

การพัฒนาเทคนิคการวางแผนกราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
ในเครื่องข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น
ภายใต้ความไม่แน่นอนของกราฟฟิก

นายปารเมษฐ์ กীরติชัยฤทธิณาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**DEVELOPMENT OF TRAFFIC PLANNING
TECHNIQUES FOR ENERGY EFFICIENT
IN IP OVER WDM NETWORKS UNDER
TRAFFIC UNCERTAINTY**

Paramet Keeratichairitnara

The image contains a large, faint watermark of the Suranaree University of Technology logo. The logo is circular and features a central emblem with a figure and a gear-like border. The Thai text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written around the bottom of the circle.

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2013

การพัฒนาเทคนิคการวางแผนกราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพใน
เครือข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น
ภายใต้ความไม่แน่นอนของกราฟฟิก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพิจารณาเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร. สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ชุติมา พรหมมาก)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร. ปิยะภรณ์ มีสวัสดิ์)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปารเมษฐ์ กิริตชัยฤทธิ์นารา : การพัฒนาเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก (DEVELOPMENT OF TRAFFIC PLANNING TECHNIQUES FOR ENERGY EFFICIENT IN IP OVER WDM NETWORKS UNDER TRAFFIC UNCERTAINTY) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก, 189 หน้า.

การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายแกนหลักประเภทไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing: IP over WDM) เป็นเรื่องที่ได้รับ ความสนใจมาก เนื่องจากในเครือข่ายการสื่อสารมีแนวโน้มของการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปี ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การใช้พลังงานของเครือข่ายเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการใช้งานอินเทอร์เน็ตที่มี เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ปริมาณทราฟฟิกในเครือข่ายเพิ่มขึ้นอย่างมาก ปริมาณทราฟฟิกใน เครือข่ายจึงเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบโดยตรงต่อการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่ายสำหรับการ ขนส่งทราฟฟิก ซึ่งทราฟฟิกในเครือข่ายมีลักษณะไม่แน่นอน มีความแปรปรวนขึ้นอยู่กับปริมาณ การใช้งานของผู้ใช้ ดังนั้นความไม่แน่นอนของทราฟฟิกจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องมีการพิจารณา สำหรับการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่ายเพื่อแก้ปัญหาในเรื่องการใช้พลังงานอย่างไม่คุ้มค่าใน เครือข่ายการสื่อสารอย่างเครือข่าย IP over WDM ให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่าย IP over WDM ด้วยการพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอนของ ทราฟฟิก ซึ่งเป็นการออกแบบ โครงข่ายเสมือนภายใต้การพิจารณาระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ด้วยการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้การใช้พลังงานสำหรับการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM มี ประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยใช้รูปแบบการแก้ปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม และหา คำตอบโดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ยิ่งไปกว่านั้นผู้วิจัยได้คำนึงถึง คุณภาพของการบริการ ซึ่งทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนมีผลต่อความน่าเชื่อถือของการเชื่อมต่อ ภายในเครือข่าย งานวิจัยนี้ยังเสนอเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลของทราฟฟิกภายใต้ ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก และได้ตรวจสอบผลกระทบระหว่างเทคนิคการวางแผนทราฟฟิก เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและเพื่อความสมดุลของทราฟฟิกภายใต้ความไม่แน่นอน ของทราฟฟิก

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

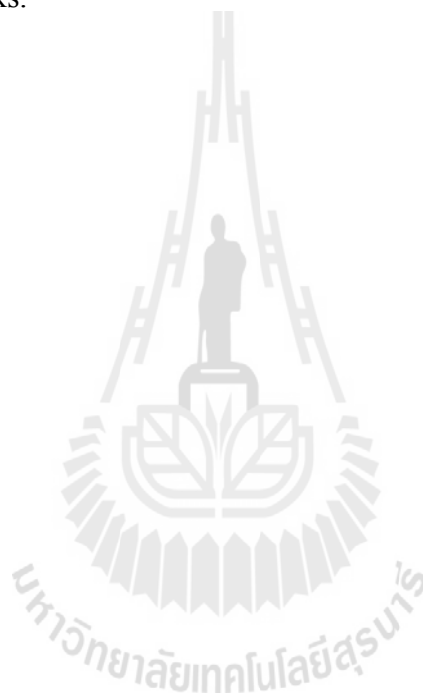
PARAMET KEERATICHAIKITNARA : DEVELOPMENT OF TRAFFIC
PLANNING TECHNIQUES FOR ENERGY EFFICIENT IN IP OVER WDM
NETWORKS UNDER TRAFFIC UNCERTAINTY. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. CHUTIMA PROMMAK, Ph.D., 189 PP.

CORE NETWORK/IP OVER WDM/ENERGY EFFICIENCY/
TRAFFIC PLANNING/TRAFFIC UNCERTAINTY

Energy efficiency in core network for IP over Wavelength Division Multiplexing (IP over WDM) network is receiving much attention because the telecommunications network has a trend of increasing energy consumption every year. The one reason for the power consumption of communication networks is increasing because the use of the internet has increased continuously, resulting in a volume of traffic on the network increases dramatically. Traffic demand on the network is a factor that has a direct impact on the energy consumption of network devices for transporting traffic. Traffic demand nature is uncertain with variance depending on deployment behavior of the user. The uncertainty behavior of the IP traffic brings challenges in provisioning and managing traffic demand to provide energy efficiency in IP over WDM networks.

This research proposes the development of traffic planning techniques for energy efficiency in IP over WDM network with consideration the characteristics of the traffic uncertainty. This is a virtual topology design under guaranteed levels of traffic uncertainty and routing suitable to transport traffic in IP over WDM network. The proposed virtual topology design problem is formulated as Integer Linear

Programming (ILP) models and solved by the IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. Moreover, the researchers took into account the quality of service. Traffic demand uncertainty could affect the reliability of the logical connectivity in IP over WDM networks. This research also proposes traffic planning techniques with load balancing in IP over WDM networks and investigates the effects of planning techniques traffic for energy efficiency and load balancing under traffic uncertainty in IP over WDM networks.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ วงศ์สรรค์ รองศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนคุณครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ปารเมษฐ์ กิริติชัยฤทธิ์นารา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	5
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	5
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	6
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน.....	6
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	6
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	7
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	7
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	7
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	7
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	8
1.8 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้.....	8
1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2	ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	10
2.1	กล่าวนำ	10
2.2	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
2.3	วิวัฒนาการของเครือข่ายแกนหลัก	16
2.4	ทำไมต้อง IP over WDM	20
2.5	โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่าย IP over WDM	22
	2.5.1 สถาปัตยกรรมเครือข่ายในชั้น IP	24
	2.5.2 สถาปัตยกรรมเครือข่ายในชั้นเชิงแสง	26
2.6	ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย	28
2.7	การจัดการทราฟฟิกของเครือข่ายเชิงแสง	32
	2.7.1 การกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น	32
	2.7.2 การออกแบบเครือข่ายเชิงแสงและการวางแผนความจุ	33
	2.7.3 การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยวิธีของไดคัสตรา	35
2.8	ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก	37
	2.8.1 การเตรียมความจุเพื่อรองรับทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน	37
2.9	การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม	39
	2.9.1 รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้น	39
	2.9.2 ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้น	41
	2.9.3 คุณสมบัติของรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม	41
	2.9.4 การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหา	42
	2.9.5 การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริธึมซิมเพล็กซ์	42
3	การวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของไอพีทราฟฟิกภายในเครือข่ายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	46
3.1	แนวคิดในการวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของไอพีทราฟฟิก	46
3.2	โครงสร้างของเครือข่ายและการออกแบบการทดลอง	48
3.3	การวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิก	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	สรุปผลของงานวิจัยในบทนี้.....	61
4	เทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกภายใต้	
	การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM.....	62
4.1	แนวคิดในการออกแบบและวางแผน โครงข่ายเสมือนสำหรับ	
	เครือข่าย IP over WDM.....	63
4.2	การกำหนดปัญหาการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม.....	65
4.3	การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์.....	68
4.4	การวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม.....	74
4.5	โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม.....	84
4.6	การทดลองออกแบบ โครงข่ายเสมือน.....	86
4.7	การวิเคราะห์ผลการออกแบบ โครงข่ายเสมือน.....	89
4.8	สรุปผลของงานวิจัยในบทนี้.....	96
5	เทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้	
	การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM.....	97
5.1	แนวคิดในการออกแบบและวางแผน โครงข่ายเสมือนสำหรับ	
	เครือข่าย IP over WDM.....	98
5.2	การใช้พลังงานในชั้นการขนส่งทราฟฟิกบนเครือข่าย IP over WDM.....	104
5.3	การกำหนดปัญหาการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม.....	108
5.4	การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์.....	109
5.5	การวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม.....	116
5.6	โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม.....	130
5.7	การทดลองออกแบบ โครงข่ายเสมือน.....	131
5.7.1	ขั้นตอนการดำเนินการตรวจสอบระหว่างการใช้พลังงาน	
	ในเครือข่ายกับความไม่แน่นอนของทราฟฟิก.....	135
5.7.2	ขั้นตอนการดำเนินการตรวจสอบระหว่างการใช้พลังงาน	
	ในเครือข่ายและความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่าย.....	135

สารบัญ (ต่อ)

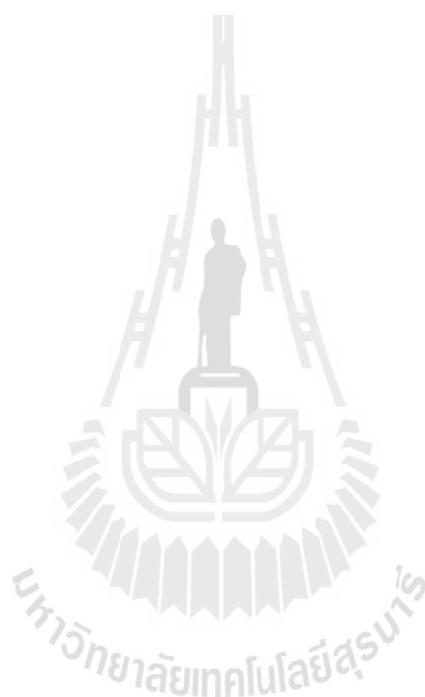
	หน้า
5.8 การวิเคราะห์ผลการออกแบบโครงข่ายเสมือน	138
5.8.1 การใช้พลังงานในเครือข่ายกับความไม่แน่นอนของกราฟฟิก	138
5.8.2 การใช้พลังงานและความสมดุลของกราฟฟิกในเครือข่าย	141
5.9 สรุปผลของงานวิจัยในบทนี้	145
6 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ	147
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์	147
6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	149
6.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต	150
รายการอ้างอิง	151
ภาคผนวก	155
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย	155
ภาคผนวก ข. คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	170
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	178
ประวัติผู้เขียน	189

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รูปแบบของตารางซิมเพล็กซ์	44
3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคุณลักษณะการกระจาย	58
4.1 สรุปคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปรการตัดสินใจ	77
4.2 จำนวนเงื่อนไข	80
4.3 ขนาดของปัญหา	82
4.4 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio	85
4.5 พารามิเตอร์ค่าคงที่ที่ใช้ในการออกแบบโครงข่ายเสมือน	87
4.6 คุณลักษณะการกระจายของกราฟฟิคที่ใช้ในการออกแบบโครงข่ายเสมือน	87
4.7 การรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิค	87
4.8 การใช้ประโยชน์ของข่ายเชื่อมโยง	95
5.1 สรุปคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปรการตัดสินใจ	118
5.2 จำนวนเงื่อนไข	120
5.3 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ	123
5.4 การเปรียบเทียบการใช้จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ	123
5.5 พื้นที่การค้นหา	124
5.6 การเปรียบเทียบการใช้พื้นที่การค้นหา	124
5.7 จำนวนเงื่อนไข	126
5.8 การเปรียบเทียบการใช้จำนวนเงื่อนไขในการประมวลผล	126
5.9 ขนาดของปัญหา	127
5.10 สรุปการใช้พื้นที่ในการประมวลผล	129
5.11 สรุปการเปรียบเทียบการใช้พื้นที่ในการประมวลผล	129
5.12 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio	130
5.13 การรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิค	133

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.14 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนกราฟฟิก.....	133
5.15 การใช้พลังงานของอุปกรณ์.....	134
ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	171



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ชั้นในเครือข่าย..... 16
2.2	วิวัฒนาการของชั้นการสื่อสาร..... 17
2.3	การอยู่ร่วมกันของ SONET/SDH และทราฟฟิกไอพี ในชั้น WDM..... 22
2.4	แผนวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก..... 24
2.5	อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง..... 25
2.6	โครงสร้างอุปกรณ์เครือข่าย..... 25
2.7	สถาปัตยกรรมเครือข่ายเชิงแสง..... 26
2.8	สถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM..... 30
2.9	ความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิก..... 37
3.1	โครงสร้างเครือข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... 49
3.2	โครงสร้างของเครือข่ายหอพักภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... 50
3.3	ตัวอย่างโปรแกรม PRTG Traffic Grapher..... 51
3.4	ปริมาณของทราฟฟิกที่ไหลผ่านสวิตช์ S4..... 53
3.5	ปริมาณของทราฟฟิกที่ไหลผ่านสวิตช์ S13..... 53
3.6	การเปรียบเทียบการใช้งานทราฟฟิกที่ Switch S4..... 54
3.7	Histogram ของทราฟฟิกในช่วงเวลา peak-load ของ Switch S4..... 55
3.8	Histogram ของทราฟฟิกในช่วงเวลา light-load ของ Switch S4..... 56
3.9	Histogram ของทราฟฟิกในช่วงเวลา peak-load ของ Switch S13..... 56
3.10	Histogram ของทราฟฟิกในช่วงเวลา light-load ของ Switch S13..... 57
3.11	P-P Plot ในช่วง Peak-load ของ Switch S4..... 59
3.12	P-P Plot ในช่วง Light-load ของ Switch S4..... 59
3.13	P-P Plot ในช่วง Peak-load ของ Switch S13..... 60
3.14	P-P Plot ในช่วง Light-load ของ Switch S13..... 60
4.1	แบบจำลองเครือข่าย..... 66
4.2	ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น..... 67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม.....	68
4.4 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เมื่อ $J = 20$	76
4.5 ขนาดของพื้นที่การค้นหา.....	79
4.6 จำนวนเงื่อนไข เมื่อ $J = 20$	81
4.7 จำนวนเงื่อนไข เมื่อ $P = 5$	81
4.8 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....	84
4.9 ความจุช่องสัญญาณที่ต้องใช้เพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนต่าง ๆ.....	88
4.10 ปริมาณทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%.....	89
4.11 ปริมาณทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 95%.....	90
4.12 ปริมาณทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%.....	90
4.13 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการกระจายแบบปกติ.....	92
4.14 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการกระจายแบบเบต้า.....	92
4.15 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการกระจายแบบปัวซอง.....	93
4.16 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%.....	93
4.17 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 95%.....	94
4.18 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%.....	94
5.1 เครือข่าย IP over WDM.....	104
5.2 โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM.....	106
5.3 ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น.....	109
5.4 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เมื่อ $J = 20$	117
5.5 ขนาดของพื้นที่การค้นหา.....	119
5.6 จำนวนเงื่อนไข.....	121
5.7 โครงสร้างเครือข่าย NSFNET.....	132
5.8 โครงสร้างเครือข่าย COST239.....	132
5.9 การใช้พลังงานสำหรับแต่ละความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในเครือข่าย NSFNET.....	140
5.10 การใช้พลังงานสำหรับแต่ละการไม่แน่นอนของทราฟฟิกในเครือข่าย COST239.....	140

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 การเปรียบเทียบค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกในเครือข่าย NSFNET.....	143
5.12 การเปรียบเทียบค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกในเครือข่าย COST239.....	144
5.13 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย NSFNET.....	144
5.14 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%.....	145
ก.1 ส่วนประกอบโปรแกรม PRTG Traffic Grapher.....	157
ก.2 การเพิ่มตัวตรวจวัดสัญญาณ (Sensor) ในการมอนิเตอร์ทราฟฟิก.....	159
ก.3 การสร้างรายงาน (Report).....	162
ก.4 การใช้งานโปรแกรม EasyFit.....	165
ก.5 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....	167
ก.6 Data file editing area.....	168
ก.7 Setting file editing area.....	168

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายแกนหลักประเภทไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing : IP over WDM) เป็นเรื่องที่ได้รับ ความสนใจมากในขณะนี้ เนื่องจากในทุก ๆ ปีจะมีแนวโน้มการใช้งานทรัพยากรเครือข่ายที่เพิ่มขึ้น Leisching, P. and Pickavet, M. (2009) กล่าวว่า การใช้พลังงานไฟฟ้าในปี 2009 ของเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (Information and Communication Technology : ICT) ใช้พลังงานไฟฟ้าถึง 8% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั่วโลก และ Zhang, Y., Chowdhury, P., Tornatore, M. and Mukherjee, B. (2010) ยังมีการคาดการณ์ว่าในปี 2020 จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในด้านนี้เพิ่มขึ้นถึง 14% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั่วโลก จากสถานะการใช้พลังงานของเครือข่ายที่เพิ่มมากขึ้นนี้ จึงควรมีการพิจารณาวางแผนการใช้งานเครือข่าย เพื่อให้มีการใช้พลังงานของเครือข่ายการสื่อสารอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การใช้พลังงานของเครือข่ายการสื่อสารเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการใช้งานอินเทอร์เน็ตที่มีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปริมาณกราฟิกในเครือข่ายเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่าย โดยเฉพาะในเครือข่ายแกนหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวางแผนการใช้งานทรัพยากรเครือข่ายอย่างเหมาะสม เพื่อให้การใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่ายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ช่วยประหยัดพลังงานซึ่งจะนำไปสู่การช่วยลดภาวะโลกร้อนอย่างเช่นปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) ได้อีกด้วย

Dixit, S. (2003) กล่าวถึงเครือข่าย IP over WDM เป็นสถาปัตยกรรมเครือข่ายแกนหลักที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มว่าจะได้รับความนิยมต่อไปในอนาคต เครือข่ายดังกล่าวมีส่วนประกอบหลักคือส่วนของชั้นไอพี (IP layer) ซึ่งมีอุปกรณ์จัดเส้นทางหรือเราท์เตอร์ (routers) ที่ใช้ในการกำหนดหรือเลือกเส้นทางที่จะส่งข้อมูลนั้นเข้าสู่ภายในเครือข่าย ในขณะที่ชั้นของการ

มัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (WDM layer) ประกอบด้วยอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (Optical Cross-Connects : OXCs) ที่เชื่อมต่อกันด้วยสายเชื่อมโยงนำแสง (optical fiber link) ซึ่งในการใช้พลังงานสำหรับสถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM นี้จะเกิดขึ้นในส่วนของการดำเนินการทางอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนของการดำเนินการเชิงแสง โดยการใช้พลังงานในส่วนของอิเล็กทรอนิกส์หรือเรียกได้ว่าเป็นการใช้พลังงานในส่วน of ชั้น IP ซึ่งมีการใช้พลังงานที่สูงมากที่เราเตอร์ เพื่อการจัดการทราฟฟิก ในขณะที่การใช้พลังงานในส่วนของการดำเนินการเชิงแสงหรือเรียกได้ว่าเป็นการใช้พลังงานในส่วน of ชั้น WDM มีการใช้พลังงานในส่วนของการสลับช่องสัญญาณทางแสง การขยายสัญญาณและการทวนสัญญาณ และสิ่งหนึ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้พลังงานของเครือข่าวนั้น คือ ปริมาณทราฟฟิกในเครือข่าวนั้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ในเครือข่าวนั้น ซึ่งทราฟฟิกในเครือข่าวนั้นมีลักษณะไม่แน่นอน มีความแปรปรวนขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้งานของผู้ใช้ ดังนั้นความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ Meesublak, K. (2008) กล่าวไว้ ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ต้องพิจารณาเพื่อให้มีการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าวก่อนหลักประเภท IP over WDM ได้อย่างเหมาะสม

จากการสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่าในหลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจในการศึกษาการวางแผนเครือข่าวนั้นสำหรับการใช้พลังงานของเครือข่าวก่อนหลักอย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยของ Zhang, Y., Tornatore, M., Chowdhury, P. and Mukherjee, B. (2011) ได้มีการนำเสนอวิธีการประหยัดพลังงานสำหรับเครือข่าย IP over WDM ด้วยการปิดแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) และโครงสร้างอุปกรณ์เครือข่าวนั้น (chassis) ของเราเตอร์ที่ไม่มีการใช้งาน โดยการปิดอุปกรณ์นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณทราฟฟิกในแต่ละช่วงเวลา และยังมีการเสนอแนวทางบางอย่างเพื่อลดการหยุดชะงักของทราฟฟิกที่อาจเกิดขึ้นเมื่อมีการปิดการใช้งานอุปกรณ์ งานวิจัยของ Kim, Y., Lee, C., Rhee, J. K. and Lee, S. (2012) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ด้วยการพิจารณาสัดส่วนการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่าวนั้นในชั้น IP โดยสัดส่วนการใช้พลังงานของอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งในเครือข่าวนั้น งานวิจัยนี้ได้กล่าวไว้ว่าสัดส่วนการใช้พลังงานของอุปกรณ์นั้นมีผลต่อการประหยัดพลังงานในเครือข่าย IP over WDM และยังมีมีการพิจารณาถึง OXC ที่มีรูปแบบที่แตกต่างกันว่าส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานอย่างไร งานวิจัยของ Musumeci, F., Tornatore, M. and Pattavina, A. (2012) ได้ทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานของเครือข่าย IP over WDM ที่มีโครงสร้างสถาปัตยกรรมที่แตกต่างกัน ซึ่งในการวิเคราะห์นั้นพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานเครือข่าวนั้นด้วยการประเมินการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในส่วน of ชั้นการขนส่ง (transport layer) โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้พลังงานน้อยที่สุด ซึ่งในการวิเคราะห์การใช้พลังงานของโครงสร้าง

สถาปัตยกรรมเครือข่ายที่แตกต่างกันนั้น ก็เพื่อให้สามารถเลือกใช้งานสถาปัตยกรรมเครือข่ายได้อย่างมีความเหมาะสมที่สุด และในงานวิจัยของ Dong, X., Lawey, A., El-Gorashi, T. E. H., and Elmirghani, J. M. H. (2012) ได้วิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานสำหรับ โครงข่ายทางกายภาพของ IP over WDM ร่วมกับการพิจารณาพลังงานสะสมรวม (embodied energy) ซึ่งคือพลังงานที่ใช้ในการผลิตหรือดำเนินการสร้างที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ และยังมี การประเมินการใช้พลังงานร่วมกับการบีบอัดข้อมูลในเครือข่าย และการใช้พลังงานของบิตทอร์เรนต์ (BitTorrent) ที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบเพียร์ทูเพียร์ (peer-to-peer) ร่วมด้วย ในขณะที่การศึกษาในงานวิจัยข้างต้นนี้มีความสำคัญและแสดงผลลัพธ์ที่น่าสนใจแต่ประเด็นสำคัญของกราฟฟิคที่มีความไม่แน่นอนไม่ได้รับการพิจารณา ซึ่งก็มีงานวิจัยให้ความสนใจเกี่ยวกับความไม่แน่นอนของกราฟฟิคในการวางแผนเครือข่าย อย่างในงานวิจัยของ Meesublak, K. (2008) ได้กล่าวถึงลักษณะความไม่แน่นอนที่เกิดจากลักษณะของไอพีกราฟฟิคแบบพลวัต (dynamic nature of the IP-based traffic) และนำเสนอวิธีการวางแผนเครือข่ายที่มีการกำหนดด้วยธรรมชาติของกราฟฟิคภายในขั้นตอนการออกแบบเครือข่าย ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวมีเป้าหมายเพื่อกำหนดเส้นทางของการขนส่งกราฟฟิคในเครือข่าย ด้วยการใช้วัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายภายในเครือข่าย โดยพิจารณาความจุที่ใช้ในการรองรับกราฟฟิคที่ต้องการขนส่งภายในเครือข่าย ซึ่งความจุที่ใช้ในการรองรับกราฟฟิคนี้มีการกำหนดด้วยระดับความไม่แน่นอนของกราฟฟิค โดยงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเครือข่ายที่มีรูปแบบชั้นเดียว (Single layer network) ส่วนในงานวิจัยของ Meesublak, K. (2009) ได้ทำการพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิคสำหรับสถาปัตยกรรมเครือข่ายสองชั้น (Two layer network) โดยใช้วัตถุประสงค์เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Meesublak, K. (2008) คือเพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในเครือข่าย เมื่อมีการร้องขอใช้งานทรัพยากรเครือข่าย อย่างเช่นการใช้งานความจุและสายเชื่อมโยง ในงานวิจัยของ Gagnaire, M., Doumith, E. A. and Al Zaher, S. (2011) ได้กล่าวถึงประเด็นความไม่แน่นอนของกราฟฟิคที่นำมาพิจารณาร่วมกับวัตถุประสงค์การเลือกใช้งานจำนวนของตัวทวนสัญญาณ (Regenerators) ที่แต่ละโหนดให้มีความเหมาะสมกับการร้องขอการเชื่อมต่อของกราฟฟิคในเครือข่าย WDM ให้มากที่สุด ซึ่งได้พิจารณากราฟฟิคด้วยการคาดการณ์กราฟฟิคที่มีความแตกต่างกัน และแบ่งการวิเคราะห์เป็นสองประเด็นคือ ปัญหาการจัดวางจำนวนตัวทวนสัญญาณกับการกำหนดเส้นทางกราฟฟิคและปัญหาการจัดวางจำนวนตัวทวนสัญญาณกับความยาวคลื่นที่มีการใช้งาน ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวก็ได้แสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์การกำหนดจำนวนตัวทวนสัญญาณที่เหมาะสมต่อการออกแบบเครือข่าย WDM ภายใต้อาการความไม่แน่นอนของกราฟฟิค และงานวิจัยของ Aparicio-Pardo, R., Pavon-Marino, P., Mukherjee, B. (2012) ได้ทำการพิจารณาเครือข่ายเชิงแสงภายใต้กราฟฟิคที่มีความไม่แน่นอนเพื่อให้มีความ

เสถียรภาพของเครือข่าย โดยใช้กระบวนการปรับความจุของเครือข่ายเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีการคาดการณ์ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการขนส่งทราฟฟิกโดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระดับค่าใช้จ่ายกับเทคโนโลยีความจุของ WDM ที่แตกต่างกัน

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการวางแผนเครือข่ายสำหรับการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM พบว่า ในงานวิจัยที่ผ่านมาจนถึงแม้ว่ามีบางงานวิจัยที่ทำการพิจารณาเกี่ยวกับปริมาณทราฟฟิกกับการใช้พลังงานในเครือข่าย แต่ก็ยังเป็นเพียงการพิจารณาระดับปริมาณทราฟฟิกด้วยค่าเฉลี่ยเท่านั้น โดยไม่ได้คำนึงถึงความแปรปรวนของทราฟฟิก หรือลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิก และถึงแม้ว่าบางงานวิจัยมีการพิจารณาเรื่องความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในขั้นตอนการวางแผนเครือข่าย แต่งานวิจัยเหล่านี้มีเป้าหมายหลักเกี่ยวกับการลดค่าใช้จ่ายของเครือข่าย หรือเพื่อเลือกใช้งานทรัพยากรเครือข่าย ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ยังขาดการศึกษาประเด็นความไม่แน่นอนของทราฟฟิกร่วมกับการใช้พลังงานของเครือข่าย ดังนั้นงานวิจัยที่นำเสนอจึงได้มุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อกำหนดเส้นทางในการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM โดยมีการพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอน ความแปรปรวนของทราฟฟิก เพื่อปรับปรุงเรื่องการใช้พลังงานในการส่งทราฟฟิกผ่านอุปกรณ์เครือข่ายให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการดำเนินงานและสถาปัตยกรรมพื้นฐานของเครือข่าย IP over WDM

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกภายในเครือข่าย IP over WDM

1.2.3 เพื่อพัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผนทราฟฟิกที่ขนส่งในเครือข่าย IP over WDM เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพของเครือข่ายภายใต้ทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน

1.2.4 เพื่อพัฒนาเทคนิคและสมการคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน

1.2.5 เพื่อวิเคราะห์และประเมินคุณภาพของการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับการวางแผนทราฟฟิกที่ได้จากเทคนิคอื่น

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 การวางแผนการขนส่งทราฟฟิกภายในเครือข่ายที่เหมาะสมนั้น จะช่วยให้มีการสิ้นเปลืองพลังงานที่น้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้มีความคุ้มค่าในการใช้พลังงานของเครือข่ายที่มากขึ้น

1.3.2 การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับการรับประกันสูง จะส่งผลต่อขนาดของแบนด์วิดท์ ซึ่งจะต้องใช้แบนด์วิดท์มากขึ้นสำหรับการขนส่งทราฟฟิกภายในเครือข่าย

1.3.3 การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับการรับประกันสูง จะทำให้มีการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่ายมากขึ้น

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 เครือข่ายแกนหลักที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นเครือข่ายประเภท IP over WDM

1.4.2 ตำแหน่งที่ตั้งของโนดและสายเชื่อมโยงในเครือข่าย IP over WDM ได้มีการกำหนดไว้แล้ว

1.4.3 ความจุของสายเชื่อมโยงในเครือข่าย IP over WDM มีขนาดคงที่

1.4.4 ทราฟฟิกที่ส่งภายในเครือข่ายมีลักษณะแปรปรวน

1.4.5 ค่าของพลังงานที่ใช้ในการส่งทราฟฟิกผ่านเครือข่ายได้จากคู่มือและเอกสารอ้างอิงของอุปกรณ์เครือข่าย

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงาน และทฤษฎีของการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM

1.5.2 ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

1.5.3 วางแผนทราฟฟิกที่มีความแปรปรวนสำหรับเครือข่าย เพื่อศึกษาการขนส่งทราฟฟิกภายในเครือข่ายขนาดต่าง ๆ

1.5.4 พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เป็นสมการสำหรับหาค่าการใช้พลังงานที่เหมาะสม ที่มีการพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

1.5.5 ใช้โปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสมการคณิตศาสตร์ในข้อ 1.5.4 เพื่อหาค่าการใช้พลังงานที่เหมาะสม รวมถึงเส้นทางที่เหมาะสมในการขนส่งข้อมูลจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทาง

1.5.6 ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบและประเมินคุณภาพของเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับการออกแบบและวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM และศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับความไม่แน่นอนของทราฟฟิก
- 3) วางแผนทราฟฟิกที่มีความแปรปรวนสำหรับเครือข่าย เพื่อศึกษาการขนส่งทราฟฟิกภายในเครือข่าย ร่วมกับการพิจารณาทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน
- 4) พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกที่ขนส่งในเครือข่ายภายใต้การพิจารณาทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน
- 5) ศึกษาการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกภายในเครือข่ายแกนหลักสำหรับเครือข่าย IP over WDM
- 6) พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบเครือข่าย IP over WDM เป็นสมการ สำหรับหาค่าเหมาะสมที่สุด สำหรับการใช้งพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพที่มีการพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ขนส่งภายในเครือข่าย
- 7) ใช้โปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสมการคณิตศาสตร์ในข้อ 6)
- 8) ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบและประเมินคุณภาพของเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) วางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ขนาดเล็ก เพื่อศึกษาการขนส่งทราฟฟิกระหว่างโนดต้นทางไปยังปลายทาง
- 3) ศึกษาและวิเคราะห์การคำนวณการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกภายในเครือข่ายแกนหลักสำหรับเครือข่าย IP over WDM

- 4) พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบเครือข่าย IP over WDM เป็นสมการ สำหรับหาค่าเหมาะสมที่สุด สำหรับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ที่มีการพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ขนส่งภายในเครือข่าย
- 5) ใช้โปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสมการคณิตศาสตร์ในข้อ 4)
- 6) ทำการทดลองเปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย สำหรับเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารโทรคมนาคม อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)
- 2) โปรแกรม MATLAB
- 3) โปรแกรม Microsoft Excel
- 4) โปรแกรม ILOG CPLEX

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวางแผนเครือข่าย IP over WDM จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) เก็บรวบรวมผลการทดลองเมื่อมีการรับประกันทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน สำหรับการขนส่งทราฟฟิกภายในเครือข่าย IP over WDM รวมทั้งการใช้พลังงานของเครือข่ายที่รองรับทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเกี่ยวกับเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในการขนส่งทราฟฟิกภายในเครือข่ายแกนหลักสำหรับเครือข่าย IP over WDM ที่มีการพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของทราฟฟิกพร้อมด้วย เพื่อนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่เหมาะสมที่สุด และแสดงทางเลือกการใช้งานทรัพยากรเครือข่ายที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.7.1 เป็นแนวทางในการวางแผนทรานซิปติกภายในเครือข่าย IP over WDM ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและวางแผนพัฒนาเครือข่ายประเภทนี้ได้ในงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถต่อยอดแนวความคิดนี้ได้อีก

1.7.2 ได้ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในการขนส่งทรานซิปติกภายในเครือข่ายแกนหลักสำหรับเครือข่าย IP over WDM

1.8 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการนำเสนอเทคนิคการวางแผนทรานซิปติกเพื่อกำหนดเส้นทางในการขนส่งทรานซิปติกในเครือข่าย IP over WDM โดยมีการพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอน ความแปรปรวนของทรานซิปติก เพื่อปรับปรุงในเรื่องการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งทรานซิปติกผ่านอุปกรณ์เครือข่าย โดยใช้การกำหนดปัญหาการออกแบบโครงข่ายเสมือนด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเต็ม (Integer linear programming : ILP) ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM ที่น้อยที่สุด โดยในการออกแบบนั้นได้คำนึงถึงข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น ข้อจำกัดของทรัพยากรต่าง ๆ ของอุปกรณ์เครือข่าย และยังคำนึงถึงการใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนในระดับต่าง ๆ

นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ยังได้ตระหนักถึงคุณภาพในการให้บริการ ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อความน่าเชื่อถือของผู้ให้บริการ งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอเทคนิคสำหรับการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่ายแกนหลัก IP over WDM ด้วยเทคนิคการวางแผนทรานซิปติกเพื่อความสมดุลของการจัดส่งทรานซิปติกภายในข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพสำหรับเครือข่าย IP over WDM ภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทรานซิปติกโดยใช้การกำหนดปัญหาการออกแบบโครงข่ายเสมือนด้วยการใช้รูปแบบของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความไม่สมดุลของทรานซิปติกในเครือข่าย IP over WDM ให้ให้น้อยที่สุด ภายใต้การพิจารณางบประมาณค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเครือข่ายที่มีอยู่อย่างจำกัด

1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัยและบอกถึงข้อตกลงเบื้องต้นสำหรับการวิจัย

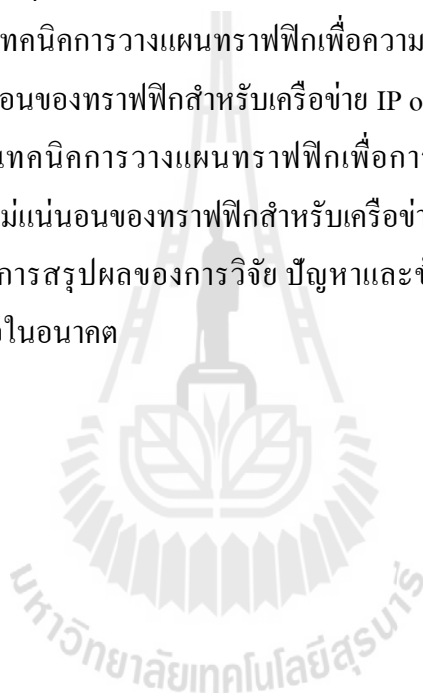
บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของไอพีทราฟฟิกภายในเครือข่ายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4 กล่าวถึงเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM

บทที่ 5 กล่าวถึงเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหา และแนวทางการพัฒนาต่อในอนาคต



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการพัฒนาเทคนิคการวางแผนกราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิกสำหรับเครือข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing : IP over WDM) นั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาในส่วนของปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมา ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างการทำงาน of เครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำงานของเครือข่าย IP over WDM และสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคนิคการวางแผนกราฟฟิกในงานวิจัยนี้ได้ ดังนั้นบทนี้ได้กล่าวถึงหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ 2.1 กล่าวนำ 2.2 ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2.3 วิวัฒนาการของเครือข่ายแกนหลัก 2.4 ทำไมต้อง IP over WDM 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่าย IP over WDM 2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย 2.7 วิสวกรรมกราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM 2.8 ความไม่แน่นอนของกราฟฟิก และ 2.9 การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

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 (สัญญาณไฟฟ้า) และส่วนของการดำเนินการเชิงแสง (สัญญาณแสง) โดยการใช้พลังงานในส่วนของอิเล็กทรอนิกส์หรือเรียกได้ว่าเป็นการใช้พลังงานในส่วน of ชั้น IP ซึ่งมีการใช้พลังงานที่สูงมากที่เราท์เตอร์ เพื่อการจัดสรรกราฟฟิกที่ต้องการขนส่งภายในเครือข่าย ในขณะที่การใช้พลังงานในส่วน of การดำเนินการเชิงแสงหรือเรียกได้ว่าเป็นการใช้พลังงานในส่วน of ชั้น WDM มีการใช้พลังงานในส่วน of การสลับช่องสัญญาณทางแสง การขยายสัญญาณและการทวนสัญญาณ ซึ่งมีหลาย ๆ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงาน ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญสำหรับการใช้พลังงาน

ของเครือข่ายนั้นก็คือปริมาณทราฟฟิกในเครือข่าย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ในเครือข่าย ซึ่งทราฟฟิกในเครือข่ายมีลักษณะที่ไม่แน่นอนมีความแปรปรวน ดังนั้นความไม่แน่นอนของทราฟฟิกจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ควรพิจารณาเพื่อให้มีการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่ายแกนหลักประเภท IP over WDM ได้อย่างเหมาะสม

2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับเครือข่าย IP over WDM และความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาทิศทางปรัศนั่วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานของเครือข่าย IP over WDM โครงสร้าง ข้อจำกัด และการออกแบบของงานวิจัยที่ผ่านมา รวมถึงการศึกษางานวิจัยที่การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับการวางแผนเครือข่าย เพื่อสามารถใช้เป็นข้อมูล และใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้ต่อไป ซึ่งจากการศึกษามีปรัศนั่วรรณกรรมที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.2.1 งานวิจัยของ Zhanga, Y., Tornatore, M., Chowdhurya, P. and Mukherjee, B. (2011) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอแนวทางในการประหยัดพลังงานสำหรับเครือข่าย IP over WDM

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ได้นำเสนอวิธีการประหยัดพลังงานสำหรับเครือข่าย IP over WDM ด้วยการปิดแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) และ โครงสร้างอุปกรณ์เครือข่าย (chassis) ของเราเตอร์ที่ไม่มีการใช้งาน โดยการปิดอุปกรณ์นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณทราฟฟิกในแต่ละช่วงเวลา และงานวิจัยนี้ยังได้เสนอแนวทางบางอย่างเพื่อลดการหยุดชะงักของทราฟฟิกที่อาจเกิดขึ้นเมื่อมีการปิดการใช้งานอุปกรณ์

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าว ถึงแม้มีการนำเสนอแนวทางเพื่อลดการหยุดชะงักของทราฟฟิกในขณะที่เปิดอุปกรณ์เครือข่ายมาใช้งานอีกครั้ง แต่การเพิ่มแนวทางในการแก้ปัญหาการหยุดชะงักของทราฟฟิกดังกล่าวก็ยังทำให้เครือข่ายใช้พลังงานสูงขึ้นตามไปด้วย และวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังมีความซับซ้อนของอัลกอริทึม (Complexity of Algorithm) สูง อย่างไรก็ตาม ปัญหาการหยุดชะงักของทราฟฟิกและความซับซ้อนของอัลกอริทึมจึงเป็นสิ่งที่ควรจะได้รับการพัฒนาต่อไป นอกจากนี้งานวิจัยดังกล่าวก็ยังไม่ได้มีการพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของทราฟฟิกอีกด้วย

2.2.2 งานวิจัยของ Kim, Y., Lee, C., Rhee, J. K. and Lee, S. (2012) เป็นงานวิจัยที่ตรวจสอบและนำเสนอเทคนิคการวางแผนการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM

ลักษณะงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ด้วยการพิจารณาสัดส่วนพลังงาน (Energy Proportionality Index : EPI) ของอุปกรณ์เครือข่ายในชั้น IP โดยสัดส่วนพลังงานของอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งในเครือข่าย งานวิจัยนี้ได้กล่าวไว้ว่าสัดส่วนการใช้พลังงานของอุปกรณ์นั้นมีผลต่อการประหยัดพลังงานในเครือข่าย IP over WDM และยังมีมีการพิจารณาถึงอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (Optical Cross-Connect : OXC) ที่มีรูปแบบโครงสร้างที่แตกต่างกันว่าส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ เทคนิคที่นำเสนอในงานวิจัยดังกล่าวมีผลกระทบต่อคุณภาพของการบริการ (Quality of Service : QoS) คือ ในส่วนการพิจารณาสัดส่วนการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่ายที่มี EPI ต่ำ เทคนิคที่นำเสนอได้จัดสรรเส้นทางสำหรับขนส่งทราฟฟิกที่มีเส้นทางขนส่งไกลมากแทนที่จะเลือกเส้นทางสั้น ๆ เนื่องจากการเลือกเส้นทางไกล ๆ กันของหลายทราฟฟิกส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่น้อยกว่า ซึ่งการพิจารณาสัดส่วนการใช้พลังงานและคุณภาพของการบริการเป็นสิ่งที่ควรได้รับการพิจารณาต่อไป และงานวิจัยดังกล่าวก็ยังไม่ได้มีการพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

2.2.3 งานวิจัยของ Musumeci, F., Tornatore, M. and Pattavina, A. (2012) เป็นงานวิจัยที่พิจารณาการใช้พลังงานของโครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานของเครือข่าย IP over WDM ที่มีโครงสร้างสถาปัตยกรรมที่แตกต่างกัน ซึ่งในการวิเคราะห์นี้พิจารณาพลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานเครือข่ายด้วยการประเมินการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในส่วนของการขนส่ง (transport layer) โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้พลังงานน้อยที่สุด ซึ่งในการวิเคราะห์การใช้พลังงานของโครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่ายที่แตกต่างกันนั้น ก็เพื่อให้สามารถเลือกใช้งานสถาปัตยกรรมเครือข่ายได้อย่างมีความเหมาะสมที่สุด

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้ยังมีปัญหาในเรื่องอัลกอริทึมที่ใหญ่เกินไป เนื่องจากมีบางกรณีในการทดลองไม่ได้รับผลลัพธ์ วิธีแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยใช้การหาคำตอบแบบฮิวริสติก (heuristic) นั่นคือ คำตอบที่ได้ อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดแต่เป็นคำตอบที่ใกล้เคียงที่สุด หรืออาจแก้ปัญหาด้วยการพัฒนาอัลกอริทึมให้มีความซับซ้อนของอัลกอริทึมที่น้อยลง และงานวิจัยนี้ก็ยังไม่ได้มีการพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

2.2.4 งานวิจัยของ Dong, X., Lawey, A., El-Gorashi, T. E. H., and Elmirghani, J. M. H. (2012) เป็นงานวิจัยที่พิจารณาการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่วิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานสำหรับโครงข่ายทางกายภาพของ IP over WDM ร่วมกับการพิจารณาพลังงานสะสมรวม (embodied energy) ซึ่งคือพลังงานที่ใช้ในการผลิตหรือดำเนินการสร้างที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และยังมี การประเมินการใช้พลังงานร่วมกับการบีบอัดข้อมูลในเครือข่าย และการใช้พลังงานของบิตทอร์เรนต์ (BitTorrent) ที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบเพียร์ทูเพียร์ (peer-to-peer) ร่วมด้วย

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้เป็นเพียงแต่การพิจารณาการใช้พลังงานในชั้นทางกายภาพของเครือข่าย ซึ่งชั้น IP ยังไม่มีการนำมาพิจารณาร่วมด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้ยังสามารถพิจารณาพลังงานสะสมรวม (embodied energy) ของชั้น IP ร่วมด้วย เพื่อความครบถ้วนขององค์ประกอบภายในเครือข่าย IP over WDM และงานวิจัยนี้ก็ยังไม่ได้มีการพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของกราฟฟิค

2.2.5 งานวิจัยของ Meesublak, K. (2008) และงานวิจัยของ Meesublak, K. (2009) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอวางแผนกราฟฟิคภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิคในเครือข่าย

ลักษณะงานวิจัย งานวิจัยของ Meesublak, K. (2008) กล่าวถึงลักษณะความไม่แน่นอนที่เกิดจากลักษณะของไอพีกราฟฟิคแบบพลวัต (dynamic nature of the IP-based traffic) และนำเสนอวิธีการวางแผนเครือข่ายที่มีการกำหนดด้วยธรรมชาติของกราฟฟิคภายในขั้นตอนการออกแบบเครือข่าย ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวมีเป้าหมายเพื่อกำหนดเส้นทางการขนส่งกราฟฟิคในเครือข่าย ด้วยการใช้วัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายภายในเครือข่าย โดยพิจารณาความจุที่ใช้ในการรองรับกราฟฟิคที่ต้องการขนส่งภายในเครือข่าย ซึ่งความจุที่ใช้ในการรองรับกราฟฟิคนี้มีการกำหนดด้วยระดับความไม่แน่นอนของกราฟฟิค โดยงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเครือข่ายที่มีรูปแบบชั้นเดียว (Single layer network) ส่วนงานวิจัยของ Meesublak, K. (2009) ได้ทำการพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิคสำหรับสถาปัตยกรรมเครือข่ายสองชั้น (Two layer network) โดยใช้วัตถุประสงค์เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Meesublak, K. (2008) คือเพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในเครือข่าย เมื่อมีการร้องขอใช้งานทรัพยากรเครือข่าย อย่างเช่นการใช้งานความจุและข่ายเชื่อมโยง

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้สมมติว่ารูปแบบของกราฟฟิคที่เกิดขึ้นมีความแปรปรวนที่กำหนดไว้ในขอบเขตของความไม่แน่นอน แต่ก็เป็นไปได้ว่าจะมีเหตุการณ์ในอนาคตที่ปริมาณกราฟฟิคแตกต่างกันไปเกินกว่าการประมาณค่าทางสถิติหรือกราฟฟิคแตกต่างกันไปตาม

ระยะเวลา หากสถานการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นขอบเขตของความไม่แน่นอนที่กำหนดเริ่มต้นจะต้องมีการปรับ ซึ่งควรได้รับการพิจารณาปรับปรุงให้อัลกอริทึมสามารถรองรับต่อสถานการณ์ความแปรปรวนของทราฟฟิกที่จะเปลี่ยนแปลงไป และงานวิจัยดังกล่าวก็ยังไม่ได้พิจารณาร่วมกับการใช้พลังงานในเครือข่าย

2.2.6 งานวิจัยของ Gagnaire, M., Doumith, E. A. and Al Zahr, S. (2011) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการวางแผนการเลือกใช้อุปกรณ์ในเครือข่าย WDM ภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

ลักษณะงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงประเด็นความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่นำมาพิจารณาร่วมกับวัตถุประสงค์การเลือกใช้อุปกรณ์ของตัวทวนสัญญาณ (Regenerators) ที่แต่ละโหนดให้มีความเหมาะสมกับการร้องขอการเชื่อมต่อของทราฟฟิกในเครือข่าย WDM ให้มากที่สุด ซึ่งได้พิจารณาการคาดการณ์ทราฟฟิกด้วยวิธีส่วนเพื่อความปลอดภัย (safety margin) และแบ่งการวางแผนเป็นสองประเด็นคือ ประเด็นการจัดวางจำนวนตัวทวนสัญญาณกับการกำหนดเส้นทางทราฟฟิกและประเด็นการจัดวางจำนวนตัวทวนสัญญาณกับความยาวคลื่นที่มีการใช้งาน ผลการทดลองการวางแผนเครือข่ายภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกด้วยวิธีส่วนเพื่อความปลอดภัยแสดงให้เห็นว่า สำหรับจำนวนทราฟฟิกน้อยมีการเลือกใช้อุปกรณ์ของตัวทวนสัญญาณได้อย่างเหมาะสม แต่เมื่อจำนวนทราฟฟิกมากอัลกอริทึมนี้ไม่สามารถให้ผลลัพธ์ของคำตอบออกมาได้

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ ผลของงานวิจัยนี้ได้พิสูจน์แล้วว่าวิธีส่วนเพื่อความปลอดภัยอาจนำไปสู่การตัดสินใจการวางแผนที่ไม่ถูกต้องและอาจจะไม่สามารถตอบสนองต่อทราฟฟิกที่คาดการณ์ เนื่องจากวิธีส่วนเพื่อความปลอดภัยมีความซับซ้อนของอัลกอริทึมที่สูงมาก ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคการวางแผนเครือข่ายในอนาคตจึงควรหลีกเลี่ยงที่จะใช้การคาดการณ์ทราฟฟิกด้วยวิธีส่วนเพื่อความปลอดภัย หรือพัฒนาให้สามารถตอบสนองต่อทราฟฟิกที่คาดการณ์ และงานวิจัยนี้ก็ยังไม่ได้พิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกร่วมกับการใช้พลังงานในเครือข่าย

2.2.7 งานวิจัยของ Aparicio-Pardo, R., Pavon-Marino, P., Mukherjee, B. (2012) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการเลือกใช้อุปกรณ์เครือข่ายภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

ลักษณะงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาเครือข่ายเชิงแสงภายใต้ทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนเพื่อให้มีความเสถียรภาพของเครือข่าย โดยใช้กระบวนการปรับความจุของเทคโนโลยีเครือข่ายเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีการคาดการณ์ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการขนส่งทราฟฟิก โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระดับ

ค่าใช้จ่ายกับเทคโนโลยีความจุของ WDM ที่แตกต่างกัน ได้แก่ pure 10G (single line rate), pure 40G SLR, pure 100G SLR และ 10/40/100G MLR (mixed line rate)

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้ได้เสนอให้มีการเลือกขนาดของอุปกรณ์เครือข่ายได้อย่างเหมาะสมต่อการจัดสรรทราฟฟิกด้วยราคาค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด แต่ในเรื่องของคุณภาพของการบริการนั้นได้รับประกันเพียงเรื่องความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ซึ่งยังสามารถพัฒนาในเรื่องความสมดุลทราฟฟิก หรือพิจารณาเรื่องการสำรองอุปกรณ์เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นซึ่งทำให้สามารถเพิ่มคุณภาพของการบริการให้สูงขึ้น และงานวิจัยนี้ก็ยังไม่ได้พิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกร่วมกับการใช้พลังงานในเครือข่าย

2.2.8 งานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) เป็นงานวิจัยที่พิจารณาการใช้พลังงานในเครือข่าย IP ภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

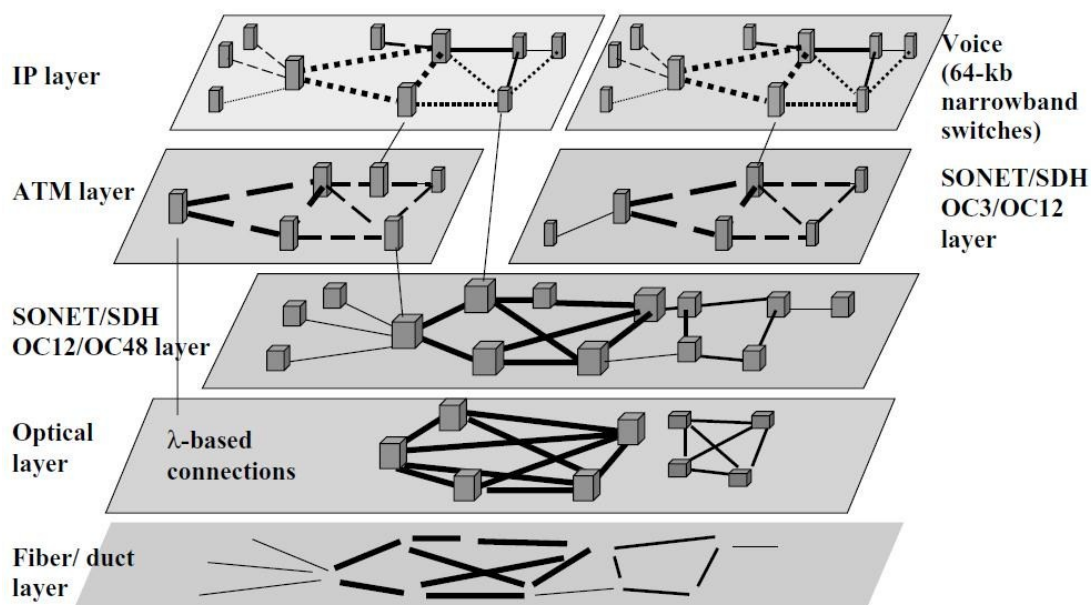
ลักษณะงานวิจัย ได้นำเสนอแนวทางการจัดสรรเส้นทางเพื่อลดการใช้พลังงานในเครือข่าย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานในเครือข่าย IP ด้วยการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิก โดยแบ่งการพิจารณาเป็นช่วงเวลา แต่ละช่วงเวลานั้นมีระดับทราฟฟิกที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้สมมติให้แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) และโครงสร้างอุปกรณ์เครือข่าย (chassis) สามารถเปลี่ยนสถานะของการทำงานเข้าสู่โหมดการพักผ่อน (sleep mode) เมื่อไม่มีการใช้งานเพื่อการประหยัดพลังงานตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยดังกล่าวเป็นเพียงการนำเสนอการจัดสรรเส้นทางเฉพาะบนเครือข่าย IP เท่านั้น ซึ่งเป็นเครือข่ายเพียงชั้นเดียว ซึ่งปัจจุบันเครือข่ายแกนหลักมีรูปแบบหลายชั้น และในความเป็นจริงแล้วเครือข่ายแกนหลักยังไม่สามารถเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์เครือข่ายเข้าสู่โหมดการพักผ่อน (sleep mode) ได้ และงานวิจัยดังกล่าวแนะนำเสนอเทคนิคการจัดสรรเส้นทางที่มีการพิจารณาทุกสถานการณ์ในการดำเนินการเพียงครั้งเดียว โดยมีการแบ่งสถานการณ์ด้วยช่วงเวลา จึงทำให้เทคนิคที่นำเสนอมีความซับซ้อนของอัลกอริทึมสูง

2.3 วิวัฒนาการของเครือข่ายแกนหลัก

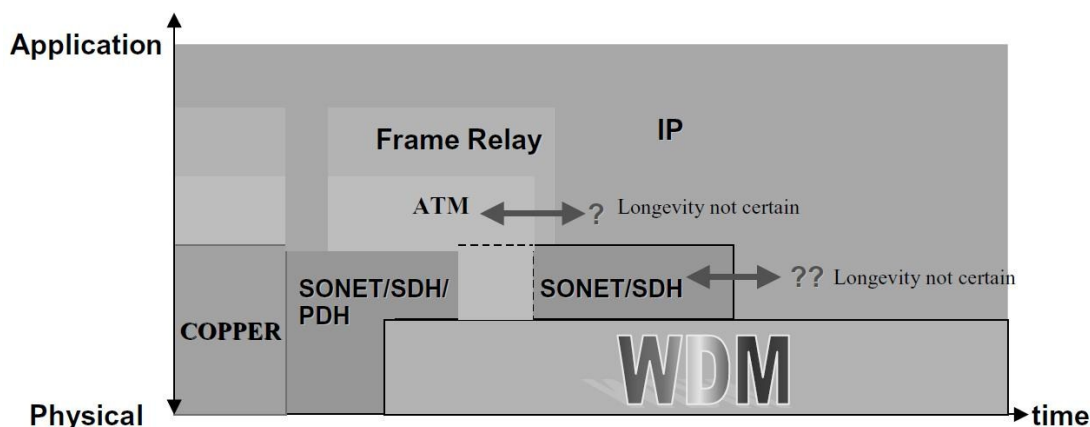
อุตสาหกรรมโทรคมนาคมมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากที่มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลน้อย แต่ในวันนี้สามารถส่งข้อมูลได้ในอัตราเร็วที่สูงขึ้นมาก การบริการที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้นขึ้นอยู่กับการใช้งานไอพี จึงนำไปสู่วิวัฒนาการของการใช้ไอพีให้เหมาะสมในเครือข่ายที่มีความจุสูงในปัจจุบันนี้

Dixit, S. (2003) กล่าวว่าวิวัฒนาการของช่วงเทคโนโลยีในอดีตที่แตกต่างกันเป็นเหตุให้เครือข่ายประกอบด้วยหลายชั้น จากชั้นไอพี (IP) ไปยังชั้นเอทีเอ็ม (Asynchronous Transfer Mode : ATM) ไปยังชั้นซิงโครนัส/ออปติคัล (Synchronous Optical Network/ Synchronous Digital Hierarchy : SONET/SDH) ไปยังชั้นเชิงแสง (Optical) และไปยังท่อส่งสายใยแก้วนำแสง (Fiber) ดังรูปที่ 2.1 แต่ละชั้นมีการปรับตัวให้เข้ากับสถานการณ์ มีข้อดี ข้อได้เปรียบและคุณลักษณะที่แตกต่างกัน การทำงานของเครือข่ายจึงมีเป้าหมายเพื่อใช้ประโยชน์จากความสามารถเฉพาะบางส่วนของแต่ละชั้นในเครือข่าย เช่น การส่งกราฟิกข้อมูลจากนิวยอร์คไปยังซานฟรานซิสโกจากชั้น IP ในระหว่างทางนั้นไม่ค่อยสมควรที่จะส่งผ่าน 2 หรือ 3 เรทเตอร์สักเท่าไร ซึ่งการส่งกราฟิกให้เสร็จภายใน 1 การเชื่อมโยง (1 hop) ในโดเมนเชิงแสงจะเหมาะสมกว่า ซึ่งช่วยให้มีประสิทธิภาพสูง มีโปรโตคอลที่ซับซ้อนน้อยกว่า และมีราคาที่เหมาะสม



รูปที่ 2.1 ชั้นในเครือข่าย

สถานการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นแล้วว่า มีชั้นมากขึ้นไปในโปรโตคอลสแตค (protocol stack) หรือระดับชั้น ไม่ว่าจะเป็นการทำงานของชั้น IP บนชั้นเฟรมรีเลย์ (frame relay) หรือ ATM และยังมีชั้น SONET/SDH ที่มีความโดดเด่น ซึ่งมีความสามารถในการรวมการส่งข้อมูลจากชั้นต่าง ๆ ไว้ที่ SONET/SDH ได้ แต่ในขณะนี้ WDM เกิดขึ้นเป็นผลให้มีการส่งข้อมูลในรูปแบบ IP over ATM over WDM หรือ IP over SDH over WDM ในรูปที่ 2.2 แสดงวิวัฒนาการของอุตสาหกรรมที่มีการใช้งาน ชั้นมากมายเหล่านี้เป็นเหตุบังเอิญในประวัติศาสตร์ที่เกิดขึ้นและเป็นผลของความต้องการที่จะให้ทำงานเข้ากันได้ หากมีการออกแบบชั้นโปรโตคอลตั้งแต่เริ่มต้น ในวันนี้หลาย ๆ ชั้นอาจไม่จำเป็นต้องมีอีกต่อไป เช่น ATM และ SONET/SDH ซึ่งการวิวัฒนาการของชั้นที่มากมายเหล่านี้มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 วิวัฒนาการของชั้นการสื่อสาร

2.3.1 IP over ATM

ATM ได้รับการพัฒนาในช่วงปลายทศวรรษปี 1980 และใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในปี 2000 โครงสร้างของ ATM เป็นเทคโนโลยีที่รองรับประเภททั้งหมดของคลาสการขนส่ง (traffic classes) ด้วยความต้องการคุณภาพของการให้บริการต่าง ๆ (Quality of Service : QoS) และเป็นเทคโนโลยีที่มีขนาดแพ็คเกจ 53 ไบต์ ซึ่งสามารถสลับสัญญาณได้อย่างรวดเร็วและทำงานบน SONET/SDH ได้ ในช่วงแรกพบว่า ATM ไม่มีความพยายามที่จะสนับสนุน IP อย่างไรก็ตามความสำเร็จที่ยิ่งใหญ่ของอินเทอร์เน็ตได้เปลี่ยนแปลงทั้งหมด ATM เริ่มพัฒนาให้มีคุณสมบัติการทำงานร่วมกันของ IP over ATM แต่โชคไม่ดีนักที่ IP และ ATM แตกต่างกันอย่างมากขึ้น เนื่องจากทั้งสองได้รับการพัฒนาอย่างอิสระ โดยมีวัตถุประสงค์และวิสัยทัศน์ที่แตกต่าง เช่น ความแตกต่าง

ของโครงสร้างแอดเดรส ซึ่ง IP อาศัยการจัดเส้นทางแบบการเชื่อมโยงต่อการเชื่อมโยง (hop-by-hop) ในขณะที่ ATM เป็นแบบจุดต่อจุด (point-to-point) ใน IP มีความน่าเชื่อถือที่มีการให้บริการโดยโปรโตคอลทีซีพี (Transmission Control Protocol : TCP) และอาศัยการสูญเสียแพกเกตเพื่อที่จะกำหนดอัตราบิต (bit rate) ในขณะที่ ATM มีการทำงานเพื่อลดการสูญเสียแพกเกต และ IP ไม่มีการสร้างการเชื่อมต่อก่อน สามารถส่งได้เลย ทำได้รวดเร็ว แต่ไม่มีการรับประกันว่าข้อมูลถึงปลายทางอย่างถูกต้อง (Connectionless) ในขณะที่ ATM ต้องสร้างการเชื่อมต่อก่อน เสียเวลาตอนเริ่มต้นหลังจากนั้นจึงเริ่มส่งได้ มีการรับประกันว่าข้อมูลถึงปลายทางอย่างถูกต้อง (Connection-Oriented) ถึงแม้ว่า ATM จะล้มเหลวในการเข้าถึงสถานีที่รับบริการ ซึ่งชั้น IP เป็นชั้นให้บริการ แต่ผู้ให้บริการก็มีการปรับ ATM อย่างต่อเนื่องในเครือข่ายแกนหลัก

2.3.2 ATM over SONET/SDH

วิสัยทัศน์เดิมของ ATM เป็น โครงสร้างแบบการสวิตช์กลุ่มข้อมูล (packet switching) ที่ฉลาดสำหรับเสียงและข้อมูล แต่ในรูปแบบใหม่ของเราเตอร์ไอพี (IP router) ให้การประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและราคาถูกลงกว่าที่การเชื่อมต่อเชิงแสง เริ่มมีคำถามว่าทำไมจึงต้องการ ATM ในเมื่อมีความล้มเหลว ในขณะที่ SONET/SDH เป็น โครงสร้างแบบการสวิตช์วงจร (circuit switching) และยังมีการปรับให้เหมาะกับชุดความเร็ว 64 กิโลบิตต่อวินาที ที่มีหลักอยู่สองประการ คือ ประการแรก อัตราเร็วบิตที่ไม่มีการบีบอัดเท่ากับ 64 กิโลบิตต่อวินาที ประการที่สอง มีการจำกัดความจุข่ายงานบริเวณกว้าง (Wide Area Network : WAN) แบบดีวิคท์เป็นทรัพยากรที่มีราคาแพง อย่างไรก็ตามทุกวันนี้ข้อมูลบิตจำนวนมากส่งแบบแพกเกตมากกว่าแบบวงจร ซึ่งข้อมูลแพกเกตเป็นประโยชน์ต่อโลกอย่างมากเมื่อท่อส่งมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการแบ่งปันข้อมูลกันมากขึ้น ดังนั้นวิสัยทัศน์ของกลุ่มเป้าหมายด้านความล้มเหลวที่มีต่อ ATM และ SONET/SDH จึงลดลงในช่วงระยะหนึ่ง สวิตช์ ATM ได้รับการพัฒนาพร้อมกับการเชื่อมต่อ SONET/SDH เนื่องจากเป็นการเชื่อมต่อที่มีความเร็วสูงที่สามารถใช้ได้ในช่วงเวลานั้นเท่านั้น แต่บทบาทนี้ก็มีโอกาสที่จะโดนแทนที่ด้วย WDM

2.3.3 SONET/SDH over WDM

โดยทั่วไปแล้ว WDM รองรับการเชื่อมต่อข้อมูลแบบดิจิทัลในระบบเครือข่าย SONET/SDH ความเร็วสูง OC-48 (2.5 Gbps) หรือ OC-192 (10 Gbps) ในแต่ละความยาวคลื่น (wavelength) ในกรณีที่เครือข่ายไม่มีชั้นอื่น ๆ ก็ถือว่าการทำงานของ SONET/SDH over WDM นั้นมีความเหมาะสม แต่ก็ไม่สมควรอย่างมากที่จะทำให้ช่องสัญญาณเหล่านี้จะเต็มไปด้วยการสวิตช์

วงจรของข้อมูลเสียงเท่านั้น (circuit-switched voice) ประการแรกช่องสัญญาณที่เป็น OC-48 หรือ OC-192 ก็เพื่อหลีกเลี่ยงส่วนหัวขบวนข้อมูล (overhead) ที่ไม่จำเป็น ประการที่สองเพื่อให้ช่องสัญญาณมีความต่อเนื่องที่เหมาะสมสำหรับการมัลติเพล็กซ์ข้อมูลแพกเกต ซึ่งการออกแบบ SONET/SDH และ WDM นั้นมีจุดประสงค์ที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง แล้วยังเกิดขึ้นในเวลาที่แตกต่างกันมากในประวัติศาสตร์ของโทรคมนาคม สำหรับ SONET/SDH over WDM นี้ก็ถือว่าเป็นวิวัฒนาการที่สอดคล้องกับการสันนิษฐานที่ว่าโครงสร้างใหม่ที่จะสร้างบน WDM จะสามารถรองรับหลาย ๆ ฟังก์ชันของ SONET/SDH ได้

2.3.4 IP over SONET/SDH

ในช่วงระยะเวลานั้น IP over SONET/SDH เป็นที่น่าสนใจมาก โดยมีการตั้งคำถามการทำงานของ IP โดยตรงไปยังบน SONET/SDH ซึ่งเป็นการกำจัดชั้น ATM ได้อย่างสมบูรณ์ การทำงานของ IP ที่ไม่มีการสร้างการเชื่อมต่อก่อน สามารถส่งได้เลย ทำได้รวดเร็ว แต่ไม่มีการรับประกันว่าข้อมูลถึงปลายทางอย่างถูกต้อง (Connectionless) ส่วนบนการทำงานของ SONET/SDH ที่ต้องสร้างการเชื่อมต่อก่อน เสียเวลาตอนเริ่มต้นหลังจากนั้นจึงเริ่มส่งได้ มีการรับประกันว่าข้อมูลถึงปลายทางอย่างถูกต้อง (Connection-Oriented) การทำงานร่วมกันของทั้งสองนี้ก็ค่อนข้างไร้จุดหมาย เนื่องจากไม่มีการเชื่อมต่อเสมือนใน IP over SONET/SDH เป็นเพียงการดำเนินการเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด (point-to-point) ระหว่างเราเตอร์มากกว่าเป็นโครงข่ายแบบวงแหวน อย่างไรก็ตามบางผู้ประกอบการต้องการให้มีชั้นที่แทรกแซงเข้าไปเพื่อให้มีรูปแบบการเชื่อมต่อเสมือน และเพื่อให้ง่ายขึ้นสำหรับวิศวกรรมโทรฟิสิก การออกแบบเครือข่าย การแก้ไขปัญหา และอื่น ๆ

2.3.5 IP over WDM

IP over WDM นี้ขึ้นอยู่กับความสามารถของชั้น IP ที่มีคุณภาพของการบริการที่ดี นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับเครือข่าย WDM ต้องสามารถอยู่รอดได้อย่างต่อเนื่องและมีความแข็งแกร่งกว่า SONET/SDH อัตราของวิวัฒนาการหรือการยอมรับนั้นยังขึ้นอยู่กับว่าการเชื่อมต่อจะมีราคาไม่แพง ซึ่ง IP over WDM จะเป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงพาณิชย์ แล้วเครือข่ายแกนหลักอย่าง ATM over WDM ก็อาจจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของส่วนหัวขบวนข้อมูลและแอปพลิเคชันของ ATM และยังสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากการประสบความสำเร็จของเทคโนโลยีอีเธอร์เน็ตและไอพีที่เชื่อมต่อไปยังเดสก์ทอป (desktop)

2.4 ทำไมต้อง IP over WDM

แน่นอนว่าทราฟฟิกข้อมูลมีทั้งทราฟฟิกเสียง ภาพ วิดีโอ และอื่น ๆ ซึ่งถือว่าสูงมากในทุกวันนี้ Dixit, S. (2003) กล่าวไว้ว่าการลงทุนในเรื่องของการแก้ไขปัญหาไอพีเป็นเรื่องปกติที่ต้องเกิดขึ้น ซึ่งจะต้องบูรณาการในส่วนที่มีความแตกต่างกันในส่วนของการขยายสองชั้นและส่วนของเทคโนโลยีทางกายภาพ แม้จะขาดการสนับสนุนจากชั้น IP สำหรับการให้บริการแบบเวลาจริง (real time) หรือการให้บริการที่ต้องการการรับประกันคุณภาพของการบริการ ในขณะที่หลาย ๆ การแก้ไขปัญหาคุณภาพของการบริการสำหรับไอพียังคงรอให้มีการดำเนินการและมีความสำเร็จเชิงพาณิชย์ แต่ก็โชคดีที่ปัญหานี้ได้รับการบรรเทาไปบ้าง เนื่องจากการเติบโตอย่างรวดเร็วของเครือข่ายเชิงแสงที่มอบแบนด์วิดท์ที่มีความพร้อมในการใช้งาน ด้วยเหตุนี้การบริการมัลติมีเดียแบบเวลาจริง (real time) จึงเป็นไปได้ด้วยความพยายามในการให้บริการอย่างดียิ่งของอินเทอร์เน็ต

การขนส่งในเครือข่ายจำเป็นต้องรองรับแพคเกจที่มีขนาดใหญ่ ต้องมีความน่าเชื่อถือ และเราเตอร์ อุปกรณ์รวมสัญญาณ อุปกรณ์สลับช่องสัญญาณ และอื่น ๆ ต้องสามารถปรับเปลี่ยนตามสถานการณ์ได้ ถ้าความสามารถของแบนด์วิดท์ยังเพิ่มขึ้นในสายใยแก้วนำแสง อุปกรณ์เครือข่ายที่กล่าวมาข้างต้นจะต้องสามารถประมวลผลข้อมูลได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทำได้ในโดเมนทางแสง ซึ่งสถาปัตยกรรมเครือข่ายต้องมีการเปลี่ยนแปลง สวิตช์ในเครือข่ายต้องมีการปรับขนาดได้และมีคุณภาพการให้บริการ ซึ่งต้องสามารถรองรับเซิร์ฟเวอร์เครือข่าย แอปพลิเคชัน และเว็บฟาร์ม (web farm) ได้ ทั้งหมดนี้ต้องการให้เกิดขึ้นในราคาที่ยี่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งเครือข่ายเชิงแสงให้ค่าใช้จ่ายต่อบิตที่ต่ำกว่าอย่างมากเมื่อเทียบกับการสื่อสารอื่น ๆ ที่ไม่ได้ใช้สายใยแก้วนำแสง ความจุในเครือข่ายแกนหลักจึงเป็นสิ่งสำคัญในการเข้าถึงอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง

WDM ได้เสนอแบนด์วิดท์ที่มีอยู่มากในสายใยแก้วนำแสง ซึ่งแบนด์วิดท์มีมากเพียงพอที่สามารถแก้ปัญหาในเรื่องคุณภาพของการบริการได้ในตอนนี้ WDM เป็นเหมือนทางหลวงที่ขยายได้ โดยสามารถใช้สีของแสงที่แตกต่างในสายใยแก้วนำแสงเดียวกัน เพื่อให้ได้ความจุที่มากขึ้น การใช้ WDM มีราคาแพงน้อยกว่าสำหรับการเพิ่มหรือจัดการกับวัสดุที่มีความจำเป็นในการแก้ไขปัญหา SONET/SDH และ WDM ยังเป็นเครือข่ายที่มีความปลอดภัย และมีการใช้พลังงานที่น้อยกว่า

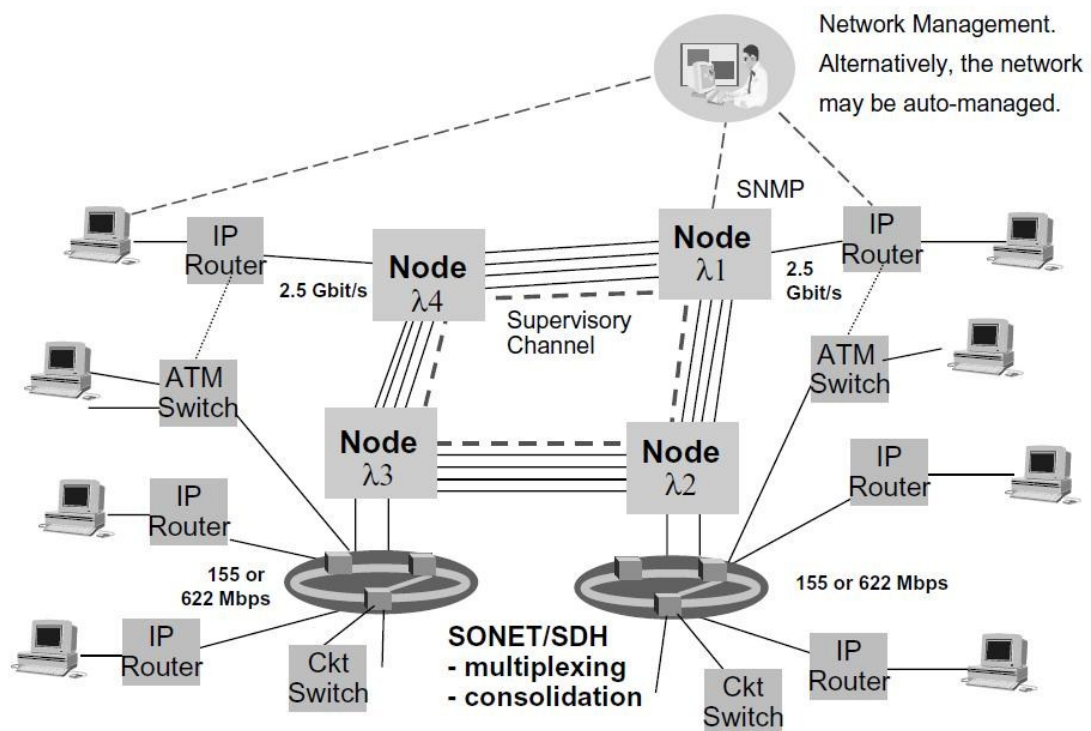
การเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายจะต้องมีชั้นในเครือข่ายที่น้อยลงและรองรับ IP ซึ่ง WDM เกิดขึ้นเพราะในสายใยแก้วนำแสงมีพื้นที่มาก WDM สามารถให้แบนด์วิดท์ได้มาก และ IP ได้เสนอการมาเจอกันที่เหมาะสม ซึ่งเป็นการรวมกันที่ประสบความสำเร็จ โดย IP จะยังอยู่ในเครือข่ายเพราะเป็นชั้นของการสร้างรายได้ ในขณะที่ WDM นั้นก็เป็นชั้นของการลดต้นทุน ค่าใช้จ่ายที่ยังสามารถให้แบนด์วิดท์หรือความจุสูง ATM และ SONET/SDH จึงกลายเป็นสิ่งที่ไม่ได้ให้คุณค่ามากนักสำหรับการขนส่งข้อมูล เพราะ SONET/SDH ได้รับการออกแบบมาสำหรับการ

สวิตช์วงจร (circuit switching) ที่มีพื้นฐานของชุดแบนด์วิดท์ 64 กิโลบิตต่อวินาที เมื่อข้อมูลดังกล่าวไม่ได้มีความโดดเด่นเท่ากับสิ่งที่มีในวันนี้ ค่าของ ATM และ SONET/SDH จึงลดลง เพราะ IP ตอบสนองต่อการให้คุณภาพการบริการที่ดี ส่วน WDM สามารถรองรับคุณสมบัติที่มากมายของ SONET/SDH ได้

อย่างไรก็ตาม ไม่ควรตั้งคำถามว่า IP over WDM เป็นการแก้ปัญหาในระยะยาวไหม แต่ควรถามว่านานแค่ไหนที่จะได้ใช้งานสิ่งนี้ ซึ่งมีสิ่งที่เกี่ยวข้องกับแนวโน้มอย่างใกล้ชิดคือ Multiprotocol Label Switching (MPLS) ซึ่งเป็นโปรโตคอลหรือตัวควบคุมการส่งสัญญาณที่ดูแลการสลับสัญญาณและการจัดสรรเส้นทางที่สายใยแก้วนำแสง ความยาวคลื่น แพลกเกต และแม้แต่ที่ระดับสล็อต (slot) ในขณะที่วิวัฒนาการ IP over WDM นี้กำลังเกิดขึ้น SONET/SDH และทราฟฟิกไอพีที่มีปริมาณสูงจะยังอยู่ร่วมกันในแกนหลักของ WDM แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยทราฟฟิกของ SONET/SDH สามารถรวมสัญญาณเข้าไปในเครือข่าย WDM ที่แต่ละความยาวคลื่น ดังนั้นความยาวคลื่นสามารถที่จะเพิ่มหรือลดได้ในโนดทางแสง ในทำนองเดียวกันเราเตอร์ไอพีสามารถเชื่อมต่อกับ WDM ด้วยการปรับเป็นสัญญาณแสง ซึ่งสามารถเชื่อมต่อได้โดยตรงกับสวิตช์ทางแสง และเราเตอร์ทางแสงที่อยู่ในแกนหลักของเครือข่าย

ถึงแม้ว่าการมารวมกันของ IP และ WDM สามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี แต่ก็ยังมีปัญหาการรวมโปรโตคอล อย่างเช่น ความท้าทายในการหาเทคนิคสำหรับการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น โดยเป็นเทคนิคที่จะใช้ในการสร้างเส้นทางเดินของแสง (lightpath) ในเครือข่ายแกนหลัก ซึ่งอาจใช้วิธีการที่เกี่ยวข้องกับโปรโตคอลการจัดสรรเส้นทางอย่างโปรโตคอล Open Shortest Path First (OSPF) โดยที่การพิจารณาถึงความน่าเชื่อถือและการป้องกันความล้มเหลวในเครือข่ายยังเป็นประเด็นที่สำคัญสำหรับเครือข่าย WDM

ปัญหาอีกประการหนึ่งที่ควรมีการจัดการ คือ แบนด์วิดท์ของเครือข่ายที่ยังไม่มีการจัดการ Dixit, S. (2003) ยังได้ตั้งคำถามว่า ประเด็นการจัดการแบนด์วิดท์ที่ขึ้น WDM หรือชั้นเชิงแสง จะต้องมีการจัดการหรือไม่ หรืออาจไม่ต้องจัดการเนื่องจากความสามารถที่มากมายที่ยังสามารถใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายเพียงเล็กน้อยต่อบิตเท่านั้น โดยข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ทำงานร่วมกันอยู่ในขณะนี้ได้รับการพัฒนาโดยองค์กรต่าง ๆ เช่น Optical Internetworking Forum (OIF), Internet Engineering Task Force (IETF) และ International Telecommunications Union (ITU)



รูปที่ 2.3 การอยู่ร่วมกันของ SONET/SDH และทราฟฟิกไอพี ในชั้น WDM

2.5 โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่าย IP over WDM

วิศวกรรมแสงเป็นสาขาหนึ่งที่มีการพัฒนาขึ้น โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสาร วิศวกรรมแสงเป็นจุดกำเนิดของการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสง ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความเจริญก้าวหน้าทางเครือข่ายคอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ต ที่เป็นเทคโนโลยีสำคัญในปัจจุบัน ในส่วนนี้จึงกล่าวถึงองค์ประกอบเกี่ยวกับวิศวกรรมแสงที่ประยุกต์ใช้ในงานด้านสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสง

การสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงมีจุดเด่นคือสามารถส่งสัญญาณหลาย ๆ ช่องไปได้พร้อมๆ กัน โดยใช้เทคนิคการรวมสัญญาณ (multiplexing) ที่นิยมใช้คือการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (WDM) เป็นการส่งสัญญาณแต่ละช่องด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ทำให้สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าเมื่อเทียบกับการสื่อสารผ่านสายทองแดงแบบเดิม โดยจุดเด่นของการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงมีดังต่อไปนี้

1. ใช้ส่งข้อมูลข้ามทวีป ผ่านเคเบิลใยแก้วใต้น้ำ เนื่องจากมีการสูญเสียสัญญาณต่ำกว่าสัญญาณไฟฟ้า ทำให้ใช้ตัวทวนสัญญาณน้อย ส่งสัญญาณได้ระยะทางไกล ความคุ้มค่าสูง

2. ส่งข้อมูลได้มหาศาลในเวลาเดียวกันเมื่อเทียบกับการสื่อสารผ่านสายทองแดง เนื่องจากเทคโนโลยีการสื่อสารแสงมีความคิดเพิ่มขึ้นของสัญญาณต่ำเมื่อทำการรวมกันของข้อมูลหลาย ๆ ช่องสัญญาณ
3. ไม่มีผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถติดตั้งได้ในบริเวณที่มีไฟฟ้าแรงสูง หรือฟ้าผ่าเกิดขึ้นบ่อยครั้ง
4. ข้อมูลรั่วไหลได้ยาก การลักลอบขโมยสัญญาณจากระบบใยแก้วนำแสงทำได้ยาก

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (Wavelength-division multiplexing : WDM) คือ การนำสัญญาณที่มีความยาวคลื่นต่างกันมารวมกัน แล้วทำการส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสง เทคโนโลยี WDM เป็นเทคโนโลยีที่ใช้เพิ่มขนาดแบนด์วิดท์การส่งข้อมูลบนเครือข่ายใยแก้วนำแสง โดยใช้การรวมส่งข้อมูลหลายชุดพร้อมกันด้วยวิธีผสมแสงแถบความถี่แคบ ๆ เข้าด้วยกัน เป็นแถบกว้างคล้ายการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency-division multiplexing : FDM) คือ การรวมข้อมูลโดยใช้สัญญาณพาหะต่างความถี่กัน โดยข้อมูลแต่ละชุดใช้แสงที่มีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันลงบนสายใยแก้วเส้นเดียว ปัจจุบันเทคโนโลยี WDM ได้เข้ามาเป็นส่วนสำคัญบนอุปกรณ์เครือข่ายใยแก้วนำแสง เพราะด้วยแบนด์วิดท์ที่เพิ่มขึ้นมาก ทำให้สามารถใช้งานแอปพลิเคชันใหม่ได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถติดตั้งเข้ากับโครงสร้างพื้นฐานของระบบเดิมที่มีอยู่ก่อนได้ง่าย และด้วยการที่ WDM เป็นเทคโนโลยีในชั้นกายภาพ จึงสามารถใช้เทคโนโลยีนี้กับระบบต่าง ๆ ได้ เช่น ทั้งอุปกรณ์ SONET/SDH สวิตช์ ATM หรือแม้แต่เราเตอร์ไอพี แต่ WDM ก็ไม่ได้มีแต่ข้อดีเสมอไป

ข้อเสียของระบบ WDM คือ จะเป็นการยากในการออกแบบระบบสถานีทวนสัญญาณเชิงแสง เนื่องจากค่าความยาวคลื่นที่ต่างกันจึงทำให้ระยะทางของสถานีทวนสัญญาณแต่ละความยาวคลื่นนั้นแตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำให้ระบบการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบละเอียด (Dense Wavelength Division Multiplexing : DWDM) เกิดขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดทางการออกแบบวงจรของสถานีทวนสัญญาณเชิงแสง จึงได้คิดค้นที่จะทำการทดลองโดยใช้หมู่ธาตุหายาก ซึ่งเป็นธาตุ Erbium ที่ทำให้ความยาวคลื่นที่ 1550 nm สามารถขยายสัญญาณในช่วงความถี่ดังกล่าวโดยเหมือนกับว่าเป็นสถานีทวนสัญญาณเชิงแสงนั่นเอง

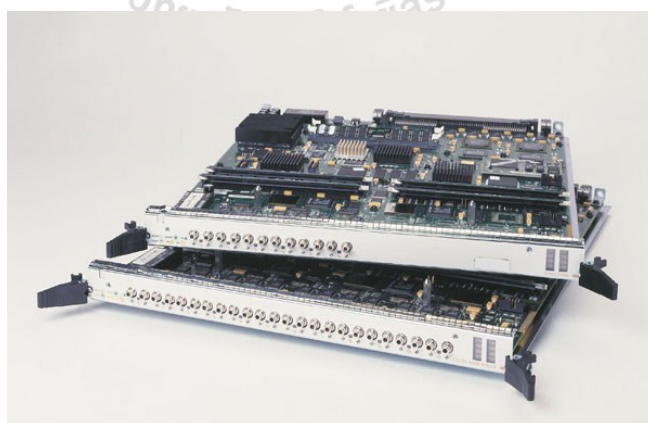
สำหรับโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่าย IP over WDM นั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่อยู่ในชั้น IP และอุปกรณ์ที่อยู่ในชั้น WDM หรือชั้นเครือข่ายเชิงแสง ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

2.5.1 สถาปัตยกรรมเครือข่ายในชั้น IP

ในชั้น IP มีอุปกรณ์เราท์เตอร์เป็นองค์ประกอบหลัก เราท์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบเครือข่ายสื่อสารคอมพิวเตอร์สองหรือหลายเครือข่ายเข้าด้วยกัน หน้าที่หลักของอุปกรณ์เราท์เตอร์ คือ การหาเส้นทางในการส่งข้อมูลที่ดีที่สุด และเป็นตัวกลางในการส่งต่อข้อมูลไปยังเครือข่ายอื่น ซึ่งเราท์เตอร์ของเครือข่ายแกนหลักมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

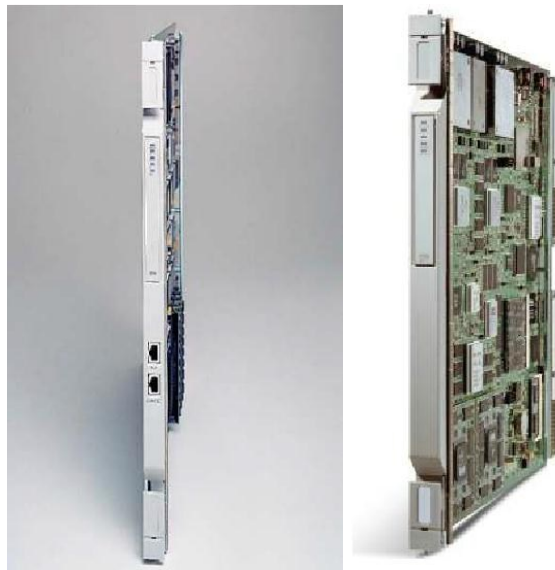
ในการประมวลผลทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Processing) เป็นการประมวลผลเพื่อเลือกเส้นทางการขนส่งให้กับทราฟฟิกที่ไหลผ่านเข้าสู่แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) ซึ่งมีการกำหนดเส้นทางในการเดินทางไปยังจุดหมายปลายทางด้วยอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor) การใช้พลังงานจะเกิดขึ้นเมื่อมีทราฟฟิกไหลเข้าสู่แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) และมีการดำเนินการกำหนดเส้นทางหรือการดำเนินงานกรูมมิ่ง (grooming) ทราฟฟิกในโดเมนทางอิเล็กทรอนิกส์

แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) เป็นตัวแปลงแพคเกจที่จะเข้าไปสู่โมเดลเชิงแสงหรือแปลงแพคเกจที่จะออกไปสู่ยังชั้นบริการต่อไป ซึ่งรูปลักษณะของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิกสำหรับเครือข่ายแกนหลักแสดงดังรูปที่ 2.4 ส่วนอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณหาเส้นทางการขนส่งทราฟฟิก ซึ่งรูปลักษณะอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทางแสดงดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างอุปกรณ์เครือข่าย (chassis) คือ โครงสร้างที่ใช้ในการบรรจุแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิกและอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง ซึ่งรูปลักษณะโครงสร้างอุปกรณ์เครือข่ายแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.4 แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก

(<http://www.cisco.com/en/US/hmpgs/index.html>)



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง

(<http://www.cisco.com/en/US/hmpgs/index.html>)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างอุปกรณ์เครือข่าย

(<http://www.cisco.com/en/US/hmpgs/index.html>)

สำหรับเครือข่ายเชิงแสงนี้ยังมีการป้องกันการล้มเหลว เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือในการให้บริการ ซึ่งมีการแบ่งระดับของการป้องกันเส้นทางแสง (lightpath) เป็นดังนี้

1. การป้องกันเฉพาะ เป็นวิธีการป้องกันเส้นทางแสงที่ประกอบด้วย เส้นทางหลัก และเส้นทางสำรอง โดยที่ทั้งสองเส้นทางมีการส่งข้อมูลไปพร้อม ๆ กัน โดยส่งไปพร้อมกันในอัตราส่วน 1:1 แต่ในเส้นทางสำรองอาจจะมีการส่งข้อมูลที่มีความสำคัญน้อยกว่า เมื่อเส้นทางหลักเกิดการล้มเหลว ข้อมูลก็จะย้ายไปขนส่งในเส้นทางสำรอง
2. การป้องกันร่วมกัน เป็นวิธีการป้องกันเส้นทางแสงที่ใช้สองเส้นทางหลัก คือ มีการใช้อีกเส้นทางหลักเป็นเส้นทางสำรอง เรียกว่า เส้นทางร่วม เมื่อเส้นทางใดเส้นทางหนึ่งมีการล้มเหลว ก็จะทำการเปลี่ยนไปใช้เส้นทางร่วมในการส่งข้อมูล
3. ไม่มีการป้องกัน เมื่อเกิดการล้มเหลว เครือข่ายจะพยายามเรียกเส้นทางแสงคืน คือ เป็นการพยายามตั้งค่าเส้นทางแสงนั้นเพื่อให้กลับมาขนส่งข้อมูลดังเดิม

นอกจากเครือข่ายเชิงแสงมีอุปกรณ์ OXC แล้ว เพื่อให้การขนส่งข้อมูลในเครือข่ายมีประสิทธิภาพ ยังต้องมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการขนส่งทราฟฟิกระหว่างโนด OXC ในเครือข่ายเชิงแสงดังต่อไปนี้

ช่องทางการรับส่งสัญญาณหรือเครื่องทรานสปอนเดอร์ (WDM transponders) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อการส่งและรับข้อมูลระหว่างสัญญาณแสงไปยังสัญญาณไฟฟ้า โดยสามารถแปลงข้อมูลในสัญญาณแสงไปยังสัญญาณไฟฟ้า (Optical to Electrical : OE) และแปลงข้อมูลในสัญญาณไฟฟ้าไปยังสัญญาณแสง (Electrical to Optical : EO) ซึ่งเครื่องทรานสปอนเดอร์ WDM นี้ อยู่ในตำแหน่งระหว่างชั้น ไอพีและชั้น WDM

อุปกรณ์รวมสัญญาณทางแสง (Optical multiplexer) เป็นอุปกรณ์แสงที่ทำหน้าที่รวมสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันแล้วป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงเส้นเดียว ส่วนอุปกรณ์แยกสัญญาณทางแสง (Optical demultiplexer) เป็นอุปกรณ์แสงที่ทำหน้าที่ตรงกันข้ามกล่าวคือทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ที่ส่งมาในเส้นใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้นออกเป็นความยาวคลื่นต่าง ๆ เพื่อส่งไปสลับสัญญาณใน OXC

อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Erbium-Doped Fiber Amplifier : EDFA) เนื่องจากสัญญาณที่เดินทางในระหว่างเส้นทางการขนส่งจะมีการลดทอนสัญญาณเกิดขึ้น การลดทอนสัญญาณทำให้แสงมีค่าความเข้มแสงอ่อนลง จึงต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณพร้อมกัน ให้มีขนาดความเข้มแสงมากพอที่จะเดินทางต่อไป

ไกล ๆ ได้ หากระยะทางระหว่างสถานีไกลมาก อาจต้องมีตัวขยายสัญญาณแสงมากกว่าหนึ่งทีโดยปกติระยะห่างระหว่างตัวขยายสัญญาณ ในระบบเส้นใยนำแสงมีค่าประมาณ 30-80 กิโลเมตร (บางระบบอาจถูกออกแบบให้มีค่ามากกว่า 100 กิโลเมตร) สำหรับระบบสื่อสารที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1550 นาโนเมตร ตัวขยายสัญญาณแสงที่นิยมใช้ ได้แก่ EDFA

อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerators) เป็นการทวนสัญญาณในชั้น WDM ซึ่งทำหน้าที่ปรับสัญญาณพัลส์แสงที่บานออก เมื่อเดินทางในสายส่งเส้นใยแก้วนำแสง เนื่องจากปรากฏการณ์การบิดเบี้ยวของสัญญาณ (Dispersion) ทำให้ความกว้างของสัญญาณพัลส์เกิดการบานออก ตามระยะทางที่เดินทาง ผลลัพธ์ก็คือเกิดการบิดเบี้ยวของสัญญาณ ที่เป็นตัวจำกัดปริมาณข้อมูลหรือทำให้อัตราเร็วของข้อมูลสูงสุดของระบบลดลง ดังนั้นระบบ WDM จึงมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ชดเชยการบานออกของสัญญาณพัลส์ซึ่ง คือ อุปกรณ์ทวนสัญญาณ เพื่อทำหน้าที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออกให้มีขนาดคงที่ตลอดการเดินทางอยู่เสมอ เนื่องจากระบบ WDM มีความยาวคลื่นแสงหลายค่า ผลของการบิดเบี้ยวของสัญญาณที่เกิดย่อมมีผลกระทบกับทุกช่องสัญญาณด้วย ยิ่งระบบมีจำนวนช่องสัญญาณมาก ก็ต้องยิ่งให้ความสนใจและเอาใจใส่กับผลกระทบของการบิดเบี้ยวของสัญญาณมากขึ้นด้วย ซึ่งการใช้ตัวทวนสัญญาณเกิดขึ้นระหว่างเส้นทางการเชื่อมโยงของโหนดต้นทาง-ปลายทาง

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย

การใช้พลังงานไฟฟ้าของเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (Information and Communication Technology : ICT) มีแนวโน้มของการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นในทุก ๆ ปี และทุกวันนี้เครือข่ายแกนหลักก็มีการใช้พลังงานสูง ซึ่งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานของเครือข่ายแกนหลัก เช่น การเลือกสถาปัตยกรรมเครือข่าย การเลือกอุปกรณ์ในเครือข่าย ปริมาณทรานซิปิกภายในเครือข่าย การกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น และอื่น ๆ โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานมีดังต่อไปนี้

2.6.1 ปัจจัยการเลือกสถาปัตยกรรมเครือข่าย

โครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่ายมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และความเหมาะสมในการใช้งาน งานวิจัยของ Musumeci, F., Tornatore, M. and Pattavina, A. (2012) ได้พิสูจน์แล้วว่าโครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่ายแต่ละแบบมีการใช้พลังงานที่แตกต่างกันมาก ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้ทำการตรวจสอบการใช้พลังงานของสถาปัตยกรรมเครือข่ายแกนหลัก 4 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.8 ได้แก่ โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM แบบพื้นฐาน โครงสร้าง

สถาปัตยกรรม IP over SDH over WDM โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM แบบโปร่งใส (transparent) และ โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM แบบโปร่งแสง (translucent) ตามลำดับ โดยแต่ละสถาปัตยกรรมมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

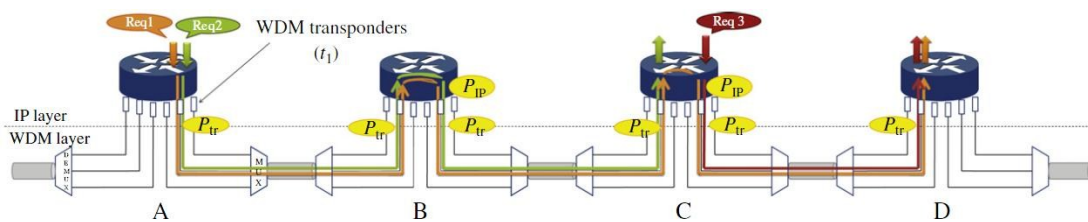
สำหรับ โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM แบบพื้นฐาน มีเร้าเตอร์ไอพี เชื่อมต่อแบบจุดต่อจุดกับสายใยแก้วนำแสง ทั้งการสวิตช์และการปรับปรุงสัญญาณทราฟฟิก สามารถทำได้ในโดเมนอิเล็กทรอนิกส์ ทราฟฟิกทั้งหมดจะได้รับการประมวลผลด้วยระบบ อิเล็กทรอนิกส์ในทุกโหนด และการแปลงระหว่างสัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณแสงจะเกิดขึ้นทุกโหนด ด้วยเครื่องทรานสปอนเดอร์ WDM (WDM transponders)

โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over SDH over WDM การขนส่งทราฟฟิกไอพีจะ ได้รับการห่อหุ้มด้วยเฟรม SDH และส่งเข้าไปยังช่องสัญญาณ WDM ผ่านทางเครื่องทรานสปอนเดอร์ ซึ่งวงจรแสงจะสิ้นสุดใน โหนดที่มีการแปลงสัญญาณแสงไปยังสัญญาณไฟฟ้า และมีอุปกรณ์ สลับช่องสัญญาณดิจิทัล (Digital Cross Connect : DXC) ทำหน้าที่ในการสลับสัญญาณ โดยที่การ การปรับปรุงสัญญาณทราฟฟิกจะเกิดขึ้นที่ชั้น IP เช่นเดียวกับ โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM แบบพื้นฐาน

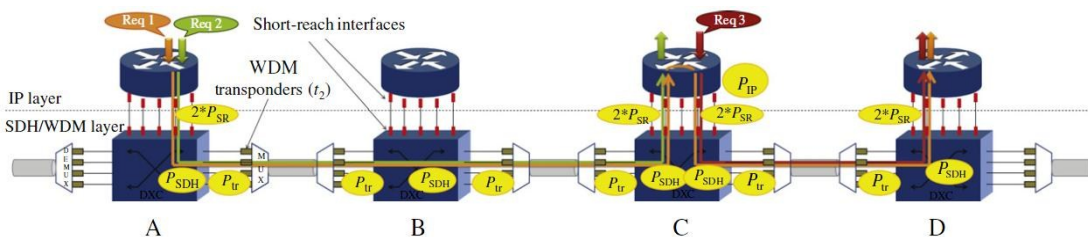
โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM แบบโปร่งใส (transparent) ในโครงสร้างนี้ มีอุปกรณ์ OXC และ อุปกรณ์รวมและแยกสัญญาณทางแสง เชื่อมต่อกับเร้าเตอร์ไอพีผ่านทาง เครื่องทรานสปอนเดอร์ ในกรณีที่ต้องการปรับปรุงสัญญาณทราฟฟิกสามารถทำได้ที่เร้าเตอร์ไอพี หรือในกรณีที่ ไม่ต้องการปรับปรุงสัญญาณทราฟฟิก สัญญาณทราฟฟิกสามารถสลับสัญญาณได้ โดยตรงใน โดเมนเชิงแสงที่ OXC

โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM แบบโปร่งแสง (translucent) ที่ โหนดเชิงแสง ของสถาปัตยกรรมนี้มีอุปกรณ์ทวนสัญญาณเชื่อมต่ออยู่กับ OXC ดังนั้นในสถาปัตยกรรมนี้การทวน สัญญาณสามารถทำได้โดยตรงในชั้น WDM

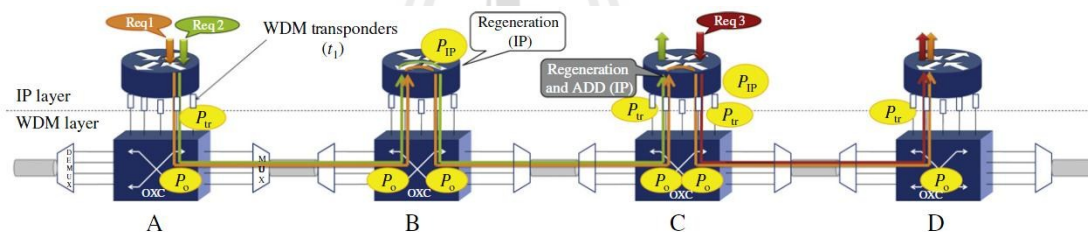
จากการนำเสนอ โครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่ายแกนหลักทั้ง 4 แบบของงานวิจัย ดังกล่าว พบว่า โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM แบบ โปร่งแสง (translucent) มีการใช้ พลังงานที่น้อยที่สุด ดังนั้นการเลือก โครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่ายแกนหลักที่เหมาะสมจึงเป็น ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการลดการใช้พลังงานของเครือข่ายแกนหลัก



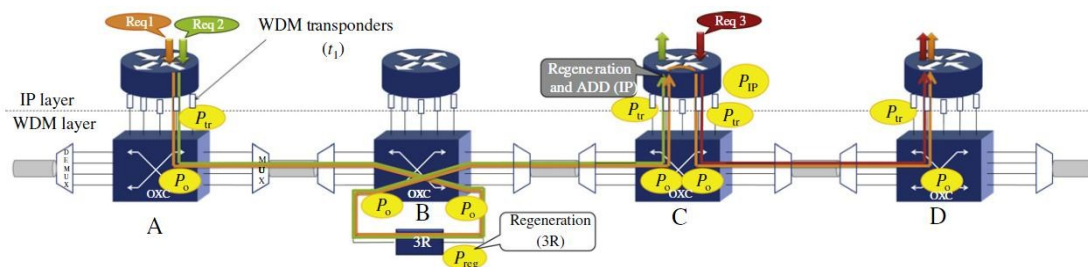
(ก) โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM แบบพื้นฐาน



(ข) โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over SDH over WDM



(ค) โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM แบบโปร่งใส (transparent)



(ง) โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM แบบโปร่งแสง (translucent)

รูปที่ 2.8 สถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM

(Musumeci, F., Tornatore, M. and Pattavina, A., 2012)

2.6.2 ปัจจัยการเลือกอุปกรณ์เครือข่าย

ขนาดอุปกรณ์เครือข่ายมีมากมายให้ได้เลือกใช้งาน ขึ้นอยู่กับการออกแบบเครือข่ายแน่นอนว่าเมื่อขนาดของอุปกรณ์เครือข่ายแตกต่างกัน ก็ย่อมมีการใช้พลังงานที่แตกต่างกันไปด้วย ซึ่งในงานวิจัยของ Idzikowski, F. (2009) ได้ทำการสำรวจการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในเครือข่าย IP over WDM ไว้มากมาย เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด ผู้ออกแบบเครือข่ายสามารถเลือกขนาดอุปกรณ์เครือข่ายและเปรียบเทียบการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่ายได้ก่อนที่จะนำมาใช้งานจริง ซึ่งอุปกรณ์มีหลายรุ่นหลายยี่ห้อและมีความสามารถที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ที่ผู้ออกแบบเครือข่ายพิจารณาการใช้พลังงานของอุปกรณ์แล้ว ผู้ออกแบบเครือข่ายก็ควรจะพิจารณาความสามารถและความเข้ากันได้ของอุปกรณ์เครือข่ายด้วย

2.6.3 ปัจจัยปริมาณกราฟิกภายในเครือข่าย

จากข้อมูลทางสถิติการใช้งานอินเทอร์เน็ต พบว่าปริมาณกราฟิกในเครือข่ายแกนหลักสูงขึ้นในทุก ๆ ปี แน่แน่นอนว่ายิ่งปริมาณกราฟิกเพิ่มขึ้น ก็ทำให้เครือข่ายต้องขยายตัวเพื่อรองรับต่อปริมาณกราฟิกที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้การใช้พลังงานสูงตามไปด้วย อย่างเช่นในงานวิจัยของ Kim, Y., Lee, C., Rhee, J. K. and Lee, S. (2012) ได้แสดงถึงสัดส่วนการใช้พลังงานเมื่อปริมาณกราฟิกมีสูงขึ้น ก็ส่งผลให้อุปกรณ์เครือข่ายใช้พลังงานสูงขึ้นตามไปด้วย ถึงแม้ว่าเครือข่ายได้รับการออกแบบมาเพื่อรองรับสถานการณ์เพิ่มขึ้นของปริมาณกราฟิก แต่อุปกรณ์ที่ใช้ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานที่แปรผันตามปริมาณกราฟิก โดยเฉพาะอุปกรณ์ในชั้นอิเล็กทรอนิกส์ ยิ่งปริมาณกราฟิกมากขึ้นก็จะทำให้อุปกรณ์ใช้พลังงานมากขึ้น แต่การใช้พลังงานก็ได้บรรเทาลงบ้างเมื่อมีการใช้การส่งข้อมูลเชิงแสงด้วยสายใยแก้วนำแสง ซึ่งทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้อย่างมาก ซึ่งก็เป็นเรื่องที่ทำนายในการพัฒนาเทคโนโลยีในอนาคตที่จะสามารถพัฒนาอุปกรณ์ที่ปริมาณกราฟิกส่งผลต่อการใช้พลังงานน้อยที่สุดออกมาได้

2.6.4 ปัจจัยการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น

บางครั้งการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นที่มีอยู่อาจทำให้เครือข่ายใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลือง เนื่องจากเป็นการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นเพื่อวัตถุประสงค์อื่น เช่น การลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเครือข่าย เป็นต้น แต่ก็มีหลาย ๆ งานวิจัยได้ให้ความสำคัญในการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นที่เหมาะสมเพื่อให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น งานวิจัยของ Dong, X., Lawey, A., El-Gorashi, T. E. H., and Elmirghani, J. M. H. (2012) ได้พิจารณาการจัดสรรเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นที่เหมาะสมเพื่อให้มีการใช้

พลังงานและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุดสำหรับโครงข่ายทางกายภาพของ IP over WDM งานวิจัยดังกล่าวได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นที่เหมาะสม สามารถทำให้ประหยัดพลังงานได้

2.7 การจัดการกราฟฟิกของเครือข่ายเชิงแสง

ในการสร้างเครือข่ายเชิงแสงที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ มีปัจจัยในด้านของนามธรรมสำหรับเครือข่ายทั่วไปและเครือข่ายเชิงแสงอยู่ 3 องค์ประกอบคือ

1. การวัดหรือการประมาณปริมาณกราฟฟิก โดยทั่วไปนั้นจะแสดงเป็นเมตริก (traffic matrix)
2. มีชุดของข้อจำกัดต่าง ๆ ซึ่งเป็นรูปแบบของจำนวนสายใยแก้วนำแสง ความจุของสายเชื่อมโยง ขนาดของ OXC และอุปกรณ์เชิงแสงอื่น ๆ ที่ใช้งาน
3. มีนโยบายการควบคุม ซึ่งประกอบด้วย โพรโตคอลข้อกำหนดต่าง ๆ และกลไกที่ใช้ในการดำเนินการหรือควบคุม โมดูล OXC

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

2.7.1 การกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น

เครือข่าย WDM ที่แสดงดังรูปที่ 2.7 เส้นทางแสง (lightpath) จะดำเนินการโดยเลือกเส้นทางของ physical link ระหว่างโหนดต้นทางและปลายทาง และสำรองความยาวคลื่นในแต่ละสายเชื่อมโยงสำหรับเส้นทางแสง (lightpath) ดังนั้นการสร้างการเชื่อมต่อจึงมีปัญหาคือ ปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น ซึ่ง Zang, H., Jue, J. P., and Mukherjee, B. (2000) ได้กล่าวถึงการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นว่ามีข้อจำกัดดังนี้

1. ข้อจำกัดความต่อเนื่องของความยาวคลื่นของเส้นทางแสง (lightpath) คือ ในทุกสายเชื่อมโยง ต้องใช้ความยาวคลื่นเดิมตลอดการเชื่อมต่อหนึ่งเส้นทางจากโหนดต้นทางถึงปลายทาง
2. ข้อจำกัดความแตกต่างของความยาวคลื่น คือ ทุก ๆ เส้นทางแสง (lightpath) ที่ใช้สายเชื่อมโยงเดียวกัน ต้องได้รับการจัดสรรความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

ซึ่งข้อจำกัดความต่อเนื่องความยาวคลื่นนั้นสามารถแก้ปัญหาได้ ถ้า OXC มีการติดตั้งตัวแปลงความยาวคลื่น โดยตัวแปลงความยาวคลื่นเป็นอุปกรณ์ที่จะสามารถแปลงความยาวคลื่นของแสงที่เข้ามาทางอินพุตเป็นความยาวคลื่นอื่นและส่งออกไปทางเอาต์พุต ข้อได้เปรียบในการแปลงความยาวคลื่นทำให้ในการสร้างเส้นทางแสง (lightpath) ตลอดสายเชื่อมโยงจากต้นทางถึงปลายทาง มีความยาวคลื่นอย่างอิสระ เป็นผลให้ปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นลดลง โดยที่การแปลงความยาวคลื่น ทำให้เกิดความยาวคลื่นที่ซ้ำกันลดลง เป็นผลให้สามารถใช้การเชื่อมต่อบนสายเชื่อมโยงเดียวกันได้มากขึ้น ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาในการกำหนดเส้นทางนั่นเอง

การกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น เป็นปัญหาพื้นฐานในการควบคุมสามารถจำแนกได้ 2 รูปแบบกว้าง ๆ คือ

1. ปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบสถิต (static) ซึ่งในการออกแบบและการวางแผนเป็นแบบที่รู้ปริมาณทราฟฟิกอยู่ก่อนแล้ว
2. ปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบพลวัต (dynamic) พบในระหว่างส่วนบริการเครือข่ายเวลาจริง (real-time) เกี่ยวกับการจัดเตรียมเส้นทางแสง (lightpath)

2.7.2 การออกแบบเครือข่ายเชิงแสงและการวางแผนความจุ

ในการออกแบบเครือข่ายเชิงแสงนั้น เทคนิคที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการจัดการวางแผนเส้นทางแสง (lightpath) เพื่อเชื่อมต่อในเครือข่าย คือ วิธีการคำนวณและวิธีการแก้ไขปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบสถิต (static) ดังนั้นการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบสถิต (static) จึงเหมาะสำหรับการจัดเตรียมชุดการเชื่อมต่อในเครือข่ายที่จะนำไปใช้เป็นระยะเวลานาน ซึ่งในการใช้ทรัพยากรที่คุ้มค่าที่สุด อาจต้องใช้ความพยายามเชิงการคำนวณมาก การออกแบบเครือข่ายเชิงแสงและส่วนของการวางแผน ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การกำหนดความต้องการของผู้ใช้หรือปริมาณทราฟฟิก ถ้ามีเครือข่ายอยู่แล้ว ความต้องการของผู้ใช้ก็จะสามารถวัดได้ ดังนั้นความต้องการประมาณได้จากจำนวนประชากรที่คาดหวัง และการใช้รูปแบบลักษณะที่คาดหวัง
2. การออกแบบโครงข่ายทางกายภาพ (physical) จากการกำหนดความต้องการของผู้ใช้แล้ว ก็จะมีการพิจารณาจำนวน OXC และสายเชื่อมโยง (fiber link) ที่จะใช้เชื่อมต่อภายในเครือข่าย

3. การออกแบบโครงข่ายเสมือน (Virtual) ในขั้นตอนนี้ปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบสถิต (static) เป็นส่วนของการคำนวณ และวิธีการสร้างเส้นทางแสง (lightpath) ภายในเครือข่ายเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้

2.7.2.1 การออกแบบโครงข่ายทางกายภาพ (Physical)

ในส่วนนี้ผู้ให้บริการเครือข่ายจะมีการคาดการณ์ความต้องการ และต้องตัดสินใจเกี่ยวกับโครงข่ายการเชื่อมต่อ ในขั้นตอนนี้จะมีการปรับจำนวนและตำแหน่งของข่ายเชื่อมโยงและโหนด OXC และจะมีการจัดการกับความล้มเหลวของข่ายเชื่อมโยงหรือโหนด OXC ในการออกแบบโครงข่ายนี้ ถ้าไม่ได้มีโครงข่ายอยู่แล้ว ผู้ให้บริการเครือข่ายต้องออกแบบโครงข่ายทางกายภาพตั้งแต่เริ่มต้น ซึ่งปัญหาในการออกแบบโครงข่ายทางกายภาพนี้ ได้รับการพิจารณาด้วยการกำหนดเราต์เตอร์ที่ทำงานตามข้อความในป้ายเท่านั้นเรียกว่า label switching router (LSR) และพิจารณาจำนวนเส้นทางแสง (lightpath) ที่เหมาะสม รวมไปถึงการใช้จำนวน OXC ให้น้อยที่สุดเพื่อสร้างเส้นทางแสง (lightpath) ทั้งหมด วิธีการแก้ไขปัญหากล่านี้สามารถพิจารณาโดยการศึกษาวิเคราะห์การใช้การกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นบนโครงข่ายทางกายภาพ

ในส่วนของการวางแผนความจุ เป็นปัญหาของการวางแผนทรัพยากรที่เหมาะสม เช่น ตัวแปลงสัญญาณ หรือตัวแยกสัญญาณ ในการวางตำแหน่งของตัวแปลงสัญญาณที่เหมาะสม และวิธีการใช้ตัวแปลงสัญญาณมากขึ้นอาจนำไปสู่ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้ และในการพิจารณาการจัดสรร OXC ที่เหมาะสม และตำแหน่งของ OXC ที่เหมาะสมก็ทำให้สามารถที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดีขึ้นได้เช่นกัน

โดยรวมแล้วการพิจารณาปัญหาการออกแบบโครงข่ายทางกายภาพค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากต้องพิจารณาถึงรูปแบบโครงข่าย ความจุข่ายเชื่อมโยง ความสามารถของ OXC จำนวนและตำแหน่งของอุปกรณ์ทางแสงที่ทนทาน และยังขึ้นอยู่กับกำหนัดเส้นทางสำหรับเส้นทางแสง (lightpath) และกลยุทธ์ในการจัดสรรความยาวคลื่นอีกด้วย

2.7.2.2 การออกแบบโครงข่ายเสมือน (Virtual)

โครงข่ายเสมือนเป็นส่วนที่จะเข้าไปซ้อนทับอยู่บนโครงข่ายทางกายภาพที่เส้นใยแก้วนำแสงและ OXC ดังนั้นปัญหาการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบสถิต (static) ก็มักจะบอกว่าเป็นปัญหาของการออกแบบโครงข่ายเสมือน ซึ่ง Dutta, R. and Rouskas, G. N. (2000) ได้สำรวจวิธีการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น พบว่าปัญหาการกำหนด

เส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบสถิต (static) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ปัญหาย่อย โดยสมมติว่าไม่มีการแปลงความยาวคลื่น ปัญหาย่อยมีดังนี้

1. ปัญหาโครงข่าย คือ การกำหนดโครงข่ายเสมือนไว้บนโครงข่ายทางกายภาพ ซึ่งคือการคำนึงในด้านของการกำหนดเส้นทางแสง (lightpath) ระหว่างโหนดต้นทางและปลายทาง
2. ปัญหาการกำหนดเส้นทางเส้นทางแสง (lightpath) คือ การกำหนดเส้นทางขนส่งให้กับแต่ละเส้นทางแสง (lightpath) โดยต้องเลือกใช้ข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพมีอยู่บนโครงข่ายทางกายภาพเท่านั้น
3. ปัญหาการจัดสรรความยาวคลื่น คือ การจัดสรรความยาวคลื่นให้แต่ละเส้นทางแสง (lightpath) ในโครงข่ายเสมือน โดยต้องเป็นไปตามข้อจำกัดของแต่ละข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ
4. ปัญหาการกำหนดเส้นทางทราฟฟิก คือ การกำหนดเส้นทางของทราฟฟิกที่จะขนส่งระหว่างโหนดต้นทางและปลายทางบนโครงข่ายเสมือนที่จะได้รับ

สำหรับการวิเคราะห์วิธีการแก้ปัญหาคำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่นแบบสถิต (static) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทกว้างๆดังนี้

1. ขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาโดยรวมของการโปรแกรมเชิงเส้น linear programming (LP) ที่เหมาะสมเฉพาะส่วน
2. ขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาเฉพาะของ 4 ปัญหาย่อยที่นำเสนอ
3. ขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาที่อยู่ของโครงข่ายเสมือนที่เข้าไปในโครงข่ายทางกายภาพ

2.7.3 การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยวิธีของไดคัสตรา

เทคนิคการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย คือ ขั้นตอนวิธีของไดคัสตรา (Dijkstra's algorithm) เพราะเป็นการคำนวณที่มีหลักการอย่างง่าย ได้รับการคิดค้นขึ้นโดยนักวิทยาการคอมพิวเตอร์ชาวดัตช์นามว่า เอ็ดส์เกอร์ ไดคัสตรา (Edsger Dijkstra) ในปี 1959 Cormen, . H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., Stein, C. (2001) กล่าวถึงขั้นตอนวิธีของไดคัสตราว่าเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาวิถีสั้นที่สุดจากจุดหนึ่งใด ๆ สำหรับกราฟที่มีความยาวของ

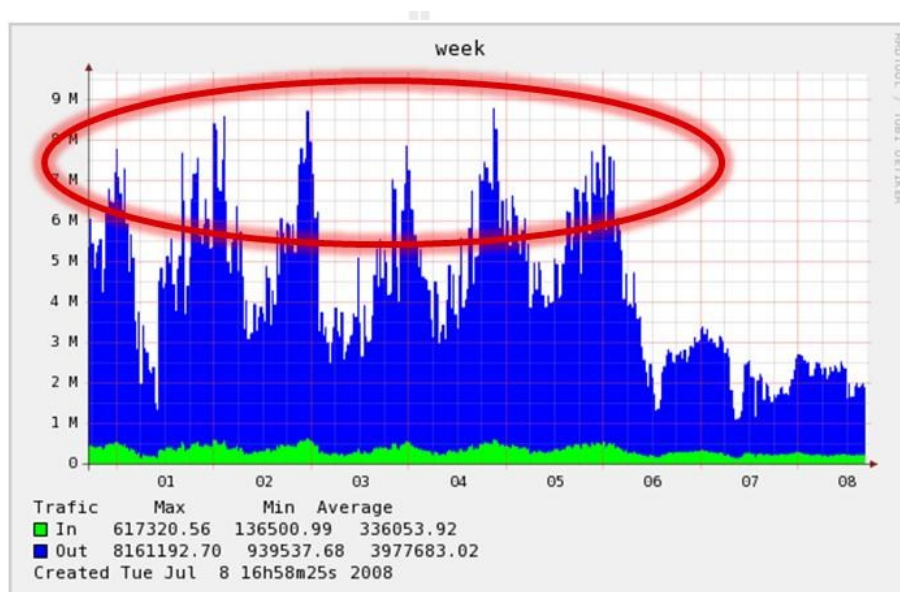
เส้นเชื่อมไม่เป็นลบ สำหรับขั้นตอนวิธีนี้จะหาระยะทางสั้นที่สุดจากจุดหนึ่งไปยังจุดใด ๆ ในกราฟ โดยจะหาเส้นทางที่สั้นที่สุดไปที่ละจุดยอดเรื่อย ๆ จนครบตามที่ต้องการ

เมื่อกำหนดให้โนดหนึ่งเป็นโนดเริ่มต้น (initial node) และกำหนดตัวแปรระยะทางของโนดปลายทาง เช่น ระยะทางของโนด Y (distance of node Y) หมายถึงระยะทางจากโนดเริ่มต้นไปยังโนด Y แล้ว ขั้นตอนวิธีของไดคัสตราจะกำหนดค่าระยะทางเริ่มต้นไว้บางโนดและจะเพิ่มค่าไปที่ละขั้นตอน โดยขั้นตอนวิธีของไดคัสตรามีขั้นตอนวิธีในการหาระยะทางสั้นที่สุดดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้ทุกโนดมีค่าระยะทางตามเส้นเชื่อม โดยให้โนดเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์ และโนดอื่นมีค่าเป็นอนันต์
2. ทำเครื่องหมายทุกโนดยกเว้น โหนดเริ่มต้นว่ายังไม่ไปเยือน (unvisited) ตั้งให้โนดเริ่มต้นเป็น โหนดปัจจุบัน สร้างเซตของโนดที่ยังไม่ไปเยือนขึ้นมาเซตหนึ่งซึ่งประกอบด้วยทุกโนดยกเว้น โหนดเริ่มต้น
3. จากโนดปัจจุบัน พิจารณาโนดข้างเคียงตามเส้นเชื่อมทุกโนดที่ยังไม่ไปเยือน และคำนวณระยะทางต่อเนื่องของเส้นเชื่อม ตัวอย่างเช่น ถ้าโนดปัจจุบันคือ A มีระยะทางของ โหนดเป็น 6 และเส้นเชื่อมที่ต่อจาก A ไปยังโนดข้างเคียง B มีระยะทางเป็น 2 ดังนั้นระยะทางของ โหนด B (โดยผ่าน A) จึงเท่ากับ $6 + 2 = 8$ เป็นต้น ถ้าระยะทางที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่าระยะทางที่บันทึกอยู่ของโนดนั้น ให้เขียนทับค่าระยะทางของโนดดังกล่าว แม้ว่าโนดข้างเคียงได้ถูกพิจารณาแล้ว แต่ก็ยังไม่ทำเครื่องหมายว่าไปเยือนแล้ว (visited) ในขั้นตอนนี้ โหนดข้างเคียงจะยังคงอยู่ในเซตของโนดที่ยังไม่ไปเยือนเช่นเดิม
4. เมื่อพิจารณาโนดข้างเคียงจากโนดปัจจุบันครบทุกโนดแล้ว ทำเครื่องหมายโนดปัจจุบันว่าไปเยือนแล้ว และนำออกจากเซตของโนดที่ยังไม่ไปเยือน โหนดที่ไปเยือนแล้วนี้จะไม่ถูกนำมาตรวจสอบอีก ค่าระยะทางที่บันทึกอยู่จะสั้นสุดและมีค่าน้อยสุด
5. โหนดปัจจุบันตัวถัดไปที่ถูกเลือกจะเป็น โหนดที่มีค่าระยะทางน้อยสุดในเซตของโนดที่ยังไม่ไปเยือน
6. ถ้าเซตของโนดที่ยังไม่ไปเยือนว่างแล้วให้หยุดการทำงาน ขั้นตอนวิธีเสร็จสิ้น หากไม่ซ้ำให้เลือกโนดที่ยังไม่ไปเยือนที่มีค่าระยะทางน้อยสุดเป็น โหนดปัจจุบัน แล้ววนกลับไปทำขั้นตอนที่ 3

2.8 ความไม่แน่นอนของกราฟฟิก

เราไม่สามารถบอกได้ว่าปริมาณกราฟฟิกในเครือข่ายจะมีค่าคงที่อยู่ตลอดเวลา เนื่องจากกราฟฟิกมีผู้ใช้ที่ใช้งานมาจากหลากหลายที่ ทำให้ปริมาณกราฟฟิกไม่คงที่ มีความแปรปรวนดังที่แสดงในรูปที่ 2.9 แต่เราสามารถคาดการณ์ได้ว่าแนวโน้มของปริมาณกราฟฟิกจะเป็นอย่างไร โดยใช้การเก็บข้อมูลปริมาณกราฟฟิกทางสถิติ เมื่อเราสามารถคาดการณ์ปริมาณกราฟฟิกที่ต้องการขนส่งในเครือข่ายได้ จึงทำให้เราสามารถวางแผนการเตรียมความจุเพื่อรองรับกราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนได้



รูปที่ 2.9 ความแปรปรวนของปริมาณกราฟฟิก

2.8.1 การเตรียมความจุเพื่อรองรับกราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน

ในการเตรียมความจุเพื่อรองรับกราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนนี้ เป็นส่วนหนึ่งที่ได้รับพิจารณาในการโปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาส (Chance-Constrained Programming : CCP) งานวิจัยของ Liu B. (2009) กล่าวว่า การโปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาสเป็นวิธีการที่สำคัญในการจัดการกับตัวแปรสุ่มในการแก้ไขปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายของตัวแปรสุ่ม ซึ่งในที่นี้ตัวแปรสุ่มแสดงถึงพารามิเตอร์ของความไม่แน่นอนของกราฟฟิก ดังนั้นการโปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาสนี้เป็นจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถจัดการกับความไม่แน่นอนของกราฟฟิกได้ ปริมาณกราฟฟิกนี้ไม่สามารถบอกได้ชัดเจนว่าจะมีปริมาณ

เท่าไร จนกว่าจะถึงเวลาที่กำหนดนั้น ซึ่งทำให้จำเป็นต้องมีการคาดคะเน หรือความเป็นไปได้ที่จะเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว ซึ่งมีวิธีการหนึ่งที่บ่งบอกถึงโอกาสที่จะคาดการณ์จำนวนหรือปริมาณทราฟฟิกเกิดขึ้นว่ามีปริมาณมากหรือน้อยในแต่ละเหตุการณ์นั้น ในทางคณิตศาสตร์เรียกจำนวนนั้นว่า ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ ดังนั้นในการเตรียมความจุจึงใช้สมการความน่าจะเป็นมาพิจารณาในงานทางวิศวกรรมเครือข่ายที่คำนึงถึงความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ซึ่งรูปแบบเงื่อนไขข้อจำกัดตาม โอกาส (Chance constraint) ก็ได้ใช้สมการความน่าจะเป็นมาพิจารณาเพื่อให้แน่ใจว่าการจัดสรรความจุหรือแบนด์วิดท์บนการเชื่อมโยงจะมีมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่ไม่แน่นอน โดยสมการดังกล่าวมีรูปแบบดังต่อไปนี้

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

เมื่อ ζ คือ พารามิเตอร์ของความไม่แน่นอน
 x คือ การกำหนดความจุหรือแบนด์วิดท์
 α คือ ค่าความน่าจะเป็นที่พารามิเตอร์ของความไม่แน่นอนจะไม่เกินขอบเขตที่กำหนด ซึ่งจะแสดงถึงระดับการรับประกันความไม่แน่นอน

สำหรับพารามิเตอร์ x นั้นสามารถแปลงเป็นสมการเพื่อหาค่าได้ โดยที่ตัวแปรสุ่ม (ζ) จะมีฟังก์ชันการแจกแจงสะสมคือ $\Phi(\cdot)$ และสามารถผกผันเปลี่ยนเป็น $\Phi^{-1}(\cdot)$ และเมื่อ $\Phi^{-1}(\alpha) = K$ ซึ่งค่า K จะได้รับจากการกำหนดค่าความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม ดังนั้นสามารถเขียนสมการความน่าจะเป็นได้คือ $P(K \geq \zeta) \geq \alpha$ โดยที่ $x \geq K$ ซึ่งในกรณีนี้สมมติให้ทราฟฟิกมีการกระจายแบบปกติที่จะมีค่าเฉลี่ย (μ) และค่าความแปรปรวน (σ^2) และจากสมการที่ (2.1) เมื่อใช้การกระจายแบบปกติมาตรฐาน (z) ทำให้สามารถเขียนสมการความน่าจะเป็นได้ คือ $P\left(\frac{x-\mu}{\sigma} \geq z\right) \geq \alpha$ และทำให้ $\frac{x-\mu}{\sigma} \geq \Phi^{-1}(\alpha)$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการเพื่อหาพารามิเตอร์ x ได้ดังสมการที่ (2.2)

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

จากการพิจารณารูปแบบเงื่อนไขข้อจำกัดตามโอกาส (Chance constraint) เพื่อให้แน่ใจว่าการจัดสรรความจุหรือแบนด์วิดท์บนการเชื่อมโยงจะมีมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่ไม่แน่นอน (ζ) หรือแสดงดังสมการที่ (2.1) ความต้องการของทราฟฟิกที่ต้องการร้องขอการใช้

งานความจุภายในเครือข่ายนั้น จะมีระดับของการรับประกันความไม่แน่นอนอย่างน้อยเท่ากับ $100(\alpha)\%$ ดังนั้นในการเตรียมความจุที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน (x) สำหรับการระดับการรับประกัน α สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (2.3)

$$x = \mu + \Phi^{-1}(\alpha)\sigma \quad (2.3)$$

2.9 การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดอย่างหนึ่ง คือ การโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) โดยใช้ในการออกแบบปัญหาเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ และต้องอยู่ภายใต้ข้อจำกัดเชิงเส้นต่าง ๆ (linear constraints) จอร์จ บี ดานซิก (George B. Dantzig) นับว่าเป็นบิดาของการโปรแกรมเชิงเส้น เนื่องจากเป็นผู้ริเริ่มในการสร้างรูปแบบทั่วไปของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น และพัฒนาวิธีการอย่างมีระบบในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของการแก้ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น ซึ่งมีการเริ่มนำมาใช้งานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2490 ทุกวันนี้วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดดังกล่าวก็ยังคงมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยใช้ อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ (simplex method) ในการคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุด ในปัจจุบันได้มีการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อหาคำตอบของการโปรแกรมเชิงเส้นที่พัฒนาขึ้น และโปรแกรมสำเร็จรูปนั้นก็มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเช่นทั้งในทางธุรกิจและอุตสาหกรรม รูปแบบทั่วไปของการโปรแกรมเชิงเส้นนั้น เป็นรูปแบบที่สามารถปรับใช้ได้กับปัญหาต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีฟังก์ชันเป้าหมาย อาจอยู่ในรูปกำไร ค่าใช้จ่าย จำนวนผลผลิตที่มากที่สุด เป็นต้น ส่วนข้อจำกัดอาจอยู่ในรูปของทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ข้อจำกัดทางการตลาด ข้อจำกัดด้านคุณภาพ เป็นต้น Hillier, F. S. and Lieberman, G. J. (2001) กล่าวถึงรูปแบบและส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นดังต่อไปนี้

2.9.1 รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้น

รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้นมีอยู่สองลักษณะ โดยแบ่งตามลักษณะของปัญหาที่พิจารณา คือ ปัญหาการหาค่าสูงสุด (maximization) และปัญหาการหาค่าต่ำสุด (minimization) ซึ่งมีรูปแบบของสมการการโปรแกรมเชิงแสดงดังสมการที่ (2.4) ถึง (2.6) ดังนี้

วัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าสูงสุด หรือหาค่าที่ต่ำที่สุด

$$z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (2.4)$$

ภายใต้ข้อจำกัด

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\ &\dots \\ &\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m \end{aligned} \quad (2.5)$$

และ

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \geq 0 \quad (2.6)$$

โดยที่

x_j คือ ตัวแปรตัดสินใจ (decision variable) หรือ จำนวนหน่วยของกิจกรรมที่ j ที่ตัดสินใจทำ เช่น อาจหมายถึงจำนวนหน่วยของสินค้าที่ j ที่จะทำการผลิต $j = 1, 2, \dots, n$

c_j คือ ผลตอบแทน (profit) ที่ได้จากการตัดสินใจทำกิจกรรมที่ j ต่อหนึ่งหน่วย เช่น ในกรณีของการผลิตสินค้าจำนวน c_j จะหมายถึงกำไรที่ได้จากการจำหน่ายสินค้าชนิดที่ j หนึ่งหน่วย $j = 1, 2, \dots, n$

a_{ij} คือ จำนวนทรัพยากรชนิดที่ i ที่จะใช้ในการทำกิจกรรมที่ j หนึ่งหน่วย (resource consumption rate) $i = 1, 2, \dots, m$ และ $j = 1, 2, \dots, n$

b_i คือ จำนวนทรัพยากร (resource) ชนิดที่ i ที่มีอยู่เพื่อใช้ในการทำกิจกรรมต่าง ๆ $i = 1, 2, \dots, m$

ในแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นมาตรฐานนี้ เราต้องการที่จะหาค่าของตัวแปรตัดสินใจ x_j ต่าง ๆ ว่ามีค่าเท่ากับเท่าไรจึงจะทำให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าสูงสุด หรือต่ำที่สุดโดยที่ตัวแปรตัดสินใจเหล่านี้จะต้องสอดคล้องกับข้อจำกัดในการใช้ทรัพยากรทั้ง m ข้อจำกัด คือ ใช้

ทรัพยากรไม่เกินปริมาณทรัพยากรที่มีอยู่ และสอดคล้องกับข้อจำกัดที่ต้องมีค่ามากกว่า 0 คือ ไม่เป็นจำนวนเชิงลบ (non-negative) สำหรับค่า a_{ij} , b_i , c_j นั้นจะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่าอยู่แล้ว

2.9.2 ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้น

ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

1. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์เป้าหมายที่ต้องการ เช่น ต้นทุน กำไร เป็นต้น โดยเป็นฟังก์ชันที่ต้องการให้ได้มาซึ่งเป้าหมายที่ทำให้เกิดค่าสูงสุด หรือค่าต่ำที่สุด ดังสมการที่ (2.4)

2. สมการข้อจำกัดของปัญหา หรือ เงื่อนไข (constraints) คือ ข้อจำกัดของปัญหาในด้านทรัพยากร หรือปัจจัยต่าง ๆ โดยแต่ละเงื่อนไขจะมีความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้น (linear equation) หรือ อสมการเชิงเส้น (linear inequality) ดังสมการที่ (2.5)

3. ตัวแปรตัดสินใจ เป็นตัวแปรที่ใส่เข้าไปในระบบ และต้องการหาคำตอบอย่างเช่น ตัวแปร x_j ในหัวข้อก่อนหน้านี้

2.9.3 คุณสมบัติของรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

1. สมการของตัวแปรตัดสินใจต้องเป็นสมการเชิงเส้นโดยที่ตัวแปรทุกตัวจะต้องมีกำลังเป็น 1 เท่านั้น นอกจากนี้ต้องเขียนอยู่ในรูปแบบของการบวกและการลบกันของตัวแปรต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น $3x_1 + 5x_2$ เป็นสมการเชิงเส้น เพราะตัวแปรมีเลขชี้กำลังเป็น 1 และตัวแปรตัดสินใจทุกตัวมีค่าเป็นจำนวนเต็ม

2. สมการวัตถุประสงค์ ต้องเป็นการระบุว่าต้องการหาค่าสูงสุด หรือค่าต่ำสุด โดยจะต้องแสดงถึงจุดประสงค์ในการตัดสินใจ เช่น ลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนให้น้อยที่สุด

3. สมการเงื่อนไข ต้องเป็นสมการ หรืออสมการเชิงเส้น ที่อยู่ในรูปน้อยกว่าเท่ากับ (\leq) มากกว่าเท่ากับ (\geq) หรือเท่ากับ ($=$) เท่านั้น โดยที่ค่าของตัวแปรตัดสินใจของทุกเทอมในสมการเงื่อนไข จะต้องมีหน่วยเดียวกัน

4. ข้อจำกัดของสัญลักษณ์ (sign restrictions) ถ้าต้องการกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นบวกจะกำหนดข้อจำกัดของสัญลักษณ์ได้ เช่น $x_j \geq 0$ แต่หากว่า ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นได้ทั้งค่าบวก และค่าลบ หรือมีค่าเป็นศูนย์ จะเรียกว่า unrestricted in sign (urs)

2.9.4 การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหา

ในการสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น จะไม่สามารถกำหนดเป็นกฎเกณฑ์ตายตัวได้ ทั้งนี้เพราะปัญหาแต่ละปัญหานั้นมีลักษณะที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม สามารถสรุปเป็นขั้นตอนทั่วไปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การนิยามตัวแปรตัดสินใจ (x) ในแต่ละปัญหานั้นจะมีการนิยามตัวแปรตัดสินใจที่แตกต่างกันไปตามลักษณะเฉพาะของปัญหาต่าง ๆ เช่น ในการพิจารณาว่าจะเลือกปลูกพืชชนิดใดบ้าง จำนวนกี่หน่วย อาจให้ x_j เป็นตัวแปรตัดสินใจ โดยหมายถึง จำนวนหน่วยของพืชชนิดที่ j ที่จะปลูก ในการพิจารณาว่าต้องใช้ใช้เหล็กชนิดใดบ้าง เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามต้องการ อาจให้ x_i แทนค่าตัวแปรตัดสินใจ โดยหมายถึงการเลือกใช้เหล็กชนิดที่ i ที่จะใช้ในการสร้างชิ้นงานตามต้องการ ซึ่งในกรณีนี้ตัวแปรตัดสินใจจะเป็นตัวแปรที่มีมิติเดียว แต่บางครั้งในการออกแบบปัญหานั้นอาจใช้ตัวแปรตัดสินใจที่มากกว่าหนึ่งมิติ เช่น x_{ij} หมายถึง เหล็กชนิด i ที่จะเลือกใช้ในปีที่ j เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (z) หลังจากที่ได้กำหนดนิยามตัวแปรตัดสินใจแล้ว จะต้องทำการเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในเทอมของตัวแปรตัดสินใจตามที่ได้กำหนดไว้ พร้อมทั้งระบุให้ชัดเจนว่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นต้องการหาค่าที่สูงที่สุด หรือค่าที่ต่ำที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 การกำหนดเงื่อนไข หรือข้อจำกัดของปัญหา คือการเขียนข้อจำกัดของปัญหาให้อยู่ในเทอมของตัวแปรตัดสินใจ เช่น ข้อจำกัดเกี่ยวกับทรัพยากรที่มีอยู่ หรือ ข้อจำกัดของสิ่งที่พิจารณา เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้น หลังจากที่ได้ออกแบบส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นแล้ว ขั้นตอนนี้จะเป็นการรวบรวมฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และข้อจำกัด ต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน

ขั้นตอนที่ 5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เมื่อได้ทำการสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นแล้ว ก็จะต้องทำการตรวจสอบแบบจำลอง ค่าพารามิเตอร์ ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ นั้น ถูกต้องแล้วหรือไม่

2.9.5 การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริธึมซิมเพล็กซ์

วิธีซิมเพล็กซ์เป็นวิธีพีชคณิต จากหนังสือการวิจัยดำเนินงาน (รองศาสตราจารย์สุทธิมา ชำนาญเวช 2009) กล่าวว่า เป็นวิธีที่ประกอบขึ้นด้วยการคำนวณเมตริกซ์ (matrix) โดยใช้หลักการปรับเปลี่ยนตัวแปรอย่างมีหลักเกณฑ์เพื่อให้มีผลต่อเป้าหมายของปัญหา และบรรลุผลตาม

เป้าหมายโดยเร็วที่สุด ดังนั้นอัลกอริทึมซิมเพล็กซ์จะเป็นวิธีการคำนวณที่มีลักษณะแบบทำซ้ำ
ขั้นตอน คือ จะคำนวณซ้ำ ๆ จนกว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งวิธีการซิมเพล็กซ์ปรับปรุงโดย จอร์จ บี
ดานซิก (George B. Dantzig) ในปี 1947 เป็นการทำซ้ำอย่างมีระบบ โดยเริ่มต้นตรวจสอบคำตอบ
จากยอดมุมของพื้นที่การค้นหา เริ่มต้นเคลื่อนที่อย่างมีระบบไปยังจุดยอดมุมต่อไปที่ทำให้ได้ค่า
ของฟังก์ชันเป้าหมายสูงสุดหรือต่ำสุด จุดยอดมุมแต่ละจุดจะเป็นคำตอบฐาน (Basic Solution)
ตลอดจนเงื่อนไขการเปลี่ยนจุดกำหนดไว้ในตาราง วิธีการซิมเพล็กซ์ดังตารางที่ 2.1 แสดงเป็น
ตารางที่มีจำนวนนับได้ ตารางหนึ่งก็คือคำตอบของจุดยอดมุมหนึ่งจุด จากตารางจะบอกให้เราได้ว่า
จุดยอดมุมซึ่งเป็นคำตอบที่เป็นไปได้พื้นฐาน (Basic feasible solution) เป็นคำตอบที่ดีที่สุด
(Optimal) หรือไม่ ถ้าไม่เป็น จุดถัดไปควรจะเป็นจุดไหน ซึ่งการแก้ปัญหาด้วยวิธีซิมเพล็กซ์ได้
อธิบายลำดับขั้นตอนทั้งสิ้น 11 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ อสมการที่แสดงถึงข้อจำกัดของปัญหา

ขั้นตอนที่ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ควรเป็นแบบหาค่าสูงสุด ถ้าเป็นแบบหาค่าต่ำสุด
ให้แปลงเป็นแบบหาค่าสูงสุด ดังนี้ Minimize $Z = -$ (Maximize Z) แล้วเปลี่ยนอสมการเป็นสมการ
โดยการใส่ตัวแปรแบบเพิ่มค่า (Slack) หรือ ลดค่า (Surplus) เพื่อให้ได้สมการในรูปแบบมาตรฐานของ
กำหนดการเชิงเส้น

ขั้นตอนที่ 3 สร้างตารางซิมเพล็กซ์เริ่มต้น (Initial Simplex Table) และใส่ค่าต่าง ๆ
ลงในตารางโดยตารางนี้เป็นตัวช่วยในการคำนวณตามกระบวนการซิมเพล็กซ์ และบอกถึงสิ่ง
ต่อไปนี้

1. ตัวแปรที่อยู่ในคำตอบ (ในสดมภ์ตัวแปรมูลฐาน ที่ไม่ได้เป็นตัวแปรเพิ่ม)
2. ค่าไรที่อยู่ในคำตอบ
3. ค่าตัวแปรที่อยู่ในคำตอบที่ทำให้เกิดกำไรสูงสุด

ตัวแปรมูลฐาน (Basic Variable) หมายถึงตัวแปรที่มีสัมประสิทธิ์เป็นเมตริกซ์
เอกลักษณ์ เช่น จากตารางข้างบนนี้ ดูในสดมภ์ s_1 s_2 s_3 จะเห็นว่า สัมประสิทธิ์ของตัวแปรเพิ่ม
ทำให้เกิด เมตริกซ์เอกลักษณ์ดังนี้

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ดังนั้นจึงใส่ s_1 s_2 s_3 ไว้ในสคมภ์ตัวแปรมูลฐานเมื่อทำตามวิธีซิมเพล็กซ์ หลังจากการนำตัวแปรอื่นแต่ละตัวเข้ามาเป็นตัวแปรมูลฐานแล้ว ตัวแปรทั้งหมดในสคมภ์นี้จะต้องทำให้เมตริกซ์เอกลักษณ์เสมอ

ตารางที่ 2.1 รูปแบบของตารางซิมเพล็กซ์

C_j	Coefficient Matrix			Slack Variable			Value of Basic variable	Basic Variables	Coefficient of Basic Variable	Minimum Ratio
	*	*	*	0	0	0				
X_j	x_1	x_2	x_3	s_1	s_2	s_3	X_B	Y_B	C_B	
	*	*	*	1	0	0	*	s_1	0	
	*	*	*	0	1	0	*	s_2	0	
	*	*	*	0	0	1	*	s_3	0	
$Z_j = \sum(X_j C_B)$										
$Z_j - C_j$										

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณ Z_j และ $Z_j - C_j$ ถ้าทุกค่าของ $Z_j - C_j \geq 0$ แสดงว่าได้ค่าสูงสุดแล้ว และหยุดการคำนวณได้ แต่ถ้ายังมีค่าที่ติดลบแสดงว่าค่าที่ได้ยังไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด จึงต้องทำขั้นตอนที่ 5 ต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 เลือกตัวแปรที่จะนำเข้ามาเป็นตัวแปรมูลฐาน โดยดูจากสคมภ์ที่มีค่า $Z_j - C_j$ ลบมากที่สุด เรียกสคมภ์นี้ว่าสคมภ์แกนหมุน (Pivot Column)

ขั้นตอนที่ 6 เลือกตัวแปรที่จะนำออกไป ให้คำนวณหาอัตราส่วน โดยนำค่าในสคมภ์ X_B ตั้ง และหารด้วยค่าในสคมภ์แกนหมุนที่สอดคล้องกันทุกแถว (Row) แล้วเลือกแถวที่มีอัตราส่วนที่มีค่าเป็นบวกน้อยที่สุดเพื่อที่จะนำตัวแปรนั้นออกไป แถวที่มีอัตราส่วนน้อยที่สุดนี้เรียกว่า แถวแกนหมุน (Pivot Row) และค่าที่อยู่ในตำแหน่งที่สคมภ์แกนหมุนแถวแกนหมุนตัดกันเรียกว่าจุดหมุน (Pivot Element)

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาค่าต่าง ๆ ของแถวแกนหมุนที่จะเข้ามาแทนที่ โดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{ค่าในแถวแกนหมุนใหม่} = \text{ค่าในแถวแกนหมุนเดิม/จุดหมุน} \quad (2.7)$$

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาค่าต่าง ๆ ของแถวอื่น ๆ ที่เหลือ โดยใช้ความสัมพันธ์
ต่อไปนี

$$\begin{aligned} \text{ค่าในแถวอื่นค่าใหม่} = & \text{ค่าในแถวอื่นค่าเดิม} - (\text{ค่าในแถวแกนหมุนใหม่}) \\ & \times (\text{ค่าในสดมภ์แกนหมุนที่อยู่ในแถวเดิม}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

ขั้นตอนที่ 9 คำนวณหาค่าของ Z_j โดยใช้สูตร $Z_j = \sum(X_j C_j)$ และหาค่าของ $Z_j - C_j$ แต่
ละตัว

ขั้นตอนที่ 10 ถ้าค่าของ $Z_j - C_j$ ยังมีค่าที่ติดลบอยู่ แสดงว่ายังไม่ได้ค่าที่ดีที่สุด ให้
กลับไปทำตามขั้นตอนที่ 5 อีก

ขั้นตอนที่ 11 ถ้าทุกค่าของ $Z_j - C_j \geq 0$ แสดงว่าได้ค่าสูงสุดแล้ว และหยุดการ
คำนวณได้



บทที่ 3

การวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของไอพีทราฟฟิก ภายในเครือข่ายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในบทนี้นำเสนอการวิเคราะห์คุณลักษณะของไอพีทราฟฟิก โดยทราฟฟิกที่นำมาวิเคราะห์นี้เป็นทราฟฟิกที่ได้รับการเก็บข้อมูลมาจากเครือข่ายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้ซอฟต์แวร์การเฝ้าตรวจทราฟฟิกหรือการมอนิเตอร์ทราฟฟิก งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การกระจายของทราฟฟิกในช่วงเวลาของปริมาณการใช้สูงสุด (peak load) และปริมาณการใช้ต่ำสุด (light load) ซึ่งรายละเอียดของทราฟฟิกรวมทั้งพารามิเตอร์ที่อธิบายคุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิกนั้นได้มาจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธีการทดสอบที่มีความแตกต่างกันสามวิธี ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในโปรแกรม ได้แก่ การทดสอบแบบโคลโมโกรอฟ-สเมียร์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov) การทดสอบแบบแอนเดอร์สัน-ดาร์ลิง (Anderson-Darling) และการทดสอบแบบไคสแควร์ (Chi-Squared) จากการทดลองผู้วิจัยได้พบว่าคุณลักษณะการกระจายของไอพีทราฟฟิก นั้นไม่ได้มีการกระจายแบบปกติเสมอไปและคุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิกในช่วงเวลา peak load และ light load ก็มีคุณลักษณะการกระจายที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ในการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงความไม่แน่นอนของปริมาณไอพีทราฟฟิก นั้นมีความแปรปรวนสูง สำหรับเนื้อหาของงานวิจัยในบทนี้ประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ 3.1 แนวคิดในการวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของไอพีทราฟฟิก 3.2 โครงสร้างของเครือข่ายและการออกแบบการทดลอง 3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิก และ 3.4 สรุปผลของงานวิจัยในบทนี้

3.1 แนวคิดในการวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของไอพีทราฟฟิก

คุณลักษณะการกระจายของไอพีทราฟฟิก (IP traffic distribution) เป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการจัดการทรัพยากรเครือข่ายเพื่อให้สามารถใช้งานทรัพยากรเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการใช้งานต่าง ๆ ที่มีการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไอพี นั้นมีความต้องการสำหรับระดับคุณภาพการบริการและการรับประกันที่แตกต่างกัน ซึ่งผู้ให้บริการเครือข่ายจำเป็นต้องจัดการทรัพยากรเครือข่ายให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกข้อมูลที่มีความต้องการขนส่งบนเครือข่ายได้ ลักษณะของความไม่แน่นอนของไอพีทราฟฟิก จึงนำมาซึ่งความท้าทายใน

การจัดเตรียมและการจัดการเครือข่าย IP เพื่อให้สามารถใช้ทรัพยากรเครือข่ายที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจในการศึกษาคุณลักษณะของไอพีทราฟฟิก อย่างเช่นงานวิจัยของ Du, X., Yang, Y. and Kang, X. (2008) ได้นำเสนอการดำเนินงานของระบบการดูแลทราฟฟิกในเครือข่ายโดยใช้วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของคุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิกในงานวิจัยของ Kim, S., Lee, J. Y. and Sung, D. K. (2003) ได้เสนอแบบจำลองทราฟฟิกของอินเทอร์เน็ตด้วยขั้นตอนแบบเวลาเชิงเส้น (linear-time) ซึ่งเป็นทราฟฟิกที่มีช่วงการขนส่งระยะไกลและเป็นทราฟฟิกที่มีการกระจายแบบชิฟต์แกมมา (shifted gamma) สำหรับงานวิจัยของ Rodrigues, L. and Guardieiro, P. R. (2004) ได้นำเสนอการวิเคราะห์อินเทอร์เน็ตในเชิงมิติของพื้นที่และมิติของเวลา ซึ่งได้วิเคราะห์ระดับการไหลของทราฟฟิกพร้อมด้วย ส่วนในงานวิจัยของ Liu, P., Liu, F. and Lei, Z. (2008) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างทราฟฟิกในเครือข่ายที่ขึ้นอยู่กับผู้ใช้เครือข่ายและแอปพลิเคชันของเครือข่ายที่มีสภาพแวดล้อมของเครือข่ายที่ซับซ้อน โดยนำเสนอแบบจำลองใหม่สำหรับทราฟฟิกในเครือข่ายด้วยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เสมอภาค (Gini coefficient) ซึ่งในการนำเสนอแบบจำลองนี้ได้พิจารณาถึงรายละเอียดของทราฟฟิกในเครือข่าย, ลักษณะของผู้ใช้เครือข่าย และแอปพลิเคชันของเครือข่าย และงานวิจัยของ Rungroj, P. and Chamsripinyo, C. (2007) เป็นการรายงานการเจริญเติบโตของทราฟฟิกทางอินเทอร์เน็ตและความจุของแบนด์วิดท์ของสามผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตรายใหญ่ในประเทศไทย

งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้สมมติฐานว่าทราฟฟิกมีลักษณะการกระจายแบบปัวซอง (poisson distribution) ในการวางแผนและวิเคราะห์การทำงานของเครือข่าย เช่น ในเครือข่ายโทรศัพท์สาธารณะ (Public Switched Telephone Network : PSTN) และเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile network) สำหรับงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการตรวจสอบคุณลักษณะของทราฟฟิกเบื้องต้น โดยที่ได้ทำการเก็บข้อมูลทราฟฟิกจากเครือข่ายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีสำหรับระยะเวลาหนึ่ง โดยใช้ซอฟต์แวร์ที่มีโปรโตคอลการจัดการระบบเครือข่ายอย่างง่าย (Simple Network Management Protocol : SNMP) ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่อยู่ระดับบนในชั้นแอปพลิเคชัน (Application layer) และเป็นส่วนหนึ่งของชุดโปรโตคอลที่ซีพี/ไอพี (TCP/IP) เครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่ใช้โปรโตคอล TCP/IP มีอุปกรณ์เครือข่ายแบบหลากหลายชนิดและหลายยี่ห้อ แต่มาตรฐานการจัดการเครือข่ายที่ใช้กันได้ดีคือ SNMP โปรโตคอล SNMP ได้รับการออกแบบให้มีฟังก์ชันและการทำงานแบบง่าย ๆ เหมาะกับคำว่าซิมเปิล (Simple) โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อให้ผู้ดูแลระบบเครือข่ายสามารถเข้ามาจัดการอุปกรณ์เครือข่ายได้จากระยะไกลโดยง่าย ซึ่งผู้ใช้งานสามารถศึกษารายละเอียดเพื่อทำความเข้าใจเพิ่มเติมสำหรับโปรโตคอล SNMP ได้จาก <http://www.net-snmp.org/> งานวิจัยในบทนี้ได้ทำการ

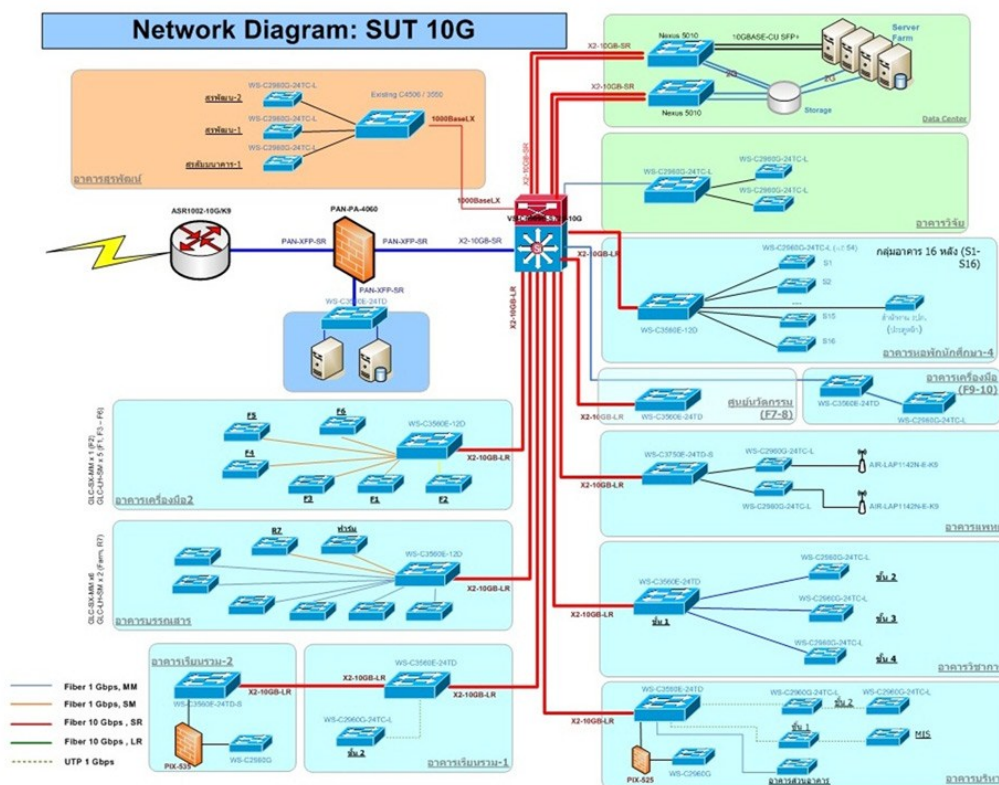
วิเคราะห์การกระจายของกราฟฟิกในช่วงเวลาของปริมาณการใช้สูงสุด (peak load) และปริมาณการใช้ต่ำสุด (light load) และในการศึกษานี้ได้รับผลลัพธ์ที่น่าสนใจสำหรับรายละเอียดคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟิกซึ่งรวมไปถึงพารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟิกด้วย

3.2 โครงสร้างของเครือข่ายและการออกแบบการทดลอง

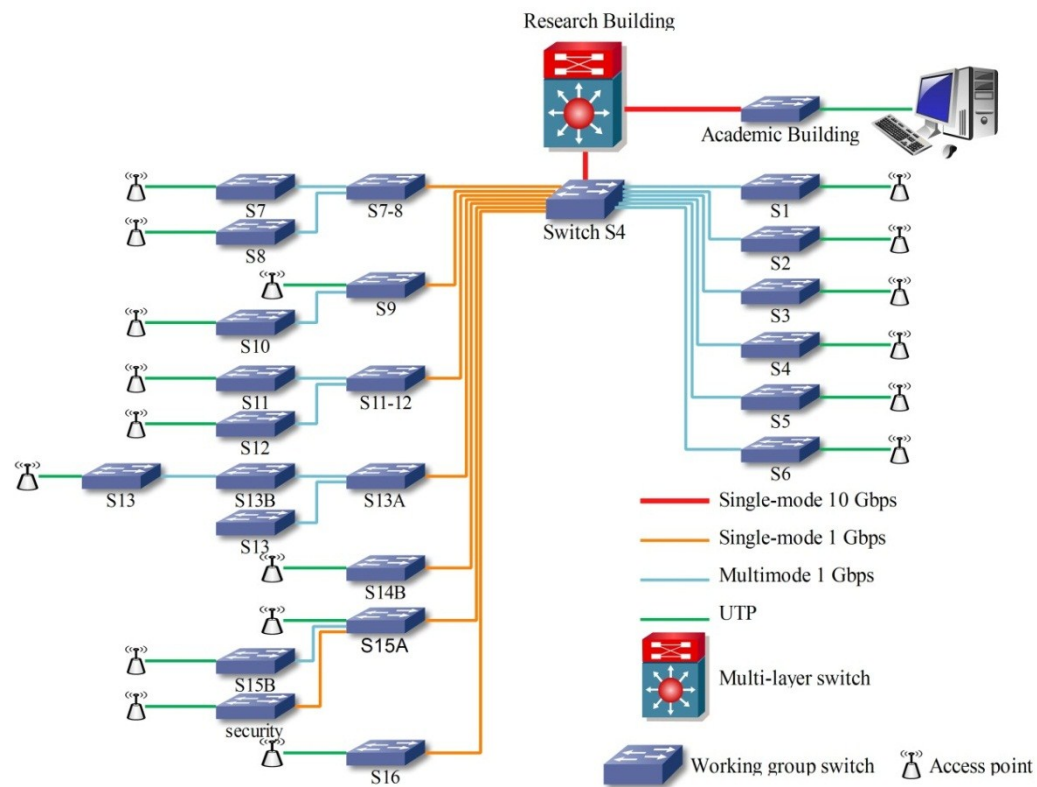
เครือข่ายที่นำมาวิเคราะห์คุณลักษณะสำหรับงานวิจัยในบทนี้คือ เครือข่ายภายในของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งถือได้ว่าเป็นเครือข่ายขนาดใหญ่ เพราะมีองค์กรภายในมหาวิทยาลัยมากมายและแต่ละองค์กรจำเป็นต้องมีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต จึงทำให้มีการกระจายของเครือข่ายไปทั่วทุกอาคารภายในมหาวิทยาลัยดังแสดงในรูปที่ 3.1 เครือข่ายภายในมหาวิทยาลัยนี้มีไฟร์วอลล์ (Firewall) เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายภายในและเครือข่ายภายนอก โดยที่ไฟร์วอลล์นั้นเชื่อมต่ออยู่กับสวิตช์หลัก (Multilayer Switch) ของเครือข่ายเพื่อการรักษาความปลอดภัยระหว่างเครือข่าย เครือข่ายภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีนี้ใช้สายใยแก้วนำแสง (fiber optic) ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูล 10 Gbps ในการเชื่อมต่อกับสวิตช์หลัก แล้วกระจายไปยังสวิตช์ (switch) ตามอาคารต่าง ๆ ด้วยสายใยแก้วนำแสงที่มีอัตราการรับส่งข้อมูล 10 Gbps เช่นกัน จากนั้นมีการเชื่อมต่อไปยังสวิตช์ย่อยของหน่วยงานหรือองค์กรต่าง ๆ ด้วยสายใยแก้วนำแสงที่มีอัตราการรับส่งข้อมูล 1 Gbps และมีการเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์กระจายสัญญาณแบบไร้สาย (Access point) โดยใช้สายคู่บิดเกลียวชนิดไม่หุ้มฉนวน (Unshielded Twisted Pair : UTP) ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูล 1 Gbps เพื่อใช้ในระบบการสื่อสารแบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN)

ผู้วิจัยทำการเลือกวิเคราะห์คุณลักษณะกราฟฟิกของเครือข่ายหอพักภายในมหาวิทยาลัย ซึ่งเครือข่ายหอพักภายในมหาวิทยาลัยนี้มีการใช้งานปริมาณกราฟฟิกถึงร้อยละ 80 ของการใช้ทั้งหมดภายในมหาวิทยาลัย โครงสร้างของเครือข่ายหอพักนักศึกษาภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยมีสวิตช์หลักอยู่ที่หอพักสุรนิวาส 4 (Switch S4) ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับเซิร์ฟเวอร์ (Server) ของมหาวิทยาลัยที่อาคารวิจัยโดยใช้สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (Single-mode) ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูล 10 Gbps จากสวิตช์หลักที่หอพักสุรนิวาส 4 ได้มีการเชื่อมต่อไปยังหอพักต่าง ๆ ซึ่งพื้นที่ในการให้บริการเครือข่ายได้แบ่งออกเป็นสองพื้นที่ คือ พื้นที่ให้บริการเครือข่ายในส่วนแรกสำหรับกลุ่มหอพักสุรนิวาส 1-6 โดยมีสวิตช์ย่อยที่เชื่อมต่อกับสวิตช์หลักที่หอพักสุรนิวาส 4 ด้วยสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (Multimode) ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูล 1 Gbps แล้วจึงเชื่อมต่อไปยัง Access point ที่อยู่ตามอาคารด้วยสาย UTP และพื้นที่ให้บริการเครือข่ายส่วนที่สอง

คือ พื้นที่ให้บริการเครือข่ายในส่วนแรกสำหรับกลุ่มหอพักสุรนิวศ 7-16 โดยมีสวิตช์ย่อยที่เชื่อมต่อกับสวิตช์หลักที่หอพักสุรนิวศ 4 ผ่านสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวที่มีอัตราการรับส่งข้อมูล 1 Gbps เนื่องจากหอพักสุรนิวศ 7-16 นี้มีพื้นที่ในการให้บริการเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ให้บริการเครือข่ายในส่วนแรก จึงมีการเชื่อมต่อไปยังสวิตช์ย่อยของแต่ละพื้นที่ให้บริการอีกทีเพื่อเชื่อมต่อไปยัง Access point ที่กระจายอยู่ตามอาคารด้วยสาย UTP ซึ่งในการเฝ้าตรวจกราฟฟิคหรือการมอนิเตอร์กราฟฟิค (Monitoring traffic) สามารถทำได้ทุกที่ที่สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายได้ และในการศึกษาครั้งนี้ได้มอนิเตอร์กราฟฟิคที่อาคารวิชาการผ่านสาย UTP ที่เชื่อมต่อกับเครือข่ายของมหาวิทยาลัย



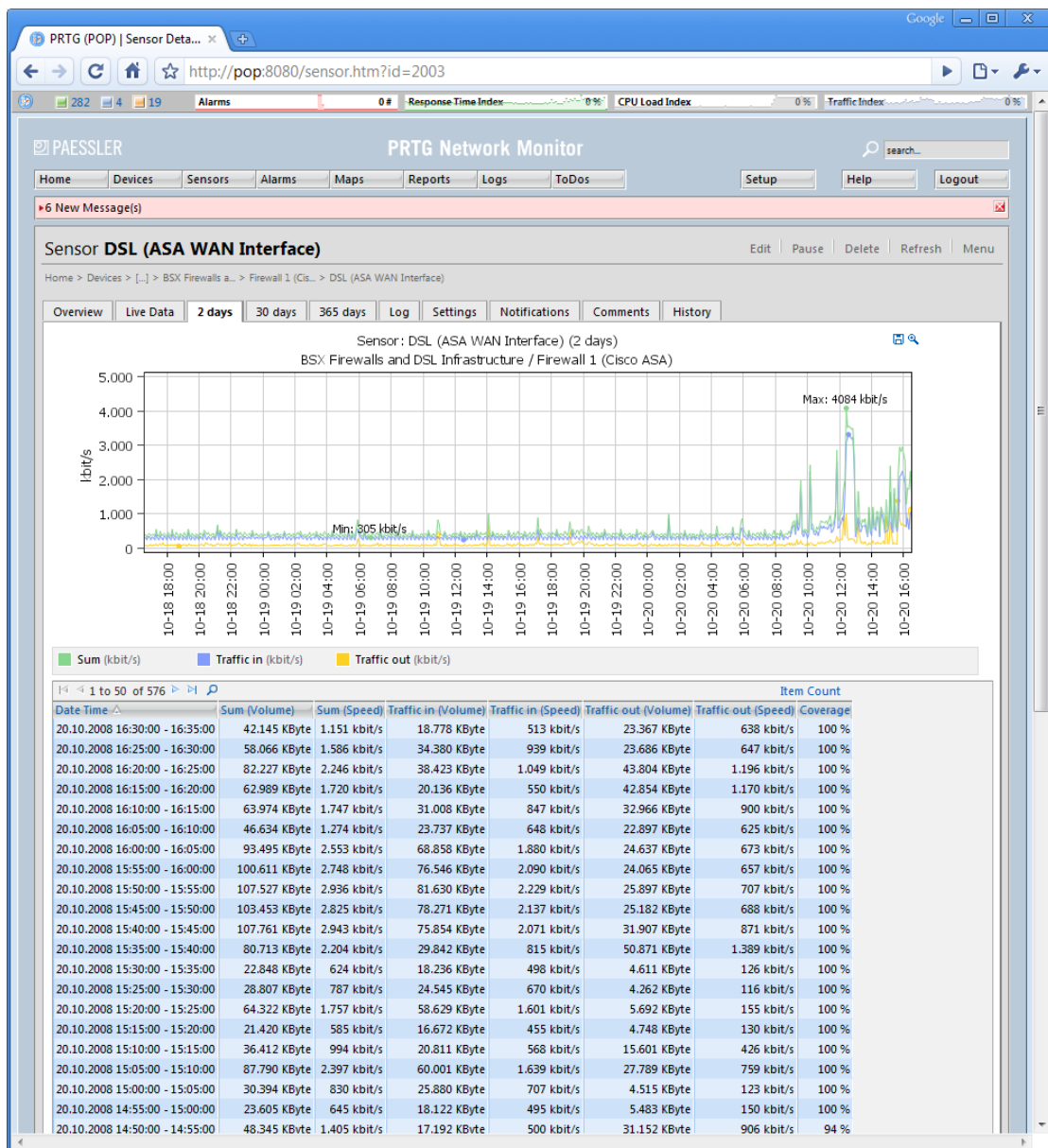
รูปที่ 3.1 โครงสร้างเครือข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของเครือข่ายหอพักภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของกราฟฟิกสำหรับงานวิจัยในบทนี้ ได้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรมมอนิเตอร์กราฟฟิกในการตรวจจับปริมาณกราฟฟิกและบันทึกข้อมูลของกราฟฟิก ซึ่งเป็นข้อมูลที่น่ามาศึกษาเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของกราฟฟิก โดยโปรแกรมมอนิเตอร์กราฟฟิกนั้น มีการดำเนินงานในชั้นแอปพลิเคชันของแบบจำลอง โอเอสไอ (OpenSystem Interconnection Reference Model : OSI) ซึ่งมีโปรโตคอลที่ใช้ดำเนินการคือโปรโตคอล SNMP แต่สำหรับบางโปรแกรมอาจมีการใช้งานโปรโตคอลอื่น ๆ มาช่วยในการมอนิเตอร์กราฟฟิก ซึ่งงานวิจัยในบทนี้ ได้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม PRTG Traffic Grapher สำหรับการเก็บบันทึกข้อมูลปริมาณการใช้งานกราฟฟิก โปรแกรม PRTG Traffic Grapher เป็นซอฟต์แวร์ที่มีหน้าที่เพื่อตรวจสอบและควบคุมการใช้งานภายในเครือข่าย โดยสามารถปฏิบัติงานตลอด 24 ชั่วโมงบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows) ซึ่งมีการเก็บบันทึกข้อมูลการใช้งานบนเครือข่ายไว้ในฐานข้อมูลภายในเพื่อใช้อ้างอิงในภายหลัง มีเว็บอินเตอร์เฟส (Web Interface) ที่เรียบง่ายสามารถปรับแต่งการตั้งค่าของอุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นตัวอย่างของโปรแกรม PRTG Traffic Grapher อ้างอิงจาก <http://www.paessler.in.th/product/prtg/> และ โปรแกรมนี้เป็นซอฟต์แวร์ที่มีการใช้โปรโตคอล

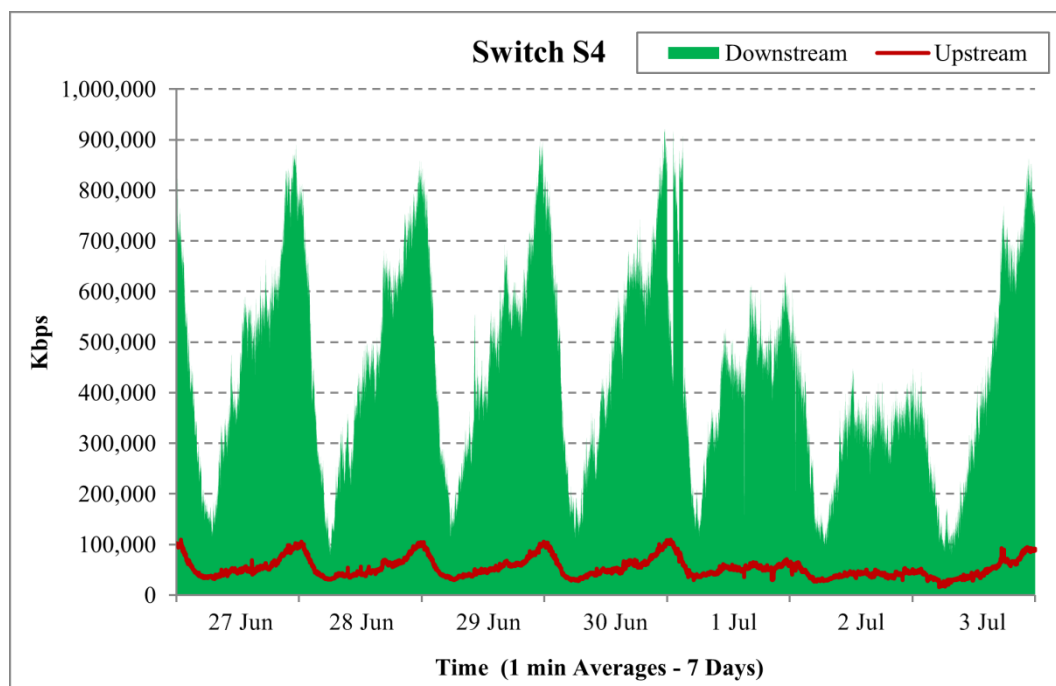
SNMP เป็นเครื่องมือสำหรับรายงานข้อมูลการใช้งานของเราเตอร์ (router) และสวิตช์อย่างละเอียด อย่างไรก็ตามผู้ใช้งานสามารถศึกษารายละเอียดของโปรแกรม PRTG Traffic Grapher เพื่อทำความเข้าใจเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ก. และ <http://www.paessler.com/prtg/>



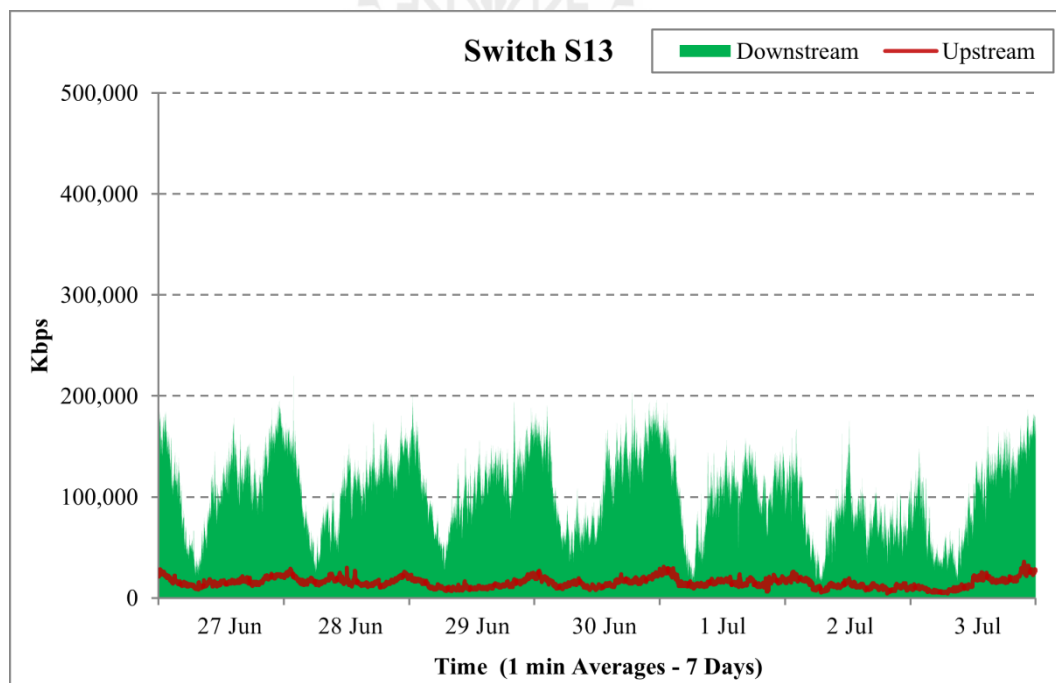
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างโปรแกรม PRTG Traffic Grapher

งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้งานกราฟฟิกในช่วงระยะเวลา 1 เดือน โดยดำเนินการเก็บข้อมูลปริมาณกราฟฟิกของทั้งสวิตช์หลักและสวิตช์ย่อย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แสดง

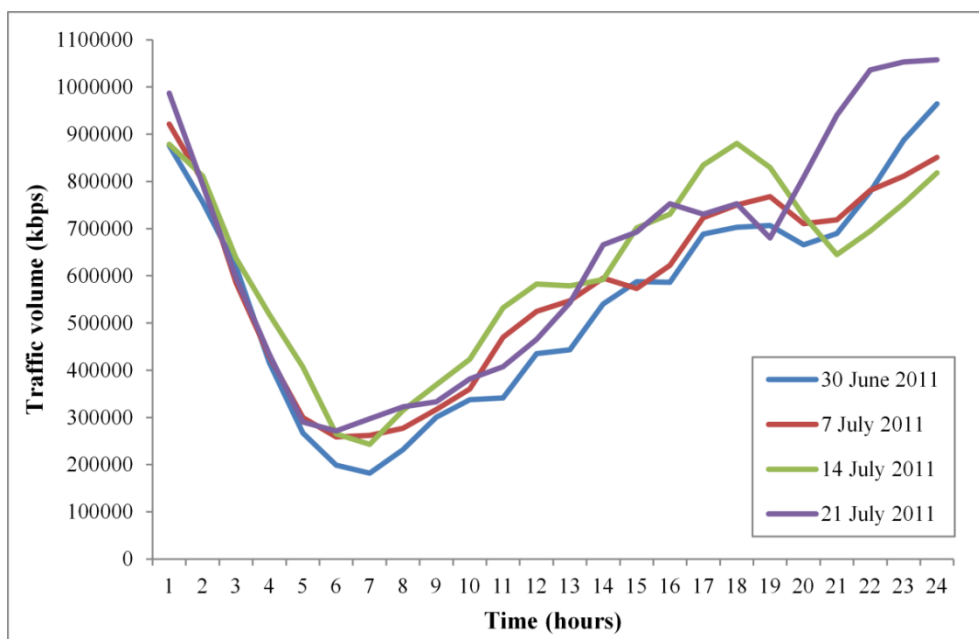
ตัวอย่างข้อมูลของสวิตช์หลัก (Switch S4) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และสวิตช์ย่อย (Switch S13) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งทั้งสองตัวอย่างได้แสดงการใช้งานปริมาณกราฟฟิคในช่วงระยะเวลา 7 วัน (1 สัปดาห์) โดยเป็นปริมาณกราฟฟิคที่มีการเก็บบันทึกข้อมูลไว้ทุก ๆ 1 นาที สังเกตได้ว่าปริมาณของกราฟฟิคในสวิตช์หลักจะมีมากกว่าปริมาณของกราฟฟิคในสวิตช์ย่อยอย่างชัดเจน และในรูปที่ 3.6 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกราฟฟิคที่ใช้งานในแต่ละวันสำหรับแต่ละสัปดาห์ โดยแสดงตัวอย่างของวันหยุดที่สัปดาห์ที่เป็นวันสำหรับการทำงานและวันอาทิตย์ที่เป็นวันหยุดดังรูปที่ 3.6 (ก) และ 3.6 (ข) ตามลำดับ ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าปริมาณกราฟฟิคที่ขนส่งผ่านเครือข่ายในวันหยุดที่สัปดาห์สำหรับแต่ละสัปดาห์นั้นมีแนวโน้มการเพิ่มลดของปริมาณกราฟฟิคในลักษณะที่มีทิศทางเดียวกัน และปริมาณกราฟฟิคที่ขนส่งผ่านเครือข่ายในวันอาทิตย์สำหรับแต่ละสัปดาห์นั้นมีแนวโน้มการเพิ่มลดของปริมาณกราฟฟิคในลักษณะที่มีทิศทางเดียวกันเช่นกัน แต่ในวันทำงานนั้นมีการใช้งานการขนส่งข้อมูลที่มีปริมาณกราฟฟิคมากกว่าในวันหยุด ซึ่งในการวิเคราะห์คุณลักษณะของกราฟฟิคนี้ได้วิเคราะห์ความสมมาตรและข้อมูลนอกกลุ่ม (Outlier) และได้พิจารณากราฟฮิสโทแกรม (Histogram) ของชุดข้อมูลโดยใช้โปรแกรม EasyFit ซึ่งสามารถศึกษารายละเอียดของโปรแกรมได้จากภาคผนวก ก. และ <http://www.mathwave.com/> โดยที่มีการวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายตัวของกราฟฟิคในช่วง Peak-load ซึ่งคือช่วงเวลาที่ปริมาณกราฟฟิคไหลผ่านเครือข่ายสูงสุด และช่วง Light-load ซึ่งคือช่วงเวลาที่ปริมาณกราฟฟิคไหลผ่านเครือข่ายต่ำสุด ด้วยการทดสอบจากวิธีการทดสอบที่มีความแตกต่างกันถึงสามวิธี ได้แก่ การทดสอบแบบ Kolmogorov Smirnov การทดสอบแบบ Anderson Darling และการทดสอบแบบ Chi-Squared และได้ทำการวิเคราะห์ความถูกต้องของคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟิคด้วยการพล็อตความน่าจะเป็น-ความน่าจะเป็น (Probability-Probability Plot : P-P Plot) ซึ่งเป็นวิธีการการพล็อตความน่าจะเป็นสำหรับการประเมินความใกล้ชิดของข้อมูลสองชุด ซึ่งในที่นี้เป็นการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของข้อมูลกับค่าความน่าจะเป็นทางทฤษฎีของคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟิค โดยการทดสอบและการวิเคราะห์ดังกล่าวได้แสดงอยู่ในหัวข้อถัดไป



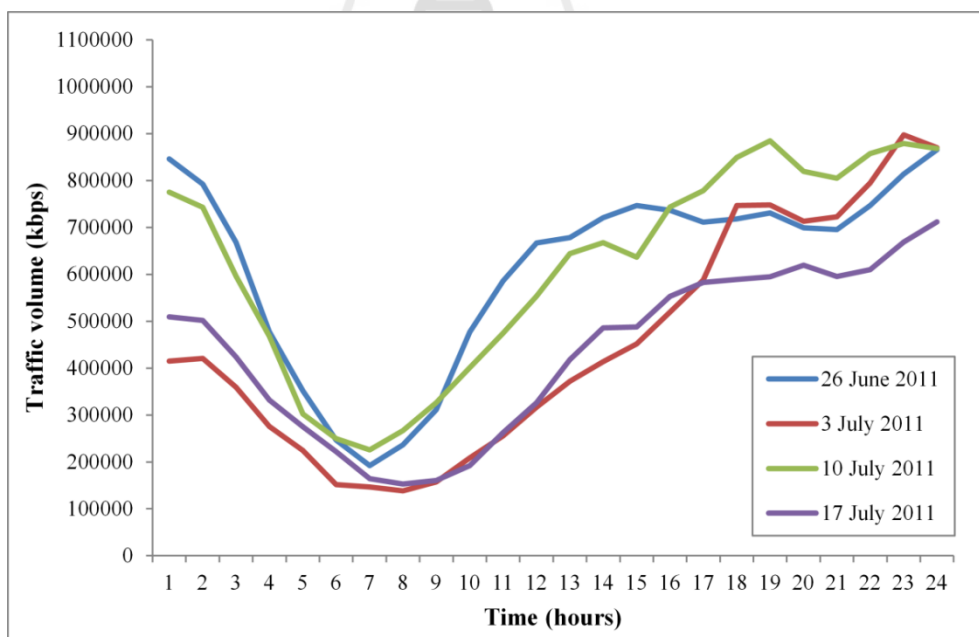
รูปที่ 3.4 ปริมาณของกราฟฟิคที่ไหลผ่านสวิตช์ S4



รูปที่ 3.5 ปริมาณของกราฟฟิคที่ไหลผ่านสวิตช์ S13



(ก) วันพฤหัสบดี

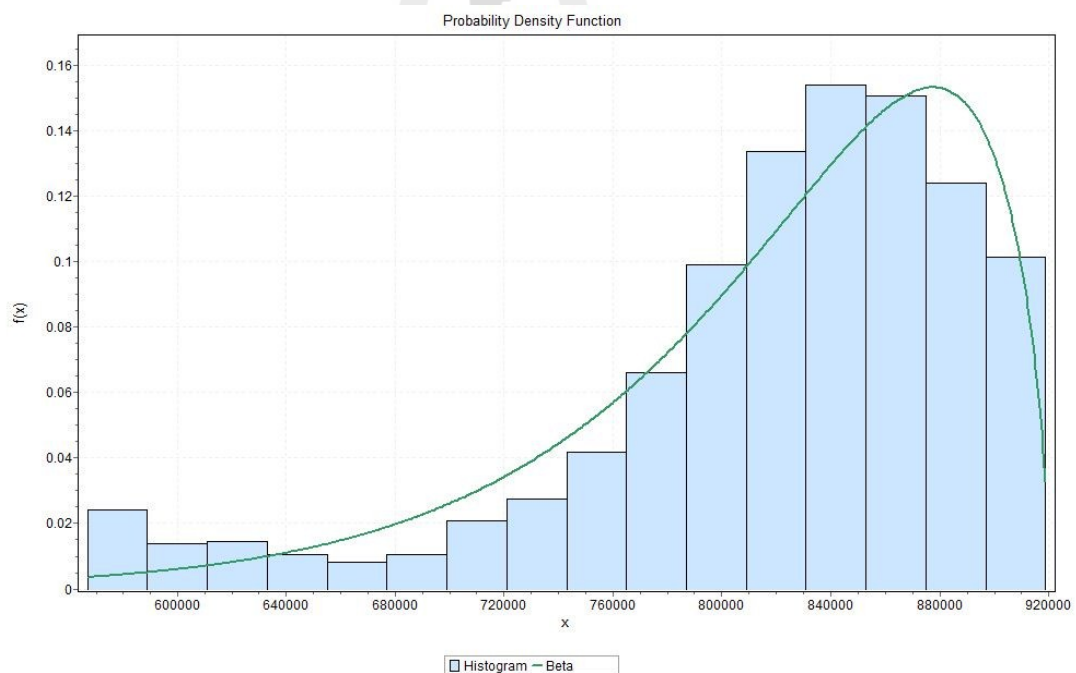


(ข) วันอาทิตย์

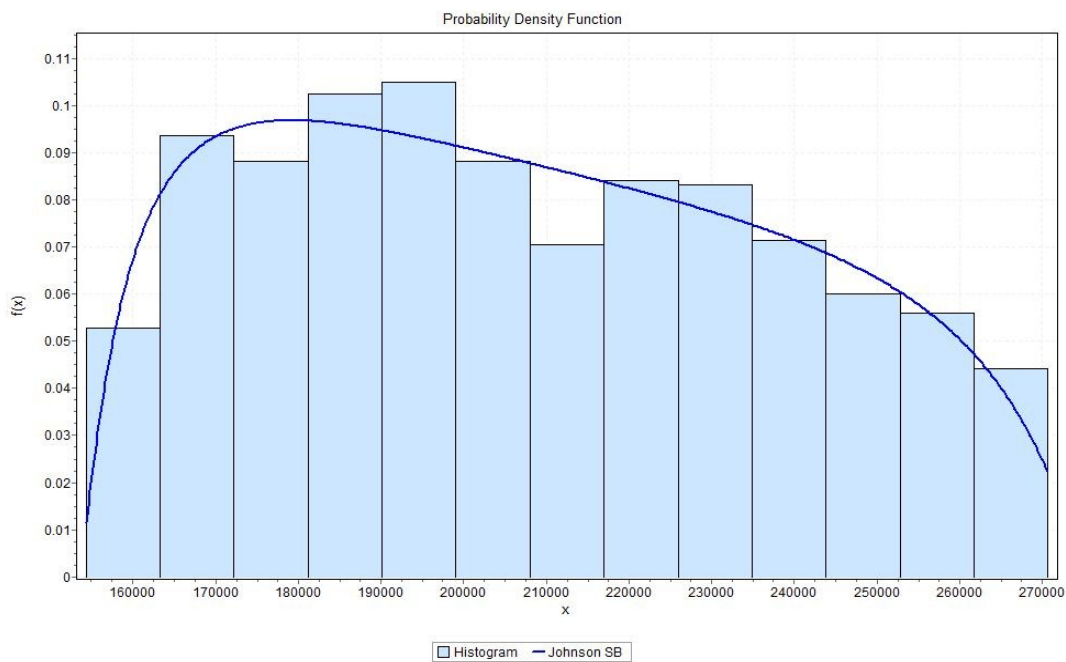
รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบการใช้งานกราฟฟิคที่ Switch S4

3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีก

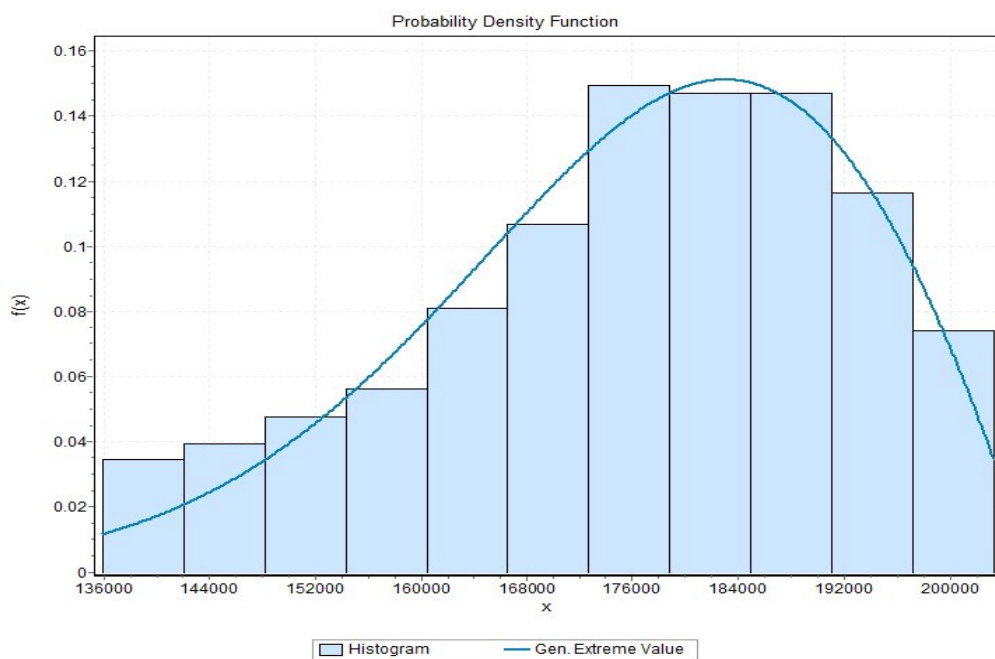
ในการวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีกในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลปริมาณกราฟฟีกที่เก็บบันทึกได้จากโปรแกรมมอนิเตอร์กราฟฟีกมาทำการวิเคราะห์สำหรับชั่วโมง Peak-load และชั่วโมง Light-load โดยได้คัดเลือกข้อมูลนอกกลุ่ม (Outlier) ออกก่อน และนำข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ความสมมาตรด้วย Histogram แสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 ได้แสดงถึง Histogram ในช่วง Peak-load และ Light-load ของ Switch S4 (สวิตช์หลัก) ตามลำดับ และในรูปที่ 3.9 และ 3.10 ได้แสดงถึง Histogram ในช่วง Peak-load และ Light-load ของ Switch S13 (สวิตช์ย่อย) ตามลำดับ ซึ่งสามารถสังเกตจาก Histogram ได้ว่า การกระจายของข้อมูลในช่วง Peak-load มีลักษณะการกระจายตัวเบ้ไปทางซ้ายและการกระจายของข้อมูลในช่วง Light-load มีลักษณะการกระจายตัวเบ้ไปทางขวา ซึ่งแสดงถึงความไม่สมมาตร ดังนั้นจากการวิเคราะห์ข้อมูลนี้ด้วย Histogram จึงทำให้สามารถกล่าวได้ว่าคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีกนี้ไม่ได้มีการกระจายแบบปกติ (Normal distribution)



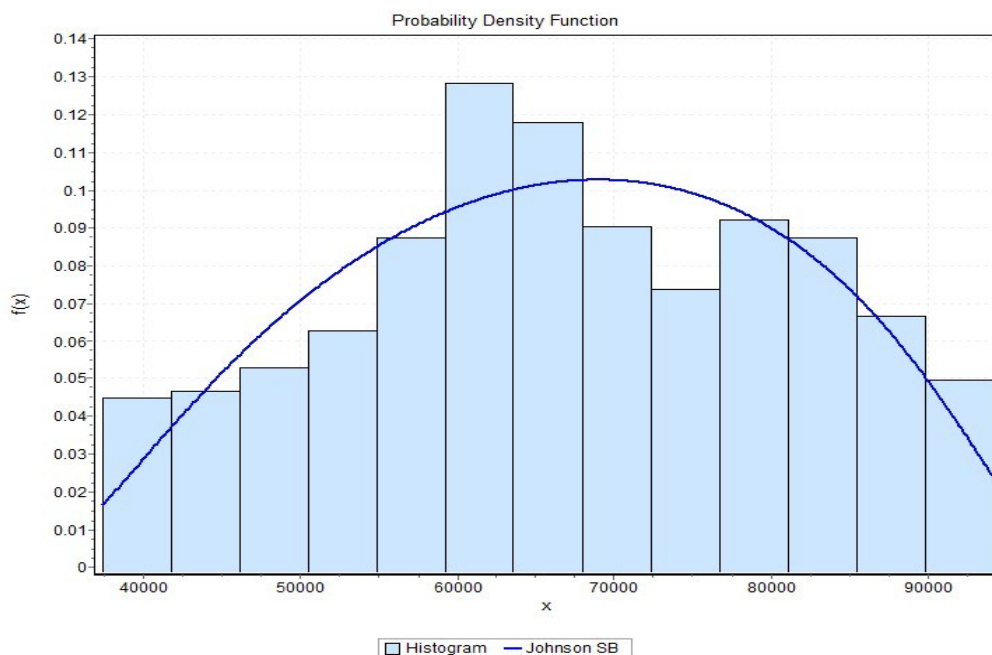
รูปที่ 3.7 Histogram ของกราฟฟีกในช่วงเวลา peak-load ของ Switch S4



รูปที่ 3.8 Histogram ของกราฟฟิกในช่วงเวลา light-load ของ Switch S4



รูปที่ 3.9 Histogram ของกราฟฟิกในช่วงเวลา peak-load ของ Switch S13



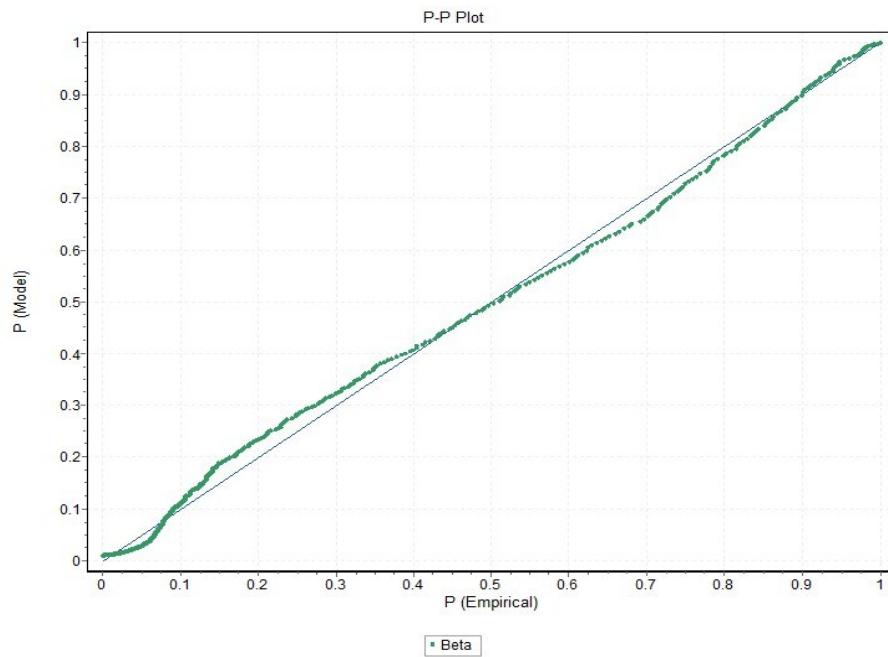
รูปที่ 3.10 Histogram ของกราฟฟีกในช่วงเวลา light-load ของ Switch S13

เนื่องจากข้อมูลของกราฟฟีกที่นำมาวิเคราะห์นี้ไม่ได้มีการกระจายแบบปกติ ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Easy Fit เพื่อจัดอันดับคุณลักษณะการกระจายด้วยการทดสอบแบบ Kolmogorov Smirnov การทดสอบแบบ Anderson Darling และการทดสอบแบบ Chi-Squared จากการทดสอบนี้จึงทำให้ได้รับคุณลักษณะการกระจายที่แสดงดังตารางที่ 1 อย่างไรก็ตาม นักวิจัยหรือผู้ใช้งานสามารถศึกษาคุณลักษณะการกระจายแบบต่าง ๆ ได้จากงานวิจัยของ Jain, R. (1991) และจากผลการทดลองนี้สามารถสังเกตได้ว่า Switch S4 ในช่วงเวลา Peak-load มีคุณลักษณะการกระจายแบบเบต้า (Beta Distribution) Switch S4 ในช่วงเวลา Light-load มีคุณลักษณะการกระจายแบบจอห์นสัน เอสบี (Johnson SB Distribution) ส่วน Switch S13 ในช่วงเวลา Peak-load มีคุณลักษณะการกระจายแบบค่าที่สุดทั่วไป (Generalized extreme value distribution) และ Switch S13 ในช่วงเวลา Light-load มีคุณลักษณะการกระจายแบบ Johnson SB Distribution โดยที่ค่าพารามิเตอร์สำหรับคุณลักษณะการกระจายต่าง ๆ ของกราฟฟีกแสดงดังตารางที่ 3.1

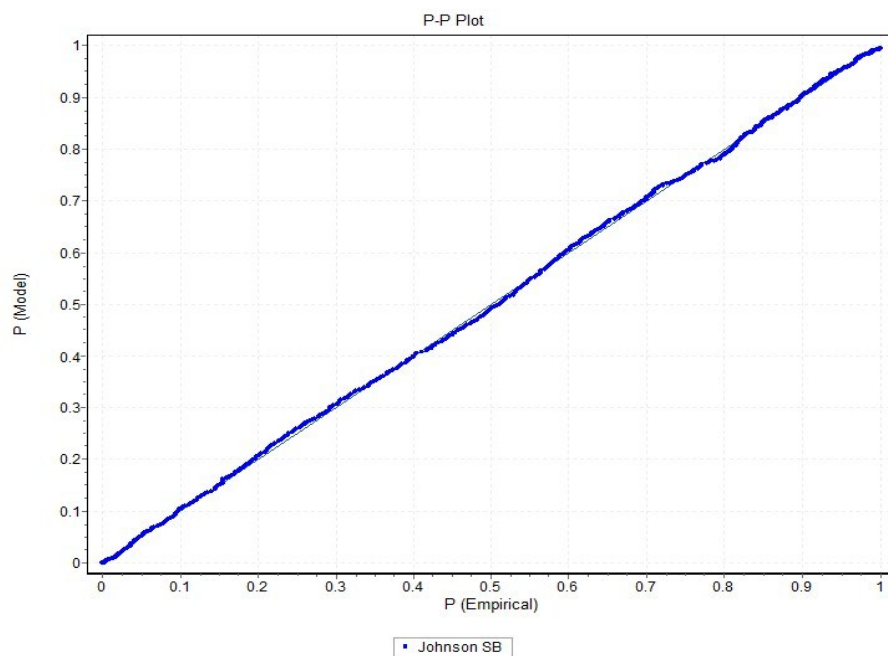
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคุณลักษณะการกระจาย

สวิตช์	ช่วงเวลา	คุณลักษณะการกระจาย	พารามิเตอร์
S4	peak-load	Beta	$a_1 = 36.612$ $a_2 = 1.6628$ $a = -1.4285 \times 10^6$ $b = 9.2046 \times 10^5$
	light-load	Johnson SB	$\gamma = 0.21722$ $\delta = 0.74927$ $\lambda = 1.2320 \times 10^5$ $\xi = 1.5313 \times 10^5$
S13	peak-load	Generalized extreme value distribution	$k = -0.52069$ $\sigma = 17618.0$ $\mu = 1.7224 \times 10^5$
	light-load	Johnson SB	$\gamma = -0.1054$ $\delta = 1.0219$ $\lambda = 69493.0$ $\xi = 30793.0$

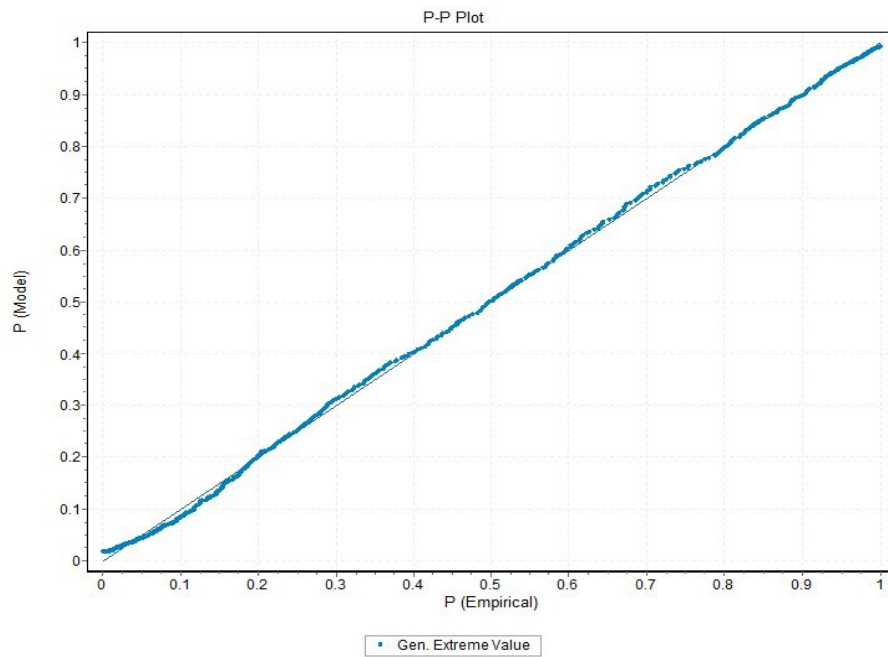
เมื่อวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายด้วยการทดสอบ Kolmogorov Smirnov การทดสอบแบบ Anderson Darling และการทดสอบแบบ Chi-Squared แล้ว ซึ่งทำให้ได้มาซึ่งคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีก และจากนั้นผู้วิจัยจึงนำคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีกที่ได้รับมาวิเคราะห์ตรวจสอบความถูกต้องของคุณลักษณะการกระจายนั้นด้วย P-P Plot ดังแสดงในรูปที่ 3.11-3.14 ในแต่ละรูปได้แสดงถึงค่าความน่าจะเป็นของข้อมูลในลักษณะที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นทางทฤษฎีของคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีกนั้น ๆ ซึ่งหมายความว่าผลที่ได้จากการทดสอบคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีกนี้มีคุณลักษณะของการกระจายที่ถูกต้องแล้ว หรือกล่าวได้ว่ามีคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีกเป็นไปตามคุณลักษณะที่ได้จากการทดสอบดังกล่าว



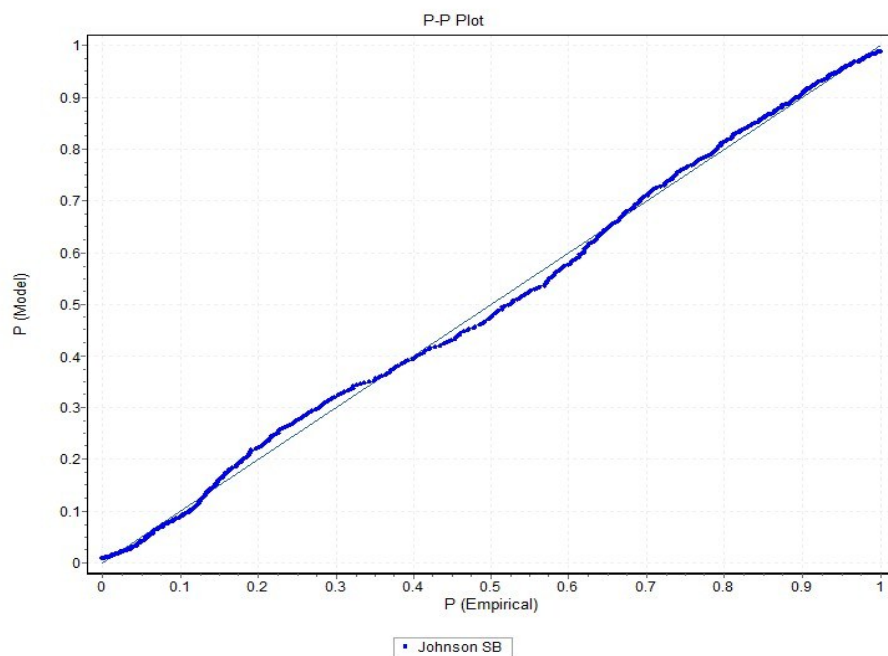
รูปที่ 3.11 P-P Plot ในช่วง Peak-load ของ Switch S4



รูปที่ 3.12 P-P Plot ในช่วง Light-load ของ Switch S4



รูปที่ 3.13 P-P Plot ในช่วง Peak-load ของ Switch S13



รูปที่ 3.14 P-P Plot ในช่วง Light-load ของ Switch S13

3.4 สรุปผลของงานวิจัยในบทนี้

งานวิจัยในบทนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของกราฟฟีกที่ได้จากการตรวจสอบหรือการมอนิเตอร์กราฟฟีกของการใช้งานอินเทอร์เน็ตเนตของหอพักภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คำนึงถึงปัจจัยการใช้งานในช่วง Peak-load และช่วง Light-load โดยทำการวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีกด้วย Histogram ที่แสดงถึงข้อมูลว่าไม่ได้มีการกระจายแบบปกติ แล้วจึงทำการหาคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีกด้วยการทดสอบแบบ Kolmogorov Smirnov การทดสอบแบบ Anderson Darling และการทดสอบแบบ Chi-Squared แล้วนำคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีกที่ได้มาทดสอบความถูกต้องของคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีกด้วย P-P Plot เพื่อบ่งบอกว่าคุณลักษณะการกระจายของกราฟฟีกที่ได้รับนั้นมีความถูกต้อง



บทที่ 4

เทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลของปริมาณทราฟฟิก ภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก สำหรับเครือข่าย IP over WDM

ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นว่าไอพีทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนนั้นมีผลต่อความน่าเชื่อถือของการเชื่อมต่อภายในเครือข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing : IP over WDM) งานวิจัยในบทนี้จึงได้ตระหนักถึงคุณภาพในการให้บริการ ซึ่งการมีคุณภาพในการให้บริการเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อความน่าเชื่อถือของผู้ให้บริการเครือข่าย โดยผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาทราฟฟิกที่มีความต้องการขนส่งข้อมูลภายในเครือข่ายภายใต้ประเด็นความไม่แน่นอนของทราฟฟิกดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.8 และผู้วิจัยได้นำเสนอเทคนิคใหม่สำหรับการออกแบบโครงข่ายเสมือนด้วยเทคนิคการวางแผนทราฟฟิก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่ายแกนหลัก IP over WDM และได้ดำเนินการตรวจสอบผลกระทบของทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนต่อความสมดุลของการจัดส่งทราฟฟิกภายในข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพสำหรับเครือข่าย IP over WDM โดยงานวิจัยในบทนี้ได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาด้วยการใช้รูปแบบของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม สำหรับผลของงานวิจัยในบทนี้คือการนำเสนอแบบจำลองที่สามารถจัดการกับสามประเด็นสำคัญ ได้แก่ ประเด็นที่หนึ่งเป็นการสร้างความมั่นใจในการเชื่อมต่อในชั้นไอพี (โครงข่ายเสมือน) ประเด็นที่สองเป็นการสร้างความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกภายในเครือข่าย WDM และประเด็นที่สามเป็นการสร้างความมั่นใจสำหรับความจุของเครือข่ายเพื่อให้สามารถรองรับความต้องการของทราฟฟิกภายใต้สถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอนของทราฟฟิก สำหรับเนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ 4.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM 4.2 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม 4.3 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ 4.4 การวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม 4.5 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้น 4.6 การดำเนินการทดลองสำหรับการออกแบบโครงข่ายเสมือน 4.7 การวิเคราะห์ผลการออกแบบโครงข่ายเสมือน และ 4.8 สรุปผลของงานวิจัยในบทนี้

4.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM

เครือข่าย IP over WDM มีบทบาทสำคัญในการขนส่งไอพีทราฟฟิกขนาดใหญ่ผ่านทางเครือข่ายหลักของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต (Internet Service Provider : ISP) ประสิทธิภาพทางวิศวกรรมทราฟฟิกจึงมีความจำเป็นต่อระบบของเครือข่ายดังกล่าวเพื่อให้มีความน่าเชื่อถืออย่างสูงในการขนส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต

การเจริญเติบโตของไอพีทราฟฟิกและแอปพลิเคชันต่าง ๆ ที่มีมากขึ้นนั้นมีความต้องการสำหรับระดับของคุณภาพการบริการและการรับประกันที่แตกต่างกัน ซึ่งระดับของคุณภาพการบริการและการรับประกันนั้นต้องมีระดับที่เหมาะสมสำหรับความไม่แน่นอนของไอพีทราฟฟิก ผู้ให้บริการเครือข่ายจึงจำเป็นต้องจัดการทรัพยากรเครือข่ายเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างเพียงพอต่อการรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งข้อมูลในเครือข่าย และสามารถให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการดำเนินงานภายใต้ความจุของเครือข่ายที่มีอยู่อย่างจำกัด ลักษณะของไอพีทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนนั้นจึงนำมาซึ่งความท้าทายในการจัดเตรียมและการจัดการทรัพยากรเครือข่ายสำหรับทราฟฟิกที่มีความต้องการขนส่งข้อมูลภายในเครือข่าย IP over WDM

ในหลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจในการศึกษาการวางแผนเครือข่ายและวิศวกรรมทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM เช่น งานวิจัยของ Ramamurthy, B., Ramakrishnan, K. K. and Sinha, R. K. (2011) ได้ทำการวิเคราะห์เรื่องค่าใช้จ่ายและความน่าเชื่อถือในการออกแบบเครือข่ายหลักของ IP over WDM และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงข่ายเสมือนในเครือข่าย IP over WDM เช่น งานวิจัยของ Ling, W. and Peida, Y. (2003) ได้เสนอการออกแบบโครงข่ายเสมือนที่เหมาะสมด้วยข้อกำหนดของคุณภาพของการให้บริการ (QoS) ที่มีการรับประกันความต้องการ QoS แบบ end-to-end เช่นการรับประกันอัตราการเกิดการบล็อก โดยในการกำหนดค่าของเครือข่ายเสมือนนั้นได้มีการตั้งค่าสำหรับแต่ละการบริการเพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายของเครือข่าย ส่วนในงานวิจัยของ Lin, T., Zhou, Z. and Thulasiraman, K. (2011) ได้เสนอการกำหนดเส้นทาง (lightpath) เพื่อความอยู่รอดของโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์ของความจุให้มากที่สุดสำหรับก่อนและหลังการเกิดความล้มเหลวของการเชื่อมโยงทางกายภาพ

ในขณะที่การศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีความสำคัญและแสดงผลลัพธ์ที่น่าสนใจแต่ประเด็นสำคัญของทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนก็ยังไม่ได้มีการพิจารณา ซึ่งก็มีบางงานวิจัยให้ความสนใจเกี่ยวกับความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในการวางแผนเครือข่าย อย่างเช่น งานวิจัยของ Meesublak, K. (2008) ได้กล่าวถึงลักษณะความไม่แน่นอนที่เกิดจากลักษณะของไอพีทราฟฟิก

แบบไดนามิก และนำเสนอวิธีการวางแผนเครือข่ายที่มีการกำหนดด้วยลักษณะของทราฟฟิกภายใน ขั้นตอนการออกแบบเครือข่าย ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวมีเป้าหมายเพื่อตรวจสอบเส้นทางในเครือข่าย เพียงชั้นเดียว ด้วยการใช้อัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนที่ใช้จ่ายสำหรับความจุที่ใช้งานในการรองรับความต้องการของทราฟฟิกภายในเครือข่าย ซึ่งทราฟฟิกที่ใช้ในงานนี้ได้มีการกำหนดด้วย ระดับความไม่แน่นอนของทราฟฟิก และในงานวิจัยของ Meesublak, K. (2009) ก็ได้ทำการพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกเช่นกัน แต่เป็นการพิจารณาสำหรับสถาปัตยกรรมเครือข่าย สองชั้นโดยใช้อัตถุประสงค์เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Meesublak, K. (2008) คือ มีวัตถุประสงค์ เพื่อลดต้นทุนที่ใช้จ่ายสำหรับความจุที่ใช้งานในเครือข่าย

ถึงแม้ว่างานวิจัยได้มีการพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในขั้นตอนการวางแผนเครือข่าย แต่งานวิจัยเหล่านั้นมีเป้าหมายหลักเกี่ยวกับลดค่าใช้จ่ายของเครือข่าย ซึ่งยังขาดการศึกษาที่มีการพิจารณาถึงความสมดุลของทราฟฟิกภายในเครือข่ายร่วมกับความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในเครือข่ายสองชั้น อาทิเช่น เครือข่าย IP over WDM สำหรับปัญหาในการขนส่งทราฟฟิกที่มีผลต่อคุณภาพในการให้บริการที่มักจะพบเห็น ได้แก่ ปัญหาความแออัดของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยง (link) หรือที่คอขวด (bottleneck) และปัญหาของการหยุดชะงักในการขนส่งทราฟฟิกเมื่อเกิดกรณีข่ายเชื่อมโยงขาดหรือล้นเหลือ ถ้ามีข่ายเชื่อมโยงที่ขาดหรือล้นเหลวนั้นมีปริมาณทราฟฟิกที่ขนส่งอยู่ในปริมาณที่สูงมาก ก็จะทำให้เกิดการหยุดชะงักในการขนส่งทราฟฟิก ซึ่งส่งผลให้ความน่าเชื่อถือในการบริการลดลงอย่างร้ายแรง ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นถึงประเด็นหนึ่งที่สำคัญต่อการแก้ไขปัญหา คือ ประเด็นความสมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงภายในเครือข่ายแกนหลัก ซึ่งสามารถช่วยกระจายทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงที่มีปริมาณทราฟฟิกสูงมาก ถ้ามีการกระจายทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงแล้วก็จะทำให้มีการสูญเสียที่ลดลงเมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดหรือล้นเหลือ ซึ่งการจัดสรรทราฟฟิกในเครือข่ายให้มีความสมดุลนี้ได้สร้างความน่าเชื่อถือและคุณภาพในการบริการให้เพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยในบทนี้ไม่เพียงแต่พิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก แต่ยังให้ความสนใจกับประเด็นความสมดุลของเครือข่ายในด้านวิศวกรรม ทราฟฟิกสำหรับเครือข่ายหลักของ IP over WDM โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับการขนส่งไอพีทราฟฟิกผ่านเครือข่าย IP over WDM ด้วยรูปแบบการแก้ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming : ILP) ซึ่งผลลัพธ์ที่น่าสนใจของงานวิจัยในบทนี้คือการนำเสนอแบบจำลองที่สามารถจัดการสามประเด็นที่สำคัญ ได้แก่ ประเด็นที่หนึ่งเป็นการสร้างความมั่นใจในการเชื่อมต่อจากชั้น IP (โครงข่ายเสมือน) ประเด็นที่สองเป็นการสร้างความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกภายในเครือข่าย WDM และประเด็นที่สามเป็นการสร้างความมั่นใจ

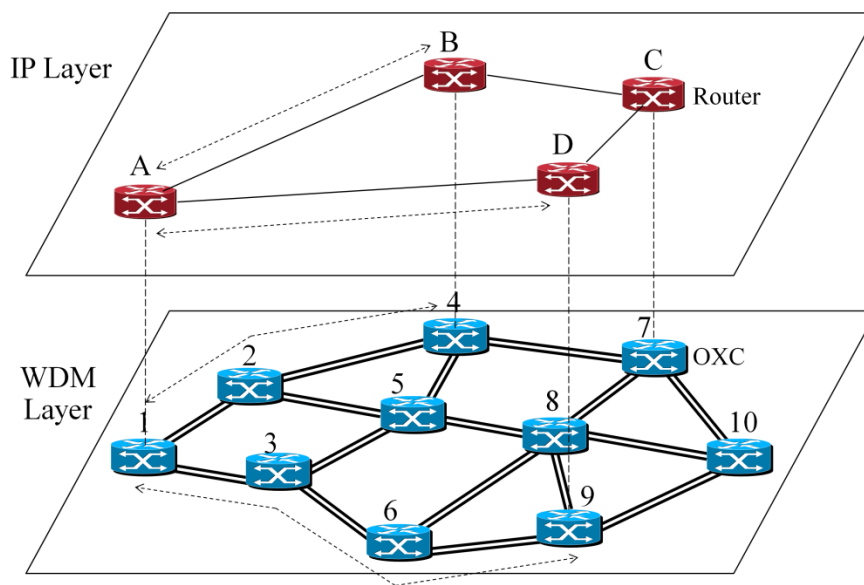
สำหรับความจุของเครือข่ายเพื่อที่จะสามารถรองรับความต้องการของทราฟฟิกภายใต้สถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

4.2 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

วิศวกรรมทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM มีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการจัดการวางแผนไอพิตราฟฟิกที่มีขนาดใหญ่ที่มาจากหลายผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตที่ต้องการขนส่งข้อมูลผ่านโนดภายในเครือข่ายแกนหลักอย่างเครือข่ายใยแก้วนำแสง โดยเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกหรือการจัดสรรเส้นทางในงานนี้เรียกได้ว่าเป็นการออกแบบโครงข่ายเสมือน (logical topology design) ซึ่งการเชื่อมต่อทางโครงข่ายเสมือนในชั้น IP หมายถึงความต้องการของไอพิตราฟฟิกระหว่างคู่โนดต้นทางและปลายทาง ในขณะที่เส้นทางการเชื่อมต่อทางกายภาพในชั้น WDM เป็นข่ายเชื่อมโยงเส้นใยแก้วนำแสง (Optical link) ที่เชื่อมต่อกันด้วยโนดทางแสง

รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของเครือข่ายสองชั้น IP over WDM ซึ่ง โนดของชั้น IP คือ อุปกรณ์จัดเส้นทางหรือเราเตอร์ของเครือข่ายแกนหลัก (Core routers) ในขณะที่โนดของชั้น WDM คือ อุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (Optical Cross-Connects : OXCs) และในรูปที่ 4.1 ยังแสดงให้เห็นตัวอย่างของการทำแผนที่การเชื่อมโยงทางโครงข่ายเสมือนของชั้น IP เข้าสู่การเชื่อมโยงทางกายภาพของชั้น WDM เช่น การเชื่อมโยงทางโครงข่ายเสมือนระหว่างคู่โนด (A, B) ของชั้น IP ได้มีการกำหนดเส้นทางผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพระหว่างคู่โนด (1, 2) และ (2, 4) ของชั้น WDM และการเชื่อมโยงทางโครงข่ายเสมือนระหว่างคู่โนด (A, D) ของชั้น IP ได้มีการกำหนดเส้นทางผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพระหว่างคู่โนด (1, 3), (3, 6) และ (6, 9) ของชั้น WDM

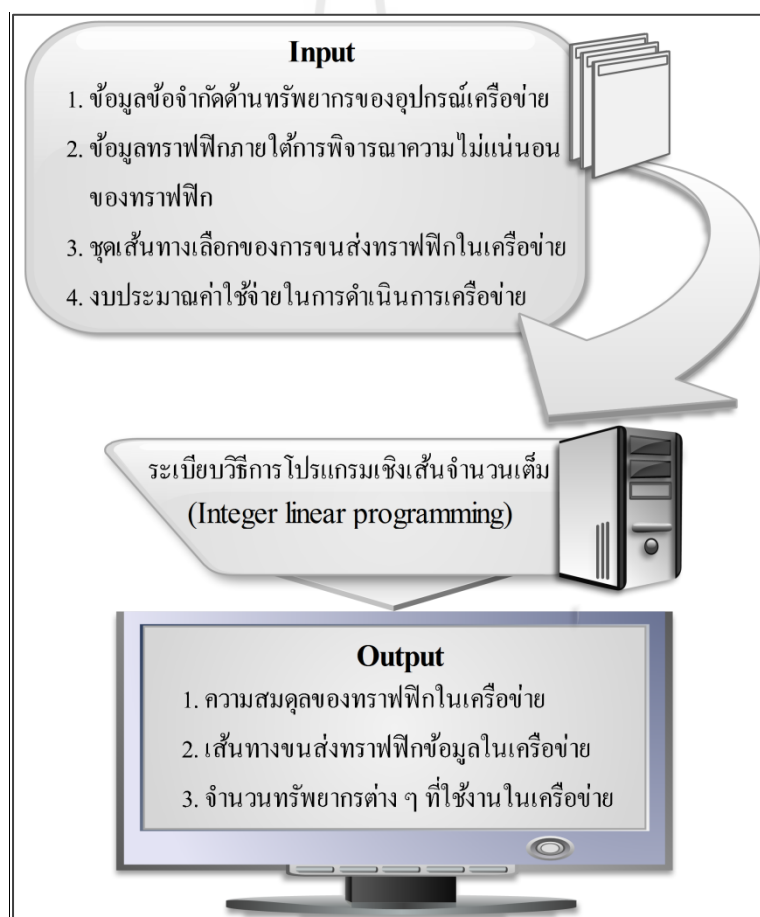
ในบทนี้ได้มุ่งเน้นถึงปัญหาในการออกแบบโครงข่ายเสมือนที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อความสมดุลสำหรับทราฟฟิกที่มีความต้องการขนส่งในเครือข่ายจากชั้น IP เข้าสู่ข่ายเชื่อมโยงนำแสงของชั้น WDM โดยเฉพาะลักษณะของทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนอย่างไอพิตราฟฟิก ได้มีการนำมาพิจารณาเพื่อให้การจัดเตรียมความจุ (capacity) ของชั้น WDM สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของไอพิตราฟฟิกนั้นได้



รูปที่ 4.1 แบบจำลองเครือข่าย

สำหรับเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการกำหนดปัญหาเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming : ILP) เป็นเทคนิคที่รู้จักอย่างแพร่หลายและเป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยดำเนินการ (operation research) ซึ่งได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการวางแผนออกแบบเพื่อจัดสรรบิจัย หรือ ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้บรรลุเป้าหมายที่กำหนดไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มนี้ประกอบไปด้วยสองส่วนสำคัญคือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) และสมการเงื่อนไข (constraint) ในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายคือ ต้องการให้มีความสมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM ที่มากที่สุด การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มนี้มีเงื่อนไขที่ประกอบไปด้วยเงื่อนไขข้อกำหนดการจัดสรรเส้นทางของทราฟฟิกข้อมูล ซึ่งมีชุดเส้นทางเลือกสำหรับทราฟฟิกข้อมูล และยังมีเงื่อนไขด้านทรัพยากรต่าง ๆ ของอุปกรณ์เครือข่าย ซึ่งเป็นข้อจำกัดของจำนวนทรัพยากรที่สามารถเลือกใช้งานได้สำหรับการขนส่งทราฟฟิกข้อมูลในเครือข่าย เมื่อกำหนดปัญหาเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเรียบร้อยแล้วจึงนำปัญหาเหล่านี้เข้าสู่กระบวนการหาคำตอบของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม โดยในกระบวนการหาคำตอบนั้นได้มีการเลือกเส้นทางจากชุดเส้นทางเลือกสำหรับทราฟฟิกข้อมูลที่ทำให้ได้คำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด ซึ่งการโปรแกรมเชิงเส้นนั้นเริ่มมีการคิดค้นโดย จอร์จ บี แคนซิก (George B Danzig) และ มาร์แชล วูด (Marshall Wood) โดยทำการพัฒนาปัญหาให้กลายเป็นความสัมพันธ์ของสมการคณิตศาสตร์ที่มี

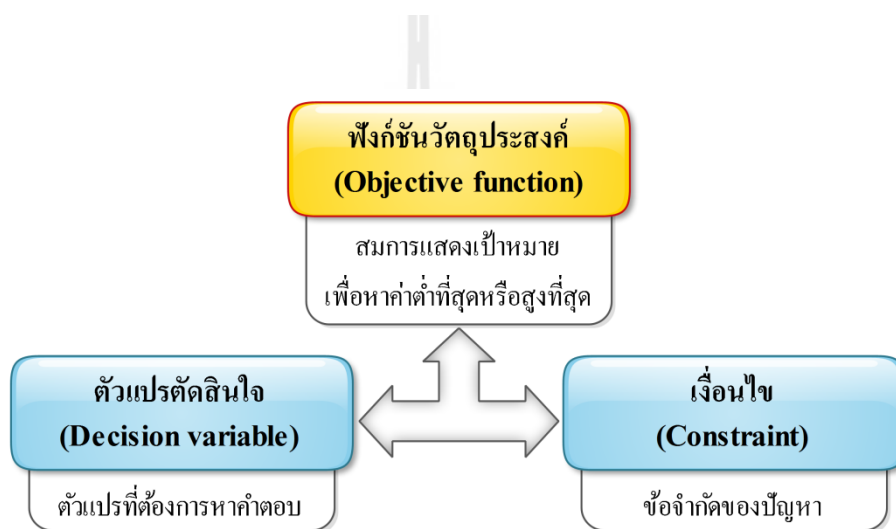
ลักษณะเชิงเส้นตรง จึงทำให้เกิดวิธีที่เรียกว่า ซิมเพล็กซ์ (simplex) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพและได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยมีหลักการของการหาคำตอบด้วยการทำงานแบบซ้ำ ๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งคำตอบที่ได้รับจากการวางแผนกราฟฟิกเพื่อให้มีความสมดุลของกราฟฟิกในเครือข่ายที่มากที่สุดภายใต้การพิจารณากราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน คือ ความสมดุลของกราฟฟิกในเครือข่าย และยังได้รับคำตอบของเส้นทางที่ใช้สำหรับการขนส่งกราฟฟิก รวมถึงจำนวนของทรัพยากรต่าง ๆ ที่มีการใช้งานเพื่อการขนส่งกราฟฟิกนั้น โดยการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่กล่าวมานี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 เมื่อกำหนดปัญหาเหล่านี้ให้อยู่ในรูปแบบของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเรียบร้อยแล้ว จากนั้นก็ได้ทำการแปลงปัญหาเหล่านี้ให้กลายเป็นสมการคณิตศาสตร์ ดังที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น

4.3 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์

การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีความสมดุลของทราฟฟิกมากที่สุดภายใต้ทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน ได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ภายใต้วิธีการกำหนดปัญหาแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งประกอบไปด้วยสามส่วนที่สำคัญคือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์, สมการเงื่อนไข และตัวแปรตัดสินใจ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ สมการแสดงเป้าหมายเพื่อใช้ในการหาค่าที่ต่ำที่สุดหรือสูงที่สุด ส่วนสมการเงื่อนไข คือ สมการที่แสดงถึงข้อกำหนดหรือข้อจำกัดของปัญหานั้น ๆ และตัวแปรตัดสินใจ คือ ตัวแปรที่ต้องการหาคำตอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ



รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

การแก้ปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มในงานวิจัยนี้กำหนดด้วยสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการออกแบบโครงข่ายเสมือน งานวิจัยในบทนี้มีเป้าหมาย คือ ต้องการให้มีความสมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM ที่มากที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของไอพีทราฟฟิกที่ขนส่งเข้าสู่ข่ายเชื่อมโยงทางแสงของชั้น WDM ให้มีค่าน้อยที่สุด (*Minimizing mean Absolute Deviation*) ซึ่งการใช้ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์นี้แสดงถึงฟังก์ชันที่มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM ที่น้อยที่สุดแสดงดังสมการที่ (4.1) ซึ่งค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการจัดสรรเส้นทางสำหรับทราฟฟิก ซึ่งแน่นอนว่าในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่ต้องการให้มีความสมดุลของทราฟฟิก

ในเครือข่ายที่มากที่สุด หรือจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผู้วิจัยเลือกใช้สามารถกล่าวได้ว่างานวิจัยนี้ต้องการค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายที่น้อยที่สุด ดังนั้นในการจัดสรรเส้นทางที่เหมาะสมนี้นำมาซึ่งความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายที่มากที่สุด ในงานวิจัยนี้เรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลอง *MAD* ซึ่งย่อมาจาก Minimizing mean Absolute Deviation

ปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นข้อกำหนดอื่น ๆ เช่นลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิก, การจำกัดงบประมาณค่าใช้จ่ายบนเครือข่าย และคุณสมบัติของโมดูลทางแสงได้แสดงอยู่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการเงื่อนไขที่ (4.2) - (4.10) อย่างเช่น เงื่อนไขข้อจำกัดของงบประมาณค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานบนเครือข่าย และเงื่อนไขการเลือกเส้นทางของทราฟฟิกข้อมูล โดยให้แต่ละทราฟฟิกข้อมูลสามารถเลือกได้เพียงหนึ่งเส้นทางเท่านั้น และในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าของวัตถุประสงค์ที่ต้องการนั้น ยังต้องมีเงื่อนไขที่ประกอบไปด้วยคุณสมบัติหรือข้อจำกัดของทรัพยากรต่าง ๆ ของอุปกรณ์เครือข่าย ได้แก่ เงื่อนไขการเลือกใช้งานโมดูลทางแสงและเงื่อนไขข้อจำกัดการเลือกใช้งานโมดูลทางแสงที่ไม่เกินแบนด์วิดท์ของข่ายเชื่อมโยง เป็นต้น

การแปลงวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขให้เป็นสมการคณิตศาสตร์นี้ทำให้ได้รับการวางแผนทราฟฟิกได้อย่างเหมาะสมที่สุดเพื่อความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่าย โดยในการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์นี้ได้มีการใช้ตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งมีคำนิยามดังต่อไปนี้

เซตของตัวแปร :

A คือ เซตของข่ายเชื่อมโยงในชั้น WDM สำหรับเครือข่าย IP over WDM

D คือ เซตของไอพีทราฟฟิก

P^k คือ เซตของชุดเส้นทางสำหรับทราฟฟิก k โดยที่ $\forall k \in D$

ตัวแปรตัดสินใจ :

y_j คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม เป็นตัวแปรที่ระบุจำนวนของโมดูลทางแสง (optical modules) ที่เลือกให้ใช้งานสำหรับทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง j โดยที่ $\forall j \in A$

z_j คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไบนารี $\{0, 1\}$ เป็นตัวแปรที่ระบุการเลือกใช้งานข่ายเชื่อมโยง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีการเลือกใช้งานข่ายเชื่อมโยง j และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเลือกใช้งานข่ายเชื่อมโยง j โดยที่ $\forall j \in A$

$f^{k,p}$ คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไบนารี $\{0, 1\}$ เป็นตัวแปรที่ระบุการเลือกเส้นทางสำหรับทราฟฟิก k ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อทราฟฟิก k เลือกใช้เส้นทาง p จากเซตของชุด

เส้นทางที่กำหนดไว้ล่วงหน้า และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่ได้เลือกใช้งานเส้นทางนั้น โดยที่ $\forall p \in P^k$ และ $\forall k \in D$

r_j คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม เป็นตัวแปรที่ระบุความจุที่ใช้งานสำหรับการขนส่งกราฟิกบนข่ายเชื่อมโยง j ที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรตัดสินใจการเลือกใช้งานเส้นทางสำหรับกราฟิก (k,p) โดยที่ $\forall j \in A$

พารามิเตอร์ค่าคงที่ :

M คือ ความจุของโมดูลทางแสง

B_j คือ ความจุบนข่ายเชื่อมโยง j โดยที่ $\forall j \in A$

C_j คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของโมดูลทางแสงที่มีการใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง j โดยที่ $\forall j \in A$

F_j คือ ต้นทุนคงที่ (fixed cost) สำหรับการใช้งานข่ายเชื่อมโยง j โดยที่ $\forall j \in A$

C_L คือ งบประมาณค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเครือข่าย

x_k คือ ความจุที่จัดเตรียมสำหรับรองรับกราฟิก k โดยที่ $\forall k \in D$ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดของพารามิเตอร์ x_k เพิ่มเติมได้ในหัวข้อที่ 2.8

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

n คือ จำนวนของข่ายเชื่อมโยงในเซต A

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีตัวแปรตัดสินใจที่ประกอบไปด้วยตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจที่ระบุจำนวนของโมดูลทางแสงที่เลือกให้ใช้งานสำหรับกราฟิกที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง j และตัวแปรที่ระบุความจุที่ใช้งานสำหรับการขนส่งกราฟิกบนข่ายเชื่อมโยง j นอกจากนี้ยังมีตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไบนารี นั่นคือ ตัวแปรตัดสินใจที่มีค่าได้เพียงสองค่าคือ 0 หรือ 1 เท่านั้น ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจที่ระบุการเลือกใช้งานข่ายเชื่อมโยง และตัวแปรตัดสินใจที่ระบุการเลือกเส้นทางสำหรับกราฟิก k ซึ่งตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไบนารีก็ถือเป็นตัวแปรตัดสินใจที่จัดอยู่ในส่วนหนึ่งของตัวแปรตัดสินใจจำนวนเต็ม ดังนั้นในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาของงานวิจัยนี้จึงกำหนดปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่มีส่วนประกอบคือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข สามารถแสดงได้ดังนี้

4.3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เนื่องจากงานวิจัยในบทนี้มีวัตถุประสงค์ คือ ต้องการความสมดุลที่มากที่สุด สำหรับกราฟฟิกระหว่างส่งในเครือข่าย ผู้วิจัยจึงใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์การให้ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบน สัมบูรณ์ของไอพ็กราฟฟิกระหว่างส่งเข้าสู่การเชื่อมโยงนำแสงของชั้น WDM ให้มีค่าน้อยที่สุด สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\min_{\forall p} \frac{1}{n} \sum_{j \in A} \left| r_j - \frac{\sum_{j \in A} r_j}{n} \right| \quad (4.1)$$

โดยที่

$$r_j = \sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} f^{k,p} x_k \quad \forall j \in A \quad (4.2)$$

สมการที่ (4.2) ใช้ในการคำนวณความจุที่รองรับปริมาณกราฟฟิกระหว่างส่งผ่านบน ข่ายเชื่อมโยง โดยเป็นการคำนวณปริมาณรวมของความจุที่รองรับไอพ็กราฟฟิกระหว่างส่งที่มีความต้องการ ขนส่งบนสายเชื่อมโยง j

4.3.2 สมการเงื่อนไข

สมการเงื่อนไขของงานวิจัยในบทนี้ประกอบด้วยสมการเงื่อนไขข้อจำกัดด้าน งบประมาณค่าใช้จ่าย สมการเงื่อนไขข้อจำกัดของทรัพยากรในด้านต่าง ๆ และสมการเงื่อนไขการ เลือกใช้เส้นทาง ซึ่งสมการเหล่านี้เป็นเงื่อนไขข้อจำกัดของปัญหาในการวิจัย ที่จะทำให้ได้มาซึ่ง วัตถุประสงค์ที่ต้องการ ประกอบด้วย 9 สมการ โดยสามารถแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เงื่อนไขงบประมาณค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานบนเครือข่าย

1. การระบุข้อจำกัดของงบประมาณค่าใช้จ่ายบนเครือข่าย ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าใช้จ่ายของการใช้ความจุของเครือข่ายซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ครอบคลุมถึงโมดูลทางแสงและค่าใช้จ่าย ในการติดตั้งการใช้งานข่ายเชื่อมโยงสำหรับการขนส่งข้อมูลในเครือข่าย

$$\sum_{j \in A} (C_j y_j + F_j z_j) \leq C_L \quad (4.3)$$

กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย

2. เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนของโมดูลทางแสงนั้น มีเพียงพอในการให้บริการบนข่ายเชื่อมโยง j ดังนั้นข่ายเชื่อมโยง j สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของทุกความต้องการของไอพีทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง j ซึ่งรูปแบบที่หลากหลายของความต้องการของไอพีทราฟฟิกแสดงอยู่ในรูปแบบของพารามิเตอร์ x_k

$$\sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} f^{k,p} x_k \leq My_j \quad \forall j \in A \quad (4.4)$$

สำหรับพารามิเตอร์ x_k นั้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.3) ในหัวข้อที่ 2.8 ดังที่ Liu, B. (2009) กล่าวไว้ว่าให้พิจารณาดังรูปแบบเงื่อนไขข้อจำกัดแบบมีโอกาส (Chance constraint) เพื่อให้แน่ใจว่าการจัดสรรความจุหรือแบนด์วิดท์บนข่ายเชื่อมโยงนั้นมีมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่ไม่แน่นอน

3. เพื่อให้แน่ใจว่าการเลือกใช้งานจำนวนโมดูลทางแสงนั้น มีการใช้ความจุไม่เกินขอบเขตของความจุ (B_j) บนข่ายเชื่อมโยง j เงื่อนไขนี้จึงเป็นการจำกัดของจำนวนโมดูลทางแสงที่สามารถใช้ได้บนข่ายเชื่อมโยง j

$$My_j \leq B_j \quad \forall j \in A \quad (4.5)$$

4. สำหรับการเลือกใช้งานโมดูลทางแสงนั้น เพื่อให้แน่ใจว่าโมดูลทางแสงไม่ได้มีการตั้งค่าให้ใช้งาน เมื่อไม่มีการขนส่งทราฟฟิกผ่านทางข่ายเชื่อมโยง j เงื่อนไขนี้จึงระบุว่าหากไม่มีทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง j แล้วโมดูลทางแสงนั้นต้องไม่มีการตั้งค่าให้ใช้งาน หรือกล่าวได้ว่าเป็นการบังคับให้ $y_j = 0$ เมื่อไม่มีทราฟฟิกไหลผ่านข่ายเชื่อมโยง j

$$y_j \leq r_j \quad \forall j \in A \quad (4.6)$$

5. ความจุที่ใช้รองรับปริมาณทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง j คือ ค่าที่ได้มาจากการคำนวณในสมการที่ (4.11) ซึ่งความจุที่ใช้รองรับปริมาณทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยง j ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของปริมาณทราฟฟิกที่มีอยู่บนข่ายเชื่อมโยง j กล่าวคือ r_j เป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

$$r_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (4.7)$$

6. จำนวนโมดูลทางแสงที่ใช้งานบนขั้วเชื่อมโยง j มีการตั้งค่าการใช้งานเมื่อมีกราฟฟิกขนส่งผ่านบนขั้วเชื่อมโยง j ดังนั้นจำนวนโมดูลทางแสงที่ใช้งานบนขั้วเชื่อมโยง j ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของจำนวนโมดูลทางแสงที่มีการตั้งค่าอยู่บนขั้วเชื่อมโยง j กล่าวคือ y_j เป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

$$y_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (4.8)$$

กลุ่มที่ 3 เงื่อนไขในการเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย

7. สำหรับการเลือกเส้นทางในเครือข่าย เพื่อไม่ให้มีการเลือกเส้นทางที่ซ้ำซ้อน เงื่อนไขนี้จึงระบุว่ากราฟฟิก k ให้สามารถเลือกได้เพียงหนึ่งเส้นทางจากเส้นทางที่มีการกำหนดไว้ในชุดเส้นทางเลือก P^k

$$\sum_{p \in P^k} f^{k,p} = 1 \quad \forall k \in D \quad (4.9)$$

8. เงื่อนไขนี้แสดงการใช้จ่ายเชื่อมโยงบนเครือข่าย โดยกำหนดให้จ่ายเชื่อมโยง z_j นั้นต้องมีการตั้งค่าให้ใช้งาน เมื่อกราฟฟิก k มีการเลือกใช้เส้นทาง p ในการขนส่งกราฟฟิก แล้วเส้นทาง p นั้นมีการใช้งานจ่ายเชื่อมโยง j

$$\delta_j^{k,p} f^{k,p} \leq z_j \quad \forall j \in A, \forall k \in D, \forall p \in P^k \quad (4.10)$$

9. สำหรับการใช้งานจ่ายเชื่อมโยง เพื่อให้แน่ใจว่าจ่ายเชื่อมโยง z_j ไม่ได้มีการตั้งค่าให้ใช้งาน เมื่อไม่มีการขนส่งกราฟฟิกผ่านทางจ่ายเชื่อมโยง j เงื่อนไขนี้จึงระบุว่าหากไม่มีกราฟฟิกขนส่งผ่านบนขั้วเชื่อมโยง j แล้วจ่ายเชื่อมโยง z_j ต้องไม่มีการตั้งค่าให้ใช้งาน กล่าวคือเป็นการบังคับให้ $z_j = 0$ เมื่อไม่มีกราฟฟิกไหลผ่านจ่ายเชื่อมโยง j

$$z_j \leq r_j \quad \forall j \in A \quad (4.11)$$

4.4 การวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม

การวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม (Complexity of Algorithm) นั้นมีเป้าหมายเพื่อหาประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ซึ่งคือการประมาณค่าทรัพยากรที่จำเป็นต้องใช้ในการทำงาน เช่น เวลา หรือ หน่วยความจำ อัลกอริทึมส่วนใหญ่มีการออกแบบมาเพื่อให้สามารถรองรับจำนวนอินพุตได้ไม่จำกัด โดยทั่วไปการวิเคราะห์ประสิทธิภาพหรือความซับซ้อนของอัลกอริทึมสามารถพิจารณาได้จาก 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การวิเคราะห์เวลาที่ต้องใช้ในการประมวลผล (Time Complexity) และการวิเคราะห์หน่วยความจำที่ต้องใช้ในการประมวลผล (Space Complexity) โดยทั้งสองสิ่งนี้มักถูกใช้เป็นตัวตัดสินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมว่ามีประสิทธิภาพมากหรือน้อยเพียงใด ดังนั้นถ้าจำเป็นจะต้องดำเนินการแก้ไขปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ก็จำเป็นต้องพิจารณาก่อนว่าจะสามารถดำเนินการแก้ไขกับส่วนใดได้บ้าง และส่งผลกระทบต่ออื่นหรือไม่ อย่างไร

สำหรับในงานวิจัยนี้มีรูปแบบอัลกอริทึมเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มจึงทำให้สามารถวัดความซับซ้อนของอัลกอริทึมได้จากพื้นที่หน่วยความจำที่ใช้ในการประมวลผล (Space Complexity) โดยสามารถทำการวัดได้จากจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables) พื้นที่การค้นหา (Search space) และจำนวนเงื่อนไข (Constraints)

การวิเคราะห์หน่วยความจำที่ต้องใช้ในการประมวลผลของอัลกอริทึมเป็นการวิเคราะห์ว่าต้องใช้หน่วยความจำทั้งหมดเท่าไรในการประมวลผลอัลกอริทึมนั้น สาเหตุที่ต้องทราบจำนวนของหน่วยความจำที่ต้องใช้นั้นมีเหตุผลดังนี้

1. ทำให้เราทราบว่าอัลกอริทึมนั้นสามารถรองรับจำนวนข้อมูลที่ส่งเข้ามาประมวลผล (Input Data) ได้มากที่สุดเท่าใด เพื่อให้อัลกอริทึมนั้นยังสามารถประมวลผลได้
2. กรณีที่ต้องประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานร่วมกันหลายคนในเครือข่าย จำเป็นที่ต้องทราบขนาดของหน่วยความจำที่จะต้องใช้ในการประมวลผลอัลกอริทึม เพื่อไม่ให้กระทบกับการทำงานของคนอื่น
3. เพื่อเลือกคุณลักษณะของคอมพิวเตอร์ที่จะใช้ติดตั้งโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้อย่างเหมาะสม ถ้านำไปติดตั้งที่เครื่องที่มีหน่วยความจำไม่เพียงพอ โปรแกรมก็จะไม่สามารถทำงานได้

การวิเคราะห์หน่วยความจำที่ต้องใช้ในการประมวลผลของอัลกอริทึม หรือขนาดของปัญหา (Problem size) แสดงดังต่อไปนี้

4.4.1 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables)

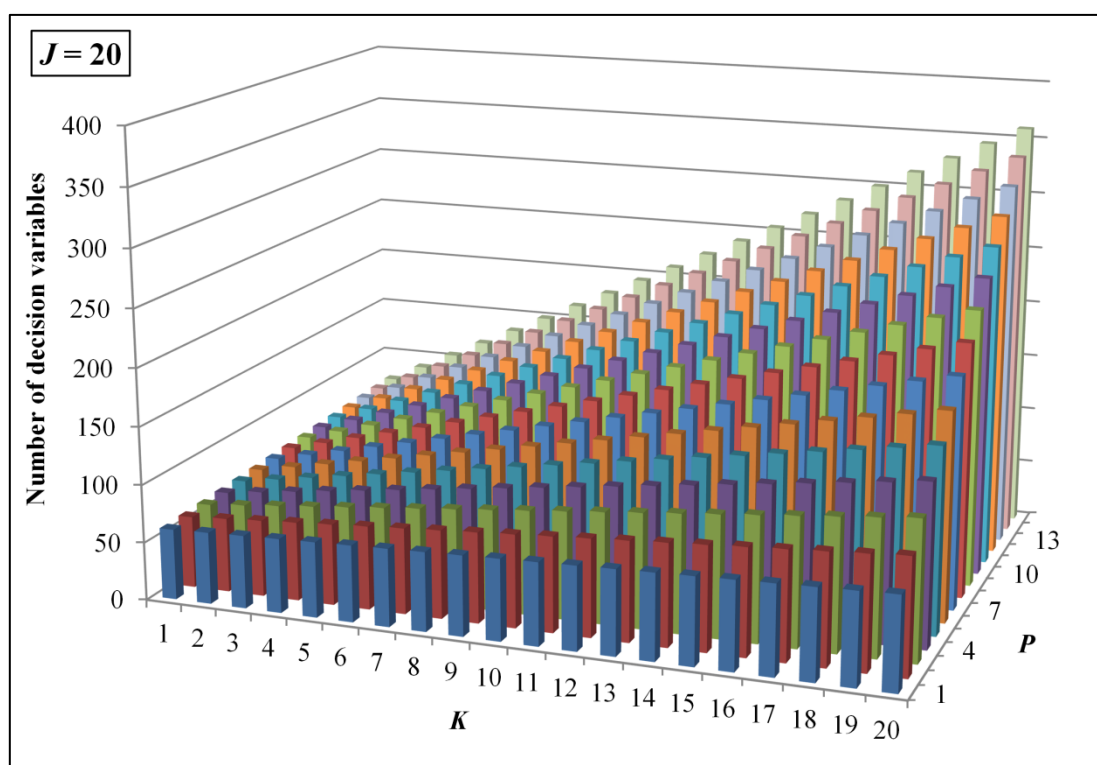
การวิเคราะห์จำนวนตัวแปรการตัดสินใจสำหรับขั้นตอนวิธีนี้ (Algorithm) ประกอบไปด้วย 3 ตัวแปรการตัดสินใจ คือ $y, z, f^{k,p}$ ซึ่งแต่ละตัวแปรการตัดสินใจนั้นมีจำนวนดังต่อไปนี้

$$\begin{array}{ll}
 y_j & = y_1, y_2, y_3, \dots, y_J & \text{ดังนั้น มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ } y \text{ เท่ากับ } |J| \text{ ตัว} \\
 z_j & = z_1, z_2, z_3, \dots, z_J & \text{ดังนั้น มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ } z \text{ เท่ากับ } |J| \text{ ตัว} \\
 f^{k,p} & = f^{1,1}, f^{1,2}, f^{1,3}, \dots, f^{k,p} & \text{ดังนั้น มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ } f \text{ เท่ากับ } |K||P| \text{ ตัว} \\
 r_j & = r_1, r_2, r_3, \dots, r_J & \text{ดังนั้น มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ } r \text{ เท่ากับ } |J| \text{ ตัว}
 \end{array}$$

ดังนั้น จำนวนตัวแปรการตัดสินใจทั้งหมดสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนตัวแปรการตัดสินใจทั้งหมด} &= |J| + |J| + |K||P| + |J| \\
 &= 3|J| + |K||P|
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

จากสมการที่ (4.12) แสดงให้เห็นว่าเป็นสมการคำนวณจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่มีรูปแบบสมการเป็นแบบพหุนาม (Polynomial) ซึ่งตัวอย่างจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.12) แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งได้มีการปรับขนาดของตัวแปร ๆ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ และจำนวนตัวแปรการตัดสินใจยังแสดงดังรูปที่ 4.4 เป็นการเปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามจำนวนอินพุตที่เพิ่มขึ้นแน่นอนว่าลักษณะเช่นนี้แสดงถึงการเพิ่มขึ้นตามรูปแบบของสมการพหุนาม



รูปที่ 4.4 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เมื่อ $J = 20$

4.4.2 พื้นที่การค้นหา (Search space)

Search space คือ ชุดของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดสำหรับอัลกอริทึมหรือปัญหานั้น ซึ่งอัลกอริทึมนี้สามารถหา Search space ได้จากคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของตัวแปรการตัดสินใจ ซึ่งคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของแต่ละตัวแปรการตัดสินใจแสดงดังตารางที่ 4.1 และมีแนวคิดดังต่อไปนี้

สำหรับตัวแปร y มีคำตอบที่เป็นไปได้คือจำนวนเต็มบวก โดยกำหนดให้เท่ากับค่าคงที่ Y และตัวแปรการตัดสินใจ y_j มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ $|J|$ ตัว ดังนั้นตัวแปรการตัดสินใจ y_j มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ $Y^{|J|}$

สำหรับตัวแปร z มีคำตอบที่เป็นไปได้คือ 0 และ 1 และตัวแปรการตัดสินใจ z_j มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ $|J|$ ตัว ดังนั้น ตัวแปรการตัดสินใจ z_j มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ $2^{|J|}$

สำหรับตัวแปร f มีคำตอบที่เป็นไปได้คือ 0 และ 1 และตัวแปรการตัดสินใจ $f^{k,p}$ มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ $|K||P|$ ตัว ดังนั้น ตัวแปรการตัดสินใจ $f^{k,p}$ มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ $2^{K \cdot P}$

สำหรับตัวแปร r มีคำตอบที่เป็นไปได้คือจำนวนเต็มบวก โดยกำหนดให้เท่ากับค่าคงที่ R และตัวแปรการตัดสินใจ r_j มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ $|J|$ ดังนั้นตัวแปรการตัดสินใจ r_j มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ $R^{|J|}$

ตารางที่ 4.1 สรุปคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปรการตัดสินใจ

ตัวแปรการตัดสินใจ	คำตอบที่เป็นไปได้
y_j	$Y^{ J }$
z_j	$2^{ J }$
$f^{k,p}$	$2^{K \cdot P}$
r_j	$R^{ J }$

จากคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปร เมื่อนำคำตอบเหล่านี้มาหาชุดคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหาสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Search space} &= Y^{|J|} \cdot 2^{|J|} \cdot 2^{K \cdot P} \cdot R^{|J|} \\ &= (Y \cdot R)^{|J|} \cdot 2^{(|J| \cdot K \cdot P)} \end{aligned} \quad (4.13)$$

นอกจากนี้เรายังสามารถสรุปตัวแปรลงสำหรับสมการคำนวณ *Search space* ที่แสดงในสมการที่ (4.13) โดยสามารถทำได้ดังต่อไปนี้ เมื่อพิจารณาจากเซตของตัวแปร

A คือ เซตของข่ายเชื่อมโยง (link) ในชั้น WDM สำหรับเครือข่าย IP over WDM ซึ่งมีจำนวนทั้งหมดเท่ากับ j ข่ายเชื่อมโยง ดังนั้นมีขนาดข้อมูลเท่ากับ $|J|$

D คือ เซตของไอพีทราฟฟิก เป็นทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งในเครือข่าย (traffic demand) ซึ่งมีจำนวนทั้งหมดเท่ากับ k ทราฟฟิก ดังนั้นมีขนาดข้อมูลเท่ากับ $|K|$

P^k คือ เซตของชุดเส้นทางสำหรับทราฟฟิก k โดยที่ $\forall k \in D$ เป็นเส้นทางที่ใช้สำหรับการขนส่งทราฟฟิก k ที่มีจำนวนทางเลือกเท่ากับ p เส้นทาง ดังนั้นมีขนาดข้อมูลเท่ากับ $|K| \cdot |P|$

เมื่อกำหนดให้ชุดของโนดคือ $N = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ ซึ่งมีจำนวนโนดเท่ากับ $|M|$ เพื่อทำการสรุปตัวแปรลง ดังนั้นสามารถเขียน $|J|$ และ $|K|$ ในรูปแบบของตัวแปร M ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Links มีขนาดเท่ากับ } |J| = \frac{M(M-1)}{2} = \frac{M^2}{2} - \frac{M}{2} \quad (4.14)$$

$$\text{Traffic demands มีขนาดเท่ากับ } |K| = M(M-1) = M^2 - M \quad (4.15)$$

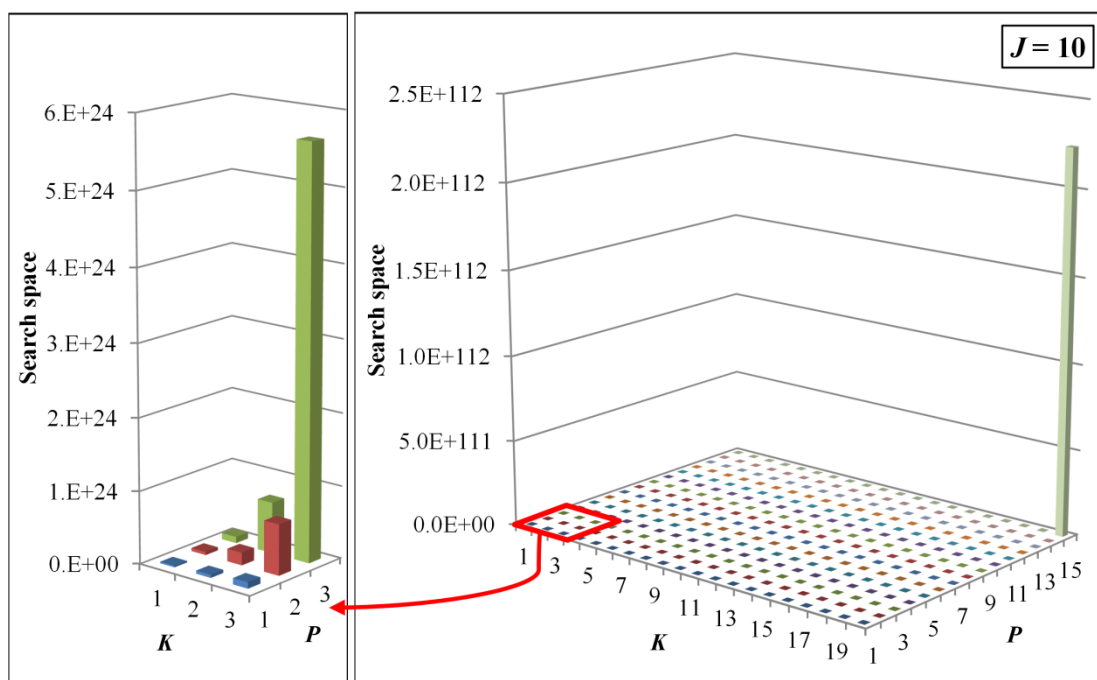
ดังนั้น คำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหาจากสมการที่ (4.13) เมื่อแทนสมการ (4.14) และ (4.15) ลงไป สามารถเขียนใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Search space} = (Y \cdot R)^{\left(\frac{M^2}{2} - \frac{M}{2}\right)} \cdot 2^{\left(\frac{M^2}{2} - \frac{M}{2}\right) + (M^2 - M) \cdot P} \quad (4.16)$$

เมื่อ ตัดพจน์ที่ส่งผลน้อยต่อสมการ Search space ออก ดังนั้นสามารถคำนวณหา Search space ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Search space} = (Y \cdot R)^{M^2} \cdot 2^{(M^2 + M^2 \cdot P)} \quad (4.17)$$

ตัวอย่างขนาดของ Search space จากสมการที่ (4.13) แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยสมมติให้ค่าคงที่ของจำนวนโมดูลทางแสงนั้น (Y) มีค่าเท่ากับ 8 และค่าคงที่ของปริมาณทราฟฟิก (R) มีค่าเท่ากับ 10 ในตารางที่ 4.3 นั้นได้มีการปรับขนาดของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของขนาด Search space ซึ่งมีรูปแบบของสมการแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) และขนาดของ Search space ยังแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 เมื่อกำหนดให้ J มีค่าเท่ากับ 10 ซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลว่าขนาด Search space สูงมาก ๆ เมื่ออินพุตมีค่ามากที่สุด ซึ่งแตกต่างจากขนาด Search space ของอินพุตอื่น ๆ ที่ต่ำมากจนแทบมองไม่เห็นความแตกต่างกันเลย ลักษณะแบบนี้แสดงให้เห็นถึงการก้าวกระโดดของขนาด Search space เมื่อมีจำนวนอินพุตเป็นไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการแบบเอกซ์โพเนนเชียลนั่นเอง



รูปที่ 4.5 ขนาดของพื้นที่การค้นหา

4.4.3 จำนวนเงื่อนไข (Constraints)

การวิเคราะห์จำนวนเงื่อนไขหรือจำนวนข้อจำกัดของปัญหานี้ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการเงื่อนไขของอัลกอริทึมนั้น ซึ่งงานวิจัยในบทนี้สามารถแสดงจำนวนเงื่อนไขได้ดังตารางที่ 4.2 อย่างเช่น สมการที่ (4.4) เป็นเงื่อนไขที่แสดงถึงว่า การเลือกใช้จำนวนโมดูลทางแสงของทุก j ต้องเป็นไปตามสมการเงื่อนไขที่กำหนด โดยที่ $j = 1, 2, 3, \dots, J$ ดังนั้นจึงทำให้สามารถนับจำนวนเงื่อนไขได้ว่ามีจำนวนเท่ากับ J เงื่อนไข

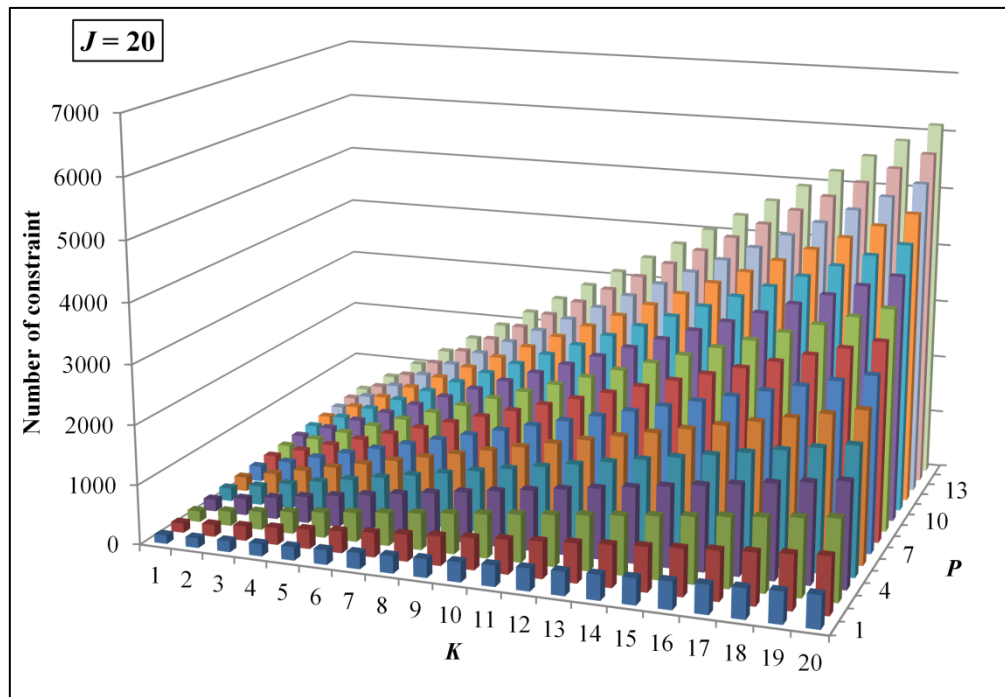
ตารางที่ 4.2 จำนวนเงื่อนไข

สมการเงื่อนไข	จำนวนเงื่อนไข (Constraints)
$\sum_{j \in A} (C_j y_j + F_j z_j) \leq C_L$ (4.3)	1
$\sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} f^{k,p} x_k \leq M y_j \quad \forall j \in A$ (4.4)	J
$M y_j \leq B_j \quad \forall j \in A$ (4.5)	J
$y_j \leq r_j \quad \forall j \in A$ (4.6)	J
$r_j \geq 0 \quad \forall j \in A$ (4.7)	J
$y_j \geq 0 \quad \forall j \in A$ (4.8)	J
$\sum_{p \in P^k} f^{k,p} = 1 \quad \forall k \in D$ (4.9)	K
$\delta_j^{k,p} f^{k,p} \leq z_j \quad \forall j \in A, \forall k \in D, \forall p \in P^k$ (4.10)	J·K·P
$z_j \leq r_j \quad \forall j \in A$ (4.11)	J

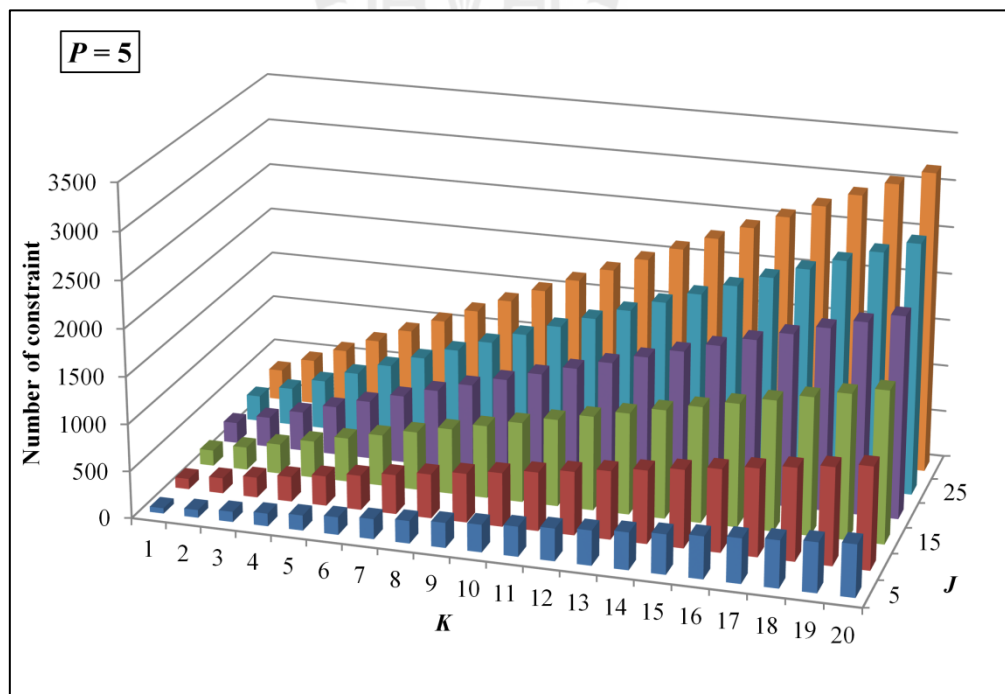
ดังนั้น จำนวนเงื่อนไขทั้งหมดจึงเท่ากับผลรวมของจำนวนเงื่อนไขของแต่ละสมการเงื่อนไข ซึ่งสมการคำนวณจำนวนเงื่อนไขสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนเงื่อนไข} &= 1 + J + J + J + J + J + J + K + J \cdot K \cdot P \\
 &= 6 \cdot J + K + J \cdot K \cdot P + 1
 \end{aligned}
 \tag{4.18}$$

สมการที่ (4.18) นี้แสดงให้เห็นว่าเป็นสมการคำนวณจำนวนเงื่อนไขที่มีรูปแบบสมการเป็นแบบพหุนาม (Polynomial) ซึ่งตัวอย่างของการคำนวณจำนวนเงื่อนไขจากสมการที่ (4.18) แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งได้มีการปรับขนาดของตัวแปรๆ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเงื่อนไข และแสดงดังรูปที่ 4.6 - 4.7 แสดงถึงจำนวนเงื่อนไข เมื่อ J เป็นค่าคงที่เท่ากับ 10 และ P เป็นค่าคงที่เท่ากับ 20 ตามลำดับ จากทั้งสองรูปแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเงื่อนไขที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามจำนวนอินพุตที่เพิ่มขึ้น แน่นอนว่าลักษณะเช่นนี้แสดงถึงการเพิ่มขึ้นตามรูปแบบของสมการพหุนามนั่นเอง



รูปที่ 4.6 จำนวนเงื่อนไข เมื่อ $J = 20$



รูปที่ 4.7 จำนวนเงื่อนไข เมื่อ $P = 5$

4.4.4 สรุปขนาดของปัญหา (Problem size)

ขนาดของปัญหา (Problem size) สำหรับอัลกอริทึมที่มีรูปแบบเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables) พื้นที่การค้นหา (Search space) และจำนวนเงื่อนไข (Constraints) ซึ่งสมการการคำนวณเพื่อหาจำนวนหรือขนาดของสิ่งเหล่านี้เป็นสมการที่มีองค์ประกอบของตัวแปร J , K และ P ดังนั้นขนาดของปัญหาจะมีการเปลี่ยนแปลงตามจำนวน J , K และ P ที่เปลี่ยนไป ซึ่งจำนวนตัวแปรการตัดสินใจและจำนวนเงื่อนไขมีการขนาดเพิ่มขึ้นในรูปแบบของสมการพหุนาม (Polynomial) ส่วนขนาดของ Search space มีขนาดเพิ่มขึ้นในรูปแบบของสมการเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) โดยสามารถเห็นความแตกต่างสำหรับขนาดของปัญหาได้ในตารางที่ 4.3 เมื่ออินพุตแต่ละตัวเปลี่ยนไป

ตารางที่ 4.3 ขนาดของปัญหา

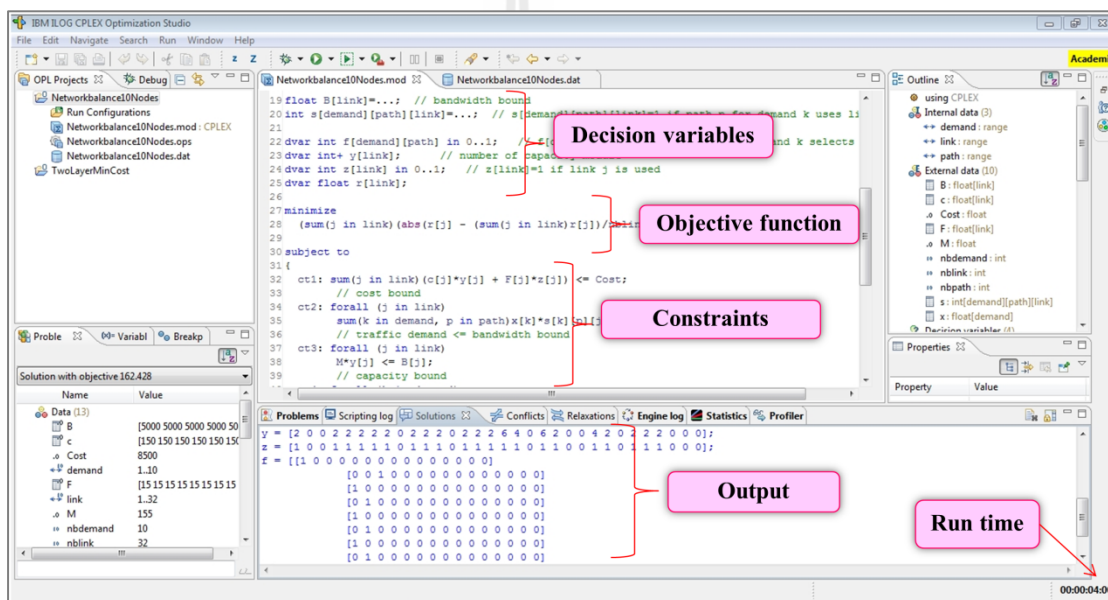
J	K	P	จำนวนตัวแปรตัดสินใจ	Size search space	จำนวนเงื่อนไข
5	5	3	30	3.44E+15	106
5	5	4	35	1.10E+17	131
5	5	5	40	3.52E+18	156
5	5	3	30	3.44E+15	106
5	6	3	33	2.75E+16	122
5	7	3	36	2.20E+17	138
5	8	3	39	1.76E+18	154
5	10	3	45	1.13E+20	186
5	15	3	60	3.69E+24	266
5	20	3	75	1.21E+29	346
10	5	3	45	3.60E+26	206
10	5	4	50	1.15E+28	256
10	5	5	55	3.69E+29	306
10	5	6	60	1.18E+31	356
10	5	7	65	3.78E+32	406
10	5	8	70	1.21E+34	456
10	5	9	75	3.87E+35	506

ตารางที่ 4.3 ขนาดของปัญหา (ต่อ)

<i>J</i>	<i>K</i>	<i>P</i>	จำนวนตัวแปรตัดสินใจ	Size search space	จำนวนเงื่อนไข
10	5	10	80	1.24E+37	556
10	5	8	70	1.21E+34	456
10	6	8	78	3.09E+36	537
10	7	8	86	7.92E+38	618
10	8	8	94	2.03E+41	699
10	9	8	102	5.19E+43	780
10	10	8	110	1.33E+46	861
10	15	8	150	1.46E+58	1266
10	20	8	190	1.61E+70	1671
5	10	8	95	1.27E+35	436
6	10	8	98	2.03E+37	521
7	10	8	101	3.25E+39	606
8	10	8	104	5.19E+41	691
9	10	8	107	8.31E+43	776
10	10	8	110	1.33E+46	861
15	10	8	125	1.39E+57	1286
20	10	8	140	1.46E+68	1711

4.5 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

ในการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาผลคำตอบที่ดีที่สุดนั้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถแปลงสมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นที่ได้ออกแบบไว้ให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรมได้อย่างง่าย มีประสิทธิภาพ และเป็นที่ยอมรับในงานวิจัยสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นอย่างแพร่หลาย โดยโปรแกรมนี้ใช้อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแก้ปัญหาของการโปรแกรมเชิงเส้นในการหาคำตอบที่ต้องการ หน้าต่างของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

คำสั่งของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ที่แสดงในตารางที่ 4.4 นั้นเป็นการแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรมเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบเครือข่ายโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM ดังแสดงในรูปที่ 4.8

โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio นี้ถือว่าเป็นเครื่องมือช่วยในการหาคำตอบที่สามารถใช้ได้ง่าย และสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในการหาคำตอบของงานวิจัยได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามผู้ใช้งานสามารถศึกษารายละเอียดเพื่อทำความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับหลักการ

และกระบวนการใช้งานโปรแกรมได้ในภาคผนวก ก. และในคู่มือสำหรับอ้างอิงจาก <http://www.ibm.com> โดยต้องศึกษาการแปลงสมการคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรม ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่สำคัญสามส่วน คือ ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข เพื่อให้สามารถใช้งานโปรแกรมในการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

ตารางที่ 4.4 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการ โปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบคำสั่งใน โปรแกรม

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

สมการคณิตศาสตร์	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	//Decision Variable
y_j	dvar int+ y[link];
z_j	dvar int z[link] in 0..1;
$f^{k,p}$	dvar int f[demand][path] in 0..1;
r_j	dvar int r[link];
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	//Objective function
สมการ(4.1)	Minimize (sum(j in link)(abs(r[j] - (sum(j in link)r[j])/nblink)))/nblink;
เงื่อนไข	subject to {
สมการ(4.2)	ct1 : sum(j in link)(c[j]*y[j] + F[j]*z[j]) <= CL;
สมการ(4.3)	ct2 : forall (j in link) sum(k in demand, p in path)x[k]*s[k][p][j]*f[k][p] <= M*y[j];
สมการ(4.4)	ct3 : forall (j in link) M*y[j] <= B[j];
สมการ(4.5)	ct4 : forall (j in link) y[j] <= r[j];
สมการ(4.6)	ct5 : forall (j in link) r[j] >= 0;
สมการ(4.7)	ct6 : forall (j in link) y[j] >= 0;
สมการ(4.8)	ct7 : forall (k in demand) sum(p in path)f[k][p]==1;
สมการ(4.9)	ct8 : forall (j in link) forall (k in demand) forall (p in path) s[k][p][j]*f[k][p]<=z[j];
สมการ(4.10)	ct9 : forall (j in link) z[j] <= r[j];

4.6 การทดลองออกแบบโครงข่ายเสมือน

ในส่วนนี้เป็นการนำเสนอวิธีการประเมินผลเกี่ยวกับประสิทธิภาพของแบบจำลอง MAD ที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 4.3 ในการดำเนินการได้ทดลองด้วยการใช้เครือข่าย IP over WDM ที่แสดงในรูปที่ 4.1 โดยมีส่วนประกอบคือ ในชั้น WDM ประกอบด้วย OXC จำนวน 10 โหนด และมีสายเชื่อมโยงทางกายภาพ 16 สายเชื่อมโยง การทดลองนี้ได้พิจารณาด้วยความต้องการในการเชื่อมต่อเพื่อขนส่งกราฟฟิกข้อมูลในเครือข่ายจำนวน 10 การเชื่อมโยงของโครงข่ายเสมือนในชั้น IP ซึ่งหมายถึงว่ามีไอพีกราฟฟิกจำนวน 10 กราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่าง 10 คู่โหนดต้นทาง-ปลายทาง ซึ่งไอพีกราฟฟิกทั้ง 10 คู่ นี้ได้เลือกมาโดยการสุ่ม

พารามิเตอร์ค่าคงที่ที่ใช้ในการทดลองในบทนี้แสดงดังตารางที่ 4.5 ได้แก่ ต้นทุนต่อหน่วยของโมดูลทางแสงและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเป็นราคาทั่วไปที่อยู่บนพื้นฐานของการกำหนดราคาของอุตสาหกรรมในประเทศไทย ซึ่งมีหน่วยเป็น cost unit (c.u.) ในการทดลองนี้ได้พิจารณากราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนที่มีลักษณะการกระจายแบบปกติ (normal distribution) การกระจายแบบเบต้า (beta distribution) และการกระจายแบบปัวซอง (poisson distribution) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งเป็นคุณลักษณะของกราฟฟิกที่มีการอธิบายไว้ในงานวิจัยของ Telkamp, T. (2002) และงานวิจัยในบทที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งกราฟฟิกของการกระจายแบบปกติมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 225 Mbps และ 25 Mbps ตามลำดับ เมื่อนำมาผ่านกระบวนการหาความจุเพื่อรองรับกราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนดังที่มีการพิจารณาหลักการในหัวข้อที่ 2.8 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.7 เป็นตัวอย่างของกระบวนการหาความจุเพื่อรองรับกราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนสำหรับกราฟฟิกที่มีคุณลักษณะการกระจายแบบปกติ และเพื่อความสะดวกในการดำเนินงานผู้ที่สนใจสามารถหาความจุเพื่อรองรับกราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนได้จากโปรแกรม EasyFit ซึ่งเป็นโปรแกรมเดียวกันกับที่ใช้วัดคุณลักษณะของกราฟฟิกในงานวิจัยบทที่ 3 โดยที่การหาความจุเพื่อรองรับกราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนสำหรับกราฟฟิกที่มีคุณลักษณะการกระจายแบบเบต้าและการกระจายแบบปัวซองในงานวิจัยนี้ก็ได้อามาจากการใช้โปรแกรม EasyFit เช่นกัน ในรูปที่ 4.9 แสดงความจุช่องสัญญาณที่ต้องใช้เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณกราฟฟิกสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิกที่ระดับต่าง ๆ และยังคงแสดงให้เห็นถึงความต้องการความจุช่องสัญญาณที่แตกต่างกันเมื่อมีคุณลักษณะของกราฟฟิกที่แตกต่างกัน ในการทดลองนี้ได้ดำเนินการทดลองรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิก 3 ระดับ ได้แก่ 90% 95% และ 99% โดยในงานวิจัยนี้มีพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความไม่แน่นอนของกราฟฟิกคือ x_k ซึ่งพารามิเตอร์ x_k คือ ขนาดความจุช่องสัญญาณที่ต้องใช้เพื่อให้สามารถรับประกันการรองรับปริมาณกราฟฟิก ซึ่งมีความไม่แน่นอนที่ระดับ 90% 95% และ 99% ซึ่งค่าของพารามิเตอร์ x_k ในแต่ละกรณีมีค่าดังต่อไปนี้ ในกรณีที่มีการแจกแจงแบบปกติค่า

ของ x_k ที่ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิก 90% 95% และ 99% คือ 257.04 266.12 และ 283.16 Mbps ตามลำดับ ในกรณีของการกระจายแบบเบต้าค่าของ x_k ที่ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิก 90% 95% และ 99% คือ 266.84 271.75 และ 280.01 Mbps ตามลำดับ และกรณีของการกระจายแบบปัวซองค่าของ x_k ที่ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิก 90% 95% และ 99% คือ 256.00 261.00 และ 273.00 Mbps ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ค่าคงที่ที่ใช้ในการออกแบบโครงข่ายเสมือน

พารามิเตอร์	ค่า
ความจุของโมดูลทางแสง	STM1 (155.52 Mbps)
ขอบเขตของความจุในข่ายเชื่อมโยง	5 Gbps
ค่าใช้จ่ายของโมดูลทางแสง	150,000 c.u.
ค่าใช้จ่ายคงที่สำหรับการใช้ข่ายเชื่อมโยง	15,000 c.u.

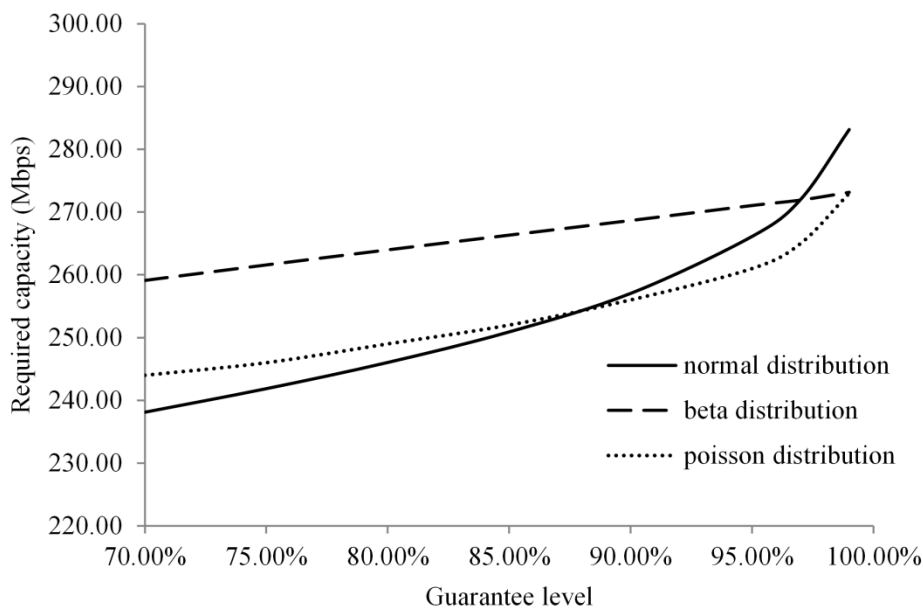
ตารางที่ 4.6 คุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิกที่ใช้ในการออกแบบโครงข่ายเสมือน

Distribution	Mean	Standard deviation
Normal distribution*	225.00 Mbps	25.00 Mbps
Beta distribution	237.36 Mbps	22.14 Mbps
Poisson distribution	237.36 Mbps	15.14 Mbps

* Telkamp, T., "Traffic characteristics and network planning," ISMA, Oct 2002.

ตารางที่ 4.7 การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

Guarantee level	Mean (μ)	SD (σ)	$P((x-\mu)/\sigma \geq z) = \alpha$	$x = \mu + \Phi^{-1}(\alpha)\sigma$ (Mbps)
90%	225	25	0.90	257.04
95%	225	25	0.95	266.12
99%	225	25	0.99	283.16

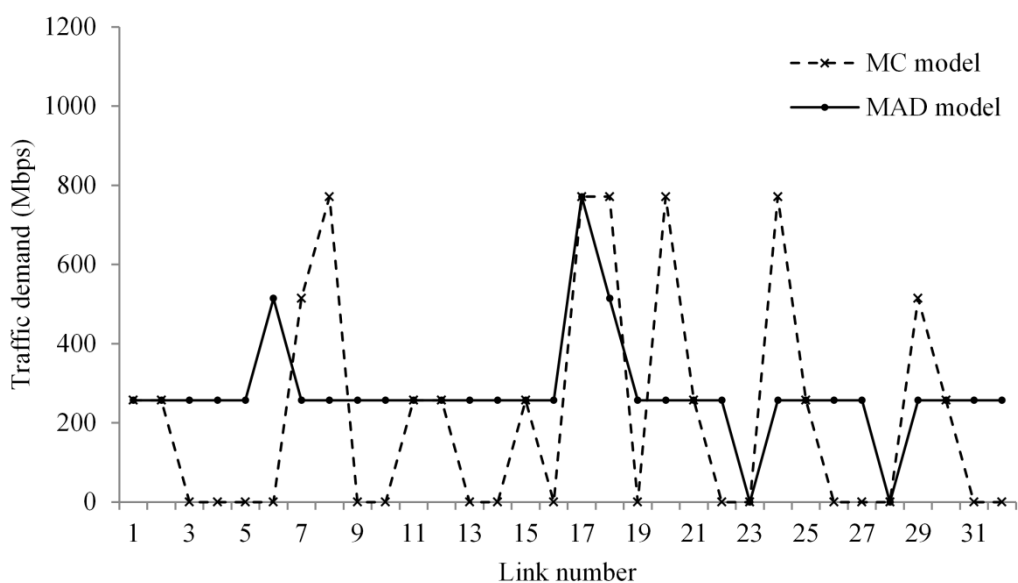


รูปที่ 4.9 ความจุช่องสัญญาณที่ต้องใช้เพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนต่าง ๆ

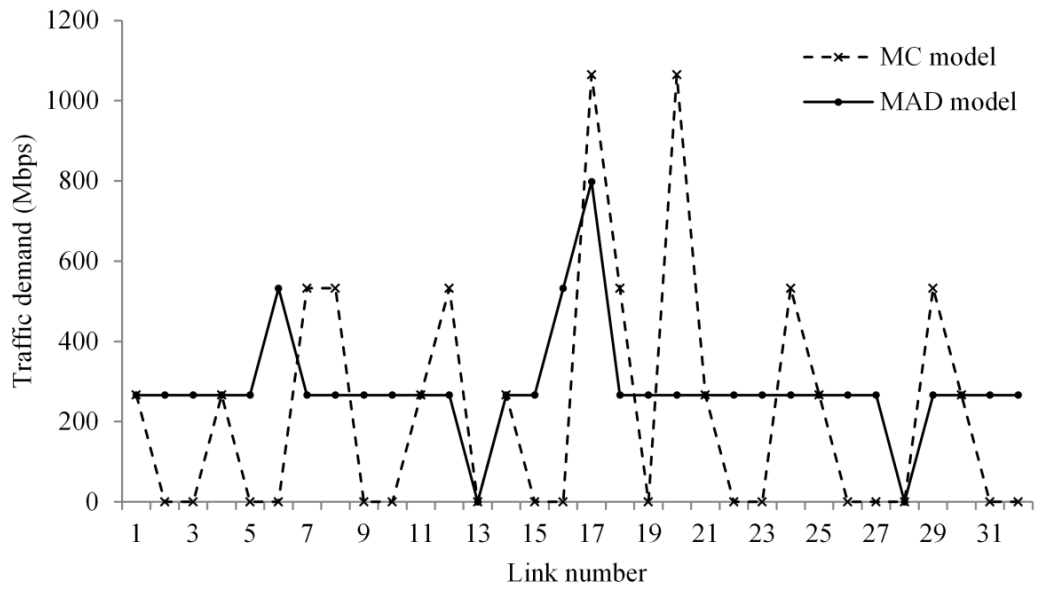
ในการทดลองนี้ได้เริ่มต้นด้วยการเปรียบเทียบแบบจำลอง MAD ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้กับแบบจำลองของที่มีการนำเสนอในงานวิจัยของ Meesublak, K. (2009) ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ การลดค่าใช้จ่ายของการดำเนินงานเครือข่ายให้น้อยที่สุด ซึ่งมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความจุของข่ายเชื่อมโยงและปริมาณของทราฟฟิกที่มีความต้องการขนส่งในเครือข่าย โดยผู้วิจัยได้เรียกวิธีการดังกล่าวว่าแบบจำลอง *MC (Minimize Cost)* ซึ่งแบบจำลอง MAD นั้นมีความแตกต่างจากแบบจำลอง MC คือ แบบจำลอง MAD มีเป้าหมายเพื่อต้องการความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ให้มากที่สุด โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ การลดค่าเฉลี่ยของการเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของปริมาณไอพีทราฟฟิกที่ขนส่งไปยังข่ายเชื่อมโยงนำแสงของชั้น WDM ให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งแสดงถึงค่าความไม่สมดุลของปริมาณทราฟฟิกที่มีค่าน้อยที่สุด การออกแบบโครงข่ายเสมือนด้วยการวางแผนทราฟฟิกได้มีการแก้ไขปัญหาสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มด้วยการใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ที่มีการป้อนอินพุตที่ใช้ในการทดลอง อย่างเช่น ข้อมูลของชุดเส้นทางที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละทราฟฟิก (P^k) ของแบบจำลองในเครือข่ายนั้น จากนั้นก็ได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยซอฟต์แวร์ CPLEX 5.2 และการคำนวณได้ดำเนินการบนคอมพิวเตอร์รุ่น Intel Centrino Core2 Duo Processor 2.0 GHz แรมขนาด 2 GB

4.7 การวิเคราะห์ผลการออกแบบโครงข่ายเสมือน

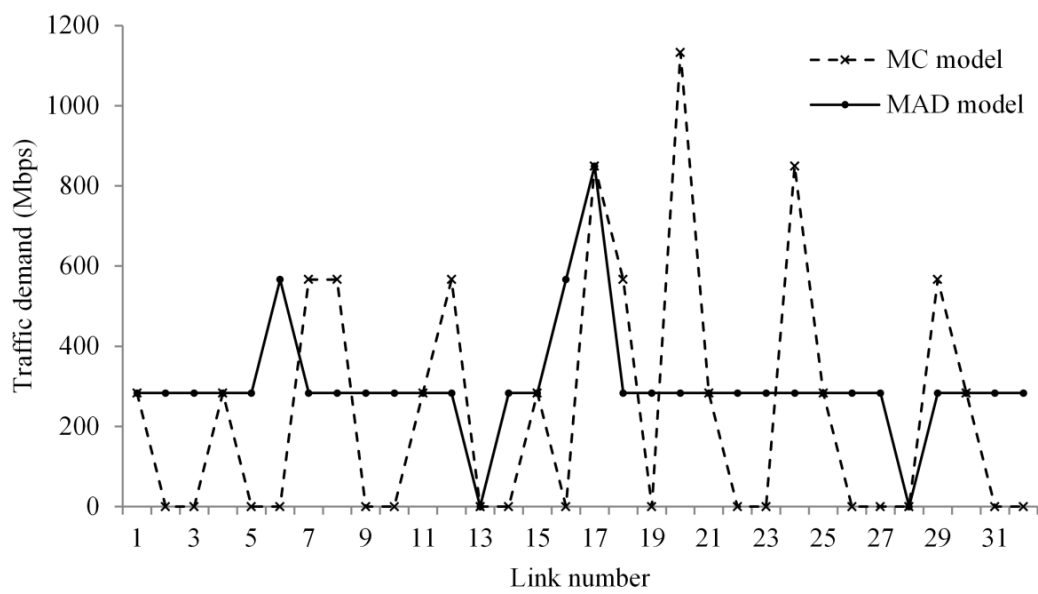
เมื่อผ่านกระบวนการหาคำตอบแล้วจะได้ปริมาณการขนส่งทราฟฟิกผ่านข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายมีลักษณะดังรูปที่ 4.10 - 4.12 ซึ่งเป็นกรณีที่มีการรับประกันที่ 90% 95% และ 99% ตามลำดับ ซึ่งทุกรูปแสดงการเปรียบเทียบปริมาณของทราฟฟิกในแต่ละข่ายเชื่อมโยงที่ได้มาจากการใช้แบบจำลอง MC และแบบจำลอง MAD ซึ่งสามารถเห็นได้จากปริมาณทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงว่า การใช้แบบจำลอง MC บางข่ายเชื่อมโยงนั้นมีการขนส่งทราฟฟิกในปริมาณที่สูงมาก ในขณะที่หลายข่ายเชื่อมโยงมีการขนส่งทราฟฟิกที่น้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนในการใช้แบบจำลอง MAD ที่งานวิจัยนี้นำเสนอได้แสดงผลตรงกันข้าม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกที่สามารถเกิดขึ้นได้มากที่สุด ยกเว้นบนข่ายเชื่อมโยงที่ 17 ที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากรูปแบบของโครงข่ายแกนหลักของข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพของชั้น WDM โดยที่ผลของการเปรียบเทียบที่แสดงนี้เป็นการใช้ทราฟฟิกที่มีการกระจายแบบปกติ



รูปที่ 4.10 ปริมาณทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%



รูปที่ 4.11 ปริมาณกราฟฟิบนข่ายเชื่อมโยงสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 95%



รูปที่ 4.12 ปริมาณกราฟฟิบนข่ายเชื่อมโยงสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%

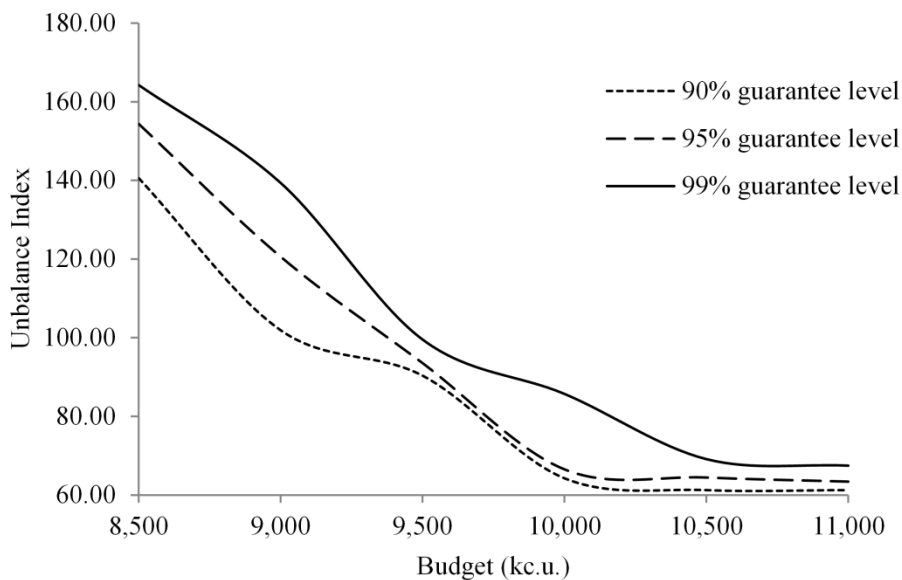
สำหรับในการทดลองต่อไปเป็นการศึกษาผลของการจำกัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเครือข่ายภายใต้ความสมดุลปริมาณทราฟฟิกของแบบจำลอง MAD ที่นำเสนอ ในการประเมินปัจจัยนี้ได้กำหนดด้วยตัวชี้วัดประสิทธิภาพการทำงานที่เรียกว่า ดัชนีความไม่สมดุล (unbalance index) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของปริมาณไอพีทราฟฟิกที่ขนส่งไปยังข่ายเชื่อมโยงนำแสงของชั้น WDM ที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ (4.1)

รูปที่ 4.13 - 4.15 เป็นการเปรียบเทียบความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกในเครือข่ายเมื่อมีงบประมาณในการดำเนินงานเครือข่ายที่แตกต่างกันสำหรับการออกแบบโครงข่ายเสมือน โดยที่แต่ละรูปเป็นผลที่ได้จากการพิจารณาคุณลักษณะของทราฟฟิกที่มีการกระจายแบบปกติ การกระจายแบบเบต้า และการกระจายแบบปัวซอง ซึ่งสามารถเห็นได้ว่าดัชนีความไม่สมดุลของทุกรูปนั้นลดลงตามงบประมาณของการออกแบบโครงข่ายเสมือนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามระดับของความสมดุลของทราฟฟิกก็มีขีดจำกัด ซึ่งการเพิ่มค่างบประมาณที่สูงมาก ๆ นั้นไม่ได้ส่งผลต่อความสมดุลของเครือข่ายให้ดีขึ้นกว่าเดิม ดังที่ปรากฏในผลการทดลองว่างบประมาณที่เพิ่มขึ้นสูงกว่า 10,500,000 c.u. ก็ไม่ได้ทำให้ความสมดุลของทราฟฟิกดีขึ้น ซึ่งขีดจำกัดของความสมดุลนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพในชั้น WDM

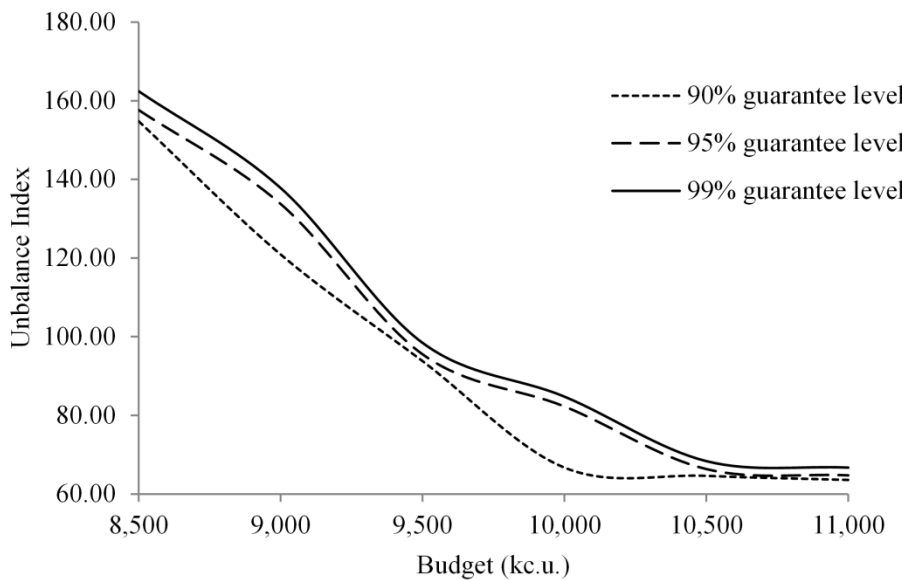
เมื่อพิจารณาผลของของระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่แตกต่างกัน โดยในที่นี้พิจารณาที่ 90% 95% และ 99% จากรูปที่ 4.13 - 4.15 พบว่า เมื่อระดับของการรับประกันความไม่แน่นอนสูงขึ้นส่งผลให้ความสมดุลของทราฟฟิกน้อยลง นั่นคือ มีดัชนีความไม่สมดุลที่สูงขึ้น

รูปที่ 4.16 - 4.18 แสดงการเปรียบเทียบความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายเมื่อมีคุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิกที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละระดับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90% 95% และ 99% ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าในระดับของการรับประกันความไม่แน่นอนที่มีค่าสูง (99%) โดยที่ใช้ทั้งการกระจายแบบปกติ การกระจายแบบเบต้า และการกระจายแบบปัวซองนั้นให้ผลของความสมดุลของทราฟฟิกในระดับที่คล้ายกัน ไม่ว่าจะที่ค่างบประมาณใด ๆ ของเครือข่ายก็ตาม ส่วนคุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิกนั้นมีผลกระทบต่อระดับของความสมดุลของทราฟฟิกเมื่อมีการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่น้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 สามารถเห็นได้ว่าการใช้ลักษณะการกระจายแบบปกติและการกระจายแบบปัวซองยังให้ระดับความสมดุลของเครือข่ายที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากแต่ละระดับของการรับประกันความไม่แน่นอนมีการจัดสรรความจุเพื่อรองรับทราฟฟิกในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่กระจายแบบเบต้ากลับให้ผลแตกต่างออกไป คือ กระจายแบบเบตานั้นแสดงถึงดัชนีความไม่

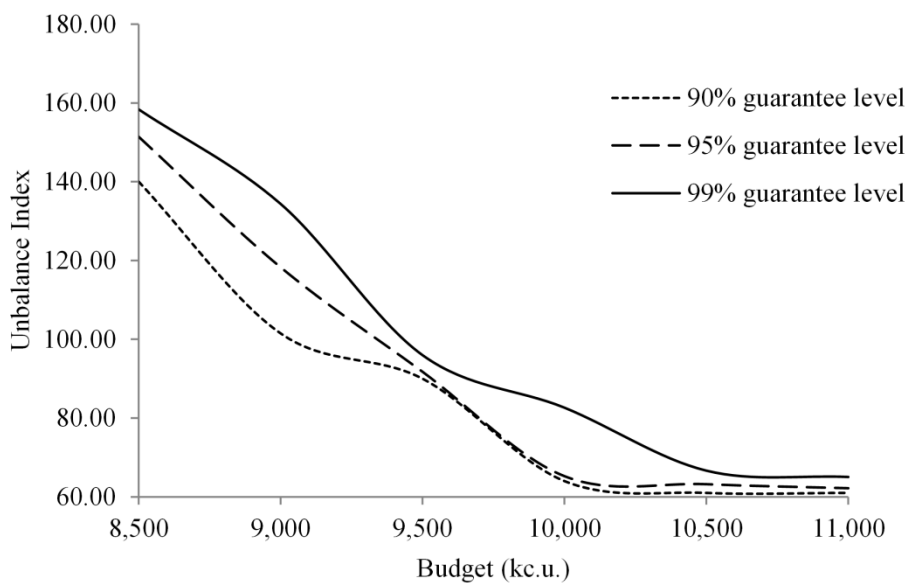
สมดุลที่สูงกว่ากระจายแบบปกติและการกระจายแบบปัวซอง หรือกล่าวได้ว่ากระจายแบบเบต้าให้ผลระดับความสมดุลของกราฟฟีกที่ต่ำกว่า



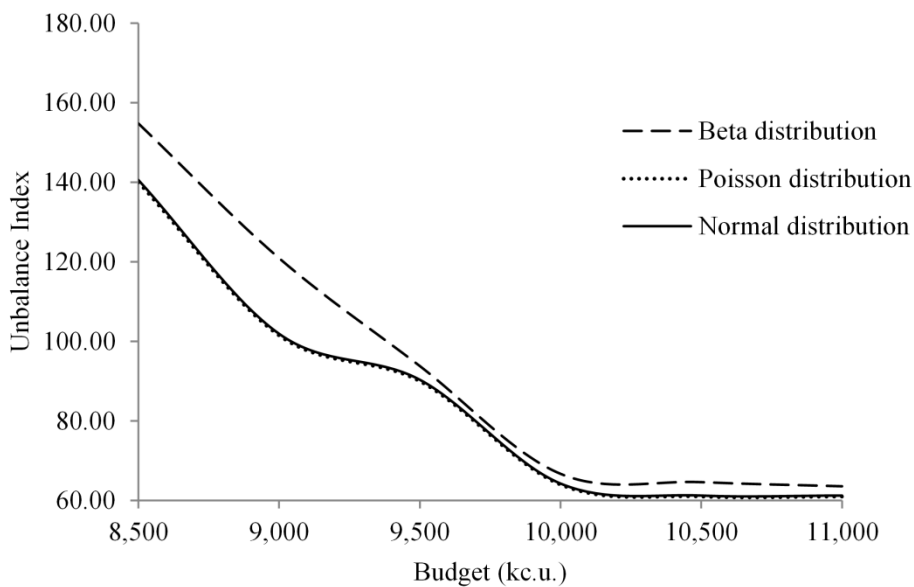
รูปที่ 4.13 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการกระจายแบบปกติ



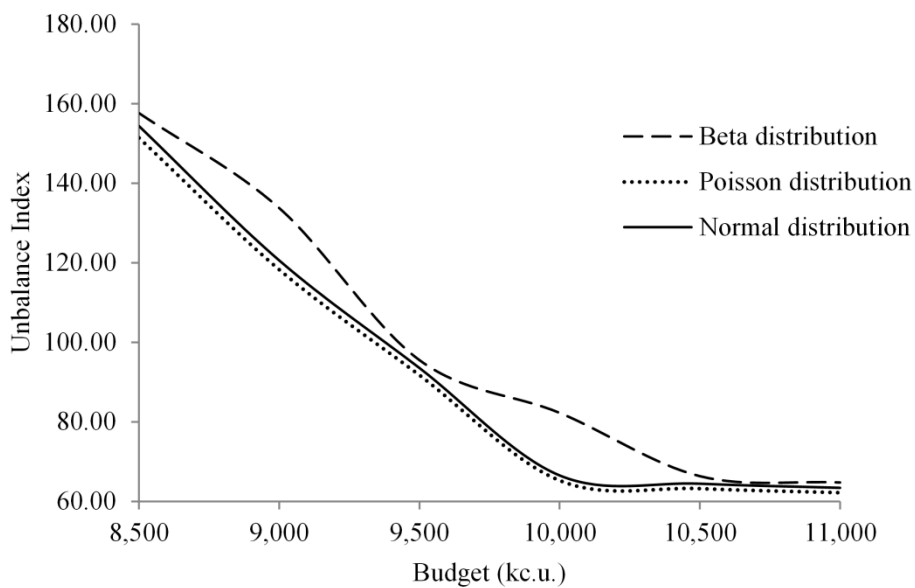
รูปที่ 4.14 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการกระจายแบบเบต้า



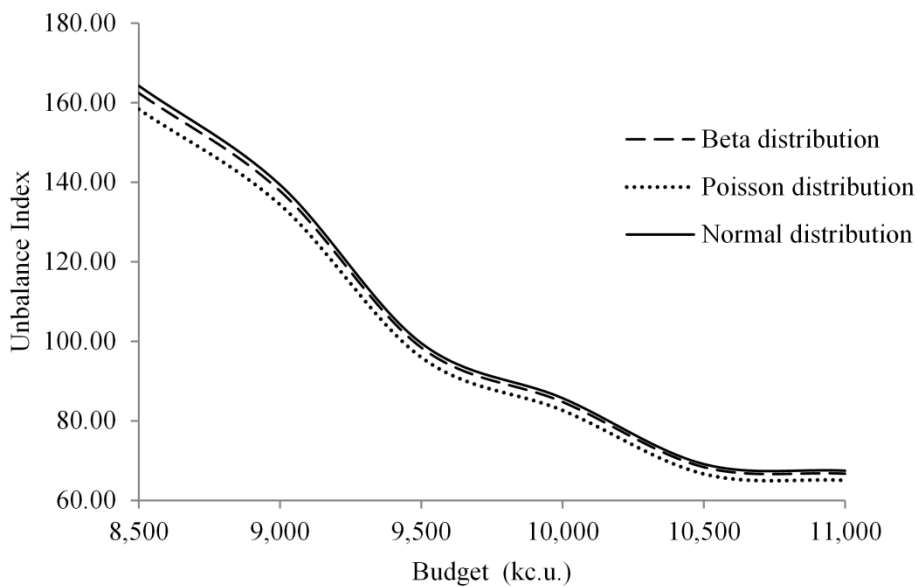
รูปที่ 4.15 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการกระจายแบบปัวซอง



รูปที่ 4.16 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%



รูปที่ 4.17 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 95%



รูปที่ 4.18 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%

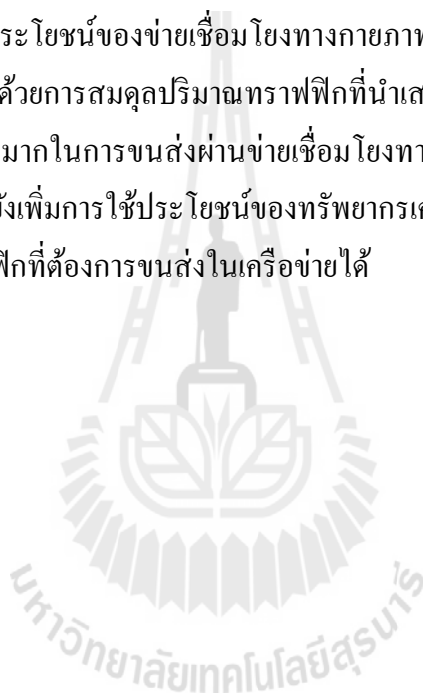
สุดท้ายสำหรับการทดลองนี้ได้วิเคราะห์การใช้ประโยชน์ของความรู้ที่มีการจัดสรรบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพในชั้น WDM ซึ่งในที่นี้การใช้ประโยชน์ของข่ายเชื่อมโยง (Link utilization) คือ ร้อยละของปริมาณทราฟฟิกที่ขนส่งบนข่ายเชื่อมโยงเปรียบเทียบกับความรู้ที่มีการจัดสรรสำหรับข่ายเชื่อมโยงนั้น ในตารางที่ 4.8 เป็นการแสดงผลการใช้ประโยชน์ของข่ายเชื่อมโยงเมื่อมีการใช้ระดับของการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่แตกต่างกันและที่แต่ละค่าของงบประมาณเครือข่ายที่แตกต่างกัน ตารางนี้ยังเปรียบเทียบการใช้ประโยชน์ของข่ายเชื่อมโยงเมื่อใช้คุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิกที่มีการกระจายแบบปกติเทียบกับการกระจายแบบเบต้า อย่างเช่นการรับประกันทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนที่ 90% ค่าเฉลี่ยของการใช้ประโยชน์ของข่ายเชื่อมโยงนั้นมีค่าประมาณ 83% และ 86% สำหรับการกระจายแบบปกติและการกระจายแบบเบต้า ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยของการใช้ประโยชน์ของข่ายเชื่อมโยงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.8 การใช้ประโยชน์ของข่ายเชื่อมโยง (Link utilization)

ระดับการรับประกัน	งบประมาณเครือข่าย (kc.u.)	การกระจายแบบปกติ		การกระจายแบบเบต้า	
		ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
90%	8500	84.42%	4.88%	86.08%	0.00%
	9500	82.49%	6.43%	86.08%	0.00%
	10500	83.47%	3.03%	86.49%	2.25%
95%	8500	85.85%	0.00%	87.66%	0.00%
	9500	85.85%	0.00%	87.66%	0.00%
	10500	86.25%	2.24%	87.66%	0.00%
99%	8500	91.34%	0.00%	90.33%	0.00%
	9500	91.34%	0.00%	90.33%	0.00%
	10500	91.34%	0.00%	89.29%	5.59%

4.8 สรุปผลของงานวิจัยในบทนี้

เนื้อหาในบทนี้ได้พิจารณาปัญหาความสมดุลของทราฟฟิกที่มีการพิจารณาทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน เพื่อให้มีการขนส่งไอพีทราฟฟิกผ่านเครือข่าย IP over WDM อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ได้เสนอนิยามสูตรทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่สามารถกำหนดเส้นทางที่ดีที่สุดและความจุที่เพียงพอเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกด้วยการกำหนดระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกตามความสำคัญของทราฟฟิก การทดลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอนี้ให้ผลการเชื่อมโยงทางโครงข่ายเสมือนสำหรับไอพีทราฟฟิกที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ ในแง่ของความสมดุลของทราฟฟิกและการใช้ประโยชน์ของข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพของชั้น WDM สังเกตได้ว่าวิธีการออกแบบโครงข่ายเสมือนด้วยการสมดุลปริมาณทราฟฟิกที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ช่วยให้สามารถกระจายทราฟฟิกที่มีอยู่สูงมากในการขนส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ซึ่งสามารถช่วยลดความไม่สมดุลได้ถึง 68% และยังสามารถเพิ่มการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรเครือข่ายได้ถึง 8% โดยที่ยังสามารถรองรับปริมาณไอพีทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งในเครือข่ายได้



บทที่ 5

เทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก สำหรับเครือข่าย IP over WDM

ทราฟฟิกอินเทอร์เน็ตนั้นมีแนวโน้มปริมาณที่สูงขึ้นในทุกปี ซึ่งจะส่งผลให้มีการใช้พลังงานสำหรับเครือข่ายแกนหลักเพิ่มขึ้นไปด้วย เครือข่ายแกนหลักที่ได้รับความสนใจและเป็นที่ยอมรับในขณะนี้คือเครือข่าย IP over WDM และทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งข้อมูลภายในเครือข่ายนั้นมีความไม่แน่นอน ซึ่งมีผลต่อความน่าเชื่อถือของการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย IP over WDM ในงานวิจัยนี้จึงเสนอเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก และตรวจสอบผลกระทบของความไม่แน่นอนของทราฟฟิกต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย โดยใช้รูปแบบการแก้ปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM ที่น้อยที่สุด ผลของงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอที่สามารถจัดการกับสองประเด็นสำคัญ ได้แก่ ประเด็นที่หนึ่งเป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายในเครือข่าย IP over WDM และประเด็นที่สองเป็นการสร้างความมั่นใจสำหรับความจุของเครือข่ายเพื่อที่จะสามารถรองรับความต้องการของทราฟฟิกภายใต้สถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ซึ่งจากการวิจัยดังกล่าวได้แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ความจุระดับต่าง ๆ มีผลต่อการใช้พลังงานในเครือข่ายอย่างมาก ยิ่งไปกว่านั้นผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม พบว่าเทคนิคที่นำเสนอมีความซับซ้อนของอัลกอริทึมที่น้อยกว่าเทคนิคของงานวิจัยอื่น นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้ตระหนักถึงคุณภาพในการให้บริการ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากต่อความน่าเชื่อถือของผู้ให้บริการ ในงานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการตรวจสอบให้เห็นว่าเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลของทราฟฟิกภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่นำเสนอในบทที่ 4 นั้นมีผลกระทบต่อการใช้พลังงานอย่างมาก และเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกนั้นก็ยังมีผลกระทบต่อความสมดุลอย่างมากเช่นกัน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยต่อไป สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้ประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

5.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM 5.2 การใช้พลังงานในชั้นการขนส่งทราฟฟิกบนเครือข่าย IP over WDM 5.3 การกำหนดปัญหาการ

โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม 5.4 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ 5.5 การวิเคราะห์ความซับซ้อนของ อัลกอริทึม 5.6 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้น 5.7 การดำเนินการทดลอง สำหรับการออกแบบโครงข่ายเสมือน 5.8 การวิเคราะห์ผลการออกแบบโครงข่ายเสมือน และ 5.9 สรุปผลของงานวิจัยในบทนี้

5.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM

การใช้พลังงานไฟฟ้าของเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (Information and Communication Technology : ICT) มีแนวโน้มของการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นในทุก ๆ ปี Leisching, P. and Pickavet, M. (2009) กล่าวว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี 2009 ของเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารใช้พลังงานไฟฟ้าถึง 8% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั่วโลก และ Zhang, Y., Chowdhury, P., Tornatore, M. and Mukherjee, B. (2010) ยังมีการคาดการณ์ว่าในปี 2020 จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในด้านนี้เพิ่มขึ้นถึง 14% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั่วโลก จากสถานะการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครือข่ายที่เพิ่มขึ้นอย่างมากนี้ จึงควรมีการพิจารณาเรื่องการวางแผนการใช้พลังงานไฟฟ้าในเครือข่าย เพื่อให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครือข่ายการสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สาเหตุหนึ่งที่ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครือข่ายการสื่อสารเพิ่มขึ้นมาก ก็เนื่องมาจากในปัจจุบันความต้องการในการใช้งานอินเทอร์เน็ตมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปริมาณทราฟฟิกในเครือข่ายเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการใช้งานอุปกรณ์ในเครือข่ายทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมาก โดยเฉพาะในเครือข่ายแกนหลักประเภทไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing : IP over WDM) มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงมาก ดังที่ Zhang, Y., Tornatore, M., Chowdhury, P. and Mukherjee, B. (2011) กล่าวไว้ว่าการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในเครือข่ายแกนหลักประเภท IP over WDM เป็นเรื่องที่ได้ได้รับความสนใจอย่างมากในขณะนี้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการวางแผนการใช้งานทรัพยากรเครือข่ายอย่างเหมาะสม เพื่อให้การใช้พลังงานไฟฟ้าในเครือข่ายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพนั้นเป็นการนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด ซึ่งช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานได้ และยังนำไปสู่การช่วยลดภาวะโลกร้อนอย่างเช่นปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) ได้อีกด้วย

Dixit, S. (2003) กล่าวถึงเครือข่าย IP over WDM เป็นสถาปัตยกรรมเครือข่ายแกนหลักที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มว่าจะได้รับความนิยมต่อไปในอนาคต เนื่องจากเครือข่าย

ดังกล่าวสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกได้ในปริมาณที่สูงมาก เครือข่ายดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือส่วนของชั้นไอพี (IP layer) ซึ่งมีอุปกรณ์จัดเส้นทางหรือเราท์เตอร์ (routers) ที่ใช้ในการกำหนดหรือเลือกเส้นทางที่จะใช้ส่งข้อมูลนั้นเข้าสู่ภายในเครือข่าย ในขณะที่ชั้นของการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (WDM layer) นั้นประกอบด้วยอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (Optical Cross-Connects : OXCs) ที่เชื่อมต่อกันด้วยสายเชื่อมโยงนำแสง (optical fiber link) ซึ่งในการใช้พลังงานสำหรับสถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM นี้เกิดขึ้นในส่วนของ การดำเนินการทางอิเล็กทรอนิกส์ (สัญญาณไฟฟ้า) และส่วนของการดำเนินการเชิงแสง (สัญญาณแสง) โดยการใช้พลังงานในส่วนของอิเล็กทรอนิกส์หรือเรียกได้ว่าเป็นการใช้พลังงานในส่วนของชั้น IP ซึ่งมีการใช้พลังงานที่สูงมากที่เราท์เตอร์ เพื่อการจัดสรรทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งภายในเครือข่าย ในขณะที่การใช้พลังงานในส่วนของ การดำเนินการเชิงแสงหรือเรียกได้ว่าเป็นการใช้พลังงานใน ส่วนของชั้น WDM มีการใช้พลังงานในส่วนของ การสลับช่องสัญญาณทางแสง การขยายสัญญาณ และการทวนสัญญาณ สิ่งหนึ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้พลังงานของเครือข่าวนั้นก็คือ ปริมาณทราฟฟิกในเครือข่าย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ในเครือข่าย ซึ่งทราฟฟิกใน เครือข่ายมีลักษณะที่ไม่แน่นอนมีความแปรปรวนขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้งานของผู้ใช้ ดังนั้นความ ไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ Meesublak, K. (2008) กล่าวไว้ ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ต้อง พิจารณาเพื่อให้มีการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่ายแกนหลักประเภท IP over WDM ได้อย่าง เหมาะสม

จากการสำรวจปริทรรศน์วรรณกรรมพบว่าในหลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจในการศึกษา การวางแผนเครือข่ายสำหรับการใช้พลังงานของเครือข่ายแกนหลักอย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัย ของ Zhanga, Y., Tornatore, M., Chowdhury, P. and Mukherjee, B. (2011) ได้มีการนำเสนอ วิธีการประหยัดพลังงานสำหรับเครือข่าย IP over WDM ด้วยการปิดแผงวงจรควบคุมการไหล ของทราฟฟิก (line card) และ โครงสร้างอุปกรณ์เครือข่าย (chassis) ของเราท์เตอร์ที่ไม่มีการใช้งาน โดยการปิดอุปกรณ์นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณทราฟฟิกในแต่ละช่วงเวลา และยังมีการเสนอแนวทาง บางอย่างเพื่อลดการหยุดชะงักของทราฟฟิกที่อาจเกิดขึ้นเมื่อมีการปิดการใช้งานอุปกรณ์ งานวิจัย ของ Kim, Y., Lee, C., Rhee, J. K. and Lee, S. (2012) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การใช้พลังงาน ในการขนส่งทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ด้วยการพิจารณาสัดส่วนการใช้พลังงานของ อุปกรณ์เครือข่ายในชั้น IP โดยสัดส่วนการใช้พลังงานของอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับปริมาณทราฟฟิกที่ ต้องการขนส่งในเครือข่าย งานวิจัยนี้ได้กล่าวไว้ว่าสัดส่วนการใช้พลังงานของอุปกรณ์นั้นมีผลต่อ การประหยัดพลังงานในเครือข่าย IP over WDM และยังมีการพิจารณาถึง OXC ที่มีรูปแบบที่ แตกต่างกันว่าส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานอย่างไร งานวิจัยของ Musumeci, F., Tornatore, M.

and Pattavina, A. (2012) ได้ทำการวิเคราะห์การใช้พลังงานของเครือข่าย IP over WDM ที่มีโครงสร้างสถาปัตยกรรมที่แตกต่างกัน ซึ่งในการวิเคราะห์นี้พิจารณาพลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานเครือข่ายด้วยการประเมินการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในส่วน of ชั้นการขนส่ง (transport layer) โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้พลังงานน้อยที่สุด ซึ่งในการวิเคราะห์การใช้พลังงานของโครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่ายที่แตกต่างกันนั้น ก็เพื่อให้สามารถเลือกใช้งานสถาปัตยกรรมเครือข่ายได้อย่างมีความเหมาะสมที่สุด และในงานวิจัยของ Dong, X., Lawey, A., El-Gorashi, T. E. H., and Elmirghani, J. M. H. (2012) ได้วิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานสำหรับ โครงข่ายทางกายภาพของ IP over WDM ร่วมกับการพิจารณาพลังงานสะสมรวม (embodied energy) ซึ่งคือพลังงานที่ใช้ในการผลิตหรือดำเนินการสร้างที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และยังมีการประเมินการใช้พลังงานร่วมกับการบีบอัดข้อมูลในเครือข่าย และการใช้พลังงานของบิตทอร์เรนต์ (BitTorrent) ที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบเพียร์ทูเพียร์ (peer-to-peer) ร่วมด้วย ในขณะที่การศึกษาในงานวิจัยของ Zhanga, Y., Tornatore, M., Chowdhurya, P. and Mukherjee, B. (2011), งานวิจัยของ Kim, Y., Lee, C., Rhee, J. K. and Lee, S. (2012), งานวิจัยของ Musumeci, F., Tornatore, M. and Pattavina, A. (2012) และงานวิจัยของ Dong, X., Lawey, A., El-Gorashi, T. E. H., and Elmirghani, J. M. H. (2012) มีความสำคัญและแสดงผลลัพธ์ที่น่าสนใจแต่ประเด็นสำคัญของกราฟฟิคที่มีความไม่แน่นอนก็ยังไม่ได้มีการพิจารณากล่าวถึงร่วมด้วยแต่อย่างใด ซึ่งก็มีบางงานวิจัยให้ความสนใจเกี่ยวกับความไม่แน่นอนของกราฟฟิคในการวางแผนเครือข่ายอย่างในงานวิจัยของ Meesublak, K. (2008) ได้กล่าวถึงลักษณะความไม่แน่นอนที่เกิดจากลักษณะของไอพีกราฟฟิคแบบพลวัต (dynamic nature of the IP-based traffic) และนำเสนอวิธีการวางแผนเครือข่ายที่มีการกำหนดด้วยธรรมชาติของกราฟฟิคภายในขั้นตอนการออกแบบเครือข่าย ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวมีเป้าหมายเพื่อกำหนดเส้นทางกรขนส่งกราฟฟิคในเครือข่าย ด้วยการใช้วัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายภายในเครือข่าย โดยพิจารณาความจุที่ใช้ในการรองรับกราฟฟิคที่ต้องการขนส่งภายในเครือข่าย ซึ่งความจุที่ใช้ในการรองรับกราฟฟิคนี้มีการกำหนดด้วยระดับความไม่แน่นอนของกราฟฟิค โดยงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเครือข่ายที่มีรูปแบบชั้นเดียว (Single layer network) ส่วนในงานวิจัยของ Meesublak, K. (2009) ได้ทำการพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิคสำหรับสถาปัตยกรรมเครือข่ายสองชั้น (Two layer network) โดยใช้วัตถุประสงค์เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Meesublak, K. (2008) คือเพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในเครือข่าย เมื่อมีการร้องขอใช้งานทรัพยากรเครือข่าย อย่างเช่นการใช้งานความจุและข่ายเชื่อมโยง ในงานวิจัยของ Gagnaire, M., Doumith, E. A. and Al Zahr, S. (2011) ได้กล่าวถึงประเด็นความไม่แน่นอนของกราฟฟิคที่นำมาพิจารณาร่วมกับวัตถุประสงค์การเลือกใช้งานของตัวทวนสัญญาณ

(Regenerators) ที่แต่ละ โหนดให้มีความเหมาะสมกับการร้องขอการเชื่อมต่อของทราฟฟิกในเครือข่าย WDM ให้มากที่สุด ซึ่งได้พิจารณาทราฟฟิกด้วยการคาดการณ์ทราฟฟิกที่มีความแตกต่างกัน และแบ่งการวิเคราะห์เป็นสองประเด็นคือปัญหาการจัดวางจำนวนตัวทวนสัญญาณกับการกำหนดเส้นทางทราฟฟิกและปัญหาการจัดวางจำนวนตัวทวนสัญญาณกับความยาวคลื่นที่มีการใช้งาน ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวก็ได้แสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์การกำหนดจำนวนตัวทวนสัญญาณที่เหมาะสมต่อการออกแบบเครือข่าย WDM ภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก และงานวิจัยของ Aparicio-Pardo, R., Pavon-Marino, P., Mukherjee, B. (2012) ได้ทำการพิจารณาเครือข่ายเชิงแสงภายใต้ทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนเพื่อให้มีความเสถียรภาพของเครือข่าย โดยใช้กระบวนการปรับความจุของเครือข่ายเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีการคาดการณ์ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการขนส่งทราฟฟิกโดยทำการศึกษาเปรียบเทียบระดับค่าใช้จ่ายกับเทคโนโลยีความจุของ WDM ที่แตกต่างกัน ได้แก่ pure 10G (single line rate), pure 40G SLR, pure 100G SLR and 10/40/100G MLR (mixed line rate) ถึงแม้ว่าในงานวิจัยของ Meesublak, K. (2008), งานวิจัยของ Meesublak, K. (2009), งานวิจัยของ Gagnaire, M., Doumith, E. A. and Al Zahr, S. (2011) และงานวิจัยของ Aparicio-Pardo, R., Pavon-Marino, P. and Mukherjee, B. (2012) มีการศึกษาและวิเคราะห์ที่น่าสนใจและให้ความสำคัญในประเด็นความไม่แน่นอนของทราฟฟิก แต่ก็ยังไม่ได้มีการนำมาพิจารณาร่วมกับประเด็นการใช้พลังงานในเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพแต่อย่างใด นอกจากงานวิจัยเหล่านี้แล้วผู้วิจัยพบว่ามีงานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) ที่ให้ความสนใจในเรื่องการพิจารณาประเด็นการใช้พลังงานในเครือข่ายร่วมกับประเด็นความไม่แน่นอน โดยงานวิจัยดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานในเครือข่าย IP ภายใต้การพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ด้วยแบ่งการพิจารณาเป็นช่วงเวลา แต่ละช่วงเวลานั้นมีระดับทราฟฟิกที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้สมมติให้แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) และโครงสร้างอุปกรณ์เครือข่าย (chassis) สามารถเปลี่ยนสถานะการทำงานเข้าสู่โหมดการพักงาน (sleep mode) เมื่อไม่มีการใช้งานเพื่อการประหยัดพลังงานตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการวางแผนเครือข่ายสำหรับการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM พบว่า ในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีบางงานวิจัยที่ทำการพิจารณาเกี่ยวกับปริมาณทราฟฟิกกับการใช้พลังงานในเครือข่ายซึ่งเป็นการพิจารณาปริมาณทราฟฟิกเพียงค่าเฉลี่ย แต่ก็ยังไม่ได้พิจารณาถึงลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกร่วมด้วย และมีบางงานวิจัยมีการพิจารณาเรื่องความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในขั้นตอนการวางแผนเครือข่าย แต่งานวิจัยเหล่านี้มีเป้าหมายหลักเกี่ยวกับการลดค่าใช้จ่ายของเครือข่ายหรือลดการใช้งานทรัพยากรเครือข่าย และผู้วิจัยยังพบว่า

มีงานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) ที่ให้ความสนใจในเรื่องการพิจารณาประเด็นการใช้พลังงานในเครือข่ายร่วมกับประเด็นความไม่แน่นอนเช่นกัน แต่งานวิจัยดังกล่าวก็มีข้อแตกต่างจากงานวิจัยที่นำเสนอต่อไปนี้

1. งานวิจัยดังกล่าวเป็นเพียงการนำเสนอการจัดสรรเส้นทางเฉพาะบนเครือข่าย IP เท่านั้น ซึ่งเป็นเครือข่ายเพียงชั้นเดียว แต่ในงานวิจัยที่นำเสนอเป็นการนำเสนอด้วยเครือข่าย IP over WDM ซึ่งเป็นเครือข่ายแบบสองชั้นเช่นเดียวกับเครือข่ายแกนหลักที่กำลังเป็นที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน

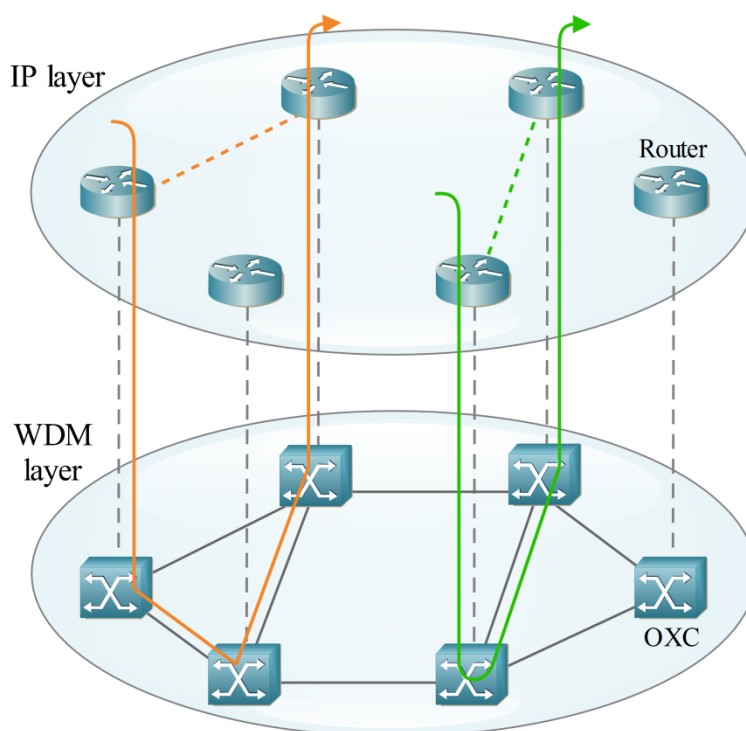
2. งานวิจัยดังกล่าวมีวัตถุประสงค์ คือ การใช้พลังงานที่น้อยที่สุดด้วยด้วยการให้แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) และ โครงสร้างอุปกรณ์เครือข่าย (chassis) สามารถเปลี่ยนสถานะการทำงานเข้าสู่โหมดการพักงาน (sleep mode) ได้เมื่อไม่มีการใช้งาน ส่วนงานวิจัยที่นำเสนอมีวัตถุประสงค์ คือ การใช้พลังงานที่น้อยที่สุดเช่นกัน แต่ในงานวิจัยนี้พิจารณาถึงการให้แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) และอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor) ที่อยู่ในเครือข่ายชั้น IP และยังรวมถึงการพิจารณาอุปกรณ์และทรัพยากรเครือข่ายอื่น ๆ ที่ใช้ในการขนส่งทราฟฟิกข้อมูลในสถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM ร่วมด้วย

3. งานวิจัยดังกล่าวนำเสนอเทคนิคการจัดสรรเส้นทางที่มีการพิจารณาทุกสถานการณ์ในการดำเนินการเพียงครั้งเดียว โดยมีการแบ่งสถานการณ์ด้วยช่วงเวลา ซึ่งการแบ่งช่วงเวลาจะแบ่งตามระดับปริมาณทราฟฟิกที่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าเทคนิคในงานวิจัยดังกล่าวทำให้ได้คำตอบที่ครอบคลุมทุกสถานการณ์ในการดำเนินการเพียงครั้งเดียว แต่เทคนิคที่นำเสนออีกมีความซับซ้อนของอัลกอริทึม (Complexity of Algorithm) สูง ส่วนงานวิจัยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เป็นเทคนิคการวางแผนการส่งทราฟฟิกไว้ล่วงหน้า ไม่ได้มีการแบ่งหลายช่วงเวลา แต่ผู้วิจัยก็ได้พิจารณาผลกระทบจากความแปรปรวนของทราฟฟิกจากสถิติการใช้งานเครือข่าย จึงทำให้เทคนิคที่นำเสนอสามารถรองรับสถานการณ์เครือข่ายลักษณะต่าง ๆ ได้ โดยที่เทคนิคที่นำเสนอมีความซับซ้อนของอัลกอริทึมที่น้อยกว่า ซึ่งการใช้อัลกอริทึมที่มีความซับซ้อนสูงเกินไป เมื่อมีอินพุตขนาดใหญ่อาจเสี่ยงกับการประมวลผลแล้วไม่ได้รับผลลัพธ์ออกมา

ถึงแม้ว่าม้งานวิจัยที่ศึกษาการใช้พลังงานในเครือข่ายร่วมกับประเด็นความไม่แน่นอนดังกล่าวไปแล้ว แต่ก็ยังเป็นเพียงการเริ่มต้นในการศึกษาประเด็นนี้ และก็เป็นเพียงการศึกษาเฉพาะเครือข่าย IP ที่เป็นเครือข่ายที่มีเพียงชั้นเดียวเท่านั้น การศึกษาเรื่องความไม่แน่นอนของทราฟฟิกร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพนี้ก็ยังมีการวิจัยที่ไม่เพียงพอ ซึ่งยังสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้อีก ดังนั้นในงานวิจัยที่นำเสนอจึงได้มุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อกำหนดเส้นทางในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM โดยมี

การพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอน ความแปรปรวนของทราฟฟิก เพื่อปรับปรุงในเรื่องการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งทราฟฟิกผ่านอุปกรณ์เครือข่ายและอัลกอริทึมที่นำเสนอให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเทคนิคที่นำเสนอใช้ในการวางแผนการส่งทราฟฟิกของเครือข่ายในช่วงออฟไลน์ (off-line) คือ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวางแผนการส่งทราฟฟิกไว้ก่อนล่วงหน้า ซึ่งผู้วิจัยได้พิจารณาการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2

นอกจากนั้นแล้วในงานวิจัยนี้ยังได้ตระหนักถึงคุณภาพในการให้บริการ ซึ่งการมีคุณภาพในการให้บริการเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อความน่าเชื่อถือของผู้ให้บริการ ปัญหาในการขนส่งทราฟฟิกซึ่งมีผลต่อคุณภาพในการให้บริการที่มักพบเห็น ได้แก่ ปัญหาความแออัดของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยง (link) หรือที่คอขวด (bottleneck) และปัญหาของการหยุดชะงักในการขนส่งทราฟฟิกเมื่อเกิดกรณีข่ายเชื่อมโยงขาดหรือล้มเหลว ซึ่งถ้าข่ายเชื่อมโยงที่ขาดหรือล้มเหลวนั้นมีทราฟฟิกที่ขนส่งอยู่ในปริมาณที่สูงมาก ก็จะทำให้เกิดการหยุดชะงักในการขนส่งทราฟฟิก ส่งผลให้ความน่าเชื่อถือในการบริการลดลงอย่างร้ายแรง ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นถึงประเด็นหนึ่งที่สำคัญต่อการแก้ไขปัญหา คือ ประเด็นความสมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงภายในเครือข่ายแกนหลักดังที่ได้นำเสนอเทคนิคเพื่อแก้ไขปัญหาในบทที่ 4 ซึ่งสามารถช่วยกระจายทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงที่มีปริมาณทราฟฟิกสูงมากได้ ถ้ามีการกระจายทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงแล้วก็จะทำให้มีการสูญเสียที่ลดลงเมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดหรือล้มเหลว ซึ่งการจัดสรรทราฟฟิกในเครือข่ายให้มีความสมดุลจะสร้างความน่าเชื่อถือและคุณภาพในการบริการให้เพิ่มขึ้นอย่างมาก ผู้วิจัยจึงศึกษาผลการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกว่ามีผลสะท้อนต่อความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายอย่างไร และยังทำการศึกษาผลการใช้พลังงานเมื่อใช้เทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่นำเสนอในบทที่ 4 ว่ามีผลสะท้อนต่อการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่ายอย่างไรในหัวข้อที่ 5.8.2 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยในอนาคต



รูปที่ 5.1 เครื่องข่าย IP over WDM

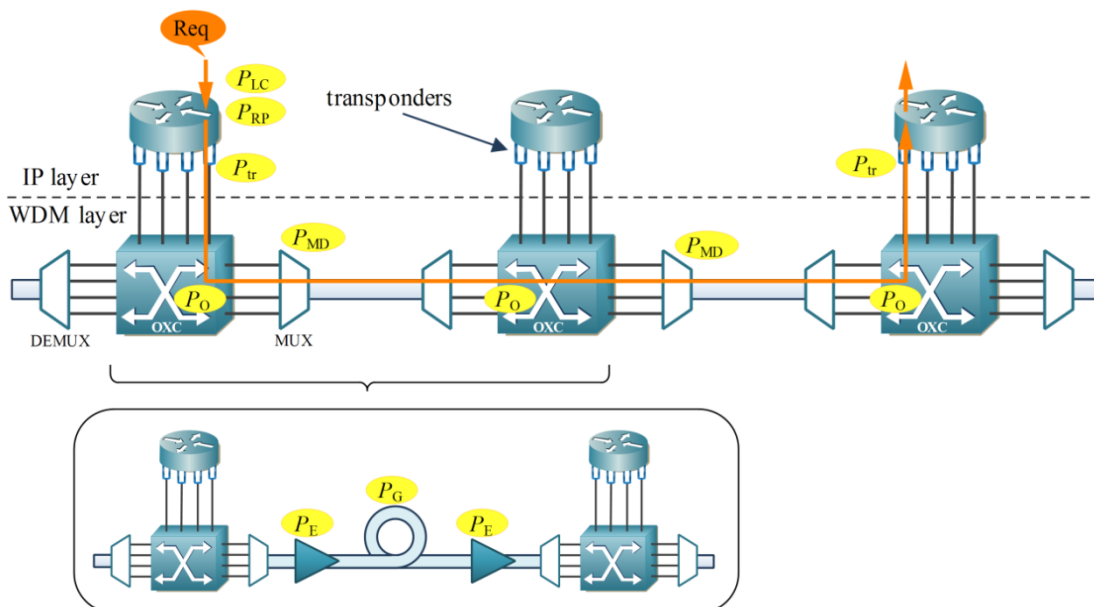
5.2 การใช้พลังงานในชั้นการขนส่งทราฟฟิกบนเครือข่าย IP over WDM

การใช้พลังงานของเครือข่ายแกนหลักสำหรับเครือข่าย IP over WDM นั้นมีการใช้พลังงานที่สูงมาก เพื่อให้มีการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ผู้วิจัยจึงทำการพิจารณาการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่ายที่ใช้ในการขนส่งทราฟฟิกข้อมูลภายในเครือข่าย IP over WDM ซึ่งองค์ประกอบต่าง ๆ ของการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกข้อมูลในสถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM นั้นมีการใช้พลังงานอยู่สองส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนของชั้นไอพี (IP layer) และส่วนของชั้น WDM (WDM layer หรือ Optical layer) แสดงดังรูปที่ 5.2

โครงสร้างเครือข่ายแกนหลักสำหรับสถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM ที่ Dixit, S. (2003) และ Musumeci, F., Tornatore, M. and Pattavina, A. (2012) ได้นำเสนอ ในแต่ละโหนดนั้นมีอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยไอพีเราท์เตอร์ (IP router) ซึ่งอยู่ในชั้นไอพี ที่มีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (Optical Cross Connect : OXC) ซึ่งอยู่ในชั้น WDM ผ่านเครื่องทรานสปอนเดอร์ (transponders) นอกจากนี้เพื่อให้การวางแผนทราฟฟิกสำหรับการขนส่งในเครือข่าย IP over WDM ที่ Dixit, S. (2003) และ Musumeci, F., Tornatore, M. and Pattavina, A. (2012) นำเสนอมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผู้วิจัยจึงได้วางแผนเครือข่ายด้วยการเลือกใช้โปรโตคอล Multiprotocol Label

Switching (MPLS) ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่คณะทำงานเฉพาะกิจด้านวิศวกรรมอินเทอร์เน็ต หรือ ไออีทีเอฟ (Internet Engineering Task Force : IETF) ได้กำหนดขึ้นมาสำหรับการทำงานรับส่งข้อมูลของสวิตช์และเราท์เตอร์ที่มีการกำหนดเส้นทางไว้ให้ไปถึงจุดหมายได้อย่างรวดเร็วขึ้น โดยผู้สนใจสามารถศึกษาโปรโตคอล MPLS เพิ่มเติมได้ในงานของ Davie, B. S. and Rekhter, Y. (2000) โดยปกตินั้นการทำงานของสวิตช์และเราท์เตอร์มีการทำงานภายใต้แพกเกตไอพี (IP Packet) โดยมีส่วนหัวที่มีหมายเลขอินเทอร์เน็ต (IP Address) และข้อมูลอยู่ โดยการดำเนินการสวิตช์นั้นมีการใช้ข้อมูลส่วนหัวของ IP ซึ่งอาจล่าช้าเกินไป ทำให้ต้องเสียเวลาในการรับส่งข้อมูล เพื่อให้การทำงานของสวิตช์และเราท์เตอร์เร็วขึ้น หลักการของโปรโตคอลนี้จึงนำเอาแพกเกตไอพี (IP Packet) ใส่ลาเบล (Label) ซึ่งเป็นส่วนที่ปะหัวข้อมูลอีกครั้ง โดยเน้นให้การสวิตช์ข้อมูลไปในเส้นทางที่กำหนดไว้ได้เร็วกว่า ดังนั้นในระหว่างการขนส่งกราฟฟิกข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง กราฟฟิกข้อมูลจึงสามารถทำการสลับสัญญาณได้โดยตรงในโคนเมนทางแสงที่ OXCs ดังแสดงในรูปที่ 5.2

สำหรับกราฟฟิกข้อมูลที่มีความต้องการขนส่งภายในเครือข่าย (traffic demands) ในการจัดสรรกราฟฟิกข้อมูลนี้ กราฟฟิกข้อมูลจะไหลเข้าสู่โหนดต้นทางผ่านแผงวงจรควบคุมการไหลของกราฟฟิก (line card) และมีการประมวลผลเพื่อกำหนดเส้นทางด้วยอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (Route Processor) จากนั้นจึงไหลสู่เครื่องทรานสปอนเดอร์ (transponders) ที่ใช้สำหรับการแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณแสง เพื่อขนส่งกราฟฟิกข้อมูลนี้ต่อไปยัง OXC และผ่านอุปกรณ์รวมสัญญาณ (multiplexers) เพื่อส่งต่อสัญญาณไปในข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ (physical link) โดยสัญญาณที่ไหลผ่านระหว่างคู่โหนดต้นทางและปลายทางนั้นจะมีการขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFA) ซึ่งยังมีการขยายสัญญาณที่โหนดต้นทางและปลายทางด้วย และมีการทวนสัญญาณด้วยอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerator) ในระหว่างเส้นทางขนส่งข้อมูล โดยที่จำนวนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณและอุปกรณ์ทวนสัญญาณที่ใช้เครือข่ายขึ้นอยู่กับความยาวของข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ เมื่อกราฟฟิกข้อมูลไหลมาถึงโหนดปลายทางก็มีการแยกสัญญาณด้วยอุปกรณ์แยกสัญญาณ (demultiplexers) เพื่อกระจายกราฟฟิกข้อมูลไปยังเป้าหมายต่อไป ดังนั้นอุปกรณ์ของเครือข่าย IP over WDM ที่มีการใช้งานเมื่อมีการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่ายมีดังนี้



รูปที่ 5.2 โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM

ในการประมวลผลทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Processing) เป็นการประมวลผลเพื่อเลือกเส้นทางการขนส่งให้กับทราฟฟิก (traffic demand) ที่ไหลผ่านเข้าสู่แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) ซึ่งมีการกำหนดเส้นทางในการเดินทางไปยังจุดหมายปลายทางด้วยอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor) การใช้พลังงานจะเกิดขึ้นเมื่อมีทราฟฟิกไหลเข้าสู่แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) และมีการดำเนินการกำหนดเส้นทางหรือการดำเนินงานกรูมมิ่ง (grooming) ทราฟฟิกในโดเมนทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะมีการใช้พลังงานในการประมวลผลทราฟฟิกที่ไอพีเร้าท์เตอร์ กำหนดด้วยพารามิเตอร์ P_{RP} และ การใช้พลังงานของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) กำหนดด้วยพารามิเตอร์ P_{LC}

ช่องทางการรับส่งสัญญาณหรือเครื่องทรานสพอนเดอร์ WDM (WDM transponders) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อการส่งและรับข้อมูลระหว่างสัญญาณแสงและยังสัญญาณไฟฟ้า โดยสามารถแปลงข้อมูลในสัญญาณแสงไปยังสัญญาณไฟฟ้า (Optical to Electrical : OE) และแปลงข้อมูลในสัญญาณไฟฟ้าไปยังสัญญาณแสง (Electrical to Optical : EO) ซึ่ง WDM transponders นี้อยู่ในตำแหน่งระหว่างชั้นไอพีและชั้น WDM ซึ่งการใช้พลังงานในส่วนนี้กำหนดด้วยพารามิเตอร์ P_{tr}

อุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (Optical Cross Connect : OXC) เป็นส่วนที่มีไมโครเทคโนโลยี (Micro Electro Mechanical Systems : MEMS) เป็นองค์ประกอบ ซึ่ง MEMS หมายถึงระบบขนาดเล็กตั้งแต่ 1 ไมโครเมตรถึง 1 มิลลิเมตรที่รวมโครงสร้างทางกลและวงจรอิเล็กทรอนิกส์

เข้าด้วยกัน MEMS อยู่ในอุปกรณ์ OXC ซึ่ง OXC เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนเส้นทางเดินของแสงในเครือข่ายใยแก้วนำแสง (Fiber optical network) เพื่อให้ข้อมูลเดินทางไปยังปลายทางที่ต้องการได้ การใช้พลังงานในส่วนนี้กำหนดด้วยพารามิเตอร์ P_0

อุปกรณ์รวมสัญญาณทางแสง (Optical multiplexer) เป็นอุปกรณ์แสงที่ทำหน้าที่รวมสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันแล้วป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงเส้นเดียว ส่วนอุปกรณ์แยกสัญญาณทางแสง (Optical demultiplexer) เป็นอุปกรณ์แสงที่ทำหน้าที่ตรงกันข้ามกล่าวคือทำหน้าที่แยกสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ที่ส่งมาในเส้นใยแก้วนำแสงหนึ่งเส้นออกเป็นความยาวคลื่นต่าง ๆ ซึ่งการใช้พลังงานของอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (multiplexer/demultiplexer) กำหนดด้วยพารามิเตอร์ P_{MD}

อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA) เนื่องจากสัญญาณที่เดินทางในระหว่างเส้นทางการขนส่งจะมีการลดทอนสัญญาณเกิดขึ้น การลดทอนสัญญาณทำให้แสงมีค่าความเข้มแสงอ่อนลง จึงต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณพร้อมกัน ให้มีขนาดความเข้มแสงมากพอที่จะเดินทางต่อไปไกล ๆ ได้ หากระยะทางระหว่างสถานีไกลมาก อาจต้องมีตัวขยายสัญญาณแสงมากกว่าหนึ่งทีโดยปกติระยะห่างระหว่างตัวขยายสัญญาณ ในระบบเส้นใยนำแสงมีค่าประมาณ 30-80 กิโลเมตร (บางระบบอาจถูกออกแบบให้มีค่ามากกว่า 100 กิโลเมตร) สำหรับระบบสื่อสารที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1550 นาโนเมตร ตัวขยายสัญญาณแสงที่นิยมใช้ ได้แก่ EDFA ซึ่งมีการใช้พลังงานเมื่อมีการขยายสัญญาณในโดเมนทางแสงนี้กำหนดด้วยพารามิเตอร์ P_E นอกจากการขยายสัญญาณระหว่างเส้นทางการเชื่อมโยงแล้ว ยังมีการขยายสัญญาณเมื่อทราฟฟิกมีการขนส่งออกจากโหนดต้นทาง และมีการขยายสัญญาณเมื่อสัญญาณเดินทางไปถึงโหนดปลายทางอีกด้วย

อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerators) เป็นการทวนสัญญาณในชั้น WDM ซึ่งทำหน้าที่ปรับสัญญาณพัลส์แสงที่บานออก เมื่อเดินทางในสายส่งเส้นใยแก้วนำแสง เนื่องจากปรากฏการณ์การผิเคเพี้ยนของสัญญาณ (Dispersion) ทำให้ความกว้างของสัญญาณพัลส์เกิดการบานออก ตามระยะทางที่เดินทาง ผลลัพธ์ก็คือเกิดการผิเคเพี้ยนของสัญญาณ ที่เป็นตัวจำกัดปริมาณข้อมูลหรือทำให้อัตราเร็วของข้อมูลสูงสุดของระบบลดลง ดังนั้นระบบ WDM จึงมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ชดเชยการบานออกของสัญญาณพัลส์ซึ่ง คือ อุปกรณ์ทวนสัญญาณ เพื่อทำหน้าที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออกให้มีขนาดคงที่ตลอดการเดินทางอยู่เสมอ เนื่องจากระบบ WDM มีความยาวคลื่นแสงหลายค่า ผลของการผิเคเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดย่อมมีผลกระทบกับทุกช่องสัญญาณด้วย ยิ่งระบบมีจำนวนช่องสัญญาณมาก ก็ต้องยิ่งให้ความสำคัญดูแลและเอาใจใส่กับผลกระทบของการผิเคเพี้ยนของสัญญาณมากขึ้นด้วย ซึ่งการใช้ตัวทวนสัญญาณเกิดขึ้นระหว่างเส้นทางการเชื่อมโยงของโหนดต้นทาง-

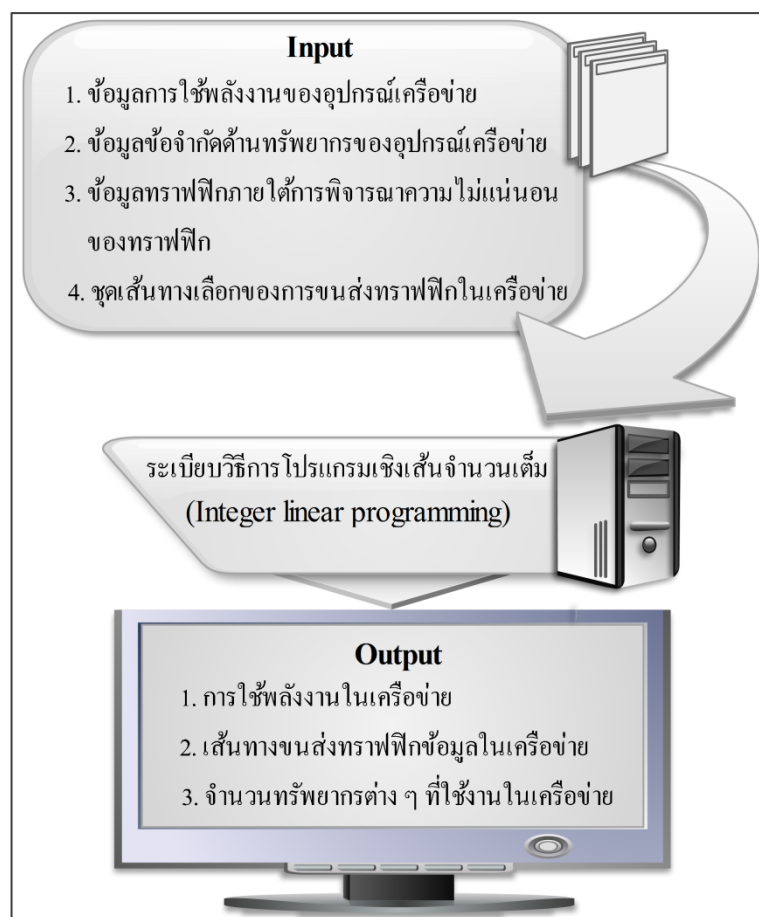
ปลายทาง สำหรับการใช้พลังงานเมื่อมีการปรับปรุงสัญญาณใน โดเมนทางแสงนี้กำหนดด้วย พารามิเตอร์ P_G

5.3 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

การใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกข้อมูลภายในเครือข่ายแกนหลักสำหรับเครือข่าย IP over WDM นั้นมีการใช้พลังงานที่สูงมาก ดังที่กล่าวถึงองค์ประกอบของการใช้พลังงานในเครือข่าย ในหัวข้อที่ 5.2 การใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิกข้อมูลนั้นมีการใช้พลังงานอยู่สอง องค์ประกอบที่สำคัญ คือ อุปกรณ์ในส่วนของชั้น ไอพี (IP layer) และอุปกรณ์ในส่วนของชั้น WDM (WDM layer) และสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกข้อมูลภายในเครือข่าย คือ ปริมาณกราฟฟิก ซึ่งเป็นที่ชัดเจนว่าปริมาณกราฟฟิกที่ไหลเข้าสู่เครือข่ายนั้นมีปริมาณที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้งานของผู้ใช้บริการในเวลานั้น เพื่อให้มีการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ผู้วิจัยจึงนำเสนอเทคนิคการวางแผนกราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิกด้วยการพิจารณาเป็นระดับการ รับประกันความไม่แน่นอนดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.8

ในการวางแผนกราฟฟิกของงานวิจัยในบทนี้ได้เลือกวิธีการกำหนดปัญหาเป็นการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming : ILP) เช่นเดียวกับงานวิจัยในบทที่ 4 ซึ่ง ประกอบไปด้วยสองส่วนสำคัญ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) และสมการเงื่อนไข (constraint) งานวิจัยนี้มีเป้าหมาย คือ ต้องการวางแผนกราฟฟิกเพื่อให้มีการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิกข้อมูลในเครือข่าย IP over WDM ที่น้อยที่สุด สำหรับเงื่อนไขนั้นก็เป็นส่วนหนึ่ง ที่สำคัญเพื่อให้การดำเนินงานวิจัยได้บรรลุเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งประกอบไปด้วยเงื่อนไขการ จัดสรรเส้นทางของกราฟฟิกข้อมูล โดยมีชุดเส้นทางเลือกในการขนส่งสำหรับกราฟฟิกข้อมูล ซึ่ง ในกระบวนการหาคำตอบนั้นจะทำการเลือกเส้นทางสำหรับกราฟฟิกข้อมูลที่ทำให้ได้คำตอบของ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด และยังมีเงื่อนไขด้านทรัพยากรต่าง ๆ ของอุปกรณ์เครือข่าย ซึ่งเป็น ข้อจำกัดของจำนวนทรัพยากรที่สามารถเลือกใช้งานได้สำหรับการขนส่งกราฟฟิกข้อมูลใน เครือข่าย เมื่อกำหนดปัญหาเป็นการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเรียบร้อยแล้ว จากนั้นเมื่อผ่าน กระบวนการหาคำตอบของการ โปรแกรมเชิงเส้นก็จะได้รับการจัดสรรเส้นทางของกราฟฟิกที่ทำให้ เกิดการใช้พลังงานในเครือข่ายน้อยที่สุดภายใต้การพิจารณากราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน รวมถึง จำนวนของทรัพยากรต่าง ๆ ที่มีการใช้งานเพื่อการขนส่งกราฟฟิกนั้น โดยการทำงานของปัญหา การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 แสดงถึงคำตอบของปัญหาที่ตั้งไว้ (เอาต์พุต) ซึ่งเป็นคำตอบที่ได้จากการนำข้อมูลอินพุตผ่านกระบวนการหาคำตอบแบบระเบียบวิธีการ

โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม จากนั้นเมื่อได้กำหนดปัญหาเหล่านี้เป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงดำเนินการแปลงปัญหาเหล่านี้ให้กลายเป็นสมการคณิตศาสตร์ โดยแสดงอยู่ในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 5.3 ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น

5.4 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์

การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการวางแผนกราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้กราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ต้องการให้การใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกบนเครือข่ายมีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุด โดยใช้สมการที่ได้พัฒนาขึ้นจากโครงสร้างสถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM ที่แสดงดังรูปที่ 5.2 และมีสมการเงื่อนไข คือ เงื่อนไขการเลือกเส้นทางของการขนส่งกราฟฟิกข้อมูลในเครือข่าย โดยที่แต่ละกราฟฟิกข้อมูลสามารถเลือกได้เพียงหนึ่งเส้นทางเท่านั้น และในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าของวัตถุประสงค์ที่ต้องการนั้น ยังต้องมีเงื่อนไขที่ประกอบไป

ด้วยข้อจำกัดของทรัพยากรต่าง ๆ ของอุปกรณ์เครือข่าย ได้แก่ เงื่อนไขข้อจำกัดแบนด์วิดท์ของความยาวคลื่น (Wavelength) เงื่อนไขข้อจำกัดการใช้จำนวนความยาวคลื่นต่อสายใยแก้วนำแสง (Fiber optic) และเงื่อนไขข้อจำกัดการใช้จำนวนความยาวคลื่นต่ออุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (multi/demultiplexers) การแปลงวัตถุประสงค์และเงื่อนไขเหล่านี้ให้เป็นสมการคณิตศาสตร์นั้นนำไปสู่การวางแผนกราฟฟิคได้อย่างเหมาะสมที่สุดต่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือการเลือกเส้นทางของกราฟฟิคข้อมูลได้อย่างเหมาะสมนั้นส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานในเครือข่ายที่น้อยที่สุด โดยในการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ได้มีการใช้ตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งมีค่านิยามดังต่อไปนี้

เซตของตัวแปร :

- A คือ เซตของข่ายเชื่อมโยงในชั้น WDM สำหรับเครือข่าย IP over WDM
- D คือ เซตของโหนดกราฟฟิค
- P^k คือ เซตของชุดเส้นทางสำหรับกราฟฟิค k โดยที่ $\forall k \in D$
- N คือ เซตของโหนดในเครือข่าย IP over WDM

ตัวแปรตัดสินใจ :

- $f^{k,p}$ คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไบนารี $\{0, 1\}$ เป็นตัวแปรที่ระบุการเลือกเส้นทางสำหรับกราฟฟิค k ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อกราฟฟิค 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) ที่กำหนดให้ใช้งานสำหรับกราฟฟิคที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ j โดยที่ $\forall j \in A$
- Nf_j คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม เป็นตัวแปรที่ระบุจำนวนของใยแก้วนำแสงที่กำหนดให้ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ j โดยที่ $\forall j \in A$
- MD_j คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม เป็นตัวแปรที่ระบุจำนวนของอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (multi/demultiplexers) ที่ใช้ระหว่างโหนดต้นทาง-ปลายทาง บนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ j โดยที่ $\forall j \in A$

พารามิเตอร์ค่าคงที่ :

- V_m คือ จำนวนเต็มที่ระบุจำนวนของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) ที่ใช้งานที่แต่ละ โหนด m โดยที่ $\forall m \in N$
- Y_m คือ จำนวนเต็มที่ระบุจำนวนของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (Route Processor) ที่ใช้งานที่แต่ละ โหนด 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 $\forall k \in D$ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดของ x_k เพิ่มเติมได้ในหัวข้อที่ 2.8
- T_k^m คือ ตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ตัวแปรระบุว่าทราฟฟิก k ไหลผ่าน โหนดต้นทาง m มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อทราฟฟิก k ไหลผ่าน โหนดต้นทาง m และมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่ได้ไหลผ่าน โหนดต้นทาง m โดยที่ $\forall k \in D, \forall m \in N$
- $\delta_j^{k,p}$ คือ ตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ เป็นตัวแปรที่ระบุข่ายเชื่อมโยงที่มีการใช้งานในเส้นทาง p สำหรับทราฟฟิก 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
P_{total}	คือ พลังงานทั้งหมดที่ใช้สำหรับการขนส่งทราฟฟิกข้อมูลในเครือข่าย

สำหรับการกำหนดปัญหาด้วยสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม เนื่องจากในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจที่ระบุจำนวนของช่องสัญญาณความยาวคลื่นที่กำหนดให้ใช้งานสำหรับทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง j ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็มที่ระบุจำนวนของใยแก้วนำแสงที่กำหนดให้ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง j และตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็มที่ระบุจำนวนของอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณที่ใช้ระหว่างโนดต้นทาง-ปลายทางบนข่ายเชื่อมโยง j ในงานวิจัยนี้ยังมีตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไบนารี นั่นคือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะมีค่าเป็นตัวเลขได้เพียงสองค่าคือ 0 หรือ 1 เท่านั้น ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจที่ใช้ในการเลือกเส้นทางสำหรับความต้องการ k ซึ่งตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไบนารีก็คือเป็นตัวแปรตัดสินใจที่อยู่ในรูปของจำนวนเต็ม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ที่มีส่วนประกอบคือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข โดยผู้วิจัยได้เรียกชุดสมการคณิตศาสตร์นี้ว่า โมเดลพลังงาน ซึ่งการออกแบบสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหของงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

5.4.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้แสดงถึงความต้องการให้มีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

$$\min_{\forall j} \left[\begin{aligned} & \sum_{m \in N} P_{LC} \cdot V_m + \sum_{m \in N} P_{RP} \cdot Y_m + 2 \cdot \sum_{k \in D} P_{tr} \cdot \beta_k + \sum_{j \in A} P_o \cdot \omega_j \\ & + \sum_{j \in A} P_{MD} \cdot MD_j + \sum_{j \in A} (P_E \cdot EA_j + P_G \cdot EG_j) \cdot Nf_j \end{aligned} \right] \quad (5.1)$$

5.4.2 สมการเงื่อนไข

ในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้มาซึ่งตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ จึงต้องมีสมการเงื่อนไขที่เป็นเงื่อนไขการเลือกเส้นทางของกราฟฟิกข้อมูล และเงื่อนไขที่ประกอบไปด้วยข้อจำกัดของทรัพยากรต่าง ๆ ของอุปกรณ์เครือข่าย ซึ่งสมการเหล่านี้เป็นเงื่อนไขข้อจำกัดของปัญหาในการวิจัยที่ทำให้ได้มาซึ่งวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ประกอบด้วย 7 สมการ โดยสามารถแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เงื่อนไขในการเลือกใช้เส้นทางในการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย

1. สำหรับการเลือกเส้นทางในเครือข่าย เพื่อไม่ให้มีการเลือกเส้นทางที่ซ้ำซ้อน เงื่อนไขนี้จึงระบุว่าความต้องการของกราฟฟิก k ให้สามารถเลือกได้เพียงหนึ่งเส้นทางจากเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ชุดของเส้นทาง P^k

$$\sum_{p \in P^k} f^{k,p} = 1 \quad \forall k \in D \quad (5.2)$$

กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย

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

$$\sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} \cdot f^{k,p} \cdot x_k \leq B_\omega \cdot \omega_j \quad \forall j \in A \quad (5.3)$$

3. เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนสายใยแก้วนำแสงนั้น (fiber optic) มีเพียงพอต่อจำนวนของความยาวคลื่นที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง j

$$\omega_j \leq W_f \cdot Nf_j \quad \forall j \in A \quad (5.4)$$

4. เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (multi/demultiplexers) นั้น มีเพียงพอต่อจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง j

$$\omega_j \leq W_{MD} \cdot MD_j \quad \forall j \in A \quad (5.5)$$

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

$$\omega_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (5.6)$$

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

$$Nf_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (5.7)$$

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

$$MD_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (5.8)$$

สำหรับพารามิเตอร์ x_k นั้นสามารถคำนวณได้ตามวิธีที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.8 ดังที่ Liu, B. (2009) กล่าวไว้ว่าให้พิจารณาโครงสร้างแบบเงื่อนไขข้อจำกัดแบบมีโอกา (Chance constraint) เพื่อให้แน่ใจว่าการจัดสรรความจุหรือแบนด์วิทบนการเชื่อมโยงจะมีมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่ไม่แน่นอน

นอกจากสมการเงื่อนไขแล้วยังมีสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

สมการที่ใช้ในการคำนวณจำนวนแฉงวงจรถอบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) ที่ใช้งานที่โนด m แสดงดังสมการที่ (5.9) เป็นผลรวมความจุของทุกทราฟฟิก k ที่ไหลผ่าน โหนดต้นทาง m หารด้วยแบนด์วิทของแฉงวงจรถอบคุมการไหลของทราฟฟิก

$$V_m = \left\lceil \frac{\sum_{k \in D} x_k T_k^m}{B_{LC}} \right\rceil \quad \forall m \in N \quad (5.9)$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณจำนวนของช่องสัญญาณความยาวคลื่น (Wavelength channels) ที่ใช้งานสำหรับทราฟฟิกข้อมูล k แสดงดังสมการที่ (5.10) ซึ่งเป็นความจุของปริมาณทราฟฟิก k หารด้วยแบนด์วิทของช่องสัญญาณความยาวคลื่น

$$\beta_k = \left\lceil \frac{x_k}{B_\omega} \right\rceil \quad \forall k \in D \quad (5.10)$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณจำนวนอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor) ที่ใช้งานที่โนด m แสดงดังสมการที่ (5.12) ซึ่งคือจำนวนของแฉงวงจรถอบคุมการไหลของทราฟฟิกที่ใช้งานในโนด m หารด้วยจำนวนของแฉงวงจรถอบคุมการไหลของทราฟฟิกที่สามารถใช้ได้ต่ออุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง

$$Y_m = \left\lceil \frac{V_m}{N_{LC}} \right\rceil \quad \forall m \in N \quad (5.12)$$

5.5 การวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม

การวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม (Complexity of Algorithm) ในบทนี้มีลักษณะการวิเคราะห์เช่นเดียวกับบทที่ 4 ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วว่า การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหรือความซับซ้อนของอัลกอริทึมโดยทั่วไปสามารถพิจารณาได้จาก 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การวิเคราะห์เวลาที่ต้องใช้ในการประมวลผล (Time Complexity) และการวิเคราะห์หน่วยความจำที่ต้องใช้ในการประมวลผล (Space Complexity) สำหรับงานวิจัยในบทนี้มีรูปแบบอัลกอริทึมเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเช่นเดียวกับบทที่ 4 จึงทำให้สามารถวัดความซับซ้อนของอัลกอริทึมได้จากพื้นที่หน่วยความจำที่ใช้ในการประมวลผล (Space Complexity) โดยสามารถทำการวัดได้จากจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables) พื้นที่การค้นหา (Search space) และจำนวนเงื่อนไข (Constraints)

การวิเคราะห์หน่วยความจำที่ต้องใช้ในการประมวลผลของอัลกอริทึม หรือขนาดของปัญหา (Problem size) แสดงดังต่อไปนี้

5.5.1 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables)

การวิเคราะห์จำนวนตัวแปรการตัดสินใจสำหรับขั้นตอนวิธีนี้ (Algorithm) ประกอบไปด้วย 3 ตัวแปรการตัดสินใจ คือ $y, z, f^{k,p}$ ซึ่งแต่ละตัวแปรการตัดสินใจนั้นมีจำนวนดังต่อไปนี้

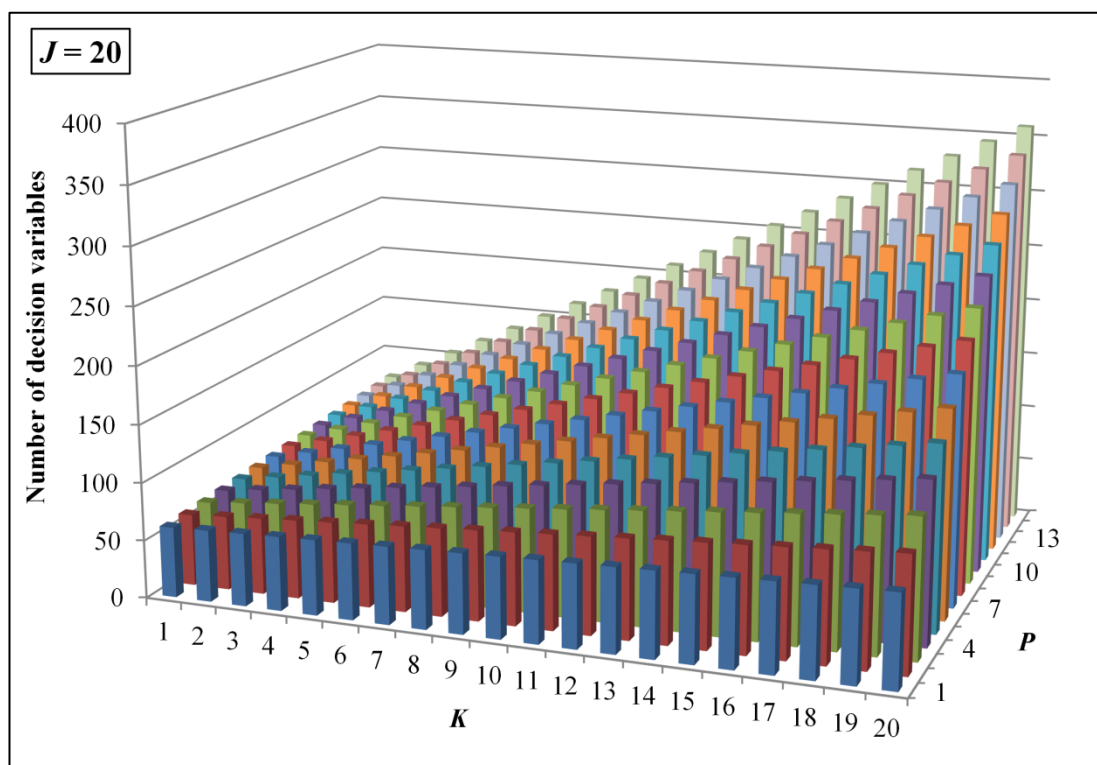
$$\begin{aligned} f^{k,p} &= f^{1,1}, f^{1,2}, f^{1,3}, \dots, f^{K,P} && \text{ดังนั้น มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ } f \text{ เท่ากับ } |K||P| \text{ ตัว} \\ \omega_j &= \omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_j && \text{ดังนั้น มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ } \omega \text{ เท่ากับ } |J| \text{ ตัว} \\ Nf_j &= Nf_1, Nf_2, Nf_3, \dots, Nf_j && \text{ดังนั้น มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ } z \text{ เท่ากับ } |J| \text{ ตัว} \\ MD_j &= MD_1, MD_2, MD_3, \dots, MD_j && \text{ดังนั้น มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ } r \text{ เท่ากับ } |J| \text{ ตัว} \end{aligned}$$

ดังนั้น จำนวนตัวแปรการตัดสินใจทั้งหมดสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนตัวแปรการตัดสินใจทั้งหมด} &= |J| + |J| + |K||P| + |J| \\ &= 3|J| + |K||P| \end{aligned} \quad (5.13)$$

จากสมการที่ (5.13) แสดงให้เห็นว่าเป็นสมการคำนวณจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่มีรูปแบบสมการเป็นแบบพหุนาม (Polynomial) ซึ่งตัวอย่างจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่คำนวณได้จากสมการที่ (5.13) แสดงดังตารางที่ 5.3 ซึ่งได้มีการปรับขนาดของตัวแปร ๆ เพื่อดูการ

เปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ และจำนวนตัวแปรการตัดสินใจยังแสดงดังรูปที่ 5.4 เป็นการเปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามจำนวนอินพุตที่เพิ่มขึ้น แน่แน่นอนว่าลักษณะเช่นนี้แสดงถึงการเพิ่มขึ้นตามรูปแบบของสมการพหุนาม



รูปที่ 5.4 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เมื่อ $J = 20$

5.5.2 พื้นที่การค้นหา (Search space)

Search space คือ ชุดของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดสำหรับอัลกอริทึมหรือปัญหานั้น ซึ่งอัลกอริทึมนี้สามารถหา Search space ได้จากคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของตัวแปรการตัดสินใจ ซึ่งคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของแต่ละตัวแปรการตัดสินใจแสดงดังตารางที่ 5.1 และมีแนวคิดดังต่อไปนี้

สำหรับตัวแปร f มีคำตอบที่เป็นไปได้คือ 0 และ 1 และตัวแปรการตัดสินใจ $f^{k,p}$ มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ $|K||P|$ ตัว ดังนั้น ตัวแปรการตัดสินใจ $f^{k,p}$ มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ $2^{K \cdot P}$

สำหรับตัวแปร ω มีคำตอบที่เป็นไปได้คือจำนวนเต็มบวก โดยกำหนดให้เท่ากับ ค่าคงที่ X และตัวแปรการตัดสินใจ ω_j มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ $|J|$ ตัว ดังนั้นตัวแปรการตัดสินใจ ω_j มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ X^J

สำหรับตัวแปร Nf มีคำตอบที่เป็นไปได้คือจำนวนเต็มบวก โดยกำหนดให้เท่ากับ ค่าคงที่ Y และตัวแปรการตัดสินใจ Nf_j มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ $|J|$ ตัว ดังนั้นตัวแปรการตัดสินใจ Nf_j มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ Y^J

สำหรับตัวแปร MD มีคำตอบที่เป็นไปได้คือจำนวนเต็มบวก โดยกำหนดให้เท่ากับ ค่าคงที่ Z และตัวแปรการตัดสินใจ MD_j มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ $|J|$ ตัว ดังนั้นตัวแปรการตัดสินใจ MD_j มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ Z^J

ตารางที่ 5.1 สรุปคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปรการตัดสินใจ

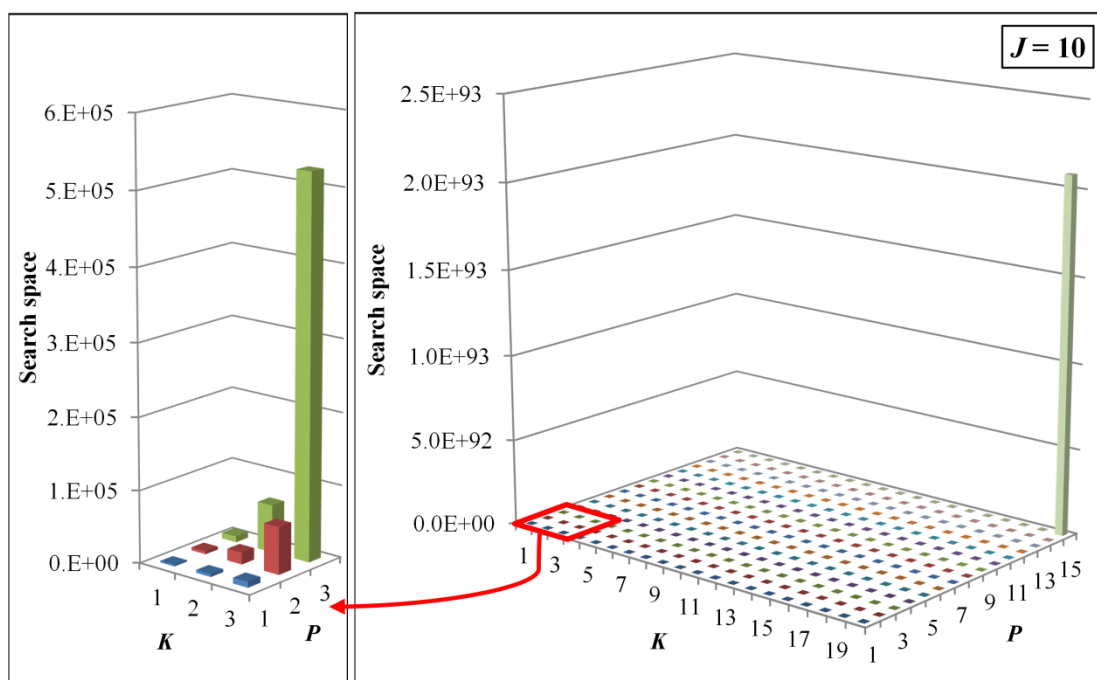
ตัวแปรการตัดสินใจ	คำตอบที่เป็นไปได้
f^p	2^{K^p}
ω_j	X^J
Nf_j	Y^J
MD_j	Z^J

จากคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปร เมื่อนำคำตอบเหล่านี้มาหาชุดคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหาสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Search space} &= 2^{K^p} \cdot X^J \cdot Y^J \cdot Z^J \\ &= (X \cdot Y \cdot Z)^J \cdot 2^{K^p} \end{aligned} \quad (5.14)$$

ตัวอย่างขนาดของ Search space จากสมการที่ (5.14) แสดงดังตารางที่ 5.3 โดยสมมติให้ค่าคงที่ของจำนวนช่องสัญญาณความยาวคลื่นนั้น (X) มีค่าเท่ากับ 2, ค่าคงที่ของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง (Y) มีค่าเท่ากับ 1 และค่าคงที่ของจำนวนอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (Z) มีค่าเท่ากับ 1 ในตารางที่ 5.3 นั้นได้มีการปรับขนาดของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อการเปลี่ยนแปลงของขนาด Search space ซึ่งมีรูปแบบของสมการแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) และขนาดของ Search space ยังแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 เมื่อกำหนดให้ J มีค่าเท่ากับ 10 ซึ่งสามารถเห็น

ได้อย่างชัดเจนสำหรับความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลว่าขนาด Search space สูงมาก ๆ เมื่อ อินพุตมีค่ามากที่สุด ซึ่งแตกต่างจากขนาด Search space ของอินพุตอื่น ๆ ที่ต่ำมากจนแทบมองไม่เห็นความแตกต่างกันเลย ลักษณะแบบนี้แสดงให้เห็นถึงการก้าวกระโดดของขนาด Search space เมื่อมีจำนวนอินพุตเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการแบบเอกซ์โพเนนเชียลนั่นเอง



รูปที่ 5.5 ขนาดของพื้นที่การค้นหา

5.5.3 จำนวนเงื่อนไข (Constraints)

การวิเคราะห์จำนวนเงื่อนไขหรือจำนวนข้อจำกัดของปัญหานี้ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการเงื่อนไขของอัลกอริทึมนั้น ซึ่งงานวิจัยในบทนี้สามารถแสดงจำนวนเงื่อนไขได้ดังตารางที่ 5.2 อย่างเช่น สมการที่ (5.3) เป็นเงื่อนไขที่แสดงถึงว่า การเลือกใช้จำนวนความยาวคลื่นของทุก j ต้องเป็นไปตามสมการเงื่อนไขที่กำหนด โดยที่ $j = 1, 2, 3, \dots, J$ ดังนั้นจึงทำให้สามารถนับจำนวนเงื่อนไขได้ว่ามีจำนวนเท่ากับ J เงื่อนไข

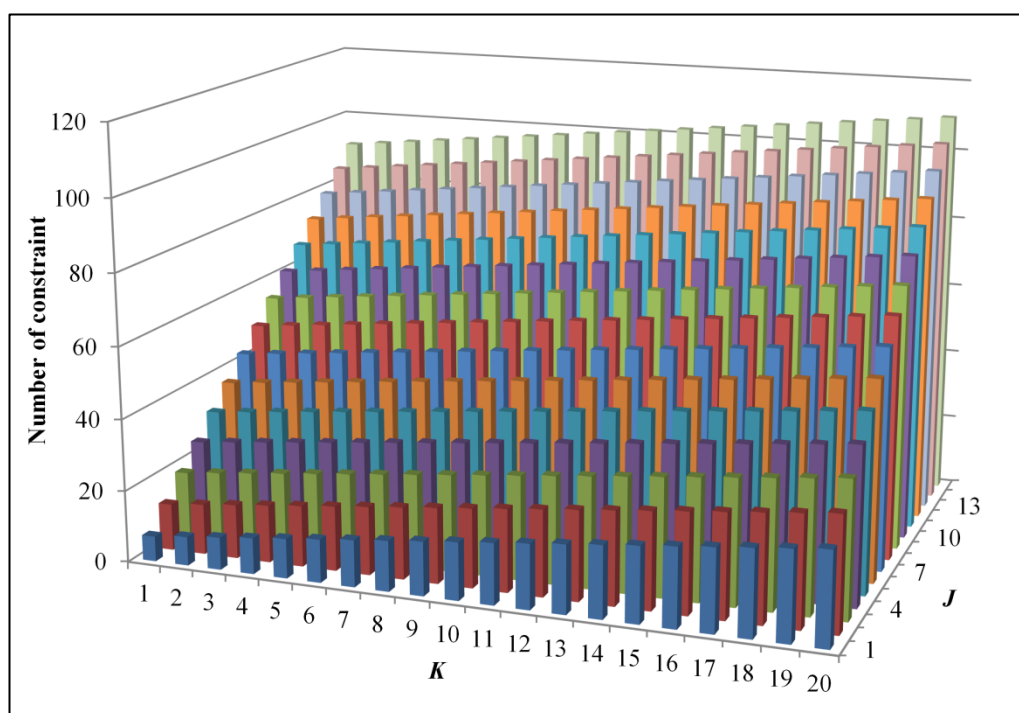
ตารางที่ 5.2 จำนวนเงื่อนไข

สมการเงื่อนไข	จำนวนเงื่อนไข
$\sum_{p \in P^k} f^{k,p} = 1 \quad \forall k \in D \quad (5.2)$	K
$\sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} \cdot f^{k,p} \cdot x_k \leq B_\omega \cdot \omega_j \quad \forall j \in A \quad (5.3)$	J
$\omega_j \leq W_f \cdot Nf_j \quad \forall j \in A \quad (5.4)$	J
$\omega_j \leq W_{MD} \cdot MD_j \quad \forall j \in A \quad (5.5)$	J
$\omega_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (5.6)$	J
$Nf_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (5.7)$	J
$MD_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (5.8)$	J

ดังนั้น จำนวนเงื่อนไขทั้งหมดจึงเท่ากับผลรวมของจำนวนเงื่อนไขของแต่ละสมการเงื่อนไข ซึ่งสมการคำนวณจำนวนเงื่อนไขสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนเงื่อนไข} &= J + J + J + J + J + J + K \\
 &= 6 \cdot J + K
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

สมการที่ (5.15) นี้แสดงให้เห็นว่าเป็นสมการคำนวณจำนวนเงื่อนไขที่มีรูปแบบสมการเป็นแบบพหุนาม (Polynomial) ซึ่งตัวอย่างของการคำนวณจำนวนเงื่อนไขจากสมการที่ (5.15) แสดงดังตารางที่ 5.3 ซึ่งได้มีการปรับขนาดของตัวแปร ๆ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเงื่อนไข และแสดงดังรูปที่ 5.6 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเงื่อนไขที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามจำนวนอินพุตที่เพิ่มขึ้น แน่แน่นอนว่าลักษณะเช่นนี้แสดงถึงการเพิ่มขึ้นตามรูปแบบของสมการพหุนามนั่นเอง



รูปที่ 5.6 จำนวนเงื่อนไข

5.5.4 การเปรียบเทียบความซับซ้อนของอัลกอริทึม

นอกจากการวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้แล้ว ผู้วิจัยได้พบว่า มีงานวิจัยที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ งานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) ซึ่งเป็นงานวิจัยที่มีการตรวจสอบการใช้พลังงานในเครือข่ายภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิกเช่นกัน โดยในงานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างจากงานวิจัยนี้ คือ เป็นเพียงฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อการเลือกใช้พลังงานของแผงวงจรควบคุมการไหลของกราฟฟิก (line card) และโครงสร้างของอุปกรณ์เครือข่าย (chassis) เท่านั้น และยังมีการแบ่งการคิดพลังงานตามช่วงเวลาอีกด้วย ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการตรวจสอบความซับซ้อนของอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) โดยดำเนินการเปรียบเทียบในการใช้พื้นที่ในการประมวลผล (Space Complexity) ได้แก่ จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables), พื้นที่การค้นหา (Search space) และจำนวนเงื่อนไข (Constraints) ด้วยการพิจารณางานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) เพียง 1 ช่วงเวลาเท่านั้น และพิจารณาเฉพาะโครงสร้างของงานที่เหมือนกันเท่านั้น เพื่อให้มีความเสมอภาคกันในการเปรียบเทียบข้อมูล ซึ่งสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

5.5.4.1 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables)

ในการเปรียบเทียบจำนวนตัวแปรการตัดสินใจนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์สำหรับตัวแปรการเลือกเส้นทางและตัวแปรการใช้งานอุปกรณ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้คือคือตัวแปร f^p และ ω_j ตามลำดับ ดังนั้นจากหัวข้อที่ 5.5.1 ในงานวิจัยนี้จึงมีการพิจารณาจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่ใช้เปรียบเทียบความซับซ้อนของอัลกอริทึมดังนี้

$$\text{จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ} = K \cdot P + J \quad (5.16)$$

สำหรับในงานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) นั้น สามารถพิจารณาจำนวนตัวแปรการตัดสินใจดังกล่าวได้ดังนี้

$$\text{จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ} = N^2 \cdot D + N^2 \quad (5.17)$$

โดยที่ในงานวิจัยดังกล่าวมีค่านิยามของตัวแปรดังต่อไปนี้

N คือ จำนวนโนดในเครือข่าย

D คือ จำนวนทราฟฟิก

จากนั้นจึงทำการพิจารณาเชิงตัวเลขด้วยการใช้เครือข่าย NSFNET และ COST239 ซึ่งแสดงในหัวข้อที่ 5.7 ดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ โดยเครือข่าย NSFNET มีจำนวนโนดเท่ากับ 14 โหนด และจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาแบบไปกลับเท่ากับ 44 ข่ายเชื่อมโยง และเครือข่าย COST239 มีจำนวนโนดเท่ากับ 11 โหนด และจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาแบบไปกลับเท่ากับ 52 ข่ายเชื่อมโยง สมมติว่ามีจำนวนทราฟฟิก 80 ทราฟฟิก และจำนวนชุดทางเลือกสำหรับทราฟฟิกเท่ากับ 10 ทางเลือก ซึ่งการพิจารณาเชิงตัวเลขแสดงดังตารางที่ 5.3 เห็นได้ชัดเจนเลยว่าในงานวิจัยที่นำเสนอนี้มีการใช้จำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่น้อยกว่ามาก ๆ และยังสามารถคิดเป็นร้อยละของการใช้จำนวนตัวแปรการตัดสินใจของงานวิจัยที่นำเสนอต่อตัวแปรการตัดสินใจของงานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) ดังตารางที่ 5.4 แสดงให้เห็นชัดเจนว่างานวิจัยที่นำเสนอนี้ใช้ตัวแปรการตัดสินใจไม่ถึงร้อยละ 10 ของงานวิจัยดังกล่าว

ตารางที่ 5.3 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ

เครือข่าย	จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ	
	งานวิจัยที่นำเสนอ	งานวิจัยของ Addis, B. และคณะ (2013)
NSFNET	844	15876
COST239	852	9801

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบการใช้จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ

เครือข่าย	ร้อยละของการใช้จำนวนตัวแปรการตัดสินใจของงานวิจัยที่นำเสนอ ต่อตัวแปรการตัดสินใจของงานวิจัยของ Addis, B. และคณะ (2013)
NSFNET	5.32%
COST239	8.69%

5.5.4.2 พื้นที่การค้นหา (Search space)

ในการเปรียบเทียบพื้นที่การค้นหานี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์สำหรับตัวแปรการเลือกเส้นทางและตัวแปรการใช้งานอุปกรณ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้คือคือตัวแปร $f^{k,p}$ และ ω ตามลำดับ ดังนั้นจากหัวข้อที่ 5.5.2 ในงานวิจัยนี้จึงมีการพิจารณาพื้นที่การค้นหาที่ใช้เปรียบเทียบความซับซ้อนของอัลกอริทึมดังนี้

$$\text{Search space} = 2^{K \cdot P} \cdot Y^I \quad (5.18)$$

สำหรับในงานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) นั้น สามารถพิจารณาจำนวนตัวแปรการตัดสินใจดังกล่าวได้ดังนี้

$$\text{Search space} = 2^{D \cdot N^2} \cdot \gamma^N \quad (5.18)$$

โดยที่ในงานวิจัยดังกล่าวมีค่านิยมของตัวแปรดังต่อไปนี้

N คือ จำนวนโนดในเครือข่าย

D คือ จำนวนทรานฟฟิก

Y คือ จำนวนอุปกรณ์

จากนั้นจึงทำการพิจารณาเชิงตัวเลขด้วยการใช้เครือข่าย NSFNET และ COST239 เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.5.4.1 โดยเครือข่าย NSFNET มีจำนวนโนดเท่ากับ 14 โหนด และจำนวนสายเชื่อมโยงที่พิจารณาแบบไปกลับเท่ากับ 44 สายเชื่อมโยง และเครือข่าย COST239 มีจำนวนโนดเท่ากับ 11 โหนด และจำนวนสายเชื่อมโยงที่พิจารณาแบบไปกลับเท่ากับ 52 สายเชื่อมโยง สมมติว่ามีจำนวนทรานฟฟิก 80 ทรานฟฟิก, จำนวนชุดทางเลือกสำหรับทรานฟฟิกเท่ากับ 10 ทางเลือก และจำนวนอุปกรณ์เท่ากับ 5 ซึ่งการพิจารณาเชิงตัวเลขแสดงดังตารางที่ 5.5 เห็นได้ชัดเจนเลยว่าในงานวิจัยที่นำเสนอมีการใช้ Search space ที่น้อยกว่ามาก ๆ และยังสามารถคิดเป็นร้อยละของการใช้ Search space ของงานวิจัยที่นำเสนอต่อการใช้ Search space ของงานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) ดังตารางที่ 5.6 แสดงให้เห็นว่างานวิจัยที่นำเสนอใช้ Search space ไม่ถึงร้อยละ 1 ของงานวิจัยดังกล่าว

ตารางที่ 5.5 พื้นที่การค้นหา

เครือข่าย	Search space	
	งานวิจัยที่นำเสนอ	งานวิจัยของ Addis, B. และคณะ (2013)
NSFNET	3.79×10^{271}	8.63×10^{4729}
COST239	1.48×10^{277}	4.56×10^{2921}

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบการใช้พื้นที่การค้นหา

เครือข่าย	ร้อยละของการใช้ Search space ของงานวิจัยที่นำเสนอ ต่อ Search space ของงานวิจัยของ Addis, B. และคณะ (2013)
NSFNET	$4.39 \times 10^{-4457} \%$
COST239	$3.25 \times 10^{-2643} \%$

5.5.4.3 จำนวนเงื่อนไข (Constraints)

ในการเปรียบเทียบจำนวนเงื่อนไขนี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์สำหรับเงื่อนไขการเลือกเส้นทางซึ่งในงานวิจัยนี้คือ สมการที่ (5.2) และเงื่อนไขการใช้งานอุปกรณ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้คือ สมการที่ (5.2) สมการที่ (5.6) ดังนั้นจากหัวข้อที่ 5.5.3 ในงานวิจัยนี้จึงมีการพิจารณาจำนวนเงื่อนไขที่ใช้เปรียบเทียบความซับซ้อนของอัลกอริทึมดังนี้

$$\text{จำนวนเงื่อนไข} = 2 \cdot J + K \quad (5.19)$$

สำหรับในงานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) นั้น สามารถพิจารณาจำนวนเงื่อนไขดังกล่าวได้ดังนี้

$$\text{จำนวนเงื่อนไข} = 2 \cdot N^2 + N \cdot D \quad (5.20)$$

โดยที่ในงานวิจัยดังกล่าวมีคำนิยามของตัวแปรดังต่อไปนี้

N คือ จำนวนโนดในเครือข่าย

D คือ จำนวนทราฟฟิก

จากนั้นจึงทำการพิจารณาเชิงตัวเลขด้วยการใช้เครือข่าย NSFNET และ COST239 เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.5.4.1 โดยเครือข่าย NSFNET มีจำนวนโนดเท่ากับ 14 โหนด และจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาแบบไปกลับเท่ากับ 44 ข่ายเชื่อมโยง และเครือข่าย COST239 มีจำนวนโนดเท่ากับ 11 โหนด และจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาแบบไปกลับเท่ากับ 52 ข่ายเชื่อมโยง สมมติว่ามีจำนวนทราฟฟิก 80 ทราฟฟิก และจำนวนชุดทางเลือกสำหรับทราฟฟิกเท่ากับ 10 ทางเลือกซึ่งการพิจารณาเชิงตัวเลขแสดงดังตารางที่ 5.7 เห็นได้ชัดเจนเลยว่าในงานวิจัยที่นำเสนอนี้มีจำนวนเงื่อนไขที่น้อยกว่ามาก ๆ และยังสามารถคิดเป็นร้อยละเพื่อเปรียบเทียบการใช้จำนวนเงื่อนไขในการประมวลผลของงานวิจัยที่นำเสนอต่อการใช้จำนวนเงื่อนไขในการประมวลผลของงานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) ดังตารางที่ 5.8 แสดงให้เห็นชัดเจนว่างานวิจัยที่นำเสนอใช้จำนวนเงื่อนไขในการประมวลผลไม่ถึงร้อยละ 20 ของงานวิจัยดังกล่าว

ตารางที่ 5.7 จำนวนเงื่อนไข

เครือข่าย	จำนวนเงื่อนไข	
	งานวิจัยที่นำเสนอ	งานวิจัยของ Addis, B. และคณะ (2013)
NSFNET	168	1512
COST239	184	1122

ตารางที่ 5.8 การเปรียบเทียบการใช้จำนวนเงื่อนไขในการประมวลผล

เครือข่าย	ร้อยละของการใช้จำนวนเงื่อนไขของงานวิจัยที่นำเสนอ ต่อจำนวนเงื่อนไขของงานวิจัยของ Addis, B. และคณะ (2013)
NSFNET	11.11%
COST239	16.40%

5.5.5 สรุปความซับซ้อนของอัลกอริทึม

5.5.5.1 ขนาดของปัญหา (Problem size) ในงานวิจัยนี้

ขนาดของปัญหาสำหรับอัลกอริทึมที่มีรูปแบบเป็นการโปรแกรมเชิงเส้น จำนวนเต็มในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables) พื้นที่การค้นหา (Search space) และจำนวนเงื่อนไข (Constraints) ซึ่งสมการการคำนวณเพื่อหาจำนวนหรือขนาดของสิ่งเหล่านี้เป็นสมการที่มีองค์ประกอบของตัวแปร J , K และ P ดังนั้นขนาดของปัญหาจะมีการเปลี่ยนแปลงตามจำนวน J , K และ P ที่เปลี่ยนไป ซึ่งจำนวนตัวแปรการตัดสินใจและจำนวนเงื่อนไขมีการขนาดเพิ่มขึ้นในรูปแบบของสมการพหุนาม (Polynomial) ส่วนขนาดของ Search space มีขนาดเพิ่มขึ้นในรูปแบบของสมการเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) โดยสามารถเห็นความแตกต่างสำหรับขนาดของปัญหาได้ในตารางที่ 5.9 เมื่ออินพุตแต่ละตัวเปลี่ยนไป

ตารางที่ 5.9 ขนาดของปัญหา

<i>J</i>	<i>K</i>	<i>P</i>	จำนวนตัวแปรตัดสินใจ	Size search space	จำนวนเงื่อนไข
5	5	3	30	3.44×10^{15}	106
5	5	4	35	1.10×10^{17}	131
5	5	5	40	3.52×10^{18}	156
5	5	3	30	3.44×10^{15}	106
5	6	3	33	2.75×10^{16}	122
5	7	3	36	2.20×10^{17}	138
5	8	3	39	1.76×10^{18}	154
5	10	3	45	1.13×10^{20}	186
5	15	3	60	3.69×10^{24}	266
5	20	3	75	1.21×10^{29}	346
10	5	3	45	3.60×10^{26}	206
10	5	4	50	1.15×10^{28}	256
10	5	5	55	3.69×10^{29}	306
10	5	6	60	1.18×10^{31}	356
10	5	7	65	3.78×10^{32}	406
10	5	8	70	1.21×10^{34}	456
10	5	9	75	3.87×10^{35}	506
10	5	10	80	1.24×10^{37}	556
10	5	8	70	1.21×10^{34}	456
10	6	8	78	3.09×10^{36}	537
10	7	8	86	7.92×10^{38}	618
10	8	8	94	2.03×10^{41}	699
10	9	8	102	5.19×10^{43}	780
10	10	8	110	1.33×10^{46}	861
10	15	8	150	1.46×10^{58}	1266
10	20	8	190	1.61×10^{70}	1671
5	10	8	95	1.27×10^{35}	436

ตารางที่ 5.9 ขนาดของปัญหา (ต่อ)

<i>J</i>	<i>K</i>	<i>P</i>	จำนวนตัวแปรตัดสินใจ	Size search space	จำนวนเงื่อนไข
6	10	8	98	2.03×10^{37}	521
7	10	8	101	3.25×10^{39}	606
8	10	8	104	5.19×10^{41}	691
9	10	8	107	8.31×10^{43}	776
10	10	8	110	1.33×10^{46}	861
15	10	8	125	1.39×10^{57}	1286
20	10	8	140	1.46×10^{68}	1711

5.5.5.2 การเปรียบเทียบความซับซ้อนของอัลกอริทึม

จากการตรวจสอบความซับซ้อนของอัลกอริทึมของทั้งสองงานวิจัย พบว่างานวิจัยที่นำเสนอมีความซับซ้อนของอัลกอริทึมน้อยกว่างานวิจัยของ Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) อย่างมาก ซึ่งงานวิจัยทั้งสองที่มีประสิทธิภาพเหมือนกันในเรื่องการกำหนดเส้นทางของกราฟฟิกเพื่อการการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิก แต่กลับมีความซับซ้อนของอัลกอริทึมที่แตกต่างกันมากดังแสดงในตารางที่ 5.10 และตารางที่ 5.11 งานวิจัยที่นำเสนอใช้พื้นที่ในการประมวลผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับงานวิจัยดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยที่นำเสนอจึงเป็นเทคนิคที่มีความซับซ้อนของอัลกอริทึมที่ต่ำกว่าในส่วนของพื้นที่ในการประมวลผล (Space Complexity) ซึ่งการใช้อัลกอริทึมที่มีพื้นที่ในการประมวลผลมากเกินไป อาจเสี่ยงกับการประมวลผลเพื่อหาผลลัพธ์แล้วไม่ได้รับผลลัพธ์ออกมา เพราะคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการประมวลผลไม่สามารถรองรับขนาดของอัลกอริทึมได้

ตารางที่ 5.10 สรุปการใช้พื้นที่ในการประมวลผล

ประเภทของการวิเคราะห์	เครือข่าย	การใช้พื้นที่ในการประมวลผล (Space Complexity)	
		งานวิจัยที่นำเสนอ	งานวิจัยของ Addis, B. และคณะ (2013)
จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ	NSFNET	844	15876
	COST239	852	9801
Search space	NSFNET	3.79×10^{271}	8.63×10^{4729}
	COST239	1.48×10^{277}	4.56×10^{2921}
จำนวนเงื่อนไข	NSFNET	168	1512
	COST239	184	1122

ตารางที่ 5.11 สรุปการเปรียบเทียบการใช้พื้นที่ในการประมวลผล

ประเภทของการวิเคราะห์	เครือข่าย	ร้อยละของการใช้พื้นที่ในการประมวลผลของงานวิจัยที่นำเสนอต่องานวิจัยของ Addis, B. และคณะ (2013)
จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ	NSFNET	5.32%
	COST239	8.69%
Search space	NSFNET	$4.39 \times 10^{-4457}\%$
	COST239	$3.25 \times 10^{-2643}\%$
จำนวนเงื่อนไข	NSFNET	11.11%
	COST239	16.40%

5.6 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

ในการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาผลคำตอบที่ดีที่สุดนั้น งานวิจัยในบทนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio เช่นเดียวกับงานวิจัยในบทที่ 4 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถแปลงสมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นที่ได้ออกแบบไว้ให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรมได้อย่างง่าย มีประสิทธิภาพ และเป็นที่ยอมรับในงานวิจัยสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นอย่างแพร่หลาย โดยโปรแกรมนี้ได้อัปเดตอริทึมซิมเพล็กซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแก้ปัญหาของการโปรแกรมเชิงเส้นในการหาคำตอบที่ต้องการ ซึ่งผู้ใช้งานสามารถศึกษารายละเอียดเพื่อทำความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับหลักการและกระบวนการใช้งานโปรแกรมได้ในภาคผนวก ก. และในคู่มือสำหรับอ้างอิงจาก <http://www.ibm.com>

ตารางที่ 5.12 แสดงคำสั่งที่ใช้ในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio สำหรับเทคนิคการวางแผนกราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ซึ่งเป็นการแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบสามส่วน คือ ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข ให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรมเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 5.12 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

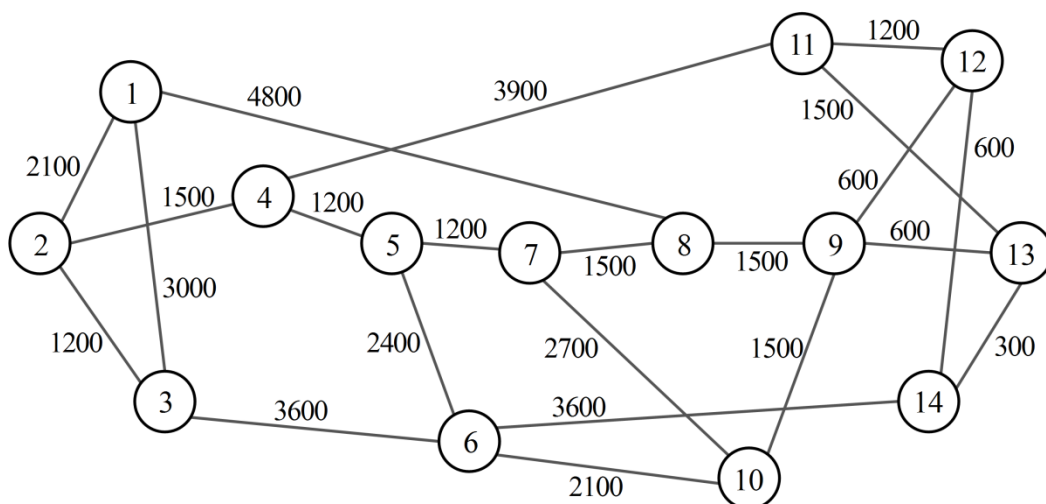
สมการคณิตศาสตร์	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	//Decision Variable
$f^{k,p}$	dvar int f[demand][path] in 0..1;
ω_j	dvar int w[link];
Nf_j	dvar int fj[link];
MD_j	dvar int MD[link];
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	//Objective function
สมการ(5.1)	minimize sum(m in node)(PLC*Vm[m]) + sum(m in node)(PRP*Y[m]) + 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];

ตารางที่ 5.12 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (ต่อ)

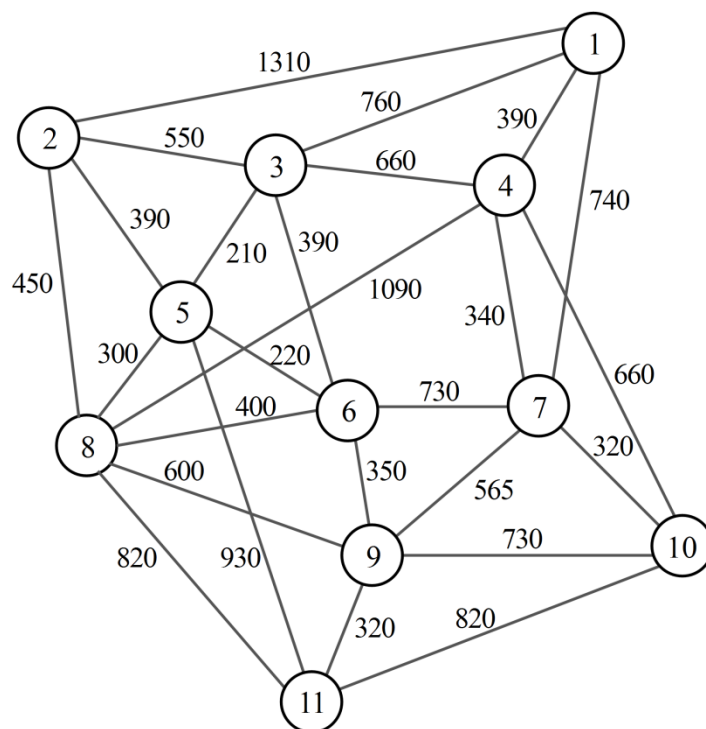
สมการคณิตศาสตร์	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
เงื่อนไข	subject to {
สมการ(5.2)	ct1 : forall (k in demand) sum(p in path)f[k][p]==1;
สมการ(5.3)	ct2 : forall (j in link) sum(k in demand, p in path)x[k]*s[k][p][j]*f[k][p] <= Bw*w[j];
สมการ(5.4)	ct3 : forall (j in link) w[j] <= Wf*fj[j];
สมการ(5.5)	ct4 : forall (j in link) w[j] <= WMD*MD[j];
สมการ(5.6)	ct5 : forall (j in link) w[j] >= 0;
สมการ(5.7)	ct6 : forall (j in link) fj[j] >= 0;
สมการ(5.8)	ct7 : forall (j in link) MD[j] >= 0;

5.7 การทดลองออกแบบโครงข่ายเสมือน

ในการออกแบบการทดลองนั้นได้ดำเนินการทดลองโดยใช้เครือข่าย NSFNET และเครือข่าย COST239 แสดงดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ สำหรับกราฟิกที่มีความต้องการขนส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนดต้นทาง-ปลายทาง ในเครือข่าย NSFNET อ้างอิงจากงานของ Miyao, Y. and Saito, H. (1998) และเครือข่าย COST239 อ้างอิงจากงานของ Somani, A. K. (2006) เนื่องจากเครือข่าย COST239 มีขนาดเล็ก ผู้วิจัยจึงได้ทำการเพิ่มความยาวสายเชื่อมโยงเป็นสองเท่าเพื่อให้เห็นถึงการเลือกใช้งานอุปกรณ์ในเครือข่ายอย่างชัดเจนและเพื่อให้ทั้งสองเครือข่ายมีขนาดเครือข่ายใกล้เคียงกัน ซึ่งจะช่วยให้เห็นถึงการหาคำตอบว่ามีผลแตกต่างกันอย่างไรเมื่อใช้เครือข่ายที่มีขนาดเท่า ๆ กัน แต่มีโครงสร้างเครือข่ายต่างกัน ซึ่งการดำเนินการทดลองในรูปแบบนี้ได้มีการดำเนินการในงานวิจัยของ Musumeci, F., Tornatore, M. and Pattavina, A. (2012) สำหรับกราฟิกที่ใช้ในการทดลอง ผู้วิจัยพิจารณาปริมาณกราฟิกข้อมูลในเครือข่ายภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟิก โดยพิจารณาด้วยระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟิก



รูปที่ 5.7 โครงสร้างเครือข่าย NSFNET (ความยาวของสายเชื่อมต่อโยงหน่วยเป็น km.)



รูปที่ 5.8 โครงสร้างเครือข่าย COST239 (ความยาวของสายเชื่อมต่อโยงหน่วยเป็น km.)

สำหรับการพิจารณาระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกข้อมูลที่ต้องการขนส่งในเครือข่าย ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาที่ระดับค่าเฉลี่ย 90% 95% และ 99% โดยผู้วิจัยได้อ้างอิงค่าเฉลี่ยของทราฟฟิก (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทราฟฟิก (Standard deviation : SD) จากการนำข้อมูลทราฟฟิกที่มีการเก็บข้อมูลทางสถิติในงานวิจัยบทที่ 3 มาดำเนินการเพิ่มสัดส่วนปริมาณทราฟฟิกให้มีปริมาณที่สูงขึ้นด้วยการเพิ่มในอัตราส่วนที่เท่ากันทุกทราฟฟิก เพื่อให้ปริมาณทราฟฟิกที่ใช้ทดลองมีขนาดที่เทียบเท่ากับทราฟฟิกที่มีอยู่ในเครือข่ายแกนหลักในปัจจุบัน โดยการดำเนินการทดลองนี้ได้ใช้ทราฟฟิกที่มีคุณลักษณะการกระจายแบบปกติ (normal distribution) ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทราฟฟิกคือ 2.00 Gbps และ 0.19 Gbps ตามลำดับ มาคำนวณหาความจุช่องสัญญาณ (x_c) ที่ต้องใช้เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับต่าง ๆ ด้วยวิธีการที่แสดงอยู่ในหัวข้อที่ 2.8 ซึ่งความจุช่องสัญญาณสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.14 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองสำหรับเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ส่วนตารางที่ 5.15 แสดงการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่าย ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นอินพุตในกระบวนการหาคำตอบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

ตารางที่ 5.13 การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

Guarantee level	Mean (μ)	SD (σ)	$P((x-\mu)/\sigma \geq z) = \alpha$	$x = \mu + \Phi^{-1}(\alpha)\sigma$ (Gbps)
Mean	2.00	0.19	0.50	2.00
90%	2.00	0.19	0.90	2.24
95%	2.00	0.19	0.95	2.31
99%	2.00	0.19	0.99	2.44

ตารางที่ 5.14 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนทราฟฟิก

พารามิเตอร์	ค่า
ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (S)	80 กิโลเมตร
ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณ	400 กิโลเมตร
แบนด์วิธของแต่ละความยาวคลื่น	2.5 Gbps
จำนวนความยาวคลื่นต่อเส้นใยแก้วนำแสง	40 ความยาวคลื่น

ตารางที่ 5.14 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนทรานซพิก (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า
จำนวนความยาวคลื่นต่ออุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (multi/demultiplexer)	80 ความยาวคลื่น
แบนด์วิธของแต่ละแผงวงจรควบคุมการไหลของทรานซพิก (line card)	40 Gbps
จำนวนแผงวงจรควบคุมการไหลของทรานซพิกต่ออุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (Route processor)	16 แผงวงจร
ระดับการรับประกันความไม่แน่นอน	ค่าเฉลี่ย 90% 95% และ 99%

ตารางที่ 5.15 การใช้พลังงานของอุปกรณ์

อุปกรณ์	ค่าพลังงาน (W)
แผงวงจรควบคุมการไหลของทรานซพิก	415 ต่อแผงวงจร ¹
อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง	166 ต่อแผงวงจร ²
เครื่องทรานสปอนเดอร์ (Transponder)	34.5 ต่อความยาวคลื่น ³
อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFA)	25 ต่อเส้นใยแก้วนำแสง ⁴
อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Regenerator)	100 ต่อเส้นใยแก้วนำแสง ⁵
อุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC)	1.5 ต่อความยาวคลื่น ³
อุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ	811 ต่ออุปกรณ์ ²

หมายเหตุ

¹ Data sheet of Cisco CRS Carrier Routing System 16-Slot Line Card Chassis System Description, January 2012.

² Idzikowski, F. "Power consumption of network elements in IP over WDM networks," Tech. Rep., Telecommunication Networks Group (TKN), TU Berlin, Germany, 2009.

³ Musumeci, F., Tornatore, M. and Pattavina, A. "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 Data sheet of Cisco ONS 15216 EDFA, August 2001.

⁵ Dong, X., Lawey, A., El-Gorashi, T. E. H., and Elmighani, J. M. H. "Energy-efficient core networks," in Int. Conf. Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2012, pp. 1–9.

เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองแล้ว ในขั้นตอนของการประมวลผลหาคำตอบสำหรับการวางแผนกราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้กราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนนั้น ได้ใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio version 12.4 โดยใช้คอมพิวเตอร์รุ่น Intel® Core™ i3-370M ความเร็วซีพียู 2.4 GHz แรมขนาด 2 GB DDR3 ในการประมวลผลหาคำตอบ ซึ่งผลการประมวลผลหาคำตอบได้แสดงอยู่ในหัวข้อถัดไป สำหรับขั้นตอนการทดลองของงานวิจัยในบทนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองขั้นตอนดังต่อไปนี้

5.7.1 ขั้นตอนการดำเนินการตรวจสอบระหว่างการใช้พลังงานในเครือข่ายกับความไม่แน่นอนของกราฟฟิก

ขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบผลกระทบของกราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย โดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับแก้ไขปัญหาคำถามการวางแผนกราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้กราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนดังที่นำเสนอในหัวข้อที่ 5.4 ที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (5.1) คือ ต้องการให้การใช้พลังงานของอุปกรณ์ในเครือข่ายมีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุด โดยผู้วิจัยได้เรียกเทคนิคการวางแผนกราฟฟิกที่นำเสนอในบทนี้ว่า *โมเดลพลังงาน* ซึ่งคำตอบที่ได้รับ คือ พลังงานที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่าย และเส้นทางที่ใช้ในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่าย รวมถึงการใช้งานอุปกรณ์ในเครือข่าย

5.7.2 ขั้นตอนการดำเนินการตรวจสอบระหว่างการใช้พลังงานในเครือข่ายและความสมดุลของกราฟฟิกในเครือข่าย

นอกจากที่ผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญในด้านการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM ภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิกแล้ว เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือในการขนส่งข้อมูล ผู้วิจัยยังจำเป็นต้องวางแผนการจัดสรรกราฟฟิกให้มีประสิทธิภาพ ดังที่กล่าวในงายวิจัยบทที่ 4 ปัญหาของการขนส่งกราฟฟิกที่มักจะพบเห็น ได้แก่ ปัญหาความแออัดของกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยง หรือปัญหาของการหยุดชะงักในการขนส่งกราฟฟิกเมื่อเกิดกรณีข่ายเชื่อมโยงขาดหรือล้มเหลว ซึ่งเป็นปัญหาที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือในการบริการ ผู้วิจัยได้แก้ไขปัญหานี้ด้วยการวางแผนกราฟฟิกเพื่อความสมดุลของกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงภายในเครือข่ายแกนหลักดังที่แสดงในงายวิจัยบทที่ 4 ซึ่งจะช่วยให้กระจายกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงที่มีปริมาณกราฟฟิกสูงมาก ทำให้ปริมาณกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงลดลง แล้วจะมีการสูญเสียลดลงเมื่อข่ายเชื่อมโยงขาดหรือ

ล้มเหลว ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการตรวจสอบผลกระทบของการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกต่อความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่าย และยังทำการตรวจสอบผลกระทบของการใช้พลังงานเมื่อใช้เทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ซึ่งมีการดำเนินการดังนี้

ในขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบผลกระทบระหว่างการใช้เทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความไม่แน่นอนทราฟฟิกต่อสถานะความสมดุลของทราฟฟิกภายใน ซึ่งผู้วิจัยได้พิจารณาถึงความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายจากงานวิจัยในบทที่ 4 โดยพิจารณาด้วยสมการค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Deviation) ของไอพีทราฟฟิกที่ขนส่งเข้าสู่ข่ายเชื่อมโยงทางออปติคัลของชั้น WDM แสดงดังสมการที่ (5.21) ซึ่งสมการนี้ใช้เป็นตัวชี้วัดค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงในเครือข่าย ซึ่งเมื่อตัวชี้วัดค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกมีค่าสูง นั้นหมายความว่ามีความสมดุลของทราฟฟิกน้อย แต่ถ้าตัวชี้วัดค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกมีค่าน้อย นั้นหมายความว่ามีความสมดุลของทราฟฟิกมาก ผู้วิจัยดำเนินการตรวจสอบโดยการนำผลที่ได้จากการหาคำตอบของ โมเดลพลังงาน ในหัวข้อที่ 5.7.1 มาคำนวณค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงในเครือข่ายในสมการที่ (5.21) ซึ่งผลลัพธ์ที่น่าสนใจนี้ได้แสดงอยู่ในหัวข้อที่ 5.8.2 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายแสดงดังต่อไปนี้

$$UB = \frac{1}{n} \sum_{j \in A} \left| r_j - \frac{\sum_{j \in A} r_j}{n} \right| \quad (5.21)$$

นอกจากสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความไม่สมดุลแล้วยังมีสมการที่ใช้ในการคำนวณความจุที่ใช้เพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ไหลบนข่ายเชื่อมโยง j สำหรับ โมเดลพลังงาน แสดงดังสมการที่ (5.22) ซึ่งเป็นผลรวมความจุของทุกทราฟฟิก k ที่ไหลผ่านบนข่ายเชื่อมโยง j จากการเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิก p โดยการคำนวณความจุที่ใช้เพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ไหลบนข่ายเชื่อมโยง j สำหรับ โมเดลพลังงาน นี้เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงในเครือข่ายในสมการที่ (5.21)

$$r_j = \sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} \cdot f^{k,p} \cdot x_k \quad \forall j \in A \quad (5.22)$$

โดยที่

UB คือ ค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกที่ไหลภายในเครือข่าย

r_j คือ ตัวแปรที่ระบุความจุที่ใช้รองรับกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยง j โดยที่ $\forall j \in A$

n คือ จำนวนของข่ายเชื่อมโยงในเครือข่าย

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ดำเนินการตรวจสอบผลกระทบระหว่างการใช้เทคนิคการวางแผนกราฟฟิกเพื่อความสมดุลของกราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ภายใต้ความไม่แน่นอนกราฟฟิกต่อสถานะการใช้พลังงานภายในเครือข่าย โดยการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการวางแผนกราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีความสมดุลของกราฟฟิกมากที่สุดภายใต้กราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนได้มีการพิจารณาในบทที่ 4 ซึ่งได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ภายใต้วิธีการกำหนดปัญหาแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งผู้วิจัยเรียกว่า *โมเดลความสมดุล* โดยงานวิจัยในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์ คือ ต้องการให้มีความสมดุลของกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงภายในเครือข่าย IP over WDM มากที่สุด ดังนั้นในการตรวจสอบผลกระทบระหว่างการใช้เทคนิคการวางแผนกราฟฟิกเพื่อความสมดุลของกราฟฟิกในเครือข่ายต่อสถานะการใช้พลังงานนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับงานวิจัยในบทที่ 4 คือ ต้องการให้มีความไม่สมดุลของกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงภายในเครือข่ายที่น้อยที่สุด โดยใช้สมการค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของปริมาณไอพีกราฟฟิกที่ไหลเข้าสู่ข่ายเชื่อมโยงทางแสงของชั้น WDM แสดงดังสมการที่ (5.23) และมีสมการเงื่อนไขเช่นเดียวกับสมการคณิตศาสตร์การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความไม่แน่นอนของกราฟฟิก (*โมเดลพลังงาน*) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (5.2) - (5.8)

$$\min_{\forall p} \frac{1}{n} \sum_{j \in A} \left| r_j - \frac{\sum_{j \in A} r_j}{n} \right| \quad (5.23)$$

เมื่อผ่านกระบวนการหาคำตอบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มของ *โมเดลความสมดุล* แล้ว ผู้วิจัยได้นำคำตอบของการจัดสรรเส้นทางสำหรับกราฟฟิกมาคำนวณการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิกภายในเครือข่าย ซึ่งผู้วิจัยพิจารณาถึงการให้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิกภายในเครือข่าย IP over WDM จาก *โมเดลพลังงาน* ที่นำเสนอในบทนี้ ด้วยสมการที่ใช้ในการคำนวณการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิกภายในเครือข่าย IP over WDM แสดงดัง

สมการที่ (5.24) เมื่อได้คำตอบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้แสดงผลลัพธ์และการวิจารณ์ผลกระทบ ระหว่างการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิกภายในเครือข่ายและความสมดุลของกราฟฟิก ภายในเครือข่ายในหัวข้อถัดไป

$$P_{total} = \sum_{m \in N} P_{LC} \cdot V_m + \sum_{m \in N} P_{RP} \cdot Y_m + 2 \cdot \sum_{k \in D} P_{tr} \cdot \beta_k + \sum_{j \in A} P_O \cdot \omega_j + \sum_{j \in A} P_{MD} \cdot MD_j + \sum_{j \in A} (P_E \cdot EA_j + P_G \cdot EG_j) \cdot Nf_j \quad (5.24)$$

5.8 การวิเคราะห์ผลการออกแบบโครงข่ายเสมือน

เมื่อผู้วิจัยดำเนินการทดลองเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผลการหาคำตอบจากการ โปรแกรมเชิงเส้น จำนวนเต็มสำหรับปัญหาการวางแผนกราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีการใช้พลังงาน อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้กราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน และปัญหาการวางแผนกราฟฟิกใน เครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีความสมดุลของกราฟฟิกมากที่สุดภายใต้กราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน โดยใช้เครือข่าย NSFNET และ COST239 นั้น ได้มีการแบ่งหัวข้อการแสดงผลและวิจารณ์ ดังต่อไปนี้

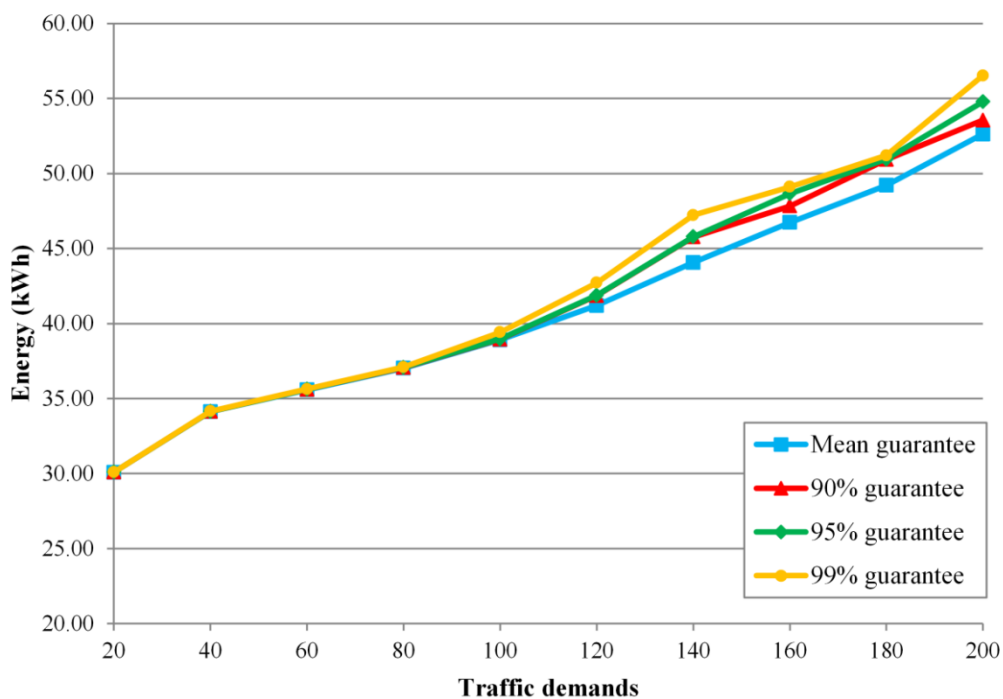
5.8.1 การใช้พลังงานในเครือข่ายกับความไม่แน่นอนของกราฟฟิก

ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบเทคนิคการวางแผนกราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมี ประสิทธิภาพภายใต้ความไม่แน่นอนของกราฟฟิก ซึ่งการเปรียบเทียบการใช้พลังงานสำหรับการ ขนส่งกราฟฟิกภายในเครือข่าย NSFNET และ COST239 แสดงดังรูปที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิกที่ระดับค่าเฉลี่ย 90% 95% และ 99% สำหรับการ ใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่าย NSFNET เมื่อจำนวนกราฟฟิกที่ ต้องการขนส่งระหว่างคู่โหนดในเครือข่ายมีจำนวน 20-100 คู่โหนด พบว่าที่แต่ละระดับการรับประกัน ความไม่แน่นอนของกราฟฟิกมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกัน เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางของแต่ละ ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิกส่งผลให้มีการใช้อุปกรณ์ที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ มีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อจำนวนกราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่างคู่โหนดในเครือข่ายมี มากขึ้น คือ 120 - 200 คู่โหนด การรับประกันความไม่แน่นอนในระดับที่สูงก็มีการใช้พลังงานที่ มากกว่าการรับประกันความไม่แน่นอนในระดับที่ต่ำกว่า กล่าวคือเครือข่ายมีการใช้พลังงานน้อยลง เมื่อมีระดับการรับประกันความไม่แน่นอนที่น้อยลง เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางของการ รับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิกที่ระดับสูงมีการใช้อุปกรณ์ในเครือข่ายที่มากกว่าการ

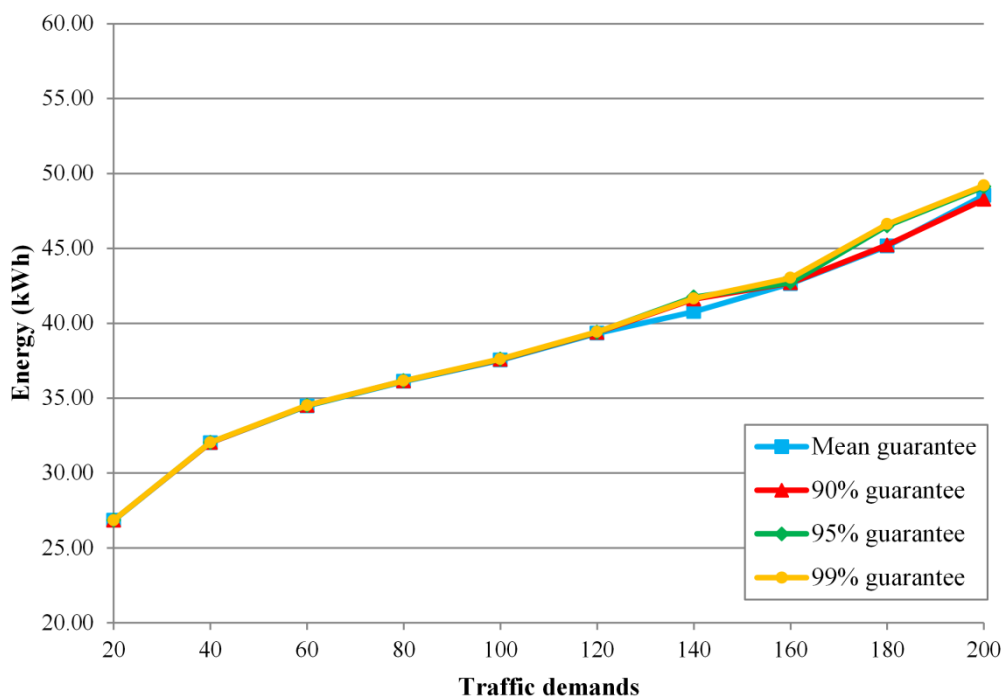
จัดสรรเส้นทางของการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคที่ระดับต่ำ สำหรับการใช้จ่ายพลังงานในการขนส่งกราฟฟิคในเครือข่าย COST239 นั้น พบว่าแต่ละระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกัน เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางของแต่ละระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคส่งผลให้มีการใช้อุปกรณ์ที่ใกล้เคียงกัน จึงทำให้มีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิคในเครือข่ายของทั้งเครือข่าย NSFNET และ COST239 นั้น พบว่ามีผลการทดลองในลักษณะที่คล้ายกัน คือ ทั้งเครือข่าย NSFNET และ COST239 มีการใช้พลังงานที่สูงกว่า 45 kWh ซึ่งทั้งสองเครือข่ายมีทิศทางแนวโน้มการใช้พลังงานที่คล้ายคลึงกัน เนื่องจากขนาดเครือข่ายมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่ก็มีการใช้พลังงานที่มีขนาดต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากทั้งสองเครือข่ายมีโครงสร้างเครือข่ายที่แตกต่างกัน จึงทำให้การจัดสรรเส้นทางของกราฟฟิคภายในเครือข่ายมีการเลือกใช้อุปกรณ์ที่ต่างกัน ดังนั้นการใช้พลังงานของทั้งสองเครือข่ายจึงมีความแตกต่างกันเล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานจากการเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคที่แตกต่างกันระหว่างทั้งสองเครือข่ายนั้น พบว่าในเครือข่าย NSFNET ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคมีผลอย่างมากต่อการใช้จ่ายพลังงานในการขนส่งกราฟฟิค ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.9 ผู้วิจัยจึงขอเสนอแนะว่า ในการเลือกใช้อุปกรณ์เพื่อรองรับปริมาณกราฟฟิคในเครือข่ายนั้น แทนที่ผู้ให้บริการจะใช้ความจุสูงสุดสำหรับขนส่งกราฟฟิคข้อมูลในเครือข่าย ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานอย่างมาก ผู้ให้บริการควรที่จะเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคที่ให้ความจุในการรองรับกราฟฟิคที่เหมาะสมต่อความสำคัญของกราฟฟิคข้อมูล ซึ่งทำให้ผู้ให้บริการสามารถใช้พลังงานที่สูญเสียไปในการขนส่งกราฟฟิคภายในเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ และถึงแม้ว่าจะมีเครือข่ายที่ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคมีผลน้อยต่อการใช้จ่ายพลังงานในการขนส่งกราฟฟิคในเครือข่าย อย่างเครือข่าย COST239 ที่แสดงดังรูปที่ 5.10 ผู้ให้บริการก็ยังคงควรคำนึงถึงการเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคที่เหมาะสมต่อความสำคัญของกราฟฟิคข้อมูล เนื่องจากการคำนึงถึงการเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคยังสามารถช่วยในการประหยัดทรัพยากรเครือข่ายได้อย่างมาก เช่น แบนด์วิดท์ของอุปกรณ์ในเครือข่าย



รูปที่ 5.9 การใช้พลังงานสำหรับแต่ละความไม่แน่นอนของกราฟฟิกในเครือข่าย NSFNET



รูปที่ 5.10 การใช้พลังงานสำหรับแต่ละการไม่แน่นอนของกราฟฟิกในเครือข่าย COST239

5.8.2 การใช้พลังงานและความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่าย

นอกจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจสอบเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้ว เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือในการขนส่งข้อมูล ผู้วิจัยยังให้ความสำคัญกับคุณภาพในการให้บริการของเครือข่าย IP over WDM ซึ่งผู้วิจัยคำนึงถึงความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่าย โดยทำการพิจารณา *โมเดลความสมดุล* (min UB) ที่นำเสนอในบทที่ 4 ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่นำเสนอใน *โมเดลพลังงาน* (min Power) ซึ่งการเปรียบเทียบค่าความไม่สมดุลสำหรับการขนส่งทราฟฟิกภายในเครือข่าย NSFNET และ COST239 แสดงดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ สำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับค่าเฉลี่ย 90% 95% และ 99% ผลแสดงให้เห็นว่าทั้ง *โมเดลความสมดุล* และ *โมเดลพลังงาน* ที่แต่ละระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น มีผลให้ค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับที่สูงมีปริมาณทราฟฟิกต่อการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดที่สูงกว่าการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับที่ต่ำ จึงทำให้ค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อใช้การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับที่น้อย ทำให้ได้รับความสมดุลของทราฟฟิกที่มากกว่าการใช้การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับที่สูง แต่ก็มีบางกรณีสำหรับ *โมเดลพลังงาน* ที่การใช้การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับที่สูงแล้วได้รับความสมดุลของทราฟฟิกที่มากกว่า คือ กรณีในเครือข่าย NSFNET ที่ใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99% ที่มีจำนวนทราฟฟิกขนส่งในเครือข่าย 200 คู่โหนด ซึ่งที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากการจัดสรรเส้นทางของกรณีใน *โมเดลพลังงาน* ที่ทำให้ใช้พลังงานน้อยที่สุดแล้วยังเป็นการจัดสรรเส้นทางที่ทำให้ได้รับความสมดุลของทราฟฟิกที่ดีกว่าการใช้การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับ 90% และ 95%

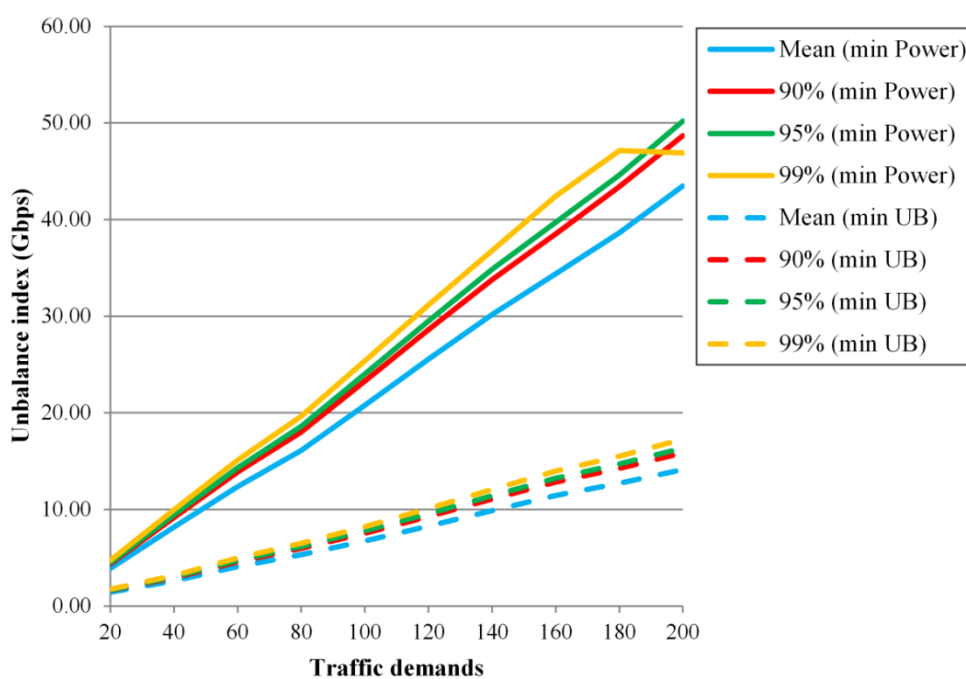
เมื่อทำการพิจารณาทั้งสองเครือข่ายสำหรับ *โมเดลความสมดุล* พบว่าการทดลองในเครือข่าย NSFNET แสดงดังรูปที่ 5.11 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการจัดสรรเส้นทางของทราฟฟิกที่มีจำนวนทราฟฟิกในเครือข่ายมากขึ้นส่งผลให้มีค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกมากขึ้นเช่นกัน แต่การทดลองในเครือข่าย COST239 แสดงดังรูปที่ 5.12 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไม่จะมีจำนวนทราฟฟิกในเครือข่ายเท่าไร การจัดสรรเส้นทางของทราฟฟิกก็สามารถจัดสรรให้มีความสมดุลของทราฟฟิกได้ดีมาก เนื่องจากทั้งสองเครือข่ายมีโครงข่ายเครือข่ายที่แตกต่างกัน จึงทำให้เครือข่าย COST239 สามารถจัดสรรเส้นทางที่ทำให้ได้รับความสมดุลของทราฟฟิกมากกว่าโครงสร้างเครือข่าย NSFNET

ถึงแม้ว่าในการใช้ *โมเดลพลังงาน* นี้ทำให้ได้รับการใช้พลังงานในเครือข่ายที่น้อยที่สุดดังที่แสดงในหัวข้อที่ 5.8.1 แต่เมื่อทำการพิจารณาความสมดุลของกราฟฟิกในเครือข่ายแล้ว สำหรับ *โมเดลพลังงาน* นี้พบว่าผลกระทบอย่างมากต่อความสมดุลของกราฟฟิกสำหรับทั้งสองเครือข่ายแสดงดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 โดยการ *ใช้ โมเดลพลังงาน* มีค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกที่สูงกว่าการใช้ *โมเดลความสมดุล* อย่างมาก เนื่องจาก *โมเดลพลังงาน* มีการจัดสรรเส้นทางเพื่อต้องการให้มีการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิกข้อมูลในเครือข่ายที่น้อยที่สุด ด้วยสาเหตุของการจัดสรรเส้นทางเพื่อต้องการให้มีการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิกข้อมูลในเครือข่ายที่น้อยที่สุดนั้น จึงทำให้กราฟฟิกไปรวมขนส่งอยู่บนข่ายเชื่อมโยงเดียวกัน และทำให้การใช้งานอุปกรณ์ลดลง เป็นผลให้มีการใช้พลังงานที่ลดลง และเป็นเหตุให้ปริมาณกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงมีความแตกต่างกันมาก จึงทำให้การใช้ *โมเดลพลังงาน* มีค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกที่สูงมาก กล่าวคือการใช้ *โมเดลพลังงาน* มีความสมดุลของกราฟฟิกในเครือข่ายน้อยมากเมื่อเทียบกับ *โมเดลความสมดุล* ที่มีการจัดสรรเส้นทางเพื่อต้องการให้มีความสมดุลของกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงภายในเครือข่ายที่มากที่สุด

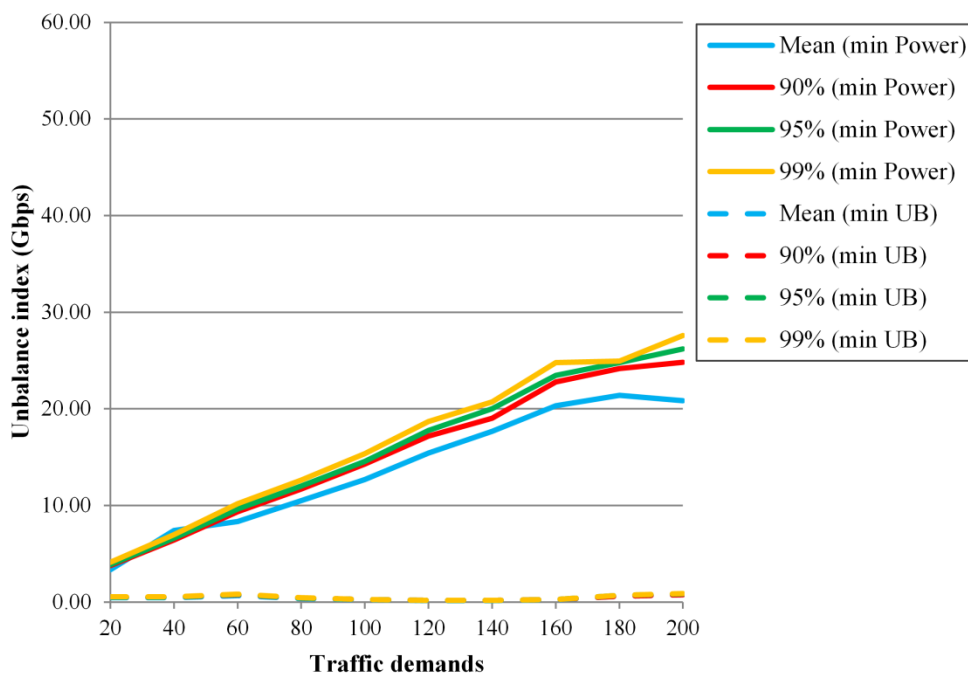
เมื่อพิจารณาความสมดุลของกราฟฟิกที่ได้จากการจัดสรรเส้นทางของทั้งสองโมเดลแล้ว จึงนำ *โมเดลความสมดุล* มาพิจารณาการใช้พลังงาน ซึ่งการเปรียบเทียบการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิกภายในเครือข่าย NSFNET และ COST239 แสดงดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าในการใช้ *โมเดลความสมดุล* นี้ได้ให้ความสมดุลของกราฟฟิกในเครือข่ายอย่างมาก แต่เมื่อนำมาพิจารณาการใช้พลังงานพบว่าผลกระทบอย่างมากต่อการใช้พลังงาน โดยมีการใช้พลังงานที่สูงกว่าการใช้ *โมเดลพลังงาน* อย่างมาก ดังที่แสดงในรูปที่ 5.13 และ 5.14 เนื่องจาก *โมเดลความสมดุล* มีการจัดสรรเส้นทางเพื่อต้องการให้มีค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงภายในเครือข่ายที่น้อยที่สุด เป็นเหตุให้ต้องการกระจายกราฟฟิกเพื่อความสมดุลของกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงภายในเครือข่าย จึงทำให้มีการใช้งานอุปกรณ์เป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับ *โมเดลพลังงาน* ที่มีการจัดสรรเส้นทางเพื่อให้มีการใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิกข้อมูลในเครือข่ายที่น้อยที่สุด

ผู้วิจัยจึงขอเสนอแนะผู้ให้บริการเครือข่ายว่า นอกจากที่ผู้ให้บริการเครือข่ายมีการคำนึงถึงการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว แต่ก็ยังมีประเด็นความน่าเชื่อถือในการขนส่งข้อมูลที่ต้องคำนึงด้วย ซึ่งปัญหาของการขนส่งกราฟฟิกที่มักจะพบเห็นตามที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ได้แก่ ปัญหาความแออัดของกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยง (link) หรือที่คอขวด (bottleneck) และปัญหาของการหยุดชะงักในการขนส่งกราฟฟิกเมื่อเกิดกรณีข่ายเชื่อมโยงขาดหรือล้มเหลว ซึ่งถ้าเกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น ก็ส่งผลให้ความน่าเชื่อถือในการบริการลดลง ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้วว่า

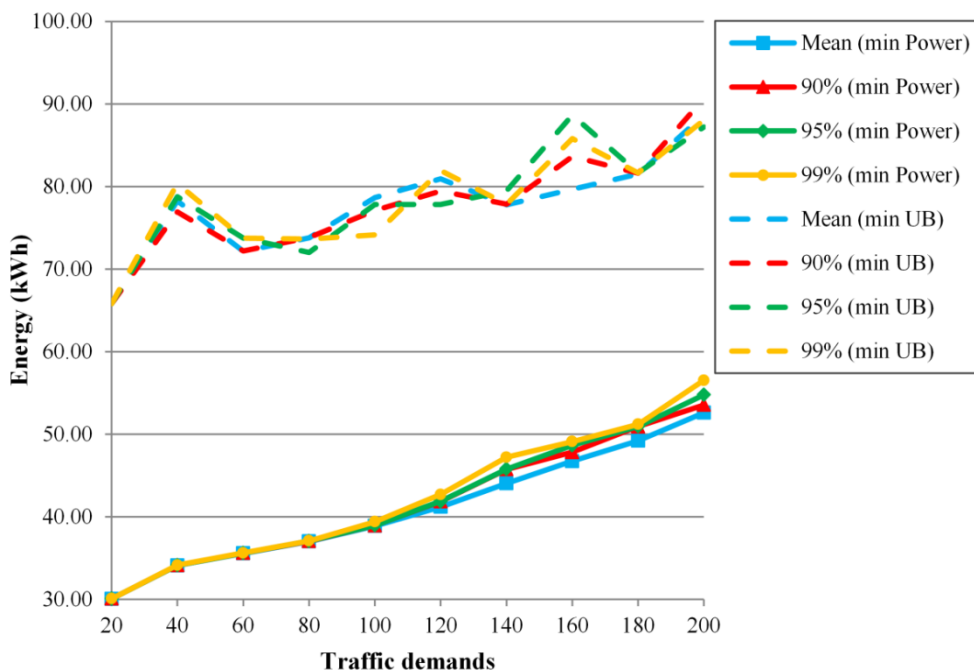
ประเด็นความสมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงภายในเครือข่ายแกนหลักช่วยให้การจัดการสรรทราฟฟิกในเครือข่ายให้มีความสมดุล ซึ่งสร้างความน่าเชื่อถือและคุณภาพในการบริการให้เพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นผู้ให้บริการควรจะคำนึงถึงคุณภาพการให้บริการด้วย ซึ่งแนวทางเลือกใช้หรือเทคนิคการการจัดเส้นทางเพื่อความสมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่ายอย่างเหมาะสมจะมีการพัฒนาต่อไปในอนาคต



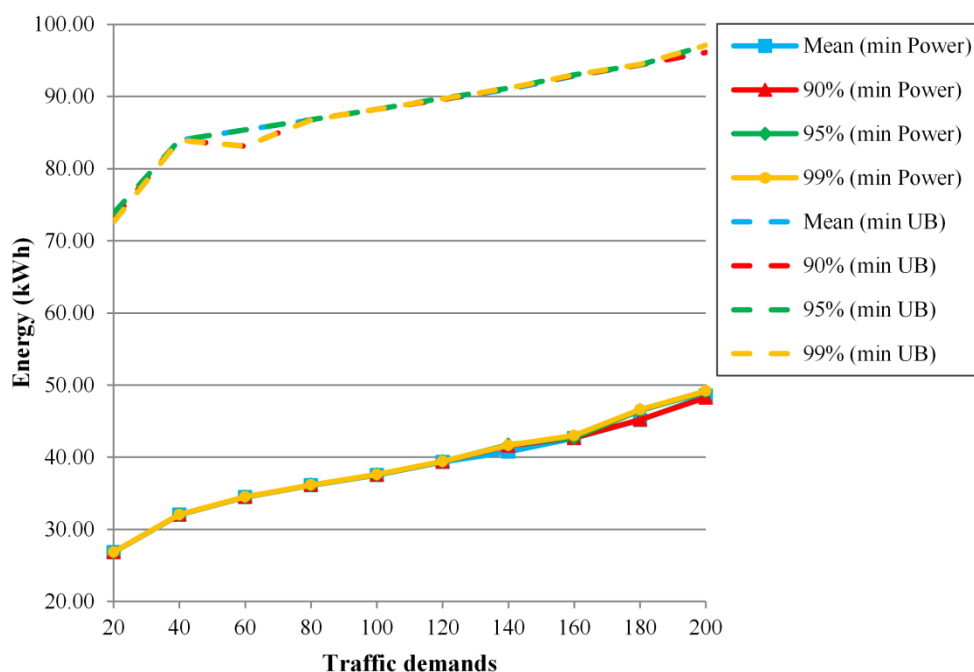
รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกในเครือข่าย NSFNET



รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกในเครือข่าย COST239



รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย NSFNET



รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่าย COST239

5.9 สรุปผลของงานวิจัยในบทนี้

งานวิจัยนี้มีการตรวจสอบปัญหาการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งได้พิจารณาว่าระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคมีผลต่อการใช้พลังงานเครือข่ายอย่างมาก ด้วยการนำเสนอเทคนิคการวางแผนกราฟฟิคเพื่อการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพ โดยนิยามสูตรทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่สามารถกำหนดเส้นทางที่ดีที่สุดและความจุที่เพียงพอเพื่อที่จะรองรับกราฟฟิคที่มีความต้องการในการขนส่งในเครือข่ายด้วยการเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิค โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการใช้พลังงานที่น้อยที่สุด นอกจากนี้เทคนิคที่นำเสนอนี้ยังมีการวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม (Complexity of Algorithm) ในส่วนของหน่วยความจำในการประมวลผล (Space Complexity) ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอนี้มีความซับซ้อนของอัลกอริทึมที่ดีกว่าในเทคนิคงานวิจัยอื่นที่ได้มีการนำเสนอไว้ โดยใช้หน่วยความจำในการประมวลผลไม่ถึง 20% ของเทคนิคในงานวิจัยอื่น

สำหรับการใช้พลังงานในเครือข่ายนั้น การทดลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นถึงว่าเทคนิคที่นำเสนอนี้ให้ผลของการใช้พลังงานที่แตกต่างกันสำหรับการเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคต่าง ๆ ซึ่งจากการทดลองในงานวิจัยนี้ให้ผลของการใช้พลังงานที่แตกต่างกันถึง 7% สำหรับการเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคแตกต่าง

ซึ่งคือระดับระดับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ค่าเฉลี่ยและ 99% ในการใช้พลังงานที่แตกต่างกันถึง 7% นี้ก็เป็นการใช้พลังงานสูงถึง 4 kWh ดังนั้นผู้ให้บริการก็ควรจะเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคให้เหมาะสมต่อความสำคัญของกราฟฟิคข้อมูล ซึ่งจะทำได้สามารถประหยัดพลังงานได้อย่างมาก นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลกระทบระหว่างเทคนิคการวางแผนกราฟฟิคเพื่อความสะดวกของกราฟฟิคและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความไม่แน่นอนของกราฟฟิค ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสะดวกของกราฟฟิคและการใช้พลังงานนั้นมีผลกระทบต่อกันอย่างมาก ซึ่งเป็นเรื่องที่ทำนายสำหรับงานวิจัยในอนาคตต่อไป



บทที่ 6

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

การใช้พลังงานไฟฟ้าของการสื่อสารโทรคมนาคมมีแนวโน้มของการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นในทุก ๆ ปี โดยเฉพาะในเครือข่ายแกนหลักประเภทไอพินบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing : IP over WDM) มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงมาก สาเหตุหนึ่งที่ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครือข่ายการสื่อสารเพิ่มขึ้นมาก ก็เนื่องมาจากในปัจจุบันความต้องการในการใช้งานอินเทอร์เน็ตเน็ทมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปริมาณทราฟฟิกในเครือข่ายเพิ่มขึ้นอย่างมาก จึงเป็นเหตุให้การใช้พลังงานไฟฟ้าสูงตามไปด้วย ซึ่งทราฟฟิกในเครือข่ายมีลักษณะที่ไม่แน่นอนมีความแปรปรวนขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้งานของผู้ใช้ ดังนั้นความไม่แน่นอนของทราฟฟิกเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ต้องพิจารณาเพื่อให้มีการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่ายแกนหลักประเภท IP over WDM ได้อย่างเหมาะสม แต่งานวิจัยที่ผ่านมาก็ยังไม่ได้คำนึงถึงการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับเครือข่าย IP over WDM ภายใต้อการพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ถึงแม้ว่าในงานวิจัยหนึ่งที่ได้นำเสนอการศึกษาการใช้พลังงานในเครือข่ายร่วมกับประเด็นความไม่แน่นอนของทราฟฟิก แต่ก็ยังเป็นเพียงการศึกษาเฉพาะเครือข่าย IP ที่เป็นเครือข่ายที่มีเพียงชั้นเดียวเท่านั้น และเทคนิคในงานวิจัยดังกล่าวก็ยังมี ความซับซ้อนของอัลกอริทึม (Complexity of Algorithm) สูง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้อการพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เริ่มศึกษาและตรวจสอบลักษณะของทราฟฟิกที่มีความแปรปรวน ด้วยการวิเคราะห์คุณลักษณะของไอพินทราฟฟิก ซึ่งทราฟฟิกที่นำมาวิเคราะห์เป็นทราฟฟิกที่ได้รับการเก็บข้อมูลมาจากเครือข่ายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้ซอฟต์แวร์การเฝ้าตรวจทราฟฟิกหรือการมอนิเตอร์ทราฟฟิก งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การกระจายของทราฟฟิกในช่วงเวลาของปริมาณการใช้สูงสุด (peak load) และปริมาณการใช้ต่ำสุด (light load) ซึ่งรายละเอียดของทราฟฟิกรวมทั้งพารามิเตอร์ที่อธิบายคุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิกนั้นได้มาจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธีการทดสอบที่มีความแตกต่างกันสามวิธี ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในโปรแกรม ได้แก่ การทดสอบแบบโคลโมโกรอฟ-สเมียร์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov) การทดสอบแบบแอนเดอร์สัน-ดาร์วิง (Anderson-Darling) และการ

ทดสอบแบบไคสแควร์ (Chi-Squared) จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าที่สวิตช์หลักมีคุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิกในช่วงเวลา Peak-load คือ การกระจายแบบเบต้า (Beta Distribution) และคุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิกในช่วงเวลา peak load และ light load ก็มีคุณลักษณะการกระจายที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ในการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงความไม่แน่นอนของปริมาณไอพีทราฟฟิก นั้นมีความแปรปรวนสูง

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้สังเกตเห็นว่าไอพีทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนนั้นมีผลต่อความน่าเชื่อถือของการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย IP over WDM งานวิจัยนี้จึงได้ตระหนักถึงคุณภาพในการให้บริการ ซึ่งการมีคุณภาพในการให้บริการเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อความน่าเชื่อถือของผู้ให้บริการเครือข่าย งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเทคนิคใหม่สำหรับการออกแบบ โครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่ายแกนหลัก IP over WDM ด้วยการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสะดวกของทราฟฟิกในเครือข่ายภายใต้การพิจารณาประเด็นความไม่แน่นอนของทราฟฟิก และได้ดำเนินการตรวจสอบผลกระทบของทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนต่อความสะดวกของการจัดส่งทราฟฟิกภายในข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพสำหรับเครือข่าย IP over WDM โดยงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาด้วยการใช้รูปแบบของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming : ILP) ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือการนำเสนอแบบจำลองที่สามารถจัดการกับสามประเด็นสำคัญ ได้แก่ ประเด็นที่หนึ่งเป็นการสร้างความมั่นใจในการเชื่อมต่อในชั้น IP (โครงข่ายเสมือน) ประเด็นที่สองเป็นการสร้างความสะดวกของปริมาณทราฟฟิกภายในเครือข่าย WDM และประเด็นที่สามเป็นการสร้างความมั่นใจสำหรับความจุของเครือข่ายเพื่อให้สามารถรองรับความต้องการของทราฟฟิกภายใต้สถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

ต่อมงานวิจัยนี้ได้เสนอเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก และตรวจสอบผลกระทบของความไม่แน่นอนของทราฟฟิกต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย โดยใช้รูปแบบการแก้ปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM ที่น้อยที่สุด ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือการนำเสนอที่สามารถจัดการกับสองประเด็นสำคัญ ได้แก่ ประเด็นที่หนึ่งเป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายในเครือข่าย IP over WDM และประเด็นที่สองเป็นการสร้างความมั่นใจสำหรับความจุของเครือข่ายเพื่อที่จะสามารถรองรับความต้องการของทราฟฟิกภายใต้สถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ซึ่งจากการวิจัยดังกล่าวได้แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ความจุนั้นๆ มีผลต่อการใช้พลังงานในเครือข่ายอย่างมาก ยิ่งไปกว่านั้นผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม พบว่าเทคนิคที่นำเสนอมีความซับซ้อนของอัลกอริทึมที่น้อยกว่าเทคนิคของงานวิจัย

อื่น นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ยังได้ตระหนักถึงคุณภาพในการให้บริการ ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อความน่าเชื่อถือของผู้ให้บริการ ในงานวิจัยนี้ยังได้ดำเนินการตรวจสอบให้เห็นว่าเทคนิคการวางแผนกราฟฟิกเพื่อความสมดุลของกราฟฟิกภายใต้ความไม่แน่นอนของกราฟฟิกที่นำเสนอในบทที่ 4 นั้นมีผลกระทบต่อการใช้พลังงานอย่างมาก และเทคนิคการวางแผนกราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความไม่แน่นอนของกราฟฟิกนั้นก็ยังมีผลกระทบต่อความสมดุลอย่างมากเช่นกัน ซึ่งเป็นเรื่องที่ทำนายสำหรับงานวิจัยในอนาคตต่อไป

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM นั้นจะต้องมีความรู้พื้นฐานในงานที่จะต้องศึกษา โดยต้องทราบถึงข้อจำกัด ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อ การออกแบบโครงข่ายเสมือน แล้วจึงกำหนดปัญหาเป็นสมการคณิตศาสตร์ โดยเมื่อกำหนดปัญหาได้แล้วจะต้องลองทดสอบความเป็นไปได้ของสมการที่กำหนดขึ้นในเครือข่ายขนาดเล็กก่อน เพื่อให้เห็นแนวโน้มความถูกต้องของสมการนั้น จากนั้นจึงนำไปใช้ในเครือข่ายที่จำลองแบบขึ้น หรือรูปแบบเครือข่ายที่มีการใช้งานอยู่จริง โดยจะต้องทำการทดสอบหลายกรณี ในเครือข่ายที่มีรูปแบบต่าง ๆ กัน เพื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เน้นการพัฒนาและตรวจสอบเทคนิคการวางแผนกราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิก โดยใช้รูปแบบการแก้ปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด จากการศึกษาหลาย ๆ งานวิจัยทำให้ทราบว่าเทคนิคต่าง ๆ สำหรับการวางแผนเครือข่าย IP over WDM มีความซับซ้อนของอัลกอริทึมสูง ผู้ที่จะออกแบบโครงข่ายเสมือนจึงควรที่จะคำนึงถึงความซับซ้อนของอัลกอริทึมด้วย เนื่องจากถ้ามีความซับซ้อนของอัลกอริทึมสูงเกินไปอาจทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ที่ใช้หาคำตอบไม่สามารถให้ผลลัพธ์ออกมาได้ นอกจากการใช้พลังงานในเครือข่ายที่ผู้ออกแบบโครงข่ายเสมือนจะตระหนักแล้ว ยังมีเรื่องคุณภาพในการให้บริการที่ผู้ออกแบบโครงข่ายเสมือนควรจะตระหนักด้วย คุณภาพในการให้บริการเป็นสิ่งที่สำคัญสามารถช่วยสร้างความน่าเชื่อถือให้กับเครือข่ายได้

นอกจากนี้สำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม โดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio นั้น หากเครือข่ายที่พิจารณามีตัวแปรอินพุตจำนวนมากเกินไปแล้ว ในบางกรณี โปรแกรมอาจไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ หรืออาจใช้ระยะเวลาในการรันผลเพื่อหาคำตอบ ดังนั้นขนาดของเครือข่าย หรือจำนวนข้อมูลอินพุต จึงเป็นข้อจำกัดในการใช้โปรแกรมนี้ ซึ่งหากต้องออกแบบในเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ และมีจำนวนอินพุตมาก อาจต้องใช้การหาคำตอบแบบฮิวริสติก (heuristic) ด้วยการพัฒนาอัลกอริทึมอื่น ๆ ที่ใช้

ในการหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อให้สามารถหาคำตอบได้ภายในระยะเวลาที่จำกัด

6.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้เสนอเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM และเสนอเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสะดวกของปริมาณทราฟฟิกภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM โดยนิยามสูตรทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่สามารถกำหนดเส้นทางที่ดีที่สุดและความจุที่เพียงพอเพื่อที่จะรองรับทราฟฟิกที่มีความต้องการในการขนส่งในเครือข่ายด้วยการเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ซึ่งวิธีการออกแบบโครงข่ายเสมือนเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้ด้วยการเลือกระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่เหมาะสมกับความสำคัญของข้อมูลช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานได้ และวิธีการออกแบบโครงข่ายเสมือนด้วยการสมดุลปริมาณทราฟฟิกที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้ได้ช่วยให้สามารถกระจายทราฟฟิกที่มีอยู่สูงมากในการขนส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพได้

งานวิจัยนี้ยังมีการศึกษาผลกระทบระหว่างเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสะดวกของทราฟฟิกภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกและเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก พบว่าเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสะดวกของทราฟฟิกมีการใช้พลังงานที่สูงมาก และเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพก็มีความสมดุลของทราฟฟิกน้อย ซึ่งการพัฒนาเทคนิคต่อไปเพื่อให้สามารถรับมือกับทั้งสองประเด็นภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกเป็นเรื่องที่ท้าทายอย่างยิ่ง ผู้วิจัยอาจใช้การโปรแกรมเชิงเส้นแบบหลายวัตถุประสงค์ในการแก้ปัญหาเพื่อให้สามารถรับมือกับทั้งสองประเด็นได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยอาจจะพิจารณาในประเด็นความเป็นธรรม (fairness) ของการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่ายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดำเนินการเครือข่าย

รายการอ้างอิง

- สุทธิมา ชำนาญเวช (2552). การวิจัยดำเนินงาน (**Operation Research**). วิทยพัฒน์. กรุงเทพฯ ๑.
- Addis, B., Capone, A., Carello, G., Gianoli, L. G. and Sansó, B. (2013) **A Robust Optimization Approach for Energy-Aware Routing in MPLS Networks**, in International Conference Computing, Networking and Communications (ICNC), pp. 567-572.
- Aparicio-Pardo, R., Pavon-Marino, P., Mukherjee, B. (2012). **Robust Upgrade in Optical Networks Under Traffic Uncertainty**, in International Conference Optical Network Design and Modeling (ONDM), pp. 1-6.
- Cormen, . H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., Stein, C. (2001). **Introduction to Algorithms**, (Second ed.). MIT Press and McGraw-Hill. pp. 595-601.
- Davie. B. S., Rekhter. Y. (2000). **MPLS: Technology and Applications**, Morgan Kaufmann Publishers.
- Dixit, S. (2003). **IP over WDM**. John Wiley & Sons, Hoboken: New Jersey.
- Dong, X., Lawey, A., El-Gorashi, T. E. H., and Elmirghani, J. M. H. (2012). **Energy-Efficient Core Networks**, in International Conference Optical Network Design and Modeling (ONDM), pp. 1-9.
- Du, X., Yang, Y. and Kang, X. (2008). **A Network Traffic Supervision System Based on Feature Parameters Distribution,**” in Proceeding of. 3rd International Conference Innovative Computing Information and Control, pp. 377-381.
- Dutta, R. and Rouskas, G. N. (2000). **A Survey of Virtual Topology Design Algorithms for Wavelength Routed Optical Networks**, Optical Networks.
- Gagnaire, M., Doumith, E. A. and Al Zahr, S., **A Novel Exact Approach for Translucent WDM Network Design under Traffic Uncertainty**, in International Conference Optical Network Design and Modeling (ONDM), pp. 1-6.
- Hillier, F. S. and Lieberman, G. J. (2001). **Introduction to Operation Research**, 7th ed., McGraw-Hill.

- Idzikowski, F. (2009). **Power Consumption of Network Elements in IP over WDM Networks**, Technical Report, Telecommunication Networks Group (TKN), Technische Universität Berlin, Germany.
- International Business Machines Corporation**. [Online]. Available: <http://www.ibm.com/>
- Jain, R. (1991). **The Art of Computer Systems Performance Analysis**, New York: John Wiley & Sons, ch. 29.
- Kim, S., Lee, J. Y. and Sung, D. K. (2003). **A Shifted Gamma Distribution Model for Long-Range Dependent Internet Traffic**, IEEE Communications Letters, Vol. 7, No. 3, pp. 124-126.
- Kim, Y., Lee, C., Rhee, J. K. and Lee, S. (2012). **IP-over-WDM Cross-Layer Design for Green Optical Networking with Energy Proportionality Consideration**, Journal of Lightwave Technology, vol. 30, pp. 2088-2096.
- Leisching, P. and Pickavet, M. (2009). **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.
- Lin, T., Zhou, Z. 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**, in Conference DRCN International Workshop, pp. 1-8.
- Ling, W. and Peida, Y. (2003). **The Optimal Design of Logical Topology with QoS Constraints in IP over WDM Network**, in Conference Communication Technology ICCT, vol. 1, pp. 706-709.
- Liu, B. (2009). **Theory and Practice of Uncertain Programming**, 3rd ed., Uncertainty Theory Laboratory: Beijing, pp. 37-42.
- Liu, P., Liu, F. and Lei, Z. (2008). **Model of Network Traffic based on Network Applications and Network Users**, in Proc. IEEE International Symposium Conference Computer Science and Computational Technology, pp. 171-174.
- MathWave Technologies** (2004-2014). [Online]. Available: <http://www.mathwave.com/>
- Meesublak, K. (2008) **Network Design under Demand Uncertainty**, in Proceedings of APAN Network Research Workshop, pp. 19-23.

- Meesublak, K. (2009) **A Two-Layer Network Design Problem under Traffic Uncertainty**, in Conference ECTI-CON, vol. 2, pp. 914-917.
- 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.
- 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.
- Net-SNMP** (2011). [Online]. Available: <http://www.net-snmp.org/>
- Paessler AG The Network Monitoring Company** (1998-2014). [Online]. Available: <http://www.paessler.com/prtg/>
- Ramamurthy, B., Ramakrishnan, K. K. and Sinha, R. K. (2011). **Cost and Reliability Considerations in Designing the Next-Generation IP over WDM Backbone Networks**, in Proceedings of ICCCN, pp. 1-6.
- Rodrigues, L. and Guardieiro, P. R. (2004). **A Spatial and Temporal Analysis of Internet Aggregate Traffic at the Flow Level**, in Proceeding IEEE International Conference Communications Society Globecom, pp. 685-691.
- Rungroj, P. and Charnsripinyo, C. (2007). **Measuring Traffic on the Network to the Internet in Thailand**, in NSTDA Annual Conference, pp. 926-931.
- Shen, G. and Tucker, R. S. (2009). **Energy-Minimized Design for IP Over WDM Networks**, Optical Communication and Networking, vol.1, pp. 176-186.
- Somani, A. K. (2006). **Survivability and Traffic Grooming in WDM Optical Networks**, Cambridge University Press.
- Telkamp, T. (2002). **Traffic Characteristics and Network Planning**, ISMA.
- Yagi, M., Satomi, S., Ryu, S., Okamura, K., Aoyagi, M. and Asano, S. (2005). **Field Trial of Optical 3R Regenerator over Installed Cable**, 31st European Conference on Optical Communication, ECOC 2005, vol. 4, pp. 975-976.
- 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.

- Zhang, Y., Chowdhury, P., Tornatore, M. and Mukherjee, B. (2010). **Energy Efficiency in Telecom Optical Networks**, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 12, no. 4, pp. 441-458.
- Zhang, Y., Tornatore, M., Chowdhury, P. and Mukherjee, B. (2011). **Energy Optimization in IP-over-WDM Networks**, Journal of Optical Switching and Networking, vol. 8, pp. 171-180.





ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

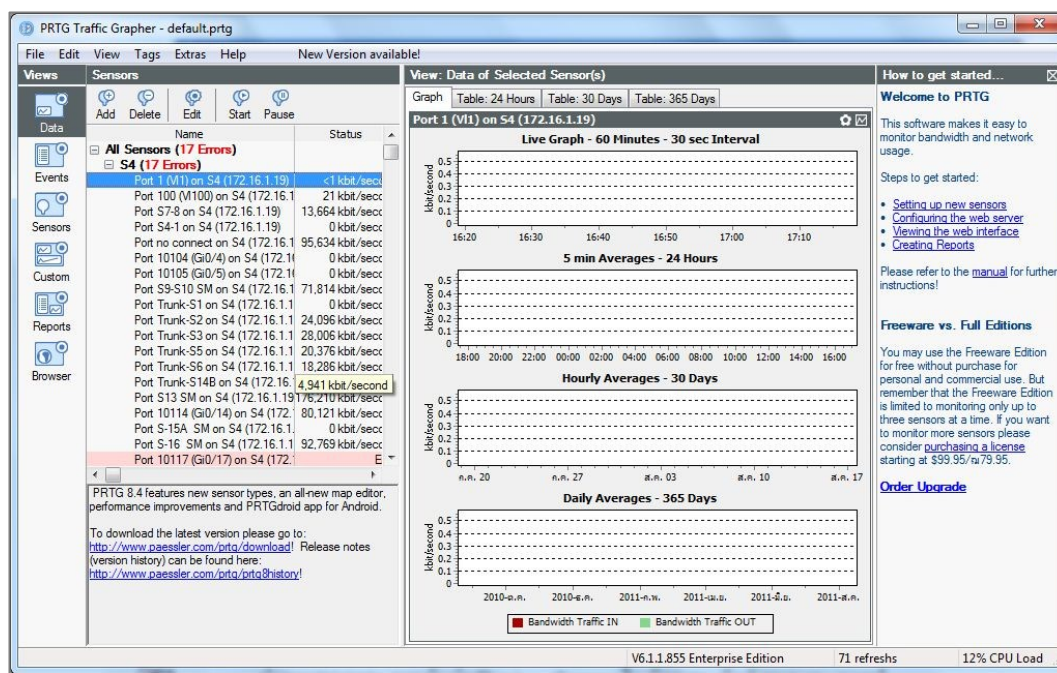
โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 โปรแกรมมอนิเตอร์กราฟฟิก

ในการจัดการเครือข่ายที่คืบหน้าจำเป็นต้องมีอย่างหนึ่งที่จะต้องมีการเก็บข้อมูลการใช้งานเครือข่ายภายในองค์กร เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาวิเคราะห์สถานการณ์ปริมาณกราฟฟิกในเครือข่ายรวมถึงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในเครือข่าย ซึ่งก็จะอาศัยข้อมูลดังกล่าวเป็นพื้นฐานในการปรับปรุงแก้ไขหรือขยายขนาดของเครือข่ายในอนาคต จึงทำให้การมอนิเตอร์กราฟฟิกในเครือข่ายจำเป็นต้องมีอย่างหนึ่งสำหรับทุกองค์กรหรือหน่วยงานที่มีการใช้งานระบบเครือข่าย เพื่อให้ประสิทธิภาพของการใช้งานเครือข่ายดีขึ้นและเป็นการเฝ้าระวังเครือข่ายเพื่อเตรียมพร้อมรับมือกับปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อไหร่ก็ได้

โปรแกรมมอนิเตอร์กราฟฟิกเป็นตัวช่วยได้อย่างดีสำหรับการมอนิเตอร์กราฟฟิกในเครือข่าย เพียงแค่ผู้ตั้งค่าของตัวโปรแกรมให้บันทึกข้อมูลกราฟฟิกซึ่งกำหนดได้หลายแบบแล้วแต่ว่าโปรแกรมนั้นจะมีคุณสมบัติทำอะไรได้บ้าง ปัจจุบันนี้มีโปรแกรมมอนิเตอร์กราฟฟิกมากมายซึ่งมีความแตกต่างกันบ้าง แต่ที่ทุกโปรแกรมนั้นมีการทำงานในชั้นแอปพลิเคชัน (Application Layer) ของมาตรฐานโอเอสไอ (Open Systems Interconnection : OSI) ซึ่งโปรโตคอลที่ใช้ก็คือโปรโตคอลการจัดการระบบเครือข่ายอย่างง่าย (Simple Network Management Protocol : SNMP) แต่โปรแกรมบางตัวอาจจะมีการใช้งานโปรโตคอลอื่นๆมาช่วยในการมอนิเตอร์กราฟฟิกแล้วแต่ว่าผู้ใช้จะใช้งานแบบไหนซึ่งประสิทธิภาพของตัวโปรแกรมนั้นจะต่างกันไปตามลักษณะของการใช้งาน ซึ่งในการศึกษาลักษณะการใช้งานกราฟฟิกในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม PRTG Traffic Grapher ในการเก็บบันทึกข้อมูลการใช้งานกราฟฟิก นอกจากนี้ผู้ใช้งานสามารถศึกษารายละเอียดของโปรแกรม PRTG Traffic Grapher เพื่อทำความเข้าใจในภาคผนวก ก.1 แล้วผู้ใช้งานสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ <http://www.paessler.com/prtg/> ซึ่งส่วนต่าง ๆ ของโปรแกรม PRTG Traffic Grapher แสดงดังรูปที่ ก.1 มีวิธีการใช้งานดังนี้



The screenshot shows the PRTG Traffic Grapher interface. On the left, there is a sidebar with navigation icons for Data, Events, Sensors, Custom, Reports, and Browser. The main area is divided into two sections: 'Sensors' and 'View: Data of Selected Sensor(s)'. The 'Sensors' section lists various sensors with their names, locations, and current status. The 'View: Data of Selected Sensor(s)' section displays four different graph views for 'Port 1 (V1) on S4 (172.16.1.19)': 'Live Graph - 60 Minutes - 30 sec Interval', '5 min Averages - 24 Hours', 'Hourly Averages - 30 Days', and 'Daily Averages - 365 Days'. Each graph shows bandwidth traffic in and out over time. The bottom status bar indicates 'V6.1.1.855 Enterprise Edition', '71 refreshes', and '12% CPU Load'.

ส่วนแสดงและการตั้งค่า Devices Sensor ในลักษณะตัวอักษรและกราฟ

ส่วนของบันทึกเหตุการณ์ การทำงานของโปรแกรม

ส่วนแสดงและการตั้งค่า Devices Sensor ในลักษณะตัวอักษร

ส่วนแสดงและการตั้งค่า Devices Sensor เฉพาะเจาะจง ในลักษณะกราฟ

ส่วนตั้งค่าและทำรายงานข้อมูลที่บันทึกจาก Devices Sensor ต่าง ๆ

ส่วนแสดงผล Devices Sensor ในลักษณะ Web Brower

รูปที่ ก.1 ส่วนประกอบโปรแกรม PRTG Traffic Grapher

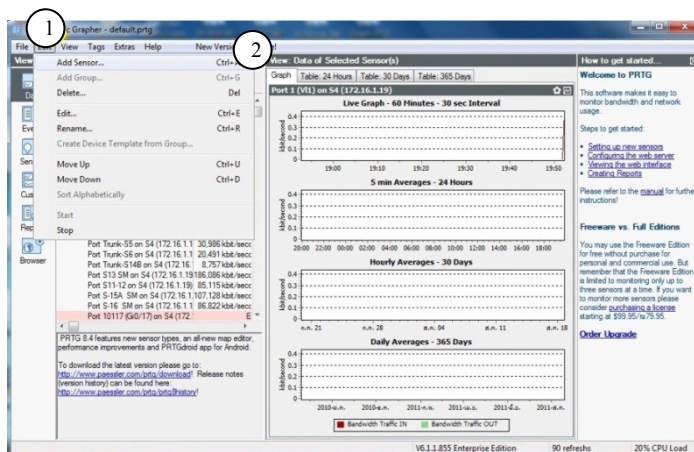
ก.1.1 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม PRTG Traffic Grapher

ในการใช้งานโปรแกรม PRTG Traffic Grapher เพื่อเก็บข้อมูลกราฟฟิคได้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การเพิ่มตัวตรวจวัดสัญญาณ (Sensor) ในการมอนิเตอร์กราฟฟิค และการสร้างรายงาน (Report) ซึ่งในแต่ละส่วนมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

การเพิ่มตัวตรวจวัดสัญญาณ (Sensor) ในการมอนิเตอร์กราฟฟิคมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เมื่อเปิดโปรแกรม PRTG ขึ้นมาแล้วให้กดแก้ไข (Edit) ดังรูปที่ ก.2 (ก)
2. กด เพิ่มตัวตรวจวัดสัญญาณ (Add Sensor)

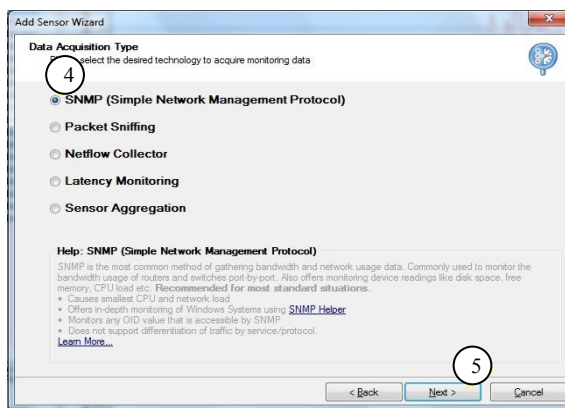
3. หลังจากกดเพิ่มตัวตรวจวัดสัญญาณแล้วจะปรากฏหน้าต่างของตัว โปรแกรม ขึ้นมาดังรูปที่ ก.2 (ข) ให้กดต่อไป (Next)
4. หลังจากกด Next แล้วตัวโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างถัดมาดังรูปที่ ก.2 (ค) ให้เลือกตรงคำว่า SNMP (Simple Network Management Protocol) เพื่อทำการ มอนิเตอร์กราฟิก หากต้องการใช้งานอย่างอื่นก็กดเลือกตามประเภทที่ต้องการ ใช้งาน
5. หลังจากเลือกการทำงานที่ต้องการแล้วให้กดต่อไป (Next)
6. โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างถัดมาดังรูปที่ ก.2 (ง) ให้เลือกตรงคำว่า Standard Traffic Sensor เพื่อทำการมอนิเตอร์กราฟิก แต่หากต้องการใช้ตรวจวัด สัญญาณ (Sensor) อื่น ๆ ก็ให้เลือกตามประเภทของตรวจวัดสัญญาณที่ต้องการ ใช้งาน
7. หลังจากเลือกการทำงานที่ต้องการแล้วให้กด Next
8. โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างถัดมาดังรูปที่ ก.2 (จ) ให้ใส่ชื่อของอุปกรณ์ที่เรา ต้องการมอนิเตอร์
9. ใส่ไอพีแอดเดรส (IP Address) ของอุปกรณ์ที่ต้องการมอนิเตอร์
10. เลือกเวอร์ชัน (Version) ของโปรโตคอล SNMP ตามต้องการ
11. เลือกพอร์ตของ SNMP ที่ต้องการใช้งานถ้าหากต้องการมอนิเตอร์กราฟิกให้ ใช้ค่าโดยปริยาย (Default)
12. ใส่คอมมิวนิตีสตริง (Community string) ของอุปกรณ์ที่เราต้องการมอนิเตอร์ กราฟิก
13. หลังจากใส่พารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้วให้กดต่อไป (Next)
14. หลังจากกด Next แล้วตัวโปรแกรมจะแสดงหน้าต่างถัดมาดังรูปที่ ก.2 (ฉ) ให้ เลือกตัวตรวจวัดสัญญาณ (Sensor) ที่เราต้องการ
15. เลือกค่าที่ต้องการมอนิเตอร์
16. จากนั้นกดต่อไป (Next)
17. โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างถัดมาดังรูปที่ ก.2 (ช) ให้เลือกตัวตรวจวัดสัญญาณ (Sensor) ที่เราต้องการ
18. จากนั้นกดต่อไป (Next) เป็นเป็นอันเสร็จสิ้นการเพิ่มตัวตรวจวัดสัญญาณ (Sensor) ในการมอนิเตอร์กราฟิก



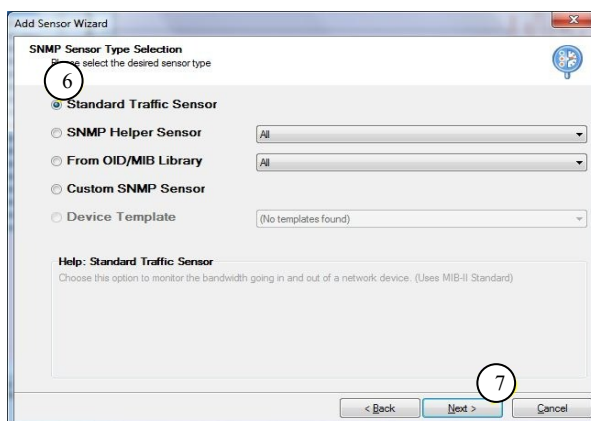
(ก) ขั้นตอนที่ 1-2



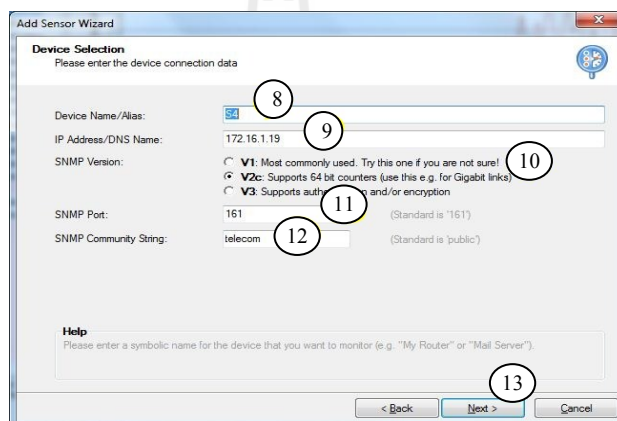
(ข) ขั้นตอนที่ 3



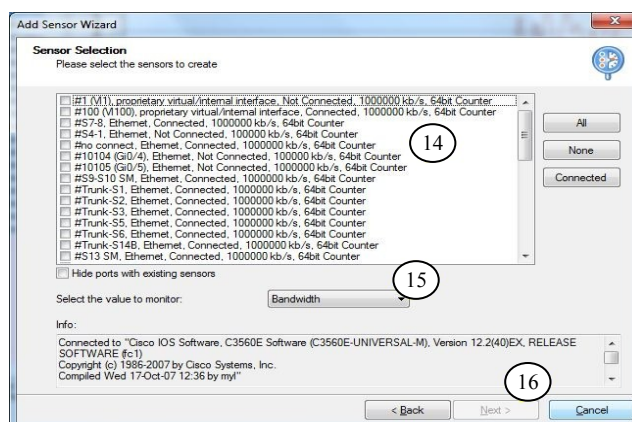
(ค) ขั้นตอนที่ 4-5



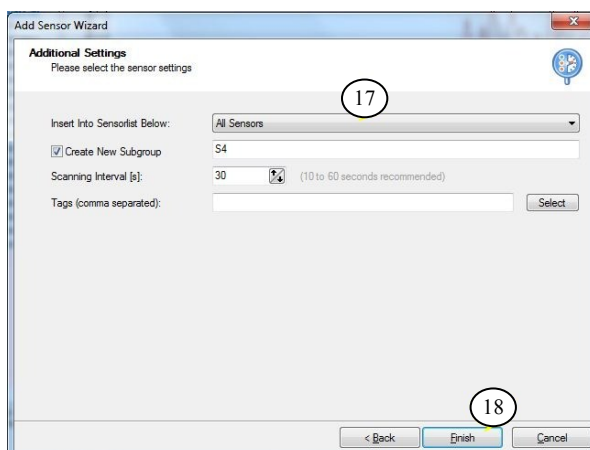
(ง) ขั้นตอนที่ 6-7



(จ) ขั้นตอนที่ 8-13



(ฉ) ขั้นตอนที่ 14-16



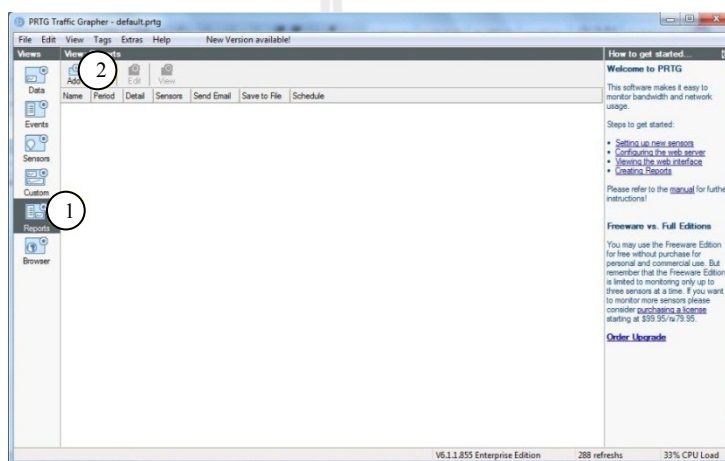
(ช) ขั้นตอนที่ 17-18

รูปที่ ก.2 การเพิ่มตัวตรวจวัดสัญญาณ (Sensor) ในการมอนิเตอร์กราฟฟิก

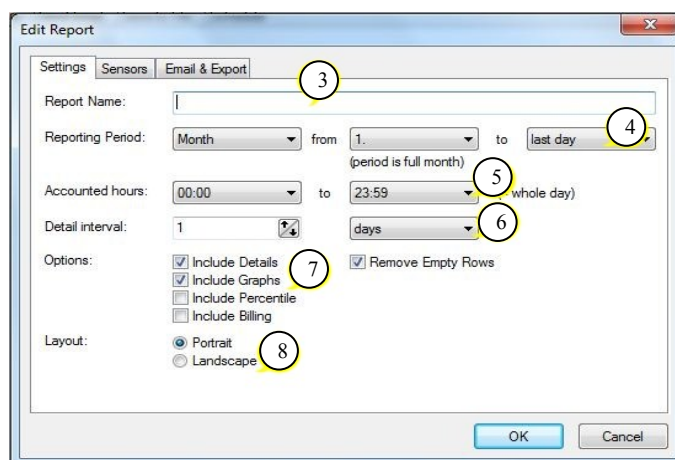
ในส่วนการสร้างรายงาน (Report) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กดตรงรายงาน (Report) ที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของหน้าต่าง โปรแกรมดังแสดงในรูปที่ ก.3 (ก)
2. กดคำสั่ง เพิ่ม (Add) จะปรากฏหน้าต่างให้ตั้งค่าการรายงาน (Edit Report) ขึ้นมา
3. ในส่วนของสคีม่าตั้งค่า (Setting) แสดงดังรูปที่ ก.3 (ข) ซึ่งเป็นการตั้งค่าต่าง ๆ ของรายงาน (Report) ที่ต้องการ ใส่ชื่อรายงาน (Report) ในช่อง ชื่อรายงาน (Report Name)
4. เลือกระยะเวลาของรายงาน (Report) ตามต้องการว่าต้องการรายงาน (Report) แบบรายวัน, สัปดาห์ หรือเดือน
5. เลือกช่วงเวลาที่ต้องการสร้างรายงาน (Report) ว่าต้องการช่วงเวลาไหน เช่น 00.00-23.59
6. เลือกความละเอียดของข้อมูลโดย PRTG ทำได้ละเอียดสุดคือ 1 นาที
7. เลือกว่าจะให้ในรายงาน (Report) มีข้อมูลอะไรบ้าง เช่น กราฟ ตารางข้อมูล
8. เลือกว่าจะเอารายงาน (Report) เป็นแนวตั้งหรือแนวนอน
9. ในส่วนของสคีม่าตัวตรวจวัดสัญญาณ (Sensor) แสดงดังรูปที่ ก.3 (ค) เป็นการเลือกที่ต้องการรายงาน (Report) ของตัวตรวจวัดสัญญาณ (Sensor) ตัวใด
10. เลือกตัวตรวจวัดสัญญาณ (Sensor) ที่ต้องการ

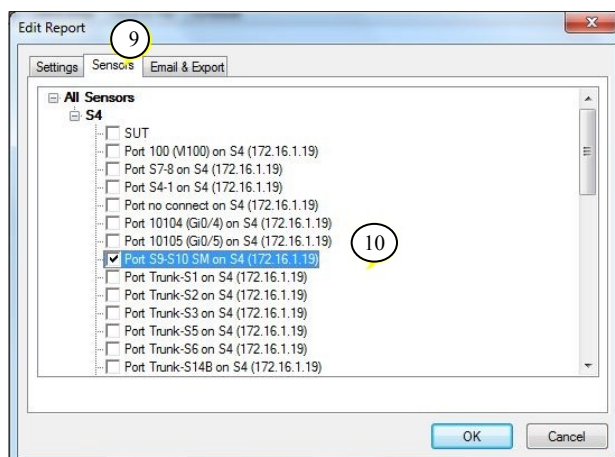
11. ในส่วนของสคีมก้อีเมลและการส่งออก (Email & Export) แสดงดังรูปที่ ก.3 (ง) เป็นการตั้งค่าการสร้างรายงาน (Report)
12. เลือกบันทึกรายงาน (Save Report to file) เป็นการสร้างรายงาน (Report) แบบเลือกไดเรกทอรี (Directory) ในการบันทึกไฟล์รายงาน (Report)
13. เลือกไดเรกทอรี (Directory) Directory ที่ต้องการเก็บรายงาน (Report)
14. เลือกรูปแบบของไฟล์ที่ต้องการ เช่น PDF, HTML, RTF
15. เมื่อกดเริ่มบันทึก (Save now) โปรแกรมจะสร้างรายงาน (Report) ไปไว้ในไดเรกทอรี (Directory) ที่เราได้เลือกไว้ เป็นอันเสร็จสิ้นการสร้างรายงาน



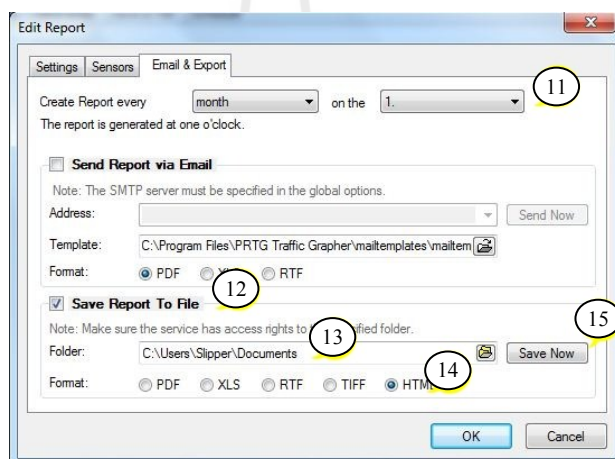
(ก) ขั้นตอนที่ 1-2



(ข) ขั้นตอนที่ 3-8



(ค) ขั้นตอนที่ 9-10



(ง) ขั้นตอนที่ 11-15

รูปที่ ก.3 การสร้างรายงาน (Report)

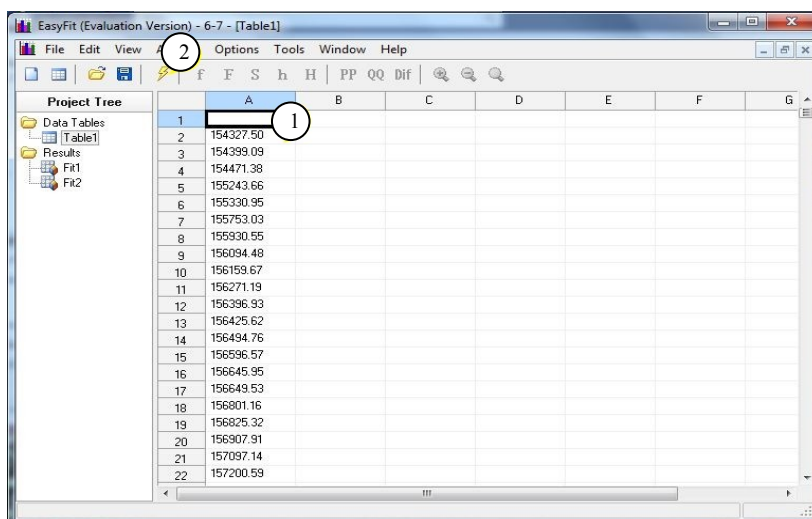
ก.2 โปรแกรมวิเคราะห์ลักษณะการกระจาย

ในการทดสอบการกระจายของข้อมูลที่มีจำนวนข้อมูลมาก ๆ หากไม่มีโปรแกรมในการช่วยทดสอบแล้วจะทำการทดสอบการกระจายของชุดข้อมูลได้ยากมาก เพราะการกระจายตัวของชุดข้อมูลมีอยู่หลายประเภท และการตั้งสมมติฐานแต่ละครั้งอาจจะไม่ได้คำตอบที่มีความใกล้เคียงกับชุดข้อมูลซึ่งอาจทำให้ผลของการทดสอบไม่ตรงกับลักษณะการกระจายของชุดข้อมูล

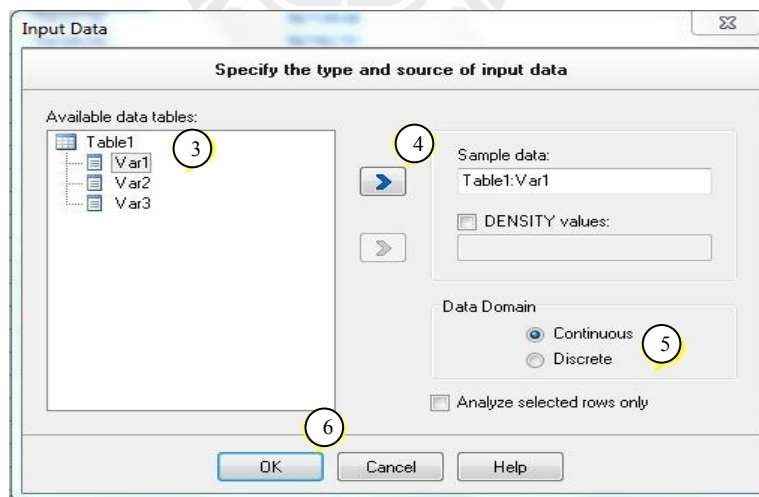
โปรแกรมวิเคราะห์ลักษณะการกระจายนั้นมียู่ด้วยกันหลายโปรแกรมซึ่งมีคุณสมบัติและการใช้งานต่างกันไปใน การทดสอบชุดข้อมูลของงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม EasyFit ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของชุดข้อมูลซึ่งทำให้การทดสอบการกระจายของชุดข้อมูลทำได้ง่ายมาก และได้ผลการทดสอบที่แม่นยำและใกล้เคียงกับการกระจายของชุดข้อมูลที่นำมาทดสอบ โปรแกรม EasyFit มีการใช้งานที่ง่ายและสะดวก นอกจากวิธีการใช้งานในภาคผนวก ก.2 และ ผู้สนใจสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ <http://www.mathwave.com/> ซึ่งโปรแกรมมีวิธีการใช้งานดังนี้

1. ใส่ชุดข้อมูลที่ต้องการทดสอบลงในตารางของโปรแกรมดังรูปที่ ก.4 (ก)
2. กด ไอคอน วิเคราะห์การกระจาย (Fit Distribution มีสัญลักษณ์เป็นรูปสายฟ้า) เพื่อเริ่มทำการวิเคราะห์ชุดข้อมูล
3. หน้าต่างข้อมูลอินพุต (Input Data) ปรากฏดังรูปที่ ก.4 (ก) กดเลือกชุดข้อมูลที่ต้องการทดสอบ
4. กดที่สัญลักษณ์ “>” เพื่อใส่ข้อมูล
5. เลือกลักษณะการกระจาย มีให้เลือก 2 แบบ คือ ต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง
6. กดตกลง (OK) แล้วโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์และคำนวณชุดข้อมูลออกมา โดยตัวโปรแกรมจะมีการทดสอบอยู่ 3 แบบ คือ การทดสอบแบบโคลโมโกรอฟ-สเมียร์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov), การทดสอบแบบแอนเดอร์สัน-ดาร์ลิง (Anderson-Darling) และการทดสอบแบบไคสแควร์ (Chi-Squared) ซึ่งโปรแกรมจะทำการทดสอบทั้ง 3 วิธีแล้วแสดงผลออกมาเป็นกราฟที่เป็นฟังก์ชันที่ใกล้เคียงกับการกระจายของชุดข้อมูลมากที่สุด
7. กดเลือกฟังก์ชันการกระจายของข้อมูลเพื่อดูลักษณะของกราฟ
8. ลักษณะของกราฟจะเปลี่ยนไปตามการเลือกฟังก์ชัน แต่แท่งกราฟจะเหมือนเดิม
9. การตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์สามารถดูได้จากการเลือก PP QQ เพื่อดูลักษณะของกราฟ PP-Plot และ QQ-Plot ตามลำดับ
10. กดสรุป (Summary) เพื่อดูพารามิเตอร์ของฟังก์ชันต่างๆที่คำนวณได้จากชุดข้อมูล

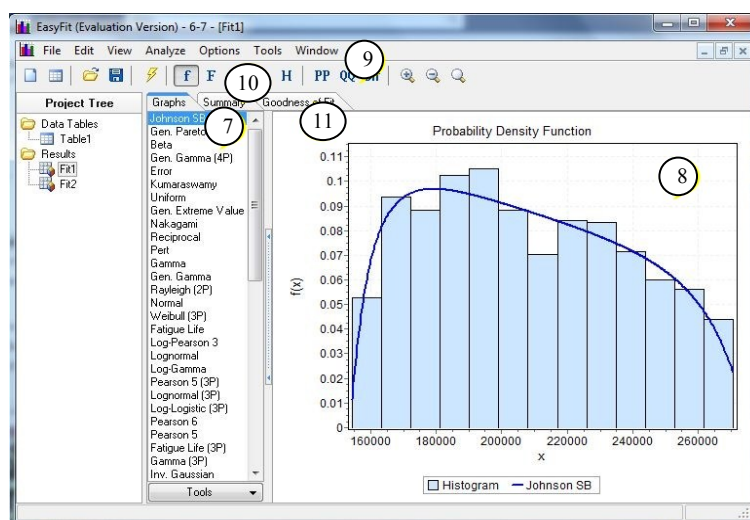
11. กคภาพารูปสนทค (Goodness of Fit) เพื่อูรูปรบแบบการกระจายที่ใกล้เคียงกับชุดข้อมูลมากที่สุดที่ได้จากการทดสอบทั้ง 3 แบบโดยตัวโปรแกรมจะจัดอันดับไว้ให้แล้ว



(ก) ขั้นตอนที่ 1-2



(ข) ขั้นตอนที่ 3-6

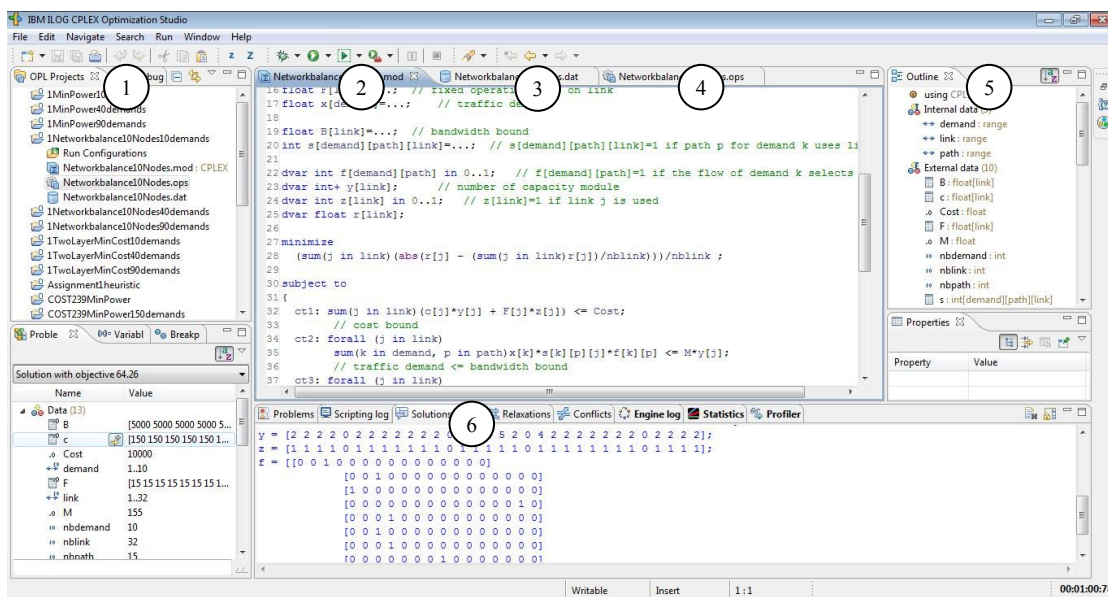


(ค) ขั้นตอนที่ 7-11

รูปที่ ก.4 การใช้งาน โปรแกรม EasyFit

ก.3 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

ในการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดนั้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถแปลงสมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นที่ได้ออกแบบไว้ให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรมได้อย่างง่าย มีประสิทธิภาพ และเป็นที่ยอมรับในงานวิจัยสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นอย่างแพร่หลาย โดยโปรแกรมนี้จะใช้อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแก้ปัญหาของการโปรแกรมเชิงเส้นในการหาคำตอบที่ต้องการ หน้าต่างของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

1. หมายเลข 1 (opl project) แสดงไฟล์โครงการ (project) ที่เปิดอยู่สำหรับการคำนวณหาคำตอบแต่ละครั้งจำเป็นต้องมีไฟล์ครบทั้ง 3 ไฟล์ ประกอบไปด้วย โมเดลไฟล์ (*.mod) คำตัดไฟล์ (*.dat) และ เซตตั้งไฟล์ (*.ops)

2. หมายเลข 2 (model file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่คำสั่งที่ใช้คำนวณค่าที่ดีที่สุด โดยคำสั่งเหล่านี้ได้ทำการแปลงมาจากสมการคณิตศาสตร์ของกรโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข

3. หมายเลข 3 (data file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่ข้อมูลที่เป็นตัวแปรค่าคงที่ ทั้งที่อยู่ในรูปของตัวแปรค่าเดียวและในรูปของเมตริกซ์ (matrix) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกเรียกใช้ในการคำนวณ โดยคำสั่งที่อยู่ในโมเดลไฟล์ แสดงดังรูปที่ ก.6

4. หมายเลข 4 (setting file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อคำนวณคำตอบที่ดีที่สุดให้โครงการ เช่น การจำกัดเพดานของเวลาและหน่วยความจำ (memory) ที่ใช้ในการคำนวณ จำนวนการวนซ้ำ (iteration) ของขั้นตอนวิธีแบบซิมเพล็กซ์และจัดการเกี่ยวกับข้อมูลล็อก (log data) ที่ได้จากการคำนวณ แสดงดังรูปที่ ก.7

5. หมายเลข 5 (outline view) แสดงโครงสร้างของข้อมูลที่อยู่ในหน้าต่างของโมเดลไฟล์ คำตัดไฟล์และเซตตั้งไฟล์ ซึ่งจะจัดเรียงข้อมูลให้แสดงในรูปแบบของรายการเพื่อให้ง่ายต่อการตรวจสอบและค้นหา

จากการที่ได้อธิบายรายละเอียดของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio มาพอสมควร กล่าวได้ว่าโปรแกรมนี้ถือว่าเป็นเครื่องมือช่วยในการหาคำตอบที่สามารถใช้ได้ง่าย และสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในการหาคำตอบของงานวิจัยได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามผู้ใช้งานสามารถศึกษารายละเอียด เพื่อทำความเข้าใจเพิ่มเติมเกี่ยวกับหลักการและกระบวนการใช้งานอย่างละเอียด ในคู่มือสำหรับอ้างอิงจาก <http://www.ibm.com> โดยจะต้องศึกษาการแปลงสมการคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรม ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบสามส่วน คือ ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข เพื่อให้สามารถใช้งานโปรแกรมในการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ





ภาคผนวก ข

คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยใช้รูปแบบของภาษาไทย ซึ่งคำศัพท์เทคนิควิศวกรรมภาษาอังกฤษที่ใช้ในวิทยานิพนธ์จะถูกเรียบเรียงให้เป็นคำศัพท์เทคนิควิศวกรรมภาษาไทย โดยผู้วิจัยได้อ้างอิงจากแหล่งอ้างอิงดังนี้

- หนังสือศัพท์เทคนิควิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ของสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ซึ่งจัดทำโดย คณะอนุกรรมการปรับปรุงศัพท์เทคนิคทางวิศวกรรมไฟฟ้า ในคณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า พ.ศ. 2527-2534
- หนังสืออภิธานศัพท์โทรคมนาคมไทย (Thai Telecommunication Glossary) จัดทำและจัดพิมพ์โดย สมาคมวิชาการไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคม และสารสนเทศ (อชีทีไอ) ห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารเชิงแสงและควอนตัม (Optical & Quantum Communications Laboratory : OQC/ICCRU) และชมรมไฟฟ้าสื่อสาร สมาคมสถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (ไอทริเปิลอี) สาขาประเทศไทย พ.ศ. 2554
- ศัพท์บัญญัติราชบัณฑิตยสถาน (<http://rirs3.royin.go.th/coinages/webcoinage.php>)

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

คำศัพท์ภาษาไทย	คำศัพท์ภาษาอังกฤษ
กราฟฮิสโทแกรม	Histogram
กรูมมิ่ง	grooming
การกระจายของไอพีทราฟฟิก	IP traffic distribution
การกระจายแบบค่าที่สุดทั่วไป	Gen. Extreme Value Distribution
การกระจายแบบจอห์นสัน เอสบี	Johnson SB Distribution
การกระจายแบบชิฟต์แกมมา	shifted gamma distribution
การกระจายแบบเบต้า	Beta Distribution
การกระจายแบบปกติ	Normal distribution
การกระจายแบบปัวซอง	poisson distribution
การกำหนดเส้นทาง	routing
การกำหนดเส้นทางและจัดสรรความยาวคลื่น	routing and wavelength assignment (RWA)
การเชื่อมโยงต่อการเชื่อมโยง	hop-by-hop

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

คำศัพท์ภาษาไทย	คำศัพท์ภาษาอังกฤษ
การใช้ประโยชน์ของข่ายเชื่อมโยง	Link utilization
การทดสอบแบบโคลโมโกรอฟ-สเมียร์นอฟ	Kolmogorov-Smirnov Test
การทดสอบแบบไคสแควร์	Chi-Squared Test
การทดสอบแบบแอนเดอร์สัน-ดาร์ริง	Anderson-Darling Test
การประมวลผลทางอิเล็กทรอนิกส์	Electronic Processing
การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเต็ม	Integer linear programming (ILP)
การโปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาส	Chance-Constrained Programming (CCP)
การผิดเพี้ยนของสัญญาณ	Dispersion
การพล็อตกราฟความน่าจะเป็น-ความน่าจะเป็น	Probability-Probability Plot : P-P Plot
การมอนิเตอร์ทราฟฟิก	Monitoring traffic
การมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นแบบละเอียด	Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)
การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่	Frequency-division multiplexing (FDM)
การรวมสัญญาณ	multiplexing
การวิจัยดำเนินการ	operation research
การสลับสัญญาณ	switching
การสวิตช์กลุ่มข้อมูล	packet switching
การสวิตช์วงจร	circuit switching
การสวิตช์วงจรของข้อมูลเสียง	circuit-switched voice
การสื่อสารแบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย	Wireless Local Area Network (WLAN)
การหาค่าต่ำสุด	minimization
การหาค่าสูงสุด	maximization
ขนาดของปัญหา	Problem size
คอขวด	bottleneck
ข้อจำกัดของสัญลักษณ์	sign restriction

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

คำศัพท์ภาษาไทย	คำศัพท์ภาษาอังกฤษ
ข้อจำกัดเชิงเส้น	linear constraint
ข้อมูลนอกกลุ่ม	Outlier
ขั้นตอนวิธีของไดคัสตรา	Dijkstra's algorithm
ข่ายงานบริเวณกว้าง	Wide Area Network (WAN)
ข่ายเชื่อมโยง	link
ข่ายเชื่อมโยงนำแสง	optical fiber link
คลาสการขนส่ง	traffic classes
ความคล้ายตนเอง	self-similar
ความจุ	capacity
ความซับซ้อนของอัลกอริทึม	Complexity of Algorithm
ความยาวคลื่น	wavelength
ค่าเฉลี่ย	Mean
ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์	Mean Absolute Deviation
ค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เสมอภาค	Gini coefficient
คำตอบฐาน	Basic Solution
คำตอบที่เป็นไปได้พื้นฐาน	Basic feasible solution
คุณภาพของการบริการ	Quality of Service (QoS)
เครือข่ายที่มีรูปแบบชั้นเดียว	Single layer network
เครือข่ายสองชั้น	Two layer network
เครื่องทรานสปอนเดอร์	transponder
โครงข่ายทางกายภาพ	Physical topology
โครงข่ายเสมือน	Virtual topology
โครงสร้างอุปกรณ์เครือข่าย	chassis
เงื่อนไข	constraint
เงื่อนไขข้อจำกัดตามโอกาส	Chance constraint
จุดต่อจุด	point-to-point

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

คำศัพท์ภาษาไทย	คำศัพท์ภาษาอังกฤษ
จุดหมุน	Pivot Element
ช่วงเวลาของปริมาณการใช้ต่ำสุด	light load
ช่วงเวลาของปริมาณการใช้สูงสุด	peak load
ช่องสัญญาณความยาวคลื่น	Wavelength channel
ชั้นการขนส่ง	transport layer
ชั้นของการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น	WDM layer
ชั้นเชิงแสง	Optical layer
ชั้นไอพี	IP layer
เซิร์ฟเวอร์	Server
โซเน็ต/เอสดีเอช	Synchronous Optical Network/ Synchronous Digital Hierarchy (SONET/SDH)
ดัชนีความไม่สมดุล	unbalance index
ดัชนีสัดส่วนพลังงาน	Energy Proportionality Index (EPI)
เดสก์ท็อป	desktop
ตัวทวนสัญญาณ	Regenerator
ตัวแปรตัดสินใจ	decision variable
ตัวแปรมูลฐาน	Basic Variable
ตารางซิมเพล็กซ์เริ่มต้น	Initial Simplex Table
แถวแกนหมุน	Pivot Row
ทรัพยากร	resource
ทฤษฎีเออร์แลง	Erlangian theory
เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร	Information and Communication Technology (ICT)
โนดเริ่มต้น	initial node
บิตทอร์เรนต์	BitTorrent
แบนด์วิดท์	bandwidth

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

คำศัพท์ภาษาไทย	คำศัพท์ภาษาอังกฤษ
แบบจำลองโอเอสไอ	Open System Interconnection Reference Model (OSI)
ปรากฏการณ์เรือนกระจก	Greenhouse Effect
โปร่งแสง	translucent
โปร่งใส	transparent
โปรโตคอลการจัดการระบบเครือข่ายอย่างง่าย	Simple Network Management Protocol (SNMP)
โปรโตคอลทีซีพี	Transmission Control Protocol (TCP)
โปรโตคอลสแตค	protocol stack
ผลตอบแทน	profit
ผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต	Internet Service Provider (ISP)
แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก	line card
พลวัต	dynamic
พลังงานสะสมรวม	embodied energy
พหุนาม	Polynomial
พื้นที่การค้นหา	Search space
พื้นที่ให้บริการเครือข่าย	local network
เพียร์ทูเพียร์	peer-to-peer
แพกเกตไอพี	IP Packet
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	objective function
เฟรมรีเลย์	frame relay
ไฟร์วอลล์	Firewall
ไม่เป็นจำนวนเชิงลบ	non-negative
ระบบปฏิบัติการวินโดวส์	Windows system
ลักษณะของ ไอพีทราฟฟิกแบบพลวัต	dynamic nature of the IP-based traffic
ลาเบล	Label

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

คำศัพท์ภาษาไทย	คำศัพท์ภาษาอังกฤษ
เว็บฟาร์ม	web farm
เว็บอินเทอร์เฟซ	Web Interface
เวลาจริง	real time
สดมภ์	Column
สดมภ์แกนหมุน	Pivot Column
สถิต	static
สมการเชิงเส้น	linear equation
สล็อต	slot
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกราฟฟิก	Standard deviation (SD)
ส่วนเผื่อความปลอดภัย	safety margin
ส่วนหัวขบวนข้อมูล	overhead
สวิตช์	switch
สวิตช์หลัก	Multilayer Switch
สัญญาณไฟฟ้าไปยังสัญญาณแสง	Electrical to Optical (EO)
สัญญาณแสงไปยังสัญญาณไฟฟ้า	Optical to Electrical (OE)
สายคู่บิดเกลียวชนิดไม่หุ้มฉนวน	Unshielded Twisted Pair (UTP)
สายใยแก้วนำแสง	Fiber
สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด	Multimode optical fiber
สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว	Single-mode optical fiber
เส้นทางแสง	lightpath
โหมดการพักผ่อน	sleep mode
อสมการเชิงเส้น	linear inequality
ออฟไลน์	off-line
อัตราบิต	bit rate
อัลกอริธึมซิมเพล็กซ์	simplex method
อินเทอร์เน็ตแบบพลวัต	Internet dynamic

ตารางที่ ข.1 คำศัพท์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

คำศัพท์ภาษาไทย	คำศัพท์ภาษาอังกฤษ
อุปกรณ์กระจายสัญญาณแบบไร้สาย	Access point
อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง	Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA)
อุปกรณ์จัดเส้นทางหรือเราท์เตอร์	router
อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง	route processor
อุปกรณ์แยกสัญญาณทางแสง	Optical demultiplexer
อุปกรณ์รวมสัญญาณทางแสง	Optical multiplexer
อุปกรณ์สลับช่องสัญญาณดิจิทัล	Digital Cross Connect (DXC)
อุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง	Optical Cross-Connect (OXC)
เอกซ์โพเนนเชียล	Exponential
เอทีเอ็ม	Asynchronous Transfer Mode (ATM)
แอปพลิเคชัน	Application
ไอพีทราฟฟิก	Traffic IP
ไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น	IP over Wavelength Division Multiplexing (IP over WDM)
ฮิวริสติก	heuristic



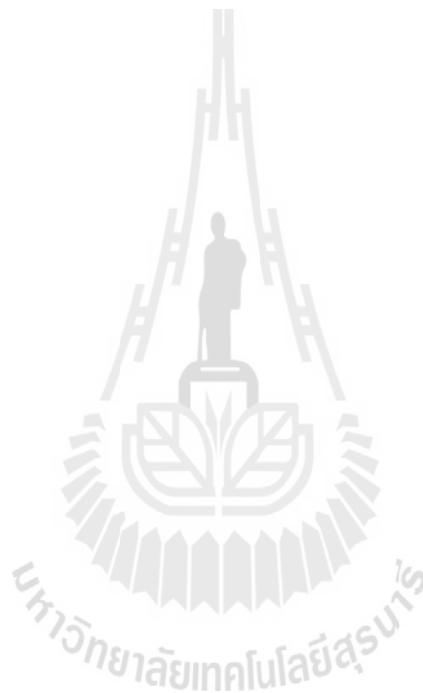
ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Keeratchairitnara, P. and Prommak, C. (2012). **Logical Topology Design in IP over WDM Networks with Load Balancing under Traffic Uncertainty**, in IEEE International Conference Communication Systems (ICCS), Singapore, pp. 55-59.

Nualmuenwai, P. and Prommak, C. (2011). **On the Analysis of IP Traffic Distribution in the Network of Suranaree University of Technology**, in International Conference World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET), Thailand, pp. 274-277.



Logical Topology Design in IP over WDM Networks with Load Balancing under Traffic Uncertainty

Paramet Keeratichairitnara and Chutima Prommak[†]

School of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand

Abstract— Traffic demand uncertainty could affect the reliability of the logical connectivity in IP over WDM networks. In this paper, we investigate the effects of traffic uncertainty and load balancing in IP over WDM networks and propose new techniques for logical topology design. In particular, we model the logical topology design in IP over WDM networks as the integer linear programming problems. Our key contribution is that the proposed model can address three important issues including (a) ensuring connectivity of the IP layer (logical topology) (b) balancing traffic load in WDM networks and (c) ensuring network capacity to accommodate traffic demand under traffic uncertainty scenarios. We observe that the proposed logical topology design method with load balancing enables much higher traffic distribution across the physical links allowing up to 63 % decreasing in unbalancing index and up to 8 % increasing in the resource utilization needed to support IP traffic demand with traffic uncertainty considerations.

Keywords- IP over WDM Networks; Logical Topology Design; Network Optimization; Traffic Uncertainty

I. INTRODUCTION

IP over Wavelength Division Multiplexing (WDM) networks have played essential role in transporting large volume of IP traffic across backbone networks of the Internet Service Providers (ISP). Efficient traffic engineering in such core networks is needed to achieve high reliability of data transportation.

Growth of IP traffic and increase in variation of the applications that require different levels of service quality and guarantee contribute to higher degree of traffic uncertainty of IP traffic. The network service providers need to manage the available network resources to sufficiently accommodate traffic demands and compromise between the limited network capacity and the service performance. The uncertainty behavior of the IP traffic brings challenges in provisioning and managing traffic demand in IP over WDM networks.

Several works in literature have devoted to study the network planning and traffic engineering in IP over WDM networks. In [7], the authors analyzed the cost and reliability issues in designing the IP over WDM backbone networks. [5] - [6] involved the logical topology design in IP over WDM networks. In [5], the authors proposed the optimal logical topology design with QoS constraints that guarantees the end-to-end QoS requirements such as call blocking rate. The

logical network configuration is assigned for each service class to minimize the network cost. In [6], the authors proposed the survivable lightpath routing of the logical topology in IP over WDM networks with the objective to maximize the logical capacity available before and after a single physical link failure.

While the studies in those previous works are significant and show interesting results, an important issue of the traffic uncertainty is not considered. There have been some works that paid attention on the traffic uncertainty in the network planning. In [2], the authors discussed the uncertainty characteristics caused by the dynamic nature of the IP-based traffic and proposed the network planning method that incorporated such nature of traffic in the network design procedures. They aimed to determine routes in the single layer networks with an objective to minimize cost of the network capacity used to accommodate the traffic demand at the specified level of traffic uncertainty. In [3], the authors considered the traffic uncertainty for the two-layer network architecture by using the same objective as in [2] to minimize cost of the network capacity usage.

Although some works have considered the traffic uncertainty in their network planning procedures, their main focus was on minimizing the network cost. The literature lacks of the study that considers load balancing and traffic uncertainty in two-layer networks such as those in the IP over WDM networks. In this paper, we not only consider the traffic uncertainty but also incorporate the load balancing issues in the traffic engineering for the backbone IP over WDM networks. In particular, we present the study of the logical topology design for IP traffic transported across IP over WDM networks. We formulate the logical topology design as an integer linear programming (ILP) problem. Our key contribution is that the proposed model can address three important issues including (a) ensuring connectivity of the IP layer (logical topology) (b) balancing traffic load in WDM networks and (c) ensuring network capacity to accommodate traffic demand under traffic uncertainty scenarios.

The remainder of this paper is organized as followed. Section II provides the problem definition and describes the problem formulation. Section III presents experiment setup and shows results and analysis. Finally, section IV concludes the paper.

This work was supported in part by Suranaree University of Technology, the Office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand and the National Research Council of Thailand (NRCT).

[†]corresponding author

II. PROBLEM DEFINITION AND FORMULATION

Traffic engineering in IP over WDM networks aims to efficiently layout large amount of IP traffic from core ISPs across backbone optical nodes. Specifically, this task is called logical topology design in which a logical connectivity in an IP layer represents IP traffic demand between a source-destination node pair whereas a physical path in a WDM layer is a set of optical fiber links connected by optical nodes.

Fig.1 shows an example of a two-layered IP-over-WDM network in which nodes of the IP layer are core routers whereas nodes of the WDM layer are optical cross connects (OXC). Fig.1 also shows examples of mapping logical links of the IP layer onto physical links of the WDM layer. The logical link (A,D) of the IP layer is routed through the physical link (1,3), (3,6) and (6,9) of the WDM layer.

This paper focuses on the logical topology design problems that aim to balance traffic demand of the IP layer onto the optical links of the WDM layer. Specially, traffic uncertainty characteristics of IP traffic are taken into account so that the provisioned capacity of the WDM layer can accommodate the variation of IP traffic.

We apply an Integer Linear Programming (ILP) approach to mathematically formulate the logical topology design problem. The proposed model aims to maximize the balance of IP traffic across optical links of the WDM layer. This objective is mathematically realized by minimizing the mean absolute deviation of IP traffic volume transported onto optical links of the WDM layer as written in the objective function, (1). (We denote the proposed model as *MAD*, shorten from *Minimizing mean Absolute Deviation*.) Other requirements such as traffic uncertainty characteristics, the network budget limitation, and the optical module specification are incorporated into the mathematical model through a set of constraints (2)-(11) presented below. Table I defines notations used in the proposed models.

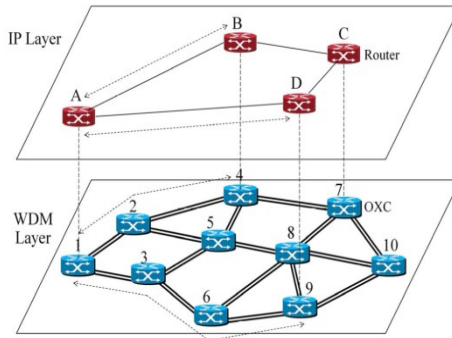


Figure 1. Network model

Objective:

$$\text{Min } \frac{1}{n} \sum_{j \in A} \left| r_j - \frac{\sum_{j \in A} r_j}{n} \right| \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{j \in A} C_j y_j + F_j z_j \leq C_L \quad (2)$$

$$\sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} f^{k,p} x_k \leq M y_j \quad \forall j \in A \quad (3)$$

$$M y_j \leq B_j \quad \forall j \in A \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P^k} f^{k,p} = 1 \quad \forall k \in D \quad (5)$$

$$\delta_j^{k,p} f^{k,p} \leq z_j \quad \forall j \in A, \forall k \in D, \forall p \in P^k \quad (6)$$

$$r_j = \sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} f^{k,p} x_k \quad \forall j \in A \quad (7)$$

$$y_j \leq r_j \quad \forall j \in A \quad (8)$$

$$z_j \leq r_j \quad \forall j \in A \quad (9)$$

$$r_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (10)$$

$$y_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (11)$$

Constraint (2) specifies budget limitation on the network cost, including the cost of using network capacity and the fixed cost which covers the optical modules and the installation cost. Constraint (3) ensures that the sufficient number of optical modules is provided for an optical link j so that link j can accommodate fluctuation of all IP traffic demands transported over link j . Variation of IP traffic demand is incorporated into the parameter x_k which can be calculated as written in (12) [8]. Let us consider the following form of chance constraint to ensure that capacity or bandwidth allocated on link is greater than or equal to an uncertain traffic volume (ξ) with probability can be written as $P(x \geq \xi) \geq \alpha$ where $0 \leq \alpha \leq 1$, and the traffic demand can be carried with α -level of guarantee. Assume that the traffic is normally distributed with mean (μ) and variance (σ^2). The random variable (ξ) has cumulative distribution function $\Phi(\cdot)$ and its inverse transform $\Phi^{-1}(\cdot)$. Thus, the parameter x_k can be written as

$$x_k = \mu_k + \Phi^{-1}(\alpha_k) \sigma_k \quad (12)$$

Constraint (4) specifies capacity limitation (B_j) on an optical link j . Constraint (5) states that the traffic demand k can select one path from the predetermined path set P^k . Constraint (6) states that link j must be installed if the traffic demand k uses path p that routes through link j . Constraint (7) calculates total amount of IP traffic demand that is transported over an optical link j . Constraint (8)-(9) specify that if no traffic demand transported through an optical link j , the optical module y_j and the optical link z_j are not installed, i.e. enforcing $y_j=0$ and $z_j=0$. Constraint (10)-(11) state that r_j and y_j are non-negative variables.

TABLE I. NOTATIONS

Sets:	
A	A set of optical links in IP over WDM networks
D	A set of IP traffic demands
P^k	A set of predetermined paths for demand $k, \forall k \in D$
Decision variables:	
r_j	Real number indicating capacity required for link $j, \forall j \in A$
y_j	An integer indicating number of optical modules required to route traffic on link $j, \forall j \in A$
z_j	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals to 1 if link j is used ; 0 otherwise
$f^{k,p}$	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals to 1 if the demand k selects path p from the predetermined path set P^k ; 0 otherwise
Constant parameters:	
M	The capacity unit of an optical module
B_j	The capacity limitation on an optical link $j, \forall j \in A$
C_j	The cost of an optical module used on an optical link $j, \forall j \in A$
F_j	The fixed cost for an optical link $j, \forall j \in A$
C_L	The network cost limitation
x_k	The volume of traffic demand $k, \forall k \in D$
$\delta_j^{k,p}$	A binary $\{0, 1\}$ parameter that equals to 1 if path $p \in P^k$ for demand k uses link j ; 0 otherwise
n	The number of optical links in set A

TABLE II. CONSTANT PARAMETERS USED IN THE EXPERIMENTS

Parameters	Values
Capacity unit of an optical module	STMI (155.52 Mbps)
The capacity limitation on an optical link	5000 Mbps
The cost of an optical module	150k
The fixed cost for an optical link	15k

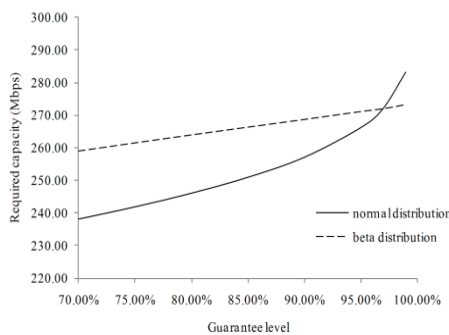


Figure 2. The traffic volume at different levels of traffic uncertainty

III. NUMERICAL EXPERIMENTS AND ANALYSIS

In this section we present numerical evaluations on the effectiveness of the proposed MAD model. In our experiment, we adopted the IP over WDM network shown in Fig. 1 in which the WDM layer consists of ten OXC nodes and sixteen physical links. We considered ten logical links in an IP layer which represents ten IP traffic demands between ten source-destination node-pairs which were randomly selected.

The constant parameters used in our experiments are given in table II. The unit cost of an optical module and fixed operational cost are normalized based on the industrial pricing in Thailand. We considered the traffic uncertainty based on the normal and beta distribution which are the traffic characteristic described in [1] and [4], respectively. The mean and standard deviation of the traffic are 225 Mbps and 25 Mbps, respectively. Fig. 2 depicts the volume of traffic demand at different level of traffic uncertainty. In particular, we conducted experiments for three levels of uncertainty guarantee, including 90%, 95%, and 99%. In case of the normal distribution, the values of x_k for each guarantee levels are 257.04, 266.12, and 283.16 Mbps, respectively. In case of the beta distribution, the values of x_k for each guarantee levels are 266.84, 271.75, and 280.01 Mbps, respectively.

First we compare our proposed MAD model with those presented in [3] of which the objective function is to minimize the network cost with constraints on the optical link capacity and the amount of traffic demand. We denote this approach as *MC (Minimize Cost)* model. Unlike MC model, MAD model aims to minimize the mean absolute deviation of IP traffic volume transported onto optical links of the WDM layer. The logical topology design was solved by implementing the mathematical formulations with the ILOG-OPL development studio and inputting a set of predetermined paths for each traffic demand (P^k) to the model. Then it was solved with CPLEX 5.2 optimization solver. Computations were performed on an Intel Centrino Core2 Duo Processor 2.0 GHz and 2GB of RAM.

Fig. 3 and 4 illustrate traffic distribution across the network links for the case of traffic uncertainty guarantee at 90% and 99%, respectively. The figures compare traffic volume on each link which was resulted from using MC and MAD model. We can see using MC model some links carry high amount of traffic demand whereas many links carry very little or no traffic demand. Using the proposed MAD model, on the other hands, load balancing could be achieved across most of the physical links, except on the link 17th which was unavoidable because it is a bottleneck of the physical connectivity of the WDM layer. Note that the normal distribution was applied in this comparison.

Next we further investigate the effects of the network cost limitation on load balancing of the proposed MAD model. In order to evaluate this factor, we define a performance measure called an unbalance index which is the mean absolute deviation of IP traffic volume transported onto optical links of the WDM layer as written in (1). Fig. 5 and 6 compare load balancing in the network when enforcing different network cost limitation on the logical topology design. The normal and

beta distribution were applied in experiments of Fig. 5 and 6, respectively. We can see that in both figures unbalance index decreases as the budget for the logical topology design increases. However, there is limitation on the level of load balancing regardless of how much we increase the budget value. It appears that although the budget was increased higher than 10,500 units, the load balancing did not improve. This limitation may be caused by how optical links were layout in the WDM layer.

Next let's consider different level of traffic uncertainty guarantee. Fig. 5 and 6 also shows results of 90%, 95% and 99% uncertainty guarantee. We can see that at any value of the network budget, a higher level of uncertainty guarantee results in less load balancing, i.e. higher value of unbalance index. Fig. 7 – 9 compare load balancing in the network when applying different traffic distribution at 90%, 95% and 99% uncertainty guarantee, respectively. Fig. 9 shows that at high level of uncertainty guarantee (99%), using either normal or beta distribution would yield similar level of load balancing at any value of the network budget. Types of traffic distribution affect level of load balancing when the traffic uncertainty guarantee decreases as illustrated in Fig. 7 and 8. We can see that using the normal distribution results in lower value of unbalancing index, i.e. higher level of load balancing in the network.

Finally, we analyze the utilization of the provisioned capacity on optical links in the WDM layer. Link utilization is defined as the percentage of traffic volume carried on an optical link compared with the provisioned capacity on the link. Table III reports link utilization when applying different levels of traffic uncertainty guarantee at different values of the network budget. The table also compares link utilization when using the normal distribution versus the beta distribution. We can see that at 90% traffic uncertainty guarantee, the mean link utilization is around 83% and 86% for the normal and beta distribution, respectively. As the percentage of traffic uncertainty guarantee increases, the mean link utilization increases whereas the standard deviation decreases.

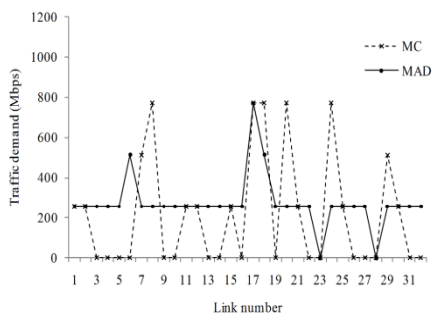


Figure 3. Traffic demand on network links for 90% uncertainty guarantee

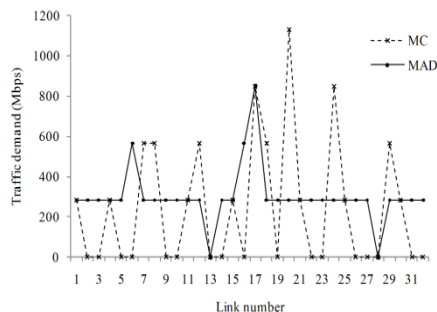


Figure 4. Traffic demand on network links for 99% uncertainty guarantee

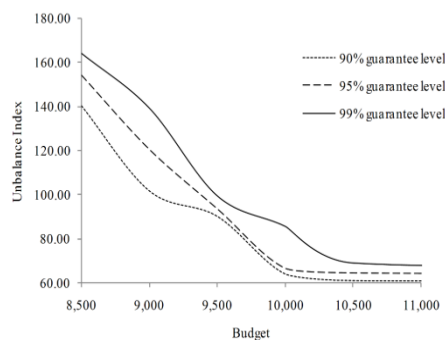


Figure 5. Unbalance index in case of normal distribution

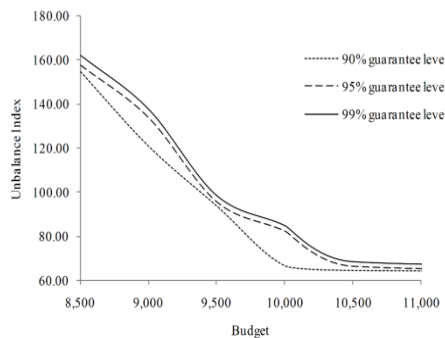


Figure 6. Unbalance index in case of beta distribution

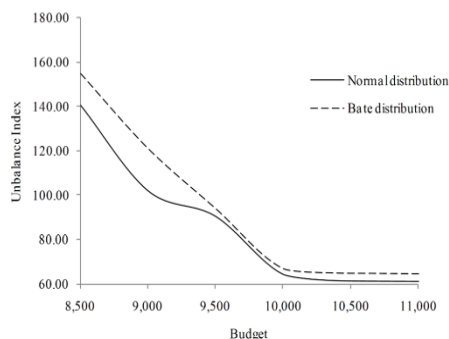


Figure 7. Unbalance index in case of 90% uncertainty guarantee

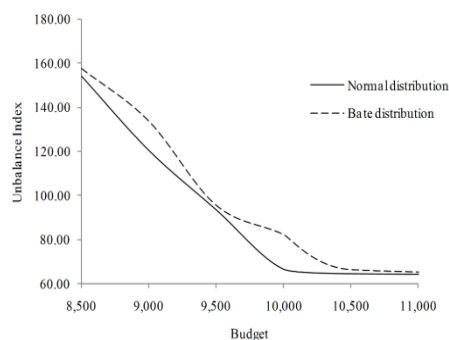


Figure 8. Unbalance index in case of 95% uncertainty guarantee

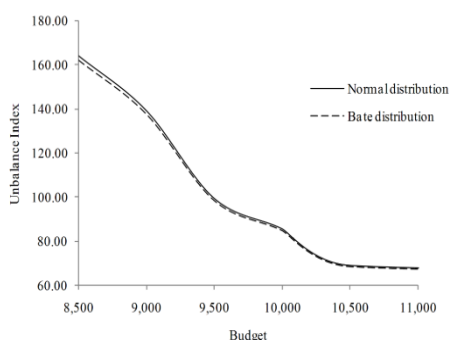


Figure 9. Unbalance index in case of 99% uncertainty guarantee

TABLE III. LINK UTILIZATION

Guarantee Level	Budget ($\times 10^3$)	Normal Distribution		Beta Distribution	
		Mean	SD	Mean	SD
90%	8500	84.42%	4.88%	86.08%	0.00%
	9500	82.49%	6.43%	86.08%	0.00%
	10500	83.47%	3.03%	86.49%	2.25%
95%	8500	85.85%	0.00%	87.66%	0.00%
	9500	85.85%	0.00%	87.66%	0.00%
	10500	86.25%	2.24%	87.66%	0.00%
99%	8500	91.34%	0.00%	90.33%	0.00%
	9500	91.34%	0.00%	90.33%	0.00%
	10500	91.34%	0.00%	89.29%	5.59%

IV. CONCLUSION

This paper has investigated the load balancing problems with special consideration of traffic uncertainty for efficiently transporting IP traffic across IP over WDM networks. We propose a novel mathematical formulation as an integer linear programming that can determine optimal paths and sufficient optical capacity to accommodate traffic demand at a desired level of traffic uncertainty guarantee. Numerical experiments illustrate that the proposed method yield more efficient logical connectivity of IP traffic demand compared with other methods in term of load balancing and link utilization on the optical links of the WDM layer. Our ongoing works further investigate performance and effectiveness of the proposed approach. Specially, we are interested in the diversity of traffic transmission paths to enhance the quality of delivery in real network deployment scenarios.

REFERENCES

- [1] T. Telkamp, "Traffic characteristics and network planning," ISMA, Oct 2002.
- [2] K. Meesublak, "Network design under demand uncertainty," in Proceedings of APAN Network Research Workshop, August 2008, pp. 19–23.
- [3] K. Meesublak, "A two-layer network design problem under traffic uncertainty", in Conf. ECTI-CON, vol. 2, May 2009, pp. 914–917.
- [4] P. Nualmuenwai and C. Prommak, "On the analysis of IP traffic distribution in the network of Suranaree University of Technology," in Conf. WASET, Thailand, 2011, pp. 362–365.
- [5] W. Ling and Y. Peida, "The optimal design of logical topology with QoS constraints in IP over WDM network," in Conf. Communication Technology ICCT, vol. 1, April 2003, pp. 706–709.
- [6] T. Lin, Z. Zhou and K. Thulasiraman, "Logical topology survivability in IP-over-WDM networks : Survivable lightpath routing for maximum logical topology capacity and minimum spare capacity requirements," in Conf. DRCN International Workshop, 2011, pp. 1–8.
- [7] B. Ramamurthy, K. K. Ramakrishnan and R. K. Sinha, "Cost and Reliability Considerations in Designing the Next-Generation IP over WDM Backbone Networks," in Proceedings of ICCCN, 2011, pp. 1–6.
- [8] B. Liu, Theory and Practice of Uncertain Programming, 3rd ed., UTLAB: Beijing, 2009, pp. 37–42.

On the Analysis of IP Traffic Distribution in the Network of Suranaree University of Technology

Paramet Nualmuenwai and Chutima Prommak*

Abstract—This paper presents the IP traffic analysis. The traffic was collected from the network of Suranaree University of Technology using the software based on the Simple Network Management Protocol (SNMP). In particular, we analyze the distribution of the aggregated traffic during the hours of peak load and light load. The traffic profiles including the parameters described the traffic distributions were derived. From the statistical analysis applying three different methods, including the Kolmogorov Smirnov test, Anderson Darling test, and Chi-Squared test, we found that the IP traffic distribution is a non-normal distribution and the distributions during the peak load and the light load are different. The experimental study and analysis show high uncertainty of the IP traffic.

Keywords—IP traffic analysis, IP traffic distribution, Traffic uncertainty

I. INTRODUCTION

UNDERSTAND the IP traffic characteristics is essential to manage the network resource utilization effectively. Various applications transferred over IP networks require different levels of service quality and guarantee. The network service providers need to manage network resources available to accommodate traffic demands and compromise between the limited network capacity and the service performance. The uncertainty behavior of IP traffic brings challenges to the IP network provisioning and management.

Several works in literature have paid attention on the study of the IP traffic characteristics. In [1], the authors present the implementation of the network traffic supervision system by using the method that analyzing traffic feature parameters distribution. In [2], the internet traffic model with a linear-time generation algorithm was proposed. The generated traffic trace is long-range dependent and its rates are distributed with a shifted gamma distribution. In [3], the authors present the internet aggregate traffic analysis at the flow level, in both spatial and temporal dimensions. In [4], a close relationship among network traffic, network user and network application in the complex network environment were studied and analyzed. The authors proposed a new network traffic model based on the use of Gini coefficient. The proposed model takes into consideration the network traffic profiles, user behaviors

and the network applications. In [5], the authors report the growth of the internet traffic and bandwidth availability of three major Internet service providers in Thailand.

Most existing works in literature focused on the study of traffic applications and interested in management and analysis of traffic network. While the results and finding reveal crucial characteristics, the literature lacks of the study on the aggregate traffic behaviors. Therefore, this paper presents the study of the temporal characteristics of the aggregated traffic that was collected from the network of Suranaree University of Technology using the software based on the Simple Network Management Protocol (SNMP). In particular, we analyze the distribution of the aggregated traffic during the hours of peak load and light load and derive the traffic profiles including the parameters described the traffic distributions.

The rest of this paper is structured as follows. Section II presents the network structure and the experiment setup. Section III presents the IP traffic characteristic and the distribution analysis. The parameters of the distribution are derived. Finally, we conclude the paper in section IV.

II. NETWORK STRUCTURE AND EXPERIMENT DESIGN

Network for the distribution feature analysis in this study is network within Suranaree University of Technology. This is internal network connected to external networks, which the network spend Firewall between internal network and external network to network security. Firewall is protected safety for network by the traffic connect to multilayer switch of internal network through optic cable size 10 Gbps and then distribute to switch of building through optic cable size 10 Gbps and forward to subswitch of the agency or organization through optic cable size 1 Gbps and distribute to Access Point, which Access Point is wireless local area network (WLAN) that connect through Unshielded Twisted Pair cable (UTP) size 1 Gbps. We select feature analysis of traffic internet of dormitories within campus. As shown in Figure 1, which network of dormitories within campus use volume of traffic as 80 percent of all volume of traffic.

For analysis of traffic feature, we are operation using monitor traffic program for traffic detection to save data of traffic. The monitor traffic program will run in the application layer of OpenSystem Interconnection Reference Model (OSI), which protocol is Simple Network Management Protocol (SNMP). But, some programs might use other protocols to help for monitor traffic. In this research, we operate using PRTG Traffic Grapher Program [8] to save data of traffic.

This work was supported in part by Suranaree University of Technology, the Office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand and the National Research Council of Thailand (NRCT).

P. Nualmuenwai and C. Prommak*, are with the School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand (phone: 66-44-224393; fax: 66-44-224603; e-mail: cprommak@sut.ac.th). *corresponding author

We operate to save data of traffic in one month by collection data on both main switch and subswitch. we are show example of main switch (Switch S4) in Fig. 2 and subswitch (Switch S13) in Fig. 3, which both shows an example usage around traffic within 7 days (1 week) by this is saved to every 1 minute. We observe that more volume of traffic on main switch than volume of traffic on subswitch explicitly. In Fig. 4 shows the comparison of traffic in each day of each week, by show an example on Thursday which is working day and Sunday which is a holiday. Both show that

volume of traffic for each day of each week is used in the same way, which working day will be running volume of traffic rather than the holiday. For analysis of traffic feature, we have analyzed symmetric and outlier and then consider histogram of data. We operate using EasyFit program [9] to analyze the distribution of traffic in Peak-load hour and Light-load hour with Kolmogorov Smirnov test, Anderson Darling test and Chi-Squared test. The results of these analysis show that distribution feature and we check the accuracy of the distribution feature of traffic with P-P Plot.

International Science Index 60, 2011 waset.org/publications/15202

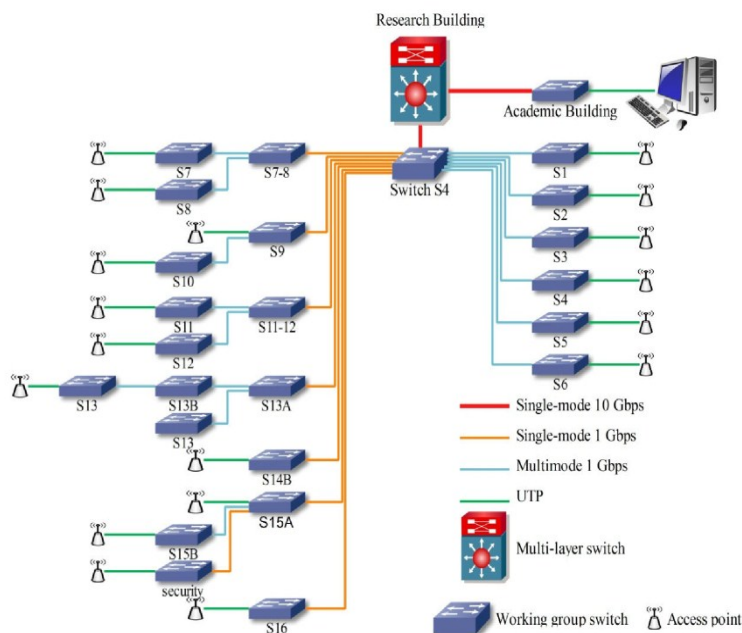


Fig. 1 Structure of the network in Suranaree University of Technology

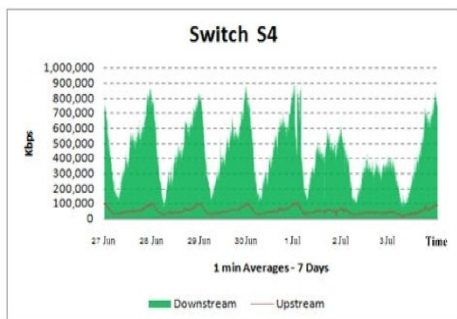


Fig. 2 Traffic volume at Switch S4

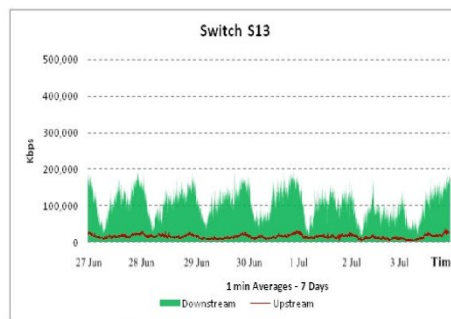
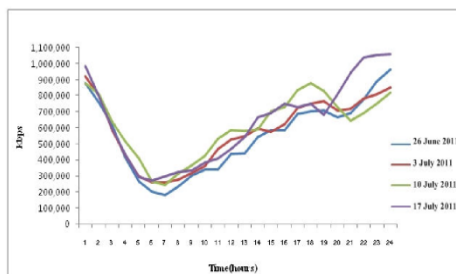
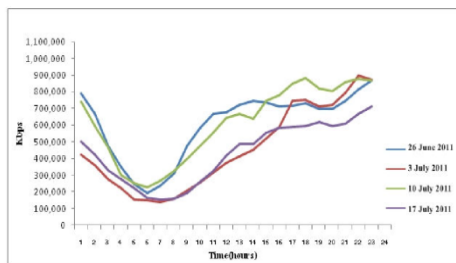


Fig. 3 Traffic volume at Switch S13



(a) Thursday



(b) Sunday

Fig. 4 Comparison of traffic at Switch S4

International Science Index 60, 2011 waset.org/publications/15202

III. ANALYSIS DISTRIBUTION FEATURE OF TRAFFIC

We obtained data of traffic from monitor traffic program. We analyze of traffic feature during peak-load hour and Light-load hour. First, the traffic data is outlier analysis, and select devoid outlier data. We obtained data set into histogram to symmetric analysis. In Fig. 5-6 show the histogram of Switch S4 (main switch) for Peak-load hour and Light-load hour respectively. In Fig. 7-8 show the histogram of Switch S13 (subswitch) for Peak-load hour and Light-load hour respectively. We found that distribution feature of data for histogram in the Peak-load is left skewed and distribution feature of data in the Light-load is right skewed which represent is asymmetric, this means that traffic data feature is non-normal distribution.

Due to traffic data is non-normal distribution. Thus, we analyze traffic data using EasyFit program to rank distribution with Goodness of fit tests by Kolmogorov Smirnov Test, Anderson Darling Test and Chi-Squared Test, which we obtained the distribution feature [6] as shown in table I. Switch S4 in Peak-load hour is Beta distribution, Switch S4 in Light-load hour is Johnson SB Distribution, Switch S13 in Peak-load hour is Gen. Extreme Value Distribution and Switch S13 in Light-load hour is Johnson SB Distribution, by we show parameter value for the distribution feature [6] of traffic data in table I.

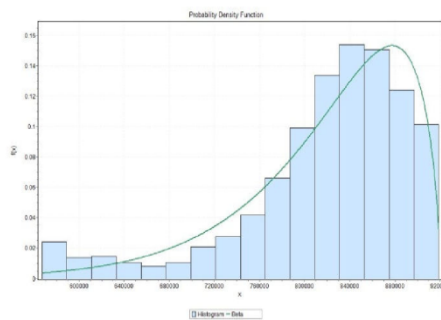


Fig. 5 Histogram of traffic during peak-load hours at Switch S4

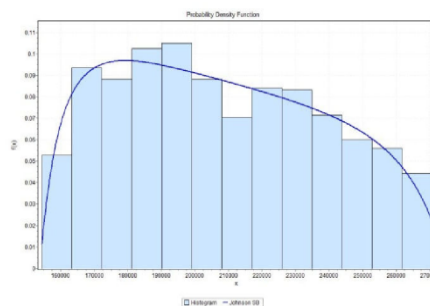


Fig. 6 Histogram of traffic during light-load hours at Switch S4

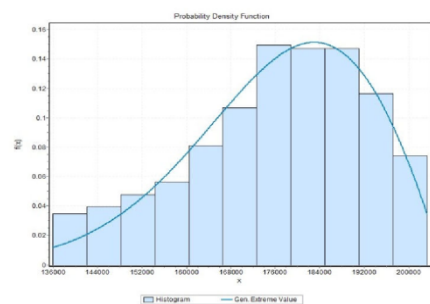


Fig. 7 Histogram of traffic during peak-load hours at Switch S13

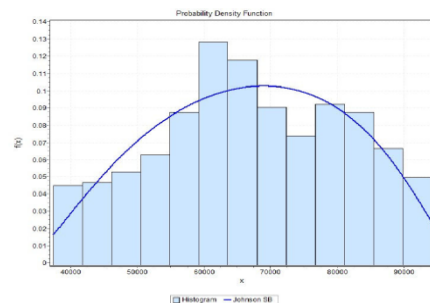


Fig. 8 Histogram of traffic during light-load hours at Switch S13

We analyzed distribution feature of traffic using Goodness of fit tests with Kolmogorov Smirnov Test, Anderson Darling Test and Chi-Squared Test which we obtained distribution feature of traffic, and then we check the accuracy of the distribution with P-P Plot analysis, as shown in Fig. 9-10 which each figure represents that probability of data traffic for the distribution feature is similar to probability of theory for the distribution features. This means that traffic is the distribution feature according to distribution features of traffic that obtained from Goodness of fit tests.

TABLE I
DISTRIBUTION PARAMETERS

Switch	Distribution	Parameters
S4 peak-load	Beta	$a_1 = 36.612$
		$a_2 = 1.6628$
		$a = -1.4285 \times 10^6$
		$b = 9.2046 \times 10^5$
S4 light-load	Johnson SB	$\gamma = 0.21722$
		$\delta = 0.74927$
		$\lambda = 1.2320 \times 10^5$
		$\xi = 1.5313 \times 10^5$
S13 peak-load	Gen. Extreme Value	$k = -0.52069$
		$\sigma = 17618.0$
S13 light-load	Johnson SB	$\gamma = -0.1054$
		$\delta = 1.0219$
		$\lambda = 69493.0$
		$\xi = 30793.0$

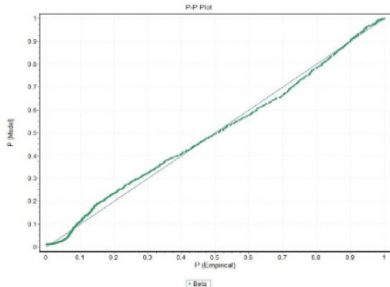


Fig. 9 P-P Plot of the peak-load hour at Switch S4

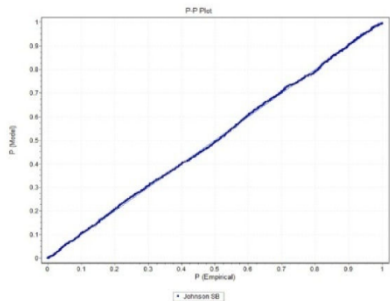


Fig. 10 P-P Plot of the light-load hour at Switch S4

IV. CONCLUSION

In this paper, we analyzed the distribution feature of traffic with Monitor Traffic for Internet Traffic of dormitories within Suranaree University of Technology. Furthermore, we consider used in the Peak-load hour and Light-load hour by analysis the distribution feature of traffic with histogram that represents the data that is non-normal distribution. Therefore, we analyzed of feature of traffic using Goodness of fit tests with Kolmogorov Smirnov Test, Anderson Darling Test and Chi-Squared Test, and check the accuracy of the distribution feature of traffic with P-P Plot to indicate the traffic distribution feature of property.

REFERENCES

- [1] X. Du, Y. Yang and X. Kang, "A Network Traffic Supervision System Based on Feature Parameters Distribution," in *Proc. 3rd Int. Conf. Innovative Computing Information and Control*, 2008, pp. 377-381.
- [2] S. Kim, J. Y. Lee, and D. K. Sung, "A Shifted Gamma Distribution Model for Long-Range Dependent Internet Traffic," *IEEE Communications Letters*, Vol. 7, No. 3, Mar. 2003, pp. 124-126.
- [3] L. Rodrigues and P. R. Guardieiro "A Spatial and Temporal Analysis of Internet Aggregate Traffic at the Flow Level," in *2004 Proc. IEEE Int. Conf. Communications Society Globecom*, pp. 685-691.
- [4] P. Liu, F. Liu and Z. Lei, "Model of Network Traffic based on Network Applications and Network Users," in *2008 Proc. IEEE Int. Symposium Conf. Computer Science and Computational Technology*, pp. 171-174.
- [5] P. Rungroj and C. Chamsripinyo, "Measuring Traffic on the Network to the Internet in Thailand," in *2007 NSTDA Annual Conf.*, pp. 926-931.
- [6] R. Jain, "The Art of Computer Systems Performance Analysis," New York: John Wiley & Sons, 1991, ch. 29.
- [7] Net-SNMP (2011, May 26). [Online]. Available: <http://www.net-snmp.org/>
- [8] Paessler AG The Network Monitoring Company 1998-2011. [Online]. Available: <http://www.paessler.com/prtg/>
- [9] MathWave Technologies 2004-2011. [Online]. Available: <http://www.mathwave.com/>

Chutima Prommak received her Ph.D. and M.S. degree in Telecommunications from the University of Pittsburgh in 2005 and from the University of Colorado at Boulder in 1998, respectively and received her B.S. from the University of Khon Kaen in 1992. She is now an assistant professor at the School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. Her research interests include wireless network design, optical network design, network optimization and heuristic approaches for network design.

Paramet Nualmuenwai received him B.S. degree in Telecommunication Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand in 2010. Currently he is pursuing him M.S. degree in the school of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology. He is a member at the Wireless Communication Research Lab at Suranaree University of Technology.

International Science Index 60, 2011 waset.org/publications/15202

ประวัติผู้เขียน

นายปารเมษฐ์ กิริตชัยฤทธิ์นารา เกิดเมื่อวันที่ 27 เมษายน พุทธศักราช 2532 สำเร็จ การศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 จากโรงเรียนอัสสัมชัญนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา และ ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 แผนกวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย จังหวัด นครราชสีมา จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีพุทธศักราช 2550 หลังจากสำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีในปีพุทธศักราช 2552 เกียรตินิยมอันดับ 1 ได้มีความสนใจที่จะศึกษาต่อ ในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ด้านการออกแบบและวางแผนเครือข่ายแกนหลัก จึง ได้สมัครเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี และได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาไฟฟ้า แขนงไฟฟ้าสื่อสาร ในปีพุทธศักราช 2556

ระหว่างศึกษาได้เสนอบทความเข้าร่วมประชุมในงานประชุมวิชาการนานาชาติ World Academy of Science, Engineering and Technology ครั้งที่ 60 (WASET 2011) ณ โรงแรมอมารี วอเตอร์เกท กรุงเทพมหานคร วันที่ 25-26 ธันวาคม 2554 และ งานประชุมวิชาการนานาชาติ IEEE Singapore International Conference on Communication Systems ครั้งที่ 13 (IEEE ICCS 2012) ประเทศ สิงคโปร์ วันที่ 21-23 พฤศจิกายน 2555 โดยมีรายละเอียดดังภาคผนวก ค