในบางกรณีที่วิธี LR ใช้เวลามากกว่า SLB ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากที่วิธี LR ต้องจัดสรรเส้นทางในแต่ละความยาวคลื่น สำหรับข้อแตกต่างอีกประการคือในกรณีที่ $M=8$ เวลาจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนโนดเร็วกว่าเมื่อ $M=1$ น่าจะเป็นผลมาจากค่า M ที่เพิ่มขึ้นทำให้อัลกอริทึมต้องใช้เวลาในการจัดสรรความยาวคลื่นให้กับเส้นทางมากขึ้น



(ก) $M=1$



(ข) $M=8$

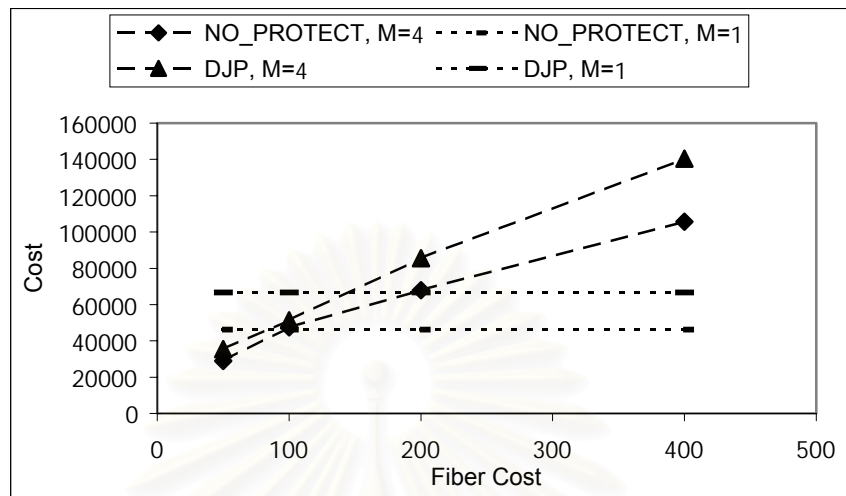
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและจำนวนโนด

4.2.6 ผลของค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงและค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง

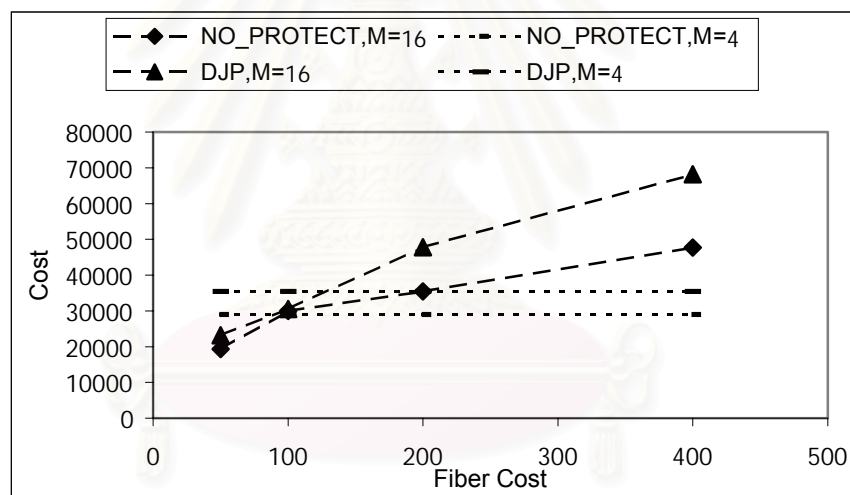
ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงผลของค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยง ($\alpha_{i,j}$) และค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง ($\beta_{i,j}$) ดังสมการ 3.1 ที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 เครือข่ายที่ใช้ในการทดสอบเป็นเครือข่าย 25 โหนด 300 ข่ายเชื่อมโยง ทั้งนี้กราฟฟิกของเครือข่ายเป็นแบบยูนิฟอร์มขนาดเท่ากับ 1 และเครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่นได้ จากหัวข้อที่ผ่านมาในบทนี้ทั้งหมดได้กำหนดให้ค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงและค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงมีค่าเท่ากันเท่ากับ 1 ในการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นว่าเมื่อค่า M มากขึ้นจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจะลดลง ดังนั้นค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงที่ค่า M มากกว่าสามารถสูงกว่าค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงที่ค่า M น้อยกว่าได้ไม่เกินค่าหนึ่งจึงให้ต้นทุนที่ต่ำกว่าดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 3.4.3

รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ของค่าต้นทุนและค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงโดยกำหนดให้ต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงมีค่าคงที่ จากรูป 4.27ก จะเห็นว่าเครือข่ายที่มีค่า $M=4$ มีค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงได้ไม่เกินค่าหนึ่งจึงให้ต้นทุนต่ำกว่าที่ $M=1$ ในกรณีเครือข่ายที่ไม่สามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ได้ จะเห็นว่าเครือข่ายที่มีค่า $M=4$ มีค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงสูงกว่าที่ $M=1$ ได้ไม่เกินประมาณ 2 เท่าจึงให้ค่าต้นทุนที่ต่ำกว่า ในกรณีที่เครือข่ายสามารถจัดสรรเส้นทางใหม่ด้วยวิธี DJP จะเห็นว่าเครือข่ายที่มีค่า $M=4$ มีค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงสูงกว่าเครือข่ายที่มี $M=1$ ได้ไม่เกิน 3 เท่าจึงให้ค่าต้นทุนที่ต่ำกว่า จากรูปที่ 4.27ข จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์คล้ายกันกับรูปที่ 4.27ก แต่เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3.4.3 เครือข่ายที่มี $M=16$ จะมีค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงสูงกว่า $M=4$ ได้ในอัตราส่วนที่ต่ำกว่าในกรณีที่เปรียบเทียบระหว่างเครือข่ายที่มี $M=4$ และ 1 ซึ่งต่างจากความสัมพันธ์ในรูป 4.27 ที่มีค่าอัตราส่วนใกล้เคียงกัน น่าจะมีสาเหตุมาจากการที่ฮิวริสติกอัลกอริทึมไม่ได้มีการจัดสรรเส้นทางที่ดีที่สุดรวมทั้งความเป็น sub-optimal ของผลเฉลย เมื่อพิจารณาในกรณีที่ค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงคงที่ ค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลง เนื่องจากในการหาผลเฉลยพยายามที่จะลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงให้น้อยลง รวมทั้งยังมีแนวโน้มทำให้ค่า connectivity ของเครือข่ายเพิ่มขึ้น ในกรณีที่ค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงคงที่ การเพิ่มค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงมีแนวโน้มทำให้เครือข่ายที่ได้มีค่า connectivity ต่ำลงและจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงจะมากขึ้น เพราะว่าเมื่อต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงสูงขึ้น การหาผลเฉลยจะพยายามลดจำนวนข่ายเชื่อมโยงให้น้อยลง ซึ่งเมื่อจำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อยลงกราฟฟิกที่ผ่านแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงและค่าต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสงด้วย เพราะว่าเมื่อเพิ่มเส้นใยแก้วนำแสงก็จะทำให้ต้นทุนในส่วนของ

เส้นใยแก้วนำแสงเพิ่มขึ้น สำหรับความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นว่าสอดคล้องกับความสัมพันธ์ที่ได้
จากผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์



(ก) M=1,4



(ข) M=4,16

รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าต้นทุนและต้นทุนของเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อ
M=1,4 และ 16 โดยกำหนดให้ค่าต้นทุนสายเคเบิลใยแก้วเท่ากับ 500

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการออกแบบโทโปโลยีของเครือข่าย WDM ที่สามารถแก้ไข ปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้ ในการออกแบบจะประกอบด้วย การเลือกวางข่ายเชื่อมโยง การจัดสรรทรัพยากรเพื่อให้เครือข่ายสามารถทำงานได้ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่มีการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ในสภาวะที่มีการเสียหายของหนึ่งข่ายเชื่อมโยงจะแก้ไขปัญหาดังกล่าว ด้วยการ จัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลบหลีกข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย ซึ่งวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ที่ได้ศึกษามีด้วยกัน 4 วิธีได้แก่ วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ Minimal Cost (MC), Single Link Basis (SLB), Disjoint Path (DJP) และ Link Restoration (LR) ในส่วนของการจัดสรรทรัพยากรจึง ประกอบไปด้วยการจัดสรรเส้นทาง การจัดสรรเส้นทางใหม่ และการจัดสรรความยาวคลื่น โดยมี วัตถุประสงค์ในการออกแบบเพื่อให้ได้ต้นทุนต่ำที่สุดซึ่งต้นทุนจะประกอบด้วยต้นทุนของข่ายเชื่อมโยง และเส้นใยแก้วนำแสง จากเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบจะศึกษาถึงต้นทุนที่ต้องจัดสรรให้ กับเครือข่ายเพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ตามแต่ละวิธีการจัดสรรเส้นทาง ใหม่ รวมทั้งในกรณีที่เครือข่ายสามารถและไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น

ในการออกแบบวิธีหนึ่งจะสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการจำลอง ปัญหา แบบจำลองคณิตศาสตร์จะใช้เทคนิค Integer linear programming (ILP) ซึ่งผลเฉลยที่ได้ สามารถรับประกันได้ว่าเป็นผลเฉลยที่มีต้นทุนต่ำที่สุด สำหรับข้อมูลที่กำหนดให้กับแบบจำลองได้ แก่ โหนดและข่ายเชื่อมโยงที่เป็นไปได้ทั้งหมด, ปริมาณทราฟฟิก, จำนวนความยาวคลื่น (M), ค่า ต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสง และเส้นทางระหว่างคูโหนดภายในเครือข่าย จากการ พิจารณาความซับซ้อนของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในแง่ของจำนวน constraint และตัวแปร จะ ได้ว่าเครือข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้มีแบบจำลองที่มีจำนวน constraint และตัวแปรมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธี การจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธีจะได้ว่าวิธี SLB มีจำนวน constraint และตัวแปรมากที่สุด ตาม ด้วยวิธี MC ส่วนวิธี DJP และ LR จะมีจำนวน constraint และตัวแปรน้อยกว่าทั้งวิธี MC และ SLB เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเครือข่าย VWP และ WP จะได้ว่าแบบจำลองสำหรับเครือข่าย WP มี จำนวน constraint และตัวแปรมากกว่า โดยจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามค่า M ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่แบบ

จำลองสำหรับเครือข่าย VWP จะมีจำนวนคงที่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีจำนวน constraint และตัวแปรมากกว่าจะต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานกว่า

ในการทดลองหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถสรุปผลได้ดังนี้ เครือข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหานึงข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้จะต้องการจำนวนรวมของข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 4 วิธี วิธีที่ต้องการจำนวนรวมข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุดคือวิธี MC และ SLB ซึ่งต้องการเป็นจำนวนเท่ากัน ตามด้วยวิธี LR ส่วนวิธี DJP จะต้องการจำนวนรวมข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสงมากที่สุด แต่จากข้อจำกัดในแปลงผันความยาวคลื่นจึงทำให้ในกรณีที่เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น วิธี LR จะต้องการจำนวนรวมข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าวิธี DJP ที่ค่า M บางค่า

สำหรับผลของการแปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อจำนวนรวมข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสงสรุปได้ว่าการแปลงผันความยาวคลื่นสามารถช่วยลดจำนวนรวมข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสงได้ที่บางค่า M และบางวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ ซึ่งจากการทดลองจะมีผลเฉพาะวิธี LR ที่บางค่า M เท่านั้น เมื่อพิจารณาถึงผลของค่า M ที่มีต่อจำนวนรวมข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสง สรุปได้ว่าเมื่อ M เพิ่มขึ้นจะทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนรวมข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสงลดลง โดยลดลงได้จนถึงค่าหนึ่งซึ่งเป็นจำนวนรวมข่ายเชื่อมโยงและเส้นใยแก้วนำแสงที่ต่ำที่สุด คือจะเป็นเครือข่ายวงแหวนที่มีหนึ่งเส้นใยแก้วนำแสงบนแต่ละข่ายเชื่อมโยง

เมื่อพิจารณาในแง่ของจำนวนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่าย สามารถสรุปได้ว่าเครือข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหานึงข่ายเชื่อมโยงเสียหายต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่จะสามารถเรียงลำดับวิธีที่ต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ วิธี DJP, LR, SLB และ MC ตามลำดับ สำหรับผลของค่า M ที่มีต่อจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่เครือข่ายต้องการ สามารถสรุปได้ว่าเมื่อ M เพิ่มขึ้นจะทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงลดลงจนกระทั่งได้เครือข่ายรูปวงแหวนเมื่อ M มีค่ามากพอ

จากการพิจารณาเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถสรุปได้ว่า เครือข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหานึงข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้ต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ โดยที่มีแนวโน้มว่าวิธี DJP และ LR ใช้เวลาน้อยกว่าวิธี MC และ SLB เมื่อพิจารณาถึงผลของการแปลงผันความยาวคลื่นที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยสรุปได้ว่าการแปลงผันความยาวคลื่นช่วยทำให้ต้องการเวลาในการหาผลเฉลยน้อยลง โดยเฉพาะเมื่อ M มีค่ามากขึ้น สำหรับผลของขนาดเครือข่ายที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยสรุป

ได้ว่าเมื่อเครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานขึ้นซึ่งในบางกรณีอาจจะใช้เวลานานมากจนเกินความเหมาะสม

จากการพิจารณาเวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์จะได้ว่าแบบจำลองจะต้องการเวลาในการหาผลเฉลยนานมากในกรณีที่เครือข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถหาผลเฉลยได้ในเวลาที่เหมาะสม ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาการหาผลเฉลยอีกวิธีหนึ่งคือฮิวริสติกอัลกอริทึม แต่อย่างไรก็ตามการหาผลเฉลยโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึมไม่ได้พิจารณาผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งหมด จึงไม่สามารถให้การรับประกันได้ว่าผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยที่ดีที่สุด จากการทดลองในการหาผลเฉลยโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึมสามารถสรุปได้ว่า ฮิวริสติกอัลกอริทึมที่มีการปรับปรุงการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นแบบสุ่มจะให้ผลเฉลยที่มีค่าต้นทุนสูงกว่าฮิวริสติกที่มีอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น ในการทดลองต่อไปจึงได้เลือกฮิวริสติกอัลกอริทึมที่มีอัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางที่สั้นที่สุดและอัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อนำมาใช้ในการหาผลเฉลย

จากการทดลองหาผลเฉลยโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม เมื่อพิจารณาในแง่ของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง สามารถสรุปได้ว่าเครือข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงเสียหายต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ทั้ง 3 วิธีซึ่งได้แก่วิธี SLB, DJP และ LR จะได้ว่าในช่วงแรกของค่า M วิธี LR ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงมากที่สุด ตามด้วยวิธี DJP และวิธี SLB ต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยที่สุด ในขณะที่เมื่อค่า M มากกว่าค่าหนึ่งวิธี DJP กลับต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงน้อยกว่าวิธี SLB ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางที่สั้นที่สุด จากการพิจารณาผลของค่า M สามารถสรุปได้ว่าเมื่อ M มีค่ามากขึ้นจะมีผลทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงลดลง และมีแนวโน้มว่าจะมีค่าคงที่เมื่อ M มีค่ามากพอ แต่ค่า M ที่เพิ่มขึ้นกลับทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนช่องสัญญาณมากขึ้น รวมทั้งทำให้ค่าอัตราส่วนการใช้งานช่องสัญญาณ (utilization) ของเครือข่ายลดลงด้วย

เมื่อพิจารณาจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่เครือข่ายต้องการจะได้ว่าทั้งเครือข่ายที่ไม่สามารถและสามารถแก้ไขปัญหานี้ข่ายเชื่อมโยงเสียหายต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงใกล้เคียงกัน แต่เมื่อค่า M เพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งวิธี DJP จะต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงมากกว่าวิธีอื่น สำหรับผลของค่า M ที่มีต่อจำนวนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายสามารถสรุปได้ว่า เมื่อ M มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงลดน้อยลง และมีแนวโน้มว่าจะมีจำนวนลดลงจนกระทั่งได้เครือข่ายวงแหวนเมื่อ M มีค่ามากพอ

จากการพิจารณาผลของการแปลงผันความยาวคลื่น เมื่อพิจารณาในแง่ของจำนวนเส้นใย แก้วนำแสงสามารถสรุปได้ว่า การแปลงผันความยาวคลื่นจะสามารถช่วยลดจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงในกรณีที่เครือข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงเสียหายได้มากกว่าเครือข่ายที่ไม่สามารถแก้ไขปัญหา ซึ่งจำนวนเส้นใยแก้วนำแสงที่ลดได้จะขึ้นอยู่กับค่า M และวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ เมื่อพิจารณาในแง่ของจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่เครือข่ายต้องการ สามารถสรุปได้ว่าการแปลงผันความยาวคลื่นทำให้เครือข่ายต้องการจำนวนข่ายเชื่อมโยงต่างกัน แต่จะมีผลน้อยลงเมื่อ M มีค่ามากจนถึงค่าหนึ่ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในขั้นต่อไปที่น่าสนใจ

1. ในการแก้ไขปัญหามองข่ายเชื่อมโยงเสียหายสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งนอกจากวิธีที่ได้ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้แล้วยังสามารถนำหลักการของวงแหวน (Ring) มาใช้ในการป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงได้ งานวิจัยที่น่าสนใจคือการออกแบบโทโปโลยีที่สามารถป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงได้ โดยการนำหลักการของวงแหวนมาใช้แทนวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่แบบ path restoration และ link restoration
2. ในการแก้ปัญหา Optimization จะสามารถนำฮิวริสติกอัลกอริทึมเช่น Genetic Algorithm (GA), Simulated Annealing (SA) ฯลฯ มาใช้ในการหาผลเฉลยได้ซึ่งอัลกอริทึมเหล่านี้จะเป็นอัลกอริทึมในส่วนของกระบวนการปรับปรุงผลเฉลย งานวิจัยในขั้นต่อไปจึงอาจจะนำอัลกอริทึมเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโทโปโลยีที่สามารถป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงได้ ซึ่งอาจจะช่วยให้ได้ผลเฉลยที่ดีขึ้น
3. เนื่องจากฮิวริสติกอัลกอริทึมในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางที่สั้นที่สุดซึ่งไม่ใช่การจัดสรรเส้นทางที่ใช้เส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างคุ้มค่าที่สุด งานวิจัยต่อไปจึงน่าจะมีการพัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถจัดสรรเส้นทางให้สามารถใช้เส้นใยแก้วนำแสงได้อย่างคุ้มค่ามากขึ้นโดยเฉพาะในส่วนของการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อป้องกันการเสียหายของข่ายเชื่อมโยง

รายการอ้างอิง

1. Bannister, J. A. ; and Fratta, L. Topological Design of the Wavelength-Division Optical Network. IEEE Proceedings of INFOCOM '90 Vol. 3 (June 1990): 1005-1013.
2. Ramaswami, R. ; and Sivarajan, K. N. Routing and Wavelength Assignment in All-Optical Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking Vol. 3, No. 5 (October 1995): pp. 489-500.
3. Okamoto, S. ; and Sato, K. Optical Path Cross-Connect Systems for Photonic Transport Networks. IEEE GLOBECOM '93 Vol. 1 (29 November - 2 December 1993): 474-480.
4. Nagatsu, N. ; Okamoto, S. ; and Sato, K. Optical Path Cross-Connect System Scale Evaluation Using Path Accommodation Design for Restricted Wavelength Multiplexing. IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 14, No. 5 (June 1996): 893-902.
5. Jeong, G. ; and Ayanoglu, E. Comparison of Wavelength-Interchanging and Wavelength-Selective Cross-Connects in Multiwavelength All-Optical Networks. IEEE Proceedings of INFOCOM '96 Vol. 1 (24 – 28 March 1996): 156-163.
6. Chlamtac, I. ; Ganz, A. ; Karmi, G. Lightpath Communations: An Approach to High Bandwidth Optical WAN's. IEEE Transactions on Communications Vol. 40, No. 7 (July 1992): 1171-1182.
7. Caenegem, B. V., et al. Dimensioning of Survivable WDM Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 16, No. 7 (September 1998): 1146-1157.
8. Gerla, M. ; and Kleinrock, L. On the topological design of distributed computer networks. IEEE Transactions on Communications Vol. 25, No. 1 (January 1977): 48-60.
9. Pierre, S. ; and Elgibaoui, A. A Tabu-Search Approach for Designing Computer-Network Topologies with Unreliable Components. IEEE Transactions on Reliability Vol. 46, No. 3 (September 1997): 350-359.

10. Altiparmak, B. F. ; and Smith, A. E. Efficient Optimization of All-Terminal Reliable Networks, Using an Evolutionary Approach. IEEE Transactions on Reliability Vol. 46, No. 1 (March 1997): 18-26.
11. Kershenbaum, A. ; Kermani, P. ; and Grove, G. A. MENTOR: An Algorithm for Mesh Network Topological Optimization and Routing. IEEE Transactions on Communications Vol. 39, No. 4 (April 1991): 503-513.
12. Qin, Z. F. ; Wu, F. ; and Law, N. Designing B-ISDN Network Topologies Using The Genetic Algorithm. IEEE Proceedings Fifth International Symposium on MASCOTS '97 (January 1997): 140-145.
13. Konak, A. ; and Smith, A. E. A Hybrid Genetic Algorithm Approach for Backbone Design of Communication Networks. IEEE Proceedings of CEC '99 Vol. 3 (1999): 1817-1823.
14. Xiao, G. ; Leung, Y. W. ; and Hung, K. W. Two-Stage Cut Saturation Algorithm for Designing All-Optical Networks. IEEE Transactions on Communications Vol. 49, No. 6 (June 2001): 1102-1115.
15. Ersoy, C. ; and Panwar, S. S. Topological Design of Multihop Lightwave Networks. IEEE GLOBECOM '93 Vol. 3 (29 November – 2 December 1993): 1803-1807.
16. Wauters, N. ; and Demeester, P. Design of the Optical Path Layer in Multiwavelength Cross-Connected Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 14, No. 5 (June 1996): 881-892.
17. Banerjee, D. ; and Mukherjee, B. A Practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 14, No. 5 (June 1996): 903-908.
18. Xiong, Y. ; and Mason, L. On State-Independent and State-Dependent Path Restoration in Self-healing Networks. IEEE ICC '98 Vol. 2 (7-11 June 1998): 1114-1118.
19. Ramamurthy, S. ; and Mukherjee, B. Survivable WDM Mesh Networks, Part I- Protection. IEEE Proceedings of INFOCOM '99 Vol. 2 (21-25 March 1999): 744-751.

20. Mohan, G. ; and Murthy, C. S. R. Lightpath Restoration in WDM Optical Networks. IEEE Network Vol. 14, No. 6 (November/December 2000): 24-32.
21. Wuttisittikulij, L. ; and O'Mahony, M.J. Use of Spare Wavelength for Traffic Restoration in Multi-Wavelength Transport Network. IEEE ICC '96 Vol. 3 (June 1996): 1778-1782.
22. Mikac, R. B. ; and Podnar, I. A Heuristic Approach to Wavelength Assignment in All-Optical Networks. IEEE MELECON '98 Vol. 2 (18-20 May 1998): 759-763.
23. Crochat, O. ; and Boudec, J. L. Design Protection for WDM Optical Networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 16, No. 7 (September 1998): 1158-1165.
24. Modiano, E. ; and Narula-Tam, A. Survivable Lightpath Routing: A New Approach to the Design of WDM-Based Networks. IEEE Journal On Selected Areas in Communications Vol. 20, No. 4 (May 2002): 800-809.
25. CPLEX6.6 [Computer program]. ILOG, Inc (distributor). ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับโปรแกรม CPLEX สามารถหาได้จาก <http://www.cplex.com>.
26. Ahuja, R. K. ; Magnanti, T. L. ; and Crin, J. B. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. New Jersey : Prentice-Hall International, 1993.
27. Martins, E. D .Q. V. ; and Pascoal, M. M. B. A New Implementation of Yen's Ranking Loopless Paths Algorithms [Online]. October 2000. Available from: <http://www.mat.uc.pt/~eqvm/new.html> [2002, January 21]



ภาคผนวก

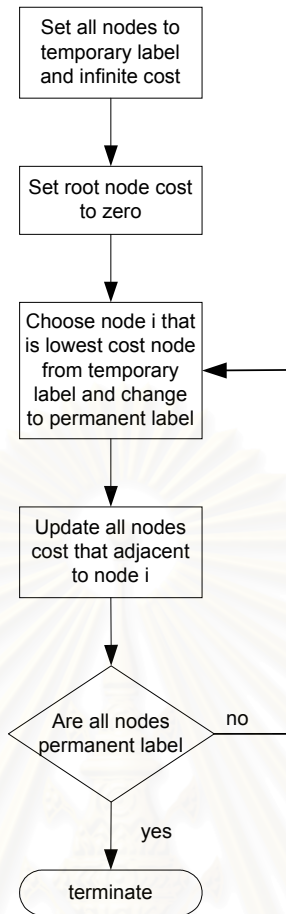
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

อัลกอริทึม Dijkstra (Dijkstra's Algorithm)

อัลกอริทึม Dijkstra [26] จะเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำสุดระหว่าง โหนดใดโหนดหนึ่งซึ่งเรียกว่า root node และโหนดอื่นๆ โหนดภายในเครือข่าย ผลที่ได้จากอัลกอริทึม จะเป็น tree ที่มีจุดเริ่มต้นจาก root node ไปยังโหนดอื่นๆ ซึ่งทำให้สามารถหาเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำ ที่สุดระหว่าง root node และโหนดอื่นได้ ต้นทุนของเส้นทางระหว่างโหนดจะเป็นต้นทุนของข่าย เชื่อมโยงบนเส้นทางนั้น ในการหาเส้นทางโหนดภายในเครือข่ายแต่ละโหนดจะมีฉลาก (label) ประจำ โหนดซึ่งก็คือต้นทุนของโหนดหรืออาจจะกล่าวได้ว่าเป็นต้นทุนของเส้นทางระหว่าง root node และ โหนดนั้น กำหนดให้ $pred(i)$ หมายถึงโหนดที่อยู่ก่อนหน้าโหนด i บน tree ซึ่งทำให้สามารถหาเส้นทาง จากโหนด i ย้อนกลับไปยัง root node ได้ โหนดจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ permanent label หมายถึง โหนดที่มีต้นทุนซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าอีก และ temporary label หมายถึงโหนดที่อาจจะมีการ เปลี่ยนแปลงค่าต้นทุนได้ ขั้นตอนของอัลกอริทึมจะเป็นดังนี้ โดยมีแผนผังการทำงานดังรูปที่ ก

1. กำหนดให้ทุกโหนดเป็น temporary label และมีต้นทุนเป็นค่าที่สูงมากค่าหนึ่ง
2. กำหนดให้ root node มีต้นทุนเท่ากับศูนย์
3. พิจารณาเลือกโหนด i ที่เป็น temporary label ซึ่งมีต้นทุนต่ำสุด แล้วเปลี่ยนโหนด i ให้เป็น permanent label
4. พิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่ต่ออยู่กับโหนด i ถ้าค่าต้นทุนของข่ายเชื่อมโยงรวมกับค่าต้นทุนของ โหนด i ต่ำกว่าค่าต้นทุนของโหนด j ซึ่งเป็นปลายอีกข้างหนึ่งของข่ายเชื่อมโยง ค่าต้นทุนของ โหนด j จะเท่ากับผลรวมของค่าต้นทุนของโหนด i และข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณา พร้อมทั้งจะ เลือกข่ายเชื่อมโยงเป็นส่วนหนึ่งของ tree โดยการกำหนดให้ $pred(j) = i$
5. กลับไปทำข้อ 4 จนกระทั่งพิจารณาทุกๆ ข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อกับโหนด i
6. ถ้ายังมีโหนดใดโหนดหนึ่งเป็น temporary label จะกลับไปข้อ 2 และจะหยุดการทำงานเมื่อ ทุกโหนดภายในเครือข่ายเป็น permanent label
7. เส้นทางบน tree ระหว่าง root node และโหนดใดๆ จะเป็นเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุด ระหว่าง root node และโหนดนั้น โดยค่าต้นทุนของเส้นทางจะเท่ากับค่าต้นทุนของโหนดนั้น สำหรับการหาเส้นทางบน tree ระหว่าง root node กับโหนด j ใดๆ จะได้จากการอ่านค่า $pred(j)$ ย้อนกลับไปจนกระทั่งถึง root node



รูปที่ ก แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึม Dijkstra

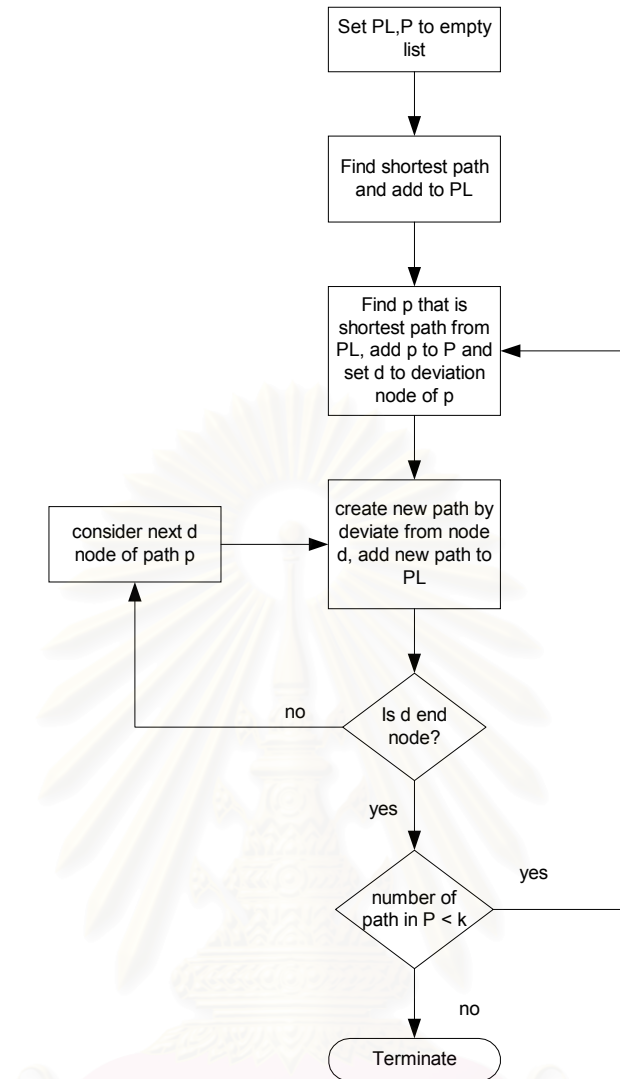
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

อัลกอริทึม Yen (Yen's Algorithm)

อัลกอริทึม Yen [27] จะเป็นอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจำนวน k เส้นทาง แรกระหว่างคูโนด (k shortest paths) โดยที่เส้นทางจะเป็นเส้นทางซึ่งไม่ผ่านโนดซ้ำกัน (loopless) ในการหาเส้นทางจะอาศัยหลักการเบี่ยงเบนเส้นทางจากโนดใดโนดหนึ่งภายในเส้นทางซึ่งเรียกว่าโนดเบี่ยงเบน (deviation node) ไปยังโนดปลายทางโดยไม่ซ้ำเส้นทางเดิม เส้นทางใหม่ที่ได้คือเส้นทางที่ประกอบด้วยเส้นทางตั้งแต่โนดต้นทางจนกระทั่งถึงโนดเบี่ยงเบนรวมกับเส้นทางจากโนดเบี่ยงเบนถึงปลายทาง เส้นทางที่ใช้ในการสร้างเส้นทางใหม่จะเรียกว่า parent ของเส้นทางใหม่นั้น ขั้นตอนของอัลกอริทึมจะมีดังต่อไปนี้ โดยที่แผนผังการทำงานเป็นดังรูปที่ ข

1. กำหนดให้ PL และ P เป็นรายการ (list) ของเส้นทางที่หาได้และเส้นทางที่เป็นผลเฉลยตามลำดับ โดยเริ่มต้นจะกำหนดให้เป็นรายการว่าง
2. หาเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างคูโนด โดยกำหนดให้มีโนดต้นทางเป็นโนดเบี่ยงเบน เพิ่มเส้นทางที่หาได้เข้าไปใน PL
3. เลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดที่อยู่ใน PL เพิ่มเข้าไปใน P กำหนดให้เป็นเส้นทาง p โดยมี d เป็นโนดเบี่ยงเบนของเส้นทาง p
4. หาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากโนด d ไปยังโนดปลายทาง โดยใช้อัลกอริทึม Dijkstra [26] โดยที่ จะต้องไม่ผ่านโนดใดๆ ระหว่างต้นทางจนถึงโนดเบี่ยงเบนบนเส้นทาง p และไม่ใช้ข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อกับโนด d บนเส้นทางที่เป็น parent ใดๆ เส้นทาง รวมทั้งจะต้องไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อกับโนด d บนเส้นทาง p
5. หาเส้นทางเบี่ยงเบน ซึ่งจะได้จากเส้นทางระหว่างโนดต้นทางไปยังโนด d รวมกับเส้นทางที่ได้ในข้อ 4 โดยเส้นทางเบี่ยงเบนจะมีเส้นทาง p เป็น parent และมีโนดเบี่ยงเบนเป็นโนดสุดท้ายบนส่วนของเส้นทางจากต้นทางที่ซ้ำกับเส้นทางใดๆ ใน P จากนั้นจึงเพิ่มเส้นทางเบี่ยงเบนเข้าไปใน PL
6. พิจารณาโนด d ถัดไปบนเส้นทาง p แล้วกลับไปทำข้อ 4 จนกระทั่งโนดถัดไปเป็นโนดปลายทางของเส้นทาง p
7. กลับไปทำข้อ 3 จนกระทั่ง P มีจำนวนเส้นทาง k เส้นทางหรือได้พิจารณาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด
8. เส้นทางทั้งหมดใน P จะเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างคูโนดจำนวน k เส้นทาง



รูปที่ ข แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึม Yen

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ภาพแสดงโทโปโลยีของผลเฉลย

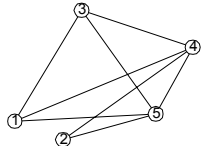
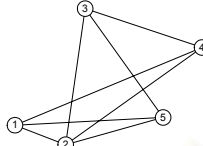
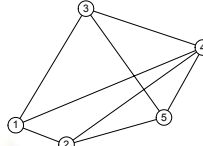
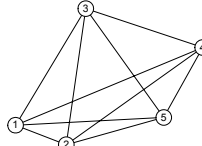
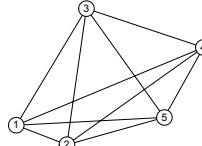
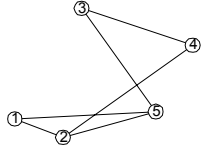

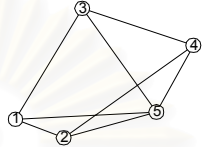
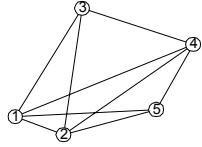
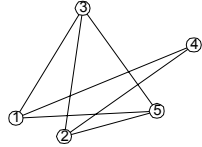
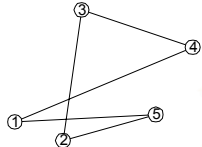
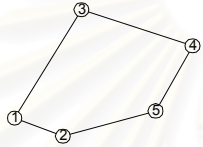
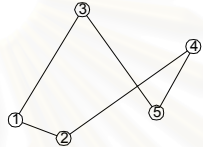
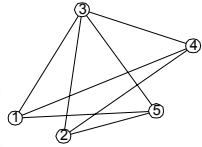
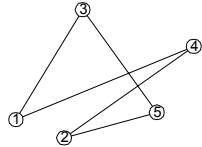
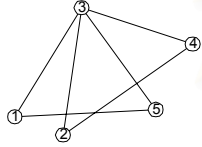
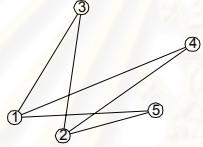
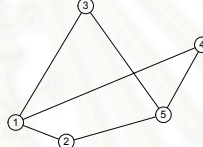
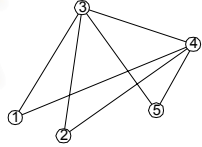
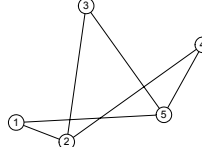
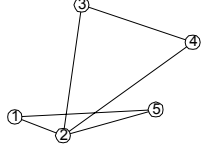


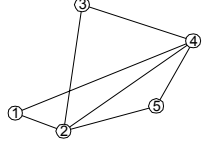
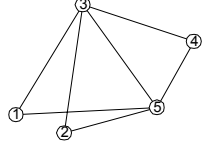
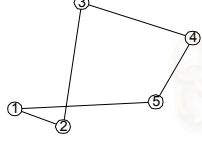
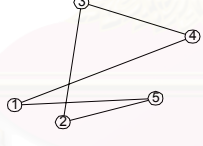
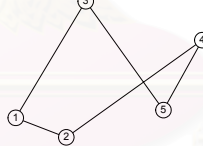
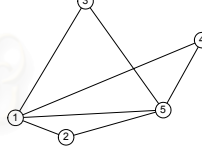
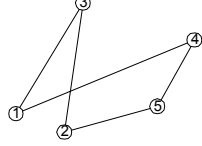
ภาพแสดงโทโปโลยีของผลเฉลยจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3.4.1 สำหรับเครือข่าย 5 โหนด ทั้งในกรณีที่เครือข่ายสามารถแปลงผันความยาวคลื่น (VWP) และไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น (WP) จะเป็นดังตารางที่ ค

ตารางที่ ค โทโปโลยีของผลเฉลยจากแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเครือข่าย 5 โหนด

(ก) เครือข่ายสามารถแปลงผันความยาวคลื่น

M	Protection Scheme (VWP)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR
1					
2					
3					
4					
5					
6					

(ข) เครือข่ายไม่สามารถแปลงผันความยาวคลื่น

M	Protection Scheme (WP)				
	NO	MC	SLB	DJP	LR
1					
2					
3					
4					
5					
6					

ภาคผนวก ง

ทราฟฟิกของเครือข่ายในการทดลอง

ตารางที่ ง ทราฟฟิกแบบแรนดอมและแบบสตาร์ของเครือข่าย 5 โหนดในการทดลองหัวข้อที่ 3.4.2

แบบแรนดอม

node	1	2	3	4	5
1		1	0	1	1
2			0	2	1
3				1	2
4					1
5					

แบบสตาร์

node	1	2	3	4	5
1		0	3	0	0
2			2	0	0
3				3	2
4					0
5					

ภาคผนวก จ

การเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และฮิวริสติกอัลกอริทึม

จากการหาผลเฉลยของเครือข่าย 4 และ 5 โหนดในการทดลองหัวข้อที่ 3.4.1 โดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึมจะได้ผลเฉลยที่มีค่าต้นทุนดังตารางที่ จ.1 และ จ.2 ตามลำดับ ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี SLB สำหรับ WA หมายถึงอัลกอริทึม H1 ที่มีอัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่นและ SP หมายถึงอัลกอริทึม H1 ที่ใช้อัลกอริทึมในการจัดสรรเส้นทางที่สั้นที่สุดในหัวข้อที่ 4.1.3 และ 4.1.4.1 แทนอัลกอริทึมในขั้นตอน B และ C รวมทั้งได้ใช้อัลกอริทึมในการจัดสรรความยาวคลื่น

ตารางที่ จ.1 ค่าต้นทุนของผลเฉลยของเครือข่าย 4 โหนดที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และฮิวริสติกอัลกอริทึม โดยที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี SLB

M	VWP				WP			
	ILP	H1	WA	SP	ILP	H1	WA	SP
1	16	16	16	17	16	16	16	17
2	12	12	12	12	12	12	12	14
3	10	10	10	10	10	11	11	12
4	8	8	8	8	8	9	10	12
5	8	8	8	8	8	8	10	12
6	8	8	8	8	8	8	10	12

ตารางที่ จ.2 ค่าต้นทุนของผลเฉลยของเครือข่าย 5 โหนดที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์และฮิวริสติกอัลกอริทึม โดยที่เครือข่ายมีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธี SLB

M	VWP				WP			
	ILP	H1	WA	SP	ILP	H1	WA	SP
1	24	30	30	26	24	30	30	26
2	16	18	18	19	16	21	20	20
3	15	15	15	16	15	18	15	15
4	12	12	12	13	12	15	15	15
5	12	12	12	12	12	15	14	15
6	10	10	10	10	10	15	13	15

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย สถิตพงษ์ พุทธิประเสริฐ เกิดเมื่อวันที่ 16 เมษายน พ.ศ.2520 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อ พ.ศ.2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย