บทที่ 5
ผลการทดลอง

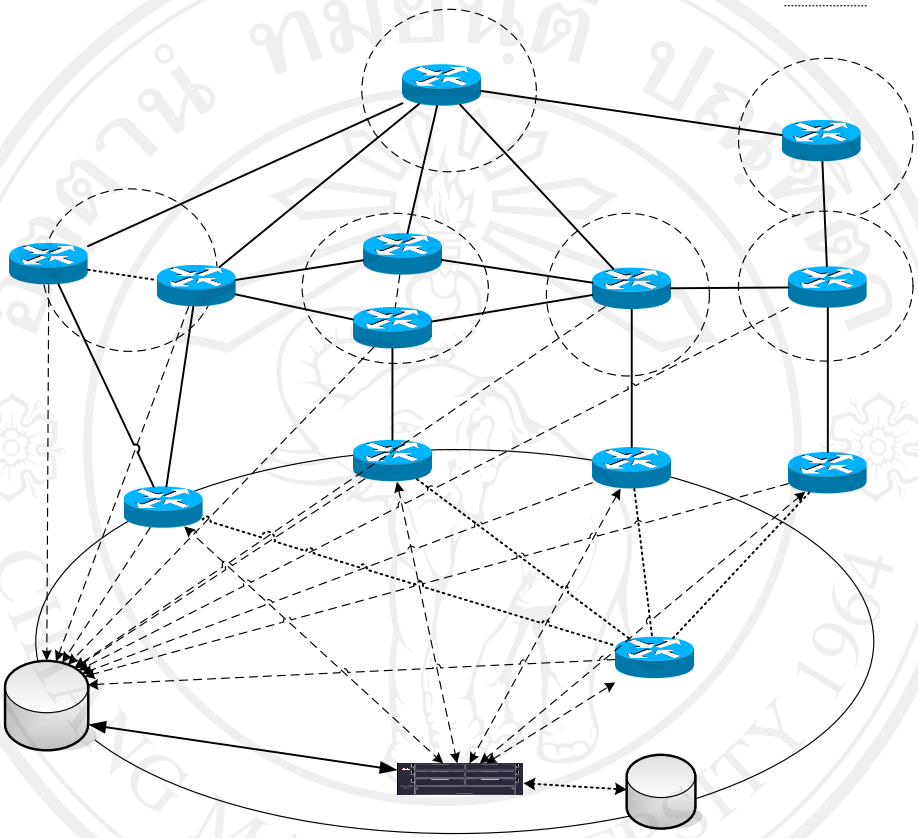
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้ จากการนำระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ลูกผสมมาทดสอบกับการจราจรระหว่างโดเมน ซึ่งประกอบด้วย การจำลอง ผลลัพธ์ การประเมินประสิทธิภาพ และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทั้งก่อนและหลังนำระบบควบคุมมาใช้งาน

5.1 การจำลอง

ในการจำลองนั้น ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบที่เหมือนกับความเป็นจริงมากที่สุดโดยจะครอบคลุมเกือบทุกกรณีที่เป็นไปได้ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อเป็นแบบมัลติโฮมเมดทูมัลติเปิลโพรวายเดอรส์ ซึ่งประกอบไปด้วยระบบอัตโนมัติ 7 ระบบ อุปกรณ์จัดเส้นทางบีจีพี 13 ตัว และลิงค์ 5 ลิงค์ เชื่อมต่อกับโดเมนบริเวณเฉพาะที่ (Local Domain) กับผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต รูป 5.1 แสดงโครงสร้างการทำงานและบีจีพีเซสชัน ประกอบด้วย ระบบอัตโนมัติ AS100 เป็นโดเมนบริเวณเฉพาะที่ ซึ่งอาจจะเป็นระบบเครือข่ายสตับ (Stub Network) หรือระบบเครือข่ายส่งผ่าน (Transit Network) โดยโดเมนบริเวณเฉพาะที่นี้ จะเชื่อมต่อกับผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต 4 ราย คือ ระบบอัตโนมัติ AS200 AS300 AS400 และ AS500 ด้วยการใช้อุปกรณ์จัดเส้นทางบีจีพี R14 R13 R12 R11 ตามลำดับ หลังจากนั้นได้กำหนดขนาดความจุของแบนด์วิดท์ของแต่ละลิงค์ โดยให้ลิงค์ Link1 มีขนาดความจุ 500 Mbps Link2 มีขนาดความจุ 400 Mbps Link3 มีขนาดความจุ 300 Mbps Link4 มีขนาดความจุ 400 Mbps และลิงค์ Link5 มีขนาดความจุ 600 Mbps ให้อุปกรณ์จัดเส้นทางบีจีพี R15 เป็นตัวสะท้อนเส้นทาง (Route Reflector หรือ RR) อุปกรณ์จัดเส้นทางบีจีพี R14 เชื่อมต่อกับระบบอัตโนมัติ AS200 โดยใช้ลิงค์ Link1 และลิงค์ Link2 อุปกรณ์จัดเส้นทางบีจีพี R13 เชื่อมต่อกับระบบอัตโนมัติ AS300 โดยใช้ลิงค์ Link3 อุปกรณ์จัดเส้นทางบีจีพี R12 เชื่อมต่อกับระบบอัตโนมัติ AS400 โดยใช้ลิงค์ Link4 และอุปกรณ์จัดเส้นทางบีจีพี R11 เชื่อมต่อกับระบบอัตโนมัติ AS 500 โดยใช้ลิงค์ Link5 การเพียริงกันระหว่างอุปกรณ์จัดเส้นทางบีจีพีแต่ละตัวที่อยู่ติดกัน จะสร้างเซสชัน (Session) ที่จุดต่อประสานลูปแบ็ค (Loopback Interface) ของอุปกรณ์จัดเส้นทางบีจีพีแต่ละตัว และ IGP ที่ใช้ เป็นโพรโทคอลการจัดเส้นทาง OSPF พื้นที่ 0 (Area 0) เพื่อใช้ในการเรียนรู้เส้นทางของตัวต่อประสานลูปแบ็คนั้นๆ หลังจากนั้นทุกๆ 5 นาที อุปกรณ์จัดเส้นทางบีจีพีแต่ละตัวที่อยู่ในโดเมนบริเวณเฉพาะที่นี้ และอุปกรณ์จัดเส้นทางบีจีพีของผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตจะทำการส่งการไหลของข้อมูล (Flow) มายังฐานข้อมูล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การไหล (Flow Database) และทุก 5 นาทีระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ลูกผสมจะทำการควบคุมการจราจรทั้งไหลเข้าและการจราจรไหลออก



รูปที่ 5.1 โครงสร้างการทำงานและบีจีพีเซสชัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

R7

R10

R9

AS 300

AS 200

R8

Link 1
500 Mbps

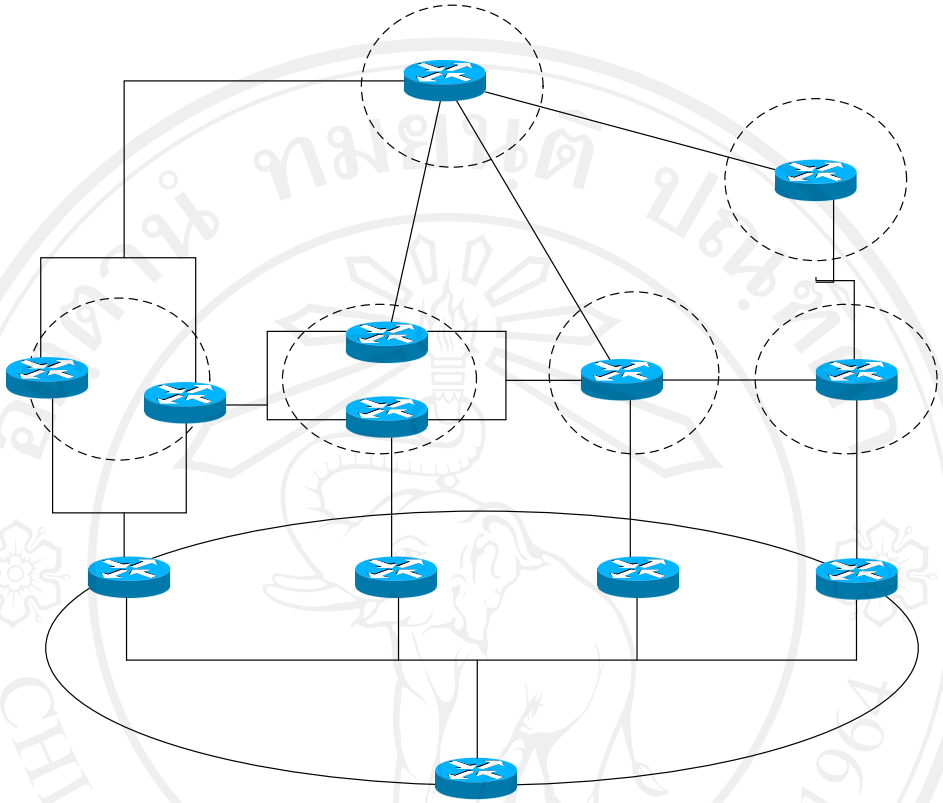
Link 3
400 Mbps

Link 3
300 Mbps

R13

R14

รูปที่ 5.2 แสดงการจำลองของระบบเครือข่ายที่ใช้ทดสอบระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ลูกผสม โดยการเชื่อมต่อของสายส่งข้อมูล และการประกาศการกำหนดเส้นทางตามที่แสดงในรูป



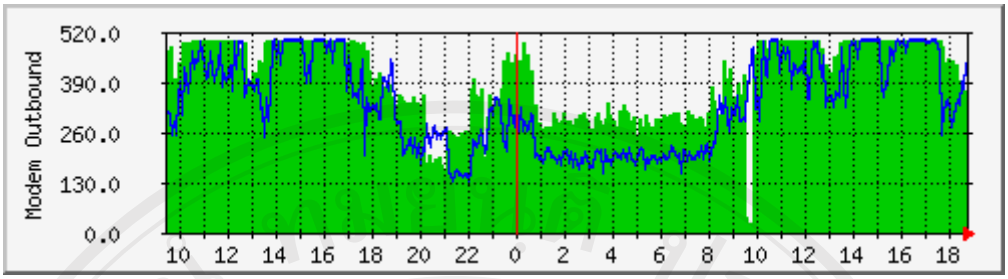
รูปที่ 5.2 การจำลองเครือข่าย

5.2 ผลการควบคุม

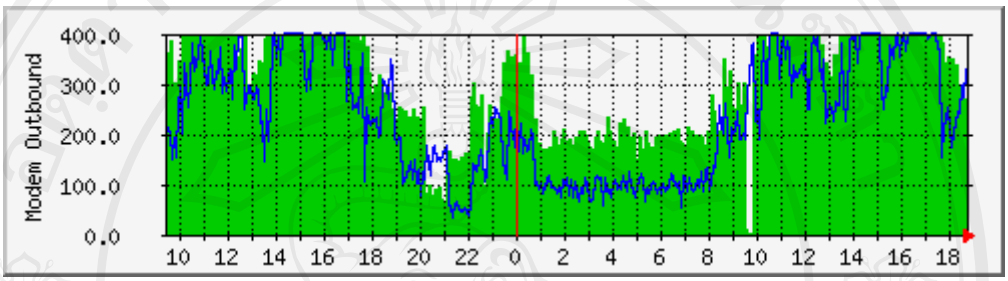
รูปที่ 5.3 แสดงถึงผลลัพธ์ของการจำลองของระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ลูกผสม ปริมาณแบนด์วิดท์ที่ถูกใช้งานจริงของแต่ละลิงค์ โดยเส้นสีเขียวแสดงการจราจรขาเข้า เส้นสีน้ำเงินแสดงการจราจรขาออก รูปที่ 5.4 แสดงการทิ้งของกลุ่มข้อมูล (Packets Drop) ของแต่ละลิงค์ เส้นสีเขียวแสดงการทิ้งของกลุ่มข้อมูลขาเข้า เส้นสีน้ำเงินแสดงการทิ้งของกลุ่มข้อมูลขาออก ผลลัพธ์ที่ได้จากการนำระบบนี้มาใช้ก็คือ การจราจรจะเกิดการใช้งานร่วมกัน (Sharing) และได้ดุลภาระที่ดีที่สุด เมื่อทุกลิงค์ถูกใช้งานเต็ม หรือเกินกว่าความจุของแบนด์วิดท์ที่มีอยู่ ได้ ค่า ELB ของทุกลิงค์จะเพิ่มขึ้น และจะมีการทิ้งของกลุ่มข้อมูลของทุกลิงค์ที่ใกล้เคียงกันดังในรูปที่ 5.4 จึงทำให้ได้ค่า ND ที่ดีที่สุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

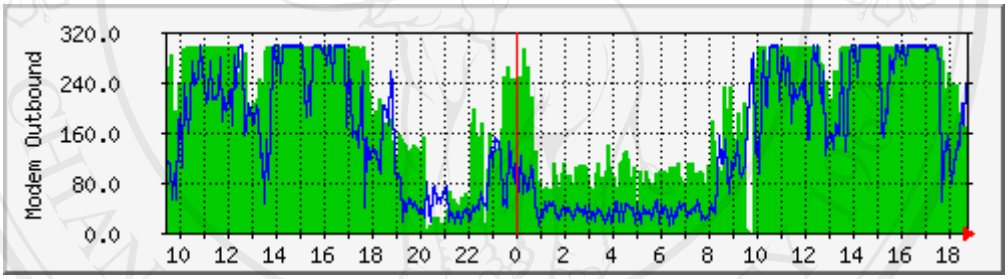
Link 1



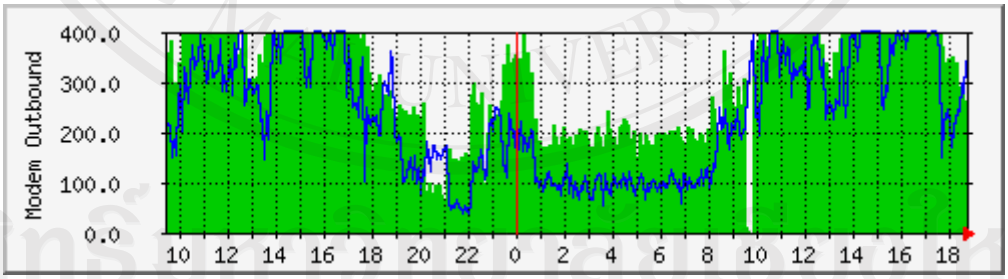
Link 2



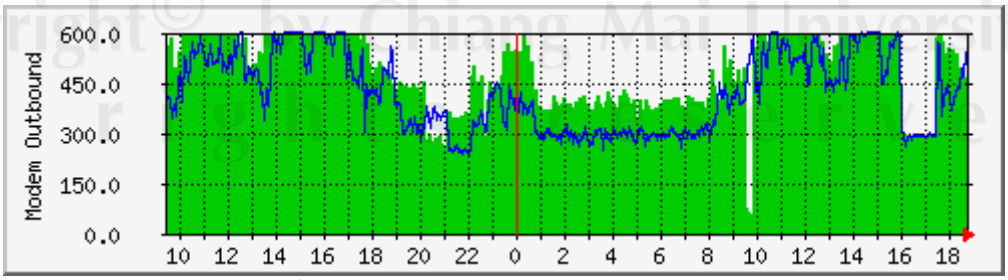
Link 3



Link 4



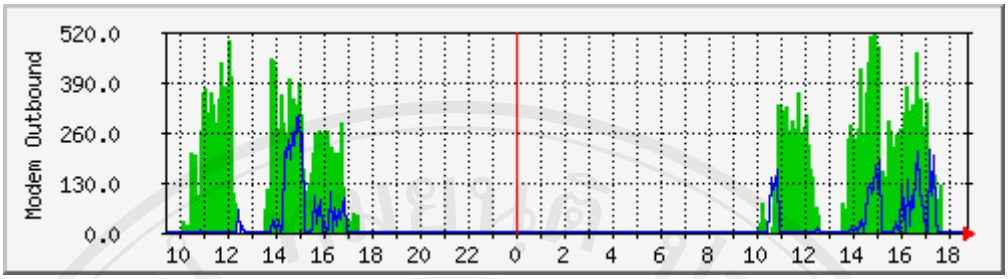
Link 5



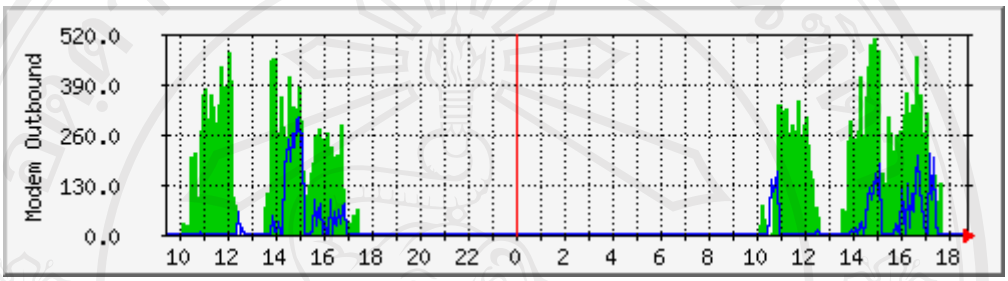
รูปที่ 5.3 การใช้งานแบนด์วิดท์ของแต่ละลิงค์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

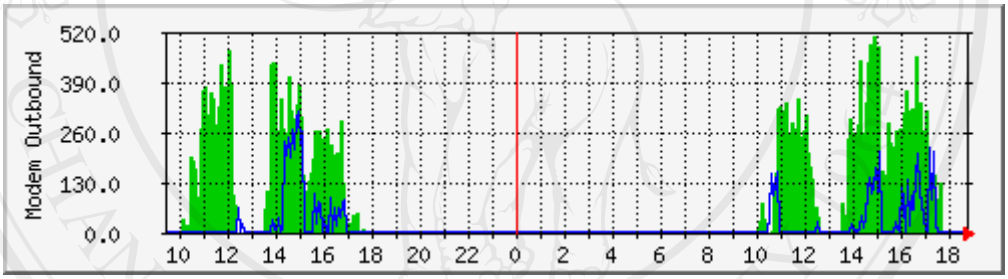
Link 1



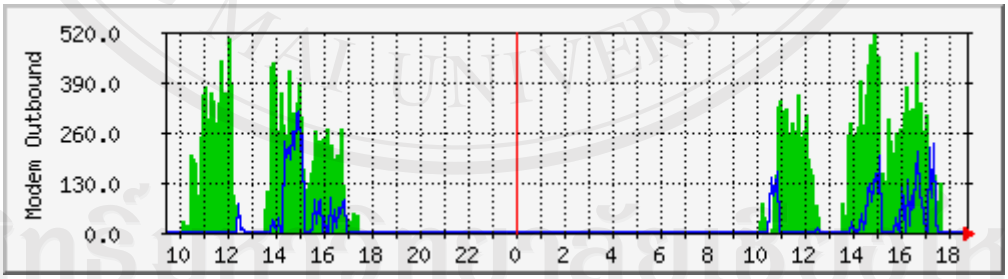
Link 2



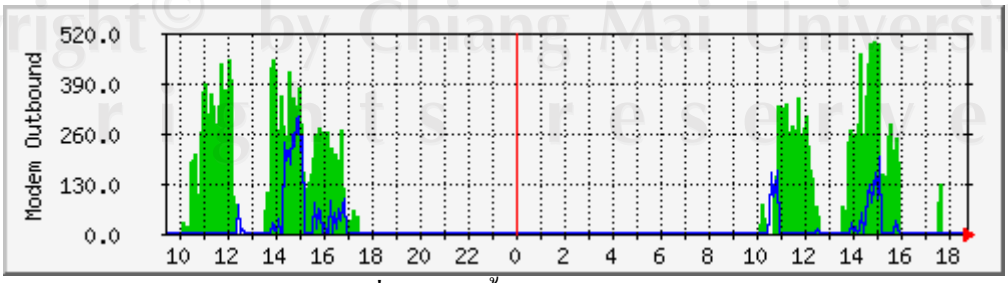
Link 3



Link 4



Link 5



รูปที่ 5.4 การทิ้งของกลุ่มข้อมูล

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภายใต้เงื่อนไขการสำรองการจราจร ลิงค์ที่กำหนดให้เป็นลิงค์ที่มีการสำรองการจราจร จะต้องไม่มีการทิ้งของข้อมูลเกิดขึ้นเด็ดขาด เพราะมันอาจจะทำการทิ้งกลุ่มข้อมูลของไอพีพรีฟิกที่ต้องการสำรองก็เป็นได้

จากรูป ณ เวลา 16.00 ถึง 17.30 ผู้วิจัยได้กำหนดให้ลิงค์ Link5 มีการสำรองการจราจร สำหรับกลุ่มข้อมูลที่ต้องการเสถียรภาพสูงความเร็วสูงทั้งการจราจรขาเข้าและการจราจรขาออกให้มีขนาดแบนด์วิดท์ไม่เกิน 300 Mbps จากรูปที่ 5.4 ลิงค์ Link5 แสดงให้เห็นว่า การจราจรขาเข้าและการจราจรขาออกจะอยู่ที่ขนาดไม่เกิน 300 Mbps โดยที่การทิ้งของกลุ่มข้อมูลของลิงค์ Link5 จะเป็นศูนย์ การใช้งานของแบนด์วิดท์ไม่เต็มประสิทธิภาพ ในขณะที่ลิงค์อื่นๆ มีการทิ้งของของกลุ่มข้อมูล การใช้งานของแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น อัตราค่าเฉลี่ยการใช้งานเครือข่ายลดลง ในขณะที่อัตราการทิ้งของกลุ่มข้อมูลของเครือข่ายเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.9

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบเครือข่ายเมื่อมีการสำรองการจราจร ทำได้ 2 วิธี

1) ใช้วิธีวิทยาการศึกษาสำนึก โดยมีเป้าหมายคือ ดีเพียงพอ หรือพอใช้ จะไม่มีการประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ ใช้ความเชี่ยวชาญของผู้ดูแลระบบ ใช้การจำลองเหตุการณ์ ใช้วิธีลองผิดลองถูก ที่สำคัญห้ามมีการทิ้งของกลุ่มข้อมูลบนลิงค์ที่มีการสำรองการจราจรเป็นอันขาด วิธีการทำได้ ดังนี้

1) ใช้การควบคุมแบบด้วยมือบนพื้นฐานการสำรองการจราจร

2) กำหนดไอพีพรีฟิกที่ต้องการเสถียรภาพสูงความเร็วสูงเดินทางบนลิงค์ที่ต้องการสำรอง

3) กำหนดค่าการใช้งานแบนด์วิดท์ได้มากสุดแบบพลวัต (Dynamic max Bandwidth Allocating) กับลิงค์ที่ต้องการให้มีสำรองการจราจร โดยค่ามากสุดนี้จะปรับเปลี่ยนไปตามช่วงเวลา โดยการใช้วิธีวิทยาการศึกษาสำนึกปรับเปลี่ยนค่าแต่ละช่วงเวลาตามความเหมาะสม เพื่อให้ได้การใช้งานแบนด์วิดท์เป็นที่น่าพอใจที่สุด

2) ใช้ความสามารถของการควบคุมแบบด้วยมือตามความต้องการและการควบคุมแบบอัตโนมัติของระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ลูกผสมที่มีอยู่ ดังนี้

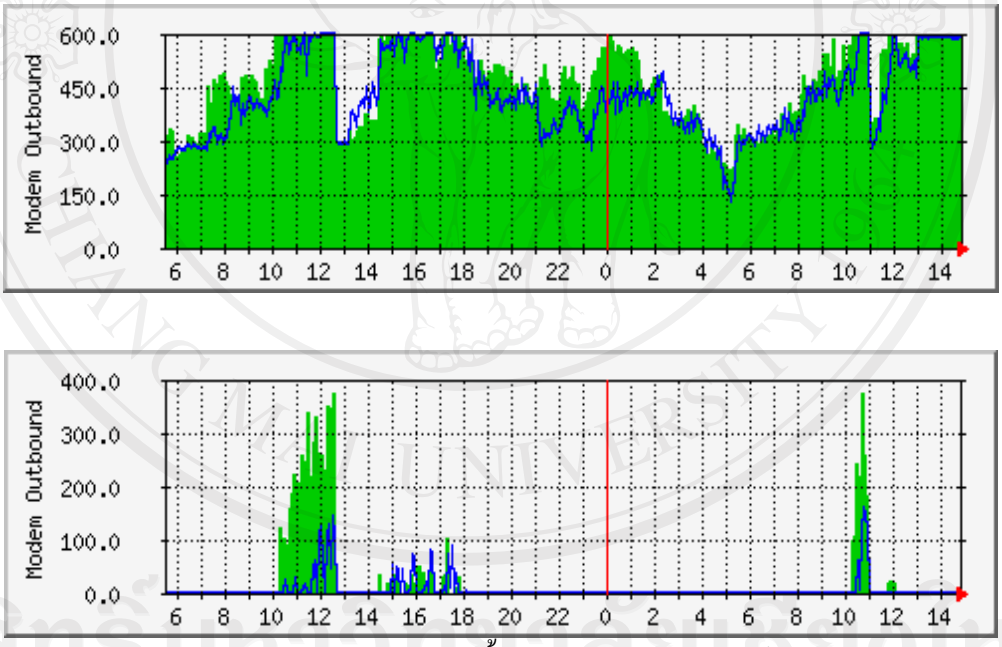
1) ใช้การควบคุมแบบด้วยมือตามความต้องการ

2) กำหนดไอพีพรีฟิกที่ต้องการเสถียรภาพสูงความเร็วสูงเดินทางบนลิงค์ที่ต้องการสำรอง

3) กำหนดค่าการใช้งานแบนด์วิดท์มากสุดเท่ากับขนาดความจุของลิงค์ หลังจากนั้นปล่อยให้ระบบควบคุมใช้วิธีการควบคุมแบบอัตโนมัติจัดสรรการจราจรให้

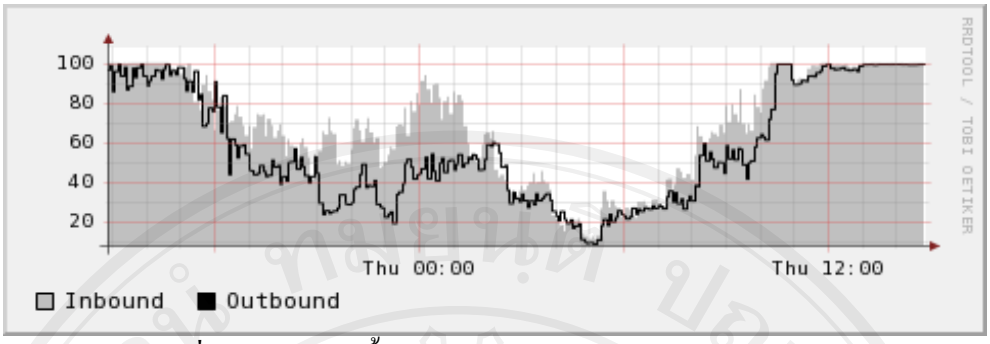
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ทำการทดลองกับทั้ง 2 วิธี โดยกำหนดให้ลิงค์ Link5 มีการสำรองการจรารจร จากรูปที่ 5.5 ณ เวลา 13.30 ของวันแรก หรือด้านซ้ายมือของเส้นสีแดงของรูป มีการสำรองการจราจรทั้งขาเข้าและขาออก 300 Mbps หลังจากนั้นเริ่มปล่อยไอพีพรีฟิกที่ต้องการเสถียรภาพสูงเดินทางบนลิงค์นี้ ณ เวลา 15.00 ใช้วิธีวิทยาการศึกษาสำนึกปรับเปลี่ยนค่าดู ผลที่ได้ คือ บางช่วงเวลามีการทิ้งของกลุ่มข้อมูล บางช่วงเวลาการใช้งานแบนด์วิดท์ไม่เต็มประสิทธิภาพ แต่ยังคงได้ตามเป้าหมายคือ ดีพอใช้ วันที่ 2 หรือ ด้านขวามือของเส้นสีแดง ณ เวลา 11.00 เริ่มมีการสำรองการจราจรอีกครั้งแล้วใช้วิธีวิทยาการศึกษาสำนึกปรับเปลี่ยนค่า ผลที่ได้ค่อนข้างจะดีขึ้น และหลังจากนั้น ณ เวลา 13.00 ใช้แบบวิธีที่สอง ที่เป็นแบบการควบคุมแบบด้วยมือตามความต้องการและการควบคุมแบบอัตโนมัติ ผลที่ได้ มีการใช้งานแบนด์วิดท์เต็มประสิทธิภาพ และเกือบจะไม่มีการทิ้งของกลุ่มข้อมูลเลย และค่า ANU มีค่ามากที่สุด ดังในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.5 การจราจร และการทิ้งของกลุ่มข้อมูลของลิงค์ Link5

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 5.6 อัตราการทิ้งของกลุ่มข้อมูลของเครือข่าย หรือ ANU

5.3 การประเมินประสิทธิภาพ

แนวความคิดของการประเมินระบบเครือข่ายได้ถูกนำเสนอขึ้นโดย Datta และ Lewis [13] ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

ขั้นตอนแรกคือการคำนวณหาค่าเฉลี่ยการใช้งานแบนด์วิดท์ (Average Bandwidth Usage: ABU) ให้ *ABU(i)* คือ ค่าเฉลี่ยการใช้งานแบนด์วิดท์ของลิงค์ *i*, *V(i)* คือการจราจรที่เกิดขึ้นจริงของลิงค์ *i* และ *BWT(i)* คือค่าความจุของแบนด์วิดท์ของลิงค์ *i* ดังแสดงในสมการ (5.1)

$$ABU(i) = \frac{V(i)}{BWT(i)} \tag{5.1}$$

ค่า ABU จะเป็นการวัดเปอร์เซ็นต์การใช้งานของลิงค์ *i* ณ เวลา *t*

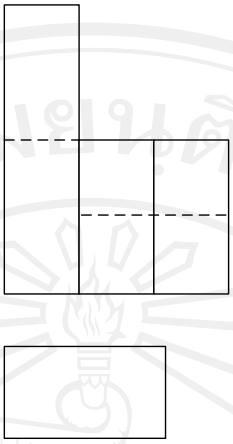
ขั้นตอนที่สอง จากสมการ (5.2) คือค่าเปอร์เซ็นต์ของความจุของแบนด์วิดท์ทั้งหมด (Contribution to Overall Bandwidth: COB) เป็นการหาค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าความจุของแบนด์วิดท์ของลิงค์ *i* เมื่อเทียบกับแบนด์วิดท์รวมทั้งหมด สมการที่ (5.3) ค่าเปอร์เซ็นต์การจราจรที่เกิดขึ้นจริง (Contribution to Overall Traffic: COT) จะเป็นการวัดเปอร์เซ็นต์ของการจราจรที่เกิดขึ้นจริงที่ไหลผ่านลิงค์ *i* เมื่อเปรียบเทียบกับการจราจรทังหมดที่ไหลผ่านระบบเครือข่าย ณ เวลา *t* โดยทั้งสองค่านี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบซึ่งกันและกันของแต่ละลิงค์ *i* ผลที่ได้ จะเป็นค่าประเมินของการได้ดุลภาระลิงค์ (Evaluation of Link Balance: ELB) ของลิงค์ *i* ดังในสมการที่ (5.4)

$$COB(i) = \frac{BWT(i)}{\sum_{i}^{N} BWT(i)} \tag{5.2}$$

$$COT(i) = \frac{V(i)}{\sum_{i}^{N} V(i)} \tag{5.3}$$

$$ELB(i) = COT(i) - COB(i) \tag{5.4}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 5.7 ตัวอย่างของการประเมินของการได้ดุลภาระลิงค์

เมื่อแต่ละลิงค์มีค่า COB เท่ากับ COT นั้นแสดงว่า เกิดสภาวะได้ดุลภาระอุดมคติ (Ideal Balance) ตัวอย่างของการหาค่าต่างๆ เหล่านี้สามารถกระทำได้ดังต่อไปนี้ เช่น จากรูปที่ 5.7 ลิงค์ L1 มีขนาดความจุของแบนด์วิดท์อยู่ที่ 4000 หน่วย ลิงค์ L2 มีขนาดความจุของแบนด์วิดท์อยู่ที่ 2000 หน่วย และลิงค์ L3 มีขนาดความจุของแบนด์วิดท์อยู่ที่ 2000 หน่วย ดังนั้นความจุรวมทั้งหมด คือ 8000 หน่วย หมายความว่า ณ เวลา t จะมีการจราจรไหลผ่านได้เต็มที่อยู่ที่ 8000 หน่วย ลิงค์ L1 จะมีค่า COB คือ 50% (4000/8000) ของความจุทั้งหมดของระบบเครือข่าย ในขณะที่ลิงค์ L2 และลิงค์ L3 จะมีค่า COB คือ 25% ของความจุทั้งหมด ดังนั้นจะได้ค่าตัวแปร $COB(L1) = 50\%$ $COB(L2) = 25\%$ $COB(L3) = 25\ \%$ สมมุติ ณ เวลา t ให้มีการจราจรไหลผ่านระบบเครือข่ายเกิดขึ้นจริงรวมทุกลิงค์ขนาด 4000 หน่วย และให้การจราจรไหลผ่านจริงของลิงค์ L1 มีขนาด $V(L1) = 2000$ หน่วย ค่า COT ของลิงค์ L1 คือ 50% ของขนาดการจราจรไหลผ่านจริง ให้ลิงค์ L2 มีการจราจรไหลผ่านจริงขนาด $V(L2) = 1000$ และการจราจรไหลผ่านจริงของลิงค์ L3 มีขนาด $V(L3) = 1000$ ดังนั้นค่า COB ของทั้งลิงค์ L2 และลิงค์ L3 คือ 25% ส่วนค่า ELB ของแต่ละลิงค์จะมีค่าเป็นศูนย์นั้นคือจะเกิดสภาวะได้ดุลภาระอุดมคติ จากตัวอย่างนี้ ถ้าค่าความจุของแต่ละลิงค์ไม่เปลี่ยนแปลง การจราจรจริงของลิงค์ L1 มีค่า $V(L1)$ เพิ่มเป็น 3000 หน่วย โดยที่การจราจรจริงของลิงค์ L2 และลิงค์ L3 มีขนาดเท่าเดิม ค่า COT ของลิงค์ L1 จะเพิ่มขึ้นเป็น 60% (3000/5000) ในขณะที่ค่า COT ของลิงค์ L2 และลิงค์ L3 จะลดลงเป็น 20% (1000/5000) ดังนั้นค่า ELB ของลิงค์ L1 คือ $(60\% - 50\%) = 10\%$ ในขณะที่ค่า ELB ของลิงค์ L2 และลิงค์ L3 คือ $(20\% - 25\%) = -5\%$ ดังนั้น จากตัวอย่างนี้ ลิงค์ L1 จะมีการจราจรของข้อมูลมากกว่าการใช้งานร่วมกันที่เป็นธรรม (Fair-Share) ในขณะที่ลิงค์ L2 และลิงค์ L3 มีการไหลผ่านของข้อมูลน้อยกว่าการใช้งานร่วมกันที่เป็นธรรม จากตัวอย่างที่ผ่านมาหาก

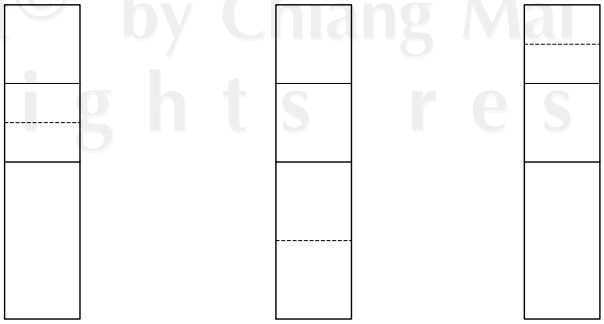
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สมมุติให้ความจุของแบนด์วิดท์ของแต่ละลิงค์มีขนาดเท่าเดิม ให้ลิงค์ L1 มีค่า $V(\text{L1})$ เปลี่ยนเป็น 1000 หน่วย โดยที่ลิงค์อื่นๆ มีค่าการใช้งานเหมือนเดิม ค่า COT ของลิงค์ LI จะลดลงเหลือ 33% (1000/3000) ในขณะที่ค่า COT ของลิงค์ L2 และ L3 จะเพิ่มขึ้นเป็น 33% (1000/3000) ค่า ELB ของลิงค์ L1 จะเป็น $(33\% - 50\%) = 17\%$ ลิงค์ L2 และลิงค์ L3 จะเป็น $(33\% - 25\%) = 8\%$ ดังนั้นจากตัวอย่างนี้ ลิงค์ L1 จะมีการจราจรของข้อมูลน้อยกว่าการใช้งานร่วมกันที่เป็นธรรม ในขณะที่ L2 และ L3 จะมีการจราจรของข้อมูลมากกว่าการใช้งานร่วมกันที่เป็นธรรม

ขั้นตอนที่สาม ค่าประเมินการใช้ประโยชน์ของลิงค์ (Evaluation of Link Utilization: ELU) ของลิงค์ *i*, UB คือค่าขอบเขตบน (Upper Bound) และ *LB* คือค่าขอบเขตล่าง (Lower Bound) ซึ่งทั้งสองค่านี้จะขึ้นอยู่กับผู้ดูแลระบบจะกำหนดขึ้นเองตามความเหมาะสม

$$ELU(i) = \max\{[ABU(i) - UB(i)],0\} - \max\{[LB(i) - ABU(i)],0\} \tag{5.5}$$

จากสมการ (5.5) ผลต่างของ *ABU* และ *UB* ที่มีค่าน้อยกว่าศูนย์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เช่น *ABU* = 7, *UB* = 5 นั้นคือ $[7-5] = 2$ แต่ถ้า *UB* = 20 นั้นคือ $[7-20] = 0$ ดังนั้น หากการใช้งานจริงของแต่ละลิงค์อยู่ในช่วงของค่า *UB* และ *LB* ที่ผู้ดูแลระบบกำหนดขึ้น ค่า ELU จะมีค่าเป็นศูนย์ ตัวอย่างเช่น สมมุติผู้ดูแลระบบกำหนดให้มีการใช้งานของลิงค์ในช่วง 50% ถึง 75% เป็นการใช้งานลิงค์ที่คุ้มค่าที่สุด ดังนั้นค่า *UB* จะเป็น 75% ค่า *LB* จะเป็น 50% และถ้าสมมุติให้ *ABU* เป็น 62% ผลก็คือ ค่า ELU จะมีค่าเป็นศูนย์ $\max\{[62-75],0\} - \max\{[50-62],0\} = 0$ ถ้าสมมุติให้ *ABU* มีค่าเป็น 25% ผลก็คือ ELU จะมีค่าเป็น -25% ได้จาก $\max\{[25-75],0\} - \max\{[50-25],0\} = -25$ แต่ถ้าให้ค่า *ABU* มีค่าเป็น 87% ผลที่ได้ ELU จะมีค่าเป็น 12% ได้จาก $\max\{[87-75],0\} - \max\{[50-87],0\} = 12$ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ส่วนในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ค่า *LB* = 25 % และค่า *UB* =75 %



รูปที่ 5.8 ตัวอย่างของการประเมินการใช้ประโยชน์ของลิงค์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ขั้นตอนที่สี่ ค่าประเมินความจุของลิงค์ (Evaluation of Link Capacity: ELC) โดยจะพิจารณาจาก ELB และจาก ELU ดังแสดงในสมการที่ (5.6) ในสภาวะอุดมคติค่า ELB ELU ELC จะมีค่าเป็นศูนย์

$$ELC(i) = \sqrt{[ELB(i)]^2 + [ELU(i)]^2} \tag{5.6}$$

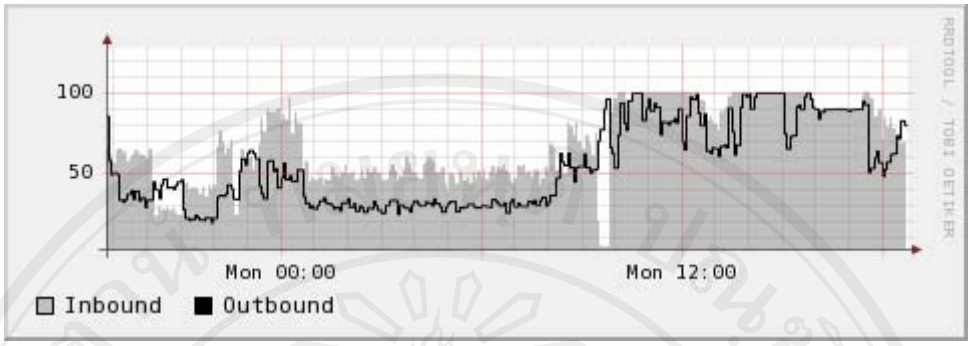
จากสมการ (5.7) ค่าประเมินความจุของระบบเครือข่าย (ENC: Evaluation of Network Capacity) จะพิจารณาจากค่า ELC ของทุกลิงค์รวมกัน โดย AVG จะเป็นค่าเฉลี่ยของ ELC ซึ่งในอุดมคตินั้นค่า ENC มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

$$ENC = \sqrt{\left[\sum_{i}^{N} ELC(i))\right]^2 - [\mathrm{AVG}(ELC(i))]} \tag{5.7}$$

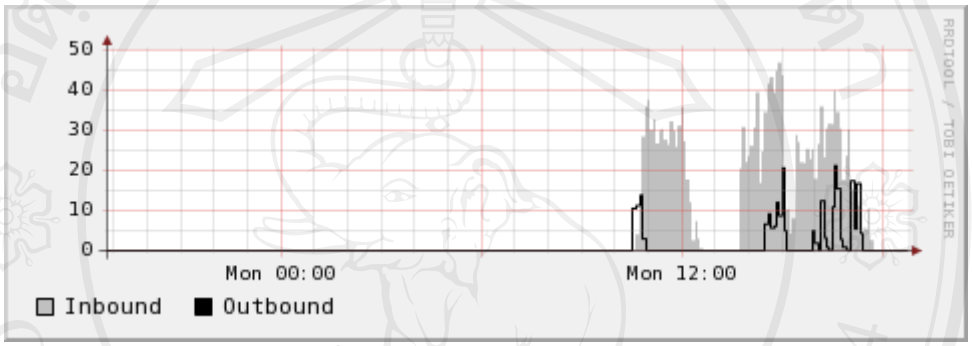
รูปที่ 5.9 แสดงผลลัพธ์ของการนำระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ลูกผสมมาแก้ปัญหา โดยผลที่คาดหวัง คือ ในช่างเวลาที่การใช้ งานลิงค์ยังไม่เต็ม น่าจะมีค่า ANU มากที่สุด ในขณะที่ค่า ND ของทุกช่วงเวลาน่าจะน้อยที่สุด และค่า ENC ของทุกช่วงเวลาน่าจะมีค่าใกล้ศูนย์ จากรูปเส้นสีเขียวแสดงอัตราค่าเฉลี่ยการใช้งานแบนด์วิดท์ ANU และอัตราการทิ้งของระบบเครือข่าย ND ของการจราจรขาเข้า ในขณะที่เส้นสีน้ำเงินเป็น ANU และ ND ของการจราจรขาออก เมื่อทุกลิงค์มีการจราจรเต็ม ค่า ANU จะมีค่ามากที่สุด การทิ้งของกลุ่มข้อมูลจะเกิดขึ้น ทุกลิงค์จะมีการทิ้งของกลุ่มข้อมูล ยกเว้นลิงค์ที่มีการสำรองการจราจร ค่า ENC และค่าตัวแปรอื่นๆ จะเพิ่มขึ้น รูปที่ 5.10 แสดงค่า ENC รูปที่ 5.11 แสดงค่า ELB ของการจราจรขาเข้าและขาออก รูปที่ 5.12 แสดง ELU ของการจราจรขาเข้าและขาออก รูปที่ 5.13 แสดง ELC เมื่อลิงค์มีการใช้งานอยู่ในช่วง 25 % ถึง 75 % ตัวแปรทุกตัวของทุกลิงค์ และ ENC จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

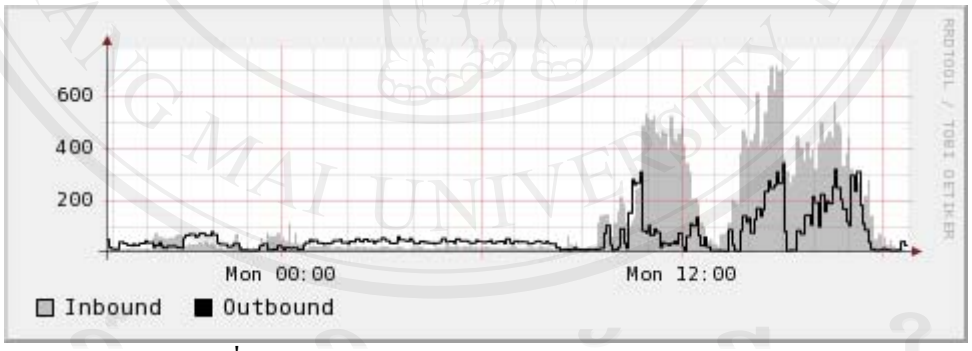
Average Network Usage.



Network drop rate



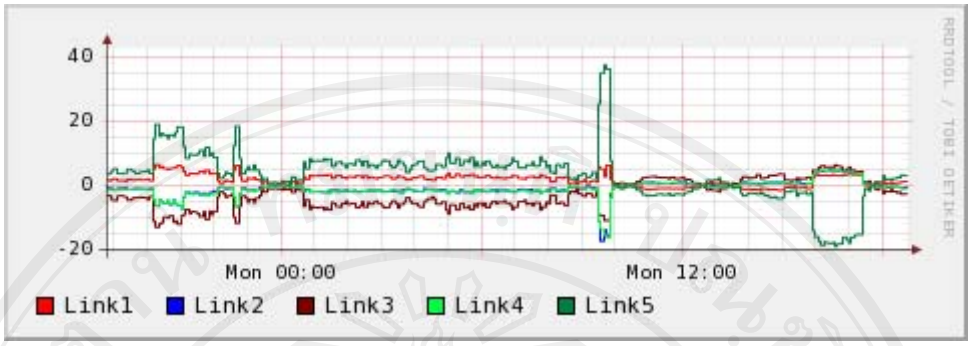
รูปที่ 5.9 Utilization และ Drop rate



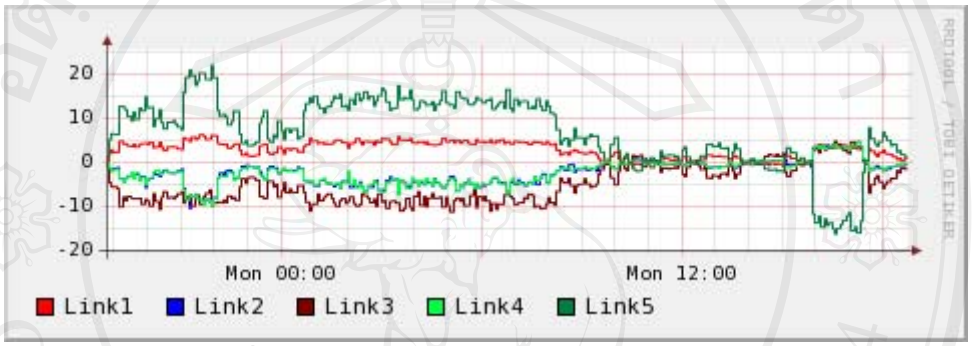
รูปที่ 5.10 ค่าประเมินความจุของระบบเครือข่าย ENC

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Evaluation of link balance of inbound traffic.

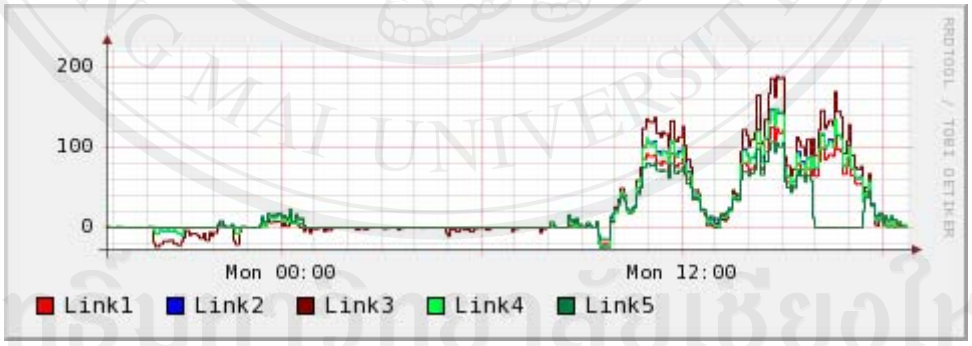


Evaluation of link balance of outbound traffic.

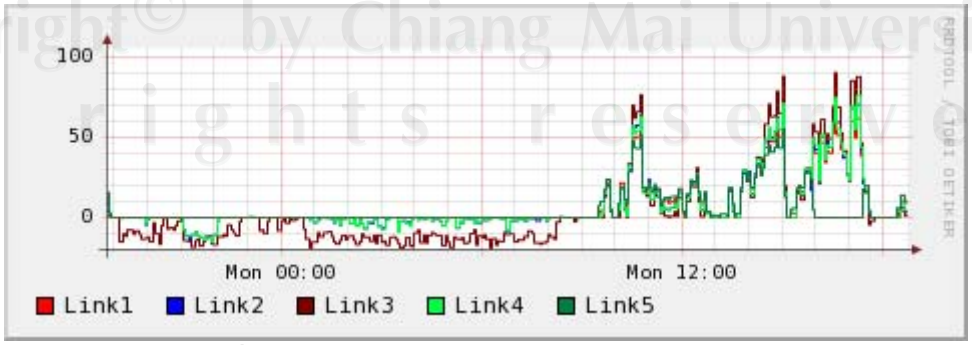


รูปที่ 5.11 ค่าประเมินของการได้ดุลภาระลิงค์ ELB

Evaluation of link utilization of inbound traffic.



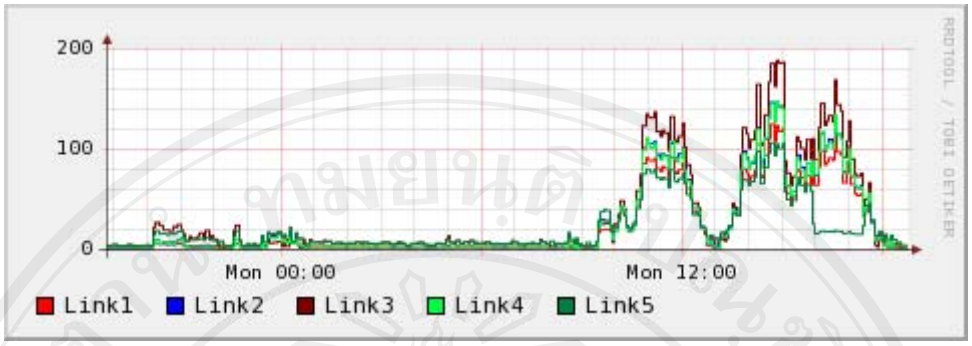
Evaluation of link utilization of outbound traffic.



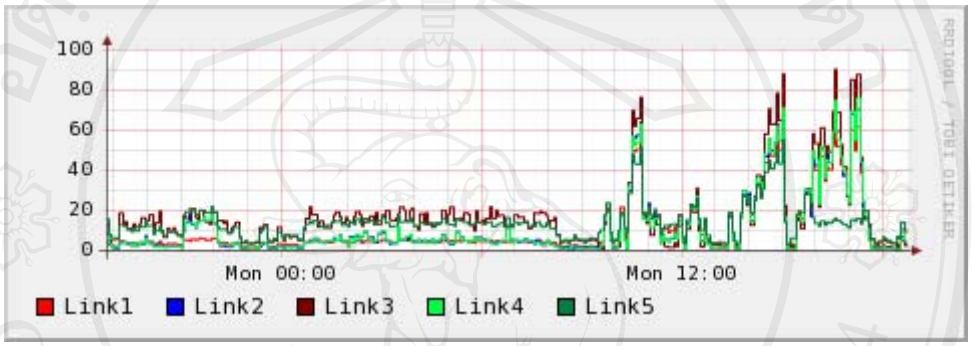
รูปที่ 5.12 ค่าประเมินการใช้ประโยชน์ของลิงค์ ELU

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Evaluation of link capacity of inbound traffic.



Evaluation of link capacity of outbound traffic.



รูปที่ 5.13 การประเมินความจุของลิงค์ ELC

5.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังนำระบบมาใช้งาน

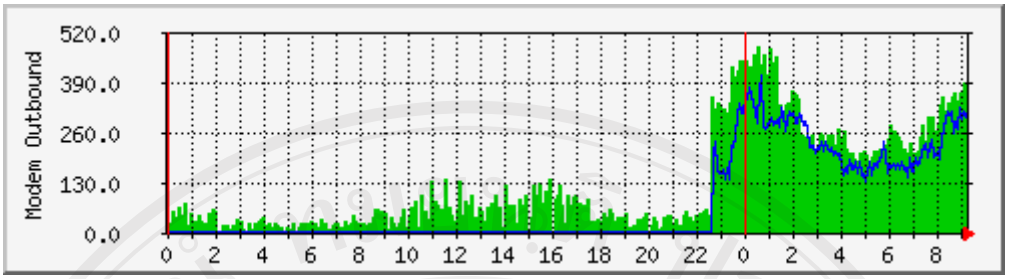
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ก่อนและหลังการนำระบบควบคุมแบบรวมศูนย์มาใช้งาน ได้กำหนดให้ ณ เวลา 0.00 จนถึง 22.30 ของวันแรก หรือ คือช่วงเวลาก่อนเส้นสีแดงตรงกลางของรูป 5.14, 5.15 เป็นการจราจรที่เกิดขึ้นจากการตัดสินใจของอุปกรณ์จัดเส้นทางบีจีพีเอง หลังจากเวลา 22.30 เป็นต้นไปใช้ระบบควบคุมแบบรวมศูนย์ลูกผสมควบคุมการจราจร ผลที่ได้คือ

1) การใช้งานของแต่ละลิงค์ ก่อนนำระบบมาใช้งาน แต่ละลิงค์จะใช้งานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ บางลิงค์มีการทิ้งของกลุ่มข้อมูลจำนวนมาก ค่าตัวแปรของการวัดอื่นๆ ก็มีค่ามากที่สุด ดังแสดงในรูป 5.17 ถึง 5.19 เมื่อนำระบบควบคุมแบบรวมศูนย์มาใช้งาน แต่ละลิงค์จะใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ การทิ้งของกลุ่มข้อมูลน้อยที่สุด ค่าตัวแปรของการวัดต่างๆ น้อยที่สุด

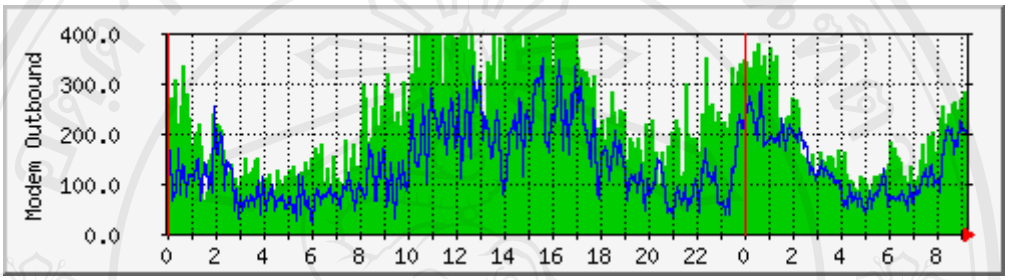
2) การใช้งานระบบเครือข่าย ก่อนนำระบบมาใช้งาน การใช้งานของระบบเครือข่ายจะได้ค่า ANU น้อย ค่า ND มากที่สุด ENC มากที่สุด ดังแสดงในรูป 5.16 หลังจานำระบบควบคุมมาใช้งาน ได้ค่า ANU มากที่สุด ND และ ENC น้อยที่สุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

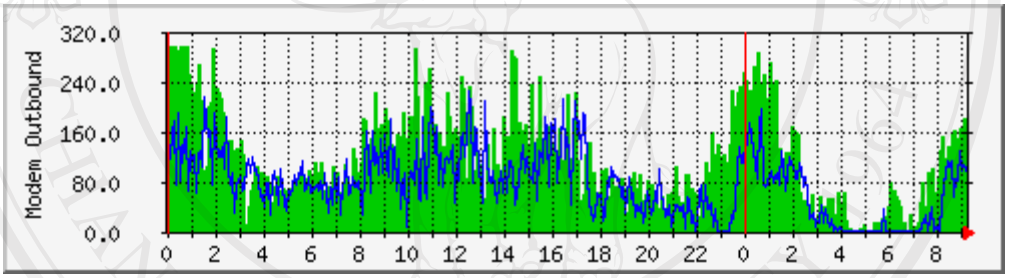
Link1



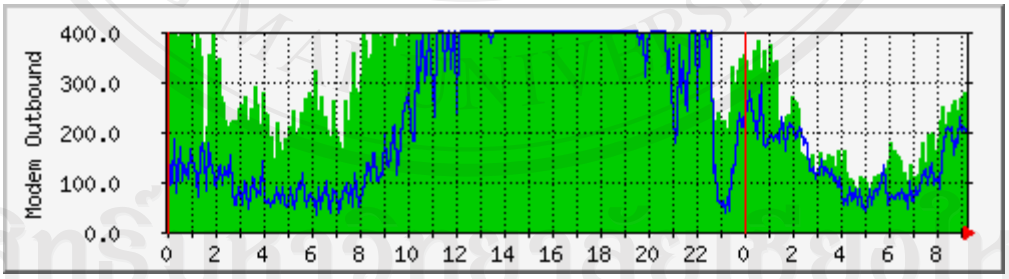
Link2



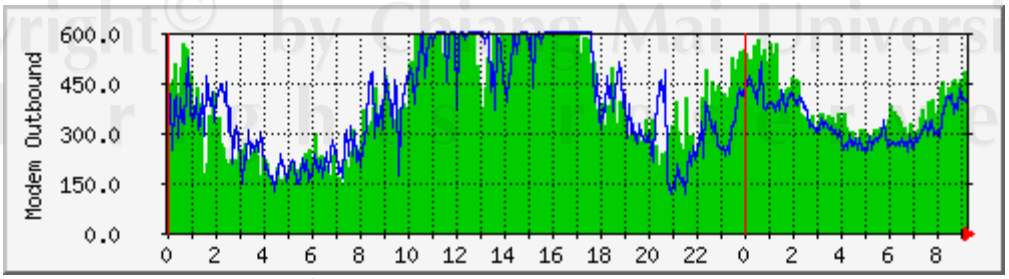
Link3



Link4



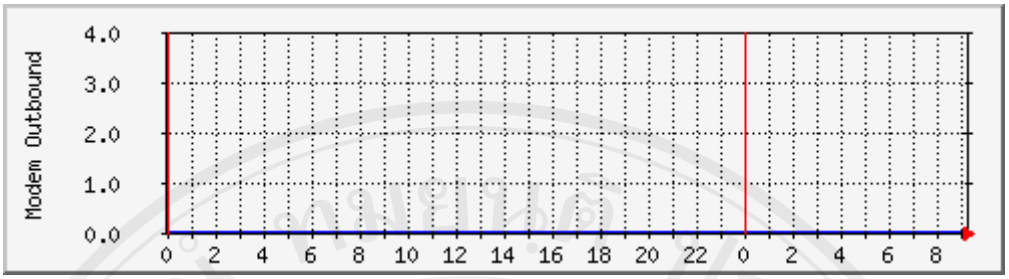
Link5



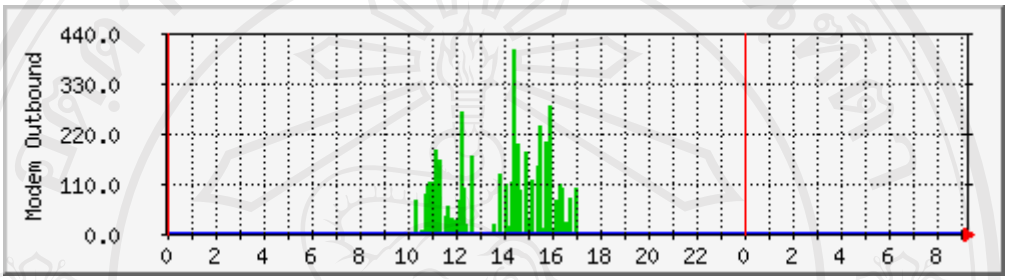
รูปที่ 5.14 การใช้งานแบนด์วิดท์แต่ละลิงค์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

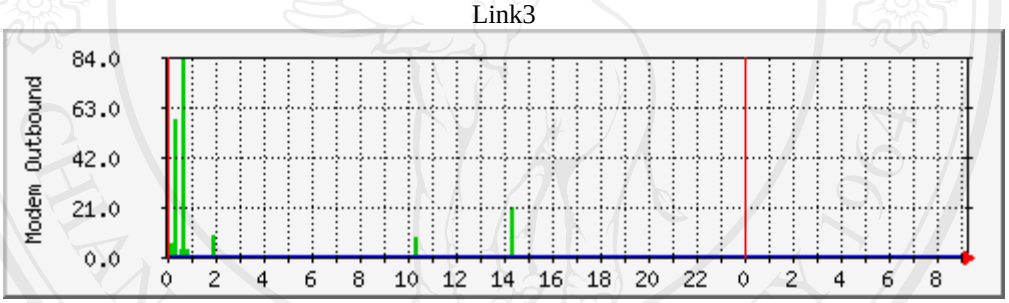
Link1



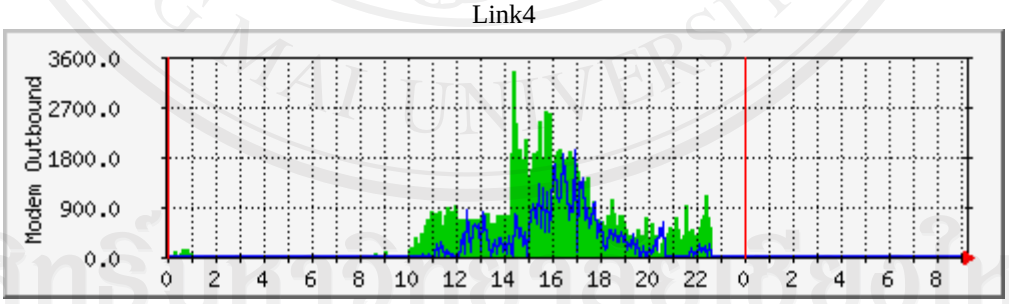
Link2



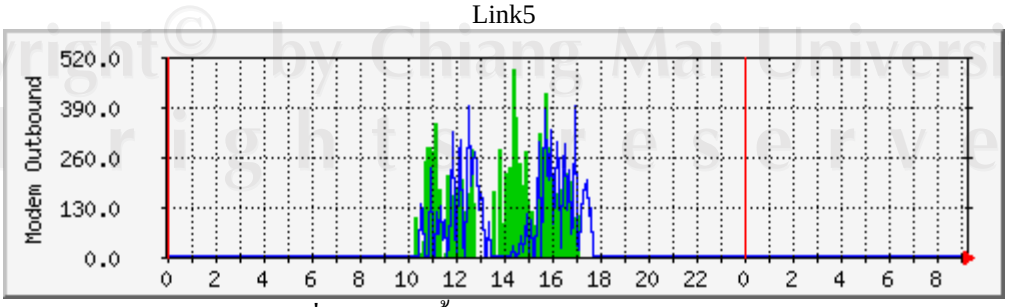
Link3



Link4



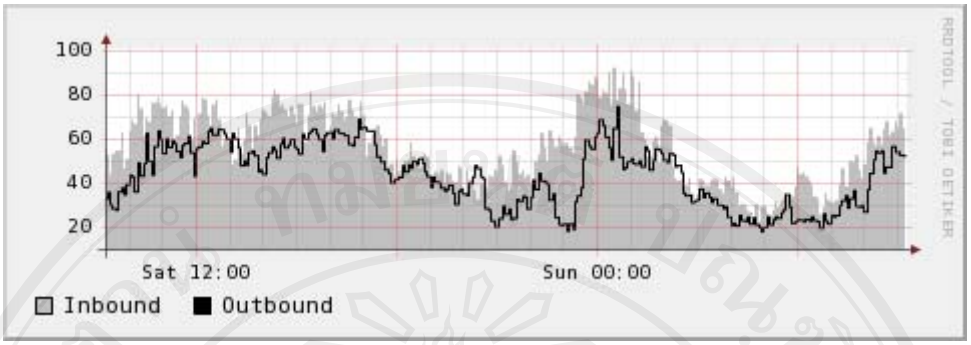
Link5



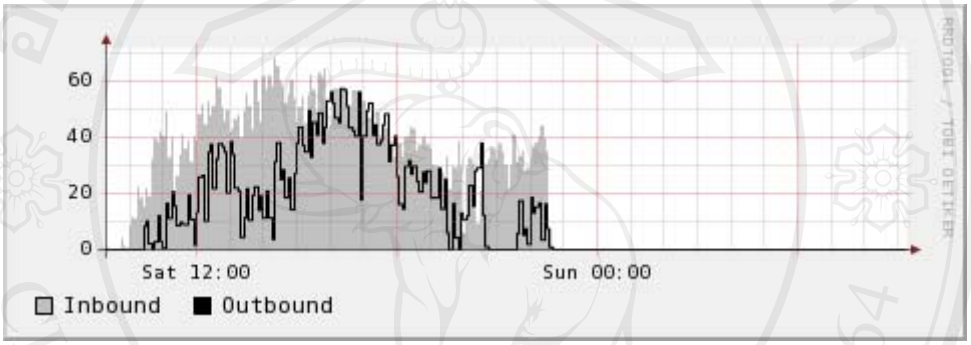
รูปที่ 5.15 การทิ้งของกลุ่มข้อมูลแต่ละลิงค์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

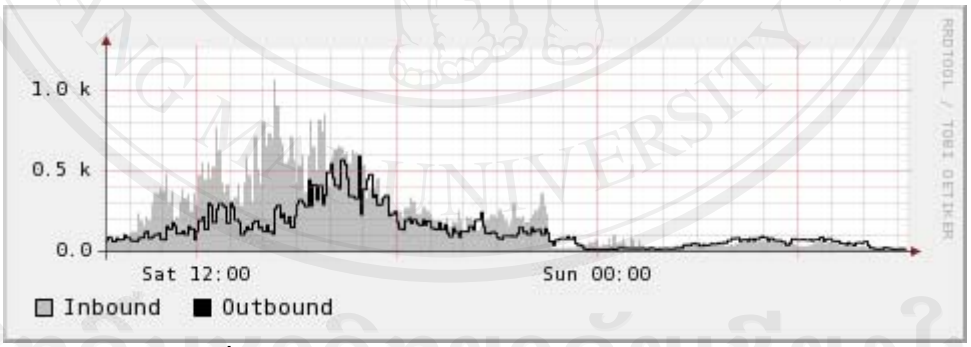
Average Network Usage



Network Drop Rate



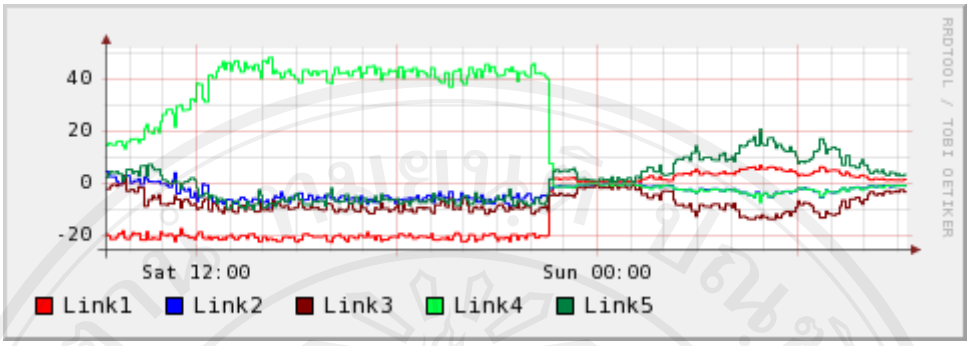
ค่าประเมินความจุของระบบเครือข่าย ENC



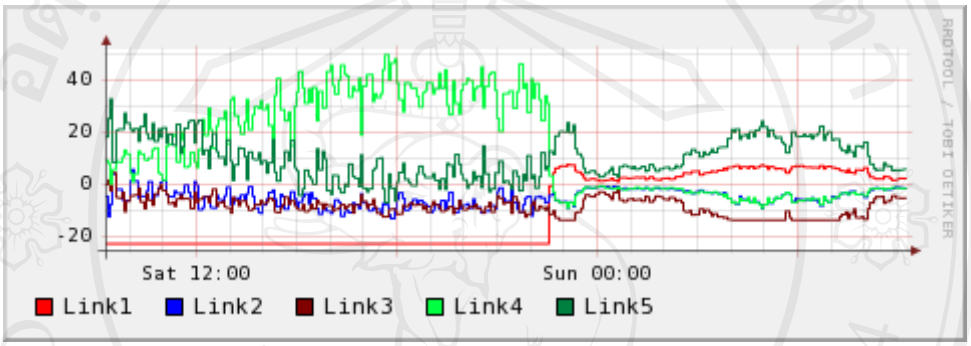
รูปที่ 5.16 ค่า ANU, ND และ ENC ของระบบเครือข่าย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Evaluation of link balance of inbound traffic

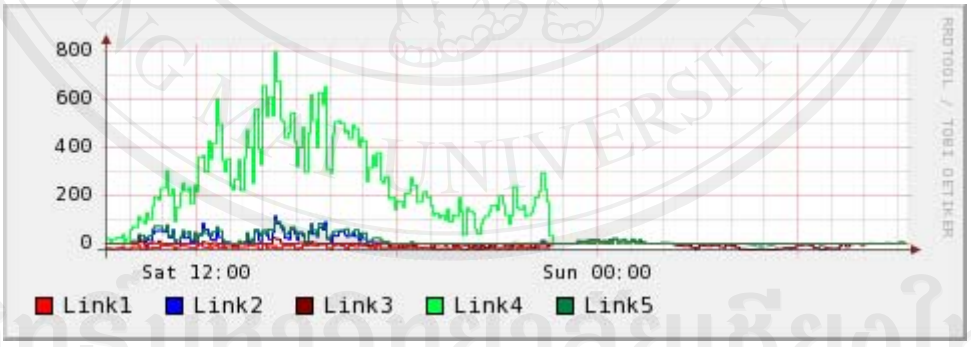


Evaluation of link balance of outbound traffic

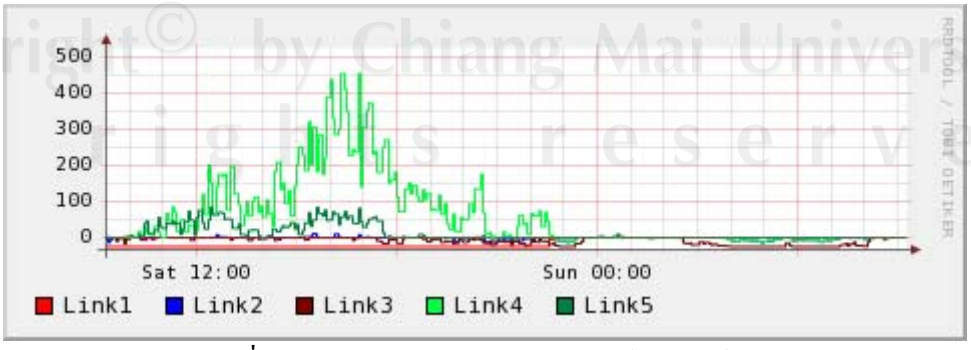


รูปที่ 5.17 ค่าประเมินของการได้ดุลภาระลิงค์ ELB

Evaluation of link utilization of inbound traffic



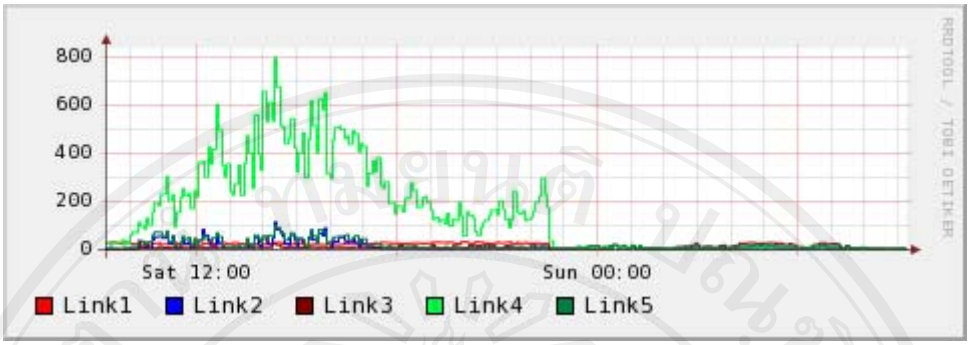
Evaluation of link utilization of outbound traffic



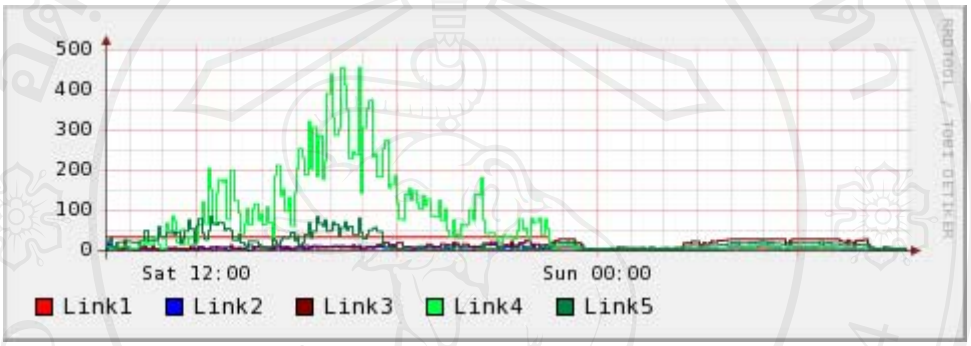
รูปที่ 5.18 ค่าประเมินการใช้ประโยชน์ของลิงค์ ELU

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Evaluation of link capacity of inbound traffic



Evaluation of link capacity of outbound traffic



รูปที่ 5.19 การประเมินความจุของลิงค์ ELC

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved