

การวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก  
สำหรับเครือข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นร่วมกับ  
การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ



นายปฏิจจ แสงदानุช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2558

**BALANCED TRAFFIC PLANNING UNDER TRAFFIC  
UNCERTAINTY FOR IP OVER WDM WITH EFFICIENT  
ENERGY CONSUMPTION**

**Patidja Sangdanuch**



**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 2015**

การวางแผนกราฟฟิกเพื่อความสมดุลภายใต้ความไม่แน่นอนของกราฟฟิกสำหรับ  
เครือข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นร่วมกับ  
การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ชุติมา พรหมมาก)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชุกิจ ลิ้มปิจาณวงศ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปฏิจจ แสงดานุช : การวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสะดวกภายใต้ความไม่แน่นอนของ  
ทราฟฟิกสำหรับเครือข่ายไอพินบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นร่วมกับการใช้  
พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (BALANCED TRAFFIC PLANNING UNDER TRAFFIC  
UNCERTAINTY FOR IP OVER WDM WITH EFFICIENT ENERGY  
CONSUMPTION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก, 119 หน้า.

เครือข่ายแกนหลักประเภทไอพินบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing : IP over WDM) เป็นเครือข่ายที่มีการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงที่สามารถส่งสัญญาณแต่ละช่องด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ทำให้สามารถส่งข้อมูลได้มากเมื่อเทียบกับการสื่อสารผ่านสายทองแดงแบบเดิม โดยในปัจจุบันเครือข่ายประเภทนี้ได้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุนี้การรองรับความต้องการของผู้ใช้บริการในแง่ของปริมาณทราฟฟิกจึงเป็นประเด็นสำคัญในการวางแผนและออกแบบระบบ เนื่องจากลักษณะทราฟฟิกของเครือข่าย IP over WDM มีลักษณะที่ไม่แน่นอนและมีความแปรปรวนอยู่ตลอดเวลา ส่งผลให้วิธีการวางแผนเพื่อกำหนดเส้นทางที่ใช้ในการส่งทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนเป็นประเด็นสำคัญที่ผู้ออกแบบไม่ควรมองข้าม นอกจากนี้ปริมาณทราฟฟิกในเครือข่ายเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบโดยตรงต่อการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่าย ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการวางแผนทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ที่มีการพิจารณาทั้งปัญหาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกและปัญหาการใช้พลังงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในเครือข่าย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวางแผนทราฟฟิกแบบสมดุลภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งนำเสนอในรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์แบบสองวัตถุประสงค์สำหรับการวางแผนทราฟฟิก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมในการขนส่งทราฟฟิกภายในเครือข่าย IP over WDM ซึ่งทำให้เกิดความสมดุลของการส่งทราฟฟิกภายในเครือข่ายและทำให้สามารถใช้พลังงานภายในเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้วิจัยได้ใช้รูปแบบการแก้ปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) และใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio สำหรับการค้นหาคำตอบ ผลของคำตอบที่ได้พบว่าระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกนั้นมีผลต่อค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกอย่างมาก ทำให้การสำรองแบนด์วิดท์เพื่อรองรับทราฟฟิกมีค่าที่มากขึ้นแตกต่างกันไปตามระดับของการรับประกัน

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

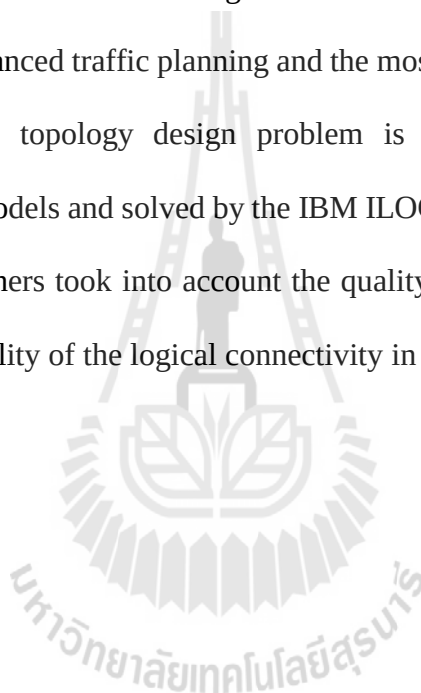
PATIDJA SANGDANUCH : BALANCED TRAFFIC PLANNING UNDER  
TRAFFIC UNCERTAINTY FOR IP OVER WDM WITH EFFICIENT  
ENERGY CONSUMPTION. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHUTIMA  
PROMMAK, Ph.D., 119 PP.

IP OVER WDM/LOAD BALANCING/SHORTEST PATH  
TRAFFIC PLANNING/TRAFFIC UNCERTAINTY/MULTI-OBJECTIVE

The core network for IP over Wavelength Division Multiplexing (IP over WDM) is a network where the data are transmitted through the optical fiber. The optical fiber permits transmission of the light with different wavelengths in each channel. It enables more massive data transmission than the traditional cable wire does. At present, this type of network is widespread. For this reason, it needs to plan a good provision and management in traffic demand in order to serve the consumer needs. Traffic of the network, IP over WDM has the characteristics of uncertainty and variability. It results in the uncertain planning of traffic transmission routes. The traffic planners do not have to ignore this issue. Moreover, traffic demand in the network has the direct effect on the energy consumption of the network devices. For the reason, the researcher highlights the importance of traffic planning for IP over WDM network where the problems of traffic uncertainty and the problems of energy consumption of network devices are present.

This thesis introduced the balanced traffic planning under traffic uncertainty in IP over WDM with efficient energy consumption. We proposed a mathematic equation using two objectives in traffic planning in order to provide the suitable routes in traffic transmission for

the IP over WDM networks. The objectives are to balance the traffic and enabled efficient energy consumption in the network. The researcher used the Integer Linear Programing (ILP) model in solving the problems and IBM ILOG CPLEX Optimization Studio program in finding the solutions. It was found that the guaranteed levels of traffic uncertainty highly affected the imbalance rate of the traffic. Moreover, it affected the bandwidth provision to serve the volume of traffic which was varied by the guaranteed level. Finally, the researcher gave the guidelines in choosing the suitable routes for transport traffic, which introduced the most balanced traffic planning and the most efficient energy consumption. 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 uncertainty could affect the reliability of the logical connectivity in IP over WDM networks.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง 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 วาณิชนันต์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวิ หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ชาญชัย ทองโสภณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา และอาจารย์เศรษฐวิทย์ ภูญาษา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

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

ปฎิจุจ แสงदानุช

# สารบัญ

## หน้า

|                                           |   |
|-------------------------------------------|---|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....                   | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....                | ข |
| กิตติกรรมประกาศ.....                      | ง |
| สารบัญ.....                               | จ |
| สารบัญตาราง.....                          | ฉ |
| สารบัญรูป.....                            | ญ |
| บทที่                                     |   |
| 1    บทนำ.....                            | 1 |
| 1.1    ความสำคัญและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2    วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....       | 3 |
| 1.3    สมมติฐานของการวิจัย.....           | 4 |
| 1.4    ขีดกลางเบื้องต้น.....              | 4 |
| 1.5    ขอบเขตของการวิจัย.....             | 4 |
| 1.6    วิธีดำเนินการวิจัย.....            | 5 |
| 1.6.1    แนวทางการดำเนินงาน.....          | 5 |
| 1.6.2    ระเบียบวิธีวิจัย.....            | 5 |
| 1.6.3    สถานที่ทำการวิจัย.....           | 5 |
| 1.6.4    เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....  | 6 |
| 1.6.5    การเก็บรวบรวมข้อมูล.....         | 6 |
| 1.6.6    การวิเคราะห์ข้อมูล.....          | 6 |
| 1.7    ประโยชน์ที่ได้รับ.....             | 6 |
| 1.8    นวัตกรรมของงานวิจัยนี้.....        | 6 |
| 1.9    ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....      | 7 |



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|          |                                                                                                                                                                          |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2</b> | <b>ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>                                                                                                                             | <b>8</b>  |
| 2.1      | กล่าวนำ                                                                                                                                                                  | 8         |
| 2.2      | ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                                                                                                                 | 9         |
| 2.3      | เครือข่าย IP over WDM                                                                                                                                                    | 13        |
| 2.4      | ความจุ ความเร็วของอินเทอร์เน็ต และ โพรโทคอล                                                                                                                              | 16        |
| 2.5      | ทำไมต้องเป็น IP over WDM                                                                                                                                                 | 20        |
| 2.6      | การใช้พลังงานของเครือข่าย IP over WDM                                                                                                                                    | 22        |
| 2.7      | การหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) โดยใช้ Dijkstra's Algorithm                                                                                                    | 23        |
| 2.8      | การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม                                                                                                                                              | 24        |
| 2.8.1    | ข้อสมมุติฐานสำคัญในการโปรแกรมเชิงเส้น                                                                                                                                    | 25        |
| 2.8.2    | รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้น                                                                                                                                       | 26        |
| 2.8.3    | ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นมาตรฐาน                                                                                                                                   | 27        |
| 2.8.4    | คุณสมบัติของรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้น                                                                                                                                     | 27        |
| 2.8.5    | การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหา                                                                                                                               | 28        |
| 2.9      | ปัญหาการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์<br>(Multi-objective optimization)                                                                                               | 29        |
| 2.9.1    | ลักษณะของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์                                                                                                                 | 29        |
| 2.9.2    | วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก                                                                                                                                                  | 31        |
| 2.10     | ความไม่แน่นอนของกราฟฟิค                                                                                                                                                  | 32        |
| <b>3</b> | <b>การวางแผนกราฟฟิคเพื่อความสะดวกของปริมาณกราฟฟิคภายใต้การพิจารณา<br/>ความไม่แน่นอนของกราฟฟิคสำหรับเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงาน<br/>อย่างมีประสิทธิภาพ</b> | <b>34</b> |
| 3.1      | แนวคิดในการวางแผนเครือข่าย IP over WDM เพื่อความสะดวกร่วมกับ<br>การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ                                                                          | 35        |
| 3.2      | การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม                                                                                                                                 | 36        |
| 3.3      | การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์                                                                                                                                                  | 39        |
| 3.3.1    | ฟังก์ชันวัตถุประสงค์                                                                                                                                                     | 43        |

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

|       |                                                                      |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.2 | สมการเงื่อนไข                                                        | 45 |
| 3.4   | การวิเคราะห์ความซับซ้อนอัลกอริทึม                                    | 48 |
| 3.4.1 | จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables)                          | 49 |
| 3.4.2 | พื้นที่การค้นหา (Search space)                                       | 51 |
| 3.4.3 | จำนวนเงื่อนไข (Constraints)                                          | 53 |
| 3.4.4 | สรุปความซับซ้อนอัลกอริทึม                                            | 54 |
| 3.5   | โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม                  | 57 |
| 4     | <b>การทดลองและวิเคราะห์ผลการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสะดวกของปริมาณ</b> |    |
|       | <b>ทราฟฟิกภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย</b> |    |
|       | <b>IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ</b>            | 60 |
| 4.1   | การใช้พลังงานสำหรับการขนส่งทราฟฟิกบนเครือข่าย IP over WDM            | 61 |
| 4.2   | การศึกษาผลกระทบต่อความไม่สมดุลของทราฟฟิกจากการใช้ชุดเส้นทางเลือก     |    |
|       | ที่ต่างกันสำหรับการขนส่งทราฟฟิก                                      | 62 |
| 4.2.1 | ตัวอย่างเส้นทางสำหรับการขนส่งทราฟฟิก                                 | 68 |
| 4.2.2 | การวิเคราะห์ผลกระทบต่อความไม่สมดุลของทราฟฟิกจากการใช้                |    |
|       | ชุดเส้นทางเลือกที่ต่างกันสำหรับการขนส่งทราฟฟิก                       | 68 |
| 4.2.3 | สรุปการทดลองหัวข้อที่ 4.2                                            | 73 |
| 4.3   | การศึกษาผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุด                  |    |
|       | ของ Multi -Objective Optimization Model                              | 73 |
| 4.3.1 | ตัวอย่างเส้นทางสำหรับการขนส่งทราฟฟิก                                 | 76 |
| 4.3.2 | การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุด              |    |
|       | ของ Multi -Objective Optimization Model                              | 77 |
| 4.3.3 | สรุปการทดลองหัวข้อที่ 4.3                                            | 82 |
| 4.4   | การศึกษาผลกระทบของปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่างคู่โหนดใน       |    |
|       | เครือข่ายต่อความไม่สมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่าย        | 82 |
| 4.4.1 | พิจารณาเครือข่าย NSFNET                                              | 83 |
| 4.4.2 | พิจารณาเครือข่าย COST239                                             | 86 |

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.3 สรุปการทดลองหัวข้อที่ 4.4                                                                                                 | 90  |
| 4.5 การศึกษาผลกระทบของปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่างคู่โหนดในเครือข่ายต่อความไม่สมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่าย | 91  |
| 4.5.1 พิจารณาเครือข่าย NSFNET                                                                                                   | 92  |
| 4.5.2 พิจารณาเครือข่าย COST239                                                                                                  | 93  |
| 4.5.3 สรุปการทดลองหัวข้อที่ 4.5                                                                                                 | 95  |
| 4.6 สรุปผลการทดลองของบทที่ 4                                                                                                    | 96  |
| 5 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ                                                                                                     | 97  |
| 5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์                                                                                                   | 97  |
| 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ                                                                                                          | 99  |
| 5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต                                                                                                       | 99  |
| รายการอ้างอิง                                                                                                                   | 100 |
| ภาคผนวก                                                                                                                         |     |
| ภาคผนวก ก. ปริมาณทราฟฟิกที่ใช้สำหรับขนส่งระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย                                                              | 103 |
| ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่                                                                                     | 109 |
| ประวัติผู้เขียน                                                                                                                 | 119 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า                                                                                                            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3.1      | สรุปคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปรการตัดสินใจ.....                                                             |
| 3.2      | จำนวนเงื่อนไข.....                                                                                              |
| 3.3      | ขนาดของปัญหา.....                                                                                               |
| 3.4      | การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม<br>IBM ILOG CPLEX Optimization Studio..... |
| 4.1      | พารามิเตอร์ค่าคงที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบความไม่สมดุลของกราฟฟิค.....                                       |
| 4.2      | การรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคมีความไม่แน่นอนที่มีลักษณะ<br>การกระจายแบบปกติ.....                          |
| 4.3      | ค่าดัชนีความไม่สมดุลของกราฟฟิค (Unbalanced index).....                                                          |
| 4.4      | พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนกราฟฟิค.....                                                                        |
| 4.5      | การใช้พลังงานของอุปกรณ์.....                                                                                    |
| 4.6      | ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์.....                                                                                 |
| 4.7      | ตัวอย่างค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคำตอบที่ดีที่สุดของสมการ<br>สองวัตถุประสงค์ในเครือข่าย.....      |
| 4.8      | เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่ใกล้เคียงกันของทั้งสองโมเดล (NSFNET).....                                               |
| 4.9      | เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่ใกล้เคียงกันของทั้งสองโมเดล (COST239).....                                              |
| ก.1      | ปริมาณกราฟฟิคระหว่างคู่โหนด 100 คู่โหนด สำหรับเครือข่าย NSFNET.....                                             |
| ก.2      | ปริมาณกราฟฟิคระหว่างคู่โหนด 140 คู่โหนด สำหรับเครือข่าย NSFNET.....                                             |
| ก.3      | ปริมาณกราฟฟิคระหว่างคู่โหนด 180 คู่โหนด สำหรับเครือข่าย NSFNET.....                                             |
| ก.4      | ปริมาณกราฟฟิคระหว่างคู่โหนด 100 คู่โหนด สำหรับเครือข่าย COST239.....                                            |
| ก.5      | ปริมาณกราฟฟิคระหว่างคู่โหนด 140 คู่โหนด สำหรับเครือข่าย COST239.....                                            |
| ก.6      | ปริมาณกราฟฟิคระหว่างคู่โหนด 180 คู่โหนด สำหรับเครือข่าย COST239.....                                            |

## สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า                                                                                                                                       |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.1    | โครงสร้างพื้นฐานถูกสร้างขึ้นด้วยชั้นของแหวนสามชั้น.....15                                                                                  |
| 2.2    | สถาปัตยกรรมในอนาคตกับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของระบบสื่อสารสัญญาณแสง<br>หลายช่องแบบ DWDM.....15                                               |
| 2.3    | การเพิ่มประสิทธิภาพของความเร็วในการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและ โปรโตคอล.....16                                                                |
| 2.4    | ชั้นของเครือข่าย.....17                                                                                                                    |
| 2.5    | ชั้นมีหลายชั้นมากเกินไป.....18                                                                                                             |
| 2.6    | การอยู่ร่วมกันของ SONET / SDH และ IP traffic ในชั้นอปติคอล.....20                                                                          |
| 2.7    | โนดเครือข่ายหลายชั้น.....21                                                                                                                |
| 2.8    | ปัญหาการเลือกซื้อรถยนต์.....29                                                                                                             |
| 3.1    | ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น.....38                                                                                           |
| 3.2    | ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม.....39                                                                                            |
| 3.3    | จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เมื่อ $J = 10$ .....50                                                                                              |
| 3.4    | จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เมื่อ $J = 44$ .....50                                                                                              |
| 3.5    | ขนาดของพื้นที่การค้นหา.....52                                                                                                              |
| 3.6    | จำนวนเงื่อนไข.....54                                                                                                                       |
| 3.7    | หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....57                                                                                  |
| 4.1    | โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM.....62                                                                                                    |
| 4.2    | โครงสร้างเครือข่าย IP over WDM ของ NSFNET.....63                                                                                           |
| 4.3    | แสดงการใช้เส้นทางสำหรับขนส่งกราฟิก.....68                                                                                                  |
| 4.4    | ปริมาณของกราฟิกบนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายโดยใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือก<br>10 ชุดเส้นทางสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%.....69         |
| 4.5    | ปริมาณของกราฟิกบนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายโดยใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือก<br>10 ชุดเส้นทางสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%.....69         |
| 4.6    | ปริมาณของกราฟิกบนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายโดยใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือก<br>ที่ต่างกันทั้ง 3 กรณีสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%.....70 |

## สารบัญรูป (ต่อ)

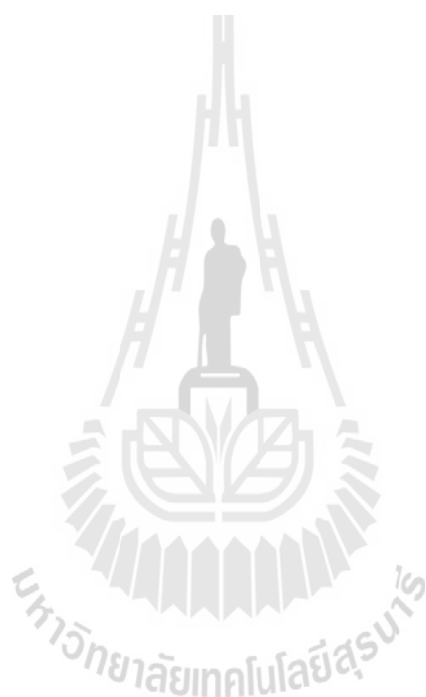
| รูปที่                                                                                                                                                                                                                     | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.7 ปริมาณของกราฟฟิบบนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายโดยใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือก<br>ที่ต่างกันทั้ง 3 กรณีสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%.....                                                                              | 70   |
| 4.8 โครงสร้างเครือข่าย NSFNET (ความยาวของข่ายเชื่อมโยงหน่วยเป็น km.).....                                                                                                                                                  | 72   |
| 4.9 แสดงการใช้เส้นทางสำหรับขนส่งกราฟฟิบบนข่ายจากโหนดที่ 2 ไปยังโหนดที่ 9<br>เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักเปลี่ยนแปลง.....                                                                                                            | 76   |
| 4.10 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนกราฟฟิบบนข่ายที่ต้องการขนส่งระหว่างโหนด<br>100 โหนด 140 โหนดและ 180 โหนดด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของการ<br>รับประกันความไม่แน่นอนที่ 90% (NSFNET).....          | 83   |
| 4.11 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนกราฟฟิบบนข่ายที่ต้องการขนส่งระหว่างโหนด<br>100 โหนด 140 โหนดและ 180 โหนดด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของการ<br>รับประกันความไม่แน่นอนที่ 99% (NSFNET).....          | 83   |
| 4.12 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนกราฟฟิบบนข่ายที่ต้องการขนส่งระหว่างโหนด<br>100 โหนด 140 โหนดและ 180 โหนดด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของการ<br>รับประกันความไม่แน่นอนที่ 90% และ 99% (NSFNET).....  | 84   |
| 4.13 โครงสร้างเครือข่าย COST239 (ความยาวของข่ายเชื่อมโยงหน่วยเป็น km.).....                                                                                                                                                | 85   |
| 4.14 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนกราฟฟิบบนข่ายที่ต้องการขนส่งระหว่างโหนด<br>100 โหนด 140 โหนดและ 180 โหนดด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของการ<br>รับประกันความไม่แน่นอนที่ 90% (COST239).....         | 87   |
| 4.15 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนกราฟฟิบบนข่ายที่ต้องการขนส่งระหว่างโหนด<br>100 โหนด 140 โหนดและ 180 โหนดด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของการ<br>รับประกันความไม่แน่นอนที่ 99% (COST239).....         | 87   |
| 4.16 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนกราฟฟิบบนข่ายที่ต้องการขนส่งระหว่างโหนด<br>100 โหนด 140 โหนดและ 180 โหนดด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของการ<br>รับประกันความไม่แน่นอนที่ 90% และ 99% (COST239)..... | 88   |
| 4.17 เปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายในเครือข่าย NSFNET ที่มีจำนวนกราฟฟิบบนข่ายที่ต้องการขนส่ง<br>กราฟฟิบบนข่ายระหว่างโหนด 100 โหนด 140 โหนดและ 180 โหนด.....                                                                   | 92   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.18 เปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายในเครือข่าย COST239 ที่มีจำนวนทราฟฟิกที่ต้องการขนส่ง  
ทราฟฟิกระหว่างคู่โหนด 100 คู่โหนด 140 คู่โหนดและ 180 คู่โหนด.....92



# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้าในเครือข่ายแกนหลักมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆปี โดยเฉพาะในเครือข่ายแกนหลักประเภทไอพียบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing : IP over WDM) Tucker, R.S., Parthiban, R., Baliga, J., Hinton, K., Ayre, R.W.A. and Sorin, W.V. (2009) กล่าวว่าสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การใช้พลังงานของเครือข่ายการสื่อสารเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการใช้งานอินเทอร์เน็ตที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปริมาณทราฟฟิกในเครือข่ายเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในเครือข่ายเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เรื่องของการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหนึ่งในข้อจำกัดที่ท้าทายมาก จึงควรมีการพิจารณาเรื่องการวางแผนการใช้พลังงานไฟฟ้าในเครือข่าย เพื่อให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดและอีกสิ่งหนึ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้พลังงานของเครือข่ายนั้นคือ ปริมาณทราฟฟิกในเครือข่าย ซึ่งปริมาณทราฟฟิกในเครือข่ายมีลักษณะที่ไม่แน่นอน มีความแปรปรวนอยู่ตลอดเวลาขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้งานของผู้ใช้งาน ดังนั้นความไม่แน่นอนของทราฟฟิกนี้เป็นปัจจัยหนึ่งที่ควรนำมาพิจารณา

Kevin H. Liu. (2002) กล่าวว่าได้มีการใช้งานเทคโนโลยี WDM เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสถาปัตยกรรมเครือข่ายแกนหลักที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ไม่เพียงแต่มีการนำเส้นใยแก้วนำแสงมาใช้งานในเครือข่ายแกนหลัก ในระดับภูมิภาคก็ยังนำเส้นใยแก้วนำแสงมาใช้งาน Keeratichairitnara, P., Prommak, C. (2013) กล่าวถึงสถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM มีส่วนประกอบหลักคือ ส่วนของชั้นไอพี (IP Layer) และชั้นของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (WDM Layer) ในแต่ละชั้นจะมีการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในส่วนของชั้นไอพีประกอบไปด้วยการใช้พลังงานของอุปกรณ์การประมวลผลทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการประมวลผลเพื่อเลือกเส้นทางการขนส่งให้กับทราฟฟิกที่ไหลผ่านเข้าสู่แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) การใช้พลังงานของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (router processor) การใช้พลังงานของเครื่องทรา



สเปกตรัม ซึ่งอยู่ในตำแหน่งระหว่างชั้นไอพีและชั้น WDM และในส่วนของชั้น WDM ประกอบไป ด้วยการใช้พลังงานของอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (Optical Cross Connect : OXC) การใช้ พลังงานของอุปกรณ์รวมสัญญาณทางแสง การใช้พลังงานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงและการใช้ พลังงานของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ และปัจจัยหนึ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานใน เครือข่ายคือ ปริมาณทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน ดังนั้นเราควรพิจารณาปริมาณทราฟฟิกที่มีความ ไม่แน่นอนโดยมีการกำหนดการเลือกใช้เส้นทางในการขนส่ง ทราฟฟิกควบคู่ไปกับการพิจารณาการ ใช้พลังงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในเครือข่ายเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานในเครือข่ายมี ประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่าในหลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจในการศึกษาการ ใช้พลังงานในเครือข่าย ในงานวิจัยของ Poompat Saengudomlert (2014) ได้พิจารณาการเลือกใช้ โครงข่ายเสมือนในเครือข่าย IP over WDM โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานทั้งหมดที่ใช้ใน การรองรับปริมาณทราฟฟิก โดยมีข้อจำกัดในการส่งผ่านทราฟฟิก ซึ่งในงานวิจัยนี้การใช้พลังงาน ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทางที่ไอพีเร้าเตอร์เท่านั้น ซึ่งยังไม่ได้พิจารณาถึงการ ใช้พลังงานของอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ รวมถึงยังไม่ได้มีการพิจารณาในกรณีของความสมดุลของการส่ง ทราฟฟิกในเครือข่ายภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ในงานวิจัยของ Bin Chen, Zheng-Ming Jiang, Teng, R.K.F., Xiao-Hui Lin, MingJun Dai, Hui Wang (2013) แสดงให้เห็นถึงการลดการใช้ พลังงานในการเกิด blocking ในเครือข่าย IP over WDM ในกรณีที่แบนด์วิธของเครือข่ายมีไม่ เพียงพอต่อการให้บริการ โดยมีการนำเสนอวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบการประหยัด พลังงานในเครือข่าย IP over WDM สองวัตถุประสงค์ โดยวัตถุประสงค์แรกคือเพื่อให้ปริมาณการ ส่งผ่านของข้อมูลในเครือข่ายให้ได้มากที่สุดและวัตถุประสงค์ที่สองคือการลดการใช้พลังงานใน เครือข่ายให้น้อยที่สุดภายใต้ปริมาณการส่งผ่านของข้อมูลมากที่สุด แสดงให้เห็นถึงปริมาณการ ส่งผ่านของข้อมูลในเครือข่ายมีความสำคัญซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย แต่ในงานวิจัยนี้ยัง ไม่ได้พิจารณาในกรณีของความสมดุลของการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย ในงานวิจัย ของ Francesco Musumeci, Domenico Siracusa, Giuseppe Rizzelli, Massimo Tornatore, Riccardo Fiandra, Achille Pattavina and Politecnico di Milano (2012) ได้ทำการพิจารณาการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM จากสถาปัตยกรรมที่ต่างกัน โดยวิเคราะห์ถึงการใช้พลังงานในสถานการณ์ที่ต่างกัน ทั้งปริมาณทราฟฟิกและพารามิเตอร์ที่สำคัญบางอย่างซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย ในขณะที่ การศึกษาในงานวิจัยข้างต้นนี้มีความสำคัญและแสดง ผลลัพธ์ที่น่าสนใจแต่ประเด็นสำคัญความ สมดุลของการส่งทราฟฟิกในเครือข่ายภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกไม่ได้รับการพิจารณา ใน งานวิจัยของ Keeratchairitnara, P., Prommak, C. (2012) ได้พิจารณาผลกระทบจากปริมาณทราฟฟิก ที่มีความไม่แน่นอนต่อความสมดุลของการจัดส่งทราฟฟิกภายในเครือข่าย IP over WDM และ

นำเสนอานิยามสูตรทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นที่สามารถกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดและความจุที่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับต่างๆ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงข่ายเสมือนด้วยการสมมูลปริมาณทราฟฟิกซึ่งสามารถกระจาย ทราฟฟิกในปริมาณที่สูงมากในการขนส่งผ่านการเชื่อมโยงทางกายภาพ ซึ่งงานวิจัยนี้มีความสำคัญและแสดงผลลัพธ์ที่น่าสนใจ แต่ประเด็นการใช้พลังงานในเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพยังไม่ถูกนำมาพิจารณา ร่วมด้วย ในงานวิจัยของ Tachun Lin, Zhili Zhou and Thulasiraman, K. (2011) พิจารณาการสร้างทางเดินของแสงโดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์ของความจุให้มากที่สุดสำหรับก่อนและหลังการเกิดความล้มเหลวของการเชื่อมโยงทางกายภาพ โดยมีข้อจำกัดในด้านของความจุบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ งานวิจัยนี้ได้มีความสำคัญและแสดงผลลัพธ์ที่น่าสนใจแต่ยังไม่ได้พิจารณาประเด็นสำคัญในเรื่องความสมดุลของการส่งทราฟฟิกในเครือข่ายภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก รวมถึงการใช้พลังงานในเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM ภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกพบว่า ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่ทำการพิจารณาเกี่ยวกับการใช้พลังงานในเครือข่ายเท่านั้น โดยไม่ได้นำความไม่แน่นอนของทราฟฟิกมาร่วมพิจารณาด้วยหรือบางงานวิจัยได้พิจารณาถึงลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกเพียงอย่างเดียว ซึ่งไม่ได้พิจารณาถึงการใช้พลังงานในเครือข่ายร่วมด้วย ดังนั้นงานวิจัยที่นำเสนอนี้จึงได้มุ่งเน้นการศึกษาและการพัฒนาเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกแบบสมมูลภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกร่วมกับการใช้พลังงานภายในเครือข่ายอย่างเหมาะสม เพื่อให้เกิดความสมดุลของการส่งทราฟฟิกภายในเครือข่ายให้มากที่สุด เพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรเครือข่ายเพิ่มมากขึ้นและเพื่อให้มีการใช้พลังงานภายในเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผนการขนส่งทราฟฟิกเพื่อให้เกิดความสมดุลในเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาเทคนิคและสมการคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนการขนส่งทราฟฟิกเพื่อให้เกิดความสมดุลในเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์และประเมินคุณภาพของการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น

### 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 เครือข่าย IP over WDM เป็นสถาปัตยกรรมเครือข่ายแกนหลักที่มีส่วนประกอบคือ ชั้นไอพีและชั้นของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น
- 1.3.2 เครือข่าย IP over WDM เป็นสถาปัตยกรรมเครือข่ายแกนหลักที่มีส่วนประกอบคือ ชั้นไอพีและชั้นของการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น
- 1.3.3 การใช้พลังงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในเครือข่ายจะมีปริมาณสูงขึ้น ขึ้นอยู่กับปริมาณทราฟฟิกที่ขนส่งในเครือข่าย
- 1.3.4 การใช้พลังงานในชั้น IP layer เกิดจากการใช้พลังงานของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง และเครื่องทรานสปอนเดอร์ ซึ่งอยู่ในตำแหน่งระหว่างชั้นไอพีและชั้น WDM
- 1.3.5 การใช้พลังงานในชั้น WDM layer เกิดจากการใช้พลังงานของอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง อุปกรณ์รวมสัญญาณทางแสง อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงและอุปกรณ์ทวนสัญญาณ

### 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.4.1 เครือข่ายแกนหลักที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นเครือข่ายประเภท IP over WDM
- 1.4.2 ปริมาณทราฟฟิกที่ใช้สำหรับการพิจารณามีลักษณะไม่แน่นอนและมีการกระจายตัวแบบปกติ (normal distribution)
- 1.4.3 ความจุของข่ายเชื่อมโยงและพลังงานที่ใช้ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในเครือข่าย IP over WDM เป็นค่าคงที่

### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาโครงสร้าง หลักการทำงานและสถาปัตยกรรมพื้นฐานของเครือข่าย IP over WDM
- 1.5.2 ศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 1.5.3 ทำการทดลองโปรแกรมจากสมการที่ได้จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและนำมาปรับใช้กับงานวิจัยที่ศึกษา
- 1.5.4 พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สองวัตถุประสงค์สำหรับการวางแผนทราฟฟิกภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM
- 1.5.5 วิเคราะห์และประเมินคุณภาพของการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

## 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

### 1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนทราฟฟิกแบบสมมูลภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายในเครือข่ายแกนหลัก
- 3) ศึกษาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการวางแผนวางแผนทราฟฟิกแบบสมมูลภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
- 4) ศึกษาโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสมการคณิตศาสตร์ในข้อ 3
- 5) พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบเครือข่าย IP over WDM สำหรับการี่พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพพร้อมกับการพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ขนส่งภายในเครือข่าย
- 6) พัฒนาโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสำหรับเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้น
- 7) วิเคราะห์เปรียบเทียบและประเมินคุณภาพของเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้น

### 1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่ายแกนหลัก
- 3) พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบเครือข่าย IP over WDM สำหรับการี่พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพพร้อมกับการพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ขนส่งภายในเครือข่าย
- 4) ใช้โปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสมการคณิตศาสตร์ในข้อ 3
- 5) เปรียบเทียบและวิเคราะห์การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพพร้อมกับการพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ได้จากการออกแบบที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่นๆ

### 1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารโทรคมนาคม อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีสุรนารี 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 IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

#### 1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) เก็บรวบรวมผลการทดลองจากการใช้พลังงานของเครือข่ายภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกและผลการทดลองจากการวางแผนเครือข่าย IP over WDM

#### 1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของการพัฒนาเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกแบบสมดุลภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ร่วมกับการใช้พลังงานภายในเครือข่ายอย่างเหมาะสมภายในเครือข่ายแกนหลัก IP over WDM เพื่อนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานและความสมดุลของทราฟฟิกที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากสมการคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

### 1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.7.1 เป็นแนวทางในการวางแผนทราฟฟิกภายในเครือข่าย IP over WDM ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและพัฒนาเครือข่ายประเภทนี้ได้ในงานที่เกี่ยวข้อง
- 1.7.2 เพื่อให้เครือข่ายแกนหลักเกิดการใช้พลังงานและเกิดความสมดุลของทราฟฟิกที่เหมาะสมที่สุด

### 1.8 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM สำหรับการเลือกใช้เส้นทางที่เหมาะสม เพื่อให้เครือข่ายมีความสมดุลรวมถึงมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการนำเสนอเทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก เพื่อแปลงสมการหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นสมการวัตถุประสงค์เดียว โดยการวางแผนทราฟฟิกเพื่อกำหนดเส้นทางในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM โดยมีการพิจารณาลักษณะความไม่แน่นอน ความแปรปรวนของทราฟฟิก โดยใช้การกำหนดปัญหาการออกแบบโครงข่ายเสมือนด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming : ILP) ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ค่าความไม่สมดุลที่น้อยที่สุดสำหรับทราฟฟิกที่ขนส่งในเครือข่ายร่วมกับการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM ที่น้อยที่สุด โดยในการออกแบบ

นั้นได้คำนึงถึงการเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย และคำนึงถึงข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่ายโดยกำหนดเป็นปัญหาการหาคำตอบที่น้อยที่สุด และยังคำนึงถึงการใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนในระดับต่าง ๆ

## 1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

**บทที่ 1** เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัยและบอกถึงข้อตกลงเบื้องต้นสำหรับการวิจัย

**บทที่ 2** กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

**บทที่ 3** กล่าวถึงการการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

**บทที่ 4** กล่าวถึงการทดลองและการวิเคราะห์ผลการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลของทราฟฟิกภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

**บทที่ 5** กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหา

## บทที่ 2

### ปรัทัศนัวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการพัฒนาเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกลงภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกลงและการใช้พลังงานภายในเครือข่ายไอพีบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing : IP over WDM) นั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาในส่วนของปรัทัศนัวรรณกรรมที่ผ่านมางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และโครงสร้างของเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับเครือข่าย IP over WDM และสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในงานวิจัยนี้ได้ ดังนั้นในบทนี้ได้กล่าวถึงหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้ หัวข้อ 2.1 กล่าวนำ หัวข้อ 2.2 ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อ 2.3 เครือข่าย IP over WDM หัวข้อ 2.4 ความจุ ความเร็วของอินเทอร์เน็ตและโพรโทคอล หัวข้อ 2.5 ทำไมต้องเป็น IP OVER WDM? หัวข้อ 2.6 การใช้พลังงานของเครือข่าย IP over WDM หัวข้อ 2.7 การหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) โดยใช้ Dijkstra's Algorithm หัวข้อ 2.8 การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม หัวข้อ 2.9 ปัญหาการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective optimization) และหัวข้อ 2.10 ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกลง

#### 2.1 กล่าวนำ

เครือข่าย IP over WDM เป็นสถาปัตยกรรมเครือข่ายแกนหลักที่มีส่วนประกอบคือ ชั้นไอพี (IP layer) และชั้นของการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (WDM layer) ซึ่งในการใช้พลังงานสำหรับสถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM นั้นประกอบไปด้วยการใช้พลังงานในส่วน of ชั้นไอพีซึ่งประกอบไปด้วย การใช้พลังงานของอุปกรณ์การประมวลผลทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการประมวลผลเพื่อเลือกเส้นทางการขนส่งให้กับทราฟฟิกลงที่ไหลผ่านเข้าสู่แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิกลง (line card) การใช้พลังงานของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (router processor) การใช้พลังงานของเครื่องทรานสปอนเดอร์ ซึ่งอยู่ในตำแหน่งระหว่างชั้นไอพีและชั้น WDM และการใช้พลังงานในส่วน of ชั้น WDM ประกอบไปด้วยการใช้พลังงานของอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (Optical Cross Connect : OXC) การใช้พลังงานของอุปกรณ์รวมสัญญาณทางแสง การใช้พลังงานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสงและการใช้พลังงานของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ และยังมีอีกหลาย ๆ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในเครือข่ายดังเช่นปริมาณของทราฟฟิกลงที่มีความไม่แน่นอน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผล

ต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย ดังนั้นเราควรพิจารณาปริมาณของทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนควบคู่ไปกับการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในเครือข่ายเพื่อให้มีการวางแผนเครือข่ายที่เหมาะสม

## 2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก รวมถึงการใช้พลังงานภายในเครือข่าย IP over WDM อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาทิศทางปรัญญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างของเครือข่าย IP over WDM ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก รวมถึงการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่างๆภายในเครือข่าย เพื่อสามารถใช้เป็นข้อมูล และใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้ต่อไป ซึ่งจากการศึกษามีปรัญญ่วรรณกรรมที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

### 2.2.1 งานวิจัยของ Poompat Saengudomlert (2014) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเกี่ยวกับการเลือกใช้โครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM โดยขึ้นอยู่กับการใช้พลังงานของเส้นทางเดินของแสง (lightpath)

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่แสดงถึงการพิจารณาการเลือกใช้โครงข่ายเสมือนในเครือข่าย IP over WDM โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการรองรับปริมาณทราฟฟิก โดยที่การใช้พลังงานส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทางที่โอฟิเรทเตอร์โดยที่สมมติว่าไม่มีข้อจำกัดของการใช้ข่ายเชื่อมโยง ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงเทคนิคพื้นฐานสองเทคนิคที่ใช้ในการประมาณค่า คือ เทคนิคการใช้โปรแกรมเชิงเส้นและเทคนิคลากรางจ์ (Lagrangian) ซึ่งนำไปสู่การกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดของทราฟฟิกภายใต้การเชื่อมโยงเสมือน (Logical link)

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้ได้แนะนำการกำหนดวัตถุประสงค์สำหรับการลดการใช้พลังงานเฉพาะที่ตัวอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทางที่โอฟิเรทเตอร์เท่านั้น ซึ่งยังไม่ได้พิจารณาถึงการใช้พลังงานของอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ รวมถึงยังไม่ได้มีการพิจารณาในกรณีของความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

### 2.2.2 งานวิจัยของ Song Yang and Kuipers, F.A. (2014) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบเครือข่ายภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงวิธีการออกแบบเครือข่ายในการรับมือกับความไม่แน่นอนของทราฟฟิก โดยอ้างอิงข้อมูลจากหลายงานวิจัย ดังเช่น การใช้ประโยชน์ของข่ายเชื่อมโยงให้ได้มากที่สุด เป็นการกำหนดเส้นทางทั้งหมดที่ใช้ขนส่งปริมาณทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงภายใต้ข้อจำกัดความจุของข่ายเชื่อมโยง โดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นสำหรับการหาเส้นทางที่สั้น



ที่สุดในการขนส่งปริมาณทราฟฟิก การใช้การแถมเชิงเส้นสำหรับการหาต้นทุนค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขของทราฟฟิกเมตริกซ์ที่อยู่ในรูปของ Polytope การพิจารณาการออกแบบเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขของทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนที่อยู่ในรูปของ polyhedron โดยมีวัตถุประสงค์ในการหาค่าต้นทุนค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดสำหรับการเลือกใช้เส้นทาง โดยความจุของข่ายเชื่อมโยงต้องไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ การพิจารณาสมการความน่าจะเป็นเพื่อพิจารณาปริมาณทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน ซึ่งปริมาณปริมาณทราฟฟิกจะอยู่ในรูปของการกระจายแบบเกาส์เซียน เพื่อที่จะออกแบบโครงข่ายเสมือนที่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนภายในเครือข่าย และกำหนดวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้ความจุของข่ายเชื่อมโยงที่มีปริมาณมากๆ ให้น้อยที่สุด

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวางแผนเครือข่ายภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก มีการออกแบบโครงข่ายหรือมีการเลือกใช้เส้นทางเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากสำหรับในการวางแผนเครือข่ายในอนาคต และยังสามารถนำเทคนิคการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมาใช้เพื่อให้เครือข่ายมีความยืดหยุ่นมากขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้นำเทคนิคการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมาพิจารณา

### 2.2.3 งานวิจัยของ Bin Chen, Zheng-Ming Jiang, Teng, R.K.F., Xiao-Hui Lin, MingJun Dai and Hui Wang, (2013) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในข้อจำกัดของแบนด์วิดท์ในเครือข่าย IP over WDM

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงการลดการใช้พลังงานในการเกิด blocking ในเครือข่าย IP over WDM ในกรณีที่แบนด์วิดท์ของเครือข่ายมีไม่เพียงพอต่อการให้บริการ โดยมีการนำเสนอวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการประหยัดพลังงานในเครือข่าย IP over WDM สองวัตถุประสงค์ โดยวัตถุประสงค์แรกคือเพื่อให้ปริมาณการส่งผ่านของข้อมูลในเครือข่ายให้ได้มากที่สุด และวัตถุประสงค์ที่สองคือการลดการใช้พลังงานในเครือข่ายให้น้อยที่สุดภายใต้ปริมาณการส่งผ่านของข้อมูลที่มากที่สุด

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้มีการใช้วัตถุประสงค์ในการลดการใช้พลังงานในเครือข่ายให้ได้มากที่สุด สังเกตได้ว่าในบทความนี้ได้มีการเปรียบเทียบการใช้วัตถุประสงค์สองวัตถุประสงค์ สามารถช่วยให้ประหยัดพลังงานในเครือข่ายได้มากกว่าการใช้เพียงหนึ่งวัตถุประสงค์ และในบทความนี้ยังไม่ได้มีการพิจารณาในกรณีของความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

**2.2.4 งานวิจัยของ Francesco Musumeci, Domenico Siracusa, Giuseppe Rizzelli, Massimo Tornatore, Riccardo Fiandra, Achille Pattavina and Politecnico di Milano (2012) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM จากสถาปัตยกรรมที่ต่างกันทั้งสี่สถาปัตยกรรม**

ลักษณะงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM จากสถาปัตยกรรมที่ต่างกัน ดังนี้ Basic (B-), Opaque (O-), Transparent (Tp) และ Translucent (Tl) IPoWDM ในกรณี Basic IPoWDM ในแต่ละ โหนดจะประกอบไปด้วยไอพีเราเตอร์มีการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด (point-to-point) ระหว่างข่ายเชื่อมโยงเส้นใยแก้วนำแสงและสัญญาณแสง (optical signals) ในกรณี Opaque IPoWDM ในแต่ละโหนดอุปกรณ์ OXC จะเชื่อมต่อกับไอพีเราเตอร์ ผ่านทางอินเตอร์เฟซ ในกรณี Transparent IPoWDM จะแปลงข้อมูลในสัญญาณแสงไปยังสัญญาณไฟฟ้า (Optical to Electrical : OE) และแปลงข้อมูลในสัญญาณไฟฟ้าไปยังสัญญาณแสง (Electrical to Optical : EO) ผ่านทางเครื่องทรานสปอนเดอร์ และกรณีสุดท้ายในกรณี Translucent IPoWDM คล้าย ๆ กับกรณีของ Transparent IPoWDM แต่ที่โหนดจะมีการติดตั้ง 3-R regenerators ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับอุปกรณ์ OXC

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ถึงการใช้พลังงานในสถานการณ์ที่ต่างกัน ทั้งปริมาณทราฟฟิกและพารามิเตอร์ที่สำคัญบางอย่างซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย ซึ่งพบว่า ในกรณี Transparent IPoWDM มีการใช้ประโยชน์จากการฟื้นฟูสัญญาณ (signal regenerator) โดยตรงที่ชั้นออฟติคัล ซึ่งผลที่ได้นั้นเป็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพได้มากที่สุด ในกรณีนี้ และในบทความนี้ยังไม่ได้มีการพิจารณาในกรณีของความไม่แน่นอนของทราฟฟิกเข้ามาเกี่ยวข้อง

**2.2.5 งานวิจัยของ Keeratichairitnara, P. and Prommak, C. (2012) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM ด้วยการสมดุลปริมาณทราฟฟิกภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก**

ลักษณะงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาผลกระทบจากปริมาณทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนต่อความสมดุลของการจัดส่งทราฟฟิกภายในเครือข่าย IP over WDM และนำเสนอนิยามสูตรทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นที่สามารถกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดและความจุที่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับต่างๆ

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงข่ายเสมือนด้วยการสมมูลปริมาณทราฟฟิก ซึ่งสามารถกระจายทราฟฟิกในปริมาณที่สูงมากในการขนส่งผ่านการเชื่อมโยงทางกายภาพ ซึ่งงานวิจัยนี้มีความสำคัญและแสดงผลลัพธ์ที่น่าสนใจ แต่ประเด็นการใช้พลังงานในเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพยังไม่ถูกนำมาพิจารณาด้วย

#### **2.2.6 งานวิจัยของ Tachun Lin, Zhili Zhou and Thulasiraman, K. (2011) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการกำหนดเส้นทางเดินของแสง (lightpath) เพื่อความยืดหยุ่นของโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM**

ลักษณะงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาการกำหนดเส้นทาง (lightpath) โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์ของความจุให้มากที่สุดสำหรับก่อนและหลังการเกิดความล้มเหลวของการเชื่อมโยงทางกายภาพ

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้ได้มีความสำคัญและแสดงผลลัพธ์ที่น่าสนใจ แต่ประเด็นสำคัญของทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนก็ยังไม่ได้มีการพิจารณา รวมถึงการใช้พลังงานในเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ

#### **2.2.7 งานวิจัยของ Tucker, R.S., Parthiban, R., Baliga, J., Hinton, K., Ayre, R.W.A. and Sorin, W.V., (2009) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอการวิวัฒนาการของเครือข่าย WDM ในด้านของต้นทุนและการใช้พลังงาน**

ลักษณะงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาต้นทุนและการใช้พลังงานในเครือข่าย WDM สำหรับการเพิ่มขนาดความจุของเครือข่าย โดยต้นทุนต่างๆ จะมีการปรับเปลี่ยนอย่างรวดเร็ว ซึ่งในการลดต้นทุนสามารถทำได้โดยการเพิ่มประสิทธิภาพของสถาปัตยกรรมเครือข่าย เช่น มีการใช้ประโยชน์ของระบบขนส่ง Lightwave และอปติคัลเพื่อลดจำนวนการใช้งานของพอร์ตร้าเตอร์ให้ได้มากที่สุด และได้วิเคราะห์ถึงการใช้พลังงานของเครือข่าย ซึ่งในอนาคตมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นมากกว่าครึ่งเมื่อเทียบกับปัจจุบัน

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้ได้มีความสำคัญและแสดงผลลัพธ์ที่น่าสนใจในด้านการใช้พลังงานในเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ประเด็นสำคัญของทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนก็ยังไม่ได้มีการพิจารณา

## 2.3 เครือข่าย IP over WDM

ในสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศได้เริ่มต้นตัวกับเมกะบิตต่อวินาที (Mbps) กิกะบิตต่อวินาที (Gbps), เทราบิตต่อวินาที (Tbps) ฯลฯ ผู้ที่ทำงานในหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีจะเริ่มคุ้นเคยกับเลขชี้กำลังซึ่งเป็นความท้าทายที่สำคัญที่กำลังเกิดขึ้นในวงการซิลิคอน การกำหนดเส้นทาง การเปลี่ยนความถี่วิทยุและการขนส่งสัญญาณ ในขณะนี้อัตราในการส่งผ่านข้อมูลหรือความสามารถในการเข้าถึงฐานข้อมูลได้รับความสนใจเพิ่มเป็นเท่าตัวตามกฎของมัวร์ ในปัจจุบันคลื่นความถี่ 40 ความยาวคลื่นที่ทำงานแต่ละความยาวคลื่นที่อัตราการส่งผ่านการเชื่อมต่อข้อมูลแบบดิจิทัลในระบบเครือข่ายความเร็วสูง (OC-48) ในระบบรุ่นใหม่ที่ถูกนำไปใช้มีความสามารถในการจัดการส่งที่ 10 Gbps จำนวน 160 ช่องสัญญาณ (เช่นที่ความเร็ว 1.6 Tbps) ดังจะเห็นได้จากการสาธิตในสภาพแวดล้อมของห้องปฏิบัติการ ในที่นี้ 160 ช่องสัญญาณจะเท่ากับ 12.8 Tbps ซึ่งมากกว่าอัตราการส่งข้อมูลทั้งหมดของเครือข่ายเสียง ในปัจจุบันอัตราการเพิ่มความจุของเส้นใยแก้วนำแสงเป็นไปได้เป็นอย่างดีและมีปริมาณมากเพียงพอต่อการเติบโตไปในอนาคต

คำถามสำคัญที่เกิดขึ้นคือ อะไรคือสิ่งที่จะส่งผลกระทบต่อความสามารถที่ควรจะมีในโครงสร้างพื้นฐานเครือข่ายในอนาคต เช่น คุณภาพของการให้บริการ การเข้าถึงเครือข่าย ระบบส่งสัญญาณดิจิทัล กฎเกณฑ์การควบคุมการส่งผ่านตามมาตรฐานอินเทอร์เน็ต เครือข่ายแกนหลักและเครือข่ายในเขตเมือง มันเป็นสิ่งสำคัญที่จะมองว่าทำไมการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (WDM) จึงเป็นสิ่งสำคัญมากและ IP over WDM จะยังคงเป็นสิ่งสำคัญหรือไม่หากเหตุผลในอดีตว่าทำไมในปัจจุบันเครือข่ายมีอยู่หลายชั้น วงการนี้จะต้องตรวจสอบว่าจำเป็นต้องมีสิ่งเหล่านี้ในอนาคตหรือไม่ หากกฎเกณฑ์การควบคุมการส่งผ่านตามมาตรฐานอินเทอร์เน็ตถูกสร้างขึ้นตั้งแต่เริ่มต้น ในวันนี้จะมีชั้นทั้งหมดเหล่านั้นหรือไม่? ถ้าไม่วงการนี้จะต้องพิจารณาวิธีการที่จะพัฒนาการสร้างโครงสร้างพื้นฐานนี้และสิ่งที่ท้าทายที่รออยู่ข้างหน้าประเด็นต่าง ๆ เช่น QoS (การรับประกันความน่าเชื่อถือ) เวลาในการจัดหา (หรือการตั้งค่าการเชื่อมต่อทันทีที่เรียกใช้) อัตราการส่งผ่านข้อมูล ค่าใช้จ่ายและปัญหาการจัดการยังต้องได้รับการพิจารณาก่อนที่จะวิสัยทัศน์นี้กลายเป็นความจริง

ก่อนที่จะเจาะลึกมากยิ่งขึ้นในเครือข่าย IP over WDM ก็ควรที่จะทบทวนโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ในตอนนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานถูกสร้างขึ้นด้วยชั้นแบบวงแหวนสามชั้น (เครือข่ายท้องถิ่น ภูมิภาค หรือเขตเมือง) และเครือข่ายแกนหลัก (backbone) วงแหวนแต่ละอันจะเชื่อมต่อกันผ่านอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC) เพื่อให้จุดเชื่อมต่อมีประสิทธิภาพสูงหรือการเพิ่มหรือดึงช่องสัญญาณ โดย ADMs สำหรับจุดเชื่อมต่อในที่มีประสิทธิภาพต่ำ การเข้าถึง

เครือข่ายปกติโดยใช้ช่องทางนอก xDSL, ISDN เส้นใยแก้วนำแสงหรือสายโคแอกเซียลการเชื่อมต่อแบบใยแก้วสัญญาณขึ้นอยู่กับแปลงแสงไปเป็นไฟฟ้าหรือการแปลงไฟฟ้าเป็นแสง เนื่องจากเป็นเพียงการเชื่อมต่อที่มีแสง แต่การประมวลผลทั้งหมดในโนดจะทำในโดเมนไฟฟ้า วงแหวนเขตเมืองและท้องถิ่นส่วนใหญ่ใช้ระบบสื่อสารเชิงแสงประสานเวลา (ลำดับชั้นการส่งสัญญาณดิจิทัลแบบประสานเวลา (SONET / SDH) ในการส่งแบบวงแหวนในเครือข่ายแกนหลักหรือแบบเมฆใช้ระบบสื่อสารเชิงแสงแบบหลายช่องสัญญาณ (DWDM) ที่มีความยาวคลื่นหลากหลายในแต่ละคู่เส้นใย การฟื้นฟูสัญญาณจะทำอยู่ในโดเมนไฟฟ้าทุกครั้งหลังจาก 200-500 กิโลเมตร (ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย) สถาปัตยกรรมที่มีมาตั้งแต่สมัยยุคโทรศัพท์ที่สำคัญที่สุดและการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับช่องสัญญาณเสียงของเครือข่ายทำการแปลงไฟฟ้าเป็นแสงแบบดั้งเดิมที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC) และเครื่องดึงช่องสัญญาณ (ADM) นอกจากนี้ยังทำให้เป็นเรื่องยากสำหรับผู้ประกอบการในการอัปเดตเครือข่ายและใช้เวลานานเกินไปในการจัดหา วงจรผ่านแหวนหลายที่ซึ่งยังคงเป็นกระบวนการที่ต้องดำเนินการด้วยตนเอง

ด้วยเหตุผลเหล่านี้ จึงมีการผลักดันการใช้เครือข่ายแบบตาข่าย (mesh) มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ กับไอพีบนเราเตอร์ออปติคัล (ด้วยการเชื่อมต่อการเชื่อมโยงระบบสื่อสารสัญญาณแสงแบบหลายช่องสัญญาณ DWDM) การตั้งค่าการขยายสัญญาณและการกำหนดเส้นทางที่จะถูกทำในโดเมนแสง โดยไม่ต้องมีการแปลงแบบแสงไปเป็นไฟฟ้าหรือแบบไฟฟ้าเป็นแสง การตั้งค่าการเชื่อมต่อแบบไดนามิกซึ่งอาจครอบคลุมผู้ให้บริการการนำส่ง LSPs จากชั้น IP ทั้งหมด ลงไปจนถึงระดับใยแก้วนำแสงจะสามารถลดเวลาลงถึงมิลลิวินาทีหรือวินาทีจากวันหรือเป็นเดือน ค่าใช้จ่ายจะลดลงโดยการกำหนดการแปลงแสงไปเป็นไฟฟ้าหรือการแปลงไฟฟ้าเป็นแสง สถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตใหม่ในอนาคตดูได้จากในรูปที่ 2.2 คุณลักษณะที่สำคัญของเครือข่ายดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

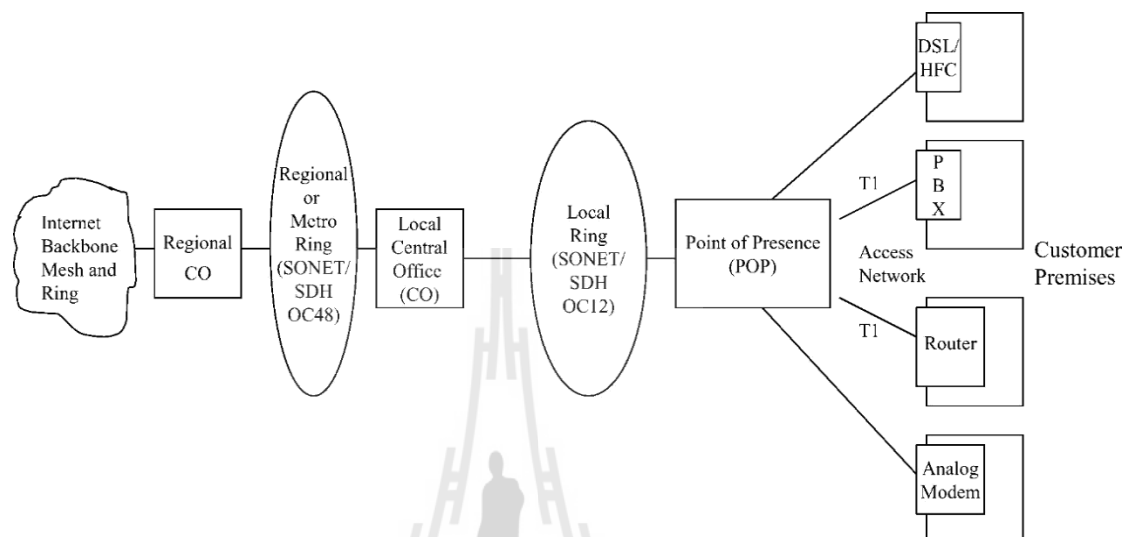
1) ระบบสื่อสารสัญญาณแสงหลายช่องแบบ DWDM จะถูกนำไปใช้งานทั่วโครงสร้างพื้นฐานรวมทั้งในการเข้าถึง เครือข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (PONs) โดยเฉพาะเครือข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟอีเธอร์เน็ตจะให้ทางเลือกที่จะให้บริการลูกค้าจำนวนมากที่มีต้นทุนต่ำด้วยการแบ่งทรัพยากร ความกว้างของแถบคลื่นความถี่ การเข้าถึงเครือข่ายจะเป็นแบบวงแหวนมากขึ้น ไม่ใช่เป็นแบบเดิมจากจุดไปจุด ซึ่งจะช่วยยกระดับความน่าเชื่อถือได้มากขึ้น

2) การดึงช่องสัญญาณแบบ ADMs และอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC) จะถูกแทนที่ด้วยสวิตช์และเราเตอร์ออปติคัลที่ตั้งค่าความยาวคลื่นจากโนดต้นทางถึงโนดปลายทาง เพื่อตอบสนองต่อการส่งสัญญาณของลูกค้า โดยจะจำกัดการแปลงแสงไปเป็นไฟฟ้าหรือการแปลงไฟฟ้าเป็นแสง

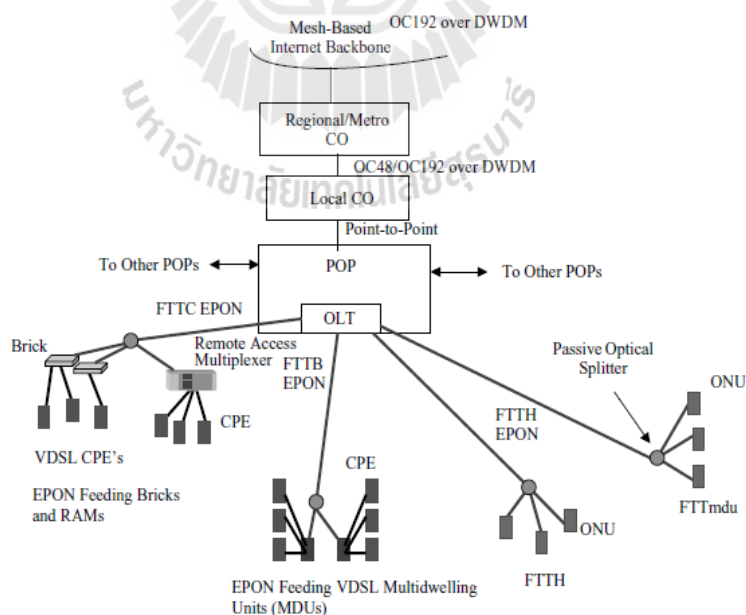
3) เนื่องจากวงแหวนนั้นไม่เพียงพอสำหรับการใช้ในความกว้างของแถบคลื่นความถี่ วงแหวนเหล่านี้จะถูกแทนที่ด้วยเครือข่ายท้องถิ่น เครือข่ายเขตเมืองและเครือข่ายภูมิภาค

4) กิกะบิตอีเธอร์เน็ตจะถูกใช้มากขึ้นในเครือข่ายผู้ให้บริการแทนระบบสื่อสารเชิงแสงประสานเวลา (SONET) และไม่ประสานเวลา

5) ทราฟฟิกส่วนใหญ่จะถูกจัดกลุ่มข้อมูลและความแตกต่างในการจัดการแบนด์วิธของเครือข่าย QoS โดยใช้บริการที่แตกต่าง IP DiffServ และเครือข่าย (MPLS)



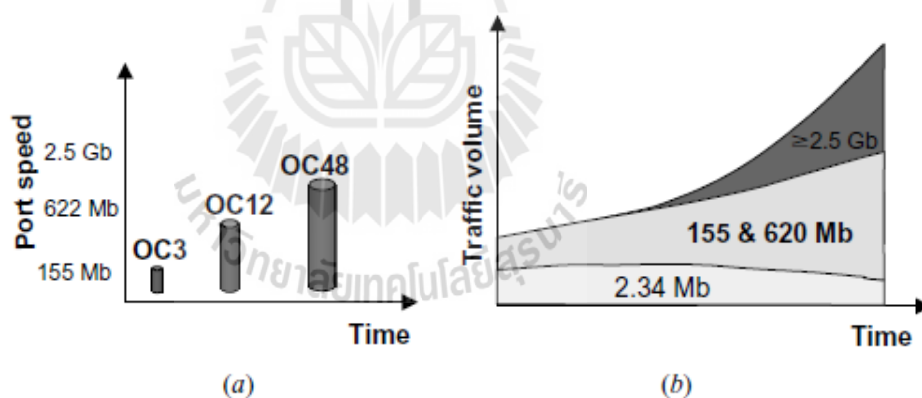
รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานถูกสร้างขึ้นด้วยชั้นของแหวนสามชั้น



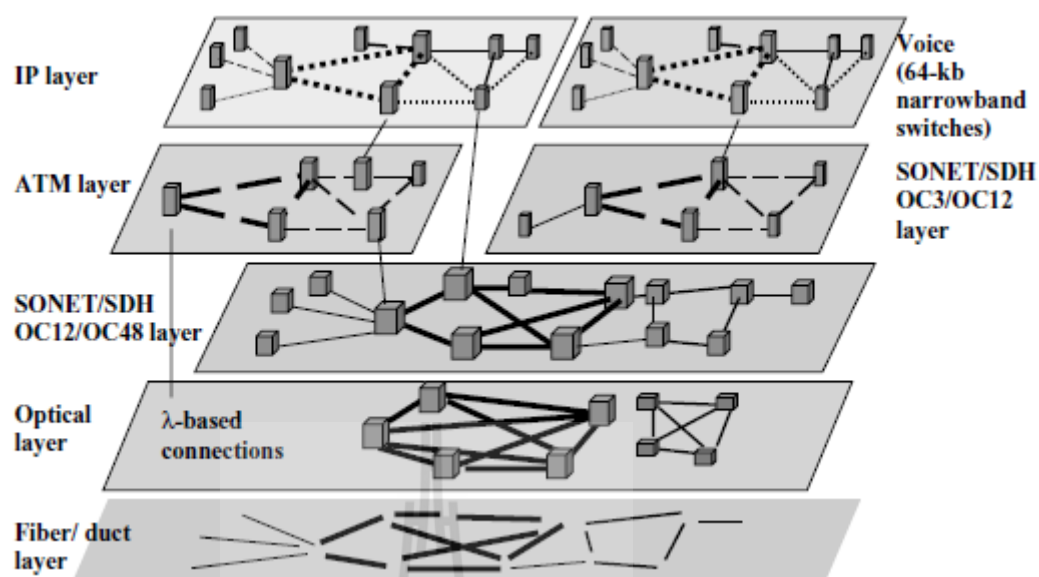
รูปที่ 2.2 สถาปัตยกรรมในอนาคตกับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของระบบสื่อสารสัญญาณแสงหลายช่องแบบ DWDM

## 2.4 ความจุ ความเร็วของอินเทอร์เน็ตเฟส และโปรโตคอล

ก่อนหน้านี้ในวงการโทรคมนาคมมีการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับผู้ใช้งาน มีการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นในเครือข่ายจาก 155 Mbps เป็น 620 Mbps นอกจากนี้ยังมีความที่จะเชื่อมต่อข้อมูลแบบดิจิทัลในระบบเครือข่ายความเร็วสูง (2.5 Gbps) การบริการรูปแบบใหม่อยู่บนพื้นฐานของ IP ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพในการสื่อสารด้วยความเร็วสูงของเครือข่ายในปัจจุบัน ทั้งการถ่ายโอนด้วยระบบ ATM และ ไอพีเรเตอร์จะมีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตเฟสแบบ SONET/SDH โดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องสังการ ระบบ ATM สามารถสับเปลี่ยนเส้นทางโดยใช้ SONET/SDH การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่นเป็นการแก้ปัญหา SONET / SDH ที่ความยาวคลื่น ในเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดการขนส่งควรจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับสมรรถนะของเครือข่าย เมื่อเวลาผ่านไปได้เพิ่มขึ้นจาก OC-3 เป็น OC-12 จนเป็น OC-48 ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ที่การเชื่อมต่อความเร็วสูง และมันจะกลายเป็นปกติที่จะใช้ความยาวคลื่นของใยแก้วนำแสง การคาดการณ์ในตลาดแสดงให้เห็นว่าปริมาณทราฟฟิกสำหรับ DS1/E1 (1.5/2.0 Mbps) กับ DS3/E3 (45/34 Mbps) จะลดลงในอนาคต ในขณะที่การส่งทราฟฟิกผ่านช่องทางความเร็วสูงจะเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต



รูปที่ 2.3 การเพิ่มประสิทธิภาพของความเร็วการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตเฟสและโปรโตคอล (a) ความเร็วอินเทอร์เน็ตเฟสในการให้บริการข้อมูล (b) ปริมาณข้อมูลในระดับความจุที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.4 ชั้นของเครือข่าย

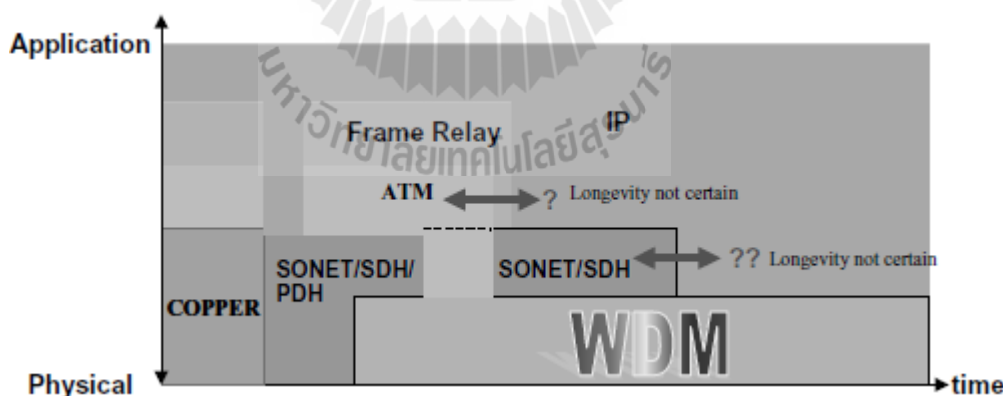
โดยปกติ เครือข่ายประกอบด้วยหลายชั้น โดยเริ่มตั้งแต่ IP ไปยังเอทีเอ็มและไปยัง SONET / SDH ไปยังออปติคอลและไปยังท่อไฟเบอร์ แสดงดังรูปที่ 2.5 ในแต่ละชั้นให้ความยืดหยุ่นของตัวเอง มีข้อได้เปรียบและคุณสมบัติของตัวเอง เป้าหมายมีเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของเครือข่ายที่จะใช้ประโยชน์จากความสามารถของชั้นบางชั้นของเครือข่าย ยกตัวอย่างเช่น มันไม่สมเหตุผลเลยที่จะส่งต่อชั้น IP ที่มีการสัญญาณแน่นจากนิวยอร์กไปซานฟรานซิสโกโดยใช้เราเตอร์สองสามอัน มันน่าจะสมเหตุผลมากกว่าหากจะจัดการทราฟฟิกที่เกิดขึ้นในนิวยอร์กไปยังซานฟรานโกในหนึ่งฮอปในโดเมนแสง วิธีการนี้จะช่วยให้ผลการดำเนินงานสูงขึ้น เพิ่มความโปร่งใสของโปรโตคอลและเพิ่มประสิทธิภาพด้านต้นทุน

ปัจจุบันพบว่าโปรโตคอล มีหลายชั้นมากจนเกินไป ดังนั้น IP จะทำงานบนเฟรมรีเลย์หรือชั้นเอทีเอ็ม SONET / SDH การถือกำเนิดของ WDM เป็นผลให้เกิดโปรโตคอลแบบ IP over ATM over WDM หรือ IP over SDH over WDM ดังรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงวิวัฒนาการของอุตสาหกรรมในวันนี้ จริงๆแล้วจำนวนของชั้นเหล่านี้เกิดขึ้นพร้อมๆกันตั้งแต่ในอดีตและโดยทั่วไปเป็นผลมาจากความต้องการความเข้ากัน ถ้าเราจะแก้ไขชั้นโปรโตคอลตั้งแต่เริ่มต้นในวันนี้ เราอาจพบว่าชั้นโปรโตคอลหลายๆชั้น (เช่นเอทีเอ็ม SONET / SDH) ต่อไปให้เราลองพิจารณาถึงชั้นโปรโตคอลต่างๆ โดยย่อต่อไปนี้



### IP over ATM

ได้รับการพัฒนาในช่วงปลายปี 1980 และมีความชัดเจนอย่างเต็มที่ในปี 2000 คาดว่าโครงสร้างพื้นฐานทั้งหมด จะขึ้นอยู่กับ ATM และจะรองรับประเภทของทราฟฟิกทุกประเภทที่ความต้องการ QoS ที่แตกต่างกัน ขนาดแพ็คเกจคงที่ 53 ไบต์จะช่วยให้สามารถทำการสลับช่องสัญญาณอย่างรวดเร็วและจะทำงานบน SONET / SDH ได้ในขั้นต้นไม่มีความพยายามที่จะรองรับไอพี อย่างไรก็ตามความสำเร็จมหาศาลของอินเทอร์เน็ตได้เปลี่ยนแปลงทั้งหมดและนักพัฒนา ATM เริ่มพัฒนาไอพีผ่านข้อกำหนดการทำงานร่วมกันเอทีเอ็ม แต่น่าเสียดายที่ไอพีและเอทีเอ็มมีความแตกต่างกันมากเนื่องจากทั้งสองได้รับการพัฒนาอย่างเป็นอิสระโดยมีวัตถุประสงค์และวิสัยทัศน์ที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ทั้ง IP และ ATM ใช้โครงสร้างที่อยู่ที่แตกต่างกัน ไอพีอาศัยการจัดเส้นทางแบบการเชื่อมโยงต่อการเชื่อมโยง (hop-by-hop routing) ในขณะที่เอทีเอ็มเป็นโซลูชันแบบจุดต่อจุด สำหรับไอพีแล้ว ความน่าเชื่อถือจะเกิดขึ้นโดยโปรโตคอลที่ซับซ้อนและจะขึ้นอยู่กับกลไกการตรวจสอบอัตราบิต ในขณะที่เอทีเอ็มทำงานเพื่อลดความสูญเสียแพ็คเกจ และไม่มีการสร้างการเชื่อมต่อก่อน ในขณะที่ ATM มีการเชื่อมต่อที่มีทิศทางและสามารถรับประกันได้ ดังนั้นจะเกิดอะไรขึ้นในอนาคต แม้ว่า ATM ไม่สามารถเข้าถึงสถานี แต่ผู้ให้บริการจะดำเนินการต่อเพื่อปรับใช้ ATM ในเครือข่ายแกนหลักและชั้น IP ในฐานะชั้นบริการเอทีเอ็มในเครือข่ายแกนหลัก ในการตั้งค่าการเชื่อมต่อเสมือนจริงตามความต้องการ นอกจากนี้ยังมีความสนใจอย่างมากในการปรับใช้แพ็คเกจ (หรือ IP) over SONET / SDH



รูปที่ 2.5 ชั้นมีหลายชั้นมากเกินไป

### ATM over SONET/SDH

วิสัยทัศน์เดิมของ ATM มีเพื่อให้โครงสร้างแบบการสวิตช์กลุ่มข้อมูล สำหรับส่งข้อมูลและเสียง แต่ทั้งนี้ IP เราเตอร์รุ่นใหม่ ๆ สามารถประมวลผลข้อมูลได้เร็วขึ้นและประมวลผลได้ถูกกว่า คำถามที่เกิดขึ้นคือ หากเป็นเช่นนั้นแล้ว เอทีเอ็มจึงเป็นสิ่งจำเป็นทั้งๆที่มันไม่สามารถเข้าถึงเดสก์ท็อปได้ ใน

ทำนองเดียวกันวิสัยทัศน์ของ SONET / SDH คือการที่โครงสร้างพื้นฐานจะเปลี่ยนวงจรและดังนั้นจึงได้รับการปรับให้เหมาะสมกับชุดความเร็วที่อัตรา 64 กิโลบิตต่อวินาที นี่คือเหตุผลหลักๆสองประการ ประการแรกที่อัตราบิตของเสียงไม่มีการบีบอัดอยู่ที่ 64 กิโลบิตต่อวินาที ประการที่สอง มีการจำกัดความจุข่ายงานบริเวณกว้าง มีการจำกัดแบนด์วิดท์ที่เป็นทรัพยากรที่มีราคาแพง จึงเหมาะสมมากกว่าหากจะแบ่งมันออกมาเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ แต่ทุกวันนี้บิตข้อมูลถูกส่งในแพคเกจมากกว่าในวงจร ข้อมูลแพคเกจได้ให้ประโยชน์อย่างมากเมื่อท่อมมีขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรทางสถิติร่วมกันในระดับสูงขึ้น และมีการใช้ทรัพยากรร่วมกัน ดังนั้นทั้ง ATM และ SONET / SDH จึงไม่ได้บรรลุวิสัยทัศน์ตามที่มุ่งหวัง ATM switch ได้รับการพัฒนาพร้อมกับ SONET / SDH interface เนื่องจากว่าเป็นอินเตอร์เฟซเดียวที่ความเร็วสูงที่มีอยู่ในเวลานั้น แต่บทบาทนี้มีแนวโน้มที่จะถูก WDM interface ช่วงชิงตำแหน่งได้

### **SONET/SDH over WDM**

โดยปกติแล้ว WDM รองรับการเชื่อมต่อข้อมูลแบบดิจิทัลความเร็วสูง OC-48 (2.5 Gbps) หรือ OC-192 (10 Gbps) ในแต่ละความยาวคลื่น และในกรณีที่เครือข่ายไม่มีชั้นอื่น ๆ จึงน่าจะเหมาะสมหากจะเรียกใช้ SONET / SDH over WDM แต่มันเป็นไปได้ที่จะคิดว่าช่องทางเหล่านี้จะได้รับการเติมเต็มด้วยการสวิตช์วงจรของข้อมูลเสียงเท่านั้น (circuit - switched voice) ประการที่หนึ่ง ช่องทางเหล่านี้จะเป็น OC-48c หรือ OC-192c เพื่อหลีกเลี่ยงส่วนหัวขบวนข้อมูล (overhead) ที่ไม่จำเป็นและประการที่สอง เพื่อให้ช่องสัญญาณมีความต่อเนื่องทั้งความเหมาะสมมากขึ้นสำหรับการมัลติเพล็กซ์ข้อมูลแพคเกจ ซึ่ง SONET / SDH และ WDM ได้ถูกการออกแบบเพื่อวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงในช่วงเวลาที่แตกต่างกันมากในประวัติศาสตร์ของโทรคมนาคม จึงน่าจะสรุปว่าโครงสร้างพื้นฐานใหม่จะถูกสร้างขึ้นบน WDM และมันจะสนับสนุนหลายๆฟังก์ชันของ SONET / SDH

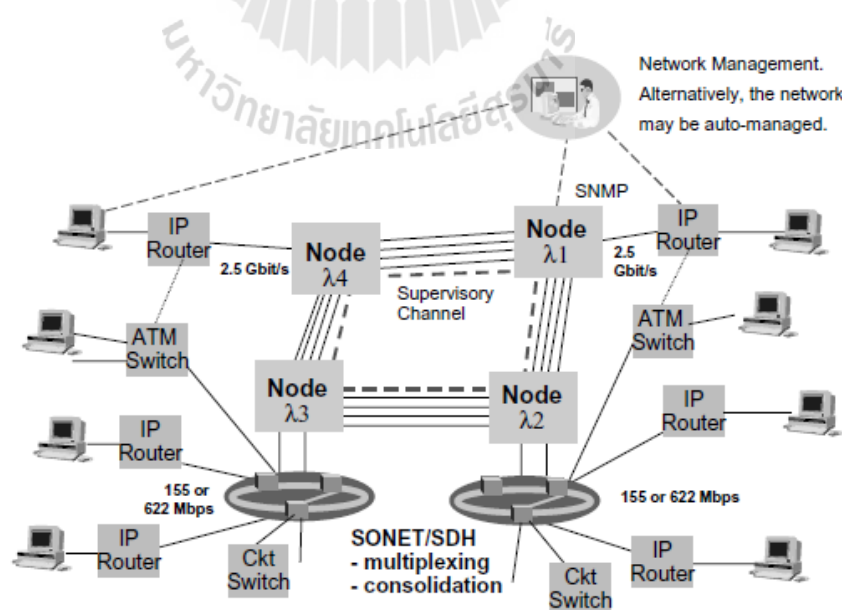
### **IP over WDM**

ในอนาคตชั้น IP over WDM จะขึ้นอยู่กับความสามารถของชั้น IP เพื่อให้คุณภาพของการบริการ นอกจากนี้ก็จะขึ้นอยู่กับว่าเครือข่าย WDM จะอยู่รอดและมีประสิทธิภาพเท่า SONET / SDH หรือไม่ อัตราของการวิวัฒนาการหรือการรับเอาเทคโนโลยีใหม่ๆ ไปใช้ก็ขึ้นอยู่กับว่าอินเตอร์เฟซจะมีราคาถูกพอสำหรับ IP over WDM หรือไม่ซึ่งราคาถูกเป็นการดึงดูดในเชิงพาณิชย์ ATM over WDM ในฐานะที่เป็นเครือข่ายแกนหลัก ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของส่วนหัวขบวนข้อมูล และการนำ ATM ไปใช้งาน ซึ่งแทบจะไม่เกิดขึ้นเนื่องจากความสำเร็จของอีเธอร์เน็ตและเทคโนโลยี IP ไปยังเดสก์ท็อป

## 2.5 ทำไมต้องเป็น IP OVER WDM?

WDM เกิดขึ้นเพราะเส้นใยอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม WDM ให้แบนด์วิดท์จำนวนมากและ ชั้นของ IP เป็นชั้นที่สร้างรายได้ ในขณะที่ WDM เป็นชั้นลดค่าใช้จ่ายที่ทำให้กำลังการผลิต ATM และ SONET / SDH ไม่เพิ่มมูลค่ามากสำหรับการส่งข้อมูลเพราะ SONET / SDH ได้ถูกออกแบบมาเพื่อมีแบนด์วิดท์พื้นฐานเท่ากับ 64 กิโลบิตต่อวินาที ค่าของ ATM และ SONET / SDH ยังจะลดลงเพราะ IP อาจจะส่งมอบคุณภาพของการบริการ WDM จะสนับสนุนคุณสมบัติที่หลากหลายของ SONET / SDH และโน้ตจะสามารถประมวลผลข้อมูล สามารถกล่าวได้ว่าเราต้องตั้งข้อสังเกตว่า ATM, SONET / SDH และ WDM ยังคงได้รับการใช้งานในแกนอินเทอร์เน็ตและเครือข่ายเขตเมือง

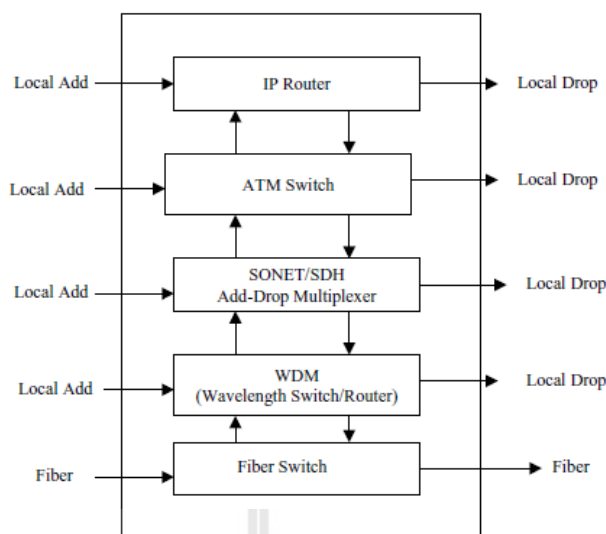
คำถามไม่ได้อยู่ที่ว่า IP over WDM เป็นวิธีการแก้ปัญหาในระยะยาวหรือไม่ แต่คำถามอยู่ที่ว่ามันจะใช้เวลานานเท่าไรเพื่อรองรับการใช้งานขนาดใหญ่ แนวโน้มที่เกี่ยวข้องคือ generalized multiprotocol label switching (GMPLS) ซึ่งเป็นตัวควบคุมร่วมกันและการส่งสัญญาณ โปรโตคอลเพื่อดูแลการสวิตช์และการกำหนดเส้นทางของใยแก้วนำแสง ความยาวคลื่นและแพ็คเกจ ในขณะที่วิวัฒนาการนี้ได้เกิดขึ้น SONET / SDH และไอพีทราฟฟิคจะอยู่ร่วมกันในเครือข่ายแกนหลักเชิงแสง แสดงดังรูปที่ 2.6 SDH traffic หรือ SONET traffic อาจจะมัลติเพล็กซ์ในเครือข่ายเชิงแสงในแต่ละความยาวคลื่น ดังนั้นความยาวคลื่นที่สามารถเพิ่มหรือปรับตัวลดลงในโน้ตเชิงแสง ในทำนองเดียวกันไอพีเราเตอร์กับการเชื่อมต่อที่ WDM อาจจะมีการเชื่อมต่อโดยตรงกับสวิตช์ออปติคัลหรือเราเตอร์ออปติคัลในเครือข่ายแกนหลัก



รูปที่ 2.6 การอยู่ร่วมกันของ SONET / SDH และ IP traffic ในชั้นออปติคัล

ในทางทฤษฎีก็เป็นไปได้มากทีเดียวที่จะสร้างโนดเครือข่ายที่จะสลับในชั้นที่แตกต่างกันของโปรโตคอลสแต็ค ยกตัวอย่างเช่น ชั้นที่ต่ำสุดอาจมีการเชื่อมต่อแบบสลับ ในชั้นที่สูงขึ้นก็จะเป็นไปได้ที่จะเชื่อมต่อแบบสลับความยาวคลื่นจากเส้นใยที่เข้ามาอย่างใดอย่างหนึ่งไปยังขาออก ในชั้นที่สูงขึ้นอย่างใดอย่างหนึ่งจะทำ ATM สลับกับการเชื่อมต่อ SONET / SDH บางส่วนของความยาวคลื่นที่สามารถรองรับทราฟฟิก SONET / SDH ซึ่งจะมีชั้น ATM ในการโหลดจ่าย ถัดขึ้นมาอีก อาจมีสวิตช์ IP ชนิดของแพลตฟอร์มนี้สามารถสลับที่หลายชั้นของโปรโตคอลสแต็คที่อาจจะถูกสร้างขึ้นดังรูปที่ 2.7

IP over WDM เกี่ยวข้องกับปัญหาการรวมไอพีโปรโตคอลชั้นสูง ตัวอย่างเช่น ความท้าทายหนึ่งคือหาเทคนิคในการทำเส้นทางความยาวคลื่นและการแบ่งความยาวคลื่นเพื่อสร้างเครือข่ายแกนหลัก โดยเป็นเทคนิคที่จะใช้ในการสร้างเส้นทางเดินของแสง (lightpath) วิธีการนี้อาจต้องมีวิธีการวัดผลที่เกี่ยวข้องกับโปรโตคอลการจัดสรรเส้นทาง (OSPF) ข้อพิจารณาอื่นคือ การกำหนดและการจัดเส้นทางเดินทางของแสง กล่าวคือ สามารถตัดผ่านตามเส้นทางเดินของแสงได้หรือไม่ ความน่าเชื่อถือของเครือข่าย ยังเป็นปัญหาสำคัญสำหรับเครือข่าย WDM ถ้า SDH/SONET จะถูกแทนที่ด้วย WDM ต้องทำให้เครือข่ายมีความน่าเชื่อถือ อีกปัญหาคือวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณ SONET/SDH สามารถใช้เพื่อการเข้าถึงช่องสัญญาณ แต่เป้าหมายโดยรวมคือ การลดอัตราการแปลงสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแสงและการแปลงสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งนำไปสู่ปัญหาของการตั้งโครงสร้างชั้น WDM ขอบเขตของความโปร่งใสของออปติคัลยังคงไม่ชัดเจน นั่นคือ ขอบเขตหนึ่งที่ต้องทำคือ การแปลงสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือการแปลงสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแสงขึ้นอยู่กับจำนวนปริมาณทราฟฟิกและความสามารถในการรองรับปริมาณทราฟฟิกให้ได้มากที่สุด สิ่งหนึ่งที่ชัดเจนคือ การแปลงสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าและการฟื้นฟูสัญญาณหรือการขยายสัญญาณเนื่องจากการสูญเสียพลังงาน ซึ่งจะทำให้เพิ่มต้นทุนเครือข่ายอย่างมากและจะทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานลดลง



รูป 2.7 โหนดเครือข่ายหลายชั้น

## 2.6 การใช้พลังงานของเครือข่าย IP over WDM

จากงานวิจัยของ Yunlei Lui, Gangxiang Shen, and Weidong Shao (2013) แสดงถึงการใช้นำพลังงานของอุปกรณ์ภายในเครือข่าย ซึ่งองค์ประกอบของการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกข้อมูลในสถาปัตยกรรมเครือข่าย IP over WDM นั้นมีการใช้พลังงานอยู่สองส่วนที่สำคัญ ได้แก่

ชั้นไอพี (IP Layer) ประกอบไปด้วยการใช้พลังงานของอุปกรณ์การประมวลผลทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการประมวลผลเพื่อเลือกเส้นทางการขนส่งให้กับทราฟฟิกที่ไหลผ่านเข้าสู่แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) การใช้พลังงานของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (router processor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณหาเส้นทางการขนส่งทราฟฟิก การใช้พลังงานของเครื่องทรานสปอนเดอร์ ใช้สำหรับการแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณแสง เพื่อขนส่งทราฟฟิกข้อมูลนี้ต่อไปยังอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง ซึ่งอยู่ในตำแหน่งระหว่างชั้นไอพีและชั้น WDM

ชั้นเชิงแสง (WDM Layer) ประกอบไปด้วยการใช้พลังงานของอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (Optical Cross Connect : OXC) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนเส้นทางเดินของแสงในเครือข่ายเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber optical network) เพื่อให้ข้อมูลเดินทางไปยังปลายทางที่ต้องการได้การใช้พลังงานของอุปกรณ์รวมสัญญาณทางแสง (Optical multiplexer) เป็นอุปกรณ์แสงที่ทำหน้าที่รวมสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันแล้วป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงเส้นเดียว การใช้พลังงานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA) เนื่องจากสัญญาณที่เดินทางใน

ระหว่างเส้นทางการขนส่งจะมีการลดทอนสัญญาณเกิดขึ้น จึงต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณพร้อมกันให้มีขนาดความเข้มแสงมากพอที่จะเดินทางต่อไปไกล ๆ ได้ นอกจากการขยายสัญญาณระหว่างเส้นทางการเชื่อมโยงแล้วยังมีการขยายสัญญาณเมื่อทรานซิมิเตอร์มีการขนส่งออกจากโหนดต้นทางและมีการขยายสัญญาณเมื่อสัญญาณเดินทางไปถึงโหนดปลายทางอีกด้วยและการใช้พลังงานของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerators) เป็นการทวนสัญญาณในชั้น WDM ซึ่งทำหน้าที่ปรับสัญญาณพัลส์แสงที่บานออก เมื่อเดินทางในสายส่งเส้นใยแก้วนำแสง โดยที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออกให้มีขนาดคงที่ตลอดการเดินทางอยู่เสมอซึ่งการใช้ตัวทวนสัญญาณจะเกิดขึ้นระหว่างเส้นทางการเชื่อมโยงของโหนดต้นทาง-ปลายทาง

## 2.7 การหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) โดยใช้ Dijkstra's Algorithm

Dijkstra's algorithm ถูกคิดค้นขึ้นโดยนักวิทยาการคอมพิวเตอร์ชาวดัตช์ชื่อว่า แอดส์เกอร์ ไดค์สตรา (Edsger Dijkstra) ในปี 1959 เพื่อแก้ไขปัญหาการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดจากจุดหนึ่งใด ๆ สำหรับกราฟที่มีความยาวของเส้นเชื่อมไม่เป็นลบ สำหรับขั้นตอนวิธี Dijkstra's Algorithm นี้จะหาระยะทางสั้นที่สุดจากจุดหนึ่งไปยังจุดใด ๆ ในกราฟโดยจะหาเส้นทางที่สั้นที่สุดไปที่ละจุดยอดเรื่อย ๆ จนครบตามที่ต้องการ

### ขั้นตอนวิธีการทำงานของ Dijkstra's algorithm

กำหนด ให้จุด จุดหนึ่งภายในกราฟเป็นจุดเริ่มต้น (initial node) และกำหนดให้ระยะทางของจุด X (distance of node X) หมายถึงระยะทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุด X ใด โดย Dijkstra's algorithm จะกำหนดค่าระยะทางเริ่มต้นไว้บางจุดและจะเพิ่มค่าไปที่ละขั้นตอน

- 1) กำหนดให้ทุกจุดมีค่าระยะทางตามเส้นเชื่อม โดยให้จุดเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์และจุดอื่น ๆ มีค่าเป็นอนันต์
- 2) ทำเครื่องหมายทุกจุด ยกเว้นจุดเริ่มต้นว่ายังไม่ไปเยือน (unvisited) ตั้งให้จุดเริ่มต้นเป็นจุดปัจจุบัน สร้างเซตของจุดที่ยังไม่ไปเยือนขึ้นมาเซตหนึ่งซึ่งประกอบด้วยจุดทุกจุด ยกเว้นจุดเริ่มต้น
- 3) จาก จุดปัจจุบัน พิจารณาจุดข้างเคียงตามเส้นเชื่อมทุกจุดที่ยังไม่ไปเยือน และคำนวณระยะทางต่อเนื่องของเส้นเชื่อม ตัวอย่างเช่น ถ้าจุดปัจจุบันคือ A มีระยะทางของจุดเป็น 6 และเส้นเชื่อมที่ต่อจาก A ไปยังจุดข้างเคียง B มีระยะทางเป็น 2 ดังนั้นระยะทางของจุด B (โดยผ่าน A) จึงเท่ากับ  $6+2=8$  เป็นต้น ถ้าระยะทางที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่าระยะทางที่บันทึกอยู่ของจุดนั้น ให้

เขียนทับค่าระยะทางของจุดดังกล่าว แม้ว่าจุดข้างเคียงได้ถูกพิจารณาแล้ว แต่ก็ยังไม่ทำเครื่องหมายว่าไปเยือนแล้ว (visited) ในขั้นตอนนี้ จุดข้างเคียงจะยังคงอยู่ในเซตของจุดที่ยังไม่ไปเยือนเช่นเดิม

4) เมื่อพิจารณาจุดข้างเคียงจากจุดปัจจุบันครบทุกจุดแล้ว ทำเครื่องหมายที่จุดปัจจุบันว่าไปเยือนแล้ว (visited) และนำออกจากเซตของจุดที่ยังไม่ไปเยือน โดยจุดที่ไปเยือนแล้วนี้จะไม่ถูกนำมาตรวจสอบอีก ค่าระยะทางที่บันทึกอยู่จะสิ้นสุดและมีค่าน้อยที่สุด

5) จุดปัจจุบันตัวถัดไปที่ถูกเลือกจะเป็นจุดที่มีค่าระยะทางน้อยสุดในเซตของจุดที่ยังไม่ไปเยือน

6) ถ้า เซตของจุดที่ยังไม่ไปเยือนว่างแล้วให้หยุดการทำงาน ขั้นตอนวิธีเสร็จสิ้น แต่ถ้าหากไม่ใช่ให้เลือกจุดที่ยังไม่ไปเยือนที่มีค่าระยะทางน้อยสุดเป็นจุดปัจจุบันแล้ววนกลับไปทำขั้นตอนที่ 3

## 2.8 การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ อย่างกว้างขวางที่สุดอย่างหนึ่ง คือ การโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) เพื่อใช้ในการออกแบบปัญหาเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) ของฟังก์ชันเป้าหมายเชิงเส้น (linear objective function) ที่สอดคล้องกับข้อจำกัดเชิงเส้นต่าง ๆ (linear constraints) จอร์จ บี ดานซิก (George B. Dantzig) นับว่าเป็นบิดาของการโปรแกรมเชิงเส้น เนื่องจากเป็นผู้ริเริ่มในการสร้างรูปแบบทั่วไปของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น และพัฒนาวิธีการอย่างมีระบบในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นซึ่งมีการเริ่มนำมาใช้งานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2490 เป็นต้นมา จนถึงทุกวันนี้วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดดังกล่าวยังคงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยใช้อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ (simplex method) ในการคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งปัจจุบันได้มีการใช้แบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นอย่างกว้างขวาง และโปรแกรมสำเร็จรูปก็มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเช่นเดียวกันทั้งในทางธุรกิจและอุตสาหกรรม รูปแบบทั่วไปของการโปรแกรมเชิงเส้นนั้น เป็นรูปแบบที่สามารถปรับใช้กับปัญหาต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เนื่องจากฟังก์ชันเป้าหมาย อาจอยู่ในรูปกำไร ค่าใช้จ่าย จำนวนผลผลิตที่มากที่สุด เป็นต้น ส่วนข้อจำกัดอาจอยู่ในรูปของข้อจำกัดของทรัพยากรที่มีอยู่ ข้อจำกัดทางการตลาด ข้อจำกัดด้านคุณภาพ เป็นต้น จากหนังสือการโปรแกรมเชิงเส้น (ประกอบ จิรคติ 2535) ได้กล่าวถึง ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงเส้น ดังนี้

1) ปัญหาทางด้านการผลิต (product mix problem) เป็นการพิจารณาปริมาณสินค้าที่จะทำการผลิต เพื่อให้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เช่น เครื่องจักร วัตถุดิบ แรงงาน ให้เป็นไปอย่างเหมาะสม เพื่อที่จะให้ได้ผลตอบแทนสูงสุด

2) ปัญหาการผสมสาร (blending problem) เป็นการพิจารณาหาปริมาณสารหรือวัตถุดิบชนิดต่างๆที่จะนำมาผสมกันหรือนำมาใช้ในการผลิตสินค้าประเภทต่างๆตามคุณสมบัติที่ได้กำหนดไว้ เพื่อที่จะได้มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด

3) ปัญหาการขนส่ง (transportation problem) เป็นการพิจารณาหาปริมาณสินค้าที่จะทำการขนส่งจากแหล่งผลิต ไปยังผู้บริโภค หรือปลายทางเพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่ำที่สุด หรือส่งถึงปลายทางได้เร็วที่สุด

4) ปัญหาการมอบหมายงาน (assignment problem) เป็นการพิจารณาการมอบหมายงานที่จะต้องทำให้กับบุคลากรหรือเครื่องจักร เพื่อให้งานที่ได้รับการมอบหมายแล้วเสร็จในเวลาเร็วที่สุด หรือเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

5) ปัญหาการลงทุน (investment project selection) เป็นการพิจารณาจัดสรรเงินลงทุนในการลงทุนต่างๆ เพื่อให้ได้รับผลตอบแทนสูงสุด

6) ปัญหาการเลือกสื่อโฆษณา (media selection) เป็นการพิจารณาเลือกสื่อโฆษณาชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ข้อมูลหรือข่าวสารที่ต้องการเผยแพร่ออกสู่เป้าหมายเป็นจำนวนมากที่สุด หรือเสียค่าใช้จ่ายในการโฆษณาน้อยที่สุด เป็นต้น

7) ปัญหาการตัดกระด้าย (trim loss problem) เป็นการพิจารณารูปแบบหรือวิธีการตัดกระด้าย (หรือสินค้าอื่นๆที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เช่น การตัดผ้า การตัดแผ่นเหล็ก) เพื่อที่จะหารูปแบบการตัดกระด้ายขนาดมาตรฐานที่มีอยู่ออกเป็นขนาดและปริมาณต่างๆ ตามความต้องการ เพื่อที่จะให้มีเศษ (ส่วนที่ใช้ประโยชน์ต่อไปไม่ได้) น้อยที่สุด

8) ปัญหาทางด้านการทหาร อาจนำเอาโปรแกรมเชิงเส้นมาใช้ในการพิจารณาวางแผนการส่งกำลังบำรุง การเลือกกำหนดจำนวนอาวุธยุทธโศปกรณ์ การกำหนดยุทธศาสตร์ เป็นต้น

### 2.8.1 ข้อสมมุติฐานสำคัญในการโปรแกรมเชิงเส้น ได้แก่

1) ความเป็นสัดส่วน (proportionality) คือ ปริมาณทรัพยากรที่ใช้ในการผลิตสินค้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนสินค้าที่ทำการผลิต เช่น ในการผลิตสินค้าชนิดหนึ่ง จะต้องใช้แรงงานในการผลิต 6 ชั่วโมงต่อหน่วย ดังนั้นหากทำการผลิตสินค้าชนิดนี้ 10 ชิ้น ก็จะต้องใช้แรงงานในการผลิตทั้งสิ้น 60 ชั่วโมง

2) การรวมกันได้ (additivity) หมายความว่า ปริมาณรวมของผลกำไรจะมีค่าเท่ากับผลรวมของกำไรของสินค้าแต่ละชนิด เช่น สินค้าชนิดที่หนึ่งมีกำไรเท่ากับ 10 บาทต่อหน่วย สินค้า



ชนิดที่สองมีกำไรเท่ากับ 15 บาทต่อหน่วย หากขายสินค้าชนิดที่หนึ่งได้เพียงชนิดเดียวจำนวน 10 ชิ้น จะได้กำไร 100 บาท ( $10 \times 10$ ) เป็นต้น

3) การแบ่งได้ (divisibility) หมายความว่า ค่าของตัวแปรตัดสินใจที่มีอยู่ในปัญหาเมื่อหาคำตอบออกมาแล้ว จะมีค่าใด ๆ ก็ได้ เช่น อาจเป็นเลขจำนวนเต็ม เศษส่วน หรือทศนิยม ในกรณีที่คำตอบที่ออกมาเป็นเลขไบนารี คือ มีค่าที่เป็นไปได้สองค่า ได้แก่ ศูนย์กับหนึ่งก็จะต้องใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

4) การทราบค่า (deterministic) หมายความว่า เราจะทราบค่าต่าง ๆ ในปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นทุกค่า ยกเว้นค่าของตัวแปรตัดสินใจ เช่น ในการหาปริมาณการผลิตสินค้า เพื่อให้ได้กำไรสูงสุดนั้น จะต้องทราบว่า สินค้าที่ผลิตแต่ละชนิดมีกำไรต่อหน่วยเท่าไร ใช้ทรัพยากรใดบ้างในการผลิต มีการใช้ทรัพยากรแต่ละชนิดในการผลิตสินค้าต่อหน่วยเท่าไร เป็นต้น

## 2.8.2 รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้น

รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้นมีสองลักษณะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่พิจารณานั้นเป็นปัญหาการหาค่าสูงสุด (maximization) หรือเป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุด (minimization) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.3) ดังนี้

วัตถุประสงค์ หาค่าสูงสุดของ หรือหาค่าที่ต่ำที่สุด

$$Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad (2.1)$$

ภายใต้ข้อจำกัด

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

...

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \quad (2.2)$$

และ

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \geq 0 \quad (2.3)$$

โดยที่

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

$c_j$  คือ ผลตอบแทน (profit) ที่ได้จากการตัดสินใจทำกิจกรรมที่  $j$  ต่อหนึ่งหน่วย เช่น ในกรณี  
ของการผลิตสินค้าจำนวน  $c_j$  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 ว่ามีค่าเท่ากับเท่าไรจึงจะทำให้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าสูงที่สุด หรือต่ำที่สุดโดยที่ตัวแปร  
ตัดสินใจเหล่านี้จะต้องสอดคล้องกับข้อจำกัดในการใช้ทรัพยากรทั้ง  $m$  ข้อจำกัด คือใช้ทรัพยากรไม่  
เกินปริมาณทรัพยากรที่มีอยู่ และต้องมีค่ามากกว่า และไม่เป็นจำนวนลบ (non-negative) สำหรับค่า  
 $a_{ij}, b_i, c_j$  นั้นจะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่าอยู่แล้ว

### 2.8.3 ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นมาตรฐาน

จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ สามส่วน ดังนี้

1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  
ต้นทุน กำไร เพื่อต้องการให้ได้มาซึ่งเป้าหมายที่ทำให้เกิดค่าสูงที่สุด หรือค่าต่ำที่สุด ดังสมการที่ (2.1)

2) สมการข้อจำกัดของปัญหา หรือ เงื่อนไข (constraints) คือ ข้อจำกัดของปัญหาในด้าน  
ทรัพยากร หรือปัจจัยต่าง ๆ โดยแต่ละเงื่อนไขจะมีความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้น (linear  
equation) หรือ อสมการเชิงเส้น (linear inequality) ดังสมการที่ (2.2)

3) ตัวแปรตัดสินใจ เป็นตัวแปรที่ใส่เข้าไปในระบบ และต้องการหาคำตอบ ดังสมการที่  
(2.3)

### 2.8.4 คุณสมบัติของรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้น

1) สมการของตัวแปรตัดสินใจต้องเป็นสมการเชิงเส้นโดยที่ตัวแปรทุกตัวจะต้องมีกำลัง  
เป็น 1 เท่านั้น นอกจากนี้ต้องเขียนอยู่ในรูปแบบของการบวก การลบกันของตัวแปรต่าง ๆ  
ตัวอย่างเช่น  $3x_1 + 5x_2$  เป็นสมการเชิงเส้น เพราะตัวแปรมีเลขชี้กำลังเป็น 1 และ ตัวแปรทุกตัวมีค่าเป็น  
จำนวนเต็ม

2) สมการวัตถุประสงค์ ต้องเป็นการระบุความต้องการหาค่าสูงสุด หรือค่าต่ำสุด โดยจะต้องแสดงถึงจุดประสงค์ในการตัดสินใจ เช่น ลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนให้น้อยที่สุด

3) สมการเงื่อนไข ต้องเป็นสมการหรืออสมการเชิงเส้นที่อยู่ในรูปน้อยกว่าเท่ากับ ( $\leq$ ) มากกว่าเท่ากับ ( $\geq$ ) หรือเท่ากับ ( $=$ ) เท่านั้น โดยที่ค่าของตัวแปรตัดสินใจของทุกเทอมในสมการเงื่อนไข จะต้องมีหน่วยเดียวกัน

4) ข้อจำกัดของสัญลักษณ์ (sign restrictions) ถ้าต้องการกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นบวกจะกำหนดข้อจำกัดของสัญลักษณ์ได้ เช่น  $x_1 \geq 0$  แต่หากว่า ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบหรือมีค่าเป็นศูนย์ จะเรียกว่า unrestricted in sign (urs)

### 2.8.5 การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหา

ในการสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น จะไม่สามารถกำหนดเป็นกฎเกณฑ์ตายตัวได้ ทั้งนี้เพราะปัญหาแต่ละปัญหานั้นมีลักษณะที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม สามารถสรุปเป็นขั้นตอนทั่วไป ได้ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** การให้นิยามตัวแปรตัดสินใจ ( $x$ ) ในแต่ละปัญหานั้นจะมีการนิยามตัวแปรตัดสินใจที่แตกต่างกันไปตามลักษณะเฉพาะของปัญหาต่าง ๆ เช่น ในการพิจารณาว่าจะเลือกปลูกผักชนิดใดบ้าง จำนวนกี่หน่วย อาจให้  $x_1$  เป็นตัวแปรตัดสินใจ โดยหมายถึง จำนวนหน่วยของผักชนิดที่ 1 ที่จะปลูก ในการพิจารณาว่าต้องใช้เหล็กชนิดใดบ้าง เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามต้องการ อาจให้  $x_i$  แทนค่าตัวแปรตัดสินใจ โดยหมายถึงการเลือกใช้เหล็กชนิดที่  $i$  ที่จะใช้ในการสร้างชิ้นงานตามต้องการ ซึ่งในกรณีนี้ตัวแปรตัดสินใจจะเป็นตัวแปรที่มีมิติเดียว แต่บางครั้งในการออกแบบปัญหานั้นอาจใช้ตัวแปรตัดสินใจที่มากกว่าหนึ่งมิติ เช่น  $x_{ij}$  หมายถึง เหล็กชนิด  $i$  ที่จะเลือกใช้ในปีที่  $j$  เป็นต้น

**ขั้นตอนที่ 2** การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ( $Z$ ) หลังจากที่ได้กำหนดนิยามตัวแปรตัดสินใจแล้ว จะต้องทำการเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในเทอมของตัวแปรตัดสินใจตามที่กำหนดไว้ พร้อมทั้งระบุให้ชัดเจนว่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นต้องการหาค่าที่สูงที่สุด หรือค่าที่ต่ำที่สุด

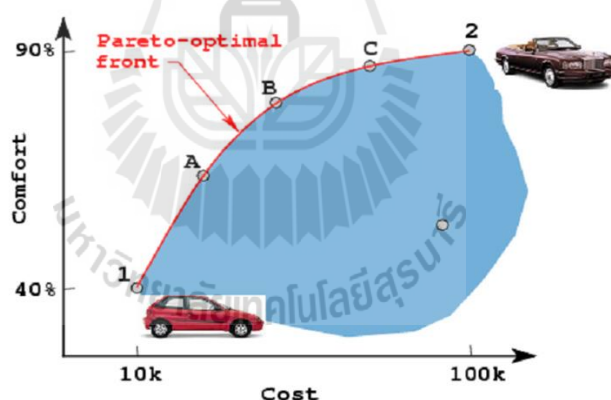
**ขั้นตอนที่ 3** การกำหนดเงื่อนไข หรือข้อจำกัดของปัญหา คือการเขียนข้อจำกัดของปัญหาให้อยู่ในเทอมของตัวแปรตัดสินใจ เช่น ข้อจำกัดเกี่ยวกับทรัพยากรที่มีอยู่ หรือ ข้อจำกัดของสิ่งที่พิจารณา เป็นต้น

**ขั้นตอนที่ 4** การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้น หลังจากที่ได้ออกแบบส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นแล้ว ขั้นตอนนี้จะเป็นการรวบรวมฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และข้อจำกัด ต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน

**ขั้นตอนที่ 5** การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เมื่อได้ทำการสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นแล้ว ก็จะต้องทำการตรวจสอบแบบจำลอง ค่าพารามิเตอร์ ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดไว้นั้น ถูกต้องแล้วหรือไม่

## 2.9 ปัญหาการทำให้ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective optimization)

หลายปัญหาในโลกแห่งความจริงไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุตสาหกรรมหรือวิชาการนั้นจะเป็นปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ และแต่ละวัตถุประสงค์มักจะมีความขัดแย้งกันอยู่ภายใต้เงื่อนไขเฉพาะที่ต้องการคำตอบหลายคำตอบแต่ละคำตอบอาจจะเป็นคำตอบที่เป็นคู่แข่งกัน ซึ่งรูปแบบคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหานั้น จะมีลักษณะพิเศษ คือ เป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด โดยที่คำตอบแต่ละคำตอบนั้นเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา และไม่มีคำตอบอื่นครอบงำ (Dominate) เลย หรือที่เรียกว่า พारेโตฟรอนต์ (Pareto front) ตัวอย่างปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ เช่น ปัญหาการจัดการผลิต ปัญหาการมอบหมายงาน หรือตัวอย่างปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ง่ายๆ ที่พบในชีวิตประจำวัน เช่น ปัญหาในการเลือกซื้อรถยนต์ ตัวอย่างดังรูปที่ 2.8 หากต้องการซื้อรถยนต์ ส่วนใหญ่จะพิจารณาในด้านของราคากับสมรรถนะของรถยนต์ ซึ่งสามารถสรุปวัตถุประสงค์ได้ 2 วัตถุประสงค์ คือ ต้องการราคาต่ำ ในขณะที่ต้องการสมรรถนะของรถสูง ซึ่งคำตอบที่ได้ไม่ได้มีเพียงแค่คำตอบเดียวเป็นต้น



รูปที่ 2.8 ปัญหาการเลือกซื้อรถยนต์

### 2.9.1 ลักษณะของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์เป็นการค้นหาเซตคำตอบภายในพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ เพื่อต้องการหาค่าที่ต่ำที่สุด หรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละฟังก์ชันพร้อมๆ กัน โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหา เรียกว่า เซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ เป็นปัญหาการออกแบบที่มีหลายวัตถุประสงค์ ประกอบด้วย  $m$  วัตถุประสงค์ และตัวแปรตัดสินใจ เขียนอยู่ในรูปทั่วไปดังสมการที่ (2.4)

$$\text{Minimize (or maximize) : } \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $x$  คือ เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ

$f_i(x)$  คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่  $i$  เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, m$

ดังนั้นรูปแบบปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ จะเป็นการค้นหา เวกเตอร์คำตอบ  $x$  ภายใต้  $m$  ข้อจำกัดแบบอสมการดังสมการที่ (2.5) หรือภายใต้  $n$  ข้อจำกัด แบบสมการดังสมการที่ (2.6) ซึ่งจะเป็นการกำหนดขอบเขตพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้

$$g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (2.5)$$

$$h_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (2.6)$$

ปกติโดยทั่วไปรูปแบบปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ มี 3 รูปแบบ ที่ เป็นไปได้ ดังนี้

- 1) ทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาคำตอบที่น้อยที่สุด
- 2) ทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาคำตอบที่มากที่สุด
- 3) แบบขัดแย้งกัน คือบางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการ

การหาคำตอบที่น้อยที่สุด บางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาคำตอบที่มากที่สุด ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์สามารถแปลงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้มีรูปแบบเป็นการหาคำตอบที่น้อยที่สุดหรือมากที่สุดได้ ตัวอย่างเช่น การแปลงทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีการหาคำตอบที่น้อยที่สุดให้เป็นรูปแบบการหาคำตอบที่มากที่สุด เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยทางด้านไอพินบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (IP over WDM) จะพิจารณาปัญหาการทำให้ดีที่สุด (optimization) ตามวัตถุประสงค์ของการแก้ปัญหาที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่เทคนิคที่ใช้ในการออกแบบเครือข่ายโดยทั่วไปจะเป็นการออกแบบการทำให้ดีที่สุดเพียงวัตถุประสงค์เดียว (single objective) เท่านั้น แล้วนำวัตถุประสงค์อื่น ๆ ที่ต้องการแปลงเป็นเงื่อนไข หรือแปลงปัญหาที่ดีที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นปัญหาที่มีเพียงวัตถุประสงค์เดียวโดยใช้ความสัมพันธ์ของค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ของวัตถุประสงค์ที่สัมพันธ์กัน เป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากและง่ายต่อการนำไปใช้ วิธีนี้อาศัยการให้น้ำหนักกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละอย่าง แล้วนำเอาน้ำหนักและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมดมารวมกัน เพื่อสร้างค่าวัตถุประสงค์เป็นค่าเดียว วิธีการผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักจะแสดงให้เห็นการแลกเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ที่สนใจ ทำให้ได้มาซึ่งผลเฉลยสำหรับปัญหาการทำให้ดีที่สุด วิธีการที่ใช้แปลงปัญหาการทำให้ดีที่สุด

แบบหลายวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียว โดยจะใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method)

### 2.9.2 วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก

เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยทำให้วัตถุประสงค์ที่สนใจเป็นบรรทัดฐาน (normalization) เดียวกัน คือ ทำให้วัตถุประสงค์นั้นๆ มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน แล้วนำค่าถ่วงน้ำหนักมาคูณกับแต่ละวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธีการนี้จะมีรูปแบบทั่วไป จากงานวิจัยของ Grodzewich, Oleksandr, O. and, Oleksandr, R. (2006) แสดงดังสมการที่ (2.7)

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^k w_i f_i(\tilde{x}) \\ \text{subject to} \quad & \tilde{x} \in \tilde{S} \end{aligned} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $w_i \geq 0$  สำหรับทุก ๆ  $i=1, \dots, k$  และ  $\sum_{i=1}^k w_i = 1$  จะเป็น pareto optimal ได้ ก็ต่อเมื่อ  $w_i > 0$  สำหรับทุก ๆ  $i=1, \dots, k$  หรือผลเฉลยไม่เหมือนกันเลย

สำหรับวิธีการที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่พิจารณานั้นเป็นบรรทัดฐาน จะแสดงดังสมการที่ (2.8)

$$0 \leq \frac{f(x) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \leq 1 \quad (2.8)$$

โดยที่  $f(x)$  คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการพิจารณา

$f_{\min}$  คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุด

$f_{\max}$  คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่ามากที่สุด

ในกรณีนี้หลังจากที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สนใจถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานแล้วจะทำให้วัตถุประสงค์มีค่าอยู่ในช่วงมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และไม่เกินหนึ่ง จากนั้นจะนำฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการพิจารณามาพล็อตกราฟเพื่อแสดงให้เห็นถึงการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างวัตถุประสงค์

จากหนังสือ Multi-objective optimization using evolutionary algorithm (Deb, K. 2009) ได้กล่าวถึงข้อดีของวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ว่าเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ โดยสามารถใช้ได้กับปัญหาที่แสดงให้เห็นถึง pareto front แบบ convex ซึ่งวิธีการนี้รับประกันได้ว่าสามารถหาเซตของคำตอบที่ดีที่สุดได้ตลอดทั้ง front สำหรับข้อเสียของวิธีการ

นี้ คือ หากนำมาใช้กับปัญหาที่มีลักษณะผสม เช่น ปัญหาแบบสองวัตถุประสงค์ที่ วัตถุประสงค์แรกต้องการหาค่าที่มากที่สุด แต่อีกวัตถุประสงค์หนึ่งต้องการหาค่าน้อยที่สุด แล้วจะต้องทำการแปลงให้เป็นวัตถุประสงค์อย่างใดอย่างหนึ่งที่เหมือนกัน เป็นต้น

## 2.10 ความไม่แน่นอนของกราฟฟิค

เนื่องจากการใช้อินเตอร์เน็ตที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เราไม่สามารถบอกได้ว่าปริมาณกราฟฟิคในเครือข่ายจะมีค่าคงที่อยู่ตลอดเวลา เนื่องจากมีผู้ใช้งานปริมาณกราฟฟิคในหลายช่วงเวลา หลายสถานที่ ทำให้ลักษณะของปริมาณกราฟฟิคมีความแปรปรวนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาในการขนส่งกราฟฟิคที่มีผลต่อคุณภาพในการให้บริการที่ ได้แก่ ปัญหาความแออัดของกราฟฟิคบนข่ายเชื่อมโยง (link) หรือที่คอขวด (bottleneck) และปัญหาของการหยุดชะงักในการขนส่งกราฟฟิคเมื่อเกิดกรณีข่ายเชื่อมโยงขาดหรือล้นเหลว ถ้ามีข่ายเชื่อมโยงที่ขาดหรือล้นเหลวนั้นมีปริมาณกราฟฟิคที่ขนส่งอยู่ในปริมาณที่สูงมาก ก็จะทำให้เกิดการหยุดชะงักในการขนส่งกราฟฟิค ซึ่งส่งผลให้ความน่าเชื่อถือในการบริการลดลง ดังนั้นเราจึงต้องเตรียมความจุที่เพียงพอเพื่อที่จะสามารถรองรับความต้องการของกราฟฟิคภายใต้สถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอนของกราฟฟิค

### การเตรียมความจุเพื่อรองรับกราฟฟิคที่มีความไม่แน่นอน

ในการเตรียมความจุเพื่อรองรับกราฟฟิคที่มีความไม่แน่นอนนี้ เป็นส่วนหนึ่งที่ได้รับการพิจารณาในการโปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาส (Chance-Constrained Programming : CCP) งานวิจัยของ Liu B. (2009) กล่าวว่า การโปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาสเป็นวิธีการที่สำคัญในการจัดการกับตัวแปรสุ่มในการแก้ไขปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายของตัวแปรสุ่ม ซึ่งในที่นี้ตัวแปรสุ่มแสดงถึงพารามิเตอร์ของความไม่แน่นอนของกราฟฟิค ดังนั้นการโปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาสนี้เป็นจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถจัดการกับความไม่แน่นอนของกราฟฟิคได้ ปริมาณกราฟฟิคนี้ไม่สามารถบอกได้ชัดเจนว่าจะมีปริมาณเท่าไร จนกว่าจะถึงเวลาที่กำหนดนั้น ซึ่งทำให้จำเป็นต้องมีการคาดคะเน หรือความเป็นไปได้ที่จะเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว ซึ่งมีวิธีการหนึ่งที่บ่งบอกถึงโอกาสที่จะคาดการณ์จำนวนหรือปริมาณกราฟฟิคเกิดขึ้นว่ามีปริมาณมากหรือน้อยในแต่ละเหตุการณ์นั้น ในทางคณิตศาสตร์เรียกจำนวนนั้นว่า ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ ดังนั้นในการเตรียมความจุจึงใช้สมการความน่าจะเป็นมาพิจารณาในงานทางวิศวกรรมเครือข่ายที่คำนึงถึงความไม่แน่นอนของกราฟฟิค ซึ่งรูปแบบเงื่อนไขข้อจำกัดตามโอกาส (Chance constraint) ก็ได้ใช้สมการความน่าจะเป็นมาพิจารณาเพื่อให้แน่ใจว่าการจัดสรรความจุหรือแบนด์วิดท์บนการเชื่อมโยงจะมีมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณกราฟฟิคที่ไม่แน่นอน โดยสมการดังกล่าวมีรูปแบบดังต่อไปนี้

$$P(x \geq \zeta) \geq \alpha \quad \text{โดยที่ } 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\zeta$  คือ พารามิเตอร์ของความไม่แน่นอน

$x$  คือ การกำหนดความจุหรือแบนด์วิดท์

$\alpha$  คือ ค่าความน่าจะเป็นที่พารามิเตอร์ของความไม่แน่นอนจะไม่เกินขอบเขตที่กำหนด ซึ่งจะเป็นแสดงถึงระดับการรับประกันความไม่แน่นอน

สำหรับพารามิเตอร์  $x$  นั้นสามารถแปลงเป็นสมการเพื่อหาค่าได้ โดยที่ตัวแปรสุ่ม ( $\zeta$ ) 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 ( $\mu$ ) และค่าความแปรปรวน ( $\sigma^2$ ) และจากสมการที่ (2.9) 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 (2.10)

$$x \geq \mu + \Phi^{-1}(\alpha)\sigma \quad (2.10)$$

จากการพิจารณารูปแบบเงื่อนไขข้อจำกัดตามโอกาส (Chance constraint) เพื่อให้แน่ใจว่าการจัดสรรความจุหรือแบนด์วิดท์บนการเชื่อมโยงจะมีมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณทราฟฟิกที่ไม่แน่นอน ( $\zeta$ ) หรือแสดงดังสมการที่ (2.9) ความต้องการของทราฟฟิกที่ต้องการร้องขอการใช้งานความจุภายในเครือข่ายนั้น จะมีระดับของการรับประกันความไม่แน่นอนอย่างน้อยเท่ากับ  $100(\alpha)\%$  ดังนั้นในการเตรียมความจุที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน ( $x$ ) สำหรับการระดับการรับประกัน  $\alpha$  สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (2.11)

$$x = \mu + \Phi^{-1}(\alpha)\sigma \quad (2.11)$$



### บทที่ 3

## การวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสะดวกของปริมาณทราฟฟิกภายใต้ การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

หลังจากที่ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าความไม่แน่นอนของทราฟฟิกนั้นเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นสำหรับการเชื่อมต่อภายในเครือข่ายไอพินบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing : IP over WDM) สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอวิธีการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสะดวกภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยทราฟฟิกที่นำมาวิเคราะห์นี้ เป็นทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนมีความแปรปรวนตลอดเวลา โดยผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาทราฟฟิกที่มีความต้องการขนส่งข้อมูลภายในเครือข่ายภายใต้ประเด็นความไม่แน่นอนของทราฟฟิกดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.10 และผู้วิจัยได้นำเสนอเทคนิคสำหรับการออกแบบโครงข่ายเสมือนด้วยเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสะดวกและเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่ายแกนหลัก IP over WDM โดยงานวิจัยในบทนี้ได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาด้วยการใช้รูปแบบของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม สำหรับเนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ 3.1 แนวคิดในการวางแผนเครือข่าย IP over WDM เพื่อความสะดวกร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ 3.2 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม 3.3 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ 3.4 การวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม 3.5 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

### 3.1 แนวคิดในการวางแผนเครือข่าย IP over WDM เพื่อความสมดุลร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ในปัจจุบันมีการใช้งานอินเทอร์เน็ตผ่านเครือข่ายแกนหลักประเภท IP over WDM เพิ่มขึ้นในทุกๆปี การใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ทำให้มีปริมาณทราฟฟิกจำนวนมากไหลผ่านเครือข่ายแกนหลัก ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อการใช้งานอุปกรณ์ในเครือข่ายทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นผู้ให้บริการเครือข่ายจำเป็นต้องตระหนักถึงการรองรับปริมาณทราฟฟิกจำนวนมากเพื่อสร้างความเชื่อมั่นแก่ผู้ใช้งานและจะต้องมีการวางแผนการใช้งานทรัพยากรเครือข่ายอย่างเหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างเพียงพอต่อการรองรับปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งข้อมูลในเครือข่าย และสามารถให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ข้อจำกัดของทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดรวมถึงเพื่อให้การใช้พลังงานไฟฟ้าในเครือข่ายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งลักษณะของไอพีทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนนั้นจึงนำมาซึ่งความท้าทายในการจัดเตรียมและจัดการทรัพยากรเครือข่ายสำหรับทราฟฟิกที่มีความต้องการขนส่งข้อมูลภายในเครือข่าย IP over WDM

ในหลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจในการศึกษาการวางแผนเครือข่ายและการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับเครือข่าย IP over WDM เช่น งานวิจัยของ Tachun Lin, Zhili Zhou and Thulasiraman, K. (2011) ได้ทำการวิเคราะห์เรื่องการสร้างทางเดินของแสงโดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้ประโยชน์ความจุของข่ายเชื่อมโยงให้มากที่สุดสำหรับก่อนและหลังการเกิดความล้มเหลวของการเชื่อมโยงทางกายภาพ และ ในงานวิจัยของ Paramet Keeritnatchairara and Chutima Prommak. (2012) ได้พิจารณาผลกระทบจากปริมาณทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนต่อความสมดุลของการจัดส่งทราฟฟิกภายในเครือข่าย IP over WDM และนำเสนอนิยามสูตรทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นที่สามารถกำหนดเส้นทางที่สั้นที่สุดและความจุที่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับต่างๆ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงข่ายเสมือนด้วยการสมดุลปริมาณทราฟฟิก ซึ่งสามารถกระจายทราฟฟิกในปริมาณที่สูงมากในการขนส่งผ่านการเชื่อมโยงทางกายภาพ

ในขณะที่การศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีความสำคัญและแสดงผลลัพธ์ที่น่าสนใจแต่ประเด็นสำคัญการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพไม่ได้มีการพิจารณา ซึ่งก็มีบางงานวิจัยให้ความสนใจเกี่ยวกับการวางแผนโครงข่ายเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างเช่น งานวิจัยของ Poompat Saengudomlert (2014) ได้กล่าวถึงการเลือกใช้โครงข่ายเสมือนในเครือข่าย IP over WDM โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการรองรับปริมาณทราฟฟิก โดยมีข้อจำกัดในการส่งผ่านทราฟฟิก ซึ่งในงานวิจัยนี้การใช้พลังงานส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทางที่ไอพีเร้าเตอร์เท่านั้น ซึ่งยังไม่ได้พิจารณาถึงการใช้พลังงานของอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ส่วนใน

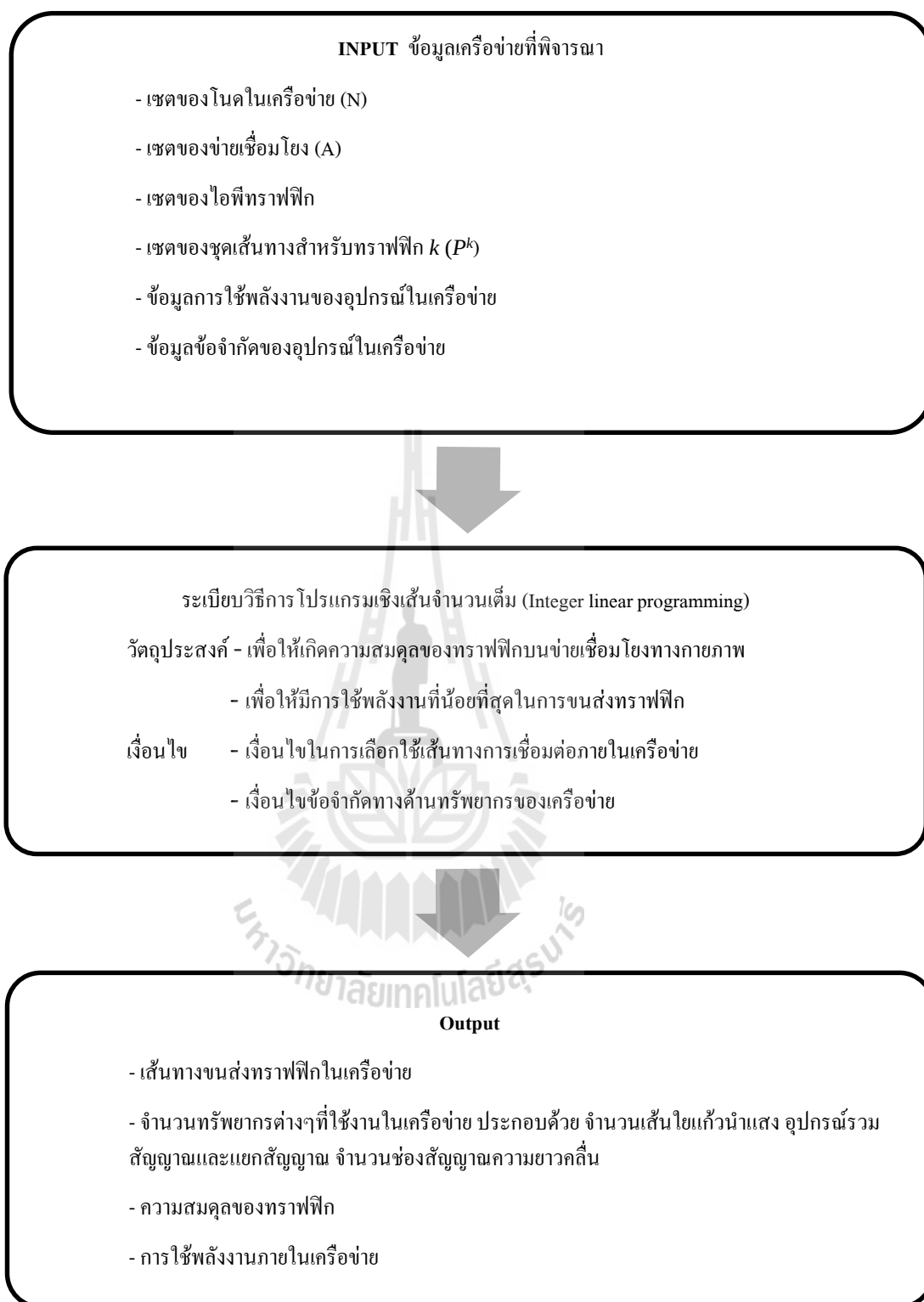
งานวิจัยของ Bin Chen, Zheng-Ming Jiang, Teng, R.K.F., Xiao-Hui Lin, MingJun Dai, Hui Wang (2013) ได้พิจารณาให้เห็นถึงการลดการใช้พลังงานในการเกิด blocking ในเครือข่าย IP over WDM ในกรณีที่แบนด์วิธของเครือข่ายมีไม่เพียงพอต่อการให้บริการ โดยนำเสนอวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานในเครือข่าย IP over WDM แสดงให้เห็นว่าปริมาณการส่งผ่านของข้อมูลในเครือข่ายมีความสำคัญซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงาน ส่วนในงานวิจัยของ Francesco Musumeci, Domenico Siracusa, Giuseppe Rizzelli, Massimo Tornatore, Riccardo Fiandra, Achille Pattavina and Politecnico di Milano (2012) ได้ทำการพิจารณาการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM จากสถาปัตยกรรมที่ต่างกัน โดยวิเคราะห์ถึงการใช้พลังงานในสถานการณ์ที่ต่างกัน ทั้งปริมาณทราฟฟิกและพารามิเตอร์ที่สำคัญบางอย่างซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงานในเครือข่าย

ถึงแม้ว่างานวิจัยได้มีการพิจารณาการใช้พลังงานในเครือข่าย IP over WDM พบว่าเป็นการพิจารณาเกี่ยวกับการใช้พลังงานในเครือข่ายประเด็นเดียวเท่านั้น ยังไม่ได้นำความไม่แน่นอนของทราฟฟิกมาร่วมพิจารณาด้วยหรืองานวิจัยได้พิจารณาถึงลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิกเพียงอย่างเดียว ซึ่งไม่ได้พิจารณาถึงการใช้พลังงานในเครือข่ายร่วมด้วย ดังนั้นงานวิจัยในบทนี้ไม่เพียงแต่พิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิก แต่ยังให้ความสนใจกับประเด็นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพร่วมด้วย โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบโครงข่ายเสมือนสำหรับการขนส่งไอพีทราฟฟิกผ่านเครือข่าย IP over WDM ด้วยรูปแบบการแก้ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming : ILP)

### 3.2 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

ในการวางแผนทราฟฟิกของงานวิจัยในบทนี้ได้เลือกวิธีการกำหนดปัญหาเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming : ILP) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพและได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยใช้หลักการปรับเปลี่ยนตัวแปรอย่างมีหลักเกณฑ์เพื่อให้มีผลต่อเป้าหมายของปัญหาและบรรลุผลตามเป้าหมายโดยเร็วที่สุด ดังนั้นอัลกอริธึมซิมเพล็กซ์จะเป็นวิธีการคำนวณที่มีลักษณะแบบทำซ้ำขั้นตอน คือ จะคำนวณซ้ำ ๆ จนกว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนสำคัญ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) และสมการเงื่อนไข (constraint) งานวิจัยนี้มีเป้าหมาย คือ ต้องการวางแผน ทราฟฟิกแบบสมดุลสำหรับการขนส่งทราฟฟิกข้อมูลในเครือข่าย IP over WDM ภายใต้อาณาเขตของความไม่แน่นอนของทราฟฟิกร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับเงื่อนไขนั้นก็เป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยได้บรรลุเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งประกอบไปด้วยเงื่อนไขการเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย โดยมีชุดเส้นทางเลือกในการขนส่งสำหรับทราฟฟิกข้อมูล และ

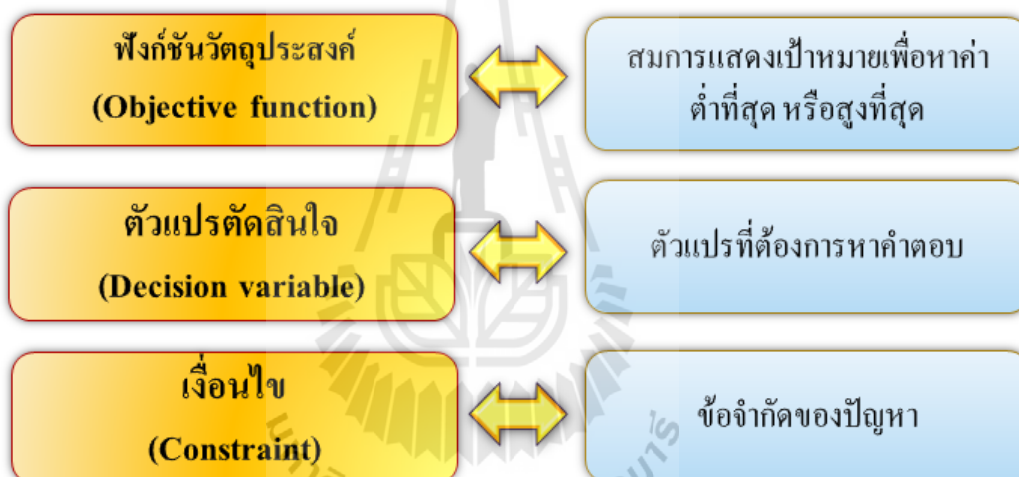
ยังมีเงื่อนไขข้อจำกัดด้านทรัพยากรต่าง ๆ ของอุปกรณ์เครือข่าย ซึ่งเป็นข้อจำกัดของจำนวนทรัพยากรที่สามารถเลือกใช้งานได้สำหรับการขนส่งทราฟฟิกข้อมูลในเครือข่าย เมื่อกำหนดปัญหาเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเรียบร้อยแล้ว กระบวนการหาคำตอบของการโปรแกรมเชิงเส้นก็จะได้รับการจัดสรรเส้นทางของทราฟฟิกที่ทำให้เกิดความสมดุลที่มากที่สุดรวมกับการใช้พลังงานในเครือข่ายน้อยที่สุดภายใต้การพิจารณาทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน รวมถึงจำนวนของทรัพยากรต่าง ๆ ที่มีการใช้งานเพื่อการขนส่งทราฟฟิกนั้น โดยการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 แสดงถึงคำตอบของปัญหาที่ตั้งไว้ (เอาต์พุต) นั่นก็คือ เส้นทางสำหรับขนส่งทราฟฟิก จำนวนทรัพยากรที่ใช้ในเครือข่าย ความสมดุลของทราฟฟิก และการใช้พลังงานในเครือข่าย ซึ่งคำตอบเหล่านี้ได้จากการนำข้อมูลอินพุตต่างๆซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลของเครือข่ายที่ใช้พิจารณา การใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่าย ข้อจำกัดของทรัพยากรในเครือข่าย จำนวนทราฟฟิกที่ขนส่งระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย ซึ่งในการเลือกคู่โหนดและจำนวนทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่างคู่โหนด พิจารณาจากการกระจายทราฟฟิกแบบสม่ำเสมอ เพื่อที่จะลดความคับคั่งหรือความแออัดของทราฟฟิกภายในเครือข่ายภายใต้เงื่อนไขของระยะทางที่ใช้สำหรับขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดต้นทาง-ปลายทางภายใต้ข้อจำกัดของความยาวคลื่นที่มีอยู่อย่างจำกัด และสุดท้ายข้อมูลชุดเส้นทางเลือกสำหรับส่งทราฟฟิก ซึ่งเป็นการคำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดสำหรับการส่งทราฟฟิกจากโหนดต้นทาง-ปลายทาง ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำมาผ่านกระบวนการหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม จากนั้นเมื่อได้กำหนดปัญหาเหล่านี้เป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงดำเนินการแปลงปัญหาเหล่านี้ให้กลายเป็นสมการคณิตศาสตร์โดยแสดงอยู่ในหัวข้อ 3.3



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น

### 3.3 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์

การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีความไม่สมดุลของทราฟฟิกน้อยที่สุดร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ภายใต้วิธีการกำหนดปัญหาแบบ การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งประกอบไปด้วยสามส่วนที่สำคัญคือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ สมการเงื่อนไข และตัวแปรตัดสินใจ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ สมการ แสดงเป้าหมายเพื่อใช้ในการหาค่าที่ต่ำที่สุดหรือสูงที่สุด ส่วนสมการเงื่อนไข คือ สมการที่แสดงถึง ข้อกำหนดหรือข้อจำกัดของปัญหานั้น ๆ และตัวแปรตัดสินใจ คือ ตัวแปรที่ต้องการหาคำตอบเพื่อให้ ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

การแก้ปัญหาด้วยการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มในงานวิจัยนี้กำหนดด้วยสมการทาง คณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการออกแบบโครงข่ายเสมือน งานวิจัยในบทนี้มีเป้าหมาย คือ ต้องการให้ มีความไม่สมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM ที่น้อย ที่สุด และเพื่อการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยของ Paramet Keeritnatchairara and Chutima Prommak. (2012) โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของไอพี ทราฟฟิกที่ขนส่งเข้าสู่ข่ายเชื่อมโยงทางแสงของชั้น WDM ให้มีค่าน้อยที่สุด (Minimizing mean Absolute Deviation) ซึ่งการใช้ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์นี้แสดงถึงฟังก์ชันที่มี วัตถุประสงค์เพื่อต้องการค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายใน

เครือข่าย IP over WDM ที่น้อยที่สุดแสดงดังสมการที่ (3.1) ซึ่งค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการจัดสรรเส้นทางสำหรับทราฟฟิกและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ของ Keeratchairitnara, P. (2013) ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM แสดงดังสมการที่ (3.2) ซึ่งแน่นอนว่าในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่ต้องการให้มีความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายที่มากที่สุดและมีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุด ดังนั้นในการจัดสรรเส้นทางที่เหมาะสมก็นำมาซึ่งความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายที่มากที่สุดและการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดด้วย ซึ่งเห็นได้ว่าผู้วิจัยได้มีการพิจารณาวัตถุประสงค์สองวัตถุประสงค์ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วในการพิจารณาปัญหาใด ๆ อาจจะมีประเด็นหรือวัตถุประสงค์ที่ต้องการทำให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดมากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์ โดยหลายปัญหาที่พิจารณานั้นมักจะเป็นปัญหาที่มีความขัดแย้งกันและจะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เพียงคำตอบเดียว ดังนั้นผู้วิจัยจะต้องทำการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดจากเซตของผลลัพธ์ที่เป็นไปได้เหล่านั้น

ในงานวิจัยนี้จะได้ศึกษาการแลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างสองวัตถุประสงค์ ได้แก่ วัตถุประสงค์ที่หนึ่ง ต้องการให้เกิดความไม่สมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายที่น้อยที่สุดและวัตถุประสงค์ที่สอง เพื่อให้มีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM จากนั้นจะทำการแปลงปัญหาที่ได้ออกแบบไว้ให้กลายเป็นสมการคณิตศาสตร์ด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเพื่อหาเซตของคำตอบที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ระหว่างวัตถุประสงค์ทั้งสอง โดยงานวิจัยนี้จะทำการแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นสมการวัตถุประสงค์เดียวโดยใช้เทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ค่าถ่วงน้ำหนักคูณกับวัตถุประสงค์ทั้งสองนี้ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.9.2 ของหัวข้อที่ 2.9

ในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์ด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับสองวัตถุประสงค์ มีเงื่อนไขและปัจจัยต่างๆ ได้แก่ การเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย โดยให้แต่ละทราฟฟิกข้อมูลสามารถเลือกได้เพียงหนึ่งเส้นทางเท่านั้นรวมถึงเงื่อนไขของทรัพยากรต่างๆ ในเครือข่าย ได้แก่ เงื่อนไขข้อจำกัดแบนด์วิธของความยาวคลื่น (Wavelength) เงื่อนไขข้อจำกัดการใช้จำนวนความยาวคลื่นต่อสายใยแก้วนำแสง (Fiber optic) และเงื่อนไขข้อจำกัดการใช้จำนวนความยาวคลื่นต่ออุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (multi/demultiplexers) ซึ่งได้แสดงอยู่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการเงื่อนไขที่ (3.6) - (3.12) ซึ่งคำตอบที่ได้จากการกำหนดปัญหาเป็นสมการคณิตศาสตร์นั้นสามารถรับประกันได้ว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด และอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้ การแปลงสมการวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขให้เป็นสมการคณิตศาสตร์นั้นจะทำให้การวางแผนเครือข่ายทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทำให้ได้เครือข่ายที่เหมาะสมที่สุด

กล่าวคือสามารถออกแบบปัญหาที่มีขนาดใหญ่ได้ ซึ่งในการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ได้มีการใช้ตัวแปรต่างๆ โดยมีคำนิยาม ดังต่อไปนี้

เซตของตัวแปร :

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

ตัวแปรตัดสินใจ :

- $f^{k,p}$  คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไบนารี  $\{0, 1\}$  เป็นตัวแปรที่ระบุการเลือกเส้นทางสำหรับทราฟฟิก  $k$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อทราฟฟิก  $k$  เลือกใช้เส้นทาง  $p$  จากเซตของชุดเส้นทางที่กำหนดไว้ล่วงหน้า และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่ได้เลือกใช้งานเส้นทางนั้น โดยที่  $\forall p \in P^k$  และ  $\forall k \in D$
- $\omega_j$  คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม เป็นตัวแปรที่ระบุจำนวนของช่องสัญญาณความยาวคลื่น (Wavelength channels) ที่กำหนดให้ใช้งานสำหรับทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ  $j$  โดยที่  $\forall j \in A$
- $Nf_j$  คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม เป็นตัวแปรที่ระบุจำนวนของใยแก้วนำแสงที่กำหนดให้ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ  $j$  โดยที่  $\forall j \in A$
- $MD_j$  คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม เป็นตัวแปรที่ระบุจำนวนของอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (multi/demultiplexers) ที่ใช้ระหว่างโนดต้นทาง-ปลายทาง บนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ  $j$  โดยที่  $\forall j \in A$

พารามิเตอร์ค่าคงที่ :

- $V_m$  คือ จำนวนเต็มที่ระบุจำนวนของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) ที่ใช้งานในแต่ละโนด  $m$  โดยที่  $\forall m \in N$
- $Y_m$  คือ จำนวนเต็มที่ระบุจำนวนของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (Route Processor) ที่ใช้งานในแต่ละโนด  $m$  โดยที่  $\forall m \in N$
- $\beta_k$  คือ จำนวนเต็มที่ระบุจำนวนของช่องสัญญาณความยาวคลื่น (Wavelength channels) ที่มีการกำหนดให้ใช้งานสำหรับทราฟฟิก  $k$  ที่ต้องการขนส่งผ่านการเชื่อมโยงเสมือน โดยที่  $\forall k \in D$
- $x_k$  คือ ความจุที่จัดเตรียมไว้สำหรับรองรับทราฟฟิก  $k$  โดยที่  $\forall k \in D$



|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $n$              | คือ จำนวนของข่ายเชื่อมโยงในเซต $A$                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $T_k^m$          | คือ ตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ตัวแปรระบุว่าทราฟฟิก $k$ ไหลผ่านโนดเส้นทาง $m$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ ทราฟฟิก $k$ ไหลผ่านโนดเส้นทาง $m$ และมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่ได้ไหลผ่านโนดเส้นทาง $m$ โดยที่ $\forall k \in D, \forall m \in N$                                                                            |
| $\delta_j^{k,p}$ | คือ ตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ เป็นตัวแปรที่ระบุข่ายเชื่อมโยงที่มีการใช้งานในเส้นทาง $p$ สำหรับ ทราฟฟิก $k$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเส้นทาง $p$ สำหรับทราฟฟิก $k$ ใช้งานข่ายเชื่อมโยง $j$ และมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่ได้ใช้งานข่ายเชื่อมโยงนั้น โดยที่ $\forall p \in P^k, \forall k \in D$ และ $\forall j \in A$ |
| $L_j$            | คือ ความยาวของข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ $j$                                                                                                                                                                                                                                                               |
| $EA_j$           | คือ จำนวนของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFAs) บนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ $j$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $EA_j = \lfloor L_j/S - 1 \rfloor + 2$ ที่นำเสนอใน Shen, G. and Tucker, R. S. (2009) โดยที่ $S$ คือ ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณ                                                                          |
| $EG_j$           | คือ จำนวนของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerators) บนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ $j$ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $EG_j = \lfloor L_j/5S - 1 \rfloor$ ที่นำเสนอใน Yagi, M., Satomi, S., Ryu, S., Okamura, K., Aoyagi, M. and Asano, S. (2005)                                                                             |
| $B_\omega$       | คือ ความจุของความยาวคลื่น (wavelength channel)                                                                                                                                                                                                                                                         |
| $B_{LC}$         | คือ ความจุของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card)                                                                                                                                                                                                                                                 |
| $N_{LC}$         | คือ จำนวนของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิกที่สามารถใช้ได้ต่ออุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor)                                                                                                                                                                                                    |
| $W_f$            | คือ จำนวนความยาวคลื่นต่อใยแก้วนำแสง                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| $W_{MD}$         | คือ จำนวนความยาวคลื่นต่ออุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ                                                                                                                                                                                                                                            |
| $P_{LC}$         | คือ การใช้พลังงานของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card)                                                                                                                                                                                                                                          |
| $P_{RP}$         | คือ การใช้พลังงานของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor)                                                                                                                                                                                                                                           |
| $P_{tr}$         | คือ การใช้พลังงานของเครื่องทรานสปอนเดอร์ (transponder)                                                                                                                                                                                                                                                 |
| $P_E$            | คือ การใช้พลังงานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFA)                                                                                                                                                                                                                                                           |
| $P_G$            | คือ การใช้พลังงานของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerator)                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $P_O$            | คือ การใช้พลังงานของอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC)                                                                                                                                                                                                                                                  |
| $P_{MD}$         | คือ การใช้พลังงานของอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ                                                                                                                                                                                                                                                |
| $C_{LC}$         | คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card)                                                                                                                                                                                                                                       |
| $C_{RP}$         | คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor)                                                                                                                                                                                                                                        |
| $C_{tr}$         | คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของเครื่องทรานสปอนเดอร์ (transponder)                                                                                                                                                                                                                                              |

- $C_E$  คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFA)  
 $C_G$  คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerator)  
 $C_O$  คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC)  
 $C_{MD}$  คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ

สำหรับการกำหนดปัญหาเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ กำหนดด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม เนื่องจากในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจที่ระบุจำนวนของช่องสัญญาณความยาวคลื่นที่กำหนดให้ใช้งานสำหรับทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็มที่ระบุจำนวนของใยแก้วนำแสงที่กำหนดให้ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  และตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็มที่ระบุจำนวนของอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณที่ใช้ระหว่างโนดต้นทาง-ปลายทางบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  และในงานวิจัยนี้ยังมีตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไบนารี นั่นคือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะมีค่าเป็นตัวเลขได้เพียงสองค่าคือ 0 หรือ 1 เท่านั้น ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจที่ใช้ในการเลือกเส้นทางสำหรับความต้องการ  $k$  ซึ่งตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไบนารีก็ถือเป็นตัวแปรตัดสินใจที่อยู่ในรูปของจำนวนเต็ม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ที่มีส่วนประกอบคือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไขสามารถแสดงได้ดังนี้

### 3.3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อให้เกิดความไม่สมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM ที่น้อยที่สุดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

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

สมการที่ 3.1 เป็นการใช้ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์แสดงถึงการให้ค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM ที่น้อยที่สุด ซึ่งจะเป็นการหาค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ โดยที่ส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ เป็นค่าที่บอกถึงการกระจายของทราฟฟิก ถ้าค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์มีค่ามากนั้นหมายความว่า บางข่ายเชื่อมโยงมีการขนส่งปริมาณทราฟฟิกในปริมาณที่สูง แต่ถ้าค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์มีค่าน้อยนั้นหมายความว่าปริมาณทราฟฟิกนั้นมีการกระจายไปยังทุกข่ายเชื่อมโยงในปริมาณใกล้เคียงกัน

วัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อให้มีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งกราฟฟิคในเครือข่าย IP over WDM สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

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

โดยที่

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

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

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

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

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

อุปกรณ์แยกสัญญาณทางแสง

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

สัญญาณแสงและอุปกรณ์ทวนสัญญาณ

ซึ่งการแปลงสมการหลายวัตถุประสงค์ให้อยู่ในรูปแบบของสมการวัตถุประสงค์เดียวนั้น ก่อนที่จะนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาคูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก จะต้องทำให้วัตถุประสงค์ทั้งสองเป็นบรรทัดฐานเดียวกันก่อน เพื่อให้ค่าของวัตถุประสงค์ที่พิจารณานั้นมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ทำให้สะดวกต่อการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมให้กับแต่ละวัตถุประสงค์ ในงานวิจัยนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผู้วิจัยนำมาพิจารณามีอยู่สองวัตถุประสงค์ ซึ่งผู้วิจัยเรียกแบบจำลองนี้ว่า *MOO Model (Multi-objective optimization Model)* โดยมีวิธีการดังนี้

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

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

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

ดังนั้น จะได้

$$\begin{aligned}
 z &= w_1 \left( \frac{f_1(x) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \right) + w_2 \left( \frac{f_2(x) - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \right) \\
 z &= w_1 \left( \frac{\left( \min_{\forall p} \left| \frac{1}{n} \sum_{j \in A} r_j - \frac{\sum_{j \in A} r_j}{n} \right| \right) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \right) \\
 &\quad + w_2 \left( \frac{\left( \min_{\forall j} \left[ \frac{\sum_{m \in N} P_{LC} \cdot V_m + \sum_{m \in N} P_{RP} \cdot Y_m + 2 \cdot \sum_{k \in D} P_{tr} \cdot \beta_k + \sum_{j \in A} P_O \cdot \omega_j}{\sum_{j \in A} P_{MD} \cdot MD_j + \sum_{j \in A} (P_E \cdot EA_j + P_G \cdot EG_j) \cdot Nf_j} \right] - f_2^{\min} \right)}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \right) \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

|       |       |                                                                     |
|-------|-------|---------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $z$   | คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบสเกลาร์                               |
|       | $w_1$ | คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 โดยที่ $w_1 = [0,1]$ |
|       | $w_2$ | คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 โดยที่ $w_2 = [0,1]$ |

### 3.3.2 สมการเงื่อนไข

สมการเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์แบบสองวัตถุประสงค์นี้ ประกอบด้วยสมการเงื่อนไขในการเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่ายและสมการเงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย ซึ่งสมการเหล่านี้เป็นเงื่อนไขข้อจำกัดของปัญหาในการวิจัย ที่จะทำให้ได้มาซึ่งวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ประกอบด้วย 7 สมการ โดยสามารถแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เงื่อนไขในการเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย

1. สำหรับการเลือกเส้นทางในเครือข่าย เพื่อไม่ให้เกิดการเลือกเส้นทางที่ซ้ำซ้อน เงื่อนไขนี้จะระบุว่าความต้องการของทราฟฟิก  $k$  ให้สามารถเลือกได้เพียงหนึ่งเส้นทางจากเส้นทางที่กำหนดไว้ชุดของเส้นทาง  $P^k$

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

กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย

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

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

3. เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนสายใยแก้วนำแสงนั้น (fiber optic) มีเพียงพอต่อจำนวนของความยาวคลื่นที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง  $j$

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

4. เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (multi/demultiplexers) นั้น มีเพียงพอต่อจำนวนความยาวคลื่นที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง  $j$

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

5. จำนวนของความยาวคลื่นที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  นั้น มีการตั้งค่าการใช้งานเมื่อมีทราฟฟิกขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  ดังนั้นจำนวนของความยาวคลื่นที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของจำนวนที่ได้ตั้งค่าไว้บนข่ายเชื่อมโยง  $j$  กล่าวคือ  $\omega_j$  เป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

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

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

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

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

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

นอกจากสมการเงื่อนไขแล้วยังมีสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

สมการที่ (3.13) ใช้ในการคำนวณความจุที่รองรับปริมาณทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง โดยเป็นการคำนวณปริมาณรวมของความจุที่รองรับไอพิตราฟฟิกที่มีความต้องการขนส่งบนข่ายเชื่อมโยง  $j$

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

สมการที่ใช้ในการคำนวณจำนวนแพลงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) ที่ใช้งานที่โหนด  $m$  แสดงดังสมการที่ (3.14) เป็นผลรวมความจุของทุกทราฟฟิก  $k$  ที่ไหลผ่าน โหนดต้นทาง  $m$ หารด้วยแบนด์วิธของแพลงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก

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

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

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

สมการที่ใช้ในการคำนวณจำนวนอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor) ที่ใช้งานที่โหนด  $m$  แสดงดังสมการที่ (3.16) ซึ่งคือจำนวนของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง ที่ใช้งานในโหนด  $m$  หารด้วยจำนวนของแพลงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิกที่สามารถใช้ได้ต่ออุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง

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

### 3.4 การวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหรือความซับซ้อนของอัลกอริทึมสามารถพิจารณาได้จาก 2 การใช้งานหน่วยความจำ (Memory) ในการประมวลผลหรือพิจารณาจากเวลา (time) ที่จะต้องใช้ในการประมวลผล

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มซึ่งสามารถวัดความซับซ้อนของอัลกอริทึมได้จากพื้นที่หน่วยความจำที่ใช้ในการประมวลผล (Space Complexity) โดยวัดได้จากจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (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

### 3.4.1 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables)

การวิเคราะห์จำนวนตัวแปรการตัดสินใจสำหรับขั้นตอนวิธีนี้ (Algorithm) ประกอบไปด้วย 4 ตัวแปรการตัดสินใจ คือ  $\omega_j, Nf_j, f^{k,p}, MD_j$  ซึ่งแต่ละตัวแปรการตัดสินใจนั้นมีจำนวนดังต่อไปนี้

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

ดังนั้น จำนวนตัวแปรการตัดสินใจทั้งหมดสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

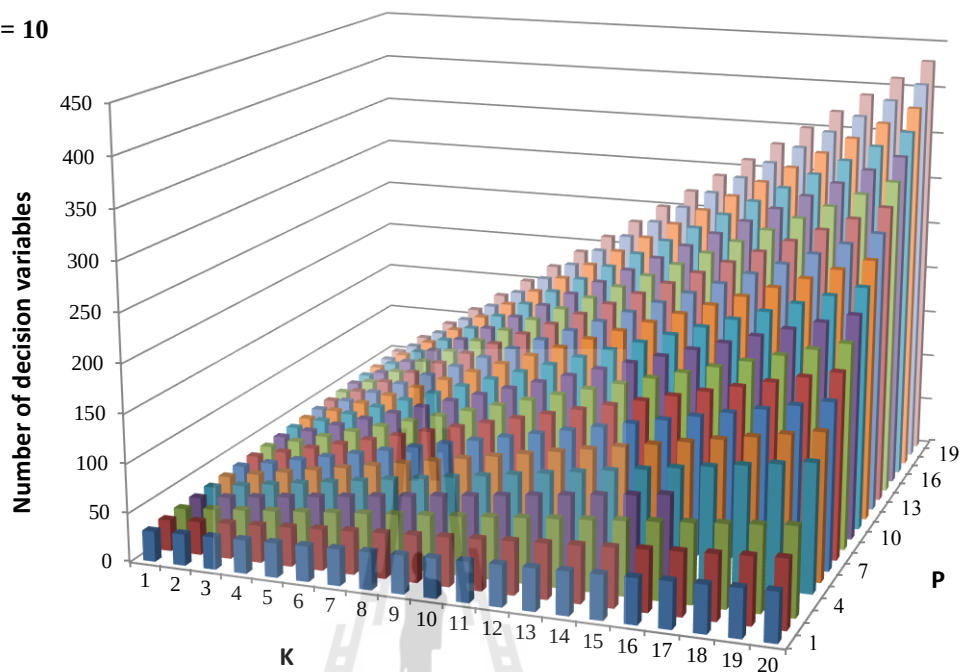
$$\begin{aligned} \text{จำนวนตัวแปรการตัดสินใจทั้งหมด} &= |K||P| + |J| + |J| + |J| \\ &= 3|J| + |K||P| \end{aligned} \quad (3.17)$$

สมการที่ (3.17) แสดงให้เห็นว่าเป็นสมการคำนวณจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่มีรูปแบบสมการเป็นแบบพหุนาม (Polynomial) โดยเป็นรูปแบบของสมการพหุนามที่มีดีกรีเท่ากับ 1 ซึ่งตัวอย่างจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.17) แสดงดังตารางที่ 3.3 ซึ่งได้มีการแทนค่าของตัวแปรเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ ในรูปที่ 3.3 และ 3.4



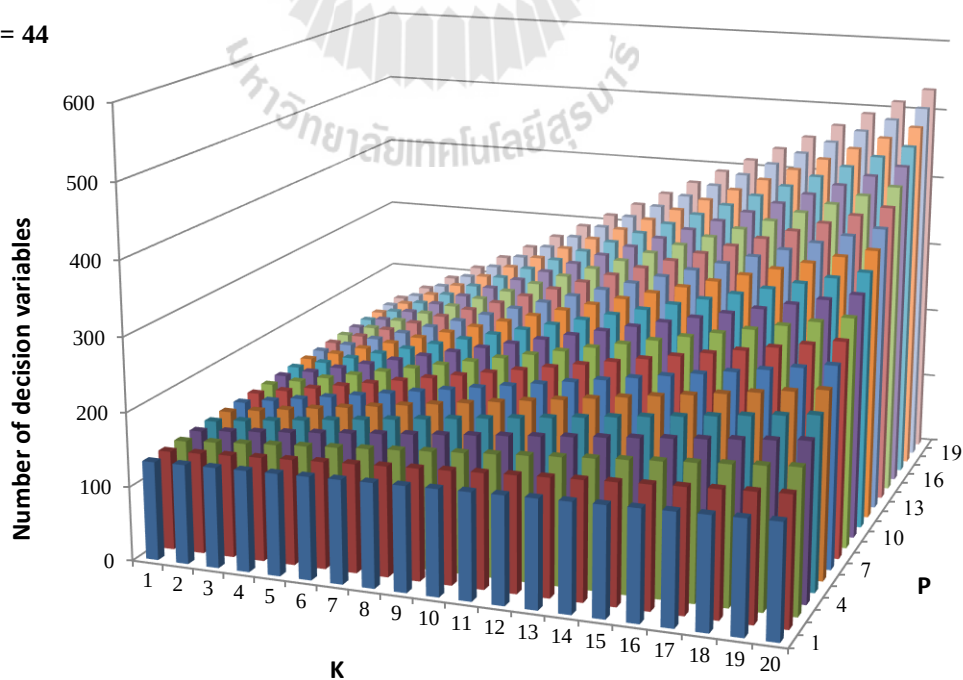
แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามจำนวนอินพุตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นตามรูปแบบของสมการพหุนาม

$J = 10$



รูปที่ 3.3 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เมื่อ  $J = 10$

$J = 44$



รูปที่ 3.4 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เมื่อ  $J = 44$

### 3.4.2 พื้นที่การค้นหา (Search space)

Search space คือ ชุดของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดสำหรับอัลกอริทึมหรือปัญหานั้น ซึ่งอัลกอริทึมนี้สามารถหา Search space ได้จากคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของตัวแปรการตัดสินใจ ซึ่งคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของแต่ละตัวแปรการตัดสินใจแสดงดังตารางที่ 3.1 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  $\omega$  มีคำตอบที่เป็นไปได้คือจำนวนเต็มบวก โดยกำหนดให้เท่ากับค่าคงที่  $X$  และตัวแปรการตัดสินใจ  $\omega_j$  มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ  $|J|$  ตัว ดังนั้นตัวแปรการตัดสินใจ  $\omega_j$  มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ  $X'$

สำหรับตัวแปร  $Nf_j$  มีคำตอบที่เป็นไปได้คือจำนวนเต็มบวก โดยกำหนดให้เท่ากับค่าคงที่  $Y$  และตัวแปรการตัดสินใจ  $Nf_j$  มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ  $|J|$  ตัว ดังนั้นตัวแปรการตัดสินใจ  $Nf_j$  มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ  $Y'$

สำหรับตัวแปร  $MD$  มีคำตอบที่เป็นไปได้คือจำนวนเต็มบวก โดยกำหนดให้เท่ากับค่าคงที่  $Z$  และตัวแปรการตัดสินใจ  $MD_j$  มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ  $|J|$  ตัว ดังนั้นตัวแปรการตัดสินใจ  $MD_j$  มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ  $Z'$

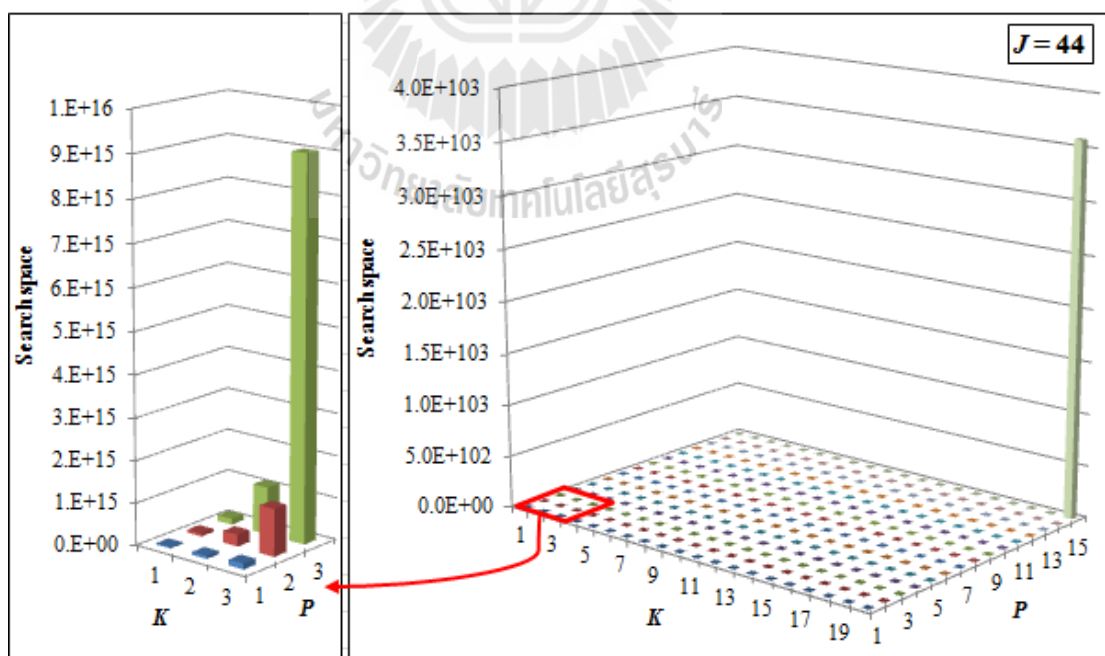
ตารางที่ 3.1 สรุปคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปรการตัดสินใจ

| ตัวแปรการตัดสินใจ | คำตอบที่เป็นไปได้ |
|-------------------|-------------------|
| $f^{k,p}$         | $2^{K \cdot P}$   |
| $\omega_j$        | $X'$              |
| $Nf_j$            | $Y'$              |
| $MD_j$            | $Z'$              |

จากคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปร เมื่อนำคำตอบเหล่านี้มาหาชุดคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหาสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Search space} &= 2^{K \cdot P} \cdot X^J \cdot Y^J \cdot Z^J \\ &= (X \cdot Y \cdot Z)^J \cdot 2^{K \cdot P} \end{aligned} \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.18) สมมติให้ค่าคงที่ของจำนวนช่องสัญญาณความยาวคลื่น ( $X$ ) เท่ากับ 2, ค่าคงที่ของจำนวนเส้นใยแก้วนำแสง ( $Y$ ) เท่ากับ 1 ค่าคงที่ของจำนวนอุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ ( $Z$ ) เท่ากับ 1 และมีการปรับขนาดของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อการเปลี่ยนแปลงของขนาด Search space แสดงดังตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.5 แสดงถึงขนาดของ Search space เมื่อกำหนดให้  $J$  มีค่าเท่ากับ 44 ซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลว่าขนาดของ Search space สูงมาก ๆ เมื่ออินพุตกราฟิก  $k$  มีค่าเท่ากับ 20 และ เส้นทาง  $p$  มีค่าเท่ากับ 15 โดยมีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ  $3.5 \times 10^{103}$  คำตอบ ซึ่งแตกต่างจากขนาด Search space ของอินพุตอื่นๆ ที่ต่ำมากๆเมื่ออินพุตมีค่าเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย ลักษณะแบบนี้แสดงให้เห็นถึงการก้าวกระโดดของขนาด Search space เมื่อมีจำนวนอินพุตเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์ของสมการแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 3.5 ขนาดของพื้นที่การค้นหา

### 3.4.3 จำนวนเงื่อนไข (Constraints)

การวิเคราะห์จำนวนเงื่อนไขหรือจำนวนข้อจำกัดของปัญหานี้ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการเงื่อนไขของอัลกอริทึมนี้ ซึ่งงานวิจัยในบทนี้สามารถแสดงจำนวนเงื่อนไขได้ดังตารางที่ 3.2 อย่างเช่น สมการที่ (3.19) เป็นเงื่อนไขที่แสดงถึงว่า การเลือกใช้งานความยาวคลื่นของทุก  $j$  ต้องเป็นไปตามสมการเงื่อนไขที่กำหนด โดยที่  $j = 1, 2, 3, \dots, J$  ดังนั้นจึงทำให้สามารถนับจำนวนเงื่อนไขได้ว่ามีจำนวนเท่ากับ  $J$  เงื่อนไข

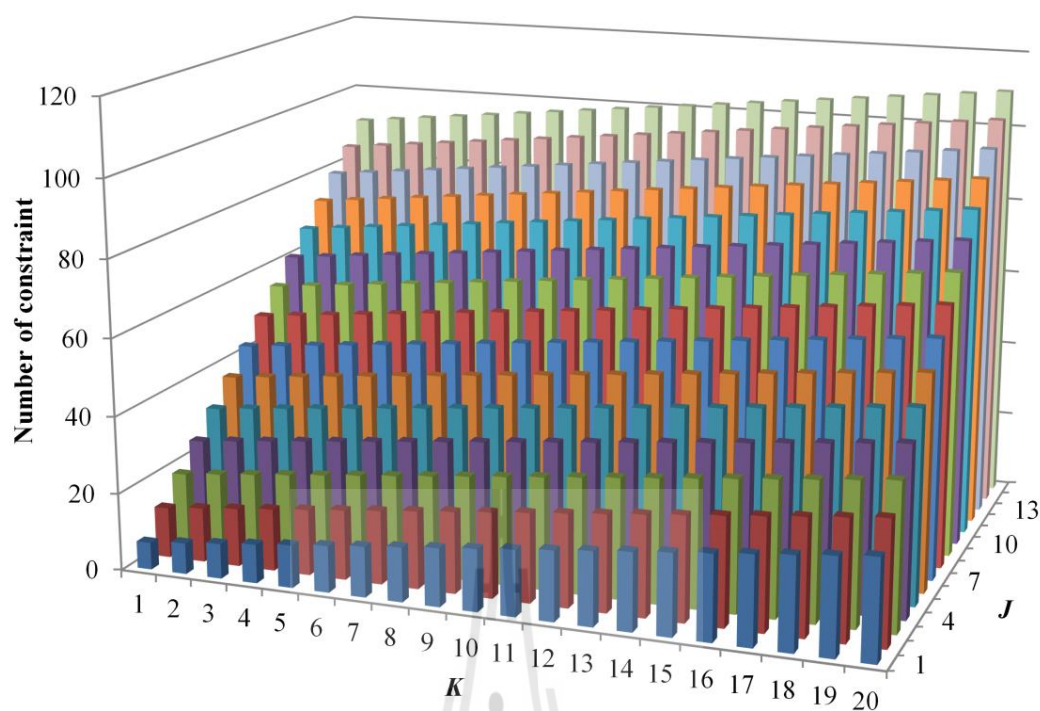
ดังนั้น จำนวนเงื่อนไขทั้งหมดจึงเท่ากับผลรวมของจำนวนเงื่อนไขของแต่ละสมการเงื่อนไข ซึ่งสมการคำนวณจำนวนเงื่อนไขสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\text{จำนวนเงื่อนไข} &= |J| + |J| + |J| + |J| + |J| + |J| + |K| \\ &= 6 \cdot |J| + |K|\end{aligned}\quad (3.19)$$

ตารางที่ 3.2 จำนวนเงื่อนไข

| สมการเงื่อนไข                                                                                                                           | จำนวนเงื่อนไข |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| $\sum_{p \in P^k} f^{k,p} = 1 \quad \forall k \in D \quad (3.6)$                                                                        | $K$           |
| $\sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} \cdot f^{k,p} \cdot x_k \leq B_\omega \cdot \omega_j \quad \forall j \in A \quad (3.7)$ | $J$           |
| $\omega_j \leq W_f \cdot Nf_j \quad \forall j \in A \quad (3.8)$                                                                        | $J$           |
| $\omega_j \leq W_{MD} \cdot MD_j \quad \forall j \in A \quad (3.9)$                                                                     | $J$           |
| $\omega_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (3.10)$                                                                                    | $J$           |
| $Nf_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (3.11)$                                                                                        | $J$           |
| $MD_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (3.12)$                                                                                        | $J$           |

สมการที่ (3.19) แสดงให้เห็นว่าเป็นสมการคำนวณจำนวนเงื่อนไขที่มีรูปแบบสมการเป็นแบบพหุนาม (Polynomial) โดยแสดงอยู่ในรูปของ  $ax + b$  ซึ่งตัวอย่างการคำนวณจำนวนเงื่อนไขแสดงดังตารางที่ 3.3 ซึ่งได้มีการแทนค่าของตัวแปรเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเงื่อนไข ในรูปที่ 3.6 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเงื่อนไขที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามจำนวนอินพุตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการแสดงถึงการเพิ่มขึ้นตามรูปแบบของสมการพหุนาม



รูปที่ 3.6 จำนวนเงื่อนไข

#### 3.4.4 สรุปความซับซ้อนของอัลกอริทึม

ขนาดของปัญหาสำหรับอัลกอริทึมที่มีรูปแบบเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables) พื้นที่การค้นหา (Search space) และจำนวนเงื่อนไข (Constraints) ซึ่งสมการการคำนวณเพื่อหาจำนวนหรือขนาดของสิ่งเหล่านี้เป็นสมการที่มีองค์ประกอบของตัวแปร  $J$ ,  $K$  และ  $P$  ดังนั้นขนาดของปัญหาจะมีการเปลี่ยนแปลงตามจำนวน  $J$ ,  $K$  และ  $P$  ที่เปลี่ยนไป ซึ่งจำนวนตัวแปรการตัดสินใจและจำนวนเงื่อนไขมีการขนาดเพิ่มขึ้นในรูปแบบของสมการ พหุนาม (Polynomial) ส่วนขนาดของ Search space มีขนาดเพิ่มขึ้นในรูปแบบของสมการเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) โดยสามารถเห็นความแตกต่างสำหรับขนาดของปัญหาได้ในตารางที่ 3.3 เมื่อมีการแทนค่าอินพุตแต่ละตัว

ตารางที่ 3.3 ขนาดของปัญหา

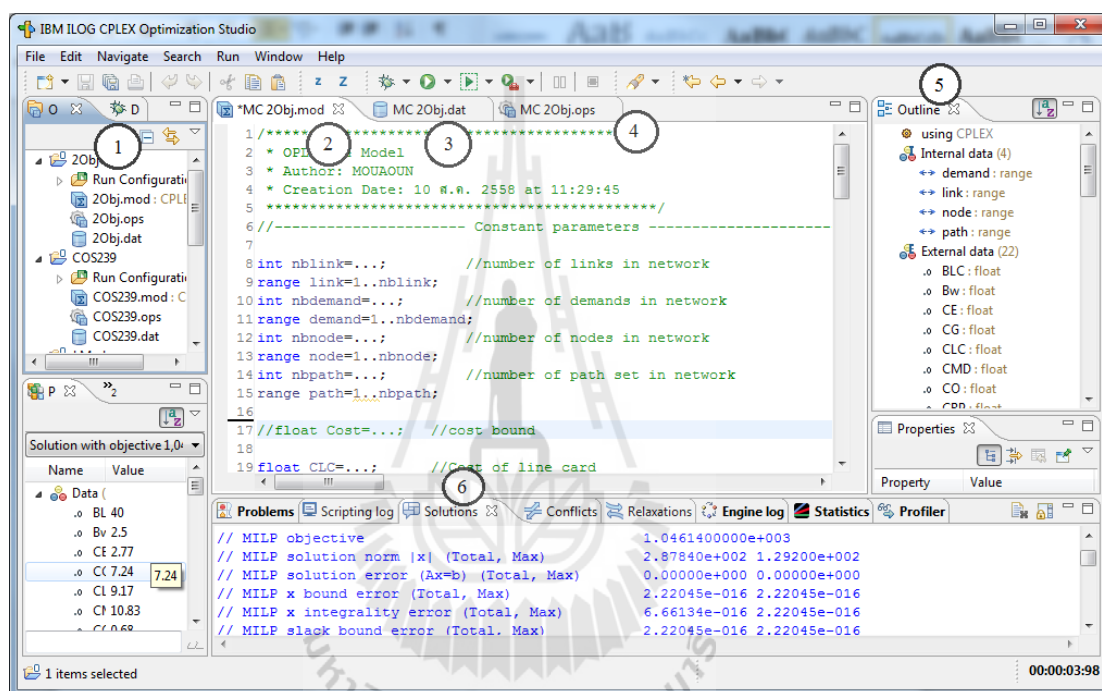
| $J$ | $K$ | $P$ | จำนวนตัวแปรตัดสินใจ | Size search space | จำนวนเงื่อนไข |
|-----|-----|-----|---------------------|-------------------|---------------|
| 5   | 5   | 3   | 30                  | 1.05E+06          | 35            |
| 5   | 5   | 4   | 35                  | 3.36E+07          | 35            |
| 5   | 5   | 5   | 40                  | 1.07E+09          | 35            |
| 5   | 6   | 3   | 30                  | 1.05E+06          | 36            |
| 5   | 7   | 3   | 33                  | 8.39E+06          | 37            |
| 5   | 8   | 3   | 36                  | 6.71E+07          | 38            |
| 5   | 10  | 3   | 39                  | 5.37E+08          | 40            |
| 5   | 15  | 3   | 45                  | 3.44E+10          | 45            |
| 5   | 20  | 3   | 60                  | 1.13E+15          | 50            |
| 10  | 5   | 3   | 75                  | 3.69E+19          | 65            |
| 10  | 5   | 4   | 45                  | 3.36E+07          | 65            |
| 10  | 5   | 5   | 50                  | 1.07E+09          | 65            |
| 10  | 5   | 6   | 55                  | 3.44E+10          | 65            |
| 10  | 5   | 7   | 60                  | 1.10E+12          | 65            |
| 10  | 5   | 8   | 65                  | 3.52E+13          | 65            |
| 10  | 5   | 9   | 70                  | 1.13E+15          | 65            |
| 10  | 5   | 10  | 75                  | 3.60E+16          | 65            |
| 10  | 5   | 8   | 80                  | 1.15E+18          | 65            |

ตารางที่ 3.3 ขนาดของปัญหา (ต่อ)

| <i>J</i> | <i>K</i> | <i>P</i> | จำนวนตัวแปรตัดสินใจ | Size search space | จำนวนเงื่อนไข |
|----------|----------|----------|---------------------|-------------------|---------------|
| 10       | 6        | 8        | 70                  | 1.13E+15          | 66            |
| 10       | 7        | 8        | 78                  | 2.88E+17          | 67            |
| 10       | 8        | 8        | 86                  | 7.38E+19          | 68            |
| 10       | 9        | 8        | 94                  | 1.89E+22          | 69            |
| 10       | 10       | 8        | 102                 | 4.84E+24          | 70            |
| 10       | 15       | 8        | 110                 | 1.24E+27          | 75            |
| 10       | 20       | 8        | 150                 | 1.36E+39          | 80            |
| 5        | 10       | 8        | 190                 | 1.50E+51          | 40            |
| 6        | 10       | 8        | 95                  | 3.87E+25          | 46            |
| 7        | 10       | 8        | 98                  | 7.74E+25          | 52            |
| 8        | 10       | 8        | 101                 | 1.55E+26          | 58            |
| 9        | 10       | 8        | 104                 | 3.09E+26          | 64            |
| 10       | 10       | 8        | 107                 | 6.19E+26          | 70            |
| 15       | 10       | 8        | 110                 | 1.24E+27          | 100           |
| 20       | 10       | 8        | 125                 | 3.96E+28          | 130           |

### 3.5 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

ในการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาผลคำตอบที่ดีที่สุดนั้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio โดยผู้วิจัยได้ทำการแปลงสมการคณิตศาสตร์ให้เป็นภาษาของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX โดยโปรแกรมนี้ใช้อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแก้ปัญหของการโปรแกรมเชิงเส้นในการหาคำตอบที่ต้องการ หน้าต่างของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

1. หมายเลข 1 (opl project) แสดงไฟล์โครงการ (project) ที่เปิดอยู่ ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ โมเดลไฟล์ (\*.mod) คำค่าไฟล์ (\*.dat) และ เซตตั้งไฟล์ (\*.ops)
2. หมายเลข 2 (model file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่คำสั่งที่ใช้คำนวณหาค่าที่ดีที่สุด โดยคำสั่งเหล่านี้ได้แปลงมาจากสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข
3. หมายเลข 3 (data file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่ข้อมูลที่เป็นตัวแปร ทั้งที่อยู่ในรูปของตัวแปรค่าเดียวและในรูปของเมตริกซ์ (matrix) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกเรียกใช้ในการคำนวณโดยคำสั่งในโมเดลไฟล์



4. หมายเลข 4 (setting file editing area) แสดงหน้าต่างสำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อคำนวณคำตอบที่ดีที่สุดให้โครงการ เช่น การจำกัดเพดานของเวลาและหน่วยความจำ (memory) เป็นต้น

5. หมายเลข 5 (outline view) แสดงโครงสร้างของข้อมูลที่อยู่ในหน้าต่างของโมเดลไฟล์ คาด้าไฟล์และเซตคิงไฟล์ จัดเรียงข้อมูลให้แสดงในรูปแบบรายการเพื่อง่ายต่อการตรวจสอบ

6. หมายเลข 6 (solutions log area) แสดงคำตอบที่โปรแกรมทำการคำนวณพบและพิจารณาว่าน่าจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดได้ (feasible solution) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกบันทึกไว้เรื่อย ๆ จนกระทั่งโปรแกรมทำการคำนวณพบคำตอบที่ดีที่สุด (final solution)

คำสั่งของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ที่แสดงในตารางที่ 3.4 นั้นเป็นการแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบสองวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรมเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการวางแผนทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีความไม่สมดุลของทราฟฟิกน้อยที่สุดรวมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพที่สุดภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก ประกอบไปด้วยส่วนประกอบสามส่วน คือ ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข

ตารางที่ 3.4 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;                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| $\omega_j$           | dvar int w[link];                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| $Nf_j$               | dvar int fj[link];                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| $MD_j$               | dvar int MD[link];                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ | Objective function                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| สมการ(3.5)           | Minimize w1*(((sum(j in link)(abs(r[j] - (sum(j in link)r[j])/nblink)))/nblink)- f1_min)/(f1_max - f1_min)) + w2*(((sum(m in node)(PLC*Vm[m]) + sum(m in node)(PRP*Y[m]) + 2*sum(k in demand)(PTR*beta[k]) + sum(j in link)(PO*w[j]) + sum(j in link)(PMD*MD[j]) + sum(j in link)(PE*EA[j]*fj[j] + PG*EG[j]*fj[j]) )- f2_min)/(f2_max - f2_min)); |

ตารางที่ 3.4 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม  
IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (ต่อ)

|             |                                                                                            |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| เงื่อนไข    | subject to {                                                                               |
| สมการ(3.6)  | ct1 : forall (k in demand) sum(p in path)f[k][p]==1;                                       |
| สมการ(3.7)  | ct2 : forall (j in link) sum(k in demand, p in path)x[k]*s[k][p][j]*f[k][p]<br><= Bw*w[j]; |
| สมการ(3.8)  | ct3 : forall (j in link) w[j] <= Wf*f[j];                                                  |
| สมการ(3.9)  | ct4 : forall (j in link) w[j] <= WMD*MD[j];                                                |
| สมการ(3.10) | ct5 : forall (j in link) w[j] >= 0;                                                        |
| สมการ(3.11) | ct6 : forall (j in link) f[j] >= 0;                                                        |
| สมการ(3.12) | ct7 : forall (j in link) MD[j] >= 0;                                                       |



## บทที่ 4

### การทดลองและวิเคราะห์ผลการวางแผนกราฟฟิคเพื่อความสะดวกของกราฟฟิค ภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิคสำหรับเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

เนื้อหาก่อนหน้านี้ได้เสนอแนวคิดของงานวิจัยคือ การหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบสองวัตถุประสงค์ ซึ่งได้พิจารณาการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค์ โดยวัตถุประสงค์ที่หนึ่ง คือ ต้องการให้มีความไม่สมดุลของกราฟฟิคในเครือข่ายที่น้อยที่สุดและวัตถุประสงค์ที่สอง คือ ต้องการให้มีการใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิคในเครือข่าย IP over WDM ที่น้อยที่สุด โดยใช้รูปแบบการแก้ปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มในการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยแปลงวัตถุประสงค์เงื่อนไข และข้อจำกัดต่าง ๆ ในทางทฤษฎีให้เป็นสมการคณิตศาสตร์ เนื่องจากการออกแบบด้วยสมการคณิตศาสตร์นั้นมีข้อดี คือ ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของผลการทดลองที่ออกแบบโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนจริง รวมทั้งสามารถออกแบบได้ในระยะเวลาที่จำกัด และนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่ายที่มีปริมาณกราฟฟิคจำนวนมาก

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงการพิจารณาการแลกเปลี่ยน (trade off) ระหว่างสองวัตถุประสงค์ โดยใช้เทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method) เพื่อแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นสมการวัตถุประสงค์เดียว แล้วนำคำตอบที่ได้จากสมการมาวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของทั้งสองวัตถุประสงค์จากกราฟความสัมพันธ์ที่มีการแปรผกผันกัน โดยสิ่งที่ทำให้คำตอบที่ดีที่สุดเปลี่ยนแปลงไป คือค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ซึ่งในบทนี้ได้แสดงความสำคัญของค่าถ่วงน้ำหนักที่มีผลกระทบต่อคำตอบที่ดีที่สุด โดยคำนึงถึงการเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่ายและคำนึงถึงข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงถึงการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดสำหรับการขนส่งกราฟฟิคและความจุที่เพียงพอเพื่อที่จะรองรับกราฟฟิคที่มีความต้องการในการขนส่งในเครือข่ายด้วยการเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิค สำหรับเนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ 4.1 การใช้พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิคบนเครือข่าย IP over WDM 4.2 การศึกษาผลกระทบต่อความไม่สมดุลของกราฟฟิคจากการใช้ชุดเส้นทางเลือกที่ต่างกันสำหรับการขนส่งกราฟฟิค 4.3 การศึกษาผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดี

ที่สุดของ Multi Objective Optimization Model 4.4 การศึกษาผลกระทบของปริมาณทราฟฟิกที่  
ต้องการขนส่งระหว่างคู่โหนดในเครือข่ายต่อความไม่สมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานใน  
เครือข่าย 4.5 การเปรียบเทียบความไม่สมดุลของทราฟฟิก การใช้พลังงานในเครือข่ายและต้นทุน  
ค่าใช้จ่ายของ MOO Model และ MC Model 4.6 สรุปผลการทดลองของบทที่ 4

#### 4.1 การใช้พลังงานสำหรับการขนส่งทราฟฟิกบนเครือข่าย IP over WDM

การใช้พลังงานของเครือข่าย IP over WDM นั้นมีการใช้พลังงานที่สูงมาก เพื่อให้มีการใช้  
พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงทำการพิจารณาการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่ายที่ใช้ใน  
การขนส่งทราฟฟิกข้อมูลภายในเครือข่าย IP over WDM ดังรูปที่ 4.1 อ้างอิงจากงานวิจัยของ Yunlei  
Lui, Gangxiang Shen, and Weidong Shao (2013) แสดงถึงการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่างๆภายใน  
เครือข่าย ซึ่งองค์ประกอบต่างๆ ของการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกข้อมูลในสถาปัตยกรรม  
เครือข่าย IP over WDM นั้นมีการใช้พลังงานอยู่สองส่วนที่สำคัญ คือ ชั้นไอพี (IP layer) และชั้นการ  
มัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น (WDM layer) ในแต่ละชั้นจะมีการใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

ในส่วน of ชั้นไอพีประกอบไปด้วยการใช้พลังงานของอุปกรณ์การประมวลผลทาง  
อิเล็กทรอนิกส์ เป็นการประมวลผลเพื่อเลือกเส้นทางการขนส่งให้กับทราฟฟิกที่ไหลผ่านเข้าสู่  
แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card) กำหนดด้วยพารามิเตอร์  $P_{LC}$  และการใช้พลังงาน  
ของอุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (route processor) เป็นการประมวลผลเพื่อกำหนดเส้นทาง กำหนด  
ด้วยพารามิเตอร์  $P_{RP}$

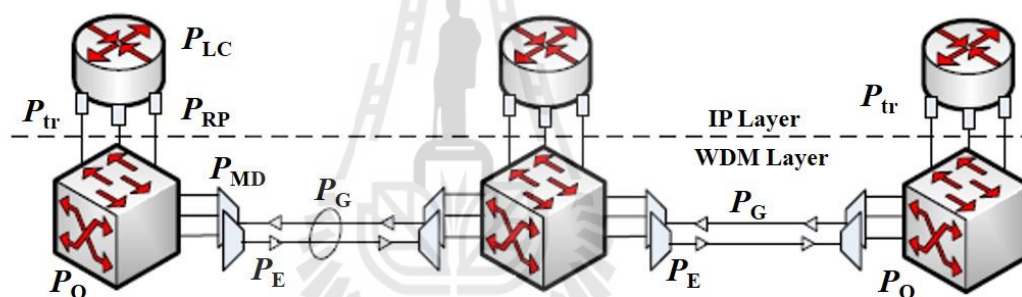
การใช้พลังงานของเครื่องทรานสปอนเดอร์ ใช้สำหรับการแปลงสัญญาณระหว่าง  
สัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณแสง เพื่อขนส่งทราฟฟิกข้อมูลนี้ต่อไปยังอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทาง  
แสง ซึ่งอยู่ในตำแหน่งระหว่างชั้นไอพีและชั้น WDM กำหนดด้วยพารามิเตอร์  $P_{tr}$

ในส่วน of ชั้น WDM ประกอบไปด้วยการใช้พลังงานของอุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง  
(Optical Cross Connect : OXC) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนเส้นทางเดินของแสงในเครือข่ายเส้น  
ใยแก้วนำแสง (Fiber optical network) เพื่อให้ข้อมูลเดินทางไปยังปลายทางที่ต้องการได้ กำหนดด้วย  
พารามิเตอร์  $P_O$

การใช้พลังงานของอุปกรณ์รวมสัญญาณทางแสง (Optical multiplexer) เป็นอุปกรณ์แสงที่ทำ  
หน้าที่รวมสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันแล้วป้อนเข้าไปในเส้นใยแสงเส้นเดียว กำหนดด้วย  
พารามิเตอร์  $P_{MD}$

การใช้พลังงานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (Erbium-Doped Fiber Amplifier: EDFA) เนื่องจากสัญญาณที่เดินทางในระหว่างเส้นทางการขนส่งจะมีการลดทอนสัญญาณเกิดขึ้น จึงต้องมีอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณแสงทุกช่องสัญญาณพร้อมกันให้มีขนาดความเข้มแสงมากพอที่จะเดินทางต่อไปไกลๆ ได้ นอกจากการขยายสัญญาณระหว่างเส้นทางการเชื่อมโยงแล้ว ยังมีการขยายสัญญาณเมื่อทราฟฟิกมีการขนส่งออกจากโหนดต้นทางและมีการขยายสัญญาณเมื่อสัญญาณเดินทางไปถึงโหนดปลายทางอีกด้วย กำหนดด้วยพารามิเตอร์  $P_E$

การใช้พลังงานของอุปกรณ์ทวนสัญญาณ (regenerators) เป็นการทวนสัญญาณในชั้น WDM ซึ่งทำหน้าที่ปรับสัญญาณพัลส์แสงที่บานออก เมื่อเดินทางในสายส่งเส้นใยแก้วนำแสง โดยที่ปรับขนาดของพัลส์ที่บานออกให้มีขนาดคงที่ตลอดการเดินทางอยู่เสมอ ซึ่งการใช้ตัวทวนสัญญาณจะเกิดขึ้นระหว่างเส้นทางการเชื่อมโยงของโหนดต้นทาง-ปลายทาง กำหนดด้วยพารามิเตอร์  $P_G$



รูปที่ 4.1 โครงสร้างสถาปัตยกรรม IP over WDM

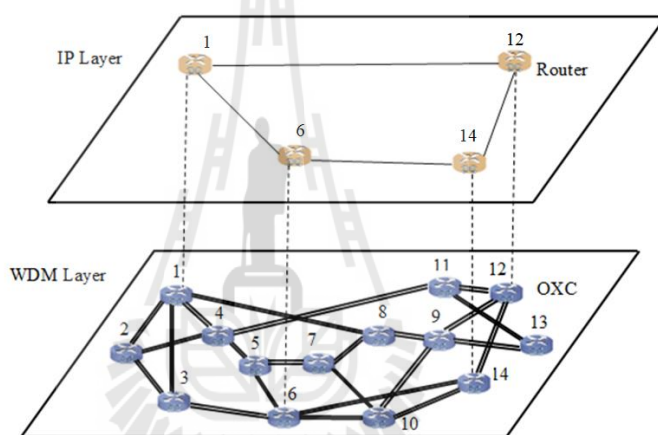
## 4.2 การศึกษาผลกระทบต่อความไม่สมดุลของทราฟฟิกจากการใช้ชุดเส้นทางเลือกที่ต่างกันสำหรับการขนส่งทราฟฟิก

ในส่วนนี้เป็นการนำเสนอถึงผลกระทบต่อความไม่สมดุลของทราฟฟิกจากการใช้ชุดเส้นทางเลือกสำหรับการขนส่งทราฟฟิกที่ต่างกัน โดยการขนส่งปริมาณทราฟฟิกจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางด้วยการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดนั้นต้องคำนึงถึงเรื่องข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ข้อจำกัดของความจุบนข่ายเชื่อมโยง ข้อจำกัดของโมดูลทางออปติคัล และข้อจำกัดของระยะทาง เป็นต้น ซึ่งปัจจัยในการเลือกเส้นทางของงานวิจัยนี้ได้ใช้ขั้นตอนวิธีของไดคส์ตรา (Dijkstra's algorithm) ดังที่นำเสนอในหัวข้อที่ 2.9

ในการดำเนินการทดลองด้วยการใช้เครือข่าย IP over WDM ของเครือข่าย NSFNET ที่แสดงในรูปที่ 4.2 โดยมีส่วนประกอบคือ ในชั้น WDM ประกอบด้วย OXC จำนวน 14 โหนด และมีข่าย

เชื่อมโยงทางกายภาพ 44 ข่ายเชื่อมโยง การทดลองนี้พิจารณาจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 180 คู่โหนดตามที่ใช้นในงานวิจัยของ Miyao,Y, Saito,H. (1998) จากรูปที่ 4.2 ได้แสดงตัวอย่างของการขนส่งทราฟฟิกในชั้นไอพีระหว่าง 4 คู่โหนด คือ คู่โหนด 1-6, 1-12, 6-14 และ คู่โหนด 14-12

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของการใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือกที่ต่างกัน ใน 3 กรณีคือ 5 ชุดเส้นทาง 10 ชุดเส้นทางและ 15 ชุดเส้นทาง จากนั้นผู้วิจัยจะนำผลการทดลองที่ส่งผลกระทบต่อความไม่สมดุลของทราฟฟิกจากการใช้ชุดเส้นทางเลือกมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Meesublak, K. (2009) ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ การลดค่าใช้จ่ายของการดำเนินงานเครือข่ายให้น้อยที่สุด โดยผู้วิจัยเรียกว่า *Minimize Cost Model (MC Model)*



รูปที่ 4.2 โครงสร้างเครือข่าย IP over WDM ของ NSFNET

พารามิเตอร์และค่าคงที่ที่ใช้ในการทดลองในหัวข้อนี้แสดงดังตารางที่ 4.1 ได้แก่ ต้นทุนต่อหน่วยของโมดูลทางแสง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเป็นราคาทั่วไปที่อยู่บนพื้นฐานของการกำหนดราคาของอุตสาหกรรมในประเทศไทย ซึ่งมีหน่วยเป็น cost unit (c.u.) และ การทดลองนี้ได้พิจารณาทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอนที่มีลักษณะการกระจายแบบปกติ (normal distribution) ซึ่งทราฟฟิกของการกระจายแบบปกติมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 225 Mbps และ 25 Mbps ตามลำดับ ในการทดลองได้ทำการทดลองสำหรับสองระดับของการรับประกันความไม่แน่นอนของปริมาณ ทราฟฟิกได้แก่ 90% และ 99% แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ค่าคงที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบความไม่สมดุลของทราฟฟิก

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

ตารางที่ 4.2 การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกมีความไม่แน่นอนที่มีลักษณะการกระจายแบบปกติ

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

สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้สำหรับการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบความไม่สมดุลของทราฟฟิกนี้ แสดงดังสมการที่ (4.1) อ้างอิงจากงานวิจัยของ Paramet Keeritnatchairara and Chutima Prommak. (2012) โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้มีความไม่สมดุลของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM ที่น้อยที่สุด โดยผู้วิจัยได้เรียกว่า *MAD Model* (Minimizing mean Absolute Deviation Model) และปัจจัยต่างๆที่เป็นข้อกำหนดอื่น ๆ เช่นลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิก การจำกัดงบประมาณค่าใช้จ่ายบนเครือข่าย และคุณสมบัติของโมดูลทางแสงได้แสดงอยู่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการเงื่อนไขที่ (4.2)-(4.10) การแปลงวัตถุประสงค์และเงื่อนไขให้เป็นสมการคณิตศาสตร์นี้ได้มีการใช้ตัวแปรต่างๆ ซึ่งมีคำนิยามดังต่อไปนี้

เซตของตัวแปร :

$A$  คือ เซตของข่ายเชื่อมโยงในชั้น WDM สำหรับเครือข่าย IP over WDM

$D$  คือ เซตของโหนดทราฟฟิก

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

ตัวแปรตัดสินใจ :

- $y_j$  คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนเต็ม เป็นตัวแปรที่ระบุจำนวนของโมดูลทางแสง (optical modules) ที่เลือกให้ใช้งานสำหรับทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบ่นข่ายเชื่อมโยง  $j$  โดยที่  $\forall j \in A$
- $z_j$  คือ ตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไบนารี  $\{0, 1\}$  เป็นตัวแปรที่ระบุการเลือกใช้จ่ายเชื่อมโยง 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  $p$  จากเซตของชุดเส้นทางที่กำหนดไว้ล่วงหน้า และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่ได้เลือกใช้งานเส้นทางนั้น โดยที่  $\forall p \in P^k$  และ  $\forall k \in D$

พารามิเตอร์ค่าคงที่ :

- $M$  คือ ความจุของโมดูลทางแสง
- $B_j$  คือ ความจุบ่นข่ายเชื่อมโยง  $j$  โดยที่  $\forall j \in A$
- $C_j$  คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายของโมดูลทางแสงที่มีการใช้งานบ่นข่ายเชื่อมโยง  $j$  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 ความจุที่จัดเตรียมสำหรับรองรับทราฟฟิก  $k$  โดยที่  $\forall k \in D$  ซึ่งสามารถดูรายละเอียดของพารามิเตอร์  $x_k$  เพิ่มเติมได้ในหัวข้อที่ 2.12
- $\delta_j^{k,p}$  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  $\forall j \in A$
- $n$  คือ จำนวนของข่ายเชื่อมโยงในเซต  $A$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อให้เกิดความไม่สมดุลของทราฟฟิกบ่นข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพภายในเครือข่าย IP over WDM ที่น้อยที่สุดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

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



สมการเงื่อนไขของงานวิจัยในบทนี้ประกอบด้วยสมการเงื่อนไขข้อจำกัดด้านงบประมาณ ค่าใช้จ่าย สมการเงื่อนไขข้อจำกัดของทรัพยากรในด้านต่าง ๆ และสมการเงื่อนไขการเลือกใช้เส้นทาง ซึ่งสมการเหล่านี้เป็นเงื่อนไขข้อจำกัดของปัญหาในการวิจัย ที่จะทำให้ได้มาซึ่งวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ประกอบด้วย 9 สมการ โดยสามารถแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

*กลุ่มที่ 1 เงื่อนไขงบประมาณค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานบนเครือข่าย*

1. การระบุข้อจำกัดของงบประมาณค่าใช้จ่ายบนเครือข่าย ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าใช้จ่ายของการใช้ความจุของเครือข่ายซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ครอบคลุมถึงโมดูลทางแสงและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งการใช้งานข่ายเชื่อมโยงสำหรับการขนส่งข้อมูลในเครือข่าย

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

*กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย*

2. เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนของโมดูลทางแสงนั้น มีเพียงพอในการให้บริการบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  ดังนั้นข่ายเชื่อมโยง  $j$  สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอพิตราฟฟิกที่ขนส่งผ่านข่ายเชื่อมโยง  $j$  ซึ่งขนาดความจุสำหรับรองรับความแปรปรวนของทราฟฟิก  $k$  กำหนดไว้ด้วยพารามิเตอร์  $X_k$

$$\sum_{k \in D} \sum_{p \in P^*} \delta_j^{k,p} f^{k,p} X_k \leq M y_j \quad \forall j \in A \quad (4.3)$$

โดยที่พารามิเตอร์  $X_k$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.11) ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.10

3. เพื่อให้แน่ใจว่าการเลือกใช้งานจำนวนโมดูลทางแสงนั้น มีการใช้ความจุไม่เกินขอบเขตของความจุ ( $B_j$ ) บนข่ายเชื่อมโยง  $j$  เงื่อนไขนี้จึงเป็นการจำกัดของจำนวน โมดูลทางแสงที่สามารถใช้ได้บนข่ายเชื่อมโยง  $j$

$$M y_j \leq B_j \quad \forall j \in A \quad (4.4)$$

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

$$y_j \leq r_j \quad \forall j \in A \quad (4.5)$$

5. ความจุที่ใช้รองรับปริมาณทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  คือ ค่าที่ได้มาจากการคำนวณในสมการที่ (2.11) ซึ่งความจุที่ใช้รองรับปริมาณทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของปริมาณทราฟฟิกที่มีอยู่บนข่ายเชื่อมโยง  $j$  กล่าวคือ  $r_j$  เป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

$$r_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (4.6)$$

6. จำนวนโมดูลทางแสงที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  มีการตั้งค่าการใช้งานเมื่อมีทราฟฟิกขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  ดังนั้นจำนวนโมดูลทางแสงที่ใช้งานบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของจำนวนโมดูลทางแสงที่มีการตั้งค่าอยู่บนข่ายเชื่อมโยง  $j$  กล่าวคือ  $y_j$  เป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

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

กลุ่มที่ 3 เงื่อนไขในการเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย

7. สำหรับการเลือกเส้นทางในเครือข่าย เพื่อให้ไม่ให้เกิดการเลือกเส้นทางที่ซ้ำซ้อน เงื่อนไขนี้จะระบุว่าทราฟฟิก  $k$  ให้สามารถเลือกได้เพียงหนึ่งเส้นทางจากเส้นทางที่มีการกำหนดไว้ในชุดเส้นทางเลือก  $P^k$

$$\sum_{p \in P^k} f^{k,p} = 1 \quad \forall k \in D \quad (4.8)$$

8. เงื่อนไขนี้แสดงการใช้จ่ายเชื่อมโยงบนเครือข่าย โดยกำหนดให้ข่ายเชื่อมโยง  $z_j$  นั้นต้องมีการตั้งค่าให้ใช้งาน เมื่อทราฟฟิก  $k$  มีการเลือกใช้เส้นทาง  $p$  ในการขนส่งทราฟฟิก แล้วเส้นทาง  $p$  นั้นมีการใช้งานข่ายเชื่อมโยง  $j$

$$\delta_j^{k,p} f^{k,p} \leq z_j \quad \forall j \in A, \forall k \in D, \forall p \in P^k \quad (4.9)$$

9. สำหรับการใช้งานข่ายเชื่อมโยง เพื่อให้แน่ใจว่าข่ายเชื่อมโยง  $z_j$  ไม่ได้มีการตั้งค่าให้ใช้งาน เมื่อไม่มีการขนส่งทราฟฟิกผ่านทางข่ายเชื่อมโยง  $j$  เงื่อนไขนี้จะระบุว่าหากไม่มีทราฟฟิกขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  แล้วข่ายเชื่อมโยง  $z_j$  ต้องไม่มีการตั้งค่าให้ใช้งาน กล่าวคือเป็นการบังคับให้  $z_j = 0$  เมื่อไม่มีทราฟฟิกไหลผ่านข่ายเชื่อมโยง  $j$

$$z_j \leq r_j \quad \forall j \in A \quad (4.10)$$

สำหรับสมการที่ (4.11) ใช้ในการคำนวณความจุที่รองรับปริมาณทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยง โดยเป็นการคำนวณปริมาณรวมของความจุที่ใช้รองรับไอพีทราฟฟิกที่มีความต้องการขนส่งบนข่ายเชื่อมโยง  $j$

$$r_j = \sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} f^{k,p} x_k \quad \forall j \in A \quad (4.11)$$

$r_j$  คือ พารามิเตอร์ที่เป็นจำนวนเต็ม ซึ่งระบุความจุที่ใช้งานสำหรับการขนส่งทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยง  $j$  ค่านี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรตัดสินใจการเลือกใช้เส้นทางสำหรับทราฟฟิก  $f^{k,p}$  โดยที่  $\forall j \in A$

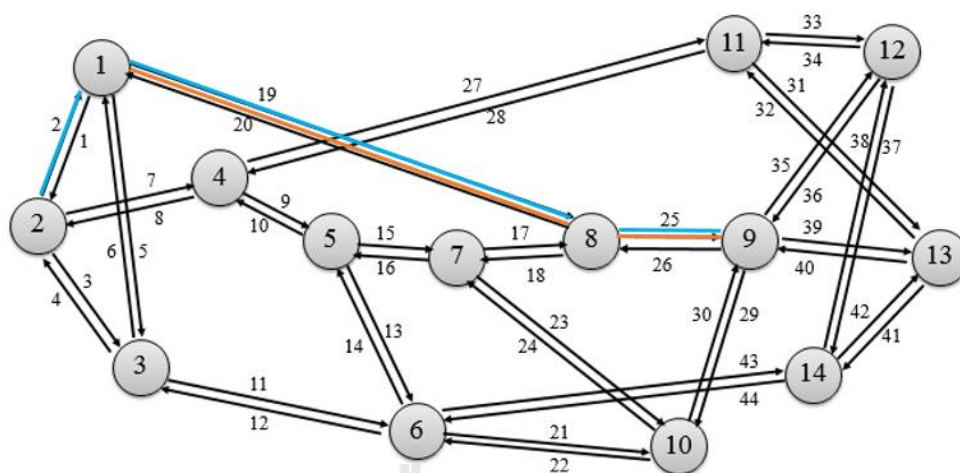
#### 4.2.1 ตัวอย่างเส้นทางสำหรับการขนส่งทราฟฟิก

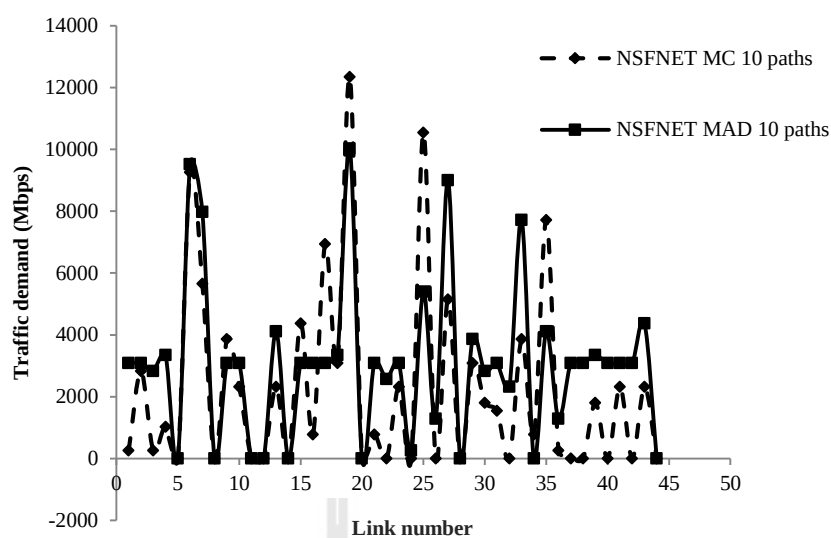
จากการทดลองด้วยการใช้เครือข่าย NSFNET พิจารณาจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 180 คู่โหนด ผลการทดลองที่ได้คือ เส้นทางสำหรับการขนส่งทราฟฟิกของคู่โหนด 180 คู่โหนด ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะยกตัวอย่างจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกมา 2 คู่โหนดจากทั้งหมด 180 คู่โหนด และกำหนดชุดเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับขนส่งทราฟฟิก 10 ชุด เส้นทาง

คู่โหนดที่ 1 ขนส่งทราฟฟิกจากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 9 ได้ใช้เส้นทางที่ 1 คือ ขนส่งทราฟฟิกผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ 19 และข่ายเชื่อมโยงที่ 25 แสดงดังรูปที่ 4.3

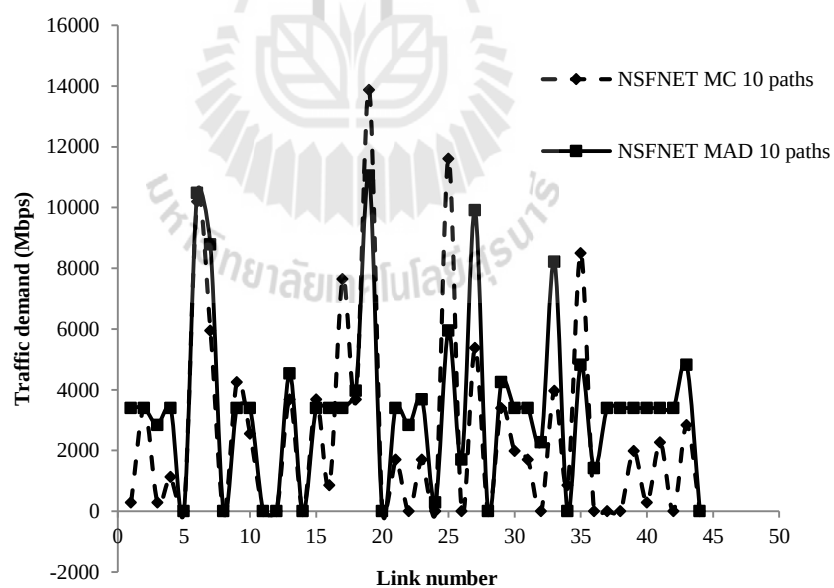
คู่โหนดที่ 2 ขนส่งทราฟฟิกจากโหนดที่ 2 ไปยังโหนดที่ 9 ได้ใช้เส้นทางที่ 1 คือ ขนส่งทราฟฟิกผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ 2 ข่ายเชื่อมโยงที่ 19 และข่ายเชื่อมโยงที่ 25 แสดงดังรูปที่ 4.3

สังเกตได้ว่าการขนส่งทราฟฟิกของทั้งสองคู่โหนดนี้ ใช้ข่ายเชื่อมโยงสำหรับขนส่งทราฟฟิกเหมือนกันคือข่ายเชื่อมโยงที่ 19 และข่ายเชื่อมโยงที่ 25 ทำให้สองข่ายเชื่อมโยงนี้มีปริมาณทราฟฟิกมาก อาจเป็นเพราะเส้นทางที่ใช้สำหรับการขนส่งทราฟฟิกของทั้งสองคู่โหนดนั้น จำเป็นต้องเลือกใช้ข่ายเชื่อมโยงที่ 19 และข่ายเชื่อมโยงที่ 25 สำหรับการขนส่งทราฟฟิกเมื่อทราบถึงการเลือกใช้เส้นทางสำหรับการขนส่งทราฟฟิกในแต่ละคู่โหนดว่าใช้เส้นทางใดบ้างสำหรับขนส่ง ทราฟฟิก คำตอบที่ได้นี้แสดงให้เห็นถึงความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกที่สามารถเกิดขึ้นได้มากที่สุด ดูได้จากกราฟกระจายของปริมาณทราฟฟิก อาจจะยกเว้นในบางข่ายเชื่อมโยงที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ทำให้ข่ายเชื่อมโยงนั้นมีปริมาณทราฟฟิกสูงกว่าข่ายเชื่อมโยงอื่น

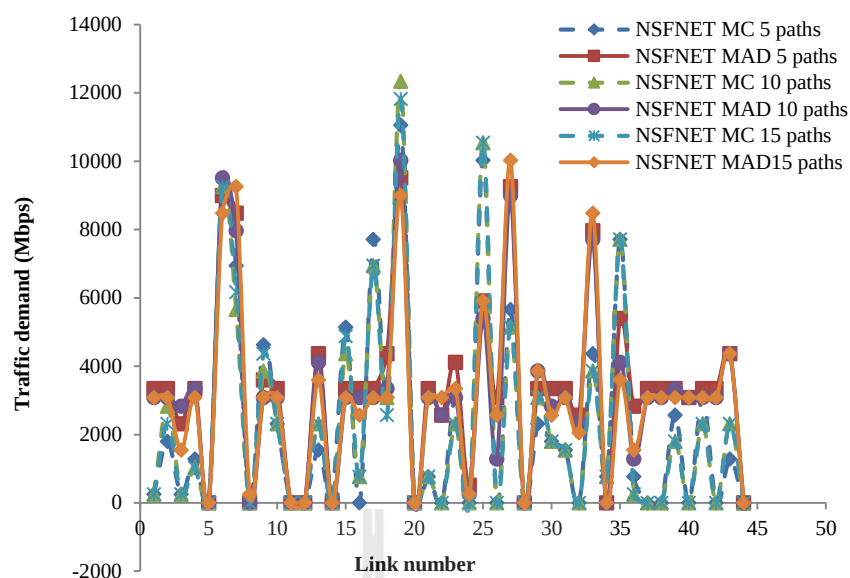




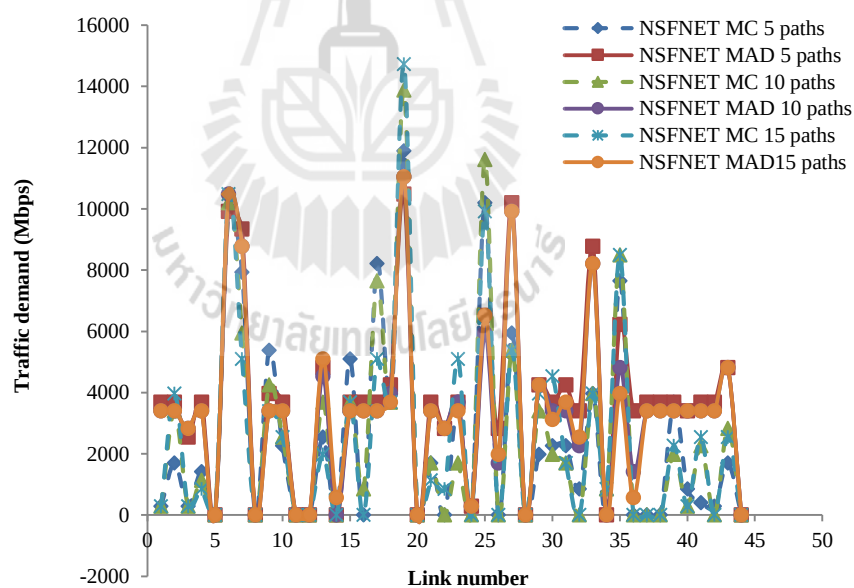
รูปที่ 4.4 ปริมาณของกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายโดยใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือก 10 ชุด  
เส้นทางสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%



รูปที่ 4.5 ปริมาณของกราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายโดยใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือก 10 ชุด  
เส้นทางสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%



รูปที่ 4.6 ปริมาณของกราฟฟิคนน่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายโดยใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือกที่ต่างกันทั้ง 3 กรณีสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%



รูปที่ 4.7 ปริมาณของกราฟฟิคนน่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายโดยใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือกที่ต่างกันทั้ง 3 กรณีสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%

เมื่อเปรียบเทียบความไม่สมดุลของทราฟฟิกจากการใช้แบบจำลองทั้งสองแบบจำลอง ดังตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงค่าดัชนีความไม่สมดุลของทราฟฟิก (Unbalanced Index) ในเครือข่าย NSFNET สำหรับกรณีที่มีการรับประกันความไม่แน่นอนทราฟฟิกที่ 90% และ 99% จากการใช้ชุดเส้นทางเลือกที่ต่างกัน 3 กรณีคือ 5 ชุดเส้นทาง 10 ชุดเส้นทางและ 15 ชุดเส้นทางจะเห็นว่าค่าดัชนีความไม่สมดุลของทราฟฟิกจากการใช้แบบจำลอง MC จะได้ค่าดัชนีความไม่สมดุลของทราฟฟิกที่สูงกว่าการใช้แบบจำลอง MAD แสดงว่าแบบจำลอง MAD สามารถกระจายทราฟฟิกที่มีอยู่ในการขนส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพได้ดีกว่าแบบจำลอง MC และสังเกตได้อีกว่าจากการใช้ชุดเส้นทางที่ 5 ชุดเส้นทาง ความไม่สมดุลของทราฟฟิก IP ของทั้งสอง แบบจำลองมีปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ชุดเส้นทางที่ 10 ชุดเส้นทางและ 15 ชุดเส้นทางเนื่องจากมีชุดเส้นทางที่ใช้สำหรับการขนส่งทราฟฟิกเพียง 5 เส้นทาง ทำให้มีการเลือกใช้ข่ายเชื่อมโยงที่ซ้ำกัน ทำให้ข่ายเชื่อมโยงนั้นมีปริมาณทราฟฟิกที่สูง ทำให้ค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิก IP จากการใช้ชุดเส้นทางที่ 5 ชุดเส้นทางมีค่ามากกว่าการใช้ชุดเส้นทางที่ 10 ชุดเส้นทาง และ 15 ชุดเส้นทางซึ่งมีจำนวนเส้นทางเลือกสำหรับการขนส่งทราฟฟิกที่มากกว่าและจากการใช้ชุดเส้นทางที่ 10 ชุดเส้นทางและ 15 ชุดเส้นทาง ความไม่สมดุลของทราฟฟิก IP ของทั้ง 2 แบบจำลองมีปริมาณใกล้เคียงกัน นั่นหมายความว่าจำนวนเส้นทางที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อการเลือกเส้นทางที่จะทำให้เกิดความสมดุลของทราฟฟิกเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นเส้นทางที่มีระยะใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีความไม่สมดุลของทราฟฟิก (Unbalanced index)

| จำนวน<br>เส้นทางเลือก | ความไม่แน่นอนทราฟฟิก 90% |          |                 | ความไม่แน่นอนทราฟฟิก 99% |          |                 |
|-----------------------|--------------------------|----------|-----------------|--------------------------|----------|-----------------|
|                       | MC                       | MAD      | Improvement (%) | MC                       | MAD      | Improvement (%) |
| 5                     | 2361.183                 | 1654.828 | 29.91           | 2514.031                 | 1822.989 | 27.49           |
| 10                    | 2251.239                 | 1635.709 | 27.34           | 2487.609                 | 1801.927 | 27.56           |
| 15                    | 2251.244                 | 1635.709 | 27.34           | 2453.713                 | 1801.927 | 26.45           |

### 4.2.3 สรุปผลการทดลองหัวข้อที่ 4.2

สำหรับในหัวข้อนี้นำเสนอถึงผลกระทบต่อความไม่สมดุลของทราฟฟิกต่อการใช้ชุดเส้นทางเลือกสำหรับการขนส่งทราฟฟิกที่ต่างกัน สังเกตได้ว่าจากการใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือก 5 ชุด เส้นทาง โดยการใช้แบบจำลอง MAD สามารถเลือกเส้นทางในการส่งทราฟฟิกที่ทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงต่างๆ ได้มากกว่าการใช้แบบจำลอง MC แต่ก็ยังไม่ถึงกับสมดุลมากเมื่อเทียบการใช้จำนวนเส้นทางเลือกที่ 10 ชุดเส้นทาง และ 15 ชุดเส้นทางและจากการเปรียบเทียบค่าชี้วัดความสมดุลทราฟฟิก จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของทราฟฟิกจากแบบจำลอง MAD มีความสมดุลของทราฟฟิกมากกว่าการใช้แบบจำลอง MC ถึงประมาณ 30%

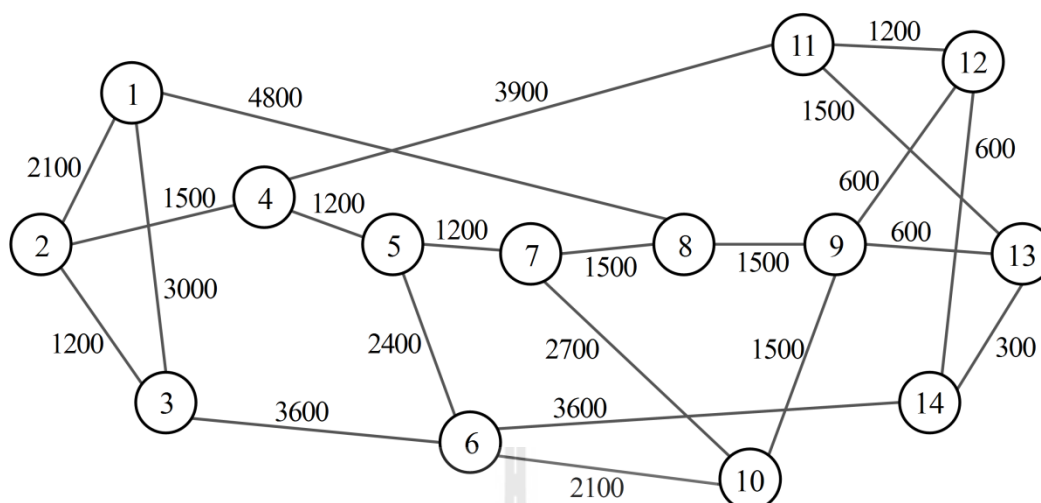
## 4.3 การศึกษาผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของ Multi-Objective Optimization Model

ในหัวข้อนี้ต้องการศึกษาผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก โดยสมการสองวัตถุประสงค์นี้ผู้วิจัยเรียกว่า *MOO Model (Multi-objective optimization model)* ดังได้อธิบายในบทที่ 3 ซึ่งพิจารณาการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค์โดยใช้เทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่ง คือต้องการลดค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกให้น้อยที่สุด ส่วนวัตถุประสงค์ที่สองที่พิจารณา การใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ซึ่งสมการที่ใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค์นั้นถูกแสดงดังสมการที่ (3.5) และใช้เงื่อนไขตามสมการที่ (3.6) - (3.12) ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

ในหัวข้อนี้ได้พิจารณาในเครือข่าย NSFNET แสดงดังรูปที่ 4.8 สำหรับทราฟฟิกที่มีความต้องการขนส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนดต้นทาง-ปลายทางในเครือข่าย NSFNET อ้างอิงจากงานวิจัยของ Miyao, Y. and Saito, H. (1998) เมื่อพิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90% เมื่อมีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 180 คู่โหนด

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองสำหรับเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของ ทราฟฟิก ส่วนตารางที่ 4.5 แสดงการใช้พลังงานของอุปกรณ์เครือข่าย และตารางที่ 4.6 แสดงการใช้ต้นทุนต่อหน่วยของค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์เครือข่าย เป็นราคาทั่วไปที่อยู่บนพื้นฐานของการกำหนดราคาของอุตสาหกรรมในประเทศไทย ซึ่งมีหน่วยเป็น cost unit (c.u.) ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นอินพุตในกระบวนการหาคำตอบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม





รูปที่ 4.8 โครงสร้างเครือข่าย NSFNET (ความยาวของสายเชื่อมโยงหน่วยเป็น km.)

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนทราฟฟิก

| พารามิเตอร์                                                                   | ค่า                   |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (S)                                          | 80 กิโลเมตร           |
| ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทวนสัญญาณ                                               | 400 กิโลเมตร          |
| แบนด์วิธของแต่ละความยาวคลื่น                                                  | 2.5 Gbps              |
| จำนวนความยาวคลื่นต่อเส้นใยแก้วนำแสง                                           | 40 ความยาวคลื่น       |
| จำนวนความยาวคลื่นต่ออุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ (multi/demultiplexer) | 80 ความยาวคลื่น       |
| แบนด์วิธของแต่ละแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก (line card)                     | 40 Gbps               |
| จำนวนแผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิกต่ออุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง (Route processor) | 16 แผงวงจร            |
| ระดับการรับประกันความไม่แน่นอน                                                | ค่าเฉลี่ย 90% และ 99% |

ตารางที่ 4.5 การใช้พลังงานของอุปกรณ์

| อุปกรณ์                             | ค่าพลังงาน (W)                      |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก       | 415 ต่อแผงวงจร <sup>1</sup>         |
| อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง              | 166 ต่อแผงวงจร <sup>2</sup>         |
| เครื่องทรานสปอนเดอร์ (Transponder)  | 34.5 ต่อความยาวคลื่น <sup>3</sup>   |
| อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFA)            | 25 ต่อเส้นใยแก้วนำแสง <sup>4</sup>  |
| อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Regenerator)      | 100 ต่อเส้นใยแก้วนำแสง <sup>5</sup> |
| อุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC)   | 1.5 ต่อความยาวคลื่น <sup>3</sup>    |
| อุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ | 811 ต่ออุปกรณ์ <sup>2</sup>         |

ตารางที่ 4.6 ต้นทุนค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์

| อุปกรณ์                             | ค่าใช้จ่าย (c.u.)                    |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| แผงวงจรควบคุมการไหลของทราฟฟิก       | 9.17 ต่อแผงวงจร <sup>6</sup>         |
| อุปกรณ์ประมวลผลเส้นทาง              | 16.67 ต่อแผงวงจร <sup>6</sup>        |
| เครื่องทรานสปอนเดอร์ (Transponder)  | 0.33 ต่อความยาวคลื่น <sup>6</sup>    |
| อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (EDFA)            | 2.77 ต่อเส้นใยแก้วนำแสง <sup>6</sup> |
| อุปกรณ์ทวนสัญญาณ (Regenerator)      | 7.24 ต่อเส้นใยแก้วนำแสง <sup>6</sup> |
| อุปกรณ์สลับช่องสัญญาณทางแสง (OXC)   | 0.68 ต่อความยาวคลื่น <sup>6</sup>    |
| อุปกรณ์รวมสัญญาณและอุปกรณ์แยกสัญญาณ | 10.83 ต่ออุปกรณ์ <sup>6</sup>        |

หมายเหตุ

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

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

<sup>3</sup> 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.

<sup>4</sup> Data sheet of Cisco ONS 15216 EDFA, August 2001.

<sup>5</sup> Dong, X., Lawey, A., El-Gorashi, T. E. H., and Elmirghani, J. M. H. “Energy-efficient core networks,” in Int. Conf. Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2012, pp. 1–9.

<sup>6</sup> R. Huelsermann, M. Gunkel, C. Meusburger, and D. A. Schupke, “Cost modeling and evaluation of capital expenditures in optical multilayer networks,” J. Opt. Netw., vol. 7, no. 9, pp. 814–833, Sept. 2008.

#### 4.3.1 ตัวอย่างเส้นทางเลือกสำหรับขนส่งทราฟฟิก

เนื่องจากการทดลองมีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 180 คู่โหนด ผู้วิจัยจะยกตัวอย่างจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกมา 1 คู่โหนดจากทั้งหมด 180 คู่โหนด และกำหนดชุดเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับขนส่งทราฟฟิก 10 ชุดเส้นทาง โดยที่จะเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 ( $w_1$ ) และค่าถ่วงน้ำหนักที่ 2 ( $w_2$ ) 3 ครั้ง ผลการทดลองที่ได้ คือ เส้นทางสำหรับการขนส่งทราฟฟิก เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 และค่าถ่วงน้ำหนักที่ 2 เปลี่ยนแปลง

ครั้งที่ 1 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 ( $w_1$ ) เท่ากับ 0 และค่าถ่วงน้ำหนักที่ 2 ( $w_2$ ) เท่ากับ 1

ผลที่ได้ โหนดที่ 2 ขนส่งทราฟฟิกไปยังโหนดที่ 9 โดยใช้ชุดเส้นทางที่ 8 มีการใช้ข่ายเชื่อมโยง ดังนี้  
ข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้งาน 7 - 9 - 13 - 40 - 42 - 43 แสดงดังรูปที่ 4.9

ครั้งที่ 2 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 ( $w_1$ ) เท่ากับ 0.32 และค่าถ่วงน้ำหนักที่ 2 ( $w_2$ ) เท่ากับ 0.68

ผลที่ได้ โหนดที่ 2 ขนส่งทราฟฟิกไปยังโหนดที่ 9 โดยใช้ชุดเส้นทางที่ 6 มีการใช้ข่ายเชื่อมโยง ดังนี้  
ข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้งาน 2 - 19 - 25 แสดงดังรูปที่ 4.9

ครั้งที่ 3 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 ( $w_1$ ) เท่ากับ 0.74 และค่าถ่วงน้ำหนักที่ 2 ( $w_2$ ) เท่ากับ 0.26

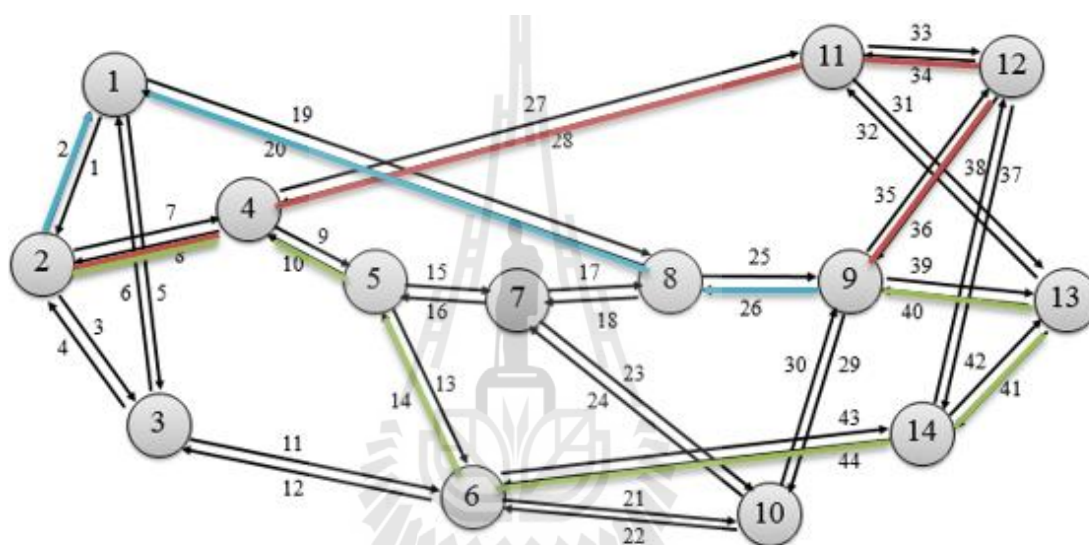
ผลที่ได้ โหนดที่ 2 ขนส่งทราฟฟิกไปยังโหนดที่ 9 โดยใช้ชุดเส้นทางที่ 2 มีการใช้ข่ายเชื่อมโยง ดังนี้  
ข่ายเชื่อมโยงที่ถูกใช้งาน 7 - 27 - 33 - 36 แสดงดังรูปที่ 4.9

สังเกตได้ว่าจากการขนส่งทราฟฟิกของ โหนดที่ 2 ไปยัง โหนดที่ 9 จะใช้เส้นทางสำหรับขนส่งทราฟฟิกที่ต่างกันเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 และค่าถ่วงน้ำหนักที่ 2 เปลี่ยนไป เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0 การเลือกใช้เส้นทางสำหรับขนส่งทราฟฟิกนั้นจะเป็นการเลือกใช้เส้นทางโดยที่คิดจากวัตถุประสงค์ที่ 2 เพียงอย่างเดียว เนื่องจากวัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0 ทำให้การเลือกใช้เส้นทางเพื่อให้เกิดความไม่สมดุลของทราฟฟิกที่น้อยที่สุดนั้นไม่ถูกพิจารณา ทำให้คำตอบที่ได้คือเส้นทางสำหรับขนส่งทราฟฟิกที่มีการใช้พลังงานในเครือข่ายที่น้อยที่สุด

เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.74 และค่าถ่วงน้ำหนักที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.32 การเลือกใช้เส้นทางสำหรับขนส่งทราฟฟิกนั้นจะเป็นการเลือกใช้เส้นทางโดยที่ให้ความสำคัญกับ

วัตถุประสงค์ที่หนึ่งมากกว่าวัตถุประสงค์ที่สอง เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักที่คูณกับวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่ามากกว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่คูณกับวัตถุประสงค์ที่สอง จึงทำให้ค่าของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่าลดลงมากกว่าอีกวัตถุประสงค์หนึ่ง

เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1 และค่าถ่วงน้ำหนักที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0 คำตอบที่ได้ก็จะเป็นการเลือกใช้เส้นทางที่พิจารณาถึงเพื่อให้เกิดความไม่สมดุลของกราฟฟิที่น้อยที่สุด การเลือกใช้เส้นทางเส้นทางสำหรับขนส่งกราฟฟิที่มีการใช้พลังงานในเครือข่ายที่น้อยที่สุดนั้นจะไม่ถูกพิจารณา



รูปที่ 4.9 แสดงการใช้เส้นทางสำหรับขนส่งกราฟฟิจากโนดที่ 2 ไปยังโนดที่ 9 เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักเปลี่ยนแปลง

#### 4.3.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของ Multi-Objective Optimization Model

จากการทดลองด้วยการใช้เครือข่าย NSFNET พิจารณาจำนวนคู่โนดที่ต้องการขนส่งกราฟฟิระหว่างคู่โนดในเครือข่าย 180 คู่โนด จากการใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือก 10 ชุดเส้นทางซึ่งเป็นกรณีที่มีการรับประกันความไม่แน่นอนขอกราฟฟิที่ 90% โดยที่ค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 ( $w_1$ ) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.02 และค่าถ่วงน้ำหนักที่ 2 มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 0 โดยปรับลดลงครั้งละ 0.02 เช่นกัน

ก่อนการหาคำตอบที่ดีที่สุดของทั้งสองวัตถุประสงค์จะต้องกำหนดพารามิเตอร์ในการทดลอง โดยจะแบ่งการหาคำตอบที่ดีที่สุดออกเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่หนึ่ง การหาค่าของ

ฟังก์ชัน  $f_1$  ที่น้อยที่สุด ( $f_1^{\min}$ ) โดยกำหนดเป็นปัญหาการหาค่าตอบที่น้อยที่สุด ซึ่งคำนวณเพื่อให้เกิดความไม่สมดุลของกราฟฟิบบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพที่น้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขจากสมการที่ (3.6) ถึง (3.12) นั่นคือภายใต้การเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่ายและข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย ซึ่งการคำนวณค่า  $f_1^{\min}$  นี้ทำให้สามารถคำนวณค่าของฟังก์ชัน  $f_2$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $f_2^{\max}$ ) ซึ่งคำนวณถึงการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มากที่สุด สามารถคำนวณได้จากการใช้งานของอุปกรณ์ในเครือข่ายจากคำตอบของการเลือกใช้เส้นทางสำหรับกาขนส่งกราฟฟิกเพื่อให้เกิดความไม่สมดุลของกราฟฟิบบนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพที่น้อยที่สุด

ขั้นตอนที่สอง การหาค่าของฟังก์ชัน  $f_2$  ที่น้อยที่สุด ( $f_2^{\min}$ ) โดยกำหนดเป็นปัญหาการหาค่าตอบที่น้อยที่สุด ซึ่งคำนวณได้จากการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในเครือข่ายที่น้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขจากสมการที่ (3.6) ถึง (3.12) ซึ่งการคำนวณค่า  $f_2^{\min}$  นี้ทำให้สามารถคำนวณค่าของฟังก์ชัน  $f_1$  ที่มีค่ามากที่สุด ( $f_1^{\max}$ ) สามารถคำนวณได้จากการคำนวณความจุที่รองรับปริมาณกราฟฟิกที่ขนส่งผ่านบนข่ายเชื่อมโยงจากสมการที่ (3.13) จากนั้นนำคำตอบที่ได้ไปคำนวณค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกจากสมการที่ (3.1)

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ในเครือข่าย จากผลการทดลองจะสังเกตว่าเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกหรือ  $f_1$  มีค่าลดลง ในขณะที่การใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่ายหรือ  $f_2$  มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสร้างสมการคณิตศาสตร์แบบสองวัตถุประสงค์นี้เป็นปัญหาการหาค่าน้อยที่สุด (minimization) ดังนั้นถ้าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใดมีค่าถ่วงน้ำหนักที่มีค่ามากกว่าคุณอยู่กับวัตถุประสงค์นั้นจะทำให้วัตถุประสงค์นั้นมีข้อได้เปรียบมากกว่าอีกวัตถุประสงค์ เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเทียบได้กับการพิจารณาวัตถุประสงค์เดียวโดยจะเหลือเพียงวัตถุประสงค์ที่สองเท่านั้น จะสังเกตเห็นว่าค่า  $f_2$  นั้นจะมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 50,930 WAh ส่งผลให้  $f_1$  มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 43.273 Gbps เนื่องจากการใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่ายมีผลต่อค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิก แสดงให้เห็นว่าถ้าการใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่ายน้อยที่สุด ค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกจะมีค่าสูงสุด จากนั้นเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่งเพิ่มขึ้นตั้งแต่ค่า 0 ไปจนถึง 0.06 นั้นจะสังเกตเห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลต่อ  $f_2$  หรือการใช้พลังงานในการขนส่งกราฟฟิกในเครือข่าย เนื่องจากค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิกมีค่าคงที่ในทุกๆค่าถ่วงน้ำหนัก และเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่ามากพอนั้นคือ เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่าเป็น 0.08 จะส่งผลต่อค่า

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สองทำให้  $f_2$  มีค่าเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะส่งผลต่อค่า  $f_1$  และ  $f_2$  ไปจนกระทั่งเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่าเป็น 1 ซึ่งในกรณีนี้จะเป็นการพิจารณาวัตถุประสงค์เดียว เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักที่คูณอยู่กับวัตถุประสงค์ที่สองนั้นมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพิจารณาจากคำตอบที่ได้พบว่าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งนั้นจะส่งผลต่อการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่ายหรือ  $f_2$  ทำให้การใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่ายมีค่ามากที่สุด เพื่อให้ค่าความไม่สมดุลของ ทราฟฟิกมีค่าลดลงต่ำที่สุด จากการทดลองพบว่าในเครือข่ายนี้เมื่อการใช้พลังงานในการขนส่ง ทราฟฟิกในเครือข่ายมีค่ามากที่สุดจะทำให้ค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกเท่ากับ 14.255 แสดงให้เห็นว่าค่าถ่วงน้ำหนักมีอิทธิพลต่อความสำคัญของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หรือกล่าวได้ว่า ค่าถ่วงน้ำหนักจะแปรผกผันกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คูณอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนักค่านั้น



ตารางที่ 4.7 ตัวอย่างค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสอง  
วัตถุประสงก์ในเครือข่าย

| w1   | w2   | Z        | f1(x)  | f2(x) (WAh) | F1(x)       | F2(x)       |
|------|------|----------|--------|-------------|-------------|-------------|
| 0    | 1    | 0        | 43.43  | 50930       | 1           | 0           |
| 0.02 | 0.98 | 200      | 43.43  | 50930       | 1           | 0           |
| 0.04 | 0.96 | 400      | 43.43  | 50930       | 1           | 0           |
| 0.06 | 0.94 | 600      | 43.43  | 50930       | 1           | 0           |
| 0.08 | 0.92 | 918.8023 | 39.385 | 51696       | 0.861377656 | 0.024967405 |
| 0.1  | 0.9  | 1086.084 | 39.385 | 51696       | 0.861377656 | 0.024967405 |
| 0.12 | 0.88 | 1253.366 | 39.385 | 51696       | 0.861377656 | 0.024967405 |
| 0.14 | 0.86 | 1420.648 | 39.385 | 51696       | 0.861377656 | 0.024967405 |
| 0.16 | 0.84 | 1564.541 | 34.794 | 52530       | 0.704043866 | 0.052151239 |
| 0.18 | 0.82 | 1694.919 | 34.794 | 52530       | 0.704043866 | 0.052151239 |
| 0.2  | 0.8  | 1825.298 | 34.794 | 52530       | 0.704043866 | 0.052151239 |
| 0.22 | 0.78 | 1955.676 | 34.794 | 52530       | 0.704043866 | 0.052151239 |
| 0.24 | 0.76 | 2073.579 | 32.272 | 53317       | 0.617614805 | 0.077803129 |
| 0.26 | 0.74 | 2181.542 | 32.272 | 53317       | 0.617614805 | 0.077803129 |
| 0.28 | 0.72 | 2490.068 | 31.036 | 54677       | 0.575257025 | 0.122131682 |
| 0.3  | 0.7  | 2580.693 | 31.036 | 54677       | 0.575257025 | 0.122131682 |
| 0.32 | 0.68 | 2547.764 | 30.643 | 54314       | 0.561788897 | 0.11029987  |
| 0.34 | 0.66 | 2842.406 | 28.815 | 56254       | 0.499143249 | 0.173533246 |
| 0.36 | 0.64 | 2914.014 | 29.62  | 55809       | 0.526730637 | 0.159028683 |
| 0.38 | 0.62 | 2936.946 | 29.25  | 55797       | 0.51405072  | 0.158637549 |
| 0.4  | 0.6  | 3137.988 | 25.968 | 58762       | 0.401576422 | 0.255280313 |
| 0.42 | 0.58 | 3075.673 | 24.943 | 59058       | 0.366449623 | 0.264928292 |
| 0.44 | 0.56 | 3243.745 | 24.566 | 60179       | 0.353529815 | 0.301466754 |
| 0.46 | 0.54 | 3280.391 | 23.684 | 61118       | 0.323303633 | 0.332073012 |
| 0.48 | 0.52 | 3254.109 | 23.335 | 61312       | 0.311343386 | 0.338396349 |
| 0.5  | 0.5  | 3248.699 | 23.335 | 61312       | 0.311343386 | 0.338396349 |
| 0.52 | 0.48 | 3182.028 | 22.511 | 61859       | 0.283104866 | 0.356225554 |

ตารางที่ 4.7 ตัวอย่างค่าถ่วงน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสอง  
วัตถุประสงค์ในเครือข่าย (ต่อ)

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



### 4.3.3 สรุปผลการทดลองหัวข้อที่ 4.3

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ได้เสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของค่าถ่วงน้ำหนักต่อคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์โดยใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักในการแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ โดยใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักในการแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้เป็นวัตถุประสงค์เดียว ซึ่งมีการศึกษาการแลกเปลี่ยนระหว่างสองวัตถุประสงค์ คือ วัตถุประสงค์ที่หนึ่งเพื่อลดความไม่สมดุลของทราฟฟิกให้น้อยที่สุด และสำหรับวัตถุประสงค์ที่สองที่พิจารณา คือ เพื่อการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM โดยคำนึงถึงการเลือกใช้เส้นทางการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย และคำนึงถึงข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ถ้าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่ามากกว่าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่สองแล้ว จะส่งผลให้มีการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกเพิ่มขึ้น เพื่อให้ค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกมีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่สองมีค่าสูงมากพอ จะส่งผลให้มีการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกลดลง ทำให้ค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักจะแปรผกผันกับวัตถุประสงค์ที่มันควบคุมอยู่ คือ เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกลดลงหรือเมื่อค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งมีค่าลดลงจะทำให้มีการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกเพิ่มขึ้น

### 4.4 การศึกษาผลกระทบของปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่างคู่โหนดในเครือข่ายต่อความไม่สมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานที่ใช้ในเครือข่าย

ดังที่ได้กล่าวถึงวิธีที่ใช้ในการแปลงสมการหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบสเกลาร์ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก และการวิเคราะห์ค่าถ่วงน้ำหนักที่มีผลต่อคำตอบที่ดีที่สุด ในหัวข้อที่ผ่านมาซึ่งแสดงให้เห็นการแลกเปลี่ยนของสองวัตถุประสงค์ที่ทำการศึกษา คือ วัตถุประสงค์ที่หนึ่งเพื่อลดความไม่สมดุลของทราฟฟิกให้น้อยที่สุดและวัตถุประสงค์ที่สองคือ เพื่อการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลกระทบเมื่อจำนวนทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่างคู่โหนดในเครือข่ายที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นจากแบบจำลอง *MOO Model* จากสมการที่ (3.5) ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยผู้วิจัยใช้เครือข่าย NSFNET ดังรูปที่ 4.8 มาพิจารณา โดยประกอบด้วย OXC จำนวน 14 โหนด และมีข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ 44 ข่ายเชื่อมโยง และเครือข่าย COST239 ดังรูปที่ 4.19 โดยประกอบด้วย OXC จำนวน 11 โหนด และมีข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ 52 ข่ายเชื่อมโยง และมีปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการขนส่ง

ทราบฟิกระหว่างคู่โนดในเครือข่าย 100 คู่โนด 140 คู่โนดและ 180 คู่โนด ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก. อ้างอิงจากงานวิจัยของ Keeratchairitnara, P. (2013)

#### 4.4.1 พิจารณาเครือข่าย NSFNET

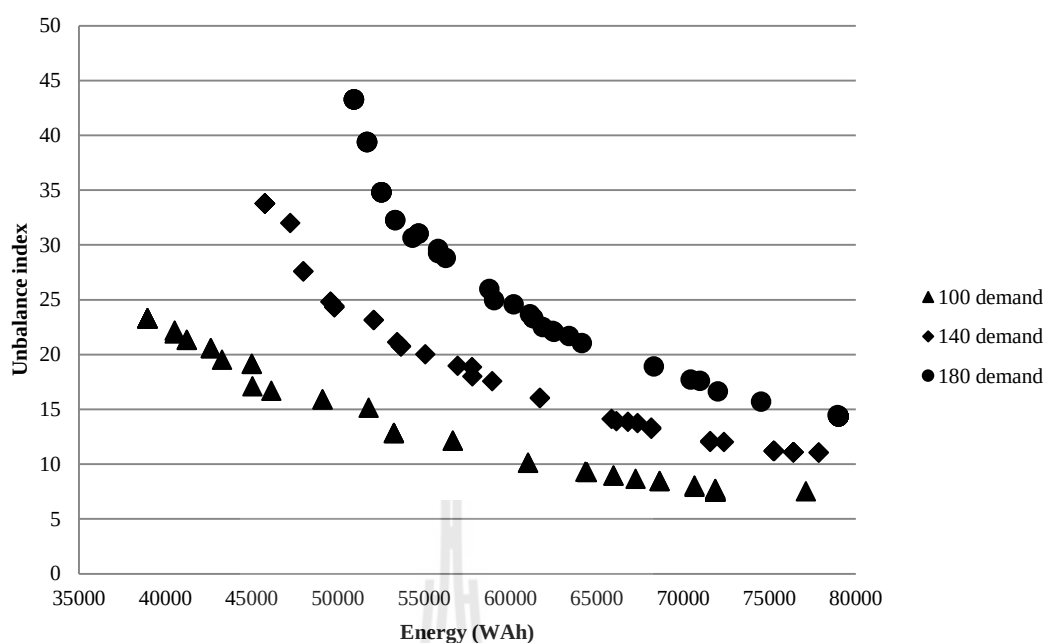
ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบการส่งทราฟฟิกที่มีปริมาณการส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โนดในเครือข่าย 100 คู่โนด 140 คู่โนดและ 180 คู่โนด ภายใต้การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90% และ 99% โดยใช้เครือข่าย NSFNET ดังรูปที่ 4.7 มาพิจารณาสำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยจะเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักทั้งสองค่าโดยเพิ่มค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งขึ้นครั้งละ 0.02 ในขณะที่ลดค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่สองลงครั้งละ 0.02 แล้วทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองวัตถุประสงค์ แสดงดังรูปที่ 4.10 – 4.12

จากรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนคู่โนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โนดในเครือข่าย 100 คู่โนด 140 คู่โนดและ 180 คู่โนด เมื่อพิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90% ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก สังเกตได้ว่าวัตถุประสงค์ทั้งสองที่พิจารณาจะมีการแลกเปลี่ยนแบบแปรผกผัน โดยค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่ง คือ ความไม่สมดุลของทราฟฟิกมีค่าลดลง เมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สอง คือ การใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่ายมีค่าเพิ่มขึ้น จากชุดของคำตอบที่ได้เมื่อมีจำนวนคู่โนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โนดในเครือข่าย 100 คู่โนด ผู้วิจัยขอเสนอแนะในการเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่มีค่าความสมดุลของทราฟฟิกเท่ากับ 12.135 และมีการใช้พลังงานเท่ากับ 56,657 WAh ต่อมาเมื่อมีจำนวนคู่โนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โนดในเครือข่าย 140 คู่โนด ผู้วิจัยขอเสนอแนะในการเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่มีค่าความสมดุลของทราฟฟิกเท่ากับ 24.302 และมีการใช้พลังงานเท่ากับ 49,804 WAh และเมื่อมีจำนวนคู่โนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โนดในเครือข่าย 180 คู่โนด ผู้วิจัยขอเสนอแนะการเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่มีค่าความสมดุลของทราฟฟิกเท่ากับ 24.566 และมีการใช้พลังงานเท่ากับ 60,179 WAh จากการเสนอแนะนี้ผู้วิจัยได้เลือกคำตอบจากค่าความคุ้มค่าของการใช้พลังงานในเครือข่ายและลักษณะความสมดุลของทราฟฟิกที่ยอมรับได้ที่คุ้มค้ำกับพลังงานที่ใช้ในเครือข่าย โดยดูจากการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นทุก 10,000 WAh การส่งทราฟฟิกในเครือข่ายจะมีความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกในเครือข่ายที่เพิ่มขึ้นเท่าไร

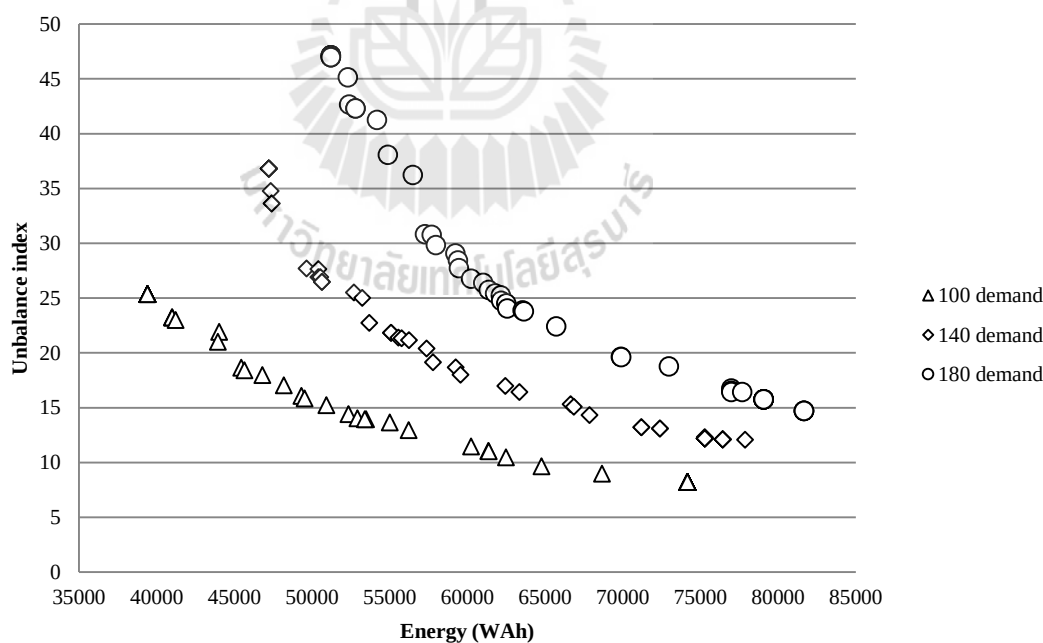
จากรูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนคู่โนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โนดในเครือข่าย 100 คู่โนด 140 คู่โนดและ 180 คู่โนด เมื่อพิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 99% ด้วยวิธีผลรวม

ค่าถ่วงน้ำหนัก สำหรับการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่ายเมื่อมีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิก ระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 100 คู่โหนด 140 คู่โหนดและ 180 คู่โหนด จากชุดของคำตอบที่ได้เมื่อมีจำนวน คู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 100 คู่โหนด ผู้วิจัยขอเสนอแนะในการ เลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่มีค่าความสมดุลของทราฟฟิกเท่ากับ 18.633 และมีการใช้พลังงาน เท่ากับ 45,446 WAh เมื่อมีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 140 คู่ โหนด ผู้วิจัยขอเสนอแนะในการเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่มีค่าความสมดุลของทราฟฟิกเท่ากับ 21.824 และมีการใช้พลังงานเท่ากับ 55,097 WAh และเมื่อมีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิก ระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 180 คู่โหนด ผู้วิจัยขอเสนอแนะการเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่มีค่า ความสมดุลของ ทราฟฟิกเท่ากับ 26.759 และมีการใช้พลังงานเท่ากับ 60,236 WAh จากการเสนอแนะ นี้ผู้วิจัยได้เลือกคำตอบจากค่าความคุ้มค่าของการใช้พลังงานในเครือข่ายและลักษณะความสมดุลของ ทราฟฟิกที่ยอมรับได้ที่คุ้มค่างับพลังงานที่ใช้ในเครือข่าย และยังสังเกตได้อีกว่าเมื่อพิจารณาการ รับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 99% จะมีการใช้พลังงานในเครือข่ายที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมี ปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากต้องมีการสำรองแบนด์วิดท์เพื่อรองรับทราฟฟิกมากกว่ากรณี การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90% จึงทำให้มีปริมาณทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงมี ปริมาณที่สูงกว่า ทำให้ค่าความสมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่ายสำหรับกรณีที่มี การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 99% เพิ่มขึ้น

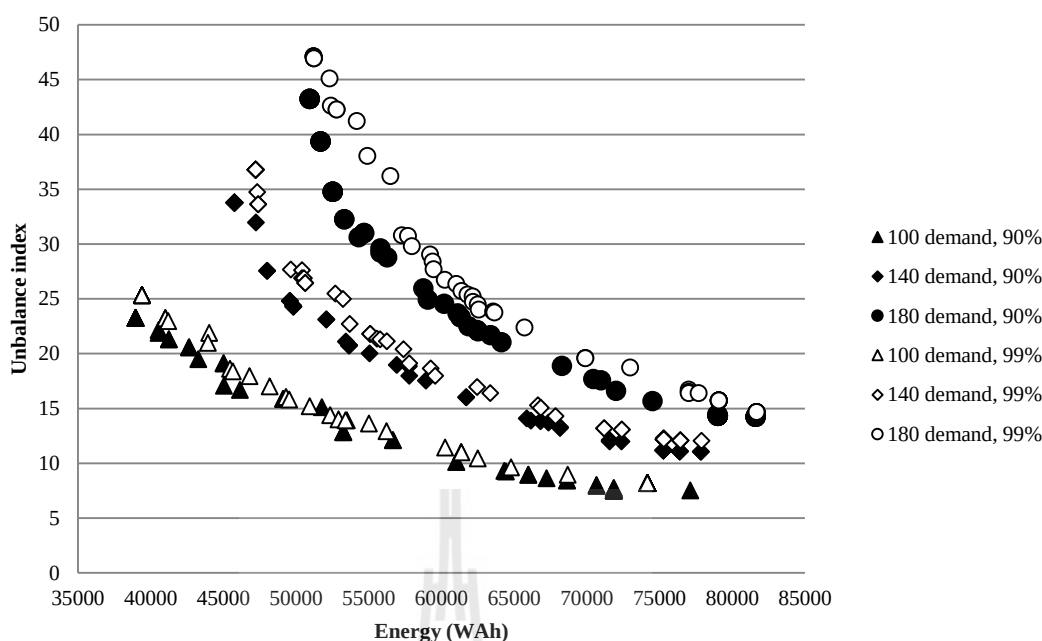
จากรูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงาน ในเครือข่ายที่มีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่ง ทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 100 คู่โหนด 140 คู่ โหนดและ180 คู่โหนด เมื่อพิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90% และ 99% ด้วย วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักพบว่าเมื่อพิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น มี ผลให้ค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกำหนดการรับประกันการรองรับความไม่ แน่นนอนของทราฟฟิกในระดับต่ำจะทำให้ปริมาณการสำรองแบนด์วิดท์เพื่อรองรับทราฟฟิกมีค่าน้อย กว่ากรณีที่กำหนดการรับประกันการรองรับความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่สูงกว่า ซึ่งส่งผลให้การ คำนวณค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกใน ระดับที่สูงกว่ามีค่ามากกว่ากรณีการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนกราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่างคู่โหนด 100 คู่โหนด 140 คู่โหนดและ 180 คู่โหนดด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90% (NSFNET)



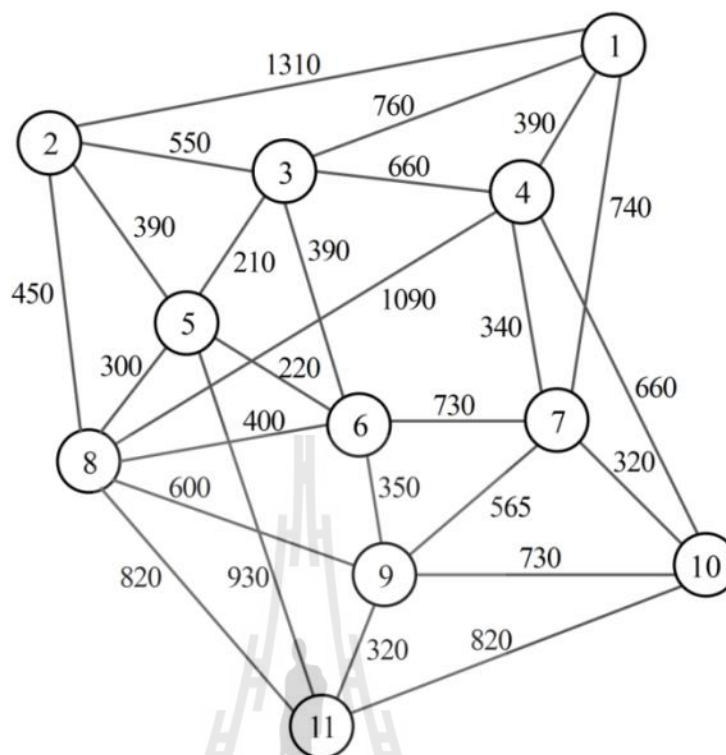
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนกราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่างคู่โหนด 100 คู่โหนด 140 คู่โหนดและ 180 คู่โหนดด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99% (NSFNET)



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่าง  
 คูโนด 100 คูโนด 140 คูโนด และ 180 คูโนดด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของการ  
 รับประกันความไม่แน่นอนที่ 90% และ 99% (NSFNET)

#### 4.4.2 พิจารณาเครือข่าย COST239

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลกระทบของความไม่สมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่ายเมื่อจำนวนทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่างคูโนดในเครือข่ายที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นจากการใช้แบบจำลอง MOO Model ดังสมการที่ (3.5) และสมการที่ (3.6) ถึง (3.12) มากำหนดเป็นเงื่อนไขในการหาคำตอบที่ดีที่สุด ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยผู้วิจัยใช้เครือข่าย COST239 อ้างอิงจากงานวิจัยของ Somani, A. K. (2006) แสดงดังรูปที่ 4.13 มาพิจารณา และมีปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคูโนดในเครือข่าย 100 คูโนด 140 คูโนด และ 180 คูโนด ภายใต้การรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90% และ 99% สำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุดของสมการสองวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยจะเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักทั้งสองค่า โดยเพิ่มค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่หนึ่งขึ้นครั้งละ 0.02 ในขณะที่ลดค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่สองลงครั้งละ 0.02 แล้วทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองวัตถุประสงค์ แสดงดังรูปที่ 4.14 – 4.17



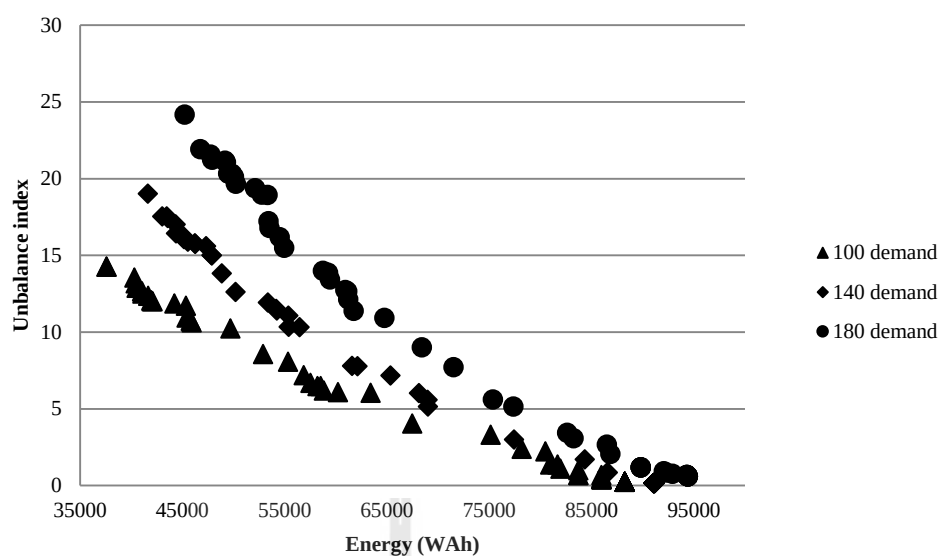
รูปที่ 4.13 โครงสร้างเครือข่าย COST239 (ความยาวของสายเชื่อมโยงหน่วยเป็น km.)

จากรูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 100 คู่โหนด 140 คู่โหนด และ 180 คู่โหนด เมื่อพิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90% ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก สังเกตได้ว่าวัตถุประสงค์ทั้งสองที่พิจารณาจะมีการแลกเปลี่ยนแบบแปรผกผัน โดยค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่ง คือ ความไม่สมดุลของทราฟฟิกมีค่าลดลง เมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สอง คือ การใช้พลังงานในการขนส่ง ทราฟฟิกในเครือข่ายมีค่าเพิ่มขึ้น จากชุดของคำตอบที่ได้เมื่อมีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 100 คู่โหนด ผู้วิจัยขอเสนอแนะในการเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่มีค่าความสมดุลของทราฟฟิกเท่ากับ 8.0703 และมีการใช้พลังงานเท่ากับ 55,310 WAh ต่อมาเมื่อมีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่ง ทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 140 คู่โหนดผู้วิจัยขอเสนอแนะในการเลือกใช้เส้นทางขนส่ง ทราฟฟิกที่มีค่าความสมดุลของทราฟฟิกเท่ากับ 12.633 และมีการใช้พลังงานเท่ากับ 50,199 WAh และเมื่อมีจำนวนคู่โหนดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 180 คู่โหนดผู้วิจัยขอเสนอแนะการเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่มีค่าความสมดุลของทราฟฟิกเท่ากับ 12.751 และมีการใช้พลังงานเท่ากับ 60,908 WAh จากการเสนอแนะนี้ผู้วิจัยได้เลือกคำตอบจากค่าความคุ้มค่าของการใช้พลังงานในเครือข่ายและลักษณะความสมดุลของทราฟฟิกที่ยอมรับได้ที่คุ้มค้ำกับพลังงานที่ใช้ในเครือข่ายโดยดูจากการใช้

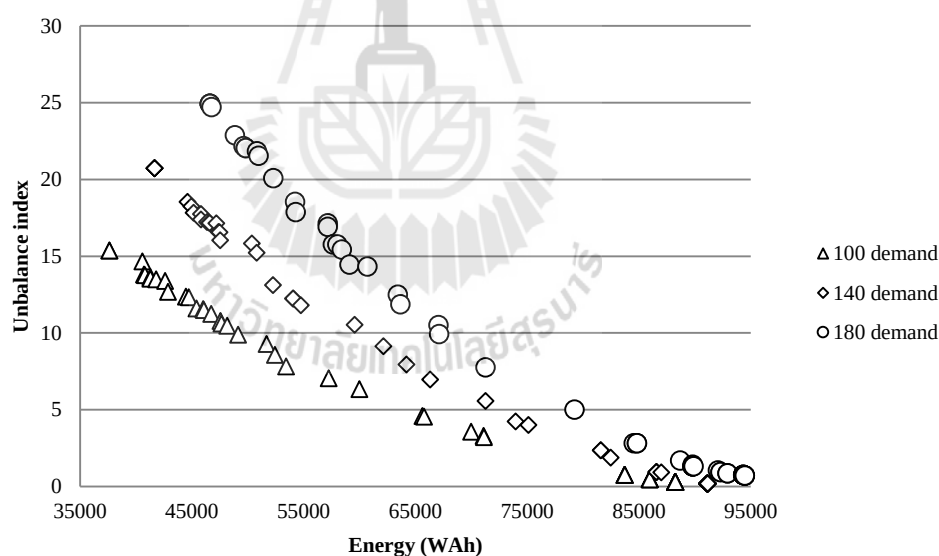
พลังงานเพิ่มขึ้นทุก 10,000 WAh การส่งทราฟฟิกในเครือข่ายจะมีความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกในเครือข่ายที่เพิ่มขึ้นเท่าไร

จากรูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนคูล์ดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคูล์ดในเครือข่าย 100 คูล์ด 140 คูล์ด และ 180 คูล์ด เมื่อพิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 99% ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก จากชุดของคำตอบที่ได้เมื่อมีจำนวนคูล์ดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคูล์ดในเครือข่าย 100 คูล์ดผู้วิจัยขอเสนอแนะในการเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่มีค่าความสมดุลของทราฟฟิกเท่ากับ 7.0457 และมีการใช้พลังงานเท่ากับ 57,235 WAh เมื่อมีจำนวนคูล์ดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคูล์ดในเครือข่าย 140 คูล์ดผู้วิจัยขอเสนอแนะในการเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่มีค่าความสมดุลของทราฟฟิกเท่ากับ 15.221 และมีการใช้พลังงานเท่ากับ 50,790 WAh และเมื่อมีจำนวนคูล์ดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคูล์ดในเครือข่าย 180 คูล์ดผู้วิจัยขอเสนอแนะการเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่มีค่าความสมดุลของทราฟฟิกเท่ากับ 17.867 และมีการใช้พลังงานเท่ากับ 54,292 WAh จากการเสนอแนะนี้ผู้วิจัยได้เลือกคำตอบจากความคุ้มค่าของการใช้พลังงานในเครือข่ายและลักษณะความสมดุลของทราฟฟิกที่ยอมรับได้ที่คุ้มค้ำกับพลังงานที่ใช้ในเครือข่าย และยังสังเกตได้อีกว่าเมื่อพิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 99% จะมีการใช้พลังงานในเครือข่ายที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีปริมาณทราฟฟิกที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากต้องมีการสำรองแบนด์วิดท์เพื่อรองรับทราฟฟิกมากกว่ากรณีการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90% จึงทำให้มีปริมาณทราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงมีปริมาณที่สูงกว่า ทำให้ค่าความสมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่ายสำหรับกรณีที่มีการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 99% เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกและการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนคูล์ดที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคูล์ดในเครือข่าย 100 คูล์ด 140 คูล์ด และ 180 คูล์ด เมื่อพิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ 90% และ 99% ด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักพบว่าเมื่อพิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น มีผลให้ค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกำหนดการรับประกันการรองรับความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับต่ำจะทำให้ปริมาณการสำรองแบนด์วิดท์เพื่อรองรับ ทราฟฟิกมีค่าน้อยกว่ากรณีที่กำหนดการรับประกันการรองรับความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่สูงกว่า ซึ่งส่งผลให้การคำนวณค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับที่สูงกว่ามีค่ามากกว่ากรณีการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับที่ต่ำกว่า

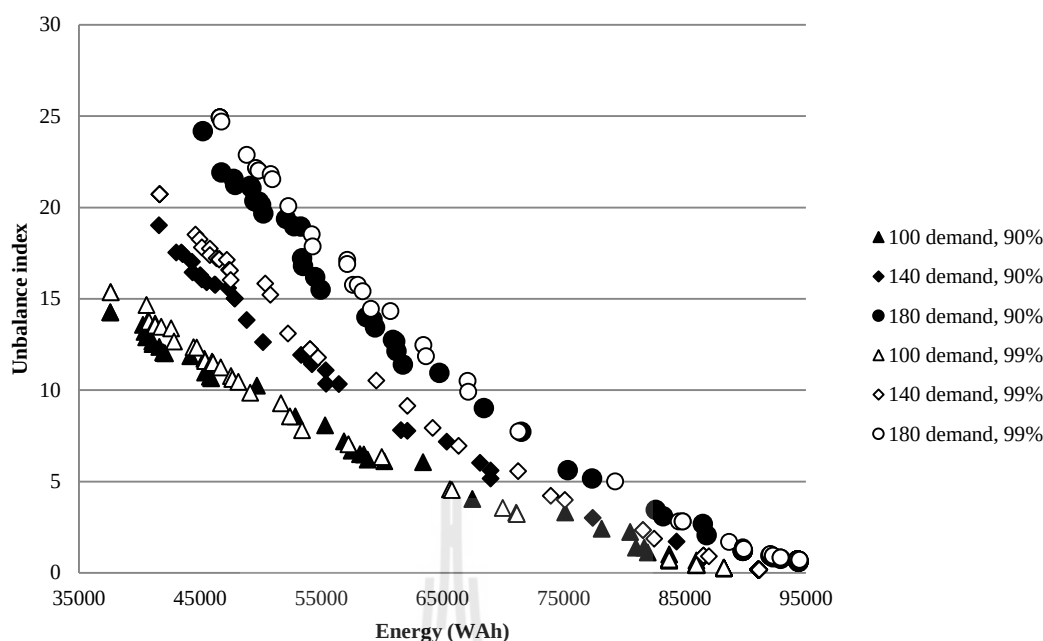


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนกราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่าง  
 คูโนด 100 คูโนด 140 คูโนดและ 180 คูโนดด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของ  
 การรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90% (COST239)



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนกราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่าง  
 คูโนด 100 คูโนด 140 คูโนดและ 180 คูโนดด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของ  
 การรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99% (COST239)





รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครือข่ายที่มีจำนวนกราฟฟิที่ต้องการขนส่งระหว่าง  
 100 140 180 และ 180 กราฟฟิด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของ  
 การรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90% และ 99% (COST239)

#### 4.4.3 สรุปผลการทดลองหัวข้อที่ 4.4

จากการตรวจสอบเทคนิคการวางแผนกราฟฟิแบบสมดุลภายใต้ความไม่แน่นอนของ  
 กราฟฟิรวมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการเปรียบเทียบความสมดุลและการใช้  
 พลังงานสำหรับการขนส่งกราฟฟิภายในเครือข่าย NSFNET และ COST239 แสดงดังรูปที่ 4.7 และ  
 4.13 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิที่ 90% และ 99% เมื่อทำการ  
 พิจารณาทั้งสองเครือข่ายพบว่าการทดลองในเครือข่าย NSFNET แสดงให้เห็นว่าการจัดสรรเส้นทาง  
 ของกราฟฟิที่มีจำนวนกราฟฟิในเครือข่ายที่มากขึ้นส่งผลให้มีค่าความไม่สมดุลของ กราฟฟิมาก  
 ขึ้นเช่นกัน แต่การทดลองในเครือข่าย COST239 แสดงให้เห็นว่าจำนวนกราฟฟิที่เพิ่มขึ้นใน  
 เครือข่าย สามารถจัดสรรเส้นทางให้มีความสมดุลของกราฟฟิได้ดีมาก เนื่องจากทั้งสองเครือข่ายมี  
 โครงข่ายเครือข่ายที่แตกต่างกัน จึงทำให้เครือข่าย COST239 สามารถจัดสรรเส้นทางที่ทำให้ได้รับ  
 ความสมดุลของกราฟฟิมากกว่าโครงสร้างเครือข่าย NSFNET สำหรับการให้พลังงานสำหรับการ  
 ขนส่งกราฟฟิในเครือข่าย NSFNET พบว่าเมื่อจำนวนกราฟฟิที่ต้องการขนส่งระหว่าง 100 ใน  
 เครือข่ายเพิ่มขึ้นจะมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกัน เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางของแต่ละระดับการ  
 รับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิส่งผลให้มีการใช้อุปกรณ์ที่ใกล้เคียงกัน และสำหรับการใช้  
 พลังงานในการขนส่งกราฟฟิในเครือข่าย COST239 นั้น พบว่าแต่ละระดับการรับประกันความไม่

แน่นอนของ ทราฟฟิกมีการใช้พลังงานใกล้เคียงกัน เนื่องจากการจัดสรรเส้นทางของแต่ละระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกส่งผลให้มีการใช้อุปกรณ์ที่ใกล้เคียงกัน

#### 4.5 การเปรียบเทียบความไม่สมดุลของทราฟฟิก การใช้พลังงานในเครือข่ายและต้นทุนค่าใช้จ่ายของ *MOO Model* และ *MC Model*

ในหัวข้อนี้ได้ผู้วิจัยได้ดำเนินการการตรวจสอบผลกระทบระหว่างการใช้เทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสะดวกของทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกร่วมกับการใช้พลังงานภายในเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ (*MOO Model*) ต่อสถานะการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายภายในเครือข่าย โดยผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยของ K. Meesublak (2009) โดยพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการลดต้นทุนในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดภายใต้วิธีการกำหนดปัญหาแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งผู้วิจัยเรียกว่า *MC Model* โดยมีวัตถุประสงค์ คือ ต้องการให้มีการใช้ต้นทุนภายในเครือข่าย IP over WDM น้อยที่สุด โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (4.12) และใช้สมการเงื่อนไขเช่นเดียวกับสมการคณิตศาสตร์การใช้เทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสะดวกของทราฟฟิกในเครือข่าย IP over WDM ภายใต้ความไม่แน่นอนทราฟฟิกร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3.6) - (3.12) ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และใช้เครือข่าย NSFNET และ COST239 ที่แสดงดังรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.13 ตามลำดับสำหรับการเปรียบเทียบการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ใช้ภายในเครือข่ายภายใต้การรับประกันความไม่แน่นอนของ ทราฟฟิกที่ 90% และมีปริมาณทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งทราฟฟิกระหว่างคู่โหนดในเครือข่าย 100 คู่โหนด 140 คู่โหนด และ 180 คู่โหนด ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก. อ้างอิงจากงานวิจัยของ Keeratichairitnara, P. (2013) และได้กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.6

$$\min_{\forall j} \left[ \begin{aligned} & \sum_{m \in N} C_{LC} \cdot V_m + \sum_{m \in N} C_{RP} \cdot Y_m + 2 \cdot \sum_{k \in D} C_{tr} \cdot \beta_k + \sum_{j \in A} C_O \cdot \omega_j \\ & + \sum_{j \in A} C_{MD} \cdot MD_j + \sum_{j \in A} (C_E \cdot EA_j + C_G \cdot EG_j) \cdot Nf_j \end{aligned} \right] \quad (4.12)$$

โดยที่

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

#### 4.5.1 เมื่อพิจารณาต้นทุนค่าใช้จ่ายที่มีค่าใกล้เคียงกันของ *MOO Model* และ *MC Model*

เมื่อผู้วิจัยดำเนินการทดลองเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผลของการหาคำตอบจากการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับปัญหาการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในเครือข่าย IP over WDM เพื่อให้มีการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายภายในเครือข่ายที่น้อยที่สุด โดยใช้เครือข่าย NSFNET และ COST239 นั้น ได้มีการแสดงผลและวิจารณ์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายของทั้งสองโมเดลที่มีความเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยใช้เครือข่าย NSFNET และ COST239 ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบถึงการใช้พลังงานในการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่ายและความไม่สมดุลของทราฟฟิกภายในเครือข่ายพบว่า MOO Model นั้นมีค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกที่น้อยกว่า MC Model ซึ่งนั่นหมายความว่าทราฟฟิกได้มีการกระจายไปยังโหนดปลายทางโดยใช้สายเชื่อมโยงที่มากกว่า MC Model และยังพบอีกว่า MC Model นั้นมีการใช้พลังงานที่สูงกว่า MOO Model เนื่องจาก MC Model นั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่าย คำตอบที่ได้จึงเป็นการเลือกใช้เส้นทางตามวัตถุประสงค์ของการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายภายในเครือข่ายที่น้อยที่สุด ทำให้เราสรุปได้ว่า MOO Model ถึงจะมีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่มากกว่า MC Model เพียงเล็กน้อยในเครือข่าย NSFNET หรือเพิ่มขึ้นมา 5% - 7% ในเครือข่าย COST239 แต่สามารถทำให้มีความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายเพิ่มมากขึ้นและมีการใช้พลังงานในเครือข่ายที่น้อยกว่า MC Model ซึ่งถือว่าคุ้มค่ากว่า

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่ใกล้เคียงกันของทั้งสองโมเดล (NSFNET)

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

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่ใกล้เคียงกันของทั้งสองโมเดล (COST239)

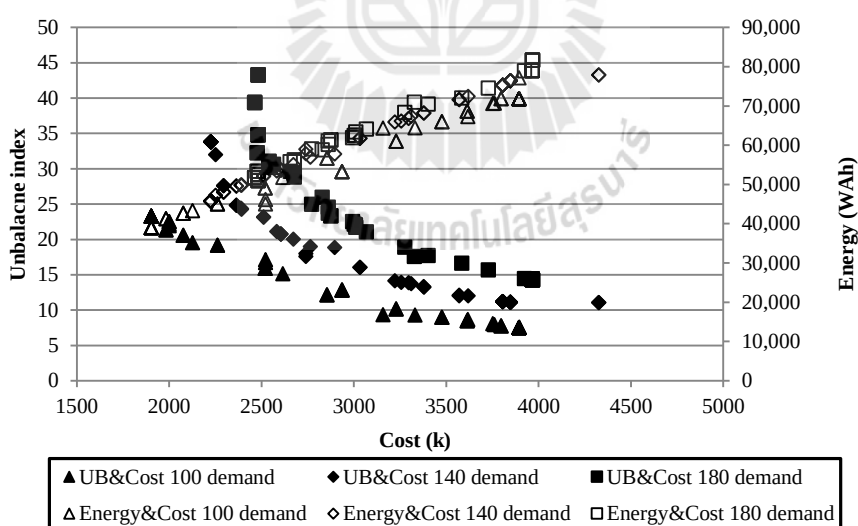
| Traffic Demands | Cost(k) |                                     | Cost different (%) | Energy(WAh) |        | Improvement of Energy (%) | Unbalance index |       | Improvement of Load Balancing (%) |
|-----------------|---------|-------------------------------------|--------------------|-------------|--------|---------------------------|-----------------|-----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

#### 4.5.2 การเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายของ MOO Model สำหรับเครือข่าย NSFNET และ COST239 เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักเปลี่ยนแปลง

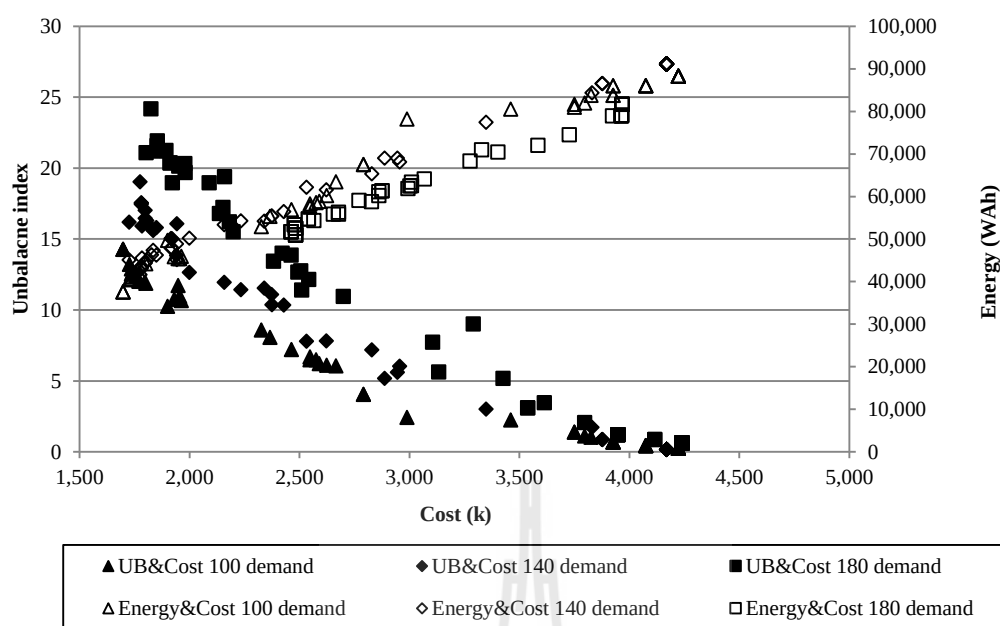
ผลจากการหาคำตอบจากการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับต้นทุนค่าใช้จ่ายในเครือข่าย IP over WDM เมื่อค่าถ่วงน้ำหนักที่หนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงลดลงครึ่งละ 0.02 และค่าถ่วงน้ำหนักที่สองมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นครึ่งละ 0.02 โดยใช้เครือข่าย NSFNET และ COST239 แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.13 ตามลำดับ โดยมีจำนวนทราฟฟิกที่ต้องการขนส่งระหว่างคู่โหนด 100 คู่โหนด 140 คู่โหนด และ 180 คู่โหนดด้วยวิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก ในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90% นั้น ได้มีการแสดงผลและวิจารณ์ดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงถึงการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายในเครือข่าย NSFNET และ COST239 ตามลำดับ พบว่าเมื่อค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกน้อยลง ซึ่งหมายความว่าทราฟฟิกมี

ความสมดุลที่มากขึ้น นั่นคือปริมาณกราฟฟิคจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางได้มีการใช้ขายเชื่อมโยงเกือบทุกขายเชื่อมโยงหรือทุกขายเชื่อมโยง ทำให้มีการใช้อุปกรณ์ภายในเครือข่ายที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้มีการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วยและในกรณีเมื่อมีการใช้พลังงานที่น้อยลงนั้นหมายถึงมีการใช้ขายเชื่อมโยงบางขายเชื่อมโยงสำหรับการขนส่งกราฟฟิคจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทาง ซึ่งจะทำให้มีการใช้อุปกรณ์ภายในเครือข่ายที่น้อยลง ทำให้มีการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายน้อยลงตามไปด้วย ถึงแม้ว่าจุดบางจุดเมื่อค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิคน้อยลง ทำให้มีการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายน้อยลงหรือการใช้พลังงานที่น้อยลง แต่กลับมีการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งกรณีนี้อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากมีการใช้เส้นทางสำหรับการขนส่งกราฟฟิคที่ต่างกัน ทำให้ค่าต้นทุนค่าใช้จ่ายน้อยลงหรือเพิ่มขึ้นมาบ้างเล็กน้อย แต่โดยรวมแล้วเมื่อความไม่สมดุลของกราฟฟิคน้อยลง ต้นทุนค่าใช้จ่ายจะมากขึ้นและเมื่อการใช้พลังงานในเครือข่ายมีค่าลดลง ต้นทุนค่าใช้จ่ายก็จะน้อยลงด้วย และยังสังเกตได้อีกว่าเมื่อจำนวนกราฟฟิคที่ต้องการขนส่งระหว่างคู่โนดเพิ่มขึ้น แต่การใช้พลังงานในเครือข่ายก็ยังมีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกัน นั้นหมายความว่า จำนวนกราฟฟิคที่ต้องการขนส่งที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่ได้ส่งผลต่อการใช้พลังงานมากนัก แต่ค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิก็ยังคงมีค่าที่แตกต่างกันเมื่อมีจำนวนกราฟฟิคที่ต่างกันยกเว้นในเครือข่าย COST239 ค่าความไม่สมดุลของกราฟฟิคช่วงหลังๆจะมีการเกาะกลุ่มกันนั้นขึ้นอยู่กับโครงข่ายของเครือข่าย COST239 นั้นเอง



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายในเครือข่าย NSFNET ที่มีจำนวนกราฟฟิคที่ต้องการขนส่งกราฟฟิกระหว่างคู่โนด 100 คู่โนด 140 คู่โนดและ 180 คู่โนด



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายในเครือข่าย COST239 ที่มีจำนวนทราฟฟิกที่ต้องการขนส่ง  
ทราฟฟิกระหว่างคู่โหนด 100 คู่โหนด 140 คู่โหนด และ 180 คู่โหนด

#### 4.5.3 สรุปผลการทดลองหัวข้อที่ 4.5

จากการเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายของทั้งสองโมเดล พบว่า MOO Model มีการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายมากกว่า MC Model เนื่องจาก MOO Model มีค่าความสมดุลของทราฟฟิกที่มากกว่า ซึ่ง ทราฟฟิกได้มีการกระจายไปยังโหนดปลายทางโดยใช้สายเชื่อมโยงที่มากกว่า MC Model และเมื่อพิจารณาต้นทุนค่าใช้จ่ายของ MOO Model โดยใช้เครือข่าย NSFNET และ COST239 พบว่าเมื่อค่าความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีการใช้อุปกรณ์ภายในเครือข่ายที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งทำให้มีการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และในกรณีเมื่อมีการใช้พลังงานที่น้อยลงนั้นหมายถึงมีการใช้สายเชื่อมโยงเพียงบางสายเชื่อมโยงสำหรับการขนส่งทราฟฟิกจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งจะทำให้มีการใช้อุปกรณ์ภายในเครือข่ายที่น้อยลง ทำให้มีการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายน้อยลงตามไปด้วย

#### 4.6 สรุปผลการทดลองของบทที่ 4

งานวิจัยนี้ทำการทดลองถึงปัญหาความไม่สมดุลของทราฟฟิกที่มีการพิจารณาทราฟฟิกที่มีความไม่แน่นอน เพื่อให้มีการขนส่งทราฟฟิกผ่านเครือข่าย IP over WDM อย่างมีประสิทธิภาพและการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดด้วยสมการสองวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก โดยนิยามสูตรทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มที่สามารถกำหนดเส้นทางที่ดีที่สุดและความจุที่เพียงพอเพื่อที่จะรองรับทราฟฟิกที่มีความต้องการในการขนส่งในเครือข่ายด้วยการเลือกใช้ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกน้อยที่สุดและการใช้พลังงานที่น้อยที่สุด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวัตถุประสงค์ที่ศึกษา มีการแลกเปลี่ยนแบบแปรผกผันกัน ซึ่งระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกอย่างมาก เนื่องจากการกำหนดการรับประกันการรองรับความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับต่ำหรือระดับสูง ทำให้ปริมาณการสำรองแบนด์วิดท์เพื่อรองรับทราฟฟิกมีค่าที่มากน้อยต่างกันและการใช้พลังงานในเครือข่ายจะมีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกันในแต่ละระดับการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิก นอกจากนี้ได้เสนอแนะการเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละกรณีและผู้วิจัยได้มีการเปรียบเทียบถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายพบว่าจากงานวิจัยที่นำเสนอถึงแม้ว่าจะมีการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นแต่ก็คุ้มค่าเมื่อทำให้ทราฟฟิกมีความสมดุลมากขึ้นและมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่ามากขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

เครือข่ายแกนหลักประเภทไอพียบนการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความยาวคลื่น (IP over Wavelength Division Multiplexing : IP over WDM) เป็นสถาปัตยกรรมเครือข่ายแกนหลักที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีแบนด์วิดท์มากเพียงพอที่สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในปัจจุบันมีความต้องการใช้งานอินเทอร์เน็ตที่เพิ่มขึ้นและสามารถคาดคะเนได้ว่าจะเพิ่มขึ้นทุกๆปี จึงเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงตามไปด้วย และเนื่องจากลักษณะของทราฟฟิกในเครือข่ายมีลักษณะที่ไม่แน่นอนมีความแปรปรวนเพิ่มสูงขึ้นหรือลดน้อยลงอยู่ตลอดเวลาขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการใช้งานและปริมาณการใช้งานของผู้ใช้ ทำให้เกิดปัญหาความแออัดของทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงในกรณีที่มีการส่งทราฟฟิกจำนวนมากผ่านข่ายเชื่อมโยงเดียวหรือปัญหาการรับส่งทราฟฟิกหยุดชะงักในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงขาด โดยงานวิจัยนี้ได้สังเกตเห็นถึงประเด็นหนึ่งที่สำคัญต่อการแก้ไขปัญหาการแออัดของปริมาณทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงควบคู่ไปกับการลดการใช้พลังงานในเครือข่าย คือ ประเด็นความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกบนข่ายเชื่อมโยงภายในเครือข่ายแกนหลัก ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่ทำการพิจารณาเกี่ยวกับการลดการใช้พลังงานในเครือข่ายเท่านั้น โดยไม่ได้คำนึงถึงความไม่แน่นอนของปริมาณทราฟฟิกมาร่วมพิจารณาด้วยหรือบางงานวิจัยได้พิจารณาถึงลักษณะความไม่แน่นอนของปริมาณทราฟฟิกเพียงอย่างเดียว ซึ่งไม่ได้พิจารณาถึงการใช้พลังงานในเครือข่ายร่วมด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของปริมาณทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้เกิดความสมดุลของการส่งทราฟฟิกภายในเครือข่ายให้มากที่สุด เพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรเครือข่ายเพิ่มมากขึ้นและเพื่อให้มีการใช้พลังงานภายในเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เริ่มศึกษาเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลจากการใช้ชุดเส้นทางเลือกสำหรับการขนส่งทราฟฟิกที่ต่างกัน โดยต้องคำนึงถึงเรื่องข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ข้อจำกัดของความจุบนข่ายเชื่อมโยง ข้อจำกัดของโมดูลทางออพติคัล และข้อจำกัดของระยะทาง เป็นต้น ซึ่งปัจจัยในการเลือกเส้นทางของงานวิจัยนี้ได้ใช้ขั้นตอนวิธีของไดคัสตรา (Dijkstra's algorithm) โดย



ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของการใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือกที่ต่างกัน ใน 3 กรณีคือ 5 ชุด เส้นทาง 10 ชุดเส้นทางและ 15 ชุดเส้นทาง โดยงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาด้วยการใช้รูปแบบของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming : ILP) ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือการนำเสนอแบบจำลองที่สามารถสร้างความสมดุลของปริมาณ ทราฟฟิกภายในเครือข่าย WDM และสำรองแบนด์วิธของเครือข่ายเพื่อให้สามารถรองรับความต้องการของทราฟฟิกภายใต้สถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

ต่อมาได้เสนอเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสามารถของปริมาณทราฟฟิกภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบสองวัตถุประสงค์ โดยใช้เทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับแปลงสมการสองวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นสมการวัตถุประสงค์เดียว แล้วนำคำตอบที่ได้จากสมการมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของทั้งสองวัตถุประสงค์ ซึ่งแน่นอนว่าในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่ต้องการให้มีความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายที่มากที่สุดและมีการใช้พลังงานที่น้อยที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จึงเป็นการจัดสรรเส้นทางที่เหมาะสมนี้นำมาซึ่งความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายที่มากที่สุดและการใช้พลังงานที่น้อยที่สุดด้วย ซึ่งเห็นได้ว่าผู้วิจัยได้มีการพิจารณาวัตถุประสงค์สองวัตถุประสงค์ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วในการพิจารณาปัญหาใด ๆ ก็ตาม มักจะมีประเด็นหรือวัตถุประสงค์ที่ต้องการทำให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดมากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์เสมอ โดยหลายปัญหาที่พิจารณานั้นมักจะเป็นปัญหาที่มีความขัดแย้งกันและจะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เพียงคำตอบเดียว ดังนั้นผู้ใช้งานจะต้องทำการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดจากเซตของผลลัพธ์ที่เป็นไปได้เหล่านั้น นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการเปรียบเทียบถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายพบว่าถึงแม้ว่าจะมีการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นแต่ก็คุ้มค่าเมื่อทำให้ทราฟฟิกมีความสมดุลมากขึ้นและมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น ซึ่งจากการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสามารถของปริมาณทราฟฟิกภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถสรุปถึงข้อดีได้ดังนี้

- การวางแผนทราฟฟิกที่นำเสนอสามารถนำไปใช้วางแผนทราฟฟิกได้ในทุกเครือข่าย
- การวางแผนทราฟฟิกที่นำเสนอสามารถกระจายปริมาณทราฟฟิกที่มีในข่ายเชื่อมโยง เพื่อลดการแออัดของทราฟฟิกได้
- การวางแผนทราฟฟิกโดยใช้สมการหลายวัตถุประสงค์ สามารถเลือกใช้เส้นทางขนส่งทราฟฟิกที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละกรณี ตามความเหมาะสมของผู้ใช้งาน
- แบบจำลองที่นำเสนอสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกภายใต้สถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอนได้

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อจำกัดในการใช้โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (IBM ILOG CPLEX Optimization Studio) ในการหาคำตอบ ซึ่งหากมีตัวแปรอินพุตที่ใช้สำหรับหาคำตอบจำนวนมากเกินไป โปรแกรมอาจจะใช้เวลานานในการรันผลเพื่อหาคำตอบ หรืออาจจะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในออกแบบเครือข่ายแกนหลักประเภท IP over WDM นั้นจะต้องมีความรู้พื้นฐานในงานที่จะต้องศึกษา โดยต้องทราบถึงข้อจำกัด และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อ การวางแผน สำหรับขนส่งทราฟฟิกในเครือข่าย จากนั้นจึงกำหนดปัญหาเป็นสมการคณิตศาสตร์ โดยเมื่อกำหนดปัญหาได้แล้วจะต้องทำการทดสอบความเป็นไปได้ของสมการที่กำหนดขึ้นในเครือข่ายที่มีขนาดเล็ก ก่อน เพื่อให้เห็นแนวโน้มความถูกต้องของสมการที่พัฒนาขึ้น จากนั้นจึงนำไปใช้ในเครือข่ายที่จำลองขึ้น โดยจะต้องทำการทดสอบเปรียบเทียบในหลายกรณี ที่มีเครือข่ายขนาดต่าง ๆ กัน เพื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เน้นการพัฒนา และตรวจสอบเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกให้มีความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายที่มากที่สุด ร่วมกับการใช้พลังงานที่น้อยที่สุด โดยใช้รูปแบบการแก้ปัญหาด้วยการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม เพื่อการหาคำตอบที่ดีที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จึงเป็นการเลือกใช้เส้นทางที่เหมาะสมมาซึ่งความสมดุลของทราฟฟิกในเครือข่ายที่มากที่สุดและการใช้พลังงานที่น้อยที่สุด นอกจากนี้สำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio นั้น หากเครือข่ายที่พิจารณา มีตัวแปรอินพุตจำนวนมากแล้ว ในบางกรณี โปรแกรมอาจไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ หรืออาจใช้ระยะเวลาในการรันผลเพื่อหาคำตอบ ดังนั้นขนาดของเครือข่าย หรือจำนวนคู่โหนดในการส่งทราฟฟิกในเครือข่าย จึงเป็นข้อจำกัดในงานวิจัยนี้ ซึ่งหากทดลองในเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ อาจต้องพัฒนาอัลกอริทึมอื่น ๆ ในการหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อให้สามารถหาคำตอบได้ภายในระยะเวลาที่จำกัด

## 5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้เสนอเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้สมการแบบหลายวัตถุประสงค์ (multi-objective optimization) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสองวัตถุประสงค์ ได้แก่ ค่าความไม่สมดุลของทราฟฟิกกับการใช้พลังงานในเครือข่าย โดยใช้เทคนิคผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักทั้งสองวัตถุประสงค์ให้กลายเป็นสมการวัตถุประสงค์เดียว ซึ่งเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้เลือกเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับใน

แต่ละกรณี เพื่อให้สามารถกระจายทราฟฟิกในการขนส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพรวมถึงการใช้พลังงานในเครือข่ายอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

งานวิจัยนี้ยังมีการศึกษาการเปรียบเทียบต้นทุนค่าใช้จ่ายระหว่างเทคนิคการวางแผนทราฟฟิกเพื่อความสะดวกของปริมาณทราฟฟิกภายใต้การพิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับเครือข่าย IP over WDM ร่วมกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพกับเทคนิคลดต้นทุนของงานวิจัยอื่น พบว่าเทคนิคที่นำเสนอของงานวิจัยนี้มีการใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น แต่ว่าต้นทุนที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้เกิดความสะดวกของทราฟฟิกได้มากขึ้นและมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับเทคนิคลดต้นทุนของงานวิจัยอื่น ซึ่งการพัฒนาเทคนิคต่อไปเพื่อให้สามารถรับมือกับต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดความสะดวกของทราฟฟิกและมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพที่เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถนำวัตถุประสงค์ที่จะพิจารณานั้นมาสร้างสมการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยวิธีการในการหาคำตอบด้วยวิธีอื่น ๆ เช่น วิธีลำดับชั้น (Hierarchical method) หรือ วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) ซึ่งจะทำได้ผลลัพธ์ที่ได้ตอบสนองกับผู้ตัดสินใจได้ดีกว่า เนื่องจากคำตอบที่ได้มีลักษณะเป็นกลุ่มคำตอบที่หลากหลายกว่า

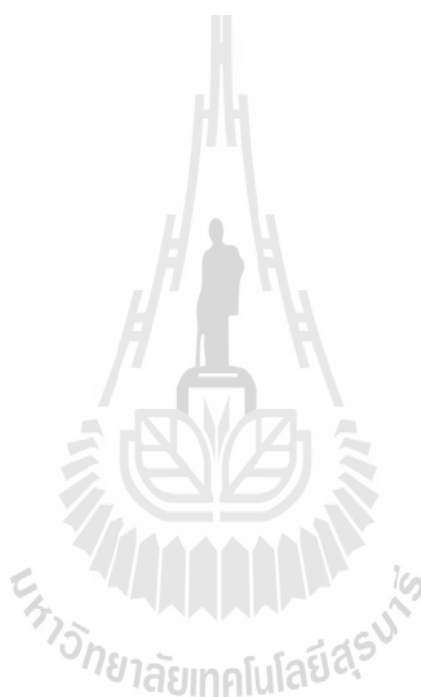


## รายการอ้างอิง

- ประกอบ จิริกิติ (2535). **การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming)**. โครงการส่งเสริมเอกสารวิชาการ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- Bin Chen, Zheng-Ming Jiang, Teng, R.K.F., Xiao-Hui Lin, MingJun Dai, Hui Wang. (2013), **An energy efficiency optimization method in bandwidth constrained IP over WDM networks**, Information Communications and Signal Processing (ICICS) 9<sup>th</sup>, pp. 1-4
- Data sheet of Cisco CRS Carrier Routing System 16-Slot Line Card Chassis System Description, January 2012.
- Data sheet of Cisco ONS 15216 EDFA, August 2001.
- Deb, K. (2009). **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**, John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom.
- 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 Int. Conf. Optical Network Design and Modeling (ONDM), pp. 1-9
- Francesco Musumeci, Domenico Siracusa, Giuseppe Rizzelli, Massimo Tornatore, Riccardo Fiandra, Achille Pattavina and Politecnico di Milano. (2012), **On the Energy Consumption of IP-over -WDM Architectures**, Communications (ICC), IEEE International Conference, pp. 3004-3008
- Grodzevich, Oleksandr O., and R. (2006). **Normalization and Other Topics in Multi-Objective Optimization [Study group report]**, Proceeding of The Fields-MITACS Industrial Problem Workshop, pp. 89–101.
- Idzikowski, F. (2009), **Power consumption of network elements in IP over WDM networks**, Tech. Rep., Telecommunication Networks Group (TKN), TU Berlin, Germany.
- Keeratchairitnara, P. (2013), **Traffic planning techniques for energy efficiency in IP over WDM networks under traffic uncertainty**, Master of Engineering in Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

- Keeratchairitnara, P., Prommak, C. (2012), **Logical Topology Design in IP over WDM Networks with Load Balancing under Traffic Uncertainty** Communication Systems (ICCS), IEEE International Conference, pp. 55 – 59
- Kevin H. Liu (2002). **IP over WDM**. John Wiley & Sons, West Sussex PO19 8SQ, England
- Liu, B. (2009). **Theory and Practice of Uncertain Programming**, 3rd ed., Uncertainty Theory Laboratory: Beijing, pp. 37-42.
- 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.
- Poompat Saengudomlert. (2014), **Power-Aware Logical Topology Selection for IP-over-WDM Backbone Networks Based on Per-Lightpath Power Consumption Model**, Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 11<sup>th</sup>, pp. 1-5
- R. Huelsermann, M. Gunkel, C. Meusburger, and D. A. Schupke. (2008), **Cost modeling and evaluation of capital expenditures in optical multilayer networks**, J. Opt. Netw., Vol. 7, no. 9, pp. 814-833
- Somani, A. K. (2006). **Survivability and Traffic Grooming in WDM Optical Networks**, Cambridge University Press.
- Song Yang, Kuipers, F.A. (2014), **Traffic uncertainty models in network planning**, Communications Magazine IEEE Publication, pp. 172 – 177
- Tachun Lin, Zhili Zhou and Thulasiraman, K. (2011), **Logical topology survivability in IP-over WDM networks: Survivable lightpath routing for maximum logical topology capacity and minimum spare capacity requirements design of reliable, communication networks** (DRCN), 8th, International Workshop, pp. 1-8
- Tucker, R.S., Parthiban, R., Baliga, J., Hinton, K., Ayre, R.W.A. and Sorin, W.V. (2009), **Evolution of WDM Optical IP Networks: A Cost and Energy Perspective** Lightwave Technology, Journal of Vol. 27, pp. 243-252

- 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.
- Yunlei Lui, Gangxiang Shen, and Weidong Shao. (2013), **Design for energy-efficient IP over WDM networks with joint lightpath bypass and router- card sleeping strategies**, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 5, pp. 1122-1138



ภาคผนวก ก

ปริมาณกราฟฟิคที่ใช้สำหรับขนส่งระหว่างจุดในเครือข่าย







ตารางที่ ก.2 ปริมาณทราฟฟิกระหว่างตู้โหนด 140 ตู้โหนด สำหรับเครือข่าย NSFNET

| ตู้โหนด | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|----|---|----|----|----|----|----|
| 1       | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 2       |   | 0 | 1 | 0 | 5 | 1 | 2 | 6  | 2 | 3  | 0  | 3  | 0  | 2  |
| 3       |   |   | 0 | 1 | 2 | 0 | 5 | 12 | 4 | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 4       |   |   |   | 0 | 0 | 0 | 1 | 0  | 1 | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  |
| 5       |   |   |   |   | 0 | 0 | 2 | 6  | 2 | 2  | 0  | 6  | 1  | 4  |
| 6       |   |   |   |   |   | 0 | 1 | 0  | 1 | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 7       |   |   |   |   |   |   | 0 | 5  | 3 | 2  | 0  | 5  | 0  | 3  |
| 8       |   |   |   |   |   |   |   | 0  | 5 | 4  | 1  | 5  | 1  | 3  |
| 9       |   |   |   |   |   |   |   |    | 0 | 3  | 1  | 6  | 2  | 0  |
| 10      |   |   |   |   |   |   |   |    |   | 0  | 1  | 2  | 1  | 0  |
| 11      |   |   |   |   |   |   |   |    |   |    | 0  | 1  | 0  | 0  |
| 12      |   |   |   |   |   |   |   |    |   |    |    | 0  | 0  | 0  |
| 13      |   |   |   |   |   |   |   |    |   |    |    |    | 0  | 1  |
| 14      |   |   |   |   |   |   |   |    |   |    |    |    |    | 0  |

ตารางที่ ก.3 ปริมาณทราฟฟิกระหว่างตู้โหนด 180 ตู้โหนด สำหรับเครือข่าย NSFNET

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

ตารางที่ ก.4 ปริมาณกราฟฟิกระหว่างตู้โนด 100 ตู้โนด สำหรับเครือข่าย COST239

| ตู้โนด | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| 1      | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  |
| 2      | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  |
| 3      | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  |
| 4      | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  |
| 5      | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  |
| 6      | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  |
| 7      | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1  | 1  |
| 8      | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1  | 1  |
| 9      | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1  | 1  |
| 10     | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0  | 1  |
| 11     | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 0  |

ตารางที่ ก.5 ปริมาณกราฟฟิกระหว่างตู้โนด 140 ตู้โนด สำหรับเครือข่าย COST239

| ตู้โนด | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| 1      | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  |
| 2      | 1 | 0 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1  | 1  |
| 3      | 1 | 2 | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1  | 1  |
| 4      | 1 | 2 | 2 | 0 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2  | 2  |
| 5      | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1  | 1  |
| 6      | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  |
| 7      | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1  | 1  |
| 8      | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 2 | 1  | 2  |
| 9      | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1  | 2  |
| 10     | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0  | 1  |
| 11     | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1  | 0  |

ตารางที่ ก.6 ปริมาณกราฟฟิกระหว่างคูโนด 180 คูโนด สำหรับเครือข่าย COST239

| คูโนด | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| 1     | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 3 | 1  | 1  |
| 2     | 1 | 0 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1  | 1  |
| 3     | 1 | 2 | 0 | 4 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2  | 1  |
| 4     | 1 | 3 | 3 | 0 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 4  | 3  |
| 5     | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 4 | 1  | 2  |
| 6     | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 3 | 2  | 1  |
| 7     | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2  | 3  |
| 8     | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 2 | 1  | 2  |
| 9     | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1  | 2  |
| 10    | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0  | 1  |
| 11    | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1  | 0  |



ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา



## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ปฏิจจ แสงदानุช และ ชุตินา พรหมมาก (2014). **Logical Topology Design in IP over WDM Networks with Load Balancing under Traffic Uncertainty**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น Volume 2, pp. 623 - 626

Patidja Sangdanuch and Chutima Prommak (2015). **Traffic Planning For Energy Efficiency In IP Over WDM Networks With Load Balancing Under Traffic Uncertainty**, in 9th SOUTH EAST ASIAN TECHNICAL UNIVERSITY CONSORTIUM (SEATUC) SYMPOSIUM, 27-30 July 2015 Thailand pp. 435 - 438



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## การวิเคราะห์การวางแผนทราฟฟิกแบบสมดุลสำหรับ IP over WDM ภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก Analysis of Balanced Traffic Planning for IP over WDM Under Traffic Uncertainty

ปฏิจจ แสงดาบุษ และ ชุตินา พรหมนาก

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-224392 E-mail: ptj-promt@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การวางแผนทราฟฟิกแบบสมดุลสำหรับเครือข่าย IP over WDM (Internet Protocol over Wavelength-Division Multiplexing) ภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก โดยใช้รูปแบบการแก้ปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming) ในการทดลองเราทำการวิเคราะห์เครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีชื่อว่า Nation Science Foundation Network (NSFNET) จากนั้นจึงวางแผนทราฟฟิกให้มีความสมดุลภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก จากผลการทดลองเทคนิคที่นำเสนอสามารถช่วยให้เกิดความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกในเครือข่าย NSFNET เพิ่มขึ้นถึง 30%

**คำสำคัญ:** โปรแกรมคณิตศาสตร์แบบแบ่งความยาวคลื่น เส้นทางที่สั้นที่สุด การวางแผนทราฟฟิก ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

### Abstract

In this paper, we propose an analysis of balanced traffic planning for IP over WDM (Internet Protocol over Wavelength-Division Multiplexing) under traffic uncertainty. The integer linear programming is used to solve this problem. In the experiment, we analyzed a large network called Nation Science Foundation Network (NSFNET). Then we planned traffic to balance under traffic uncertainty. The results show that using balanced traffic planning obtained by our proposed technique can improve the balanced traffic in NSFNET up to 30%.

**Keywords:** IP over WDM, Shortest Path, Traffic Planning, Traffic Uncertainty

### 1. บทนำ

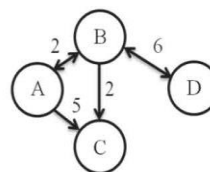
ในปัจจุบันการใช้เส้นทางในการส่งข้อมูลภายในเครือข่าย IP over WDM ส่วนใหญ่มีปัญหาในเรื่องของข้อจำกัดในด้านความจุของโหนดทางออปติคัล ความจุบนขั้วเชื่อมต่อ รวมถึงค่าใช้จ่าย ซึ่งวิธีการลดค่าใช้จ่ายที่ง่ายที่สุดคือการลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเลือกให้เส้นในการขนส่งข้อมูลสั้นที่สุด

การขนส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางด้วยการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดนั้นต้องคำนึงถึงเรื่องข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ข้อจำกัดของความจุบนขั้วเชื่อมต่อ ข้อจำกัดของโหนดทางออปติคัล และ

ข้อจำกัดของระยะทาง เป็นต้น ซึ่งปัจจัยในการเลือกเส้นทางของงานวิจัยนี้ได้ใช้ขั้นตอนวิธีของไดคัสตรา (Dijkstra's algorithm) [1] สำหรับการแก้ปัญหาการเลือกให้เส้นทางที่สั้นที่สุด จากรูปที่ 1 รูปแบบเครือข่ายจำลอง กำหนดให้ระยะทางระหว่างโหนดต้นทางและปลายทางมีค่าดังรูปจะได้เซตระยะสั้นทาง [A, B, C, D] ดังนี้ [inf, 2, 5, inf], [2, inf, 2, 6], [inf, inf, inf, inf], [inf, 6, inf, inf] เป็นต้น (ในการทดลองนี้กำหนดให้ inf เป็นค่าที่สูงมากใช้แทนค่าระยะทางเมื่อโหนดไม่มีการเชื่อมต่อ)

หลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับความไม่แน่นอนของทราฟฟิก<sup>1</sup> ในการวางแผนเครือข่าย เช่นในงานวิจัย [2] กล่าวถึงการกำหนดเส้นทางการขนส่งทราฟฟิกในเครือข่ายที่มีรูปแบบขึ้นเดียว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายภายในเครือข่าย Minimize Cost (MC) โดยพิจารณาความจุที่ใช้ในการรองรับทราฟฟิกซึ่งถูกขนส่งภายในเครือข่าย ในงานวิจัย [3] กล่าวถึงความไม่แน่นอนของทราฟฟิกสำหรับสถาปัตยกรรมเครือข่ายสองชั้นโดยใช้วัตถุประสงค์เช่นเดียวกับการในงานวิจัย [2] ส่วนงานวิจัย [4] พิจารณาความไม่แน่นอนของทราฟฟิกและความสมดุลของทราฟฟิก<sup>2</sup> ในเครือข่ายประเภท IP over WDM

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การวางแผนทราฟฟิกแบบสมดุลในเครือข่าย NSFNET<sup>3</sup> ถึงแม้การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดของไดคัสตราจะสามารถค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดได้ แต่ในการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังปลายทางในข่ายเชื่อมต่อเดียวกันส่งผลให้เกิดความแออัดของปริมาณทราฟฟิก ด้วยเหตุนีบทความนี้จึงนำเสนอรูปแบบการแก้ปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาความแออัดของปริมาณทราฟฟิก ซึ่งทำให้เกิดการกระจายตัวของปริมาณทราฟฟิกและทำให้ปัญหาความคับคั่งของทราฟฟิกลดลง องค์ประกอบของบทความมีลำดับการนำเสนอ ดังนี้ หัวข้อที่ 2 นำเสนอสมการคณิตศาสตร์ที่งานวิจัยนี้ศึกษาและวิเคราะห์ หัวข้อที่ 3 แสดงผลการทดลองและนำเสนอการเปรียบเทียบและหัวข้อที่ 4 สรุปผลการทดลอง



รูปที่ 1 รูปแบบเครือข่ายจำลอง

1, 2, 3 สัญลักษณ์ในภาคผนวก





สมการเงื่อนไขที่ (5) เงื่อนไขนี้ระบุถึงปริมาณของทราฟฟิก  $k$  สามารถเลือกได้เพียงหนึ่งเส้นทางจากเส้นทางที่ถูกกำหนดไว้ในชุดของเส้นทาง  $P^k$  สมการเงื่อนไขที่ (6) แสดงการเลือกใช้สายเชื่อมต่อสำหรับเส้นทางที่ถูกเลือกให้ขนส่งข้อมูล โดยสายเชื่อมต่อ  $j$  นั้นจะต้องถูกตั้งค่าให้ใช้งานถ้าหากปริมาณของทราฟฟิก  $k$  ใช้เส้นทาง  $p$  ในการขนส่งซึ่งเป็นเส้นทางที่ผ่านสายเชื่อมต่อ  $j$  สมการเงื่อนไขที่ (7) ถ้าหากไม่มีปริมาณของทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านสายเชื่อมต่อ  $j$  โมดูลทางออกปิคคอลลนั้นจะไม่ถูกตั้งค่าการใช้งาน กล่าวคือเป็นการบังคับให้  $y_j$  เท่ากับศูนย์ สำหรับปริมาณของทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านสายเชื่อมต่อ  $j$  ถูกแสดงสมการที่ (12) เป็นการคำนวณปริมาณรวมของทราฟฟิก IP ที่ขนส่งผ่านสายเชื่อมต่อ  $j$

$$r_j = \sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} f^{k,p} x_k \quad \forall j \in A \quad (12)$$

สมการเงื่อนไขที่ (8) เงื่อนไขนี้ระบุว่าหากไม่มีปริมาณของทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านสายเชื่อมต่อ  $j$  แล้วสายเชื่อมต่อ  $x_j$  จะไม่ถูกตั้งค่าการใช้งานบังคับให้  $x_j$  เท่ากับศูนย์ สมการเงื่อนไขที่ (9) จำนวนโมดูลทางออกปิคคอลลที่ใช้งานบนสายเชื่อมต่อ  $j$  จะต้องมีความมากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของจำนวนโมดูลทางออกปิคคอลลที่ถูกตั้งค่าอยู่บนสายเชื่อมต่อ  $j$  กล่าวคือ  $y_j$  เป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ สมการเงื่อนไขที่ (10) ปริมาณรวมของทราฟฟิกที่ขนส่งผ่านสายเชื่อมต่อ  $j$  จะต้องมีความมากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของปริมาณทราฟฟิกที่มีอยู่บนสายเชื่อมต่อ  $j$  กล่าวคือ  $r_j$  จะเป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

### 3. ผลการทดลองและการเปรียบเทียบผลการทดลอง

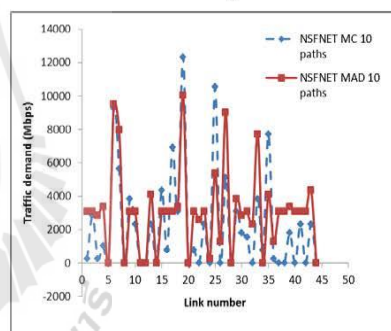
ส่วนนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลองของแบบจำลอง MAD ทำการทดลองโดยใช้เครือข่าย NSFNET แสดงดังรูปที่ 2 โดยมีส่วนประกอบคือในชั้น WDM ประกอบด้วย OXC (Optical Cross-Connect) จำนวน 14 โหนด สายเชื่อมต่อ 44 สายเชื่อมต่อทางกายภาพ การทดลองนี้พิจารณาปริมาณของทราฟฟิก IP ดังที่ใช้ทดลองในงานวิจัย [6] โดยเราได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของการใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือกที่ต่างกัน 3 กรณีคือ 5 ชุดเส้นทาง 10 ชุดเส้นทาง และ 15 ชุดเส้นทาง

ในการทดลองนี้เราใช้ทราฟฟิกที่มีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ 225 Mbps และ 25 Mbps ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองได้ทำการทดลองสำหรับสองระดับของการรับประกันความไม่แน่นอนของปริมาณทราฟฟิกได้แก่ 90% และ 99% รูปที่ 3 และ รูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงปริมาณของทราฟฟิกบนสายเชื่อมต่อของเครือข่ายสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90% และ 99% ตามลำดับจากรูปแสดงการเปรียบเทียบปริมาณทราฟฟิกในสายเชื่อมต่อซึ่งเป็นผลจากการใช้แบบจำลองทั้ง 2 แบบ คือ

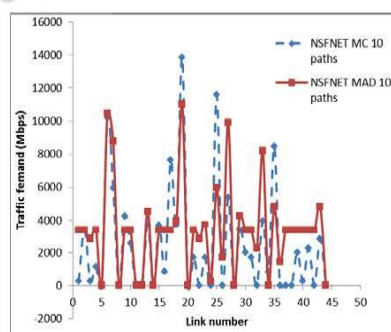
แบบจำลอง MC และแบบจำลอง MAD จากการใช้ชุดเส้นทาง 10 ชุดเส้นทาง

รูปที่ 5 และ รูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงปริมาณของทราฟฟิกบนสายเชื่อมต่อของเครือข่ายสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90% และ 99% ตามลำดับ จากการใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือกที่ต่างกันทั้ง 3 กรณี จากรูปแสดงการเปรียบเทียบปริมาณของทราฟฟิกในสายเชื่อมต่อ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณของทราฟฟิกจากการใช้แบบจำลอง MC ในบางสายเชื่อมต่อมีการขนส่งทราฟฟิกในปริมาณที่สูง ในขณะที่ส่วนใหญ่มักมีการขนส่งทราฟฟิกที่น้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนในการใช้แบบจำลอง MAD จะมีการกระจายทราฟฟิกในหลายสายเชื่อมต่อ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสมดุลของปริมาณทราฟฟิกที่สามารถเกิดขึ้นได้มากที่สุด ยกเว้นสายเชื่อมต่อที่ 6, 19, 27 และ 33 อาจเป็นเพราะรูปแบบของแกนหลักของการเชื่อมต่อทางกายภาพของชั้น WDM

สุดท้ายสำหรับการทดลองนี้แสดงการเปรียบเทียบความสมดุลของทราฟฟิกจากการใช้แบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง ดังตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของทราฟฟิก IP



รูปที่ 3 ปริมาณของทราฟฟิกบนสายเชื่อมต่อของเครือข่ายโดยใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือก 10 ชุดเส้นทางสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%

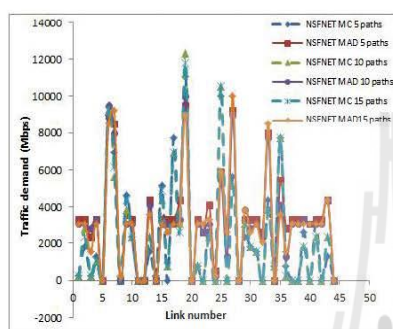


รูปที่ 4 ปริมาณของทราฟฟิกบนสายเชื่อมต่อของเครือข่ายโดยใช้จำนวนชุดเส้นทางเลือก 10 ชุดเส้นทางสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%

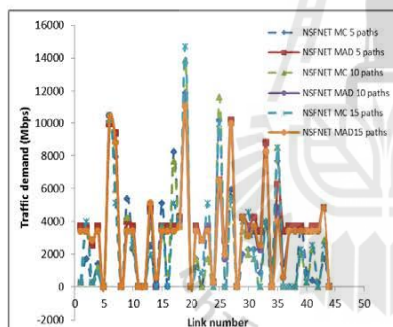
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ตารางที่ 2 ค่าวัดความสมดุลกราฟฟิก

| จำนวนเส้นทาง<br>เลือก | ความไม่แน่นอนกราฟฟิก 90% |          |                 | ความไม่แน่นอนกราฟฟิก 99% |          |                 |
|-----------------------|--------------------------|----------|-----------------|--------------------------|----------|-----------------|
|                       | MC                       | MAD      | Improvement (%) | MC                       | MAD      | Improvement (%) |
| 5                     | 2361.183                 | 1654.828 | 29.91           | 2514.031                 | 1822.989 | 27.49           |
| 10                    | 2251.239                 | 1635.709 | 27.34           | 2487.609                 | 1801.927 | 27.56           |
| 15                    | 2251.244                 | 1635.709 | 27.34           | 2453.713                 | 1801.927 | 26.45           |



รูปที่ 5 ปริมาณของกราฟฟิกบนเครือข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายโดยใช้จำนวนจุดเส้นทางเลือกต่างกันทั้ง 3 กรณีสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%



รูปที่ 6 ปริมาณของกราฟฟิกบนเครือข่ายเชื่อมโยงของเครือข่ายโดยใช้จำนวนจุดเส้นทางเลือกต่างกันทั้ง 3 กรณีสำหรับการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%

ในเครือข่าย NSFNET สำหรับกรณีที่มีการรับประกันความไม่แน่นอนกราฟฟิกที่ 90% และ 99% จากการใช้จุดเส้นทางเลือกที่ต่างกันทั้ง 3 กรณีคือ 5 จุดเส้นทาง 10 จุดเส้นทางและ 15 จุดเส้นทาง จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของกราฟฟิก IP จากการใช้แบบจำลอง MC จะได้ค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของกราฟฟิก IP ในปริมาณที่สูงกว่าการใช้แบบจำลอง MAD และสังเกตได้อีกว่าจากการใช้จุดเส้นทางที่ 10 จุดเส้นทางและ 15 จุดเส้นทาง ความสมดุลของกราฟฟิก IP ของทั้ง 2 แบบจำลองมีปริมาณใกล้เคียงกัน นั่นหมายความว่าจำนวนเส้นทางที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อการเลือกเส้นทางที่ทำให้เพิ่มความสมดุลของกราฟฟิก เนื่องจากเป็นเส้นทางที่มีระยะใกล้ขึ้น

#### 4. สรุป

การวิเคราะห์การวางแผนกราฟฟิกแบบสมดุลสำหรับเครือข่าย

IP over WDM ภายใต้ความไม่แน่นอนของกราฟฟิก โดยใช้จำนวนเส้นทางเลือกที่ต่างกันทั้ง 3 กรณี สังเกตได้ว่าจากการใช้จำนวนจุดเส้นทางเลือก 5 จุดเส้นทาง โดยการใช้เทคนิค MAD ที่นำเสนอ แสดงให้เห็นถึงความสมดุลของปริมาณกราฟฟิกได้มากกว่าการใช้แบบจำลอง MC แต่ก็ยังไม่ถึงกับสมดุลมากเมื่อเทียบการใช้จำนวนเส้นทางเลือกที่ 10 จุดเส้นทาง และ 15 จุดเส้นทางและจากการเปรียบเทียบค่าชี้วัดความสมดุลกราฟฟิก จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของกราฟฟิกจากเทคนิค MAD ที่นำเสนอ มีความสมดุลของกราฟฟิกมากกว่าการใช้แบบจำลอง MC ถึง 30%

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] E.W. Dijkstra, "A Note on Two Problems in Connexion with Graphs," *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269-271, 1959.
- [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] Paramet Keerachairitnara and Chutima Prommak, "Logical topology design in IP over WDM networks with load balancing under traffic uncertainty" in *conf. Communication System (ICCS)*, 2012, pp. 55-59.
- [5] B. Liu, *Theory and Practice of Uncertain Programming*, 3<sup>rd</sup> ed., UTLAB: Beijing, 2009, pp. 37-42.
- [6] Miyao, Y., Saito, H., "Optimal Design and Evaluation of Survivable WDM Transport Networks", *IEEE journal*, 1998.

#### ภาคผนวก

1. ปริมาณกราฟฟิกในเครือข่ายจะมีค่าไม่คงที่ตลอดเวลา เนื่องจากกราฟฟิกมีผู้ใช้งานมาจากหลากหลายที่ ทำให้ปริมาณกราฟฟิกมีความแปรปรวนอยู่ตลอดเวลา
2. ปริมาณกราฟฟิกในทุกๆช่วงเชื่อมโยงมีปริมาณใกล้เคียงกัน
3. ระบบเครือข่ายซึ่งทำหน้าที่เป็นกระดูกสันหลังหรือแกนหลักที่ใช้เป็นช่องทางการสื่อสารระหว่างโหนดต่างๆ ในประเทศหรืออเมริกา

## TRAFFIC PLANNING FOR ENERGY EFFICIENCY IN IP OVER WDM NETWORKS WITH LOAD BALANCING UNDER TRAFFIC UNCERTAINTY

**Patidja Sangdanuch and Chutima Prommak**  
**School of Telecommunication Engineering**  
**Institute of Engineering, Suranaree University of Technology**

### ABSTRACT

Traffic internet volume tends to increase every year. This will result in increasing the energy used on the core network. Nowadays the core networks that have been deployed most is the Internet Protocol (IP) over Wavelength-Division Multiplexing (WDM). The uncertainty of traffic volume caused by variations of traffic demand could affect the reliability of the logical connectivity in IP over WDM network. In this research, the Multi-Objective Optimization using weighted sum approach is applied to achieve traffic load balancing and energy consumption efficiency in IP over WDM networks. Specifically, the integer linear programming is used to solve this problem. In particular, we studied the tradeoff between two objective functions, including maximizing traffic balance across the network and minimizing energy consumption of the core network equipments. The results show that as the traffic balancing increases, the traffic tends to distributed widely across the network links. This results in high network energy consumption.

### 1. INTRODUCTION

The usage of electrical power in the related field of Information and Communication Technology (ICT) tend to increase every year. It is predicted that the electrical power consumption in ICT will increase up to 14% of global electricity consumption. From the situation that greatly increased in power consumption of the network, we should consider to plan the uses of electric power in the network for effectively used. The reason for increasing of this power consumption is the increase of internet traffic. This will have direct impacts on the usability of network devices. Especially, in the core networks that have high energy consumption. Therefore, it is necessary to plan the use of network resources appropriately in order to optimize the power consumption of the network's devices.

Several works have paid attention to investigate the network planning problems to improve the efficiency of the network energy consumption. (F. Musumeci, et al., 2012) analyzed the energy consumption of IP over WDM networks with different network architectures.

This analysis examines the energy used to operate the network by evaluating the energy consumption of devices in the transport layer with the objective to minimize the energy consumption. The aim to analyze the energy consumption of different network architecture is to be able to choose the most appropriate network architecture. While the above research studies are important and show interesting results, but the main issue of traffic uncertainty did not considered. However, some researchers that have been focused on planning the uncertainty of traffic network. (K. Meesublak, 2009) discussed about the uncertainty caused by the dynamic nature of the IP-based traffic. The main aims of this research is to determine the transit traffic in the network with the objective to minimize the cost within the network by considering the capacity that used to support traffic transportation within the network. They considered the uncertainty of traffic in two layers of the network. (P. Keeratchairitnara and C. Prommak, 2012) considers traffic balancing in the IP over WDM networks. They measured the traffic balancing by using the *Mean Absolute Deviation* of IP traffic that transported onto optical link of WDM. Small value of this indicator means that traffic tends to distribute evenly across the network. Whereas high value of this indicator means that traffic transportation in the network is unbalance.

In this study, we present an analysis of the impact of the values of weights used in the proposed multi-objective optimization model. In particular, we consider two objective functions. The first objective function is to minimize the mean absolute deviation of IP traffic volume transported onto optical links of the WDM layer (P. Keeratchairitnara and C. Prommak, 2012) and another objective function is to minimize energy consumption to transport traffic in IP over WDM networks.

The rest of this paper is organized as followed. Section 2 presents the definition and describes the problem formulation. Section 3 presents experiment setup and shows results. Finally, section 4 concludes this paper.

### 2. PROBLEM DEFINITION AND FORMULATION

#### 2.1 TRAFFIC UNCERTAINTY

Chance-Constrained Programming (CCP) is usually applied in order to manage the variables to generate the



optimal answer (B. Liu, 2009). When considering traffic uncertainty, amount of traffic cannot be absolutely defined. We need to estimate probability that traffic volume will exceed a certain threshold as written in equation (1).

$$P(x \geq \xi) \geq \alpha \quad (1)$$

where  $\xi$  is a random variable (traffic volume)  
 $x$  is a capacity reserved on a link to support traffic volume  $\xi$

$\alpha$  is probability that  $x$  will be greater than  $\xi$ ,  
 $0 \leq \alpha \leq 1$

In equation (1), random variable  $\xi$  has a cumulative distribution function  $\Phi(\cdot)$  in which an inverse transform is  $\Phi^{-1}(\cdot)$ . Define  $\Phi^{-1}(\alpha) = K$ . value of  $K$  will be defined from probability of random variable, so the equation can be written as  $P(K \geq \xi) \geq \alpha$  where  $x \geq K$ . In this case, we assume that traffic demand  $\xi$  is a normal distribution with mean ( $\mu$ ), and the variance ( $\sigma^2$ ). Standardizing the equation (1) using the unit normal random variable ( $z$ ), then the equation can be written as  $P(\frac{x-\mu}{\sigma} \geq z) \geq \alpha$ . Obtaining  $\frac{x-\mu}{\sigma} \geq \Phi^{-1}(\alpha)$ , so the equation of  $x$  can be written in an equation (2).

$$x \geq \mu + \Phi^{-1}(\alpha)\sigma \quad (2)$$

Considering the chance constraint, it can be ensured that bandwidth allocation on the network will be more than or equal to the amount of traffic uncertainty ( $\xi = \mu + \Phi^{-1}(\alpha)\sigma$ ). Therefore, it is guaranteed that the network can handle the uncertainty of traffic volume up to 100( $\alpha$ )%.

## 2.2 PROBLEM FORMULATION

To achieve traffic balancing in IP over WDM networks under the traffic uncertainty with efficient energy consumption, we propose a novel approach based on the Multi-Objective Optimization using weighted sum. Specifically, we apply an integer linear programming method. In particular, we studied the tradeoff between two objective functions, including maximizing traffic balance across the network and minimizing energy consumption of the core network equipments. Table 1 defines the notations used in the mathematical formulations.

Table 1: Notations used in the mathematical formulations

| Notations                   | Definitions                                                                                                                              |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sets:</b>                |                                                                                                                                          |
| $A$                         | A set of links in WDM layer                                                                                                              |
| $D$                         | A set of traffic demands                                                                                                                 |
| $P^k$                       | A set of predetermined paths for demand $k$ , $\forall k \in D$                                                                          |
| $N$                         | A set of nodes                                                                                                                           |
| <b>Decision variables:</b>  |                                                                                                                                          |
| $f^{kp}$                    | 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         |
| $\omega_j$                  | An integer indicating number of wavelength channels that are requested for traffic transport on physical link $j$ , $\forall j \in A$    |
| $Nf_j$                      | An integer indicating number of fibers that are used on physical link $j$ , $\forall j \in A$                                            |
| $MD_j$                      | An integer indicating number of multi/demultiplexers that are used at source – destination node of physical link $j$ , $\forall j \in A$ |
| <b>Constant parameters:</b> |                                                                                                                                          |
| $V_m$                       | The number of line cards that used by each node $m$ , $\forall m \in N$                                                                  |

|                 |                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $Y_m$           | The number of route processor that used by each node $m$ , $\forall m \in N$                                                                                                                           |
| $\beta_k$       | The number of wavelength channels that were requested for use by traffic $k$ that wants to transport through link, $\forall k \in D$                                                                   |
| $x_k$           | The number of traffic data $k$ (traffic demand $k$ ), $\forall k \in D$                                                                                                                                |
| $T_k^m$         | A binary {0, 1} parameter that equals to 1 if traffic demand $k$ flowed from source node $m$ ; 0 otherwise, $\forall k \in D$ , $\forall m \in N$                                                      |
| $\delta_j^{kp}$ | A binary {0, 1} parameter that equals to 1 if path $p \in P^k$ for demand $k$ using link $j$ ; 0 otherwise, $\forall j \in A$                                                                          |
| $N$             | The number of physical links in set $A$                                                                                                                                                                |
| $r_j$           | The capacity requested for link $j$ , $\forall j \in A$                                                                                                                                                |
| $L_j$           | The length of the physical link $j$                                                                                                                                                                    |
| $EA_j$          | The number of EDFAs on physical link $j$ , which can be obtained from $EA_j = \lfloor L_j/S - 1 \rfloor + 2$ (G. Shen and R. S. Tucker, 2009), where $S$ is the distance between two neighboring EDFAs |
| $EG_j$          | The number of regenerators on physical network link $j$ , which can be obtained $EG_j = \lfloor L_j/5S - 1 \rfloor$ (M. Yagi, et al., 2005)                                                            |
| $B_w$           | Bandwidth of wavelength channel                                                                                                                                                                        |
| $B_{LC}$        | Bandwidth of line card                                                                                                                                                                                 |
| $N_{LC}$        | The number of slot (line card) that can be used by each route processor                                                                                                                                |
| $W_f$           | The number of wavelength per fiber                                                                                                                                                                     |
| $W_{MD}$        | The number of wavelength per multi/demultiplexers                                                                                                                                                      |
| $P_{LC}$        | The power consumption of line card                                                                                                                                                                     |
| $P_{RP}$        | The power consumption of route processor                                                                                                                                                               |
| $P_{tr}$        | The power consumption of transponder                                                                                                                                                                   |
| $P_E$           | The power consumption of amplifier (EDFA)                                                                                                                                                              |
| $P_G$           | The power consumption of regenerator                                                                                                                                                                   |
| $P_O$           | The power consumption of optical switch                                                                                                                                                                |
| $P_{MD}$        | The power consumption of multiplexer/demultiplexer                                                                                                                                                     |
| $f_1$           | The unbalance index of traffic load in the network                                                                                                                                                     |
| $f_2$           | The sum of power consumption of all devices for transport traffic demands in the network                                                                                                               |
| $F_1$           | The value of the first objective function is normalize                                                                                                                                                 |
| $F_2$           | The value of the second objective function is normalize                                                                                                                                                |
| $f_1^{\min}$    | Minimum of the first objective function                                                                                                                                                                |
| $f_1^{\max}$    | Maximum of the first objective function                                                                                                                                                                |
| $f_2^{\min}$    | Minimum of the second objective function                                                                                                                                                               |
| $f_2^{\max}$    | Maximum of the second objective function                                                                                                                                                               |
| $w_1$           | Weight values for first objective function                                                                                                                                                             |
| $w_2$           | Weight values for second objective function                                                                                                                                                            |

Objective functions:

The First objective: Minimize the mean absolute deviation of IP traffic volume transported onto optical links of the WDM layer (P. Keeratichairitnara and C. Prommak, 2012).

$$f_1 = \frac{1}{n} \sum_{j \in A} \left| r_j - \frac{\sum_{j \in A} r_j}{n} \right| \quad (4)$$

The Second objective: Minimize energy consumption to transport traffic in IP over WDM network which can be written in the mathematical equations as following.

$$f_2 = \sum_{m \in N} P_{LC} \cdot V_m + \sum_{m \in N} P_{RP} \cdot Y_m + 2 \cdot \sum_{k \in D} P_{tr} \cdot \beta_k + \sum_{j \in A} P_O \cdot \omega_j + \sum_{j \in A} P_{MD} \cdot MD_j + \sum_{j \in A} (P_E \cdot EA_j + P_G \cdot EG_j) \cdot Nf_j \quad (5)$$

Both objective functions in equation (4) and (5) are normalized by using an equation (6) as follows.

$$F_1 = \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \quad \text{and} \quad F_2 = \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (6)$$

multiplying the objective function by weights

$$\text{Minimize } z = w_1 F_1 + w_2 F_2 \quad (7)$$

The proposed problem consists of constraints (8) – (14) which specify the optical capacity limitation and the network specification.

$$\sum_{p \in P^k} f^{k,p} = 1 \quad \forall k \in D \quad (8)$$

$$\sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} \cdot f^{k,p} \cdot x_k \leq B_o \cdot \omega_j \quad \forall j \in A \quad (9)$$

$$\omega_j \leq W_{MD} \cdot MD_j \quad \forall j \in A \quad (10)$$

$$\omega_j \leq W_f \cdot Nf_j \quad \forall j \in A \quad (11)$$

$$\omega_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (12)$$

$$Nf_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (13)$$

$$MD_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (14)$$

Constraint (8) prevents duplication of a route selection in the network by indicating that traffic  $k$  can select only one path from the paths defined in set  $P^k$ . Constraint (9) ensures that the sufficient number of wavelengths is provided for an optical link  $j$ , so that link  $j$  can accommodate the fluctuation of traffic volume transported through a link  $j$ . Parameter  $x_k$  incorporates the variation of traffic demand in order to guarantee that the network can support the traffic uncertainty. Constraint (10) ensures that the fiber optic is sufficient for the number of wavelength that used on link  $j$ . Constraint (11) ensures that the multi/demultiplexers have sufficient number for wavelengths on link  $j$ . Constraint (12) – (14) specify that  $\omega_j$ ,  $Nf_j$ , and  $MD_j$  are non-negative number.

The following equations are used to calculate essential parameters which are applied in the constraints.

Equation (15) calculates the amount of traffic that flow on link  $j$ . It is the sum of all traffic  $k$  that flow on link  $j$  in the selected route  $p$ .

$$r_j = \sum_{k \in D} \sum_{p \in P^k} \delta_j^{k,p} \cdot f^{k,p} \cdot x_k \quad \forall j \in A \quad (15)$$

Equation (16) calculates the number of line card that used on node  $m$ . It is the sum of all traffic demand  $k$  that flows from source node  $m$  divided by the bandwidth of line card.

$$V_m = \left\lceil \frac{\sum_{k \in D} x_k \cdot T_k^m}{B_{LC}} \right\rceil \quad \forall m \in N \quad (16)$$

Equation (17) calculates the number of wavelengths for traffic demand  $k$ . It is the amount of traffic demand  $k$  divided by bandwidth of wavelength.

$$\beta_k = \left\lceil \frac{x_k}{B_w} \right\rceil \quad \forall k \in D \quad (17)$$

Lastly, equation (18) calculates the number of route processors that needed on node  $m$ . It is the number of line cards that used in node  $m$  divided by the number of line cards that each route processor can support.

$$Y_m = \left\lceil \frac{V_m}{N_{LC}} \right\rceil \quad \forall m \in N \quad (18)$$

### 3. NUMERICAL EXPERIMENTS AND ANALYSIS

#### 3.1 EXPERIMENTS SETUP

In this section we present numerical evaluations of the proposed Multi-Objective Optimization model. In our experiment, we adopted the IP over WDM network of the NSFNET which consist of 14 nodes and 44 physical links (Y. Miyao and H. Saito, 1998).

The constant parameters used in our experiments are given in table 2 and table 3. We considered 100, 140 and 180 IP traffic demands between 100, 140 and 180 source-destination node-pairs, respectively (randomly selected). We consider the traffic uncertainty based on the normal distribution with a value of mean and standard deviation of 2 Gbps and 0.19 Gbps, respectively (P. Nualmuenwai and C. Prommak, 2011). Specifically, we consider 90% traffic uncertainty guarantee. So, we obtained the traffic volume  $\xi$  equals to 2.24 Gbps.

The weight coefficient  $w_1$  and  $w_2$  were applied in the experiments. The relationship between the weight coefficients is that, given  $w_1$ ,  $w_2 = 1 - w_1$ . Solving the multi-objective problem, the maximum point found is a particular point on the Pareto front corresponding to the weight coefficients used. An approximated Pareto front can be generated by solving the multi-objective model many times using different weight sets. In particular, our experiments vary  $w_1$  from 0 to 1, with a step size of 0.02.

The traffic planning for energy efficient in NSFNET IP over WDM network 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 IBM ILOG CPLEX Optimization Studio version 12.4. Computations were performed on Intel® Core™ 2 Duo CPU speed 2.1 GHz RAM 3 GB DDR2.

Table 2: Input data for model and simulation

| Input                                                        | Value          |
|--------------------------------------------------------------|----------------|
| The distance between two neighboring EDFAs (S)               | 80 km          |
| The distance between two neighboring regenerators            | 400 km         |
| Bandwidth of wavelength channel                              | 2.5 Gbps       |
| The number of wavelength per fiber                           | 40 wavelengths |
| The number of wavelength per multiplexers and demultiplexers | 80 wavelengths |
| Bandwidth of line card                                       | 40 Gbps        |
| The number of slot (line card) per route processor           | 16 slot card   |
| Uncertainty guarantee levels                                 | 90%            |
| Amount of Traffic demand between node-pair                   | 100, 140, 180  |

Table 3: The power consumption of devices

| Devices                   | Power (W) |
|---------------------------|-----------|
| Line card                 | 415       |
| Route processor           | 166       |
| Transponder               | 34.5      |
| EDFA                      | 25        |
| Regenerator               | 100       |
| Optical switch (OXC)      | 1.5       |
| Multiplexer/demultiplexer | 811       |

### 3.2 NUMERICAL RESULT AND DISCUSSION

Figure 1 plots the results of traffic planning for 100, 140 and 180 traffic demands over the NFSNET network. The graph compares the network performances in term of the unbalance index representing how evenly traffic is distributed across the network and the amount of total energy consumption to transport all traffic demands of each case.

The points in figure 1 are the minimum points found with different weight sets. It can be observed that as the  $w_2$  increases from 0 to 1 (from left to right of the X axes), for the case of 100 traffic demands, the amount of total energy consumption increases about 2.1 times (from 38,000 WAh to 78,000 WAh) whereas the unbalance index decreases about 3.5 times, i.e. the load balancing increases about 3.5 times. For the case of 140 and 180 demands, the amount of total energy consumption increases about 1.6 and 1.4 times whereas the load balancing increases about 3.5 and 3.0 times, respectively. We can see that as the number of traffic demands increases, the proposed model can achieve about the same ratio of load balancing at lower ratio of the energy consumption.

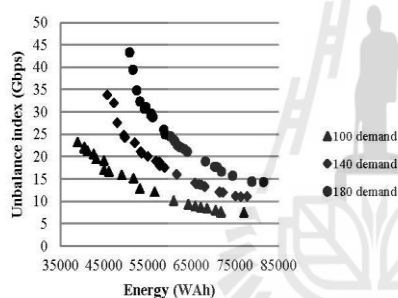


Fig. 1. Compare the energy consumption and the unbalance index using weighted sum approach at traffic uncertainty guarantee 90%.

### 4 CONCLUSION

This study presents the Multi-Objective Optimization using weights sum approach. We formulate the problem as an integer linear programming problem aiming to select the optimal path and the sufficient capacity for traffic demands, based on its uncertainty with consideration of two opposite objectives which are to minimize unbalance index of traffic on links in IP over WDM networks and to minimize energy consumption to transport traffic. In particular, we use weighted sum approach to transform two objectives to single objective and compare effect of weighting value in each one. The numerical results show that when compared the case of low traffic demands with the case of high traffic demands, the proposed multi-objective model can achieve about the same ratio of load balancing while the case of high traffic demands has lower ratio of the total energy consumption. This means that the proposed model can improve the energy efficiency of the networks that carry high traffic volume.

### REFERENCES

- Y. Zhanga, M. Tornatore, P. Chowdhurya and B. Mukherjee, Energy optimization in IP-over-WDM networks, *Journal of Optical Switching and Networking*, vol. 8, July 2011, pp. 171–180.
- F. Musumeci, M. Tornatore and A. Pattavina, A power consumption analysis for IP-over-WDM core network architectures, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 4, February 2012, pp. 108–117.
- K. Meesublak, A two-layer network design problem under traffic uncertainty, in *Conf. ECTI-CON*, vol. 2, May 2009, pp. 914–917.
- P. Keeratchairitnara and C. Prommak, "Logical Topology Design in IP over WDM Networks with Load Balancing under Traffic Uncertainty", in *IEEE Int. Conf. Communication Systems (ICCS)*, Singapore, 2012, pp. 55–59.
- B. Liu, *Theory and Practice of Uncertain Programming*, 3rd ed., UTLAB: Beijing, 2009, pp. 37–42.
- G. Shen and R. S. Tucker, "Energy-Minimized Design for IP Over WDM Networks," *Optical Communication and Networking*, vol.1, 2009, pp. 176–186.
- M. Yagi, et al., "Field trial of optical 3R regenerator over installed cable" *31st European Conference on Optical Communication*, ECOC 2005, vol. 4, 2005, pp. 975–976.
- Y. Miyao and H. Saito, "Optimal design and evaluation of survivable WDM transport networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 1190–1198, 1998.
- 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.



**Patidja Sangdanuch** received B.Eng (2013) in Telecommunication Engineering from Suranaree University of Technology. Currently he is pursuing Master's degree in Telecommunication Engineering at Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.



**Chutima Prommak** received B.Eng (Hons) in Electrical Engineering from Khon Kaen University, Thailand in 1992. She received M.Sc. and Ph.D. in Telecommunications from University of Colorado at Boulder, CO, USA in 1998 and University of Pittsburgh, PA, USA in 2004, respectively. Currently she is an assistant professor in Suranaree University of Technology, Thailand. Her research interests are in the areas of wireless network design and planning, network optimization, WiMAX, wireless sensor networks and heuristic optimization for telecommunication networks.



## ประวัติผู้เขียน

นายปฏิจ ฉางดานุช เกิดเมื่อวันที่ 3 ตุลาคม พุทธศักราช 2533 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 และระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 แผนกวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนลาซาล จังหวัดกรุงเทพมหานคร จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พุทธศักราช 2552 หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในปีพุทธศักราช 2555 ได้มีความสนใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ด้านการวางแผนเครือข่ายแกนหลัก จึงได้สมัครเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระหว่างศึกษาได้เสนอบทความเข้าร่วมประชุมในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON-37) ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด จังหวัดขอนแก่น วันที่ 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 และ งานประชุมวิชาการนานาชาติ 9th SOUTH EAST ASIAN TECHNICAL UNIVERSITY CONSORTIUM (SEATUC) SYMPOSIUM ประเทศไทย วันที่ 27-30 กรกฎาคม 2558 โดยมีรายละเอียดดังภาคผนวก ข

