

รหัสโครงการ SUT7-709-57-12-13



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น
ภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก
(Development of traffic planning techniques for energy efficiency in
IP over WDM networks under traffic uncertainty)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-709-57-12-13



รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น
ภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก
(Development of traffic planning techniques for energy efficiency in
IP over WDM networks under traffic uncertainty)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุติมา พรหมมาก

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

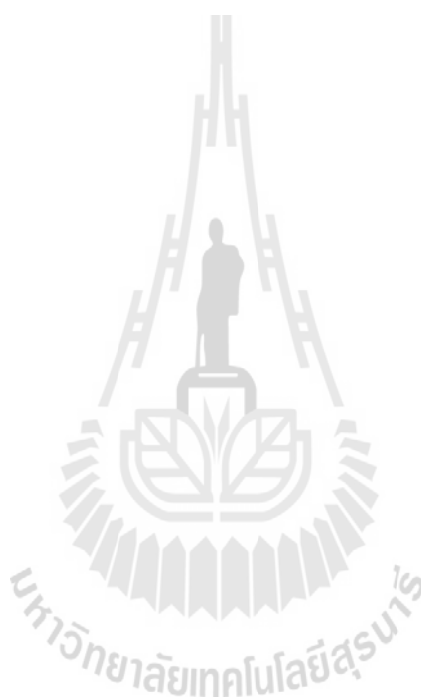
กรกฎาคม 2559

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ช่วยให้งานวิจัยนี้เสร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณศูนย์คอมพิวเตอร์ และ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการวิจัย ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในการให้ทุนสนับสนุนการวิจัย และให้งบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย ณ การประชุมวิชาการนานาชาติ

ผู้วิจัย

กรกฎาคม 2559



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวางแผนการส่งทราฟฟิก เพื่อกำหนดเส้นทางในการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM โดยมีการพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอน ความแปรปรวนของทราฟฟิก เพื่อปรับปรุงเรื่องการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิกผ่านอุปกรณ์เครือข่ายให้มีประสิทธิภาพ โดยเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) และได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ในการหาคำตอบสำหรับสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

นวัตกรรมของงานวิจัยนี้ได้แก่การพัฒนาเทคนิคการวางแผนการส่งทราฟฟิก เพื่อกำหนดเส้นทางในการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ที่ทำให้มีการใช้พลังงานในเครือข่ายที่ลดลง และสามารถเตรียมแบนด์วิธของข่ายเชื่อมโยงสำหรับรองรับทราฟฟิกที่มีความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิกในระดับที่กำหนดได้

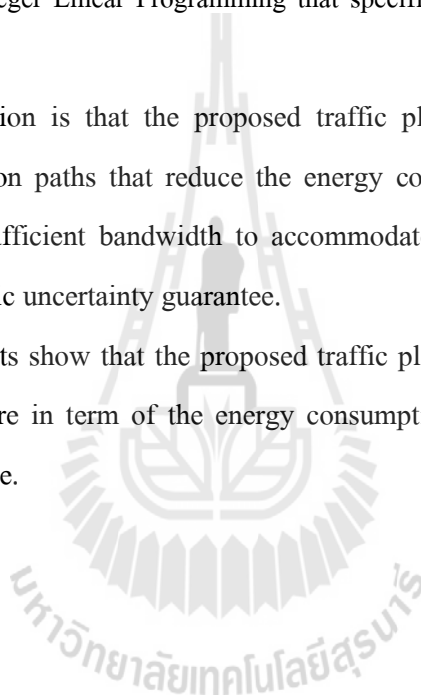
จากผลการทดลองวางแผนการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM แบบต่างๆ ด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น พบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถช่วยเพิ่มสมรรถนะการส่งทราฟฟิกผ่านเครือข่าย IP over WDM ได้ ทั้งในด้านการลดพลังงานที่ใช้ในเครือข่าย การเพิ่มความสมดุลของทราฟฟิกภายในข่ายเชื่อมโยงของเครือข่าย และการเตรียมแบนด์วิธที่เพียงพอในข่ายเชื่อมโยงสำหรับรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีลักษณะไม่คงที่มีความแปรปรวน

Abstract

This research presents a study and development of traffic planning techniques for energy efficiency in IP over WDM networks under traffic uncertainty consideration. The aim is to improve the traffic transmission in the IP over WDM networks in term of the energy consumption and the traffic balancing across the network's links. The proposed traffic planning techniques applied the Integer Linear Programming that specifically takes into account the traffic uncertainty characteristics.

Our key contribution is that the proposed traffic planning techniques can yield the efficient traffic transmission paths that reduce the energy consumption of the IP over WDM equipment and provide sufficient bandwidth to accommodate the variation of the amount of traffic at the specified traffic uncertainty guarantee.

Experimental results show that the proposed traffic planning techniques outperform the other technique in literature in term of the energy consumption, the traffic balancing and the traffic uncertainty guarantee.



สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ทฤษฎี และกรอบแนวความคิดของ โครงการวิจัย	5
2.3 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.4 การจัดการทราฟฟิกของเครือข่ายเชิงแสง	8
2.5 ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก	11
บทที่ 3 เทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายไอพีบนการ มัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก	
3.1 แนวคิดในการวางแผนเครือข่าย IP over WDM เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ	14
3.2 การกำหนดปัญหาการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์.....	18
3.3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	20
3.3.2 สมการเงื่อนไข.....	23
3.4 วิธีหาคำตอบสำหรับสมการที่พัฒนาขึ้น.....	25
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผล	
4.1 การใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิกบนเครือข่าย IP over WDM.....	28
4.2 การทดลองวางแผนกราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM.....	30
4.2.1 ตัวอย่างเส้นทางในการส่งกราฟฟิกที่ได้.....	32
4.2.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบของ Multi-Objective Optimization Model.....	34
4.3 การศึกษาผลกระทบของปริมาณกราฟฟิกที่ส่งภายในเครือข่ายต่อลักษณะความสมดุลของกราฟฟิกและการใช้พลังงานของเครือข่าย.....	40
4.3.1 ผลการทดลองกรณีเครือข่าย NSFNET.....	40
4.3.2 ผลการทดลองกรณีเครือข่าย COST239.....	43
4.4 การเปรียบเทียบเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้กับเทคนิคอื่น.....	46
บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	49
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก ก. ปริมาณกราฟฟิกที่ใช้ในการทดลอง.....	54
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	60
ประวัติผู้วิจัย.....	61

สารบัญภาพ

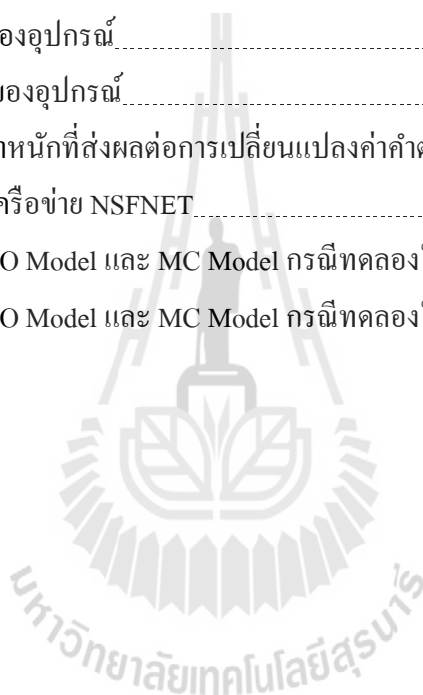
หน้า

รูปที่ 2.1 องค์ประกอบที่มีส่วนในการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM.....	5
รูปที่ 2.2 สถาปัตยกรรมเครือข่ายเชิงแสง.....	9
รูปที่ 2.3 ลักษณะความแปรปรวนของปริมาณกราฟฟิก.....	12
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น.....	17
รูปที่ 3.2 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....	26
รูปที่ 4.1 การใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM.....	29
รูปที่ 4.2 โครงสร้างเครือข่าย NSFNET (ความยาวของสายเชื่อมโยงหน่วยเป็น km.).....	30
รูปที่ 4.3 เส้นทางสำหรับส่งกราฟฟิกจาก โหนดที่ 2 ไปยัง โหนดที่ 9 เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักเปลี่ยนแปลง.....	33
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย NSFNET กรณีการรับประกันความไม่แน่นอน กราฟฟิกที่ 90%.....	41
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย NSFNET กรณีการรับประกันความไม่แน่นอน กราฟฟิกที่ 99%.....	42
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย NSFNET กรณีการรับประกันความไม่แน่นอน กราฟฟิกที่ 90% และ 99%.....	42
รูปที่ 4.7 โครงสร้างเครือข่าย COST239.....	43
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย COST239 กรณีการรับประกันความไม่แน่นอน กราฟฟิกที่ 90%.....	44
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย COST239 กรณีการรับประกันความไม่แน่นอน กราฟฟิกที่ 99%.....	45
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย COST239 กรณีการรับประกันความไม่แน่นอน กราฟฟิกที่ 90% และ 99%.....	45

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 การแปลงสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีของเฟสที่ 1 เป็นคำสั่งใน โปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio.....	27
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนกราฟิก.....	31
ตารางที่ 4.2 การใช้พลังงานของอุปกรณ์.....	31
ตารางที่ 4.3 ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์.....	32
ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสอง วัตถุประสงค์ในเครือข่าย NSFNET.....	37
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบ MOO Model และ MC Model กรณีทดลองในเครือข่าย NSFNET.....	47
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบ MOO Model และ MC Model กรณีทดลองในเครือข่าย COST239.....	48



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายแกนหลักประเภทไอพินบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing: IP over WDM) เป็นเรื่องที่ได้รับการสนใจมาก [1-4] เนื่องจากในทุก ๆ ปีจะมีแนวโน้มการใช้งานทรัพยากรเครือข่ายที่เพิ่มขึ้น จากข้อมูลในปี 2009 การใช้พลังงานของเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (Information and Communication Technology: ICT) ใช้พลังงานไฟฟ้าถึง 8% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั่วโลก [5] และคาดว่าในปี 2016 จะมีการใช้พลังงานในด้านนี้เพิ่มขึ้นจนถึง 16% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั่วโลก [6] จากสถานะการใช้พลังงานของเครือข่ายที่เพิ่มมากขึ้นนี้ จึงควรมีการพิจารณาเรื่องวางแผนการใช้งานเครือข่าย เพื่อให้มีการใช้พลังงานของเครือข่ายการสื่อสารอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การใช้พลังงานของเครือข่ายการสื่อสารเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการใช้งานอินเทอร์เน็ตที่มีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปริมาณทราฟฟิกในเครือข่ายเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่าย โดยเฉพาะในเครือข่ายแกนหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวางแผนการใช้งานทรัพยากรเครือข่ายอย่างเหมาะสม เพื่อให้การใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่ายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ช่วยประหยัดพลังงานซึ่งจะนำไปสู่การช่วยลดภาวะโลกร้อนอย่างเช่นปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) ได้อีกด้วย

เครือข่าย IP over WDM เป็นสถาปัตยกรรมเครือข่ายแกนหลักที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และมีแนวโน้มว่าจะได้รับความนิยมต่อไปในอนาคต [7] เครือข่ายดังกล่าวมีส่วนประกอบหลักคือส่วนของ IP layer และ WDM layer โดยที่ IP layer ใช้ IP router ในการกำหนดหรือเลือกเส้นทางที่จะส่งข้อมูลเข้าสู่เครือข่าย ในขณะที่ WDM layer นั้นประกอบด้วย Optical Cross-Connects (OXC) ที่เชื่อมต่อกันด้วย fiber optic link ซึ่งในการใช้พลังงานสำหรับสถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM นี้ เกิดขึ้นในส่วนของอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนของออปติก โดยการใช้พลังงานในส่วนของอิเล็กทรอนิกส์ หรือเรียกได้ว่าเป็นการใช้พลังงานในส่วนของ IP layer จะเกิดขึ้นที่ routers เพื่อการจัดการทราฟฟิก ในขณะที่การใช้พลังงานในส่วนของออปติกหรือเรียกได้ว่าเป็นการใช้พลังงานในส่วนของ WDM layer จะมีการใช้พลังงานในส่วนของการสวิตช์สัญญาณ และการทวนสัญญาณ และสิ่งหนึ่งที่เป็นปัจจัย

สำคัญสำหรับการใช้พลังงานของเครือข่ายก็คือปริมาณทราฟฟิกในเครือข่าย ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ในเครือข่าย ซึ่ง ทราฟฟิกในเครือข่ายนี้มีลักษณะที่ไม่แน่นอน มีความแปรปรวนขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้งานของผู้ใช้ ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกนี้เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาประกอบด้วยในการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่ายแกนหลักประเภท IP over WDM [8-11]

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงได้เสนอการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการวางแผนทราฟฟิก เพื่อกำหนดเส้นทางในการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM โดยจะมีการพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอน ความแปรปรวนของทราฟฟิก เพื่อปรับปรุงเรื่องการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิกผ่านอุปกรณ์เครือข่ายให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ซึ่งเทคนิคที่ได้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่ายแกนหลักประเภท IP over WDM ได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงาน และโครงสร้างของเครือข่าย IP over WDM และศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย
2. เพื่อออกแบบกรอบวิธี และพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่าย IP over WDM โดยพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกด้วย
3. เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบและประเมินคุณภาพการวางแผนทราฟฟิกที่ได้จากเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาหลักการทำงาน และโครงสร้างของเครือข่าย IP over WDM
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM
3. ออกแบบกรอบวิธีและพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่าย IP over WDM โดยพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกด้วย
4. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่าย IP over WDM
5. ทำการทดลอง วิเคราะห์เปรียบเทียบ และประเมินคุณภาพการวางแผนทราฟฟิกที่ได้จากเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาหลักการทํางาน และโครงสร้างของเครือข่าย IP over WDM และศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย
2. ศึกษาและสำรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการวางแผนทราฟฟิกที่เน้นวิธีการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ความแปรปรวนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM
3. ออกแบบกรอบวิธี และเกณฑ์การวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกด้วย
4. พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนทราฟฟิกตามกรอบวิธีที่ได้จากการออกแบบ
5. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับการวางแผนทราฟฟิก
6. ทําทดลอง วิเคราะห์เปรียบเทียบ และประเมินคุณภาพการวางแผนทราฟฟิกที่ได้จากเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับ : ได้เทคนิคการวางแผนทราฟฟิกไอพีในเครือข่ายใยแก้วนำแสงที่มีการมัลติเพรสซิ่งเชิงความยาวคลื่น เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกด้วย ซึ่งเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนี้จะป็นองค์ความรู้ในการวิจัยและการประยุกต์ใช้ต่อไป นอกจากนี้ยังได้บทความวิจัยที่มีคุณค่าทางวิชาการต่อวงการศึกษาศึกษาและวิจัย และได้ผลิตนักวิจัยซึ่งเป็นบัณฑิตระดับปริญญาโทที่มีคุณภาพ และมีประสบการณ์ในการทำงานวิจัยซึ่งสามารถผลิตผลงานที่มีประโยชน์ได้

หน่วยงานที่สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ สถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยที่มีความสนใจเกี่ยวกับการวางแผนทราฟฟิกไอพีในเครือข่ายใยแก้วนำแสงที่มีการมัลติเพรสซิ่งเชิงความยาวคลื่น รวมถึงหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ที่ทำหน้าที่ดูแลและควบคุมระบบการทำงานของ การส่งทราฟฟิกไอพีผ่านเครือข่ายใยแก้วนำแสงที่มีการมัลติเพรสซิ่งเชิงความยาวคลื่น

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

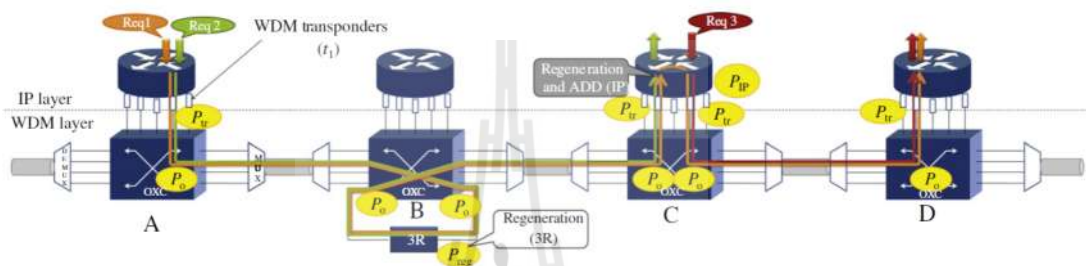
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและหลักการทำงานของเครือข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing : IP over WDM) โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 2.1 กล่าวนำ หัวข้อ 2.2 ทฤษฎี และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย หัวข้อ 2.3 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อ 2.4 การจัดการกราฟฟิกของเครือข่ายเชิงแสง และหัวข้อ 2.5 ความไม่แน่นอนของกราฟฟิก

2.1 กล่าวนำ

เครือข่าย IP over WDM เป็นสถาปัตยกรรมเครือข่ายแกนหลักที่มีส่วนประกอบหลักคือ ส่วนของชั้นไอพี (IP layer) ซึ่งมีอุปกรณ์จัดเส้นทางหรือเราท์เตอร์ (routers) ที่ใช้ในการกำหนดหรือเลือกเส้นทางที่จะใช้ส่งข้อมูลนั้นเข้าสู่ภายในเครือข่าย ในขณะที่ชั้นของการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (WDM layer) นั้นประกอบด้วยอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (Optical Cross-Connects : OXCs) ที่เชื่อมต่อกันด้วยสายเชื่อมโยงนำแสง (optical fiber link) ซึ่งในการใช้พลังงานสำหรับสถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM นี้เกิดขึ้น ในส่วนของการดำเนินการทางอิเล็กทรอนิกส์ (สัญญาณ ไฟฟ้า) และส่วนของการดำเนินการเชิงแสง (สัญญาณแสง) โดยการใช้พลังงานในส่วนของอิเล็กทรอนิกส์หรือเรียกได้ว่าเป็นการใช้พลังงานในส่วน of ชั้น IP ซึ่งมีการใช้พลังงานที่สูงมากที่เร้าเตอร์ เพื่อการจัดสรรกราฟฟิกที่ต้องการขนส่งภายในเครือข่าย ในขณะที่การใช้พลังงานในส่วนของการดำเนินการเชิงแสงหรือเรียกได้ว่าเป็นการใช้พลังงานในส่วน of ชั้น WDM มีการใช้พลังงานในส่วนของการสลับช่องสัญญาณทางแสง การขยายสัญญาณและการทวนสัญญาณ ซึ่งมีหลาย ๆ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงาน ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับการใช้พลังงานของเครือข่ายนั้นก็คือปริมาณกราฟฟิกในเครือข่าย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ในเครือข่าย ซึ่งกราฟฟิกในเครือข่ายมีลักษณะที่ไม่แน่นอนมีความแปรปรวน ดังนั้นความไม่แน่นอนของกราฟฟิกจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ควรพิจารณาเพื่อให้มีการวางแผนกราฟฟิกในเครือข่ายแกนหลักประเภท IP over WDM ได้อย่างเหมาะสม

2.2 ทฤษฎี และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เครือข่ายแกนหลักที่ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไอพีผ่านระบบส่งสัญญาณใยแก้วนำแสงเช่น เทคโนโลยี IP over WDM มีบทบาทสำคัญในการรองรับกราฟฟิกรอเตอร์เน็ตที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1, 2] ส่งผลต่อแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานของเครือข่าย โดยส่วนที่มีผลต่อการใช้พลังงานของเครือข่าย IP over WDM มีอยู่หลายองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วย WDM transponders, Electronic Processing, 3R-regenerators และ Optical switching [3, 4]



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบที่มีส่วนในการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM

1) WDM transponders เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณของระบบส่งสัญญาณใยแก้วนำแสง ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า (Optical to Electrical: OE) และแปลงสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแสง (Electrical to Optical: EO) การใช้พลังงานของ WDM transponders แทนด้วยสัญลักษณ์ P_{tr} ในรูปที่ 2.1

2) Electronic Processing เป็นการใช้พลังงานในการประมวลผลทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะมีการใช้พลังงานเกิดขึ้นเมื่อมีการดำเนินการกำหนดเส้นทางหรือการดำเนินงานกรูมมิ่ง (grooming) กราฟฟิกรอเตอร์เน็ตทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะมีการใช้พลังงานในการประมวลผลกราฟฟิกรอเตอร์เน็ตสำหรับ IP router ซึ่งยังรวมถึงการใช้พลังงานในการทวนสัญญาณ (signal regeneration) ที่ IP router ด้วย จากรูปที่ 2.1 การใช้พลังงานของส่วนนี้แทนด้วยสัญลักษณ์ P_{IP}

3) 3R-regenerators เป็นส่วนของการทวนสัญญาณใน WDM layer ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการปรับเวลาในการเข้ารหัสสัญญาณ (re-timing), การขยายสัญญาณ (re-amplification) และการทวนรูปร่างสัญญาณ (re-shaping) ด้วยเหตุนี้จึงเรียกว่า 3R ซึ่งจะมีการใช้พลังงานเมื่อมีการปรับปรุงสัญญาณในโดเมนทางแสง จากรูปที่ 2.1 การใช้พลังงานของส่วนนี้แทนด้วยสัญลักษณ์ P_{reg}

4) Optical switching เป็นส่วนที่ทำการสวิตช์ทางแสงโดยมีอุปกรณ์ประเภท Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) ซึ่งเป็นระบบขนาดเล็กตั้งแต่ 1 ไมโครเมตรถึง 1 มิลลิเมตรที่รวม

โครงสร้างทางกลและวงจรอิเล็กทรอนิกส์เข้าด้วยกัน เป็นส่วนประกอบภายใน Optical Cross Connects (OXC) จากรูปที่ 2.1 การใช้พลังงานของ OXC แทนด้วยสัญลักษณ์ P_o

นอกจากการพิจารณาเรื่องการใช้พลังงานในส่วนต่างๆของอุปกรณ์ในเครือข่ายแล้ว ในการวางแผนทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ควรให้ความสำคัญในเรื่องคุณลักษณะของทราฟฟิกด้วย เนื่องจากปริมาณของทราฟฟิกไอพีในช่วงเวลาต่างๆจะไม่คงที่ มีความแปรปรวน ลักษณะดังกล่าวเรียกว่า ความไม่แน่นอนของ ทราฟฟิก (traffic uncertainty) ซึ่งทำให้เกิดความไม่แน่นอนของขนาดแบนด์วิดท์ที่ต้องใช้ในเส้นทางสื่อสารที่เชื่อมระหว่าง โหนดต้นทางถึง โหนดปลายทาง

งานวิจัย [5, 6] ทำการสังเกต เก็บข้อมูล และวิเคราะห์ทราฟฟิกไอพีในโครงข่ายแกนหลักทางสถิติ พบว่าเมื่อทราฟฟิกจากหลายเส้นทางมาผ่านข่ายเชื่อมโยง (link) เดียวกัน ซึ่งเรียกว่า ทราฟฟิกที่รวมตัวกัน (aggregated traffic demand) ทราฟฟิกที่รวมตัวกันดังกล่าวมีลักษณะการกระจายแบบ Gaussian [5, 6] ดังนั้นการวางแผนเส้นทางสำหรับโครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกที่มีลักษณะดังกล่าว หากใช้วิธีการที่พิจารณาค่าเฉลี่ยของทราฟฟิก (mean traffic value) ก็อาจทำให้แบนด์วิดท์ที่จองให้กับเส้นทางสื่อสารไม่เพียงพอที่จะรองรับกรณีที่ทราฟฟิกแปรปรวนจนอาจมีปริมาณทราฟฟิกสูงเกินกว่าขนาดแบนด์วิดท์ที่จองไว้ ส่วนวิธีการที่พิจารณาค่าสูงสุดของ ทราฟฟิก (peak traffic value) จะมีการจองแบนด์วิดท์ไว้เท่ากับค่าสูงสุดของทราฟฟิกตามสถิติ ซึ่งขนาดของแบนด์วิดท์ดังกล่าวอาจมากกว่าขนาดของแบนด์วิดท์ที่ใช้ในวิธีที่พิจารณาค่าเฉลี่ยของทราฟฟิกอยู่มาก แต่โอกาสที่ทราฟฟิกจะมีระดับสูงขนาดนั้นเป็นไปได้น้อย ดังนั้นการจองแบนด์วิดท์เท่ากับค่าสูงสุดของทราฟฟิกจึงเป็นการใช้งานทรัพยากรเครือข่าย ซึ่งในที่นี้คือแบนด์วิดท์อย่างไม่คุ้มค่า ดังนั้นในการกำหนดเส้นทางและจองแบนด์วิดท์ที่เหมาะสมที่สุดให้กับทราฟฟิกในเครือข่ายแกนหลักที่รองรับทราฟฟิกไอพีด้วยเทคโนโลยี IP over WDM จึงต้องคำนึงถึงลักษณะทางสถิติของทราฟฟิกที่รวมตัวกัน โดยพิจารณาค่าเฉลี่ย (mean) และค่าความแปรปรวน (variance) ของทราฟฟิก และไม่ทำการจองแบนด์วิดท์มากเกินความจำเป็น แต่สามารถกำหนดระดับการรับประกัน (guarantee level) ในการจองแบนด์วิดท์ที่เพียงพอเพื่อให้สามารถรองรับความแปรปรวนของทราฟฟิกได้

ในการปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM นั้น นักวิจัยได้พิจารณาเรื่องการใช้พลังงานในส่วนต่างๆของอุปกรณ์เครือข่ายดังกล่าว ร่วมกับการพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกไอพี และได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ สำหรับการกำหนดเส้นทางส่งทราฟฟิกที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้ทำการพิจารณาการใช้พลังงานของ

อุปกรณ์เครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพด้วย โดยพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถให้อยู่ในรูปของ Linear integer programming ดังแสดงในบทที่ 3

2.3 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาปรัชญ่วรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่างานวิจัยเกี่ยวกับการวางแผนทราฟฟิกเพื่อกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดให้กับทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยได้มีการศึกษาเรื่องการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิกผ่านอุปกรณ์ในเครือข่าย [3, 7-9] ซึ่งได้เสนอวิธีการที่ใช้ Deterministic approaches ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธี (algorithms) หรือ การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ (mathematical formulations) ที่มีสมมติฐานว่าผู้วางแผนทราฟฟิกรู้ปริมาณที่แน่นอนของทราฟฟิกภายในเครือข่าย โดยทำการสร้างเส้นทางและจองแบนด์วิดท์ไว้แบบถาวร แนวทางดังกล่าวไม่ได้พิจารณาความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนของทราฟฟิกซึ่งถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของทราฟฟิกที่ส่งผ่านระบบสื่อสารภายในโครงข่ายแกนหลักที่ใช้เทคโนโลยีแบบ IP over WDM โดยในงานวิจัยที่ [7] ได้มีการนำเสนอวิธีการประหยัดพลังงานสำหรับเครือข่าย IP over WDM ด้วยการปิด line card และ chassis ของ router ที่ไม่มีการใช้งาน โดยการปิดอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับปริมาณทราฟฟิกในแต่ละช่วงเวลา และยังมีข้อเสนอแนะเพื่อลดการหยุดชะงักของทราฟฟิกที่อาจเกิดขึ้นเมื่อมีการปิดการใช้งานอุปกรณ์ งานวิจัยที่ [8] ได้ทำการศึกษาการใช้พลังงานสำหรับเครือข่าย IP over WDM ด้วยการพิจารณาสัดส่วนพลังงานในการขนส่งทราฟฟิกของอุปกรณ์เครือข่าย โดยมีการพิจารณาถึง Optical Cross-Connect (OXC) ที่มีรูปแบบที่แตกต่างกัน งานวิจัยที่ [3] ได้ทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานของเครือข่าย IP over WDM ที่มีโครงสร้างสถาปัตยกรรมที่แตกต่างกัน ซึ่งในการวิเคราะห์นี้ได้พิจารณาพลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานเครือข่ายด้วยการประเมินการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในส่วนของ transport layer โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้พลังงานน้อยที่สุดเพื่อความเหมาะสมในการเลือกใช้งานสถาปัตยกรรมเครือข่าย และในงานวิจัยที่ [9] ได้วิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานสำหรับโครงข่ายทางกายภาพของ IP over WDM ร่วมกับการพิจารณาพลังงานแฝงหรือพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการใช้งานอุปกรณ์เครือข่าย และได้มีการประเมินการใช้พลังงานร่วมกับการบีบอัดข้อมูลในเครือข่ายด้วย

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาจะให้ความสำคัญเกี่ยวกับการศึกษาเรื่องการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่าย IP over WDM และได้มีการพัฒนาเทคนิคการวางแผนการส่งทราฟฟิกภายในเครือข่าย ที่คำนึงถึงเรื่องการใช้พลังงานของเครือข่าย แต่ก็ยังไม่ได้พิจารณาคุณลักษณะของทราฟฟิกไอพีที่มีความไม่แน่นอน มีปริมาณการใช้ที่แปรปรวน ซึ่งที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่พิจารณาประเด็นนี้ในการ

วางแผนเครือข่าย [10-13] แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวก็มุ่งเน้นเรื่องการลดต้นทุนเครือข่ายให้น้อยที่สุด (minimize network cost) โดยยังไม่ได้พิจารณาเรื่องการใช้พลังงานเครือข่ายของอุปกรณ์เครือข่าย ดังนั้นโครงการวิจัยที่นำเสนอนี้จึงได้มุ่งที่จะศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวางแผนกราฟฟิคที่มีการพิจารณาเรื่องประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการส่งกราฟฟิคผ่านอุปกรณ์เครือข่าย ร่วมกับการพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอน ความแปรปรวนของกราฟฟิค เพื่อปรับปรุงวิธีการวางแผนกราฟฟิคในเครือข่าย IP over WDM ให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2.4 การจัดการกราฟฟิคของเครือข่ายเชิงแสง

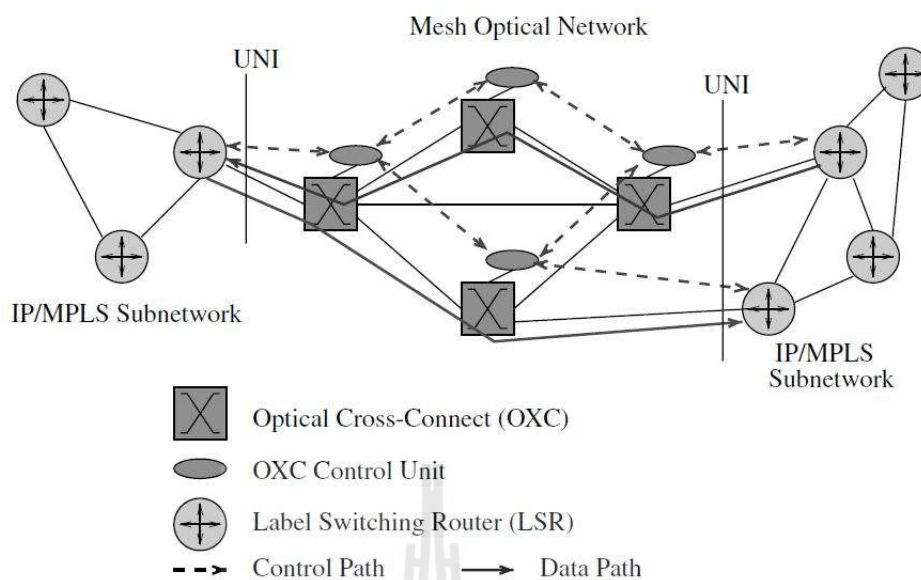
ในการสร้างเครือข่ายเชิงแสงที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ มีปัจจัยในด้านของนามธรรมสำหรับเครือข่ายทั่วไปและเครือข่ายเชิงแสงอยู่ 3 องค์ประกอบคือ

1. การวัดหรือการประมาณปริมาณกราฟฟิค โดยทั่วไปนั้นจะแสดงเป็นเมตริก (traffic matrix)
2. มีชุดของข้อจำกัดต่าง ๆ ซึ่งเป็นรูปแบบของจำนวนสายใยแก้วนำแสง ความจุของข่ายเชื่อมโยง ขนาดของ OXC และอุปกรณ์เชิงแสงอื่น ๆ ที่ใช้งาน
3. มีนโยบายการควบคุมการส่งสัญญาณภายในเครือข่าย IP over WDM ซึ่งประกอบด้วยโปรโตคอลข้อกำหนดต่าง ๆ และกลไกที่ใช้ในการดำเนินการหรือควบคุมโมดูล OXC

ในการสร้างเครือข่ายเชิงแสงนี้ เพื่อให้มีการออกแบบและการดำเนินงานของเครือข่าย WDM ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น (routing and wavelength assignment : RWA) จึงมีบทบาทที่สำคัญสำหรับการดำเนินงานเพื่อรองรับกราฟฟิคที่ต้องการขนส่งในเครือข่าย

2.4.1 การกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น

รูปที่ 2.2 แสดงเครือข่าย WDM ซึ่งประกอบด้วย เส้นทางแสง (lightpath) ซึ่งเกิดจากการเลือกเส้นทางของ physical link ระหว่างโหนดต้นทางและปลายทาง และสำรองความยาวคลื่นในแต่ละข่ายเชื่อมโยงสำหรับเส้นทางแสง (lightpath) ดังนั้นการสร้างเส้นทางแสงจึงมีประเด็นที่ต้องพิจารณาคือ ปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น ซึ่งงานวิจัย [14] โดย Zang, H., Jue, J. P., and Mukherjee, B. (2000) ได้กล่าวถึงพิจารณาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น โดยมีข้อจำกัดดังนี้



รูปที่ 2.2 สถาปัตยกรรมเครือข่ายเชิงแสง [1]

1. ข้อจำกัดความต่อเนื่องของความยาวคลื่นของเส้นทางแสง (lightpath) คือ ในทุกข่ายเชื่อมโยง ต้องใช้ความยาวคลื่นเดิมตลอดการเชื่อมต่อหนึ่งเส้นทางจากโหนดต้นทางถึงปลายทาง

2. ข้อจำกัดความแตกต่างของความยาวคลื่น คือ ทุกๆ เส้นทางแสง (lightpath) ที่ใช้ข่ายเชื่อมโยงเดียวกัน ต้องได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

ซึ่งข้อจำกัดความต่อเนื่องความยาวคลื่นนั้นสามารถแก้ปัญหาได้ ถ้า OXC มีการติดตั้งตัวแปลงความยาวคลื่น โดยตัวแปลงความยาวคลื่นเป็นอุปกรณ์ที่จะสามารถแปลงความยาวคลื่นของแสงที่เข้ามาทางอินพุตเป็นความยาวคลื่นอื่นและส่งออกปลายทางเอาต์พุต ข้อได้เปรียบในการแปลงความยาวคลื่นทำให้ในการสร้างเส้นทางแสง (lightpath) ตลอดข่ายเชื่อมโยงจากต้นทางถึงปลายทางมีความยาวคลื่นอย่างอิสระ เป็นผลให้ปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นลดลง โดยที่การแปลงความยาวคลื่น ทำให้เกิดความยาวคลื่นที่จะซ้ำกันลดลง เป็นผลให้สามารถให้การเชื่อมต่อบนข่ายเชื่อมโยงเดียวกันได้มากขึ้น ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาในการกำหนดเส้นทางนั่นเอง

การกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น เป็นปัญหาพื้นฐานในการควบคุมการส่งสัญญาณภายในเครือข่าย IP over WDM ซึ่งสามารถจำแนกได้ 2 รูปแบบกว้าง ๆ คือ

1. ปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบสถิต (static) ซึ่งในการออกแบบและการวางแผนเป็นแบบที่รู้ปริมาณทราฟฟิกอยู่ก่อนแล้ว

2. ปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบพลวัต (dynamic) พบในระหว่างส่วนบริการเครือข่ายเวลาจริง (real-time) เกี่ยวกับการจัดเตรียมเส้นทางแสง (lightpath)

2.4.2 การออกแบบเครือข่ายเชิงแสงและการวางแผนความจุ

ในการออกแบบเครือข่ายเชิงแสงนั้น เทคนิคที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการจัดการวางแผนเส้นทางแสง (lightpath) เพื่อเชื่อมต่อในเครือข่าย คือ วิธีการคำนวณและวิธีการแก้ไขปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบสถิต (static) ดังนั้นการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบสถิต (static) จึงเหมาะสำหรับการจัดเตรียมชุดการเชื่อมต่อในเครือข่ายที่จะนำไปใช้เป็นระยะเวลานาน เพื่อให้มีการใช้ทรัพยากรที่คุ้มค่าที่สุด จะต้องมีการวางแผนการส่งทราฟฟิกผ่านเครือข่ายเชิงแสงอย่างเหมาะสม ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การกำหนดความจุหรือแบนวิธท์ของข่ายเชื่อมโยงเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิก
2. พิจารณาโครงสร้างทางกายภาพ (Physical) ของเครือข่าย WDM จากการกำหนดความจุหรือแบนวิธท์ของข่ายเชื่อมโยงเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิก แล้วพิจารณาจำนวน OXC และข่ายเชื่อมโยง (fiber link) ที่จะใช้เชื่อมต่อภายในเครือข่าย
3. พิจารณาโครงสร้างของเครือข่ายเสมือน (Virtual network) ซึ่งเป็นการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น เพื่อรองรับความต้องการในการส่งทราฟฟิกผ่านเครือข่าย

2.4.2.1 การออกแบบโครงสร้างทางกายภาพ (Physical)

ในส่วนนี้ผู้ให้บริการเครือข่ายจะมีการคาดการณ์ปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการในการส่งผ่านเครือข่าย IP over WDM และปรับจำนวนและตำแหน่งของข่ายเชื่อมโยง และ โหนด OXC ในกรณีที่ยังไม่มีเครือข่าย WDM อยู่แล้ว ผู้ให้บริการเครือข่ายต้องออกแบบโครงสร้างทางกายภาพของเครือข่าย IP over WDM ตั้งแต่เริ่มต้น ซึ่งปัญหาในการออกแบบเครือข่ายทางกายภาพนี้ พิจารณาการกำหนดเร้าเตอร์และพิจารณาจำนวนเส้นทางแสง (lightpath) ที่เหมาะสม รวมไปถึงการใช้จำนวน OXC ให้น้อยที่สุดเพื่อสร้างเส้นทางแสง (lightpath)

ในส่วนของการวางแผนความจุหรือแบนวิธท์เพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิก เป็นเรื่องของการวางแผนจัดการทรัพยากรที่เหมาะสม เช่น การกำหนดการใช้ตัวแปลงสัญญาณ หรือตัวแยกสัญญาณ การวางตำแหน่งของตัวแปลงสัญญาณที่เหมาะสม และการใช้ตัวแปลงสัญญาณมากขึ้นเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่แปรปรวน และการพิจารณาการจัดสรร OXC ในตำแหน่งที่เหมาะสม

โดยรวมแล้วปัญหาการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายทางกายภาพค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากต้องพิจารณาถึงรูปแบบโครงสร้างของเครือข่าย ความจุของข่ายเชื่อมโยง ความสามารถของ OXC จำนวนและตำแหน่งของอุปกรณ์ทางแสง และยังขึ้นอยู่กับการกำหนดเส้นทางสำหรับเส้นทางแสง (lightpath) และกลยุทธ์ในการจัดสรรความยาวคลื่นอีกด้วย

2.4.2.2 การออกแบบโครงสร้างของเครือข่ายเสมือน (Virtual)

เครือข่ายเสมือนเป็นส่วนที่จะเข้าไปซ้อนทับอยู่บนเครือข่ายทางกายภาพ (Physical network) ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยแก้วนำแสง (fiber optic) และ OXC การออกแบบโครงสร้างของเครือข่ายเสมือนเป็นการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบสถิต (static) ภายในเครือข่ายทางกายภาพ

งานวิจัย [15] ได้สำรวจวิธีการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น และพบว่าปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบสถิต (static) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ปัญหาย่อย โดยสมมติว่าไม่มีการแปลงความยาวคลื่น ซึ่งปัญหาย่อยมีดังนี้

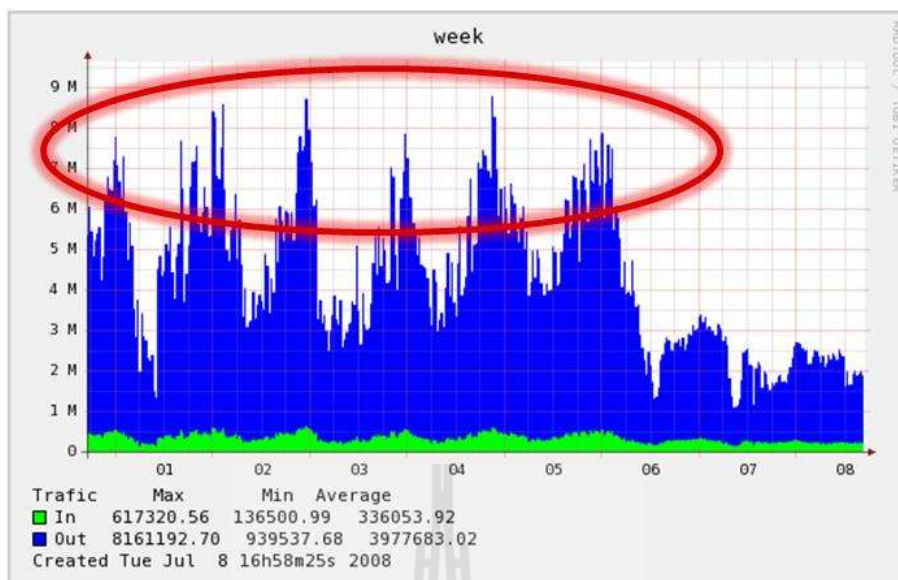
1. ปัญหาโครงสร้างเครือข่าย คือ การกำหนดโครงสร้างเครือข่ายเสมือนซ้อนทับอยู่บนเครือข่ายทางกายภาพ ซึ่งเป็นการกำหนดเส้นทางแสง (lightpath) ระหว่างโหนดต้นทางและปลายทาง
2. ปัญหาการกำหนดเส้นทางเส้นทางแสง (lightpath) คือ การกำหนดเส้นทางขนส่งให้กับแต่ละเส้นทางแสง (lightpath) โดยต้องเลือกใช้ขั้วเชื่อมโยงเสมือนที่มีอยู่บนเครือข่ายทางกายภาพเท่านั้น
3. ปัญหาการจัดสรรความยาวคลื่น คือ การจัดสรรความยาวคลื่นให้แก่แต่ละเส้นทางแสง (lightpath) ในเครือข่ายเสมือน โดยต้องเป็นไปตามข้อจำกัดของแต่ละขั้วเชื่อมโยงทางกายภาพ
4. ปัญหาการกำหนดเส้นทางทราฟฟิก คือ การกำหนดเส้นทางในการส่งทราฟฟิก ระหว่างโหนดต้นทางและปลายทางบนเครือข่ายเสมือน

2.5 ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

ปริมาณทราฟฟิกที่ส่งผ่านเครือข่าย IP over WDM มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงทั้งจำนวนของผู้ที่ต้องการส่งทราฟฟิก และขนาดของทราฟฟิกที่ต้องการส่ง ซึ่งทำให้ปริมาณทราฟฟิกรวมที่ส่งผ่านเครือข่ายมีปริมาณไม่คงที่ มีความแปรปรวนดังที่แสดงในรูปที่

2.3

ในทางปฏิบัติเราสามารถคาดการณ์ได้ว่าแนวโน้มของปริมาณทราฟฟิกจะเป็นอย่างไร โดยใช้การเก็บข้อมูลปริมาณทราฟฟิก และทำการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งทำให้เราสามารถวางแผนการเตรียมความจุหรือแบนวิธเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนได้



รูปที่ 2.3 ลักษณะความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิก

2.5.1 การเตรียมความจุเพื่อรองรับทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน

งานวิจัย [16] ได้ประยุกต์ใช้แนวทางของการ โปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาส (Chance-Constrained Programming : CCP) ในการประเมินความจุหรือแบนวิidth สำหรับรองรับทราฟฟิกที่มีความแปรปรวนหรือไม่แน่นอน โดยการโปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาสได้ใช้แนวทางทางสถิติในการจัดการกับตัวแปรสุ่ม (Random variable) เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายของตัวแปรสุ่ม ซึ่งในที่นี้ตัวแปรสุ่มแสดงถึงพารามิเตอร์ของความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถบอกได้ว่าทราฟฟิกจะมีปริมาณเท่าไรจนกว่าจะถึงเวลานั้น ซึ่งทำให้ผู้วางแผนการส่งทราฟฟิกจำเป็นต้องทำการคาดคะเน หรือประมาณความเป็นไปได้ที่จะมีปริมาณทราฟฟิกจำนวนหนึ่งส่งผ่านเครือข่าย ซึ่งในการดำเนินการดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้หลักการของการ โปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาสได้ โดยการคำนวณค่าความน่าจะเป็นที่จะมีปริมาณทราฟฟิกค่าหนึ่งๆส่งผ่านเครือข่าย

ดังนั้นในการเตรียมสำรองความจุหรือแบนวิidth ของข่ายเชื่อมโยงจึงใช้สมการความน่าจะเป็นมาคำนวณ เพื่อให้แน่ใจว่าความจุหรือแบนวิidth บนการเชื่อมโยงจะมีการเตรียมสำรองไว้เพียงพอสำหรับรองรับทราฟฟิกที่ปริมาณมีลักษณะไม่แน่นอน โดยใช้สมการดังนี้

$$P(x \geq \zeta) \geq \alpha \quad \text{โดยที่ } 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2.1)$$

เมื่อ ζ คือ ตัวแปรสุ่มของปริมาณทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง

x คือ ปริมาณความจุหรือแบนด์วิดท์ที่ต้องสำรองไว้

α คือ ค่าความน่าจะเป็นที่ตัวแปรสุ่มของปริมาณทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงจะมีปริมาณมากกว่าความจุหรือแบนด์วิดท์ที่ต้องสำรองไว้ซึ่ง α แสดงถึงระดับการรับประกันว่าข่ายเชื่อมโยงมีความจุที่รองรับความไม่แน่นอนได้ก็เปอร์เซ็นต์

จากสมการที่ (2.1) สามารถเขียนในรูปที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความจุหรือแบนด์วิดท์ที่ต้องสำรองไว้เพื่อรองรับทราฟฟิกที่มีความแปรปรวนได้ดังสมการที่ (2.2)

$$x \geq \mu + \Phi^{-1}(\alpha)\sigma \quad (2.2)$$

โดย x คือ ค่าความจุหรือแบนด์วิดท์ที่ต้องสำรองไว้เพื่อรองรับทราฟฟิกที่มีความแปรปรวนเมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็น α ที่ปริมาณทราฟฟิกจะมีค่าไม่เกินความจุหรือแบนด์วิดท์ที่เตรียมสำรองไว้และ $\Phi^{-1}(\alpha)$ คือ การผกผันความน่าจะเป็นของสมการ (2.1)

ที่มาของสมการ (2.2) อธิบายได้ดังนี้ กำหนดให้ $\Phi^{-1}(\alpha) = K$ เมื่อ K คือค่าสูงสุดของปริมาณทราฟฟิกที่เกิดขึ้นได้เมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นมีค่าเท่ากับ α หรือเขียนในรูปของสมการ (2.1) ได้ว่า $P(K \geq \zeta) \geq \alpha$ เมื่อพิจารณาทราฟฟิกที่มีการกระจายแบบปกติ (Normal distribution) โดยมีค่าเฉลี่ย (μ) และค่าความแปรปรวน (σ^2) และจากสมการที่ (2.1) เมื่อใช้การกระจายแบบปกติมาตรฐาน (Standard normal distribution, z) ทำให้สามารถเขียนสมการความน่าจะเป็นได้ คือ $P\left(\frac{x-\mu}{\sigma} \geq z\right) \geq \alpha$ และทำให้ $\frac{x-\mu}{\sigma} \geq \Phi^{-1}(\alpha)$ ดังนั้นสมการที่ใช้คำนวณหาค่าความจุหรือแบนด์วิดท์ที่ต้องสำรองไว้เพื่อรองรับทราฟฟิกที่มีความแปรปรวน นั่นคือ $x \geq K$ จึงเขียนได้ดังสมการที่ (2.2)

บทที่ 3

เทคนิคการวางแผนกราฟฟิกรเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น ภายใต้ความไม่แน่นอนของกราฟฟิก

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอวิธีการวางแผนกราฟฟิกภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิก ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้แนวทางของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming) เนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วยหัวข้อ ต่อไปนี้ หัวข้อ 3.1 เสนอแนวคิดในการวางแผนเครือข่าย IP over WDM เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ หัวข้อ 3.2 อธิบายการนิยามและการกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม หัวข้อ 3.3 นำเสนอการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม และหัวข้อ 3.4 อธิบายโปรแกรมที่ใช้หาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

3.1 แนวคิดในการวางแผนเครือข่าย IP over WDM เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ในปัจจุบันมีการใช้งานอินเทอร์เน็ตผ่านเครือข่ายแกนหลักประเภท IP over WDM เพิ่มขึ้นในทุกๆปี การใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ทำให้มีปริมาณกราฟฟิกจำนวนมากไหลผ่านเครือข่ายแกนหลักซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการใช้งานอุปกรณ์ในเครือข่ายทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นผู้ให้บริการเครือข่ายจำเป็นต้องตระหนักถึงการรองรับปริมาณกราฟฟิกจำนวนมากเพื่อสร้างความเชื่อมั่นแก่ผู้ใช้งานและจะต้องมีการวางแผนการใช้งานทรัพยากรเครือข่ายอย่างเหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างเพียงพอต่อการรองรับปริมาณกราฟฟิกที่ต้องการขนส่งข้อมูลในเครือข่าย และสามารถให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ข้อจำกัดของทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดรวมถึงเพื่อให้การใช้พลังงานไฟฟ้าในเครือข่ายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งลักษณะของไอพีกราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนนั้นจึงนำมาซึ่งความท้าทายในการจัดเตรียมและจัดการทรัพยากรเครือข่ายสำหรับกราฟฟิกที่มีความต้องการขนส่งข้อมูลภายในเครือข่าย IP over WDM

ในหลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจในการศึกษาการวางแผนเครือข่ายและการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM เช่น งานวิจัยที่ [17] ได้ทำการวิเคราะห์เรื่องการสร้างทางเดินของแสงโดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์ความจุของข่ายเชื่อมโยงให้มากที่สุด

สำหรับก่อนและหลังการเกิดความล้มเหลวของการเชื่อมโยงทางกายภาพ และ ในงานวิจัยที่ [18] ได้พิจารณาผลกระทบจากปริมาณทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนต่อความสมดุลของการจัดส่งทราฟฟิกภายในเครือข่าย IP over WDM และนำเสนอนิยามสูตรทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นที่สามารถกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดและความจุที่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับต่างๆ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงข่ายเสมือนด้วยการสมดุลปริมาณทราฟฟิก ซึ่งสามารถกระจายทราฟฟิกในปริมาณที่สูงมากในการขนส่งผ่านการเชื่อมโยงทางกายภาพ

ในขณะที่การศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีความสำคัญและแสดงผลลัพธ์ที่น่าสนใจแต่ประเด็นสำคัญการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพไม่ได้มีการพิจารณา ซึ่งก็มีบางงานวิจัยให้ความสนใจเกี่ยวกับการวางแผนโครงข่ายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างเช่น งานวิจัยที่ [19] ได้กล่าวถึงการเลือกใช้โครงข่ายเสมือนในเครือข่าย IP over WDM โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการรองรับปริมาณทราฟฟิก โดยมีข้อจำกัดในการส่งผ่านทราฟฟิก ซึ่งในงานวิจัยนี้การใช้พลังงานส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทางที่ไอพีเร้าเตอร์เท่านั้น ซึ่งยังไม่ได้พิจารณาถึงการใช้พลังงานของอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ส่วนในงานวิจัยที่ [20] ได้พิจารณาให้เห็นถึงการลดการใช้พลังงานในการเกิด blocking ในเครือข่าย IP over WDM ในกรณีที่แบนด์วิดท์ของเครือข่ายมีไม่เพียงพอต่อการให้บริการ โดยนำเสนอวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานในเครือข่าย IP over WDM แสดงให้เห็นว่าปริมาณการส่งผ่านของข้อมูลในเครือข่ายมีความสำคัญซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงาน ส่วนในงานวิจัยที่ [21] ได้ทำการพิจารณาการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM จากสถาปัตยกรรมที่ต่างกัน โดยวิเคราะห์ถึงการใช้พลังงานในสถานการณ์ที่ต่างกันทั้งปริมาณทราฟฟิกและพารามิเตอร์ที่สำคัญบางอย่างซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย

ถึงแม้ว่าบางงานวิจัยได้มีการพิจารณาการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM พบว่าเป็นการพิจารณาเกี่ยวกับการใช้พลังงานในเครือข่ายประเด็นเดียวเท่านั้น ยังไม่ได้นำความไม่แน่นอนของ ทราฟฟิกมาร่วมพิจารณาด้วยหรือบางงานวิจัยได้พิจารณาถึงลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกเพียงอย่างเดียว ซึ่งไม่ได้พิจารณาถึงการใช้พลังงานในเครือข่ายร่วมด้วย ดังนั้นงานวิจัยในบทนี้ไม่เพียงแต่พิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก แต่ยังให้ความสนใจกับประเด็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพร่วมด้วย โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับการขนส่ง ไอพีทราฟฟิกผ่านเครือข่าย IP over WDM ด้วยรูปแบบการแก้ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming : ILP)

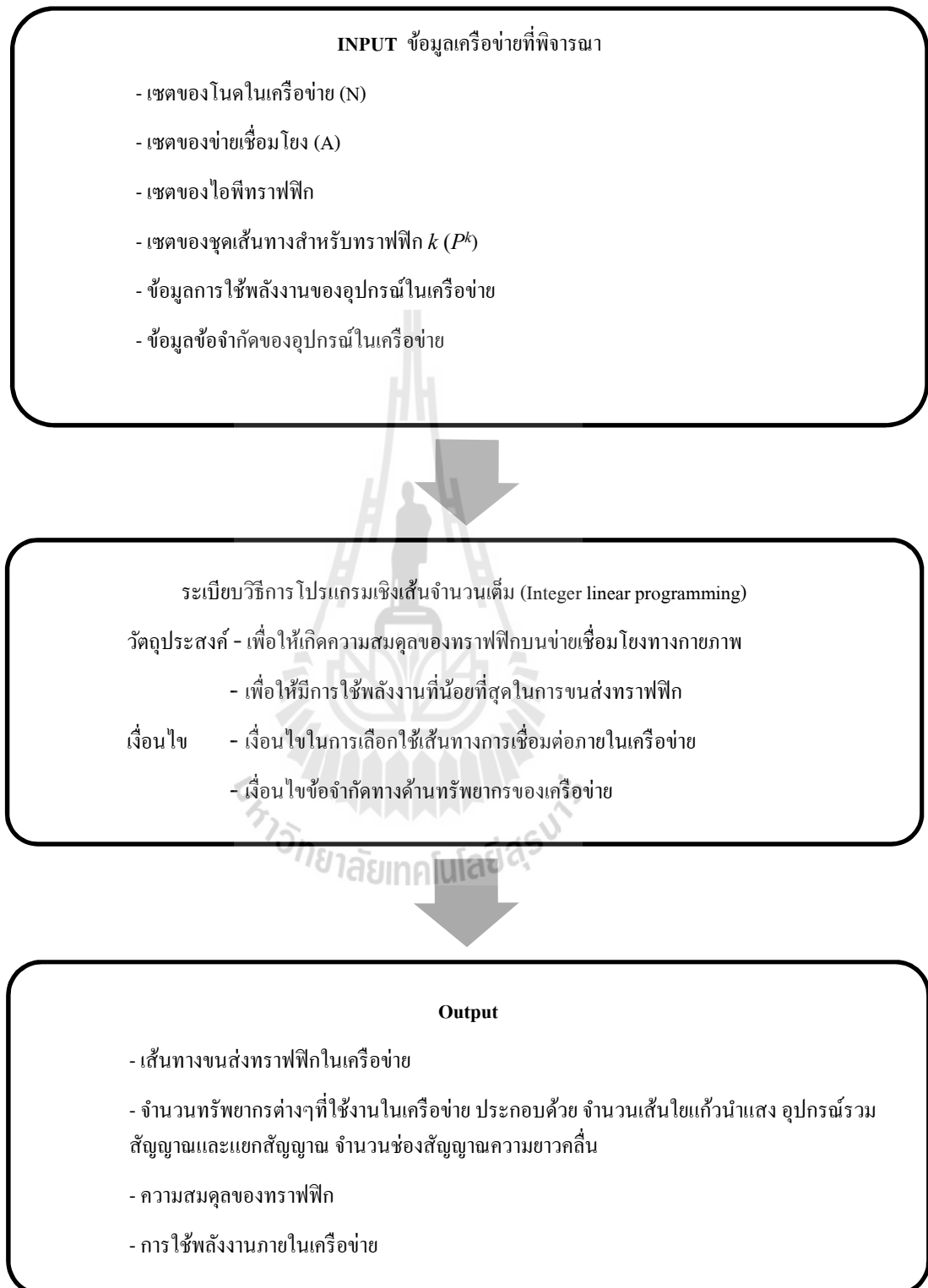
3.2 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

ในการวางแผนทรานซิปติกของงานวิจัยนี้ ได้เลือกวิธีการกำหนดปัญหาเป็นการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming : ILP) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยใช้หลักการปรับเปลี่ยนตัวแปรอย่างมีหลักเกณฑ์เพื่อให้มีผลต่อเป้าหมายของปัญหาและบรรลุผลตามเป้าหมายโดยเร็วที่สุด

การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มประกอบด้วยสองส่วนสำคัญ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) และสมการเงื่อนไข (constraint) งานวิจัยนี้มีเป้าหมาย คือ ต้องการวางแผนการส่งทรานซิปติกแบบสมมูลในเครือข่าย IP over WDM โดยพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอนของทรานซิปติก เพื่อให้มีการใช้พลังงานเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับเงื่อนไขนั้นประกอบด้วยเงื่อนไขการเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย โดยมีชุดเส้นทางเลือกในการขนส่งสำหรับทรานซิปติกข้อมูล และยังมีเงื่อนไขข้อจำกัดด้านทรัพยากรต่างๆ ของอุปกรณ์เครือข่าย ซึ่งเป็นข้อจำกัดของจำนวนทรัพยากรที่สามารถเลือกใช้งานได้สำหรับการขนส่งทรานซิปติกข้อมูลในเครือข่าย หัวข้อที่ 3.3 อธิบายรายละเอียด และแสดงสมการคณิตศาสตร์สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข

รูปที่ 3.1 แสดงหลักการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม โดยอินพุตของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มคือ เซตของโนดในเครือข่าย เซตของข่ายเชื่อมโยง เซตของไอพิตทรานซิปติก เซตของชุดเส้นทางสำหรับส่งทรานซิปติก ข้อมูลการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในเครือข่าย และข้อมูลข้อจำกัดของอุปกรณ์ในเครือข่าย ส่วนเอาต์พุตที่ได้จากการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มคือ เส้นทางขนส่งทรานซิปติกในเครือข่าย จำนวนทรัพยากรต่างๆที่ใช้งานในเครือข่าย ประกอบด้วยจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง อุปกรณ์รวมสัญญาณและแยกสัญญาณ จำนวนช่องสัญญาณความยาวคลื่น

เอาต์พุตของรูปที่ 3.1 ได้จากการนำข้อมูลอินพุตต่างๆมาผ่านกระบวนการหาคำตอบของสมการคณิตศาสตร์การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ด้วยใช้โปรแกรมช่วยหาคำตอบที่อธิบายในหัวข้อ 3.4



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น

3.3 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์

การวางแผนการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) โดยได้พิจารณาการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างสองวัตถุประสงค์ ได้แก่ วัตถุประสงค์ที่หนึ่งเพื่อให้มีความสมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM ที่มากที่สุด (Maximize traffic balancing) และวัตถุประสงค์ที่สองเพื่อให้มีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM (Minimize energy consumption)

ต่อไปนี้เป็นกรนิยามตัวแปรต่างๆที่ใช้ในโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบด้วย เซต ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) และพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ (constant parameters) ตามลำดับ

เซต :

- A คือ เซตของข่ายเชื่อมโยงในชั้น WDM สำหรับเครือข่าย IP over WDM
- D คือ เซตของไอพีทราฟฟิก
- P^k คือ เซตของชุดเส้นทางสำหรับทราฟฟิก k โดยที่ $\forall k \in D$
- N คือ เซตของโนดในเครือข่าย IP over WDM

ตัวแปรตัดสินใจ :

- $f^{k,p}$ คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไบนารี $\{0, 1\}$ เป็นตัวแปรที่ระบุการเลือกเส้นทางสำหรับทราฟฟิก k ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อทราฟฟิก k เลือกใช้เส้นทาง p จากเซตของชุดเส้นทางที่กำหนดไว้ล่วงหน้า และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่ได้เลือกใช้งานเส้นทางนั้น โดยที่ $\forall p \in P^k$ และ $\forall k \in D$
- ω_j คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม เป็นตัวแปรที่ระบุจำนวนของช่องสัญญาณความยาวคลื่น (Wavelength channels) ที่กำหนดให้ใช้งานสำหรับทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ j โดยที่ $\forall j \in A$
- Nf_j คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม เป็นตัวแปรที่ระบุจำนวนของใยแก้วนำแสงที่กำหนดให้ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ j โดยที่ $\forall j \in A$

MD_j คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม เป็นตัวแปรที่ระบุจำนวนของอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (multi/demultiplexers) ที่ใช้ระหว่างโนดต้นทาง-ปลายทาง บนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ j โดยที่ $\forall j \in A$

พารามิเตอร์ค่าคงที่ :

V_m คือ จำนวนเต็มที่ระบุจำนวนของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) ที่ใช้งานในแต่ละโนด m โดยที่ $\forall m \in N$

Y_m คือ จำนวนเต็มที่ระบุจำนวนของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (Route Processor) ที่ใช้งานในแต่ละโนด m โดยที่ $\forall m \in N$

β_k คือ จำนวนเต็มที่ระบุจำนวนของช่องสัญญาณความยาวคลื่น (Wavelength channels) ที่มีการกำหนดให้ใช้งานสำหรับทราฟฟิก k ที่ต้องการขนส่งผ่านการเชื่อมโยงเสมือน โดยที่ $\forall k \in D$

x_k คือ ความจุที่จัดเตรียมไว้สำหรับรองรับทราฟฟิก k โดยที่ $\forall k \in D$

n คือ จำนวนของข่ายเชื่อมโยงในเซต A

T_k^m คือ ตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ตัวแปรระบุว่าทราฟฟิก k ไหลผ่านโนดต้นทาง m มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ ทราฟฟิก k ไหลผ่านโนดต้นทาง m และมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่ได้ไหลผ่านโนดต้นทาง m โดยที่ $\forall k \in D, \forall m \in N$

$\delta_j^{k,p}$ คือ ตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ เป็นตัวแปรที่ระบุข่ายเชื่อมโยงที่มีการใช้งานในเส้นทาง p สำหรับ ทราฟฟิก k มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเส้นทาง p สำหรับทราฟฟิก k ใช้งานข่ายเชื่อมโยง j และมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่ได้ใช้งานข่ายเชื่อมโยงนั้น โดยที่ $\forall p \in P^k, \forall k \in D$ และ $\forall j \in A$

L_j คือ ความยาวของข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ j

EA_j คือ จำนวนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFAs) บนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ j ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $EA_j = \lfloor L_j/S - 1 \rfloor + 2$ ที่นำเสนอใน Shen, G. and Tucker, R. S. (2009) โดยที่ S คือ ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณ

EG_j คือ จำนวนของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerators) บนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ j ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $EG_j = \lfloor L_j/5S - 1 \rfloor$ ที่นำเสนอใน Yagi, M., Satomi, S., Ryu, S., Okamura, K., Aoyagi, M. and Asano, S. (2005)

B_ω คือ ความจุของความยาวคลื่น (wavelength channel)

B_{LC} คือ ความจุของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card)

N_{LC}	คือ จำนวนของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิกที่สามารถใช้ได้ต่ออุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor)
W_f	คือ จำนวนความยาวคลื่นต่อใยแก้วนำแสง
W_{MD}	คือ จำนวนความยาวคลื่นต่ออุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ
P_{LC}	คือ การใช้พลังงานของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card)
P_{RP}	คือ การใช้พลังงานของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor)
P_{tr}	คือ การใช้พลังงานของเครื่องทรานสปอนเดอร์ (transponder)
P_E	คือ การใช้พลังงานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFA)
P_G	คือ การใช้พลังงานของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerator)
P_O	คือ การใช้พลังงานของอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC)
P_{MD}	คือ การใช้พลังงานของอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ
C_{LC}	คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card)
C_{RP}	คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor)
C_{tr}	คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของเครื่องทรานสปอนเดอร์ (transponder)
C_E	คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFA)
C_G	คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerator)
C_O	คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC)
C_{MD}	คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ

3.3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อให้มีความสมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM ที่มากที่สุด (Maximize traffic balancing)

ในการประเมินความสมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM นั้น ผู้วิจัยได้ใช้สมการคณิตศาสตร์จากงานวิจัยที่ [18] ซึ่งเป็นการคำนวณค่าตัวชี้วัดความไม่สมดุล (Unbalance Index : UI) โดยใช้ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Deviation) ของไอพีทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงทางแสง ซึ่งค่าความไม่สมดุลของ ทราฟฟิกที่ได้นี้ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการจัดสรรเส้นทางสำหรับส่งทราฟฟิกในเครือข่าย

ดังนั้นวัตถุประสงค์เพื่อ Maximize traffic balancing สามารถเขียนในรูปของการ Minimize Unbalance Index ดังในสมการที่ (3.1) ซึ่งจะทำให้เกิดการส่งทราฟฟิกที่ปริมาณทราฟฟิกรวมในแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์มีค่าต่ำสุดนั่นเอง

$$\min_{\forall p} \frac{1}{n} \sum_{j \in A} \left| r_j - \frac{\sum_{j \in A} r_j}{n} \right| \quad (3.1)$$

เมื่อ n คือ จำนวนของข่ายเชื่อมโยงในเขต A และ r_j คือปริมาณรวมของความจุที่ใช้รองรับไอพีทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งบนข่ายเชื่อมโยง j ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.13)

วัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อให้มีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM (Minimize energy consumption) ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\min_{\forall j} \left[\begin{aligned} & \sum_{m \in N} P_{LC} \cdot V_m + \sum_{m \in N} P_{RP} \cdot Y_m + 2 \cdot \sum_{k \in D} P_{tr} \cdot \beta_k + \sum_{j \in A} P_O \cdot \omega_j \\ & + \sum_{j \in A} P_{MD} \cdot MD_j + \sum_{j \in A} (P_E \cdot EA_j + P_G \cdot EG_j) \cdot Nf_j \end{aligned} \right] \quad (3.2)$$

โดยที่

$\sum_{m \in N} P_{LC} \cdot V_m$ เป็นการคำนวณการใช้พลังงานของแผงวงจร

$\sum_{m \in N} P_{RP} \cdot Y_m$ เป็นการคำนวณการใช้พลังงานของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง

$2 \cdot \sum_{k \in D} P_{tr} \cdot \beta_k$ เป็นการคำนวณการใช้พลังงานของทรานสปอนเดอร์

$\sum_{j \in A} P_O \cdot \omega_j$ เป็นการคำนวณการใช้พลังงานของอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง

$\sum_{j \in A} P_{MD} \cdot MD_j$ เป็นการคำนวณการใช้พลังงานของอุปกรณ์รวมสัญญาณทางแสงและ

อุปกรณ์แยกสัญญาณทางแสง

$\sum_{j \in A} (P_E \cdot EA_j + P_G \cdot EG_j) \cdot Nf_j$ เป็นการคำนวณการใช้พลังงานของอุปกรณ์ขยาย

สัญญาณแสงและอุปกรณ์ทวนสัญญาณ

ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีการแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปแบบของสมการวัตถุประสงค์เดียว โดยใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการ

หาคำตอบที่ดีที่สุด โดยทำให้วัตถุประสงค์ที่สนใจเป็นบรรทัดฐานเดียวกัน (Normalize) คือทำให้วัตถุประสงค์ทั้งสองนั้นมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ($F_1(x), F_2(x)$) แล้วนำค่าถ่วงน้ำหนัก (w_1, w_2) มาคูณกับแต่ละวัตถุประสงค์ โดยที่ $w_1 + w_2 = 1$ ซึ่งสมการวัตถุประสงค์เดียวเขียนได้ดังสมการที่ (3.3) และให้ชื่อสมการนี้ว่า MOO Model (Multi-objective optimization Model)

$$\text{Minimize } z = w_1 F_1(x) + w_2 F_2(x) \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } F_1(x) &= \frac{f_1(x) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \\ F_2(x) &= \frac{f_2(x) - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

- เมื่อ f_1 คือ ค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิก
 F_1 คือ ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 ที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว
 f_1^{\min} คือ ค่าของฟังก์ชัน f_1 ที่น้อยที่สุด
 f_1^{\max} คือ ค่าของฟังก์ชัน f_1 ที่มากที่สุด
 f_2 คือ การใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่าย (WAh)
 F_2 คือ ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 ที่ทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว
 f_2^{\min} คือ ค่าของฟังก์ชัน f_2 ที่น้อยที่สุด (WAh)
 f_2^{\max} คือ ค่าของฟังก์ชัน f_2 ที่มากที่สุด (WAh)

ดังนั้น จะได้

$$z = w_1 \left(\frac{f_1(x) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \right) + w_2 \left(\frac{f_2(x) - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \right)$$

$$z = w_1 \left(\frac{\left(\min_{\forall p} \frac{1}{n} \sum_{j \in A} r_j - \frac{\sum_{j \in A} r_j}{n} \right) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \right)$$

$$+w_2 \left(\frac{\left(\min_{\forall j} \left[\sum_{m \in N} P_{LC} \cdot V_m + \sum_{m \in N} P_{RP} \cdot Y_m + 2 \cdot \sum_{k \in D} P_{tr} \cdot \beta_k + \sum_{j \in A} P_O \cdot \omega_j \right] - f_2^{\min} \right)}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \right) \quad (3.5)$$

เมื่อ z คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบสเกลาร์

w_1 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 โดยที่ $w_1 = [0,1]$

w_2 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 โดยที่ $w_2 = [0,1]$

3.3.2 สมการเงื่อนไข

สมการเงื่อนไขประกอบด้วย การเลือกใช้เส้นทาง การเชื่อมต่อภายในเครือข่าย โดยมีชุดเส้นทางเลือกในการขนส่งสำหรับทราฟฟิกข้อมูล และข้อจำกัดด้านทรัพยากรต่าง ๆ ของอุปกรณ์เครือข่าย ซึ่งเป็นข้อจำกัดของจำนวนทรัพยากรที่สามารถเลือกใช้งานได้สำหรับการขนส่งทราฟฟิกข้อมูลในเครือข่าย สมการเงื่อนไขสำหรับการวางแผนการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ประกอบด้วย 7 สมการ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เงื่อนไขในการเลือกใช้เส้นทางในการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย

1. สำหรับการเลือกเส้นทางในเครือข่าย เพื่อไม่ให้เกิดการเลือกเส้นทางที่ซ้ำซ้อน เงื่อนไขนี้จะระบุว่าคุณสมบัติของทราฟฟิก k ให้สามารถเลือกได้เพียงหนึ่งเส้นทางจากเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ชุดของเส้นทาง P^k

$$\sum_{p \in P^k} f^{k,p} = 1 \quad \forall k \in D \quad (3.6)$$

กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย

2. เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนของความยาวคลื่นนั้น (wavelength) มีเพียงพอในการให้บริการสำหรับบนข่ายเชื่อมโยง j ดังนั้นข่ายเชื่อมโยง j ต้องสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของทุกความต้องการของไอพีทราฟฟิก ที่ขนส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง j ซึ่งรูปแบบที่หลากหลายของความต้องการของไอพีทราฟฟิก ได้แสดงอยู่ในรูปแบบของพารามิเตอร์ x_k

$$\sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} \cdot f^{k,p} \cdot x_k \leq B_\omega \cdot \omega_j \quad \forall j \in A \quad (3.7)$$

3. เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนสายใยแก้วนำแสงนั้น (fiber optic) มีเพียงพอต่อจำนวนของความยาวคลื่นที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง j

$$\omega_j \leq W_f \cdot Nf_j \quad \forall j \in A \quad (3.8)$$

4. เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (multi/demultiplexers) นั้น มีเพียงพอต่อจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง j

$$\omega_j \leq W_{MD} \cdot MD_j \quad \forall j \in A \quad (3.9)$$

5. จำนวนของความยาวคลื่นที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง j นั้น มีการตั้งค่าการใช้งานเมื่อมีทราฟฟิกขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง j ดังนั้นจำนวนของความยาวคลื่นที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง j ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของจำนวนที่ได้ตั้งค่าไว้บนข่ายเชื่อมโยง j กล่าวคือ ω_j เป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

$$\omega_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (3.10)$$

6. จำนวนสายใยแก้วนำแสงที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง j นั้น มีการตั้งค่าการใช้งานเมื่อมีทราฟฟิกขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง j ดังนั้นจำนวนสายใยแก้วนำแสงที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง j ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของจำนวนที่ได้ตั้งค่าไว้บนข่ายเชื่อมโยง j กล่าวคือ Nf_j เป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

$$Nf_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (3.11)$$

7. จำนวนอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง j นั้น มีการตั้งค่าการใช้งานเมื่อมีทราฟฟิกขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง j ดังนั้นจำนวนอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง j ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของจำนวนที่ได้ตั้งค่าไว้บนข่ายเชื่อมโยง j กล่าวคือ MD_j เป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

$$MD_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (3.12)$$

นอกจากสมการเงื่อนไขแล้วยังมีสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

สมการที่ (3.13) ใช้ในการคำนวณความจุที่รองรับปริมาณทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง โดยเป็นการคำนวณปริมาณรวมของความจุที่รองรับไอพีทราฟฟิกที่มีความต้องการขนส่งบนข่ายเชื่อมโยง j

$$r_j = \sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} f^{k,p} x_k \quad \forall j \in A \quad (3.13)$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณจำนวนแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) ใช้งานที่โนด m แสดงดังสมการที่ (3.14) เป็นผลรวมความจุของทุกทราฟฟิก k ที่ไหลผ่านโนดต้นทาง m หารด้วยแบนด์วิธของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก

$$V_m = \left\lceil \frac{\sum_{k \in D} x_k T_k^m}{B_{LC}} \right\rceil \quad \forall m \in N \quad (3.14)$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณจำนวนของช่องสัญญาณความยาวคลื่น (Wavelength channels) ที่ใช้งานสำหรับทราฟฟิกข้อมูล k แสดงดังสมการที่ (3.15) ซึ่งเป็นความจุของปริมาณทราฟฟิก k หารด้วยแบนด์วิธของช่องสัญญาณความยาวคลื่น

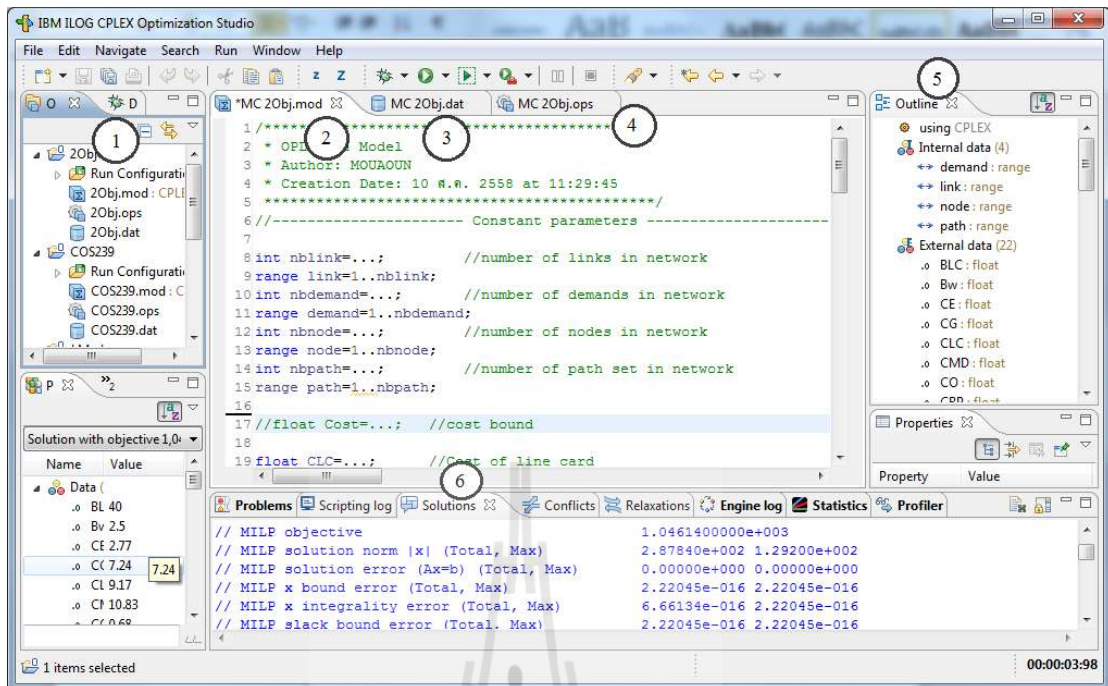
$$\beta_k = \left\lceil \frac{x_k}{B_\omega} \right\rceil \quad \forall k \in D \quad (3.15)$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณจำนวนอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor) ที่ใช้งานที่โนด m แสดงดังสมการที่ (3.16) ซึ่งคือจำนวนของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทางที่ใช้งานในโนด m หารด้วยจำนวนของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิกที่สามารถใช้ได้ต่ออุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง

$$Y_m = \left\lceil \frac{V_m}{N_{LC}} \right\rceil \quad \forall m \in N \quad (3.16)$$

3.4 วิธีหาคำตอบสำหรับสมการที่พัฒนาขึ้น

ในการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดนั้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio โดยผู้วิจัยได้ทำการแปลงสมการคณิตศาสตร์ให้เป็นภาษาของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX โดยโปรแกรมนี้ใช้อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแก้ปัญหาของการโปรแกรมเชิงเส้นในการหาคำตอบที่ต้องการ หน้าต่างของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

1. หมายเลข 1 (opl project) แสดงไฟล์โครงการ (project) ที่เปิดอยู่ ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ โมเดลไฟล์ (*.mod) ค่าตัวไฟล์ (*.dat) และ เซตตั้งไฟล์ (*.ops)
2. หมายเลข 2 (model file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่คำสั่งที่ใช้คำนวณหาค่าที่ดีที่สุด โดยคำสั่งเหล่านี้ได้แปลงมาจากสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข
3. หมายเลข 3 (data file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่ข้อมูลที่เป็นตัวแปร ทั้งที่อยู่ในรูปของตัวแปรค่าเดียวและในรูปของเมตริกซ์ (matrix) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกเรียกใช้ในการคำนวณโดยคำสั่งในโมเดลไฟล์
4. หมายเลข 4 (setting file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อคำนวณคำตอบที่ดีที่สุดให้โครงการ เช่น การจำกัดเวลาของเวลาและหน่วยความจำ (memory) เป็นต้น
5. หมายเลข 5 (outline view) แสดงโครงสร้างของข้อมูลที่อยู่ในหน้าต่างของโมเดลไฟล์ ค่าตัวไฟล์และเซตตั้งไฟล์ จัดเรียงข้อมูลให้แสดงในรูปแบบรายการเพื่อต่อการตรวจสอบ
6. หมายเลข 6 (solutions log area) แสดงคำตอบที่โปรแกรมทำการคำนวณพบและพิจารณาว่าน่าจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดได้ (feasible solution) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกบันทึกไว้เรื่อยๆ จนกระทั่งโปรแกรมทำการคำนวณพบคำตอบที่ดีที่สุด (final solution)

ตารางที่ 3.1 แสดงคำสั่งของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ที่ได้จากการแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบสองวัตถุประสงค์ ให้เป็นภาษาของโปรแกรมเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ซึ่งในส่วนของโปรแกรมประกอบด้วย ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข

ตารางที่ 3.1 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

สมการคณิตศาสตร์	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	Decision Variable
$f^{k,p}$	dvar int f[demand][path] in 0..1;
ω_j	dvar int w[link];
Nf_j	dvar int fj[link];
MD_j	dvar int MD[link];
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	Objective function
สมการ(3.5)	Minimize w1*(((sum(j in link)(abs(r[j]) - (sum(j in link)r[j])/nblink)))/nblink) - f1_min)/(f1_max - f1_min)) + w2*(((sum(m in node)(PLC*Vm[m]) + sum(m in node)(PRP*Y[m]) + 2*sum(k in demand)(PTR*beta[k]) + sum(j in link)(PO*w[j]) + sum(j in link)(PMD*MD[j]) + sum(j in link)(PE*EA[j]*fj[j] + PG*EG[j]*fj[j])) - f2_min)/(f2_max - f2_min));
เงื่อนไข	subject to {
สมการ(3.6)	ct1 : forall (k in demand) sum(p in path)f[k][p]==1;
สมการ(3.7)	ct2 : forall (j in link) sum(k in demand, p in path)x[k]*s[k][p][j]*f[k][p] <= Bw*w[j];
สมการ(3.8)	ct3 : forall (j in link) w[j] <= Wf*fj[j];
สมการ(3.9)	ct4 : forall (j in link) w[j] <= WMD*MD[j];
สมการ(3.10)	ct5 : forall (j in link) w[j] >= 0;
สมการ(3.11)	ct6 : forall (j in link) fj[j] >= 0;
สมการ(3.12)	ct7 : forall (j in link) MD[j] >= 0;

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผล

เนื้อหาบทนี้สาธิตการใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่ได้อธิบายในบทที่ 3 ในการวางแผนการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM และได้ศึกษาลักษณะการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยง และการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิก โดยหัวข้อ 4.1 อธิบายเรื่องการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งทราฟฟิกบนเครือข่าย IP over WDM หัวข้อ 4.2 ศึกษาผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของ Multi Objective Optimization Model หัวข้อ 4.3 ศึกษาผลกระทบของปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการส่งระหว่างคู่โหนดในเครือข่ายต่อความไม่สมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่าย หัวข้อ 4.4 เปรียบเทียบเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้กับเทคนิคอื่น

4.1 การใช้พลังงานสำหรับการขนส่งทราฟฟิกบนเครือข่าย IP over WDM

งานวิจัยนี้พิจารณาการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่ายที่ใช้ในการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ดังแสดงในรูปที่ 4.1 อ้างอิงจากงานวิจัย [22] ของ Yunlei Lui, Gangxiang Shen, and Weidong Shao (2013) ซึ่งพิจารณาการใช้พลังงาน 2 ส่วน คือ ชั้นไอพี (IP layer) และชั้นการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (WDM layer) โดยในแต่ละชั้นจะมีการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

ในส่วนของชั้นไอพีประกอบไปด้วยการใช้พลังงานของอุปกรณ์การประมวลผลทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นการประมวลผลเพื่อเลือกเส้นทางการขนส่งให้กับทราฟฟิกที่ไหลผ่านเข้าสู่แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) การใช้พลังงานส่วนนี้แทนด้วยพารามิเตอร์ P_{LC} และการใช้พลังงานของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor) เป็นการประมวลผลเพื่อกำหนดเส้นทาง แทนด้วยพารามิเตอร์ P_{RP}

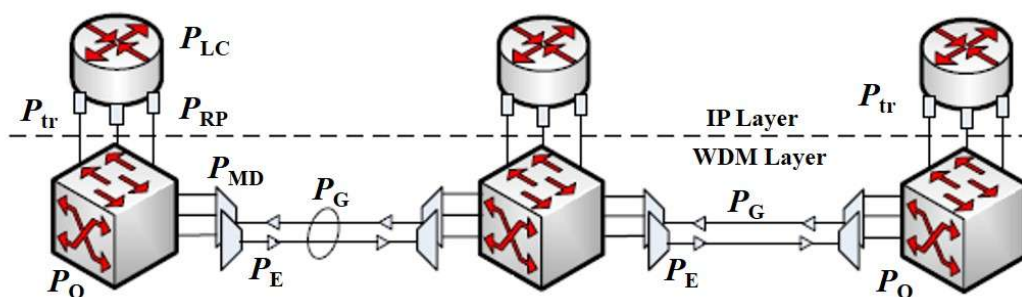
การใช้พลังงานของเครื่องทรานสปอนเดอร์ ใช้สำหรับการแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณแสง เพื่อขนส่งทราฟฟิกข้อมูลนี้ต่อไปยังอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง ซึ่งอยู่ในตำแหน่งระหว่างชั้นไอพีและชั้น WDM แทนด้วยพารามิเตอร์ P_{T}

ในส่วน of ชั้น WDM ประกอบไปด้วยการใช้พลังงานของอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (Optical Cross Connect : OXC) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนเส้นทางเดินของแสงในเครือข่ายใยแก้วนำแสง (Fiber optical network) เพื่อให้ข้อมูลเดินทางไปยังปลายทางที่ต้องการได้ แทนด้วยพารามิเตอร์ P_O

การใช้พลังงานของอุปกรณ์รวมสัญญาณทางแสง (Optical multiplexer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แสงที่ทำหน้าที่รวมสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันแล้วป้อนเข้าไปในใยแก้วนำแสงเส้นเดียว แทนด้วยพารามิเตอร์ P_{MD}

การใช้พลังงานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA) เนื่องจากสัญญาณที่เดินทางในระหว่างเส้นทางการขนส่งจะมีการลดทอนสัญญาณเกิดขึ้น จึงต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณพร้อมกันให้มีขนาดความเข้มแสงมากพอที่จะเดินทางต่อไปไกลๆ ได้ นอกจากการขยายสัญญาณระหว่างเส้นทางการเชื่อมโยงแล้วยังมีการขยายสัญญาณเมื่อทรานซิปมีการขนส่งออกจากโหนดต้นทาง และมีการขยายสัญญาณเมื่อสัญญาณเดินทางไปถึง โหนดปลายทางอีกด้วย แทนด้วยพารามิเตอร์ P_E

การใช้พลังงานของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerators) เป็นการทวนสัญญาณในชั้น WDM ซึ่งทำหน้าที่ปรับสัญญาณพัลส์แสงที่บานออก เมื่อเดินทางในสายส่งใยแก้วนำแสง โดยที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออกให้มีขนาดคงที่ตลอดการเดินทางอยู่เสมอซึ่งการใช้ตัวทวนสัญญาณจะเกิดขึ้นระหว่างเส้นทางการเชื่อมโยงของโหนดต้นทาง-ปลายทาง กำหนดด้วยพารามิเตอร์ P_G



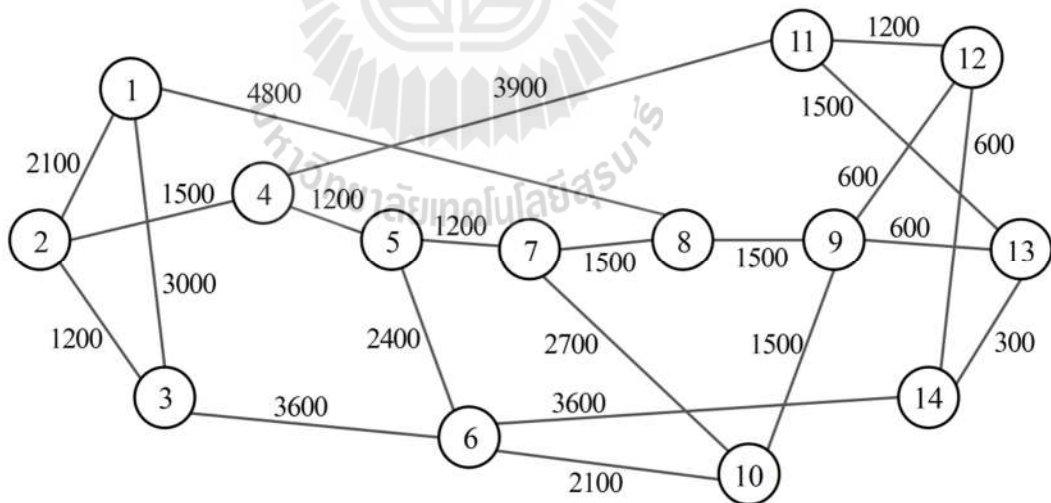
รูปที่ 4.1 การใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM

4.2 การวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM

หัวข้อนี้สาธิตการใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่ได้พัฒนาขึ้นในการวางแผนการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM และได้ศึกษาผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบที่ได้ เพื่อสังเกตการ Tradeoff ระหว่างความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยง และการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิก

ในการทดลองได้พิจารณาการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย NSFNET ซึ่งมีทั้งหมด 14 โหนด และมีโครงสร้างของข่ายเชื่อมโยงดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยได้วางแผนการส่งทราฟฟิกจำนวน 180 ทราฟฟิกระหว่าง 14 คู่โหนด [28] ดังแสดงในตาราง ก.3 ในภาคผนวก ก. โดยได้พิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90%

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองของหัวข้อนี้ ส่วนตารางที่ 4.2 แสดงค่าของพลังงานที่ใช้ของอุปกรณ์เครือข่ายต่างๆ และตารางที่ 4.3 แสดงค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์เครือข่าย ซึ่งเป็นราคาทั่วไปที่อยู่บนพื้นฐานของการกำหนดราคาของอุตสาหกรรมในประเทศไทย ซึ่งมีหน่วยเป็น cost unit (c.u.) ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นอินพุตในกระบวนการหาคำตอบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม



รูปที่ 4.2 โครงสร้างเครือข่าย NSFNET (ความยาวของข่ายเชื่อมโยงหน่วยเป็น km.)

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนกราฟฟิค

พารามิเตอร์	ค่า
ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (S)	80 กิโลเมตร
ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณ	400 กิโลเมตร
แบนด์วิดท์ของแต่ละความยาวคลื่น	2.5 Gbps
จำนวนความยาวคลื่นต่อเส้นใยแก้วนำแสง	40 ความยาวคลื่น
จำนวนความยาวคลื่นต่ออุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (multi/demultiplexer)	80 ความยาวคลื่น
แบนด์วิดท์ของแต่ละแผงวงจรควบคุมการไหลของกราฟฟิค (line card)	40 Gbps
จำนวนแผงวงจรควบคุมการไหลของกราฟฟิคต่ออุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (Route processor)	16 แผงวงจร
ระดับการรับประกันความไม่แน่นอน	ค่าเฉลี่ย 90% และ 99%

ตารางที่ 4.2 การใช้พลังงานของอุปกรณ์

อุปกรณ์	ค่าพลังงาน (W)
แผงวงจรควบคุมการไหลของกราฟฟิค	415 ต่อแผงวงจร [23]
อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง	166 ต่อแผงวงจร [24]
เครื่องทรานสปอนเดอร์ (Transponder)	34.5 ต่อความยาวคลื่น [21]
อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFA)	25 ต่อเส้นใยแก้วนำแสง [25]
อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Regenerator)	100 ต่อเส้นใยแก้วนำแสง [26]
อุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC)	1.5 ต่อความยาวคลื่น [21]
อุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ	811 ต่ออุปกรณ์ [24]

ตารางที่ 4.3 ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ [27]

อุปกรณ์	ค่าใช้จ่าย (c.u.)
แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก	9.17 ต่อแผงวงจร
อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง	16.67 ต่อแผงวงจร
เครื่องทรานสปอนเดอร์ (Transponder)	0.33 ต่อความยาวคลื่น
อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFA)	2.77 ต่อเส้นใยแก้วนำแสง
อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Regenerator)	7.24 ต่อเส้นใยแก้วนำแสง
อุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC)	0.68 ต่อความยาวคลื่น
อุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ	10.83 ต่ออุปกรณ์

4.2.1 ตัวอย่างเส้นทางในการส่งทราฟฟิกที่ได้

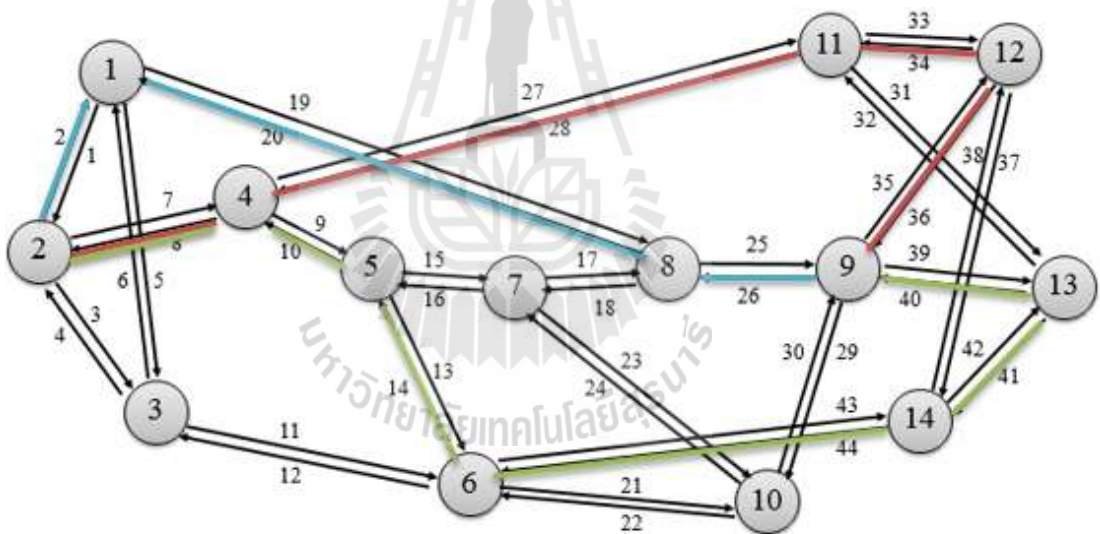
เมื่อใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่ได้พัฒนาขึ้น ในการวางแผนการส่งทราฟฟิกทั้งหมด 180 ทราฟฟิกระหว่าง 14 ภูมิภาคของเครือข่าย NSFNET ทำให้ได้เส้นทางในการส่งแต่ละทราฟฟิก ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยขอยกตัวอย่างเฉพาะเส้นทางที่ได้สำหรับการส่งทราฟฟิกจากโหนดที่ 2 ไปโหนดที่ 9 ซึ่งเส้นทางจะเปลี่ยนไปตามค่าถ่วงน้ำหนัก (w_1, w_2) ที่ใช้ในสมการวัตถุประสงค์ (3.6) ซึ่งเป็นสมการผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักของสองวัตถุประสงค์ โดยวัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อให้มีความสมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM ที่มากที่สุด (Maximize traffic balancing) ส่วนวัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อให้มีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM (Minimize energy consumption) ดังที่นำเสนอในบทที่ 3

รูปที่ 4.3 แสดงเส้นทางที่ได้สำหรับการส่งทราฟฟิกจากโหนดที่ 2 ไปโหนดที่ 9 ในกรณีที่พิจารณาการใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก 3 แบบ คือ ($w_1=0, w_2=1$), ($w_1=0.74, w_2=0.26$) และ ($w_1=1, w_2=0$)

เมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก ($w_1=0, w_2=1$) การเลือกเส้นทางสำหรับส่งทราฟฟิกในกรณีนี้ เป็นผลจากการคิดวัตถุประสงค์ที่ 2 เพียงอย่างเดียว เนื่องจากวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือเป็นการเลือกเส้นทางที่พยายามลดผลรวมของการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิกทั้งหมดให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งทำให้ได้เส้นทางสำหรับส่งทราฟฟิกจากโหนดที่ 2 ไปโหนดที่ 9 ที่ใช้ข่ายเชื่อมโยง 7-9-13-43-42-40 ดังแสดงในรูปที่ 4.3

กรณีใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก ($w_1=0.74, w_2=0.26$) ค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 เพิ่มขึ้นเป็น 0.74 และค่าถ่วงน้ำหนักที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.26 ทำให้การเลือกใช้เส้นทางสำหรับส่งกราฟฟิกเป็นการเลือกใช้เส้นทางโดยที่ให้ความสำคัญกับวัตถุประสงค์ที่ 1 มากกว่าวัตถุประสงค์ที่ 2 จึงทำให้ค่าของวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าลดลงมากกว่าค่าของวัตถุประสงค์ที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ในกรณีนี้ได้เส้นทางสำหรับส่งกราฟฟิกจาก โหนดที่ 2 ไป โหนดที่ 9 ที่ใช้ข่ายเชื่อมโยง 2-19-25 ดังแสดงในรูปที่ 4.3

และเมื่อใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก ($w_1=1, w_2=0$) การเลือกเส้นทางสำหรับส่งกราฟฟิกในกรณีนี้เป็นผลจากการคิดวัตถุประสงค์ที่ 1 เพียงอย่างเดียว เนื่องจากวัตถุประสงค์ที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือเป็นการเลือกเส้นทางที่พยายามเพิ่มความสมดุลของปริมาณกราฟฟิกรวมในข่ายเชื่อมโยงต่างๆของเครือข่าย นั่นคือเป็นการ minimize unbalance index ซึ่งทำให้ได้เส้นทางสำหรับส่งกราฟฟิกจาก โหนดที่ 2 ไป โหนดที่ 9 ที่ใช้ข่ายเชื่อมโยง 7-27-33-36 ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เส้นทางสำหรับส่งกราฟฟิกจาก โหนดที่ 2 ไปยัง โหนดที่ 9 เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักเปลี่ยนแปลง

4.2.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของ Multi-Objective Optimization Model

หัวข้อนี้ศึกษาการใช้โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มสองวัตถุประสงค์ที่นำเสนอในบทที่ 3 สำหรับการทดลองวางแผนการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย NSFNET (รูปที่ 4.2) ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก โดยในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มสองวัตถุประสงค์ เพื่อสังเกตการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างสองวัตถุประสงค์ โดยคำนึงถึงการส่งทราฟฟิกที่มีความสมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM ที่มากที่สุด และคำนึงถึงการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM

สำหรับวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักเป็นวิธีที่ใช้ในการแปลงสมการหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นวัตถุประสงค์เดียว โดยจะเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) มาคูณกับแต่ละวัตถุประสงค์ จะได้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบสเกลาร์ (scalarized objective function) โดยการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักพิจารณาจากความสำคัญของวัตถุประสงค์ คือ ถ้าวัตถุประสงค์ใดมีความสำคัญมากกว่า ค่าถ่วงน้ำหนักที่คูณอยู่กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นก็จะมีความมากกว่าอีกวัตถุประสงค์อื่น อย่างไรก็ตามการเลือกพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันย่อมส่งผลต่อขนาด (magnitude) ของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันด้วย ดังนั้นก่อนที่จะมีการนำฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักนั้นจึงต้องทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นบรรทัดฐาน (normalize) เดียวกัน เพื่อให้วัตถุประสงค์ที่พิจารณามีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน สำหรับค่าถ่วงน้ำหนักที่เลือกใช้เพื่อคูณกับแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นต้องรวมกันแล้วมีค่าเป็น 1 จากหนังสือ Multi-objective optimization using evolutionary algorithms [29] กล่าวว่า คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์นี้จะเป็น pareto-optimal ถ้าค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าเป็นบวกสำหรับทุกๆ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่พิจารณา

พารามิเตอร์ในการทดลอง

การทดลองในหัวข้อนี้พิจารณาการวางแผนการส่งทราฟฟิกทั้งหมด 180 ทราฟฟิกระหว่าง 14 คู่โหนดในเครือข่าย NSFNET (รูปที่ 4.2) โดยในการวางแผนการส่งทราฟฟิก ได้กำหนดให้มีการรับประกันว่าความจุหรือแบนด์วิธที่สำรองไว้สามารถรองรับความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิกที่ 90% ($\alpha=0.9$) ในการวางแผนการส่งทราฟฟิกได้ใช้สมการคณิตศาสตร์ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.3 และกำหนดให้ใช้ค่าคงที่ และพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.1-4.3 และได้ทำการเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนัก (w_1, w_2) ตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.02 เพื่อให้สามารถสังเกตการ

เปลี่ยนแปลงของ pareto-front ได้อย่างชัดเจน โดยที่ $w_1 + w_2 = 1$ จากนั้นเมื่อได้คำตอบของเส้นทางส่งโทรฟฟิก ก็นำมาคำนวณหาค่าดัชนีความไม่สมดุลของโทรฟฟิก (f_1) และ ค่าการใช้พลังงานในการส่งโทรฟฟิกในเครือข่าย (f_2) แล้วนำค่าของทั้งสองวัตถุประสงค์มาพิจารณา pareto-front ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของทั้งสองวัตถุประสงค์ที่ค่าถ่วงน้ำหนักต่างๆ

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

จากการทดลองเมื่อพิจารณาเครือข่าย NSFNET ขนาด 14 โหนด ในรูปที่ 4.2 นั้น ก่อนการหาคำตอบของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการแปลงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสองให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน (Normalize) ซึ่งเป็นการทำให้วัตถุประสงค์ทั้งสองนั้นมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน โดยใช้สมการที่ (3.4) ดังแสดงในบทที่ 3 โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการ normalize ได้แก่ f_1^{\min} , f_1^{\max} , f_2^{\min} และ f_2^{\max}

การหาค่า f_1^{\min} ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุดของฟังก์ชัน f_1 ทำได้โดยการแก้ปัญหา minimize unbalance index โดยพิจารณาเงื่อนไขจากสมการที่ (3.6) ถึง (3.12) นั่นคือภายใต้การเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่ายและข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย ซึ่งการคำนวณค่า f_1^{\min} นี้ทำให้สามารถคำนวณค่าของฟังก์ชัน f_2 ที่มีค่ามากที่สุด (f_2^{\max}) ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใช้ในเครือข่ายที่มากที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการใช้งานของอุปกรณ์ในเครือข่ายจากคำตอบของการเลือกใช้เส้นทางสำหรับการขนส่งโทรฟฟิกเพื่อให้ minimize unbalance index

ส่วนการหาค่า f_2^{\min} ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุดของฟังก์ชัน f_2 ทำได้โดยการแก้ปัญหา minimize energy consumption โดยพิจารณาเงื่อนไขจากสมการที่ (3.6) ถึง (3.12) ซึ่งการคำนวณค่า f_2^{\min} นี้ทำให้สามารถคำนวณค่าของฟังก์ชัน f_1 ที่มีค่ามากที่สุด (f_1^{\max}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าความจุที่ใช้รองรับปริมาณโทรฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงโดยใช้สมการที่ (3.13) จากนั้นนำคำตอบที่ได้ไปคำนวณหาค่าความไม่สมดุลของโทรฟฟิกโดยใช้สมการที่ (3.1)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่าย จากผลการทดลองจะสังเกตว่าเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความไม่สมดุลของโทรฟฟิกหรือ f_1 มีค่าลดลง ในขณะที่การใช้พลังงานในการขนส่งโทรฟฟิกในเครือข่ายหรือ f_2 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสร้างสมการคณิตศาสตร์แบบสองวัตถุประสงค์นี้เป็นปัญหาการหาค่าน้อยที่สุด (minimization) ดังนั้นถ้าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใดมีค่าถ่วงน้ำหนักที่มีค่ามากกว่าคุณอยู่กับวัตถุประสงค์นั้นจะทำให้

วัตถุประสงคนั้นมีข้อได้เปรียบมากกว่าอีกวัตถุประสงค์ เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเทียบได้กับการพิจารณาวัตถุประสงค์เดียวโดยจะเหลือเพียงวัตถุประสงค์ที่สองเท่านั้น จะสังเกตเห็นว่าค่า f_2 นั้นจะมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 50,930 WAh ส่งผลให้ f_1 มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 43.273 Gbps เนื่องจากการใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่ายมีผลต่อค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิก แสดงให้เห็นว่าถ้าการใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่ายน้อยที่สุด ค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกจะมีค่าสูงสุด จากนั้นเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่งเพิ่มขึ้นตั้งแต่ค่า 0 ไปจนถึง 0.06 นั้นจะสังเกตเห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลต่อ f_2 หรือการใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่าย เนื่องจากค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกมีค่าคงที่ในทุกๆค่าถ่วงน้ำหนัก และเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่ามากพอ นั่นคือ เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่าเป็น 0.08 จะส่งผลต่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สองทำให้ f_2 มีค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะส่งผลต่อค่า f_1 และ f_2 ไปจนกระทั่งเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่าเป็น 1 ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นการพิจารณาวัตถุประสงค์เดียว เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักที่คูณอยู่กับวัตถุประสงค์ที่สองนั้นมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาจากคำตอบที่ได้พบว่าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งนั้นจะส่งผลต่อการใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่ายหรือ f_2 ทำให้การใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่ายมีค่ามากที่สุด เพื่อทำให้ค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกมีค่าลดลงต่ำที่สุด จากการทดลองพบว่าในเครือข่ายนี้เมื่อการใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่ายมีค่ามากที่สุด จะทำให้ค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกเท่ากับ 14.255 แสดงให้เห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักมีอิทธิพลต่อความสำคัญของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หรือกล่าวได้ว่า ค่าถ่วงน้ำหนักจะแปรผกผันกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คูณอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักค่านั้น

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสอง
วัตถุประสงค์ในเครือข่าย NSFNET

w1	w2	Z	f1(x)	f2(x) (WAh)	F1(x)	F2(x)
0	1	0	43.43	50930	1	0
0.02	0.98	200	43.43	50930	1	0
0.04	0.96	400	43.43	50930	1	0
0.06	0.94	600	43.43	50930	1	0
0.08	0.92	918.8023	39.385	51696	0.861377656	0.024967405
0.1	0.9	1086.084	39.385	51696	0.861377656	0.024967405
0.12	0.88	1253.366	39.385	51696	0.861377656	0.024967405
0.14	0.86	1420.648	39.385	51696	0.861377656	0.024967405
0.16	0.84	1564.541	34.794	52530	0.704043866	0.052151239
0.18	0.82	1694.919	34.794	52530	0.704043866	0.052151239
0.2	0.8	1825.298	34.794	52530	0.704043866	0.052151239
0.22	0.78	1955.676	34.794	52530	0.704043866	0.052151239
0.24	0.76	2073.579	32.272	53317	0.617614805	0.077803129
0.26	0.74	2181.542	32.272	53317	0.617614805	0.077803129
0.28	0.72	2490.068	31.036	54677	0.575257025	0.122131682
0.3	0.7	2580.693	31.036	54677	0.575257025	0.122131682
0.32	0.68	2547.764	30.643	54314	0.561788897	0.11029987
0.34	0.66	2842.406	28.815	56254	0.499143249	0.173533246
0.36	0.64	2914.014	29.62	55809	0.526730637	0.159028683
0.38	0.62	2936.946	29.25	55797	0.51405072	0.158637549
0.4	0.6	3137.988	25.968	58762	0.401576422	0.255280313
0.42	0.58	3075.673	24.943	59058	0.366449623	0.264928292
0.44	0.56	3243.745	24.566	60179	0.353529815	0.301466754
0.46	0.54	3280.391	23.684	61118	0.323303633	0.332073012
0.48	0.52	3254.109	23.335	61312	0.311343386	0.338396349

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

w1	w2	Z	f1(x)	f2(x) (WAh)	F1(x)	F2(x)
0.5	0.5	3248.699	23.335	61312	0.311343386	0.338396349
0.54	0.46	3189.975	22.159	62444	0.271041809	0.375293351
0.56	0.44	3161.078	22.067	62511	0.267888965	0.377477184
0.58	0.42	3184.991	21.697	63383	0.255209047	0.405899609
0.6	0.4	3119.811	21.058	64122	0.233310487	0.429986962
0.62	0.38	3138.484	18.899	68294	0.159321453	0.565971317
0.64	0.36	3083.046	17.587	70967	0.11435915	0.65309648
0.66	0.34	2945.63	17.716	70436	0.118779986	0.635788787
0.68	0.32	2754.126	16.633	72011	0.081665524	0.687125163
0.7	0.3	2652.921	15.694	74518	0.049485949	0.768839635
0.72	0.28	2608.833	14.458	78953	0.00712817	0.913396349
0.74	0.26	2406.627	14.356	79011	0.003632625	0.915286832
0.76	0.24	2224.296	14.356	79011	0.003632625	0.915286832
0.78	0.22	2041.966	14.356	79011	0.003632625	0.915286832
0.8	0.2	1859.635	14.356	79011	0.003632625	0.915286832
0.82	0.18	1677.304	14.356	79011	0.003632625	0.915286832
0.84	0.16	1494.973	14.356	79011	0.003632625	0.915286832
0.86	0.14	1312.642	14.356	79011	0.003632625	0.915286832
0.88	0.12	1130.311	14.356	79011	0.003632625	0.915286832
0.9	0.1	947.9805	14.356	79011	0.003632625	0.915286832
0.92	0.08	800	14.25	81610	0	1
0.94	0.06	600	14.25	81610	0	1
0.96	0.04	400	14.25	81610	0	1
0.98	0.02	200	14.25	81610	0	1
1	0	0	14.25	81610	0	1

การทดลองในหัวข้อได้นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ โดยใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักในการแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้เป็นวัตถุประสงค์เดียว จากการศึกษา Tradeoff ระหว่างสองวัตถุประสงค์คือ วัตถุประสงค์ที่หนึ่งเพื่อลดความไม่สมดุลของทราฟฟิกให้น้อยที่สุด และสำหรับวัตถุประสงค์ที่สองที่พิจารณา คือ เพื่อการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM โดยคำนึงถึงการเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย และคำนึงถึงข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่ามากกว่าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่สอง จะส่งผลให้มีการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกเพิ่มขึ้น เพื่อให้เกิดการกระจายของทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงต่างๆ ในเครือข่าย นั่นคือทำให้เกิดความสมดุลของทราฟฟิกมากขึ้น หรือลดค่าของดัชนีความไม่สมดุลนั่นเอง แต่หากค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่สองมีค่าสูงมากขึ้น จะส่งผลให้มีการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกลดลง ทำให้การกระจายตัวของการส่งทราฟฟิกลดลง กล่าวคือทราฟฟิกจะถูกส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงร่วมกันมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความสมดุลของการส่งทราฟฟิกมีค่าลดลง ซึ่งทำให้ค่าดัชนีความไม่สมดุลเพิ่มขึ้นนั่นเอง

จะสังเกตได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักจะแปรผกผันกับวัตถุประสงค์ที่มันขึ้นอยู่กับ คือ เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้ดัชนีความไม่สมดุลของทราฟฟิกลดลง และเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่สองมีค่าลดลงจะทำให้มีการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกเพิ่มขึ้น

4.3 การศึกษาผลกระทบของปริมาณทราฟฟิกที่ส่งภายในเครือข่ายต่อลักษณะความสมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานของเครือข่าย

หัวข้อนี้ศึกษาผลกระทบเมื่อปริมาณทราฟฟิกที่ส่งระหว่างคู่โหนดในเครือข่ายมีจำนวนต่างๆ คือ 100 ทราฟฟิก, 140 ทราฟฟิก และ 180 ทราฟฟิก ดังแสดงรายละเอียดของ Traffic matrix ในภาคผนวก ก. โดยการทดลองได้ใช้เครือข่ายที่ต่างกัน 2 เครือข่าย คือ เครือข่าย NSFNET [28] และเครือข่าย COST239 [30] ซึ่งเครือข่าย NSFNET ประกอบด้วย OXC จำนวน 14 โหนด และมีข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ 44 ข่ายเชื่อมโยง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ส่วนเครือข่าย COST239 ประกอบด้วย OXC จำนวน 11 โหนด และมีข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ 52 ข่ายเชื่อมโยง ดังแสดงในรูปที่ 4.7

โดยในการวางแผนการส่งทราฟฟิกได้พิจารณาให้มีการรับประกันว่าความจุหรือแบนด์วิดท์ที่สำรองไว้ ให้สามารถรองรับความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิกที่ 90% และ 99% ($\alpha=0.9$ และ 0.99) ในการวางแผนการส่งทราฟฟิกได้ใช้สมการคณิตศาสตร์ดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.3 และกำหนดให้ใช้ค่าคงที่ และพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.1-4.3 โดยได้ทำการเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนัก (w_1, w_2) ตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.02 เพื่อให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ pareto-front ได้อย่างชัดเจน ($w_1 + w_2 = 1$) จากนั้นเมื่อได้คำตอบของเส้นทางส่งทราฟฟิก ก็นำมาคำนวณหาค่าดัชนีความไม่สมดุลของทราฟฟิก (Unbalance index) และ ค่าการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย (Energy) แล้วนำค่าของทั้งสองวัตถุประสงค์มาพิจารณา pareto-front ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของทั้งสองวัตถุประสงค์ที่ค่าถ่วงน้ำหนักต่างๆ

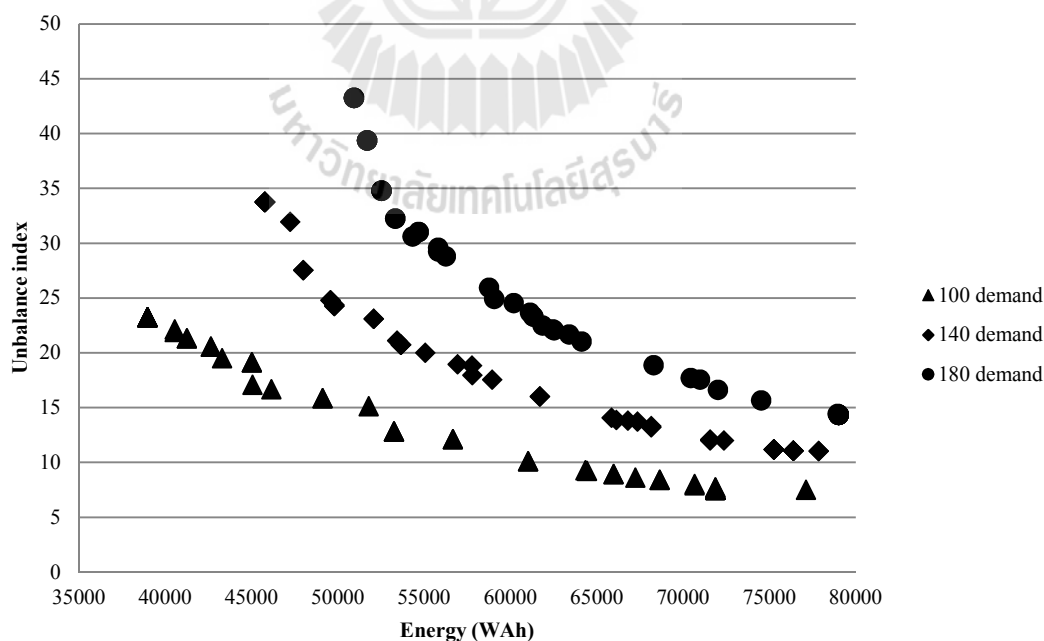
4.3.1 ผลการทดลองกรณีเครือข่าย NSFNET

รูปที่ 4.4 - 4.6 เป็นรูปของ pareto-front ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสองวัตถุประสงค์ (Unbalance index และ Energy) ซึ่งคำนวณได้หลังจากได้เส้นทางส่งทราฟฟิกสำหรับทราฟฟิกทั้งหมดที่พิจารณา ในรูปได้เปรียบเทียบกรณีการส่งทราฟฟิก 100 ทราฟฟิก, 140 ทราฟฟิก และ 180 ทราฟฟิก

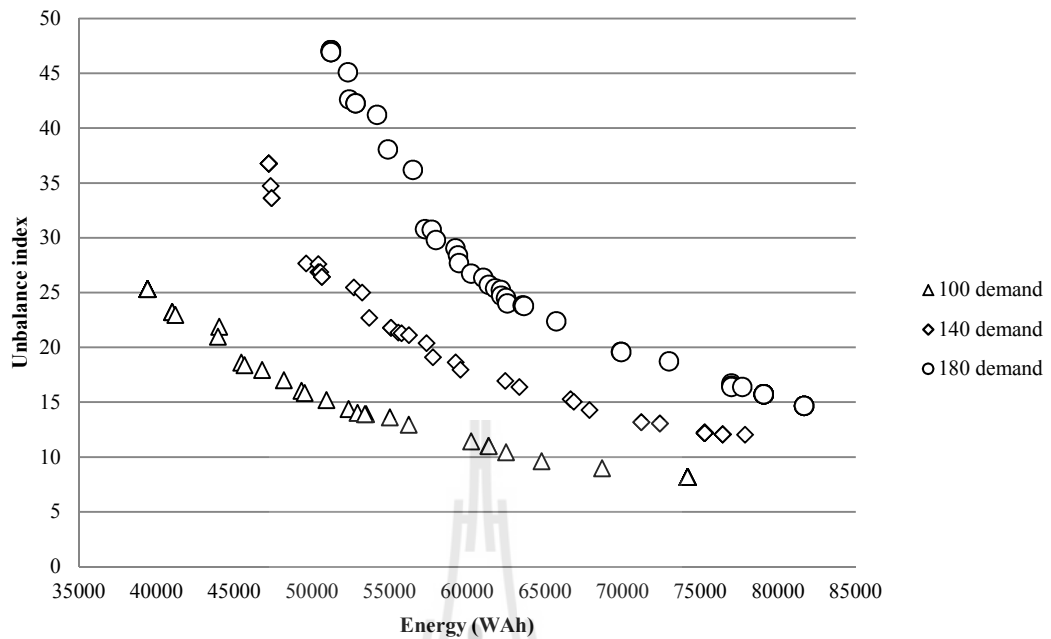
รูปที่ 4.4 เป็นผลของกรณีที่พิจารณาให้มีการรับประกันว่าความจุหรือแบนด์วิดท์ที่สำรองไว้สามารถรองรับความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิกที่ 90% ($\alpha=0.9$) เราสังเกตได้ว่าวัตถุประสงค์ทั้งสองที่พิจารณาจะมีลักษณะแปรผกผันกัน โดยค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่

หนึ่ง คือ ความไม่สมดุลของทรานฟฟิกร์ (Unbalance index) มีค่าลดลง เมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สอง คือ การใช้พลังงานในการขนส่งทรานฟฟิกร์ในเครือข่าย (Energy) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ทรานฟฟิกร์ที่ส่งผ่านเครือข่ายมีปริมาณที่ต่างกันคือ 100 ทรานฟฟิกร์, 140 ทรานฟฟิกร์ และ 180 ทรานฟฟิกร์ จะเห็นว่า ถ้าพิจารณาที่ค่าของการใช้พลังงานเท่ากัน กรณี 180 ทรานฟฟิกร์ให้ค่า Unbalance index ที่สูงกว่า นั่นหมายความว่า การกระจายตัวของทรานฟฟิกร์ที่ส่งในเครือข่ายมีความสมดุลน้อยกว่ากรณีที่มีปริมาณทรานฟฟิกร์น้อยๆ แต่ถ้าพิจารณาที่ค่าของ Unbalance index ที่เท่ากัน จะเห็นว่ากรณี 180 ทรานฟฟิกร์มีการใช้พลังงานในการขนส่งทรานฟฟิกร์ที่สูงกว่ากรณีอื่น

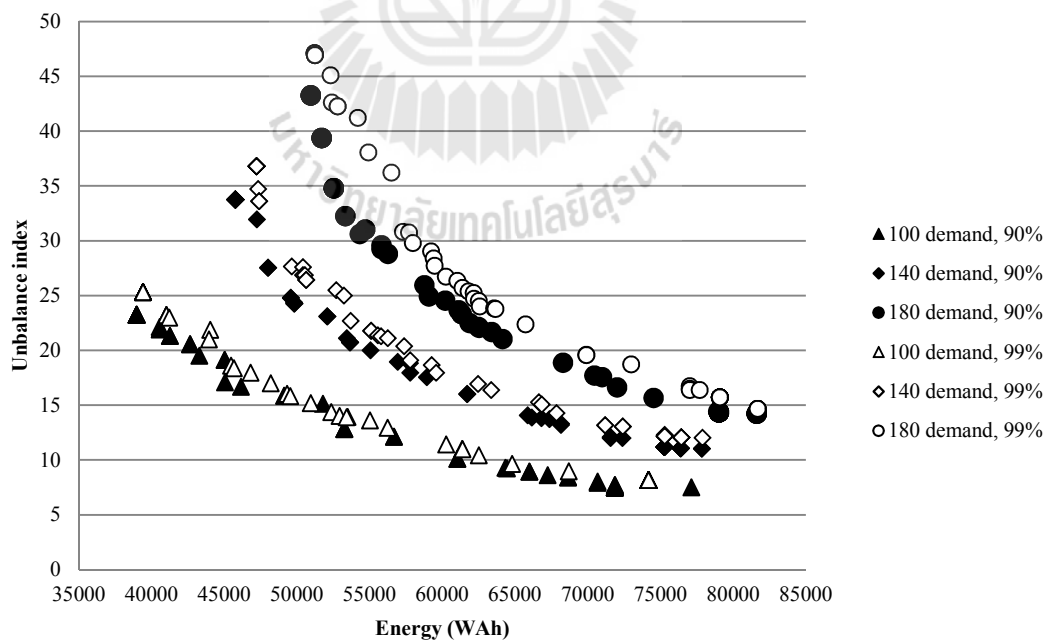
รูปที่ 4.5 เป็นผลของกรณีที่พิจารณาให้มีการรับประกันว่าความจุหรือแบนด์วิดท์ที่สำรองไว้สามารถรองรับความแปรปรวนของปริมาณทรานฟฟิกร์ที่ 99% ($\alpha=0.99$) เราสังเกตได้ว่า วัตถุประสงค์ทั้งสองที่พิจารณาจะมีลักษณะแปรผกผันกัน เช่นเดียวกับรูปที่ 4.4 ส่วนรูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบกรณีที่มี $\alpha=0.9$ และ $\alpha=0.99$ จะเห็นว่าเมื่อค่าของ α เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าของ Unbalance index เพิ่มขึ้น นั่นคือค่าความสมดุลของการกระจายตัวของทรานฟฟิกร์ในเครือข่ายลดลง เนื่องจากการใช้ค่า α ในระดับที่สูงกว่า จะทำให้ปริมาณการสำรองแบนด์วิดท์เพื่อรองรับทรานฟฟิกร์มีค่ามากกว่ากรณีที่กำหนดค่า α ที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย NSFNET กรณีการรับประกันความไม่แน่นอนของทรานฟฟิกร์ที่ 90%



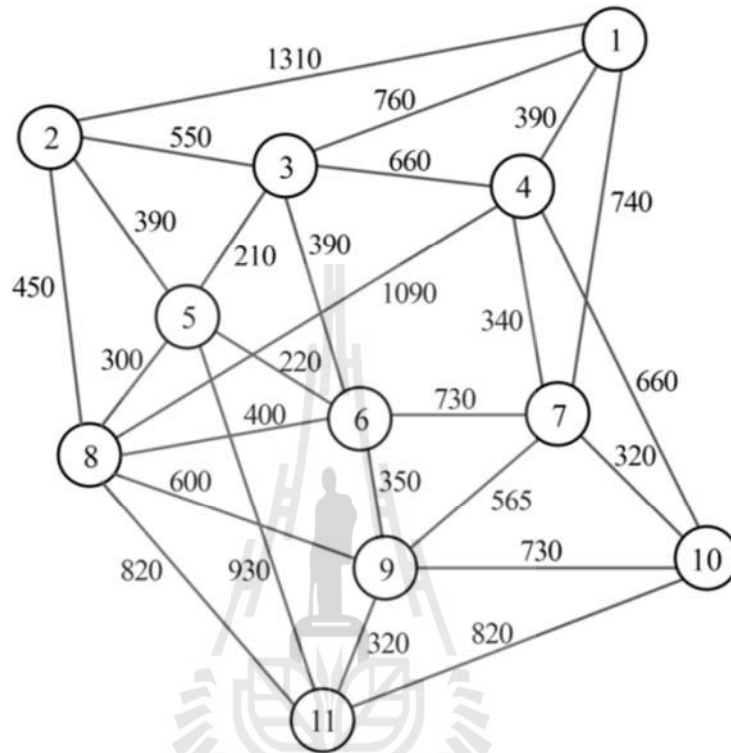
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย NSFNET กรณีการรับประกันความ
ไม่แน่นอนอัตราฟีกที่ 99%



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย NSFNET กรณีการรับประกันความ
ไม่แน่นอนอัตราฟีกที่ 90% และ 99%

4.3.2 ผลการทดลองกรณีเครือข่าย COST239

หัวข้อนี้พิจารณาการวางแผนการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย COST239 ประกอบด้วย OXC จำนวน 11 โหนด และมีข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ 52 ข่ายเชื่อมโยง ดังแสดงในรูปที่ 4.7



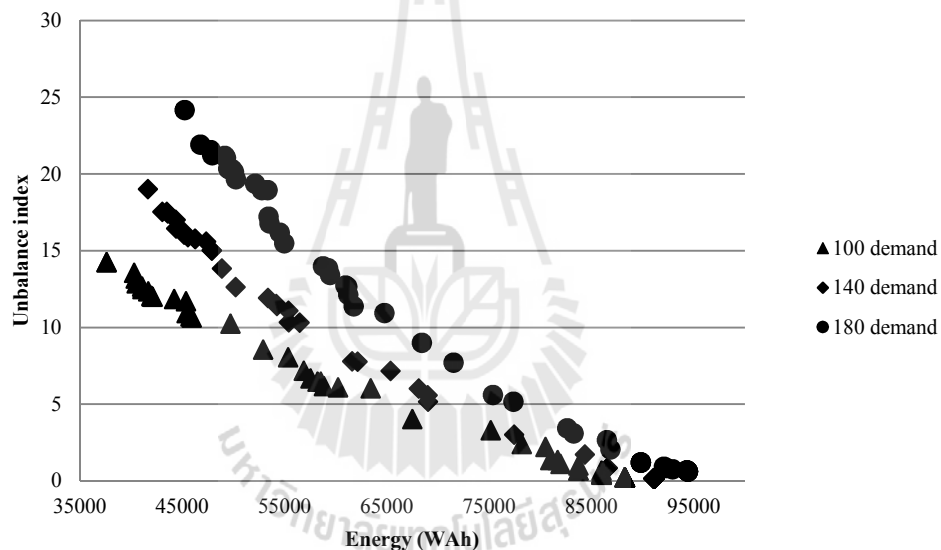
รูปที่ 4.7 โครงสร้างเครือข่าย COST239 (ความยาวของข่ายเชื่อมโยงหน่วยเป็น km.)

รูปที่ 4.8 - 4.10 เป็นรูปของ pareto-front ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสองวัตถุประสงค์ (Unbalance index และ Energy) ซึ่งคำนวณได้หลังจากได้เส้นทางการส่งทราฟฟิกสำหรับทราฟฟิกทั้งหมดที่พิจารณา ในรูปได้เปรียบเทียบกรณีการส่งทราฟฟิก 100 ทราฟฟิก, 140 ทราฟฟิก และ 180 ทราฟฟิก

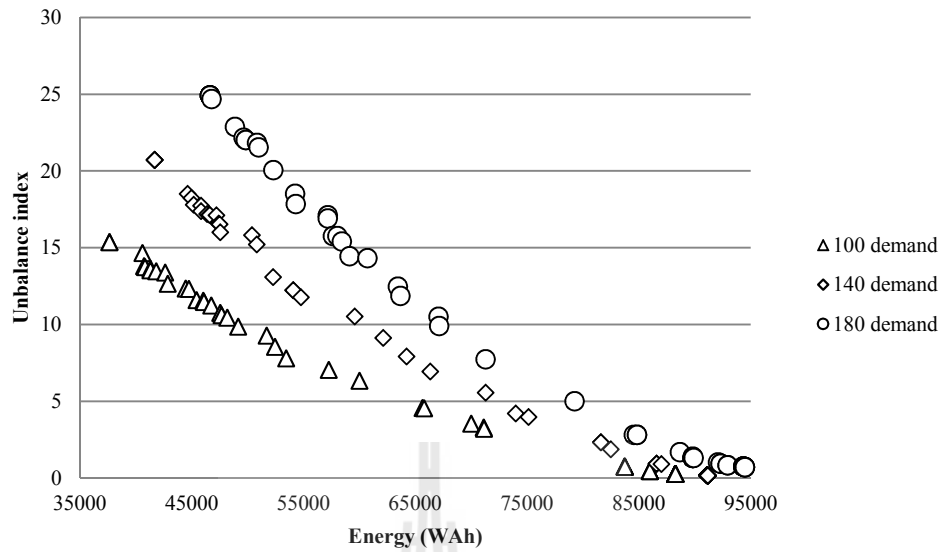
รูปที่ 4.8 และ 4.9 เป็นผลของกรณีที่พิจารณาให้มีการรับประกันว่าความจุหรือแบนด์วิดท์ที่สำรองไว้สามารถรองรับความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิกที่ 90% ($\alpha=0.9$) และ 99% ($\alpha=0.99$) ตามลำดับ เราสังเกตได้ว่าวัตถุประสงค์ทั้งสองที่พิจารณาจะมีลักษณะแปรผกผันกัน เช่นเดียวกับผลที่ได้ในกรณีทดลองกับเครือข่าย NSFNET โดยค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่ง คือ ความไม่สมดุลของทราฟฟิก (Unbalance index) มีค่าลดลง เมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สอง คือ การใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย (Energy) มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกรณีที่ทราฟฟิกที่ส่งผ่านเครือข่ายมีปริมาณที่ต่างกันคือ 100 ทราฟฟิก, 140 ทรา

ฟฟีก และ 180 ทราฟฟีก ก็จะได้ผลในลักษณะเดียวกับผลที่ได้ในกรณีทดลองกับเครือข่าย NSFNET กล่าวคือ เมื่อพิจารณาที่ค่าของการใช้พลังงานเท่ากัน กรณีการส่ง 180 ทราฟฟีกให้ค่า Unbalance index ที่สูงกว่า นั้นหมายความว่า การกระจายตัวของทราฟฟีกที่ส่งในเครือข่ายมีความสมดุลน้อยกว่ากรณีที่ปริมาณทราฟฟีกน้อยๆ แต่ถ้าพิจารณาที่ค่าของ Unbalance index ที่เท่ากัน จะเห็นว่ากรณี 180 ทราฟฟีกมีการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟีกที่สูงกว่ากรณีอื่น

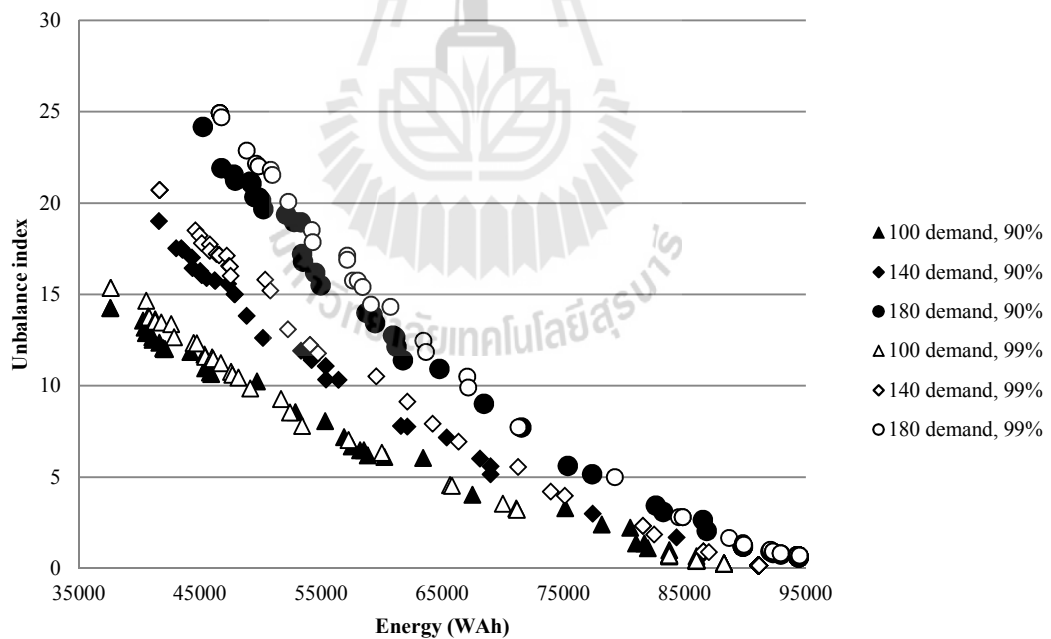
ส่วนรูปที่ 4.10 เป็นการเปรียบเทียบกรณีที่ $\alpha=0.9$ และ $\alpha=0.99$ จะเห็นว่าเมื่อค่าของ α เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าของ Unbalance index เพิ่มขึ้น นั่นคือค่าความสมดุลของการกระจายตัวของทราฟฟีกในเครือข่ายลดลง เนื่องจากการใช้ค่า α ในระดับที่สูงกว่า จะทำให้ปริมาณการสำรองแบนด์วิธเพื่อรองรับทราฟฟีกมีค่ามากกว่ากรณีที่กำหนดค่า α ที่น้อยกว่า



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย COST239 กรณีการรับประกันความไม่แน่นอนทราฟฟีกที่ 90%



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย COST239 กรณีการรับประกันความ
ไม่แน่นอนอัตราฟลักที่ 99%



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย COST239 กรณีการรับประกัน
ความไม่แน่นอนอัตราฟลักที่ 90% และ 99%

4.4 การเปรียบเทียบเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้กับเทคนิคอื่น

หัวข้อนี้เปรียบเทียบการวางแผนการส่งทราฟฟิกที่ใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (MOO Model) กับเทคนิคที่นำเสนอในงานวิจัย [31] ซึ่งเป็นแนวทางพื้นฐานที่ใช้ในการวางแผนการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM

เทคนิคการวางแผนการส่งทราฟฟิกที่นำเสนอในงานวิจัย [31] ได้ประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่มีวัตถุประสงค์ของการเลือกเส้นทางในการส่งทราฟฟิกเพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายของเครือข่ายให้น้อยที่สุด (Minimize cost) ในที่นี้จึงเรียกเทคนิคนี้ว่า MC Model ซึ่งมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังแสดงในสมการที่ (4.1) และใช้สมการเงื่อนไข (3.6) - (3.12) เช่นเดียวกับ MOO Model ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

$$\min_{\forall j} \left[\sum_{m \in N} C_{LC} \cdot V_m + \sum_{m \in N} C_{RP} \cdot Y_m + 2 \cdot \sum_{k \in D} C_{tr} \cdot \beta_k + \sum_{j \in A} C_O \cdot \omega_j + \sum_{j \in A} C_{MD} \cdot MD_j + \sum_{j \in A} (C_E \cdot EA_j + C_G \cdot EG_j) \cdot Nf_j \right] \quad (4.1)$$

โดยที่

- C_{LC} คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card)
- C_{RP} คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor)
- C_{tr} คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของเครื่องทรานสปอนเดอร์ (transponder)
- C_E คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFA)
- C_G คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerator)
- C_O คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC)
- C_{MD} คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ

การทดลองส่งทราฟฟิกในหัวข้อนี้ พิจารณาการส่งทราฟฟิกผ่านเครือข่าย NSFNET และ COST239 ที่แสดงดังรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.7 ตามลำดับ โดยในการวางแผนการส่งทราฟฟิกได้พิจารณาให้มีการรับประกันว่าความจุหรือแบนด์วิธที่สำรองไว้ให้สามารถรองรับความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิกที่ 90% ($\alpha=0.9$) และกำหนดค่าใช้จ่ายค่าคงที่ และพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.1-4.3 และทดลองวางแผนการส่งทราฟฟิกสำหรับกรณีที่มีปริมาณทราฟฟิกที่ส่งระหว่างคู่โหนดในเครือข่ายต่างกัน 3 แบบ คือ 100 ทราฟฟิก, 140 ทราฟฟิก และ 180 ทราฟฟิก ดังแสดงรายละเอียดของ Traffic matrix ในภาคผนวก ก.

ผลการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 ซึ่งพิจารณาผลการวางแผนทราฟฟิกของ MOO Model ที่มีค่าใช้จ่ายในการส่งทราฟฟิกใกล้เคียงกับค่าใช้จ่ายของ MC Model และเปรียบเทียบผลการทำงานใน 2 ประเด็น คือ ประเด็นความสมดุลในการกระจายทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงต่างๆของเครือข่าย และประเด็นของพลังงานที่ใช้ในการส่งทราฟฟิกทั้งหมด

ตารางที่ 4.5 เป็นผลของกรณีที่ทดลองในเครือข่าย NSFNET พิจารณากรณีของการส่งทราฟฟิก 100 ทราฟฟิก สำหรับ MC Model ชุดเส้นทางส่งทราฟฟิกที่ได้ ทำให้มีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 1,848 K unit ส่วน MOO Model ได้เลือกคำตอบที่ได้จากกรณีที่ค่าถ่วงน้ำหนักเป็น $w_1=0$ และ $w_2=1$ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการส่งทราฟฟิก 1,902.83 K unit เมื่อคำนวณค่า Unbalance index และค่าการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิกจากการใช้เส้นทางส่งทราฟฟิกที่ได้ พบว่า MOO Model ให้ค่า Unbalance index ที่น้อยกว่า MC Model ซึ่งหมายความว่า การส่งทราฟฟิกด้วยเส้นทางที่ได้จาก MOO Model ทำให้ทราฟฟิกได้มีการกระจายการส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงในเครือข่ายอย่างสมดุลมากกว่ากรณีของ MC Model นอกจากนี้ MOO Model ยังมีการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิกที่น้อยกว่าของ MC Model อีกด้วย สำหรับกรณีที่ส่งทราฟฟิก 140 และ 180 ทราฟฟิก ก็ได้ผลในลักษณะเดียวกัน นั่นคือ MOO Model มีการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิกที่น้อยกว่า MC Model และมีความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงในเครือข่ายมากกว่า MC Model (หรืออีกนัยหนึ่งคือ มีค่า Unbalance index ที่น้อยกว่า MC Model)

ตารางที่ 4.6 เป็นผลของกรณีที่ทดลองในเครือข่าย COST239 ซึ่งผลที่ได้ก็มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกับผลของการทดลองในเครือข่าย NSFNET

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบ MOO Model และ MC Model กรณีทดลองในเครือข่าย NSFNET

Traffic Demands	Cost (K unit)		Cost different (%)	Energy(WAh)		Improvement of Energy (%)	Unbalance index		Improvement of Load Balancing (%)
	MC	MOO		MC	MOO		MC	MOO	
100 traffic demands	1,848	1,902.83 ($w_1=0, w_2=1$)	2.83	42,574	38,960	9.63	30.62	23.28	23.97
140 traffic demands	2,210	2,224.52 ($w_1=0, w_2=1$)	0.62	48,640	45,770	2.87	33.97	33.79	0.5
180 traffic demands	2,459	2,462.24 ($w_1=0.08, w_2=0.92$)	0.09	57,004	51,696	9.31	38.31	34.79	9.26

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบ MOO Model และ MC Model กรณีทดลองในเครือข่าย COST239

Traffic Demands	Cost(K unit)		Cost different (%)	Energy(WAh)		Improvement of Energy (%)	Unbalance index		Improvement of Load Balancing (%)
	MC	MOO		MC	MOO		MC1	MOO	
100 traffic demands	1,581.4	1,697.6 ($w_1=0$, $w_2=1$)	6.85	46,386.5	37,590	12.62	14.21	14.07	0.98
140 traffic demands	1,680.7	1,775.1 ($w_1=0$, $w_2=1$)	5.32	51,496.5	41,610	16.43	20.23	19.03	5.93
180 traffic demands	1,781.5	1,824.3 ($w_1=0$, $w_2=1$)	5.45	57,575.5	45,220	21.45	26.08	24.18	7.86



บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาเทคนิคและสมการคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนการส่งทราฟฟิก เพื่อกำหนดเส้นทางในการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM โดยมีการพิจารณา ลักษณะความไม่แน่นอน ความแปรปรวนของทราฟฟิก เพื่อปรับปรุงเรื่องการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิกผ่านอุปกรณ์เครือข่ายให้มีประสิทธิภาพ

เทคนิคการวางแผนการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) แบบหลายวัตถุประสงค์ (Multiple Objectives) เพื่อกำหนดเส้นทางในการส่งทราฟฟิก และเตรียมจองแบนด์วิธให้เพียงพอสำหรับปริมาณทราฟฟิกที่มีความแปรปรวนในระดับที่กำหนด โดยมีหลักการในการเลือกเส้นทางเพื่อให้มีการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิกที่น้อยที่สุด และมีความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกที่ส่งผ่านสายเชื่อมโยงในเครือข่ายมากที่สุด

ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดให้กับปัญหาการวางแผนการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ที่อยู่ในรูปของโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method) ในการแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว และใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ในการหาคำตอบ

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับการวางแผนการส่งทราฟฟิกที่สามารถเตรียมจองแบนด์วิธของสายเชื่อมโยงสำหรับรองรับทราฟฟิกที่มีความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิกในระดับที่กำหนด และยังทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกในสายเชื่อมโยงต่างๆของเครือข่าย รวมถึงมีการใช้พลังงานเครือข่ายในการส่งทราฟฟิกอย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อจำกัดของเทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้คือ การใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ในการหาคำตอบ จะใช้เวลานานมาก หรือหาคำตอบไม่ได้หากปัญหาที่

พิจารณามีตัวแปรจำนวนมากเกินไป นั่นคือเครือข่ายมีขนาดใหญ่เกินไป หรือกราฟฟิกที่ต้องการส่งผ่านเครือข่ายมีจำนวนมากเกินไป

เทคนิคการวางแผนกราฟฟิกไอพีในเครือข่าย IP over WDM ที่ได้ศึกษาและพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชนที่ทำหน้าที่ดูแลและควบคุมระบบการทำงานของกราฟฟิกไอพีผ่านเครือข่ายใยแก้วนำแสงที่มีการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น หรือ IP over WDM เพื่อให้มีการใช้พลังงานในการส่งกราฟฟิกอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถรองรับความแปรปรวนของปริมาณกราฟฟิกได้ นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้จากการใช้โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบหลายวัตถุประสงค์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ยังมีคุณค่าทางวิชาการต่อวงการศึกษาศึกษาและวิจัย ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการออกแบบและวางแผนโครงสร้างเครือข่ายประเภทอื่นได้

สำหรับแนวทางงานวิจัยในอนาคต สามารถพิจารณาใช้วัตถุประสงค์เพิ่ม หรือปรับเปลี่ยนวัตถุประสงค์ หรือ เงื่อนไขอื่น ๆ เพื่อใช้ในการวัดสมรรถนะของการส่งกราฟฟิกผ่านเครือข่ายได้ เช่น ความจำกัดของงบประมาณ ซึ่งในการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของ Multi-Objective Optimization Model สามารถใช้กราฟ pareto front เพื่อสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ต่างๆได้ และงานวิจัยในอนาคตสามารถพัฒนาเทคนิควิธีในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีทาง Heuristic อื่นๆ เช่น Genetic algorithm ซึ่งจะทำให้สามารถหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด ในระยะเวลาที่จำกัดได้ เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] S. Dixit, IP over WDM. John Wiley & Sons, Hoboken: New Jersey, 2003
- [2] P. Leisching and M. Pickavet, "Energy footprint of ICT: Forecasts and network solutions," in OFC/NFOEC'09, Workshop on Energy Footprint of ICT: Forecast and Network Solutions, San Diego, CA, Mar. 2009.
- [3] F. Musumeci, M. Tornatore and A. Pattavina, "A power consumption analysis for IP-over-WDM core network architectures," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 4, February 2012, pp. 108–117.
- [4] Y. Zhang, P. Chowdhury, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Energy Efficiency in Telecom Optical Networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 12, no. 4, Fourth Quarter 2010, pp. 441 – 458.
- [5] J. Kilpi and I. Norros, "Testing the Gaussian approximation of aggregate traffic," in Proc. Internet Measurement Workshop, 2002, pp. 49-61.
- [6] T. Telkamp, "Traffic characteristics and network planning," ISMA, Oct 2002.
- [7] Y. Zhanga, M. Tornatore, P. Chowdhury and B. Mukherjee, "Energy optimization in IP-over-WDM networks," Journal of Optical Switching and Networking, vol. 8, July 2011, pp. 171–180.
- [8] Y. Kim, C. Lee, J.-K. K. Rhee and S. Lee, "IP-over-WDM cross-layer design for green optical networking with energy proportionality consideration," Journal of Lightwave Technology, vol. 30, July 2012, pp. 2088–2096.
- [9] X. Dong, A. Lawey, T. E. H. El-Gorashi, and J. M. H. Elmirghani, "Energy-efficient core networks," in Int. Conf. Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2012, pp. 1–9.
- [10] K. Meesublak, "Network design under demand uncertainty," in Proceedings of APAN Network Research Workshop, August 2008, pp. 19–23.
- [11] K. Meesublak, "A two-layer network design problem under traffic uncertainty," in Conf. ECTI-CON, vol. 2, May 2009, pp. 914–917.

- [12]M. Gagnaire, E. A. Doumith and S. Al Zahr, "A novel exact approach for translucent WDM network design under traffic uncertainty," in Int. Conf. Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2011, pp. 1–6.
- [13]R. Aparicio-Pardo, P. Pavon-Marino, B. Mukherjee, "Robust upgrade in optical networks under traffic uncertainty," in Int. Conf. Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2012, pp. 1–6.
- [14]Zang, H., Jue, J. P., and Mukherjee, B. (2000). A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks, Optical Networks.
- [15]Dutta, R. and Rouskas, G. N. (2000). A Survey of Virtual Topology Design Algorithms for Wavelength Routed Optical Networks, Optical Networks.
- [16]Liu, B. (2009). Theory and Practice of Uncertain Programming, 3rd ed., Uncertainty Theory Laboratory: Beijing, pp. 37-42.
- [17]Tachun Lin, Zhili Zhou and Thulasiraman, K. (2011), Logical topology survivability in IP-over WDM networks: Survivable lightpath routing for maximum logical topology capacity and minimum spare capacity requirements design of reliable, communication networks (DRCN), 8th, International Workshop, pp. 1-8
- [18]Keeratichairitnara, P., Prommak, C. (2012), Logical Topology Design in IP over WDM Networks with Load Balancing under Traffic Uncertainty Communication Systems (ICCS), IEEE International Conference, pp. 55 – 59.
- [19]Poompat Saengudomlert. (2014), Power-Aware Logical Topology Selection for IP-over-WDM Backbone Networks Based on Per-Lightpath Power Consumption Model, Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 11th, pp. 1-5
- [20]Bin Chen, Zheng-Ming Jiang, Teng, R.K.F., Xiao-Hui Lin, MingJun Dai, Hui Wang. (2013), An energy efficiency optimization method in bandwidth constrained IP over WDM networks, Information Communications and Signal Processing (ICICS) 9th, pp. 1-4

- [21] Musumeci, F., Tornatore, M. and Pattavina, A. (2012), A power consumption analysis for IP-over WDM core network architectures, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 4, pp. 108-117.
- [22] Yunlei Lui, Gangxiang Shen, and Weidong Shao. (2013), Design for energy-efficient IP over WDM networks with joint lightpath bypass and router- card sleeping strategies, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 5, pp. 1122-1138.
- [23] Data sheet of Cisco CRS Carrier Routing System 16-Slot Line Card Chassis System Description, January 2012.
- [24] Idzikowski, F. (2009), Power consumption of network elements in IP over WDM networks, Tech. Rep., Telecommunication Networks Group (TKN), TU Berlin, Germany.
- [25] Data sheet of Cisco ONS 15216 EDFA, August 2001.
- [26] Dong, X., Lawey, A., El-Gorashi, T. E. H., and Elmirghani, J. M. H. (2012), Energy-efficient core networks, in *Int. Conf. Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, pp. 1-9.
- [27] R. Huelsermann, M. Gunkel, C. Meusburger, and D. A. Schupke. (2008), Cost modeling and evaluation of capital expenditures in optical multilayer networks, *J. Opt. Netw.*, Vol. 7, no. 9, pp. 814-833.
- [28] Miyao, Y. and Saito, H. (1998). Optimal Design and Evaluation of Survivable WDM Transport Networks, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 1190-1198.
- [29] Deb, K. (2009). *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom.
- [30] Somani, A. K. (2006). *Survivability and Traffic Grooming in WDM Optical Networks*, Cambridge University Press.
- [31] Meesublak, K. (2009), A Two-Layer Network Design Problem under Traffic Uncertainty, in *Conference ECTI-CON*, Vol. 2, pp. 914-917.



ตารางที่ ก.2 ปริมาณกราฟฟิก 140 กราฟฟิก สำหรับเครือข่าย NSFNET

คูโนด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2		0	1	0	5	1	2	6	2	3	0	3	0	2
3			0	1	2	0	5	12	4	1	0	0	0	1
4				0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1
5					0	0	2	6	2	2	0	6	1	4
6						0	1	0	1	1	0	0	0	1
7							0	5	3	2	0	5	0	3
8								0	5	4	1	5	1	3
9									0	3	1	6	2	0
10										0	1	2	1	0
11											0	1	0	0
12												0	0	0
13													0	1
14														0

ตารางที่ ก.3 ปริมาณกราฟฟีก 180 กราฟฟีก สำหรับเครือข่าย NSFNET

จุดโนด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2		0	1	0	7	1	2	6	2	4	0	4	0	3
3			0	1	2	0	10	21	4	1	0	0	0	1
4				0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1
5					0	0	2	6	2	2	0	8	1	4
6						0	1	0	1	1	0	0	0	1
7							0	11	3	2	0	7	0	3
8								0	6	6	1	5	1	3
9									0	4	1	13	2	0
10										0	1	2	1	0
11											0	1	0	0
12												0	0	0
13													0	1
14														0

ตารางที่ ก.4 ปริมาณกราฟฟีก 100 กราฟฟีก สำหรับเครือข่าย COST239

คูโหนด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1
8	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

ตารางที่ ก.5 ปริมาณกราฟฟีก 140 กราฟฟีก สำหรับเครือข่าย COST239

คูโหนด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	0	2	2	1	1	1	2	1	1	1
3	1	2	0	2	1	1	1	2	1	1	1
4	1	2	2	0	2	1	1	2	2	2	2
5	1	1	1	1	0	1	1	2	2	1	1
6	1	1	1	2	1	0	1	1	1	1	1
7	1	1	1	2	1	1	0	1	1	1	1
8	1	2	2	1	2	1	1	0	2	1	2
9	1	1	1	2	2	1	1	2	0	1	2
10	1	1	1	2	1	1	1	1	1	0	1
11	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	0

ตารางที่ ก.6 ปริมาณกราฟฟีก 180 กราฟฟีก สำหรับเครือข่าย COST239

คูโหนด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	1	1	1	1	2	4	1	3	1	1
2	1	0	2	3	1	1	1	3	1	1	1
3	1	2	0	4	1	1	1	2	1	2	1
4	1	3	3	0	2	1	1	3	2	4	3
5	1	1	1	1	0	1	1	2	4	1	2
6	2	1	1	2	1	0	1	1	3	2	1
7	2	1	2	2	1	1	0	1	2	2	3
8	1	3	2	2	2	1	1	0	2	1	2
9	1	1	1	2	4	2	1	2	0	1	2
10	1	1	1	3	1	3	1	1	1	0	1
11	1	1	1	3	1	1	1	3	2	1	0



ภาคผนวก ข.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ

1. ปฏิจิต แสงदानุช และ ชุตินา พรหมมาก (2014). Logical Topology Design in IP over WDM Networks with Load Balancing under Traffic Uncertainty, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) Vol. 2, pp. 623 - 626
2. Patidja Sangdanuch and Chutima Prommak (2015). Traffic Planning For Energy Efficiency In IP Over WDM Networks With Load Balancing Under Traffic Uncertainty, in 9th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, pp. 435 - 438

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุติมา พรหมมาก สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยม) จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อ พ.ศ. 2535 ปริญญาโท (Telecommunication Engineering) จาก University of Colorado at Boulder เมื่อ ค.ศ. 1998 และปริญญาเอก (Telecommunication Engineering) จาก University of Pittsburgh เมื่อ ค.ศ. 2004 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สนใจงานวิจัยเรื่อง Wireless network design, Optical network design, Network optimization และ Heuristic approaches for network design

