

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาของกระบวนการกู้กลับร่วมหลายระดับชั้น  
สำหรับกราฟฟิกแบบมัลติคาสต์

นายจุมพล สุขวัฒนานุกิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

TIME EFFICIENCY ANALYSIS OF MULTI-LAYER NETWORK RECOVERY  
MECHANISMS FOR MULTICAST TRAFFIC

Mr. Jumpon Sukwattananukit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineer Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาของกระบวนการกู้กลับร่วม  
หลายระดับชั้นสำหรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์

โดย

นายจุมพล สุขวัฒนานุกิจ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ สหายวิจิตร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ สหายวิจิตร)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขาวนดิศ อัสวกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

จุมพล สุขวัฒน์านุกิจ : การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงเวลาของกระบวนการกู้กลับร่วมหลายระดับชั้นสำหรับทราฟฟิกแบบมัลติคาสต์. (TIME EFFICIENCY ANALYSIS OF MULTI-LAYER NETWORK RECOVERY MECHANISMS FOR MULTICAST TRAFFIC) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. ชัยเชษฐ สหายวิจิตร, 81 หน้า.

การกู้กลับของทราฟฟิกเป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญที่ต้องถูกพิจารณา เมื่อมีการนำมาใช้ในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องในโครงข่ายความเร็วสูง ซึ่งสำหรับเวลาที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องเพื่อรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์นั้น ขั้นตอนวิธีดั้งเดิมอาจไม่สามารถทำให้เวลาที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องบนโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ ดังนั้น จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้ คือ นำเสนอขั้นตอนวิธีที่ช่วยให้เวลาในการกู้กลับของความขัดข้องลดลงสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (multicast traffic) ของหนึ่งเซสชัน (session) โดยมีผลกระทบของความขัดข้อง (failure) ที่เกิดจากเส้นใยนำแสง (fiber optic) อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง (Optical Cross-Connect: OXC) หรือ อุปกรณ์จัดหาเส้นทาง (router) บนโครงข่าย (network) โดยมีงานวิทยานิพนธ์นี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน นั่นคือ การเลือกเส้นทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้น และการวิเคราะห์เชิงเวลาในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้นบนโครงข่ายโดยใช้เวลาในการกู้กลับของความขัดข้อง (recovery time) เป็นค่าชี้วัดในการเปรียบเทียบ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเวลาที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องด้วยวิธีที่นำเสนอเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกู้กลับของความขัดข้องแบบวง (cycle algorithm) [6] มาดำเนินการเข้ากับวิธีการกู้กลับของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้น [17] โดยวิธีการที่นำเสนอจะมีความมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เมื่อทดสอบด้วยโครงข่ายที่มีค่าเฉลี่ยดีกรีของโหนดของ (average node degree) ในระดับชั้นออกพิตคอลลต่ำลง

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา ..... 2554 .....

##5270664821: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MULTICAST TRAFFIC/ MULTI-LAYER RECOVERY MECHANISM

JUMPON SUKWATTANANUKIT: TIME EFFICIENCY ANALYSIS OF MULTI-LAYER NETWORK RECOVERY MECHANISMS FOR MULTICAST TRAFFIC, ADVISOR: CHAIYACHET SAIVICHIT, Ph.D., 81 pp.

Traffic recovery is one of the crucial issues that need to be considered intensively when deploying the recovery mechanism in high speed networking. Regarding the recovery time, some traditional recovery schemes do still not perform efficiently. In this thesis, we investigate the recovery schemes for multi-layer network which provide efficient recovery outcomes. Then, we proposed an algorithm that adapts the concept of multi-layer cooperation approach to restore multicast traffic in order to recovery from node or link failures (e.g., optical/OXC and router) and reduce recovery time at the same time.

In the design, our algorithm will be divided into two parts, i.e. the selection process of multicast multi-layer protection and the reduction of recovery time when the network failure occurs. In the first part, three types of failures which are optical link failure, OXC failure and router failure are considered to construct the failure independent path protection. Whereas in the second part, the analysis of recovery time in the multi-layer network using the recovery time is an indicator for comparison.

Our simulation results show that the proposed algorithm can provide multicast traffic restoration which consume less time in recovering from failure compared with the cycle algorithm [6] implemented on the sequential two-layer in [17].The difference will be more significant if our algorithm is implemented in the network topology with low average node degree.

Department: ...Electrical Engineering...                      Student's Signature .....

Field of study: Electrical Engineering...                      Advisor's Signature .....

Academic Year: .....2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ เนื่องด้วยความช่วยเหลือของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ สหายวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำ ชี้คิดเห็น และ มุมมองต่างๆ รวมทั้งได้มอบหมายงานที่เป็นประโยชน์ ทำให้นิสิตมีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับ ระบบโทรคมนาคม ทั้งในด้านทฤษฎีและปฏิบัติมากยิ่งขึ้น นิสิตจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทับทิม อ่างแก้ว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาว์ดิศ อิศวกุล และ รองศาสตราจารย์ ดร. ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ กรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในสาขาไฟฟ้าสื่อสาร ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้ประสิทธิ ประสาทความรู้พื้นฐานในวิชาทางระบบสื่อสาร อันเป็นพื้นฐาน

ขอกราบขอบพระคุณมารดา พี่ชาย และ พี่สาว ที่เป็นกำลังใจ เป็นที่ปรึกษา และคอย ช่วยเหลือตลอดมา ไม่ว่าจะเป็นเรื่องเกี่ยวกับการเรียน หรือ เรื่องในชีวิตประจำวัน รวมทั้งขอกราบ ขอบพระคุณที่ให้โอกาสนิสิตได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และ รุ่นน้องในห้องปฏิบัติการวิจัยโทรคมนาคม ในภาควิชากรรม ไฟฟ้าที่ให้กำลังใจและคำปรึกษา จนนิสิตสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยโทรคมนาคม ภาควิชากรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทรัพยากรต่างๆ ในการศึกษาค้นคว้าและวิจัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมา .....	2
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	6
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	7
2.1 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (multicast routing).....	7
2.1.1 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี (IP layer multicast) .....	7
2.1.2 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ ในระดับชั้นออปติคอลล (multicast via optical layer unicast) .....	9
2.1.3 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออปติคอลล (optical layer mulicast) .....	10
2.2 การกู้กลับของความขัดข้องหลายระดับชั้น (multi-layer recovery) .....	12
2.2.1 การกู้กลับของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้น (layer recovery) .....	12
2.2.2 รูปแบบการทำงานร่วมกันของหลายระดับชั้น (inter-working between layers) .....	16

บทที่	หน้า
2.2.3 กลยุทธ์ความอยู่รอดโดยพิจารณาการกู้กลับของความขัดข้องแบบหลายระดับชั้น (multi-layer survivability strategies).....	18
3. การการวางแผนเส้นทางป้องกันและกระบวนการกู้กลับร่วมหลายระดับชั้นสำหรับกราฟฟิกแบบมัลติคาสต์.....	20
3.1 การเลือกเส้นทางป้องกันเพื่อรองรับความขัดข้องของโครงข่าย.....	20
3.1.1 การหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นออฟติคอลล.....	22
3.1.2 การหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพี.....	23
3.2 การวิเคราะห์เชิงเวลาในกระบวนการกู้กลับร่วมหลายระดับชั้นบนโครงข่าย.....	25
3.2.1 กระบวนการกู้กลับของความขัดข้องร่วมหลายระดับชั้น.....	26
3.2.2 การวิเคราะห์เชิงเวลาการกู้กลับของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้น.....	28
3.2.2.1 การวิเคราะห์เชิงเวลาการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นออฟติคอลล.....	29
3.2.2.2 การวิเคราะห์เชิงเวลาการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นไอพี.....	32
4. การทดสอบขั้นตอนวิธีในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องร่วมหลายระดับชั้นสำหรับกราฟฟิกแบบมัลติคาสต์.....	35
4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องระหว่างขั้นตอนวิธีการกู้กลับของความขัดข้องแบบวง (cycle algorithm) [6] มาดำเนินการเข้ากับขั้นตอนวิธีการกู้กลับของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้น [17].....	35
4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องด้วยวิธีที่นำเสนอสำหรับมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ชนิด.....	68
5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 บทสรุป.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก ข้อมูล SRLG ของโครงข่ายแต่ละรูปแบบ.....	77
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	81



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางนิยามพารามิเตอร์ .....	21
1 ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 .....	77
2 ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 .....	78
3 ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 .....	79
4 ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 .....	79
5 ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 .....	80
6 ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 6 .....	80

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	7
2.2	8
2.3	9
2.4	10
2.5	11
2.6	11
2.7	13
2.8	14
2.9	15
2.10	16
2.11	17
3.1	25
3.2	28
4.1	36
4.2	38
4.3	39







ภาพที่	หน้า
4.25.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความ ชัดซิ่งที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้อง ขอที่แปรผันเมื่อทดสอบบนทอพอโลยีในโครงข่ายรูปที่ 1 ถึง บนโครงข่าย รูปแบบที่ 3 .....	55
4.26 โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 4 .....	56
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความชัดซิ่งที่เกิดขึ้นใน บริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอ ต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด .....	57
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความชัดซิ่งที่เกิดขึ้นใน บริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอ ต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด .....	57
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความชัดซิ่งที่เกิดขึ้นใน บริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอ ต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด .....	58
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความชัดซิ่งที่เกิดขึ้นใน บริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอ ต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด .....	58
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความชัดซิ่งที่เกิดขึ้นใน บริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอ ต้องการโหนดปลายทาง 6 โหนด .....	59
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความชัดซิ่งที่เกิดขึ้นใน บริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอ ต้องการโหนดปลายทาง 7 โหนด .....	59
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความชัดซิ่งที่เกิดขึ้นใน บริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องบนโครงข่าย รูปแบบที่ 4 .....	60



ภาพที่	หน้า
4.41.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 .....	66
4.41.2 ความสัมพันธ์ความแตกต่างระหว่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความขัดข้องที่เกิดขึ้นทั้งในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางและใกล้เคียงกับโหนดต้นทาง กับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5.....	66
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอที่แปรผันเมื่อทดสอบบนทอพอโลยีชนิดต่างๆ .....	67
4.42.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอที่แปรผันเมื่อทดสอบบนทอพอโลยีชนิดต่างๆ .....	68
4.43 โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 6 .....	69
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความขัดข้องของมัลติคาสต์ประเภททราฟฟิกทั้ง 3 ชนิดเทียบกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอ .....	70
4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความขัดข้องของมัลติคาสต์ประเภททราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออกพัตคอลลเทียบกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอเมื่อใช้รูปแบบการทำงานการป้องกันในรูปแบบที่ใช้ในการกำหนดให้ (dedicated).....	70



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าการสื่อสารโทรคมนาคมเป็นเทคโนโลยี ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาความเจริญทั้งด้านโครงสร้างพื้นฐาน และการให้บริการของโครงข่าย รวมไปถึงยังเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์ ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี การสื่อสารนั้น ทำให้เกิดงานประยุกต์ (application) ขึ้นมาที่สามารถตอบสนองความต้องการของมนุษย์ และมีหลายรูปแบบ เช่น การประชุมผ่านระบบวิดีโอทัศน์ (video conference), การบริการโทรทัศน์ผ่านระบบไอพี (IPTV: Internet Protocol Television) ซึ่งงานประยุกต์เหล่านี้ล้วนได้นำเอาเทคนิคการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ (multicast) มาใช้เพื่อทำให้การสื่อสารนั้นสามารถครอบคลุมผู้ใช้บริการได้มากกว่าหนึ่งราย

การที่จะให้บริการงานประยุกต์ดังกล่าวข้างต้นนั้น ผู้ให้บริการโครงข่าย (provider) จำเป็นต้องเพิ่มขีดความสามารถของโครงข่ายไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารโดยใช้เส้นใยนำแสงในการเชื่อมต่อ รวมไปถึงการเพิ่มแบนด์วิดท์ของท่อส่ง นอกจากการเพิ่มขีดความสามารถของโครงข่ายแล้วนั้น ความต่อเนื่องในการส่งข้อมูลก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่จำเป็นต้องพิจารณา เมื่อความขัดข้องเกิดขึ้นในโครงข่าย ความต่อเนื่องของการส่งข้อมูลก็ต้องถูกยุติลง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผู้ใช้งาน (user) จากความขัดข้องที่เกิดขึ้นนี้ยังจะส่งผลกระทบต่อผู้ให้บริการโครงข่าย เช่น การสูญเสียความน่าเชื่อถือจากผู้ให้บริการ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อรายรับจากการให้บริการ ซึ่งความขัดข้องเหล่านี้ อาจเกิดความขัดข้องขององค์ประกอบภายในโครงข่ายเพียงแค่ 1 องค์ประกอบเท่านั้น และยิ่งถ้าความขัดข้องนั้นเกิดขึ้นภายในแกนโครงข่าย (backbone network) ผลกระทบที่ตามมานั้น อาจจะส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเพื่อลดผลกระทบจากความขัดข้องที่เกิดขึ้นในโครงข่าย ผู้ให้บริการโครงข่ายจำเป็นต้องเตรียมกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องโดยใช้เวลาน้อยที่สุด (network failure fast recovery) ไว้สำหรับคำร้องขอ (request) ของผู้ใช้บริการซึ่งวิธีการกู้กลับของความขัดข้องดังกล่าวนี้ เป็นกระบวนการที่ช่วยให้เวลาในการกู้กลับของความขัดข้องลดลง ส่งผลให้โครงข่ายมีความเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบมากขึ้น

ในปัจจุบันผู้ให้บริการโครงข่ายส่วนใหญ่ได้กำหนดหน้าที่ในการรับผิดชอบต่อการดำเนินการกู้กลับของความขัดข้องของแต่ละระดับชั้น (layer) เป็นอิสระต่อกัน นั้นหมายถึง เมื่อมีความ

ขัดข้องเกิดขึ้นในโครงข่าย ถ้าระดับชั้นใดตรวจจับความขัดข้องนั้นได้ ระดับชั้นนั้นก็จะเริ่มเข้าสู่กระบวนการกู้กลับของความขัดข้องโดยไม่คำนึงถึงระดับชั้นอื่นๆ การกระทำเช่นนี้อาจส่งผลให้เกิดความสับสนในการกู้กลับของความขัดข้องนั้นได้ในกรณีที่ความขัดข้องนั้นถูกตรวจจับได้ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน รวมไปถึงประเด็นในการกู้กลับของความขัดข้อง (recovery) โดยใช้เวลาน้อยที่สุดนั้น ยังไม่มีกระบวนการกู้กลับที่แน่ชัดสำหรับเทคนิคการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ (multicast) ซึ่งถือว่าเป็นประเด็นสำคัญที่ควรคำนึงถึงในโครงข่ายยุคปัจจุบัน

## 1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

จากงานวิจัยส่วนใหญ่ในอดีตพบว่าการกู้กลับของความขัดข้องได้ถูกออกแบบในลักษณะที่แตกต่างกันโดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในโครงข่ายเฉพาะในแต่ละระดับชั้น

งานวิจัย [1], [2], [3] และ [4] เป็นงานวิจัยที่คิดค้นรูปแบบการกู้กลับของความขัดข้องสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ ในระดับชั้นกายภาพ (physical layer) ที่ใช้เทคโนโลยี WDM (Wavelength Division Multiplexing) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สามารถส่งข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสงโดยใช้ความยาวคลื่นเป็นพาหะ โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเรียกว่าระดับชั้นออปติคอลล (optical layer)

ในงานวิจัย [1] ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการกู้กลับของความขัดข้องของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ โดยการวางเส้นทางป้องกันให้กับทุกเซกเมนต์ (segment) ของเส้นทางร้องขอ การออกแบบในลักษณะนี้จะยึดโหนดตัวแยก (splitting node) ซึ่งเป็นโหนดแบ่งเส้นทางของการร้องขอออกเป็นเซกเมนต์ ซึ่งแต่ละเซกเมนต์จำเป็นต้องได้รับการป้องกัน โดยการออกแบบนั้นสามารถคำนึงถึงการใช้ความจุสำรองร่วมกัน ระหว่างเส้นทางป้องกัน ในกรณีที่บางเซกเมนต์ไม่มีโหนดปลายทางอยู่ภายในการสำรองความจุสำหรับ เซกเมนต์เหล่านี้จะไม่มีค่าเปรียบเทียบกับการสำรองความจุสำหรับเส้นทางป้องกันระหว่างโหนดต้นทางถึงโหนดปลายทางโดยตรง

ในส่วนงานวิจัย [2] ได้เสนอขั้นตอนวิธีการกู้กลับของความขัดข้องในลักษณะของเส้นทางป้องกันแบบบางส่วน นั่นคือ พิจารณาการวางเส้นทางป้องกันเฉพาะการเชื่อมโยงที่ใช้ส่งข้อมูลสำหรับหลายโหนดปลายทางเท่านั้น สำหรับการเชื่อมโยงที่ขนส่งข้อมูลสำหรับโหนดปลายทางโหนดเดียว เมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นทำให้โหนดดังกล่าวไม่สามารถรับข้อมูลได้ โหนดนั้นจะทำการคำนวณหาเส้นทางใหม่ที่สามารถเชื่อมโยงไปยังส่วนของต้นไม้ (tree) เดิม ถึงแม้การสร้างเส้นทาง

ป้องกันในลักษณะนี้จะสามารถลดการใช้ความจุสำรองได้ในระดับหนึ่งก็ตาม การกักตัวของความขัดข้องสำหรับโหนดปลายทางยังคงต้องให้การคำนวณเพื่อหาเส้นทางเชื่อมโยงไปยังต้นไม้อิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณอาจส่งผลกระทบต่อทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่ต้องการความเชื่อถือ (reliability) ในระดับสูง

สำหรับงานวิจัย [3] และ [4] ต่างได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการป้องกันโดยให้มีการเชื่อมโยงระหว่างโหนดปลาย (leaf nodes) ซึ่งเป็นโหนดสุดท้ายที่มีดีกรี (degree) เท่ากับหนึ่งเป็นเส้นทางป้องกัน แต่คำร้องขอของงานวิจัย [3] นี้จะมีส่วนหลัก (main branch) เพียงแค่หนึ่ง นั่นหมายความว่า จะส่งผลกระทบต่อกลุ่มโหนดตัวรับเป็นจำนวนมาก ถ้าส่วนหลักเกิดความขัดข้องขึ้น ส่วนงานวิจัย [4] มีความแตกต่างออกไป จะมีการสร้างเส้นทางป้องกัน 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกจะมีการเชื่อมโยงระหว่างโหนดตัวส่ง (source node) ไปยังโหนดปลายและส่วนที่สองจะทำการเชื่อมระหว่างโหนดปลายกับโหนดปลายต่อละเซกเมนต์ (segment) เพื่อที่จะลดปัญหาของส่วนหลักลงและสามารถป้องกันความขัดข้องหลายๆการเชื่อมโยง แต่จำนวนเส้นทางป้องกัน (cost) จะเพิ่มตามจำนวนเซกเมนต์

สำหรับในส่วนงานวิจัย [5] และ [6] เป็นการนำเสนอวิธีการกักตัวของความขัดข้องสำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ในระดับชั้นไอพี (IP layer) ที่นำเอาเทคนิคการจัดเส้นทางใหม่อย่างรวดเร็ว (fast rerouting) ที่ถูกนำเสนอใน [7] มาพัฒนาให้เกิดประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ในงานวิจัย [5] มีการออกแบบขั้นตอนวิธีการวางคำร้องขอชนิดมัลติคาสต์ให้มีการใช้การเชื่อมโยงที่น้อยที่สุด จุดประสงค์ของการกระทำเช่นนี้ เพื่อนำเส้นทางดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบเส้นทางป้องกันด้วยเทคนิค การจัดเส้นทางใหม่อย่างรวดเร็วซึ่งยังคำร้องขอนั้นใช้การเชื่อมโยงน้อยเพียงใด ความจุสำรองที่ใช้ในการวางเส้นทางป้องกันด้วยเทคนิคนี้ก็จะน้อยตามลงไปด้วย อย่างไรก็ตาม การออกแบบในลักษณะนี้ยังขาดการพิจารณาในมุมมองของเวลากระบวนการกักตัวของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับ

สำหรับงานวิจัย [6] เป็นการออกแบบขั้นตอนวิธีการกักตัวของความขัดข้องโดยให้มีเส้นทางเชื่อมโยงป้องกันเป็นลักษณะแบบวง (ring topology) ด้วยวิธีการนี้เป็นการสร้างเส้นทางป้องกันให้มีเส้นทางเชื่อมโยงระหว่างโหนดปลายสุดถึงโหนดปลายสุด เส้นทางป้องกันดังกล่าวสามารถรองรับความขัดข้องที่เกิดขึ้นได้พร้อมทั้งยังสามารถหลีกเลี่ยงความสูญเสียของแพ็คเก็ต ซึ่งเป็นผลของการลดเวลาในกระบวนการกักตัวของความขัดข้องนั่นเอง อย่างไรก็ตามในลักษณะนี้ยังขาดการพิจารณาการป้องกันและกระบวนการกักตัวร่วมกันหลายระดับขึ้น

ในการดูแลโครงข่ายการดำเนินการในแต่ละระดับชั้นของโครงข่ายจะถูกดูแลแยกส่วนกัน นั้นรวมไปถึงการกักเก็บของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้นด้วย ดังนั้นความขัดข้องที่เกิดขึ้นบนโครงข่ายจะถูกกักเก็บของความขัดข้องโดยแต่ละระดับชั้นซึ่งเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งนั่นอาจส่งผลให้เกิดความซ้ำซ้อนของการกักเก็บของความขัดข้อง หรือการรบกวนกันในการกักเก็บ ดังนั้นในงานวิจัย [8], [9] และ [10] จึงได้เสนอการกักเก็บของความขัดข้องโดยการพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น ซึ่งทุกงานวิจัยที่อ้างถึงล้วนแต่นำเสนอแผนการกักเก็บของความขัดข้องแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นเพื่อรองรับกราฟฟิคนิคมัลติคาสต์เท่านั้น และในส่วนของงานวิจัย [11] ได้มีการนำเสนอขั้นตอนวิธีการวางเส้นทางป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นที่รองรับกราฟฟิคนิคมัลติคาสต์ ที่มีการมุ่งเน้นการวางเส้นทางป้องกันด้วยการจับจองความจุสำรอง (spare capacity) ต่ำที่สุดแต่ขาดการพิจารณาในด้านของเวลาในกระบวนการกักเก็บของความขัดข้อง

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้น การพิจารณาการป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นรวมไปถึงการออกแบบขั้นตอนวิธีการกักเก็บของความขัดข้องที่ใช้เวลาน้อยที่สุด เพื่อรองรับกราฟฟิคนิคมัลติคาสต์ นั้นเป็นแนวทางที่งานวิจัยข้างต้นยังไม่ได้ถูกพิจารณา ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะเสนอแผนการป้องกันและกระบวนการกักเก็บของความขัดข้อง เพื่อรองรับกราฟฟิคนิคมัลติคาสต์ ซึ่งเป็นกราฟฟิกที่ต้องการความเชื่อถือและคุณภาพในระดับสูงโดยจะพิจารณาการทำงานกลับร่วมกันหลายระดับชั้น สำหรับการออกแบบกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้นจะอ้างอิงพื้นฐานเทคนิคการกักเก็บของความขัดข้องที่มีอยู่เดิม

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ในโครงร่างวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอขั้นตอนวิธีการกักเก็บของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้นเพื่อรองรับกราฟฟิคนิคมัลติคาสต์หนึ่งเซสชันในกรณีที่โครงข่ายเกิดความขัดข้องขึ้น โดยจะสามารถรองรับความขัดข้องที่เกิดขึ้นได้ และยังใช้เวลาในการกักเก็บของความขัดข้องน้อยที่สุดได้ ทั้งนี้ความขัดข้องที่เกิดขึ้นจากเส้นใยนำแสงขาด อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงขัดข้อง หรืออุปกรณ์จัดหาเส้นทางขัดข้องอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น (single-type of failure) ณ เวลาเดียวกัน ในส่วนของ การออกแบบแผนการรองรับความขัดข้องจะพิจารณาการรองรับความขัดข้องในแต่ละระดับชั้น ที่ถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การรองรับความขัดข้องในระดับชั้นออฟติคอลล และการรองรับความขัดข้องในระดับชั้นไอพี สำหรับในส่วนของกาวิเคราะห์เวลาในกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องที่เกิดขึ้น จะพิจารณาทั้งหลักการในการออกแบบขั้นตอนวิธีและเพิ่มวิธีการ (technique)

การกู้กลับของความขัดข้องร่วมหลายระดับชั้น (multi-layer recovery) และการกู้กลับของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้น (layer recovery) ทั้งในการกู้กลับของความขัดข้องระดับชั้นออปติคัล (optical layer recovery) และการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นไอพี (IP layer recovery) เพื่อให้เวลาที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องนั้นมีประสิทธิภาพที่สุดภายใต้สภาวะรองรับงานประยุกต์ (application) ที่มีการใช้เทคนิคการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ (multicast) มาใช้ในการสื่อสาร

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

1. ศึกษารูปแบบการกู้กลับของความขัดข้องในประเภทต่างๆ ทั้งในระดับชั้นออปติคัล และระดับชั้นไอพีพร้อมทั้งศึกษารูปแบบการกู้กลับของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้น
2. กำหนดรูปแบบปัญหา รวมทั้งแบบจำลองในการแก้ปัญหา
3. เขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ทดสอบแบบจำลอง
4. วิเคราะห์ และประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบกับขั้นตอนแบบอื่น
5. รวบรวมข้อมูล และสรุปผลวิเคราะห์ รวมทั้งดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอในการสร้างเส้นทางป้องกันนั้น สามารถนำไปสร้างเส้นทางป้องกันได้ทั้ง 2 ระดับชั้นด้วยระยะทางที่สั้นที่สุด ซึ่งจะมีผลต่อการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้น และการสร้างเส้นทางป้องกันนี้ยังสามารถรองรับทราฟฟิกประเภทมัลติคาสต์ทั้ง 3 ประเภทได้อีกด้วย
2. ขั้นตอนวิธีการกู้กลับของความขัดข้องนั้น สามารถกู้กลับของความขัดข้องทั้งในระดับชั้นออปติคัล ระดับชั้นไอพีและรวมไปถึงกระบวนการพิจารณาการตรวจจับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นจริงในโครงข่าย

3. การนำขั้นตอนวิธีที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ไปใช้เพื่อแก้ปัญหาความขัดข้องที่เกิดขึ้นในโครงข่าย อีกทั้งยังสามารถลดเวลาในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นได้ ส่งผลต่อระบบโครงข่ายมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น
4. การนำขั้นตอนวิธีที่นำเสนอไปปรับปรุงและพัฒนาสามารถนำไปรองรับกับเทคโนโลยีอื่นๆในอนาคตได้

## 1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์โดยจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อหลักๆ ได้แก่ ประเภทมัลติคาสต์ทราฟฟิก โดยจะกล่าวถึงลักษณะพิเศษและความแตกต่างของมัลติคาสต์ในแต่ละประเภท และกระบวนการกู้กลับของความขัดข้อง โดยจะอธิบายประเภทของการกู้กลับของความขัดข้อง รวมไปถึงการสร้างเส้นทางการป้องกันของความขัดข้องในแต่ละประเภท

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ โดยจะเริ่มจากออกแบบขั้นตอนเส้นทางการป้องกันทั้งในระดับชั้นอพติคอลลและระดับชั้นไอพีที่สามารถรองรับความขัดข้องที่เกิดขึ้นจากเส้นใยนำแสง อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง หรืออุปกรณ์จัดหาเส้นทางได้ รวมทั้งต้องสามารถรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกได้ทุกประเภทอีกด้วย จากนั้นจะอธิบายวิธีการค้นหาความขัดข้องที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งวิเคราะห์เวลาที่ใช้เวลาน้อยที่สุดในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้น

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ โดยจะมีการเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีที่มีอยู่เดิม และรวมไปถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

## บทที่ 2

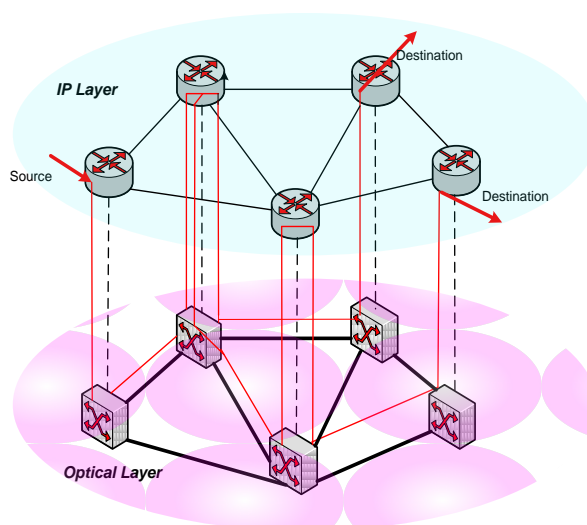
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ (multicast routing)

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงประเภทของการจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ โดยจะแบ่งออกเป็นทั้งสิ้น 3 ประเภท [11], [12] คือ การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี (IP layer multicast) การจัดเส้นทางทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ (unicast) ของระดับชั้นออปติคอลล (multicast via optical layer unicast) และการจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออปติคอลล (optical layer multicast) โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละประเภทดังต่อไปนี้

##### 2.1.1 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี (IP layer multicast)

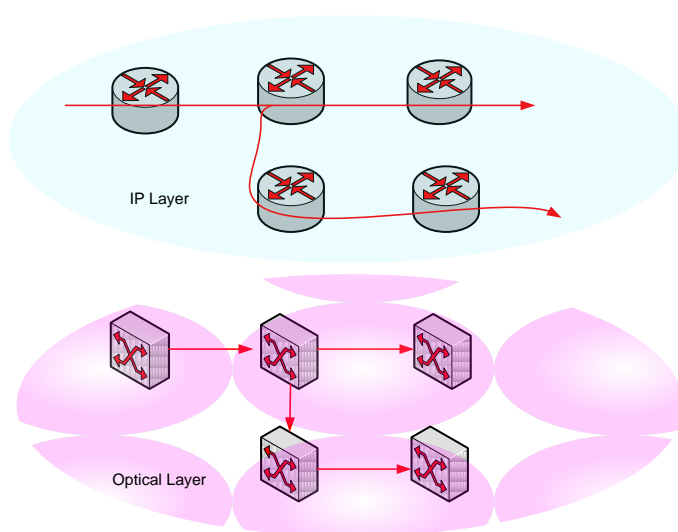
การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ประเภทนี้ จะใช้หลักการจัดเส้นทางผ่านระดับชั้นไอพี (Internet Protocol :IP) นั่นคือข้อมูลจะต้องผ่านการประมวลผลในรูปแบบสัญญาณไฟฟ้าในอุปกรณ์จัดหาเส้นทาง ดังภาพที่ 1 เมื่อมีคำร้องขอ (request) จากโหนดต้นทางไปยังกลุ่มของโหนดปลายทางจะเห็นได้ว่าการเดินทางของข้อมูลนั้น จะผ่านการเปลี่ยนรูปแบบจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า เพื่อทำการประมวลผลที่เป็นอุปกรณ์จัดหาเส้นทาง และเมื่อสิ้นสุดการประมวลผลดังกล่าวรูปแบบของข้อมูลจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณแสงอีกครั้ง เพื่อการส่งไปยังโหนดถัดไปผ่านระดับชั้นออปติคอลล



ภาพที่ 2.1: การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี

เมื่อทำการพิจารณาในแต่ละระดับชั้นพบว่า ในระดับชั้นออกพัตคอลลการเดินทางของข้อมูล จะอยู่ในรูปแบบของการเชื่อมโยงทางแสงหรือ ที่เรียกว่าทางเดินแสง (light path) โดยแต่ละทางเดินแสงจะเชื่อมระหว่างอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรมองรอบข้างเท่านั้น ในกรณีนี้ถือว่ามีทางเดินแสงทั้งหมด 7 เส้นทาง ในขณะที่เมื่อพิจารณาในระดับชั้นไอพี พบว่าการเดินทางของข้อมูลจะอยู่ในรูปแบบของการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์จัดหาเส้นทาง โดยอุปกรณ์จัดหาเส้นทางของโหนดต้นทางจะสามารถเห็นทั้งอุปกรณ์จัดหาเส้นทางระหว่างทางและอุปกรณ์จัดหาเส้นทางของโหนดปลายทางดังแสดงในภาพที่ 2.2

ข้อดีของการจัดเส้นทางในลักษณะนี้ คือ โหนดระหว่างทางจะสำเนาชุดข้อมูลที่ส่งมาจากต้นทางและเก็บไว้ในฐานข้อมูล ดังนั้น โหนดระหว่างทางเหล่านี้จะสามารถทำตัวเป็นต้นทางได้ เช่นเดียวกับโหนดต้นทางในกรณีที่มีโหนดปลายทางใหม่เพิ่มขึ้นในโครงข่าย ในทางตรงกันข้าม เนื่องจากการส่งข้อมูลในลักษณะนี้จะมีเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูลจากสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณแสง และจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า รวมไปถึงโหนดระหว่างทางจะต้องทำการประมวลผลทุกครั้ง ดังนั้น การส่งข้อมูลในลักษณะนี้จะใช้เวลามาก



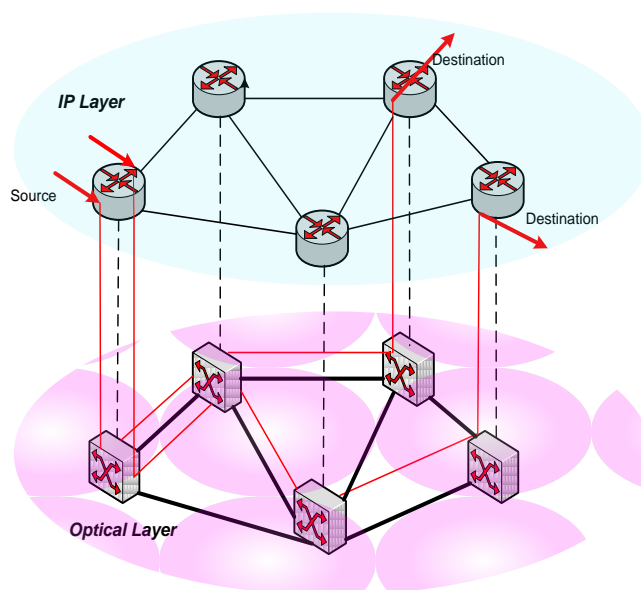
ภาพที่ 2.2: คำร้องขอในแต่ละระดับชั้นสำหรับการจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับไอพี



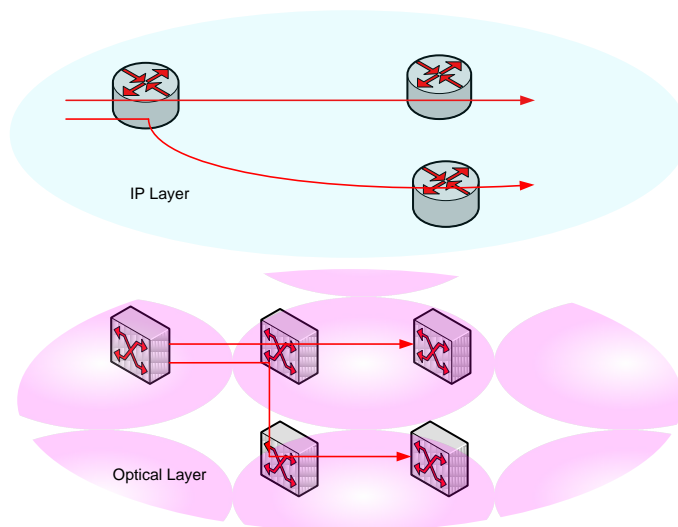
## 2.1.2 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ของระดับชั้นออฟติคอลล (multicast via optical layer unicast)

การจัดเส้นทางประเภทนี้ โหนดต้นทางจะพิจารณาการส่งข้อมูลไปยังแต่ละโหนดปลายทางในรูปแบบยูนิคาสต์ที่เป็นอิสระต่อกัน (independent) ซึ่งการส่งแบบยูนิคาสต์นี้โหนดต้นทางจะทำการส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์จัดหาเส้นทางของตนเอง จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งผ่านทางเดินแสงจากอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงต้นทางไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงปลายทางดังภาพที่ 2.3

เมื่อทำการวิเคราะห์การจัดเส้นทางประเภทนี้โดยแยกเป็นมุมมองของชั้นออฟติคอลล และชั้นไอพีพบว่าในชั้นออฟติคอลล อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงต้นทางจะเห็นการเชื่อมโยงของทางเดินแสงไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงปลายทาง โดยระหว่างทางเดินแสงดังกล่าวข้อมูลจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปแบบเป็นสัญญาณไฟฟ้านั้นหมายความว่า ข้อมูลจะเดินทางผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงของโหนดระหว่างทางเท่านั้น เมื่อพิจารณามุมมองของระดับชั้นไอพีพบว่า อุปกรณ์จัดหาเส้นทางของโหนดต้นทางจะเห็นการเชื่อมโยงจัดเส้นทางทางของโหนดปลายทางโดยตรง



ภาพที่ 2.3: การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ของระดับชั้นออฟติคอลล



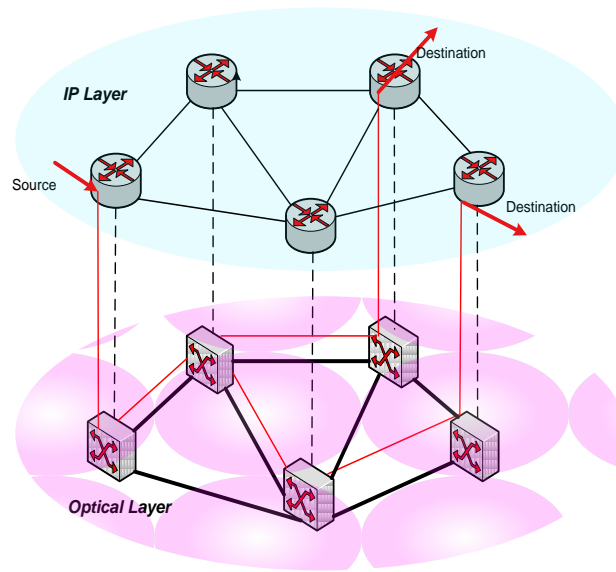
ภาพที่ 2.4: คำร้องขอในแต่ละระดับชั้นสำหรับการจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ของระดับชั้นออปติคอลล

โดยที่อุปกรณ์จัดเส้นทางของโหนดต้นทางนั้น จะไม่สามารถมองเห็นอุปกรณ์จัดเส้นทางของโหนดระหว่างทางได้ เนื่องจากการเดินทางข้อมูลจะไม่ผ่านการประมวลผลที่ระดับชั้นไอพี หรือ ที่อุปกรณ์จัดเส้นทางระหว่างทางดังแสดงในภาพที่ 2.4

การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ ของระดับชั้นออปติคอลลนั้น สามารถทำให้การควบคุมดูแลโหนดปลายทางสะดวกยิ่งขึ้น เนื่องจากแต่ละคู่โหนดต้นทางปลายทางนั้นเป็นอิสระซึ่งกันและกันในทางตรงกันข้าม สำหรับกรณีที่ทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์มีโหนดปลายทางจำนวนมาก จำนวนยูนิคาสต์ที่จำเป็นต้องใช้จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นปริมาณแบนด์วิดท์สำหรับยูนิคาสต์เหล่านี้จะสูงมาก ซึ่งถ้าแต่ละโหนดปลายทางมีความต้องการ (requirement) ที่เหมือนกันแล้วการส่งทราฟฟิกผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์นี้จะเป็นการสิ้นเปลืองแบนด์วิดท์จำนวนมาก

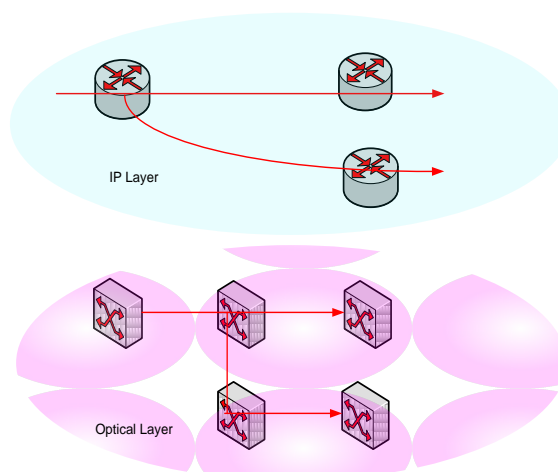
### 2.1.3 การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออปติคอลล (optical layer multicast)

สำหรับการจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ประเภทนี้ จะใช้ความสามารถในการแยกแสงของโหนดในระดับชั้นออปติคอลลเพื่อส่งข้อมูล โดยกลุ่มของข้อมูลขาออกของโหนดที่มีการแยกแสงนั้นจะมีลักษณะที่เหมือนกันดังภาพที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าการส่งข้อมูลประเภทนี้จะมีการทำมัลติคาสต์ที่ระดับชั้นออปติคอลลเท่านั้น



ภาพที่ 2.5: การจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออฟติคอลล

เมื่อทำการศึกษามุมมองของการจัดเส้นทางประเภทนี้ในแต่ละระดับชั้น พบว่าในระดับชั้นออฟติคอลลการเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์วงจรแสงของโหนดต้นทาง กับกลุ่มของอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงของโหนดปลายทางจะมีรูปแบบทางเดินแสงเป็นต้นไม้ (light tree) สำหรับในระดับชั้นไอพี พบว่าอุปกรณ์จัดหาเส้นทางของโหนดต้นทางจะเห็นการเชื่อมโยงกับอุปกรณ์จัดหาเส้นทางของโหนดปลายทางโดยตรง โดยที่จำนวนของการเชื่อมโยงระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทางจะเพิ่มขึ้นเมื่อทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์นั้นมีจำนวนโหนดปลายทางมากขึ้น ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6: คำร้องขอในแต่ละระดับชั้นสำหรับการจัดเส้นทางของทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออฟติคอลล

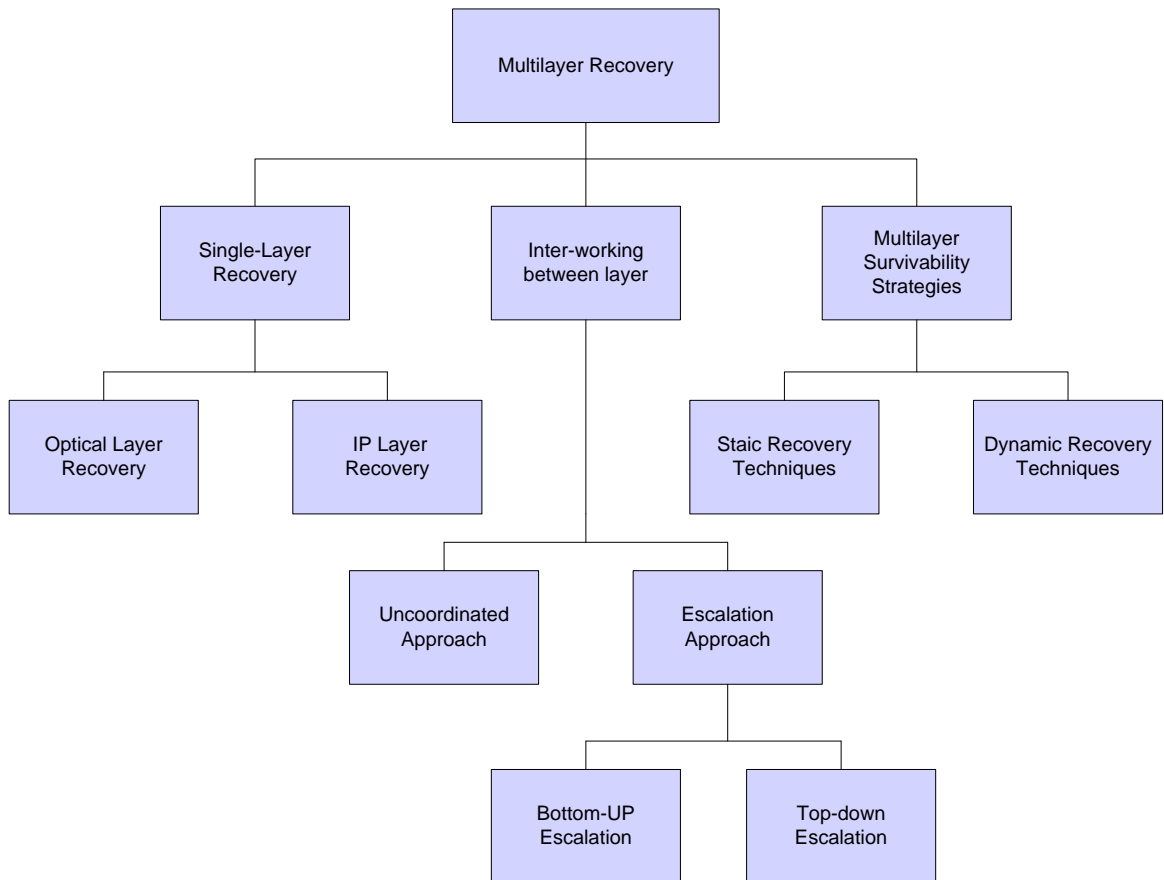
การจัดเส้นทางประเภทนี้ได้แก้ไขข้อบกพร่องของการจัดเส้นทางผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบ  
 ยูนิคาสต์ของระดับชั้นออปติคอลล ในกรณีที่กลุ่มของโหนดปลายทางมีความต้องการเหมือนกัน  
 โดยจะเห็นได้ว่าแบนด์วิดท์ที่ถูกใช้ในการส่งข้อมูลแบบต้นไม้นั้นในระดับชั้นออปติคอลลจะมีปริมาณ  
 น้อยกว่า อีกทั้งการส่งข้อมูลด้วยการจัดเส้นทางประเภทนี้จะใช้เวลาน้อยกว่าการจัดเส้นทางผ่าน  
 ระดับชั้นไอพี เนื่องจากข้อมูลจะไม่ถูกประมวลผลในอุปกรณ์จัดหาเส้นทางระหว่างทาง

## 2.2 การกู้กลับของความขัดข้องแบบหลายระดับชั้น (multi-layer recovery)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและเหตุผลที่เกี่ยวข้องในการกู้กลับของความขัดข้องที่อาจจะ  
 เกิดขึ้นได้ในโครงข่ายด้วยการพิจารณาแบบหลายระดับชั้น เพื่อให้ทราบฟิสิกส์ที่ถูกผลกระทบจาก  
 ความขัดข้องที่เกิดขึ้นสามารถส่งต่อไปยังปลายทางได้ โดยหัวข้อที่จำเป็นต้องพิจารณาในการกู้  
 กลับของความขัดข้องแบบหลายระดับชั้นนั้นแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ [9], [10] คือ หลักการกู้กลับ  
 ของความขัดข้องในระดับชั้นออปติคอลล และในระดับชั้นไอพี รูปแบบการกู้กลับของความขัดข้อง  
 ร่วมกันของหลายระดับชั้น และกลยุทธ์ของความอยู่รอดโดยพิจารณาการกู้กลับของความขัดข้อง  
 หลายระดับชั้น ดังภาพที่ 2.7

### 2.2.1 การกู้กลับของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้น (layer recovery)

การกู้กลับของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้นนั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การกู้กลับ  
 ของความขัดข้องในระดับชั้นออปติคอลล (optical layer recovery) และ การกู้กลับของความ  
 ขัดข้องในระดับไอพี (IP layer recovery) ซึ่งการกู้กลับของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้นนั้นจะ  
 ขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ในแต่ละระดับชั้น เช่น ความสามารถในการมองเห็นเส้นทาง  
 ของข้อมูล ในระดับชั้นออปติคอลลนั้นจะเห็นเส้นทางเดินแสงของข้อมูลในรูปแบบของทางเดินแสง  
 จากอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงหนึ่งไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงอีกตัวหนึ่ง ในขณะที่ระดับชั้นไอ  
 พี เส้นทางเดินของข้อมูลจะถูกมองเห็นในลักษณะของการเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์จัดหาเส้นทาง  
 ต้นทางไปยังอุปกรณ์จัดหาเส้นทางปลายทาง

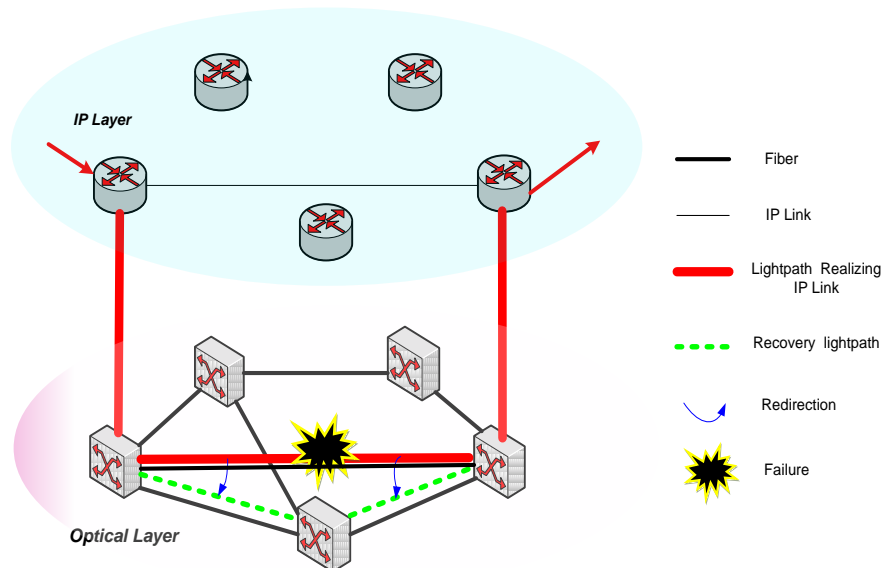


ภาพที่ 2.7: หัวข้อเกี่ยวข้องกับการกู้กลับของความขัดข้องแบบหลายระดับชั้น

### 2.2.2.1 การกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นออปติคอลล (optical layer recovery)

การกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นออปติคอลล เป็นการกู้กลับของความขัดข้องแบบง่ายที่สุด โดยจะพิจารณาเฉพาะทางเดินแสงที่เกิดความขัดข้องขึ้นเท่านั้น ซึ่งเมื่ออุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงต้นทางเดินแสงนี้ตรวจพบความขัดข้องดังกล่าว อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงต้นทางจะทำการสลับทางเดินแสงที่เกิดความขัดข้องไปยังอีกทางเดินแสงหนึ่ง ซึ่งมีอุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสงปลายทางอันเดียวกัน ดังภาพที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าทั้งการตรวจพบความขัดข้องและการกู้กลับของความขัดข้อง จะกระทำในระดับชั้นออปติคอลลทั้งสิ้น ซึ่งข้อดีของการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นออปติคอลลนี้คือ ความรวดเร็วในการกู้กลับของความขัดข้องเนื่องจากไม่ต้องผ่านการประมวลผลที่ระดับชั้นไอพี แต่ข้อเสียเปรียบของการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นออปติคอลลคือ ในกรณีที่การเชื่อมโยงต้องใช้ทางเดินแสงหลายเส้นทางร่วมกัน การเตรียมเส้นทางป้องกัน (protection path) เพื่อรับรองความขัดข้องของการเชื่อมโยงนี้จะจำเป็นต้องใช้ความจุสำรองมาก

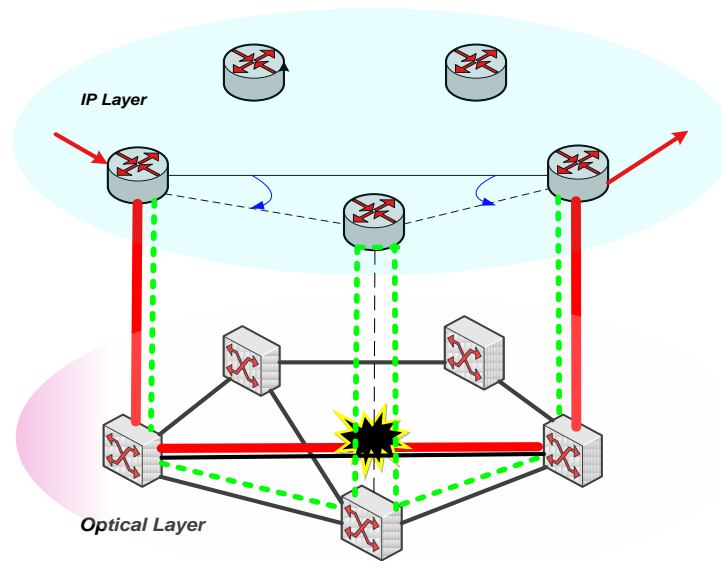
และยิ่งไปกว่านั้นการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นนี้ไม่สามารถกู้กลับของความขัดข้องได้ทุกประเภทอีกด้วย



ภาพที่ 2.8: การกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นออปติคัล

### 2.2.2.2 การกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นไอพี (IP layer recovery)

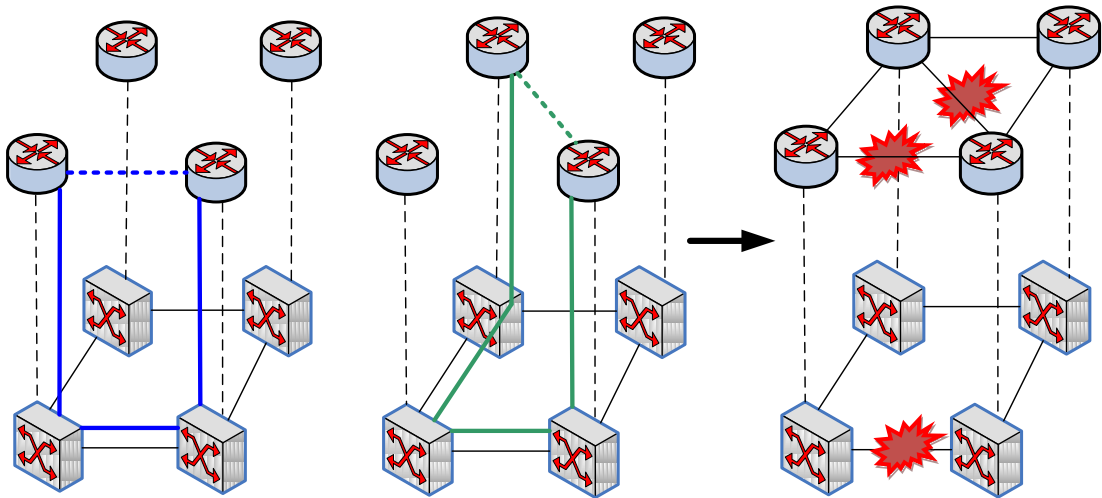
การกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นไอพีนั้น จะพิจารณาการกู้กลับของความขัดข้องจากการมุมมองของอุปกรณ์จัดหาเส้นทางต้นทางและปลายทาง โดยเมื่อเกิดความขัดข้องขึ้นที่เส้นทางหลักซึ่งส่งผลทำให้อุปกรณ์จัดหาเส้นทางต้นทางไม่สามารถส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์จัดหาเส้นทางปลายทางได้ อุปกรณ์จัดหาเส้นทางต้นทางจะทำการเปลี่ยนทางของข้อมูลจากเส้นทางเดิมไปยังเส้นทางใหม่ ซึ่งยังคงส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์จัดหาเส้นทางปลายทางได้อยู่ ดังภาพที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นนี้ จะใช้เวลาในการกู้กลับของความขัดข้องมากกว่าการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นออปติคัล เนื่องจากข้อมูลจะถูกเปลี่ยนรูปแบบจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นจึงค่อยนำไปสู่การประมวลผลที่อุปกรณ์จัดหาเส้นทางอีกที ในทางตรงกันข้ามการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นนี้จะสามารถกู้กลับของความขัดข้องได้หลายประเภทเช่น ความขัดข้องของเส้นใยแสง อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง หรืออุปกรณ์จัดหาเส้นทางระหว่างทาง



ภาพที่ 2.9: การกู่กลับของความขัดข้องในระดับชั้นไอพี

เป็นที่ทราบกันดีว่าการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีนั้นเป็นการเชื่อมโยง จากอุปกรณ์ จัดหาเส้นทางหนึ่งไปยังอีกอุปกรณ์จัดหาเส้นทางหนึ่ง นั่นคือการที่จะเกิดการเชื่อมโยงดังกล่าวได้ นั้น อุปกรณ์จัดหาเส้นทางหนึ่งจะทำการส่งข้อมูลโดยผ่านการประมวลผลในรูปแบบของสัญญาณ ไฟฟ้า จากนั้นจะเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลไปเป็นรูปแบบของสัญญาณแสงเพื่อให้สามารถส่งผ่านเส้น ใยนำแสงได้ เมื่อข้อมูลถูกส่งไปยังโหนดที่ต้องการแล้วข้อมูลจะถูกเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นสัญญาณ ไฟฟ้าอีกครั้ง เพื่อทำการประมวลผลที่อุปกรณ์จัดหาเส้นทางซึ่งนี่ถือเป็นเส้นทางเดินของข้อมูลที่ อุปกรณ์จัดหาเส้นทางทั้ง 2 เห็นว่าสามารถเชื่อมโยงกันได้ การเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีนั้นอาจ ประกอบด้วย การเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคัล และ อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง มากกว่า 1 องค์ประกอบขึ้นไป ดังภาพที่ 2.10 จะเห็นได้ว่า เมื่อเกิดความขัดข้องในระดับชั้นล่างเพียง 1 องค์ประกอบอาจส่งผลให้องค์ประกอบโครงข่ายในระดับชั้นบนขัดข้องมากกว่า 1 องค์ประกอบได้ ดังนั้น SRLG หรือ Shared Risk Link Group [13] จึงได้ถูกนำเสนอให้พิจารณาในการออกแบบ เส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพี

SRLG ของการเชื่อมโยงหนึ่งในระดับชั้นไอพีนั้น บ่งบอกถึงกลุ่มของการเชื่อมโยงในระดับ ออฟติคัลที่ประกอบให้เกิดการเชื่อมโยงในระดับไอพี 1 การเชื่อมโยง ดังนั้นการออกแบบเส้นทาง ป้องกันอาจนำเอา SRLG ของทุกการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพี มาเป็นข้อกำหนดในการหาเส้นทาง ป้องกันของคาร์บอนขอได้



ภาพที่ 2.10: รูปแบบของปัญหาที่เกิดจากการวางโครงข่ายในทั้ง 2 ระดับชั้น

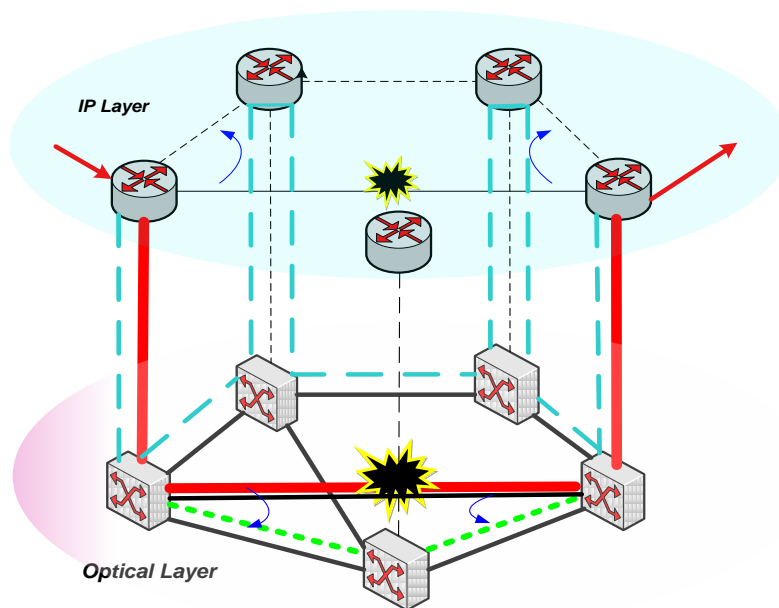
## 2.2.2 รูปแบบการทำงานร่วมกันของหลายระดับชั้น (inter-working between layers)

จากที่ได้กล่าวถึง การกู่กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในโครงข่ายของแต่ละระดับชั้นในหัวข้อที่แล้วในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทำงานร่วมกันในการกู่กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นของแต่ละระดับชั้น ซึ่งจากภาพที่ 2.7 จะเห็นว่า รูปแบบการทำงานร่วมกันของหลายระดับชั้นนั้นแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การทำงานแบบไม่ประสานกัน (Uncoordinated Approach) และ การทำงานแบบเป็นลำดับ (Escalation Approach) จะกล่าวรายละเอียดต่อไป

### 2.2.2.1 รูปแบบการทำงานแบบไม่ประสานกัน (Uncoordinated Approach)

การกู่กลับของความขัดข้องในลักษณะนี้ จะไม่มีข้อกำหนดใดที่จะดูแลกระบวนการกู่กลับของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้นนั่นคือ ระดับชั้นใดที่ตรวจจับความขัดข้องที่เกิดขึ้นในโครงข่ายได้ก่อน จะเป็นระดับชั้นที่เริ่มทำการกู่กลับของความขัดข้องก่อน การวางรูปแบบในลักษณะนี้มีข้อดีคือ ช่วยลดภาระในการดูแลและควบคุมการกู่กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในโครงข่าย ในทางตรงกันข้ามข้อเสียของรูปแบบนี้คือ อาจเกิดการรบกวนกันระหว่างกระบวนการกู่กลับของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้น รวมไปถึง การใช้ความจุสำรองเป็นจำนวนมากเนื่องจากแต่ละระดับชั้นเริ่มทำการกู่กลับของความขัดข้องในเวลาใกล้เคียงกัน ในกรณีที่แต่ละระดับชั้นสามารถตรวจจับความขัดข้องได้ในเวลาใกล้เคียงกันดังภาพที่ 2.11





ภาพที่ 2.11: รูปแบบการทำงานแบบที่ไม่ประสานกัน

### 2.2.2.2 รูปแบบการทำงานแบบเป็นลำดับ (Escalation Approach)

รูปแบบการทำงานแบบเป็นลำดับ คือ การกำหนดลำดับของแต่ละระดับชั้น ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้น ซึ่งการแบ่งลำดับให้ชัดเจนในลักษณะนี้ ช่วยให้การกู้กลับของความขัดข้องมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถลดการใช้ความจุสำรองของโครงข่ายได้มาก เมื่อเทียบกับรูปแบบการทำงานแบบไม่ประสานกันการจะกำหนดให้แต่ละระดับชั้นทำหน้าที่กู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นได้นั้นจำเป็นต้องมีค่าซีวัดเวลา (hold-off timer) ค่าหนึ่งเพื่อบอกถึงระยะเวลามากที่สุดที่ระดับชั้นหนึ่งๆ จะสามารถทำการกู้กลับของความขัดข้องได้ ถ้าระดับชั้นใดไม่สามารถกู้กลับของความขัดข้องได้ตามระยะเวลาที่กำหนด ระดับชั้นที่มีหน้าที่ในการกู้กลับของความขัดข้องถัดไปจะเริ่มทำการกู้กลับของความขัดข้องทันที โดยระดับชั้นที่ทำการกู้กลับของความขัดข้องเดิมต้องยุติกระบวนการ รูปแบบการทำงานแบบเป็นลำดับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ รูปแบบการทำงานจากระดับชั้นล่างขึ้นบน (bottom-up escalation) และรูปแบบการทำงานจากระดับชั้นบนลงล่าง (top-down escalation)

➤ รูปแบบการทำงานจากระดับชั้นล่างขึ้นบน (bottom-up escalation)

รูปแบบการทำงานจากระดับชั้นล่างขึ้นบนนี้เป็นการกำหนดให้กระบวนการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นออฟติคอลล ำรับหน้าที่ในการแก้ไขความขัดข้องที่เกิดขึ้นก่อน เมื่อระดับชั้นนี้ไม่สามารถแก้ไขความขัดข้องที่เกิดขึ้นได้ หรือกระบวนการแก้ไขใช้เวลามากกว่าค่าขีดเวลาที่กำหนด ระดับชั้นไอพีจะรับหน้าที่ในการกู้กลับของความขัดข้องถัดไป ข้อดีของรูปแบบนี้คือถ้าความขัดข้องที่เกิดขึ้นสามารถแก้ไขได้ในระดับชั้นออฟติคอลล เวลาที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องจะไม่มากนัก เมื่อเทียบกับการกู้กลับของความเสียหายดังกล่าวในระดับชั้นไอพี

➤ รูปแบบการทำงานจากระดับชั้นบนลงล่าง (top-down escalation)

รูปแบบการทำงานจากระดับชั้นบนลงล่างนี้เป็นการกำหนดให้ระดับชั้นไอพีรับหน้าที่ในกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นก่อน จากนั้นจึงเป็นระดับชั้นออฟติคอลลที่จะทำหน้าที่กู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นถัดไป การกำหนดให้ระดับชั้นไอพีทำการกู้กลับของความขัดข้องก่อนนั้น เนื่องจากในระดับชั้นไอพี อุปกรณ์จัดหาเส้นทางบนโครงข่ายจะทราบถึงข้อมูลของโครงข่าย ณ ขณะนั้น รวมไปถึงประเภทของทราฟฟิกซึ่งสามารถจัดลำดับความสำคัญ (priority) ในการกู้กลับของความขัดข้องได้ก่อน

## 2.2.3 กลยุทธ์ของความอยู่รอดโดยพิจารณาการกู้กลับของความขัดข้องแบบหลายระดับชั้น (multi-layer survivability strategies)

กลยุทธ์ของความอยู่รอดของโครงข่ายโดยพิจารณาการกู้กลับของความขัดข้องแบบหลายระดับชั้น แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ วิธีการกู้กลับของความขัดข้องแบบสถิต (static recovery technique) และวิธีการกู้กลับของความขัดข้องแบบพลวัต (dynamic recovery technique)

### 2.2.3.1 วิธีการกู้กลับของความขัดข้องแบบสถิต (static recovery technique)

การกู้กลับของความขัดข้องแบบสถิต เป็นรูปแบบการกู้กลับของความขัดข้อง ที่สามารถเตรียมการได้ (preplanned configuration) นั่นคือรูปแบบการกู้กลับของความขัดข้องจะถูกเตรียมไว้ก่อนการให้บริการรูปแบบการเตรียมการกู้กลับของความขัดข้องแบบสถิต หรือที่เรียกว่า การป้องกัน (protection) นั่นจะถูกเตรียมไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ความขัดข้องที่เกิดขึ้น ส่งผลต่อทราฟฟิก หลังจากการเปิดให้บริการ ดังนั้นการป้องกันความขัดข้องดังกล่าวจะไม่ทำให้ทอพอโลยีของโครงข่ายเปลี่ยนแปลงไปจากทอพอโลยีขณะก่อนเริ่มให้บริการ

### 2.2.3.2 วิธีการกู้กลับของความขัดข้องแบบพลวัต (dynamic recovery technique)

การกู้กลับของความขัดข้องในลักษณะนี้จะเป็นการกู้กลับของความขัดข้อง เมื่อมีความขัดข้องเกิดขึ้นในโครงข่ายภายหลังการเปิดให้บริการ ดังนั้นการจัดการความขัดข้องดังกล่าวจำเป็นต้องใช้หลักการจัดสรรโครงข่ายแบบที่ใช้ช่วงเวลาสั้นมากที่เกิดขึ้น ขณะระบบกำลังรับและจัดการข้อมูล (real-time configuration) ในการจัดสรรโครงข่ายแบบนี้ จะมีหน้าที่ดูแลการจ้องและการยกเลิกการจ้องความจุสำรอง ในกรณีที่โครงข่ายเกิดความขัดข้องขึ้น รวมไปถึงการดูแลทอพอโลยีที่เปลี่ยนไปในระหว่างดำเนินการกู้กลับของความขัดข้อง การกู้กลับของความขัดข้องในลักษณะนี้จำเป็นต้องใช้เทคนิคหรือกระบวนการที่มีความรวดเร็วในการคำนวณสูง เพื่อลดผลกระทบที่อาจส่งผลกระทบต่อกราฟฟิก

### บทที่ 3

## การวางแผนทางป้องกันและกระบวนการกู้กลับร่วมหลายระดับชั้น สำหรับกราฟฟิกแบบมัลติคาสต์

บทนี้จะเป็นการกล่าวถึงขั้นตอนวิธีการวางแผนทางป้องกัน และกระบวนการกู้กลับร่วมหลายระดับชั้นสำหรับกราฟฟิกแบบมัลติคาสต์โดยเลือกนำวิธีการป้องกัน“Dual-Tree Approach” [3] นั้นมาประยุกต์ใช้ในการสร้างขั้นตอนวิธีที่สามารถรองรับความขัดข้องที่เกิดจากเส้นใยนำแสง อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง หรืออุปกรณ์จัดหาเส้นทางได้ นอกจากนี้แนวทางการออกแบบจำเป็นต้องสามารถรองรับมัลติคาสต์กราฟฟิกได้ทั้ง 3 ประเภทอีกด้วย และเนื่องด้วยทางผู้วิจัยมุ่งเน้นกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องกราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ ซึ่งเป็นกราฟฟิกที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูง ดังนั้นแนวทางจะมุ่งเน้นในเรื่องการวิเคราะห์เชิงเวลาในกระบวนการกู้กลับ

หลักการออกแบบการวางแผนทางป้องกันและกระบวนการกู้กลับนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักด้วยกัน นั่นคือ การเลือกเส้นทางป้องกันเพื่อรองรับความขัดข้องของโครงข่าย และการวิเคราะห์เชิงเวลาในกระบวนการกู้กลับร่วมหลายระดับชั้นบนโครงข่ายโดยจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อจากนี้

### 3.1 การเลือกเส้นทางป้องกันเพื่อรองรับความขัดข้องของโครงข่าย

ในการเลือกเส้นทางในการป้องกันและกระบวนการกู้กลับนั้นสิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึง คือ ข้อมูลที่ต้องป้อนเข้า(input) ในขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ ซึ่งข้อมูลเหล่านั้นมีดังนี้

- ทอพอโลยีในระดับชั้นออปติคัล(optical) และไอพี (IP)  
สำหรับงานวิจัยนี้จะแทนด้วยเมตริกซ์ที่มีขนาดเท่ากับจำนวนโหนดของระดับชั้นออปติคัล โดยที่ค่าในแต่ละตำแหน่งของเมตริกซ์จะมีค่าเป็น 1 เมื่อคูโหนดในระดับชั้นนั้นๆ มีการเชื่อมโยงถึงกันโดยตรง และในทางตรงกันข้าม เมื่อไม่มีการเชื่อมโยงระหว่างคูโหนดนั้น จะมีค่าเป็น 0
- ข้อมูล SRLG  
ข้อมูลนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญเมื่อต้องพิจารณาโครงข่ายที่มีระดับชั้นมากกว่า 1 ระดับชั้น ข้อมูลนี้จะอยู่ในรูปแบบเซตของการเชื่อมโยงของระดับชั้นไอพี นั่นคือ SRLG ของการ

เชื่อมโยงในระดับชั้นไอพี จะประกอบด้วยกลุ่มของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีที่ใช้การเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลละเอียดกับการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีนั้น

➤ คำร้องขอ

คำร้องขอในที่นี้ คือ เส้นทางของการเชื่อมจากโหนดต้นทางไปยังกลุ่มโหนดปลายทาง ทั้งในระดับชั้นไอพี และระดับชั้นออฟติคอลละเอียดโดยเส้นทางของคำร้องขอนี้ต้องได้รับการป้องกันเพื่อความต่อเนื่องในการส่งข้อมูลในกรณีที่เกิดความขัดข้องขึ้นในโครงข่าย

เพื่อสะดวกในการอ้างอิงถึงข้อมูลต่างๆ ผู้วิจัยจึงให้นิยามพารามิเตอร์ขึ้นมาดังแสดงในตารางที่ 3.1 เพื่อใช้ในการเรียกถึงต่อไป

ตารางที่ 3.1 ตารางนิยามพารามิเตอร์

---



---

$t_{OP}$ :	เวลาการตรวจจับของระดับชั้นออฟติคอลละเอียด (fault detection time of optical layer); ( $t_{OP} = 10ms$ )
$t_{IP}$ :	เวลาการตรวจจับของระดับชั้นไอพี (fault detection time of IP layer); ( $t_{IP} = 30ms$ )
$t_{HIP}$ :	ค่าซีวัดเวลา (hold-off timer) ในระดับชั้นไอพี ; ( $t_{HIP} = 50ms$ )
$t_{FN}$ :	เวลาที่แจ้งหรือประกาศไปยังโหนดที่จะเริ่มมีการกู้ความขัดข้อง (failure notification time)
$t_{RO}$ :	เวลาที่ดำเนินการกู้กลับของความขัดข้อง (recovery operation time)
$t_{TR}$ :	เวลาที่กู้กลับของความขัดข้องเสร็จสิ้น (traffic redirect time)
$t_{MP_p}$ :	เวลาของกระบวนการ (message processing time) เริ่มต้นที่เกิเกิดขึ้นในระดับชั้นไอพี; ( $t_{MP_p} = 10\mu s$ )
$t_{MP_{op}}$ :	เวลาของกระบวนการ (message processing time) ที่เกิดขึ้นในโหนด OXC รวมไปถึงในการรอคิวต่างๆในระดับชั้นออฟติคอลละเอียด ; ( $t_{MP_{op}} = 100\mu s$ )
$t_{MP_{io}}$ :	เวลาที่ใช้ในกระบวนการ (message processing time) ที่เกิดขึ้นในระดับชั้นไอพี ซึ่งช่วงเวลานี้เป็นตัวกำหนดให้มีการกระตุ้น (trigger) ระหว่างระดับชั้น เพื่อที่จะให้มีการเชื่อมต่อภายใน (cross-connection) ที่ใช้สำหรับการสลับ (switch) ของโหนด OXC ในระดับชั้นออฟติคอลละเอียด ; ( $t_{MP_{io}} = 10ms$ )
$t_{PD}$ :	เวลาประเวียงการแพร่กระจาย (propagation delay) ของแต่ละความยาวเส้นใยนำแสง; ( $t_{PD} = 5\mu s / km$ )

- $t_c$ : เวลาในการปรับเปลี่ยนโครงแบบ (configuration) ของโหนด OXC ใหม่; ( $t_c = 10ms$ )
- $R$ : จำนวนฮอปจากโหนดปลายทางที่ไม่ได้รับผลกระทบไปยังโหนดปลายทางที่ได้รับผลกระทบ หลังจากมีการกระตุ้นเส้นทางป้องกันในการกักเก็บของความขัดข้อง (recovery path)
- $M$ : จำนวนโหนดจากโหนดปลายทางที่ได้รับผลกระทบแล้วได้รับการกักเก็บของความขัดข้อง เสรีจลน์ไปยังโหนดสุดท้ายของโหนดตัวรับของการเชื่อมโยงนั้นๆ
- $H$ : จำนวนฮอป (hop) จากโหนดที่ตรวจจับความขัดข้องได้ไปยังโหนดปลายทางที่ไม่ได้รับผลกระทบเพื่อที่จะเริ่มกระบวนการกักเก็บของความขัดข้อง
- $L$ : ความยาวของการเชื่อมโยงหรือระยะเส้นใยนำแสง
- $f$ : จำนวนการเชื่อมโยงที่ได้รับผลกระทบต่อการเกิดความขัดข้องที่แสดงผลกระทบในระดับชั้นไอพี

### 3.1.1 การหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นออปติคัล

หลังจากรับข้อมูลทั้ง 3 ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เข้ามาในขั้นตอนวิธีการวางแผนเส้นทางป้องกันแล้วโดยเฉพาะเมื่อโหนดต้นทางได้ส่งคำร้องขอจากกลุ่มโหนดปลายทาง ที่เป็นการส่งแบบมัลติคาสต์ จากการสังเกตได้พบว่ามัลติคาสต์ทราฟฟิกที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 นั้น มีความหลากหลายและแตกต่างกันออกไปไม่ว่าจะเป็นทราฟฟิกประเภทมัลติคาสต์ในระดับชั้นไอพี ทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ของระดับชั้นออปติคัล หรือทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ในระดับชั้นออปติคัล ล้วนพบว่าทางเดินแสงของทราฟฟิกประเภทต่าง ๆ นั้นมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูปแบบเป็นทางเดินแสงแบบต้นไม้ ดังนั้นการที่จะออกแบบเพื่อรองรับมัลติคาสต์ทราฟฟิกในระดับชั้นออปติคัลได้นั้น จึงจำเป็นต้องออกแบบให้อยู่ในทอพอโลยีลักษณะแบบวง (ring topology) เพื่อให้ขั้นตอนวิธีที่นำเสนอสามารถครอบคลุมคุณลักษณะของมัลติคาสต์ทั้ง 3 ชนิดได้

ในการสร้างเส้นทางป้องกันสำหรับคำร้องขอในระดับชั้นออปติคัลนั้น ได้แนวคิดจาก “Dual-Tree Approach” [3] โดยแนวคิดนี้ได้พิจารณาตามเงื่อนไขบังคับ (constraint) คือ เส้นทางที่ป้องกันที่หาได้นั้นต้องไม่มีโหนด ที่เป็นส่วนประกอบของคำร้องขอที่พิจารณา (node-disjoint) โดยให้มีการเชื่อมโยงระหว่างโหนดที่เป็นโหนดปลายสุด (leaf nodes) ซึ่งเป็นโหนดสุดท้ายที่มีดีกรี (degree) เท่ากับหนึ่ง หรือเป็นโหนดปลายทาง (destination nodes) การเชื่อมโยงดังกล่าวจะมีลักษณะแบบวง และเป็นไปตามลักษณะเงื่อนไขบังคับ “node-disjoint” ซึ่งจะเป็นวิธีที่มีความน่าจะเป็นในการกักเก็บของความขัดข้องได้มากที่สุด

### 3.1.2 การหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพี

การหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพีนั้นไม่จำเป็นต้องกระทำหลังจากการหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นออฟติคอลล เนื่องจากการหาเส้นทางป้องกันในทั้ง 2 ระดับชั้นไม่จำเป็นต้องแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกัน การหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพีนี้ จะอ้างอิงจากข้อมูลที่ได้รับเข้ามาตั้งแต่แรก นั่นก็คือ ข้อมูลทอพอโลยีในระดับชั้นไอพี ข้อมูลคำร้องขอ และข้อมูล SRLG ส่วนสำหรับรูปแบบมัลติคาสต์ทราฟฟิกทั้ง 3 ประเภทในระดับชั้นไอพีนั้น ลักษณะโครงสร้างยังเป็นรูปแบบเป็นทางเดินแสงแบบต้นไม้ เช่นเดียวกับในระดับชั้นออฟติคอลล ทำให้สามารถนำหลักการการสร้างเส้นทางป้องกันเช่นเดียวกับที่กระทำในระดับชั้นออฟติคอลลมาใช้ได้

หลักการออกแบบนั้นจะมีความคล้ายคลึงกับขั้นตอนการหาเส้นทางป้องกันในระดับชั้นออฟติคอลล ซึ่งจำเป็นต้องใช้หลักการตามลักษณะเงื่อนไขบังคับ “node-disjoint” ที่สามารถกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดจากเส้นใยนำแสง อุปกรณ์เชื่อมต่อวงจรแสง หรืออุปกรณ์จัดเส้นทางได้ทุกกรณี ดังนั้นผู้วิจัยจะเลือกการวางเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพีด้วยเงื่อนไขบังคับ “node-disjoint”

การหาเส้นทางป้องกันที่เป็นไปได้ตามเงื่อนไขบังคับ “node-disjoint” สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันกับระดับชั้นออฟติคอลล นั่นคือ การลบโหนดที่เป็นโหนดระหว่างทางที่เชื่อมระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางที่จะทำการวางเส้นทางป้องกัน นอกจากนี้การวางเส้นทางป้องกันสำหรับระดับชั้นไอพียังจำเป็นต้องคำนึงถึงประเด็นของ SRLG ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการดูแลโครงข่ายตั้งแต่ 1 ระดับชั้นขึ้นไป โดยข้อมูล SRLG ที่รับมาตั้งแต่ต้นจะอยู่ในรูปของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพี และเซตของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีที่มีการใช้การเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลเดียวกับการเชื่อมโยงนั้น โดยการสร้างเส้นทางป้องกันนั้นต้องใช้เงื่อนไขบังคับ “SRLG-disjoint” นี้เพื่อความสมบูรณ์ในหลักการ “Dual-Tree Approach” กระทำได้โดยการลบการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีที่อยู่ในเซต SRLG เดียวกับการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทางออก

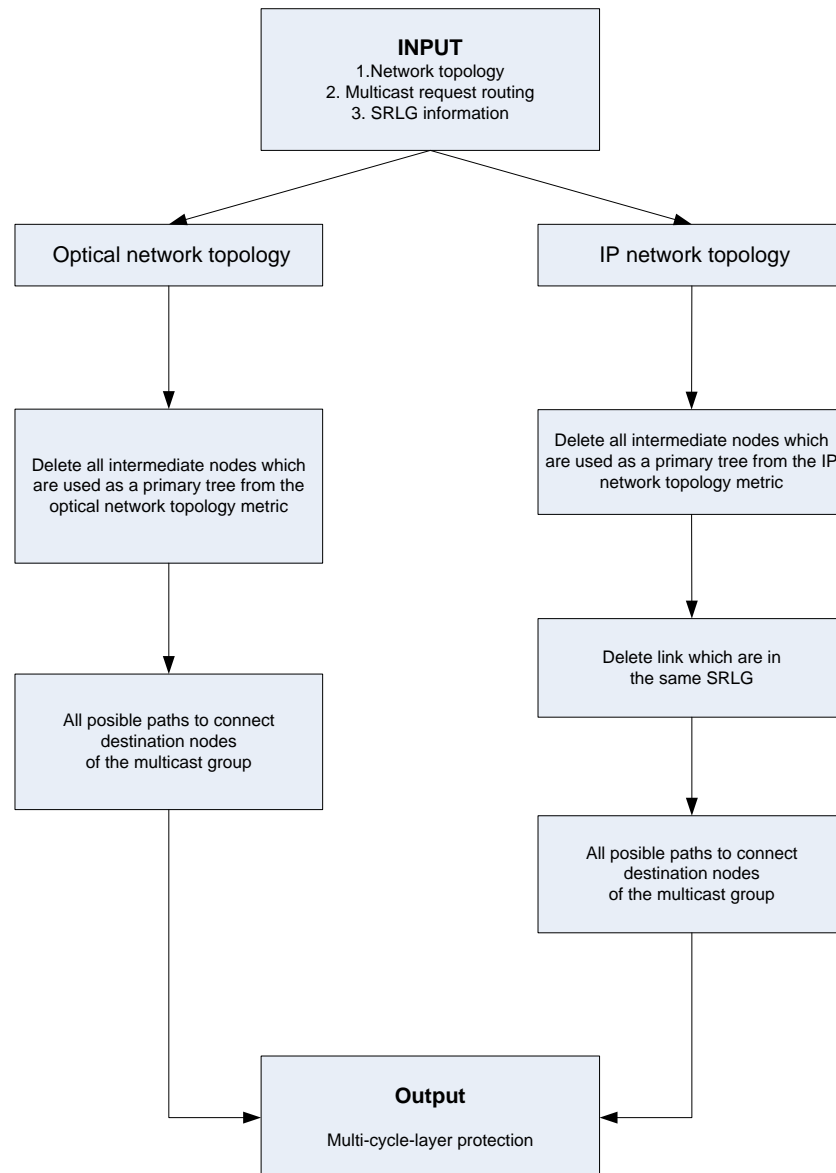
ในการสร้างเส้นทางป้องกันให้กับคำร้องขอในระดับชั้นไอพี ผลที่ได้จากการดำเนินหลักการเงื่อนไขบังคับทั้ง Node-disjoint และ SRLG-disjoint จะได้เส้นทางป้องกันที่ไปเป็นตามลักษณะแบบวง จากการที่กล่าวมาทั้งหมด มีประเด็นสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาเกี่ยวข้องกับการ

สร้างเส้นทางป้องกันของระดับนี้ด้วย นั่นคือในขณะที่มีการสร้างเส้นทางป้องกันนั้น หลักการจัดเส้นทางของ “PIM” หรือ Protocol Independent Multicast [14] ต้องเข้าร่วม (“join”) ขณะที่เริ่มมีกระบวนการสร้างเส้นทางป้องกัน เพื่อที่จะตอบสนองต่อการจัดการทราฟฟิกที่เป็นประเภทแบบมัลติคาสต์ พร้อมด้วยวิธีการจัดเส้นทางใหม่อย่างรวดเร็ว (fast rerouting)

ส่วนที่สำคัญที่สุดในหลักการสร้างเส้นทางป้องกันที่ต้องกล่าวถึง นั่นคือ ระยะเวลาป้องกันถัดไป (next hop protection) หรือเรียกว่า เส้นทางป้องกันนั่นเอง จะถูกบรรจุพร้อมๆ ใน “PIM join” ที่มีการร้องขอของกลุ่มมัลติคาสต์ เมื่อมีการร้องขอของ “PIM join” เข้ามา จะทำให้ทราฟฟิกของอุปกรณ์จัดหาเส้นทางปลายทางสุด (leaf routers) ที่จะต้องถูกเพิ่มเส้นทางป้องกัน (next hop protection) เข้าไปซึ่งเป็นเส้นทางหรือระยะเวลาเชื่อมโยงกับอุปกรณ์จัดหาเส้นทางปลายทางสุดบริเวณใกล้เคียง (neighbor routers) เข้าไปในแต่ละอุปกรณ์จัดหาเส้นทาง ซึ่งเส้นทางป้องกันเหล่านี้ได้ถูกเรียกว่า “non-RPF” หรือ non-Reverse Path Forwarding โดยที่แต่ละอุปกรณ์จัดหาเส้นทางจะต้องถูกปรับเปลี่ยนโครงแบบ (configuration) ด้วยวิธีการ “Loop Free Alternate” (LFA) [15] เพื่อเป็นการส่งข้อความในการเข้าร่วม “join” สำหรับที่เป็นเส้นทางสำรอง (alternate route) ไปยังกลุ่มอุปกรณ์จัดหาเส้นทางที่มีการเชื่อมโยงด้วยเส้นทางป้องกันที่ถูกสร้างขึ้น

จากขั้นตอนวิธีที่กล่าวมาทั้งหมดนั้น ในแต่ละอุปกรณ์จัดหาเส้นทางจะมีการเก็บทั้งเส้นทางหลักและเส้นทางสำรองไว้ในตาราง ดังนั้นเมื่อเส้นทางหลักไม่สามารถใช้งานได้ อุปกรณ์จัดหาเส้นทางสามารถใช้เส้นทางสำรองได้ทันที ด้วยกลไกนี้เองทำให้ช่วงระยะเวลา convergence จะสั้นมากซึ่งส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องลดลงตามลำดับ





ภาพที่ 3.1: ผังงานการวางแผนเส้นทางป้องกันทางเดินแสงของคำร้องขอในหลายระดับชั้นที่ใช้สำหรับแสดงค่าของเวลาหลังจากการกักตัวของความขัดข้องที่เกิดขึ้น

### 3.2 การวิเคราะห์เชิงเวลาในกระบวนการกักตัวร่วมหลายระดับชั้นบนโครงข่าย

เวลาที่ถูกใช้ในกระบวนการกักตัวของความขัดข้องนั้น จะส่งผลกระทบต่อทั้งในด้านของข้อมูลและรายได้ที่จะสูญเสียการลดเวลา หรือการใช้เวลาในกระบวนการกักตัวความขัดข้องน้อยลงเป็นประเด็นหลักสำคัญที่ต้องได้รับการพิจารณาสำหรับงานประยุกต์ ที่เป็นประเภทใช้ช่วงเวลานั้นมากที่เกิดขึ้นขณะระบบกำลังรับและจัดการข้อมูล ( real time application) ซึ่งงานประยุกต์

เหล่านี้ล้วนได้นำเอาเทคนิคการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ (multicast) มาใช้ในการสื่อสาร โดยปกติกราฟฟิกแบบลักษณะนี้เป็นกราฟฟิกที่ต้องการความเชื่อถือได้ (reliability) ในระดับสูง

การวิเคราะห์เชิงเวลาในกระบวนการกู้กลับร่วมหลายระดับชั้นบนโครงข่าย หรือการออกแบบขั้นตอนวิธีเพื่อลดเวลาในกระบวนการกู้กลับนั้น เป็นอีกจุดประสงค์หลักที่ต้องพิจารณา การที่จะทำให้เวลาในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องลดลงให้น้อยที่สุดได้นั้น เราจำเป็นต้องตรวจจับความขัดข้องให้เร็วที่สุด นั่นคือ การพิจารณาการใช้งานร่วมกันของการตรวจจับความขัดข้องหรือการหาที่ตั้งของความขัดข้อง จากที่ได้กล่าวถึงทฤษฎีของการกู้กลับของความขัดข้องแบบพิจารณาการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้น พบว่าการกำหนดการทำงานแบบลำดับนั้นต้องให้ระดับชั้นใดระดับชั้นหนึ่งเริ่มกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องไปก่อน จนกระทั่งไม่สามารถกู้กลับของความขัดข้องได้นั้น เนื่องจากมีสาเหตุต่างๆ เช่น เกิดความขัดข้องในระดับชั้นที่ไม่ได้เป็นระดับชั้นที่กู้กลับของความขัดข้องก่อนเป็นต้น หรือใช้เวลามากกว่าค่าชิวัดเวลา (hold-off timer) เป็นต้น จากนั้นกระบวนการในระดับชั้นดังกล่าวจะต้องถูกยุติลง และปล่อยให้ระดับชั้นต่อไปเริ่มกระบวนการกู้กลับของความขัดข้อง

### 3.2.1 กระบวนการกู้กลับของความขัดข้องร่วมหลายระดับชั้น (multi-layer recovery)

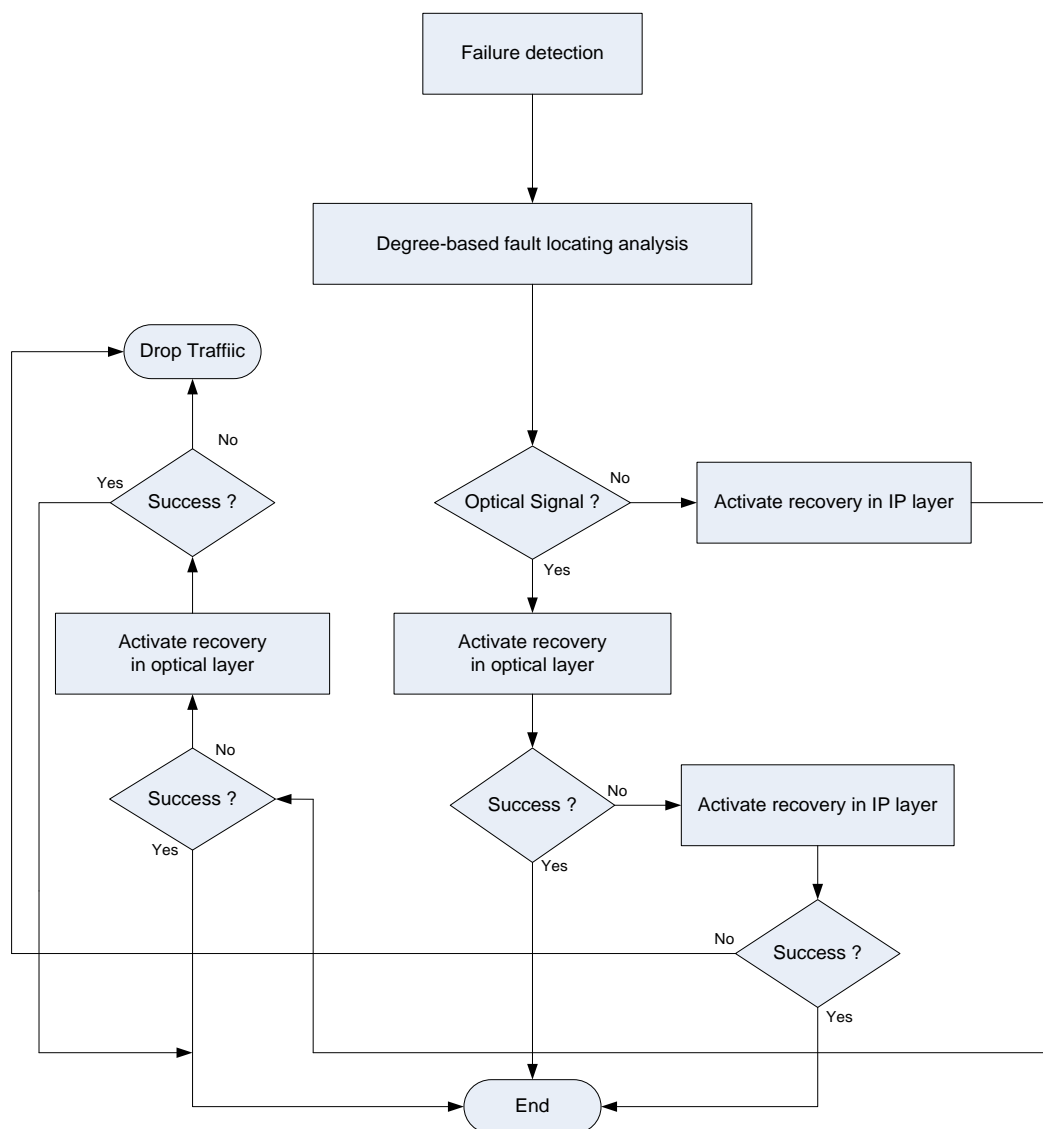
จากการกล่าวมาข้างต้นการทำงานกู้กลับของความขัดข้องแบบลำดับนั้น ส่วนที่สำคัญนั้นคือ ค่าชิวัดเวลา (hold-off timer) ซึ่งเป็นตัวกำหนดเวลาในการทำงานแต่ละระดับชั้น นั่นจึงเป็นสาเหตุในการปรับ เปลี่ยนแนวทางการทำงานของค่าชิวัดเวลา เพื่อแก้ปัญหาในกรณีที่ค่าชิวัดเวลาไม่เหมาะสม เช่น ถ้ากำหนดค่าชิวัดเวลาน้อยเกินไป กระบวนการป้องกันของระดับชั้นไอพีก็จะเริ่มกระบวนการกู้กลับขึ้นทันที ก่อนที่ระดับชั้นออฟติคอลลจะทำการกู้กลับของความขัดข้องเสร็จ แต่ถ้ากำหนดค่าชิวัดเวลามีค่ามากเกินไป แล้วถ้ากระบวนการกู้กลับของความขัดข้องระดับชั้นออฟติคอลลไม่สามารถกู้กลับของความขัดข้อง(failure) นั้นได้หรือความขัดข้องนั้นไม่ได้เกิดขึ้นในระดับชั้นออฟติคอลล จะส่งผลทำให้ระดับชั้นไอพีต้องรอเวลาของค่าชิวัดเวลานั้นไปจนกว่าค่าชิวัดเวลานั้นหมด

อย่างไรก็ตาม ถ้าความขัดข้องที่เกิดขึ้นในระดับชั้นออฟติคอลล กระบวนการกู้กลับของความขัดข้องนั้นก็จะดำเนินการไปตามแบบแผน แต่ประสิทธิภาพการกู้กลับของความขัดข้องจะลดลงอย่างมาก ถ้าความขัดข้องเกิดขึ้นที่ระดับชั้นไอพี ในกรณีข้างต้นนี้อาจอิงรูปแบบการทำงานจากระดับชั้นล่างขึ้นบน (bottom-up escalation) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอกระบวนการแก้ปัญหาข้างต้น โดยนำเสนอขั้นตอนวิธีในการตรวจสอบความขัดข้องที่เกิดขึ้นและ นำเอากระบวนการ

การกู่กลับของความขัดข้องแบบเป็นลำดับชนิดรูปแบบการทำงานจากระดับชั้นล่างขึ้นบนมาเป็น กระบวนการหลัก (bottom-up escalation) มาผสมผสานขั้นตอนวิธีการตรวจสอบโดยทำการ ตรวจสอบจำนวนดีกรีของต้นไม้เพื่อเป็นการวิเคราะห์ความขัดข้องที่เกิดขึ้น (Degree-based fault locating algorithm) โดยแนวทางกระบวนการทำงานมีเงื่อนไขว่าค่าชี้วัดของการตรวจสอบจำนวน ดีกรีของต้นไม้และค่าชี้วัดเวลาได้ถูกกำหนดให้มีสถานะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน หลังมีการตรวจจับ ความขัดข้องเกิดขึ้น ผลของการวิเคราะห์จากวิธีการตรวจสอบจำนวนดีกรีของต้นไม้ จะเป็นการ วิเคราะห์ความขัดข้องที่เกิดขึ้นมานั้น ว่าอยู่ในระดับชั้นออฟติคอลลหรือระดับชั้นไอพี โดยมีหลักการ ทำงานวิเคราะห์ดังนี้ ในกรณีที่มีทราฟฟิกวิ่งบน OXC แล้ว ถ้าจำนวนข้อความ (message) ของ โหนดตรงกลาง (ที่ไม่ใช่โหนดต้นทางและกลุ่มโหนดปลายทาง) ประกาศข้อความไปยังโหนดเพื่อน บ้านของโหนด OXC ในระดับชั้นออฟติคอลล และได้รับข้อความจากการตอบกลับของโหนดเพื่อน บ้านมีค่าเท่ากับผลบวกจำนวนดีกรี (degree) ของโหนด “ผลบวกของ indegree และ outdegree ของโหนด จะเท่ากับ จำนวนการเชื่อมต่อของโหนดนั้นๆ” นั้นแสดงว่า ความขัดข้องไม่ได้เกิดขึ้นใน ระดับชั้นออฟติคอลล ดังนั้นระดับชั้นไอพีจะเริ่มกระบวนการกู่กลับของความขัดข้องทันที โดยที่ไม่ ต้องรอค่าชี้วัดเวลาให้หมดเวลา

ในทางตรงกันข้ามถ้าจำนวนข้อความของโหนด OXC (ในกรณีที่มีทราฟฟิกวิ่งบน OXC นั้นๆ) ที่ได้รับข้อความจากการตอบกลับของโหนดเพื่อนบ้าน มีค่าไม่เท่ากับผลบวกจำนวนดีกรี (degree) ของโหนดนั้นๆ นั้นแสดงว่าความขัดข้องที่เกิดขึ้นนั้น เกิดขึ้นภายในระดับชั้นออฟติคอลล ดังนั้นกระบวนการกู่กลับจะเริ่มที่ระดับชั้นออฟติคอลล พร้อมด้วยเงื่อนไขของค่าชี้วัดเวลาของระดับ ชั้นไอพี นั่นคือ ในระดับชั้นไอพีจะเริ่มกระบวนการกู่กลับได้นั้น ต้องรอให้ค่าชี้วัดเวลานั้นหมดเวลา ลงไปก่อน ดังแสดงในภาพที่ 3.2

แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ากลุ่มโหนดปลายทางเริ่มมากขึ้น ทำให้กลุ่มโหนดปลายทางบางโหนด ต้องมาเป็นโหนดที่เป็นปล่อยทราฟฟิก หลักการตรวจสอบดีกรีของต้นไม้ ก็ยังคงเป็นเช่นเดิมตามที่ เคยกล่าวมาข้างต้นนั้น ดังนั้นข้อสรุปในการตรวจสอบความขัดข้องที่เกิดขึ้น “ทำการตรวจสอบทุก โหนด ยกเว้นโหนดที่มีดีกรีหนึ่ง (degree-1 node) ที่ไม่ต้องมีการตรวจสอบ”



ภาพที่ 3.2: ผังงานการกู้กลับของความขัดข้องแบบการทำงานจากระดับชั้นล่างขึ้นบน (bottom-up escalation)

### 3.2.2 การวิเคราะห์เชิงเวลาการกู้กลับของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้น

รูปแบบกระบวนการวิเคราะห์เชิงเวลาในการกู้กลับของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้นนั้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เวลาของการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นออปติคอลล (optical layer recovery time) และเวลาของการกู้กลับของความขัดข้องในระดับไอพี (IP layer recovery time)

### 3.2.2.1 การวิเคราะห์เชิงเวลาการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นออฟติคอลล

การวิเคราะห์เชิงเวลาการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นออฟติคอลลนั้น ได้ทำการเพิ่มวิธีการเข้าไปยังในส่วนของการแจ้งข้อความหรือประกาศความขัดข้อง (failure notification message) รวมไปถึงการกระบวนการตัดสินใจของการเริ่มกระบวนการ (activate) เส้นทางป้องกันขึ้นให้มีความกระชับชัดเจนมากขึ้น การเพิ่มวิธีการนี้ยังไม่ได้ถูกกล่าวถึงในมุมมองการกระจายของภาวะแวดล้อม (distributed environment) ซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการกู้กลับของความขัดข้อง [3] โดยขั้นตอนการกู้กลับของความขัดข้องทั้งหมดจะกล่าวต่อจากนี้

ขั้นตอนที่ 1: เมื่อความขัดข้องเกิดขึ้นจะให้โหนดตัวรับที่ติดกับความขัดข้อง (downstream nodes) เป็นโหนดตรวจจับความขัดข้อง

ขั้นตอนที่ 2: เมื่อโหนดที่ติดกับความขัดข้องนั้นตรวจจับได้ก็จะทำการประกาศข้อความความขัดข้องไปยังกลุ่มโหนดตัวปลายทางหรือเรียกว่าโหนดปลายสุด (leaf nodes) ซึ่งเป็นโหนดสุดท้ายที่มีดีกรี (degree) เท่ากับหนึ่ง จากการประกาศข้อความของโหนดตัวรับ (downstream nodes) นั้น สถานะกลุ่มของโหนดปลายสุดจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกจะเป็นกลุ่มโหนดปลายสุดที่ได้รับผลกระทบจากการเกิดความขัดข้อง (affected group) และกลุ่มที่สองเป็นกลุ่มโหนดปลายสุดที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเกิดความขัดข้อง (unaffected group) โดยลักษณะการการเกิดกลุ่มโหนดปลายสุดที่มีผลกระทบนั้น จะถูกบ่งชี้จากการประกาศข้อความของโหนดตรวจจับ

ขั้นตอนที่ 3: เมื่อมีการระบุเป็นกลุ่มโหนดที่ได้รับผลกระทบ โดยที่แต่ละโหนดของกลุ่มที่ได้รับผลกระทบจะทำการประกาศข้อความความขัดข้อง ไปยังแต่ละโหนดของกลุ่มโหนดที่ไม่ได้รับผลกระทบ ตามเส้นทางป้องกัน (protection path) ที่มีการสร้างเชื่อมโยงกับกลุ่มโหนดที่ไม่ได้รับผลกระทบ เพื่อที่จะทำการเริ่มกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องในเส้นทางป้องกัน ซึ่งเส้นทางป้องกันที่ถูกสร้างขึ้นนั้นจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขระยะฮอปสั้นที่สุด (shortest hop) ด้วยหลักการวิเคราะห์ค่าจำนวนฮอปของการประกาศความขัดข้อง นั่นคือ เมื่อมีการประกาศข้อความความขัดข้องจากโหนดปลายสุดที่ได้รับผลกระทบ ไปยังกลุ่มโหนดปลายสุดที่ไม่ได้รับผลกระทบเพื่อที่จะเริ่มเข้าสู่กระบวนการกู้กลับนั้น ก็ต่อเมื่อได้รับข้อความการประกาศความขัดข้องของโหนดปลายสุดที่ได้รับผลกระทบ ด้วยจำนวนฮอป

ของข้อความที่น้อยที่สุด เช่นกรณีนี้ หลังจากโหนดปลายสุดที่ไม่ได้รับผลกระทบ ได้รับการประกาศข้อความความขัดข้อง โหนดปลายสุดที่ไม่ได้รับผลกระทบนี้ จะทำการบอกข้อความที่ได้รับไปยังโหนดปลายสุดบริเวณใกล้เคียง (neighbors) เกี่ยวกับค่าของจำนวนฮอป ทำให้สามารถแสดงถึงระยะฮอปที่ใกล้ที่สุดกับโหนดปลายสุดที่ได้รับผลกระทบ ส่งผลให้เส้นทางป้องกันมีระยะฮอปสั้นที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าโหนดปลายสุดที่ได้รับผลกระทบอยู่ใกล้กับโหนดปลายสุดที่ไม่ได้รับผลกระทบมีจำนวนมากกว่า 1 โหนด นั้นหมายความว่า จะมีระยะฮอปที่สั้นที่สุดมีหลายการเชื่อมโยงที่จะเริ่มกระบวนการเส้นทางป้องกัน ในกรณีนี้ได้เพิ่มวิธีการโดยการเพิ่มการระบุตัวตน (ID) ของโหนดปลายสุดที่ได้รับผลกระทบ เข้าไปในส่วนของข้อความที่ประกาศความขัดข้องนั้นๆ จากตัวอย่างที่กล่าวมานั้น เมื่อโหนดที่ไม่ได้รับผลกระทบได้รับการประกาศข้อความความขัดข้องจากโหนดปลายสุดที่ได้รับผลกระทบโหนดปลายสุดที่ไม่ได้รับผลกระทบนี้ จะทำการบอกข้อความที่ได้รับไปยังโหนดปลายสุดบริเวณใกล้เคียง เกี่ยวกับค่าของจำนวนฮอป ปรากฏว่ามีระยะฮอปสั้นที่สุดและเท่ากันมีอยู่ 2 ฮอป การระบุตัวตน (ID) ที่อยู่ในข้อความจะถูกนำมาพิจารณาแทน โดยที่เลข ID ใดมีค่าน้อยที่สุดจะถูกพิจารณาในการเลือกเป็นอันดับแรกก่อน

ขั้นตอนที่ 4: เมื่อโหนดปลายสุดที่ไม่ได้รับผลกระทบเริ่มกระบวนการเกิดขึ้น ทราฟฟิกจะมีการปรับเปลี่ยนการไหลของทราฟฟิก (reconfiguration message) ขึ้นมาใหม่ เนื่องจากทิศทางการไหลของทราฟฟิกใหม่จะถูกอ้างอิงมาจากโหนดปลายสุดที่ไม่ได้รับผลกระทบที่มีเส้นทางป้องกันที่เชื่อมโยง กับโหนดปลายสุดที่มีผลกระทบ เมื่อโหนดปลายสุดที่ได้รับผลกระทบได้รับการกู้กลับของความขัดข้อง (ทราฟฟิกจะวิ่งบนเส้นทางป้องกัน)เมื่อมีการกู้กลับของความขัดข้องแล้วนั้น นอกเหนือจากทราฟฟิกที่วิ่งบนเส้นทางป้องกัน ในส่วนทิศทางการไหลของทราฟฟิกของกลุ่มโหนดปลายสุดที่ได้รับผลกระทบจะถูกบังคับให้วิ่งตามในส่วนของต้นไม้ (tree) เดิมก่อน เนื่องจากเส้นทางป้องกัน นั้นอาจมีความยาวมากกว่าต้นไม้เดิมทำให้ราคา (cost) ทั้งหมดของต้นไม้มีค่าสูงกว่าต้นไม้เดิมหลังจากการกู้กลับของความขัดข้อง ซึ่งจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้อง

จากขั้นตอนวิธีที่กล่าวไว้ข้างต้น สามารถสรุปสมการของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการกักเก็บของความขัดข้องในระดับชั้นออฟติคอลล ( $t_{TOP}$ ) ดังต่อไปนี้

$$t_{TOP} = t_{OP} + t_{FN} + t_{RO} + t_{TR} \quad (3.1)$$

ในกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องที่นำเสนอนี้ จะมุ่งเน้นในการกักเก็บของความขัดข้องแบบลักษณะที่เรียกว่าเฉพาะส่วน (local) ซึ่งเป็นกระบวนการกักเก็บที่เริ่มกระบวนการ (activate) ด้วยเส้นทางป้องกันจากโหนดที่ติดกับความขัดข้องนั้นเลย ซึ่งจะแตกต่างกันออกไปกับกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องแบบที่เรียกว่าครอบคลุม (global) ที่เป็นกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องที่เริ่มกระบวนการด้วยเส้นทางป้องกันจากโหนดต้นทางเสมอ นั้นความหมายว่า ทั้ง 2 กระบวนการวิธีนี้มีความแตกต่างในเรื่องของ “เวลา” ที่เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องเป็นอย่างมาก

จากการกักเก็บของความขัดข้องแบบเฉพาะส่วน ตามนิยามทั่วไปนั้น ( $t_{FN} = 0$ ) พบได้ว่า จะไม่สูญเสียเวลาในการแจ้งประกาศ (notification time) ไปยังโหนดที่ใช้ในการกักเก็บของความขัดข้อง แต่ในการงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเวลาในส่วนนี้ด้วย จึงไม่เป็นไปตามนิยามที่กล่าวไว้ข้างต้น แล้วนั้น เวลาในการแจ้งประกาศ ( $t_{FN}$ ) จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เนื่องจากต้องมีค่าของเวลาในการแจ้งประกาศไปยังกลุ่มโหนดปลายทางที่ไม่ได้รับผลกระทบเพื่อที่จะให้มีการตอบสนองเริ่มกระบวนการเส้นทางป้องกันขึ้น ดังนั้น

$$t_{FN} = (H \cdot t_{PD} \cdot L) + (H + 1)t_{MP_{op}} \quad (3.2)$$

เมื่อโหนดที่ไม่ได้รับผลกระทบได้รับข้อความของการประกาศ ( $t_{FN}$ ) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (signal) เพื่อที่จะให้ทรัพยากรที่ถูกจองไว้สำหรับการป้องกันนั้น เริ่มกระบวนการกักเก็บทันทีโดยที่สัญญาณนี้จะส่งไปถึงตัวควบคุม (controller) เมื่อตัวควบคุมได้รับสัญญาณมานั้น จะทำการสั่งให้มีการบวนการปรับเปลี่ยนโครงสร้างการเชื่อมต่อภายใน (cross-connection) ขึ้นมาใหม่ ก่อนที่การเชื่อมต่อภายในจะเสร็จสิ้น ก็ต่อเมื่อโหนดที่ไม่ได้รับผลกระทบได้ส่งสัญญาณออกไปยังโหนดแรกของกลุ่มโหนดที่ได้รับผลกระทบของการเชื่อมต่อกับเส้นทางป้องกัน (merge node)

$$t_{RO} = (R \cdot t_{PD} \cdot L) + (R + 1)t_C + (R + 1)t_{MP_{op}} \quad (3.3)$$

สุดท้ายนี้ทราฟฟิกของการทำงานที่เกิดขัดข้องนั้นจะถูกกู้กลับมาได้นั้น ต้องหลังจากเวลาของ ( $t_{RO}$ ) ประวิงเวลาในการแพร่กระจาย (propagation time) จากโหนดสาขา (branch node) หรือโหนดที่มีการเริ่มกระบวนการกู้กลับไปยังโหนดสุดท้ายของโหนดตัวรับของการเชื่อมโยง

$$t_{TR} = (R \cdot t_{PD} \cdot L) + (M \cdot t_{PD} \cdot L) + (M \cdot t_{MP_{op}}) \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.2), (3.3) และ (3.4) นำไปแทนลงในสมการที่ (3.1) จะได้สมการเวลา (3.5) ซึ่งเป็นสมการรวมที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นออปติคัล ( $t_{TOP}$ ) มีดังนี้

$$t_{TOP} = t_{OP} + \left[ \sum_{i=1}^{2R+M+H} L_i t_{PD} \right] + (H + R + 2)t_{MP_{op}} + (R + 1)t_c \quad (3.5)$$

### 3.2.2.2 การวิเคราะห์เชิงเวลาการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นไอพี

เมื่อมีการสร้างเส้นทางจากคำร้องขอ (multicast request routing) เสร็จสิ้น อุปกรณ์จัดหาเส้นทางแต่ละตัวจะมี MFIB (Multicast Forwarding Information Base) ในการส่งผ่านของทราฟฟิกในแต่ละพอร์ต (port) [14] และเส้นทางป้องกัน (next hop protection) ที่ถูกปรับเปลี่ยนโครงแบบ (configuration) ด้วย “LFA” ที่ไว้สำหรับใช้เป็นเส้นทางสำรอง (backup path) ในการกู้กลับของความขัดข้อง การออกแบบวิธีการแบบแผนนี้เพื่อที่จะให้มีความสอดคล้องกับการกู้กลับแบบการจัดเส้นทางใหม่อย่างรวดเร็ว (fast rerouting) ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นไอพี

จากที่มีการตรวจจับความขัดข้องโดยอุปกรณ์จัดหาเส้นทางด้านตัวรับ (downstream router) ที่ติดกับความขัดข้อง และตรวจจับที่ตั้งของความขัดข้องด้วยโดยใช้หลักการวิเคราะห์ของระยะฮอป ดังที่เคยกล่าวมาในหัวข้อการกู้กลับของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้น หลังจากตรวจจับความขัดข้องได้นั้น อุปกรณ์จัดหาเส้นทางที่ตรวจจับจะประกาศข้อความความขัดข้อง (failure notification message) ไปยังอุปกรณ์จัดหาเส้นทางปลายสุด (leaf router) นั้นแสดงว่ากลุ่มอุปกรณ์จัดหาเส้นทางปลายสุดนี้ได้รับผลกระทบจากความขัดข้อง และยังคงต้องได้รับการยืนยันจากหลักเส้นทางยูนิคาสต์ (unicast routing protocol)

เมื่ออุปกรณ์จัดหาเส้นทางปลายสุด (leaf router) ที่ไม่ได้รับผลกระทบได้รับข้อความจากการประกาศของความขัดข้องจากอุปกรณ์จัดหาเส้นทางปลายสุดที่ได้รับผลกระทบ อุปกรณ์จัดหาเส้นทางปลายสุด (leaf router) ที่ไม่ได้รับผลกระทบจะทำการเปลี่ยนเส้นทางตามที่มีการปรับ



เปลี่ยนโครงแบบไว้ก่อนหน้านี้ ที่เรียกว่า “non-RPF” ที่ถูกจัดขึ้นโดย “LFA” ดังนั้นเส้นทางสำรองจะถูกเปลี่ยนจาก non-RPF ไปเป็นเส้นทางหลักใหม่ (RPF path) ทันทีและสามารถกู้ภาพฟิสิกที่ เกิดจากความขัดข้องได้

จากการกู้กลับด้วยกระบวนการดังที่กล่าวมานั้น เป็นกระบวนการที่ปราศจากการคำนวณเวลาในการปรับตารางเส้นทางให้เป็นปัจจุบัน (update routing table) ทำให้เวลากระบวนการของการกู้กลับของความขัดข้องแบบแผนนี้สามารถลดลงไปจากแบบแผนเดิมได้

จากการกล่าวขั้นตอนวิธีไว้ข้างต้น สามารถสรุปสมการของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องในระดับชั้นไอพี ( $t_{TIP}$ ) ดังต่อไปนี้

$$t_{TIP} = t_{IP} + t_{HIP} + t_{FN} + t_{RO} + t_{TR} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.6) จะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน นั่นคือ ( $t_{HIP}$ ) เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการกู้กลับของความขัดข้องแบบเป็นลำดับรูปแบบการทำงานเริ่มจากระดับชั้นล่างขึ้นระดับชั้นบน จากรูปแบบการทำงานดังกล่าวในระดับชั้นไอพีต้องรอกระบวนการหรือรอช่วงเวลาของค่าซีวัดเวลา (hold-off timer) ในการกู้กลับจากระดับชั้นออฟติคอลลก่อน

ในส่วนของการทำงานของเวลาต่างๆที่เหลือนั้น จะคล้ายคลึงกับการทำงานในระดับชั้นออฟติคอลล เพียงแต่ต้องมีการเปลี่ยนโดเมน หมายถึง การเปลี่ยนส่ง (mapping) จากเส้นทางในระดับชั้นไอพีไปเป็น โดเมนในระดับชั้นออฟติคอลล เหตุผลของกระทำเช่นนี้ เพื่อให้เส้นทางเดินแสงเป็นรูปธรรม เนื่องจากเส้นทางเดินแสงที่จะเป็นจริงในการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลเท่านั้น

เมื่ออุปกรณ์จัดหาเส้นทางปลายทางสุดท้ายได้รับการประกาศข้อความความขัดข้อง ( $t_{FN}$ ) สมการเวลาที่ได้นั้นจะคล้ายคลึงกับสมการที่ (3.2) เพียงแต่มีสัญญาณในการแสดงหรือประกาศความขัดข้องถูกส่งไปยังโหนดเพื่อนบ้านของระดับชั้นไอพีเพิ่มเติม

$$t_{FN} = (H \cdot t_{PD} \cdot L) + (H + 1)t_{MP_p} + f \cdot t_{MP_p} \quad (3.7)$$

ในส่วนเวลา ( $t_{RO}$ ) ที่เวลาในการเริ่มกระบวนการกู้กลับนั้นจะมีความแตกต่างกันตรงที่ ต้องมีการกระตุ้น (trigger) การเชื่อมต่อภายใน (cross-connection) ใหม่ เนื่องจากเส้นทางป้องกันหรือเส้นทางสำรองของระดับชั้นไอพี ต้องมีการเปลี่ยนพลังงานระหว่างระดับชั้นที่ได้เคยกล่าวไว้บทที่ 2 ดังนั้น

$$t_{RO} = (R_i + 1)t_{MP_o} + (R + 1)t_{MP_{op}} + (R \cdot t_{PD} \cdot L) + (R + 1)t_C \quad (3.8)$$

ส่วนของ  $(t_{TR})$  มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับการทำงานของเวลาในระดับชั้นออฟติคัล เพียงแต่จะไม่มีโหนดที่เป็น “(merge node)” เนื่องจากเป็นที่การปรับเปลี่ยนโครงแบบ ซึ่งไปตามหลักการทำงานของมัลติคาสต์นั่นเอง

$$t_{TR} = (R \cdot t_{PD} \cdot L) \quad (3.9)$$

จากสมการเวลาที่กล่าวมาข้างต้นในระดับชั้นไอพี นำมารวมเข้ากับสมการที่ (3.6) ดังนั้น จะได้สมการเวลา (3.10) ที่ใช้กระบวนการในการกักเก็บของความขัดข้องในระดับชั้นไอพี ( $t_{TIP}$ ) มีดังนี้

$$t_{TIP} = t_{IP} + t_{HIP} + \left[ \sum_{i=1}^{2R+H} L_i t_{PD} \right] + f \cdot t_{MP_p} + (H + 1)t_{MP_{op}} + (R_i + 1)t_{MP_o} + \{(R + 1) \times (t_C + t_{MP_{op}})\} \quad (3.10)$$

เพราะฉะนั้นสมการเวลารวมทั้งหมดที่ใช้ในการกักเก็บของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในระบบโครงข่ายร่วมกันหลายระดับชั้น ( $t_{TT}$ ) นั้นเท่ากับ (จะเป็นในกรณีที่กระบวนการกักเก็บของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้นนั้นๆ ไม่สามารถกักเก็บของความขัดข้องได้ ซึ่งต้องอาศัยการกักเก็บของความขัดข้องของทั้ง 2 ระดับชั้น)

$$t_{TT} = t_{TOP} + t_{TIP} \quad (3.11)$$

## บทที่ 4

### การทดสอบขั้นตอนวิธีในกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องร่วมหลายระดับชั้นสำหรับกราฟฟิกแบบมัลติคาสต์

ในบทนี้จะเสนอการทดสอบขั้นตอนวิธีในกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องร่วมหลายระดับชั้นสำหรับกราฟฟิกแบบมัลติคาสต์ที่ได้นำเสนอ โดยจะแบ่งเป็น 2 แนวทางด้วยกันคือ

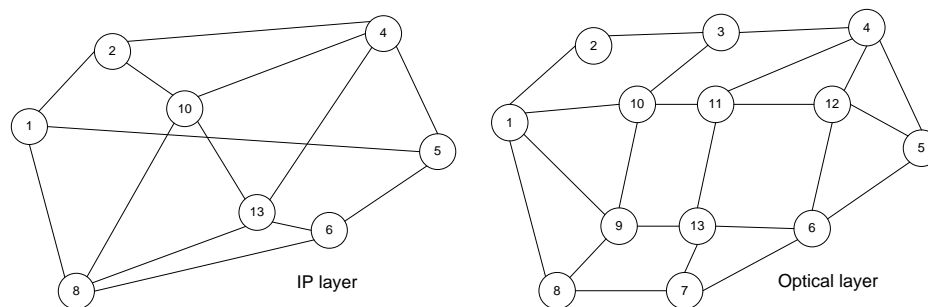
- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาในกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องระหว่างขั้นตอนวิธีที่นำเสนอและขั้นตอนวิธีการกักเก็บของความขัดข้องแบบวงของ [6] มาดำเนินการเข้ากับขั้นตอนวิธีการกักเก็บของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้นของ [17]
- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาในกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องด้วยวิธีที่นำเสนอสำหรับมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ชนิด

สำหรับขั้นตอนวิธีที่นำมาเปรียบเทียบนั้น ได้ผสมผสานขั้นตอนวิธีในการทำงานระหว่างกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องแบบเป็นลำดับชนิดรูปแบบการทำงานจากระดับชั้นล่างขึ้นระดับชั้นบน (bottom-up escalation) และมาดำเนินการเข้ากับ “recovery token signal” [17] ซึ่งเป็นการกำหนดค่าของตัวชี้วัดเวลาอีกทางเลือกหนึ่งที่เป็นวิธีลดความหน่วง (delay) ของเวลากระบวนการกักเก็บของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้น นั่นคือ ระดับชั้นออกतिकอลทำการส่งสัญญาณการกักเก็บของความขัดข้อง (recovery token) ไปยังระดับชั้นไอพี ก็ต่อเมื่อระดับชั้นออกतिकอลไม่สามารถทำการกักเก็บของความขัดข้องนั้นได้ (สัญญาณที่เกิดขึ้นจริง) ซึ่งในกระบวนการนี้จะดำเนินการโดยการเฝ้าสังเกต (monitor) ในส่วนของโหนดที่เชื่อมต่อกับเส้นทางป้องกัน

สุดท้ายนี้ ได้นำมาประยุกต์เข้ากับแนวความคิดของขั้นตอนวิธีแบบวง (cycle algorithm) ของ [6] จากขั้นตอนวิธีทั้งหมดที่กล่าวมานั้นมีจุดประสงค์คล้ายคลึงในลักษณะที่จะรองรับความขัดข้องได้แล้วยังสามารถลดเวลาในกระบวนการกักเก็บร่วมหลายระดับชั้นอีกด้วยดังนั้นในงานวิจัยจึงได้นำขั้นตอนวิธีนี้มาใช้เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบกับวิธีที่ได้นำเสนอ

- 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาในกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องระหว่างขั้นตอนวิธีที่นำเสนอและขั้นตอนวิธีการกักเก็บของความขัดข้องแบบวงของ [6] มาดำเนินการเข้ากับขั้นตอนวิธีการกักเก็บของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้นของ [17]

การทดสอบประสิทธิภาพของเวลาในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องในขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ นั้นมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของเวลาที่ใช้ในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องต่อจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจะนำขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอนี้ไปเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องที่ได้จากขั้นตอนวิธีที่เปรียบเทียบกับซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่มีจุดประสงค์ที่คล้ายคลึงกับขั้นตอนวิธีในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องที่ได้นำเสนอ นั่นคือ การมุ่งเน้นในการพิจารณากระบวนการทำงานในเรื่องของเวลาการกู้กลับของความขัดข้องให้น้อยที่สุด โดยการทดสอบนั้นจะเริ่มกระบวนการทำแบบจำลองเครือข่ายรูปแบบที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 4.1 [19]



ภาพที่ 4.1: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 1

ในการทดสอบนั้นจะกระทำแบบจำลองทั้งหมด 5 รูปแบบ ซึ่งทั้ง 5 รูปแบบนั้นจะคงจำนวนโหนดในระดับชั้นออปติคอลล 13 โหนด และ ในระดับชั้นไอพี 8 โหนดไว้ โดยที่ในแต่ละรูปแบบจะแตกต่างกันด้วยค่าเฉลี่ยดีกรีของโหนด (average node degree,  $\bar{d}$ ) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดความหนาแน่นของการเชื่อมต่อ (connectivity) ของโครงข่ายดังสมการที่ 4.1 โดยที่  $n$  และ  $l$  คือจำนวนโหนด และ จำนวนการเชื่อมโยง ในระดับชั้นที่พิจารณา

$$\bar{d} = \frac{2 \times l}{n} \quad (4.1)$$

นอกจากนี้การเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพี จะถูกกำหนดด้วยเส้นทางในระดับชั้นออปติคอลลที่ใช้ระยะฮอปน้อยที่สุด และในส่วนของ การเกิดความขัดข้องขึ้นนั้น จะทำการทดสอบทั้งในบริเวณใกล้กับโหนดต้นทางและใกล้กับโหนดปลายทาง การทดสอบลักษณะแบบนี้มีจุดประสงค์ต้องการศึกษาผลกระทบของความขัดข้องที่เกิดขึ้น การที่ความขัดข้องเกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับตัวโหนดต้นทาง นั้นหมายความว่า โอกาสความเป็นไปได้ที่จะส่งผลกระทบต่อจำนวนกลุ่มโหนดปลายทางสูง

ในทางตรงกันข้าม โอกาสความเป็นไปได้จะส่งผลกระทบต่อโหนดปลายทาง ก็ต่อเมื่อความขัดข้องที่เกิดขึ้นมานั้นเกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทาง

สำหรับการวัดค่าเวลาในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องนั้น จะกระทำโดยการแปรผันจำนวนโหนดปลายทาง ซึ่งในที่นี้คือ ตั้งแต่ 2 โหนดจนถึง 7 โหนด โดยจะอ้างอิงจากโหนดในระดับชั้นไอพี ซึ่งมีอุปกรณ์จัดหาเส้นทางเป็นตัวกำหนดเส้นทางให้กับคำร้องขอ สำหรับแต่ละจำนวนของโหนดปลายทางนั้น จะทำการเก็บเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้อง จากรูปแบบคำร้องขอลักษณะต่างๆ โดยที่คำร้องขอดังกล่าวจะเกิดจากการสุ่มโหนดต้นทาง 1 โหนด ด้วยการกระจายตัวแบบเอกกรุป (uniform distribution) และกลุ่มของโหนดปลายทางที่ต้องการทดสอบด้วยการกฎการจัดหมู่ ซึ่งจะไม่นำรูปแบบคำร้องที่เคยมาทดสอบมาพิจารณา

ภาพที่ 4.2-4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มโหนดต้นทาง และกลุ่มโหนดปลายทางของบริเวณบนโครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 1 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยดีกรีของโหนดระดับออกพติคอลเท่ากับ 3.538 และในระดับชั้นไอพีเท่ากับ 3.5 สำหรับการสุ่มนั้นจะเริ่มต้นจาก โหนดปลายทาง 2 โหนด จนถึง 7 โหนด โดยจะเห็นได้ว่าในแต่ละจำนวนโหนดปลายทางต้องอาศัยการสุ่มโดยประมาณ 54-240 ครั้ง เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องถึงจะค่อนข้างคงที่ ยกเว้นกรณีกลุ่มโหนดปลายทาง 7 โหนด ซึ่งจะมีรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งสิ้น 8 รูปแบบด้วยกัน

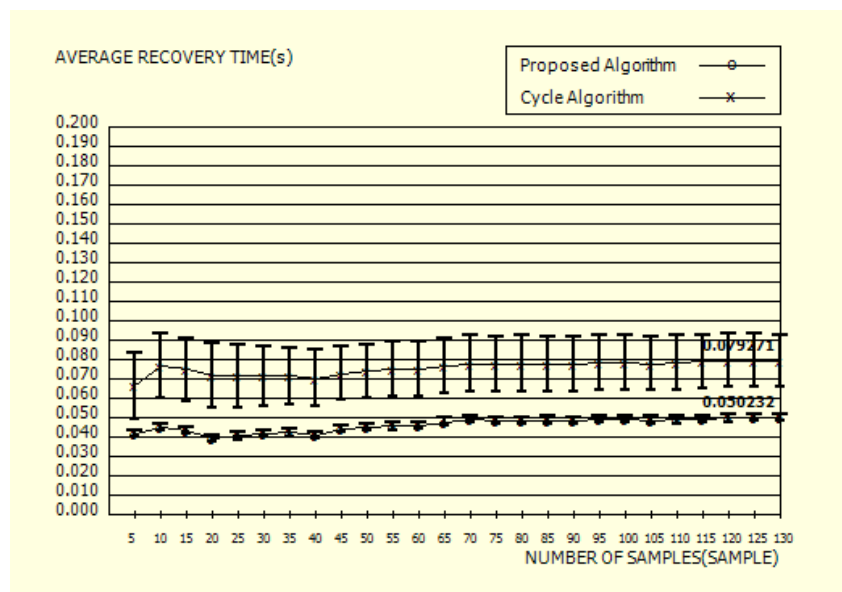
ภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอบน โครงข่ายรูปแบบที่ 1 จะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งช่วงพิจารณาออกเป็นทั้งสิ้น 2 ช่วงด้วยกัน นั่นคือ ช่วงที่ 1 กรณีจำนวนโหนดปลายทางเท่ากับ 2 และ 3 โหนด และช่วงที่ 2 กรณีจำนวนโหนดปลายทางเท่ากับ 4 จนถึง 7 โหนด

สำหรับช่วงที่ 1 นั้นพบว่าความแตกต่างของทั้งขั้นตอนวิธีที่นำเสนอและวิธีที่เปรียบเทียบนั้น มีความแตกต่างกันไม่มากนัก ทั้งนี้เป็นผลเมื่อมีจำนวนโหนดปลายทางน้อย ถึงแม้จะทำให้ทางเลือกในการป้องกันมีมาก แต่จำนวนองค์ประกอบของเส้นทางที่ต้องการการป้องกันยังคงมีน้อยอยู่ จึงมีผลต่อเวลาในการกู้กลับของความขัดข้อง เมื่อโครงสร้างที่เป็นวงแหวนยังมีลักษณะค่อนข้างเล็ก ซึ่งจะทำให้เวลา

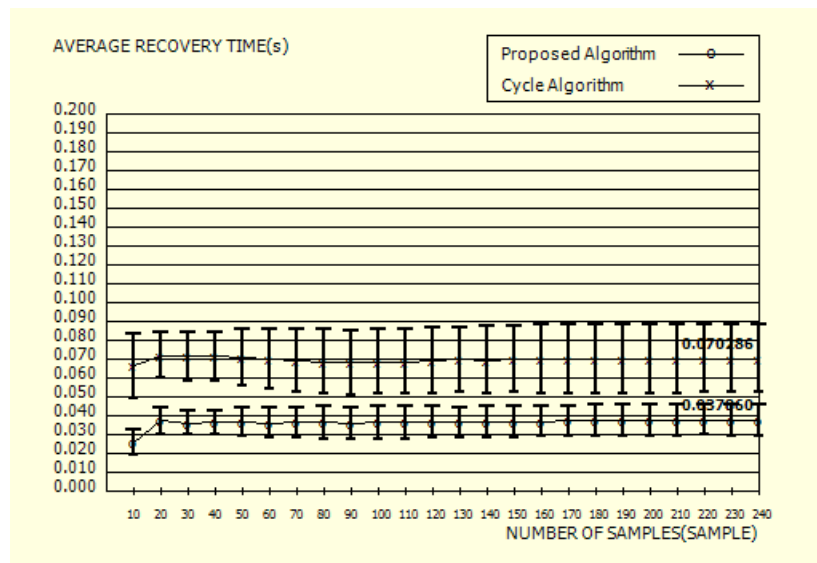
สำหรับช่วงที่ 2 สังเกตได้ว่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอให้ผลที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีที่เปรียบเทียบอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลจากการที่ เมื่อมีจำนวน

โหนดปลายทางมากขึ้นจะทำให้โอกาสของการกระจายตัวของโหนดปลายทางในโครงข่ายมีหลากหลายยิ่งขึ้น รวมทั้งองค์ประกอบที่ต้องการการป้องกันมีเพิ่มขึ้น การเชื่อมโยงระหว่างโหนดปลายทางที่มีผลต่อโครงสร้างวงแหวนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ ยิ่งโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงยิ่งส่งผลกระทบต่อเวลาเฉลี่ยในการกู้กลับของความขัดข้อง

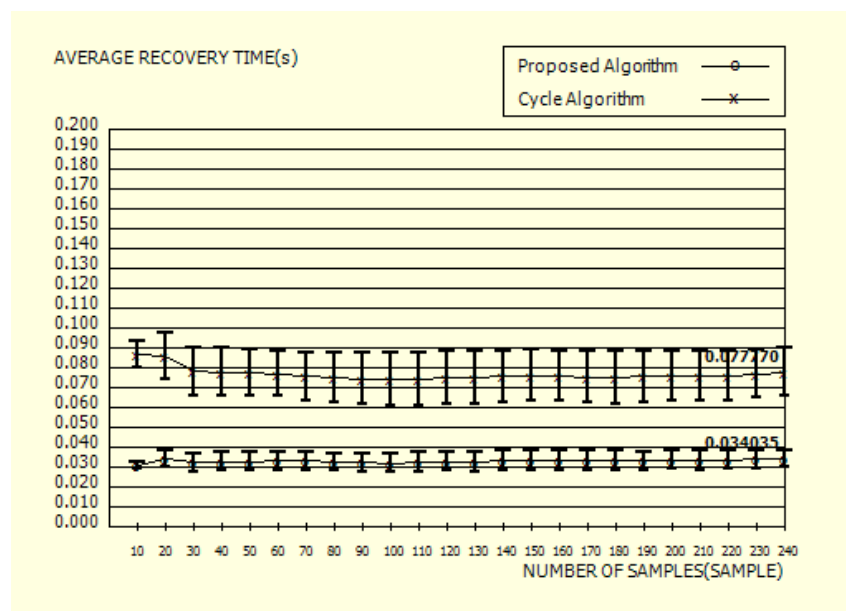
จากผลการทดลองที่ได้ในรูป 4.8.1 นั้น เมื่อมีการทดสอบความขัดข้องให้เกิดขึ้นบนโหนดต้นทาง ความแตกต่างของกราฟจะไม่ได้แตกต่างกับการทดสอบความขัดข้องให้เกิดขึ้นบนโหนดปลายทาง แต่ที่พบได้ชัดเจน นั่นคือเวลาเฉลี่ยในการกู้กลับของความขัดข้องของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องของวิธีที่เปรียบเทียบลดลง นั่นเป็นเพราะว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ ต้องใช้เวลาในการประกาศความขัดข้องไปยังโหนดปลายทางที่สามารถกระตุ้นเส้นทางป้องกันเพิ่มขึ้น และในส่วนของขั้นตอนวิธีที่เปรียบเทียบจะใช้เวลาในการกู้กลับของความขัดข้องลดลง เนื่องจากจำนวนฮอปของเส้นทางสำรองน้อยลง เพราะว่าความขัดข้องที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดขึ้นที่โหนดต้นทางเป็นส่วนใหญ่



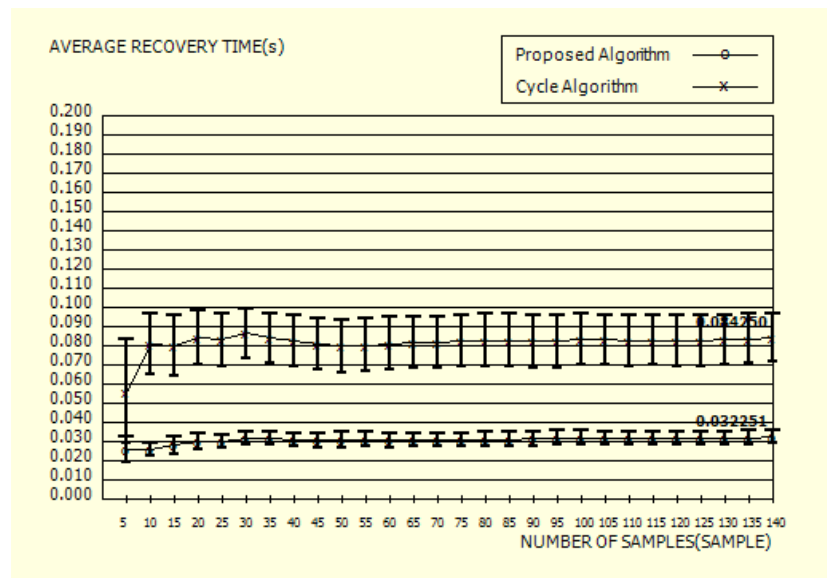
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณโหนดต้นทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด



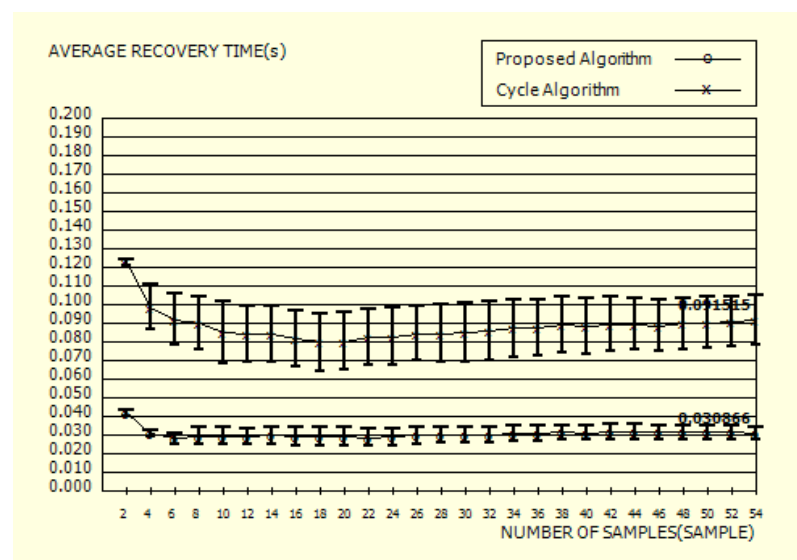
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด

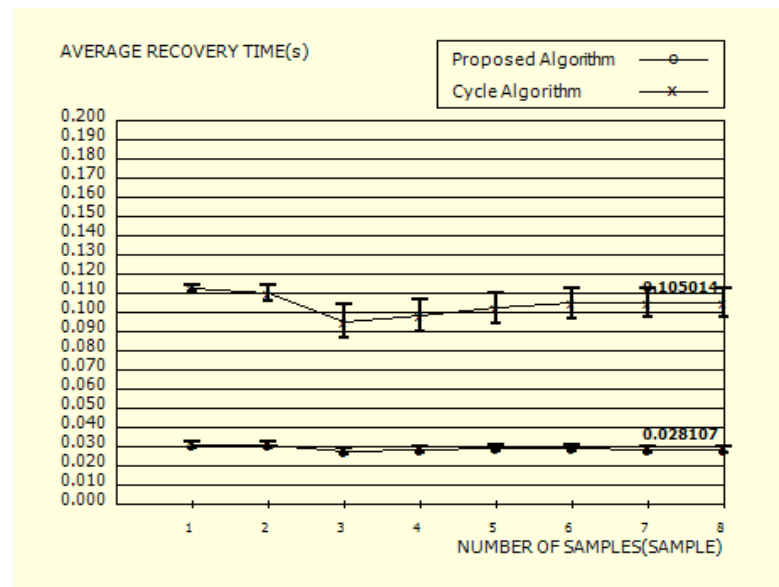


ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่ส่งบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด

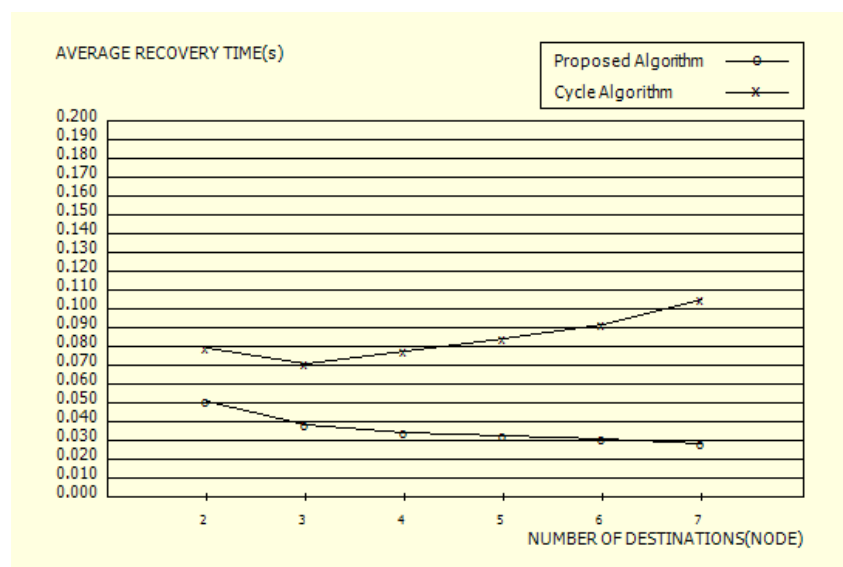


ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่ส่งบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 6 โหนด

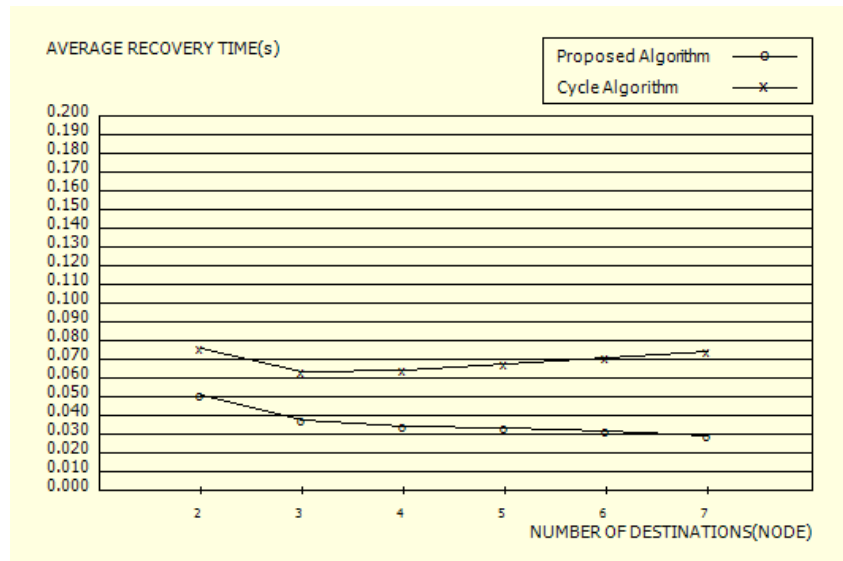




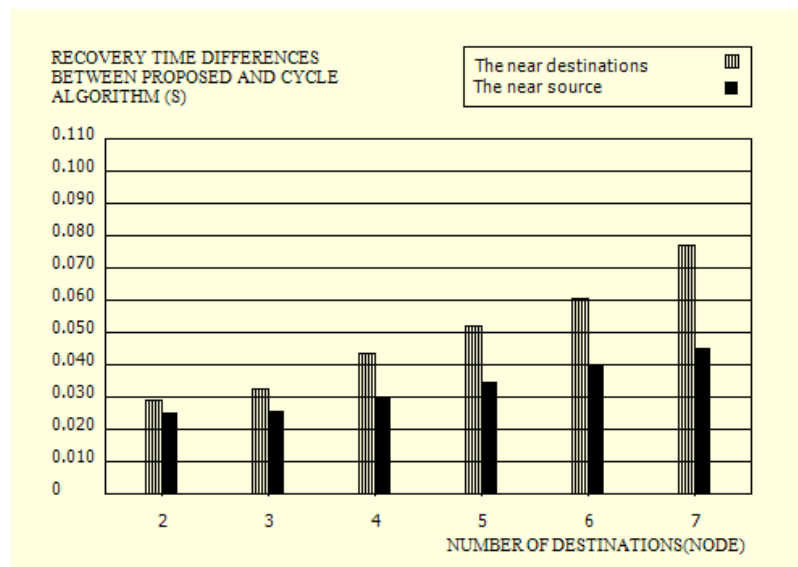
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 7 โหนด



ภาพที่ 4.8: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1



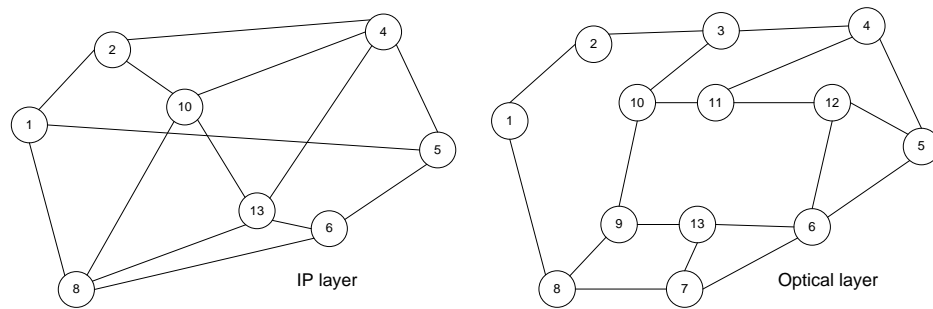
ภาพที่ 4.8.1: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1



ภาพที่ 4.8.2: ความสัมพันธ์ความแตกต่างระหว่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นทั้งในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางและใกล้กับโหนดต้นทาง กับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1

สำหรับโครงข่ายรูปแบบที่ 2 ซึ่งกระทำการลดจำนวนการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลอกเพื่อทำให้ค่าเฉลี่ยค่าดีกรีของโหนดในระดับชั้นลดลงจาก 3.548 เป็น 2.92 ส่วนระดับชั้นไอพีจะคงทอพอโลยีเดิมไว้นั้นคือมีค่าเฉลี่ยดีกรีของโหนดเท่ากับ 3.5 ดังแสดงในภาพที่ 4.9 จุดประสงค์

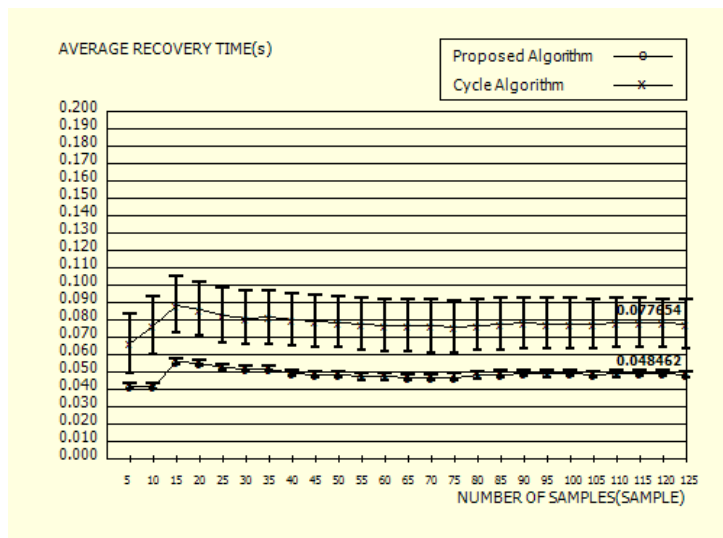
ของการกระทำเช่นนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอเมื่อโครงข่ายมีค่าเฉลี่ยดีกรี  
โหนดในระดับชั้นออฟติคอลลดลง



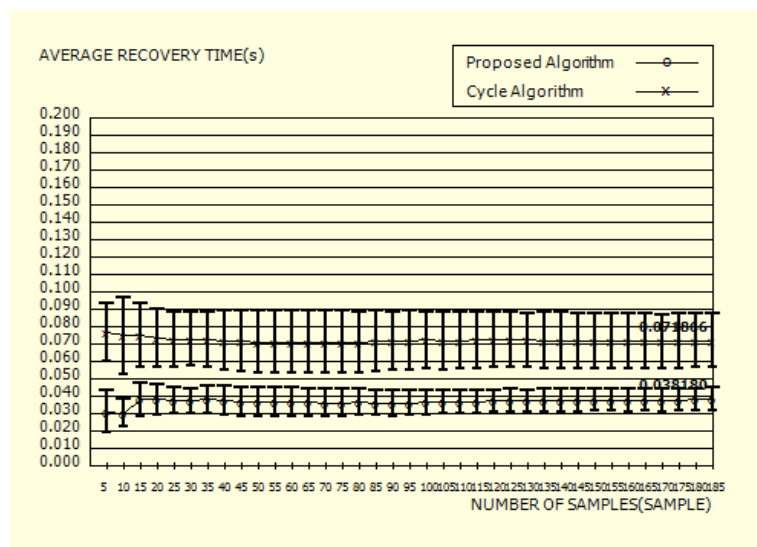
ภาพที่ 4.9: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 2

ภาพที่ 4.10-4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความ  
ขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทาง กับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอ บน  
โครงข่ายรูปแบบที่ 2 ซึ่งจะกระทำในรูปแบบเดียวกันกับในโครงข่ายรูปแบบที่ 1 นั่นคือ เริ่มจากการ  
สุ่มโหนดต้นทาง 1 โหนด ด้วยการกระจายตัวแบบเอกรูป จากนั้นจะทำการสุ่มกลุ่มโหนดปลายทาง  
ด้วยการสุ่มการจับคู่เพื่อทดสอบ ซึ่งในการทดสอบจะทำการแปรผันจำนวนโหนดปลายทางตั้งแต่  
2 โหนด จนถึง 7 โหนด โดยที่จะเห็นได้ว่าในแต่ละกลุ่มจำนวนโหนดปลายทางต้องอาศัยการสุ่ม  
ประมาณ 49-185 ครั้ง เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องถึงจะค่อนข้างคงที่ ยกเว้น  
กรณีกลุ่มโหนดปลายทาง 7 โหนด ซึ่งจะมีรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งสิ้น 8 รูปแบบเท่านั้น

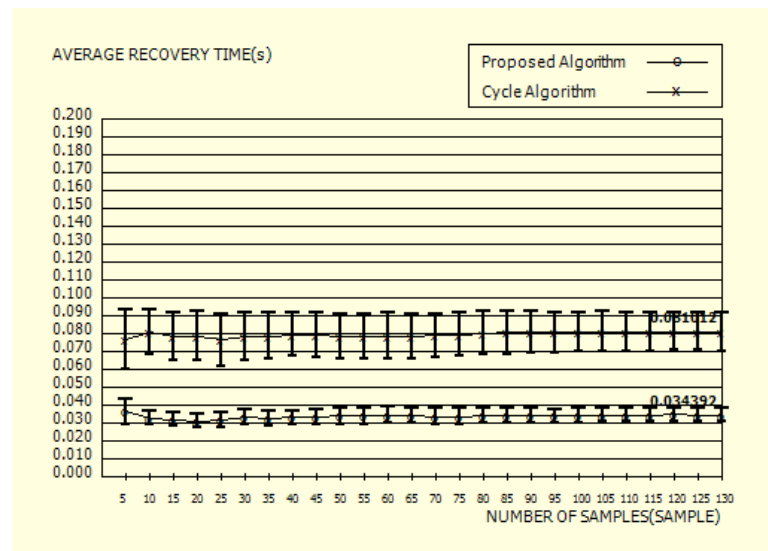
ภาพที่ 4.16 และ 4.16.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ และขั้นตอน  
วิธีการกู้กลับของความขัดข้องแบบวงของ [6] มาดำเนินการเข้ากับขั้นตอนวิธีการกู้กลับของความ  
ขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้นของ [17] จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการลดค่าเฉลี่ยดีกรีของโหนดบนโครง  
ข่ายในระดับโครงข่ายในระดับชั้นออฟติคอลลดลงจากโครงข่ายภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของเวลา  
เฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องเมื่อแปรผันจำนวนโหนดปลายทางนั้น ยังคงมีแนวโน้ม  
ดั้งเดิมเพียงแต่การเปลี่ยนแปลงลดลงจะไม่มากนักเนื่องจากโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่  
มากนัก ส่งผลให้รูปแบบลักษณะวงแหวนจะมีขนาดแตกต่างกันน้อยมาก



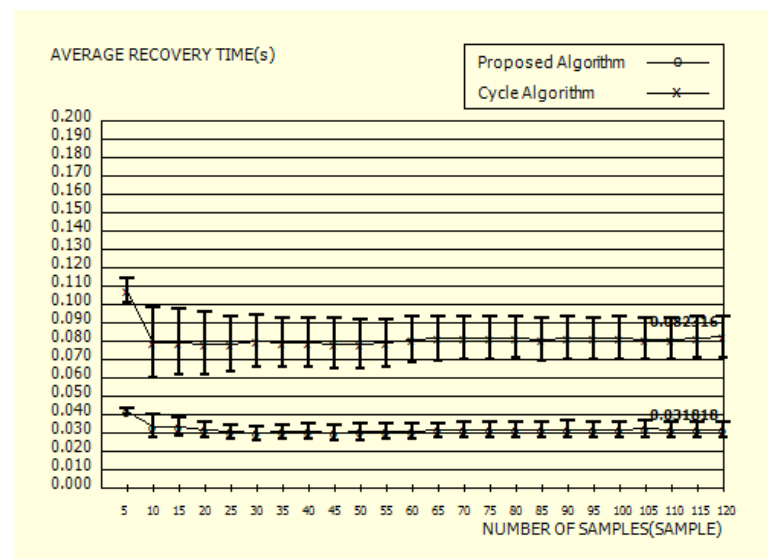
ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด



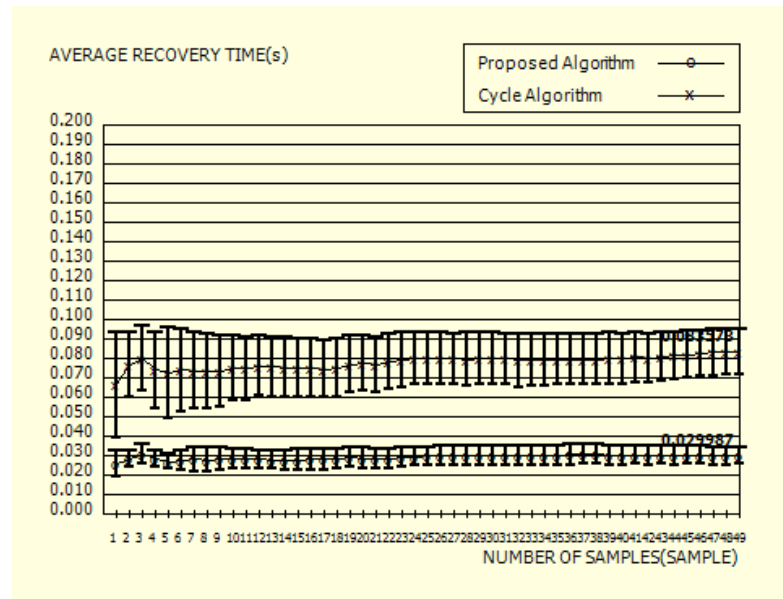
ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด



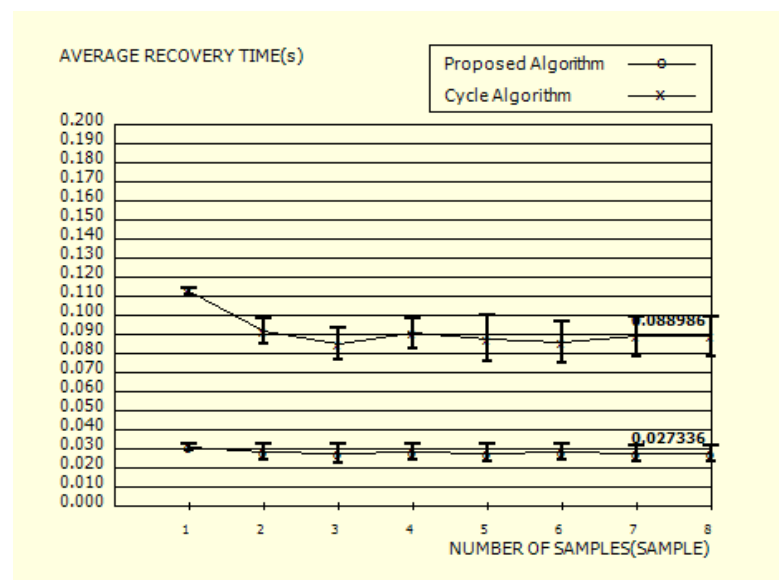
ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด



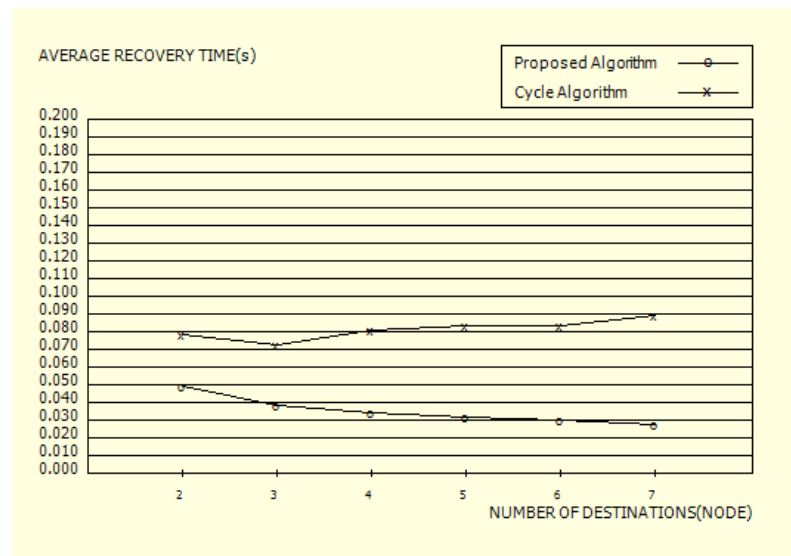
ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด



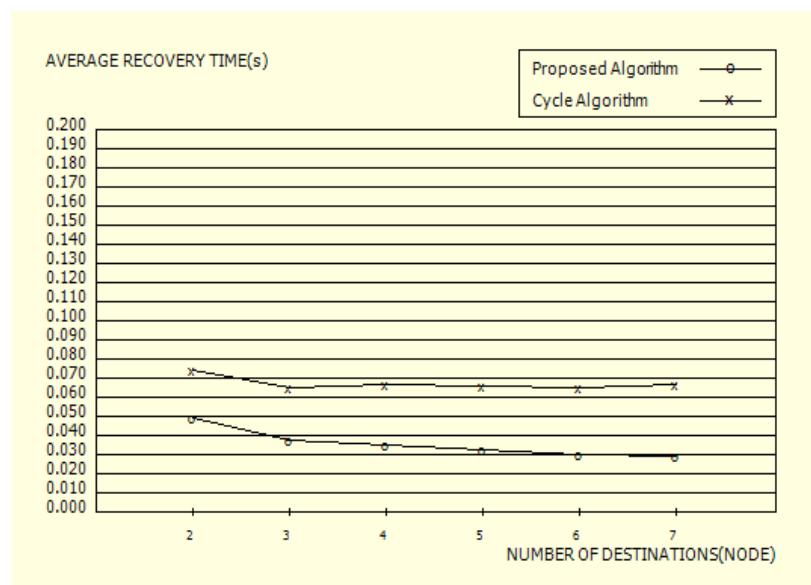
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทาง กับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 6 โหนด



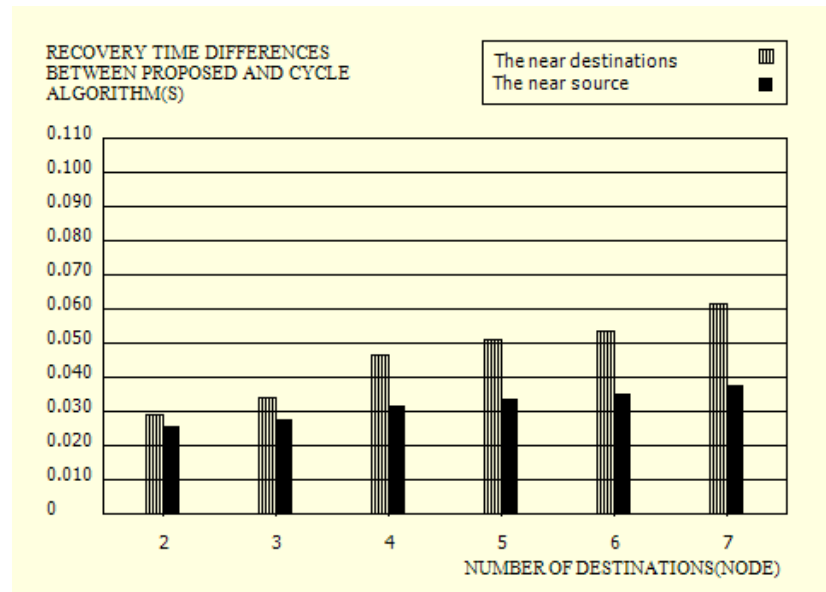
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทาง กับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 7 โหนด



ภาพที่ 4.16: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้อง บนโครงข่ายรูปแบบที่ 2

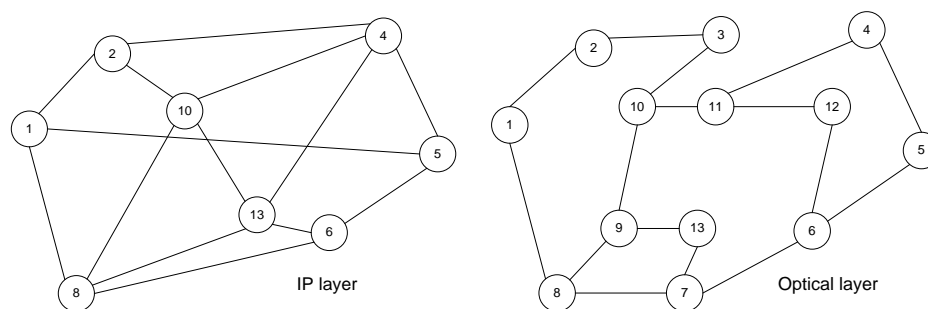


ภาพที่ 4.16.1: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2



ภาพที่ 4.16.2: ความสัมพันธ์ความแตกต่างระหว่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นทั้งในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางและใกล้กับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของโครงข่ายแบบที่ 2

ภาพที่ 4.17 แสดงโครงข่ายแบบที่ 3 ที่จะทำการทดสอบโดยมีลักษณะทอพอโลยีเกิดจากการลดจำนวนการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลจากโครงข่ายแบบที่ 1 ออกทั้งสิ้น 7 การเชื่อมโยงเพื่อให้ดีกรีเฉลี่ยของโหนดเท่ากับ 2.462 ซึ่งลดลงจากเดิม 1.08 ดีกรี โดยยังคงทอพอโลยีในระดับชั้นไอพีไว้ดังเดิม การกระทำเช่นนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการลดลงของการเชื่อมต่อในระดับชั้นออฟติคอลล



ภาพที่ 4.17: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 3

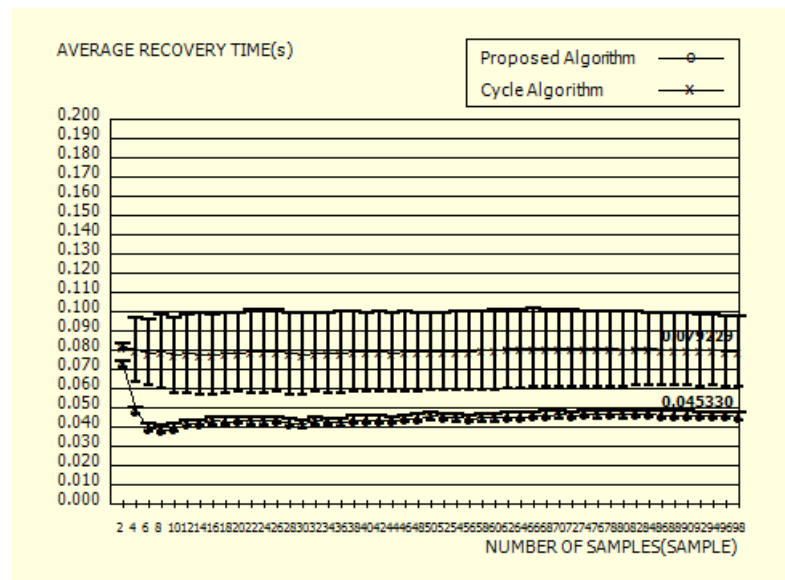
ภาพที่ 4.18-4.23 แสดงการหาเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางเทียบกับจำนวนครั้งในการสุ่มโหนดต้นทางและกลุ่มของโหนดปลายทาง



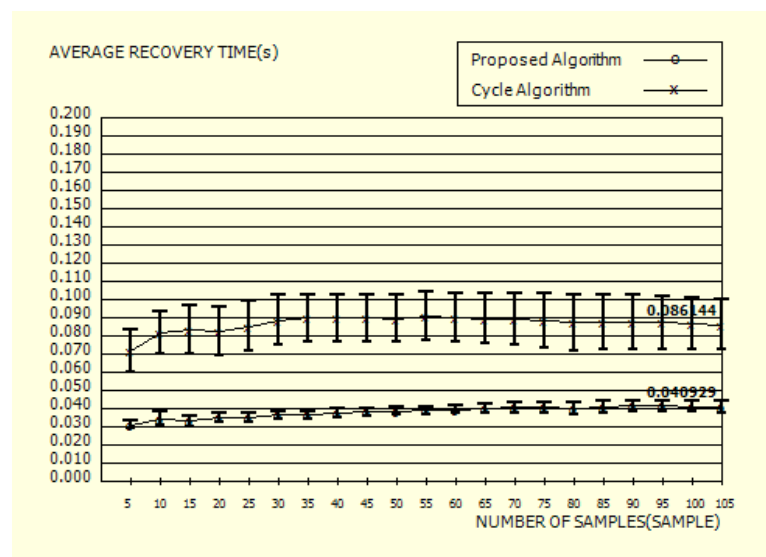
ทางโดยจะแปรผันจำนวนโหนดปลายทางจาก 2 จนถึง 7 โหนด และกำหนดให้มีการสุ่มโหนดต้นทาง 1 โหนดนั้นมีการกระจายตัวแบบเอกรูป ส่วนการสุ่มของกลุ่มโหนดปลายทางจะเป็นไปตามกฎการจัดหมู่ โดยที่กลุ่มที่ได้รับการทดสอบแล้วจะไม่นำมาพิจารณาอีก จะเห็นได้ว่าในแต่ละกรณี จะทำการหาค่าเฉลี่ยจนกระทั่งคงที่ นั่นคือจำเป็นต้องสุ่มกลุ่มตัวอย่างประมาณ 33-110 ครั้ง ในแต่ละจำนวนของโหนดปลายทาง ยกเว้นกรณีที่คำร้องขอมีกลุ่มโหนดปลายทางเท่ากับ 7 โหนด ซึ่งจะมีจำนวนรูปแบบเท่ากับ 8 รูปแบบเท่านั้น

ภาพที่ 4.24 และ 4.24.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความขัดข้องเทียบกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอ จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความขัดข้องด้วยวิธีที่นำเสนอขึ้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นั้นหมายความว่า เส้นทางป้องกันที่สร้างขึ้นนั้นมีความยาวมากขึ้น สาเหตุของการเพิ่มขึ้นนั้นเป็นเพราะว่า เมื่อทำการลดจำนวนการเชื่อมโยงในระดับชั้นออกผิดปกติออก ทำให้การกระจายตัวของคำร้องขอมีมากขึ้นเมื่อเทียบกับโครงข่ายใหม่ ดังนั้นตัวเลือกในการเส้นทางป้องกันจึงน้อยลงตามเงื่อนไขบังคับการสร้างเส้นทางป้องกัน ซึ่งการที่มีตัวเลือกที่น้อยลงประกอบกับการกระจายตัวของคำร้องขอที่เพิ่มขึ้น ทำให้โอกาสในการสร้างเส้นทางป้องกันที่สามารถถูกใช้งานร่วมกับคำร้องขอนั้นน้อยลง จึงทำให้โครงสร้างที่เป็นลักษณะวงแหวนมีขนาดใหญ่

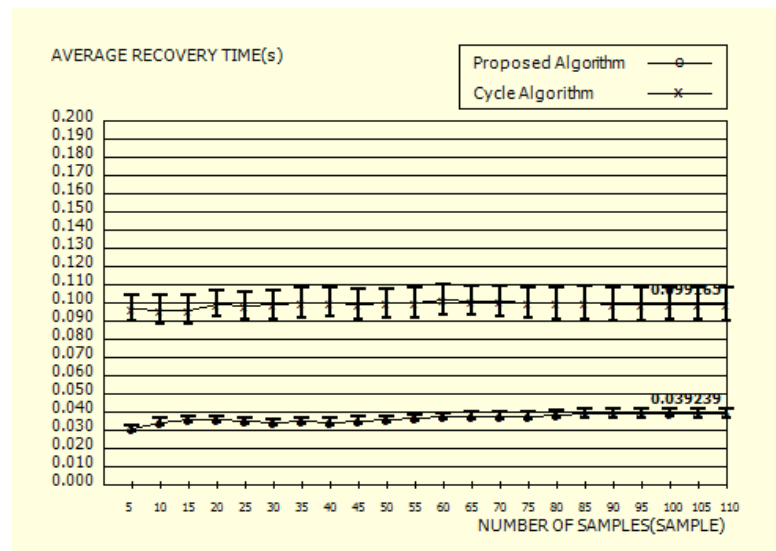
สำหรับขั้นตอนวิธีการกักตัวของความขัดข้องแบบวงของ [6] มาดำเนินการเข้ากับขั้นตอนวิธีการกักตัวของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้นของ [17] เข้าด้วยกันนั้น จะสังเกตได้ว่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักตัวของความขัดข้องด้วยวิธีนี้ จะมีค่าเพิ่มขึ้นทุกจำนวนของโหนดปลายทางเมื่อเทียบกับกรณีที่ทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1 เป็นผลมาจากวงแหวนที่ถูกสร้างขึ้นหลังจากมีการสร้างเส้นทางป้องกันร่วมกับคำร้องขอมีขนาดใหญ่ ซึ่งมีผลต่อเวลาในการกักตัวของความขัดข้องอย่างแน่นอน



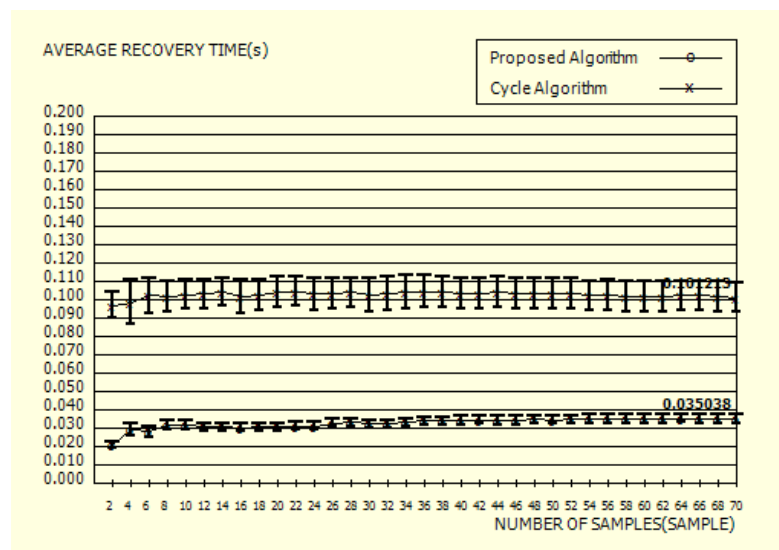
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด



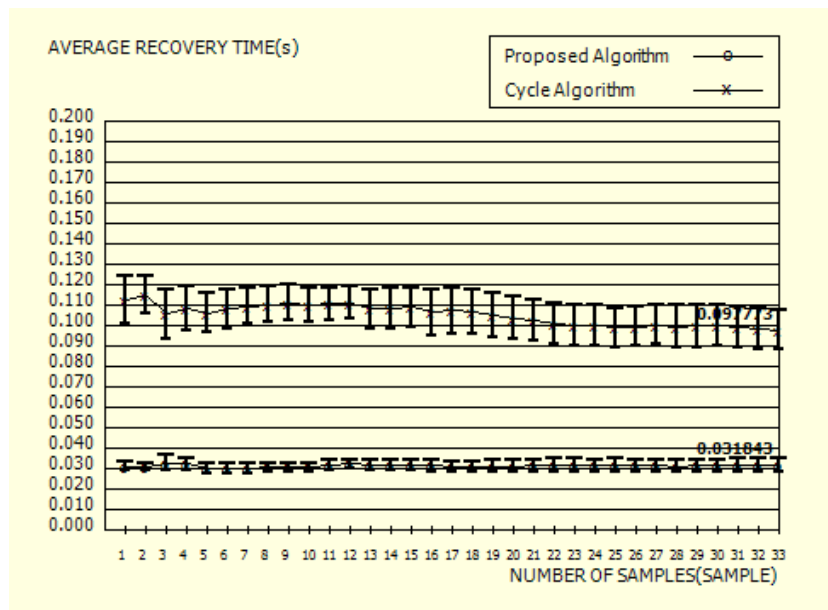
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด



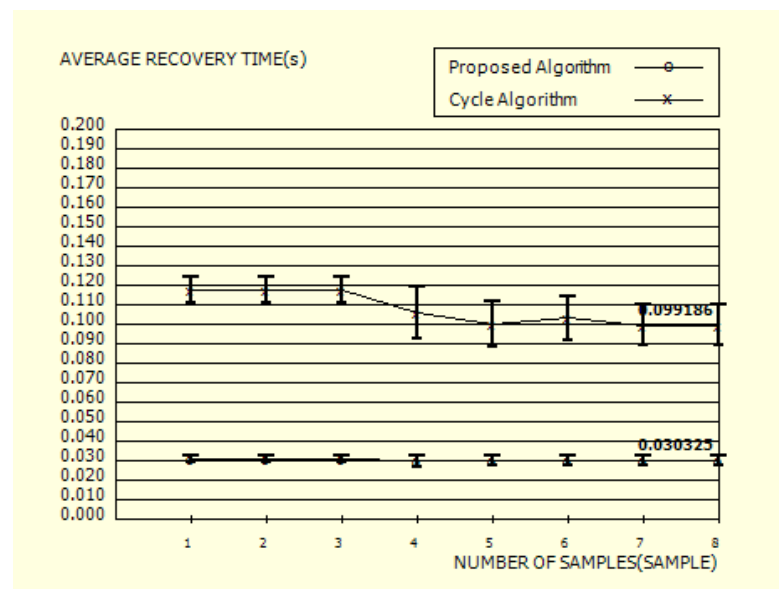
ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด



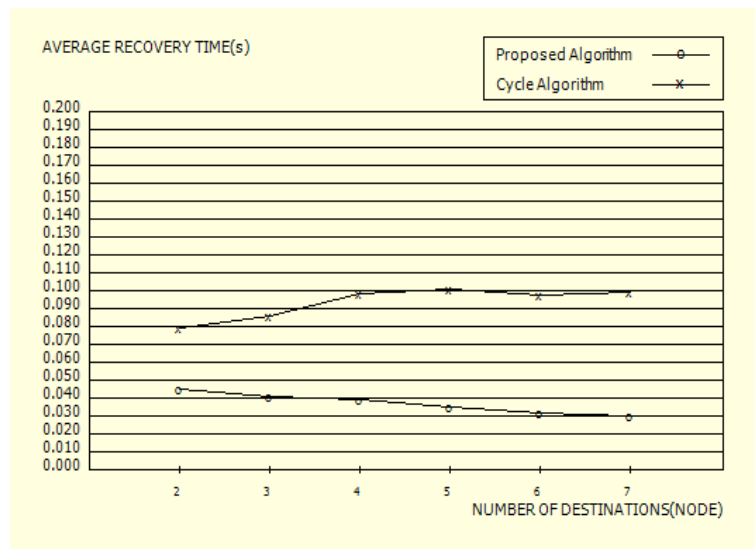
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด



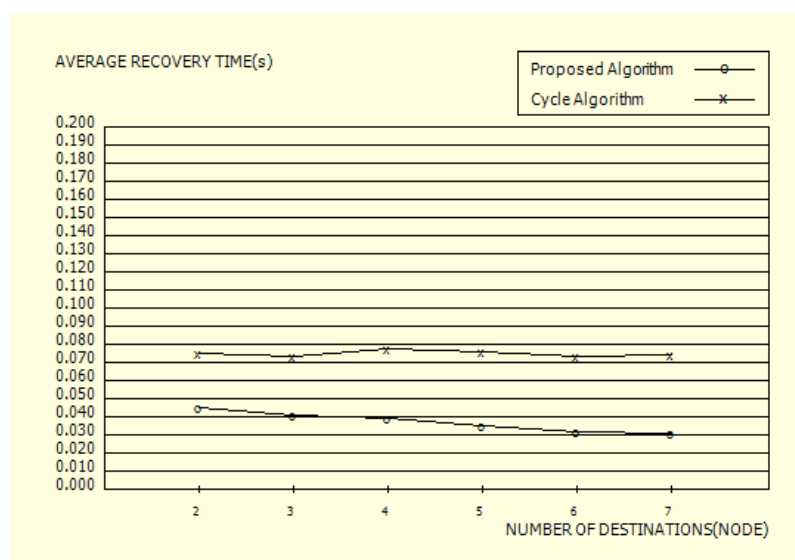
ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 6 โหนด



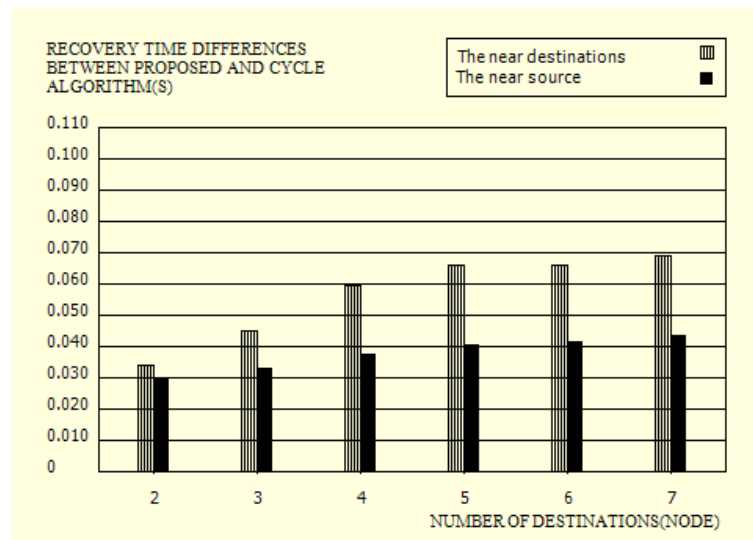
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 7 โหนด



ภาพที่ 4.24: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทาง กับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3



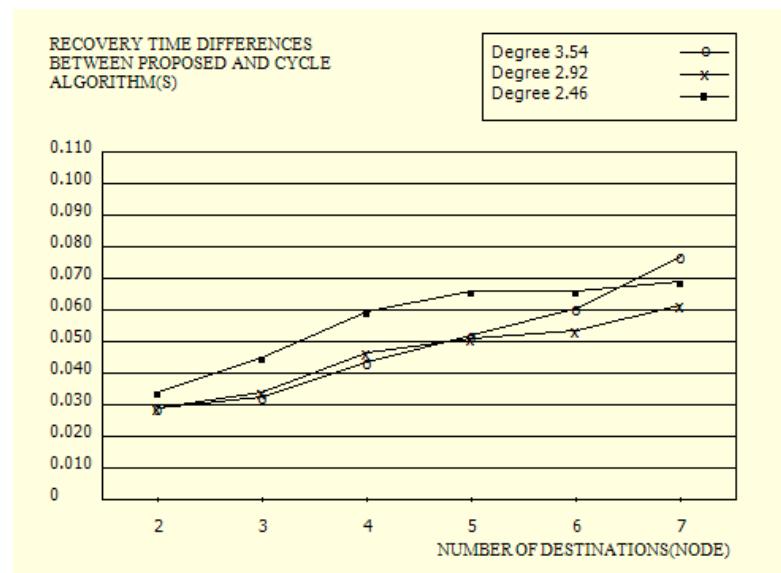
ภาพที่ 4.24.1: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3



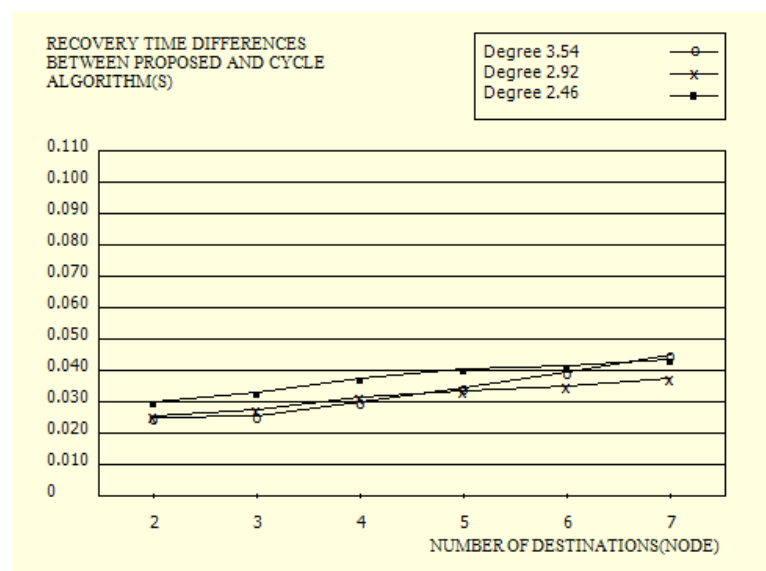
ภาพที่ 4.24.2: ความสัมพันธ์ความแตกต่างระหว่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นทั้งในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางและใกล้กับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของโครงข่ายรูปแบบที่ 3

จากการทดสอบผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนทอพอโลยีในระดับชั้นออฟติคอลล โดยคงทอพอโลยีในระดับชั้นไอพีเอาไว้คงเดิมที่ได้แสดงในโครงข่ายทดสอบทั้ง 3 รูปแบบนั้น พบว่าสามารถสรุปแนวโน้มได้เป็นดังนี้ นั่นคือ จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดปลายทางที่เพิ่มขึ้นกับความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นทั้งในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทาง และบริเวณใกล้กับโหนดต้นทางระหว่างขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ กับ ขั้นตอนวิธีการกู้กลับของความขัดข้องแบบวงของ [6] มาดำเนินการเข้ากับขั้นตอนวิธีการกู้กลับของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้นของ [17] ดังแสดงในภาพที่ 4.25 และภาพที่ 4.25.1 ซึ่งจะสรุปได้ว่าเมื่อทอพอโลยีมีค่าเฉลี่ยของโหนดต่ำลง ความแตกต่างของทั้ง 2 วิธีก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งความแตกต่างนั้นจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นเมื่อทดสอบด้วยโครงข่ายที่มีจำนวนโหนดปลายทางมากขึ้น และเมื่อทอพอโลยีในระดับชั้นออฟติคอลลที่ดีกรีเฉลี่ยของโหนดสูง หรือดีกรีเฉลี่ยของโหนดลดลงไม่มาก จำนวนตัวเลือกของการสร้างเส้นทางป้องกันในระดับชั้นออฟติคอลลจึงสูงตามไปด้วย ดังนั้นโอกาสในการหาเส้นทางป้องกันที่สามารถใช้งานได้มีสูง นั่นหมายความว่า โครงข่ายวงแหวนมีจำนวนที่มีวงขนาดใหญ่และวงขนาดเล็กหลากหลาย ทำให้ความแตกต่างระหว่าง 2 วิธีมีมาก นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่า เมื่อมีการลดดีกรีเฉลี่ยของโหนดลงเป็น 2.46 และมีการเพิ่มจำนวนโหนดปลายทางนั้นเป็นการเพิ่มการกระจายตัวของโครงข่าย ซึ่งเมื่อทอพอโลยีมีการเชื่อมต่อน้อยลง การกระจายตัวของโครงข่ายที่มีจำนวนโหนดเท่ากันก็จะเพิ่มขึ้น นั่นจึงเปรียบเสมือนกฎการบังคับให้เลือกเส้นทาง

โดยอัตโนมัติ ทำให้โครงข่ายวงแหวนมีขนาดใหญ่ลดลงหลังจากมีการสร้างเส้นทางป้องกัน ซึ่งจะส่งผลให้ความแตกต่างของทั้ง 2 วิธีลดลงไปด้วย

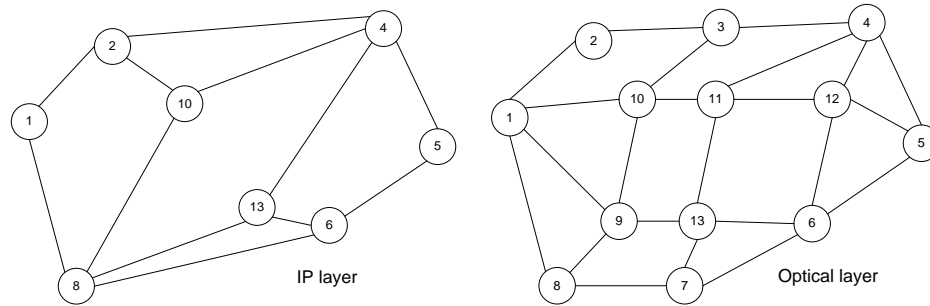


ภาพที่ 4.25: ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอที่แปรผัน เมื่อทดสอบบนทอพอโลยีในโครงข่ายภาพที่ 1 ถึงบนโครงข่ายรูปแบบที่ 3



ภาพที่ 4.25.1: ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอที่แปรผันเมื่อทดสอบบนทอพอโลยีในโครงข่ายภาพที่ 1 ถึง บนโครงข่ายรูปแบบที่ 3

ภาพที่ 4.26 คือโครงข่ายที่ใช้เพื่อทดสอบผลกระทบที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้อง เมื่อดีกรีเฉลี่ยของโหนดบนระดับชั้นไอพีลดลงจาก 3.5 ลดลงเป็น 3.0 ด้วยการลดจำนวนการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีออก 2 การเชื่อมโยง โดยที่สำหรับระดับชั้นออกพิดคอลลนั้น จะยังคงลักษณะของทอพอโลยีในโครงข่ายรูปแบบที่ 1



ภาพที่ 4.26: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 4

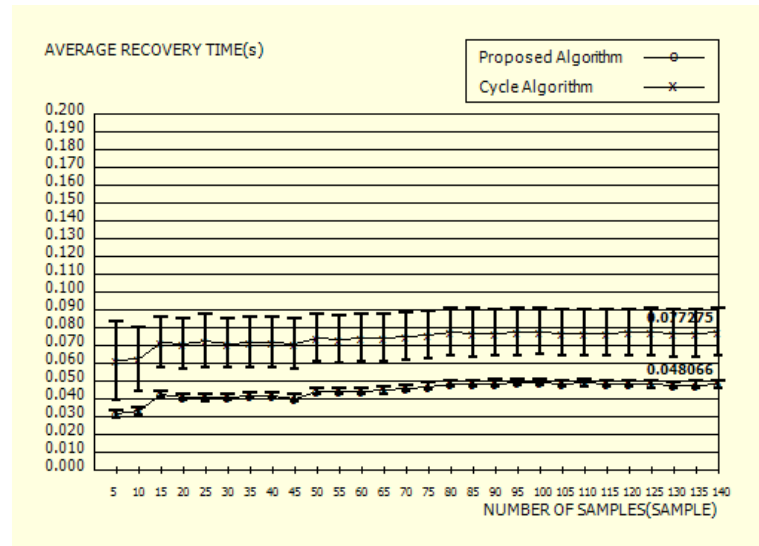
ภาพที่ 4.27-4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้อง กับจำนวนครั้งที่ใช้ส้อม ซึ่งในการส้อม 1 ครั้งนั้นประกอบด้วยการส้อมโหนดต้นทาง 1 โหนด ด้วยการกระจายตัวแบบเอกรูป จากนั้นจึงส้อมของโหนดปลายทางที่ต้องการด้วยกฎการจัดหมู่ โดยที่กลุ่มใดที่ถูกพิจารณาไปแล้ว จะไม่นำมาพิจารณาซ้ำ จากผลการทดลองพบว่าแต่ละจำนวนของโหนดปลายทางนั้น จำเป็นต้องใช้การส้อมทั้งสิ้น 56-280 ครั้ง ยกเว้นกรณีที่คำร้องขอมีโหนดปลายทางเท่ากับ 7 โหนด ซึ่งจะมีจำนวนรูปแบบทั้งสิ้น เท่ากับ 8 รูปแบบด้วยกัน

ภาพที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นใกล้กับโหนดปลายทาง กับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอ เมื่อทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 โดยจะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโครงข่ายรูปแบบที่ 1 นั้น การเปลี่ยนแปลงของเวลาที่ใช้ในการกู้กลับที่ได้จากวิธีที่นำเสนอจะมีค่าเพิ่มขึ้นทั้ง 2 ขั้นตอนวิธี นั้นเป็นเพราะว่าการลดจำนวนการเชื่อมโยงในระดับไอพีออก เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดจำนวนรูปแบบของการสร้างคำร้องขอลง ส่งผลให้เส้นทางของคำร้องขอเสมือนเป็นการบังคับเส้นทางคำร้องขอ ส่งผลให้รูปแบบหรือโครงสร้างวงแหวนมีไม่หลากหลาย และมีลักษณะขนาดใหญ่ ทำให้เส้นทางป้องกันของขั้นตอนวิธีที่เปรียบเทียบกับว่าการทดสอบโครงข่ายรูปแบบที่ 1 ซึ่งจะมีผลต่อการกู้กลับอย่างแน่นอน

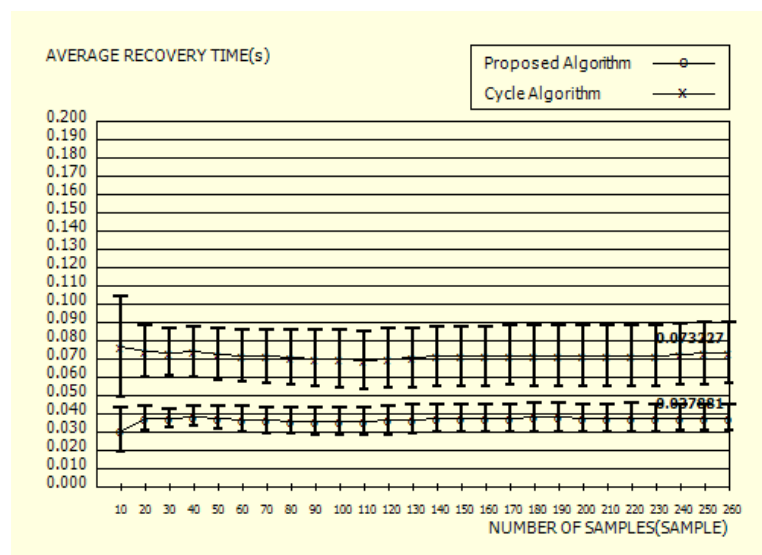
ภาพที่ 4.33.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดต้นทาง กับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอเมื่อทดสอบบนโครง



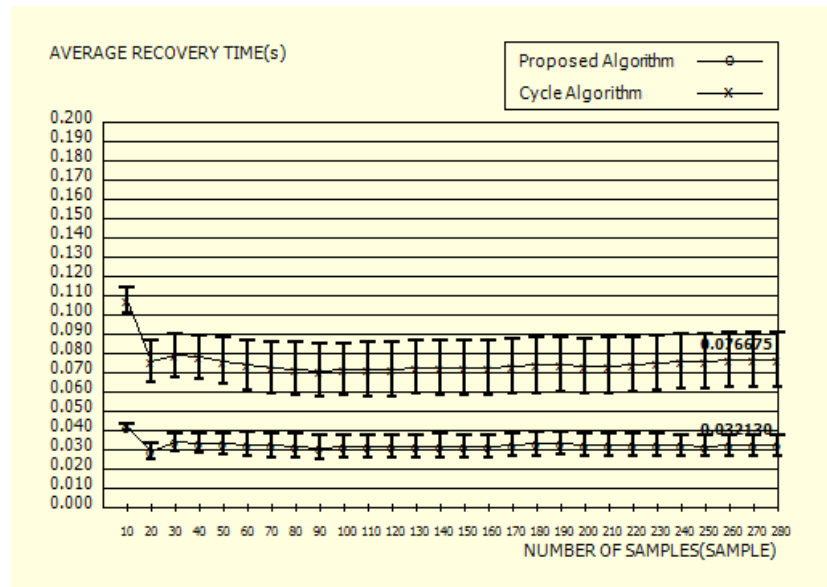
ข่ายรูปแบบที่ 4 โดยจะพบว่า ผลที่ได้นั้นยังคงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ เวลาที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องของขั้นตอนวิธีที่เปรียบเทียบลดลง และเวลาที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอเพิ่มขึ้น



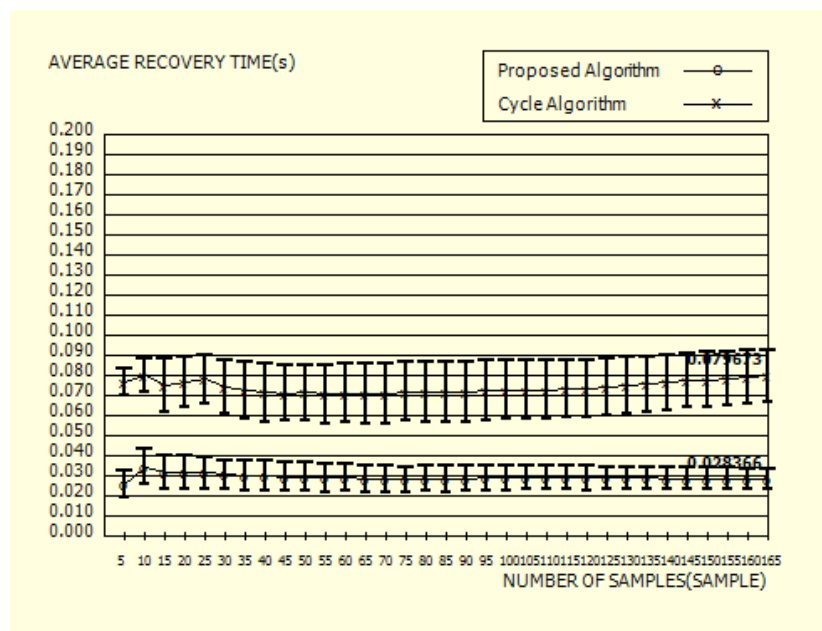
ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด



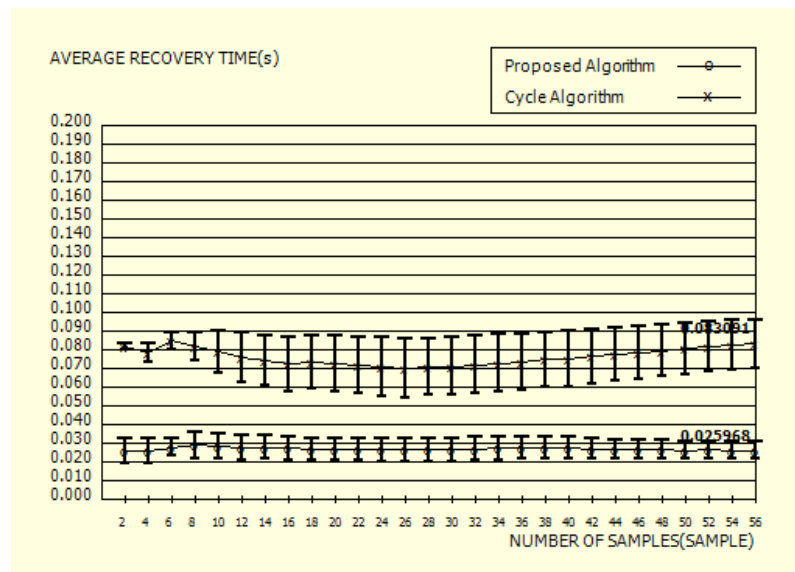
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทาง กับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด



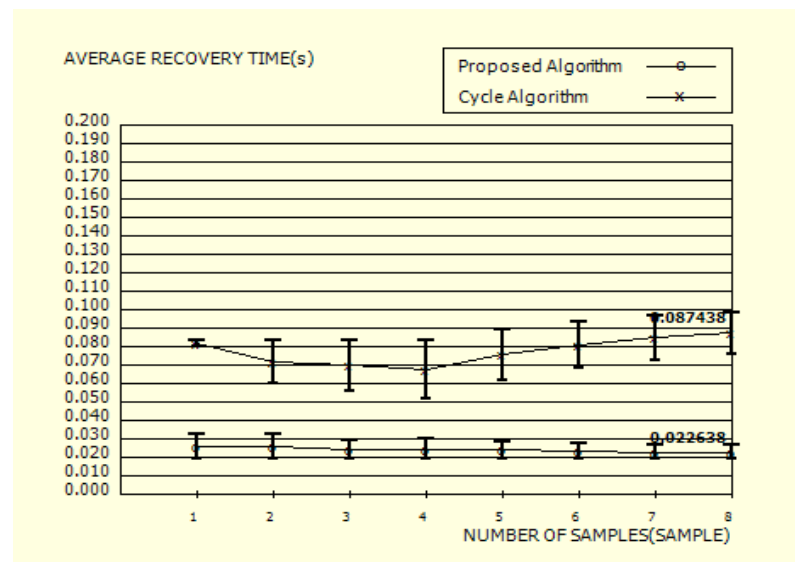
ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทาง กับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด



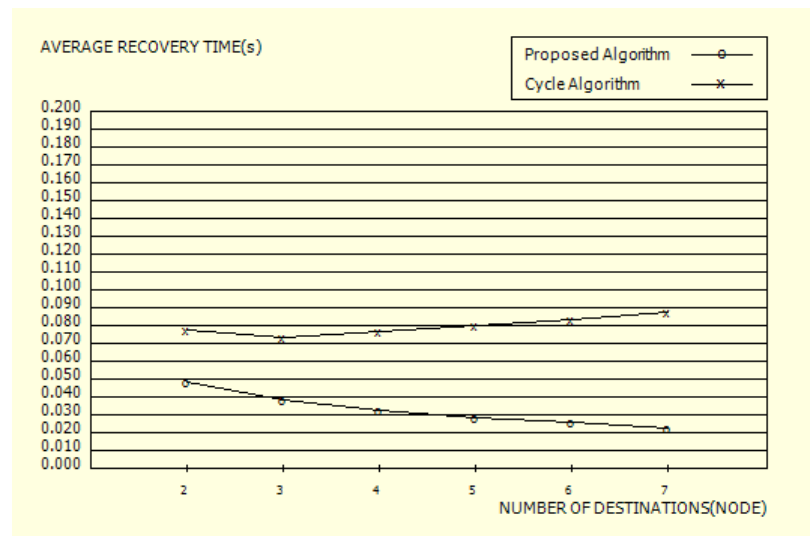
ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทาง กับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด



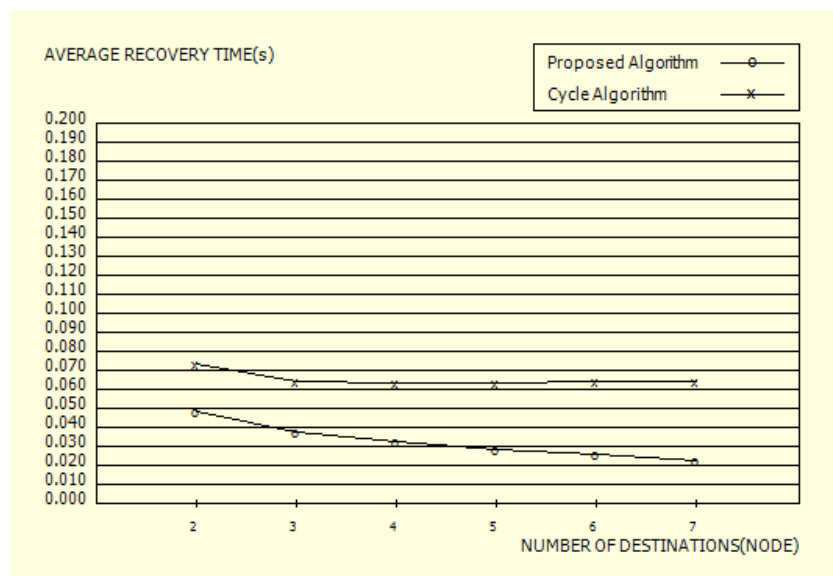
ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทาง กับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 6 โหนด



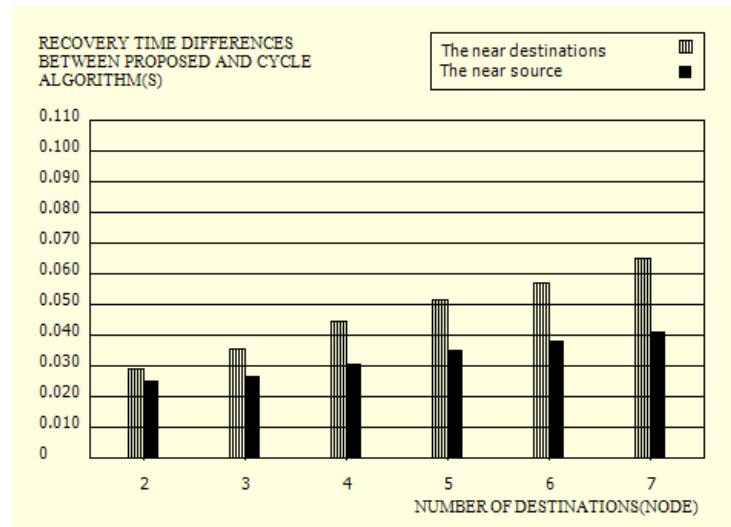
ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทาง กับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 7 โหนด



ภาพที่ 4.33: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้อง บนโครงข่ายรูปแบบที่ 4

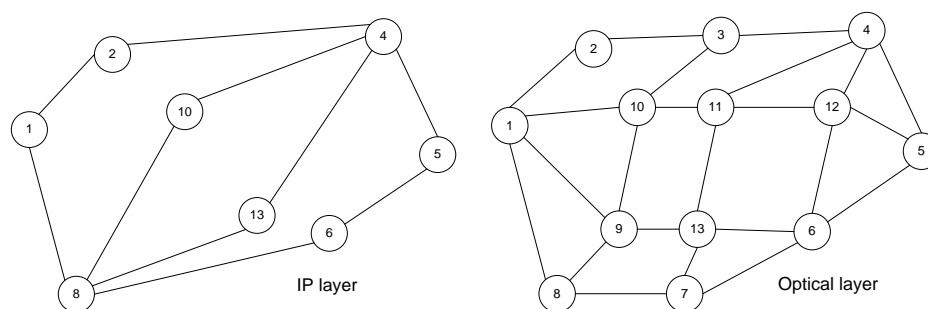


ภาพที่ 4.33.1: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้อง บนโครงข่ายรูปแบบที่ 4



ภาพที่ 4.33.1.1: ความสัมพันธ์ความแตกต่างระหว่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นทั้งในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางและใกล้กับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องบนโครงข่ายรูปแบบที่ 4

ภาพที่ 4.34 แสดงลักษณะโครงข่ายที่ใช้ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีในระดับชั้นไอพี ซึ่งทำให้ค่าดีกรีเฉลี่ยของโหนดในระดับชั้นไอพีลดลงจากทอพอโลยีในโครงข่ายรูปแบบที่ 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.5 ลดลงเหลือ 2.5 โดยการทดสอบนั้นจะยังคงลักษณะทอพอโลยีในระดับชั้นออฟติคอลลเอาไว้ นั่นคือ ยังคงมีค่าดีกรีเฉลี่ยของโหนดในระดับชั้นออฟติคอลลเท่ากับ 3.54



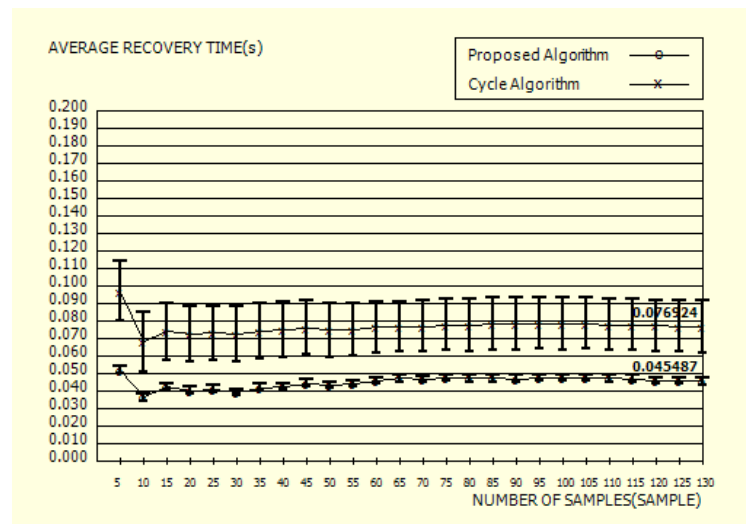
ภาพที่ 4.34: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 5

ภาพที่ 4.35-4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องกับจำนวนครั้งที่ใช้สุม ซึ่งในการสุม 1 ครั้งนั้นประกอบด้วยการสุมโหนดต้นทาง 1 โหนดด้วยการกระจายตัวแบบเอกรูป จากนั้นจึงสุมของโหนดปลายทางที่ต้องการด้วยกฎการจับหมู่ โดยที่กลุ่มใดที่ถูกพิจารณาไปแล้วจะไม่นำมาพิจารณาซ้ำจากผลการทดลองพบว่าแต่ละจำนวนของโหนดปลายทาง

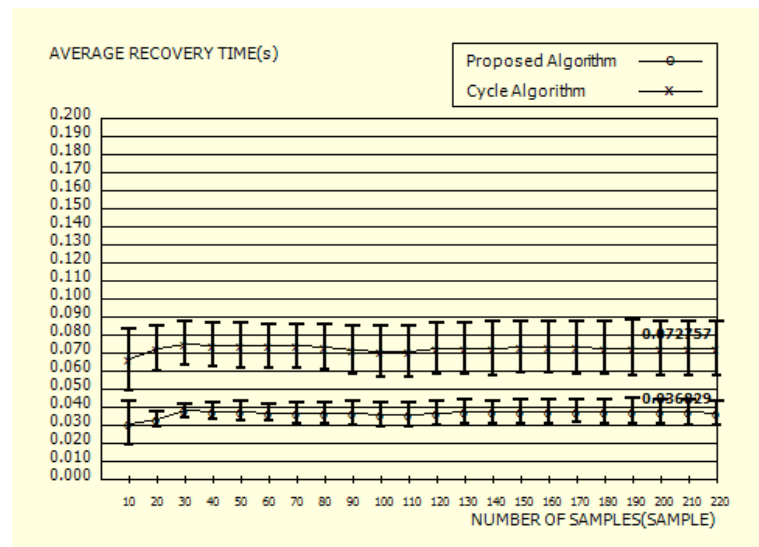
ทางนั้นจำเป็นต้องใช้การสุ่มทั้งสิ้น 30-220 ครั้ง ยกเว้นกรณีที่คำร้องขอมีโหนดปลายทางเท่ากับ 7 โหนด ซึ่งจะมีจำนวนรูปแบบทั้งสิ้นเท่ากับ 8 รูปแบบเท่านั้น

ภาพที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปลายทางและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางเมื่อทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของมีค่าลดลงจากเดิมเล็กน้อย นั่นเป็นเพราะว่าการลดจำนวนการเชื่อมโยงในระดับไอพ็อดอก ซึ่งมีผลกระทบต่อการสร้างจำนวนรูปแบบของการสร้างคำร้องขอและเส้นทางป้องกันลงส่งผลให้โอกาสของรูปแบบคำร้องขอ นั้นหลากหลายหรือเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าโครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 4 นั้นส่งผลคล้ายคลึงกัน นั้นเปรียบเสมือนเป็นการบังคับเส้นทางคำร้องขอ ส่งผลรูปแบบหรือโครงสร้างวงแหวนมีไม่หลากหลายเลย และมีลักษณะขนาดเล็กกลง ทำให้เส้นทางป้องกันของขั้นตอนวิธีที่เปรียบเทียบมีขนาดสั้นลงตามไปด้วย

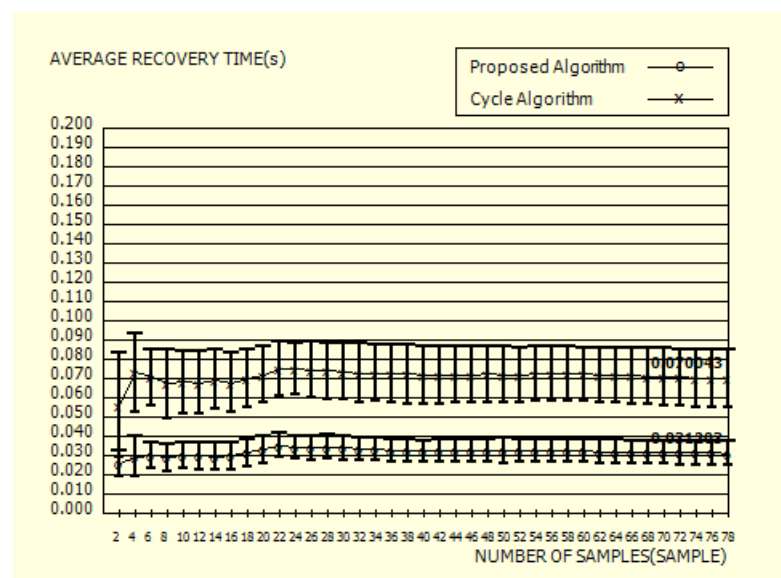
ภาพที่ 4.41.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปลายทางและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดต้นทาง เมื่อทดสอบบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 ทิศทางหรือแนวโน้มไม่ต่างไปจากเดิมมากนัก



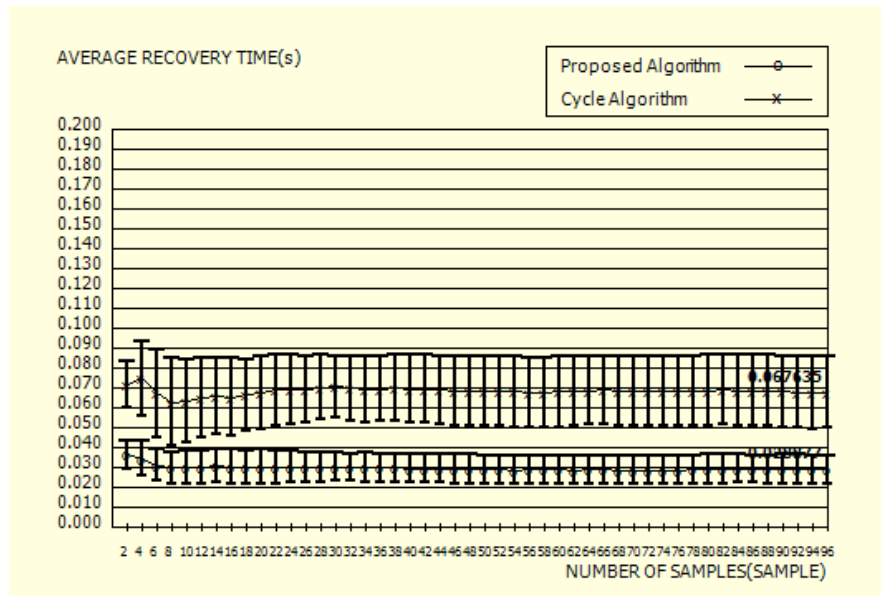
ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 2 โหนด



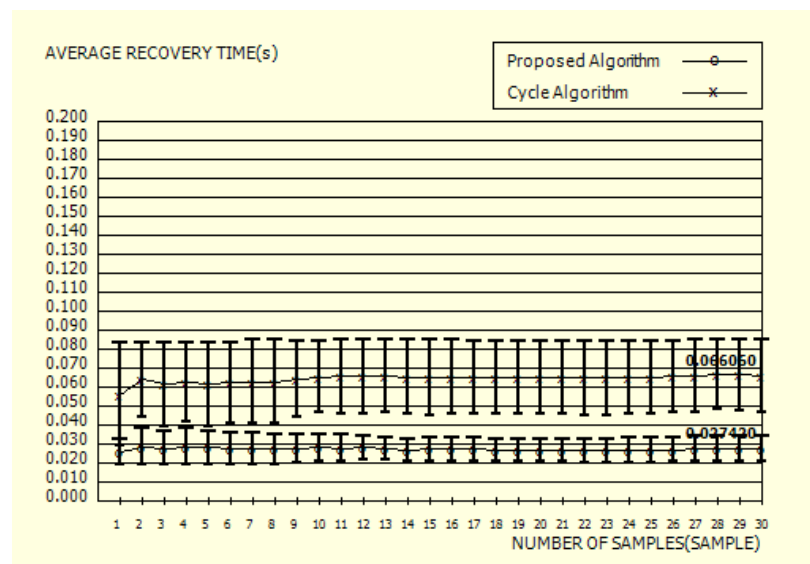
ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 3 โหนด



ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 4 โหนด

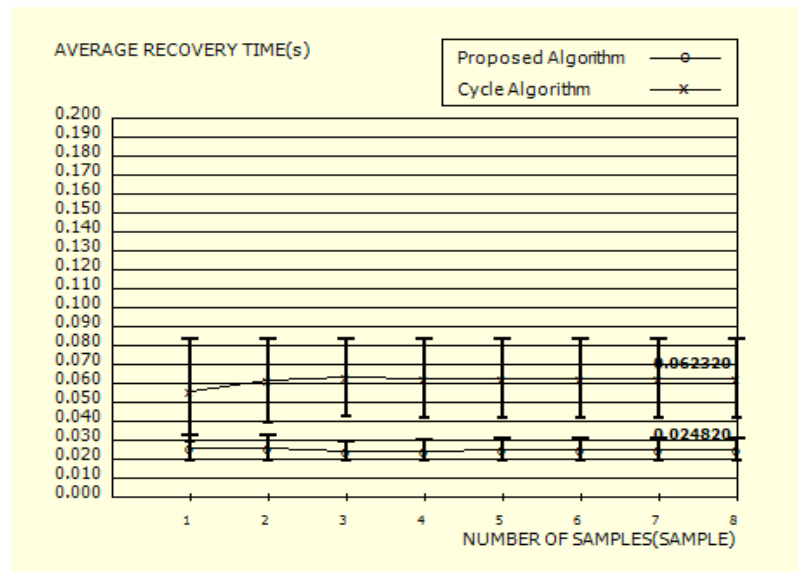


ภาพที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 5 โหนด

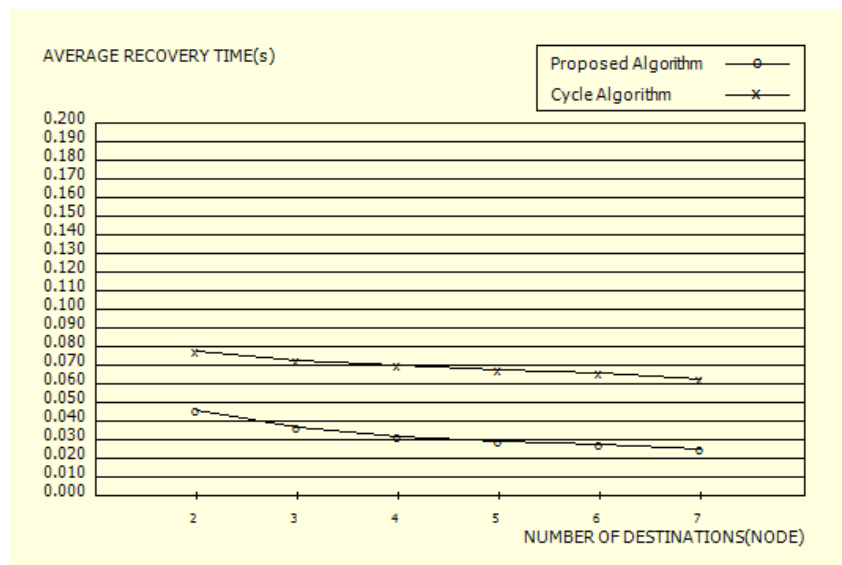


ภาพที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทาง กับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 6 โหนด

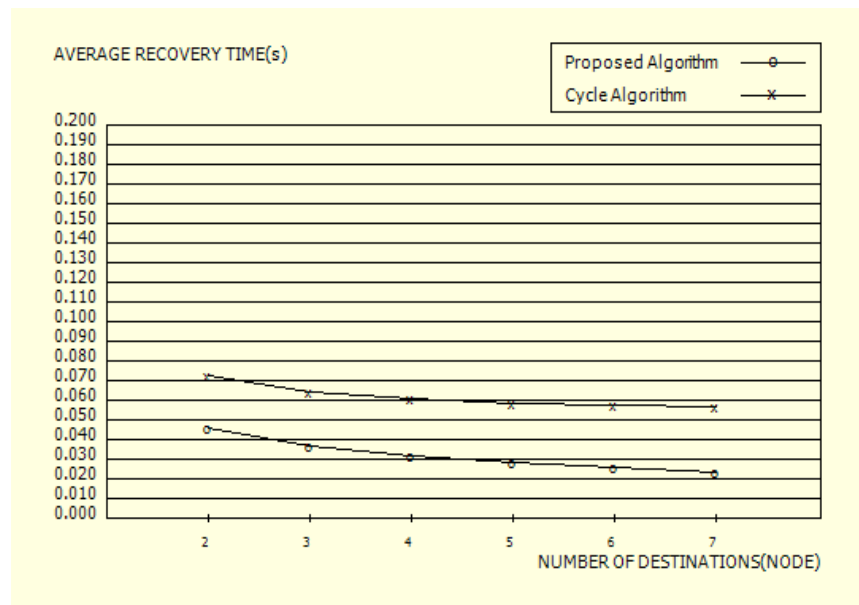




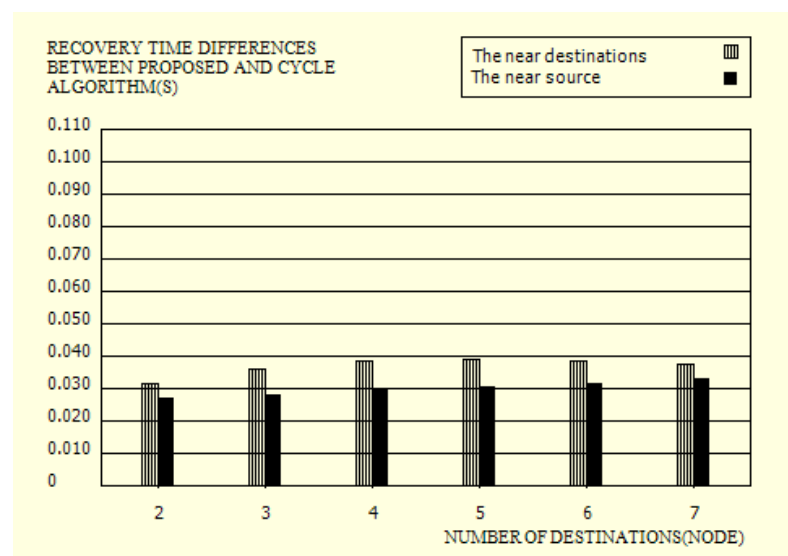
ภาพที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทาง กับจำนวนครั้งที่สุ่มบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5 เมื่อคำร้องขอต้องการโหนดปลายทาง 7 โหนด



ภาพที่ 4.41: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้อง บนโครงข่ายรูปแบบที่ 5

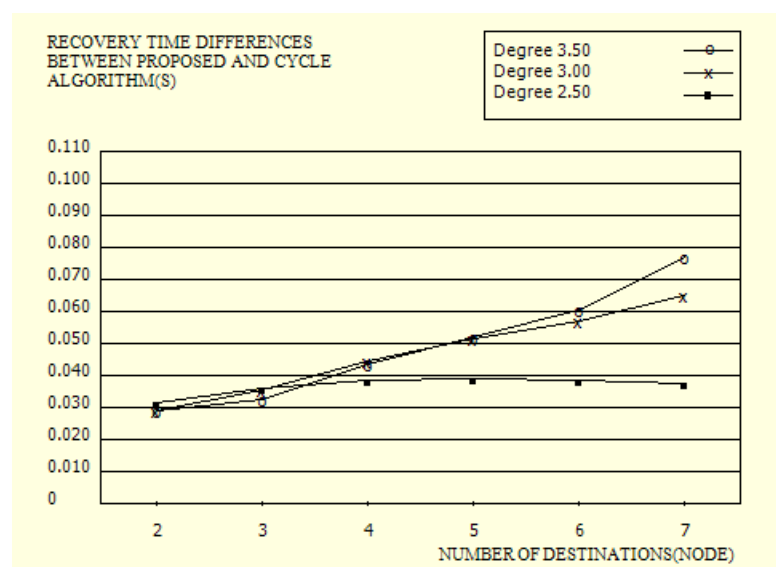


ภาพที่ 4.41.1: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้อง บนโครงข่ายรูปแบบที่ 5

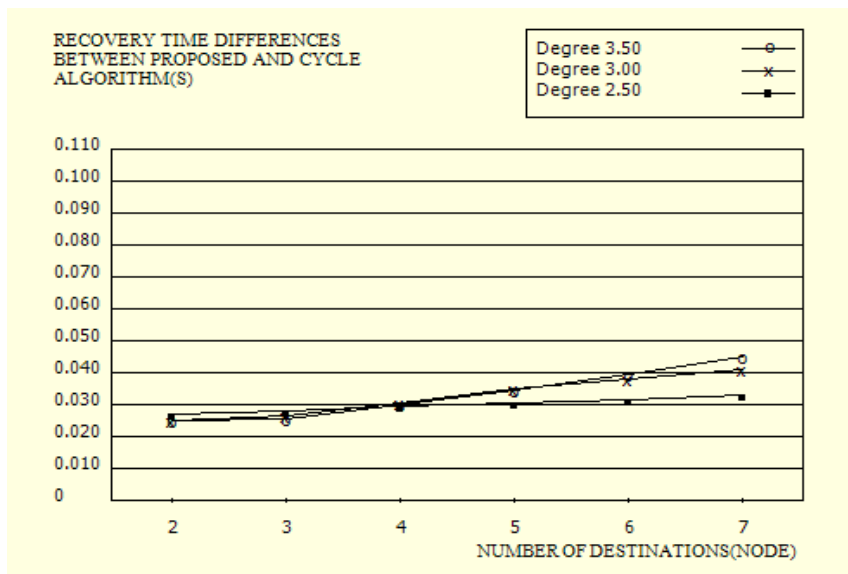


ภาพที่ 4.41.2: ความสัมพันธ์ความแตกต่างระหว่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นทั้งในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางและใกล้กับโหนดต้นทาง กับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องบนโครงข่ายรูปแบบที่ 5

จากการทดสอบผลกระทบของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นทั้งในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางและใกล้กับโหนดต้นทาง เมื่อเปลี่ยนค่าดีกรีเฉลี่ยของโหนดในระดับชั้นไอพี ดังภาพที่ 4.42 และ 4.42.1 ตามลำดับ ซึ่งจะสรุปได้ว่าเมื่อทอพอโลยีมีค่าดีกรีเฉลี่ยของโหนดต่ำลง ความแตกต่างของทั้ง 2 วิธีการจะน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งความแตกต่างนั้น จะมีอัตราการเพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบด้วยคำร้องขอที่มีจำนวนโหนดปลายทางมากขึ้น และที่สำคัญอย่างเห็นได้ชัดจน เมื่อโครงข่ายในระดับชั้นไอพีถูกลดทอนดีกรีเฉลี่ยของโหนดไปเป็นทางลดลงมากซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะโครงข่ายแบบเป็นวงแหวนที่มีขนาดไม่ใหญ่ ดังนั้นเมื่อโครงข่ายมีความหลากหลายของการเชื่อมโยงให้เล็กลง การสร้างเส้นคำร้องขอและการสร้างเส้นทางป้องกัน จึงเปรียบเสมือนถูกบังคับให้เลือกเส้นทางโดยอัตโนมัติ ส่งผลให้เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องของขั้นตอนวิธีการกู้กลับของความขัดข้องแบบวงของ [6] มาดำเนินการเข้ากับขั้นตอนวิธีการกู้กลับของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้นของ [17] ลดลง ในทางกลับกันเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทำให้ความแตกต่างของทั้ง 2 วิธีลดลง



ภาพที่ 4.42: ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอที่แปรผัน เมื่อทดสอบบนทอพอโลยีชนิดต่างๆ



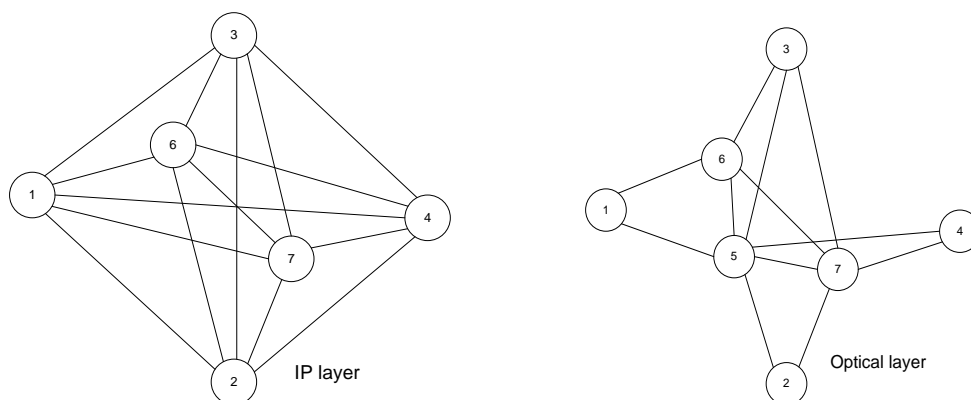
ภาพที่ 4.42.1: ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดต้นทางกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอที่แปรผันเมื่อทดสอบบนทอพอโลยีชนิดต่างๆ

#### 4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาในกระบวนการกู้กลับของความขัดข้องด้วยวิธีที่นำเสนอสำหรับมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ชนิด

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเวลาในกระบวนการกู้กลับด้วยวิธีที่นำเสนอสำหรับมัลติคาสต์กราฟฟิกทั้ง 3 ชนิด มีจุดประสงค์เพื่อวัดค่าเวลาเฉลี่ยในกระบวนการกู้กลับสำหรับกราฟฟิกแต่ละประเภทเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างโดยในการทดสอบนั้นจำเป็นต้องทดสอบบนโครงข่ายที่มีทอพอโลยีในระดับไอพีแบบมีการเชื่อมต่อทั้งถึง (fully connected) เพื่อให้สามารถทดสอบด้วยกราฟฟิกทั้ง 3 ชนิดได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี จะมีลักษณะการเชื่อมโยงจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง โดยที่โหนดปลายทางส่วนใหญ่จะไม่ได้เชื่อมต่อกับโหนดต้นทางโดยตรง ส่วนกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับออปติคอลล และกราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับออปติคอลลนั้น เป็นลักษณะการเชื่อมต่อโดยตรงระหว่างโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง

สำหรับการทดสอบนั้นจะกระทำบนโครงข่ายรูปแบบที่ 6 ดังแสดงในภาพที่ 4.43 [20] โดยที่ในระดับชั้นไอพีจะมีโหนด 6 โหนด ซึ่งจำนวนโหนดเหล่านี้จะมีการเชื่อมโยงเป็นลักษณะเชื่อมต่อกันแบบทั่วถึง ในส่วนของระดับชั้นออปติคอลลจะมีโหนดทั้งหมด 7 โหนด และการเชื่อมโยงทั้งหมด

ในระดับนี้มี 12 การเชื่อมโยง ในส่วนของความขัดข้องที่เกิดขึ้นนั้น จะทำการทดลองสุ่มของการเกิดของความขัดข้องนั้นๆ

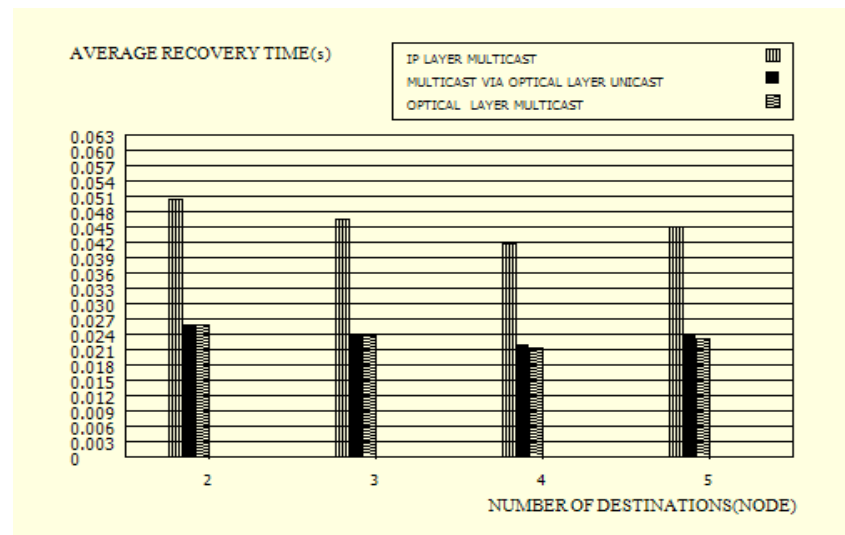


ภาพที่ 4.43: โครงข่ายทดสอบรูปแบบที่ 6

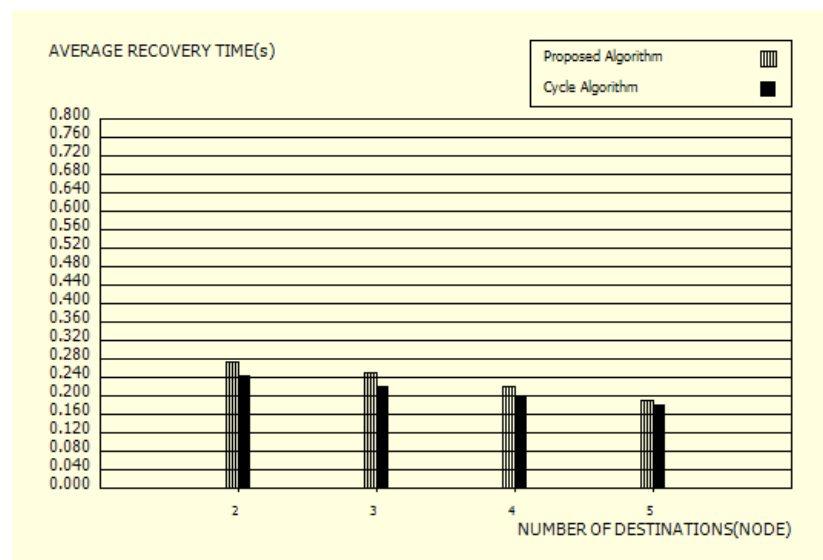
ภาพที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่ทำการสุ่ม และ ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องสำหรับทราฟฟิกทั้ง 3 รูปแบบ โดยที่การสุ่มหนึ่งครั้งจะทำการสุ่มโหนดต้นทาง 1 โหนด จากนั้นจะทำการสุ่มกลุ่มของโหนดปลายทาง ด้วยการกระจายตัวแบบเอกรูป การสร้างเส้นทางของคำร้องขอนั้นสำหรับมัลติคาสต์วิธีการส่งข้อมูลแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออฟติคอลล และมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออฟติคอลลจะมีวิธีเลือกโหนดปลายทางที่เหมือนกัน นั่นคือจะเลือกเส้นทางที่เชื่อมต่อโดยตรงกับโหนดปลายทาง ซึ่งหมายความว่าแต่ละเส้นทางจะไม่มีการผ่านอุปกรณ์จัดหาเส้นทางใดเลยสำหรับการส่งข้อมูลแบบมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพีนั้นจะเลือกเส้นทางของคำร้องขอโดยเลือกกระยะฮอปที่ห่างจากโหนดต้นทางในระดับชั้นไอพีเท่ากับ 2 ฮอป นอกจากนี้ทุกการสุ่มคำร้องขอ ยังจำเป็นต้องตรวจสอบทางเดินข้อมูลไม่ให้เกิดการวน (loop)

ภาพที่ 4.44 แสดงเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องของมัลติคาสต์ทั้ง 3 ชนิด เมื่อแปรผันจำนวนโหนดปลายทางจาก 2 โหนดถึง 5 โหนด จะเห็นได้ว่าทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับไอพี จำเป็นต้องใช้เวลาในการกู้กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า ทราฟฟิกทั้ง 2 ชนิด ซึ่งนั่นเป็นเพราะว่า การกู้กลับของของทราฟฟิกแบบระดับชั้นไอพี หรือเรียกว่าเป็นกู้กลับบนระดับชั้นไอพี ต้องอาศัยการในการกระตุ้น (trigger) การเชื่อมต่อภายใน (cross-connection) ใหม่ เนื่องจากเส้นทางป้องกันหรือเส้นทางสำรองของระดับชั้นไอพี ต้องมีการเปลี่ยนพลังงานระหว่างระดับชั้น เนื่องจากเส้นทางเดินแสงที่จะเป็นจริงนั้น เป็นการเดินทางในการเชื่อมโยงในระดับชั้นออฟติคอลลเท่านั้น และจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการกระจายตัวของคำร้องขอสูงขึ้น เวลาเฉลี่ยที่

ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องจะลดลงตามลำดับ นั้นเป็นเพราะว่าโครงสร้างของวงแหวนมีขนาดเล็กลง



ภาพที่ 4.44: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องของมัลติคาสต์ประเภททราฟฟิกทั้ง 3 ชนิดเทียบกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอ



ภาพที่ 4.45: ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องของมัลติคาสต์ประเภททราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออกพติคอลเทียบกับจำนวนโหนดปลายทางของคำร้องขอเมื่อใช้รูปแบบการทำงานการป้องกันในรูปแบบที่ใช้ในการกำหนดให้ (dedicated)

ภาพที่ 4.45 แสดงเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักเก็บของความขัดข้องของชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออกพติคอลเท่านั้น เนื่องจากประเภทรูปภาพทั้ง 2 ชนิด จะมีลักษณะแนวโน้มตามภาพที่ 4.44 เมื่อแปรผันจำนวนโหนดปลายทางจาก 2 โหนดถึง 5 โหนดจะเห็นได้ว่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกักเก็บของความขัดข้องของขั้นตอนวิธีการกักเก็บของความขัดข้องแบบวงของ [6] มาดำเนินการเข้ากับขั้นตอนวิธีการกักเก็บของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้นของ [17] นั้นมีค่าของเวลาลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนเนื่องจากเป็นเพราะว่าในกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องแบบเฉพาะส่วน เวลาในการแจ้งประกาศ ( $t_{FN}$ ) ของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ นั้น จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีการกักเก็บของความขัดข้องแบบวงของ [6] มาดำเนินการเข้ากับขั้นตอนวิธีการกักเก็บของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้นของ [17] ซึ่งในกระบวนการที่นำมาเปรียบเทียบนั้น เป็นการทำงานการป้องกันในรูปแบบที่ใช้ในการกำหนดให้ (dedicated) หรือที่เรียกว่ารูปแบบ (1+1) ที่ไม่ต้องใช้เวลาในการปรับเปลี่ยน (configuration) หรือคำนวณเวลาต่างๆ ซึ่งต่างจากขั้นตอนวิธีที่นำเสนอเนื่องจากต้องมีค่าของเวลาในการแจ้งประกาศไปยังกลุ่มโหนดปลายทางที่ไม่ได้รับผลกระทบเพื่อที่จะให้มีการตอบสนองเริ่มกระบวนการเส้นทางป้องกันขึ้น

สุดท้ายยังต้องใช้เวลาในการตรวจสอบการระบุตัวตน (ID) ของโหนดปลายทางสุดท้ายที่ได้รับผลกระทบในส่วนของคุณภาพที่ประกาศความขัดข้องนั้นๆ ในกรณีที่ระยะฮอปสั้นที่สุดที่มีระยะฮอปมากกว่า 1 ฮอป

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ที่ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการกักเก็บของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้น เพื่อป้องกันความขัดข้องที่อาจส่งผลกระทบต่อกราฟฟิคนิคมัลติคาสต์หนึ่งเซสชัน เช่น ความขัดข้องที่เกิดกับเส้นใยแก้วนำแสง อุปกรณ์เชื่อมวงจรแสง หรือ อุปกรณ์จัดหาเส้นทาง โดยที่การออกแบบจะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก นั่นคือ การออกแบบเพื่อรองรับความขัดข้อง และการออกแบบกระบวนการกักเก็บของความขัดข้องให้มีความเหมาะสมที่สุด สำหรับส่วนแรก การออกแบบจะใช้หลักการ “Dual-Tree Approach” ในการสร้างเส้นทางป้องกันที่สามารถหลบหลีกผลกระทบจากความขัดข้องที่ได้กล่าวข้างต้นได้ นอกจากนี้จากการแบ่งหน้าที่การทำงานตามหลักการขั้นตอนการค้นหาค่าความขัดข้องร่วมกันหลายระดับ ทำให้กระบวนการกักเก็บของความขัดข้องมีแบบแผนที่แน่นอน ทำให้การกักเก็บของความขัดข้องในแต่ละระดับชั้นนั้นไม่รบกวนซึ่งกันและกัน หรือขัดขวางการกักเก็บของความขัดข้องต่อกัน

สำหรับการออกแบบการกักเก็บของความขัดข้องที่ให้ความเหมาะสมที่สุดนั้น ผู้วิจัยจะใช้หลักการทั้งการทำงานร่วมกันหลายระดับชั้นโดยการเพิ่มวิธีในการตรวจสอบความขัดข้องเพื่อการระบุที่ตั้งของความขัดข้องที่เกิดขึ้นอย่างแท้จริง และพิจารณาการออกแบบวิธีการกักเก็บของความขัดข้องภายในระดับชั้น ซึ่งสามารถทำให้เวลาที่ใช้ในการกักเก็บลดลง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญและมีความจำเป็นในการรองรับการให้บริการโครงข่ายความเร็วสูง

จากผลการทดลองพบว่า ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีในระดับชั้นไอพีนั้น จะส่งผลกระทบมากกว่าการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีในระดับชั้นออกพัตคอลล นั่นคือ การลดดีกรีเฉลี่ยของโหนดในทอพอโลยีของระดับชั้นไอพี จะทำให้ความแตกต่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้การกักเก็บของความขัดข้องที่เกิดขึ้นทั้งในบริเวณใกล้เคียงกับโหนดปลายทางและบริเวณใกล้เคียงกับโหนดต้นทางมีทิศทางลดลงอย่างเห็นได้ชัด นั่นอาจสรุปได้ว่า วิธีการที่ได้นำเสนอไม่เหมาะสมในการใช้กับทอพอโลยีที่มีดีกรีเฉลี่ยของโหนดในระดับชั้นไอพีต่ำ เนื่องจากการลดเส้นทางเดินแสงของระดับชั้นไอพีลงนั้นเปรียบเสมือนบังคับโครงสร้างในการกระจายคำร้องขอ ซึ่งทำให้การกระจายตัวของคำร้องขอไม่มีความหลากหลาย ซึ่งจะส่งผลต่อลักษณะวงแหวนที่ได้หลังจากการสร้างเส้นทางป้องกันนั้นมีขนาดใหญ่แต่ไม่ได้มีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับโครงข่ายรูปแบบที่ 3 ซึ่งมีวิธีการในการสร้างโครงข่ายแบบวงโดยการลดจำนวนเส้นใยนำแสง ในทางตรงกันข้ามความแตกต่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกั



กลับของความขัดข้องที่เกิดขึ้น ทั้งในบริเวณใกล้กับโหนดปลายทางและบริเวณใกล้กับโหนดต้นทางจะเห็นผลที่ได้ชัดเจนเมื่อทอพอโลยีในระดับชั้นออฟติคอลลดลง นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าขั้นตอนวิธีที่น่าเสนอนั้นจะใช้เวลาในการกู้กลับของความขัดข้องน้อยกว่าขั้นตอนวิธีการกู้กลับของความขัดข้องแบบวงของ [6] มาดำเนินการเข้ากับขั้นตอนวิธีการกู้กลับของความขัดข้องร่วมกันหลายระดับชั้นของ [17] แต่ถ้าเส้นทางป้องกันใช้ในรูปแบบที่ใช้ในการกำหนดให้ (dedicated) นั้นส่งผลให้เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของความขัดข้องของขั้นตอนวิธีที่นำมาเปรียบเทียบนั้นลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

สุดท้ายนี้ ประเภทของมัลติคาสต์ทราฟฟิกได้ถูกทดสอบ เพื่อวัดเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการกู้กลับของขัดข้องเทียบกัน โดยผลการทดลองพบว่าการกู้กลับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นไอพี ใช้เวลามากกว่าการกู้กลับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านวิธีการส่งแบบยูนิคาสต์ในระดับชั้นออฟติคอลล และทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ผ่านระดับชั้นออฟติคอลล ในทุกกรณีของจำนวนโหนดปลายทาง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการออกแบบการป้องกันร่วมกันหลายระดับชั้นในงานวิจัยนี้ ยังขาดการพิจารณาร่วมในส่วนของการจองความจุสำรองร่วมกัน ซึ่งอาจจะเป็นเงื่อนไขสำคัญต่อการออกแบบโครงข่ายในยุคปัจจุบันให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

2. ในการทดสอบนั้นยังขาดการพิจารณาในการสำรองขอเข้ามาพร้อมกันมากกว่า 1

## รายการอ้างอิง

- [1] L.Liao, L. Li and S. Wang, Multicast protection scheme in survivable WDM optical networks, *Journal of Network and Computer Applications* 31, 3 (2008): 303-316.
- [2] C. Wang, S. Wang, and C. Chen, Partial multicast protection in WDM networks, *The 9th International Conference on Advanced Communication Technology* (2007): 1559-1563.
- [3] A.Fei, J.Cui, M.Gerla and D.Cavendish A Dual-tree Scheme for Fault-Tolerant Multicast, *IEEE International Conference on Communications* 3 (2001): 690-694,
- [4] Hwang, I. S., Cheng, R. Y., Tseng, W. D, A novel dynamic Multiple Ring-based Local Restoration for point-to-multipoint multicast traffic in WDM mesh networks, *Photonic Network Communications* 14 (2007): 23-33.
- [5] K. Mochizuki, M. Shimizu and S. Yasukawa, Multicast tree algorithm minimizing the number of fast reroute protection links for P2MP-TE networks, *IEEE Global Telecommunication Conference, GLOBECOM'06* (2006): 1-5
- [6] A.S-W.Tam, K.Xi and H.J.Chao, A Fast Reroute Scheme for IP Multicast *IEEE Conference, GLOBECOM* (2009).
- [7] M. Shand and S. Bryant, IP fast reroute framework, Internet-Draft-draft-ietf-rtgwg-ipfrr-framework-08.txt Feb, (2008).
- [8] P.D. et al., Resilience in Multilayer Networks, *IEEE Communication Magazine* 37, 8 (1999): 70-76.
- [9] M. Pickavet and Others, Recovery in Multilayer Optical Networks, *Journal of Light Wave Technology* 24, 1 (2006).
- [10] P. Cholda and A. Jajszczyk, Recovery and Its Quality in Multilayer Networks, *Journal of Lightwave Technology* 28, 4, (February 2010).
- [11] P. Chiewchara. *Static Multi-Layer for Multicast Traffic*. Master's Thesis, Faculty of Engineering Chulalongkorn University, 2008

- [12] M. Jeong, C.Qiao, Y. Xiong, H. C. Cankaya and M. Vandenhoute. Tree-shared Multicast in Optical Burst-Switched WDM Networks, *Journal of Lightwave Technology* 21, 1 (January 2003): 13-24.
- [13] B. Rajagoplan, D. Pendarakis, D. Saha, R.S. Ramamoorthy, and K. Bala. IP over Optical Network: Architectural aspects, *IEEE Commun. Mag* 38, 9, (2000): 94-102
- [14] B. Fenner, M. Handley, H. Holbrook, and I. Kouvelas, Protocol independent multicast -sparse mode (PIM-SM): Protocol specification (revised) RFC 4601, (Aug. 2006).
- [15] A. Atlas, A. Zini, Basic Specification for IP Fast Re-route: Loop-Free-Alternates, IETF RFC 5286. (September 2008).
- [16] W.D.Grover, Mesh-Base Survivable Networks Options and Strategies for Optical, MPLS, SONET and ATM Networking. *Prentice Hall*, (2004).
- [17] Yang Qin, Lome Mason and Ke Jia, Study on a Joint Multiple Layer Restoration Scheme for IP over WDM Networks. *IEEE Network*, (March/April 2003): 4348.
- [18] A. Autenrieth, Recovery Time Analysis of Differentiated Resilience in MPLS, in *Proc. DRCN 2003, Banff, Alberta, Canada* (Oct. 2003): 333–340.
- [19] Y.Liu, D.Tipper, and K. Vajanapoom “Spare Capacity Allocation in Two-Layer Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communication* 25, 5 (June 2007).
- [20] A. Capone, G. Carello and R. Matera, Multi-layer Network Design with Multicast Traffic and Statistical Multiplexing in Global Telecommunication Conference, *IEEE GLOBECOM 2007*, (2007): 2565-2570.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูล SRLG ของโครงข่ายแต่ละรูปแบบ

ข้อมูล SRLG ของแต่ละโครงข่าย เป็นข้อมูลที่ใช้ประกอบเพื่อการออกแบบเส้นทางป้องกันในระดับชั้นไอพี เพื่อให้เส้นทางเหล่านั้นไม่ถูกผลกระทบจากความขัดข้องที่พิจารณา โดยข้อมูลนี้จะแสดงในรูปแบบกลุ่มของการเชื่อมโยงในระดับชั้นออปติคัล ที่ใช้เพื่อสร้างการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพี ซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 1-6

ตารางที่ 1: ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 1

IP link	1-2	1-5	1-8	2-4	2-10	4-5	4-10	4-13	5-6	6-8	6-13	8-10	8-13	10-13
1-2	X	X			X									
1-5	X	X		X	X	X								
1-8			X											
2-4		X		X										
2-10	X	X			X									
4-5		X				X								
4-10							X	X						X
4-13							X	X						X
5-6									X					
6-8										X				
6-13											X			
8-10												X	X	
8-13												X	X	
10-13							X	X						X

ตารางที่ 2: ตารางข้อมูล SRLG ของการเชื่อมโยงในระดับชั้นไอพีบนโครงข่ายรูปแบบที่ 2

IP link	1-2	1-5	1-8	2-4	2-10	4-5	4-10	4-13	5-6	6-8	6-13	8-10	8-13	10-13
1-2	X	X												
1-5	X	X		X	X	X		X						
1-8			X											
2-4		X		X	X									
2-10		X		X	X									
4-5		X				X		X						
4-10							X							
4-13		X				X		X	X		X			
5-6								X	X					
6-8										X				
6-13								X			X			
8-10												X	X	X
8-13												X	X	X
10-13												X	X	X







## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจุมพล สุขวัฒนานุกิจ เกิดวันที่ 4 พฤษภาคม พ.ศ. 2529 จังหวัดชลบุรี เป็นบุตรของ นายอึ้ง และนางบุญธรรม สุขวัฒนานุกิจ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในปีการศึกษา 2552 ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สังกัดห้องปฏิบัติการโทรคมนาคม

### บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

J. Sukwattananukit and C. Saivichit. Analysis of Recovery Time in Multi-layer Network Recovery for Multicast Traffic, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34 (EECON-34), ชลบุรี, 28 พฤศจิกายน-2 ธันวาคม, 2554