บทที่ 4

วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายที่มีการส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนดเดียว

การวิเคราะห์หาประสิทธิภาพสูงสุดในการส่งข้อมูลในขณะที่ระบบโครงข่ายเกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงที่สุดโดยการแข่งขันกันระหว่างเราเตอร์กับผู้ทำลายนั้น ค่าเป้าหมายของเกมจะเป็นค่า EAC เราเตอร์จะทำการส่งข้อมูลแบบสุ่ม (stochastic routing) โดยพยายามที่จะทำให้ค่า EAC มีค่าสูงที่สุด ในขณะเดียวกันผู้ทำลายจะเลือกแผนการทำลายเพื่อทำให้ค่า EAC มีค่าต่ำที่สุด โดยในหัวข้อนี้เราจะนิยามว่าความเสียหายแบบที่ j หมายถึงข่ายเชื่อมโยงที่ i เกิดความเสียหาย เราสามารถที่จะวิเคราะห์เกมลักษณะนี้ในรูปของ ปัญหาเกมขีดต่ำสุดของขั้นสูงได้ โดยเราเตอร์จะเลือกรูปแบบการใช้เส้นทางที่ดีที่สุดในการส่งข้อมูล $\mathbf{H}$ จากการแก้ปัญหา

$$\max_{\mathbf{H}} \min_{\mathbf{Q}} \mathbf{H}^T \mathbf{R} \mathbf{Q} \tag{4.1}$$

หรือผู้ทำลายสามารถหารูปแบบการทำลายที่ร้ายแรงที่สุด $\mathbf{Q}$ ได้โดยการแก้ปัญหา

$$\min_{\mathbf{Q}} \max_{\mathbf{H}} \mathbf{H}^T \mathbf{R} \mathbf{Q} \tag{4.2}$$

โดยปัญหาทั้งสองข้างต้นจะถูกจำกัดด้วยเงื่อนไข

$$\sum_{k=1}^{K} h_k = 1, \mathbf{H} \geq \mathbf{0}, \sum_{j=1}^{J} q_j = 1, \mathbf{Q} \geq \mathbf{0} \tag{4.3}$$

เป็นที่รู้กันว่าปัญหาข้างต้นสามารถที่จะแก้ได้ด้วยการใช้ระเบียบวิธีกำหนดการเชิงเส้น (linear programming) และเราสามารถที่จะพิสูจน์ได้ด้วยหลักทวิภาวะ (duality theory) ว่าค่าของเกมหรือ EAC จะมีค่าเพียงค่าเดียวสำหรับกรณีการส่งข้อมูลเพียงหนึ่งคู่โหนด [24] อย่างไรก็ตามค่าความน่าจะเป็นในการเลือกทำลายข่ายเชื่อมโยงของผู้ทำลายและค่าความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทาง ในการส่งข้อมูลของเราเตอร์ซึ่งเป็นค่าที่จุดสมดุลของแนชสามารถที่จะมีได้หลายรูปแบบที่เหมาะสมดังจะแสดงให้เห็นในหัวข้อที่ 4.2

4.1 การวิเคราะห์และแก้ปัญหาโดยกรรมวิธี MSA

ในการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายโดยทั่วไป เราสามารถที่จะใช้ระเบียบวิธีกำหนดการเชิงเส้นในการแก้ปัญหาขีดต่ำสุดของขั้นสูง ซึ่งเป็นปัญหาของเกมได้ อย่างไรก็ตามเมื่อค่าผลรับจากเกมมีค่าไม่คงตัว ขึ้นกับปริมาณทราฟฟิกที่ใช้ การใช้ระเบียบวิธีกำหนดการเชิงเส้นจะไม่สามารถใช้ในการแก้ปัญหาขีดต่ำสุดของขั้นสูงได้ ระเบียบวิธี MSA (method of successive average) จึงถูกนำมาใช้เพื่อหาผลเฉลยของเกมแทน เนื่องจากวิธี MSA สามารถที่จะแก้ปัญหาได้ทั้งกรณีปัญหาที่ค่าใช้จ่ายในเกม เป็นค่าที่ขึ้นกับปริมาณทราฟฟิก และ ไม่ขึ้นกับปริมาณท

ราฟฟิกในระบบโครงข่าย [16, 25] ด้วยกระบวนการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นของแผนการเล่นในแต่ละรอบ เพื่อหาจุดสมดุลของเกม วิธีการวิเคราะห์และแก้ปัญหาด้วยวิธี MSA นั้นมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นในการเลือกแผนการเล่นของผู้เล่นทั้งสองฝ่าย ให้แต่ละแผนการมีความเท่าเทียมกันโดยเราเตอร์จะมีค่าความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางในการส่งบนแต่ละเส้นทาง (h_k) และทางฝั่งผู้ทำลายจะมีความน่าจะเป็นที่จะทำลายข่ายเชื่อมโยง (q_j) เป็น
$$h_k = \frac{1}{K}, q_j = \frac{1}{J}$$
พร้อมทั้งกำหนดให้รอบของการเล่นเกมเริ่มแรกให้เป็นรอบที่ 1 ($n = 1$)

2. เราเตอร์คำนวณค่า EAC ที่พึงได้เมื่อเราเตอร์เลือกแผนการเล่น k สำหรับค่า $k = 1, 2, ..., K$ ดังสมการ
$$E_k[R_{k,j}] = \sum_{j=1}^{J} [q_j R_{k,j}]$$

3. เราเตอร์เลือกแผนการเล่นที่ดีที่สุด $\hat{k}$ ซึ่งทำให้ค่า EAC มีค่าสูงที่สุด
$$\hat{k} = \arg\max_{k} E_k[R_{k,j}]$$

4. เราเตอร์ปรับค่าความน่าจะเป็นในการเลือกแผนการเล่น (h_k) โดยเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกเส้นทางที่ได้เลือกไว้ในขั้นตอนที่ 3 โดยใช้การปรับค่าตามระเบียบวิธี MSA
$$h_k \leftarrow (\frac{1}{n})x_k + (\frac{n-1}{n})h_k;\ x_k = \begin{cases} 1, & \text{if } k = \hat{k} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

5. ผู้ทำลายคำนวณหาค่า EAC ที่พึงได้เมื่อผู้ทำลายเลือกแผนการเล่น j สำหรับค่า $j = 1, 2, \ldots, J$ ดังสมการ
$$E_j[R_{k,j}] = \sum_{k=1}^{K} [h_k R_{k,j}]$$

6. ผู้ทำลายเลือกแผนการเล่นที่ดีที่สุด $\hat{j}$ ซึ่งจะทำให้ค่า EAC มีค่าน้อยที่สุด
$$\hat{j} = \arg\min_{j} E_j[R_{k,j}]$$

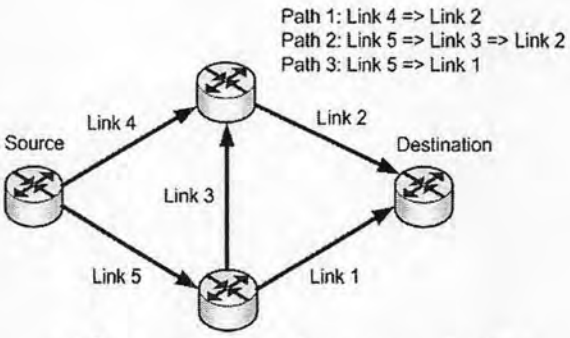
7. ผู้ทำลายปรับค่าความน่าจะเป็นในการเลือกแผนการเล่น (q_j) โดยเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกแผนการที่ได้เลือกไว้ในขั้นตอนที่ 6 โดยใช้การปรับปรุงค่าตามระเบียบวิธี MSA
$$q_j \leftarrow (\frac{1}{n})y_j + (\frac{n-1}{n})q_j;\ y_j = \begin{cases} 1, & \text{if } j = \hat{j} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

8. หาค่า EAC ของระบบ ณ รอบของการเล่นเกม n จากสมการ

$$EAC = \sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{J} h_k q_j R_{k,j}$$

9. ปรับค่ารอบของการเล่น $n \leftarrow n + 1$ และกลับไปทำขั้นตอนที่ 2-8 ใหม่จนกระทั่งค่า EAC ที่ได้จาก (4.1) และ (4.2) มีค่าผลต่างที่น้อยกว่าค่าคงตัวค่าหนึ่ง ซึ่งจะถือว่าเกิดการลู่เข้าของค่า EAC

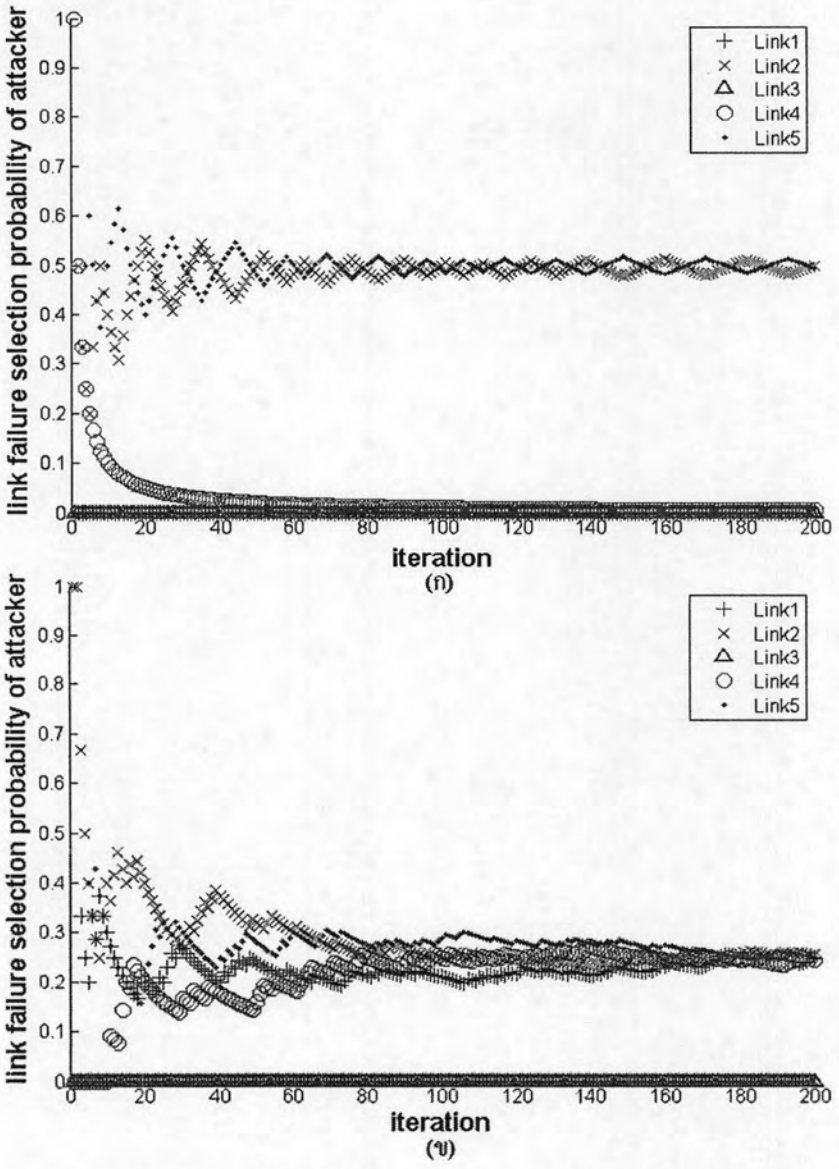
4.2 ปัญหาของผลการวิเคราะห์หาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายในอดีต



รูปที่ 4.1 ระบบโครงข่ายทดสอบอย่างง่าย

การวิเคราะห์หาความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายด้วยวิธีการหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบในอดีตนั้น จะใช้ค่าคำตอบที่ได้จากความน่าจะเป็นที่ข่ายเชื่อมโยงจะถูกจ้องทำลาย [13, 14, 15, 16] โดยจะถือว่าข่ายเชื่อมโยงที่มีค่าความน่าจะเป็นที่จะถูกจ้องทำลายสูงที่สุดเป็นจุดที่สำคัญที่สุดต่อระบบโครงข่าย อย่างไรก็ตามค่าความน่าจะเป็นที่ข่ายเชื่อมโยงจะถูกจ้องทำลายนั้นสามารถที่จะมีได้หลายค่าขึ้นอยู่กับลักษณะของเส้นทางที่เป็นไปได้และการเชื่อมต่อของระบบโครงข่ายที่จะใช้งาน ซึ่งจะทำให้วิธีในอดีตนั้นอาจนำไปสู่ความกำกวมในการพิจารณาข่ายเชื่อมโยงที่เป็นจุดอ่อนที่สุดในโครงข่าย เพื่อให้เข้าใจได้ง่าย ในที่นี้จะพิจารณาตัวอย่างกรณีการทดสอบระบบโครงข่ายอย่างง่าย ที่มีลักษณะของระบบโครงข่ายรวมถึงเส้นทางที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 กำหนดให้มีคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูลเพียง 1 คู่โหนดและทุกข่ายเชื่อมโยงมีความจุ 200 หน่วย ลักษณะการเลือกทำลายข่ายเชื่อมโยงของผู้ทำลายที่เป็นไปได้ ณ จุดสมดุลของเกมสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าในเกมการส่งข้อมูลของผู้เล่นเราเตอร์และผู้ทำลายนั้น ค่าความน่าจะเป็นของการเลือกทำลายข่ายเชื่อมโยงของผู้ทำลายสามารถที่จะมีได้หลายชุดของคำตอบที่เป็นไปได้ โดยผลจากรูปที่ 4.2 (ก) ระบุว่าข่ายเชื่อมโยงที่ 2 และ 5 มีความสำคัญต่อระบบโครงข่าย แต่ผลจากรูปที่ 4.2 (ข) ระบุว่าข่ายเชื่อมโยงที่ 1, 2, 4 และ 5 มีความสำคัญต่อระบบโครงข่าย จากผลดังกล่าวข้างต้นทำให้เราไม่สามารถชี้ชัดได้ว่าข่ายเชื่อมโยงใดมีความสำคัญ



รูปที่ 4.2 ผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งสองรูปแบบของค่าความน่าจะเป็นในการทำลายข่ายเชื่อมโยง ณ จุดสมดุลของเกม

ต่อระบบโครงข่ายมากที่สุดและควรจะต้องทำการป้องกันข่ายเชื่อมโยงใดต่อเหตุการณ์การเกิดความเสียหายก่อน นอกจากนั้นในบางครั้งการลู่เข้าของค่าความน่าจะเป็นในการทำลายข่ายเชื่อมโยงอาจจะต้องใช้จำนวนรอบของการเล่นเกมมาก และไม่ได้รับประกันถึงการลู่เข้าของคำตอบทุกครั้ง ดังนั้นการใช้ค่าความน่าจะเป็นของการทำลายข่ายเชื่อมโยงเป็นตัวชี้วัดข่ายเชื่อมโยงที่มีผลกระทบต่อความจุของระบบนั้นจึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสม เราจึงจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการอื่นในการระบุถึงข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบวิธีอื่นแทน

4.3 วิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายที่เสนอ

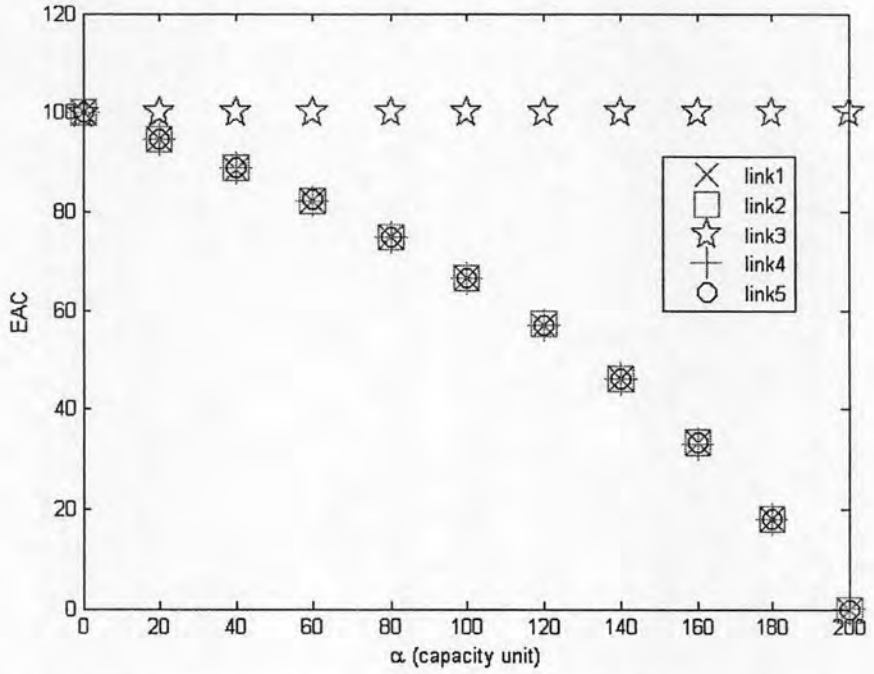
ถึงแม้ว่าค่าความน่าจะเป็นในการทำลายข่ายเชื่อมโยงของผู้ทำลายสามารถที่จะเป็นไปได้หลายค่าที่จุดสมดุลของเกม แต่ค่า EAC จะมีได้เพียงแค่ค่าเดียว ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอให้ใช้ค่า EAC ในการช่วยวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบ แนวความคิดหลักของวิธีการที่นำเสนอคือ การประเมินความเชื่อถือได้ของข่ายเชื่อมโยงจากการวัดผลกระทบต่อค่า EAC เมื่อค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่งลดลง ดังนั้นวิธีการประเมินความเชื่อถือได้ที่เสนอจะเริ่มด้วยการลดปริมาณความจุของข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายเชื่อมโยงลงจำนวนหนึ่ง หลังจากนั้นระบบโครงข่ายที่เหลือหลังจากถูกลดค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงลงไปแล้วจะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าของเกมหรือ EAC ซึ่งเป็นค่าที่ชี้ถึงปริมาณข้อมูลสูงที่สุดที่จะสามารถไหลผ่านระบบโครงข่ายที่เหลือได้เมื่อเกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงที่สุดโดยเฉลี่ย กำหนดให้ค่า α เป็นปริมาณความจุที่ถูกลดลงเมื่อเกิดเหตุการณ์ความเสียหายซึ่งทำให้ความจุของข่ายเชื่อมโยง i ลดลง และกำหนดให้ $EAC_i(\alpha)$ เป็นค่า EAC ที่พึงได้จากระบบโครงข่ายเมื่อข่ายเชื่อมโยง i ถูกลดความจุลงไป α หน่วย สำหรับข่ายเชื่อมโยงใด ๆ เราจะพิจารณาว่าข่ายเชื่อมโยงนั้นเป็นข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบถ้าหากความจุที่ลดลงของข่ายเชื่อมโยงนั้นทำให้ค่า EAC ลดลง ดังนั้นข่ายเชื่อมโยงที่มีผลกระทบต่อการส่งข้อมูลมากที่สุด $\hat{i}$ จะสามารถหาได้จากสมการ

$$\hat{i} = \arg\min_{i} EAC_i(\min(\alpha, C_i)) \tag{4.4}$$

4.4 การเปรียบเทียบกระบวนการหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของระบบโครงข่าย

หากพิจารณากรณีทดสอบในหัวข้อที่ 4.2 อีกครั้ง โดยการใช้วิธีการที่เสนอในหัวข้อที่ 4.3 เพื่อวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของระบบโครงข่ายและเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ กับวิธีการวิเคราะห์ในอดีต ที่ใช้ค่าความน่าจะเป็นที่ข่ายเชื่อมโยงจะถูกจ้องทำลายในการชี้วัด ผลที่ได้จากวิธีการที่เสนอจะถูกแสดงในรูปที่ 4.3

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับระบบโครงข่ายในอดีตด้วยวิธีการใช้ค่าความน่าจะเป็นในการถูกจ้องทำลายซึ่งแสดงในรูปที่ 4.2 กับวิธีการ

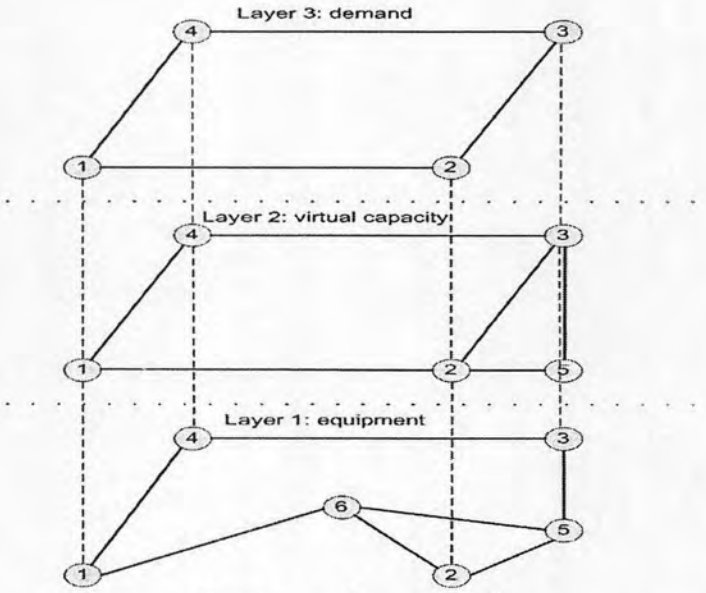


รูปที่ 4.3 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายอย่างง่าย

ที่เสนอซึ่งแสดงในรูปที่ 4.3 แล้ว เราจะพบว่าวิธีการที่เสนอนั้นจะให้รูปแบบของคำตอบเพียงแค่รูปแบบเดียวเสมอ ซึ่งแตกต่างกับวิธีการวิเคราะห์ในอดีตที่ใช้ค่าความน่าจะเป็นในการถูกจ้องทำลายในการชี้วัด ที่อาจจะมีคำตอบที่กำกวมและไม่สามารถระบุได้ชัดเจนถึงข่ายเชื่อมโยงที่สำคัญที่สุดกับระบบโครงข่าย ผลจากวิธีการที่เสนอจะสามารถช่วยในการระบุถึงข่ายเชื่อมโยงที่ควรจะต้องทำการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย นั่นคือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 1, 2, 4 และ 5 โดยที่ข่ายเชื่อมโยงทั้งสี่นี้มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบเท่ากัน เนื่องจากข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดจะให้ค่า EAC ที่ลดลงอย่างเท่าเทียมกันเมื่อข่ายเชื่อมโยงถูกทำลายหรือมีความจุลดลง ดังนั้นวิธีการที่เสนอจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับระบบมากกว่าการใช้วิธีการวิเคราะห์ในอดีต ที่ใช้ค่าความน่าจะเป็นที่ข่ายเชื่อมโยงจะถูกทำลายซึ่งอาจจะให้คำตอบที่กำกวมและไม่สามารถชี้ชัดได้ว่าควรจะทำการป้องกัน หรือเพิ่มความจุของข่ายเชื่อมโยงใดก่อนเพื่อทำให้ระบบมีความสามารถในการส่งข้อมูลที่ทนทานต่อความเสียหายมากที่สุด

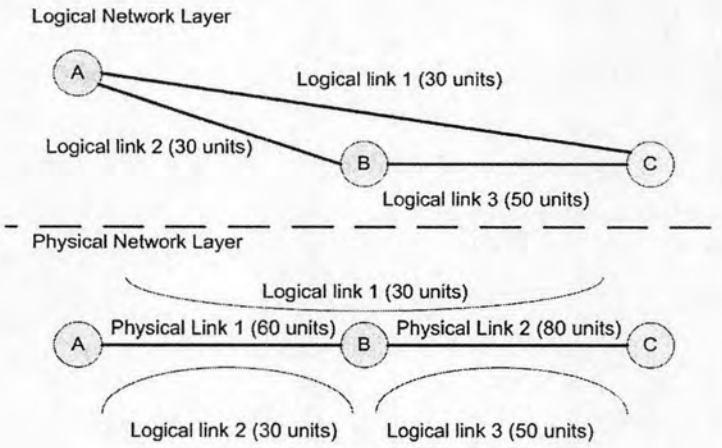
4.5 การคำนวณหาค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายหลายชั้น

โดยทั่วไประบบโครงข่ายที่ใช้ในทางปฏิบัติ จะเป็นระบบโครงข่ายที่มีหลายชั้น รูปที่ 4.4 แสดงถึงตัวอย่างของระบบโครงข่ายแบบหลายชั้น [26] ที่มีชั้นของการใช้งานอยู่ทั้งหมดสามชั้นด้วยกันได้แก่ ชั้นอุปกรณ์ (equipment layer), ชั้นการเชื่อมต่อเสมือน (virtual capacity



รูปที่ 4.4 ระบบโครงข่าย 3 ชั้น

layer), และชั้นของความต้องการข้อมูล (demand layer) โดยในการใช้งานจริงอาจจะมีได้หลายชั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบของระบบโครงข่ายนั้น ๆ



รูปที่ 4.5 ระบบโครงข่าย 2 ชั้น

ข้อสังเกตที่สำคัญอย่างหนึ่งของระบบโครงข่ายแบบหลายชั้นคือ ความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายชั้นกายภาพข่ายเชื่อมโยงเดียว อาจจะทำให้เกิดความเสียหายกับหลายการเชื่อมต่อของโครงข่ายในชั้นบนได้ พิจารณาระบบโครงข่ายหลายชั้นดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นว่า การเชื่อมต่อชั้นบนจากโหนด C ไปยังโหนด A สามารถมีได้สองเส้นทางในการเชื่อมต่อชั้นบน ได้แก่ เส้นทางที่ใช้การเชื่อมต่อที่ 1 และ เส้นทางที่ใช้การเชื่อมต่อที่ 3 ไปยังการเชื่อมต่อที่ 2 ซึ่งหากพิจารณาแล้วจะเห็นได้ว่าระบบโครงข่ายมีเส้นทางสำรองในการส่งข้อมูลและมีความทนทานต่อความเสียหาย อย่างไรก็ตาม หากเราพิจารณาถึงการเชื่อมต่อชั้นล่างด้วย

ตารางที่ 4.1 การแปลงลักษณะความเสียหายของระบบโครงข่ายหลายชั้น

failure scenario	failed physical link	failed logical links	failed paths
j = 1	physical link 1	logical links 1 and 2	paths 1 and 2
j = 2	physical link 2	logical links 1 and 3	paths 1 and 2

จะเห็นได้ว่า ความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงที่ 1 ในชั้นล่างเพียงข่ายเชื่อมโยงเดียว สามารถที่จะทำให้เส้นทางของการเชื่อมต่อชั้นบนจากโหนด C ไปยังโหนด A เสียหายได้ทั้งหมด ดังนั้นในการวิเคราะห์กรณีระบบโครงข่ายที่มีหลายชั้น จึงจำเป็นที่จะต้องทำการแปลงลักษณะกรณีของความเสียหายจากระบบโครงข่ายในชั้นล่างเพียงข่ายเชื่อมโยงเดียว เป็นการเสียหายพร้อมกันของเส้นทางในระดับการส่งข้อมูลชั้นบนที่อาจจะมีได้มากกว่า 1 เส้นทาง นอกจากนั้น ในการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายหลายชั้น จะต้องทำการแปลงค่าความจุที่เกิดขึ้นในชั้นล่าง ให้เป็นค่าความจุที่เกิดขึ้นจริงในชั้นบนด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.5

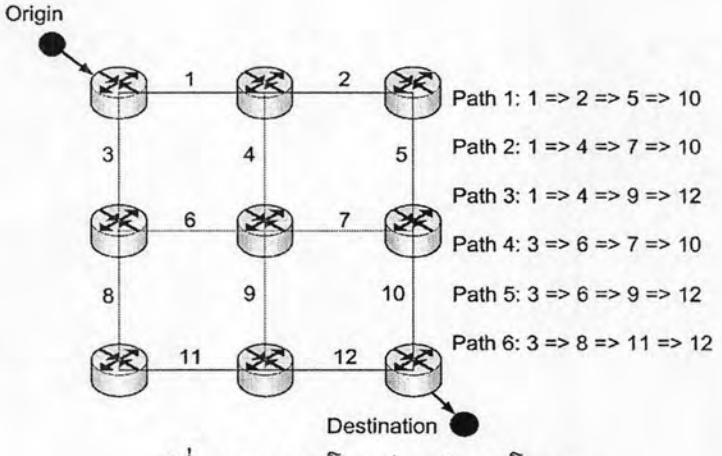
พิจารณาระบบโครงข่ายในรูปที่ 4.5 กำหนดให้มีความต้องการส่งข้อมูลจาก โหนด C ไปยังโหนด A พร้อมทั้งเส้นทางการส่งข้อมูลในชั้นตรรกะสองเส้นทางด้วยกัน โดยที่เส้นทางที่ 1 ใช้การเชื่อมต่อที่ 1 และเส้นทางที่ 2 ใช้การเชื่อมต่อที่ 3 ไปยังการเชื่อมต่อที่ 2 ตารางที่ 4.1 แสดงการแปลงลักษณะความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงในชั้นล่างให้อยู่ในรูปของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบโครงข่ายชั้นบน ทั้งนี้เพื่อทำให้นิยามของความเสียหายสามารถอยู่ในชั้นเดียวกันได้ โดยภายหลังจากการแปลงลักษณะของความเสียหายให้เหลือเพียง 1 ชั้นแล้ว การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายก็จะสามารถวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองของความเสียหายที่เสนอตามปกติ และไม่จำกัดการใช้งานเพียงระบบโครงข่ายเพียงสองชั้น ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์สามารถที่จะเข้าใจได้ง่าย การทดสอบทั้งหมดต่อจากนี้จะทำการวิเคราะห์ระบบโครงข่าย โดยพิจารณาถึงระบบโครงข่ายเพียงชั้นตรรกะเพียงชั้นเดียว ซึ่งถือว่ามีการแปลงลักษณะการเชื่อมต่อรวมทั้งลักษณะรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นจากชั้นกายภาพมาเป็นการเชื่อมต่อในชั้นตรรกะแล้ว โดยไม่พิจารณาถึงลักษณะการเกิดความเสียหายพร้อมกันของเส้นทางการส่งข้อมูลหลายเส้นทางในระบบโครงข่ายชั้นตรรกะ เมื่อเกิดความเสียหายเพียงข่ายเชื่อมโยงเดียวในชั้นกายภาพ อย่างไรก็ตาม เราสามารถที่จะเปลี่ยนนิยามของลักษณะการเกิดความเสียหายในแบบจำลองที่เสนอ เพื่อให้ครอบคลุมในการพิจารณาถึงกรณีการเกิดความเสียหายพร้อมกันของเส้นทางในชั้นตรรกะได้เช่นกัน

4.6 การวิเคราะห์เปรียบเทียบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบโครงข่ายสำหรับรูปแบบความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงแบบต่าง ๆ

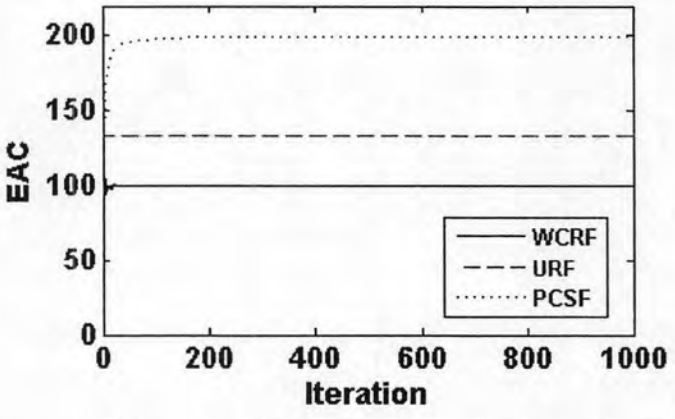
การวัดค่าผลกระทบจากความเสียหายในทางปฏิบัติจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงสาเหตุและรูปแบบของการเกิดความเสียหายในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเกิดความเสียหายจากความตั้งใจ หรือรูปแบบการเกิดความเสียหายจากอุบัติเหตุโดยทั่วไป ในส่วนนี้จะแสดงตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงลักษณะความแตกต่างของการวิเคราะห์รูปแบบความเสียหายแต่ละรูป

แบบ ที่จะสามารถเกิดขึ้นได้กับระบบเป็น 3 กรณีดังนี้

- กรณีความเสียหายจากกลยุทธ์แบบบริสุทธิ์ (pure chance strategy of failure, PCSF)
- กรณีความเสียหายแบบสุ่มอย่างเอกรูป (uniform random failure, URF)
- กรณีความเสียหายแบบสุ่มที่ร้ายแรงที่สุด (worst-case random failure, WCRF)



รูปที่ 4.6 ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของลักษณะการเกิดความเสียหายรูปแบบต่าง ๆ ของระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด (ในกรณี PCSF ผลจากความเสียหายมีลักษณะเดียวกันสำหรับทุกข่ายเชื่อมโยง)

ในการทดสอบนี้จะนำระบบโครงข่ายอย่างง่ายที่มีลักษณะกริด 9 โหนด ที่มีคู่โหนดความต้องการข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.6 มาทำการทดสอบ โดยกำหนดให้ทุกข่ายเชื่อมโยงมีขนาดความจุที่มีขนาด 200 หน่วย ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 จากผลการทดสอบจะพบว่าค่า EAC ที่ได้ ณ จุดสมดุลมีค่าแตกต่างกันดังนี้ $EAC_{PCSF} = 200, EAC_{URF} =$

ตารางที่ 4.2 ค่าความจุสูงสุดของระบบโครงข่ายในกรณีการวิเคราะห์ลักษณะต่าง ๆ ของระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด

Max flow	EAC_{PCSF}	EAC_{URF}	EAC_{WCRF}
400	200	133	100

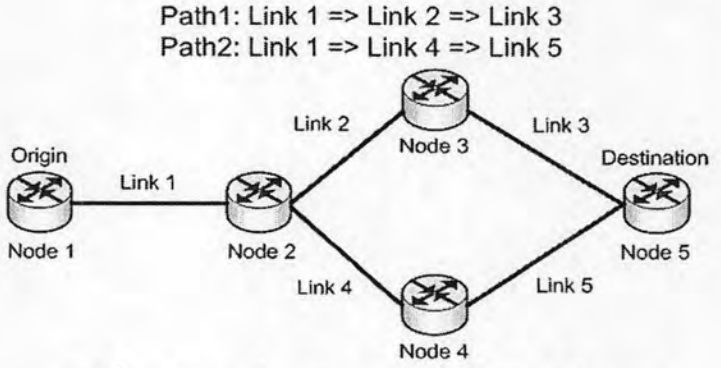
$133, EAC_{WCRF} = 100$ สำหรับระบบโครงข่ายที่พิจารณา เมื่อพิจารณาคำตอบของเกม จะพบว่ารูปแบบการเกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงแบบเฉพาะเจาะจงกับข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง (pure chance strategy of failure, PCSF) จะส่งผลต่อการลดลงของค่า EAC น้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากในการเกิดลักษณะความเสียหายรูปแบบนี้ ระบบโครงข่ายสามารถที่จะรับรู้ถึงสภาพการโจมตีที่เฉพาะเจาะจงได้ และทำการเลือกเส้นทางในการส่งที่สามารถหลบหลีกความเสียหายได้เสมอหลังจากรับรู้ลักษณะเฉพาะตัวของการโจมตี ในกรณีรูปแบบการเกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงจากอุบัติเหตุ ซึ่งแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีความน่าจะเป็นในการเกิดความเสียหายอย่างสุ่มบนระบบโครงข่ายอย่างสม่ำเสมอ (uniform random failure, URF) ระบบโครงข่ายที่ได้รับผลกระทบลักษณะนี้ จะไม่สามารถคาดเดาลักษณะการหลบหลีกการเกิดความเสียหายได้เหมือนกับกรณี PCSF เนื่องจากความเสียหายเกิดขึ้นอย่างสุ่ม และไม่สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายได้ทุกครั้งถึงแม้ว่าระบบโครงข่ายจะสามารถรับรู้ถึงรูปแบบความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้ก็ตาม ดังนั้นค่า EAC ที่ได้จึงมีปริมาณที่น้อยกว่ากรณี PCSF กรณีสุดท้ายเป็นรูปแบบการเกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มและเกิดจากการจ้องทำลาย (worst-case random failure, WCRF) ระบบโครงข่ายที่ได้รับผลกระทบลักษณะนี้ จะมีลักษณะของความเสียหายที่เป็นไปในลักษณะสุ่มโจมตี ที่ร้ายแรงที่สุดต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของระบบ ดังนั้นค่า EAC ที่ได้รับจึงมีปริมาณน้อยที่สุด ในกรณีทั่วไปเราสามารถเปรียบเทียบค่า EAC ที่จะได้รับจากลักษณะรูปแบบของความเสียหายทั้ง 3 รูปแบบจากกรณีทดสอบตัวอย่าง ได้ดังนี้

$$EAC_{PCSF} \geq EAC_{URF} \geq EAC_{WCRF} \tag{4.5}$$

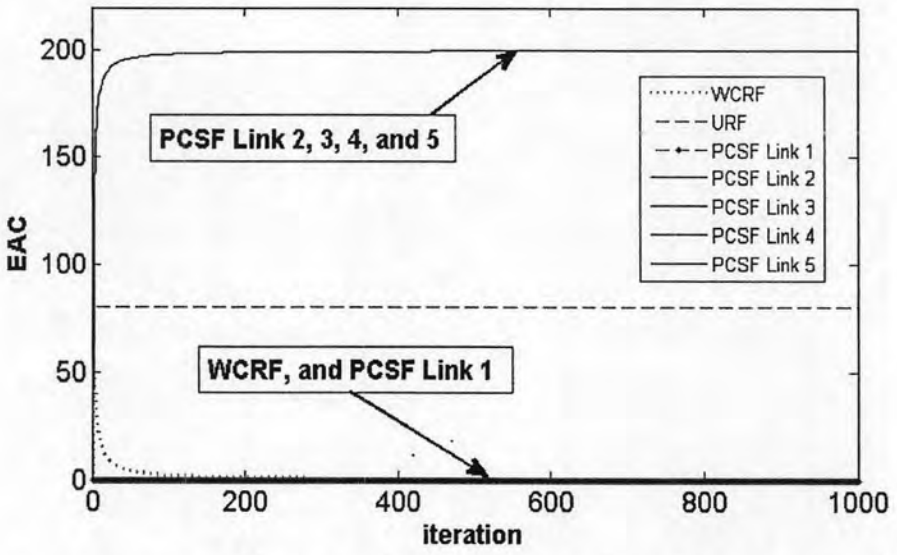
สำหรับการวิเคราะห์หาค่าความจุสูงสุดโดยการใช้วิธีการหาจากทฤษฎีการไหลสูงสุด นั้นเราจะพบว่ามีค่าความจุเป็น 400 หน่วยซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณข้อมูลที่เป็นขอบเขตบนของการวิเคราะห์หาค่าความจุที่ได้เมื่อระบบไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น เราจะเห็นได้ว่าเมื่อระบบโครงข่ายได้รับผลกระทบจากความเสียหาย ปริมาณความจุที่สามารถได้รับสูงสุดจะมีค่าลดลง และลดลงมากที่สุดเมื่อเกิดความเสียหายแบบจ้องทำลาย เราสามารถเปรียบเทียบค่าความจุที่จะได้รับในกรณีการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้จากทฤษฎีการไหลสูงสุด และค่า EAC ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ข้อสังเกตที่แตกต่างอย่างหนึ่งของการวิเคราะห์ผลกระทบจากความเสียหายด้วยทฤษฎีเกมกับทฤษฎี max-flow min-cut ก็คือ จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่เมื่อถูกทำลายแล้วส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงที่สุดกับระบบโครงข่ายซึ่งสามารถแยกโหนดต้นทางและปลายทางออกจากกันได้ จะต้องมีค่าเท่ากับจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่อยู่ใน min-cut เท่านั้น

อย่างไรก็ตามในกรณีที่ความสามารถในการทำลายของผู้ทำลายถูกจำกัดเนื่องจากทรัพยากรในการโจมตีที่มีจำกัด เช่น ทำลายได้เพียง 1 หรือ 2 ข่ายเชื่อมโยงเท่านั้น การวิเคราะห์ระบบโครงข่ายโดยใช้ทฤษฎี min-cut อาจจะไม่สามารถนำมาวิเคราะห์หาชุดของข่ายเชื่อมโยงที่สำคัญกับระบบโครงข่ายได้ อย่างไรก็ตามเราสามารถที่จะวิเคราะห์ค่าความจุที่จะได้รับสูงสุดเมื่อเกิดความเสียหายร้ายแรงที่สุดได้จากทฤษฎีเกมแทน โดยการเปลี่ยนนิยามของความเสียหายที่ใช้ (Q_j) ให้เป็นลักษณะของความเสียหายที่ถูกโจมตีที่ไม่ถูกจำกัดอยู่แค่เพียง 1 ข่ายเชื่อมโยง ซึ่งเป็นข้อดีที่ได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีเกมเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบจากค่าความจุข้อมูลสูงสุดด้วยทฤษฎี min-cut



รูปที่ 4.8 ระบบโครงข่ายทดสอบอย่างง่าย 4 โหนด



รูปที่ 4.9 ผลกระทบของลักษณะการเกิดความเสียหายรูปแบบต่าง ๆ ของระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด

ข้อสังเกตที่สำคัญของข้อสรุปที่แสดงในอสมการที่ (4.5) คือ ข้อสรุปนี้จะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อเราเตอร์มีเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลอย่างน้อย 2 เส้นทาง ซึ่งเส้นทางที่ใช้นั้น จะต้องไม่

มีการใช้เส้นทางบนข่ายเชื่อมโยงเดียวกัน พิจารณากรณีทดสอบของระบบโครงข่าย ที่มีความต้องการข้อมูลจากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 5 และมีเส้นทางในการส่งข้อมูลสองเส้นทางดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยกำหนดให้ทุกข่ายเชื่อมโยงในระบบโครงข่ายนี้มีค่าความจุเป็น 200 หน่วย ผลกระทบจากลักษณะของการเกิดความเสียหายรูปแบบต่าง ๆ ของระบบโครงข่าย จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.9

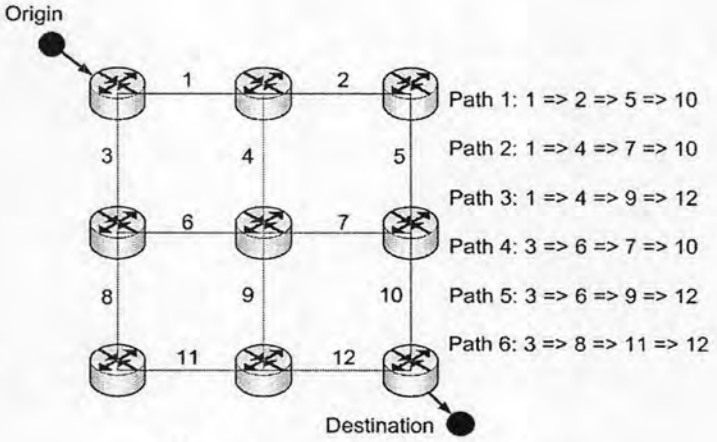
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ในกรณีของความเสียหายแบบ PCSF สำหรับข่ายเชื่อมโยงที่ 1 ค่า EAC ที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 0 หน่วย ทั้งนี้เนื่องจาก เราเตอร์ไม่สามารถที่จะเลือกเส้นทางสำรองที่ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงที่ 1 ได้ ซึ่งกรณีนี้จะให้ค่า EAC ที่น้อยกว่ากรณีความเสียหายแบบ PCSF ที่เราเตอร์สามารถเลือกเส้นทางในการหลบหลีกความเสียหายได้ เช่นในกรณี PCSF ของข่ายเชื่อมโยงที่ 2, 3, 4 และ 5 ซึ่งให้ค่า EAC เป็น 200 หน่วย ดังนั้นความเสียหายในกรณี PCSF จะให้ผลที่ร้ายแรงเมื่อเกิดความเสียหาย ณ บางตำแหน่งของระบบโครงข่ายได้ก็ต่อเมื่อ เราเตอร์มีเส้นทางในการส่งข้อมูลที่มีการใช้เส้นทางซ้ำซ้อนบนข่ายเชื่อมโยงเดียวกัน หรือการที่เราเตอร์มีเส้นทางให้เลือกส่งข้อมูลได้เพียงเส้นทางเดียว จะเห็นได้ว่าระบบโครงข่ายจะมีความทนทานต่อความเสียหายก็ต่อเมื่อ ระบบโครงข่ายนั้นมีเส้นทางสำรองให้สามารถหลบหลีกความเสียหายได้นั่นเอง

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลกระทบจากการเกิดความเสียหายกรณี PCSF ในกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงที่ 1 เกิดความเสียหายเพียงข่ายเชื่อมโยงเดียว กับ กรณีที่ระบบเกิดความเสียหายอย่างสุ่มโดยปกติ (URF) เราจะพบว่า กรณี PCSF ที่ข่ายเชื่อมโยงที่ 1 เกิดความเสียหายจะให้ค่า EAC ที่น้อยกว่ากรณีการเกิดความเสียหายอย่างสุ่มโดยปกติ ที่ให้ค่า EAC เป็น 80 หน่วยความจุ จะเห็นได้ว่าข้อสรุปที่แสดงในอสมการที่ (4.5) จะไม่เป็นจริงเนื่องจาก $EAC_{URF} \geq EAC_{PCSF}$ ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดความเสียหายแบบเฉพาะเจาะจงบนข่ายเชื่อมโยงบางตำแหน่งสามารถที่จะเป็นการทำลายที่ร้ายแรงที่สุดได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจริงจึงเป็นการยากที่จะทำการระบุว่าระบบโครงข่ายทั่ว ๆ ไปลักษณะใด ควรจะวิเคราะห์ด้วยกรณี PCSF หรือ URF เพื่อที่จะคาดเดาถึงผลของการเกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงที่สุด อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายในกรณีที่ระบบเกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงที่สุด (WCRF) ซึ่งใช้การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีเกมที่เสนอ สามารถที่จะวิเคราะห์ถึงค่าความสามารถในการส่งข้อมูลที่คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากความเสียหายอย่างสุ่มที่เกิดอย่างร้ายแรงที่สุด และให้ค่า EAC ที่น้อยที่สุดเสมอเมื่อเทียบกับกรณีความเสียหายในรูปแบบ PCSF และ URF ดังนั้นในการที่จะป้องกัน การเกิดลักษณะความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบโครงข่าย การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายและหาข่ายเชื่อมโยงที่สำคัญเพื่อที่จะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพ ควรจะต้องวิเคราะห์อยู่บนพื้นฐานของการเกิดความเสียหายในลักษณะที่เกิดอย่างร้ายแรงที่สุด ซึ่งแบบจำลองของเกมนั้นสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ให้เกิดประโยชน์ดังกล่าวได้

4.7 การวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบสำหรับกรณีระบบโครงข่ายแบบต่าง ๆ

การวิเคราะห์ในส่วนนี้ จะนำเสนอการทดสอบแบบจำลองการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายและทำการหาข่ายเชื่อมโยงที่มีผลกระทบกับประสิทธิภาพการส่งข้อมูลสูงสุดของระบบเมื่อเกิดรูปแบบความเสียหายอย่างร้ายแรงที่สุด โดยจะทำการเสนอผลการทดสอบกับระบบโครงข่ายที่มีลักษณะแตกต่างกัน ดังนี้

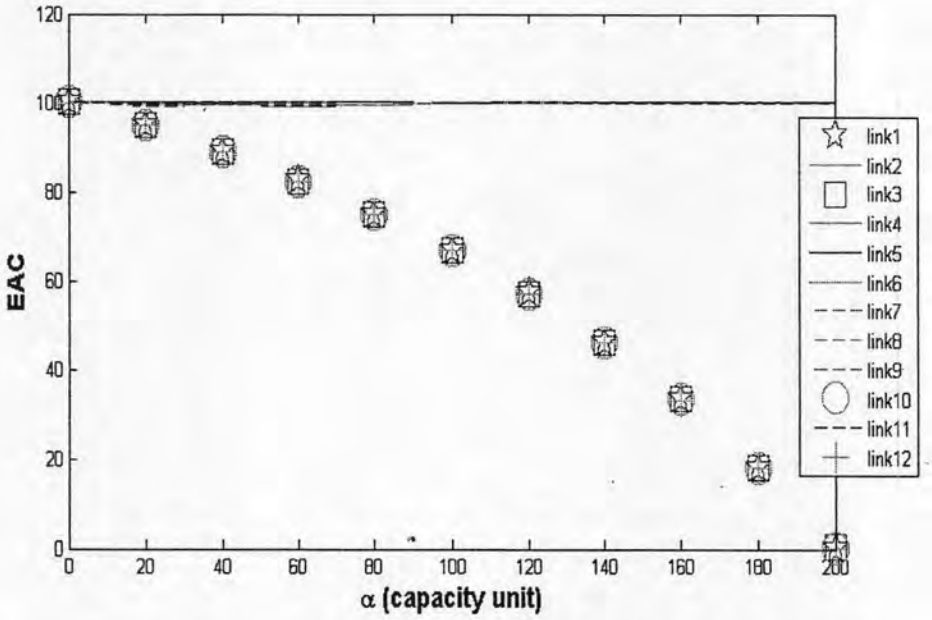
4.7.1 ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด



รูปที่ 4.10 ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด

พิจารณาระบบโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงดังแสดงในรูปที่ 4.10 กำหนดให้ขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดในระบบโครงข่ายนี้มีขนาดเป็น 200 หน่วย ผลจากการทดสอบหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับประสิทธิภาพการส่งข้อมูลที่สูงที่สุดโดยการใช้ค่า EAC เป็นตัวชี้วัดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11

จากผลการทดสอบจะพบว่าข่ายเชื่อมโยงที่ 1, 3, 10 และ 12 มีความสำคัญต่อค่าความจุโดยรวมของระบบโครงข่าย ทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของค่าความจุในข่ายเชื่อมโยงเหล่านี้ จะส่งผลให้ผู้ทำลายสามารถหาวิธีการทำลายที่ดีที่สุดในการลดค่า EAC ได้ ในขณะที่การลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ ไม่ทำให้ค่า EAC ลดลงแต่อย่างใด เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากรูปแบบการเสียหายของข่ายเชื่อมโยงแบบเสียหายทั้งหมด (complete link failure) ของข่ายเชื่อมโยง 1, 3, 10 และ 12 จะพบว่าเมื่อข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในข่ายเชื่อมโยงเหล่านี้มีค่าความจุลดลง ระบบโครงข่ายที่เหลืออยู่ จะมีความสามารถในการส่งข้อมูลเพื่อหลบหลีกลักษณะความเสียหายจากการจ้องทำลายลดลงอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากผู้ทำลายสามารถที่จะเลือกทำลายข่ายเชื่อมโยงที่เหลืออยู่ ซึ่งเป็นสมาชิกที่อยู่ในเซตตัดเดียวกันกับข่ายเชื่อมโยงที่เสียหายได้ และจะทำให้ผู้เล่นเราเตอร์ไม่สามารถที่จะทำการหลบหลีกความเสียหายที่เกิดขึ้นได้

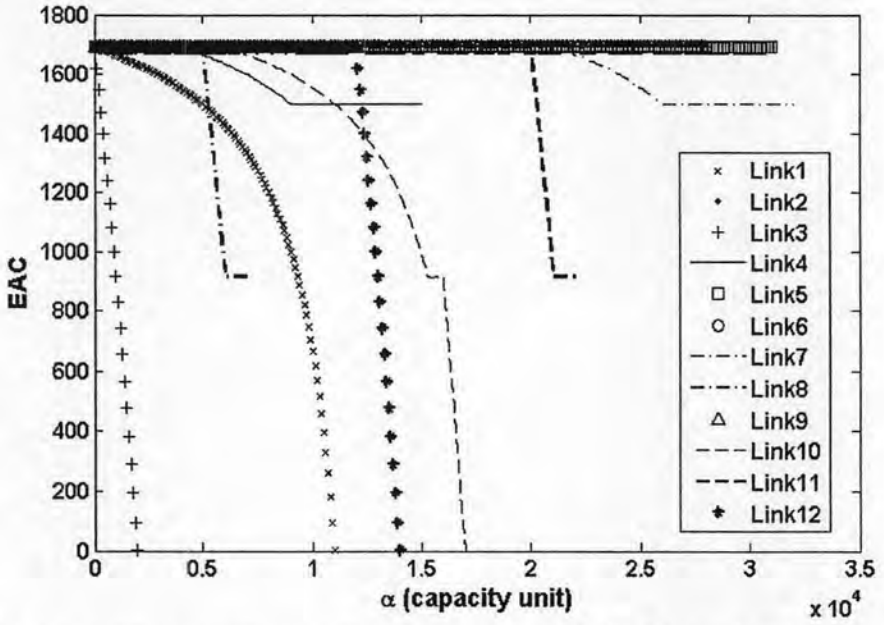


รูปที่ 4.11 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด

ในการวิเคราะห์ จะพบว่ารูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้น มีการเกิดขึ้นของเหตุการณ์ความเสียหายสองครั้งด้วยกัน ส่วนของการเสียหายประเภทแรกเป็นเพียงการสมมุติเพื่อการวิเคราะห์หาผลกระทบกับระบบโครงข่าย เมื่อสมมุติว่ามีการลดลงของปริมาณความจุขึ้น ซึ่งอาจจะเกิดจากความเสียหายหรือการปิดซ่อมบำรุงของข่ายเชื่อมโยง โดยการลดลงของปริมาณความจุอาจจะมีทั้งลักษณะของการเสียหายไปเพียงบางส่วนหรือเสียหายไปทั้งหมด ในกรณีการเสียหายประเภทที่สองจะเป็นรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งจะใช้ระบุถึงความสามารถของระบบโครงข่ายในการส่งข้อมูลเพื่อหลบหลีกความเสียหายจากการจ้องทำลาย โดยการใช้ค่า EAC เป็นตัวชี้วัดถึงความสามารถในการส่งข้อมูลที่มากที่สุดที่เป็นไปได้โดยเฉลี่ย ณ ขณะเวลาที่เกิดความเสียหายจากการจ้องทำลาย เมื่อระบบโครงข่ายเป็นระบบที่มีสภาพดังที่ได้สมมุติว่าเกิดเหตุการณ์การลดลงของความจุของระบบโครงข่ายดังในกรณีการเสียหายประเภทแรกขึ้น โดยเหตุการณ์ความเสียหายที่เกิดจากการจ้องทำลายจะเป็นลักษณะของการเสียหายที่เกิดจากการทำลายข่ายเชื่อมโยงโดยสมบูรณ์ (complete link failure) เท่านั้น

ถ้าหากวิเคราะห์เพิ่มเติมจากระบบโครงข่ายในรูปที่ 4.10 ถึงผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุของระบบโครงข่ายที่มีความจุของแต่ละข่ายเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาระบบโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงในรูปที่ 4.10 ซึ่งกำหนดให้ขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงที่ 1-12 ในโครงข่ายนี้มีค่าเป็น 11000, 6000, 2000, 15000, 31000, 1000, 32000, 7000, 28000, 17000, 22000, 14000 ตามลำดับ โดยค่าตัวเลขที่นำมาใช้ในกรณีนี้ เป็นค่าตัวเลขที่ได้จากระบบโครงข่ายทดสอบในงานวิจัย [13] ผลจากการทดสอบหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับประสิทธิภาพการส่งข้อมูลที่สูงที่สุดโดยการใช้ค่า EAC เป็นตัวชี้วัดสามารถแสดงได้ดังรูปที่

4.12



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด เมื่อข่ายเชื่อมโยงมีความจุที่แตกต่างกัน

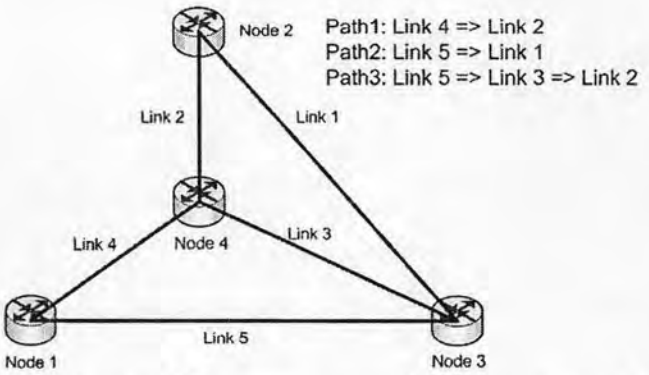
จากรูปที่ 4.12 จะพบว่า จะมีข่ายเชื่อมโยงอยู่สองประเภท คือ ข่ายเชื่อมโยงที่ทำการลดขนาดความจุแล้วไม่ทำให้ค่า EAC ลดลง และ ข่ายเชื่อมโยงที่ทำการลดขนาดความจุแล้วทำให้ค่า EAC ลดลง ซึ่งข่ายเชื่อมโยงในกรณีหลังนี้ ได้แก่ข่ายเชื่อมโยงที่ 1, 3, 4, 7, 8, 10, 11 และ 12 ความสำคัญของข่ายเชื่อมโยงแต่ละข่ายเชื่อมโยงในระบบโครงข่ายนี้ ขึ้นกับค่าระดับการลดลงของปริมาณความจุที่ต้องการพิจารณา (α) ถ้าหากทำการพิจารณาหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับค่า EAC ของระบบโครงข่ายเมื่อเกิดเหตุการณ์ความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงประเภทเสียหายทั้งหมด (complete link failure) ข่ายเชื่อมโยงที่ต้องทำการดูแลและเพิ่มความเชื่อถือได้ จะประกอบด้วยข่ายเชื่อมโยงที่ 1, 3, 10 และ 12 อย่างไรก็ตามถ้าหากเป้าหมายของการวิเคราะห์เป็นการหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับค่า EAC ของระบบโครงข่ายเมื่อเกิดเหตุการณ์ความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงเพียงบางส่วน (partial link failure) ข่ายเชื่อมโยงที่ต้องดูแลและเพิ่มความเชื่อถือได้เป็นอันดับแรก ได้แก่ข่ายเชื่อมโยงที่ให้ค่า EAC ที่น้อยที่สุดเมื่อปริมาณความจุของข่ายเชื่อมโยงนั้นลดลงเป็นปริมาณ α หน่วย ทั้งนี้ค่า α นั้นเป็นค่าที่ขึ้นกับระดับของความเสียหายที่ต้องการพิจารณาในการออกแบบระบบเพื่อป้องกันความเสียหาย และเป็นค่าที่ผู้ออกแบบระบบจะต้องตัดสินใจเพื่อกำหนดระดับความเสียหายที่ต้องการวิเคราะห์ เพื่อปรับปรุงให้ระบบโครงข่ายสามารถทนทานต่อความเสียหายจากการจ้องทำลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 4.12 หากสังเกตลักษณะของการลดลงของค่า EAC เมื่อความจุในบางข่ายเชื่อมโยงลดลงแล้ว จะพบว่ามีบางข่ายเชื่อมโยง ได้แก่ ข่ายเชื่อมโยงที่ 4, 7, 8 และ 11 ที่เมื่อทำ

การลดค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงแล้ว จะทำให้ค่า EAC ลดลง และหากลดขนาดความจุอย่างต่อเนื่อง จะพบว่าจะมีจุดหนึ่งที่ค่า EAC จะมีค่าคงตัวเสมอไม่ว่าค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงนั้นจะลดลงเท่าใดก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจาก ณ สถานะของระบบโครงข่ายขณะนั้น ข่ายเชื่อมโยงที่ 4, 7, 8, และ 11 จะเริ่มไม่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบ และเราเตอร์จะทำการส่งข้อมูลโดยใช้เส้นทางอื่นที่ไม่ผ่านข่ายเชื่อมโยงเหล่านั้น ดังนั้นค่า EAC จึงมีค่าคงตัวแม้ว่าข่ายเชื่อมโยงนั้นจะถูกทำลายไปมากเท่าใดก็ตาม

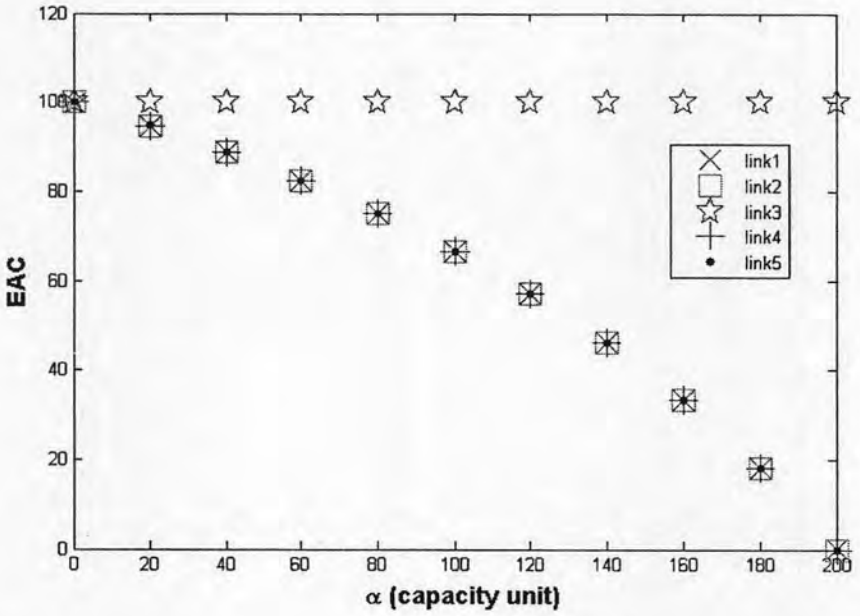
4.7.2 ระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด

เพื่อทำให้การเปรียบเทียบผลการทดสอบสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนมากขึ้น ในส่วนการทดสอบนี้จึงพิจารณาระบบโครงข่ายอย่างง่ายที่มีการเชื่อมโยงและเส้นทางการใช้งานที่เป็นไปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยจะทำการวิเคราะห์ถึงผลของการที่ระบบโครงข่ายมีข่ายเชื่อมโยงที่เป็นคอขวด, วิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่เป็นจุดที่ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพความจุ และแสดงให้เห็นถึงผลจากการเพิ่มความจุให้กับข่ายเชื่อมโยงที่เป็นคอขวดของระบบซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดของค่า EAC ของระบบโครงข่าย โดยกรณีแรกจะกำหนดให้ขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดในระบบโครงข่ายนี้มีขนาดเป็น 200 หน่วย และมีความต้องการส่งข้อมูลจากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 2 ผลจากการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับประสิทธิภาพการส่งข้อมูลที่สูงที่สุดโดยการใช้ค่า EAC เป็นตัวชี้วัดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 โครงสร้างชั้นกายภาพของระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด

จากผลการทดสอบจะพบว่าข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อค่า EAC ของระบบคือ ข่ายเชื่อมโยงที่ 1, 2, 4 และ 5 โดยข่ายเชื่อมโยงทั้ง 4 นั้นมีความสำคัญที่เท่าเทียมกันเนื่องจากการลดลงของค่าความจุของทั้งสี่ข่ายเชื่อมโยง ส่งผลต่ออัตราการลดลงของ EAC อย่างเท่าเทียมกัน จะเห็นว่าข่ายเชื่อมโยงที่ 3 นั้นไม่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของระบบโครงข่ายต่อเหตุการณ์ความเสียหายจากการจ้องทำลาย ทั้งนี้เนื่องจากเหตุการณ์ความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงที่ 3 ไม่ทำให้ค่า EAC ลดลงนั่นเอง นอกจากนั้นหากทำการพิจารณาโดยการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการไหลสูงสุด แล้ว จะพบว่าข่ายเชื่อมโยงที่ถูกระบุจากเกมว่าเป็นข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบ ในที่นี้ได้แก่ข่ายเชื่อมโยงที่



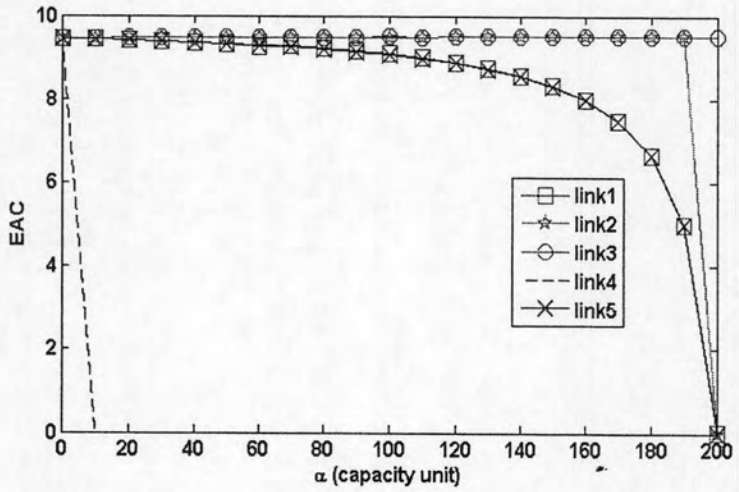
รูปที่ 4.14 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด

1, 2, 4 และ 5 จะสอดคล้องกับสมาชิกของเซตตัดที่ให้ค่าความจุที่ต่ำที่สุด (min-cut) ด้วย

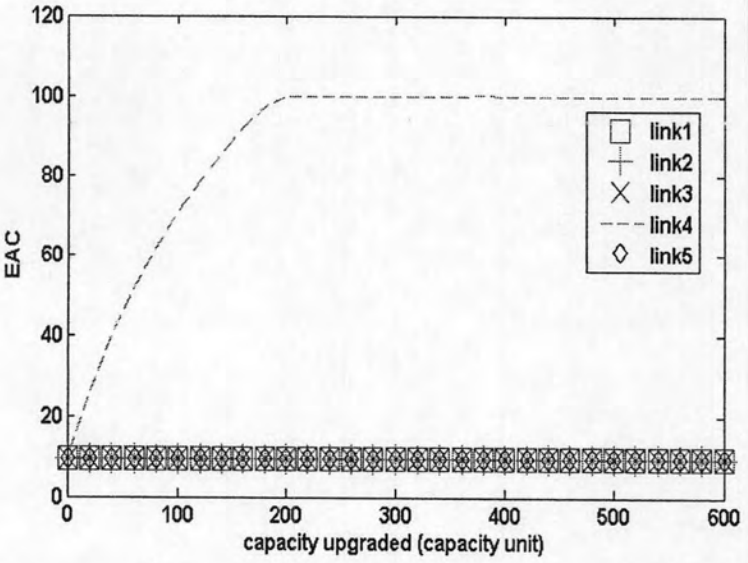
หากเปลี่ยนค่าความจุของระบบโครงข่ายทดสอบอย่างง่าย โดยสมมุติให้มีเหตุการณ์ความเสียหายเกิดขึ้นบนข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง แล้ววิเคราะห์ระบบโครงข่ายที่ข่ายเชื่อมโยงนั้นเกิดความเสียหายเป็นคอขวดของระบบ เราจะสามารถแยกแยะระดับความสำคัญของข่ายเชื่อมโยงที่จำเป็นที่จะต้องทำการปรับปรุงค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงก่อนและหลังได้ พิจารณาระบบโครงข่ายในรูปที่ 4.13 กำหนดให้มีคู่โหนดความต้องการข้อมูลจากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 2 โดยข่ายเชื่อมโยงที่ 4 ได้รับผลกระทบจากความเสียหายเพียงบางส่วนและมีความจุเหลืออยู่เพียง 10 หน่วย และกำหนดให้ข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ มีค่าความจุจำนวน 200 หน่วย ผลจากการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับประสิทธิภาพการส่งข้อมูลที่สูงที่สุดโดยการใช้ค่า EAC เป็นตัวชี้วัดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.15

จากผลการทดสอบจะพบว่า เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ 4 ในระบบโครงข่ายถูกลดประสิทธิภาพลงเหลือค่าความจุเพียง 10 หน่วย ข่ายเชื่อมโยงที่ 4 จะเป็นจุดที่สำคัญที่สุดในการที่จะต้องทำการปรับปรุงค่าความจุเป็นอันดับแรก ทั้งนี้เนื่องจาก การลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงที่ 4 เพียง 10 หน่วยความจุนั้น จะทำให้ระบบโครงข่ายที่เหลือไม่สามารถที่จะส่งข้อมูลได้ถ้าหากเกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงอย่างร้ายแรงที่สุดขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ 4 ถูกลดประสิทธิภาพการส่งข้อมูลเพียงเล็กน้อย ก็จะมีผลทำให้ระบบโครงข่ายที่เหลือไม่มีความทนทานต่อรูปแบบความเสียหายที่เกิดจากการจ้องทำลายได้

หากเราต้องการทำการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบโครงข่าย เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ 4 มีความจุเพียง 10 หน่วย เราจะพบว่าวิธีการเพิ่มความจุให้กับจุดที่เป็นเสมือนคอ



รูปที่ 4.15 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ 4 มีความจุเพียง 10 หน่วย



รูปที่ 4.16 ผลจากการเพิ่มขนาดค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่าง ๆ ต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายอย่างง่าย 4 โหนด เมื่อข่ายเชื่อมโยงที่ 4 มีความจุเพียง 10 หน่วย

ขวดของระบบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทฤษฎีเกมที่เสนอ จะช่วยให้ระบบโครงข่ายมีประสิทธิภาพการส่งข้อมูลที่มีความเชื่อถือได้ที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อเพิ่มค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงที่ 4 ซึ่งถูกวิเคราะห์ว่าเป็นข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบแล้ว ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบซึ่งชี้วัดด้วยค่า EAC จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยอัตราใกล้เคียงกับการเพิ่มแบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงที่ 4 ไปถึงจุดหนึ่ง ค่า EAC จะเริ่มมีค่าคงตัวไม่ว่าจะเพิ่มขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงที่ 4 ไปเท่าใดก็ตาม หากทำการทดสอบในหลาย ๆ รูปแบบของระบบโครงข่าย จะพบว่าในบางครั้งเราจำเป็นที่จะต้องเพิ่มขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงมากกว่า 1 ข่ายเชื่อมโยงพร้อมกัน เพื่อทำให้ค่า EAC เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามวิทยานิพนธ์นี้จะไม่พิจารณาถึงระเบียบวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงเพื่อให้ระบบโครงข่ายมีความทนทานต่อความเสียหาย แต่จะทำการชี้วัดหาข่ายเชื่อมโยงที่ควรจะต้องทำการปรับปรุงก่อนเพื่อให้ระบบโครงข่ายมีความเชื่อถือได้สูงแทน

เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงที่ 4 เปรียบเทียบกับกรณีของการเพิ่มค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ จะพบว่า การเพิ่มค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ข่ายเชื่อมโยงที่ 4 จะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นต่อค่า EAC แต่อย่างใด ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบด้วยทฤษฎีเกมจะสามารถช่วยวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงข่ายเชื่อมโยงให้กับระบบโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีทั่วไปวิธีที่เสนอจะพยายามทำให้ระบบมีการกระจายค่าความจุให้กับข่ายเชื่อมโยงต่าง ๆ โดยไม่เน้นการเพิ่มความจุให้กับข่ายเชื่อมโยงใดข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเป็นสำคัญ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่ดีในการออกแบบระบบให้มีความทนทานและความเชื่อถือได้สูง

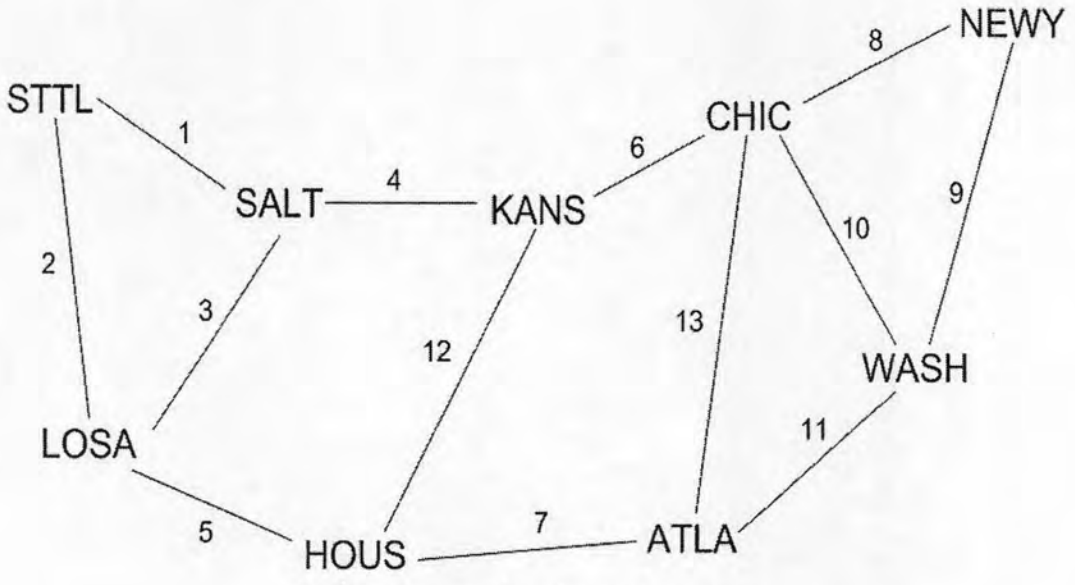
4.7.3 ระบบโครงข่ายแกน Abilene

การทดสอบนี้จะเสนอผลของการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้พร้อมทั้งหาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญกับประสิทธิภาพการส่งข้อมูลที่สูงที่สุดของระบบโครงข่ายที่มีการใช้งานอยู่จริงในทางปฏิบัติ โดยได้ทดสอบกับระบบโครงข่ายแกน Abilene [27] ซึ่งเป็นระบบโครงข่ายที่มีอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกาและเป็นโครงข่ายของโครงการ internet2 โดยมีการเชื่อมต่อด้วยความเร็วสูงถึง 10 กิกะบิตต่อวินาที (10 Gbps) โดยเป้าหมายของโครงข่ายแกน Abilene คือการจัดหาระบบโครงข่ายความเร็วสูงเพื่อช่วยเหลือเกี่ยวกับงานด้านต่าง ๆ เหล่านี้

- การพัฒนางานนวัตกรรมด้านแอพพลิเคชั่นใหม่ต่าง ๆ ที่เป็นความคิดสร้างสรรค์ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทำการทดลองบนระบบโครงข่าย ที่สามารถให้บริการที่มีสมรรถนะสูงซึ่งไม่สามารถหาใช้ได้โดยทั่วไปตามบริการอินเทอร์เน็ตในท้องตลาด
- การติดตั้งและทดสอบของบริการใหม่ ๆ รวมถึงเทคโนโลยีการทำ multicast, ipv6, การวัด รวมถึงเทคโนโลยีด้านความปลอดภัย ซึ่งไม่มีการให้บริการโดยทั่วไปตามท้องตลาด
- การเสริมสร้างการร่วมมือกันระหว่างองค์กรการวิจัยในประเทศต่าง ๆ ที่เป็นสมาชิก

ทั้งนี้รวมถึงองค์กรการวิจัยทั้งในภาครัฐและเอกชน เพื่อยกระดับคุณภาพการวิจัยของประเทศต่าง ๆ ให้ดียิ่งขึ้น

- การเพิ่มการเข้าถึงให้กับนักวิจัยที่ต้องการทำการทดสอบกับระบบโครงข่ายสมรรถนะสูง เพื่อรองรับกับการใช้งานระบบโครงข่ายที่สามารถให้บริการใหม่ ๆ และเป็นประโยชน์ได้

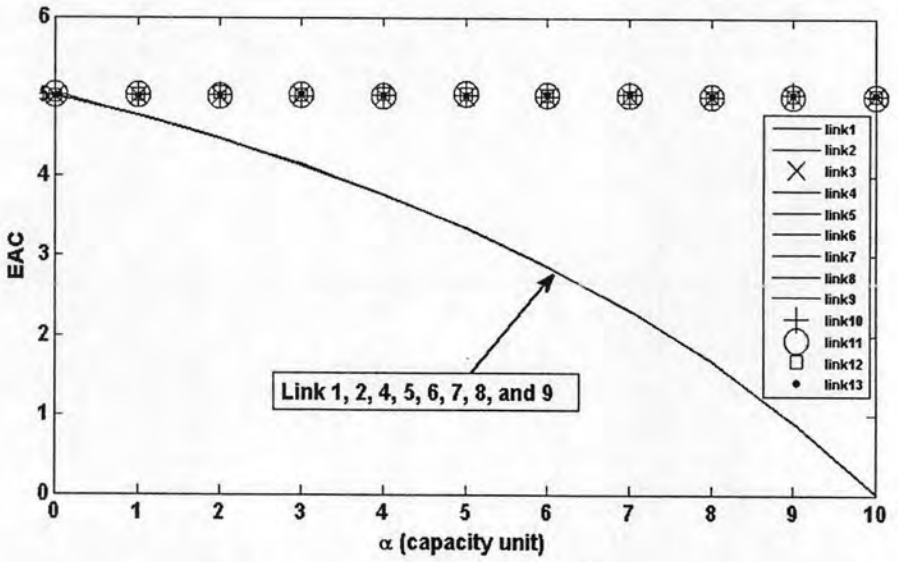


รูปที่ 4.17 ระบบโครงข่ายแกน Abilene

จากรูปที่ 4.17 แสดงลักษณะของโครงข่ายแกน Abilene ที่ทุกข่ายเชื่อมโยงมีขนาดความจุ 10 หน่วย โดยกำหนดข่ายเชื่อมโยงไว้ดังแสดงในรูป และ เพื่อทำการทดสอบกับการใช้งานจริงในกรณีเส้นทางที่ใช้ส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนด วางตัวห่างกันไกลที่สุด ในที่นี้จึงกำหนดให้มีคู่โหนดความต้องการส่งข้อมูลจากโหนด STTL ไปยังโหนด NEWY โดยมีเส้นทางในการส่งข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมดจำนวน 26 เส้นทาง ดังนี้

เส้นทางที่ 1 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 4 → 6 → 8
เส้นทางที่ 2 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 4 → 6 → 10 → 9
เส้นทางที่ 3 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 4 → 6 → 13 → 11 → 9
เส้นทางที่ 4 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 4 → 12 → 7 → 13 → 8
เส้นทางที่ 5 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 4 → 12 → 7 → 11 → 9
เส้นทางที่ 6 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 4 → 12 → 7 → 11 → 10 → 8
เส้นทางที่ 7 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 3 → 5 → 12 → 6 → 8
เส้นทางที่ 8 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 3 → 5 → 12 → 6 → 13 → 11 → 9
เส้นทางที่ 9 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 3 → 5 → 12 → 6 → 10 → 9
เส้นทางที่ 10 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 3 → 5 → 7 → 13 → 8
เส้นทางที่ 11 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 3 → 5 → 7 → 13 → 10 → 9

เส้นทางที่ 12 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 3 → 5 → 7 → 11 → 10 → 8
เส้นทางที่ 13 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 3 → 5 → 7 → 11 → 9
เส้นทางที่ 14 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 3 → 4 → 6 → 8
เส้นทางที่ 15 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 3 → 4 → 6 → 10 → 9
เส้นทางที่ 16 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 3 → 4 → 6 → 13 → 11 → 9
เส้นทางที่ 17 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 3 → 4 → 12 → 7 → 13 → 8
เส้นทางที่ 18 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 3 → 4 → 12 → 7 → 13 → 10 → 9
เส้นทางที่ 19 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 3 → 4 → 12 → 7 → 11 → 9
เส้นทางที่ 20 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 5 → 12 → 6 → 8
เส้นทางที่ 21 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 5 → 12 → 6 → 10 → 9
เส้นทางที่ 22 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 5 → 12 → 6 → 13 → 11 → 9
เส้นทางที่ 23 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 5 → 7 → 13 → 8
เส้นทางที่ 24 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 5 → 7 → 13 → 10 → 9
เส้นทางที่ 25 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 5 → 7 → 11 → 10 → 9
เส้นทางที่ 26 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 2 → 5 → 7 → 11 → 9



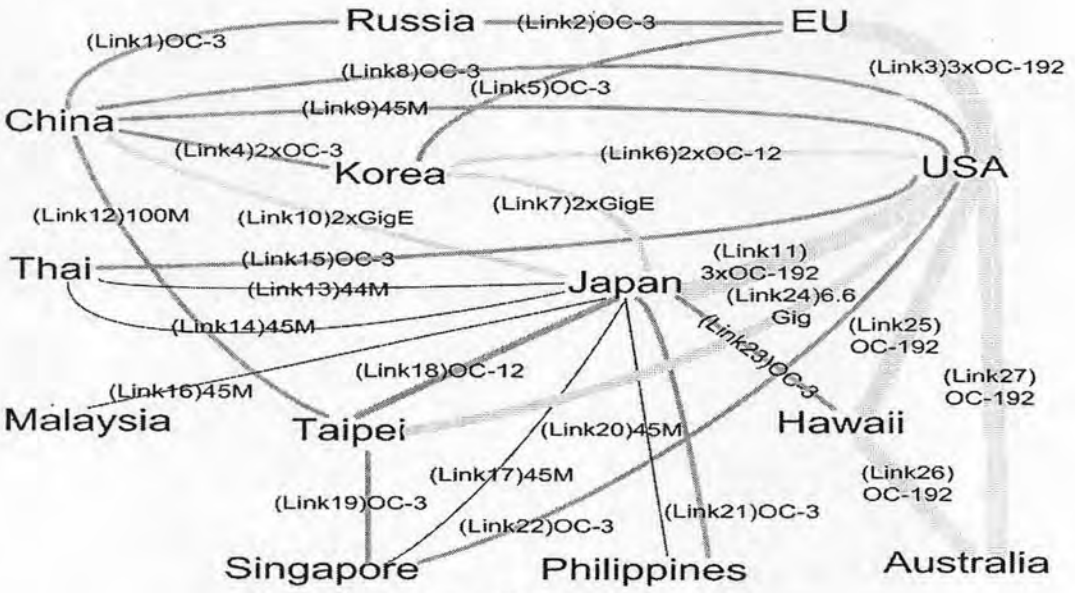
รูปที่ 4.18 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน Abilene

ผลการทดสอบการวิเคราะห์หาข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบโครงข่ายสามารถที่จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า ข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบโครงข่ายนั้นได้แก่ ข่ายเชื่อมโยงที่ 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 โดยข่ายเชื่อมโยงเหล่านี้มีความสำคัญเท่ากันเนื่องจากข่ายเชื่อมโยงเหล่านี้ให้ค่า EAC ที่มีอัตราการลดลงอย่างเท่าเทียมกันเมื่อทำการลดค่าความจุของข่ายเชื่อม

โยง นอกจากนั้นหากเราทำการเปรียบเทียบกับทฤษฎีการไหลสูงสุดแล้ว เราจะพบว่าข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวเป็นสมาชิกของเซตตัดที่เป็น min-cut ที่มีความจุรวมมีค่าเป็น 20 หน่วย ซึ่งเป็นจุดติดขัด (bottleneck) ของระบบโครงข่ายนั่นเอง

4.7.4 ระบบโครงข่ายแกน APAN

จากตัวอย่างการทดสอบระบบโครงข่ายแกน Abilene ข้างต้น จะพบว่าข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงจะมีขนาดความจุเป็นปริมาณ 10 หน่วยความจุ เท่ากันทั้งหมดซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าเราอาจจะประยุกต์ใช้ทฤษฎีการไหลสูงสุด เพื่อมาทำการหาข่ายเชื่อมโยงที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของระบบโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อและการกระจายของความจุที่ไม่ซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตามเมื่อระบบโครงข่ายนั้นมีการเชื่อมต่อที่ซับซ้อนและการกระจายตัวของความจุข่ายเชื่อมโยงมีมากขึ้น การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี การไหลสูงสุด อาจจะไม่สามารถใช้ในการชี้ชัดได้ว่าข่ายเชื่อมโยงใดสำคัญมากกว่ากัน ดังนั้นการทดสอบในส่วนนี้ จะนำเสนอการทดสอบระบบโครงข่ายที่มีความซับซ้อนและมีค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงที่มีความแตกต่างกันมาก โดยจะเสนอผลจากการทดสอบระบบโครงข่ายแกน APAN [28] ซึ่งเป็นระบบโครงข่ายที่มีการใช้งานจริงในทางปฏิบัติ โครงข่ายแกน APAN เป็นระบบโครงข่ายขององค์กร APAN ที่ไม่แสวงผลกำไร เป็นระบบโครงข่ายที่เกิดจากการร่วมมือกันของประเทศต่างๆในภาคพื้นเอเชีย-แปซิฟิก ซึ่งถูกออกแบบโดยมุ่งหวังให้เป็นระบบโครงข่ายสมรรถนะสูงสำหรับการวิจัยและการพัฒนาสำหรับระบบโครงข่ายในยุคหน้า โดยจะมีการให้บริการ ระบบโครงข่ายที่ทันสมัยสำหรับการวิจัยและศึกษาในสังคมการวิจัยและพัฒนาบนภาคพื้นเอเชีย - แปซิฟิก เพื่อส่งเสริมการร่วมมือกันระหว่างประเทศในระดับสากล



รูปที่ 4.19 ระบบโครงข่ายแกน APAN

ระบบโครงข่ายแกน APAN มีลักษณะการเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 4.19 มีขนาดความจุ

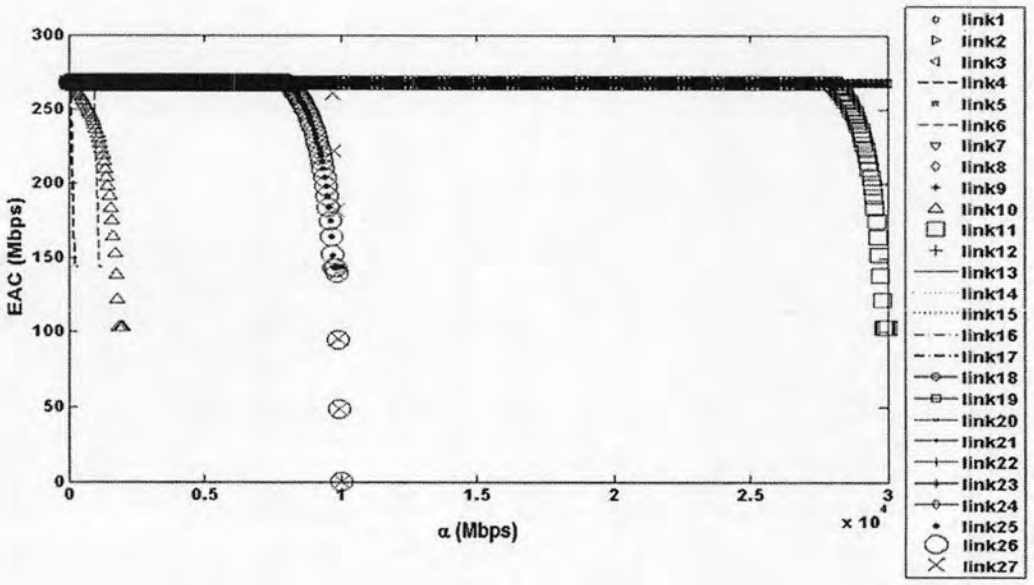
ตารางที่ 4.3 หมายเลขของข่ายเชื่อมโยง การเชื่อมต่อ และความจุของแต่ละข่ายเชื่อมโยงในระบบโครงข่ายแกน APAN

link	connection	capacity (Mbps)	link	connection	capacity (Mbps)
1	China-Russia	155	15	Thai-USA	155
2	Russia-EU	155	16	Malaysia-Japan	45
3	EU-USA	30000	17	Singapore-Japan	45
4	China-Korea	310	18	Taipei-Japan	622
5	Korea-EU	155	19	Singapore-Taipei	155
6	Korea-USA	1244	20	Philippine-Japan	45
7	Korea-Japan	2000	21	Philippine-Japan	155
8	China-USA	155	22	Singapore-USA	155
9	China-USA	45	23	Japan-Hawaii	155
10	China-Japan	2000	24	Taipei-USA	6600
11	Japan-USA	30000	25	Hawaii-USA	10000
12	China-Taipei	100	26	Hawaii-Australia	10000
13	Thai-Japan	44	27	Australia-USA	10000
14	Thai-Japan	45			

และหมายเลขของการเชื่อมต่อดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 [28] โดยกำหนดให้ข่ายเชื่อมโยงที่เป็นการเชื่อมต่อผ่านดาวเทียมมีค่าความจุเป็น 45 เมกะบิตต่อวินาที และสมมติขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงจาก Russia → EU และ EU → USA มีค่าเป็น 155 และ 30000 เมกะบิตต่อวินาทีตามลำดับ เพื่อทำการทดสอบกับการใช้งานจริงในกรณีเส้นทางที่ใช้ส่งข้อมูลระหว่างคู่โหนดวางตัวห่างกันไกลที่สุด ในที่นี้จึงกำหนดให้มีคู่โหนดความต้องการส่งข้อมูลจากประเทศจีนไปยังประเทศออสเตรเลีย และมีเส้นทางการส่งข้อมูลทั้งหมด 25 เส้นทาง ดังนี้

เส้นทางที่ 1 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 2 → 3 → 27
เส้นทางที่ 2 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 2 → 5 → 6 → 27
เส้นทางที่ 3 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 2 → 5 → 7 → 23 → 26
เส้นทางที่ 4 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 2 → 3 → 25 → 26
เส้นทางที่ 5 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 2 → 5 → 6 → 25 → 26
เส้นทางที่ 6 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 2 → 5 → 7 → 11 → 27
เส้นทางที่ 7 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 1 → 2 → 5 → 7 → 11 → 25 → 26
เส้นทางที่ 8 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 4 → 6 → 27
เส้นทางที่ 9 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 4 → 7 → 11 → 25 → 26
เส้นทางที่ 10 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 4 → 7 → 11 → 27

เส้นทางที่ 11 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 4 → 7 → 23 → 26
เส้นทางที่ 12 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 8 → 25 → 26
เส้นทางที่ 13 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 8 → 27
เส้นทางที่ 14 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 9 → 25 → 26
เส้นทางที่ 15 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 9 → 27
เส้นทางที่ 16 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 10 → 23 → 26
เส้นทางที่ 17 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 10 → 11 → 27
เส้นทางที่ 18 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 10 → 11 → 25 → 26
เส้นทางที่ 19 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 12 → 24 → 25 → 26
เส้นทางที่ 20 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 12 → 24 → 27
เส้นทางที่ 21 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 12 → 18 → 11 → 27
เส้นทางที่ 22 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 12 → 18 → 11 → 25 → 26
เส้นทางที่ 23 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 12 → 18 → 23 → 26
เส้นทางที่ 24 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 12 → 19 → 22 → 25 → 26
เส้นทางที่ 25 ผ่านข่ายเชื่อมโยง 12 → 19 → 22 → 27



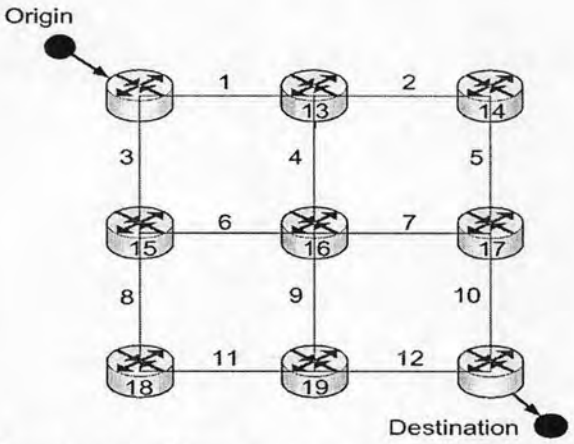
รูปที่ 4.20 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายแกน APAN

จากผลการทดสอบจะพบว่าข่ายเชื่อมโยงที่มีความสำคัญต่อระบบโครงข่าย จะได้แก่ข่ายเชื่อมโยงที่ 4, 6, 10, 11, 25, 26 และ 27 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าข่ายเชื่อมโยงที่สำคัญเหล่านี้ไม่สามารถที่จะวิเคราะห์โดยการใช้ทฤษฎีการไหลสูงสุด ได้ จากรูปที่ 4.20 เราจะสามารถที่จะบอกได้ว่า ถ้าหากเราต้องทำการปรับปรุงค่าขนาดความจุของข่ายเชื่อมโยงในชั้นของการเกิดความเสียหายที่แตกต่างกันแล้ว ข่ายเชื่อมโยงที่สำคัญที่เราต้องทำการปรับปรุงก่อน จะหาได้

จากสมการ (4.4)

4.8 การวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากการเสียหายของโหนด

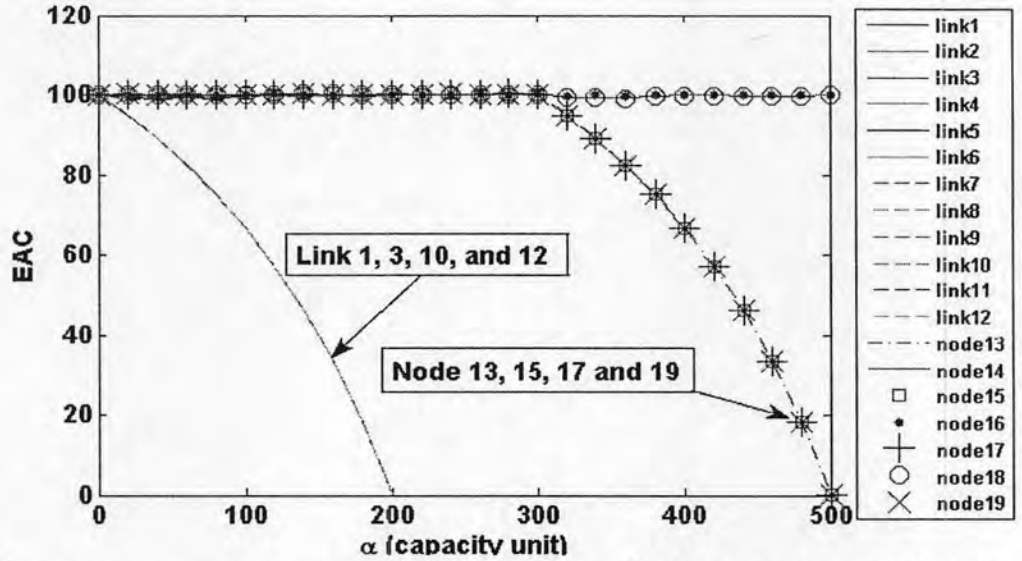
ในการวิเคราะห์ถึงความเสียหายของระบบโครงข่ายนั้น นอกจากความเสียหายจะสามารถเกิดกับข่ายเชื่อมโยงได้แล้ว ความเสียหายในทางปฏิบัติจริง อาจจะเกิดจากการที่อุปกรณ์โหนดเกิดความเสียหายหรือถูกโจมตีผ่านทางระบบโครงข่ายโดยผู้ไม่ประสงค์ดีกับระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ความสำคัญของอุปกรณ์โหนดต่อประสิทธิภาพการส่งข้อมูลโดยรวมของระบบ วิธีการที่เสนอคือ การพิจารณาว่าอุปกรณ์โหนดมีความสามารถที่จะรองรับปริมาณข้อมูลได้จำกัด และโดยทั่วไปโหนดจะมีความสามารถในการรองรับข้อมูลได้มากกว่าข่ายเชื่อมโยงเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการเปรียบเทียบความสำคัญของโหนดจึงควรที่จะนับอุปกรณ์โหนดร่วมกับข่ายเชื่อมโยงด้วย โดยการเพิ่มความจุให้กับอุปกรณ์โหนดให้มีปริมาณสูงขึ้นเป็นจำนวนมาก พร้อมทั้งนับอุปกรณ์โหนดนั้นร่วมกับเส้นทางที่ต้องผ่านในแต่ละคู่โหนดที่ต้องการส่งข้อมูล เพื่อที่จะใช้กรรมวิธีการหาโหนดที่มีความสำคัญกับระบบโครงข่ายเช่นเดียวกับที่เสนอในสมการที่ (4.4) ดังแสดงในตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 4.21 ระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด กรณีการพิจารณาผลจากความเสียหายของโหนด

พิจารณาระบบโครงข่ายอย่างง่ายที่มีคู่โหนดความต้องการข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.21 กำหนดให้ข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงมีค่าความจุเป็น 200 หน่วย และกำหนดให้โหนดทุกโหนดทุกจุดมีค่าความจุเป็น 500 หน่วย โดยเส้นทางในการส่งข้อมูลมีทั้งหมด 6 เส้นทางดังนี้

เส้นทางที่ 1 ผ่านข่ายเชื่อมโยง/โหนด 1 → 13 → 2 → 14 → 5 → 17 → 10
เส้นทางที่ 2 ผ่านข่ายเชื่อมโยง/โหนด 1 → 13 → 4 → 16 → 7 → 17 → 10
เส้นทางที่ 3 ผ่านข่ายเชื่อมโยง/โหนด 1 → 13 → 4 → 16 → 9 → 19 → 12
เส้นทางที่ 4 ผ่านข่ายเชื่อมโยง/โหนด 3 → 15 → 6 → 16 → 7 → 17 → 10
เส้นทางที่ 5 ผ่านข่ายเชื่อมโยง/โหนด 3 → 15 → 6 → 16 → 9 → 19 → 12
เส้นทางที่ 6 ผ่านข่ายเชื่อมโยง/โหนด 3 → 15 → 8 → 18 → 11 → 19 → 12



รูปที่ 4.22 ผลกระทบของการลดลงของค่าความจุของข่ายเชื่อมโยงต่อค่า EAC สำหรับระบบโครงข่ายกริด 9 โหนด

ผลจากการทดสอบวิเคราะห์ผลของการที่โหนดเกิดความเสียหายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.22 จากรูปจะพบว่า โหนดที่มีความสำคัญต่อค่า EAC ได้แก่โหนดที่ 13, 15, 17 และ 19 ทั้งนี้เนื่องจากการที่ระบบโครงข่ายที่ไม่มีโหนดเหล่านี้จะไม่สามารถทนทานต่อความเสียหายจากการจ้องทำลายได้ ซึ่งจะให้ค่า EAC มีค่าเป็น 0 และเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงกับโหนด จะพบว่า สำหรับกรณีความเสียหายแบบเสียหายทั้งหมดของอุปกรณ์ระบบโครงข่าย จุดเชื่อมโยงที่ 13, 15, 17, 19 และข่ายเชื่อมโยงที่ 1, 3, 10, 12 จะมีความสำคัญต่อระบบโครงข่ายเท่ากัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลของความเสียหายในกรณีเสียหายเพียงบางส่วน จะพบว่าผลจากความเสียหายของข่ายเชื่อมโยง จะมีการลดลงของค่า EAC ที่เร็วกว่าการลดลงของค่า EAC จากการเสียหายของโหนด เนื่องจากการที่โหนดมีความสามารถในการส่งข้อมูลได้สูงกว่าข่ายเชื่อมโยงมาก

จะเห็นได้ว่า โดยการใช้วิธีการวิเคราะห์ที่เสนอ เราสามารถที่จะระบุถึงโหนดที่มีความสำคัญต่อระบบโครงข่าย ได้เช่นเดียวกับกรณีการวิเคราะห์ของข่ายเชื่อมโยง โดยการวิเคราะห์ในกรณีที่โหนดเกิดความเสียหาย จะทำการแทนค่าความจุที่โหนดนั้นสามารถที่จะรองรับได้ให้กับค่าความจุของโหนดนั้น แล้วทำการวิเคราะห์ตามปกติเช่นเดียวกับกรณีการวิเคราะห์หาความเชื่อถือได้ โดยพิจารณาเพียงกรณีที่ระบบมีความเสียหายจากข่ายเชื่อมโยงเพียงอย่างเดียว นอกจากนั้นเราสามารถที่จะวิเคราะห์ระบบโครงข่ายในกรณีที่โหนดแต่ละโหนดมีความสามารถในการส่งข้อมูลที่ไม่เท่ากัน โดยการใช้วิธีการวิเคราะห์หาจุดที่ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพก่อน ด้วยวิธีวิเคราะห์เช่นเดียวกับกรณีการวิเคราะห์ระบบโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยงที่มีขนาดความจุที่ไม่เท่ากัน