รหัสโครงการ SUT7-709-53-12-33

รายงานการวิจัย

การวางแผนโครงข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกเพื่อการใช้งานแบนด์วิดท์ในโครงข่ายแกนหลักของชาติอย่างมีประสิทธิภาพ

(IP over WDM Network Planning Under Traffic Uncertainty for Efficient Bandwidth Utilization in National Backbone Networks)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-709-53-12-33

รายงานการวิจัย

การวางแผนโครงข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกเพื่อการใช้งานแบนด์วิดท์ในโครงข่ายแกนหลักของชาติอย่างมีประสิทธิภาพ

(IP over WDM Network Planning Under Traffic Uncertainty for Efficient Bandwidth Utilization in National Backbone Networks)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุติมา พรหมมาก

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2555

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ช่วยให้งานวิจัยนี้เสร็จลุล่วงด้วยดี ขอบคุณศูนย์คอมพิวเตอร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการวิจัย ขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในการให้ทุนสนับสนุนการวิจัย และให้งบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย ณ การประชุมวิชาการนานาชาติ

ผู้วิจัย

มิถุนายน 2555

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวางแผนโครงข่ายสำหรับการจัดส่งทราฟฟิกไอพีผ่านโครงข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (IP over WDM) โดยได้พิจารณาลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกและความสมดุลของการจัดส่งทราฟฟิกด้วย เทคนิคดังกล่าวได้พัฒนาขึ้นในรูปของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม

นวัตกรรมของงานวิจัยนี้ได้แก่การพัฒนาเทคนิคการวางแผนโครงข่าย IP over WDM ที่สามารถ (ก) สร้างความมั่นใจในการสื่อสารข้อมูลในโครงข่ายไอพี (ข) สามารถทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกภายในโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ใช้การมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น และ (ค) สามารถรับประกันความเพียงพอของความจุช่องสัญญาณที่เตรียมให้กับทราฟฟิกไอพีซึ่งอาจมีความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิกในระดับที่ต้องการได้ จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าเทคนิควิธีที่นำเสนอสามารถกระจายทราฟฟิกในโครงข่ายใยแก้วนำแสงมากขึ้น ทำให้ลดความไม่สมดุลทราฟฟิกได้ถึง 68 % และสามารถเพิ่มการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรโครงข่ายได้สูงถึง 8 % ในการรองรับทราฟฟิกไอพีที่มีลักษณะทราฟฟิกที่แปรปรวน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

This research presents a study and development of network planning techniques for transporting traffic across IP over WDM networks. In particular, traffic uncertainty and load balance are incorporated into the network planning procedure. The proposed techniques are mathematically formulated as an integer linear programming model.

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 network planning technique with load balancing consideration 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.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....ก
บทคัดย่อ .....ข
Abstract .....ค
สารบัญ .....ง
สารบัญภาพ .....ฉ
สารบัญตาราง .....ช
บทที่ 1 บทนำ
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและปริทัศน์วรรณกรรม
2.1 โครงสร้างโครงข่าย IP over WDM 4
2.2 การวางแผนโครงข่าย IP over WDM 5
2.3 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....6
2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....7
บทที่ 3 การทดลองและวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกไอพี
3.1 ความสำคัญและที่มาของการวิเคราะห์ลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกไอพี.....9
3.2 โครงสร้างของโครงข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและการออกแบบการทดลอง....10
3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิก.....13
3.4 สรุป.....17
บทที่ 4 การวางแผนโครงข่ายไอพีบนบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นภายใต้ความไม่แน่นอน
ของทราฟฟิก
4.1 แนวคิดในการวางแผนโครงข่ายเสมือนภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิ.....18

หน้า

4.2 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม.....20
4.2.1 การนิยามตัวแปร.....20
4.2.2 สมการเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มสำหรับวางแผนโครงข่ายเสมือน.....21
4.3 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม.....24
4.3.1 การแปลงสมการเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มเป็นคำสั่งในโปรแกรม.....24
4.3.2 ส่วนประกอบของโปรแกรม.....26
4.4 การทดลองและการวิเคราะห์ผล.....28
4.4.1 ลักษณะพารามิเตอร์และโครงข่ายที่ใช้ในการทดลอง.....28
4.4.2 การวิเคราะห์ความสมดุลของทราฟฟิกในโครงข่าย.....29
4.4.3 การศึกษาผลกระทบจากงบประมาณที่กำหนดและความไม่แน่นอนของทราฟฟิก.....31
4.4.4 การวิเคราะห์การใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวของทราฟฟิกที่ต่างกันในการวางแผนโครงข่ายเสมือน.....32
4.4.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการใช้ทรัพยากรโครงข่าย.....34
4.5 สรุป.....35
บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....36
บรรณานุกรม.....38
ภาคผนวก
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....41
ประวัติผู้วิจัย.....51

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แบบจำลองโครงข่าย IP over WDM 5
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของโครงข่ายภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....11
รูปที่ 3.2 ปริมาณของทราฟฟิกที่ไหลผ่านสวิตซ์ S4.....12
รูปที่ 3.3 ปริมาณของทราฟฟิกที่ไหลผ่านสวิตซ์ S13.....12
รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบการใช้งานทราฟฟิกที่ Switch S4.....13
รูปที่ 3.5 Histogram ของทราฟฟิกในช่วงเวลา peak-load ของ Switch S4.....14
รูปที่ 3.6 Histogram ของทราฟฟิกในช่วงเวลา light-load ของ Switch S4.....14
รูปที่ 3.7 Histogram ของทราฟฟิกในช่วงเวลา peak-load ของ Switch S13.....14
รูปที่ 3.8 Histogram ของทราฟฟิกในช่วงเวลา light-load ของ Switch S13.....15
รูปที่ 3.9 P-P Plot ในช่วง Peak-load ของ Switch S4.....16
รูปที่ 3.10 P-P Plot ในช่วง Light-load ของ Switch S4.....16
รูปที่ 4.1 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio.....27
รูปที่ 4.2 โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลอง.....28
รูปที่ 4.3 กรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 90%.....30
รูปที่ 4.4 กรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 99%.....31
รูปที่ 4.5 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการกระจายแบบปกติ.....32
รูปที่ 4.6 ปริมาณของทราฟฟิกในระดับการรับประกันความไม่แน่นอนที่แตกต่างกัน.....33
รูปที่ 4.7 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%.....33
รูปที่ 4.8 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 95%.....34
รูปที่ 4.9 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%.....34

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคุณลักษณะการกระจาย.....15
ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรเซท.....20
ตารางที่ 4.2 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรตัดสินใจ.....20
ตารางที่ 4.3 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่.....21
ตารางที่ 4.4 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบ
คำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....25
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ค่าคงที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย.....29
ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ข่ายเชื่อมโยง.....35

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาระบบสื่อสารโทรคมนาคมของประเทศ โดยเฉพาะการพัฒนาในส่วนของโครงข่ายแกนหลักของชาติซึ่งได้มีการพัฒนาจากการใช้งานเทคโนโลยีไมโครเวฟมาจนถึงการใช้ระบบส่งสัญญาณใยแก้วนำแสงซึ่งเริ่มแรกเป็นแบบที่ส่งลำแสงเดียวในแต่ละใยแก้ว จนกระทั่งในปัจจุบันเป็นระบบที่สามารถส่งหลายลำแสงผ่านไปในใยแก้ว โดยใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า การมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (WDM: Wavelength Division Multiplexing) การใช้งานแบนด์วิดท์ของโครงข่ายแกนหลักก็มีลักษณะที่เปลี่ยนไปเช่นกัน ในอดีตลักษณะการใช้งานจะอยู่ในรูปของการจองแบนด์วิดท์ในโครงข่ายแกนหลักเพื่อใช้เชื่อมต่อระบบสื่อสารระหว่างชุมสายโทรศัพท์ของเครือข่ายโทรศัพท์ ไม่ว่าจะเป็นชุมสายของเครือข่ายโทรศัพท์สาธารณะ หรือเครือข่ายโทรศัพท์เซลลูลาร์ แบนด์วิดท์ที่ทำการจองดังกล่าวก็สามารถกำหนดขนาดต่างๆ ได้ตามมาตรฐานการมัลติเพล็กซ์ PDH/SDH (Plesiochronous Digital Hierarchy/ Synchronous Digital Hierarchy) นั่นคือสามารถจองแบนด์วิดท์ขนาดตั้งแต่ E1 (1.544 Mbps) จนถึง E4 (274.176 Mbps) หรือ ตั้งแต่ STM-0 (51.84 Mbps) จนถึง STM-256 (40 Gbps) ลักษณะการจองแบนด์วิดท์ดังกล่าวเป็นการสร้างเส้นทางสื่อสารเพื่อเชื่อมต่อระหว่างชุมสายหรือโหนดต่างๆภายในเครือข่ายสื่อสารแบบถาวร นั่นคือไม่ว่าจะมีทราฟฟิกวิ่งผ่านเส้นทางนั้นหรือไม่ ก็จะมีการจองแบดท์วิดอยู่ตลอดเวลา ทำให้ทราฟฟิกอื่นๆภายในโครงข่ายแกนหลักไม่สามารถใช้งานแบนด์วิดท์ดังกล่าวได้

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบส่งข้อมูลของโครงข่ายแกนหลักโดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไอพีบนระบบส่งสัญญาณใยแก้วนำแสง เช่น เทคโนโลยี IP over WDM [1] การใช้งานแบนด์วิดท์เพื่อส่งข้อมูลระหว่างโหนดภายในโครงข่ายแกนหลักที่ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวมีลักษณะการใช้งานที่ขนาดของแบนด์วิดท์ที่ต้องการเพื่อส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนดต่างๆมีขนาดไม่คงที่ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการส่งระหว่างคู่โหนดนั้นๆ ลักษณะดังกล่าวเรียกว่า ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก (traffic uncertainty) ดังนั้นการที่จะใช้วิธีการกำหนดเส้นทางและการจองแบนด์วิดท์แบบถาวรที่ใช้สำหรับโครงข่ายแกนหลักแต่เดิมนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับระบบที่ความต้องของการทราฟฟิกมีลักษณะแปรปรวนดังเช่นในโครงข่ายแกนหลักแบบ IP over WDM

โครงการที่นำเสนอนี้มุ่งพัฒนาวิธีการวางแผนโครงข่ายภายแกนหลักซึ่งเน้นที่วิธีการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก เพื่อแก้ปัญหาเรื่องการจัดสรรแบนด์วิดท์และเลือกเส้นทางสื่อสารให้มีความเหมาะสมสำหรับการรองรับทราฟฟิกที่มีลักษณะแปรปรวนในโครงข่ายแกนหลักที่ใช้เทคโนโลยีแบบ IP over WDM

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อคิดค้นและพัฒนาวิธีการวางแผนโครงข่าย ซึ่งเน้นที่วิธีการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ความแปรปรวนของทราฟฟิกสำหรับระบบส่งสัญญาณแกนหลักของชาติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานแบนด์วิดท์ในโครงข่ายแกนหลักของชาติให้คุ้มค่าที่สุด
2. เพื่อพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถรับประกันการจัดสรรแบนด์วิดท์ที่เพียงพอให้กับความต้องการของทราฟฟิกในโครงข่ายแกนหลักภายใต้สภาวะที่ ทราฟฟิกมีความแปรปรวน
3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานแบนด์วิดท์ในโครงข่ายแกนหลักภายใต้สภาวะที่ทราฟฟิกมีความแปรปรวน โดยใช้วิธีการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดที่พัฒนาขึ้น และมีการพิจารณาการรับประกันการจัดสรรแบนด์วิดท์ให้กับความต้องการของทราฟฟิก โดยพิจารณาการรับประกันที่ระดับต่างๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายแกนหลักของชาติ
2. พิจารณาโครงข่ายแกนหลักที่ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไอพีบนระบบส่งสัญญาณใยแก้วนำแสง เช่น IP over WDM
3. ลักษณะทางสถิติของทราฟฟิกที่พิจารณาในโครงข่ายมีการกระจายแบบ Gaussian โดยพารามิเตอร์ที่กำหนดคุณลักษณะของทราฟฟิกได้แก่ ค่าเฉลี่ย (mean) และค่าความแปรปรวน (variance)
4. คำนวณหาขนาดของแบนด์วิดท์เพื่อรองรับความต้องการทราฟฟิกสำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยง (link) ของโครงข่ายแกนหลัก

5. พิจารณาระดับการรับประกัน (guarantee level) การจัดสรรแบนด์วิดท์ให้กับความต้องการของทราฟฟิกที่ระดับต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานแบนด์วิดท์ในโครงข่ายแกนหลักภายใต้สภาวะที่ทราฟฟิกมีความแปรปรวน

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาและสำรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการวางแผนโครงข่าย ซึ่งเน้นที่วิธีการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ความแปรปรวนของทราฟฟิกสำหรับระบบส่งสัญญาณใยแก้วนำแสงความเร็วสูง
2. ออกแบบกรอบวิธี และเกณฑ์การกำหนดเส้นทางของทราฟฟิกในโครงข่ายแกนหลัก
3. พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการกำหนดเส้นทางของทราฟฟิกในโครงข่ายแกนหลัก
4. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมชุดทดลองเพื่อกำหนดเส้นทางของทราฟฟิกในโครงข่ายแกนหลัก
5. ทดสอบและวิเคราะห์เทคนิคการกำหนดเส้นทางของทราฟฟิกในโครงข่ายแกนหลักที่พัฒนาขึ้น โดยจะทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานแบนด์วิดท์ในโครงข่ายแกนหลักภายใต้สภาวะที่ทราฟฟิกมีความแปรปรวน และมีการพิจารณาการรับประกันการจัดสรรแบนด์วิดท์ให้กับความต้องการของทราฟฟิก โดยพิจารณาการรับประกันที่ระดับต่างๆ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ : ได้เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการกำหนดเส้นทางที่สามารถรับประกันการจัดสรรแบนด์วิดท์ที่เพียงพอให้กับความต้องการของทราฟฟิกในโครงข่ายแกนหลัก ซึ่งเป็นองค์ความรู้ในการวิจัยและประยุกต์ใช้ต่อไป นอกจากนี้ยังได้บทความวิจัยที่มีคุณค่าทางวิชาการต่อวงการศึกษาและวิจัย

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ : สถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยที่มีความสนใจในวิธีการพัฒนาเทคนิคการกำหนดเส้นทางให้กับความต้องการของทราฟฟิกในโครงข่ายแกนหลัก รวมถึงหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชนที่ทำหน้าที่ดูและควบคุมระบบการทำงานของโครงข่ายแกนหลักที่เป็นระบบส่งสัญญาณใยแก้วนำแสงความเร็วสูง

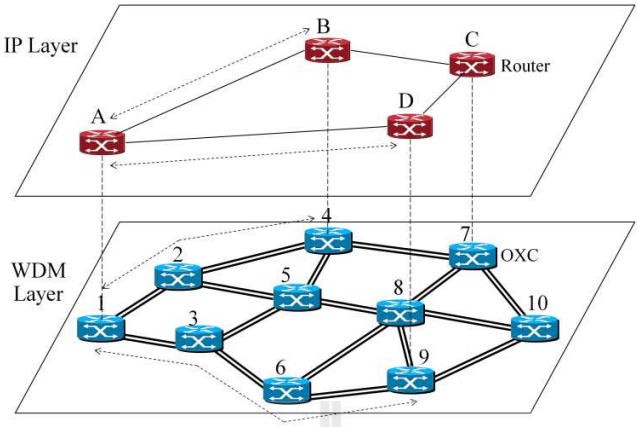
บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและปริทัศน์วรรณกรรม

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงหลักการทำงานของโครงข่าย IP over WDM และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 2.1 กล่าวถึงโครงสร้างของโครงข่าย หัวข้อ 2.2 กล่าวถึงหลักการวางแผนโครงข่าย IP over WDM หัวข้อ 2.3 กล่าวถึงกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย และหัวข้อ 2.4 เป็นการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างโครงข่าย IP over WDM

โครงข่าย IP over WDM (IP over Wavelength Division Multiplexing (WDM) networks) เป็นโครงข่ายเสมือนที่ก่อนรูปขึ้นเพื่อส่งทราฟฟิกไอพีไปบนโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (WDM networks) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.1 โดยที่โครงข่ายเสมือนจัดเป็นการเชื่อมต่อในชั้นไอพีสำหรับการส่งทราฟฟิกไอพีระหว่างเราเตอร์ต้นทาง (source router) กับเราเตอร์ปลายทาง (destination router) ส่วนการเชื่อมต่อในทางกายภาพเป็นโครงสร้างของโครงข่ายการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น ซึ่งเป็นโครงข่ายใยแก้วนำแสง (optical networks) ที่ใช้แนวคิดของการหาเส้นทางในการส่งความยาวคลื่นผ่านโนดที่เรียกว่า Optical Cross Connect (OXC) ซึ่งเชื่อมต่อโดยข่ายเชื่อมโยงใยแก้วนำแสง (optical fiber links) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีรูปร่างแบบตาข่าย (mesh topology) รูปแบบของการเชื่อมต่อประเภทนี้จะดำเนินการโดยใช้เส้นทางแสง (lightpath) ในการส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายใยแก้วนำแสง

รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างโครงข่ายเสมือนของชั้นไอพีกับโครงข่ายทางกายภาพของชั้นการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น โดยแสดงตัวอย่างเส้นทางในการส่งทราฟฟิกไอพีระหว่างคู่โนด (A, D) ของโครงข่ายชั้นไอพี ซึ่งมีเส้นทางที่สามารถเลือกส่งได้ผ่านชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสงได้แก่ เส้นทางที่ผ่านข่ายเชื่อมโยง (1,3)-(3,6)-(6,9) หรือ เส้นทางที่ผ่านข่ายเชื่อมโยง (1,2)-(2,5)-(5,8)-(8,9) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แบบจำลองโครงข่าย IP over WDM

2.2 การวางแผนโครงข่าย IP over WDM

การวางแผนโครงข่าย IP over WDM (IP over WDM network planning) ในงานวิจัยนี้พิจารณาการวางแผนการใช้งานแบนด์วิดท์ในโครงข่าย ซึ่งแบนด์วิดท์หรือความจุเป็นทรัพยากรที่มีจำกัด ดังนั้นจึงต้องมีการจัดสรรการใช้งานอย่างเหมาะสม จึงจะทำให้เกิดการใช้งานทรัพยากรโครงข่ายอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ

ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการวางแผนการใช้งานแบนด์วิดท์หรือความจุของโครงข่าย IP over WDM ได้แก่ ปริมาณทราฟฟิกระหว่างโนดต่างๆในโครงข่าย ข้อจำกัดทางกายภาพของโครงข่าย เช่น การเชื่อมต่อของข่ายเชื่อมโยงใยแก้วนำแสง แบนด์วิดท์หรือความจุของข่ายเชื่อมโยง และการ์ดที่ใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไอพี เป็นต้น นอกจากนี้ควรพิจารณาข้อกำหนดการทำงาน การควบคุมอุปกรณ์โครงข่ายใยแก้วนำแสง และการสื่อสารข้อมูลไอพีด้วย

การวางแผนแผนการใช้งานแบนด์วิดท์หรือความจุของโครงข่าย IP over WDM เป็นการกำหนดเส้นทาง และจัดสรรความจุของข่ายเชื่อมโยงให้กับทราฟฟิกที่ต้องการส่งผ่านโครงข่าย ซึ่งกระบวนการนี้อาจทำไว้ล่วงหน้าและกำหนดเส้นทางการส่งแบบคงที่ (static) หรือทำทันทีเมื่อมีความต้องการส่งทราฟฟิก และสามารถปรับเปลี่ยนเส้นทางได้ตามลักษณะทราฟฟิกที่เปลี่ยน แปลง (dynamic)

ในการกำหนดขนาดความจุที่จะจองให้สำหรับรองรับทราฟฟิกของข่ายเชื่อมโยงนั้น ควรพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกด้วย (traffic uncertainty) เนื่องจากปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการส่งระหว่างโนดในโครงข่ายจะมีความแปรปรวน เปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนผู้ใช้ และช่วงเวลาการใช้งาน เช่นในช่วงเวลาเร่งด่วนจะมีปริมาณทราฟฟิกมากกว่าเวลารุ่งเช้า

การวางแผนการใช้งานแบนด์วิดท์ในโครงข่าย IP over WDM ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เป็นการออกแบบโครงข่ายเสมือน (virtual network) ซึ่งเป็นโครงข่ายที่ซ้อนอยู่ในโครงข่ายในทางกายภาพ (physical network) ที่เป็นโครงข่ายใยแก้วนำแสง โดยการออกแบบโครงข่ายเสมือนเป็นการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความจุของข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อโนดต้นทาง (source node) ผ่านโนดต่างๆในโครงข่ายใยแก้วนำแสงไปจนถึงโนดปลายทาง (destination node)

2.3 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

โครงข่ายแกนหลักที่ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไอพีบนระบบส่งสัญญาณใยแก้วนำแสงเช่น เทคโนโลยี IP over WDM [1] เป็นการใช้งานแบบที่ไม่มีการจองแบนด์วิดท์แบบถาวรสำหรับสร้างเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างโหนดภายในเครือข่ายสื่อสาร แต่จะทำการสร้างเส้นทางและจองแบนด์วิดท์เป็นครั้งคราวตามความต้องการของทราฟฟิก (traffic demand) โดยที่ปริมาณของทราฟฟิกในช่วงเวลาต่างๆก็อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ ลักษณะดังกล่าวเรียกว่า ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก (traffic uncertainty) ซึ่งทำให้เกิดความไม่แน่นอนของขนาดแบนด์วิดท์ที่ต้องใช้ในเส้นทางสื่อสารที่เชื่อมระหว่างโหนดต้นทางถึงโหนดปลายทาง งานวิจัย [2,3] ทำการสังเกต เก็บข้อมูล และวิเคราะห์ทราฟฟิกไอพีในโครงข่ายแกนหลักทางสถิติ พบว่าเมื่อทราฟฟิกจากหลายเส้นทางมาผ่านข่ายเชื่อมโยง (link) เดียวกัน ซึ่งเรียกว่า ทราฟฟิกที่รวมตัวกัน (aggregated traffic demand) ทราฟฟิกที่รวมตัวกันดังกล่าวมีลักษณะการกระจายแบบปกติ (Normal distribution) [2,3] ดังนั้นการวางแผนเส้นทางสำหรับโครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกที่มีลักษณะดังกล่าว หากใช้วิธีการที่พิจารณาเฉพาะค่าเฉลี่ยของทราฟฟิก (mean traffic value) ก็อาจทำให้แบนด์วิดท์ที่จองให้กับเส้นทางสื่อสารไม่เพียงพอที่จะรองรับกรณีที่ทราฟฟิกแปรปรวนจนอาจมีปริมาณทราฟฟิกสูงเกินกว่าขนาดแบนด์วิดท์ที่จองไว้ ส่วนวิธีการที่พิจารณาค่าสูงสุดของ ทราฟฟิก (peak traffic value) จะมีการจองแบนด์วิดท์ไว้เท่ากับค่าสูงสุดของทราฟฟิกตามสถิติ ซึ่งขนาดของแบนด์วิดท์ดังกล่าวอาจมากกว่าขนาดของแบนด์วิดท์ที่ใช้ในวิธีที่พิจารณาค่าเฉพาะค่าเฉลี่ยของทราฟฟิกอยู่มาก แต่โอกาสที่ทราฟฟิกจะมีระดับสูงขนาดนั้นเป็นไปได้น้อย ดังนั้นการจองแบนด์วิดท์เท่ากับค่าสูงสุดของ ทราฟฟิกจึงเป็นการใช้งานทรัพยากรโครงข่ายซึ่งในที่นี้คือแบนด์วิดท์อย่างไม่คุ้มค่า ดังนั้นในการกำหนดเส้นทางและจองแบนด์วิดท์ที่เหมาะสมที่สุดในกับทราฟฟิกในโครงข่ายแกนหลักที่รองรับทราฟฟิกไอพีด้วยเทคโนโลยี IP over WDM จึงต้องคำนึงถึงลักษณะทางสถิติของทราฟฟิกที่รวมตัวกัน โดยพิจารณาค่าเฉลี่ย (mean) และค่าความแปรปรวน (variance) ของทราฟฟิก และไม่ทำการจองแบนด์วิดท์มากเกินความจำเป็น แต่สามารถกำหนดระดับการรับประกัน (guarantee level) ในการจองแบนด์วิดท์ที่

เพียงพอเพื่อให้สามารถรองรับความแปรปรวนของทราฟฟิกได้ ซึ่งเป็นแนวทางการวางแผนโครงข่ายที่รวมอยู่ในสมการคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นสมการคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming: ILP) ดังรายละเอียดที่นำเสนอในบทที่ 3

2.4 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา การวางแผนโครงข่ายที่เน้นวิธีการกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดให้กับทราฟฟิกในโครงข่ายแกนหลักส่วนมากเสนอวิธีการที่ใช้ Deterministic approaches ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธี (algorithms) หรือ แบบจำลองคณิตศาสตร์ (mathematical models) ที่มีสมมติฐานว่าผู้วางแผนโครงข่ายรู้ปริมาณที่แน่นอนของทราฟฟิกภายในโครงข่าย โดยทำการสร้างเส้นทางและจองแบนด์วิดท์ไว้แบบถาวร แนวทางดังกล่าวไม่ได้พิจารณาความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนของทราฟฟิกซึ่งถือว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของทราฟฟิกที่ส่งผ่านระบบสื่อสารภายในโครงข่ายแกนหลักที่ใช้เทคโนโลยีแบบ IP over WDM ในงานวิจัย [4,5] ได้ใช้ค่าเฉลี่ยของทราฟฟิก (mean traffic value) ในการระบุปริมาณของทราฟฟิกในแบบจำลองคณิตศาสตร์ ส่วนงานวิจัย [6,7] ได้ใช้ค่าสูงสุดของทราฟฟิก (peak traffic value) เพื่อรับประกันการจัดสรรแบนด์วิดท์ให้กับทราฟฟิก ณ เวลาที่ทราฟฟิกในโครงข่ายมีความหนาแน่นสูงที่สุด อย่างไรก็ตามการใช้ค่าเฉลี่ยหรือค่าสูงสุดของทราฟฟิกในการวางแผนโครงข่ายประเภทที่ทราฟฟิกมีลักษณะแปรปรวนอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการจัดสรรแบนด์วิดท์คืออาจมีการจองแบนด์วิดท์มากเกินความจำเป็นหรือน้อยกว่าที่ควรจะเป็น [8]

งานวิจัยแนวทางอื่นที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนโครงข่ายแกนหลักได้แก่งานวิจัยที่มีการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของทราฟฟิก เช่น งานวิจัย [9] ได้เสนอการวิเคราะห์ความไว (sensitivity analysis) ในการวางแผนโครงข่ายซึ่งเป็นการประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในปัญหาที่พิจารณา ส่วนงานวิจัย [10,11] ได้มีการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทราฟฟิกในโครงข่าย และได้มีการใช้ค่าส่วนเผื่อที่คงที่ (fixed margin) เพื่อรองรับความแปรปรวนของทราฟฟิกที่อาจเกิดขึ้น โดยในงานวิจัย [11] ได้พิจารณาการวางแผนโครงข่าย ATM ซึ่งได้มีการใช้ค่าส่วนเผื่อที่คงที่ในแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อรับประกันอัตราการปฏิเสธการใช้ช่องสัญญาณเนื่องจากแบนด์วิดท์อาจถูกจองไว้หมดแล้ว วิธีการใช้ค่าส่วนเผื่อที่คงที่นี้ถือว่าเป็นวิธีเสมือน Deterministic approaches ดังกล่าวแล้วข้างต้น เพราะยังไม่ได้มีการพิจารณาความไม่แน่นอนหรือความแปรปรวนของทราฟฟิกโดยการใช้ตัวแปรทางสถิติอื่นๆในการกำหนดลักษณะความแปรปรวนของไอพีทราฟฟิก

นอกจากนี้ได้มีงานวิจัยที่ให้ความสนใจในการศึกษาการวางแผนโครงข่ายและวิศวกรรมทราฟฟิกสำหรับโครงข่าย IP over WDM เช่น ในงานวิจัย [12] ได้ทำการวิเคราะห์เรื่องค่าใช้จ่ายและความน่าเชื่อถือในการออกแบบโครงข่ายแกนหลักของ IP over WDM และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับโครงข่าย IP over WDM เช่น ในงานวิจัย [13] ได้เสนอการออกแบบโครงข่ายเสมือนที่ดีที่สุดด้วยข้อจำกัดของคุณภาพของการให้บริการ (QoS) ที่มีการรับประกันความต้องการ QoS แบบ end-to-end เช่นการรับประกันอัตราการเกิดการบล็อก โดยในการกำหนดค่าของเครือข่ายเสมือนนั้นจะมีการตั้งค่าสำหรับแต่ละชั้นของการบริการเพื่อที่จะลดต้นทุนของโครงข่าย ส่วนในงานวิจัย [14] ได้เสนอการกำหนดเส้นทางแสงของโครงข่ายใยแก้วนำแสง เพื่อเพิ่มความมั่นคงของการส่งทราฟฟิกของโครงข่ายเสมือน โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรเครือข่ายให้มากที่สุดทั้งก่อนและหลังเหตุการณ์ข่ายเชื่อมโยงชำรุด

แม้ว่างานวิจัยดังกล่าว จะมีความสำคัญและแสดงแนวทางที่น่าสนใจ แต่ไม่ได้พิจารณา ประเด็นเรื่องความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ซึ่งก็มีบางงานวิจัยให้ความสนใจเกี่ยวกับความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในการวางแผนโครงข่าย เช่น งานวิจัย [15] ได้กล่าวถึงลักษณะความไม่แน่นอนที่เกิดจากลักษณะของทราฟฟิก IP แบบไดนามิก และนำเสนอวิธีการวางแผนโครงข่ายที่พิจารณาคุณสมบัติความไม่แน่นอนของทราฟฟิก โดยงานวิจัยดังกล่าวมีเป้าหมายเพื่อหาเส้นทางในโครงข่ายที่มีโครงสร้างเพียงชั้นเดียว ด้วยการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนในการใช้แบนด์วิดท์หรือความจุช่องสัญญาณสำหรับการส่งทราฟฟิก และในงานวิจัย [16] ได้ทำการพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับสถาปัตยกรรมโครงข่ายสองชั้นโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ [15]

ถึงแม้ว่าบางงานวิจัยจะมีการพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในขั้นตอนการวางแผนโครงข่าย แต่งานวิจัยเหล่านั้นมีเป้าหมายหลักเกี่ยวกับลดค่าใช้จ่ายของการใช้แบนด์วิดท์หรือความจุช่องสัญญาณสำหรับการส่งทราฟฟิก ซึ่งยังไม่ได้พิจารณาความสมดุลของทราฟฟิกไอพีที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายใยแก้วนำแสง เช่น โครงข่าย IP over WDM ซึ่งในงานวิจัยที่นำเสนอนี้ได้พิจารณาเรื่องความไม่แน่นอนของทราฟฟิก และให้ความสนใจกับประเด็นความสมดุลของทราฟฟิกไอพีที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายใยแก้วนำแสงด้วย โดยผู้วิจัยได้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคการวางแผนโครงข่ายเสมือนในโครงข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์ความยาวคลื่น

บทที่ 3
การทดลองและวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกไอพี

บทนี้นำเสนอการทดลองและการวิเคราะห์ลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกไอพี โดยได้ทำการเก็บข้อมูลทราฟฟิกจากโครงข่ายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้ซอฟแวร์ Simple Network Management Protocol (SNMP) และได้วิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของทราฟฟิกในช่วงเวลาต่างๆ เนื้อหาในบทนี้แบ่งเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 3.1 กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายของทราฟฟิกไอพี หัวข้อ 3.2 อธิบายโครงสร้างของโครงข่ายและการออกแบบการทดลอง หัวข้อ 3.3 เป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิก และ หัวข้อ 3.4 สรุปผลการทดลอง

3.1 ความสำคัญและที่มาของการวิเคราะห์ลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกไอพี

ความเข้าใจในลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกไอพีเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่งในการจัดการทรัพยากรโครงข่ายเพื่อให้มีการใช้งานทรัพยากรโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากการประยุกต์ใช้งานสื่อสารข้อมูลประเภทต่าง ๆ ที่ส่งผ่านโครงข่าย IP จะมีความต้องการระดับของคุณภาพการบริการและการรับประกันที่แตกต่างกัน ผู้ให้บริการโครงข่ายจึงจำเป็นต้องจัดการทรัพยากรโครงข่ายเพื่อที่จะสามารถรองรับความต้องการของทราฟฟิกและสามารถใช้ประโยชน์แบนด์วิดท์หรือความจุช่องสัญญาณที่มีอย่างจำกัดอย่างมีประสิทธิภาพ

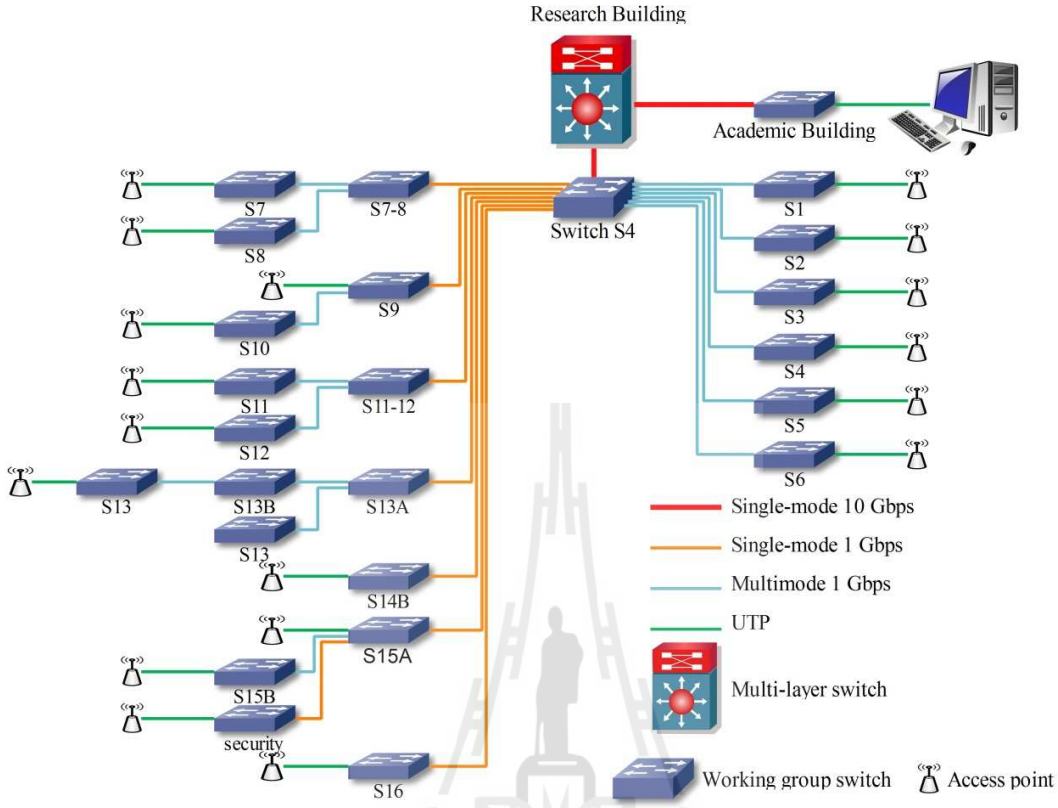
งานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ให้ความสนใจในการศึกษาลักษณะของทราฟฟิก IP เช่น งานวิจัย [17] ได้นำเสนอการดำเนินงานของระบบการดูแลทราฟฟิกในโครงข่ายโดยใช้วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของคุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิก งานวิจัย [18] ได้ศึกษาแบบจำลองทราฟฟิกของอินเตอร์เน็ต และงานวิจัย [19] ได้นำเสนอการวิเคราะห์อินเตอร์เน็ตในเชิงมิติของพื้นที่และมิติของเวลา ซึ่งได้วิเคราะห์ระดับการไหลของทราฟฟิกร่วมด้วย ส่วนงานวิจัย [20] ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างทราฟฟิกในโครงข่ายที่ขึ้นอยู่กับรายละเอียดของทราฟฟิกในโครงข่าย, ลักษณะของผู้ใช้โครงข่ายและการประยุกต์ใช้งานโครงข่าย ส่วนงานวิจัย [21] เป็นการรายงานการเจริญเติบโตของทราฟฟิกทางอินเทอร์เน็ตและความจุของแบนด์วิดธ์ของสามผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตรายใหญ่ในประเทศไทย

การทดลองและการวิเคราะห์ที่นำเสนอในบทนี้ต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ กล่าวคือ เป็นการเน้นการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะคุณลักษณะของทราฟฟิกที่เกิดจากการรวมตัวของทราฟฟิกย่อยๆ ในช่วงเวลาต่างๆ ภายในโครงข่ายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 โครงสร้างของโครงข่ายมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและการออกแบบการทดลอง

โครงข่ายที่ใช้สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นโครงข่ายภายในของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นโครงข่ายภายในมหาวิทยาลัยที่มีการเชื่อมต่อกับโครงข่ายภายนอก โดยมีไฟล์วอลล์ (Firewall) เป็นตัวกลางระหว่างโครงข่ายภายในและโครงข่ายภายนอก เพื่อให้มีความปลอดภัยระหว่างโครงข่าย ไฟล์วอลล์จะเชื่อมต่ออยู่กับสวิตซ์หลัก (Multilayer Switch) ของโครงข่ายภายในโดยใช้สายใยแก้วนำแสงที่มีอัตราการรับส่งข้อมูล 10 Gbps แล้วกระจายไปยังสวิตซ์ตามอาคารต่าง ๆ ผ่านสายใยแก้วนำแสงที่มีอัตราการรับส่งข้อมูล 10 Gbps แล้วส่งต่อไปยังสวิตซ์ย่อยของหน่วยงานหรือองค์กรต่าง ๆ ผ่านสายใยแก้วนำแสงที่มีอัตราการรับส่งข้อมูล 1 Gbps และจะกระจายไปยังตัวกระจายสัญญาณ (Access Point) ที่เป็นโครงข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (WLAN) โดยใช้สาย UTP ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูล 1 Gbps โดยผู้วิจัยทำการเลือกวิเคราะห์คุณลักษณะทราฟฟิกของโครงข่ายหอพักภายในมหาวิทยาลัย ซึ่งโครงข่ายหอพักภายในมหาวิทยาลัยนี้มีการใช้งานปริมาณทราฟฟิกถึงร้อยละ 80 ของปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดภายในมหาวิทยาลัย

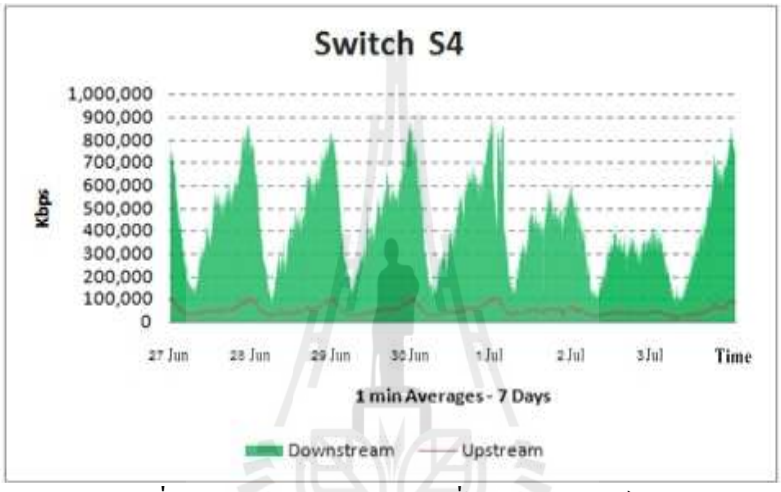
ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของทราฟฟิกของงานวิจัยนี้ จะดำเนินการโดยใช้โปรแกรมมอนิเตอร์ทราฟฟิกในการตรวจจับปริมาณทราฟฟิกเพื่อที่จะบันทึกข้อมูลของทราฟฟิกที่จะนำมาวิเคราะห์ โปรแกรมมอนิเตอร์ทราฟฟิกนั้นจะทำงานในส่วน Application Layer ของ Open System Interconnection Reference Model (OSI) ซึ่งจะมีโปรโตคอลที่ใช้ดำเนินการคือโปรโตคอล Simple Network Management Protocol (SNMP) แต่สำหรับบางโปรแกรมอาจจะมีการใช้งานโปรโตคอลอื่น ๆ มาช่วยในการมอนิเตอร์ทราฟฟิก และในงานวิจัยนี้จะดำเนินการโดยใช้โปรแกรม PRTG Traffic Grapher สำหรับการเก็บบันทึกข้อมูลปริมาณการใช้งานทราฟฟิก ซึ่งสามารถศึกษารายละเอียดของโปรแกรมได้จาก http://www.paessler.com/prtg [22]



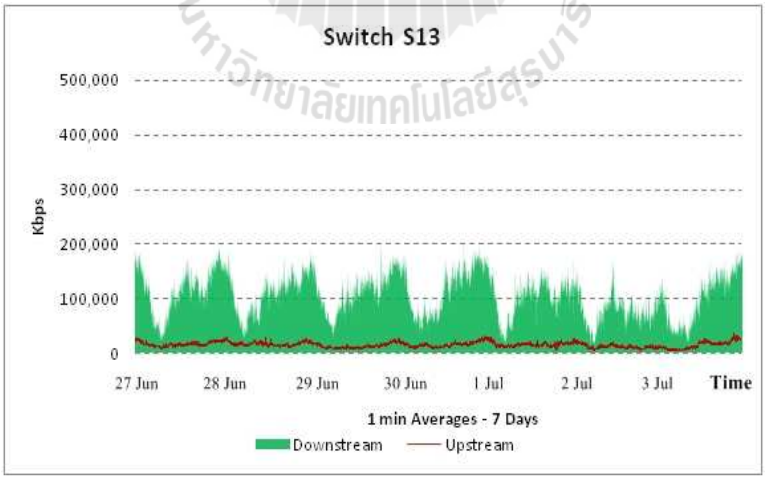
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของโครงข่ายภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้งานทราฟฟิกในช่วงระยะเวลา 1 เดือน โดยเก็บข้อมูลทั้งสวิตซ์หลักและสวิตซ์ย่อย ซึ่งเนื้อหาในบทนี้แสดงตัวอย่างข้อมูลของสวิตซ์หลัก (Switch S4) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ สวิตย์ย่อย (Switch S13) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งทั้งสองตัวอย่างแสดงการใช้งานปริมาณทราฟฟิกในช่วง 7 วัน (1 สัปดาห์) โดยเป็นทราฟฟิกที่ถูกเก็บบันทึกข้อมูลไว้ทุกๆ 1 นาที จะสังเกตได้ว่าปริมาณของทราฟฟิกในสวิตซ์หลักมีมากกว่าปริมาณของทราฟฟิกในสวิตซ์ย่อยอย่างชัดเจน และในรูปที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณทราฟฟิกที่ใช้งานในแต่ละวันสำหรับแต่ละสัปดาห์ โดยแสดงตัวอย่างของวันพฤหัสบดีที่เป็นวันสำหรับการทำงานและวันอาทิตย์ที่เป็นวันหยุด จะเห็นว่าปริมาณทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านโครงข่ายในแต่ละวันสำหรับแต่ละสัปดาห์มีปริมาณของทราฟฟิกในลักษณะที่มีทิศทางเดียวกัน โดยในวันทำงานจะมีการใช้งานการขนส่งข้อมูลที่มีปริมาณทราฟฟิกมากกว่าในวันหยุด ซึ่งในการวิเคราะห์คุณลักษณะของทราฟฟิกนี้ได้วิเคราะห์ความสมมาตรและมีการตัดข้อมูลนอกกลุ่ม (Outlier) และจะพิจารณาลักษณะของ Histogram ของชุดข้อมูลโดยใช้โปรแกรม EasyFit ซึ่งสามารถศึกษารายละเอียดของโปรแกรมได้จาก http://www.mathwave.com/ [23]

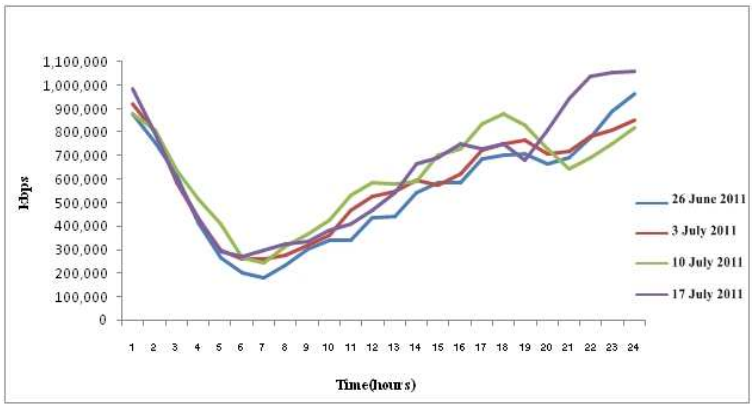
การวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายตัวของทราฟฟิกได้แบ่งวิเคราะห์ข้อมูลในสองช่วงเวลาคือ ในชั่วโมงเร่งด่วน หรือชั่วโมงที่มีการใช้ทราฟฟิกมากที่สุด (Peak-load) และชั่วโมงที่มีการใช้ทราฟฟิกน้อยที่สุด (Light-load) โดยได้มีการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบสามวิธี ได้แก่ การทดสอบแบบ Kolmogorov Smirnov, การทดสอบแบบ Anderson Darling และการทดสอบแบบ Chi-Squared และได้ทำการวิเคราะห์ความถูกต้องของคุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิกด้วย P-P Plot ซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป



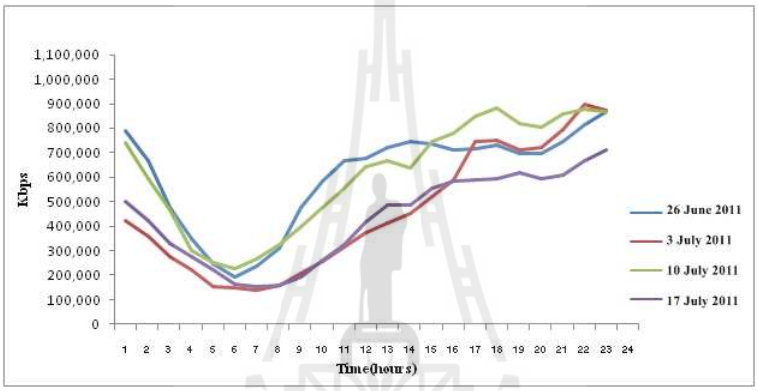
รูปที่ 3.2 ปริมาณของทราฟฟิกที่ไหลผ่านสวิตซ์ S4



รูปที่ 3.3 ปริมาณของทราฟฟิกที่ไหลผ่านสวิตซ์ S13



(ก) วันพฤหัสบดี

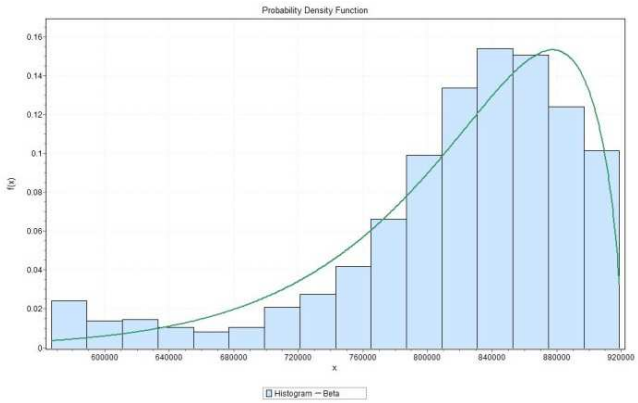


(ข) วันอาทิตย์

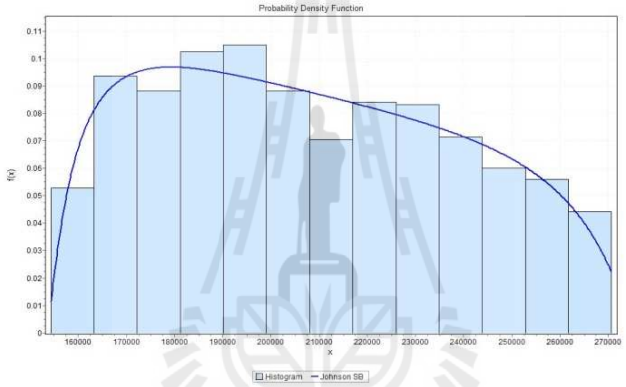
รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบการใช้งานทราฟฟิกที่ Switch S4

3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิก

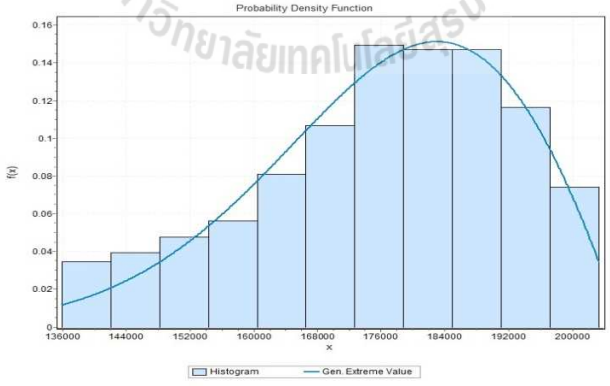
ในการวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายของทราฟฟิกในงานวิจัยนี้ ได้นำข้อมูลปริมาณทราฟฟิกที่วัดได้จากโปรแกรมมอนิเตอร์ทราฟฟิกมาทำการวิเคราะห์สำหรับชั่วโมง Peak-load และชั่วโมง Light-load โดยจะคัดเลือกข้อมูลนอกกลุ่มออก (Outlier) และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความสมมาตรด้วยกราฟ Histogram โดยรูปที่ 3.5 เป็นกราฟ Histogram ในช่วง Peak-load ของ Switch S4 (สวิตช์หลัก) และ รูปที่ 3.6 เป็นกราฟ Histogram ในช่วง Light-load ของ Switch S4 ส่วนรูปที่ 3.7 เป็นกราฟ Histogram ในช่วง Peak-load ของ Switch S13 (สวิตช์ย่อย) และ รูปที่ 3.8 เป็นกราฟ Histogram ในช่วง Light-load ของ Switch S13 จะเห็นได้จากกราฟ Histogram ว่า การกระจายของข้อมูลในช่วง Peak-load มีลักษณะการกระจายตัวเบ้ไปทางขวาและการกระจายของข้อมูลในช่วง Light-load มีลักษณะการกระจายตัวที่สมมาตรมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการกระจายตัวของทราฟฟิกก็ไม่เป็นแบบปกติ ที่เรียกว่า Normal distribution



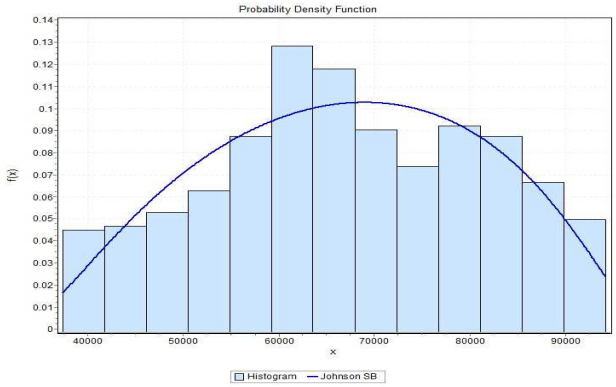
รูปที่ 3.5 Histogram ของทราฟฟิกในช่วงเวลา peak-load ของ Switch S4



รูปที่ 3.6 Histogram ของทราฟฟิกในช่วงเวลา light-load ของ Switch S4



รูปที่ 3.7 Histogram ของทราฟฟิกในช่วงเวลา peak-load ของ Switch S13



รูปที่ 3.8 Histogram ของทราฟฟิกในช่วงเวลา light-load ของ Switch S13

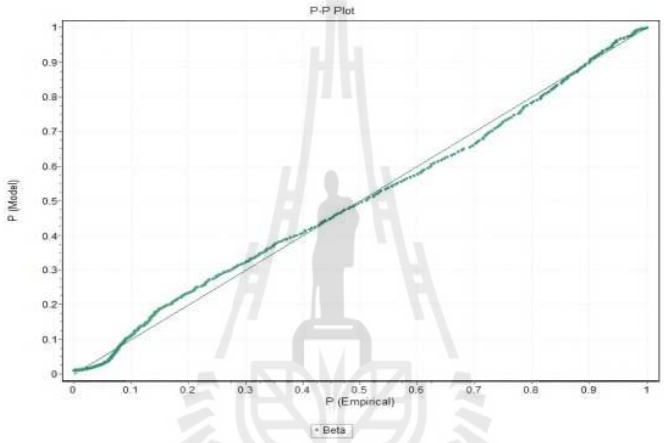
เนื่องจากข้อมูลของทราฟฟิกไม่ได้มีการกระจายแบบปกติ (Normal distribution) จึงนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Easy Fit เพื่อจัดอันดับคุณลักษณะการกระจายด้วยการทดสอบแบบ Kolmogorov Smirnov, การทดสอบแบบ Anderson Darling และการทดสอบแบบ Chi-Squared

จากการทดสอบนี้พบว่าทราฟฟิกมีคุณลักษณะการกระจายดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งคุณลักษณะการกระจายต่าง ๆ สามารถศึกษาได้จาก [24] และจากผลการทดลองจะเห็นว่า Switch S4 ในช่วงเวลา Peak-load จะมีคุณลักษณะการกระจายแบบเบต้า (Beta Distribution) ส่วนในช่วงเวลา Light-load จะมีคุณลักษณะการกระจายแบบจอห์นสันเอสบี (Johnson SB Distribution) สำหรับ Switch S13 ในช่วงเวลา Peak-load จะมีคุณลักษณะการกระจายแบบเจนเอกซะทรีม (Gen. Extreme Value Distribution) และ Switch S13 ในช่วงเวลา Light-load จะมีคุณลักษณะการกระจายแบบจอห์นสันเอสบี โดยที่ค่าพารามิเตอร์สำหรับการกระจายต่าง ๆ ของทราฟฟิกได้แสดงในตารางที่ 3.1

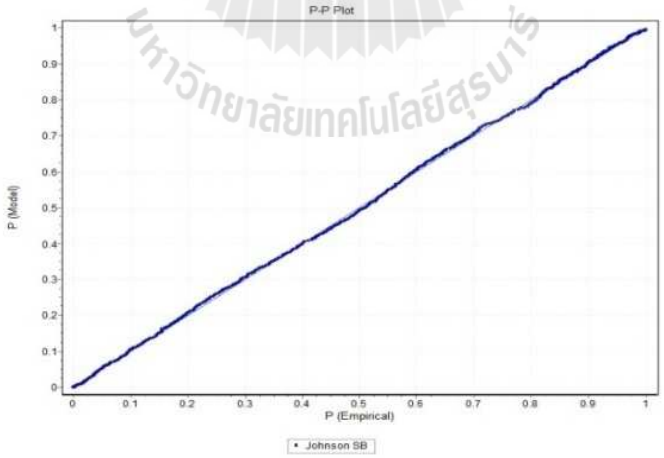
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับคุณลักษณะการกระจาย

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	$k = -0.52069$ $\sigma = 17618.0$ $\mu = 1.7224 \times 10^5$
S13 light-load	Johnson SB	$\gamma = -0.1054$ $\delta = 1.0219$ $\lambda = 69493.0$ $\xi = 30793.0$

เมื่อวิเคราะห์คุณลักษณะการกระจายจากการทดสอบ Kolmogorov Smirnov, การทดสอบแบบ Anderson Darling และการทดสอบแบบ Chi-Squared แล้วทำให้ลักษณะการกระจายของทราฟฟิก และจากนั้นได้นำลักษณะการกระจายของทราฟฟิกดังกล่าวมาวิเคราะห์ตรวจสอบความถูกต้องด้วย P-P Plot ดังแสดงในรูปที่ 3.9-3.10 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าความน่าจะเป็นของการกระจายของข้อมูลทราฟฟิกเทียบกับการกระจายที่ได้จากการวิเคราะห์ จากกราฟจะเห็นว่าได้แนวเส้นเป็นเส้นตรงเฉียง 45 องศา ซึ่งแสดงว่าลักษณะการกระจายที่วิเคราะห์ได้คือการกระจายแบบเบต้า และจอห์นสันเอสบี มีลักษณะที่ตรงกับการกระจายของข้อมูลทราฟฟิกที่ตรวจจับมาได้



รูปที่ 3.9 P-P Plot ในช่วง Peak-load ของ Switch S4



รูปที่ 3.10 P-P Plot ในช่วง Light-load ของ Switch S4

3.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้แสดงการวิเคราะห์ลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกไอพี โดยได้ทำการเก็บข้อมูลทราฟฟิกจากโครงข่ายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากการวิเคราะห์ลักษณะของทราฟฟิกในชั่วโมงเร่งด่วน หรือชั่วโมงที่มีการใช้ทราฟฟิกมากที่สุด (Peak-load) และชั่วโมงที่มีการใช้ทราฟฟิกน้อยที่สุด (Light-load) โดยได้ใช้วิธีทดสอบการกระจายของข้อมูลสามวิธี ได้แก่ การทดสอบแบบ Kolmogorov Smirnov, การทดสอบแบบ Anderson Darling และการทดสอบแบบ Chi-Squared พบว่าทราฟฟิกไอพีนั้นมีความไม่แน่นอนสูง และมีลักษณะการกระจายของข้อมูลที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งลักษณะการกระจายของข้อมูลนั้นไม่ได้เป็นแบบปกติ (Normal distribution) อย่างที่ในงานวิจัยส่วนมากใช้เป็นสมมุติฐานของลักษณะทราฟฟิกที่ใช้ในการวางแผนโครงข่าย

ในบทต่อได้จะได้นำเสนอการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนโครงข่าย IP over WDM ที่มีการพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก และจะได้ยกตัวอย่างการวางแผนโครงข่าย IP over WDM โดยใช้ลักษณะการกระจายของทราฟฟิกไอพีตามผลที่ได้จากวิเคราะห์ในบทนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
การวางแผนโครงข่ายไอพีบนบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น ภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

โครงข่ายไอพีบนบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing (WDM) networks) มีบทบาทสำคัญในการขนส่งทราฟฟิกไอพีขนาดใหญ่ผ่านทางเครือข่ายแกนหลักของผู้ให้บริการอินเตอร์เน็ต (Internet Service Provider: ISP) เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือในการขนส่งข้อมูล จำเป็นต้องมีการวางแผน และจัดการการส่งทราฟฟิกที่มีประสิทธิภาพ

ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก (traffic uncertainty) คือความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงในโครงข่าย ความแปรปรวนนี้เกิดจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณไอพีทราฟฟิก ความต้องการในการส่งทราฟฟิกของผู้ใช้ที่ไม่คงที่ อาจเปลี่ยนตามช่วงเวลา กิจกรรม หรือเทศกาลต่างๆ รวมถึงความต้องการที่แตกต่างกันสำหรับระดับของคุณภาพการบริการและการรับประกันคุณภาพการสื่อสาร ดังนั้นผู้ให้บริการโครงข่ายจึงจำเป็นต้องจัดการทรัพยากรโครงข่ายไอพีบนบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นให้เหมาะสมเพื่อที่จะสามารถใช้งานได้อย่างเพียงพอในการรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีความแปรปรวน และสามารถให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพและน่าเชื่อถือ

รายงานวิจัยบทนี้นำเสนอแนวคิดและวิธีวางแผนโครงข่ายไอพีบนบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น ที่มีการพิจารณาความสมดุลของทราฟฟิกภายใต้สภาวะความไม่แน่นนอนของทราฟฟิก เพื่อให้การใช้งานโครงข่ายไอพีบนบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้ 4.1 แนวคิดในการออกแบบและวางแผนโครงข่ายเสมือนสำหรับโครงข่ายไอพีบนบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น 4.2 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม 4.3 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม 4.4 การทดลองและการวิเคราะห์ผลการวางแผนโครงข่ายเสมือน และ 4.5 สรุปผลการทดลอง และข้อสังเกต

4.1 แนวคิดในการวางแผนโครงข่ายเสมือนภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

การวางแผนโครงข่าย IP over WDM (IP over WDM network planning) ในงานวิจัยนี้พิจารณาการวางแผนการใช้งานแบนด์วิดท์ในโครงข่าย ซึ่งแบนด์วิดท์หรือความจุเป็นทรัพยากรที่มีจำกัด ดังนั้นจึงต้องมีการจัดสรรการใช้งานอย่างเหมาะสม จึงจะทำให้เกิดการใช้งานทรัพยากรโครงข่ายอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ การวางแผนการใช้งานแบนด์วิดท์ในโครงข่าย IP over WDM ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เป็น

การออกแบบโครงข่ายเสมือน (virtual network) (อธิบายในบทที่ 2) โดยที่โครงข่ายเสมือนเป็นโครงข่ายเชิงตรรกที่ซ้อนอยู่ในโครงข่ายทางกายภาพ (physical network) ซึ่งเป็นโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น โดยการออกแบบและวางแผนโครงข่ายเสมือนนี้เป็นการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความจุของข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อโนดต้นทาง (source node) ผ่านโนดต่างๆในโครงข่ายใยแก้วนำแสงไปจนถึงโนดปลายทาง (destination node) โดยมีการคำนึงถึงลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิก นอกจากนี้ยังได้มีการเลือกติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมาะสมและเพียงพอสำหรับส่งทราฟฟิกไอพีผ่านโครงข่ายใยแก้วนำแสง โดยได้มีการพิจารณาถึงความสมดุลของทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายใยแก้วนำแสงด้วย

ผู้วิจัยได้พัฒนาเทคนิคใหม่สำหรับการวางแผนโครงข่ายเสมือนดังกล่าว ซึ่งจัดเป็นนวัตกรรมที่ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) ที่สามารถสร้างความมั่นใจในการสื่อสารข้อมูลในโครงข่ายไอพี (โครงข่ายเสมือน) และยังสามารถทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกภายในโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ใช้การมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น รวมถึงสามารถรับประกันความเพียงพอของความจุช่องสัญญาณที่เตรียมให้กับทราฟฟิกไอพีซึ่งอาจมีความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิกในระดับที่ต้องการได้

การโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มสำหรับการวางแผนโครงข่ายเสมือนที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นสมการที่กำหนดความต้องการของลักษณะโครงข่ายเสมือนที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ ต้องการให้เกิดความสมดุลมากที่สุดในการส่งทราฟฟิกผ่านข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายใยแก้วนำแสง กล่าวคือต้องการให้มีการกระจายปริมาณของทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงในชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสง เพื่อเพิ่มความมั่นคง ปลอดภัยในการส่งข้อมูล ในกรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงอันใดอันหนึ่ง ก็จะส่งผลกระทบต่อทราฟฟิกที่ไม่มากนัก ที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงนั้น

สำหรับสมการเงื่อนไขเป็นการกำหนดกรอบการวางแผนโครงข่ายเสมือน ซึ่งเป็นการระบุข้อจำกัดทางกายภาพของโครงข่ายได้แก่ ข้อจำกัดเรื่องแบนด์วิดท์หรือความจุของข่ายเชื่อมโยง ข้อจำกัดเรื่องเส้นทางในการส่งทราฟฟิกผ่านโนดภายในโครงข่าย และความต้องการเรื่องการรับประกันระดับของความแปรปรวน ความไม่แน่นนอนของทราฟฟิกไอพี

4.2 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม

จากแนวคิดในการวางแผนโครงข่าย IP over WDM ภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่กล่าวมาแล้ว หัวข้อนี้จะได้นำเสนอการแปลงปัญหาดังกล่าวให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์การโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข หัวข้อถัดไปจะได้นิยามตัวแปรต่างๆที่ใช้ในโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น และในหัวข้อต่อจากนั้นจะได้อธิบายรายละเอียดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข

4.2.1 การนิยามตัวแปร

ตัวแปรที่ใช้ประกอบด้วย เซท ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) และพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ (constant parameters) ดังแสดงในตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรเซท

สัญลักษณ์	คำนิยาม
A	เซตของข่ายเชื่อมโยงในชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น
D	เซตของทราฟฟิกไอพีที่ส่งระหว่างโนดในชั้นโครงข่ายไอพี
P^k	เซตของเส้นทางในการส่งผ่านชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสงสำหรับทราฟฟิก k, $k \in D$

ตารางที่ 4.2 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรตัดสินใจ

สัญลักษณ์	คำนิยาม
y_j	ตัวแปรจำนวนเต็มซึ่งระบุจำนวนของอุปกรณ์สำหรับส่งทราฟฟิกไอพีผ่านโครงข่ายในแก้วนำแสง สำหรับข่ายเชื่อมโยง $j, j \in A$
z_j	ตัวแปรไบนารี {0,1} ถ้า $z_j = 1$ หมายถึง *เลือกใช้*ข่ายเชื่อมโยง j ถ้า $z_j = 0$ หมายถึง *ไม่เลือกใช้*ข่ายเชื่อมโยง j , $j \in A$
$f^{k,p}$	ตัวแปรไบนารี {0,1} ถ้า $f^{k,p}=1$ หมายถึง ทราฟฟิก k *เลือกใช้*เส้นทาง p จากเซตของเส้นทางในการส่งผ่านชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ได้กำหนดไว้ $p \in P^k$ ถ้า $f^{k,p}=0$ หมายถึง ทราฟฟิก k *ไม่เลือกใช้*เส้นทาง p จากเซตของเส้นทางในการส่งผ่านชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ได้กำหนดไว้ $p \in P^k$

ตารางที่ 4.3 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่

สัญลักษณ์	คำนิยาม
M	ขนาดของอุปกรณ์สำหรับส่งทราฟฟิกไอพีผ่านโครงข่ายในแก้วนำแสง (Mbps)
B_j	แบนด์วิดท์หรือความจุของข่ายเชื่อมโยง $j, j \in A$
C_j	ราคาของอุปกรณ์สำหรับส่งทราฟฟิกไอพีผ่านข่ายเชื่อมโยง $j, j \in A$
F_j	ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเลือกใช้ข่ายเชื่อมโยง $j, j \in A$
C_L	งบประมาณในการส่งทราฟฟิกไอพีทั้งหมดผ่านโครงข่าย IP over WDM
x_k	ปริมาณทราฟฟิก k, $k \in D$
$\delta_j^{k,p}$	พารามิเตอร์สำหรับที่ระบุว่าเส้นทาง p สำหรับทราฟฟิก k ใช้ข่ายเชื่อมโยง j หรือไม่ ซึ่งพารามิเตอร์นี้ได้ทำการคำนวณไว้ก่อนแล้วสำหรับแต่ละทราฟฟิก k, $k \in D$
n	จำนวนของข่ายเชื่อมโยงในเซต A

4.2.2 สมการเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มสำหรับวางแผนโครงข่ายเสมือน

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนโครงข่ายเสมือนซึ่งเป็นโครงข่ายเชิงตรรกที่ซ้อนอยู่ในโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น โดยใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

(1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

ในงานวิจัยนี้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำหนดให้การวางแผนโครงข่ายเสมือนทำให้เกิดความสมดุลมากที่สุดในการส่งทราฟฟิกผ่านข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายใยแก้วนำแสง กล่าวคือต้องการให้มีการกระจายปริมาณของทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงในชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสง เพื่อเพิ่มความมั่นคงปลอดภัยในการส่งข้อมูล ในกรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงอันใดอันหนึ่ง จะช่วยลดปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบได้

ผู้วิจัยได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังกล่าว ดังแสดงในสมการที่ (4.1) ซึ่งเป็นการทำให้ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ขอทราฟฟิกไอพีที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายใยแก้วนำแสงมีค่าน้อยที่สุด (Minimize mean absolute deviation) ผลที่ได้ก็คือเส้นทางการส่งทราฟฟิกจะถูกเลือกในลักษณะที่ทำให้มีการกระขายปริมาณทราฟฟิกในชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสง

$$Min \ \frac{1}{n}\sum_{j\in A}\left| r_j - \frac{\sum_{j\in A} r_j}{n} \right| \qquad (4.1)$$

(2) สมการเงื่อนไข (Constraints)

สมการเงื่อนไขเป็นการระบุข้อจำกัดเพื่อกำหนดกรอบในการวางแผนโครงข่ายเสมือน ข้อจำกัดหรือเงื่อนไขที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ข้อจำกัดทางกายภาพของโครงข่าย ข้อจำกัดเรื่องแบนด์วิดท์หรือความจุของข่ายเชื่อมโยง ข้อจำกัดเรื่องเส้นทางในการส่งทราฟฟิกผ่านโนดภายในโครงข่าย และความต้องการเรื่องการรับประกันระดับของความไม่แน่นนอนของทราฟฟิกไอพี ผู้วิจัยได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับสมการเงื่อนไข 10 สมการ โดยแบ่งเงื่อนไขเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เงื่อนไขงบประมาณของการดำเนินงานในเครือข่าย

1. การระบุข้อจำกัดของงบประมาณค่าใช้จ่ายบนเครือข่าย ซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายของการใช้ความจุของเครือข่ายซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ครอบคลุมถึงโมดูลทางออปติคอลและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งการใช้งานการเชื่อมโยงสำหรับการขนส่งข้อมูลในเครือข่าย

$$\sum_{j\in A} C_j y_j + F_j z_j \le C_L \qquad (4.2)$$

กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย

2. เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนของโมดูลทางออปติคอลนั้น มีเพียงพอในการให้บริการสำหรับบนลิงค์ j ดังนั้นลิงค์ j จะสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของทุกความต้องการของทราฟฟิก IP ที่ขนส่งผ่านลิงค์ j ซึ่งรูปแบบที่หลากหลายของความต้องการของทราฟฟิก IP จะถูกแสดงอยู่ในพารามิเตอร์ x_k

$$\sum_{k\in D}\sum_{p\in P^k} \delta_j^{k,p} f^{k,p} x_k \le M y_j \qquad \forall j \in A \qquad (4.3)$$

3. เพื่อให้แน่ใจว่าการเลือกใช้จำนวนโมดูลทางออปติคอลนั้น มีความจุไม่เกินขอบเขตของความจุ (B_j) บนลิงค์ j เงื่อนไขนี้จึงเป็นการจำกัดของจำนวนโมดูลทางออปติคอลที่สามารถใช้ได้บนลิงค์ j

$$M y_j \le B_j \qquad \forall j \in A \qquad (4.4)$$

4. ปริมาณของทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนลิงค์จะถูกแสดงด้วยเงื่อนไขนี้ โดยจะเป็นการคำนวณปริมาณรวมของความต้องการของทราฟฟิก IP ที่จะขนส่งผ่านลิงค์ j

$$r_j = \sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} f^{k,p} x_k \qquad \forall j \in A \tag{4.5}$$

5. สำหรับการใช้งานโมดูลทางออปติคอบ เพื่อให้แน่ใจว่าโมดูลทางออปติคอบจะไม่ถูกตั้งค่าให้ใช้งาน เมื่อไม่มีการขนส่งทราฟฟิกผ่านทางลิงค์ j เงื่อนไขนี้จึงระบุว่าหากไม่มีความต้องการของทราฟฟิกที่จะขนส่งผ่านบนลิงค์ j แล้วโมดูลทางออปติคอลนั้นจะไม่ถูกตั้งค่าการใช้งาน กล่าวคือเป็นการบังคับให้ $y_j = 0$

$$y_j \le r_j \qquad \forall j \in A \tag{4.6}$$

6. ปริมาณรวมของทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนลิงค์ j คือ ค่าที่ได้มาจากทราฟฟิกที่มีการขนส่งบนลิงค์นั้น ดังนั้น ปริมาณรวมของทราฟฟิกบนลิงค์ j จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของปริมาณทราฟฟิกที่มีอยู่บนลิงค์ j กล่าวคือ r_j จะเป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

$$r_j \ge 0 \qquad \forall j \in A \tag{4.7}$$

7. จำนวนโมดูลทางออปติคอลที่ใช้งานบนลิงค์ j จะถูกตั้งค่าการใช้งานเมื่อมีทราฟฟิกขนส่งผ่านบนลิงค์ j ดังนั้น จำนวนโมดูลทางออปติคอลที่ใช้งานบนลิงค์ j จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของจำนวนโมดูลทางออปติคอลที่ถูกตั้งค่าอยู่บนลิงค์ j กล่าวคือ y_j เป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

$$y_j \ge 0 \qquad \forall j \in A \tag{4.8}$$

กลุ่มที่ 3 เงื่อนไขในการเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย

8. สำหรับการเลือกเส้นทางในเครือข่าย เพื่อไม่ให้มีการเลือกเส้นทางที่ซ้ำซ้อน เงื่อนไขนี้จึงระบุว่าความต้องการของทราฟฟิก k ให้สามารถเลือกได้เพียงหนึ่งเส้นทางจากเส้นทางที่ถูกกำหนดไว้ชุดของเส้นทาง P^k

$$\sum_{p \in P^k} f^{k,p} = 1 \qquad \forall k \in D \tag{4.9}$$

9. เงื่อนไขนี้จะแสดงการเลือกใช้ลิงค์สำหรับเส้นทางที่ถูกเลือกให้ขนส่งข้อมูล โดยจะกำหนดให้ลิงค์ j นั้นจะต้องถูกตั้งค่าให้ใช้งานถ้าความต้องการของทราฟฟิก k ใช้เส้นทาง p ในการขนส่งซึ่งเป็นเส้นทางที่ผ่านลิงค์ j

$$\delta_j^{k,p} f^{k,p} \le z_j \qquad \forall j \in A, \forall k \in D, \forall p \in P^k \tag{4.10}$$

10. สำหรับการใช้งานลิงค์ เพื่อให้แน่ใจว่าลิงค์ j จะไม่ถูกตั้งค่าให้ใช้งาน เมื่อไม่มีการขนส่งทราฟฟิกผ่านทางลิงค์ j เงื่อนไขนี้จึงระบุว่าหากไม่มีความต้องการของทราฟฟิกที่จะขนส่งผ่านบนลิงค์ j แล้ว ลิงค์ z_j จะไม่ถูกตั้งค่าการใช้งาน กล่าวคือเป็นการบังคับให้ $z_j = 0$

$$z_j \le r_j \qquad \forall j \in A \tag{4.11}$$

สำหรับพารามิเตอร์ x_k นั้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.12) ดังที่ Liu, B. (2009) กล่าวไว้ว่าให้พิจารณาดังรูปแบบเงื่อนไขข้อจำกัดแบบมีโอกาส (Chance constraint) เพื่อให้แน่ใจว่าการจัดสรรความจุหรือแบนด์วิดธ์บนการเชื่อมโยงจะมีมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่ไม่แน่นอน (ξ) โดยสมการความน่าจะเป็นสามารถเขียนได้คือ $P(x \ge \xi) \ge \alpha$ โดยที่ $0 \le \alpha \le 1$ และความต้องการของทราฟฟิกที่จะถูกขนส่งในเครือข่ายจะมีระดับของการรับประกันคือ α ซึ่งสมมติว่าทราฟฟิกเป็นกระจายตามปกติที่มีค่าเฉลี่ย (μ) และค่าความแปรปรวน (σ^2) โดยตัวแปรสุ่ม (ξ) จะมีฟังก์ชันการแจกแจงสะสมคือ $\Phi(.)$ และสามารถผกผันเปลี่ยนเป็น $\Phi^{-1}(.)$ ดังนั้นพารามิเตอร์ x_k สามารถเขียนดังนี้

$$x_k = \mu_k + \Phi^{-1}(\alpha_k)\sigma_k \tag{4.12}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.3 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม

ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับสมการทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มที่นำเสนอในหัวข้อ 4.2 นั้น ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio โดยได้ทำการแปลงสมการเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มให้เป็นคำสั่งในโปรแกรม ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.3.1 ส่วนหัวข้อที่ 4.3.2 อธิบายรายละเอียดหน้าต่างการใช้งานโปรแกรม

4.3.1 การแปลงสมการเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มเป็นคำสั่งในโปรแกรม

การแปลงสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มจากหัวข้อที่ 4.2.2 ให้เป็นคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งประกอบด้วยการกำหนดตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (4.1) และสมการเงื่อนไข (4.2)-(4.11)

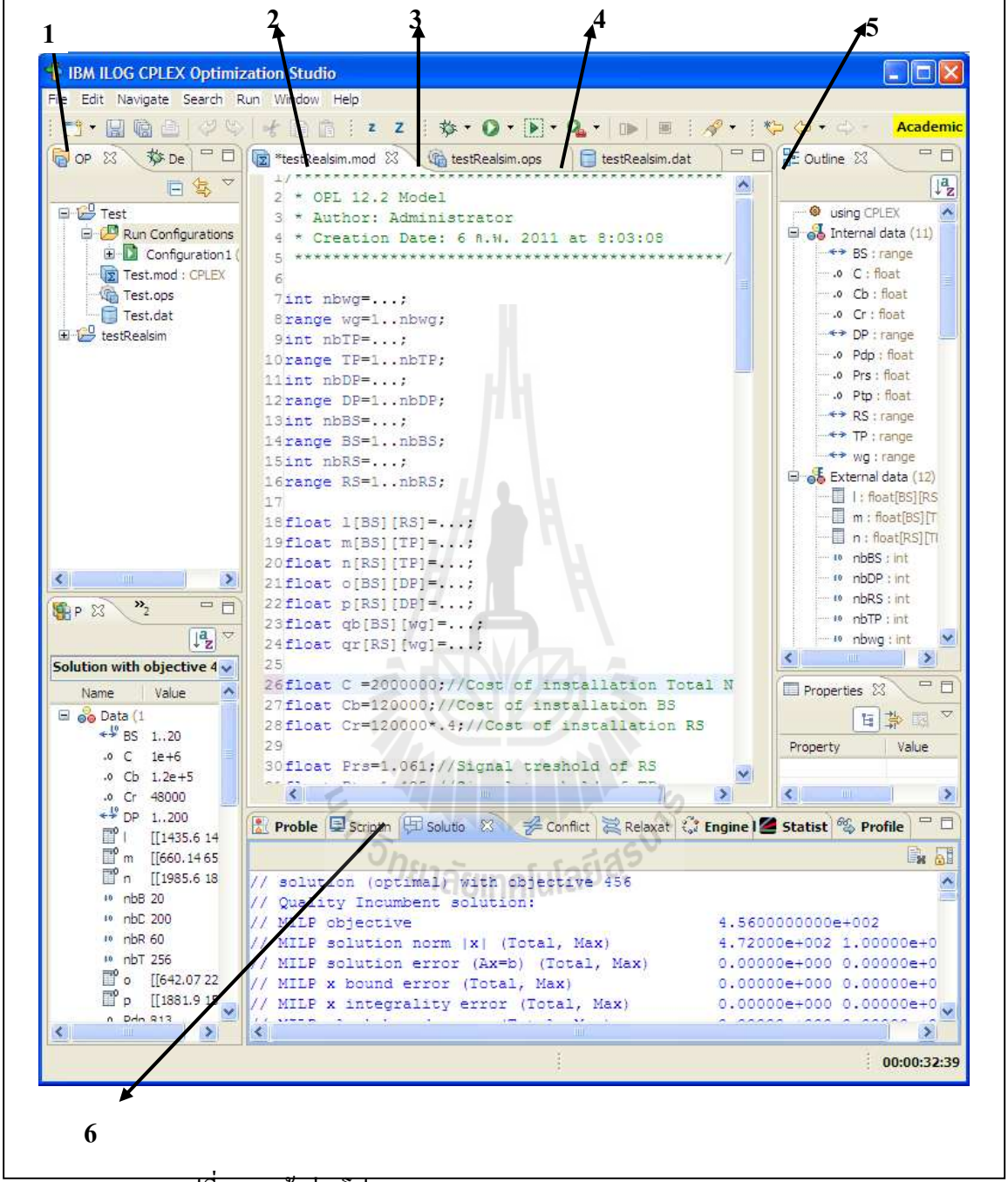
ตารางที่ 4.4 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

สมการคณิตศาสตร์	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	//Decision Variable
r_j	dvar float r[link];
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;
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	//Objective function
สมการ(2.1)	Minimize (sum(j in link)(abs(r[j] - (sum(j in link)r[j])/nblink)))/nblink;
เงื่อนไข	subject to {
สมการ(2.2)	ct1 : sum(j in link)(c[j]*y[j] + F[j]*z[j]) <= CL;
สมการ(2.3)	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(2.4)	ct3 : forall (j in link) M*y[j] <= B[j];
สมการ(2.5)	ct4 : forall (j in link) r[j] == sum(k in demand, p in path)x[k]*s[k][p][j]*f[k][p];
สมการ(2.6)	ct5 : forall (j in link) y[j] <= r[j];
สมการ(2.7)	ct6 : forall (j in link) r[j] >= 0;
สมการ(2.8)	ct7 : forall (j in link) y[j] >= 0;
สมการ(2.9)	ct8 : forall (k in demand) sum(p in path)f[k][p]==1;
สมการ(2.10)	ct9 : forall (j in link) forall (k in demand) forall (p in path) s[k][p][j]*f[k][p]<=z[j];
สมการ(2.11)	ct10 : forall (j in link) z[j] <= r[j];

4.3.2 ส่วนประกอบของโปรแกรม

รูปที่ 4.1 แสดงหน้าต่างโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio ซึ่งมีรายละเอียดและหน้าที่การทำงานดังนี้

- หมายเลข 1 (OPL Project) แสดงไฟล์โครงการ (Project) ที่กำลังเปิดอยู่ สำหรับการคำนวณหาคำตอบแต่ละครั้งจำเป็นต้องมีไฟล์ครบทั้ง 3 ไฟล์ ประกอบไปด้วย โมเดลไฟล์ (*.mod) ดาต้าไฟล์ (*.dat) และ เซตติ้งไฟล์ (*.ops)
- หมายเลข 2 (Model File Editing Area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่คำสั่งที่ใช้คำนวณหาค่าที่ดีที่สุด โดยคำสั่งเหล่านี้ได้ทำการแปลงมาจากสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ เงื่อนไข
- หมายเลข 3 (Data File Editing Area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่ข้อมูลที่เป็นตัวแปร ทั้งที่อยู่ในรูปของตัวแปรค่าเดียว และในรูปของเมตริกซ์ (Matrix) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกเรียกใช้ในการคำนวณโดยคำสั่งในโมเดลไฟล์
- หมายเลข 4 (Setting File Editing Area) แสดงหน้าต่างสำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ เพื่อคำนวณคำตอบที่ดีที่สุดให้กับโปรแกรม เช่น การจำกัดเพดานของเวลาและหน่วยความจำ (Memory) ที่ใช้ในการคำนวณ
- หมายเลข 5 (Outline View) แสดงโครงสร้างของข้อมูลที่อยู่ในหน้าต่างของ โมเดลไฟล์ ดาต้าไฟล์ และ เซตติ้งไฟล์ และจัดเรียงข้อมูลให้แสดงในรูปแบบรายการเพื่อง่ายต่อการตรวจสอบและค้นหา
- หมายเลข 6 (Solutions Log Area) แสดงคำตอบที่โปรแกรมทำการคำนวณพบ และพิจารณาว่าน่าจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดได้ (Feasible Solution) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกบันทึกไว้เรื่อย ๆ จนกระทั่งโปรแกรมทำการคำนวณพบคำตอบที่ดีที่สุด (Final Solution)



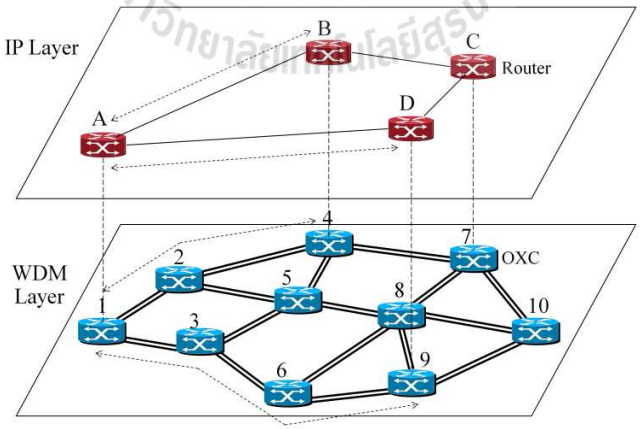
รูปที่ 4.1 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio

4.4 การทดลองและการวิเคราะห์ผล

เนื้อหาในหัวข้อนี้นำเสนอการทดลองที่ใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มที่ได้พัฒนาขึ้น ในการวางแผนโครงข่ายเสมือนซึ่งเป็นโครงข่ายเชิงตรรกที่ซ้อนอยู่ในโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น โดยเนื้อหาในหัวข้อที่ 4.4.1 อธิบายลักษณะโครงสร้างของโครงข่ายที่ใช้ในการทดลอง และอธิบายพารามิเตอร์ต่างๆของระบบการทำงาน หัวข้อที่ 4.4.2 นำเสนอการวิเคราะห์ความสมดุลของทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงของชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสง หัวข้อที่ 4.4.3 นำเสนอการการศึกษาผลกระทบจากงบประมาณที่กำหนดสำหรับการจัดส่งทราฟฟิกและการวิเคราะห์ผลกระทบจากความแปรปรวนของทราฟฟิกต่อความสมดุลของการจัดส่งทราฟฟิกภายในโครงข่าย หัวข้อที่ 4.4.4 นำเสนอการวิเคราะห์การใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวของทราฟฟิกที่ต่างกันในการวางแผนโครงข่าย และสุดท้ายหัวข้อที่ 4.4.5 นำเสนอการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการใช้ทรัพยากรโครงข่ายในการรองรับทราฟฟิกเมื่อพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

4.4.1 ลักษณะพารามิเตอร์และโครงข่ายที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของโครงข่าย IP over WDM (IP over WDM network) ที่ใช้ในการทดลอง โดยโครงข่ายชั้นใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นประกอบด้วยอุปกรณ์เชื่อมต่อสลับลำแสงหรือโอเอ็กซี (Optical Cross Connect: OXC) จำนวน 10 โนด และประกอบด้วยข่ายเชื่อมโยงใยแก้วนำแสงจำนวน 10 ข่ายเชื่อมโยง ส่วนโครงข่ายเสมือนของชั้นไอพีจะพิจารณาการส่งทราฟฟิกระหว่าง 10 คู่โนดของชั้นไอพี ซึ่งเลือกมาโดยการสุ่ม



รูปที่ 4.2 โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลอง

ตารางที่ 4.5 แสดงพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งราคาของอุปกรณ์สำหรับส่งทราฟฟิกไอพีผ่านข่ายเชื่อมโยงและค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเลือกใช้ข่ายเชื่อมโยงเป็นสัดส่วนราคาที่อ้างอิงจากราคาในการเช่าและการติดตั้งระบบใยแก้วนำแสงในประเทศไทย

การทดลองในหัวข้อย่อยต่อไปนี้พิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก โดยพิจารณาทราฟฟิกที่มีลักษณะการกระจายแบบเกาเซียน (Gaussian distribution) หรือมีการกระจายแบบเบต้า (Beta distribution) ซึ่งรายละเอียดได้ระบุไว้ในแต่ละหัวข้อ

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ค่าคงที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย

พารามิเตอร์	ค่า
ขนาดของอุปกรณ์สำหรับส่งทราฟฟิกไอพีผ่านโครงข่ายในแก้วนำแสง (M)	STM1 (155.52 Mbps)
แบนด์วิดท์หรือความจุของข่ายเชื่อมโยง (B_j)	5 Gbps
ราคาของอุปกรณ์สำหรับส่งทราฟฟิกไอพีผ่านข่ายเชื่อมโยง (C_j)	150,000
ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเลือกใช้ข่ายเชื่อมโยง (F_j)	15,000

4.4.2 การวิเคราะห์ความสมดุลของทราฟฟิกในโครงข่าย

การทดลองในหัวข้อนี้ทำการเปรียบเทียบวิธีการวางแผนโครงข่ายเสมือนที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ กับวิธีการอื่นที่ได้มีการนำเสนออยู่ในบทความวิจัย โดยได้เปรียบเทียบกับวิธีการที่นำเสนอใน [16] ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการลดค่าใช้จ่ายของการใช้ทรัพยากรโครงข่ายในการจัดส่งทราฟฟิกโดยให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด และพิจารณาข้อจำกัดเกี่ยวกับความจุของข่ายเชื่อมโยงและการรับประกันการส่งทราฟฟิกให้สามารถรองรับความไม่แน่นอนของทราฟฟิกตามที่กำหนด

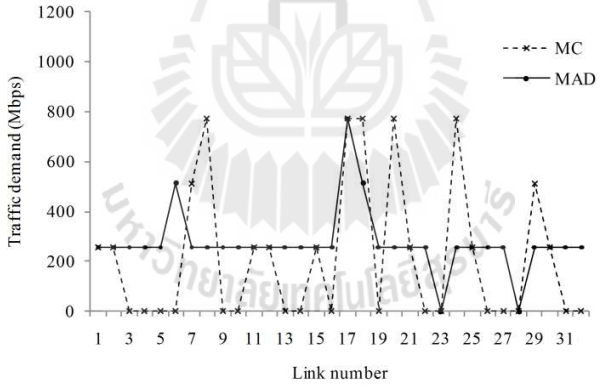
โดยในการทดลองได้พิจารณาทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนซึ่งมีลักษณะการกระจายแบบปกติหรือแบบเกาเซียน (Gaussian distribution) ที่มีค่าเฉลี่ยของทราฟฟิก225 Mbps และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 25 Mbps [25] โดยได้ทำการวางแผนโครงข่ายเสมือนเพื่อให้สามารถรองรับความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90% และ 99% ในกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 90% ค่าของ x_k = 257.04 Mbps ส่วนกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 99% ค่าของ x_k = 283.16 Mbps

การหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการวางแผนโครงข่ายเสมือนดังกล่าวทำโดยใช้ โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ที่จะมีการป้อนข้อมูลของชุดเส้นทางที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละทราฟ

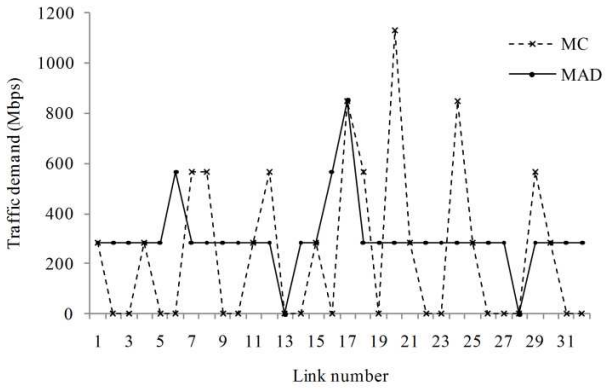
ฟิก (P^k) และทำการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์รุ่น Intel Centrino Core2 Duo Processor 2.0 GHz หน่วยความจำขนาด 2GB

เพื่อแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองในรูปแบบกราฟเส้น ในที่นี้จึงเรียกเทคนิคที่นำเสนอใน [16] ว่า MC ซึ่งย่อมาจาก Minimizing cost ส่วนเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เรียกว่า MAD ย่อมาจาก Minimize mean Absolute Deviation

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบปริมาณของทราฟฟิกในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นผลมาจากการใช้วิธี MC และวิธี MAD จะเห็นว่าการใช้วิธี MC นั้นทำให้บางข่ายเชื่อมโยงมีปริมาณทราฟฟิกที่สูงมาก ในขณะที่หลายข่ายเชื่อมโยงมีปริมาณทราฟฟิกที่น้อยมาก หรือไม่มีเลย ส่วนการใช้วิธี MAD ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ทำให้ได้ผลแบบตรงกันข้าม กล่าวคือปริมาณทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงต่างๆของโครงข่ายใยแก้วนำแสงมีลักษณะที่สมดุลมากกว่า คือ ปริมาณทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงต่างๆ มีปริมาณใกล้เคียงกัน ยกเว้นข่ายเชื่อมโยงที่ 17 รองรับปริมาณทราฟฟิกมากกว่าข่ายเชื่อมโยงอื่น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นกรณีที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ เพราะโครงสร้างการเชื่อมต่อทางกายภาพของโครงข่ายใยแก้วนำแสงทำให้เกิดลักษณะคอขวดขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงที่ 17



รูปที่ 4.3 กรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 90%



รูปที่ 4.4 กรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 99%

4.4.3 การศึกษาผลกระทบจากงบประมาณที่กำหนดและความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

การทดลองในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลกระทบต่อลักษณะของโครงข่ายเสมือนที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยได้ศึกษาผลกระทบใน 2 ประเด็น คือ ผลกระทบจากงบประมาณที่กำหนดสำหรับการจัดส่งทราฟฟิก และผลกระทบจากความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่สามารถรองรับได้

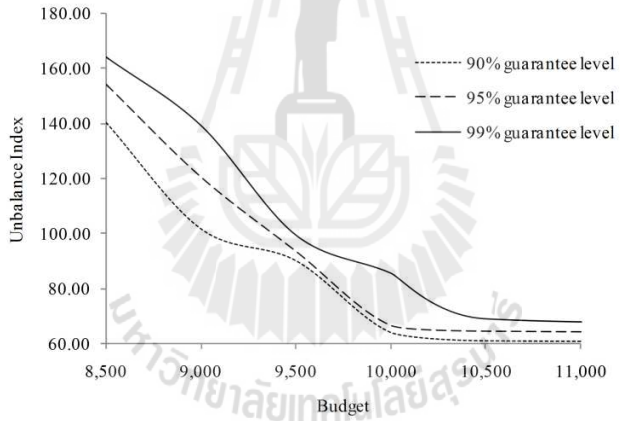
ในการบอกลักษณะของโครงข่ายเสมือนที่ได้จากการออกแบบ ได้ทำการประเมินจากลักษณะการกระจายของทราฟฟิกในโครงข่ายใยแก้วนำแสง ว่ามีลักษณะการส่งทราฟฟิกผ่านข่ายเชื่อมโยงต่างๆ อย่างสมดุลหรือไม่ ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ใช้ตัวชี้วัดที่เรียกว่า ดัชนีความไม่สมดุล (Unbalance index) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของทราฟฟิกไอพีที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายใยแก้วนำแสง ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4.12)

$$Unbalance\ index = \frac{1}{n}\sum_{j\in A}\left| r_j - \frac{\sum_{j\in A} r_j}{n} \right| \qquad (4.12)$$

โดยในการทดลองได้พิจารณางบประมาณในการจัดส่งทราฟฟิกที่ต่างกันตั้งแต่ 8,500 - 11,000 หน่วย และได้พิจารณาทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนซึ่งมีลักษณะการกระจายแบบปกติหรือแบบเกาเซียน (Gaussian distribution) เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.2 แต่ในที่นี้ได้พิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90%, 95% และ 99% ในกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 90% ค่าของ x_k = 257.04 Mbps ในกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 95% ค่าของ x_k = 266.12 Mbps ส่วนกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 99% ค่าของ x_k = 283.16 Mbps

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าดัชนีความไม่สมดุลจะลดลงตามงบประมาณในการจัดส่งทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือยิ่งกำหนดงบประมาณสูงยิ่งทำให้การกระจายของทราฟฟิกในโครงข่ายมากขึ้น นั่นคือมีความสมดุลของทราฟฟิกมากขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองนี้ จะเห็นว่าเทคนิคการวางแผนโครงข่ายที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความไม่สมดุลทราฟฟิกได้ถึง 68 % เมื่องบประมาณเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มงบประมาณก็มีขีดจำกัด สำหรับกรณีของโครงข่ายที่ใช้ในการทดลองนี้ ขีดจำกัดอยู่ที่ 10,500 หน่วย จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าแม้จะเพิ่มงบประมาณสูงมากกว่าขีดจำกัดนี้ ก็ไม่ช่วยทำให้ทราฟฟิกมีความสมดุลเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของการกำหนดค่าความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่สามารถรองรับได้ต่อค่าดัชนีความไม่สมดุล จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าที่งบประมาณค่าใดๆ เมื่อระดับความไม่แน่นอนของทราฟฟิกเพิ่มขึ้น จะทำให้ดัชนีความไม่สมดุลเพิ่มขึ้น นั่นคือการกระจายของเส้นทางที่เลือกสำหรับใช้ส่งทราฟฟิกลดลง

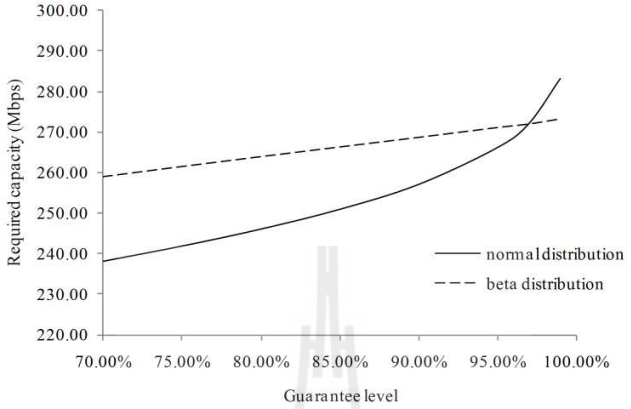


รูปที่ 4.5 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการกระจายแบบปกติ

4.4.4 การวิเคราะห์การใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวของทราฟฟิกที่ต่างกันในการวางแผนโครงข่ายเสมือน

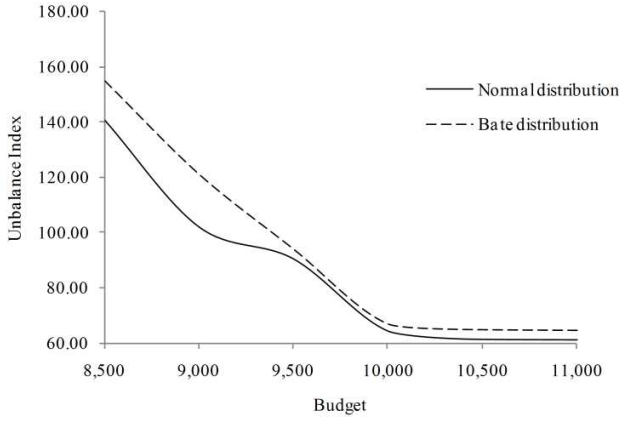
การทดลองในหัวข้อนี้คล้ายกับหัวข้อ 4.4.3 แต่ได้เพิ่มการพิจารณาทราฟฟิกที่มีลักษณะการกระจายแบบเบต้า (Beta distribution) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของทราฟฟิก225 Mbps และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 25 Mbps [26] โดยได้พิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90%, 95% และ 99% ในกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 90% ค่าของ x_k = 266.84 Mbps ในกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 95% ค่าของ x_k = 271.75 Mbps ส่วนกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 99% ค่าของ x_k = 280.01 Mbps

รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบขนาดของแบนด์วิดท์หรือความจุช่องสัญญาณสำหรับรองรับทราฟฟิกที่มีลักษณะการกระจายแบบปกติ และมีลักษณะการกระจายแบบเบต้า เพื่อการรับประกันความไม่แน่นอนทราฟฟิกระดับต่างๆ ตั้งแต่ 70% - 100%

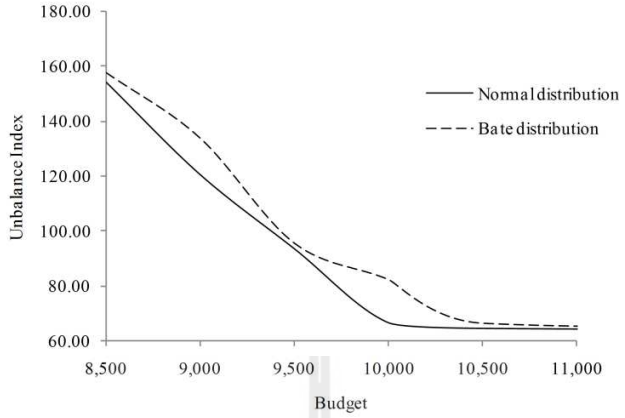


รูปที่ 4.6 ปริมาณของทราฟฟิกในระดับการรับประกันความไม่แน่นอนที่แตกต่างกัน

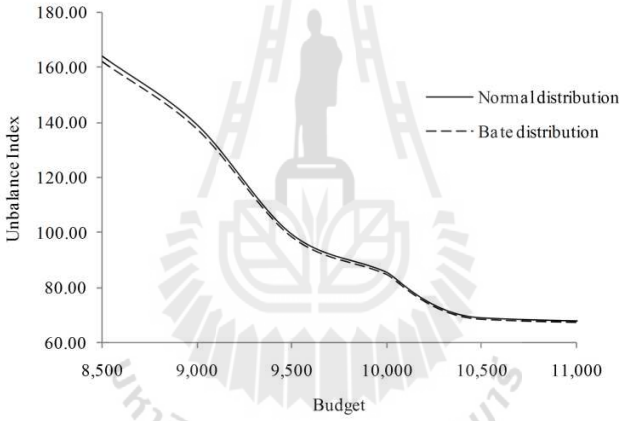
ผลการทดลองใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวของทราฟฟิกที่ต่างกันในการวางแผนโครงข่าย แสดงในรูปที่ 4.7-4.9 โดยประเมินจากดัชนีความไม่สมดุลของโครงข่ายเสมือนที่ได้จากการออกแบบ จากรูป 4.7 และ 4.8 จะเห็นว่า เมื่อกำหนดการรับประกันความไม่แน่นอนที่ระดับต่ำ คือ 90% และ 95% การใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบปกติจะให้ค่าดัชนีความไม่สมดุลที่ต่ำกว่าการใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเบต้า แต่เมื่อกำหนดการรับประกันความไม่แน่นอนที่ระดับสูง คือ 99% (รูป 4.9) การใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวของทราฟฟิกทั้งสองแบบจะให้ค่าดัชนีความไม่สมดุลที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.7 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%



รูปที่ 4.8 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 95%



รูปที่ 4.9 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%

4.4.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการใช้ทรัพยากรโครงข่าย

ในหัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการใช้ทรัพยากรโครงข่ายสำหรับผลการวางแผนโครงข่ายเสมือนที่ทดลองในหัวข้อที่ 4.4.3 และ 4.4.4 โดยได้ใช้ตัวชี้วัดคือ เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ข่ายเชื่อมโยง (Link utilization percentage) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของปริมาณทราฟฟิกที่จัดส่งบนข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายใยแก้วนำแสงเทียบต่อขนาดแบนด์วิดท์หรือความจุของช่องสัญญาณที่จัดสรรไว้สำหรับข่ายเชื่อมโยงนั้นๆ

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการใช้ทรัพยากรโครงข่าย เมื่อกำหนดงบประมาณและระดับการรับประกันความไม่แน่นอนทราฟฟิกที่ต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อกำหนดการ

รับประกันความไม่แน่นอนที่ระดับสูงขึ้น จะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ข่ายเชื่อมโยงที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถเพิ่มการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรโครงข่ายได้สูงถึง 8 % และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวของทราฟฟิกที่ต่างกันในการวางแผนโครงข่ายจะเห็นว่าการใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเบต้าจะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ข่ายเชื่อมโยงที่สูงกว่า เมื่อกำหนดการรับประกันความไม่แน่นอนที่ระดับ 90% และ 95% แต่เมื่อกำหนดการรับประกันความไม่แน่นอนที่ระดับ 99% ฟังก์ชันการกระจายตัวทั้งสองแบบจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ข่ายเชื่อมโยงที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์ข่ายเชื่อมโยง

ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนทราฟฟิก	งบประมาณ ($\times 10^3$)	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%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.5 สรุป

รายงานวิจัยบทนี้นำเสนอเทคนิคการวางแผนโครงข่ายสำหรับการจัดส่งทราฟฟิกไอพีผ่านโครงข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (IP over WDM) ซึ่งได้พัฒนาขึ้นในรูปของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม (Integer linear programming) โดยได้มีการพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกและความสมดุลของการจัดส่งทราฟฟิกด้วย จากการทดลองวางแผนโครงข่ายเสมือนสำหรับการส่งทราฟฟิกไอพีในโครงข่าย IP over WDM สังเกตได้ว่าเทคนิควิธีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถกระจายทราฟฟิกในโครงข่ายใยแก้วนำแสงได้ ซึ่งทำให้สามารถลดความไม่สมดุลทราฟฟิกได้ถึง 68 % และสามารถเพิ่มการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรโครงข่ายได้สูงถึง 8 % ในการรองรับทราฟฟิกไอพีที่มีลักษณะทราฟฟิกที่แปรปรวน

บทที่ 5
สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยที่นำเสนอนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวางแผนโครงข่าย IP over WDM โดยได้พิจารณาผลกระทบจากความไม่แน่นอนของทราฟฟิกด้วย เพื่อให้การใช้งานแบนด์วิดท์ในโครงข่ายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้พัฒนาเทคนิคดังกล่าวในรูปของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) ที่สามารถสร้างความมั่นใจในการสื่อสารข้อมูลในโครงข่ายไอพี และยังสามารถทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกภายในโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ใช้การมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น รวมถึงสามารถรับประกันความเพียงพอของความจุช่องสัญญาณที่เตรียมให้กับทราฟฟิกไอพีซึ่งอาจมีความแปรปรวนของปริมาณทราฟฟิกในระดับที่ต้องการได้

จากการทดลองที่ใช้เทคนิคการวางแผนโครงข่ายที่ได้พัฒนาขึ้น ในการวางแผนโครงข่ายเสมือนซึ่งเป็นโครงข่ายเชิงตรรกที่ซ้อนอยู่ในโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น และได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น พบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ทำให้ประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านโครงข่าย IP over WDM สูงขึ้นทั้งในด้านของความสมดุลของทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงของชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสง และความคุ้มค่าของการใช้ทรัพยากรโครงข่ายในการรองรับทราฟฟิกเมื่อพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

จากการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ งบประมาณที่กำหนดสำหรับการจัดส่งทราฟฟิก ระดับความแปรปรวนของทราฟฟิกที่ต้องการให้รองรับได้ และ ฟังก์ชันการกระจายตัวของทราฟฟิกที่ใช้ในการวางแผนโครงข่าย พบว่าการกำหนดงบประมาณไว้สูงจะทำให้ได้เส้นทางการจัดส่งทราฟฟิกในโครงข่ายที่มีลักษณะกระจายตัวมากขึ้น นั่นคือมีความสมดุลของทราฟฟิกมากขึ้น แต่ก็มีขีดจำกัด นั่นคือถึงแม้จะเพิ่มงบประมาณสูงมากกว่าค่าหนึ่งก็ไม่ช่วยทำให้ทราฟฟิกมีความสมดุลเพิ่มขึ้น ส่วนการกำหนดให้โครงข่ายเสมือนสามารถรองรับความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับสูง จะทำให้การกระจายของเส้นทางที่เลือกสำหรับใช้ส่งทราฟฟิกลดลง นั่นคือมีความสมดุลของทราฟฟิกลดลง สำหรับฟังก์ชันการกระจายตัวของทราฟฟิกที่ต่างกันจะไม่ส่งผลมากนักในกรณีระดับความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสูงกว่า 99%

ดังนั้นเทคนิคการวางแผนโครงข่าย IP over WDM ที่ได้พัฒนาและศึกษาในงานวิจัยนี้ จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการสื่อสารข้อมูลผ่านโครงข่ายแกนหลักซึ่งใช้เทคโนโลยีโครงข่ายแบบ IP over WDM ได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับหน่วยงานที่ดูแลการให้บริการ

โครงข่ายแกนหลักประเภทนี้ได้ต่อไป นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังมีคุณค่าทางวิชาการต่อวงการศึกษาและวิจัยที่มีความสนใจในวิธีการแก้ปัญหาการวางแผนจัดการทรัพยากรโครงข่ายภายใต้สภาวะที่ทราฟฟิกมีความแปรปรวน ซึ่งงานวิจัยในอนาคตจะทำการศึกษาเรื่องการปรับสัดส่วนของแบนด์วิดท์ของโครงข่ายเสมือนตามสภาวะโหลดและประเภทการประยุกต์ใช้งานของผู้ใช้บริการได้อย่างอัตโนมัติ โดยจะพิจารณาความหลากหลายของเส้นทางการจัดส่งทราฟฟิกเพื่อเพิ่มคุณภาพของการจัดส่งในสถานการณ์การใช้งานของโครงข่ายจริง เพื่อที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ทรัพยากรโครงข่ายแกนหลักประเภท IP over WDM ให้สูงมากขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

[1] N. Ghani, S. Dixit, and T. S. Wang, "On IP-over-WDM integration," IEEE Communications Magasine, Mar 2000, vol. 38, pp. 72-84.

[2] J. Kilpi and I. Norros, "Testing the Gaussian approximation of aggregate traffic," in Proc. Internet Measurement Workshop, 2002, pp. 49-61.

[3] T. Telkamp, "Traffic characteristics and network planning," ISMA, Oct 2002.

[4] S. Suri, M. Waldvogel, and P.R. Warkhede, "Profile-based routing: a new framework for MPLS traffic engineering," in Proc. QofIS, 2001.

[5] M. Roughan, M. Thorup and Y. Zang, "Traffic engineering with estimated traffic matrices," in Proc. USENIX/ACM, 2003.

[6] M. Johansson and A. Gunnar, "Data-driven Traffic Engineering: techniques, experiences and challenges," in Proc. BROADNETS, 2006.

[7] H. Wang, H. Xie, L.Qiu, Y. Yang, Y. Zhang and A. Greenberg, "COPE: Traffic Engineering in Dynamic Networks," in Proc. GLOBECOM, 2007.

[8] J. R. Birge and F. Louveaux, Introduction to Stochastic Programming, Springer series in operations research. Springer, New York, 1997.

[9] J.M. Mulvey, R.J. Vanderbei, and S.A. Zenios, "Robust optimization of large-scale systems," Operation Research, Mar/Apr 1995, vol. 43, pp. 264-281.

[10] E.A. Medova, "Chance-constrained stochastic programming for integrated services network management," Annals of Operation Research, 1998, vol. 81, pp. 213-229.

[11] S. Verbrugge, D. Colle, M. Pickaver, P. Demeester, "Common planning practices for network dimensioning under traffic uncertainty," in Proc. DRCN, Oct 2003, pp.317-323.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] K. Meesublak, “Network design under demand uncertainty,” in Proceedings of APAN Network Research Workshop, August 2008, pp. 19–23.

[16] K. Meesublak, “A two-layer network design problem under traffic uncertainty”, in Conf. ECTI-CON, vol. 2, May 2009, pp. 914–917.

[17] X. Du, Y. Yang and X. Kang, “A Network Traffic Supervision System Based on Feature Parameters Distribution,” The 3rd Intetnational Conference on Innovative Computing Information and Control, 2008

[18] 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, March 2003, pp. 124-126

[19] L. Rodrigues and P. R. Guardieiro “A Spatial and Temporal Analysis of Internet Aggregate Traffic at the Flow Level,” IEEE Communications Society Globecom, 2004, pp. 685-691

[20] P. Liu, F. Liu and Z. Lei, “Model of Network Traffic based on Network Applications and Network Users,” IEEE International Symposium on Computer Science and Computational Technology, 2008, pp. 171-174

[21] P. Rungroj and C. Charnsripinyo, “Measuring Traffic on the Network to the Internet in Thailand,” NSTDA Annual Conference (NAC 2007), ISBN: 978-974-229-150-1, pp. 926-931, March 2007.

[22] Paessler AG, The Network Monitoring Company 1998-2011. [Online]. Available: http://www.paessler.com/prtg

[23] MathWave Technologies 2004-2011. [Online]. Available: http://www.mathwave.com/

[24] R. Jain, “The Art of Computer Systems Performance Analysis,” Wiley Computer Publishing, John Wiley and Sons, Inc., 1991, pp. 496- 653

[25] T. Telkamp, “Traffic characteristics and network planning,” ISMA, Oct 2002.

[26] 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.

ภาคผนวก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ

1 P. Nualmuenwai and C. Prommak, “On the Analysis of IP Traffic Distribution in the Network of Suranaree University of Technology”, World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 60, pp. 362-366, 2011.

2 P. Nualmuenwai and C. Prommak, “Logical Topology Design in IP over WDM Networks with Load Balancing under Traffic Uncertainty”, IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), Singapore, Nov 23-26, 2012.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้วิจัย

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี