



## บทที่ 4

### การวางแผนโครงข่ายไอพีบนบนการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น ภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

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

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

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

#### 4.1 แนวคิดในการวางแผนโครงข่ายเสมือนภายใต้ความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

การวางแผนโครงข่าย IP over WDM (IP over WDM network planning) ในงานวิจัยนี้พิจารณาการวางแผนการใช้งานแบนด์วิธในโครงข่าย ซึ่งแบนด์วิธหรือความจุเป็นทรัพยากรที่มีจำกัด ดังนั้นจึงต้องมีการจัดสรรการใช้งานอย่างเหมาะสม จึงจะทำให้เกิดการใช้งานทรัพยากรโครงข่ายอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ การวางแผนการใช้งานแบนด์วิธในโครงข่าย IP over WDM ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เป็น

การออกแบบโครงข่ายเสมือน (virtual network) (อธิบายในบทที่ 2) โดยที่โครงข่ายเสมือนเป็นโครงข่ายเชิงตรรกะที่ซ่อนอยู่ในโครงข่ายทางกายภาพ (physical network) ซึ่งเป็นโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น โดยการออกแบบและวางแผนโครงข่ายเสมือนนี้เป็นการกำหนดเส้นทางและจัดสรรความจุของข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อโหนดต้นทาง (source node) ผ่านโหนดต่างๆในโครงข่ายใยแก้วนำแสงไปจนถึงโหนดปลายทาง (destination node) โดยมีการคำนึงถึงลักษณะความไม่แน่นอนของทราฟฟิก นอกจากนี้ยังได้มีการเลือกติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมาะสมและเพียงพอสำหรับส่งทราฟฟิกไอพีผ่านโครงข่ายใยแก้วนำแสง โดยได้มีการพิจารณาถึงความสมดุลของทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายใยแก้วนำแสงด้วย

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

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

สำหรับสมการเงื่อนไขเป็นการกำหนดกรอบการวางแผนโครงข่ายเสมือน ซึ่งเป็นการระบุข้อจำกัดทางกายภาพของโครงข่ายได้แก่ ข้อจำกัดเรื่องแบนด์วิธหรือความจุของข่ายเชื่อมโยง ข้อจำกัดเรื่องเส้นทางในการส่งทราฟฟิกผ่านโหนดภายในโครงข่าย และความต้องการเรื่องการรับประกันระดับของความแปรปรวน ความไม่แน่นอนของทราฟฟิกไอพี

## 4.2 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม

จากแนวคิดในการวางแผนโครงข่าย IP over WDM ภายใต้อิทธิพลของความไม่แน่นอนของกราฟฟิสิกที่กล่าวมาแล้ว หัวข้อนี้จะได้นำเสนอการแปลงปัญหาดังกล่าวให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์การโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข หัวข้อถัดไปจะได้นิยามตัวแปรต่างๆที่ใช้ใน โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น และในหัวข้อต่อจากนั้นจะได้อธิบายรายละเอียดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข

### 4.2.1 การนิยามตัวแปร

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

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรเซต

สัญลักษณ์	คำนิยาม
$A$	เซตของข่ายเชื่อมโยงในชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น
$D$	เซตของกราฟฟิสิกไอพีที่ส่งระหว่างโนดในชั้นโครงข่ายไอพี
$P^k$	เซตของเส้นทางในการส่งผ่านชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสงสำหรับกราฟฟิสิก $k$ , $k \in D$

ตารางที่ 4.2 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรตัดสินใจ

สัญลักษณ์	คำนิยาม
$y_j$	ตัวแปรจำนวนเต็มซึ่งระบุจำนวนของอุปกรณ์สำหรับส่งกราฟฟิสิกไอพีผ่านโครงข่ายในแก้วนำแสง สำหรับข่ายเชื่อมโยง $j$ , $j \in A$
$z_j$	ตัวแปรไบนารี $\{0,1\}$ ถ้า $z_j = 1$ หมายถึง เลือกใช้ข่ายเชื่อมโยง $j$ ถ้า $z_j = 0$ หมายถึง ไม่เลือกใช้ข่ายเชื่อมโยง $j$ , $j \in A$
$f^{k,p}$	ตัวแปรไบนารี $\{0,1\}$ ถ้า $f^{k,p} = 1$ หมายถึง กราฟฟิสิก $k$ เลือกใช้เส้นทาง $p$ จากเซตของเส้นทางในการส่งผ่านชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ได้กำหนดไว้ $p \in P^k$ ถ้า $f^{k,p} = 0$ หมายถึง กราฟฟิสิก $k$ ไม่เลือกใช้เส้นทาง $p$ จากเซตของเส้นทางในการส่งผ่านชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ได้กำหนดไว้ $p \in P^k$

ตารางที่ 4.3 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่

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

#### 4.2.2 สมการเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มสำหรับวางแผนโครงข่ายเสมือน

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการวางแผนโครงข่ายเสมือนซึ่งเป็นโครงข่ายเชิงตรรกที่ซ่อนอยู่ในโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น โดยใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### (1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

ในงานวิจัยนี้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์กำหนดให้การวางแผนโครงข่ายเสมือนทำให้เกิดความสมดุลมากที่สุดในการส่งทราฟฟิกผ่านข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายใยแก้วนำแสง กล่าวคือต้องการให้มีการกระจายปริมาณของทราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงในชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสง เพื่อเพิ่มความมั่นคงปลอดภัยในการส่งข้อมูล ในกรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงอันใดอันหนึ่ง จะช่วยลดปริมาณทราฟฟิกที่ได้รับผลกระทบได้

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

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

## (2) สมการเงื่อนไข (Constraints)

สมการเงื่อนไขเป็นการระบุข้อจำกัดเพื่อกำหนดกรอบในการวางแผนโครงข่ายเสมือน ข้อจำกัดหรือเงื่อนไขที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ข้อจำกัดทางกายภาพของโครงข่าย ข้อจำกัดเรื่องแบนด์วิดท์หรือความจุของข่ายเชื่อมโยง ข้อจำกัดเรื่องเส้นทางในการส่งทราฟฟิกผ่านโหนดภายในโครงข่าย และความต้องการเรื่องการรับประกันระดับของความไม่แน่นอนของทราฟฟิกไอพี ผู้วิจัยได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับสมการเงื่อนไข 10 สมการ โดยแบ่งเงื่อนไขเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

### กลุ่มที่ 1 เงื่อนไขงบประมาณของการดำเนินงานในเครือข่าย

1. การระบุข้อจำกัดของงบประมาณค่าใช้จ่ายบนเครือข่าย ซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายของการใช้ความจุของเครือข่ายซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่ครอบคลุมถึงโมดูลทางออปติคอลและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งการใช้งานการเชื่อมโยงสำหรับการขนส่งข้อมูลในเครือข่าย

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

### กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรของเครือข่าย

2. เพื่อให้แน่ใจว่าจำนวนของโมดูลทางออปติคอลนั้น มีเพียงพอในการให้บริการสำหรับบนลิงค์  $j$  ดังนั้นลิงค์  $j$  จะสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของทุกความต้องการของทราฟฟิก IP ที่ขนส่งผ่านลิงค์  $j$  ซึ่งรูปแบบที่หลากหลายของความ ต้องการของทราฟฟิก IP จะถูกแสดงอยู่ในพารามิเตอร์  $x_k$

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

3. เพื่อให้แน่ใจว่าการเลือกใช้งานจำนวนโมดูลทางออปติคอลนั้น มีความจุไม่เกินขอบเขตของความจุ (B) บนลิงค์  $j$  เงื่อนไขนี้จึงเป็นการจำกัดของจำนวนโมดูลทางออปติคอลที่สามารถใช้ได้บนลิงค์  $j$

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

4. ปริมาณของกราฟฟิกร์ที่ขนส่งผ่านบนลิงค์จะถูกแสดงด้วยเงื่อนไขนี้ โดยจะเป็นการคำนวณปริมาณรวมของความต้องการของกราฟฟิกร์ IP ที่ขนส่งผ่านลิงค์  $j$

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

5. สำหรับการใช้งานโมดูลทางออปติคอป เพื่อให้แน่ใจว่าโมดูลทางออปติคอปจะไม่ถูกตั้งค่าให้ใช้งาน เมื่อไม่มีการขนส่งกราฟฟิกร์ผ่านลิงค์  $j$  เงื่อนไขนี้จึงระบุว่าหากไม่มีความต้องการของกราฟฟิกร์ที่ขนส่งผ่านบนลิงค์  $j$  แล้วโมดูลทางออปติคอปนั้นจะไม่ถูกตั้งค่าการใช้งาน กล่าวคือเป็นการบังคับให้  $y_j = 0$

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

6. ปริมาณรวมของกราฟฟิกร์ที่ขนส่งผ่านบนลิงค์  $j$  คือ ค่าที่ได้มาจากกราฟฟิกร์ที่มีการขนส่งบนลิงค์นั้น ดังนั้น ปริมาณรวมของกราฟฟิกร์บนลิงค์  $j$  จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของปริมาณกราฟฟิกร์ที่มีอยู่บนลิงค์  $j$  กล่าวคือ  $r_j$  จะเป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

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

7. จำนวนโมดูลทางออปติคอปที่ใช้งานบนลิงค์  $j$  จะถูกตั้งค่าการใช้งานเมื่อมีกราฟฟิกร์ขนส่งผ่านบนลิงค์  $j$  ดังนั้น จำนวนโมดูลทางออปติคอปที่ใช้งานบนลิงค์  $j$  จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดเริ่มต้นของจำนวนโมดูลทางออปติคอปที่ถูกตั้งค่าอยู่บนลิงค์  $j$  กล่าวคือ  $y_j$  เป็นตัวแปรที่ไม่เป็นเชิงลบ

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

กลุ่มที่ 3 เงื่อนไขในการเลือกใช้เส้นทางในการเชื่อมต่อภายในเครือข่าย

8. สำหรับการเลือกเส้นทางในเครือข่าย เพื่อไม่ให้มีการเลือกเส้นทางที่ซ้ำซ้อน เงื่อนไขนี้จึงระบุว่าความต้องการของกราฟฟิกร์  $k$  ให้สามารถเลือกได้เพียงหนึ่งเส้นทางจากเส้นทางที่ถูกกำหนดไว้ชุดของเส้นทาง  $P^k$

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



9. เงื่อนไขนี้จะแสดงการเลือกใช้ลิงค์สำหรับเส้นทางที่ถูกเลือกให้ขนส่งข้อมูล โดยจะกำหนดให้ลิงค์  $j$  นั้นจะต้องถูกตั้งค่าให้ใช้งานถ้าความต้องการของกราฟฟิกลง  $k$  ใช้เส้นทาง  $p$  ในการขนส่งซึ่งเป็นเส้นทางที่ผ่านลิงค์  $j$

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

10. สำหรับการใช้งานลิงค์ เพื่อให้แน่ใจว่าลิงค์  $j$  จะไม่ถูกตั้งค่าให้ใช้งาน เมื่อไม่มีการขนส่งกราฟฟิกลงทางลิงค์  $j$  เงื่อนไขนี้จะระบุว่าหากไม่มีความต้องการของกราฟฟิกลงที่จะขนส่งผ่านบนลิงค์  $j$  แล้วลิงค์  $z_j$  จะไม่ถูกตั้งค่าการใช้งาน กล่าวคือเป็นการบังคับให้  $z_j = 0$

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

สำหรับพารามิเตอร์  $x_k$  นั้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.12) ดังที่ Liu, B. (2009) กล่าวไว้ว่าให้พิจารณาดังรูปแบบเงื่อนไขข้อจำกัดแบบมีโอกาสดัง (Chance constraint) เพื่อให้แน่ใจว่าการจัดสรรความจุหรือแบนด์วิดธ์บนการเชื่อมโยงจะมีมากกว่าหรือเท่ากับปริมาณกราฟฟิกลงที่ไม่แน่นอน ( $\xi$ ) โดยสมการความน่าจะเป็นสามารถเขียนได้คือ  $P(x \geq \xi) \geq \alpha$  โดยที่  $0 \leq \alpha \leq 1$  และความต้องการของกราฟฟิกลงที่จะถูกขนส่งในเครือข่ายจะมีระดับของการรับประกันคือ  $\alpha$  ซึ่งสมมติว่ากราฟฟิกลงเป็นกระจายตามปกติที่มีค่าเฉลี่ย ( $\mu$ ) และค่าความแปรปรวน ( $\sigma^2$ ) โดยตัวแปรสุ่ม ( $\xi$ ) จะมีฟังก์ชันการแจกแจงสะสมคือ  $\Phi(\cdot)$  และสามารถผกผันเปลี่ยนเป็น  $\Phi^{-1}(\cdot)$  ดังนั้นพารามิเตอร์  $x_k$  สามารถเขียนดังนี้

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

#### 4.3 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม

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

##### 4.3.1 การแปลงสมการเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มเป็นคำสั่งในโปรแกรม

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

ตารางที่ 4.4 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นเป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม

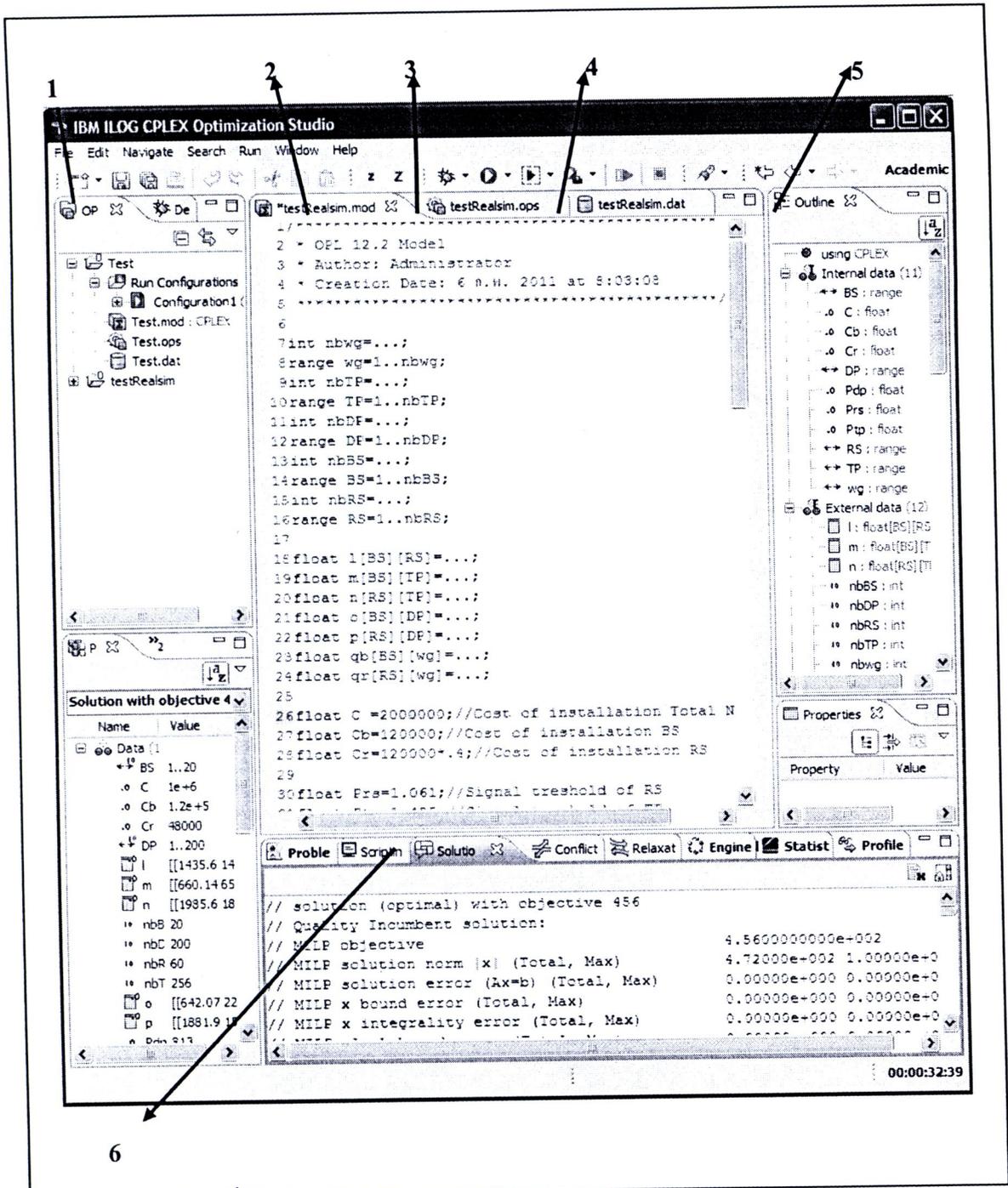
IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

สมการคณิตศาสตร์	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	//Decision Variable
$r_j$	dvar float r[link];
$y_j$	dvar int+ y[link];
$z_j$	dvar int z[link] in 0..1;
$f^{k,p}$	dvar int f[demand][path] in 0..1;
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	//Objective function
สมการ(2.1)	Minimize (sum(j in link)(abs(r[j] - (sum(j in link)r[j])/nblink)))/nblink;
เงื่อนไข	subject to {
สมการ(2.2)	ct1 : sum(j in link)(c[j]*y[j] + F[j]*z[j]) <= CL;
สมการ(2.3)	ct2 : forall (j in link) sum(k in demand, p in path)x[k]*s[k][p][j]*f[k][p] <= M*y[j];
สมการ(2.4)	ct3 : forall (j in link) M*y[j] <= B[j];
สมการ(2.5)	ct4 : forall (j in link) r[j] == sum(k in demand, p in path)x[k]*s[k][p][j]*f[k][p];
สมการ(2.6)	ct5 : forall (j in link) y[j] <= r[j];
สมการ(2.7)	ct6 : forall (j in link) r[j] >= 0;
สมการ(2.8)	ct7 : forall (j in link) y[j] >= 0;
สมการ(2.9)	ct8 : forall (k in demand) sum(p in path)f[k][p]==1;
สมการ(2.10)	ct9 : forall (j in link) forall (k in demand) forall (p in path) s[k][p][j]*f[k][p]<=z[j];
สมการ(2.11)	ct10 : forall (j in link) z[j] <= r[j];

#### 4.3.2 ส่วนประกอบของโปรแกรม

รูปที่ 4.1 แสดงหน้าต่างโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio ซึ่งมีรายละเอียดและหน้าที่การทำงานดังนี้

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



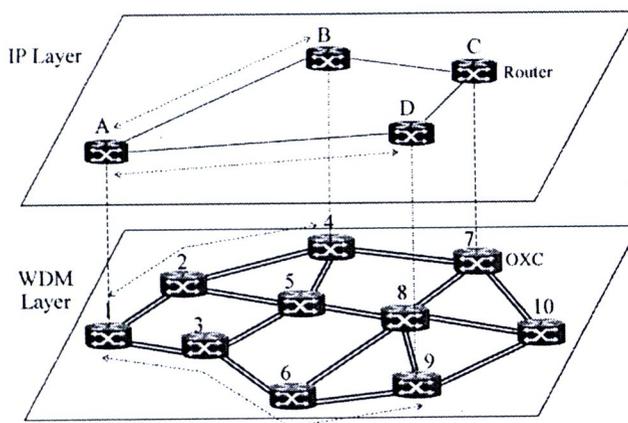
รูปที่ 4.1 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

#### 4.4 การทดลองและการวิเคราะห์ผล

เนื้อหาในหัวข้อนี้นำเสนอการทดลองที่ใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มที่ได้พัฒนาขึ้น ในการวางแผนโครงข่ายเสมือนซึ่งเป็นโครงข่ายเชิงตรรกที่ซ่อนอยู่ในโครงข่ายใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่น โดยเนื้อหาในหัวข้อที่ 4.4.1 อธิบายลักษณะโครงสร้างของโครงข่ายที่ใช้ในการทดลอง และอธิบายพารามิเตอร์ต่างๆของระบบการทำงาน หัวข้อที่ 4.4.2 นำเสนอการวิเคราะห์ความสมดุลของกราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงของชั้นโครงข่ายใยแก้วนำแสง หัวข้อที่ 4.4.3 นำเสนอการการศึกษาผลกระทบจากงบประมาณที่กำหนดสำหรับการจัดส่งกราฟฟิกและการวิเคราะห์ผลกระทบจากความแปรปรวนของกราฟฟิกต่อความสมดุลของการจัดส่งกราฟฟิกภายในโครงข่าย หัวข้อที่ 4.4.4 นำเสนอการวิเคราะห์การใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวของกราฟฟิกที่ต่างกันในการวางแผนโครงข่าย และสุดท้ายหัวข้อที่ 4.4.5 นำเสนอการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการใช้ทรัพยากรโครงข่ายในการรองรับกราฟฟิกเมื่อพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิก

##### 4.4.1 ลักษณะพารามิเตอร์และโครงข่ายที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของโครงข่าย IP over WDM (IP over WDM network) ที่ใช้ในการทดลอง โดยโครงข่ายชั้นใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคนิคการมัลติเพล็กซ์เชิงความยาวคลื่นประกอบด้วยอุปกรณ์เชื่อมต่อสลับลำแสงหรือโอเอ็กซ์ซี (Optical Cross Connect: OXC) จำนวน 10 โหนด และประกอบด้วยข่ายเชื่อมโยงใยแก้วนำแสงจำนวน 10 ข่ายเชื่อมโยง ส่วนโครงข่ายเสมือนของชั้นไอพีจะพิจารณาการส่งกราฟฟิกระหว่าง 10 คู่โหนดของชั้นไอพี ซึ่งเลือกมาโดยการสุ่ม



รูปที่ 4.2 โครงข่ายที่พิจารณาในการทดลอง

ตารางที่ 4.5 แสดงพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งราคาของอุปกรณ์สำหรับส่งกราฟฟิคไอพีผ่านข่ายเชื่อมโยงและค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเลือกใช้ข่ายเชื่อมโยงเป็นสัดส่วนราคาที่ยังอิงจากราคาในการเช่าและการติดตั้งระบบใยแก้วนำแสงในประเทศไทย

การทดลองในหัวข้อย่อยต่อไปนี้จะพิจารณาความไม่แน่นอนของกราฟฟิค โดยพิจารณากราฟฟิคที่มีลักษณะการกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) หรือมีการกระจายแบบเบต้า (Beta distribution) ซึ่งรายละเอียดได้ระบุไว้ในแต่ละหัวข้อ

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ค่าคงที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเครือข่าย

พารามิเตอร์	ค่า
ขนาดของอุปกรณ์สำหรับส่งกราฟฟิคไอพีผ่านโครงข่ายในแก้วนำแสง ( $M$ )	STM1 (155.52 Mbps)
แบนด์วิธหรือความจุของข่ายเชื่อมโยง ( $B_j$ )	5 Gbps
ราคาของอุปกรณ์สำหรับส่งกราฟฟิคไอพีผ่านข่ายเชื่อมโยง ( $C_j$ )	150,000
ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการเลือกใช้ข่ายเชื่อมโยง ( $F_j$ )	15,000

#### 4.4.2 การวิเคราะห์ความสมดุลของกราฟฟิคในโครงข่าย

การทดลองในหัวข้อนี้ทำการเปรียบเทียบวิธีการวางแผนโครงข่ายเสมือนที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ กับวิธีการอื่นที่ได้มีการนำเสนออยู่ในบทความวิจัย โดยได้เปรียบเทียบกับวิธีการที่นำเสนอใน [16] ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการลดค่าใช้จ่ายของการใช้ทรัพยากรโครงข่ายในการจัดส่งกราฟฟิคโดยให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด และพิจารณาข้อจำกัดเกี่ยวกับความจุของข่ายเชื่อมโยงและการรับประกันการส่งกราฟฟิคให้สามารถรองรับความไม่แน่นอนของกราฟฟิคตามที่กำหนด

โดยในการทดลองได้พิจารณากราฟฟิคที่มีความไม่แน่นอนซึ่งมีลักษณะการกระจายแบบปกติหรือแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ที่มีค่าเฉลี่ยของกราฟฟิค 225 Mbps และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 25 Mbps [25] โดยได้ทำการวางแผนโครงข่ายเสมือนเพื่อให้สามารถรองรับความแปรปรวนหรือความไม่แน่นอนของกราฟฟิคที่ 90% และ 99% ในกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคที่ระดับ 90% ค่าของ  $x_k = 257.04$  Mbps ส่วนกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิคที่ระดับ 99% ค่าของ  $x_k = 283.16$  Mbps

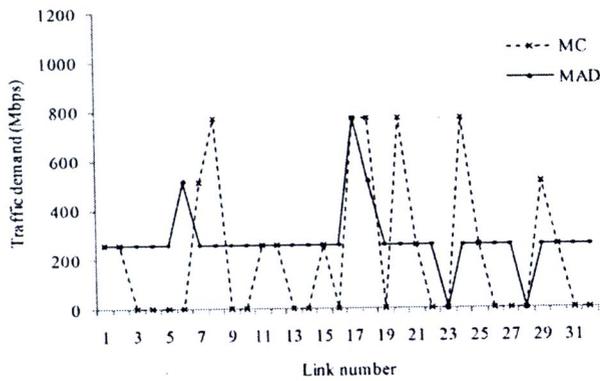
การหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการวางแผนโครงข่ายเสมือนดังกล่าวทำโดยใช้ โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ที่จะมีการป้อนข้อมูลของชุดเส้นทางที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละกราฟฟิค



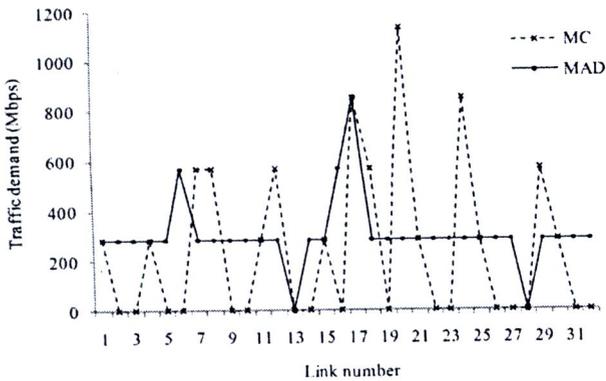
ฟิก ( $P^f$ ) และทำการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์รุ่น Intel Centrino Core2 Duo Processor 2.0 GHz หน่วยความจำขนาด 2GB

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

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบปริมาณของกราฟฟิกในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นผลมาจากการใช้วิธี MC และวิธี MAD จะเห็นว่าการใช้วิธี MC นั้นทำให้บางข่ายเชื่อมโยงมีปริมาณกราฟฟิกที่สูงมาก ในขณะที่หลายข่ายเชื่อมโยงมีปริมาณกราฟฟิกที่น้อยมาก หรือไม่มีเลย ส่วนการใช้วิธี MAD ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ทำให้ได้ผลแบบตรงกันข้าม กล่าวคือปริมาณกราฟฟิกในข่ายเชื่อมโยงต่างๆของโครงข่ายใยแก้วนำแสงมีลักษณะที่สมดุลมากกว่า คือปริมาณกราฟฟิกที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงต่างๆ มีปริมาณใกล้เคียงกัน ยกเว้นข่ายเชื่อมโยงที่ 17 รองรับปริมาณกราฟฟิกมากกว่าข่ายเชื่อมโยงอื่น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นกรณีที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ เพราะโครงสร้างการเชื่อมต่อทางกายภาพของโครงข่ายใยแก้วนำแสงทำให้เกิดลักษณะคอขวดขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงที่ 17



รูปที่ 4.3 กรณีรับประกันความไม่แน่นอนของกราฟฟิกที่ระดับ 90%



รูปที่ 4.4 กรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่ระดับ 99%

#### 4.4.3 การศึกษาผลกระทบจากงบประมาณที่กำหนดและความไม่แน่นอนของทราฟฟิก

การทดลองในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลกระทบต่อลักษณะของโครงข่ายเสมือนที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยได้ศึกษาผลกระทบใน 2 ประเด็น คือ ผลกระทบจากงบประมาณที่กำหนดสำหรับการจัดส่งทราฟฟิก และผลกระทบจากความไม่แน่นอนของทราฟฟิกที่สามารถรองรับได้

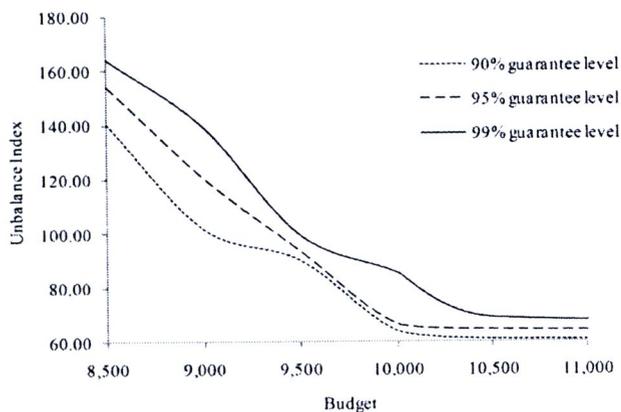
ในการบอกลักษณะของโครงข่ายเสมือนที่ได้จากการออกแบบ ได้ทำการประเมินจากลักษณะการกระจายของทราฟฟิกในโครงข่ายใยแก้วนำแสง ว่ามีลักษณะการส่งทราฟฟิกผ่านข่ายเชื่อมโยงต่างๆ อย่างสมดุลหรือไม่ ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ใช้ตัวชี้วัดที่เรียกว่า ดัชนีความไม่สมดุล (Unbalance index) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ขอทราฟฟิกไอพีที่ส่งผ่านข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายใยแก้วนำแสง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

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

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

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าดัชนีความไม่สมดุลจะลดลงตามงบประมาณในการจัดสรรทรัพยากรที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือยิ่งกำหนดงบประมาณสูงยิ่งทำให้การกระจายของทรัพยากรในโครงข่ายมากขึ้น นั่นคือมีความสมดุลของทรัพยากรมากขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองนี้ จะเห็นว่าเทคนิคการวางแผนโครงข่ายที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความไม่สมดุลทรัพยากรได้ถึง 68 % เมื่องบประมาณเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มงบประมาณก็มีขีดจำกัด สำหรับกรณีของโครงข่ายที่ใช้ในการทดลองนี้ ขีดจำกัดอยู่ที่ 10,500 หน่วย จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าแม้จะเพิ่มงบประมาณสูงกว่าขีดจำกัดนี้ ก็ไม่ช่วยทำให้ทรัพยากรมีความสมดุลเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของการกำหนดค่าความไม่แน่นอนของทรัพยากรที่สามารถรองรับได้ต่อค่าดัชนีความไม่สมดุล จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าทั้งงบประมาณค่าใดๆ เมื่อระดับความไม่แน่นอนของทรัพยากรเพิ่มขึ้น จะทำให้ดัชนีความไม่สมดุลเพิ่มขึ้น นั่นคือการกระจายของเส้นทางที่เลือกสำหรับใช้ส่งทรัพยากรลดลง

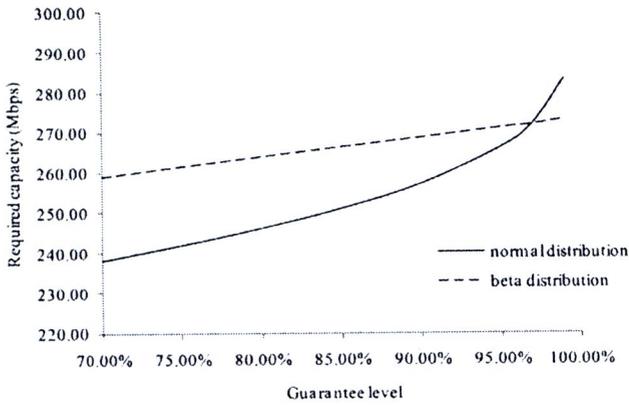


รูปที่ 4.5 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการกระจายแบบปกติ

#### 4.4.4 การวิเคราะห์การใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวของทรัพยากรที่ต่างกันในการวางแผนโครงข่ายเสมือน

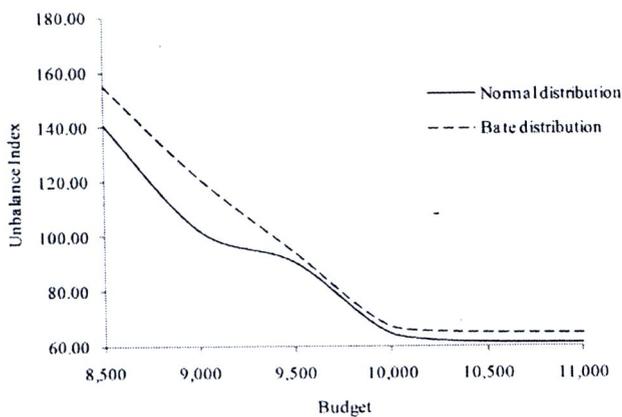
การทดลองในหัวข้อนี้คล้ายกับหัวข้อ 4.4.3 แต่ได้เพิ่มการพิจารณาทรัพยากรที่มีลักษณะการกระจายแบบเบต้า (Beta distribution) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของทรัพยากรที่ 225 Mbps และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 25 Mbps [26] โดยได้พิจารณาความไม่แน่นอนของทรัพยากรที่ 90%, 95% และ 99% ในกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทรัพยากรที่ระดับ 90% ค่าของ  $x_k = 266.84$  Mbps ในกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทรัพยากรที่ระดับ 95% ค่าของ  $x_k = 271.75$  Mbps ส่วนกรณีรับประกันความไม่แน่นอนของทรัพยากรที่ระดับ 99% ค่าของ  $x_k = 280.01$  Mbps

รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบขนาดของแบนด์วิดท์หรือความจุช่องสัญญาณสำหรับรองรับทราฟฟิกที่มีลักษณะการกระจายแบบปกติ และมีลักษณะการกระจายแบบเบต้า เพื่อการรับประกันความไม่แน่นอนของทราฟฟิกในระดับต่างๆ ตั้งแต่ 70% - 100%

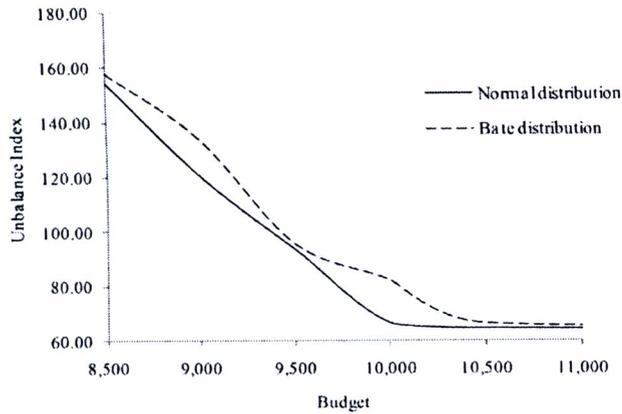


รูปที่ 4.6 ปริมาณของทราฟฟิกในระดับการรับประกันความไม่แน่นอนที่แตกต่างกัน

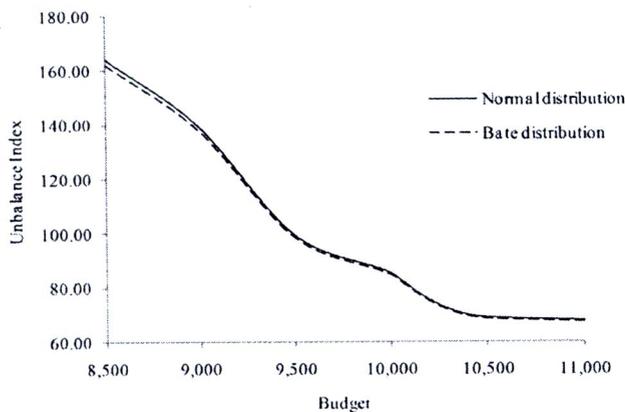
ผลการทดลองใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวของทราฟฟิกที่ต่างกันในการวางแผนโครงข่าย แสดงในรูปที่ 4.7-4.9 โดยประเมินจากดัชนีความไม่สมดุลของโครงข่ายเสมือนที่ได้จากการออกแบบ จากรูป 4.7 และ 4.8 จะเห็นว่า เมื่อกำหนดการรับประกันความไม่แน่นอนที่ระดับต่ำ คือ 90% และ 95% การใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบปกติจะให้ค่าดัชนีความไม่สมดุลที่ต่ำกว่าการใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเบต้า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



รูปที่ 4.7 ดัชนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 90%



รูปที่ 4.8 คำนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 95%



รูปที่ 4.9 คำนีความไม่สมดุลในกรณีของการรับประกันความไม่แน่นอนที่ 99%

#### 4.4.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการใช้ทรัพยากรโครงข่าย

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

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการใช้ทรัพยากรโครงข่าย เมื่อกำหนดงบประมาณและระดับการรับประกันความไม่แน่นอนทราฟฟิกที่ต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อกำหนดการ

รับประกันความไม่แน่นอนที่ระดับสูงขึ้น จะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์จ่ายเชื่อมโยงที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถเพิ่มการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรโครงข่ายได้สูงถึง 8 % และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวของทราฟฟิกที่ต่างกันในการวางแผนโครงข่ายจะเห็นว่าการใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเบต้าจะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์จ่ายเชื่อมโยงที่สูงกว่า เมื่อกำหนดการรับประกันความไม่แน่นอนที่ระดับ 90% และ 95% แต่เมื่อกำหนดการรับประกันความไม่แน่นอนที่ระดับ 99% ฟังก์ชันการกระจายตัวทั้งสองแบบจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การใช้ประโยชน์จ่ายเชื่อมโยงที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซนต์การใช้ประโยชน์จ่ายเชื่อมโยง

ระดับการรับประกันความไม่แน่นอนทราฟฟิก	งบประมาณ ( $\times 10^3$ )	การกระจายแบบปกติ		การกระจายแบบเบต้า	
		ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.
90%	8500	84.42%	4.88%	86.08%	0.00%
	9500	82.49%	6.43%	86.08%	0.00%
	10500	83.47%	3.03%	86.49%	2.25%
95%	8500	85.85%	0.00%	87.66%	0.00%
	9500	85.85%	0.00%	87.66%	0.00%
	10500	86.25%	2.24%	87.66%	0.00%
99%	8500	91.34%	0.00%	90.33%	0.00%
	9500	91.34%	0.00%	90.33%	0.00%
	10500	91.34%	0.00%	89.29%	5.59%

#### 4.5 สรุป

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