

การออกแบบการป้องกันโครงข่าย WDM สำหรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
ได้รับความเสียหายโดยใช้อัลกอริทึมฮิวริสติก



นายอนุชิต มั่นจิรังกูร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

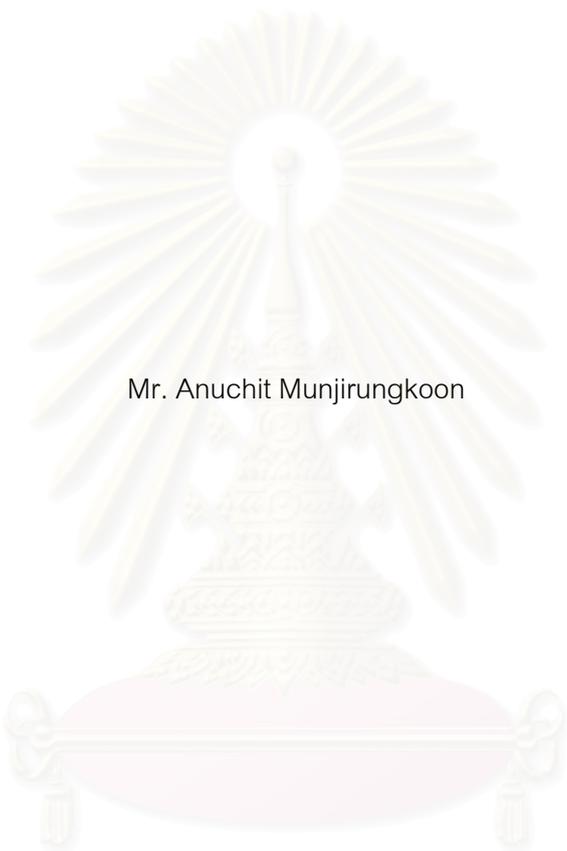
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2511-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF WDM NETWORK PROTECTIONS FOR MULTICAST TRAFFIC WITH SINGLE LINK
FAILURE USING HEURISTIC ALGORITHMS



Mr. Anuchit Munjirungkoon

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 2006

ISBN 974-14-2511-2

อนุชิต มั่นจิรังกูร : การออกแบบการป้องกันโครงข่าย WDM สำหรับมัลติคาสต์ทราฟฟิก
เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายโดยใช้อัลกอริทึมฮิวริสติก (DESIGN OF WDM
NETWORK PROTECTIONS FOR MULTICAST TRAFFIC WITH SINGLE LINK
FAILURE USING HEURISTIC ALGORITHMS) อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร.สัญญากร วุฒิสถิทธิกุล
กิจ, อ. ที่ปรึกษาร่วม: ดร.ชุตินา พรหมมาก, 102 หน้า. ISBN 974-14-2511-2

วิทยานิพนธ์นี้ เลื่อนการออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับการป้องกัน
โครงข่าย WDM สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายเพื่อ
รองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งในสภาวะการทำงานปกติและสภาวะการเกิดความเสียหายที่ข่าย
เชื่อมโยงหนึ่งข่าย ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาอัลกอริทึมฮิวริสติกด้วยกัน 3 ชนิด ได้แก่ อัลกอริทึมฮิวริส
ติกแบบ Local Search (LS) อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ Simulated Annealing (SA) อัลกอริทึมฮิวริส
ติกแบบ Tabu Search (TS) โดยนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการออกแบบการจัดสรรและกำหนด
ความยาวคลื่น และ กลยุทธ์การป้องกันโครงข่าย 2 วิธี คือ กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF
(Physical Branch Fixed) และ กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (Optical Mesh
Protection) อีกทั้งยังศึกษาถึงผลกระทบของการมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้งอยู่ใน
ระบบด้วย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาค้นหาผลเฉลยเพื่อให้ได้จำนวนเส้นใยนำแสงของระบบน้อย
ที่สุด

จากการวิเคราะห์ผลเฉลยสามารถสรุปได้ว่า ในงานออกแบบการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้
อัลกอริทึมฮิวริสติกนั้น สามารถจำแนกลักษณะปัญหาของงานได้ 2 แบบ คือ งานที่มีความซับซ้อน
น้อยหรือขนาดเล็ก และงานที่มีความซับซ้อนมากหรือขนาดใหญ่ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนั้น
อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS จะมีความเหมาะสมกับงานที่มีความซับซ้อนน้อยหรือขนาดเล็ก
เนื่องจากให้คำตอบที่มีความเหมาะสมในเวลาที่ย่นย่อรวดเร็ว แต่เมื่องานมีความซับซ้อนมาก
หรือขนาดใหญ่ขึ้น การใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS จะมีความเหมาะสมมากกว่าเนื่องจากอาศัย
พื้นที่หน่วยความจำในการประกอบคำตอบตัดสินใจยอมรับคำตอบ และอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA
จะอยู่ตรงกลางระหว่างสองอัลกอริทึมข้างต้น โดยกระบวนการตัดสินใจมีการยอมรับคำตอบที่ดี
กว่าเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ จึงเพิ่มโอกาสในการค้นพบค่าที่เหมาะสม
ที่สุดในเวลาที่เหมาะสม

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....อนุชิต มั่นจิรังกูร.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....วิเศษ งาม.....
ปีการศึกษา.....2549.....

4670584321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: WDM / Protection / Optimization / MC-RWA / LS / SA / TS

ANUCHIT MUNJIRUNGKON: DESIGN OF WDM NETWORK PROTECTIONS FOR MULTICAST TRAFFIC WITH SINGLE LINK FAILURE USING HEURISTIC ALGORITHMS. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ, Ph.D., THESIS COADVISOR: CHUTIMA PROMMAK, Ph.D., 102 pp. ISBN 974-14-2511-2

This thesis presents the heuristic algorithm which is designed in order to protect the multicast traffic of the WDM network with single link failure occurs, and also to route the path of the network in normal operation. The designed algorithms, Local Search (LS), Simulated Annealing (SA) and Tabu Search (TS), are to be applied with two protecting strategies, PBF (Physical Branch Fixed) and OMP (Optical Mesh Protection). In addition, this thesis also studies contains the impact of the wavelength converters in a given system. The objective of the algorithm's design is to find the minimum fiber solutions and reduces the execution time.

In optimization design by using heuristic algorithm, The problems can be divided into two groups, low-complexity or small network problem and high-complexity or large network problem. The simulation results show that each proposed algorithm is suitable for different kind of WDM network. LS algorithm is most suitable for low-complexity or small network because of its fast execution time. In contrast, for high-complexity or large network, it is more appropriate to use TS algorithm, because of its larger memory space, SA algorithm is a compromise between LS and TS algorithm with sub-optimal solution and appropriate execution time.

Department.....Electrical..Engineering.....Student's Signature.....*Anuchit Munjirungkoon*
 Field of Study.....Electrical..Engineering.....Advisor's Signature.....*Prof. Lunchakorn Wuttisittikulkiy*
 Academic Year.....2006.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รศ. ดร. วัลลภกร วุฒิสถิตถิกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อ.ดร. ชุตติมา พรหมมาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยด้วยดีเสมอมา รวมทั้งการกระตุ้นเอาใจใส่ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณเจริญชัย บวรธรรมรัตน์ คุณกนกภรณ์ วิสเพ็ญ คุณวรางรัตน์ วัฒนวรากุล คุณกำพล วรดิษฐ์ และ คุณกอบเทพ ไชยเสน สำหรับคำปรึกษา กำลังใจ และความช่วยเหลือตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ชั้น 13 ตึกวิศวกรรมไฟฟ้า 4 ทุกท่าน และเพื่อน ๆ ที่เคยศึกษากับผู้วิจัยด้วยกันมาในระดับปริญญาตรี โดยเฉพาะเพื่อน ๆ ในชั้นปีเดียวกันที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และข้อคิดที่ดีมาโดยตลอด ทำให้การศึกษาปริญญาโทราบรื่นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเต็มไปด้วยคุณค่าและความหมายดี ๆ สำหรับผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และ พี่น้องทุกคนในครอบครัวของผู้วิจัย ที่มีส่วนร่วมให้การสนับสนุนทางการเงินและระยะเวลาที่ศึกษามาตลอดถึงระดับปริญญาโท ให้มีแรงผลักดันจนสามารถบรรลุตามเป้าหมายได้ด้วยเป็นอย่างดี

อนุชิต มั่นจิรังกูร

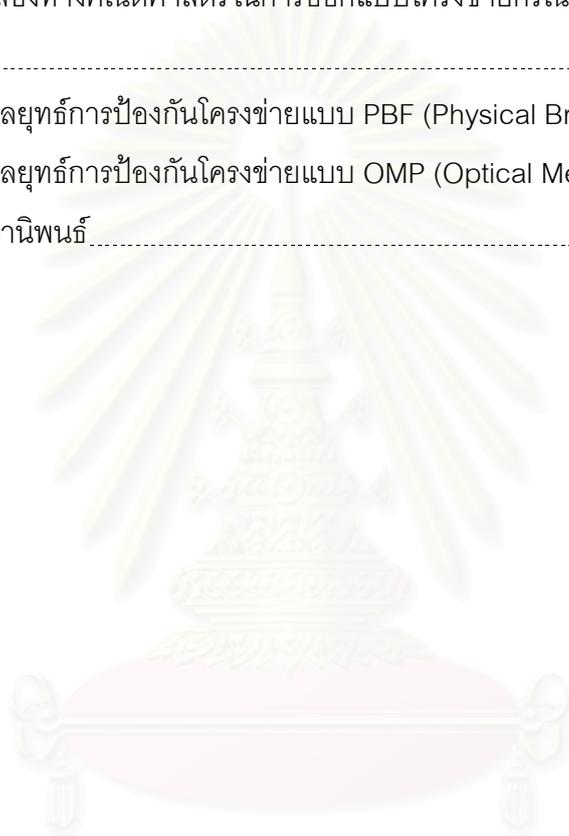
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ผ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 แนวทางในการออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์.....	7
2.1 โครงข่าย WDM.....	7
2.2 การจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์บน โครงข่าย WDM.....	9
2.2.1 การจัดสรรเส้นทาง (Routing).....	10
2.2.2 การกำหนดความยาวคลื่น (Wavelength Assignment).....	11
2.3 การป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย.....	13
2.3.1 กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (Physical Branch Fixed).....	14
2.3.2 กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (Optical Mesh Protection).....	15
3 อัลกอริทึมฮิวริสติก.....	17
3.1 อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS.....	17
3.1.1 หลักการทั่วไปของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS.....	18
3.2 อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA.....	18
3.2.1 หลักการทั่วไปของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA.....	19
3.2.2 หลักการทำงานของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA.....	19

บทที่	หน้า
3.3 อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS.....	22
3.3.1 หลักการทั่วไปของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS.....	22
3.3.2 หลักการทำงานของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS.....	23
3.4 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับการออกแบบการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่น.....	25
3.5 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับการออกแบบการป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข้างเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย.....	27
3.6 กระบวนการตัดสินใจยอมรับคำตอบผลเฉลยของอัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละวิธี.....	30
3.6.1 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS.....	30
3.6.2 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA.....	31
3.6.3 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS.....	32
4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในอัลกอริทึมฮิวริสติก.....	34
4.1 แบบจำลองโครงข่ายที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมฮิวริสติก.....	34
4.2 แบบจำลองกราฟฟิคที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมฮิวริสติก.....	35
4.3 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA.....	36
4.3.1 การวิเคราะห์ค่า α และค่า L	37
4.3.2 ค่า α และค่า L ที่มีความเหมาะสมกับการออกแบบโครงข่ายแต่ละแบบ.....	43
4.3.3 การวิเคราะห์ค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้น.....	48
4.4 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS.....	49
5 ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย.....	52
5.1 สมมุติฐานที่ใช้ในการทดลอง.....	52
5.2 ผลเฉลยของการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นในสภาวะทำงานปกติ.....	53
5.3 ผลเฉลยของการป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข้างเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย.....	64
6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	88
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	88
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	89
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	92
ก.1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model).....	93
ก.2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ.....	93

ก.3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง.....	95
ก.4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายทำงานใน สภาวะปกติ.....	96
ก.4.1 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-Tree method, VLT).....	96
ก.4.2 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light-Tree method, LT).....	96
ก.5. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายได้รับความ เสียหาย.....	98
ก.5.1 กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (Physical Branch Fixed).....	98
ก.5.2 กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (Optical Mesh Protection).....	99
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	102



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.1	36
<p>ทราฟฟิกที่ใช้ในการทดสอบ (ก) สำหรับโครงข่าย 5N_7L (ข) สำหรับโครงข่าย 8N_14L และ (ค) สำหรับโครงข่าย 10N_21L และ โครงข่าย NSFNet.....</p>	
ตารางที่ 4.2	44
<p>ผลเฉลี่ยต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้ทราฟฟิกตามตารางที่ 4.1 (ก) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย 5N_7L.....</p>	
ตารางที่ 4.3	44
<p>จำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้ทราฟฟิกตามตารางที่ 4.1(ค) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย 5N_7L.....</p>	
ตารางที่ 4.4	45
<p>ผลเฉลี่ยต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้ทราฟฟิกตามตารางที่ 4.1 (ข) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย 8N_14L.....</p>	
ตารางที่ 4.5	45
<p>จำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้ทราฟฟิกตามตารางที่ 4.1(ค) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย 8N_14L.....</p>	
ตารางที่ 4.6	46
<p>ผลเฉลี่ยต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้ทราฟฟิกตามตารางที่ 4.1 (ค) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย 10N_21L.....</p>	
ตารางที่ 4.7	46
<p>จำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้ทราฟฟิกตามตารางที่ 4.1(ค) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย 10N_21L.....</p>	

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.8	47
ผลเฉลยต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้กราฟฟิกตามตารางที่ 4.1 (ค) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย NSFNet	
ตารางที่ 4.9	47
จำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้กราฟฟิกตามตารางที่ 4.1(ค) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย NSFNet	
ตารางที่ 4.10	49
เปรียบเทียบระหว่างค่าต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดและระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาค่าตอบเมื่อค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าต่างกัน	
ตารางที่ 4.11	50
ต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดที่ค้นพบของโครงข่าย 5N_7L และจำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ค้นพบค่าตอบเมื่อใช้ความยาวของ Tabu list ต่าง ๆ กัน	
ตารางที่ 4.12	50
ต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดที่ค้นพบของโครงข่าย 8N_14L และจำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ค้นพบค่าตอบเมื่อใช้ความยาวของ Tabu list ต่าง ๆ กัน	
ตารางที่ 4.13	50
ต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดที่ค้นพบของโครงข่าย 10N_21L และจำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ค้นพบค่าตอบเมื่อใช้ความยาวของ Tabu list ต่าง ๆ กัน	
ตารางที่ 4.14	50
ต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดที่ค้นพบของโครงข่าย NSFNet และจำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ค้นพบค่าตอบเมื่อใช้ความยาวของ Tabu list ต่าง ๆ กัน	
ตารางที่ 5.1	56
จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำหรับโครงข่าย 5N_7L ในสภาวะการทำงานปกติ (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	
ตารางที่ 5.2	57
เวลาที่ใช้ในการค้นหาค่าตอบสำหรับโครงข่าย 5N_7L ในสภาวะการทำงานปกติ (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	
ตารางที่ 5.3	58
จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำหรับโครงข่าย 8N_14L ในสภาวะการทำงานปกติ (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	
ตารางที่ 5.4	59
เวลาที่ใช้ในการค้นหาค่าตอบสำหรับโครงข่าย 8N_14L ในสภาวะการทำงานปกติ (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น	

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 5.22 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย NSFNet ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	80
ตารางที่ 5.23 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองสำหรับโครงข่าย NSFNet ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	81
ตารางที่ 5.24 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย NSFNet ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น.....	82

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น	7
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโนดในโครงข่าย WDM (ก) กรณีไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้ง และ (ข) กรณีมีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้ง	8
รูปที่ 2.3 การจัดสรรเส้นทางบนโครงข่าย WDM โดยอาศัยพื้นฐานโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง	10
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการกำหนดความยาวคลื่นสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (ก) โครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (ข) LT และ (ค) VLT	12
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF	14
รูปที่ 2.6 การประยุกต์แนวคิดวงแหวนหลายวงสำหรับการป้องกันโครงข่ายแบบ PBF	15
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP	16
รูปที่ 3.1 รหัสเทียมอธิบายอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS	18
รูปที่ 3.2 รหัสเทียมอธิบายอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA	21
รูปที่ 3.3 รหัสเทียมอธิบายอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS	23
รูปที่ 3.4 ผังงานอัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับกระบวนการจัดสรรเส้นทางบนโครงข่าย WDM	25
รูปที่ 3.5 ผังงานอัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับกระบวนการป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายบนโครงข่าย WDM	28
รูปที่ 3.6 ผังงานกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยโดยใช้อัลกอริทึม LS	30
รูปที่ 3.7 ผังงานกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยโดยใช้อัลกอริทึม SA	31
รูปที่ 3.8 ผังงานกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยโดยใช้อัลกอริทึม TS	32
รูปที่ 4.1 โทโพโลยีโครงข่ายที่ใช้ในการทดสอบ	35
รูปที่ 4.2 ลักษณะการลดลงของความน่าจะเป็นที่ยอมรับคำตอบที่ดี (ก) ความน่าจะเป็นที่ยอมรับคำตอบที่ดีเมื่อ α เท่ากับ 0.99 และ L เท่ากับ 30 (ข) ความน่าจะเป็นที่ยอมรับคำตอบที่ดีเมื่อ α เท่ากับ 0.99 และ L เท่ากับ 5 (ค) ความน่าจะเป็นที่ยอมรับคำตอบที่ดีเมื่อ α เท่ากับ 0.8 และ L เท่ากับ 30 (ง) ความน่าจะเป็นที่ยอมรับคำตอบที่ดีเมื่อ α เท่ากับ 0.8 และ L เท่ากับ 5	38
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบระหว่างต้นทุนที่ดีที่สุดและต้นทุนที่ได้รับการยอมรับ (ก) เมื่อ α เท่ากับ 0.99 และ L เท่ากับ 30 (ข) เมื่อ α เท่ากับ 0.99 และ L เท่ากับ 5 (ค) เมื่อ α เท่ากับ 0.8 และ L เท่ากับ 30 (ง) เมื่อ α เท่ากับ 0.8 และ L เท่ากับ 5	40

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.1 วิธีหาเส้นใยนำแสงสำรองของกลยุทธ์การป้องกันแบบ PBF เดิมและที่ใช้ใน วิทยานิพนธ์นี้.....	65
รูปที่ 5.2 วิธีหาเส้นใยนำแสงสำรองของกลยุทธ์การป้องกันแบบ OMP ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	66
รูปที่ 5.3 แผนภูมิแสดงจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงเมื่อโครงข่ายทำงานในสภาวะ ปกติทั้งกรณี VLT และ LT.....	84
รูปที่ 5.4 แผนภูมิแสดงจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ได้รับความเสียหายสำหรับกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF ทั้งกรณี VLT และ LT.....	85
รูปที่ 5.5 แผนภูมิแสดงจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ได้รับความเสียหายสำหรับกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP ทั้งกรณี VLT และ LT.....	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการสื่อสารข้อมูลมีความต้องการรับส่งข้อมูลที่มีขนาดใหญ่หรือปริมาณมาก และต้องการความรวดเร็วสูง เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการต่าง ๆ กัน เช่น การสื่อสารทางอินเทอร์เน็ต ที่มีความต้องการส่งข้อมูลภาพและเสียง อาทิ การดาวน์โหลดข้อมูล ภาพยนตร์ เพลง เกมออนไลน์ การสนทนา msn การถ่ายทอดสดทางอินเทอร์เน็ต การประชุมทางไกล (Teleconference) เป็นต้น ดังนั้นโครงข่ายการสื่อสารจึงต้องสามารถรองรับช่องสัญญาณ (Channel) แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ได้เพียงพอกับปริมาณความต้องการและมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีหนึ่งที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ในปัจจุบันนี้ได้แก่ เทคโนโลยีการมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength Division Multiplexing technology) [1-3] หรือเรียกสั้น ๆ ว่า WDM เทคโนโลยี WDM มีหลักการทำงาน คือ ทำการมัลติเพลกซ์ช่องสัญญาณจำนวนหนึ่งรวมกันโดยอาศัยคลื่นพาห้ (carrier) ที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันเพื่อส่งไปในเส้นใยนำแสง (Optical fiber) เดียวกัน ทำให้การเข้าใช้ประโยชน์ของแบนด์วิดท์ของเส้นใยนำแสงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจึงให้มีการนำเทคโนโลยี WDM มาใช้ในการออกแบบโครงข่ายความเร็วสูง ซึ่งสามารถรับส่งข้อมูลได้สูงถึงระดับ เทระบิตต่อวินาที

เทคโนโลยี WDM ในสมัยก่อน การขยายแบนด์วิดท์สำหรับการส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุดผ่านข่ายเชื่อมโยงใยแสง (Fiber link) ส่งผลกระทบต่อให้แสงบางส่วนในโครงข่ายไม่สามารถส่งผ่านไปได้ เนื่องจากว่าสัญญาณข้อมูลเชิงแสง (Optical data signal) ที่ส่งผ่านไปทุก ๆ โหนดระหว่างทาง ใช้ตัวแปลงสัญญาณ Optical-to-Electrical-to-Optical (OEO) [3] อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical amplifier) และ Optical cross-connects (OXC) เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานแบบ all-optical domain จึงไม่มีการนำ OEO มาใช้กับโหนดระหว่างทาง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายมีมากขึ้น เราเรียกโครงข่ายประเภทนี้ว่า all-optical network ซึ่งหน้าที่หลัก ๆ ของ OXC คือ ใช้ในการสวิตซ์ข้อมูลระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตที่ความยาวคลื่นเดียวกัน ส่วนลักษณะการเชื่อมต่อใน all-optical network นี้ เรียกว่าวิถีเชิงแสง (Lightpath) ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อทางแสงบนความยาวคลื่นเฉพาะของจำนวนข่ายเชื่อมโยงใยแสงจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง

ในงานออกแบบโครงข่าย WDM เมื่อโครงข่ายที่พิจารณาประกอบด้วยโหนด (node) ในโครงข่ายจำนวน N โหนด ถ้าแต่ละโหนดติดตั้งอุปกรณ์รับส่งเชิงแสง (optical transceiver) จำนวน $N-1$ ตัว และมีจำนวนความยาวคลื่นเพียงพอกับข่ายเชื่อมโยงใยแสงทุกเส้น แต่ละคู่โหนดของโครงข่ายย่อมสามารถเชื่อมต่อวิถีเชิงแสงซึ่งกันและกันได้โดยไม่มีปัญหา แต่ในความเป็นจริง อุปกรณ์รับส่งเชิงแสงมีต้นทุนค่าใช้จ่าย (Cost) ค่อนข้างสูงและจำนวนช่องสัญญาณของความยาวคลื่นที่ใช้อยู่ในเส้นใยมีอยู่อย่างจำกัด ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องมีการออกแบบวิธีการบริหารจัดการทรัพยากรโครงข่ายให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของผู้ใช้ในระบบได้ทั้งหมดและมีประสิทธิภาพเพื่อสามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายลง วิธีการที่นำมาใช้ออกแบบแก้ปัญหานี้ ได้แก่ การจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่น (Routing and Wavelength Assignment, RWA) [3-7]

งานวิจัยจำนวนมากจะมุ่งเน้นศึกษาปัญหา RWA เพียงการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point Communication) หรือ ยูนิคาสต์ (Unicast) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายการใช้เส้นใยนำแสงให้มีค่าน้อยที่สุด แต่เทคโนโลยีในปัจจุบันที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเช่น อินเทอร์เน็ตมีรูปแบบทราฟฟิกในลักษณะการสื่อสารแบบจุดต่อหลายจุด (Point-to-Multipoint communication) หรือ มัลติคาสต์ (Multicast) ดังนั้นงานวิจัย [8] จึงเสนอการนำโครงสร้างต้นไม้ (Tree) มาใช้เป็นโครงสร้างพื้นฐานในการสร้างเส้นทางเชื่อมต่อเพื่อตอบสนองการร้องขอการรับส่งข้อมูลเป็นจำนวนมากได้ โครงสร้างดังกล่าวนี้จะมีข้อดีคือ มีการใช้ข่ายเชื่อมโยงร่วมกันในการรับส่งข้อมูลบนพื้นฐานการสื่อสารแบบจุดต่อจุดจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางได้ทั้งหมด เรียกปัญหา RWA ที่สามารถรองรับทราฟฟิกมัลติคาสต์นี้ว่าการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (Multicast Routing and Wavelength Assignment, MC-RWA) [4,9,10]

ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบโครงข่าย WDM ที่ทำให้โครงข่ายสามารถรับส่งข้อมูลที่มีปริมาณมาก ๆ ด้วยอัตราบิตมากกว่า 100 กิกะบิตต่อวินาทีได้นั้น หากมีอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่ง (เช่น ข่ายเชื่อมโยงหรือโหนด) ในโครงข่ายเกิดความเสียหาย ย่อมทำให้เกิดความสูญหายของข้อมูลจำนวนมากได้ ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อยุทธศาสตร์ได้ในเชิงธุรกิจ ดังนั้นเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบดังกล่าวจึงต้องคำนึงถึงการป้องกันโครงข่าย (Network protection) เพื่อทำให้มีความต่อเนื่องในการให้บริการเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น จึงได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอวิธีการจัดการกับปัญหานี้ การออกแบบมีทั้งการออกแบบระบบที่มีการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุดสำหรับทราฟฟิกแบบยูนิคาสต์ และระบบที่มีการเชื่อมต่อแบบจุดต่อหลายจุดสำหรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ จึงต้องมีการออกแบบการป้องกันโครงข่าย WDM ที่ดีพอเพื่อให้โครงข่ายสามารถใช้ประโยชน์ได้สูงสุดโดยที่มีการลงทุนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นอกจากนั้นยังพิจารณาในส่วน

ของการกำหนดความยาวคลื่น (Wavelength assignment) โดยศึกษาถึงผลกระทบของการที่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength converter) ติดตั้งอยู่บนโครงข่าย ในแง่ของต้นทุนค่าใช้จ่าย

การนำเสนอการทางคณิตศาสตร์มาเพื่อแก้ปัญหาการหาค่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดนั้น จัดได้ว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากวิธีนี้ให้ผลลัพธ์ออกมาถูกต้องและแม่นยำ นั่นก็หมายความว่า เมื่อนำมาออกแบบคำนวณหาต้นทุนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงของโครงข่ายจะได้ค่าคำตอบออกมาน้อยที่สุดนั่นเอง โดยเทคนิคที่นำมาจัดการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์นี้ เรียกว่า ILP (Integer Linear Programming) ถึงแม้ว่า ILP จะเป็นกรรมวิธีคำนวณหาผลเฉลยที่มีประสิทธิภาพมากแต่งานวิจัย [11] พบว่าการค้นหาผลเฉลยในกรณีปัญหาที่ทดสอบมีขนาดค่อนข้างใหญ่ (NP-hard) เช่น โครงข่าย NSFNet ขนาด 14 โหนด 21 ข่ายเชื่อมใย จะใช้เวลาในการแก้ปัญหามากกว่า 10 ชั่วโมง อันเนื่องมาจากจำนวนเงื่อนไขบังคับและจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่ามีความซับซ้อนสูง ดังนั้นเมื่อโครงข่ายที่ใช้ทดสอบมีขนาดใหญ่จะส่งผลให้ความซับซ้อนในการคำนวณมีขนาดเวลาเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล งานวิจัย [12] จึงเสนอวิธีการแก้ปัญหาแบบ NP-hard ให้มีความซับซ้อนน้อยลงโดยการจำแนกปัญหาออกเป็นส่วน ๆ ทำให้ปัญหามีขนาดเล็กลงแล้วแยกกันคำนวณ ซึ่งเป็นรูปแบบของกระบวนการฮิวริสติก (Heuristic procedure)

ในงานทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีได้มีการคิดค้นนำเสนอตัวอย่างการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาที่มีขนาดใหญ่โดยใช้กรรมวิธีเชิงประมาณค่า นั่นก็คือ การนำอัลกอริทึมฮิวริสติก (Heuristic algorithm) [13-17] มาใช้เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายเทคนิควิธี เช่น อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ Local Search (LS) อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ Simulated Annealing (SA) อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ Tabu Search (TS) อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ Genetic Algorithm (GA) หรือ อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ Ant colony เป็นต้น ซึ่งอัลกอริทึมต่าง ๆ เหล่านี้มีการพิสูจน์แล้วว่าผลเฉลยที่ได้นั้นอาจจะได้ค่าไม่สูงเข้าคำตอบได้เสมอไปแต่ถ้าใกล้เคียงและมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนหรือมีขนาดใหญ่ได้ดี เนื่องจากใช้เวลาในการประมวลผลไม่มากนัก จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเช่นกัน โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนออัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับงานออกแบบการป้องกันบนโครงข่าย WDM ด้วยกัน 3 แบบ ได้แก่ อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA และ อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS โดยหลักการของอัลกอริทึมแต่ละวิธีที่นำเสนออธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS [13-15,21] เป็นเทคนิควิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงการจัด (Combinatorial optimization problem) ซึ่งเป็นปัญหาแบบ NP-hard โดยอาศัยการปรับเปลี่ยนคำตอบจากที่มีอยู่ไปเรื่อย ๆ ทีละน้อยในลักษณะวนซ้ำ (iterative) จนกว่าจะได้ผลเฉลยที่พอใจ โดยสร้างเซตของผลเฉลยหรือฟังก์ชันข้างเคียง (Neighborhood function) มาใช้ในการพิจารณา โดยในการตัดสินใจนั้นจะนำผลเฉลยก่อนหน้ามาเปรียบเทียบกับผลเฉลยปัจจุบัน หากพบว่าผลเฉลยปัจจุบันให้คำตอบที่ดีกว่าผลเฉลยก่อนหน้าก็จะยอมรับคำตอบของผลเฉลยนั้น และจะหยุดทำงานก็ต่อเมื่อพบค่าที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ (Local optimum)

อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA [13-15,21] เป็นขั้นตอนการลดอุณหภูมิระหว่างการหลอมเพื่อให้ได้โลหะที่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (โดยจะลดอุณหภูมิอย่างช้า ๆ เพื่อให้ได้โลหะที่เหนียวไม่เปราะ) วิธีนี้เปรียบเทียบผลเฉลยปัจจุบันเป็นสถานะปัจจุบันของโครงสร้างโลหะในระบบฟังก์ชันต้นทุนที่กำกับผลเฉลยเปรียบเสมือนพลังงานของสถานะ และการทำงานวนซ้ำเปรียบเสมือนกับการค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงเรื่อย ๆ วิธีนี้มีฟังก์ชันการยอมรับผลเฉลยใหม่ที่ด้อยกว่าของเก่าได้ ภายใต้ความน่าจะเป็นซึ่งเป็นฟังก์ชันที่มีพารามิเตอร์ผลต่างของต้นทุนของผลเฉลยตัวใหม่เทียบกับต้นทุนของผลเฉลยตัวเก่า และตัวแปรอุณหภูมิตะหว่างการวนซ้ำตามสมการ $\exp(-\Delta f / kt)$ เมื่อ k คือค่าคงที่ของ Boltzmann เหตุผลที่ใช้ค่าตามสมการดังกล่าวนี้มาจากพฤติกรรมของกระบวนการทางฟิสิกส์ระหว่างการหลอมละลายโลหะ ซึ่งหมายความว่า มีการยอมรับผลเฉลยที่ด้อยกว่าได้ง่ายในระยะแรกของการวนซ้ำ (เมื่ออุณหภูมิตั้งสูง) แต่จะยอมรับผลเฉลยที่ด้อยกว่ายากขึ้นเรื่อย ๆ จนเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจะเกิดการยอมรับผลเฉลยที่ดีได้ง่ายกว่าผลเฉลยที่ด้อย การวนซ้ำจะสิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงหรือไม่มีผลเฉลยที่ดีกว่าเกินระยะเวลาที่ตั้งเป็นเกณฑ์ไว้

อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS [13-15,21] เป็น Meta-heuristics ซึ่งเป็นฮิวริสติกวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้ไขปัญหามีรูปแบบเฉพาะตัว อัลกอริทึมแบบนี้มีข้อแตกต่างจากสองอัลกอริทึมที่กล่าวไว้ข้างต้นตรงที่มีการนำหน่วยความจำ (Memory) มาเป็นส่วนประกอบ ซึ่งมีหลักการพื้นฐานของวิธีการค้นหาผลเฉลยแบบเฉพาะที่ แต่กระบวนการค้นหาจะดำเนินต่อถึงแม้ว่าจะพบค่าที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ โดยจะทำการค้นหาต่อไปในบริเวณที่ไม่เคยไปมาก่อนถึงแม้ว่าจะให้ผลเฉลยที่ดีกว่าก็ตาม นั่นคือจะพิจารณาผลเฉลยถัดไปที่ไม่เคยถูกเลือกมาก่อน (เพื่อป้องกันการทำงานซ้ำซ้อน) ดังนั้นจึงต้องมีการจัดเก็บผลเฉลยที่เคยถูกเลือกโดยใช้หน่วยความจำที่เรียกว่า Tabu list สำหรับตรวจสอบการเกิดผลเฉลยซ้ำซ้อนดังกล่าว โดยจะทำการเก็บข้อมูลของผลเฉลยที่ตรงตามเงื่อนไขไว้ใน Tabu list แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลเฉลยปัจจุบันเพื่อใช้ตัดสินใจดำเนินรอบการทำงานถัดไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการออกแบบการป้องกันโครงข่าย WDM สำหรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกที่ประกอบไปด้วย อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA และอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS โดยออกแบบโครงข่ายมีวัตถุประสงค์ คือ ให้ใช้จำนวนเส้นใยนำแสงน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการใช้เส้นใยโดยอาศัยการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นที่เหมาะสมให้กับโครงข่าย ซึ่งเป็นการพัฒนาต่อจากงานวิจัย [11] ที่ใช้กรรมวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ไม่มีความเหมาะสมสำหรับการแก้ไขปัญหาที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการคำนวณผลหรือค้นหาคำตอบไม่ได้เลยในบางกรณี นอกจากนี้ยังพิจารณาผลกระทบของการมีและไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นในแง่ของต้นทุนค่าใช้จ่าย เปรียบเทียบสมรรถนะและข้อดีข้อเสียของอัลกอริทึมในแต่ละวิธี

1.2 วัตถุประสงค์

พัฒนาอัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับออกแบบการป้องกันโครงข่าย WDM (Wavelength Division Multiplexing) ที่รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ เมื่อได้รับความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง โดยใช้เทคนิควิธีการป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (Physical Branch Fixed) และ OMP (Optical Mesh Protection) ทั้งนี้จะคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาและออกแบบให้โครงข่ายมีความต้องการใช้เส้นใยนำแสงน้อยที่สุด

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาถึงการนำอัลกอริทึมฮิวริสติกมาประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบการป้องกันโครงข่าย WDM ที่มีทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ได้แก่ กลยุทธ์การป้องกันแบบ PBF และ OMP ในกรณีที่มีการจัดสรรความยาวคลื่นแบบ VLT และ LT
2. ศึกษาข้อดีและข้อเสียในด้านจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่าย และความซับซ้อนในการบริหารโครงข่ายจากกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย
3. วิเคราะห์การทำงานเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างอัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละวิธี
4. เปรียบเทียบผลระหว่างอัลกอริทึมฮิวริสติกกับวิธี ILP

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
 - 1.1 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี WDM
 - 1.2 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางใหม่เมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
 - 1.3 ศึกษาเกี่ยวกับบทความที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกทั้ง 3 แบบ
2. ทดสอบและออกแบบอัลกอริทึมฮิวริสติกเพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้โครงข่ายที่สามารถป้องกันโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายหนึ่งข่ายเชื่อมโยง
3. วิเคราะห์และเปรียบเทียบอัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละวิธีที่ได้จากการจำลองระบบ
4. สรุปงานวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบอัลกอริทึมฮิวริสติกเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์การป้องกันโครงข่ายแต่ละเทคนิค ด้วยเทคนิคการจัดสรรความยาวคลื่นที่มีรูปแบบแตกต่างกันได้
2. ทำให้ทราบข้อดีข้อเสียของการใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละวิธี เพื่อนำไปประกอบการพิจารณาเลือกวิธีที่เหมาะสมกับปัญหาการออกแบบโครงข่ายหนึ่ง ๆ มากที่สุดได้
3. เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยสำหรับการปรับปรุงและพัฒนาการออกแบบการป้องกันโครงข่าย WDM ต่อไป

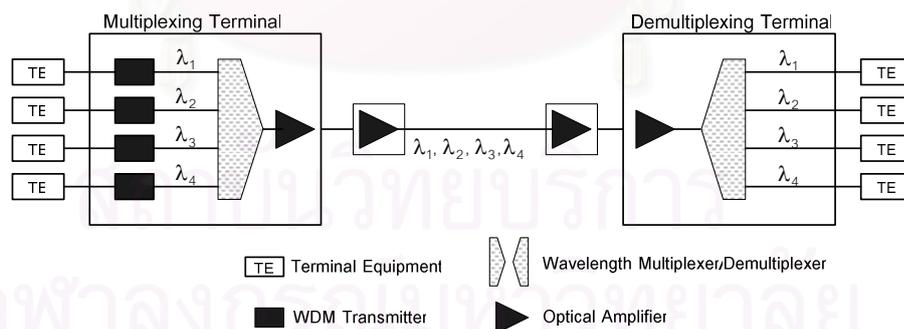
บทที่ 2

แนวทางในการออกแบบโครงข่าย WDM เพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์

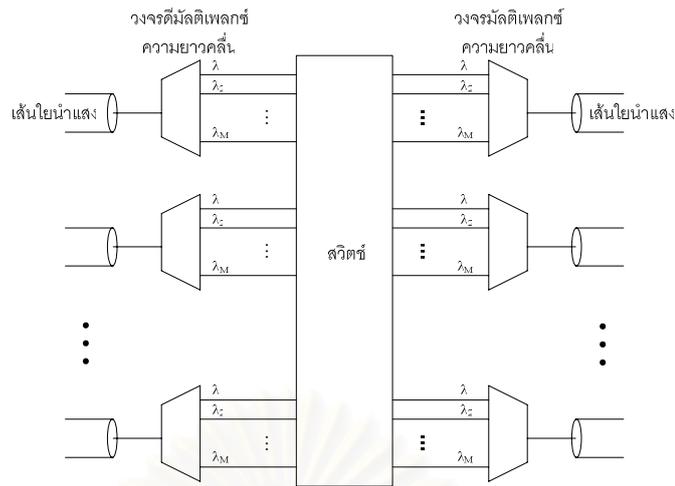
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM การจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ และการป้องกันโครงข่ายแบบต่าง ๆ เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยง เพื่อเป็นแนวทางสำหรับงานออกแบบโครงข่าย WDM ต่อไป

2.1 โครงข่าย WDM

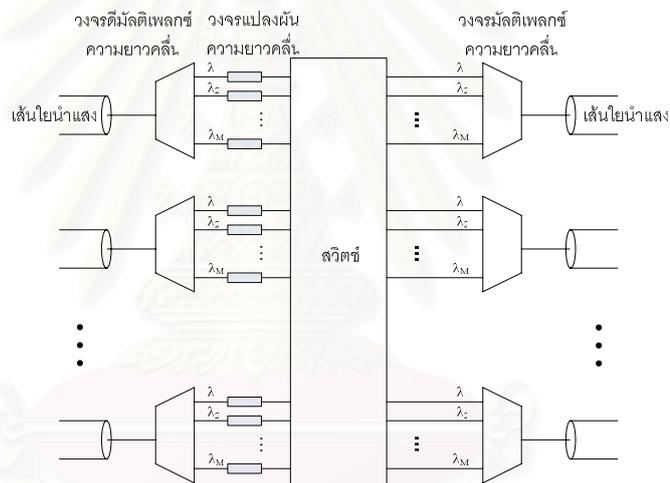
รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น ในภาคส่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงและเครื่องส่งสัญญาณ (WDM transmitter) ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้ให้เป็นสัญญาณแสงแต่ละความยาวคลื่น จากนั้นจะถูกมัลติเพลกซ์ให้เป็นลำแสงเดียวกันเพื่อส่งไปในเส้นใยนำแสง โดยอาศัยตัวมัลติเพลกซ์ (Wavelength Multiplexer) ระหว่างการส่งไปในเส้นใยนำแสง อาจต้องมีการขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Optical Amplifier) ในภาครับประกอบด้วยตัวดีมัลติเพลกซ์ (Wavelength Demultiplexer) ซึ่งทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงเป็นสัญญาณแต่ละความยาวคลื่น ก่อนที่จะแปลงกลับเป็นสัญญาณข้อมูลของผู้ใช้ตามเดิม



รูปที่ 2.1 ระบบมัลติเพลกซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น [17]



(ก) ไม่มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้ง



(ข) มีอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นติดตั้ง

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโหนดในโครงข่าย WDM [18]

โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่าย WDM ประกอบด้วยโหนด (Node) จำนวนหนึ่งซึ่งมีหน้าที่รวบรวมข้อมูลเพื่อส่งออกและในขณะเดียวกันก็ยังคงคัดลอกข้อมูลเพื่อส่งไปยังโหนดอื่น ๆ ผ่านทางสายเชื่อมโยง (Link) รูปที่ 2.2 (ก) แสดงตัวอย่างโครงสร้างของ OXCs ซึ่งประกอบด้วยวงจรมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น วงจรมัลติเพลกซ์ความยาวคลื่น และสวิตช์แบบแบ่งเส้นทาง (Space Switch) ที่โหนดอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (Wavelength Converter) เพิ่มเติมเพื่อทำหน้าที่เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นของช่องสัญญาณที่วิ่งผ่านโหนด โครงสร้างของโหนดที่มีการ

ติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นเพิ่มเติม แสดงดังรูปที่ 2.2 (ข) ซึ่งอาศัยการเชื่อมต่อโนดที่มีโครงสร้างดังกล่าว จะสามารถสร้างโครงข่ายที่มีโทโพโลยีทางกายภาพ (Physical Topology) ต่าง ๆ กันได้

ในระบบการมัลติเพล็กซ์แบบ WDM เส้นทาง (Route) หนึ่ง ๆ ที่รองรับทราฟฟิกจะได้รับ การกำหนดความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดทั้งเส้นทาง ตราบใดที่เส้นทางนั้นไม่ถูกกำหนดความยาวคลื่นค่าเดียวกับเส้นทางอื่นซึ่งจะทำให้สัญญาณกวนกัน อุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นซึ่งมีหน้าที่แปลงความยาวคลื่นของสัญญาณข้อมูลจากค่าหนึ่งไปเป็นอีกค่าหนึ่งจึงมีความสำคัญในกรณีที่ไม่สามารถกำหนดความยาวคลื่นค่าเดียวกันให้ตลอดทั้งเส้นทาง (Wavelength blocking) หรือกรณีที่การกำหนดความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดทั้งเส้นทาง ทำให้ประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรของระบบด้อย เป็นต้น ในระบบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น เส้นทาง จะได้รับการกำหนดความยาวคลื่นค่าเดียวกันตลอดทั้งเส้นทาง เรียกว่า เส้นทางนั้นมีข้อจำกัดด้านความต่อเนื่องทางความยาวคลื่น (Wavelength-Continuity Constraint)

สำหรับกรณีที่นำอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมาเสริมขีดความสามารถของโนดจะทำให้ปัญหาของการกำหนดความยาวคลื่นในการรองรับทราฟฟิกกระทำได้ง่ายขึ้น เพราะไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงการใช้ความยาวคลื่นเดียวตลอดเส้นทางอีกต่อไป ระบบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นมักจะมีประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรด้อยกว่าระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น [3,11,22]

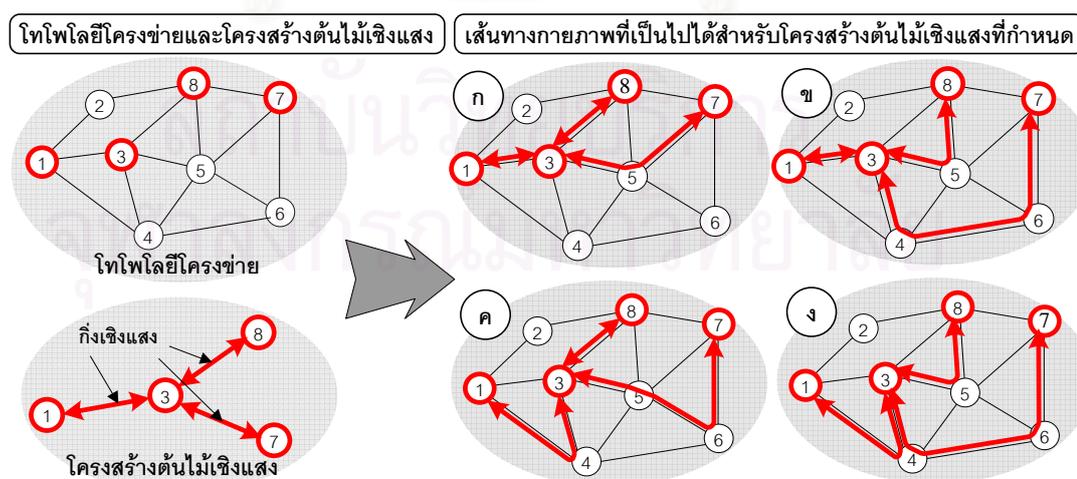
2.2 การจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์บนโครงข่าย WDM

การจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นบนโครงข่าย WDM จะเป็นการสร้างวิถี (Path) การเชื่อมต่อระหว่างโนดต่าง ๆ ในโครงข่ายที่ต้องการติดต่อถึงกันในระบบที่ใช้ช่องสัญญาณ WDM เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของผู้ใช้ในระบบได้ทั้งหมด ในการสร้างวิถีดังกล่าวจะต้องมีการกำหนดเส้นทาง และช่องสัญญาณให้กับทราฟฟิกแต่ละทราฟฟิกด้วย โดยในกรณีนี้แต่ละช่องสัญญาณจะถูกกำหนดเป็นค่าความยาวคลื่นในเส้นใยนำแสง ดังนั้นการกำหนดเส้นทางและช่องสัญญาณให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายจึงถูกเรียก เป็นการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่น (Routing and Wavelength Assignment, RWA) และหากทราฟฟิกที่พิจารณาเป็นชนิดมัลติคาสต์ จะเรียกการกำหนดเส้นทางและช่องสัญญาณให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ว่า การจัดสรรเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (Multicast Routing and Wavelength Assignment, MC-RWA) ซึ่งข้อจำกัดในการกำหนดช่องสัญญาณ คือ หากเส้นทาง

มากกว่าหนึ่งเส้นทางมีการใช้งานซ้ำเชื่อมโยงร่วมกัน เส้นทางนั้นจะต้องใช้ค่าความยาวคลื่นที่ไม่ซ้ำกัน ข้อจำกัดนี้ทำให้จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้ในโครงข่ายมีความสำคัญ หากในโครงข่ายมีปริมาณทราฟฟิกมากก็จำเป็นที่จะต้องใช้อัตราความยาวคลื่นมากตามไปด้วย ซึ่งหากจำนวนความยาวคลื่นมีไม่เพียงพอ จะทำให้โครงข่ายไม่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด และเพื่อให้การทำ MC-RWA ให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ของโครงข่ายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การพิจารณาถึงคุณลักษณะของทราฟฟิกที่เข้ามาในระบบจึงเป็นสิ่งสำคัญ จากการศึกษางานวิจัยที่เผยแพร่อยู่ในปัจจุบันเกี่ยวกับลักษณะของทราฟฟิกในโครงข่ายพบว่า ทราฟฟิกจะถูกแบ่งออกเป็นสองแบบคือ ทราฟฟิกแบบคงที่ (Static traffic) และทราฟฟิกแบบพลวัต (Dynamic traffic) [19] หรือ ทราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แต่ทราฟฟิกที่กำหนดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นทราฟฟิกแบบคงที่ โดยแยกพิจารณาการจัดสรรเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นได้ดังนี้

2.2.1 การจัดสรรเส้นทาง (Routing)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การจัดสรรเส้นทางจะอยู่บนพื้นฐานของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light-tree) นั่นคือ โหนดสมาชิกในมัลติคาสต์เซตชั้นเดียวกันทุกโหนดจะต้องเชื่อมต่อถึงกันในลักษณะที่ไม่ทำให้เกิดวงปิด และเส้นทางการเชื่อมต่อต้องมีทิศทางออกจากโหนดต้นทางไปสิ้นสุดยังกลุ่มโหนดปลายทาง โดยเรียกการเชื่อมต่อระหว่างโหนดใด ๆ ในกลุ่มมัลติคาสต์เดียวกันว่า กิ่งเชิงแสง (Optical branch) [11] ลักษณะโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับโครงข่ายตัวอย่างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การจัดสรรเส้นทางบนโครงข่าย WDM โดยอาศัยพื้นฐานโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงประกอบไปด้วยกิ่งเชิงแสงจำนวน 3 กิ่ง คือ 1-3, 3-8 และ 3-7 โดยที่โหนดปลายทางของแต่ละกิ่งเชิงแสงนั้นเป็นสมาชิกของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงด้วย ซึ่งโหนดของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสามารถที่จะคัดลอกและแยกข้อมูลที่เป็นสมาชิกของมัลติคาสต์เซสชันได้ นั่นก็คือโหนดที่ 3 โดย OXCs ต้องรวมอุปกรณ์แยกสัญญาณแสง (Optical splitters) ไว้ภายในด้วย และพบว่าโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เลือกสามารถมีเส้นทางทางกายภาพที่เป็นไปได้มากกว่าหนึ่งเส้นทางดังตัวอย่างรูปที่ 2.3 (ก) - (ง)

2.2.2 การกำหนดความยาวคลื่น (Wavelength Assignment)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งการกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM สำหรับกราฟฟิสิกซ์มัลติคาสต์เป็น 2 วิธี [11] ดังนี้

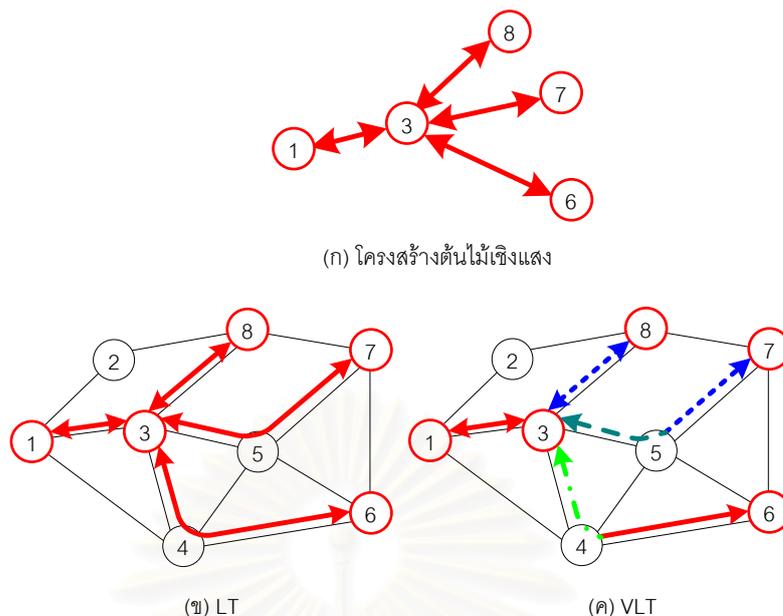
1) วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light-Tree method, LT)

วิธีนี้ความยาวคลื่นที่ถูกกำหนดให้กับกิ่งเชิงแสงทุกกิ่งในโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะเป็นความยาวคลื่นค่าเดียวกัน นั่นคือ จำนวนความยาวคลื่นที่ใช้จะเท่ากับจำนวนโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง จึงไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น ลักษณะการกำหนดความยาวคลื่นของวิธีนี้แสดงดังรูปที่ 2.4 (ข)

2) วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-Tree method, VLT)

วิธีนี้การกำหนดความยาวคลื่นจะพิจารณาแยกแต่ละข่ายเชื่อมโยง นั่นคือ ความยาวคลื่นที่ถูกกำหนดให้กับโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพนั้นสามารถมีค่าแตกต่างกันได้ ดังนั้น วิธีนี้จึงอนุญาตให้ทุกโหนดของโครงข่ายสามารถติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นได้ ลักษณะการกำหนดความยาวคลื่นของวิธีนี้แสดงดังรูปที่ 2.4 (ค)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการกำหนดความยาวคลื่นสำหรับกราฟพิกซิมัลติคาสต์

เส้นใยนำแสงที่ใช้งานในโครงข่าย WDM จะประกอบไปด้วยช่องสัญญาณหลาย ๆ ช่องสัญญาณซึ่งขึ้นอยู่กับค่า M (จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสง) ของเส้นใยนำแสง โดยสามารถแบ่งช่องสัญญาณเหล่านั้นออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการใช้งานช่องสัญญาณ ดังนี้

ความจุใช้งาน (Working capacity) คือ ความจุที่ใช้รองรับเส้นทางที่เป็นวิถีทำงาน (active path) ซึ่งเป็นเส้นทางใช้งานทั่วไปเมื่อโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ หรือสภาวะที่ไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงข่าย

ความจุสำรอง (Spare capacity) คือ ความจุที่ใช้รองรับเส้นทางที่เป็นวิถีสำรอง (Protection path) ซึ่งเป็นเส้นทางที่จะถูกเปลี่ยนมาใช้แทนเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายได้รับความเสียหาย

ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองปัญหาการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

- 1 Optimized Spare Capacity Assignment เป็นวิธีการหาจำนวนความจุสำรองทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อให้โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย ในกรณีนี้จะต้องมีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นของวิถีทำงาน

มาให้ รวมทั้งกำหนดจำนวนความจุทำงานมาให้ด้วย เพื่อนำมาพิจารณาร่วมกับความจุสำรองที่ได้จากกระบวนการหาคำตอบผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ

- 2 Jointly Optimized Working and Spare Capacity Assignment เป็นวิธีการหาความจุทำงานทั้งหมดที่ใช้รองรับทราฟฟิกเมื่อโครงข่ายอยู่ในสภาวะปกติ และจำนวนความจุสำรองทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อให้โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายพร้อมกัน โดยไม่ต้องมีการกำหนดเส้นทาง ความยาวคลื่น และจำนวนความจุทำงานมาให้เหมือนกับวิธีแรก

เมื่อพิจารณาจะพบว่า การจำลองปัญหาในกรณีแรกจะเป็นการจำลองปัญหาสำหรับโครงข่ายที่มีการใช้งานจริงในทางปฏิบัติแล้ว แต่ว่าโครงข่ายดังกล่าวยังไม่ได้มีการคำนึงถึงกรณีหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย นั่นคือ ยังไม่มีการติดตั้งความจุสำรองเพิ่มเติมให้กับโครงข่าย ดังนั้น สามารถใช้วิธีการจำลองปัญหาแบบแรกมาออกแบบหาจำนวนความจุสำรองที่โครงข่ายต้องการได้ ส่วนในกรณีของการจำลองปัญหาในกรณีที่สองนั้น จะเหมาะสำหรับการออกแบบโครงข่ายที่ต้องการทราบถึงต้นทุนของโครงข่ายก่อนที่จะมีการพิจารณาวางโครงข่ายจริงในทางปฏิบัติ โดยค่าต้นทุนของโครงข่ายจะเป็นค่าจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ต้องทำการติดตั้งให้กับโครงข่ายซึ่งจะประกอบไปด้วยความจุทำงานและความจุสำรอง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีแรกเท่านั้น

2.3 การป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย

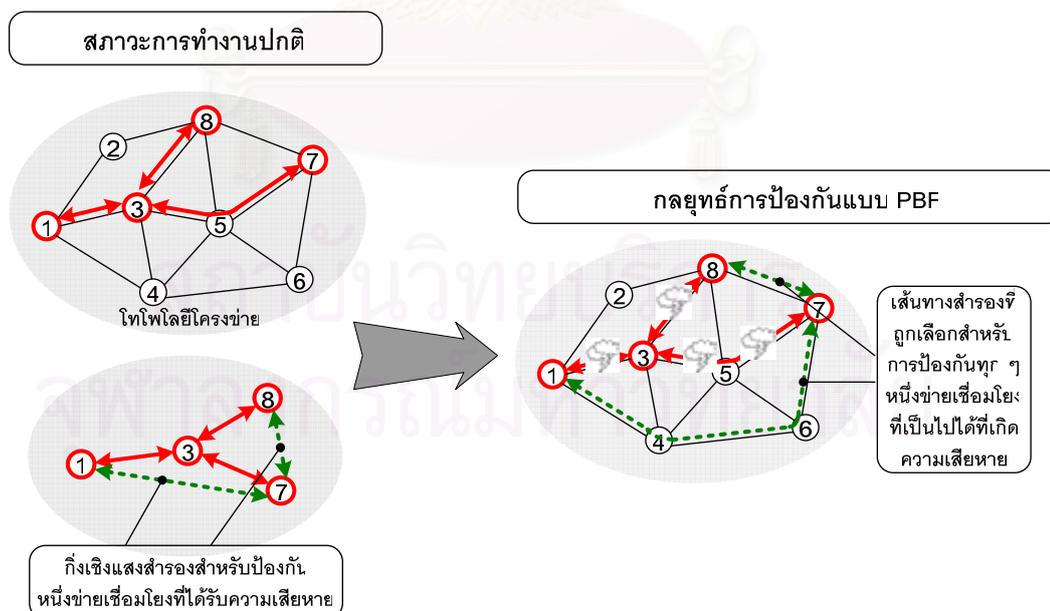
ในการออกแบบโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายที่ได้รับการออกแบบมีความเชื่อถือได้ (Reliability) และมีความอยู่รอดได้ (Survivability) ในสภาวะที่เกิดความเสียหายขึ้น โครงข่ายที่ถูกออกแบบจะต้องมีความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากอุปกรณ์บางส่วนของโครงข่ายเช่น โหนดหรือข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย มาตรการที่ใช้ป้องกันความเสียหายของโครงข่าย (Protection) คือ การจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับทราฟฟิกในโครงข่าย กล่าวคือ เมื่อข่ายเชื่อมโยงมีความเสียหายเกิดขึ้นไม่สามารถใช้งานได้ เส้นทางของทราฟฟิกที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายจะต้องเปลี่ยนไปใช้เส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงข่ายเชื่อมโยงที่เสียหาย เรียกเส้นทางที่โครงข่ายจัดสรรให้ใหม่นี้ว่า วิถีบูรณะ (Restoration path) ดังนั้น การแก้ไขปัญหาเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น จำเป็นที่จะต้องมีการเผื่อความจุเพิ่มให้กับโครงข่ายเพื่อใช้รองรับวิถีบูรณะ และเนื่องจากการเผื่อความจุสำรองเพิ่มให้กับโครงข่าย ดังนั้นต้นทุนของโครงข่ายที่สามารถแก้ไขปัญหาเมื่อโครงข่ายได้รับความเสียหายจึงสูงกว่าต้นทุนของโครงข่ายที่ไม่ได้แก้ไขปัญหา ซึ่งจากการศึกษางานวิจัย

ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงข่าย WDM ที่สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดจากความเสียหายในโครงข่ายนั้นพบว่า ความเสียหายที่พบได้มาก และมีความซับซ้อนในการป้องกันไม่สูงมากนักคือ ความเสียหายที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยง (Single-link failure)

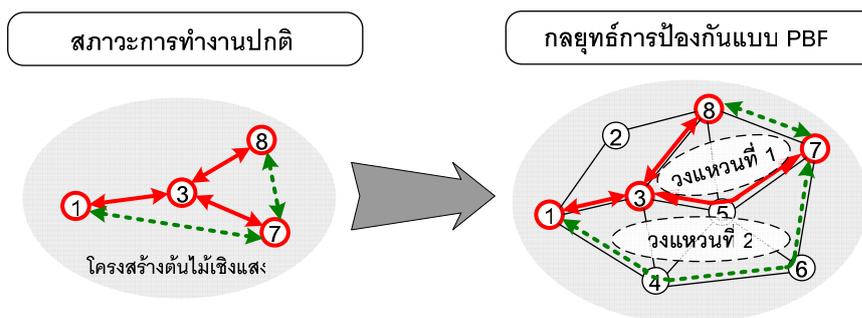
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำกลยุทธ์การป้องกันโครงข่าย WDM เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์โดยมีคุณลักษณะโครงสร้างแบบต้นไม้เชิงแสงในสภาวะการทำงานปกติ ซึ่งนำเสนอด้วยกัน 2 วิธี [11] คือ

2.3.1 กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (Physical Branch Fixed)

กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF นี้ จะต้องมีกิ่งเชิงแสงที่มีจำนวนแน่นอนเพื่อให้สำรองเส้นทางในกรณีเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยง กล่าวคือเมื่อเกิดความเสียหายขึ้น วิธีนี้จะมีการกำหนดเส้นทางกายภาพ (Physical routes) สำรองที่แน่นอนให้กับกิ่งเชิงแสงสำรอง โดยจะเลือก 1 กิ่งเชิงแสงต่อ 1 เส้นทางกายภาพ จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยงใด ๆ การจัดสรรเส้นทางไปยังเส้นทางสำรองนั้นก็就会เลือกใช้ตามเส้นทางกายภาพที่ได้ทำการเลือกไว้แล้ว นั่นก็คือเส้นทางกายภาพสำรอง 1-4-6-7 และ 8-7 สามารถใช้กู้คืนช่องสัญญาณได้ทั้งกรณีที่ข่ายเชื่อมโยง 3-8 หรือ 3-5 ได้รับความเสียหาย จากตัวอย่างนี้จะเห็นว่ามีการใช้เส้นทางกายภาพสำรองเพียงสองเส้นทางเท่านั้นสำหรับเหตุการณ์ที่เป็นไปได้หนึ่งข่ายเชื่อมโยงทุกกรณีเกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF



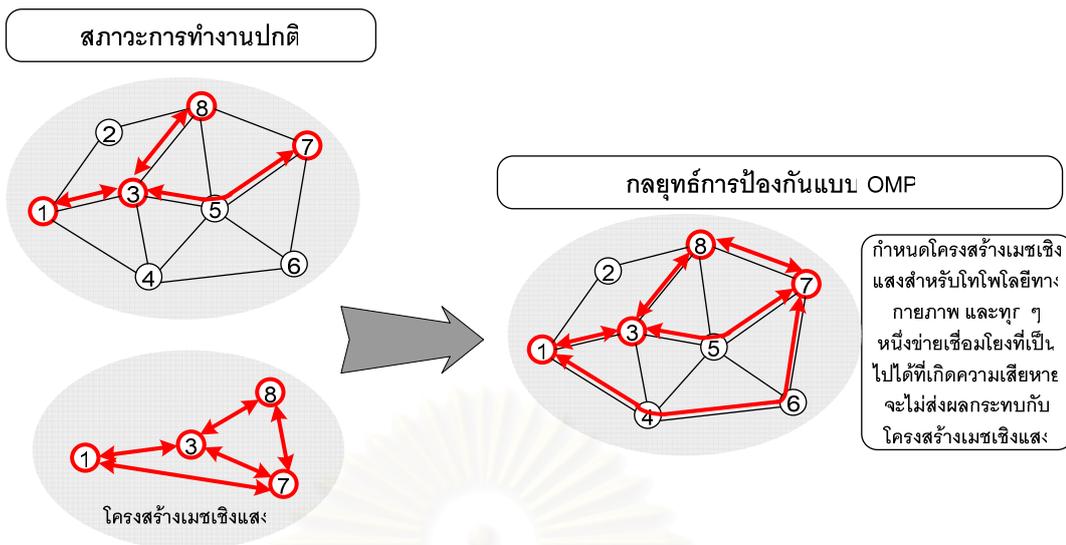
รูปที่ 2.6 การประยุกต์แนวคิดวงแหวนหลายวงสำหรับกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF

เมื่อพิจารณาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงร่วมกับวิธีบูรณะกายภาพ จะเห็นว่าสามารถนำแนวคิดวงแหวนหลายวง (multi-ring) มาประกอบกันเป็นเซตให้ครอบคลุมทุกโหนดสมาชิกและข่ายเชื่อมโยงกายภาพของมัลติคาสต์เซชันในโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 กล่าวคือ เลือกข่ายเชื่อมโยงกายภาพสำรองให้กับวิธีบูรณะโดยอาศัยวงแหวนที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นไปตามหลักการของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF

2.3.2 กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (Optical Mesh Protection)

ในกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP นี้ โครงข่ายจะอาศัยโครงสร้างเมชเชิงแสง (Optical mesh) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีคำจำกัดความว่า เป็นโครงสร้างของเมชที่ประกอบด้วยจำนวนการเชื่อมต่อกันระหว่างกิ่งเชิงแสงที่ครอบคลุมโหนดสมาชิกทุก ๆ ตัวในมัลติคาสต์เซชัน ซึ่งโครงสร้างเมชเชิงแสงต้องมีคุณสมบัติ คือ ในแต่ละกิ่งเชิงแสงจะต้องสอดคล้องกันกับเส้นทางกายภาพที่ได้กำหนดไว้จากสภาวะการทำงานปกติด้วย หากเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยงใด ๆ โครงสร้างเมชเชิงแสงจะต้องมีความสามารถในการเชื่อมต่ออยู่เช่นเดิมแสดงดังรูปที่ 2.7

ในความเป็นจริงแล้วกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP เป็นการพัฒนามาจากกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF นั่นคือ เมื่อกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF ทำการเลือกเส้นทางกายภาพสำรองสำหรับโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงแล้ว โครงข่ายจะสำรองเส้นทางนำแสงสำรองเฉพาะ (Dedicated) ให้กับวิธีบูรณะทันที ดังนั้น เมื่อนำโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงในสภาวะการทำงานปกติมาประกอบกันกับเส้นทางกายภาพสำรองจะกลายเป็นโครงสร้างเมชเชิงแสงนั่นเอง



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างโครงข่ายที่ใช้กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP

เนื้อหาในบทถัดไปจะกล่าวถึงทฤษฎีและการนำอัลกอริทึมฮิวริสติกมาประยุกต์ใช้ในงานออกแบบการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นเมื่อโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ และการป้องกันโครงข่ายเมื่อนำสายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายสำหรับโครงข่าย WDM ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถทำให้การออกแบบโครงข่ายมีประสิทธิภาพในการใช้เส้นใยนำแสงมากที่สุดหรือมีความต้องการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงน้อยที่สุดได้วิธีหนึ่ง

บทที่ 3

อัลกอริทึมฮิวริสติก

งานวิจัย [11] พบว่าข้อดีของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ค่าคำตอบผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดหรือใช้จำนวนเส้นใยนำแสงในโครงข่ายน้อยที่สุด แต่ข้อเสียของแบบจำลองนี้ก็คือเมื่อปัญหาของโครงข่ายที่ออกแบบมีขนาดที่ใหญ่หรือซับซ้อนมาก เช่น โครงข่ายมีขนาดโทโพโลยีมัลติคาสต์เซสชันหรือปริมาณทราฟฟิกขนาดใหญ่ขึ้น ย่อมส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยค่อนข้างกินเวลานานหรืออาจหาคำตอบไม่ได้ในบางคำตอบ อันเนื่องมาจากจำนวนพารามิเตอร์และตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเพิ่มจำนวนมากขึ้นตามลักษณะปัญหาแบบ NP-hard แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้ออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดเล็กและไม่ซับซ้อนมากนัก ในบทนี้จะกล่าวถึงอัลกอริทึมฮิวริสติก (Heuristic) ซึ่งเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้แก้ปัญหาการออกแบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่ได้ดี โดยอาศัยหลักการสุ่มหาคำตอบผลเฉลย วิธีนี้เป็นการหาค่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีประมาณค่า ดังนั้นคำตอบของผลเฉลยที่ได้จะได้ต้นทุนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงของโครงข่ายใกล้เคียงผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (Sub-optimum)

ก่อนที่จะกล่าวถึงการนำอัลกอริทึมฮิวริสติกไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นบนโครงข่าย WDM หัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของอัลกอริทึมฮิวริสติกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ Local Search อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ Simulated Annealing และอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ Tabu Search ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS

อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS [13,14] มีหลักการพิจารณาคำตอบอย่างง่าย คือ หากกระบวนการค้นหาผลเฉลยสามารถค้นพบคำตอบใหม่ที่พัฒนาขึ้นหรือมีต้นทุนลดลง จะยอมรับคำตอบของผลเฉลยที่พัฒนาขึ้นนั้นเสมอ ซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการค้นหาผลเฉลยใหม่ในรอบถัดไป ส่วนในกรณีที่ต้นทุนของผลเฉลยมีค่าเท่าเดิม จะยอมรับค่าใหม่และถือเอาเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการค้นหาผลเฉลยใหม่เพื่อเปรียบเทียบในรอบถัดไปเพื่อให้เกิดการขยายขอบเขตของผลเฉลย

3.1.1 หลักการทั่วไปของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS

อัลกอริทึมเริ่มจากการกำหนดผลเฉลยที่เป็นไปได้เริ่มต้น $S_0 \in \Omega$ เมื่อ Ω คือปริภูมิการค้นหา (search space) และใช้ฟังก์ชัน *improve* ในการค้นหาผลเฉลยที่ดีกว่าผลเฉลยข้างเคียงของ S_0 ถ้าพบผลเฉลยที่ดีกว่าหรือ $S \in N(S_0)$ แล้ว จะทำการค้นหาผลเฉลยข้างเคียงหรือ $N(S)$ ของผลเฉลยใหม่ถัดไปจนกว่าจะพบผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ (Local optimum) หรือเงื่อนไขเป็นเท็จ ซึ่งเงื่อนไขของฟังก์ชัน *improve* มีดังนี้

$$improve(S) = \begin{cases} any\ T \in N(S) & Cost(T) < Cost(S) \\ nil & otherwise \end{cases}$$

โดยสามารถอธิบายอัลกอริทึมค้นหาผลเฉลยแบบเฉพาะที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.1

```

Algorithm LocalSearch ( $S_0$ )
Begin
   $S = S_0$ ;
  Repeat
     $S^* = S$ ;
     $S = improve(S^*)$ ;
  Until  $S = nil$ ;
  Return ( $S^*$ )
End /* of LocalSearch */

```

รูปที่ 3.1 รหัสเทียมอธิบายอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS [13]

จากรูปที่ 3.1 สามารถอธิบายได้ว่า มีการกำหนดผลเฉลยเริ่มต้นเพื่อนำมาตรวจสอบกับฟังก์ชัน *improve* ถ้าเงื่อนไขเป็นจริงจะปรับผลเฉลยนั้นให้เป็นผลเฉลยใหม่แล้วนำไปใช้เปรียบเทียบกับรอบการวนซ้ำถัดไปจนกว่าเงื่อนไขจะเป็นเท็จหรือผลเฉลยปัจจุบันไม่พัฒนาขึ้นจากผลเฉลยในอดีตจนกว่าจะพบเกณฑ์การหยุดทำงาน (stop criterion) จึงจะหยุดทำงาน

3.2 อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA

หลังจาก Kirkpatrick ได้พัฒนาแนวความคิดซึ่งมีจุดเริ่มต้นมาจาก Metropolis loop โดยอาศัยความสัมพันธ์กันระหว่างการหลอมละลายโลหะกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัด (combinatorial optimization problem) เมื่อปี ค.ศ.1983 ในเวลาใกล้เคียงกันนั้น Cerny ได้เสนอแนวความคิดที่คล้ายคลึงกันขึ้นมาในปี ค.ศ.1985 จากการสังเกตการเทียบเคียงกันได้ระหว่างผล

เฉลี่ยในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดกับสถานะทางกายภาพของโลหะ และการเทียบเคียงกันได้ระหว่างต้นทุนค่าใช้จ่าย (Cost) ของผลเฉลี่ยจากการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัดและพลังงานอิสระในโลหะหลอมละลาย ผลลัพธ์ที่ได้มานั้นพบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันจึงเป็นที่มาของคำว่า Simulated annealing

3.2.1 หลักการทั่วไปของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA

อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA [13,14] จัดว่าเป็นอัลกอริทึมหนึ่งซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัด ซึ่งเป็นปัญหาชนิด NP-hard โดยคำว่า annealing เทียบได้กับการเผาโลหะที่อุณหภูมิสูง ๆ จนโลหะเกิดการหลอมละลาย จากนั้นจึงค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ เพื่อให้ได้ผลึกโลหะที่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA ถือว่าเป็นเทคนิคการค้นหาผลเฉลยแบบเฉพาะที่อย่างหนึ่ง ซึ่งมีกระบวนการทำงานแบบวนซ้ำเพื่อค้นหาผลเฉลยในปริภูมิผลเฉลยไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่พอใจ โดยเริ่มจากผลเฉลยเริ่มต้น อัลกอริทึมนี้เป็นฮิวริสติกแบบปรับตัวได้แบบ Non-deterministic

กระบวนการหลอมละลายโลหะนั้นจะอาศัยพื้นฐานเทคนิคการจำลองอัลกอริทึม Monte Carlo โดยกำหนดให้สถานะปัจจุบันหรือ S_i ของโลหะเทียบได้กับพลังงาน E_i และสถานะถัดไปของโลหะ (subsequent state) หรือ S_j เทียบได้กับพลังงาน E_j แล้วนำมาท่อกำเนิดกระบวนการสั้นเชิงกล โดยการเปลี่ยนจากสถานะปัจจุบันเป็นสถานะถัดไปให้มีความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด ซึ่งสถานะใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นมาจะถูกเลือกมาแบบสุ่ม ถ้าหากค่าพลังงานของสถานะใหม่มีค่าน้อยกว่าสถานะปัจจุบันหรือ $\Delta E = E_j - E_i \leq 0$ จึงจะยอมรับผลเฉลยเพื่อไปใช้ทดแทนผลเฉลยในอดีต แล้วสถานะปัจจุบันจะกลายเป็นสถานะใหม่ ถ้าหากผลต่างพลังงานมีค่ามากกว่า 0 ก็จะยอมรับผลเฉลยด้วยความน่าจะเป็น

$$\Pr(\text{accept}) = \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (3.1)$$

โดย k_B คือค่าคงที่ Boltzmann และ T คืออุณหภูมิปัจจุบันของการหลอมละลาย โดยเงื่อนไขการยอมรับผลเฉลยข้างต้นนี้จะกระทำซ้ำ ๆ กันหลายวงรอบ

3.2.2 หลักการทำงานของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA

Kirkpatrick และ Cerny ให้ข้อสรุปไว้ว่า ผลเฉลี่ยในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัด เปรียบได้กับสถานะทางกายภาพ และต้นทุนของผลเฉลยเปรียบได้กับสถานะของพลังงาน โดยทำการเปรียบเทียบการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดกับกระบวนการหลอมละลายโลหะไว้ว่า

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของทั้งหมด (global optimum) มีส่วนคล้ายกับโครงสร้างผลึกโลหะแบบสมบูรณ์ (สถานะพลังงานต่ำที่สุดของโลหะ) และโครงสร้างผลึกโลหะที่ไม่สมบูรณ์ (Imperfection) เปรียบเสมือนกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่

การให้ความร้อนเพื่อหลอมละลายโลหะนั้นต้องอาศัยอุณหภูมิค่อนข้างสูงเพื่อให้โลหะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้มีความเหมาะสมมากพอ สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการควบคุมอุณหภูมินี้เรียกว่า control parameter ซึ่งอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA จะอาศัยตามหลักการของอัลกอริทึม Metropolis คือ จะค่อย ๆ ปรับลดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวลงในแต่ละวงรอบการวนซ้ำ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับรอบที่ค้นหาคำตอบ

สมมุติฐานของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA นี้มีลักษณะเหมือนกับอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS คือ สมมุติให้มีโครงสร้างผลเฉลยข้างเคียง (Neighbourhood structure) และกลไกการทำงานปกติ เพื่อให้เกิดการเลือกเฟ้นหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด โดยจะขออธิบายบทนิยามที่สำคัญสำหรับกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยไว้ดังนี้

บทนิยาม 3.2.1 ให้ (S, f) แทนตัวอย่างของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัดโดยที่ S คือ ปริภูมิผลเฉลย (solution space) ใช้แทนเซตจำกัดของผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งหมดและ f คือฟังก์ชันต้นทุนโดยมีนิยามว่า

$$f : S \rightarrow \mathbb{R} \quad (3.2)$$

i และ j เป็นผลเฉลยในอดีตและผลเฉลยปัจจุบันของต้นทุน $f(i)$ และ $f(j)$ ตามลำดับ โดยที่เกณฑ์การยอมรับค่าจะเป็นไปตามความน่าจะเป็นในการยอมรับค่า

$$\Pr(\text{accept } j) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(j) \leq f(i) \\ \exp\left(-\frac{f(j) - f(i)}{c}\right) & \text{if } f(j) > f(i) \end{cases} \quad (3.3)$$

เมื่อ $c \in \mathbb{R}^+$ แทนพารามิเตอร์ควบคุมอุณหภูมิ

บทนิยาม 3.2.2 การเปลี่ยนสถานะ (transition) คือผลลัพธ์ที่เกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงผลเฉลยปัจจุบันหนึ่งไปเป็นอีกผลเฉลยหนึ่ง ซึ่งกระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะดังกล่าวประกอบด้วยกันสองส่วน คือ ผลลัพธ์จากกลไกของการทำงานตามปกติเอง และผลลัพธ์จากการพิจารณาตัดสินใจเกณฑ์การยอมรับค่า

อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA อธิบายได้ดังรูปที่ 3.2 โดยกำหนดค่า c เริ่มต้นให้มีค่ามาก ๆ เปรียบเสมือนกับกำหนดอุณหภูมิให้สูงเพื่อให้ยอมรับผลเฉลยที่ด้อยลงได้สูงในรอบแรก ๆ แล้วจึงลดค่า c ลงเพื่อให้ยอมรับค่าผลเฉลยที่ด้อยได้น้อยลงกว่าเดิม จนกระทั่งค่า c เข้าใกล้ศูนย์ผลเฉลยที่ด้อยก็จะมีอีกเลยซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการค้นหาผลเฉลยแบบเฉพาะที่ และค่าความน่าจะเป็นของการยอมรับค่านั้นจะเปรียบเทียบค่าระหว่าง $\exp(-(f(j) - f(i))/c)$ กับค่าที่ได้จากการสุ่มซึ่งมีการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์มในช่วง $[0, 1)$ เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าจะยอมรับคำตอบของผลเฉลยในแต่ละรอบหรือไม่

```

procedure Simulated Annealing( );

begin
  Initialize ( $i_{\text{start}}, c_0, L$ );
   $k := 0$ ;
   $i := i_{\text{start}}$ ;
  repeat
    for  $l := 1$  to  $L$  do
      begin
        Generate ( $j$  from  $S_i$ );
        if  $f(j) < f(i)$  then  $i := j$ 
        else
          if  $\exp\left(-\frac{f(j) - f(i)}{c_k}\right) > \text{random}[0,1)$  then
             $i := j$ ;
          end
        end;
       $k := k + 1$ ;
       $c_k := \alpha \cdot c_k$ ;
    until stopcriterion
  end;
end;

```

รูปที่ 3.2 รหัสเทียมอธิบายอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA [14]

ส่วนค่าของพารามิเตอร์ควบคุมอุณหภูมิจะปรับให้ลดลงเรื่อย ๆ ตามสมการ (3.4)

$$c_{k+1} = \alpha \cdot c_k, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (3.4)$$

โดยที่ α เป็นค่าคงที่มีค่าน้อยกว่าแต่ใกล้เคียงกับ 1 (นิยมใช้ระหว่าง 0.8 ถึง 0.99) [13,14] ส่วนพารามิเตอร์ L เป็นจำนวนรอบการทำงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการยอมรับคำตอบที่ด้อยลงของอัลกอริทึม Metropolis

3.3 อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS

อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS [13-16] เป็นกระบวนการค้นหาผลเฉลยแบบเฉพาะที่อย่างหนึ่งที่จะให้คำตอบผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกรณีที่เป็นแบบ NP-hard โดยใช้เทคนิคการค้นหาที่ใช้โครงสร้างของหน่วยความจำ (memory) เข้ามาเป็นส่วนประกอบ ดังนั้น อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS จึงถูกเรียกว่าเป็นอัลกอริทึมแบบ meta-heuristics ซึ่งนำเสนอโดย Glover [13,15,16] เมื่อปี ค.ศ.1986 ความหมายของคำว่าตาบู (Tabu) คือ ข้อห้าม หรือ สิ่งต้องห้าม พุทธอภินัยหนึ่งก็คือ การหลีกเลี่ยงการเกิดการเลือกผลเฉลยใหม่ที่ซ้ำซ้อน (cyclic) กับผลเฉลยในอดีตที่ไม่ก่อให้เกิดการพัฒนาขึ้นของคำตอบ ซึ่งเป็นที่มาของการนำหน่วยความจำเข้ามาเป็นส่วนประกอบของอัลกอริทึม

3.3.1 หลักการทั่วไปของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS

ในการเพิ่มความหลากหลายของชุดคำตอบของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS จะป้องกันไม่ให้เกิดผลเฉลยใหม่ซ้ำกับคำตอบของผลเฉลยในอดีต โดยในแต่ละรอบของกระบวนการค้นหาคำตอบใหม่ จะมีการพิจารณาการย้าย (Move) ผลเฉลยที่มีโอกาสทำให้อันดับของคำตอบใหม่ที่จะค้นหาซ้ำซ้อนกับคำตอบของผลเฉลยในอดีต การย้ายเหล่านี้จะถูกห้ามและถูกบันทึกลงในหน่วยความจำที่เรียกว่า Tabu list อย่างไรก็ตาม การย้ายที่อยู่ใน list นี้จะถูกห้ามอยู่เพียงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น หลังจากนั้นจะถูกลบออกจาก list และอนุญาตให้กระทำดังเดิม ดังนั้นการกำหนดความยาวของ Tabu list คือ การกำหนดระยะเวลาที่การย้ายแต่ละแบบจะถูกห้ามนั่นเอง

Tabu restrictions เป็นข้อจำกัดของ tabu list โดยจะเคลื่อนย้ายตาบู (Tabu move) ได้ก็ต่อเมื่อเงื่อนไข Tabu restrictions เป็นจริง Tabu search ประกอบไปด้วยรูปแบบการค้นหาคำตอบ 2 รูปแบบที่สำคัญคือ การค้นหาผลเฉลยโดยใช้ความจำระยะสั้น (Short-term memory search) และการค้นหาผลเฉลยโดยใช้ความจำระยะยาว (Long-term memory search) ซึ่งการค้นหาผลเฉลยโดยใช้ความจำระยะสั้นนั้นเป็นหลักการสำคัญและเป็นหลักการเบื้องต้นของวิธี Tabu search การใช้หน่วยความจำระยะสั้นหมายถึง การค้นหาที่จดจำอดีตหรือประสบการณ์การค้นหาที่ผ่านมาเพียงระยะสั้น ในทางตรงข้ามกับการใช้ความจำระยะยาวนั้นจะต้องจดจำอดีตหรือประสบการณ์ที่ผ่านมาตลอดเพื่อช่วยให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาเฉพาะการนำ Short-term memory มาประยุกต์เท่านั้น

3.3.2 หลักการทำงานของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS

```

Algorithm Tabu_Search( );
 $\Omega$       : เซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งหมด
 $S$        : ผลเฉลยปัจจุบัน
 $S^*$      : ผลเฉลยที่ดีที่สุด
 $Cost$    : ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
 $N(S)$    : ผลเฉลยข้างเคียง ( $S \in \Omega$ )
 $V^*$     : ผลเฉลยข้างเคียงที่นำมาสู่คัดเลือก
 $T$       : Tabu list
 $AL$     : เงื่อนไขการยอมรับคำตอบ

begin
Start with an initial feasible solution  $S \in \Omega$ 
Initialize tabu list and aspiration level ;
for fixed number of iterations do
    Generate neighbor solutions  $V^* \subset N(S)$  ;
    Find best  $S^* \in V^*$  ;
    if move  $S$  to  $S^*$  is not in  $T$  then
        Accept move and update best solution ;
        Update tabu list and aspiration level ;
        Increment iteration number ;
    else
        if  $Cost(S^*) < AL$  then
            Accept move and update best solution ;
            Update tabu list and aspiration level ;
            Increment iteration number ;
        endif
    endif
endfor
end.

```

รูปที่ 3.3 รหัสเทียมอธิบายอัลกอริทึม TS [13]

รูปที่ 3.3 อธิบายอัลกอริทึมการสร้าง TS อย่างง่าย โดยกระบวนการเริ่มจากการกำหนดผลเฉลยที่เป็นไปได้เริ่มต้น S เป็นผลเฉลยปัจจุบัน ในปริภูมิการค้นหา Ω นิยามผลเฉลยข้างเคียงของแต่ละ S เป็น $N(S)$ การสุ่มตัวอย่างหนึ่งจากผลเฉลยข้างเคียงแทนด้วย $V^* \subset N(S)$ และโอกาสที่เป็นไปได้บางอย่างหนึ่ง คือการใช้ผลเฉลยข้างเคียงทั้งหมดที่แทนด้วย $V^* = N(S)$ แต่โดยทั่วไปแล้ววิธีนี้ไม่สามารถทำได้จริงเนื่องจากต้องสิ้นเปลืองเวลาที่ใช้ในการคำนวณมาก จึงต้องสุ่มบริเวณพื้นที่ข้างเคียงที่มีขนาดเล็ก ($V^* \subset N(S)$) ที่เรียกว่าผลเฉลยทดลองสุ่ม (trial) ($|V^*| = n \ll |N(S)|$) โดยจะสุ่มเลือกจนกระทั่งได้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่สุด กล่าวคือเลือก $S^* \in V^*$ เพื่อใช้ในการพิจารณาผลเฉลยถัดไป การย้าย S ไป S^* นั้นจะย้ายได้ก็ต่อเมื่อ S^* ดีกว่า S หรือ $Cost(S^*) > Cost(S)$ นั่นเอง

ในการเลือกการย้ายที่เหมาะสมที่สุดใน V^* นั้นอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า การย้ายที่ดีควรมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยที่ให้ค่าคำตอบใกล้เคียงกับผลเฉลยที่เหมาะสมมากที่สุดจึงต้องพิจารณาผลเฉลยทดลอง $S^* \in V^*$ ด้วย เพราะผลเฉลยทดลองที่เหมาะสมที่สุดนั้นอาจทำให้ผลเฉลยปัจจุบันดีหรือไม่ดีขึ้นก็ได้ ลักษณะเช่นนี้เป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดค่าที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ได้

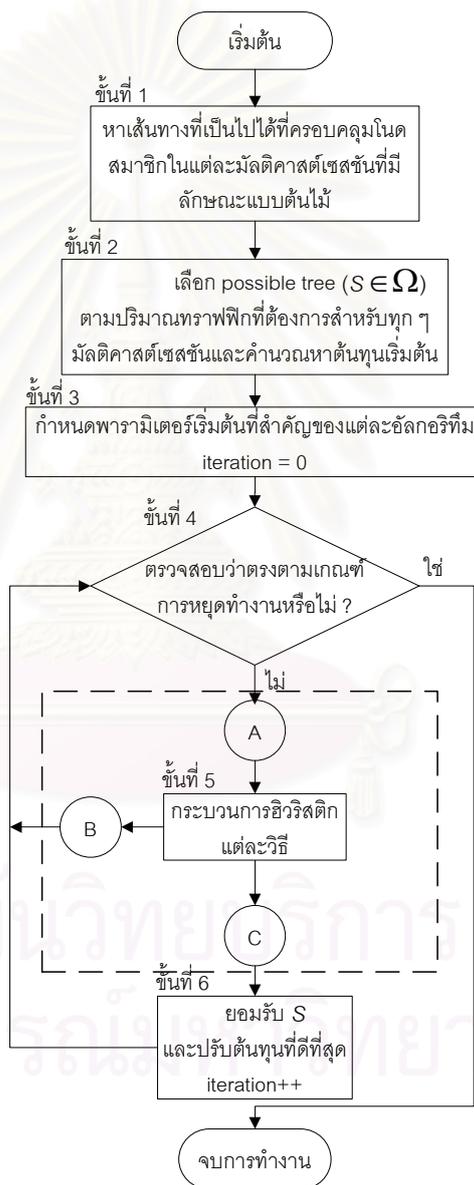
Aspiration criterion เป็นกลไกอย่างหนึ่งที่น่ามาพิจารณาใช้หากเกิดสถานะ tabu ขึ้นภายใน tabu list หากการย้ายนั้นดีพอหรือผ่านเกณฑ์การยอมรับผลเฉลยก็จะเกิดการยอมรับคำตอบ

พิจารณารูปที่ 3.3 อีกครั้ง เริ่มแรกจะกำหนดผลเฉลยปัจจุบันเริ่มต้นให้เป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดในการสำเนาผลเฉลยปัจจุบันยอมส่งผลต่อการย้ายของเซตผลเฉลยใหม่ ฉะนั้นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดจะถูกเลือกขึ้นมา ถ้าการย้ายนั้นไม่ใช่ตามแล้ว ผลเฉลยดังกล่าวจะกลายเป็นผลเฉลยปัจจุบัน แต่ถ้าการย้ายนั้นเป็นตามก็ต้องทำการตรวจสอบเกณฑ์การยอมรับค่า ถ้าเงื่อนไขดังกล่าวเป็นจริง จะเคลื่อนย้ายค่าคำตอบหรือคุณสมบัติบางอย่างของมันเก็บไว้ใน tabu list (ขนาดความยาวของ tabu list ที่นิยมใช้อยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 12 [13,15]) มิฉะนั้นมันอาจจะเลือกค่าที่ให้ผลเฉลยซ้ำเดิมทำให้สิ้นเปลืองเวลา ถ้าผลเฉลยถัดไปดีกว่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดในอดีตแล้วต้องทำการปรับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดใหม่ เมื่อใดก็ตามที่มีการยอมรับการย้ายจะต้องทำการเพิ่มค่ารอบการปรับตัว กระบวนการจะทำต่อเนื่องเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนตรงตามเกณฑ์การหยุด อันประกอบไปด้วย

- จะหยุดทำก็ต่อเมื่อมีการปรับจำนวนรอบจนครบตามที่กำหนดไว้
- จะหยุดทำหลังจากปรับค่าไปจนกระทั่งค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ไม่มีการพัฒนาค่าตอบที่ดีกว่าเดิม

3.4 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับการออกแบบการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่น

หัวข้อนี้อธิบายการนำอัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละวิธีมาประยุกต์ใช้ออกแบบการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นเมื่อโครงข่ายทำงานอยู่ในสภาวะปกติสำหรับโครงข่าย WDM ทั้งกรณีที่มีและไม่มี การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยรูปที่ 3.4 แสดงผังงานอัลกอริทึมฮิวริสติกโดยรวมที่ใช้ออกแบบการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่น



รูปที่ 3.4 ผังงานอัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับกระบวนการจัดสรรเส้นทางบนโครงข่าย WDM

พิจารณารูปที่ 3.4 สามารถอธิบายการทำงานของผังงานอัลกอริทึมฮิวริสติกได้ดังนี้

- กรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

ขั้นที่ 1 หาปริภูมิการค้นหา (Search space) ที่มีลักษณะเส้นทางเป็นโครงสร้างต้นไม้โดยมีการใช้ข่ายเชื่อมโยงน้อยสุดที่เป็นไปได้และครอบคลุมทุกโนดสมาชิกในแต่ละมิติคาสต์เซตชั้น เพื่อใช้สำหรับสุ่มหาคำตอบผลเฉลย

ขั้นที่ 2 กำหนดเส้นทางเริ่มต้นให้กับทุก ๆ ช่องสัญญาณในแต่ละมิติคาสต์เซตชั้นต้องการ และคำนวณหาจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงเริ่มต้นให้เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทดสอบจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงในรอบถัดไป

ขั้นที่ 3 กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นที่อัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละแบบต้องการและกำหนดรอบการวนซ้ำเริ่มต้นเท่ากับ 0

ขั้นที่ 4 ตรวจสอบว่าพบเงื่อนไขตามเกณฑ์การหยุดการทำงานหรือไม่ ถ้าใช่ ให้สิ้นสุดการทำงาน ถ้าไม่ใช่ให้ทำจุดต่อ A ซึ่งเป็นอินพุตให้กับขั้นที่ 5 ต่อไป

ขั้นที่ 5 ทำกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยฮิวริสติกแต่ละวิธี โดยจะให้เอาท์พุทไปที่จุดต่อ B หรือจุดต่อ C ถ้าเอาท์พุทปรากฏที่จุดต่อ B ให้ทำขั้นที่ 4 อีกครั้ง และถ้าเอาท์พุทปรากฏที่จุดต่อ C ให้ทำขั้นที่ 6 ต่อไป โดยจะอธิบายกระบวนการตัดสินใจนี้ในหัวข้อที่ 3.6

ขั้นที่ 6 ยอมรับผลเฉลยถัดไปแล้วรับค่าจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงที่เหมาะสมที่สุดใหม่และปรับรอบการทำงานขั้นอีก 1 รอบ จากนั้นให้ทำขั้นที่ 4

- กรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

ขั้นที่ 1 หาปริภูมิการค้นหาที่มีลักษณะเส้นทางเป็นโครงสร้างต้นไม้โดยมีการใช้ข่ายเชื่อมโยงน้อยสุดที่เป็นไปได้และครอบคลุมทุกโนดสมาชิกในแต่ละมิติคาสต์เซตชั้น เพื่อใช้สำหรับสุ่มหาคำตอบผลเฉลย

ขั้นที่ 2 กำหนดเส้นทางเริ่มต้นให้กับทุก ๆ ช่องสัญญาณในแต่ละมิติคาสต์เซตชั้นต้องการโดยกำหนดความยาวคลื่นที่เหมาะสมให้กับแต่ละเส้นทางที่เลือก (1 เส้นทางต่อ 1 ความยาวคลื่น) และคำนวณหาจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงเริ่มต้นให้เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทดสอบจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงในรอบถัดไป

ขั้นที่ 3 กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นที่อัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละแบบต้องการและกำหนดรอบการวนซ้ำเริ่มต้นเท่ากับ 0

ขั้นที่ 4 ตรวจสอบว่าพบเงื่อนไขตามเกณฑ์การหยุดการทำงานหรือไม่ ถ้าใช่ ให้สิ้นสุดการทำงาน ถ้าไม่ใช่ให้ทำจุดต่อ A ซึ่งเป็นอินพุทให้กับขั้นที่ 5 ต่อไป

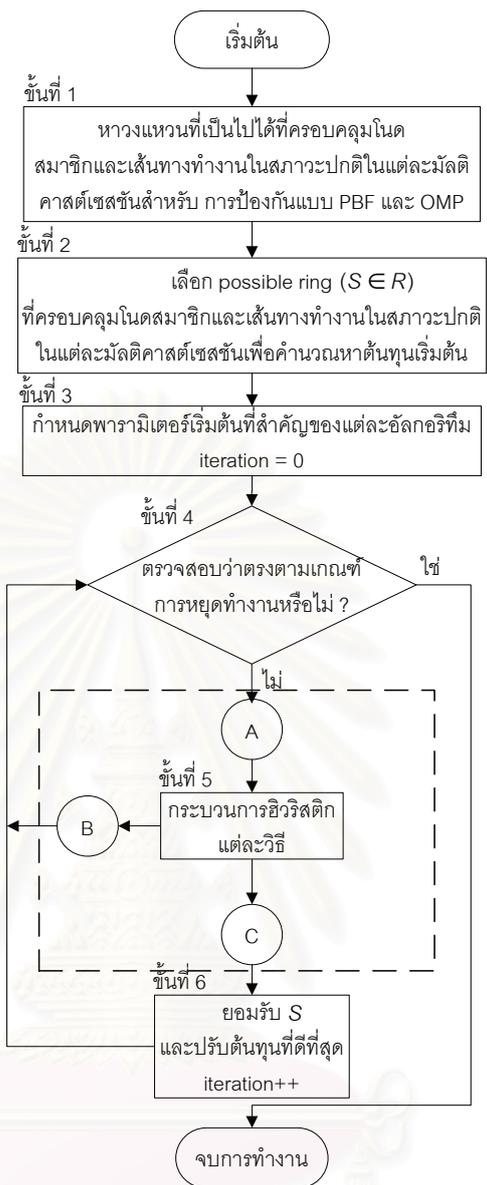
ขั้นที่ 5 ทำกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยฮิวริสติกแต่ละวิธี โดยจะให้เอาท์พุทไปที่จุดต่อ B หรือจุดต่อ C ถ้าเอาท์พุทปรากฏที่จุดต่อ B ให้ทำขั้นที่ 4 อีกครั้ง และถ้าเอาท์พุทปรากฏที่จุดต่อ C ให้ทำขั้นที่ 6 ต่อไป โดยจะอธิบายกระบวนการตัดสินใจนี้ในหัวข้อที่ 3.6

ขั้นที่ 6 ยอมรับผลเฉลยถัดไปแล้วรับค่าจำนวนความถี่การใช้เส้นใยนำแสงที่เหมาะสมที่สุดใหม่ และปรับรอบการทำงานขึ้นอีก 1 รอบ จากนั้นให้ทำขั้นที่ 4

3.5 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับการออกแบบการป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย

หัวข้อนี้อธิบายการนำอัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละวิธีมาประยุกต์ใช้ออกแบบการป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายสำหรับโครงข่าย WDM ทั้งกรณีที่มีและไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยผังงานในรูปที่ 3.5 จะใช้อธิบายการทำงานอัลกอริทึมฮิวริสติกของการป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย จากบทที่ 2 จะเห็นว่าหลักการทำงานของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF และ OMP จะอาศัยแนวคิดการสร้างวงแหวนหลายวงเพื่อจัดสรรเป็นเส้นทางสำรองเหมือนกันทั้งสองวิธี ดังนั้นจึงต้องทำการหาวงแหวนที่เป็นไปได้ที่ครอบคลุมโหนดสมาชิกและเส้นทางทำงานที่จัดสรรไว้แล้วในสถานะปกติมาก่อนเพื่อนำไปใช้สุ่มเลือกเส้นทางวงแหวนสำหรับอัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละวิธี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ผังงานอัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับกระบวนการป้องกันโครงข่ายเมื่อนำเข้าเชื่อมโยง
ได้รับความเสียหายบนโครงข่าย WDM

กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF และ OMP มีหลักการเลือกวงแหวนเหมือนกัน
ดังนั้นจึงพิจารณารูปที่ 3.5 ร่วมกัน โดยอธิบายการทำงานของผังงานอัลกอริทึมฮิวริสติกได้ดังนี้

- กรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

ขั้นที่ 1 หาปริมาณการค้นหาค่าที่เป็นไปได้ที่มีลักษณะเป็นวงแหวนโดยมีการใช้ข่ายเชื่อมโยงน้อยสุดที่เป็นไปได้และครอบคลุมทุกโนดสมาชิกและเส้นทางทำงานในสภาวะปกติของแต่ละมัลติคาสต์เซตชั้น เพื่อใช้สำหรับสุ่มหาคำตอบผลเฉลย

ขั้นที่ 2 กำหนดเส้นทางวงแหวนเริ่มต้นให้กับทุก ๆ ช่องสัญญาณให้เพียงพอที่แต่ละมัลติคาสต์เซสชันต้องการ และคำนวณหาจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงเริ่มต้นให้เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้สำหรับทดสอบจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงในรอบถัดไป

ขั้นที่ 3 กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นที่อัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละแบบต้องการและกำหนดรอบการวนซ้ำเริ่มต้นเท่ากับ 0

ขั้นที่ 4 ตรวจสอบว่าพบเงื่อนไขตามเกณฑ์การหยุดการทำงานหรือไม่ ถ้าใช่ ให้สิ้นสุดการทำงาน ถ้าไม่ใช่ให้ทำจุดต่อ A ซึ่งเป็นอินพุทให้กับขั้นที่ 5 ต่อไป

ขั้นที่ 5 ทำกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยฮิวริสติกแต่ละวิธี โดยจะให้เอาท์พุทไปที่จุดต่อ B หรือจุดต่อ C ถ้าเอาท์พุทปรากฏที่จุดต่อ B ให้ทำขั้นที่ 4 อีกครั้ง และถ้าเอาท์พุทปรากฏที่จุดต่อ C ให้ทำขั้นที่ 6 ต่อไป โดยจะอธิบายกระบวนการตัดสินใจนี้ในหัวข้อที่ 3.6

ขั้นที่ 6 ยอมรับผลเฉลยถัดไปแล้วรับค่าจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงที่เหมาะสมที่สุดชุดใหม่ และปรับรอบการทำงานขึ้นอีก 1 รอบ จากนั้นให้ทำขั้นที่ 4

- กรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

ขั้นที่ 1 หาปริมาณการค้นหาที่เป็นไปได้ที่มีลักษณะเป็นวงแหวนโดยมีการใช้ซ้ำเชื่อมโยงน้อยสุดที่เป็นไปได้และครอบคลุมทุกโหนดสมาชิกและเส้นทางทำงานในสภาวะปกติของแต่ละมัลติคาสต์เซสชัน เพื่อใช้สำหรับสุ่มหาคำตอบผลเฉลย

ขั้นที่ 2 กำหนดเส้นทางวงแหวนเริ่มต้นให้กับทุก ๆ ช่องสัญญาณให้เพียงพอที่แต่ละมัลติคาสต์เซสชันต้องการโดยคำนึงถึงความยาวคลื่นที่ถูกกำหนดในสภาวะการทำงานปกติด้วย และคำนวณหาจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงเริ่มต้นให้เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทดสอบจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงในรอบถัดไป

ขั้นที่ 3 กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นที่อัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละแบบต้องการและกำหนดรอบการวนซ้ำเริ่มต้นเท่ากับ 0

ขั้นที่ 4 ตรวจสอบว่าพบเงื่อนไขตามเกณฑ์การหยุดการทำงานหรือไม่ ถ้าใช่ ให้สิ้นสุดการทำงาน ถ้าไม่ใช่ให้ทำจุดต่อ A ซึ่งเป็นอินพุทให้กับขั้นที่ 5 ต่อไป

ขั้นที่ 5 ทำกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยฮิวริสติกแต่ละวิธี โดยจะให้เอาท์พุทไปที่จุดต่อ B หรือจุดต่อ C ถ้าเอาท์พุทปรากฏที่จุดต่อ B ให้ทำขั้นที่ 4 อีกครั้ง และถ้าเอาท์พุทปรากฏที่จุดต่อ C

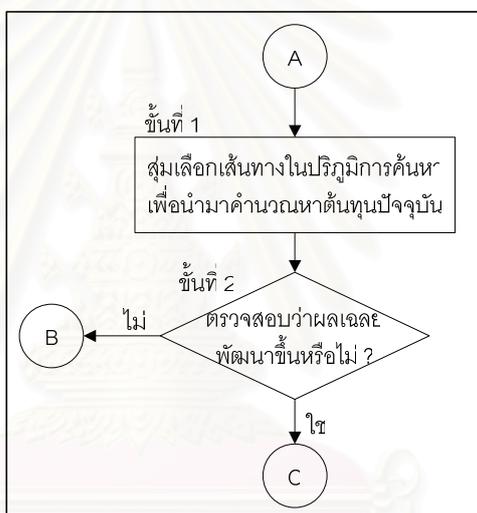
ให้ทำขั้นที่ 6 ต่อไป โดยจะอธิบายกระบวนการตัดสินใจนี้ในหัวข้อที่ 3.6

ขั้นที่ 6 ยอมรับผลเฉลยถัดไปแล้วปรับค่าจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงที่เหมาะสมที่สุดชุดใหม่ และปรับรอบการทำงานขึ้นอีก 1 รอบ จากนั้นให้ทำขั้นที่ 4

3.6 กระบวนการตัดสินใจยอมรับคำตอบผลเฉลยของอัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละวิธี

จากขั้นที่ 5 ของผังงานรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญสำหรับกระบวนการตรวจสอบผลเฉลยว่ามีการพัฒนาขึ้นกว่าเดิมหรือไม่ โดยจำแนกเป็นกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยสำหรับอัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละวิธีได้ดังนี้

3.6.1 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS



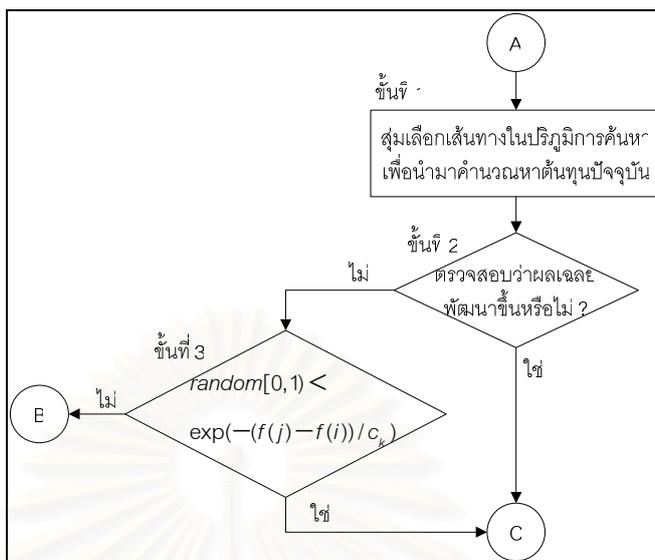
รูปที่ 3.6 ผังงานกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยโดยใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS

พิจารณารูปที่ 3.6 สามารถอธิบายผังงานกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยของอัลกอริทึม LS ได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 สุ่มเลือกเส้นทางในปริภูมิการค้นหาให้ครบตามปริมาณทราฟฟิกที่แต่ละมัลติคาสต์เซสชันต้องการของรอบการทำงานถัดไป จากนั้นนำมาคำนวณหาจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงของผลเฉลย S เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการยอมรับการตัดสินใจในขั้นที่ 2

ขั้นที่ 2 ตรวจสอบผลเฉลยจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงรอบถัดไปว่าดีกว่าผลเฉลยปัจจุบันหรือไม่ ถ้าใช่ให้ทำจุดต่อ C ถ้าไม่ใช่ ให้ทำจุดต่อ B โดยย้ายทราฟฟิกกลับมาเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดชุดเดิม และเพิ่มรอบการทำงานอีก 1 รอบ

3.6.2 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA



รูปที่ 3.7 ผังงานกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยโดยใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA

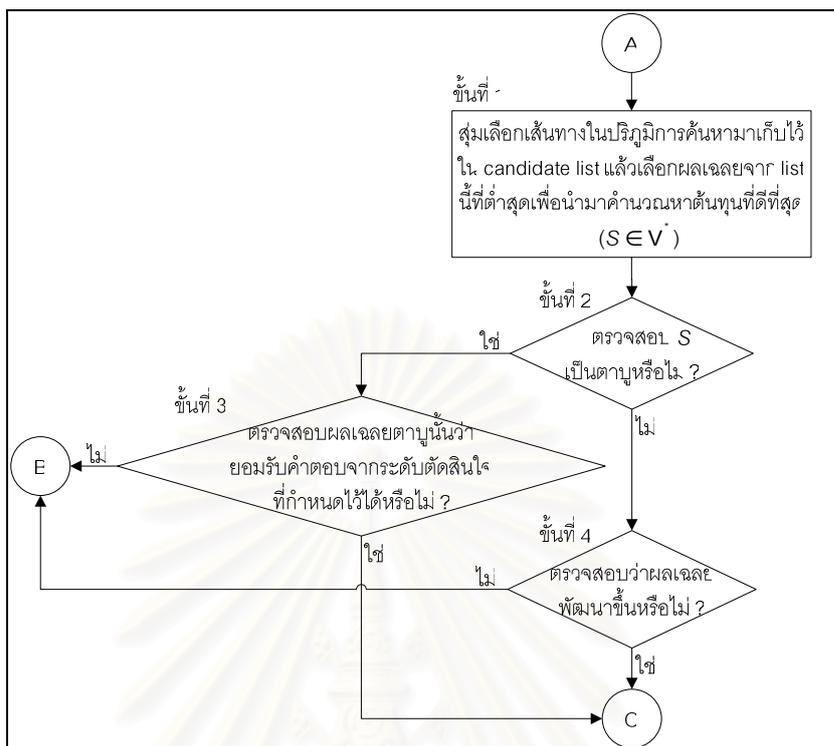
พิจารณารูปที่ 3.7 สามารถอธิบายผังงานกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยของอัลกอริทึม SA ได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 สุ่มเลือกเส้นทางในปริภูมิการค้นหาให้ครบตามปริมาณทราฟฟิกที่แต่ละมัดติคาสต์เซสชันต้องการของรอบการทำงานถัดไป จากนั้นนำมาคำนวณหาจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงของผลเฉลย S เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการยอมรับการตัดสินใจในขั้นที่ 2

ขั้นที่ 2 ตรวจสอบผลเฉลยจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงรอบถัดไปว่าดีกว่าผลเฉลยปัจจุบันหรือไม่ ถ้าใช่ให้ทำจุดต่อ C และปรับพารามิเตอร์ควบคุมอุณหภูมิเป็น $c_{k+1} = \alpha \cdot c_k$ เมื่อ k คือรอบการวนซ้ำในสภาวะปัจจุบัน (ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2) ถ้าไม่ใช่ ให้ทำขั้นที่ 3

ขั้นที่ 3 ตรวจสอบผลเฉลยเมื่อจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงรอบถัดไปมากกว่าจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงปัจจุบันโดยการสุ่มค่าแบบยูนิฟอร์ม $[0,1)$ แล้วเปรียบเทียบกับความน่าจะเป็นในการยอมรับค่า ถ้าเงื่อนไขเป็นจริงให้ทำจุดต่อ C หากเงื่อนไขเป็นเท็จให้ทำจุดต่อ B โดยย้ายทราฟฟิกกลับมาเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดชุดเดิม และเพิ่มรอบการทำงานอีก 1 รอบ

3.6.3 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS



รูปที่ 3.8 ผังงานกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยโดยใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS

พิจารณารูปที่ 3.8 สามารถอธิบายผังงานกระบวนการตัดสินใจยอมรับผลเฉลยของอัลกอริทึม TS ได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 สุ่มเลือกเส้นทางในปริภูมิการค้นหาให้ครบตามปริมาณทราฟฟิกที่แต่ละมัดติคาสต์เซสชันต้องการของรอบการทำงานถัดไปมาเก็บไว้ใน candidate list (V^*) เพื่อหาค่าที่ต่ำสุดใน list นี้ จากนั้นนำมาคำนวณหาจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงของผลเฉลย S เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการยอมรับการตัดสินใจในขั้นที่ 2

ขั้นที่ 2 ตรวจสอบ S ว่ามีการเลือกเส้นทางซ้ำซ้อนกับเส้นทางในอดีตหรือไม่ถ้าซ้ำจะมีสถานะเป็น tabu แล้วทำขั้นที่ 3 หากเส้นทางที่ตรวจสอบไม่ซ้ำซ้อนกับเส้นทางเดิมในอดีตจะอัปเดตเส้นทางเก็บไว้ใน tabu list เพื่อใช้ตรวจสอบสถานะ tabu ในรอบการทำงานถัดไป แล้วจึงทำขั้นที่ 4 ต่อไป

ขั้นที่ 3 ตรวจสอบผลเฉลยจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงที่มีสถานะ tabu ว่าสามารถยอมรับระดับการยอมรับ (aspiration level) ผลเฉลยที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้ายอมรับให้ทำจุดต่อ C หากไม่ยอมรับให้ทำจุดต่อ B โดยย้ายทราฟฟิกกลับมาเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดชุดเดิม และเพิ่มรอบการทำงานอีก 1 รอบ

ขั้นที่ 4 ตรวจสอบผลเฉลยจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงรอบถัดไปว่าดีกว่าผลเฉลยปัจจุบันหรือไม่ ถ้าใช่ให้ทำจุดต่อ C ถ้าไม่ใช่ให้ทำจุดต่อ B โดยย้ายทราฟฟิกกลับมาเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดชุดเดิม และเพิ่มรอบการทำงานอีก 1 รอบ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

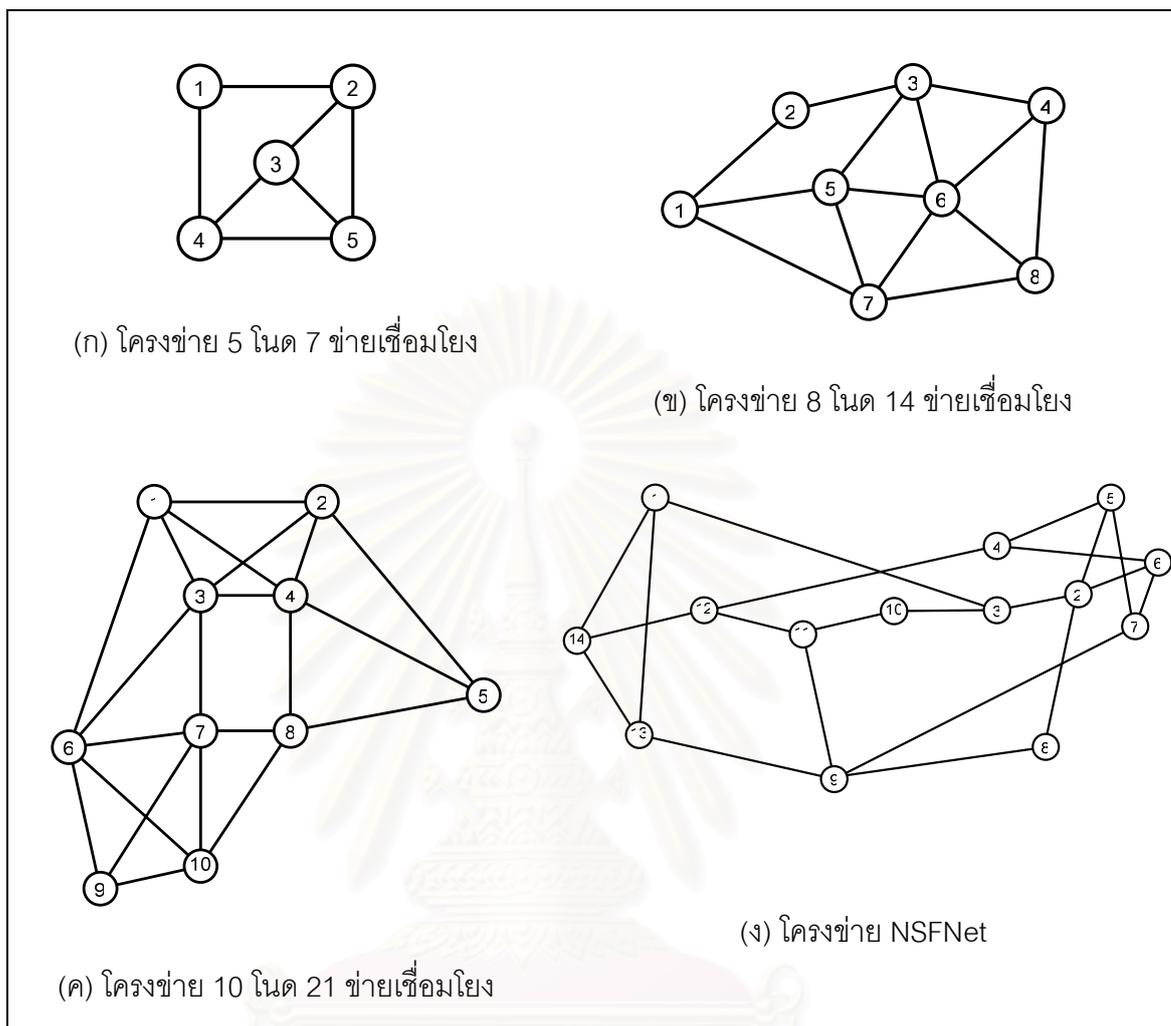
บทที่ 4

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในอัลกอริทึมฮิวริสติก

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในอัลกอริทึมฮิวริสติก โดยอัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละวิธีนั้นจะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อกระบวนการพัฒนาคำตอบของผลเฉลยดังที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะมุ่งเน้นวิเคราะห์พารามิเตอร์เฉพาะในอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA และ TS เท่านั้น ส่วนแบบ LS ไม่มีพารามิเตอร์ใด ๆ ที่มีผลต่อการพัฒนาคำตอบจึงไม่ขอกล่าวถึง

4.1 แบบจำลองโครงข่ายที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมฮิวริสติก

โครงข่ายที่ใช้ในการทดสอบอัลกอริทึมฮิวริสติกมีด้วยกัน 4 โครงข่ายโดยแบ่งเป็นประเภทโครงข่ายทดสอบ ได้แก่ โครงข่าย 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง (5N_7L) โครงข่าย 8 โหนด 14 ข่ายเชื่อมโยง (8N_14L) โครงข่าย 10 โหนด 21 ข่ายเชื่อมโยง (10N_21L) และโครงข่ายที่มีใช้งานจริง ได้แก่ โครงข่าย NSFNet (The National Science Foundation Network) ขนาด 14 โหนด 21 ข่ายเชื่อมโยง โครงข่ายทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.1 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 โทโพโลยีโครงข่ายที่ใช้ในการทดสอบ

4.2 แบบจำลองทราฟฟิกที่ใช้ทดสอบอัลกอริทึมฮีริสติก

ทราฟฟิกของโหนดสมาชิกในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันที่ใช้ทดสอบในวิทยานิพนธ์นี้ นิยามให้เป็นความต้องการใช้ช่องสัญญาณในการส่งข้อมูลจากโหนดหนึ่งไปยังโหนดปลายทางกลุ่มหนึ่ง และมีลักษณะคงตัวไม่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา (Static traffic) ลักษณะโครงข่าย WDM ที่ใช้หาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการถูกแทนด้วย กราฟที่ไม่มีทิศทาง (Undirected graph) โดยมีชุดทราฟฟิกที่ใช้ทดสอบสำหรับโทโพโลยีโครงข่ายแต่ละแบบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ทราฟฟิกที่ใช้ในการทดสอบ (ก) สำหรับโครงข่าย 5N_7L (ข) สำหรับโครงข่าย 8N_14L และ (ค) สำหรับโครงข่าย 10N_21L และ โครงข่าย NSFNet

session	demand	source	destination	session	demand	source	destination
1	1	5	2 3	1	3	1	4 5
2	2	5	1 3 2	2	2	1	2 3 7
3	3	5	4 2	3	3	1	4 6
4	1	5	4 2 1 3	4	4	1	4 5 7
5	3	5	1 3	5	2	1	5 6 7

(ก)

(ข)

session	demand	source	destination
1	2	4	3 5 8 9
2	2	4	1 6 10
3	3	4	7 3 2 9
4	3	4	10
5	2	4	9 7
6	1	4	2 5 6
7	2	4	1 8

(ค)

4.3 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA

ในอัลกอริทึมการปรับปรุงการออกแบบโดยใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA ตัวแปรที่สำคัญในการตัดสินใจเพื่อยอมรับคำตอบที่ดีกว่า ได้แก่ ค่าความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่ดีกว่า (P) ซึ่งจะถูกคำนวณในแต่ละรอบจากค่าคำตอบที่เปลี่ยนไปและค่าควบคุมอุณหภูมิ (c) ดังสมการที่ 4.2

$$P = \exp\left(-\frac{f(j) - f(i)}{c}\right) \quad (4.2)$$

เมื่อ $f(i)$ และ $f(j)$ คือ ต้นทุนในอดีตและต้นทุนปัจจุบัน ตามลำดับ

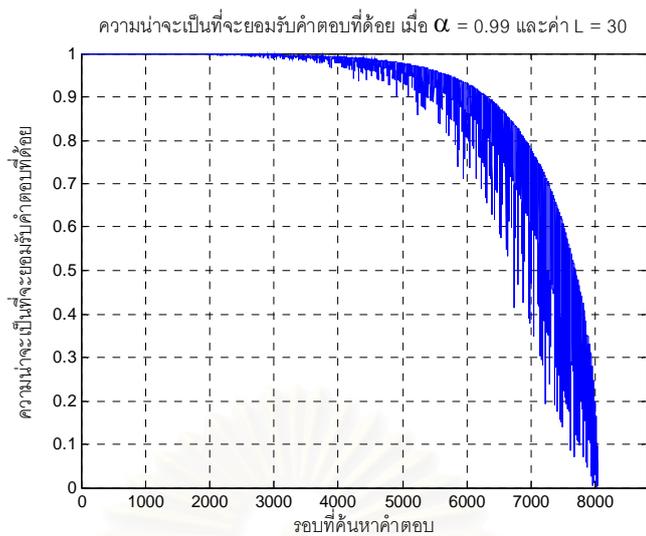
ค่าต้นทุนที่เปลี่ยนไปจะขึ้นอยู่กับกระบวนการค้นหาคำตอบ ส่วนค่าอุณหภูมิจะถูกลดค่าลงทุก ๆ L ครั้งที่มีการยอมรับคำตอบด้วยค่าคงที่สำหรับปรับลดอุณหภูมิ (α) ที่กล่าวไว้ในบทที่

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่ดียิ่งจะมี 3 ค่า ได้แก่ ค่าควบคุมคุณภาพเริ่มต้น (c_0) ค่า L และค่า α การกำหนดค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่านี้ จึงต้องให้อัลกอริทึมสามารถค้นพบคำตอบที่มีค่าที่ดีภายในเวลาที่เหมาะสม แต่เนื่องจากไม่มีทฤษฎีใด ๆ บ่งชี้ว่าควรใช้ค่าพารามิเตอร์อย่างไรจึงจะดีสำหรับโครงข่ายหนึ่ง ๆ ดังนั้นจึงต้องทดสอบโดยใช้ค่าพารามิเตอร์หลาย ๆ แบบ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับโครงข่ายหนึ่ง ๆ มากที่สุด

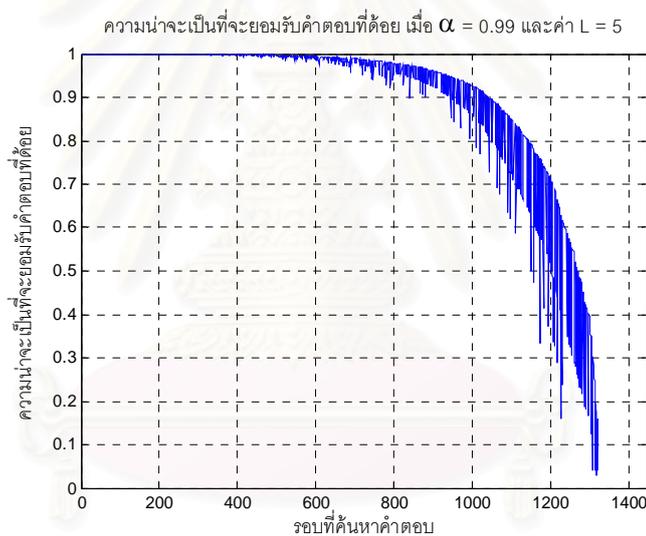
4.3.1 การวิเคราะห์ค่า α และค่า L

ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ค่า α และค่า L ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการลดลงของค่าคุณภาพโดยตรง จากสมการที่ 3.3 และ 3.4 ในบทที่ 3 จะเห็นว่าค่า α และค่า L ที่น้อยจะทำให้คุณภาพลดลงอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่ดียิ่งลดลงอย่างรวดเร็วกว่าค่า α และค่า L ที่มีค่ามาก รูปที่ 4.2 (ก) – (ง) แสดงให้เห็นลักษณะการลดลงของความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่ดียิ่งตามค่า L สำหรับการปรับปรุงการออกแบบ เมื่อใช้ค่า α และค่า L ในการลดคุณภาพต่าง ๆ กัน (ค่า α และค่า L) เท่ากับ (0.99,30), (0.99,5), (0.8,30) และ (0.8,5) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ การทดสอบทำบนโครงข่าย NSFNet ขนาด 14 โหนด 21 ข่ายเชื่อมโยง โดยใช้กราฟฟิคตามตารางที่ 4.1(ค) เมื่อ $M = 1$ และกำหนดให้ค่าควบคุมคุณภาพเริ่มต้น (c_0) เป็น 10000

รูปที่ 4.2 (ก) แสดงความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่ดียิ่ง เมื่อใช้ค่า α เท่ากับ 0.99 และค่า L เท่ากับ 30 จะเห็นได้ว่าในช่วง 3000 รอบแรกของการค้นหาคำตอบ ความน่าจะเป็นมีการลดลงไม่มากนักและมีค่าใกล้เคียง 1 เนื่องจากค่าควบคุมคุณภาพในรอบการทำงานนี้ยังมีค่าสูงอยู่ ในช่วงถัดมา คือ รอบที่ 3000 ถึงรอบที่ 8000 ของการค้นหาคำตอบ ค่าความน่าจะเป็นจะมีการแกว่งตัวมากและมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเข้าหาค่า 0 เนื่องจากค่าควบคุมคุณภาพในช่วงนี้มีค่าลดต่ำลงนั่นเอง ส่วนค่า L เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในส่วนของอัลกอริทึม Metropolis ซึ่งเป็นกระบวนการยอมรับคำตอบที่ดียิ่ง ส่งผลให้รอบการทำงานสำหรับการเปลี่ยนสถานะสำหรับทดสอบมีหลายค่า นั่นก็หมายความว่าในการสุ่มหาคำตอบนั้นยอมเพิ่มโอกาสในการค้นพบคำตอบที่ดีมีมากขึ้นด้วยเช่นกัน

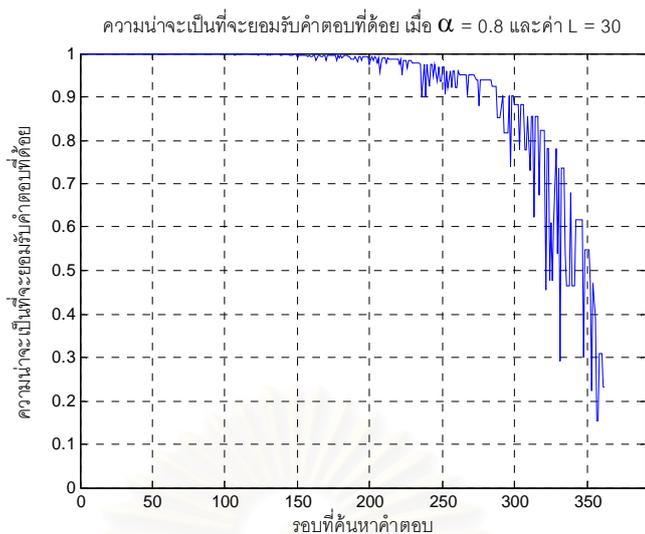


(ก) ความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่ดียิ่งเมื่อ $\alpha = 0.99$ และค่า $L = 30$

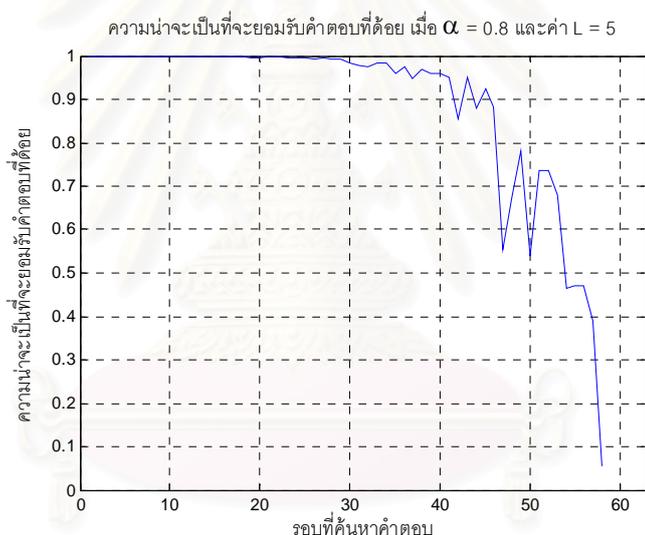


(ข) ความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่ดียิ่งเมื่อ $\alpha = 0.99$ และค่า $L = 5$

รูปที่ 4.2 ลักษณะการลดลงของความน่าจะเป็นที่ยอมรับคำตอบที่ดียิ่ง



(ค) ความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่ด้อยเมื่อ $\alpha = 0.8$ และค่า $L = 30$

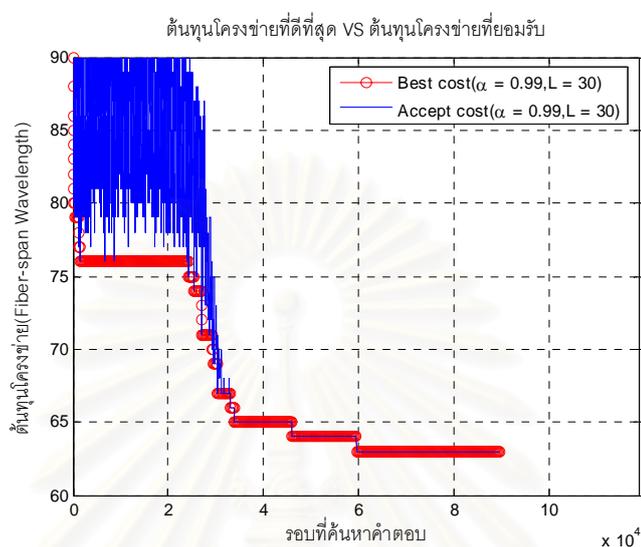


(ง) ความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่ด้อยเมื่อ $\alpha = 0.8$ และค่า $L = 5$

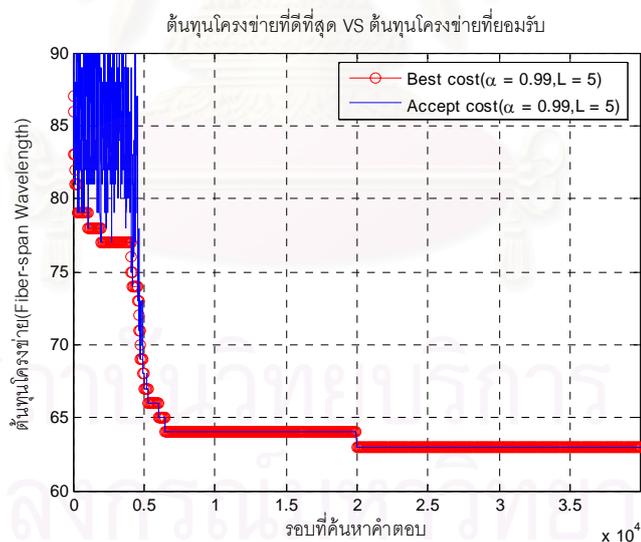
รูปที่ 4.2 (ต่อ) ลักษณะการลดลงของความน่าจะเป็นที่ยอมรับคำตอบที่ด้อย

รูปที่ 4.2 (ข) – (ง) แสดงลักษณะการลดลงของความน่าจะเป็นที่ยอมรับคำตอบที่ด้อย เมื่อใช้ค่า α และค่า L เป็น (0.99,5), (0.8,30) และ (0.8,5) ตามลำดับ จะพบว่าเมื่อความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่ด้อยลดลงลักษณะเดียวกับค่า α เท่ากับ 0.99 และค่า L เท่ากับ 30 คือ ในช่วงรอบแรก ๆ ของการค้นหาคำตอบ จะมีค่าใกล้เคียง 1 และจะลดลงอย่างช้ามาก จากนั้นจะลู่เข้าหา 0 อย่างรวดเร็วในช่วงถัดมา แต่จะแตกต่างจากรูปที่ 4.2 (ก) ตรงที่การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นรวดเร็วกว่า คือ ช่วงเวลาตั้งแต่ความน่าจะเป็นมีค่าเป็น 1 จนค่าลดลงเข้าใกล้ 0 จะสั้นกว่า

มาก โดยจะเกิดขึ้นภายในรอบที่ 1300, 370 และ 58 เมื่อใช้ค่า α และค่า L เป็น (0.99,5), (0.8,30) และ (0.8,5) ตามลำดับ ความแตกต่างของระยะเวลานี้จะส่งผลให้กระบวนการค้นหาคำตอบกินเวลาสั้นหรือยาวแตกต่างกันไป

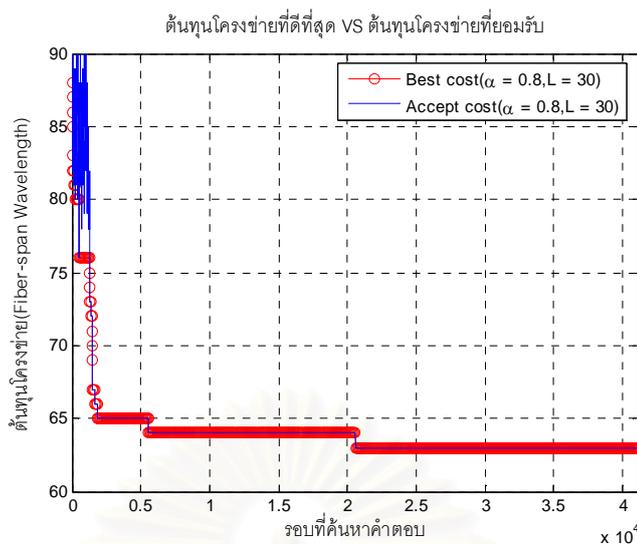
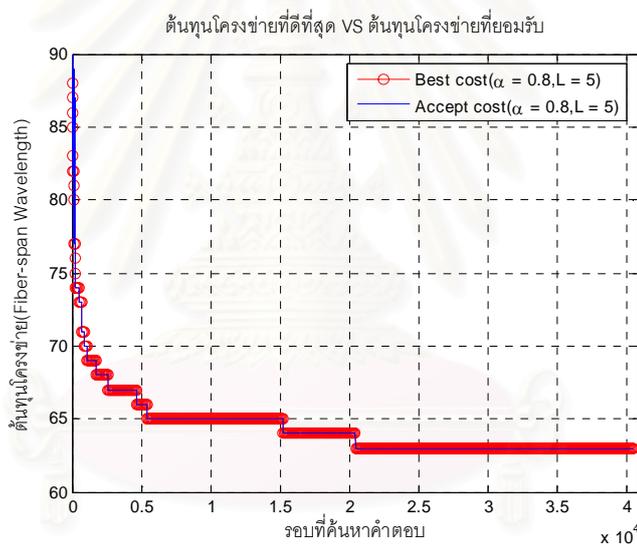


(ก) เมื่อ α เท่ากับ 0.99 และ L เท่ากับ 30



(ข) เมื่อ α เท่ากับ 0.99 และ L เท่ากับ 5

รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบระหว่างต้นทุนที่ดีที่สุดและต้นทุนการยอมรับคำตอบที่น้อย

(ค) เมื่อ α เท่ากับ 0.8 และ L เท่ากับ 30(ง) เมื่อ α เท่ากับ 0.8 และ L เท่ากับ 5

รูปที่ 4.3 (ต่อ) เปรียบเทียบระหว่างต้นทุนที่ดีที่สุดและต้นทุนการยอมรับคำตอบที่น้อย

ในการเปรียบเทียบผลกระทบของความเร็วในการลดลงของความน่าจะเป็นที่มีต่อกระบวนการค้นหาคำตอบ จะแสดงเป็นค่าต้นทุนที่ได้รับการยอมรับในแต่ละรอบและต้นทุนที่ดีที่สุดหรือเหมาะที่สุดที่ค้นพบ ดังรูปที่ 4.3 โดยพิจารณาในช่วง 60000 รอบแรกของการค้นหาคำตอบ ทดสอบโดยเปรียบเทียบค่า α เป็น 0.99 เท่ากันและ L เป็น 30 และ 5 ของรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ พบว่าในช่วงแรกของการทำงานค่าต้นทุนที่ยอมรับคำตอบที่น้อยมีการแกว่งตัวมาก แต่จะเริ่มแกว่งตัวน้อยลงจนถึงรอบที่ 35000 เมื่อ α เท่ากับ 0.99 และ L เท่ากับ 30 ได้

ต้นทุนเท่ากับ 65 Fiber-span Wavelength และรอบที่ 6000 เมื่อ α เท่ากับ 0.99 และ L เท่ากับ 5 ได้ต้นทุนเท่ากับ 64 Fiber-span Wavelength เนื่องจากความน่าจะเป็นในกระบวนการยอมรับคำตอบที่ด้อยเริ่มมีค่าลดลงนั่นเอง ดังนั้นเมื่อค่า L ต่างกัน นั่นก็หมายความว่ารอบการทำงานของกระบวนการในอัลกอริทึม Metropolis มีระยะเวลาในการค้นหาเพื่อยอมรับคำตอบที่ด้อยต่างกันด้วย หลังจากนั้นเมื่อรอบการทำงานสูงมากขึ้น ค่าต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดที่เริ่มค้นพบอยู่ในรอบที่ 60000 และ 20000 ของรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เท่ากับ 63 Fiber-span Wavelength

ในรูปที่ 4.3 (ค) และ (ง) เป็นการเปรียบเทียบค่า α เป็น 0.8 เท่ากันและ L เป็น 30 และ 5 ตามลำดับ พบว่าทั้งสองรูปดังกล่าวมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) คือช่วงแรกของการทำงานจะมีการแกว่งตัวมาก แต่จะเริ่มแกว่งตัวน้อยลงด้วยจำนวนรอบที่น้อยกว่าคือรอบที่ 2500 และ 5000 ได้ต้นทุนเท่ากับ 65 เท่ากัน หลังจากนั้นเมื่อรอบการทำงานสูงมากขึ้น ค่าต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดที่เริ่มค้นพบอยู่ในรอบที่ 21000 เท่ากับ 63 Fiber-span Wavelength ของรูปที่ 4.3 (ค) และ (ง)

พิจารณารูปที่ 4.3 (ก) และ (ค) เมื่อค่า α เป็น 0.99 และ 0.8 ตามลำดับ และค่า L เท่ากับ 30 เท่ากัน พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกับทวิเคราะห์ที่ผ่านมาคือช่วงรอบแรก ๆ ของการทำงานจะมีการแกว่งตัวค่อนข้างสูงแต่จะแกว่งตัวน้อยลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่า α มีค่าเท่ากับ 0.8 อันเนื่องมาจากค่าควบคุมอุณหภูมิมีการลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความน่าจะเป็นในการยอมรับคำตอบที่ด้อยมีค่าเข้าใกล้ 0 เร็วด้วย ทำให้มีการยอมรับคำตอบที่ด้อยไม่มากนัก ในขณะที่เมื่อ α เป็น 0.99 ค่าควบคุมอุณหภูมิมีการลดลงช้ากว่าทำให้การค้นหาคำตอบในช่วงรอบแรก ๆ ของการค้นหาได้คำตอบที่ดีที่สุดมีค่าคำตอบมากกว่า หรือค่าความน่าจะเป็นในการยอมรับคำตอบที่ด้อยมีการลดลงช้ากว่า ทำให้มีการยอมรับคำตอบที่ด้อยเป็นเวลานาน

รูปที่ 4.3 (ข) และ (ง) เมื่อค่า α เป็น 0.99 และ 0.8 ตามลำดับ และค่า L เท่ากับ 5 เท่ากันมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับที่กล่าวมาข้างต้น แต่จะยังมีการแกว่งตัวในช่วงแรกน้อยลงค่อนข้างจะรวดเร็วมากกว่า เนื่องจากค่า L มีค่าน้อยนั่นเอง

จึงสรุปได้ว่าที่ α ค่าเดียวกันแต่ค่า L ต่างกัน สามารถค้นหาค่าต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดได้รวดเร็วเมื่อค่า L มีค่าน้อย ๆ เนื่องจากกระบวนการยอมรับคำตอบที่ด้อยจะจบลงรวดเร็ว ส่งผลให้รอบการทำงานถัดไปมีโอกาสที่จะค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเกิดขึ้นรวดเร็วเช่นกัน แต่ในขณะที่ค่า L มีค่ามาก ๆ กระบวนการยอมรับคำตอบที่ด้อยจะจบลงอย่างช้า ๆ ทำให้มีการยอมรับต้นทุนที่ด้อยเป็นจำนวนมาก แต่เมื่อรอบการทำงานสูงมากขึ้น การค้นหาคำตอบจะมีการยอมรับคำตอบที่ด้อยลดลง คงเหลือแต่ค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่านั้น

4.3.2 ค่า α และค่า L ที่มีความเหมาะสมกับการออกแบบโครงข่ายแต่ละแบบ

ในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการใช้อัลกอริทึม SA เมื่อต้องการหยุดค้นหาคำตอบเมื่อไม่พบการพัฒนาของคำตอบภายใน 10000 รอบ ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำให้ต้นทุนมีค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยจะทดสอบกับค่า α ต่าง ๆ กัน โดยจะแปรค่าไปที่ละ 0.3 ตั้งแต่ 0.8 ถึง 0.99 ซึ่งเป็นค่าช่วงที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยสามารถให้คำตอบที่ดีได้ [13,14] โดยจะแปรค่า L ไปทีละ 5 รอบ ตั้งแต่ 5 รอบถึง 30 รอบ ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10000 ในทุก ๆ กรณี การทดสอบจะทำบนโครงข่าย 5N_7L โครงข่าย 8N_14L โครงข่าย 10N_21L และโครงข่าย NSFNet ผลที่ได้จะแสดงเป็นต้นทุนของโครงข่ายเมื่อใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA และใช้กราฟฟิกตามตารางที่ 4.1 (ก) - (ค) เมื่อ M มีค่าเป็น 1



ตารางที่ 4.2 ผลเฉลยต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้กราฟฟิกตามตารางที่ 4.1 (ก) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย 5N_7L (ต้นทุนที่ได้จาก LS = 27)

ต้นทุนที่เหมาะสมที่สุด								
L	Alpha							
	0.8	0.83	0.86	0.89	0.92	0.95	0.98	0.99
5	27	27	27	27	27	27	27	27
10	27	27	27	27	27	28	27	27
15	27	27	27	27	27	28	27	28
20	27	28	27	27	27	27	27	27
25	27	27	28	27	27	27	29	29
30	27	27	27	27	28	27	28	28

ตารางที่ 4.3 จำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้กราฟฟิกตามตารางที่ 4.1(ค) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย 5N_7L

จำนวนรอบที่ใช้ทั้งหมด								
L	Alpha							
	0.8	0.83	0.86	0.89	0.92	0.95	0.98	0.99
5	10419	12988	16029	10905	11034	11357	22459	18486
10	11070	14264	17495	17896	18953	12002	18664	19882
15	12071	18846	10971	15310	19952	13065	22106	13740
20	12262	11090	11299	11684	14936	15551	21333	26755
25	12155	16072	12236	14471	15892	14758	10085	17237
30	16067	18657	13350	16217	13688	15756	22444	17233

ตารางที่ 4.4 ผลเฉลยต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้กราฟฟิกตามตารางที่ 4.1 (ข) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย 8N_14L (ต้นทุนที่ได้จาก LS = 47)

ต้นทุนที่เหมาะสมที่สุด								
L	Alpha							
	0.8	0.83	0.86	0.89	0.92	0.95	0.98	0.99
5	48	48	48	50	49	48	48	46
10	47	48	48	47	48	48	49	49
15	49	50	47	47	49	47	48	59
20	47	49	49	47	49	49	49	48
25	48	49	47	48	48	49	48	56
30	48	47	47	46	50	48	48	57

ตารางที่ 4.5 จำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้กราฟฟิกตามตารางที่ 4.1(ค) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย 8N_14L

จำนวนรอบที่ใช้ทั้งหมด								
L	Alpha							
	0.8	0.83	0.86	0.89	0.92	0.95	0.98	0.99
5	19599	15446	15014	17489	21173	18086	24905	33704
10	25423	19214	25750	26443	15854	19404	25502	24553
15	13295	13600	28402	19185	19079	27858	29780	10801
20	25910	15421	16450	21357	16855	19364	24949	42708
25	18433	16352	26241	23812	17165	19605	24268	18456
30	23903	20347	28220	28358	16056	27648	33769	10489

ตารางที่ 4.6 ผลเฉลี่ยต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้กราฟฟิกตามตารางที่ 4.1 (ค) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย 10N_21L (ต้นทุนที่ได้จาก LS = 53)

ต้นทุนที่เหมาะสมที่สุด								
L	Alpha							
	0.8	0.83	0.86	0.89	0.92	0.95	0.98	0.99
5	54	56	56	55	54	54	56	54
10	56	56	53	53	53	59	57	55
15	57	55	54	55	57	57	56	57
20	53	56	55	56	56	56	54	70
25	57	58	54	57	56	54	70	70
30	58	56	56	55	56	56	68	70

ตารางที่ 4.7 จำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้กราฟฟิกตามตารางที่ 4.1(ค) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย 10N_21L

จำนวนรอบที่ใช้ทั้งหมด								
L	Alpha							
	0.8	0.83	0.86	0.89	0.92	0.95	0.98	0.99
5	22599	18106	14954	21445	22866	29768	20814	30466
10	23193	19954	30195	32576	30213	14741	20199	31653
15	12854	17189	37123	18454	15098	17134	25725	36261
20	31287	15282	17051	17612	22946	25831	32527	13174
25	12720	16576	38268	17086	23442	32271	10399	13410
30	19340	32665	20194	24245	29517	26586	11922	10579

ตารางที่ 4.8 ผลเฉลี่ยต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้ทราฟฟิกตามตารางที่ 4.1 (ค) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย NSFNet (ต้นทุนที่ได้จาก $LS = 63$)

ต้นทุนที่เหมาะสมที่สุด								
L	Alpha							
	0.8	0.83	0.86	0.89	0.92	0.95	0.98	0.99
5	64	65	64	65	63	64	65	63
10	65	64	65	64	65	64	65	65
15	64	65	64	64	63	65	64	64
20	64	63	64	64	65	64	63	76
25	64	63	64	63	64	64	64	76
30	64	64	66	63	65	64	64	75

ตารางที่ 4.9 จำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึม SA เมื่อใช้ทราฟฟิกตามตารางที่ 4.1(ค) ที่ $M = 1$ โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 10000 และจะหยุดการทำงานเมื่อไม่มีการพัฒนาค่าตอบภายใน 10000 รอบ สำหรับโครงข่าย NSFNet

จำนวนรอบที่ใช้ทั้งหมด								
L	Alpha							
	0.8	0.83	0.86	0.89	0.92	0.95	0.98	0.99
5	19182	15669	14715	18884	21741	17294	26616	31190
10	21473	19869	19706	27808	16251	13868	34693	22536
15	38184	31202	24023	26143	15914	16795	19927	30886
20	15217	21734	18035	28827	25319	22689	30630	10115
25	17492	20567	14724	15939	22736	21299	10186	17853
30	21359	19133	18793	24258	25206	20363	49663	11713

เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนที่ได้จากอัลกอริทึมแบบ SA กับต้นทุนที่ได้จากอัลกอริทึมแบบ LS จะเห็นว่าต้นทุนของอัลกอริทึมแบบ SA ในบางกรณีมีค่าต่ำกว่าต้นทุนของอัลกอริทึมแบบ LS แต่ในบางกรณีมีค่าสูงกว่าหรือเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมแบบ SA ไม่จำเป็นต้องให้ต้นทุนที่ดีกว่าอัลกอริทึมแบบ LS เสมอไปในทุกค่า α และค่า L ที่ใช้ในอัลกอริทึมแบบ SA เพียงแต่เพิ่มโอกาสในการค้นพบคำตอบที่ดีกว่าคำตอบที่พบใน LS เท่านั้น และหากต้องการหยุดค้นหาคำตอบเมื่อไม่

พบการพัฒนาคำตอบภายใน 10000 รอบ ไม่ควรเลือกใช้ค่า α และค่า L ที่สูงเกินไป พิจารณาได้จากตารางที่ 4.2, 4.4, 4.6 และ 4.8 จะเห็นว่าที่ค่า α เท่ากับ 0.99 และค่า L เท่ากับ 25 หรือ 30 ทุกโครงข่ายจะให้ค่าต้นทุนที่ยังไม่ถึงจุดที่จะลดลงสู่ค่าที่ต่ำ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ส่วนค่า α และค่า L ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละโครงข่ายให้ลองพิจารณารอบการทำงานที่ใช้ทดสอบประกอบการศึกษาตัดสินใจ ดังตารางที่ 4.3, 4.5, 4.7 และ 4.9

พิจารณาตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9 สำหรับโครงข่าย NSFNet เมื่อ α เท่ากับ 0.8, 0.83 และค่า L เท่ากับ 20, 25 พบว่าที่ α เท่ากับ 0.8 เท่ากันและค่า L เท่ากับ 20, 25 จะได้ต้นทุนเท่ากับ 64 Fiber-span Wavelength และใช้จำนวนรอบในการค้นหาทั้งหมดเท่ากับ 15217 และ 17492 ตามลำดับ ขณะที่เมื่อ α เท่ากับ 0.83 เท่ากันและค่า L เท่ากับ 20, 25 จะได้ต้นทุนเท่ากับ 63 Fiber-span Wavelength และใช้จำนวนรอบในการค้นหาทั้งหมดเท่ากับ 21734 และ 20567 ตามลำดับ จะเห็นว่าแม้ว่าคำตอบที่ได้ในกรณีหลังจะได้ต้นทุนที่ต่ำกว่าในกรณีแรกซึ่งถือว่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ต้องการระยะเวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งหากปัญหาที่พิจารณาต้องการระยะเวลาที่รวดเร็วในการแก้ปัญหาการเลือกใช้พารามิเตอร์ในกรณีแรกจะมีความเหมาะสมมากกว่าในกรณีหลัง ดังนั้นการพิจารณาเลือกพารามิเตอร์ดังกล่าวจึงต้องมีความเหมาะสมกันระหว่างต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดและเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของโครงข่ายแต่ละแบบ

4.3.3 การวิเคราะห์ค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้น

ค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งซึ่งมีผลต่อกระบวนการค้นหาคำตอบ ในหัวข้อนี้จะศึกษาการกำหนดค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นให้เหมาะสมกับปัญหาในอัลกอริทึมแบบ SA จะกำหนดให้ค่าควบคุมอุณหภูมิมีค่าสูงมากในรอบแรกของการทำงาน คือ $c_0 \gg f(j) - f(i)$ เพื่อให้ความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่ดีมีค่าสูงและใกล้ 1 มากที่สุด ในการทดสอบจะใช้โครงข่าย NSFNet ใช้กราฟฟิกตามตารางที่ 4.1 (ค) และ M มีค่าเป็น 1 โดยทดลองกับค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นต่าง ๆ กัน คือ 5000, 10000, 25000, 50000, 75000 และ 100000 โดยกำหนดค่า α เท่ากับ 0.99 และค่า L เป็น 30 และการลดลงของต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดที่ค้นพบในช่วง 120000 รอบของการค้นหาคำตอบ แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบระหว่างค่าต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดและระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ เมื่อค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าต่างกัน

ค่าควบคุม อุณหภูมิเริ่มต้น	ต้นทุนที่ เหมาะสมที่สุด	จำนวนรอบที่ใช้ใน การค้นหาคำตอบ	เวลาที่ใช้ในการ ค้นหาคำตอบ
5000	63	216684	27 นาที
10000	63	155655	16 นาที
25000	63	214721	34 นาที
50000	63	176894	20 นาที
75000	63	191780	27 นาที
100000	63	202517	31 นาที

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบการปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นที่แตกต่างกันสำหรับโครงข่าย NSFNet จะเห็นว่าค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นทุกค่าจะให้ค่าคำตอบของต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดเท่ากันคือ 63 แต่จะแตกต่างกันที่ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ พิจารณาสมการที่ 3.4 ในบทที่ 3 เมื่อค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าน้อย ๆ กระบวนการปรับลดอุณหภูมิจะกินระยะเวลาน้อย แต่เนื่องจากกระบวนการเป็นการสุ่มหาผลเฉลยจึงมีโอกาสที่จะพบคำตอบที่ดีได้มาก ดังนั้นเมื่อค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 5000 จึงใช้ระยะเวลานานถึง 216684 รอบ แต่เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมพบว่า ยิ่งค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น กระบวนการค้นหาคำตอบก็จะยิ่งใช้ระยะเวลานานเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากการปรับลดอุณหภูมิลงจะเป็นไปอย่างช้า ๆ ดังนั้นหากคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ จึงไม่ควรเลือกค่าควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นที่มีค่าสูง ๆ แต่ควรเลือกค่าที่สามารถให้ค่าต้นทุนที่ดีได้ภายในช่วงเวลาที่ต้องการ

4.4 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS

ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอัลกอริทึม คือ Tabu list ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งที่ห้ามให้กระบวนการค้นหาคำตอบเกิดความซ้ำซ้อนกับผลเฉลยที่เคยทำมาก่อนในอดีต โดยจะพิจารณาในแง่ประโยชน์ของ Tabu list ต่อต้นทุนของโครงข่าย และกำหนดให้ความยาว Tabu list ที่นำมาทดสอบเป็นแบบคงที่

ตารางที่ 4.11 ต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดที่ค้นพบของโครงข่าย 5N_7L และจำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ค้นพบคำตอบเมื่อใช้ความยาวของ Tabu list ต่าง ๆ กัน

ความยาว tabu list	5	6	7	8	9	10	11	12
ต้นทุน	27	27	27	27	27	27	27	27
จำนวนรอบที่ใช้	12562	10308	10525	10561	10472	10118	10021	12616

ตารางที่ 4.12 ต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดที่ค้นพบของโครงข่าย 8N_14L และจำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ค้นพบคำตอบเมื่อใช้ความยาวของ Tabu list ต่าง ๆ กัน

ความยาว tabu list	5	6	7	8	9	10	11	12
ต้นทุน	47	46	46	46	46	46	46	47
จำนวนรอบที่ใช้	15435	19499	12014	18683	15576	11872	22146	14402

ตารางที่ 4.13 ต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดที่ค้นพบของโครงข่าย 10N_21L และจำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ค้นพบคำตอบเมื่อใช้ความยาวของ Tabu list ต่าง ๆ กัน

ความยาว tabu list	5	6	7	8	9	10	11	12
ต้นทุน	53	52	53	53	51	53	53	53
จำนวนรอบที่ใช้	15787	15443	15758	13251	28980	14084	17743	11783

ตารางที่ 4.14 ต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดที่ค้นพบของโครงข่าย NSFNet และจำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ค้นพบคำตอบเมื่อใช้ความยาวของ Tabu list ต่าง ๆ กัน

ความยาว tabu list	5	6	7	8	9	10	11	12
ต้นทุน	63	64	64	64	63	63	63	63
จำนวนรอบที่ใช้	23557	11156	13536	11166	11028	11792	17043	16445

ตารางที่ 4.11 – 4.14 แสดงผลของความยาวของ tabu list ที่ความยาวต่างกัน (ช่วงความยาวระหว่าง 5 ถึง 12 ซึ่งเป็นช่วงที่ผลเฉลยมีความเหมาะสมมากในทางปฏิบัติ [13,15]) ต่อค่าต้นทุนของโครงข่ายและจำนวนรอบที่ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเมื่อทดสอบบนโครงข่าย 4 โครงข่าย ได้แก่ โครงข่าย 5N_7L โครงข่าย 8N_14L โครงข่าย 10N_21L และโครงข่าย NSFNet ใช้ทราฟฟิกตามตารางที่ 4.1 (ก) – (ค) เมื่อ M เป็น 1 และจะหยุดการค้นหาคำตอบเมื่อไม่มีการพัฒนาของคำตอบภายใน 10000 รอบ

จะเห็นว่าความยาว Tabu list มีผลต่อทั้งต้นทุนและจำนวนรอบทั้งหมดที่ใช้ค้นหาคำตอบต่างกันไปในแต่ละโครงข่าย โดยในแต่ละโครงข่าย ต้นทุนที่ต่ำที่สุดจากการทดสอบกำหนดขนาดของ Tabu list ให้มีความยาวต่าง ๆ กัน จะพบเมื่อใช้ความยาว Tabu list เท่ากับ 5,6,7,8,9,10,11 และ 12 สำหรับโครงข่าย 5N_7L ความยาวเท่ากับ 6,7,8,9,10 และ 11 สำหรับโครงข่าย 8N_14L ความยาวเท่ากับ 9 สำหรับโครงข่าย 10N_21L และความยาวเท่ากับ 5,9,10,11 และ 12 สำหรับโครงข่าย NSFNet ซึ่งไม่พบความสัมพันธ์ใด ๆ ระหว่างค่าต้นทุนของโครงข่ายกับความยาวของ Tabu list และค่าต้นทุนที่ค้นพบเมื่อกำหนดความยาว Tabu list ต่าง ๆ กันให้ค่าคำตอบที่ไม่แตกต่างกันมากด้วย ดังนั้นการกำหนดความยาว Tabu list ให้เหมาะสมสำหรับโครงข่ายแบบหนึ่ง ๆ จึงต้องอาศัยการทดสอบกับทุกกรณี

หลังจากทำการทดสอบปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึมฮิวริสติกสำหรับแต่ละโครงข่ายแล้ว จะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้นี้ ไปใช้ประกอบการประยุกต์ออกแบบการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นในสภาวะทำงานปกติและการป้องกันโครงข่ายในสภาวะเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย ซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป

บทที่ 5

ผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลเฉลยและการวิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละแบบ ทั้งในสภาวะที่โครงข่ายอยู่ในสภาวะทำงานปกติและสภาวะเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย โดยเปรียบเทียบจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสง ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ และสมรรถนะของการใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแต่ละวิธี ได้แก่ อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS, SA และ TS เพื่อพิจารณาหาอัลกอริทึมฮิวริสติกที่เหมาะสมกับการออกแบบโครงข่ายแบบหนึ่ง ๆ มากที่สุด

5.1 สมมุติฐานที่ใช้ในการทดลอง

สมมุติฐานที่ใช้ในการทดลองจะใช้โทโพโลยีโครงข่ายและทราฟฟิกชุดเดียวกับในบทที่ 4 คือ โครงข่ายที่ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติก 3 อัลกอริทึม ในการทดลองมี 4 โครงข่ายโดยแบ่งเป็นประเภทโครงข่ายทดสอบ ได้แก่ โครงข่าย 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง (5N_7L) โครงข่าย 8 โหนด 14 ข่ายเชื่อมโยง (8N_14L) โครงข่าย 10 โหนด 21 ข่ายเชื่อมโยง (10N_21L) และโครงข่ายที่มีใช้งานจริง ได้แก่ โครงข่าย NSFNet ขนาด 14 โหนด 21 ข่ายเชื่อมโยง แสดงดังรูปที่ 4.1 (ก) - (ง) ตามลำดับ

ทราฟฟิกของโหนดสมาชิกในแต่ละมัลติคาสต์เซสชันที่ใช้ทดสอบ นิยามให้เป็นความต้องการช่องสัญญาณเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลจากโหนดหนึ่งไปยังโหนดปลายทางกลุ่มหนึ่ง และมีลักษณะคงตัวไม่แปรเปลี่ยนไปตามเวลา ลักษณะโครงข่าย WDM ที่ใช้หาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการถูกแทนด้วย กราฟที่ไม่มีทิศทาง โดยมีชุดทราฟฟิกที่ใช้ทดสอบสำหรับโทโพโลยีโครงข่ายแต่ละแบบดังตารางที่ 4.1 และมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ต้องการค้นหาผลเฉลยที่มีการใช้เส้นใยนำแสงน้อยที่สุดสำหรับการออกแบบในแต่ละโครงข่าย

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้อาศัยเทคนิควิธีการวางแผนเส้นใยนำแสงทั้งหมดแบบ Optimized Spare Capacity Assignment สำหรับการป้องกันโครงข่าย จึงมีความจำเป็นต้องมีการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นในสภาวะทำงานปกติเป็นอันดับแรกโดยอาศัยโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ แล้วจึงออกแบบการป้องกันโครงข่ายในสภาวะหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย (กลยุทธ์การป้องกันแบบ PBF และ OMP) โดยการนำเส้นทางและความยาว

คลื่นของวิธีทำงาน รวมทั้งความจุทำงานในสภาวะปกติมาพิจารณาพร้อมกับความจุสำรองที่ได้ ออกแบบจากอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบต่าง ๆ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

หนึ่งวิทยานิพนธ์นี้ใช้คอมพิวเตอร์ Pentium 4 ความเร็ว 2.8 กิกะเฮิร์ตซ์ และมีหน่วยความจำเท่ากับ 512 เมกะไบต์ ในการประมวลผล

5.2 ผลเฉลยของการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นในสภาวะทำงานปกติ

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลเฉลยของการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นในสภาวะทำงานปกติ โดยทำการทดสอบ 5 การทดลอง และจะแปรค่าจำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสงหรือ M จำนวน 8 ค่า ได้แก่ 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 และ 128 แล้วนำมาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละอัลกอริทึมฮิวริสติก และเปรียบเทียบความต้องการใช้จำนวนเส้นใยทำงานกับผลเฉลยทางคณิตศาสตร์หรือวิธี ILP โดยจะแยกพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น และ กรณีไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น แสดงดังตารางที่ 5.1 – 5.8

ตารางที่ 5.1 (ก) และ (ข) แสดงผลเฉลยของจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำหรับโครงข่าย 5N_7L ในสภาวะการทำงานปกติเมื่อระบบมีการติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นตามลำดับ โดยจะเปรียบเทียบจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงระหว่างผลเฉลยของอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS, SA และ TS กับผลเฉลยทางคณิตศาสตร์หรือ ILP จะเห็นว่าผลเฉลยอัลกอริทึมฮิวริสติกทั้ง 3 แบบจะให้ค่าคำตอบมากกว่าหรือเท่ากับผลเฉลยของวิธี ILP ทุก ๆ ค่า M เมื่อพิจารณาที่ค่า M มีค่าน้อย ๆ คือ M เป็น 1 และ 2 ของกรณี VLT ผลเฉลยที่ได้จะใช้จำนวนเส้นใยนำแสงเท่ากันทั้งผลเฉลยของอัลกอริทึมฮิวริสติกทั้ง 3 แบบและผลเฉลย ILP แต่เมื่อค่า M สูงขึ้นคือ 4, 8 และ 16 จะเห็นว่าผลเฉลยของอัลกอริทึมฮิวริสติกจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับผลเฉลย ILP โดยอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS จะให้ผลเฉลยเท่ากับผลเฉลย ILP ที่ค่า M เป็น 4 และ 16 คือ 7 และ 4 เส้น ตามลำดับ ขณะที่ผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA และ TS ให้ผลเฉลยมากกว่าวิธี ILP คิดเป็น 15% และ 25% ตามลำดับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกระบวนการของอัลกอริทึมฮิวริสติกจะอาศัยการสุ่มหาผลเฉลย ซึ่งค่าคำตอบย่อมมีโอกาสค้นพบผลเฉลยที่เท่ากับผลเฉลย ILP หรือไม่พบก็เป็นได้ จึงให้ค่าคำตอบออกมาใกล้เคียงคำตอบที่เหมาะสมที่สุด และเมื่อพิจารณาที่ M เป็น 32, 64 และ 128 ผลเฉลยที่ได้จากอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS จะให้ค่าคำตอบเท่ากับ ILP ที่ค่า M เป็น 64 และ 128 ใช้เส้นใยนำแสงเท่ากับ 4 เส้น แต่อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS และ SA จะให้ผลเฉลยที่มากกว่าวิธี ILP หรือคิดเป็น 25%

เมื่อพิจารณาผลของค่า M ของตารางที่ 5.1 (ก) และ (ข) เมื่อค่า M มีค่าน้อย ๆ คือ 1, 2, และ 4 จะพบว่าความต้องการใช้เส้นใยนำแสงจะมีจำนวนลดลงเป็นเท่าตัว เนื่องจากเมื่อค่า M มีค่าสูงขึ้น ย่อมมีช่องสัญญาณให้ใช้งานเพิ่มมากขึ้นด้วยจึงสามารถลดจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงลงได้ แต่เมื่อค่า M เป็น 8 จะพบว่าจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงเริ่มลดลงจากเดิมเพียงเล็กน้อย และจะเริ่มคงตัวเมื่อ $M \geq 16$

พิจารณากรณีที่ไม่มีกรติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นหรือ LT ของตารางที่ 5.1 (ข) จะเห็นว่า ทุก ๆ ค่า M จะให้ผลเฉลี่ยที่เท่ากับกับกรณี VLT แต่จะใช้เส้นใยนำแสงมากกว่าที่ M เป็น 4 โดยใช้เส้นใยนำแสงจำนวน 8 เส้น จึงอาจกล่าวได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นสามารถลดจำนวนเส้นใยนำแสงลงได้เพียงบางค่าของ M เท่านั้น

เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบในตารางที่ 5.2 (ก) และ (ข) พบว่าเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมฮิวริสติกทั้ง 3 แบบ จะใช้เวลามากกว่าเมื่อเทียบกับวิธี ILP สำหรับกรณี VLT จะอยู่ในช่วงระหว่าง 6 – 42 วินาที แต่วิธี ILP จะใช้เวลาไม่เกิน 0.03 วินาที แม้ว่าค่า M จะมีค่าต่างกัน ก็ไม่ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการค้นหามากนัก เนื่องจากความซับซ้อนในการคำนวณไม่สูงมาก [11] แต่ในกรณี LT ความซับซ้อนในการคำนวณของวิธี ILP จะขึ้นอยู่กับค่า M จึงส่งผลให้เมื่อค่า M มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ก็ยิ่งกินเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบนานเช่นกัน ดังตารางที่ 5.2 (ข) ที่ M เป็น 1, 2, 4, 8, 16 และ 32 อัลกอริทึมฮิวริสติกจะใช้เวลาในการค้นหาระหว่าง 11 – 101 วินาที ซึ่งนานกว่าวิธี ILP ที่ใช้เวลาไม่เกิน 29 วินาที แต่เมื่อค่า M เป็น 64 และ 128 อัลกอริทึมฮิวริสติกจะใช้น้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดคือช่วง 22 – 151 วินาที แต่วิธี ILP ใช้นานถึง 532.5 วินาทีหรือประมาณ 8 นาที และ 2904.67 วินาที หรือ ประมาณ 49 นาที ตามลำดับ เนื่องจากการกำหนดความยาวคลื่นในวิธีนี้ต้องทำการกำหนดค่าความยาวคลื่นเป็นค่าเดียวกันตลอดทั้งเส้นทางนั่นเอง แต่เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบระหว่างอัลกอริทึมฮิวริสติกทั้ง 3 แบบ พบว่าอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS จะใช้เวลาโดยเฉลี่ยน้อยที่สุดในขณะที่รองลงมาได้แก่อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA และแบบ TS จะใช้เวลาในการค้นหามากที่สุด เนื่องจากอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS เป็นการสุ่มคำตอบแล้วนำมาพิจารณาว่ายอมรับคำตอบได้หรือไม่เท่านั้น ซึ่งไม่มีความซับซ้อนมากนัก ในขณะที่อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA มีความซับซ้อนมากกว่าในส่วนของการตัดสินใจยอมรับคำตอบที่ด้อยดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 จึงส่งผลให้ใช้เวลาในการค้นหามากขึ้นและอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS ใช้นานที่สุดเนื่องจากกระบวนการตัดสินใจยอมรับคำตอบมีการเข้าถึงหน่วยความจำใน Tabu list เพื่อไม่ให้เกิดการสุ่มหาคำตอบมีการเลือกผลเฉลยลักษณะซ้ำซ้อนในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จึงมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบเป็นอย่างมาก

และเนื่องจากทำการทดลอง 5 ครั้งในแต่ละโครงข่าย การคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะสามารถช่วยวัดสมรรถนะของการใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกทั้ง 3 แบบ ได้อีกวิธีหนึ่ง ซึ่งค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานนี้เป็นตัวชี้ให้เห็นถึงค่าคำตอบที่ได้จากทุก ๆ การทดลองว่ามีการแกว่งตัวของคำตอบ ต่างกันมากน้อยเพียงใด โดยพบว่าในกรณี VLT อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS จะมีค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานอยู่ในช่วง $0 - 0.447$ ซึ่งมีช่วงน้อยกว่าอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA และ TS มีค่า เบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง $0 - 0.548$ และกรณี LT อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS และ TS มีค่า เบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง $0 - 0.548$ และอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน อยู่ในช่วง $0 - 0.837$

ตารางที่ 5.3 – 5.8 แสดงผลเฉลยของจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงและเวลาที่ใช้ ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย 8N_14L, 10N_21L และ NSFNet ในสภาวะการทำงานปกติ เมื่อระบบมีการติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น พบว่าเมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ ขึ้นสามารถกล่าวโดยสรุปเป็นภาพรวมในแต่ละส่วนได้ว่าการค้นหาคำตอบโดยอัลกอริทึมฮิวริสติก เริ่มมีความแตกต่างในส่วนของการใช้เส้นใยนำแสงจากวิธี ILP มากขึ้นสำหรับทุก ๆ ค่า M แต่ก็มีบางโครงข่ายเช่นกันที่ให้คำตอบเท่ากันหรือใกล้เคียงกับวิธี ILP ในบางค่า M เท่านั้น และเมื่อลองพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมฮิวริสติกทั้ง 3 แบบ พบว่าคำตอบที่ ให้ค่าความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสามารถเรียงลำดับจากน้อยไปมากได้ดังนี้ คือ $TS \leq SA \leq LS$ ทั้งกรณีที่มีและไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นทุก ๆ โครงข่าย เนื่องจาก อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS มีโอกาสพบค่าที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ (Local optimum) มากกว่าแบบ SA และ TS นั่นเอง แต่เมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบพบว่าสามารถเรียงลำดับจาก น้อยไปมากได้ดังนี้ คือ $LS \leq SA \leq TS$ สำหรับกรณี VLT แต่กรณี LT จะใช้เวลาเป็น $SA \leq LS \leq TS$ จึงอาจกล่าวได้ว่าเมื่อปัญหาที่มีความซับซ้อนไม่มากนักการใช้อัลกอริทึมฮิวริสติก แบบ LS จะมีความรวดเร็วในการค้นหาคำตอบมากที่สุด แต่เมื่อปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความ ซับซ้อนมากขึ้นการใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA จะมีความรวดเร็วในการค้นหาคำตอบมากที่สุด และเมื่อนำมาเทียบกับวิธี ILP จะเห็นได้ว่าในบางโครงข่าย เช่น ตารางที่ 5.5 (ข) โครงข่าย 10N_21L กรณี LT ที่ M เป็น 128 ไม่สามารถหาคำตอบได้เลย และยังพบอีกว่าเวลาที่ใช้ในการ ค้นหาคำตอบของวิธี ILP จะใช้เวลาค่อนข้างเร็วในการค้นหาคำตอบสำหรับกรณี VLT แต่จะใช้ เวลานานมากสำหรับกรณี LT ทุก ๆ โครงข่าย ที่ M มีค่าสูง ๆ เช่น ตารางที่ 5.8 (ข) สำหรับ โครงข่าย NSFNet เมื่อ M มีค่าเป็น 128 จะใช้เวลาค้นหาคำตอบนานถึง 91418.3 วินาทีหรือ ประมาณ 26 ชั่วโมง ซึ่งมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับตารางที่ 5.2 (ก) และ (ข) ดังที่ได้อธิบาย มาแล้วข้างต้น และส่วนสุดท้ายที่จะวิเคราะห์คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าเมื่อโครงข่ายมีขนาด ใหญ่ขึ้น ทำให้ปริมาณการค้นหาคำตอบมีจำนวนมากเช่นกัน ดังนั้นจากที่อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS

มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด ก็จะกลายเป็นมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุดเนื่องจากกระบวนการตัดสินใจยอมรับคำตอบไม่ซับซ้อนมากนัก คำตอบจึงค่อนข้างกว้าง ในขณะที่อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA และ TS มีกระบวนการตัดสินใจยอมรับคำตอบที่ซับซ้อนมากกว่า ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจึงมีค่าน้อยกว่า ซึ่งสามารถสรุปเป็นภาพรวมได้โดยเรียงลำดับจากน้อยไปหามากดังนี้ $TS \leq SA \leq LS$ สังเกตได้ชัดจากตารางที่ 5.7 (ก) และ (ข)

ตารางที่ 5.1 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำหรับโครงข่าย 5N_7L ในสภาวะการทำงานปกติ (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

จำนวนเส้นใยนำแสง (VLT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	27	27	27	27
2	14	14	14	14
4	7	8	8	7
8	5	5	5	5
16	4	5	5	4
32	5	5	5	4
64	5	5	4	4
128	5	5	4	4
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0-0.447	0-0.548	0-0.548	-

(ก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวนเส้นใยนำแสง (LT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	27	27	27	27
2	14	14	14	14
4	8	8	8	8
8	6	6	5	5
16	4	5	4	4
32	5	5	4	4
64	5	4	5	4
128	4	5	4	4
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0-0.548	0-0.837	0-0.548	-

(ข)

ตารางที่ 5.2 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย 5N_7L ในสภาวะการทำงานปกติ (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, VLT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	9	9	26	0.03
2	6	15	24	0.02
4	12	9	26	0.02
8	8	13	30	0.02
16	15	11	25	0.02
32	8	12	25	0.02
64	7	13	30	0.02
128	10	11	42	0.02

(ก)

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, LT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	16	14	71	0.03
2	11	16	76	0.03
4	12	15	100	0.3
8	20	13	97	0.69
16	27	16	77	9.61
32	22	17	101	29
64	22	33	103	532.5
128	59	20	151	2904.67

(ข)

ตารางที่ 5.3 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำหรับโครงข่าย 8N_14L ในสภาวะการทำงานปกติ (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

จำนวนเส้นใยนำแสง (VLT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	47	47	46	46
2	25	24	25	23
4	14	15	15	13
8	9	9	9	7
16	8	9	8	6
32	9	9	9	6
64	9	8	8	6
128	9	9	8	6
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.528-1.924	0-1.517	0-0.894	-

(ก)

จำนวนเส้นใยนำแสง (LT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	47	46	46	46
2	28	26	26	23
4	17	18	17	13
8	13	11	11	8
16	9	9	8	6
32	9	9	8	6
64	9	9	8	6
128	8	9	7	6
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.447- 1.483	0.447- 1.483	0.447- 0.894	-

(ข)

ตารางที่ 5.4 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย 8N_14L ในสภาวะการทำงานปกติ (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, VLT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	13	49	75	0.02
2	17	24	51	0
4	25	24	32	0.05
8	19	14	37	0.05
16	16	21	59	0.06
32	17	27	44	0.11
64	10	23	65	0.13
128	18	24	57	0.13

(ก)

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, LT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	38	72	107	0.06
2	33	61	159	0.06
4	33	20	112	3.03
8	15	31	135	13.78
16	23	36	192	240.45
32	22	23	145	8977.95
64	40	26	268	2102.67
128	39	34	252	26390.39

(ข)

ตารางที่ 5.5 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำหรับโครงข่าย 10N_21L ในสภาวะการทำงานปกติ (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

จำนวนเส้นใยนำแสง (VLT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	55	54	52	51
2	32	32	30	27
4	20	18	18	15
8	14	13	13	10
16	11	12	11	9
32	12	12	11	9
64	13	13	11	9
128	13	11	11	9
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.447-	0.447-	0.447-	-
	0.894	1.304	1.304	

(ก)

จำนวนเส้นใยนำแสง (LT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	54	53	52	51
2	32	34	31	27
4	21	23	22	15
8	16	16	14	10
16	12	12	11	9
32	12	13	12	10
64	13	13	11	11
128	12	13	12	หาค่าไม่ได้
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.447- 0.894	0.447- 1.304	0.447- 1.304	-

(ข)

ตารางที่ 5.6 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย 10N_21L ในสภาวะการทำงานปกติ (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, VLT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	13	24	102	0.06
2	15	35	45	0.36
4	8	29	50	0.5
8	9	30	35	3.39
16	15	28	29	9.53
32	13	22	36	18.28
64	9	25	36	25.84
128	12	28	32	30.45

(ก)

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, LT)				
M	LS	SA	TS	ILP
1	32	36	275	0.23
2	54	52	141	5.14
4	43	46	95	175.36
8	41	28	304	7009.17
16	33	24	218	13857
32	31	23	190	5023.59
64	37	29	175	21555.44
128	53	34	250	หาค่าไม่ได้

(ข)

ตารางที่ 5.7 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำหรับโครงข่าย NSFNet ในสภาวะการทำงานปกติ (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

จำนวนเส้นใยนำแสง (VLT)				
M	LS	SA	TS	ILP
1	63	63	63	63
2	35	33	34	33
4	21	19	19	18
8	13	14	12	11
16	11	11	10	9
32	11	10	11	9
64	11	11	11	9
128	11	10	10	9
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0-1.141	0.447- 1.517	0-0.894	-

(ก)

จำนวนเส้นใยนำแสง (LT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	64	64	63	63
2	36	36	34	33
4	21	23	22	19
8	14	14	13	11
16	11	11	11	9
32	11	11	11	9
64	11	11	10	9
128	11	11	11	9
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0-2.074	0.447- 1.14	0-1.871	-

(ข)

ตารางที่ 5.8 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย NSFNet ในสภาวะการทำงานปกติ (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, VLT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	9	24	52	0.09
2	8	22	35	0.05
4	15	17	35	0.03
8	11	13	56	0.09
16	7	14	42	0.06
32	8	27	52	0.13
64	8	13	49	0.16
128	9	39	37	0.11

(ก)

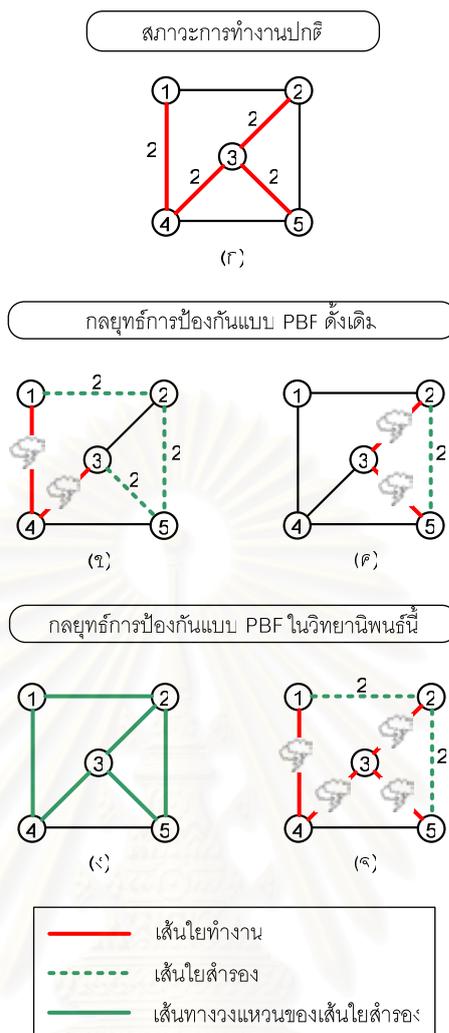
เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, LT)				
<i>M</i>	LS	SA	TS	ILP
1	38	16	91	0.06
2	42	25	139	0.11
4	29	24	106	7.05
8	19	23	123	17.18
16	22	20	125	468.19
32	22	21	141	41415.78
64	35	31	173	166216.4
128	44	34	261	91418.28

(ข)

5.3 ผลเฉลยของการป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย

หลังจากที่ได้ผลเฉลยของการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นเมื่อโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติในหัวข้อที่ผ่านมา ผลเฉลยดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการออกแบบร่วมกับกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF และ OMP โดยจะนำผลเฉลยที่ได้จากวิธี ILP เป็นผลเฉลยตั้งต้นสำหรับกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายทั้ง 2 แบบ ทั้งกรณี VLT และ LT เนื่องจากการค้นหาคำตอบด้วยวิธี ILP ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดนั่นเอง

ในวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยพื้นฐานกลยุทธ์การป้องกันแบบ PBF และ OMP [11] ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบสำหรับอัลกอริทึมฮิวริสติกจึงขออธิบายวิธีการที่ใช้ในการเลือกโครงสร้างวงแหวนที่นำมาครอบคลุมทุกโหนดสมาชิกและข่ายเชื่อมโยงในสภาวะทำงาน ซึ่งแตกต่างจาก [11] ที่อาศัยการค้นหาวงแหวนที่ครอบคลุมทีละหนึ่งข่ายเชื่อมโยงที่ได้รับความเสียหายเท่านั้น และกำหนดจำนวนโครงสร้างวงแหวนที่ประกอบร่วมกันมีจำนวนไม่เกิน 2 วงแหวน เพื่อกำเนิตปริภูมิการค้นหาผลเฉลยสำหรับกลยุทธ์การป้องกันทั้ง 2 กลยุทธ์ โดยแสดงตัวอย่างการหาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ

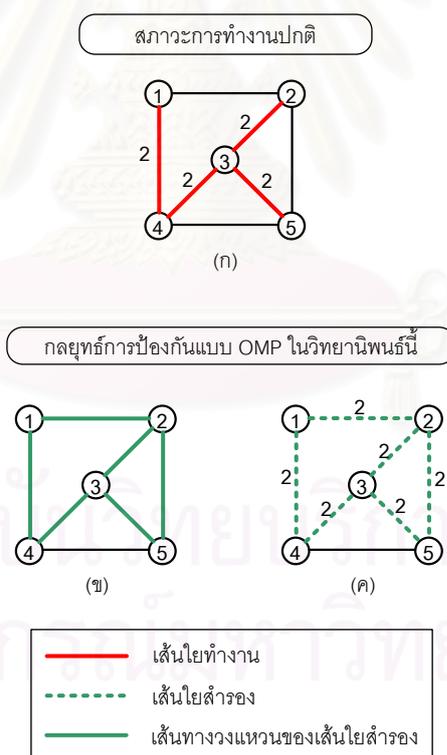


รูปที่ 5.1 วิธีหาเส้นใยนำแสงสำรองของกลยุทธ์การป้องกันแบบ PBF เดิมและที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการหาเส้นใยนำแสงสำรองของกลยุทธ์การป้องกันแบบ PBF เดิมและที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ โดยการหาโครงสร้างวงแหวนที่เป็นไปได้ที่ครอบคลุมขั้วเชื่อมโยงของเส้นใยทำงานและโหนดสมาชิกของแต่ละมัลติคาสต์เซชัน รูปที่ 5.1 (ก) แสดงวิถีทำงานในสภาวะการทำงานปกติที่มีเส้นใยทำงาน 1-4, 4-3, 3-2 และ 3-5 ที่รองรับปริมาณทราฟฟิกขนาดเท่ากับ 2 จะเห็นว่าแต่ละขั้วเชื่อมโยงใช้เส้นใยนำแสงจำนวนเท่ากับ 2 ในสภาวะการเกิดความเสียหายที่ขั้วเชื่อมโยง การหาเส้นใยสำรองของกลยุทธ์การป้องกันแบบ PBF แบบเดิม จะมีการหาเส้นทางสำรองในลักษณะวงแหวน 2 วง ได้แก่ วงแหวน 1-2-5-3-4-1 และ 2-5-3-2 ดังรูปที่ 5.1 (ข) และ (ค) ตามลำดับ วิธีนี้จะทำการหาวงแหวนของเส้นใยสำรองเพื่อรองรับเส้นใยทำงานที่ละขั้วเชื่อมโยงแสดงดังรูปที่ 5.1 (ข) จะเห็นว่ามีการใช้เส้นใยสำรองที่ขั้วเชื่อมโยง 1-2, 2-5 และ 5-3 จำนวนเท่ากับ 6 เพื่อรองรับขั้วเชื่อมโยงของเส้นใยทำงาน 1-4 หรือ 4-3 เมื่อเกิดความเสียหาย รูปที่ 5.1 (ค) มีการใช้เส้นใยสำรองที่ขั้วเชื่อมโยง 2-5 จำนวนเท่ากับ 2 เพื่อรองรับขั้วเชื่อมโยงของเส้นใยทำงาน 2-3 หรือ 3-5 เมื่อเกิดความเสียหาย แล้วนำมาคำนวณหาเส้นใยสำรองทั้งหมด

จะได้เส้นใยสำรองทั้งหมดเท่ากับ 8 ในขณะที่การหาเส้นใยสำรองของกลยุทธ์การป้องกันแบบ PBF ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการหาเส้นทางสำรองในลักษณะวงแหวนที่เป็นไปได้ดังรูปที่ 5.1 (ง) มีการใช้ข่ายเชื่อมโยงของวงแหวน 1-2-5-3-4-1 และ 2-5-3-2 ประกอบกัน โดยกำหนดให้แต่ละข่ายเชื่อมโยงมีการใช้เส้นใยสำรองจำนวนเท่ากับ 2 แล้วนำมาคำนวณหาเส้นใยสำรองจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 5.1 (จ) จะเห็นว่ามีการใช้เส้นใยสำรองทั้งหมดเท่ากับ 4 ที่ข่ายเชื่อมโยง 1-2 และ 2-5 เพื่อรองรับข่ายเชื่อมโยงของเส้นใยทำงาน 1-4, 4-3, 3-2 หรือ 3-5 เมื่อเกิดความเสียหาย ซึ่งมีการใช้เส้นใยสำรองน้อยกว่าการหาเส้นใยสำรองของกลยุทธ์การป้องกันแบบ PBF แบบเดิม และง่ายต่อการออกแบบกับอัลกอริทึมฮิวริสติก

กลยุทธ์การป้องกันแบบ OMP จะอาศัยหลักการหาเส้นใยนำแสงที่ใช้ในลักษณะเดียวกับกลยุทธ์การป้องกันแบบ PBF ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ด้วยเช่นกัน แต่จะพิจารณาวิธีทำงานในข่ายเชื่อมโยงสภาวะทำงานปกติของกลยุทธ์การป้องกันแบบ PBF เป็นวิธีสำรองที่ใช้ในกลยุทธ์การป้องกันแบบ OMP แสดงดังรูปที่ 5.2 (ก) – (ค)



รูปที่ 5.2 วิธีหาเส้นใยนำแสงสำรองของกลยุทธ์การป้องกันแบบ OMP ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 5.9 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองสำหรับโครงข่าย 5N_7L ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

จำนวนเส้นใยนำแสง (VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	24	24	24
2	9	9	9
4	7	7	7
8	6	6	6
16	3	3	3
32	3	3	3
64	3	3	3
128	3	3	3
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0	0	0

(ก)

จำนวนเส้นใยนำแสง (LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	24	24	24
2	10	10	10
4	7	7	7
8	6	6	6
16	3	3	3
32	3	3	3
64	3	3	3
128	3	3	3
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0	0	0

(ข)

ตารางที่ 5.10 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย 5N_7L ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	9	14	35
2	10	14	34
4	10	14	33
8	9	15	32
16	9	15	32
32	10	14	32
64	10	15	32
128	9	15	33

(ก)

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	11	10	37
2	13	12	48
4	18	17	65
8	20	16	68
16	21	17	69
32	22	17	73
64	24	19	80
128	26	23	92

(ข)

ตารางที่ 5.11 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองสำหรับโครงข่าย 5N_7L ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

จำนวนเส้นใยนำแสง (VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	51	51	51
2	23	23	23
4	14	14	14
8	10	10	10
16	6	6	6
32	6	6	6
64	6	6	6
128	6	6	6
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0	0	0

(ก)

จำนวนเส้นใยนำแสง (LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	51	51	51
2	24	24	23
4	14	14	14
8	9	9	9
16	5	5	5
32	5	5	5
64	7	7	6
128	6	6	5
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0	0	0

(ข)

ตารางที่ 5.12 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย 5N_7L ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	10	13	32
2	10	13	32
4	9	11	33
8	10	14	32
16	10	18	32
32	9	15	32
64	10	19	33
128	10	20	33

(ก)

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	11	10	37
2	13	12	48
4	18	16	67
8	21	18	67
16	18	16	70
32	20	18	73
64	23	22	84
128	31	24	94

(ข)

ตารางที่ 5.13 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองสำหรับโครงข่าย 8N_14L ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

จำนวนเส้นใยนำแสง (VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	36	36	36
2	18	18	18
4	14	14	14
8	7	7	7
16	4	4	4
32	5	4	5
64	5	4	4
128	4	4	4
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0-0.447	0-0.837	0

(ก)

จำนวนเส้นใยนำแสง (LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	36	36	36
2	23	23	22
4	19	19	19
8	12	11	11
16	6	5	5
32	6	5	5
64	7	7	7
128	5	5	5
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.447- 1.483	0.447- 1.483	0.447- 0.894

(ข)

ตารางที่ 5.14 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย 8N_14L ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	10	12	34
2	10	12	33
4	10	12	34
8	10	13	34
16	10	13	34
32	17	18	33
64	10	23	32
128	11	15	32

(ก)

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	11	11	39
2	20	18	66
4	22	20	79
8	26	21	94
16	24	22	96
32	30	23	102
64	31	26	116
128	44	33	145

(ข)

ตารางที่ 5.15 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองสำหรับโครงข่าย 8N_14L ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

จำนวนเส้นใยนำแสง (VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	82	82	82
2	41	41	41
4	27	27	27
8	14	14	14
16	8	8	8
32	8	8	8
64	8	8	8
128	9	10	9
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0-0.837	0-0.837	0-0.837

(ก)

จำนวนเส้นใยนำแสง (LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	82	82	82
2	46	46	47
4	32	32	31
8	19	19	19
16	9	9	8
32	11	11	11
64	11	11	11
128	10	10	10
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.447- 1.483	0.447- 1.483	0.447- 0.894

(ข)

ตารางที่ 5.16 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย 8N_14L ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	10	11	33
2	10	13	34
4	10	10	33
8	10	14	35
16	10	18	33
32	13	15	33
64	11	19	35
128	11	21	33

(ก)

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	11	10	39
2	19	19	65
4	20	19	78
8	24	21	92
16	25	22	94
32	27	23	99
64	31	26	114
128	41	36	149

(ข)

ตารางที่ 5.17 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองสำหรับโครงข่าย 10N_21L ของกลยุทธการป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

จำนวนเส้นใยนำแสง (VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	39	39	39
2	22	22	22
4	14	14	14
8	8	8	8
16	8	8	8
32	8	8	8
64	7	7	7
128	8	8	8
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0-0.548	0-1.643	0-0.548

(ก)

จำนวนเส้นใยนำแสง (LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	39	42	39
2	25	25	24
4	19	19	19
8	12	11	9
16	13	11	10
32	13	12	11
64	12	11	10
128	*	*	*
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.447- 1.643	0.447- 0.894	0.447- 0.894

(ข)

หมายเหตุ * หมายถึงไม่สามารถหาผลเฉลี่ยได้เนื่องจากไม่มีผลเฉลี่ยตั้งต้นจากวิธี ILP

ตารางที่ 5.18 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย 10N_21L ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	10	17	33
2	13	12	33
4	11	12	38
8	11	18	34
16	15	20	34
32	12	12	33
64	11	16	34
128	10	15	38

(ก)

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	11	10	56
2	18	26	58
4	23	20	68
8	28	18	73
16	28	18	86
32	31	22	85
64	30	23	100
128	*	*	*

(ข)

หมายเหตุ * หมายถึงไม่สามารถหาผลเฉลยได้เนื่องจากไม่มีผลเฉลยตั้งต้นจากวิธี ILP

ตารางที่ 5.19 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองสำหรับโครงข่าย 10N_21L ของกลยุทธการป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

จำนวนเส้นใยนำแสง (VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	90	90	90
2	49	49	49
4	29	29	29
8	16	16	16
16	13	13	13
32	13	13	13
64	14	14	14
128	13	13	13
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0-0.837	0-0.548	0-0.548

(ก)

จำนวนเส้นใยนำแสง (LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	90	90	90
2	51	51	52
4	36	34	34
8	20	22	18
16	16	15	14
32	18	17	17
64	18	18	18
128	*	*	*
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.447- 1.304	0.447- 1.304	0.447- 0.894

(ข)

หมายเหตุ * หมายถึงไม่สามารถหาผลเฉลี่ยได้เนื่องจากไม่มีผลเฉลี่ยตั้งต้นจากวิธี ILP

ตารางที่ 5.20 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย 10N_21L ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	10	11	34
2	10	13	34
4	10	12	33
8	11	14	35
16	18	18	65
32	11	17	34
64	23	26	50
128	22	24	37

(ก)

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	10	15	41
2	16	22	58
4	20	21	66
8	22	19	73
16	20	27	75
32	25	24	85
64	28	23	99
128	*	*	*

(ข)

หมายเหตุ * หมายถึงไม่สามารถหาผลเฉลยได้เนื่องจากไม่มีผลเฉลยตั้งต้นจากวิธี ILP

ตารางที่ 5.21 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองสำหรับโครงข่าย NSFNet ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

จำนวนเส้นใยนำแสง (VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	64	64	64
2	35	35	35
4	22	22	22
8	13	13	13
16	11	11	10
32	10	10	10
64	9	9	9
128	9	9	9
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.447- 1.095	0-1.095	0-0.548

(ก)

จำนวนเส้นใยนำแสง (LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	66	64	64
2	42	42	41
4	26	28	26
8	22	21	20
16	14	14	14
32	13	12	12
64	17	16	16
128	15	14	14
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0-2.074	0.447- 1.14	0-0.874

(ข)

ตารางที่ 5.22 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย NSFNet ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	16	19	37
2	10	16	46
4	12	19	40
8	11	17	46
16	16	16	65
32	16	20	45
64	12	14	37
128	15	18	36

(ก)

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	21	21	43
2	18	24	79
4	27	22	74
8	28	23	73
16	27	18	75
32	30	20	86
64	34	24	94
128	41	35	135

(ข)

ตารางที่ 5.23 จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองสำหรับโครงข่าย NSFNet ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

จำนวนเส้นใยนำแสง (VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	127	127	127
2	68	68	68
4	39	39	39
8	21	21	21
16	16	16	16
32	16	16	16
64	16	16	16
128	16	16	16
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.447- 1.095	0-0.548	0-0.548

(ก)

จำนวนเส้นใยนำแสง (LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	127	129	127
2	74	74	74
4	46	46	45
8	33	31	29
16	18	18	18
32	19	18	18
64	20	20	20
128	18	18	18
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.447- 2.074	0.447- 1.14	0-0.873

(ข)

ตารางที่ 5.24 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย NSFNet ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (ก) เมื่อระบบมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น (ข) เมื่อระบบไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, VLT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	17	19	43
2	15	17	37
4	16	19	39
8	13	17	34
16	11	16	50
32	12	20	43
64	12	14	40
128	14	18	35

(ก)

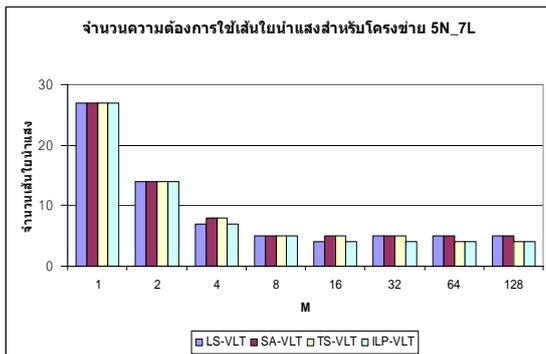
เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (วินาที, LT)			
<i>M</i>	LS	SA	TS
1	24	12	57
2	19	19	77
4	23	19	70
8	22	20	71
16	20	19	75
32	23	20	85
64	28	24	96
128	38	33	141

(ข)

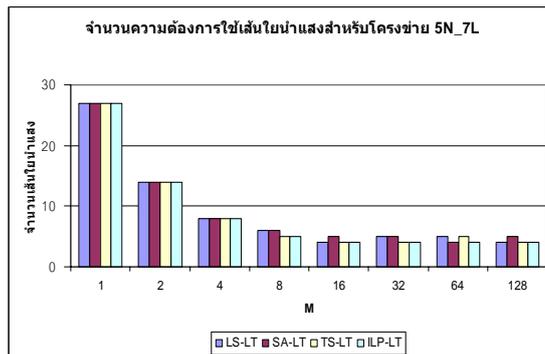
ตารางที่ 5.9 – 5.24 แสดงผลเฉลยของจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองและเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสำหรับโครงข่าย 5N_7L, 8N_14L, 10N_21L และ NSFNet ในสถานะเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF และ OMP เมื่อระบบมีการติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น พบว่าแนวโน้มของค่าคำตอบของการใช้เส้นใยนำแสงสำรองสำหรับกรณี VLT ทั้ง 3 อัลกอริทึมจะให้ค่าไม่ต่างกันมากนักเมื่อโครงข่ายมีขนาดเล็ก แต่เมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นสามารถสรุปได้ว่า $TS \leq SA \leq LS$ ส่วนกรณี LT ซึ่งมีความซับซ้อนของโครงข่ายมากกว่ากรณี VLT สามารถสรุปได้ว่า $TS \leq SA \leq LS$ เช่นกัน ทางด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสามารถสรุปได้ว่าในกรณี VLT ใช้เวลาเป็นดังนี้ $LS \leq SA \leq TS$ แต่ในกรณี LT จะใช้เวลาเป็นดังนี้ $SA \leq LS \leq TS$ และการวิเคราะห์ในส่วนสุดท้ายคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่า $TS \leq SA \leq LS$ ทั้งกรณี VLT และ LT ซึ่งบทสรุปทั้งหมดนี้ให้แนวโน้มทางด้านความต้องการใช้จำนวนเส้นใยนำแสง เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในลักษณะเช่นเดียวกับผลเฉลยของการออกแบบการจัดสรรและกำหนดความยาวคลื่นสำหรับการทำงานปกติในหัวข้อที่ผ่านมา

การเปรียบเทียบกันระหว่างกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF และ OMP พบว่าความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองสำหรับแบบ OMP จะมีค่ามากกว่าแบบ PBF ที่ทุก ๆ ค่า M เนื่องจากกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP มีการวางเส้นใยสำรองที่วิธีทำงานปกติเพิ่มด้วยนั่นเอง

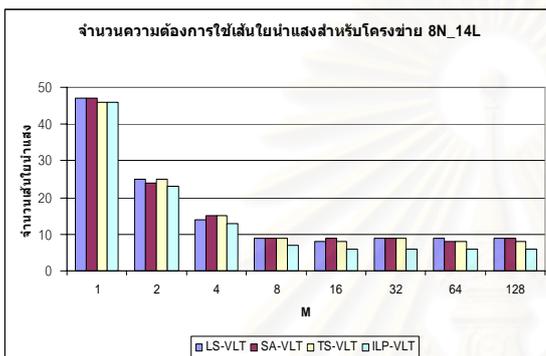
เพื่อให้เห็นภาพรวมของการหาผลเฉลยความต้องการใช้เส้นใยนำแสงของแต่ละโครงข่าย ทั้งการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นในสถานะการทำงานปกติ ที่ได้จากรายการที่ 5.1 – 5.8 และกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF และ OMP ที่ได้จากรายการที่ 5.9 - 5.24 กรณีที่มีและไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น สามารถนำผลการทดลองดังกล่าวมาแสดงอีกครั้งเป็นแผนภูมิแท่งได้ดังรูปที่ 5.3, 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ



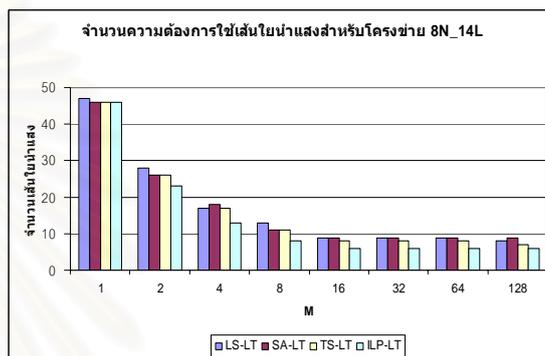
(ก)



(ข)



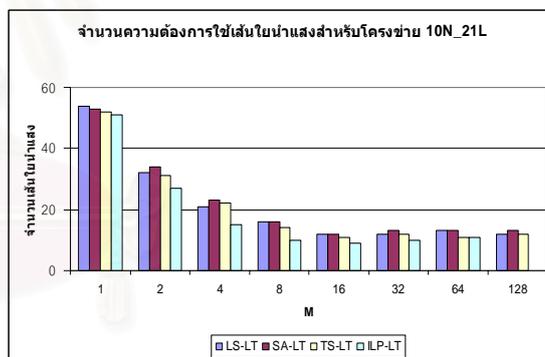
(ค)



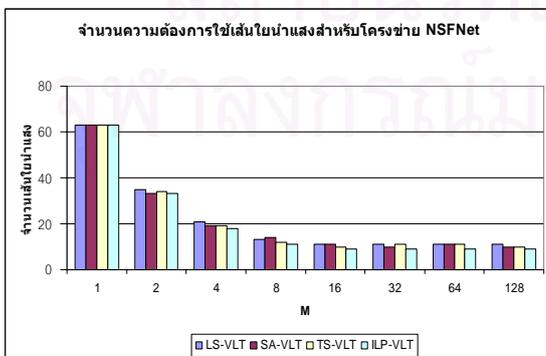
(ง)



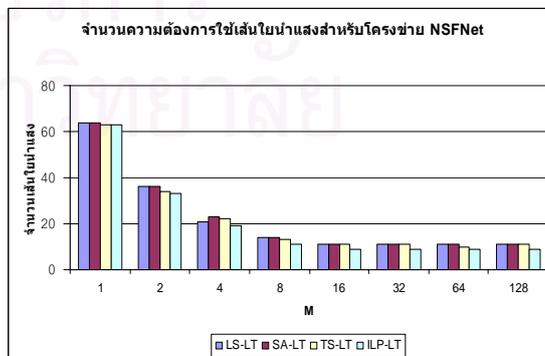
(จ)



(ฉ)

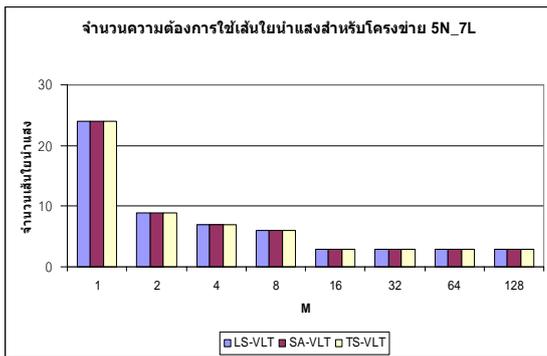


(ช)

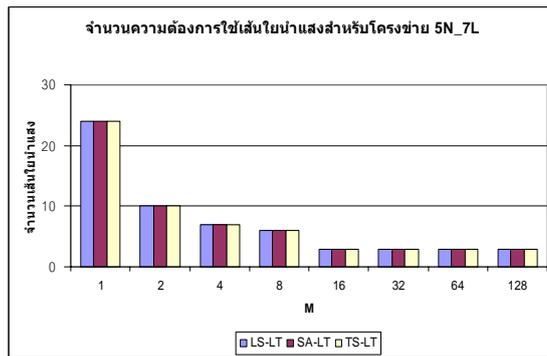


(ซ)

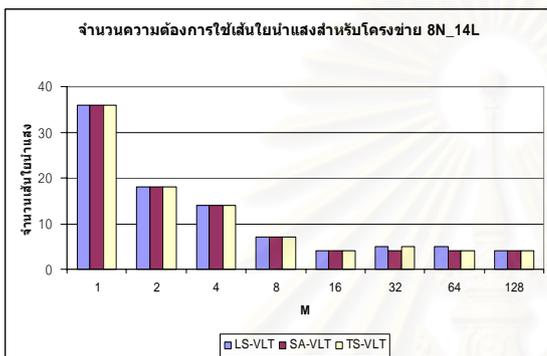
รูปที่ 5.3 แผนภูมิแสดงจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงเมื่อโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติทั้งกรณี VLT และ LT



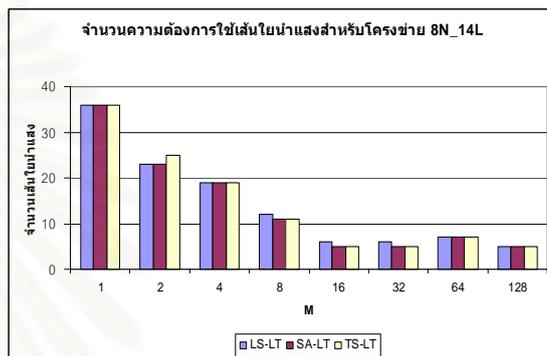
(ก)



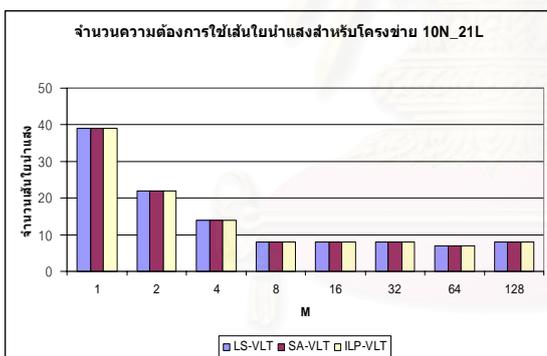
(ข)



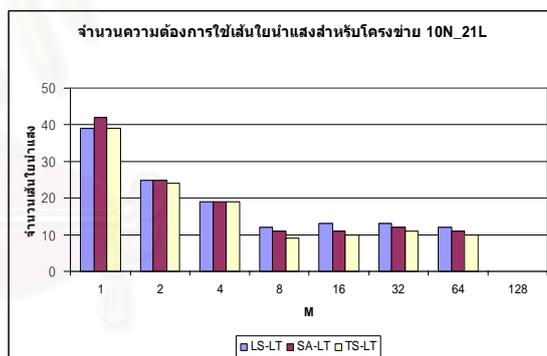
(ค)



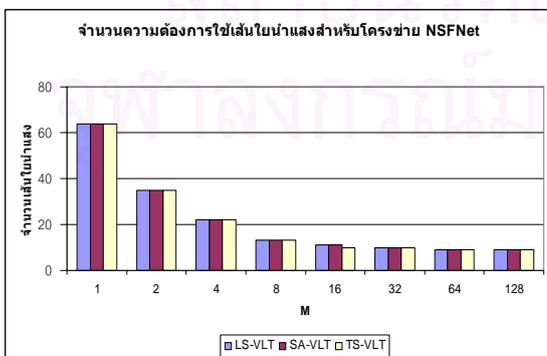
(ง)



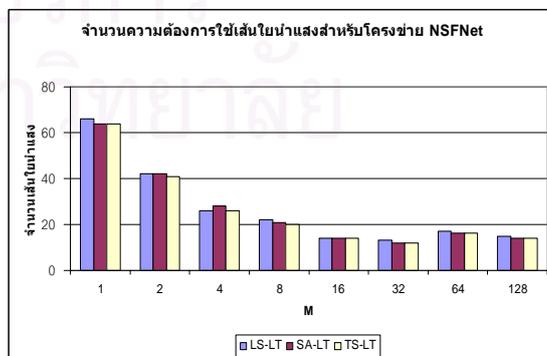
(จ)



(ฉ)

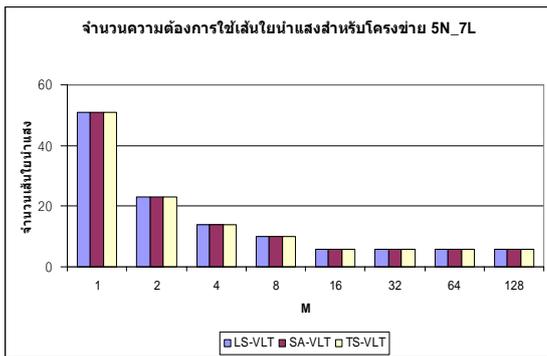


(ช)

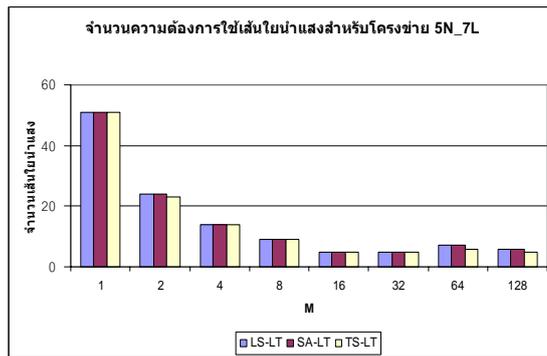


(ซ)

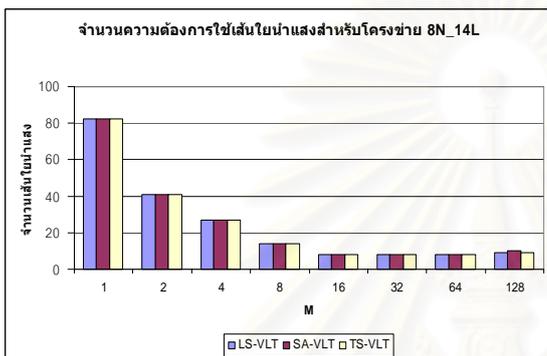
รูปที่ 5.4 แผนภูมิแสดงจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำรองเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายสำหรับกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF ทั้งกรณี VLT และ LT



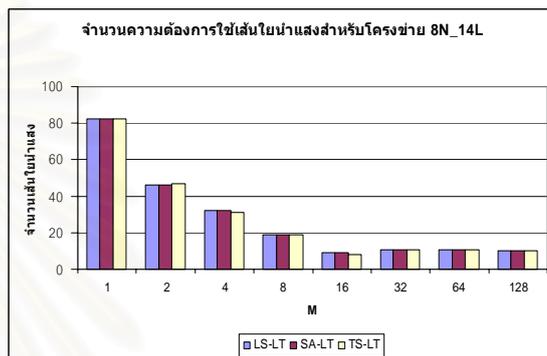
(ก)



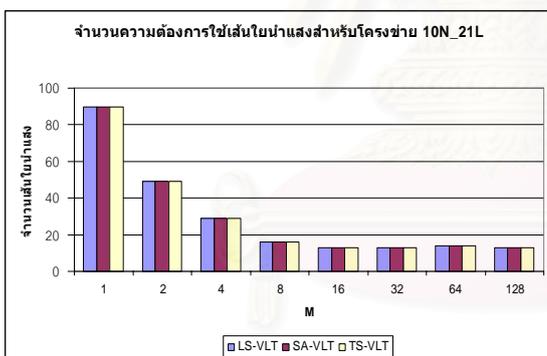
(ข)



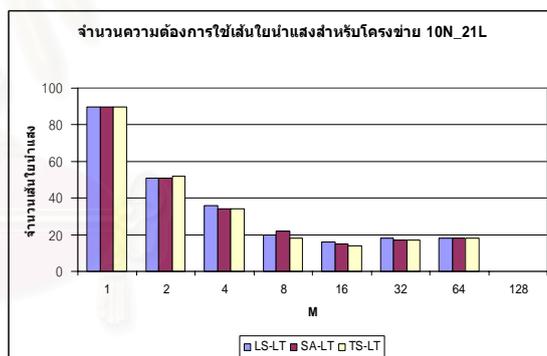
(ค)



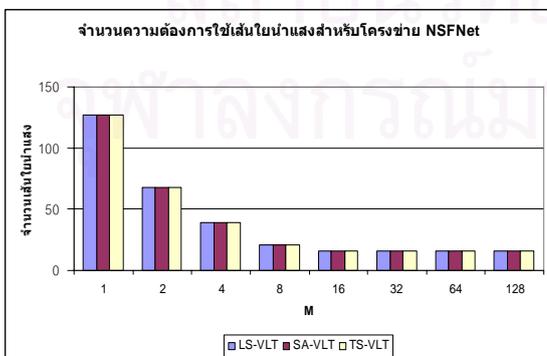
(ง)



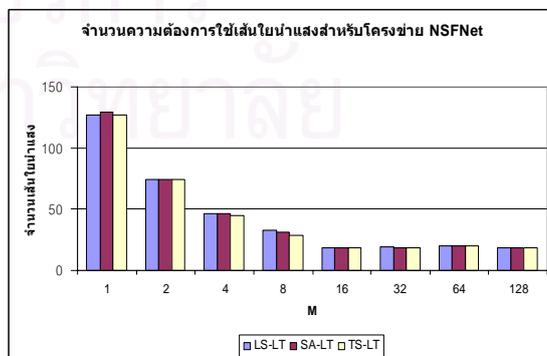
(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

รูปที่ 5.5 แผนภูมิแสดงจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงสำหรับโครงข่ายเมื่อนำเข้าเชื่อมโยงได้รับความเสียหายสำหรับกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP ทั้งกรณี VLT และ LT

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบการป้องกันโครงข่าย WDM สำหรับมัลติคาสต์ทราฟฟิก เมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายโดยใช้อัลกอริทึมฮิวริสติก เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของระบบได้เพียงพอทั้งในสภาวะการทำงานปกติและสภาวะเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย ซึ่งเป็นการพัฒนาจากงานวิจัย [11] โดยในสภาวะทำงานปกติ การออกแบบการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นจะอาศัยโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมในแต่ละมัลติคาสต์เซสชัน ส่วนสภาวะเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายจะใช้กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (Physical Branch Fixed) และ กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (Optical Mesh Protection) จะอาศัยโครงสร้างวงแหวนหลายวงมาประกอบกันเพื่อให้ครอบคลุมโหนดสมาชิกและข่ายเชื่อมโยงในวิถีทำงานปกติในแต่ละมัลติคาสต์เซสชัน โดยมีวัตถุประสงค์คือทำการค้นหาคำตอบของความต้องการใช้เส้นใยนำแสงของโครงข่ายทั้งในสภาวะการทำงานปกติและสภาวะเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายทั้งในกรณีที่ระบบมีการติดตั้งและไม่มี การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

การออกแบบโครงข่ายในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ อัลกอริทึมฮิวริสติกซึ่งเป็นการค้นหาคำตอบแบบประมาณค่า ประกอบด้วย 3 อัลกอริทึม ได้แก่ อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA และ อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS ซึ่งผลเฉลยที่ได้จะให้ค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด แต่เมื่อขนาดของปัญหาใหญ่หรือ ซับซ้อนมากขึ้น การใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกจะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบได้รวดเร็วกว่าการค้นหา โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือวิธี ILP (Integer Linear Programming) โดยใน วิทยานิพนธ์จะใช้วิธี Optimized Spare Capacity Assignment ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งเป็นวิธีการหาความจุสำรองที่โครงข่ายต้องการ โดยในการหาผลเฉลยจะต้องมีการกำหนดเส้นทางและ ความยาวคลื่นที่เป็นวิถีทำงานของโครงข่ายมาให้

จากการใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกที่ได้เสนอไว้ทั้ง 3 แบบ ในการทดลองเพื่อค้นหาคำตอบของ เส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ ได้แก่ โครงข่าย 5 โหนด 7 ข่ายเชื่อมโยง โครงข่าย 8 โหนด 14 ข่าย

เชื่อมโยง โครงข่าย 10 โนด 21 ข่ายเชื่อมโยง และ โครงข่าย NSFNet ขนาด 14 โนด 21 ข่ายเชื่อมโยงสามารถสรุปผลการทดลองในแง่ของสมรรถนะการใช้อัลกอริทึมฮิวริสติก โดยอาศัยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นตัวชี้วัดโดยเรียงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ $TS \leq SA \leq LS$ เนื่องจากอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS จะอาศัยพื้นที่ของหน่วยความจำเพื่อนำมาตรวจสอบผลเฉลยที่สุ่มไม่ให้เกิดลักษณะซ้ำซ้อนกับผลเฉลยในอดีต จึงทำให้โอกาสที่จะพบผลเฉลยที่ดีกว่าเป็นไปได้ น้อยมาก ขณะที่อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA จะอาศัยกระบวนการยอมรับคำตอบที่ดีเพื่อลดการเกิดค่าที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ หรือ Local optimum ซึ่งทั้งสองอัลกอริทึมดังกล่าวมีความซับซ้อนมากกว่าอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS ที่กระบวนการตัดสินใจยอมรับคำตอบเป็นอย่างไรง่าย จึงทำให้อัลกอริทึมนี้มีโอกาสเกิดค่าที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ได้มาก

เมื่อพิจารณาในแง่ของเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ ถ้าความซับซ้อนของปัญหามีความซับซ้อนไม่มากนัก หรือ กรณี VLT สามารถเรียงลำดับจากน้อยไปมากได้ดังนี้ $LS \leq SA \leq TS$ แต่วิธี ILP จะใช้เวลาที่น้อยที่สุด และเมื่อความซับซ้อนของปัญหามีมาก หรือกรณี LT สามารถเรียงลำดับจากน้อยไปมากได้ดังนี้ $SA \leq LS \leq TS$ เนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับการสรุปผลในแง่ของสมรรถนะของอัลกอริทึมฮิวริสติกที่ผ่านมา เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับวิธี ILP จะใช้เวลาดำเนินการรวดเร็วในการค้นหาคำตอบเมื่อค่า M มีค่าน้อย ๆ แต่จะยิ่งใช้เวลานานมากเมื่อค่า M มีค่าสูงมาก ๆ และยังพบว่าที่ค่า M มีค่าสูง ๆ ของบางโครงข่ายไม่สามารถหาผลเฉลยได้เลย เนื่องจากความซับซ้อนของปัญหาในกรณี LT นี้จะขึ้นอยู่กับค่า M ด้วย

พิจารณาในแง่ความต้องการใช้เส้นใยนำแสงในสภาวะการทำงานปกติและสภาวะเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย สามารถเรียงลำดับความต้องการใช้เส้นใยนำแสงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ $TS \leq SA \leq LS$ ในกรณี VLT ซึ่งมีความซับซ้อนไม่มากนักจะมีความต้องการใช้จำนวนเส้นใยนำแสงน้อยกว่ากรณี LT ที่มีความซับซ้อนมากกว่า ในการออกแบบกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF จะใช้จำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงที่น้อยกว่ากลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP ทุก ๆ ค่า M เนื่องจากกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF และ OMP อาศัยโครงสร้างของวงแหวนหลายวงในการป้องกันข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายเหมือนกัน เพียงแต่กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP จะต้องนำวิธีทำงานปกติมาออกแบบสำหรับเส้นใยนำแสงสำรองด้วย

ดังนั้นจึงสามารถสรุปเป็นภาพรวมถึงการนำอัลกอริทึมฮิวริสติกทั้ง 3 แบบ มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สามารถจำแนกลักษณะปัญหาของงานได้ 2 แบบ คือ งานที่มีความซับซ้อนน้อยหรือขนาดเล็ก และงานที่มีความซับซ้อนมากหรือขนาดใหญ่ ซึ่งผลที่

ได้จากการทดลองนั้น อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS จะมีความเหมาะสมกับงานที่มีความซับซ้อนน้อย หรือขนาดเล็ก เนื่องจากให้ค่าคำตอบที่มีความเหมาะสมในเวลาที่ย่อหน้ารวดเร็วกว่า แต่เมื่องานมีความซับซ้อนหรือขนาดใหญ่ขึ้น การใช้ อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ TS จะมีความเหมาะสมมากที่สุด ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการทำงานมากกว่าอัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ LS และ SA ก็ตาม เนื่องจากอาศัยพื้นที่หน่วยความจำในการประกอบการตัดสินใจยอมรับคำตอบ ในขณะที่อัลกอริทึมฮิวริสติกแบบ SA จะอยู่ตรงกลางระหว่างสองอัลกอริทึมข้างต้น โดยกระบวนการตัดสินใจมีการยอมรับคำตอบที่ต่ำกว่าเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ จึงเพิ่มโอกาสในการค้นพบค่าที่เหมาะสมที่สุดในเวลาที่เหมาะสม

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในขั้นต่อไปที่น่าสนใจ

- 1 ในวิทยานิพนธ์นี้ ขั้นตอนการสำรวจความจุเป็นขั้นตอนที่ทำหลังจากได้จัดสรรความจุที่ใช้รองรับกราฟฟิกในสภาวะทำงานปกติเรียบร้อยแล้ว (Optimized Spare Capacity Assignment) งานวิจัยในขั้นต่อไปควรพัฒนาอัลกอริทึมให้สามารถจัดสรรความจุสำรวจได้ควบคู่กับการจัดสรรความจุให้กราฟฟิกในสภาวะปกติได้ (Jointly Optimized Working and Spare Capacity Assignment) จึงอาจทำให้จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการมีความประหยัดมากขึ้น

- 2 เนื่องจากการออกแบบการสำรวจความจุในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการออกแบบโดยไม่คำนึงถึงข้อสัญญาที่เหลือนของเส้นใยทำงาน จึงทำให้เกิดความสิ้นเปลืองของการใช้เส้นใยเป็นอย่างมาก ในขั้นต่อไป จึงควรออกแบบการสำรวจความจุโดยคำนึงความจุที่เหลือนบนเส้นใยทำงานก่อน เพื่อลดความต้องการใช้เส้นใยนำแสงลง

- 3 กราฟฟิกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบคงที่ (Static traffic) ซึ่งเป็นการออกแบบปัญหาในช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น ในขั้นต่อไปควรศึกษาและพัฒนาถึงกราฟฟิกที่มีลักษณะแบบพลวัต (Dynamic traffic) หรือกราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เนื่องจากมีความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานในปัจจุบัน

รายการอ้างอิง

1. George N. Rouskas. Routing and Wavelength Assignment in Optical WDM Networks. Wiley Encyclopedia of Telecommunications. (John Proakis, Editor), John Wiley & Sons. (2001).
2. B. Mukherjee. WDM optical communication networks: Progress and Challenges. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 18 (October 2000): 1810-1824.
3. G. N. Rouskas and H. G. Parros. A tutorial on optical networks. Networking 2002 Tutorial. (2002): 155-193.
4. K. N. Sivarajan and R. Ramaswami. Routing and wavelength assignment in all-optical networks. IEEE Transactions of Networking. 3 (Oct. 1995): 489-500.
5. D. Banerjee and B. Mukherjee. A practical approach for routing and wavelength assignment in large wavelength-routed optical networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 14 (June 1996): 903-908.
6. N. Nagatsu, Y. Hamazumi and K. Sato. Optical path accommodation designs applicable to large scale networks. IEICE Transactions on Communications E78-B (April 1995): 597-607.
7. J. Strand, A. L. Chiu and R. Tkach. Issues for routing in the optical layer. IEEE Communications Magazine. (Feb. 2001): 81-87.
8. Y. Xin, G. N. Rouskas and H. G. Perros. Light-Tree Routing Under Optical Layer Power Budget Constraints. Infocom submission. (2003):1-11.
9. G. N. Rouskas. Optical layer multicast: Rationale, building blocks, and challenges. IEEE Network. (Jan./Feb. 2003): 2-8.
10. L. H. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee. Multicast routing algorithm and protocols: A tutorial. IEEE Network. (Jan./Feb. 2000): 90-102.
11. C. Bowontummarat. Wavelength Routing and Optical Layer Network Protection Approaches Against Single Link Failures for Multicast Traffic on WDM Networks. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University. (2003).

12. D. Yan. Optimization models and methods for communication network design and routing. Ph. D. Dissertation Linkopings University. (2001).
13. Sadiq M. Sait and Habib Youssef. Iterative computer algorithms with applications in engineering:solving combinatorial optimization problems. Wiley-IEEE Computer Society Press. (2000).
14. Emile Aarts and Jan Korst. Simulated annealing and Boltzmann machines: a stochastic approach to combinatorial optimization and neural computing. John Wiley & Sons. (July 1990).
15. F. Glover and M. Laguna. Tabu Search. Kluwer Academic Publishers. (1997).
16. M. Gendreau. An Introduction to Tabu Search. (2002).
17. B. Mukherjee. Optical Communication Networks. Newyork : McGraw-Hill. (1997).
18. Eng, K.Y. and Santoro, M. Multi-Gb/s optical cross-connect switch architectures: TDM versus FDM techniques. Proc. of GLOBECOM '89. (November 1989): 999-1003.
19. H. Zang, J. P. Jue and B. Mukherjee. A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks. Optical Networks Magazine. 1 (January 2000): 47-60.
20. S. Baroni, S.K. Korotky and P. Bayvel. Wavelength interchange in multi-wavelength optical transport networks. Proceedings. ECOC'97. 3 (1997): 164-167.
21. สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล. การออกแบบและวิเคราะห์อัลกอริทึม. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, 2544.
22. ธีัญพร เขี่ยมวสันต์. การออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
23. วรารัตน์ วัฒนวรากุล. การจัดสรรเส้นทางเชิงความยาวคลื่นและการป้องกันโครงข่ายจากความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงบนโครงข่าย WDM สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

งานวิจัย [11] เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้ออกแบบการแก้ไขปัญหาการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ และแบบจำลองสำหรับการป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายสำหรับโครงข่าย WDM ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยมีวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองคือ เพื่อใช้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ ทั้งในกรณีที่ทุกโหนดในโครงข่ายมีและไม่มี การติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยอาศัย Integer Linear Programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

ก.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ

พารามิเตอร์ และ ตัวแปรสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
N	จำนวนโหนดทั้งหมดในโครงข่าย
L	จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาทั้งหมดในโครงข่าย
$K = R $	จำนวนมัลติคาสต์เซสชัน
$r_k (s_k, D_k)$	มัลติคาสต์เซสชันที่ r_k โดยมีโหนดต้นทางคือ s_k และมีจุดโหนดปลายทางคือ จุด D_k
t_{r_k}	ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k
Δ	จำนวนสัญญาณที่มากที่สุดที่อนุญาตให้ออกจากตัวแยกสัญญาณได้ (fanout)
M	จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ลงบนเส้นใยนำแสงได้
$\delta_{ij,p}^{r_k}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ p ของชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0
P_{sd}	ชุดของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดของคูโหนดที่ sd
I_∞	ค่าคงที่จำนวนเต็มที่มีค่ามาก
ตัวแปร	คำอธิบาย
f_{ij}	จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij
$x_{r_k}^{ij}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อกิ่งเชิงแสงที่ใช้ส่งข้อมูลจากโหนด i ไปยังโหนด j ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ถ้าไม่ถูกใช้จะมีค่าเป็น 0

ตัวแปร	คำอธิบาย
$a_{r_k,p}^{sd}$	เส้นทางทางกายภาพ (physical route) ลำดับที่ p ของคูโนดที่ sd สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซตชั้นที่ r_k (กรณี VLT)
$a_{r_k,p,\lambda}^{sd}$	เส้นทางทางกายภาพลำดับที่ p ของคูโนดที่ sd สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซตชั้นที่ r_k ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ (กรณี LT)
$W_{r_k,\lambda}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อค่าความยาวคลื่น λ ถูกเลือกเพื่อใช้ส่งข้อมูลสำหรับมัลติคาสต์เซตชั้นที่ r_k ถ้าไม่ถูกเลือกจะมีค่าเป็น 0 (กรณี LT)

พารามิเตอร์ และ ตัวแปรเพิ่มเติมสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีโครงข่ายได้รับความเสียหาย

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
Q	ชุดของวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่าย
n_q	จำนวนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพทั้งหมดของวงแหวน $q \in Q$
π_q^{ij}	มีค่าเป็น 1 เมื่อวงแหวน q ผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij ของโครงข่าย ถ้าไม่ใช่จะมีค่าเป็น 0

ตัวแปร	คำอธิบาย
s_{ij}	จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij
$b_{r_k,q}^{ij}$	จำนวนช่องสัญญาณทำงานของวงแหวน q ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซตชั้นที่ r_k (กรณี VLT)
$b_{r_k,q,\lambda}^{ij}$	จำนวนช่องสัญญาณทำงานของวงแหวน q ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซตชั้นที่ r_k ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ (กรณี LT)
$Sw_{r_k,q}^{ij}$	จำนวนช่องสัญญาณสำรองของวงแหวน q ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซตชั้นที่ r_k เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (กรณี VLT)
$Sw_{r_k,q,\lambda}^{ij}$	จำนวนช่องสัญญาณสำรองของวงแหวน q ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซตชั้นที่ r_k เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ (กรณี LT)

ก.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

ในการหาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด (optimal light-tree) T_k เพื่อรองรับมัลติคาสต์เซตชันที่ $r_k(s_k, D_k)$ นั้น จะต้องแทนที่โครงข่าย WDM ที่พิจารณาด้วยกราฟแบบไม่แสดงทิศทาง $G_k = (N_k, A_k)$ โดยชุดของโหนด N_k จะประกอบไปด้วยโหนดต้นทาง s_k และชุดของโหนดปลายทาง D_k แสดงได้ดังสมการ $N_k = \{i \in N_k \mid i \in D_k \vee i = s_k\}$ รวมทั้งสิ้นจำนวน N_k โหนด, และชุดของเส้นเชื่อมเชิงตรรกะ (logical arcs) A_k ซึ่งแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $A_k = \{ij \in A_k \mid i, j \in N_k \wedge i \neq j\}$ แล้วเปลี่ยนกราฟแบบไม่แสดงทิศทาง G_k ที่ได้ให้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด T_k โดยโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องประกอบด้วยกิ่งเชิงแสงจำนวน $|N_k| - 1$ กิ่ง ดังนั้น สามารถแสดงเงื่อนไขบังคับ 2 ข้อแรกได้ดังนี้

$$\sum_{ij \in A_k} x_{r_k}^{ij} = |N_k| - 1, \quad \forall r_k \in R \quad (ก.1)$$

$$x_{r_k}^{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall ij \in A_k, \forall r_k \in R \quad (ก.2)$$

เมื่อพิจารณาเส้นเชื่อมขาออกของแต่ละโหนด จะพบว่าจำนวนเส้นเชื่อมขาออกของแต่ละโหนดจะถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์แยกสัญญาณทางแสงที่สามารถแยกสัญญาณแสงออกเป็นสัญญาณขนาดย่อยได้จำนวนเท่ากับ Δ ดังนั้น สามารถแสดงเงื่อนไขบังคับสมการที่ ก.3 ได้ดังนี้

$$\sum_{j:ij \in A_k} x_{r_k}^{ij} \leq \Delta, \quad \forall i \in N_k, \forall r_k \in R \quad (ก.3)$$

และเพื่อเป็นการรับประกันว่าทุกโหนดที่เป็นสมาชิกของกลุ่มมัลติคาสต์สามารถเชื่อมต่อกันได้ และโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องไม่มีลักษณะเป็นวงปิด เงื่อนไขบังคับสมการที่ ก.4 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sum_{ij \in \mathcal{A}(S)} x_{r_k}^{ij} \geq 1, \quad \forall S \subset N_k, S \neq \phi, N, \forall r_k \in R \quad (ก.4)$$

เมื่อ S คือเซตย่อย (subset) ของ N_k และ $\mathcal{A}(S)$ คือ เซตตัด (cut-set) ของเซตย่อย S โดยสามารถแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $\mathcal{A}(S) = \{ij \in A_k \mid i \in S, j \notin S\}$

ก.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

ในการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ในสภาวะทำงานปกติ จะเป็นการจัดสรรความจุใช้งานเพื่อรองรับเส้นทางที่เป็นวิถีทำงานให้กับโครงข่าย โดยสามารถใช้เทคนิค ILP ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

ก.4.1 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-Tree method, VLT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (ก.5)$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) และ

$$\sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p}^{sd} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (ก.6)$$

$$M \times f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p}^{sd} \delta_{ij, p}^{sd} \geq 0, \quad \forall ij \in L \quad (ก.7)$$

$$a_{r_k, p}^{sd} \in Z^+, \quad \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (ก.8)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (ก.9)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นวิธี VLT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.5) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) และ (ก.6) - (ก.9) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้หาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.6) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.7) เป็นเงื่อนไขของปัญหาที่ใช้บังคับให้ความจุของสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.8) และ (ก.9) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นจำนวนเต็มที่ไม่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

ก.4.2 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light-Tree method, LT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \quad (ก.10)$$

และมีเงื่อนไขบังคับสมการที่ (ก.1) - (ก.4) และ

$$\sum_{p \in P_{r_k}} \sum_{\lambda=1}^M a_{r_k, p, \lambda} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \quad \forall sd \in V_k, \forall r_k \in R \quad (ก.11)$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p, \lambda}^{sd} \delta_{ij, p}^{sd} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ij \in L \quad (ก.12)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{r_k, \lambda} = t_{r_k}, \quad \forall r_k \in R \quad (ก.13)$$

$$a_{r_k, p, \lambda}^{sd} \leq I_{\infty} \times W_{r_k, \lambda}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (ก.14)$$

$$W_{r_k, \lambda} \in \{0, 1\}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R \quad (ก.15)$$

$$a_{r_k, p, \lambda}^{sd} \in Z^+, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (ก.16)$$

$$f_{ij} \in Z^+, \quad \forall ij \in L \quad (ก.17)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นวิธี LT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.10) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) – (ก.4) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้หาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.11) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กึ่งเชิงแสงของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.12) เป็นเงื่อนไขของปัญหาที่ใช้บังคับให้ความจุของสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.13) จะกำหนดให้แต่ละมัลติคาสต์เซสชันเลือกความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียว และความยาวคลื่นนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางทางกายภาพที่เลือกจากเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.11) ซึ่งแสดงได้ดังเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.14) ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.15) – (ก.17) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นตัวแปรแบบบูล (boolean variable) และจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

ก.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายได้รับความเสียหาย

เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นในโครงข่าย ทราฟฟิกในโครงข่ายจะถูกจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น โดยสามารถแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่าง ๆ ดังนี้

ก.5.1 กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (Physical Branch Fixed)

กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} s_{ij} \quad (ก.18)$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) , (ก.6) - (ก.8) และ

$$\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p}^{sd} \delta_{ij, p}^{sd} = \sum_{q \in Q} b_{r_k, q}^{ij} \pi_q \quad \forall r_k \in R, \forall ij \in L \quad (ก.19)$$

$$(Sw_{r_k, ij}^q + b_{r_k, q}^{ij}) \pi_q \geq b_{r_k, q}^{ij'} \pi_{q'} \quad \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.20)$$

$$M \times s_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{q \in Q} Sw_{r_k, ij}^q \pi_q \geq 0 \quad \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.21)$$

$$b_{r_k, q}^{ij} \in Z^+ \quad \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L \quad (ก.22)$$

$$Sw_{r_k, ij}^q \in Z^+ \quad \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.23)$$

$$s_{ij} \in Z^+ \quad \forall ij \in L \quad (ก.24)$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นสำหรับการป้องกันโครงข่ายแบบ PBF แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.18) คือเพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.1) - (ก.4) และ (ก.6) ที่ใช้คำนวณหาวิธีทำงานของแต่ละมัลติคาสต์เซชันในโครงข่าย ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.19) แสดงวิธีทำงานในสภาวะปกติของโครงสร้างต้นไม่เชิงแสง r_k ซึ่งช่องสัญญาณของวงแหวน q ถูกกำหนดให้ครอบคลุมข่ายเชื่อมโยง ij ในระหว่างที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย เงื่อนไขบังคับที่ (ก.20) ถูกนำมาใช้คำนวณหาช่องสัญญาณสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของวงแหวน q โดยจำนวนช่องสัญญาณสำรองต้องมีจำนวนมากพอที่จะรองรับวิธีทำงานสำหรับการเกิดความ

เสียหายใด ๆ ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.20) และ (ก.21) ใช้คำนวณหาเส้นใยนำแสงสำรองที่ต้องการสำหรับวิธีบูรณะ ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.22) – (ก.24) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้ มีค่าจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} s_{ij} \quad (ก.25)$$

และมีเงื่อนไขบังคับสมการที่ (ก.1) - (ก.4), (ก.11), (ก.12), (ก.14) และ

$$\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p, \lambda}^{sd} \delta_{ij, p, \lambda}^{sd} = \sum_{q \in Q} b_{r_k, q, \lambda}^{ij} \pi_q^{ij} \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R, \forall ij \in L \quad (ก.26)$$

$$(Sw_{r_k, ij, \lambda}^{q, ij'} + b_{r_k, q, \lambda}^{ij}) \pi_q^{ij} \geq b_{r_k, q, \lambda}^{ij'} \pi_q^{ij'} \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \\ \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.27)$$

$$s_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{q \in Q} Sw_{r_k, ij, \lambda}^{q, ij'} \pi_q^{ij} \geq 0 \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.28)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{r_k, \lambda} = t_{r_k} \quad \forall r_k \in R \quad (ก.29)$$

$$b_{r_k, q, \lambda}^{ij} \leq I_{\infty} \times W_{r_k, \lambda} \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall q \in Q, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (ก.30)$$

$$W_{r_k, \lambda} \in \{0, 1\}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R \quad (ก.31)$$

$$b_{r_k, q, \lambda}^{ij} \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L \quad (ก.32)$$

$$Sw_{r_k, ij, \lambda}^{q, ij'} \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \\ \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \quad (ก.33)$$

$$s_{ij} \in Z^+ \quad \forall ij \in L \quad (ก.34)$$

ก.5.2 กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (Optical Mesh Protection)

กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} s_{ij} \quad (ก.35)$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) , (ก.6) - (ก.8) และ

$$\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p}^{sd} \delta_{ij, p}^{sd} = \sum_{q \in Q} b_{r_k, q}^{ij} \pi_q^{ij} \quad \forall r_k \in R, \forall ij \in L \quad (ก.36)$$

$$Rw_{r_k, ij}^{kl} \pi_q^{kl} \geq b_{r_k, q}^{ij} \pi_q^{ij} \quad \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L - \{kl\}, \forall kl \in L \quad (ก.37)$$

$$H_{r_k}^{ij} - \sum_{q \in Q} R w_q^{ij} \pi_q^{ij} \geq 0 \quad \forall r_k \in R, \forall ij \in L \quad (ก.38)$$

$$M \times s_{ij} - \sum_{r_k \in R} H_{r_k}^{ij} \geq 0 \quad \forall ij \in L \quad (ก.39)$$

$$b_{r_k, q}^{ij}, R w_q^{ij} \in Z^+ \quad \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L \quad (ก.40)$$

$$H_{r_k}^{ij} \in Z^+ \quad \forall r_k \in R, \forall ij \in L \quad (ก.41)$$

$$s_{ij} \in Z^+ \quad \forall ij \in L \quad (ก.42)$$

กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP มีลักษณะการใช้แนววิถ่วงแหวนหลายวง เช่นเดียวกับกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF โดยโครงข่ายจะสำรองช่องสัญญาณเฉพาะ (dedicated) สำหรับแต่ละมัลติคาสต์เซสชันทั้งกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติและกรณีเกิดความเสียหาย ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.35) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.1) – (ก.4) และ (ก.6) ที่ใช้คำนวณหาวิธีทำงานของแต่ละมัลติคาสต์เซสชันในโครงข่าย

เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.36) เป็นการกำหนดช่องสัญญาณสำรองที่ครอบคลุมวิธีทำงานในสภาวะปกติของโครงข่ายต้นไม้มัลติคาสต์เช่นเดียวกับเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.19) ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF โดยจำนวนช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพทั้งหมดของวงแหวน q เหมือนกับโครงข่ายต้นไม้มัลติคาสต์ในวิธีทำงาน ดังนั้น การคำนวณหาช่องสัญญาณ $R w_q^{ij}$ ที่ข่ายเชื่อมโยง ij ต้องการของวงแหวน q เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.37) ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.38) ใช้คำนวณหาช่องสัญญาณ $H_{r_k}^{ij}$ ที่ข่ายเชื่อมโยง ij ต้องการสำหรับโครงข่ายเมชเชิงแสงของมัลติคาสต์เซสชัน r_k ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.39) ใช้คำนวณหาจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงของข่ายเชื่อมโยง ij เพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย และเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.40) – (ก.42) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} s_{ij} \quad (ก.43)$$

และมีเงื่อนไขบังคับสมการที่ (ก.1) - (ก.4), (ก.11), (ก.12), (ก.14) และ

$$\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k, p, \lambda}^{sd} \delta_{ij, p, \lambda}^{sd} = \sum_{q \in Q} b_{r_k, q, \lambda}^{ij} \pi_q^{ij} \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R, \forall ij \in L \quad (ก.44)$$

$$Rw_{q, \lambda}^{kl} \pi_q^{kl} \geq b_{r_k, q, \lambda}^{ij} \pi_q^{ij} \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \\ \forall ij \in L - \{kl\}, \forall kl \in L \quad (ก.45)$$

$$H_{r_k, \lambda}^{ij} - \sum_{q \in Q} R w_{q, \lambda}^{ij} \pi_q^{ij} \geq 0 \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R, \forall ij \in L \quad (ก.46)$$

$$s_{ij} - \sum_{r_k \in R} H_{r_k, \lambda}^{ij} \geq 0 \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall ij \in L \quad (ก.47)$$

$$\sum_{\lambda=1}^M W_{r_k, \lambda} = t_{r_k} \quad \forall r_k \in R \quad (ก.48)$$

$$b_{r_k, q, \lambda}^{ij} \leq I_{\infty} \times W_{r_k, \lambda} \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall q \in Q, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \quad (ก.49)$$

$$W_{r_k, \lambda} \in \{0, 1\}, \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R \quad (ก.50)$$

$$b_{r_k, q, \lambda}^{ij}, R w_{q, \lambda}^{ij} \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L \quad (ก.51)$$

$$H_{r_k, \lambda}^{ij} \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, \dots, M\}, \forall r_k \in R, \forall ij \in L \quad (ก.52)$$

$$s_{ij} \in Z^+ \quad \forall ij \in L \quad (ก.53)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอนุชิต มั่นจิรังกูร เกิดวันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ.2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปีการศึกษา 2542 สำเร็จการศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย