

## โครงการวิจัยย่อยลำดับที่ 13

เรื่อง การศึกษาโดยวิฤตเกี่ยวกับความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายสื่อสาร ปีที่ 3 : การเฝ้าระวังและจัดการโครงข่ายเพื่อลดผลกระทบจากความเสียหายในอนาคด

ผู้รับผิดชอบโครงการ อ.ดร.ชัยเชษฐ สายวิจิตร

### โครงการงานวิจัยที่น่าสนใจ

โดยโครงการจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ซึ่งในสองส่วนแรกจะกล่าวถึงโครงข่ายที่มีข่ายเชื่อมโยง และส่วนสุดท้ายนี้จะทำการศึกษาโครงข่ายไร้สาย ซึ่งจะนำโครงข่าย Ad Hoc มาทำการศึกษาด้านการใช้พลังงานของโครงข่ายซึ่ง มีหัวข้อดังนี้

1. การเฝ้าระวังและจัดการโครงข่ายเพื่อลดผลกระทบจากความเสียหายในอนาคด ในส่วนแรกเป็นการปรับปรุงวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก ด้วยกัน 4 วิธีคือ การเสนอการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่ การปรับค่าถ่วงน้ำหนักให้เปลี่ยนตามเวลา การใช้ข้อมูลมากกว่าหนึ่งชนิดข้อมูลร่วมกันในการตรวจจับความผิดปกติ และการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาร่วมกับการใช้ข้อมูลมากกว่าหนึ่งชนิดข้อมูลในการตรวจจับความผิดปกติ อีกทั้งยังวิเคราะห์ถึงผลของขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติที่มีผลต่อความแน่นอนในการตรวจจับความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นในอนาคด โดยการใช้โปรแกรม NS (Network Simulator) ในการก่อเกิดกราฟฟิกและทดลองในการตรวจจับความผิดปกติในส่วนที่สองทำการวิเคราะห์ผลของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบทันทีทันใด โดยใช้กราฟฟิกที่ได้จากโครงข่ายของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่รูทเทอร์ 7513 และนำเสนอการเลือกใช้เกณฑ์ในการบอกว่าระบบโครงข่ายเกิดความผิดปกติหรือไม่ด้วยกัน 2 วิธี คือ การเลือกใช้ค่ากลางของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด และการเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด ในส่วนที่สามใช้วิธีการตรวจจับความผิดปกติของการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก และเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ร่วมกัน โดยใช้กรรมวิธีการของพีซี ในการตัดสินใจว่าในขณะที่นั้นเกิดความผิดปกติหรือไม่โดยใช้กราฟฟิกที่ได้จากโครงข่ายของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่รูทเทอร์ 7513

ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการที่น่าสนใจการปรับปรุงวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายนั้นจะให้ผลดีกว่าวิธีการเดิมในบางขนาดหน้าต่างในส่วนนี้จะทำการออกแบบวิธีในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายก่อนที่ระบบโครงข่ายจะเกิดความเสียหายในกรณีหนึ่ง โหนด และเสนอวิธีในการลดความผิดพลาดของสัญญาณเตือน เนื่องจากผลกระทบของสัญญาณเตือนของโนดข้างเคียง ในกรณีระบบโครงข่ายมีตัวตรวจจับหลายๆ โหนด

2. การพัฒนาอัลกอริธึมการจัดสรรเส้นทางในโครงข่ายแอคฮอทบนพื้นฐานประสิทธิภาพของพลังงาน : งานวิจัยนี้นำเสนอ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางบนพื้นฐานประสิทธิภาพของพลังงานสำหรับโครงข่ายแอคฮอท เพื่อให้โครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานนานที่สุด ใน

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางขึ้นมา 3 โพรโทคอล โพรโทคอลแรกที่น่าสนใจคือโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด โดยมีเป้าหมายทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่นำเอาพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากทั้งการส่ง การรับ และการไต่ฮันจากแบบจำลองการใช้พลังงานของ โหนด รวมทั้งผลกระทบของการใช้พลังงานเนื่องจากคุณภาพของช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาใช้ในการกำหนดค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทาง แบบที่สองเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อรักษาสมดุลในการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของ โหนดในโครงข่าย โดยการพยายามเลือกเส้นทางที่ประกอบด้วย โหนดที่มีอายุการใช้งานที่อยู่ในระดับสูง ซึ่งวิธีการที่น่าสนใจนี้ได้กำหนดวิธีการคำนวณอายุการใช้งานของ โหนดขึ้นมาใหม่เพื่อให้มีความแม่นยำในการประมาณแทนที่จะใช้เฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่ แต่จะพิจารณาถึงพลังงานที่ โหนดจะต้องใช้ในการส่งแพ็กเก็ตที่อยู่ในบัฟเฟอร์ นอกจากนี้ยังรวมถึงพลังงานที่ โหนดจะต้องใช้เพื่อรองรับการสื่อสารที่ โหนดค้นทางร้องขอมา ซึ่งโพรโทคอลที่น่าสนใจนี้สามารถที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานของ โครงข่ายได้อย่าง ชัดเจนและโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบสุดท้ายที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้คือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม โดยการนำเอาข้อดีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุดที่น่าสนใจมาพิจารณาเข้าด้วยกัน เพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานได้นานที่สุด โดยโพรโทคอลนี้เลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด และขณะเดียวกันก็เป็นเส้นทางที่ประกอบด้วย โหนดในโครงข่ายที่มีอายุการใช้งานในระดับที่สูง ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมจะให้ประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานและคุณภาพการให้บริการดีที่สุด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเฝ้าระวังและจัดการโครงข่ายเพื่อลดผลกระทบจากความเสียหายในอนาคต

## 1.วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย (*Network Anomaly*) ก่อนที่ระบบโครงข่ายจะเกิดความเสียหาย และนำเสนอวิธีลดจำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาด (*False Alarm*) ใน โหนด วิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายที่น่าเสนอนี้ จะใช้ข้อมูลร่วมจากหลายๆส่วนมาใช้พิจารณาร่วมกันเพื่อใช้ลดความผิดพลาดของสัญญาณเตือน และสามารถรู้ได้ว่าความผิดปกติของระบบโครงข่ายเกิดมาจากตำแหน่งใด โดยจะส่งผลให้ผู้ดูแลระบบโครงข่าย (*Network Administrator*) รับผิดชอบและแก้ไขปัญหาของระบบโครงข่ายที่เกิดขึ้นก่อนที่ความเสียหายจะเกิดขึ้น

## 2.การปรับปรุงวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก

ในหัวข้อที่ 2 นั้นเราได้มีการนำเสนอเนื้อหาทางทฤษฎีของการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการนี้นั้นค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าคงที่ตลอดเวลาและใช้ข้อมูลเพียง 1 ชนิด ในการตรวจจับความผิดปกติ ถ้าเราทำการเปลี่ยนให้วิธีการตรวจจับความผิดปกตินี้มีการเปลี่ยนแปลงค่าถ่วงน้ำหนักตามเวลา และใช้ชนิดข้อมูลมากขึ้นในการตรวจจับความผิดปกติ น่าจะให้ผลที่ดีกว่าวิธีการดั้งเดิม ดังนั้นเราจึงเสนอการปรับปรุงการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่โดยใช้ผลรวมของค่าสมบรูณ์ของความแตกต่างของข้อมูล 2 วัน และนำวิธีการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมและการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่มาปรับปรุงใช้กับวิธีการที่เรานำเสนอ 3 วิธีคือ

1. การปรับค่าถ่วงน้ำหนักให้เปลี่ยนตามเวลา
2. การใช้ข้อมูลมากกว่าหนึ่งชนิดข้อมูลร่วมกันในการตรวจจับความผิดปกติ
3. การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาร่วมกับการใช้ข้อมูลมากกว่าหนึ่งชนิด

ข้อมูลในการตรวจจับความผิดปกติ

อีกทั้งยังวิเคราะห์ถึงผลกระทบของขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติซึ่งมีผลต่อความแน่นอนในการตรวจจับความผิดปกติที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

เนื้อหาในหัวข้อที่ 3 นี้จะแบ่งเป็น 3 ส่วน ในส่วนที่ 1 เกี่ยวข้องกับวิธีการที่เราเสนอในการปรับปรุงวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก ส่วนที่ 2 แสดงถึงดัชนีชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของวิธีตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย ส่วนที่ 3 จะแสดงถึงผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

### 2.1 วิธีการที่เราเสนอในการปรับปรุงวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก

จากวิธีการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก ที่กล่าวมานั้นเราจึงได้มีการเสนอการปรับปรุงการตรวจจับความผิดปกติของวิธีการนี้ดังนี้



### 2.1.1 การปรับเปลี่ยนการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่

วิธีการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่นั้นจะใช้สมมุติฐานที่ว่าถ้าผลรวมของผลต่างของค่าเฉลี่ยกราฟฟิกของวันที่  $i$  และ กราฟฟิกวันที่  $j$  ภายในช่วงเวลาหนึ่งมีค่าน้อยแสดงว่าลักษณะของกราฟฟิกระหว่างสองวันนี้มีลักษณะคล้ายกันมาก ดังนั้นค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างวันที่ทั้งสองนี้จะมีค่ามาก ซึ่งการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่แสดงดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$c_{m,n} = \sum_{t=1}^T |\alpha_m(t) - \alpha_n(t)| \quad (2.1)$$

$$c_{m,n}' = \frac{1/c_{m,n}}{\sum_{i \neq m} 1/c_{m,i}} \quad (2.2)$$

โดยที่  $c_{m,n}'$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของวันที่  $m$  กับวันที่  $n$

$\alpha_m(t)$  คือ ค่าเฉลี่ยของกราฟฟิกของวันที่  $m$  ที่เวลาที่  $t$

$\alpha_n(t)$  คือ ค่าเฉลี่ยของกราฟฟิกของวันที่  $n$  ที่เวลาที่  $t$

$T$  คือ เวลาทั้งหมดของข้อมูลในแต่ละวัน

$N$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดใน 1 หน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ

$D$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดใน 1 วัน

ซึ่งค่า  $T$  นั้นสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2.3)

$$T = \frac{D}{N} \quad (2.3)$$

ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่ที่น่าเสนอน่าจะให้ผลของประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติดีกว่าค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิม เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมมีความคลาดเคลื่อนที่มากถ้ากราฟฟิกของวันที่ต้องการทำนายมีค่ามากกว่าวันที่ต้องการใช้เทียบ แต่วิธีการของการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่สามารถแก้ปัญหาในกรณีนี้ได้

### 2.1.2 การปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมและแบบใหม่ให้เปลี่ยนแปลงตามเวลา

เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมและแบบใหม่ของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกมีค่าคงที่ ดังนั้นเราจึงมีแนวคิดที่ว่าถ้าเราทำให้ค่าถ่วงน้ำหนักทั้งแบบเดิมและแบบใหม่สามารถเปลี่ยนแปลงตามเวลาของหน้าต่างในการตรวจจับความผิดปกติที่เปลี่ยนไป น่าจะให้ผลของประสิทธิภาพการตรวจจับความผิดปกติที่ดีกว่า ดังนั้นการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมเปลี่ยนตามเวลาแสดงดังสมการ (2.4) และ (2.5)

$$c_{m,n}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_{m,i}(t)}{\alpha_{n,i}(t)} \quad (2.4)$$

$$c_{m,n}'(t) = \frac{c_{m,n}(t)}{\sum_{i \neq m} c_{m,i}(t)} \quad (2.5)$$

ส่วนการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแสดงดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)

$$c_{m,n}(t) = \sum_{i=1}^N |\alpha_{m,i}(t) - \alpha_{n,i}(t)| \quad (2.6)$$

$$c_{m,n}'(t) = \frac{1/c_{m,n}(t)}{\sum_{i \neq m} 1/c_{m,i}(t)} \quad (2.7)$$

โดยที่  $c_{m,n}'(t)$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของวันที่  $m$  กับวันที่  $n$  ที่เวลา  $t$

$\alpha_{m,i}'(t)$  คือ ค่าเฉลี่ยของกราฟฟิกของวันที่  $m$  ของชุดข้อมูลตำแหน่งที่  $i$  ที่เวลาที่  $t$

$\alpha_{n,i}'(t)$  คือ ค่าเฉลี่ยของกราฟฟิกของวันที่  $n$  ของชุดข้อมูลตำแหน่งที่  $i$  ที่เวลาที่  $t$

### 2.1.3 การใช้ข้อมูล 3 ระดับในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

การใช้ข้อมูลเพียง 1 ชนิดในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายนั้นอาจให้ผลที่ไม่ดีนัก ถ้าความผิดปกติในระบบโครงข่ายเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่ข้อมูลที่เราใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายไม่สามารถตรวจจับได้ ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่ว่าถ้าใช้ข้อมูลหลากหลายชนิดมากขึ้นพร้อมกันในการตรวจจับความผิดปกติที่จำทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่ายดีขึ้น ในที่นี้จึงนำเสนอการใช้ข้อมูล 3 ระดับประกอบไปด้วย *ipIDE*, *ipOR* และ *ipIR* ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

ซึ่ง *ipIR* คือ จำนวนไบต์ของกราฟฟิกทั้งหมดที่เข้าสู่รูทเทอร์ในช่วงเวลาหนึ่ง

*ipOR* คือ จำนวนไบต์ของกราฟฟิกที่ผ่านจากอุปกรณ์ที่ต่อกับรูทเทอร์ เข้าสู่รูทเทอร์เพื่อส่งออกไปในช่วงเวลาหนึ่ง

*ipIDE* คือ จำนวนไบต์ของกราฟฟิกที่ผ่านจากรูทเทอร์เพื่อเข้าสู่อุปกรณ์ที่ต่อกับรูทเทอร์ในช่วงเวลาหนึ่ง

โดยเงื่อนไขที่ระบบโครงข่ายจะไม่ผิดปกติเป็นดังสมการที่ (2.8)

$$\sum_{i=1}^3 (\bar{I}_i - 2\bar{\sigma}_i) \leq \sum_{i=1}^3 I_i \leq \sum_{i=1}^3 (\bar{I}_i + 2\bar{\sigma}_i) \quad (2.8)$$

$i$  คือ จำนวนชนิดข้อมูลที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่าย

$\bar{I}$  คือ ค่าเฉลี่ยของกราฟฟีกที่ถูกทำนายโดยข้อมูลในอดีตที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

$\bar{c}$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกราฟฟีกที่ถูกทำนายโดยข้อมูลในอดีตที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

$I$  คือ ค่าเฉลี่ยของกราฟฟีกจริงที่วัดได้ที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

### 2.1.4 การใช้การปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักให้เปลี่ยนแปลงตามเวลาร่วมกับการใช้ข้อมูล 3 ระดับในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

ในส่วนนี้จะเป็นการนำวิธีการเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักตามเวลามาใช้ร่วมกับการใช้ข้อมูล 3 ระดับ ซึ่งประกอบไปด้วย  $ipOR$   $ipIR$  และ  $ipIDE$  ในการตรวจจับความผิดปกติ โดยมีแนวคิดที่ว่าถ้าเราใช้วิธีการทั้งสองพร้อมกันน่าจะทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายดีขึ้น

### 2.2 ดัชนีชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของวิธีตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

ดัชนีที่ใช้วัดประสิทธิภาพในวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปรียบเทียบกับรูปแบบกราฟฟีกประกอบด้วย 4 ดัชนีชี้วัด ดังต่อไปนี้

ความน่าจะเป็นที่จะเกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาด ( $P_f$ ) โดย

$$P_f = \frac{\text{Total number of false alarms}}{\text{Total number of data samples}} \quad (2.9)$$

ความน่าจะเป็นที่สามารถตรวจจับความผิดปกติได้ถูกต้อง ( $P_r$ ) โดย

$$P_r = \frac{\text{Total number of true alarms}}{\text{Total number of know faults}} \quad (2.10)$$

นอกจากนี้ยังมีการตรวจจับที่ผิดพลาด 2 รูปแบบคือ

- *False positive rate* คือ อัตราที่ระบบตรวจจับความผิดปกติจะตรวจจับกราฟฟีกที่ปกติว่าผิดปกติ โดยที่

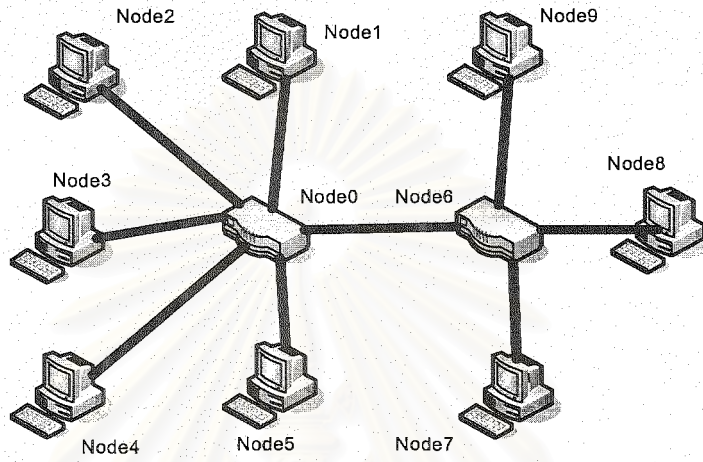
$$\text{False positive rate} = \frac{\text{Total number of false alarms}}{\text{Total number of alarms}} \quad (2.11)$$

- *False negative rate* คือ อัตราที่ระบบตรวจจับความผิดปกติจะตรวจจับกราฟฟีกที่ผิดปกติว่าปกติ โดยที่

$$\text{False negative rate} = \frac{\text{Number of undetected alarms}}{\text{Number of errors}} \quad (2.12)$$

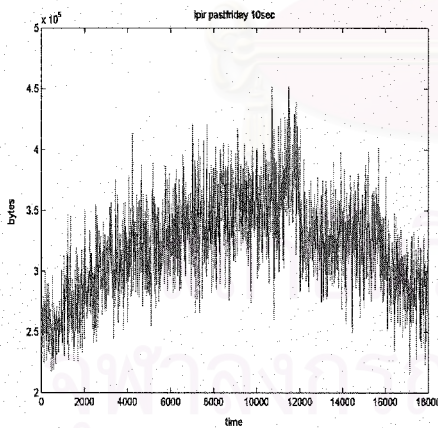
### 2.3 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

ในการทดลองนี้เราจะใช้ระบบโครงข่ายที่ประกอบไปด้วย 10 โหนด 9 ข่ายเชื่อมโยง เป็นโครงข่ายที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 2.1

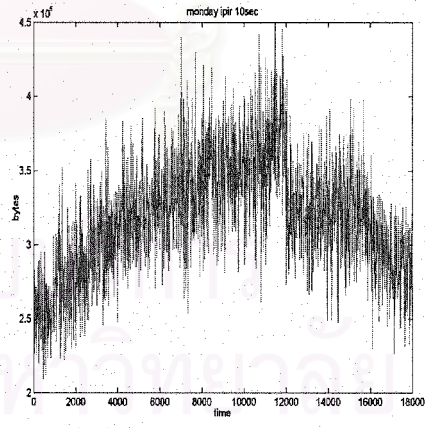


รูปที่ 2.1 ระบบโครงข่ายที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้เราจะทำการกำเนิดกราฟฟิกในระบบโครงข่ายนี้โดยใช้โปรแกรม *NS(Network Simulator)* โดยใช้การส่งข้อมูลแบบ *UDP (User Datagram Protocol)* ด้วยแบบจำลอง *On-Off* โดยที่การกระจายของการส่งข้อมูลเป็นแบบ *Exponential* จำนวนทั้งสิ้น 6 วัน จากช่วงเวลาที 0 วินาทีถึงช่วงเวลาที 18,000 วินาที ดังรูปที่ 2.2-2.19 ตามลำดับ

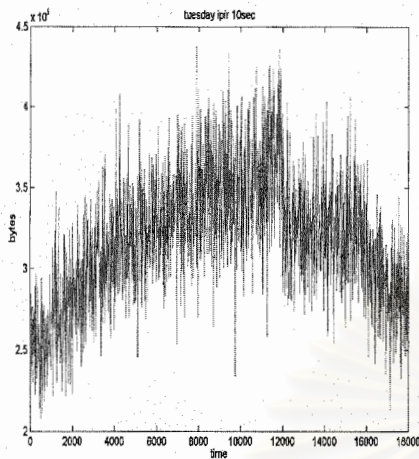


รูปที่ 2.2 ipIR PastFriday

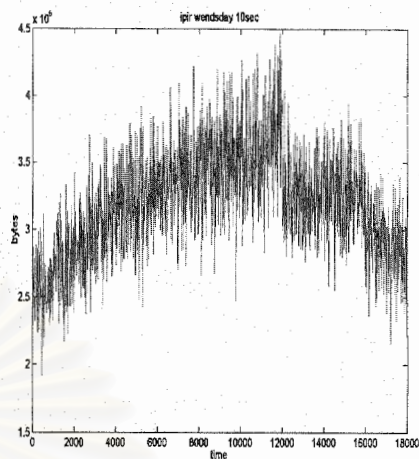


รูปที่ 2.3 ipIR Monday

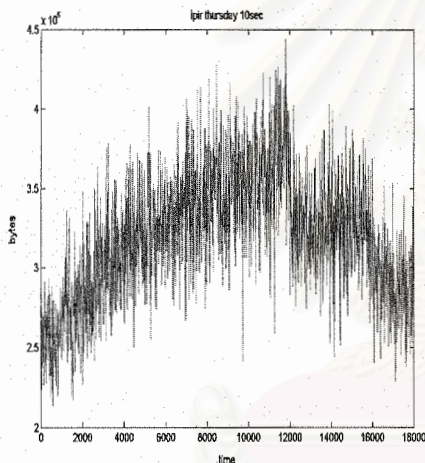




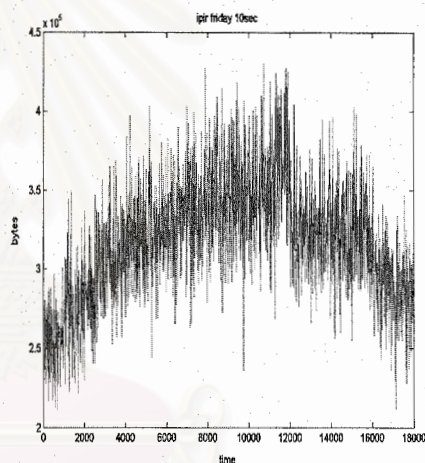
รูปที่ 2.4 ipIR Tuesday



รูปที่ 2.5 ipIR Wednesday



รูปที่ 2.6 ipIR Thursday



รูปที่ 2.7 ipIR Friday

วิธีการตรวจจับทั้งหลายที่ได้นำเสนอมานั้น ได้นำมาทดสอบใน 3 สถานการณ์ดังนี้

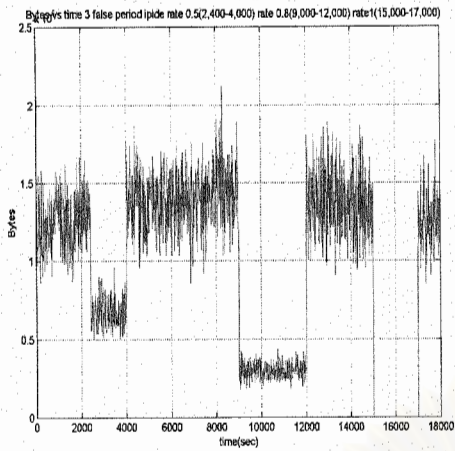
สถานการณ์ที่ 1. ไม่มีความผิดปกติเกิดขึ้นในระบบโครงข่าย

สถานการณ์ที่ 2. มีความผิดปกติเกิดขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงระหว่าง โหนด 0 และ โหนด 6 ซึ่งแพ็กเก็ตที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงนี้จะสูญหาย 50 เปอร์เซ็นต์ในช่วงเวลา (2,400-4,000) 80 เปอร์เซ็นต์ในช่วงเวลา (9,000-12,000) และ 100 เปอร์เซ็นต์ในช่วงเวลา (15,000-17,000)

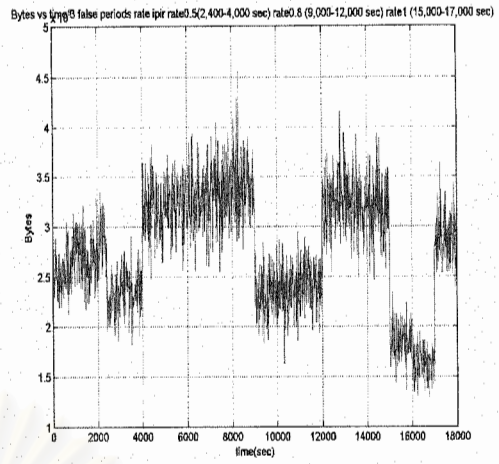
สถานการณ์ที่ 3. มีความผิดปกติเกิดขึ้นที่โหนด 0 และ โหนด 1 ที่เวลา (3,000-3,100) โดยที่โหนด 1 ส่งข้อมูลไปยังโหนด 0 มากผิดปกติในช่วงเวลานี้ และความผิดปกติเกิดขึ้นที่ทุกโหนดในกรณีที่ อัตราส่วนระหว่างช่วงเวลากการส่งและหยุดส่งที่ แต่ค่าของสองค่านี้เปลี่ยนไปในช่วงเวลา (7,000-8,000)

โดยที่ลักษณะของกราฟฟิกที่ผิดปกติของการทดลองในสถานการณ์ที่ 2 และสถานการณ์ที่ 3 แสดงดังรูปที่ 2.8-2.9 ตามลำดับ

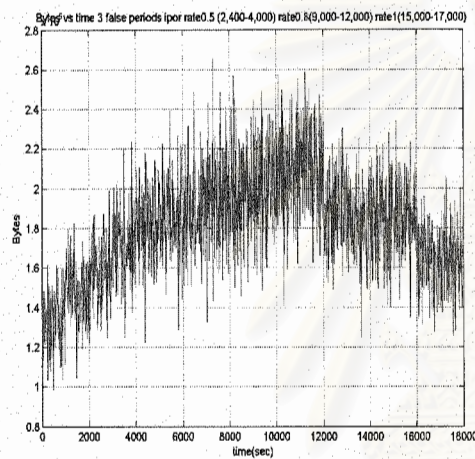




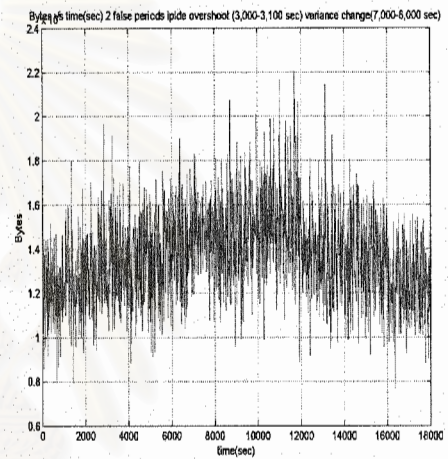
รูปที่ 2.8 กราฟฟีก *ipIDE* ในสถานการณ์ที่ 2



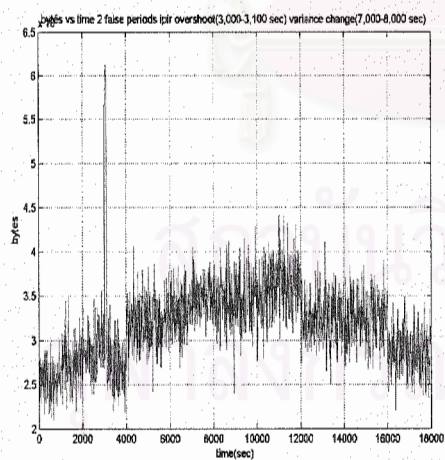
รูปที่ 2.9 กราฟฟีก *ipIR* ในสถานการณ์ที่ 2



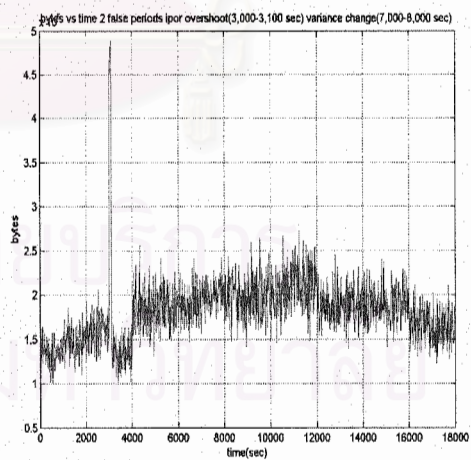
รูปที่ 2.10 กราฟฟีก *ipOR* ในสถานการณ์ที่ 2



รูปที่ 2.11 กราฟฟีก *ipIDE* ในสถานการณ์ที่ 3



รูปที่ 2.12 กราฟฟีก *ipIR* ในสถานการณ์ที่ 3



รูปที่ 2.13 กราฟฟีก *ipOR* ในสถานการณ์ที่ 3

ในการทดลองนั้นเราได้มีการกำหนดตัวแปรในการแสดงผลของแต่ละวิธีในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายดังนี้

*method1ide* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipIDE*

*method1ir* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipIR*

*method1or* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipOR*

*method2ide* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipIDE*

*method2ir* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipIR*

*method2or* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipOR*

*method3* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูล 3 ชนิดพร้อมกันคือ *ipIR ipOR* และ *ipIDE*

*method4* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูล 3 ชนิดพร้อมกันคือ *ipIR ipOR* และ *ipIDE*

*method1idenewidea* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipIDE*

*method1irnewidea* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipIR*

*method1ornewidea* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipOR*

*method2idenewidea* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipIDE*

*method2irnewidea* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipIR*

*method2ornewidea* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipOR*

*method3newidea* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูล 3 ชนิดพร้อมกันคือ *ipIR ipOR* และ *ipIDE*

*method4newidea* หมายถึง การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูล 3 ชนิดพร้อมกันคือ *ipIR ipOR* และ *ipIDE*

### 2.3.1 การทดลองการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายในสถานการณ์ที่ 1

ในการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิคนำเสนอทั้งสิ้น 16 วิธี ในสถานการณ์ที่ 1 นั้นได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2.1

<i>mlide</i>	<i>mlidenew</i>	<i>mlir</i>	<i>mlirnew</i>	<i>mlor</i>	<i>mlornew</i>	<i>m2ide</i>	<i>m2idenew</i>
0.0032	0.003	5.36E-04	<b>4.98E-04</b>	0.0026	0.0025	0.0031	0.0044
<i>m2ir</i>	<i>m2irnew</i>	<i>m2or</i>	<i>m2ornew</i>	<i>m3</i>	<i>m3new</i>	<i>m4</i>	<i>m4new</i>
5.75E-04	9.58E-04	0.0026	0.003	0.0015	0.0014	0.0015	0.0509

ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นของการเกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาด เมื่อไม่เกิดความผิดปกติในระบบโครงข่าย

จากผลการทดลอง จะเห็นว่าการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมและค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่นั้น ขนาดหน้าต่างที่สั้นลงจะมีผลให้ความน่าจะเป็นที่จะเกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดสูงขึ้น เช่นขนาดหน้าต่างที่เท่ากับ 2 และ 3 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากจำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ในการทำนายค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนมีน้อยเกินไปทำให้เกิดความผิดพลาด และแต่ละชนิดข้อมูลที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติให้ผลของประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติไม่เท่ากัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบางชนิดข้อมูลการกระจายของกราฟฟิกไม่สอดคล้องกับการทำนายกราฟฟิก ในกรณีนี้วิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipIR* ให้ผลที่ดีที่สุด

### 2.3.2 การทดลองการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายในสถานการณ์ที่ 2

ในการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกที่นำเสนอทั้งสิ้น 16 วิธี ในสถานการณ์ที่ 2 นั้นได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2.2-2.5

<i>mlide</i>	<i>mlidenew</i>	<i>mlir</i>	<i>mlirnew</i>	<i>mlor</i>	<i>mlornew</i>	<i>m2ide</i>	<i>m2idenew</i>
0.004	0.004	4.00E-03	5.10E-03	0.0039	0.0041	0.0037	0.0054
<i>m2ir</i>	<i>m2irnew</i>	<i>m2or</i>	<i>m2ornew</i>	<i>m3</i>	<i>m3new</i>	<i>m4</i>	<i>m4new</i>
4.00E-03	6.60E-03	0.0038	0.005	<b>0.0028</b>	0.003	0.053	0.0526

ตารางที่ 2.2 ค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นของการเกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาด เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบโครงข่ายในสถานการณ์ที่ 2

จากผลการทดลองขนาดหน้าต่างที่สั้นลงของการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมและการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่ จะเห็นว่าการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมและค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่นั้น ขนาดหน้าต่างที่สั้นลงจะมีผลให้ความน่าจะเป็นที่จะเกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดสูงขึ้น เช่นขนาดหน้าต่างที่เท่ากับ 2 และ 3 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากจำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ในการทำนายค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนมีน้อยเกินไปทำให้เกิดความผิดพลาด และแต่ละชนิดข้อมูลที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติให้ผลของประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติไม่เท่ากัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากบางชนิดข้อมูลการกระจายของกราฟฟิกไม่สอดคล้อง



กับการทำนายกราฟฟิค ในกรณีนี้วิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูล 3 ชนิดพร้อมกันคือ *ipIR ipOR* และ *ipIDE* ให้ผลดีที่สุด

<i>mlide</i>	<i>mlidenew</i>	<i>mlir</i>	<i>mlirnew</i>	<i>mlor</i>	<i>mlornew</i>	<i>m2ide</i>	<i>m2idenew</i>
0.9671	0.9663	9.34E-01	9.31E-01	0.006	0.0071	0.9663	<b>0.9671</b>
<i>m2ir</i>	<i>m2irnew</i>	<i>m2or</i>	<i>m2ornew</i>	<i>m3</i>	<i>m3new</i>	<i>m4</i>	<i>m4new</i>
9.34E-01	9.31E-01	0.0063	0.0094	0.8852	0.8828	0.8848	0.8831

ตารางที่ 2.3 ค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่สามารถตรวจจับความผิดปกติได้ เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบโครงข่ายในสถานการณ์ที่ 2

จากผลการทดลองจะเห็นว่า การหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมและแบบใหม่นั้น ความน่าจะเป็นที่จะตรวจจับความผิดปกติได้ ดังตารางที่ 2.3 ข้อมูลชนิด *ipOR* นั้นจะให้ความน่าจะเป็นที่จะตรวจจับความผิดปกติได้มีค่าต่ำมากเนื่องจากว่าความผิดปกติของระบบโครงข่ายเกิดขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงระหว่าง โหนด 0 และ โหนด 6 ซึ่งข้อมูลของ *ipOR* นั้นจะเก็บค่ากราฟฟิคที่ไหลจาก โหนด 1, 2, 3, 4, 5 ไปยัง โหนด 0 ในกรณีนี้วิธีวิธีการตรวจจับความผิดปกติซึ่งใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipIDE* ให้ผลดีที่สุด

<i>mlide</i>	<i>mlidenew</i>	<i>mlir</i>	<i>mlirnew</i>	<i>mlor</i>	<i>mlornew</i>	<i>m2ide</i>	<i>m2idenew</i>
3.2861	3.3663	6.61E+00	6.87E+00	99.395	99.2864	3.3663	<b>3.2861</b>
<i>m2ir</i>	<i>m2irnew</i>	<i>m2or</i>	<i>m2ornew</i>	<i>m3</i>	<i>m3new</i>	<i>m4</i>	<i>m4new</i>
6.62E+00	6.91E+00	99.3742	99.0568	11.48	11.7158	11.522	11.6876

ตารางที่ 2.4 ค่าเฉลี่ยของปริมาณของ *false negative rate* เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบโครงข่ายในสถานการณ์ที่ 2

ในส่วนของปริมาณของ *false negative rate* ของการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมและแบบใหม่ ในตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าข้อมูลชนิด *ipOR* นั้นจะให้ความผิดพลาดที่สูงมากเนื่องจากว่าความผิดปกติของระบบโครงข่ายเกิดขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงระหว่าง โหนด 0 และ โหนด 6 ซึ่งข้อมูลของ *ipOR* นั้นจะเก็บค่ากราฟฟิคที่ไหลจาก โหนด 1, 2, 3, 4, 5 ไปยัง โหนด 0 ซึ่งไม่มีความเกี่ยวข้องกัน ซึ่งถ้านำข้อมูลชนิดนี้มาตรวจจับจะเกิดความผิดพลาดอย่างมาก ในกรณีนี้วิธีวิธีการตรวจจับความผิดปกติซึ่งใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipIDE* ให้ผลดีที่สุด

<i>m1ide</i>	<i>m1idenew</i>	<i>m1ir</i>	<i>m1irnew</i>	<i>m1or</i>	<i>m1ornew</i>	<i>m2ide</i>	<i>m2idenew</i>
0.9501	0.9359	9.84E-01	1.22E+00	48.072	39.9912	0.8788	1.2034
<i>m2ir</i>	<i>m2irnew</i>	<i>m2or</i>	<i>m2ornew</i>	<i>m3</i>	<i>m3new</i>	<i>m4</i>	<i>m4new</i>
9.86E-01	1.53E+00	46.8428	36.0723	<b>0.6902</b>	0.7529	13.37	13.2639

ตารางที่ 2.5 ค่าเฉลี่ยของปริมาณของ *false positive rate* เมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบโครงข่ายในสถานการณที่ 2

จากผลการทดลอง ขนาดหน้าต่างที่สั้นลงของการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมและการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่ จะมีผลให้ปริมาณของ *false positive rate* สูงขึ้น เช่นขนาดหน้าต่างที่เท่ากับ 2 และ 3 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากจำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ในการทำนายค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนมีน้อยเกินไปส่งผลให้เกิดความผิดพลาด ในกรณีนี้การตรวจจับความผิดพลาดซึ่งใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูล 3 ชนิดพร้อมกันคือ *ipIR ipOR* และ *ipIDE* ให้ผลดีที่สุด

### 2.3.3 การทดลองการตรวจจับความผิดพลาดของระบบโครงข่ายในสถานการณที่ 3

ในการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการตรวจจับความผิดพลาดแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิที่น่าเสนอทั้งสิ้น 16 วิธี ในสถานการณที่ 3 นั้นได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2.6-2.9

<i>m1ide</i>	<i>m1idenew</i>	<i>m1ir</i>	<i>m1irnew</i>	<i>m1or</i>	<i>m1ornew</i>	<i>m2ide</i>	<i>m2idenew</i>
0.0053	0.0053	1.02E-02	1.02E-02	0.0429	0.0433	0.0052	0.007
<i>m2ir</i>	<i>m2irnew</i>	<i>m2or</i>	<i>m2ornew</i>	<i>m3</i>	<i>m3new</i>	<i>m4</i>	<i>m4new</i>
1.03E-02	1.51E-02	0.0427	0.0446	0.0052	0.0052	<b>0.005</b>	0.0552

ตารางที่ 2.6 ค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นของการเกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาด เมื่อเกิดความผิดพลาดในระบบโครงข่ายในสถานการณที่ 3

จากผลของการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมและแบบใหม่ ซึ่งขนาดหน้าต่างที่สั้นลงจะมีความน่าจะเป็นของสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดสูงขึ้น เช่นขนาดหน้าต่างที่เท่ากับ 2 และ 3 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากจำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ในการทำนายค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนมีน้อยเกินไปทำให้เกิดความผิดพลาด ในกรณีนี้ การตรวจจับความผิดพลาดซึ่งใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเดิมเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูล 3 ชนิดพร้อมกันคือ *ipIR ipOR* และ *ipIDE* ให้ผลดีที่สุด

<i>mlide</i>	<i>mlidenew</i>	<i>mlir</i>	<i>mlirnew</i>	<i>mlor</i>	<i>mlornew</i>	<i>m2ide</i>	<i>m2idenew</i>
0.0028	0.0028	1.44E-01	1.45E-01	0.1497	0.1497	0.1497	0.0056
<i>m2ir</i>	<i>m2irnew</i>	<i>m2or</i>	<i>m2ornew</i>	<i>m3</i>	<i>m3new</i>	<i>m4</i>	<i>m4new</i>
1.44E-01	1.44E-01	0.1503	0.1544	0.1401	0.1407	0.1401	0.1407

ตารางที่ 2.7 ค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่สามารถตรวจจับความผิดปกติได้ เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ  
โครงข่ายในสถานการณ์ที่ 3

ในส่วนของความน่าจะเป็นที่จะตรวจจับความผิดปกติได้ นั้นมีค่าต่ำมากเนื่องจากวิธีการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก ไม่สามารถที่จะตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากค่าความแปรปรวนที่เปลี่ยนไปได้ ในกรณีนี้ การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยใช้ข้อมูลชนิด *ipOR* ให้ผลดีที่สุด

<i>mlide</i>	<i>mlidenew</i>	<i>mlir</i>	<i>mlirnew</i>	<i>mlor</i>	<i>mlornew</i>	<i>m2ide</i>	<i>m2idenew</i>
99.7212	99.7212	8.56E+01	8.55E+01	85.029	85.0286	99.659	99.4423
<i>m2ir</i>	<i>m2irnew</i>	<i>m2or</i>	<i>m2ornew</i>	<i>m3</i>	<i>m3new</i>	<i>m4</i>	<i>m4new</i>
8.56E+01	8.56E+01	84.9659	84.5616	85.989	85.9267	85.989	85.9267

ตารางที่ 2.8 ค่าเฉลี่ยของปริมาณของ *false negative rate* เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ โครงข่ายใน  
สถานการณ์ที่ 3

ในส่วนของปริมาณของ *false negative rate* มีค่าของความผิดพลาดในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายที่สูงมาก เนื่องจากวิธีการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก ไม่สามารถที่จะตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากค่าความแปรปรวนที่เปลี่ยนไปได้ ในกรณีนี้ การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูลชนิด *ipOR* ให้ผลดีที่สุด

<i>mlide</i>	<i>mlidenew</i>	<i>mlir</i>	<i>mlirnew</i>	<i>mlor</i>	<i>mlornew</i>	<i>m2ide</i>	<i>m2idenew</i>
98.1555	98.1555	3.35E+01	3.54E+01	78.028	78.028	97.874	96.9362
<i>m2ir</i>	<i>m2irnew</i>	<i>m2or</i>	<i>m2ornew</i>	<i>m3</i>	<i>m3new</i>	<i>m4</i>	<i>m4new</i>
3.35E+01	3.83E+01	77.9412	78.0467	17.729	17.5103	16.76	82.6364

ตารางที่ 2.9 ค่าเฉลี่ยของปริมาณของ *false positive rate* เมื่อเกิดความผิดปกติในระบบ โครงข่ายใน  
สถานการณ์ที่ 3

ในส่วนของปริมาณของ *false positive rate* มีค่าของความผิดพลาดในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายที่สูงมาก เนื่องจากวิธีการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก ไม่สามารถที่จะตรวจจับความผิดปกติเนื่องจากค่าความแปรปรวนที่เปลี่ยนไปได้ ในกรณีนี้ วิธีการตรวจจับความผิดปกติโดยใช้ค่าถ่วง



น้ำหนักแบบเดิมเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยใช้ข้อมูล 3 ชนิดพร้อมกันคือ *ipIR ipOR* และ *ipIDE* ให้ผลดีที่สุด

### 2.3.4 สรุปผลการทดลอง

การใช้ขนาดหน้าต่างที่สั้นเกินไปในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย จะมีผลให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากจำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ในการทำนายค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนมีน้อยเกินไปส่งผลให้เกิดความผิดพลาด และชนิดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติที่แตกต่างกันให้ผลของประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติที่แตกต่างกันที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแต่ละชนิดข้อมูลมีความคล้ายคลึงกันระหว่างข้อมูลในอดีตและปัจจุบันที่แตกต่างกัน วิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิคนั้นเหมาะสำหรับตรวจจับความผิดปกติที่เป็นแบบค่าเฉลี่ยของกราฟฟิคนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเกิดในกรณีของข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย แต่ไม่เหมาะสำหรับความผิดปกติที่กราฟฟิคนั้นมีลักษณะค่าเบี่ยงเบนกราฟฟิคนั้นเปลี่ยนแปลง เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิคนั้นใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยของกราฟฟิกในการตรวจจับ และวิธีการที่นำเสนอในการปรับปรุงวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติที่ดีขึ้นกว่าวิธีการเดิม

### 3. การปรับปรุงวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด (*Abrupt Change*)

ในหัวข้อที่ผ่านมา เราได้มีการนำเสนอเนื้อหาทางทฤษฎีของการตรวจจับความผิดปกติแบบการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด (*Abrupt Change*) ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการนี้นั้นจะใช้ข้อมูล 3 ชนิดพร้อมกัน ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลจาก *ipIR, ipOR* และ *ipIDE* ซึ่งค่าที่ใช้ในการตัดสินใจว่าระบบโครงข่ายเกิดความผิดปกติหรือไม่นั้นหาได้จากค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาดของข้อมูล [*ipIR ipOR ipIDE*] ที่มีทิศทางที่ใกล้กับเวกเตอร์ความผิดปกติ [1 1 1] มากที่สุด ซึ่งหมายความว่า เวกเตอร์นั้นให้ผลที่ค่าความผิดพลาดของ 3 ชนิดข้อมูลมีการแปรผันตรงกันมากที่สุด โดยวิธีการนี้จะเลือกค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาดที่มีทิศทางใกล้กับเวกเตอร์ [1 1 1] มา 2 ค่าแล้วเลือกค่าที่ต่ำที่สุดเป็นค่าที่ใช้เป็นเกณฑ์สำหรับการบ่งชี้ว่าขณะนี้ระบบโครงข่ายของเราเกิดความผิดปกติหรือไม่ ดังนั้นเราจึงเสนอวิธีการเลือกค่าที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการบ่งชี้ถึงความผิดปกติในโครงข่ายของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบทันทีทันใด ด้วยกัน 2 วิธีคือ 1) การเลือกใช้ค่ากลางของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด และ 2) การเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด นอกจากนี้ในบทนี้จะวิเคราะห์ถึงผลของขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติที่มีผลต่อความแน่นอนในการตรวจจับความผิดปกติที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต ผลของจำนวนรอบที่ใช้ในการหาค่าเมตริกซ์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์กันของความผิดปกติของข้อมูลหลายระดับต่อผลของการตรวจจับความ

ผิดปกติของระบบโครงข่าย และผลของค่า *Threshold* ของแต่ละวิธีที่มีความสัมพันธ์ถึงขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

เนื้อหาในหัวข้อที่ 3 นี้จะแบ่งเป็น 3 ส่วน ซึ่งส่วนที่ 1 จะเกี่ยวข้องกับวิธีการที่เรานำเสนอในการปรับปรุงวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ส่วนที่ 2 แสดงถึงดัชนีชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของวิธีตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย และส่วนที่ 3 จะกล่าวถึงผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

### 3.1 วิธีการที่นำเสนอในการปรับปรุงวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

ในที่นี้เราจะอธิบายถึงวิธีที่ใช้การหาค่าเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าเกิดความผิดปกติในระบบโครงข่ายหรือไม่ด้วยกัน 3 วิธี คือ 1) การใช้ค่าน้อยสุดของความผิดพลาด 2 ตัว ที่ใกล้กับเวกเตอร์ความผิดปกติ  $[1 \ 1 \ 1]$  มากที่สุด 2) การเลือกใช้ค่ากลางของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด และ 3) การเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด

#### 3.1.1 การใช้ค่าน้อยสุดของความผิดพลาด 2 ตัว ที่ใกล้กับเวกเตอร์ความผิดปกติ $[1 \ 1 \ 1]$ มากที่สุด

ในวิธีการของการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดนั้น ในกรณีที่เรารู้ชนิดข้อมูลในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายเป็น 3 ชนิด จะได้ค่า *Eigenvalue* และ *Eigenvector* อย่างละ 3 ค่า ซึ่งจะนำค่า *Eigenvector* แต่ละค่านี้มาตรวจสอบว่า *Eigenvector* 2 ค่าไหนที่มีทิศทางไปทางเดียวกับเวกเตอร์ความผิดปกติ  $[1 \ 1 \ 1]$  มากที่สุด แล้วนำค่า *Eigenvalue* ของ *Eigenvector* 2 ค่านั้นมาพิจารณาหาค่าที่ใช้ในการบอกว่าระบบโครงข่ายของเราตอนนี้เกิดความผิดปกติหรือไม่ ดังสมการที่ (3.1)

$$Th = \min_{i=1}^2 (\lambda_i (\max(\frac{[111]^* \vec{\phi}}{|\vec{\phi}|}))) \quad (3.1)$$

ซึ่ง  $1 < N < M$  โดยที่  $M$  เป็นจำนวนชนิดข้อมูลที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย ซึ่งถ้าค่าความผิดปกติของระบบโครงข่ายเกินค่าเกณฑ์ จะถือว่าระบบโครงข่ายเกิดความผิดปกติขึ้น

#### 3.1.2 การเลือกใช้ค่ากลางของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด

ในวิธีการของการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดนั้น ในกรณีที่เรารู้ชนิดข้อมูลในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย 3 ชนิด จะได้ *Eigenvalue* และ *Eigenvector* อย่างละ 3 ค่า ซึ่งค่าที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการบอกว่าระบบเกิดความผิดปกติหรือไม่ เราจะเลือกใช้ค่าความผิดพลาดค่ากลาง ซึ่ง  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$  ดังสมการที่ (3.2)

$$Th = \lambda_2 \quad (3.2)$$

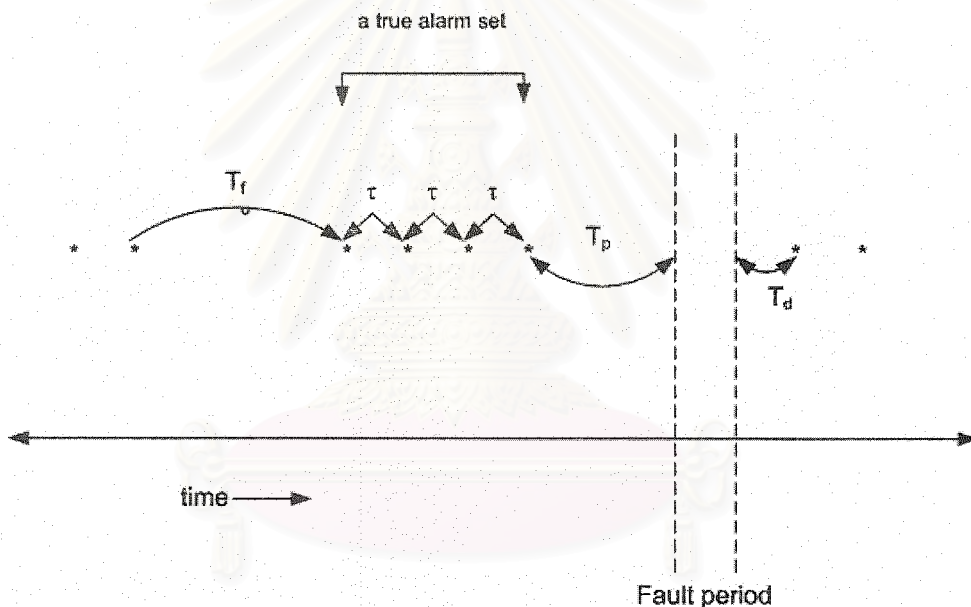
### 3.1.3 การเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด

ในวิธีการของการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดนั้น ในกรณีที่เราใช้ชนิดข้อมูลในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายเป็น 3 ชนิด จะได้ค่า *Eigenvalue* และ *Eigenvector* อย่างละ 3 ค่า ซึ่งค่าที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการบอกว่าจะระบบเกิดความผิดปกติหรือไม่เราจะเลือกใช้เฉลี่ยเลขคณิตของค่าความผิดพลาดของ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ซึ่ง  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$  ดังสมการที่ (3.3)

$$Th = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3} \quad (3.3)$$

### 3.2 ดัชนีชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของวิธีตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

ในการประเมินว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดมีประสิทธิภาพหรือไม่นั้น เราจะใช้ดัชนีชี้วัดที่ประกอบไปด้วย  $T_f, T_p, T_d, \tau$  ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ดัชนีชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

ซึ่ง  $N_f$  คือ จำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดต่อจำนวนหน้าต่างข้อมูล

$T_f$  คือ ช่วงเวลาที่เกิดความผิดพลาดในการทำนายความผิดปกติของระบบโครงข่าย

$T_p$  คือ ช่วงเวลาที่สามารถทำนายความผิดปกติได้ก่อนเกิดความผิดปกติในระบบโครงข่าย

$T_d$  คือ เวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติได้หลังจากเกิดความผิดปกติในระบบโครงข่ายไปแล้ว

$\tau$  คือ ช่วงเวลาที่สัญญาณเตือนความผิดปกติยังคงเป็นสัญญาณเตือนที่ถูกต้องในการตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่าย

โดยที่มีเงื่อนไขที่ว่า  $\tau < 15 \text{ min}$  (3.4)



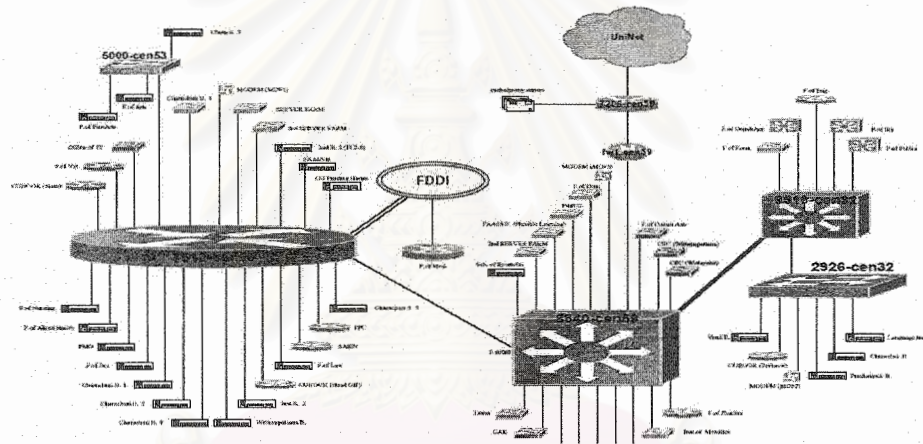
ในที่นี้เราได้นิยามตัวแปร  $S$  ซึ่งใช้เป็นตัวบอกว่าระบบโครงข่ายของเราควรเลือกใช้ค่าขนาดหน้าต่างเท่าใดในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย โดยที่ค่าตัวแปร  $S$  มีค่าดังสมการที่ (3.5)

$$S = T_f * N_f \quad (3.5)$$

ซึ่งถ้าค่า  $S$  ยังมีค่ามากแสดงว่าขนาดหน้าตานั้นให้ผลการตรวจจับความผิดปกติโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

### 3.3 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

ในการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบทันทีทันใดที่นำเสนอ นั้น จะใช้ข้อมูลกราฟฟิคที่ได้จากโครงข่ายของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่รูลทเทอร์ 7513 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระบบโครงข่ายของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่รูลทเทอร์ หมายเลข 7513 และ รูลทเทอร์ หมายเลข 7206

ข้อมูลของการส่งข้อมูลที่ได้จากรูลทเทอร์ 7513 นั้นถูกเก็บโดยใช้โปรแกรม *NETFLOW* ซึ่งการเก็บข้อมูลของโปรแกรม *NETFLOW* นี้แสดงดังรูปที่ 3.3

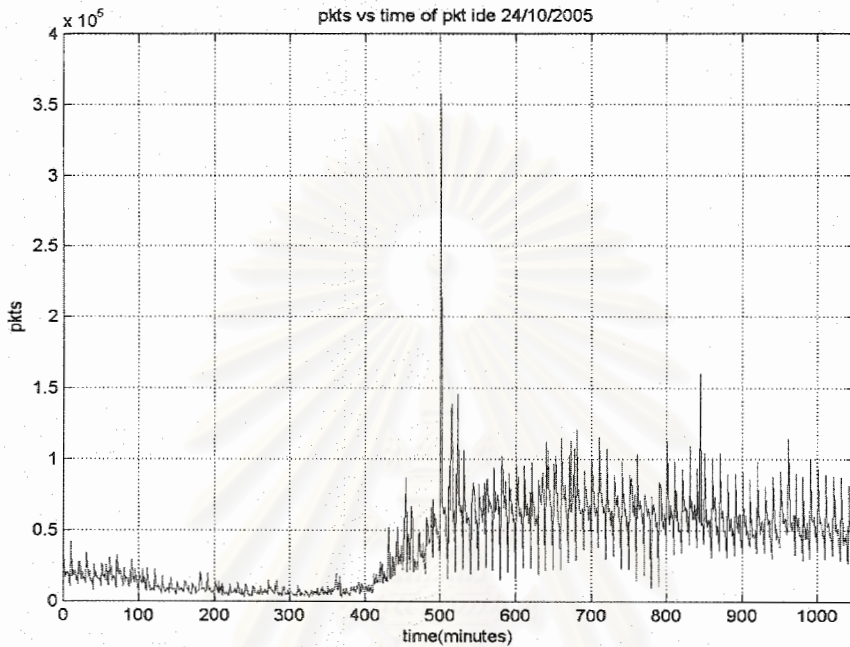
```

161.200.755.3.2005_02_11 Notepad
File Edit Format View Help
srcaddr|dstaddr|srcport|dstport|prot|tos|pkts|octets|flows|starttime|endtime|activetime
2.66|24.94.238.58|30955|6346|17|0|5|205|1|1108054764|1108054788|24144|161.200.192.4|158.
17|0|3|230|1|1108055322|1108055325|2800|161.200.192.4|64.73.138.72|50562|53|17|0|2|1146|1
1.200.129.102|203.121.145.116|3330|80|6|0|5|540|1|1108055063|1108055065|2092|161.200.129
2|1108055063|1108055217|947963|161.200.129.102|203.121.145.116|3339|80|6|0|6|538|1|11080
1|1108055124|1108055125|7682|03.121.145.116|161.200.129.102|80|3345|16|0|6|1685|1|110805
2|1108055127|1108055211|18804|161.200.192.6|129.49.1.4|25|56926|6|0|6|500|6|1108054814|1
161.200.129.102|80|3366|6|0|8|3576|1|1108055336|1108055339|3260|161.200.192.66|82.228.1
2|203.121.145.116|3371|80|6|0|7|1000|1|1108055343|1108055345|1808|203.121.145.116|161.20
20|161.200.192.4|53|50562|17|0|1|185|1|1108054815|1108054815|0|161.200.129.102|203.121.1
|205|1|1108055182|1108055206|24176|161.200.192.4|1202.59.252.13|50562|53|17|0|2|1446|2|110
3.11|161.200.192.10|25|3582|8|0|4|280|1|1108055036|1108055037|784|194.67.18.130|161.200
1108055051|1108055091|40612|161.200.192.17|209.134.28.4|2297|25|6|0|2|96|1|1108055040|11
1108055163|242463.150.131.26|161.200.129.204|80|49496|6|0|6|437|1|1108055161|11080551
38055168|197263.150.131.26|161.200.129.204|80|49504|6|0|5|403|1|1108055167|1108055169|2
161.200.129.106|80|3644|6|0|6|288|1|1108054951|1108055201|22352|203.121.145.37|161.200.1
52|17|0|6|1133|3|1108054971|1108055084|117802|03.121.145.37|161.200.129.106|80|3669|6|0|
1.200.192.4|200.160.0.10|50562|53|17|0|1|56|1|1108055003|1108055003|0200.160.0.10|161.2
0|1|1108055042|1108055043|764203.121.145.182|161.200.129.106|80|3565|6|0|4|1133|1|11080
200.192.66|82.42.159.51|30955|6346|17|0|10|526|1|1108055294|1108055319|24840202.44.52.
129.100|80|1085|6|0|25|24436|2|1108054951|1108055011|41760|161.200.129.100|202.44.52.4|
1093|80|6|0|21|203|2|1108054957|1108055030|5744068.142.79.29|161.200.129.141|80|1125|1
|0|20|10376|2|1108055051|1108055149|27192|161.200.129.100|202.44.52.4|1119|80|6|0|22|404
588|2|1108055051|1108055219|106644202.44.52.4|161.200.129.100|80|1125|6|0|22|11683|2|11
5166|1516161.200.192.10|128.227.64.7|2984|25|6|0|1|52|1|1108054985|1108054985|0128.227.
33|2232161.200.192.1|202.176.83.147|80|26294|6|0|72|96533|1|1108054831|1108054831|22321
1|52|1|1108054987|1108054987|0|161.200.129.100|202.44.52.4|1161|80|6|0|9|2228|1|1108055
59.224|161.200.129.172|80|1514|6|0|17|9256|9|1108054766|1108055278|4161.200.129.100|202

```

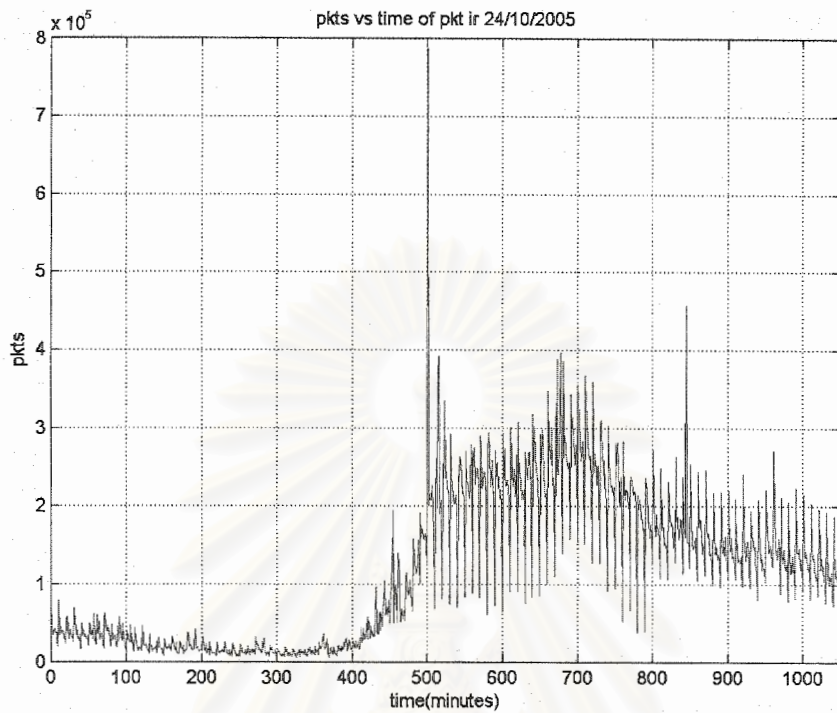
รูปที่ 3.3 ลักษณะของกราฟฟิคที่โปรแกรม *NETFLOW* บันทึกในรูลทเทอร์ 7513

จากผลของข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม *NETFLOW* นี้เราจึงต้องนำข้อมูลนี้มาทำการแบ่งแยกเป็นชนิดของข้อมูล *ipIR*, *ipIDE* และ *ipOR* โดยใช้โปรแกรม *PERL* ในการแบ่งแยกชนิดข้อมูล ซึ่งในการทดลองนี้เราจะใช้ข้อมูลของวันที่ 24 ตุลาคม 2548 ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย แสดงดังรูปที่ 3.4-3.6

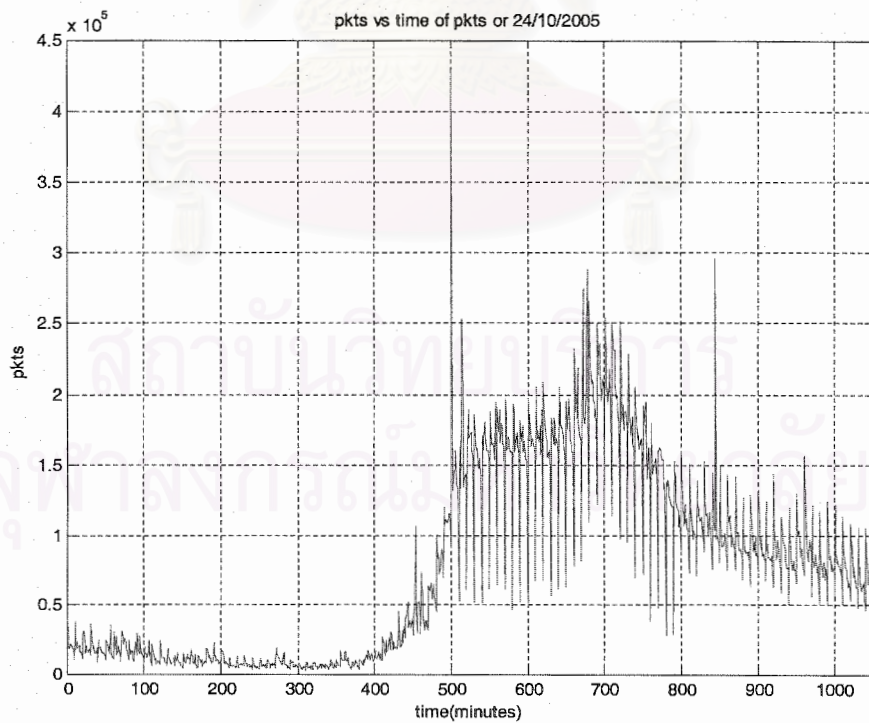


รูปที่ 3.4 ข้อมูล *ipIDE* ของรูลเตอร์ 7513 ในวันที่ 24/10/2005

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ข้อมูล *ipIR* ของรุตเทอร์ 7513 ในวันที่ 24/10/2005



รูปที่ 3.6 ข้อมูล *ipOR* ของรุตเทอร์ 7513 ในวันที่ 24/10/2005



เราได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรก เราได้ศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนขนาดหน้าต่าง และจำนวนรอบในการคำนวณเมตริกซ์  $A$  ที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายต่อค่า *Threshold* ส่วนที่สอง เรากำหนดให้จำนวนรอบที่ใช้ในการหาค่าเมตริกซ์  $A$  มีค่าคงที่เท่ากับ 14 รอบ แต่ปรับเปลี่ยนค่าความกว้างของหน้าต่างในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

เนื่องจากข้อมูลกราฟฟิคที่บันทึกได้จากโปรแกรม *NETFLOW* ที่ได้จากโครงข่ายจุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนั้น ไม่ได้มีการบันทึกว่าในช่วงเวลาที่ผ่านมามีความผิดปกติขึ้นเมื่อใด ด้วยสาเหตุใด เป็นเวลานานเท่าใด ดังนั้นจากรูปที่ 3.4-3.6 ของกราฟฟิควันที่ 24 ตุลาคม 2548 เราจึงได้กำหนดให้มีความผิดปกติเกิดขึ้นที่ระบบโครงข่ายที่เวลา 500 นาที ด้วยเหตุผลที่ว่าที่เวลานี้จำนวนแพ็กเก็ตมีความเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเทียบกับช่วงเวลาที่ดีกัน

ในการทดลองนั้นเราได้มีการกำหนดตัวแปรในการแสดงผลของแต่ละวิธีในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายดังนี้

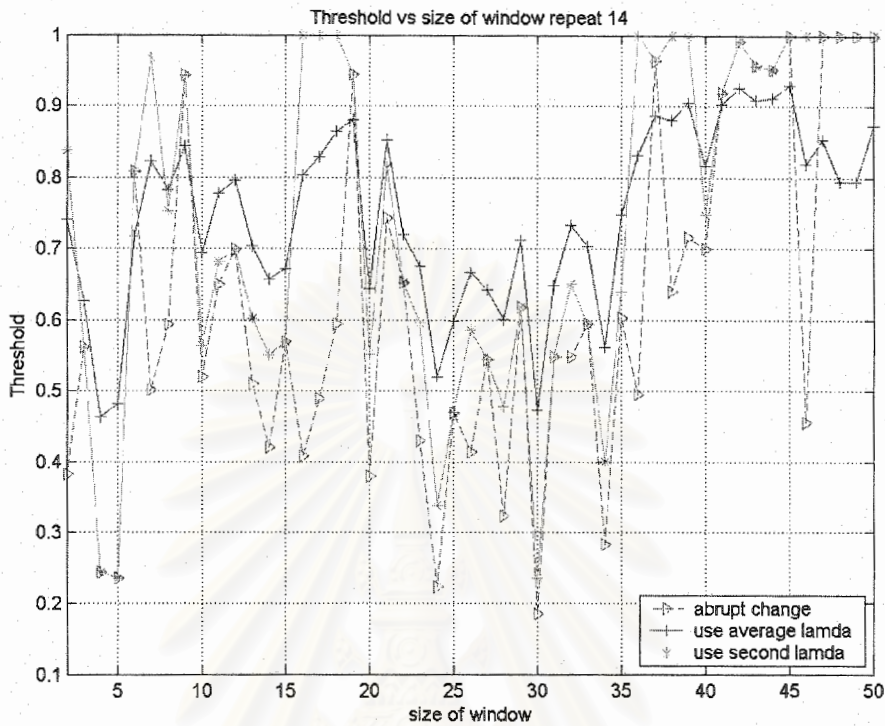
*useabruptchange* หมายถึง การใช้ค่าน้อยสุดของความผิดพลาด 2 ตัว ที่ใกล้กับเวกเตอร์ความผิดปกติ  $[1 \ 1 \ 1]$  มากที่สุด เป็นค่า *Threshold*

*useaveragelamda* หมายถึง การเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด เป็นค่า *Threshold*

*usesecondlamda* หมายถึง การเลือกใช้ค่ากลางของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด เป็นค่า *Threshold*

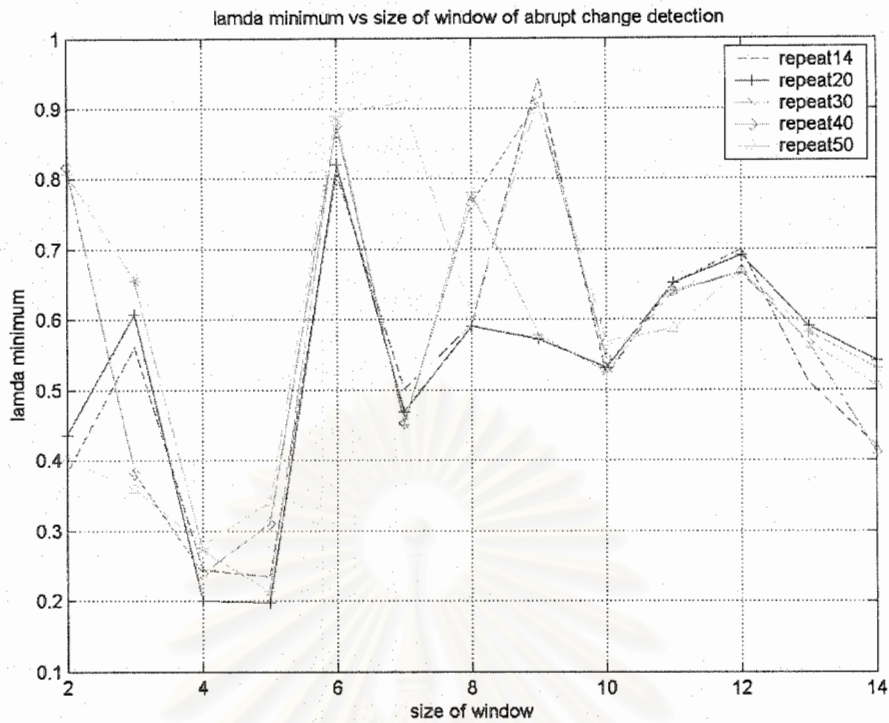
### 3.3.1 ผลของการแปรเปลี่ยนขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายต่อค่า *Threshold*

ในการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบทันทีทันใดที่นำเสนอทั้งสิ้น 3 วิธี ในส่วนแรกนั้นได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.7-3.10

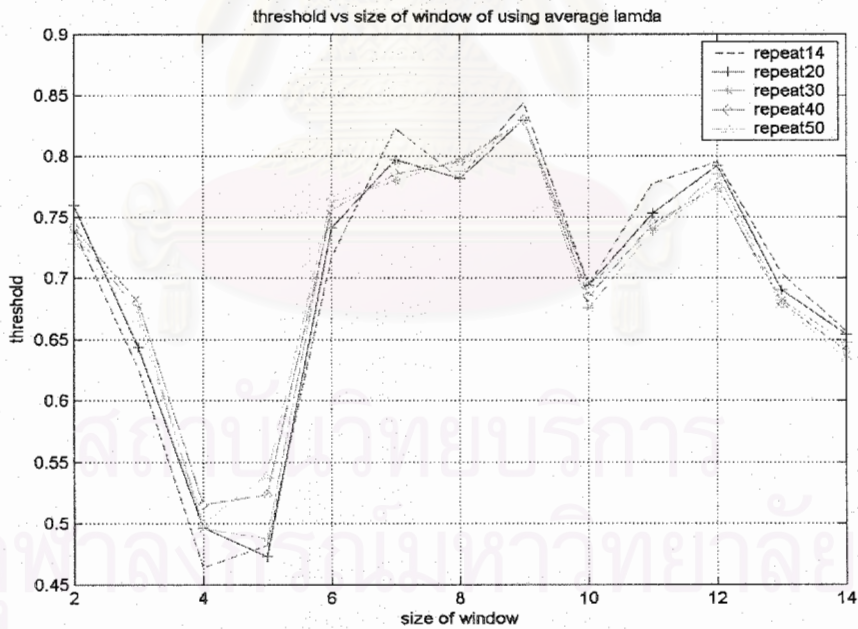


รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า *Threshold* และขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าระบบโครงข่ายเกิดความผิดปกติหรือไม่ของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบทันทีทันใด วิธีการที่เรานำเสนอโดยการเลือกใช้ค่ากลางของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด และการเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดหน้าต่างในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายไปเรื่อยๆ มีค่าเปลี่ยนไปตามขนาดหน้าต่างที่เปลี่ยนไป และไม่มีแนวโน้ม ดังนั้นการตรวจจับความผิดปกติของโครงข่ายโดยใช้วิธีการทั้ง 3 วิธีนี้ จะต้องมีการทดสอบและเลือกค่าขนาดหน้าต่างที่เหมาะสมเพื่อที่จะทำให้ระบบการตรวจจับความผิดปกติมีประสิทธิภาพที่ดี ซึ่งขนาดหน้าต่างในทางปฏิบัติที่ควรใช้ควรอยู่ในช่วง 5 ถึง 20 นาที เนื่องจากถ้าใช้ขนาดหน้าต่างที่ยาวเกินไป จะทำให้ระบบการตรวจจับความผิดปกติไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติได้ทันเวลาที่

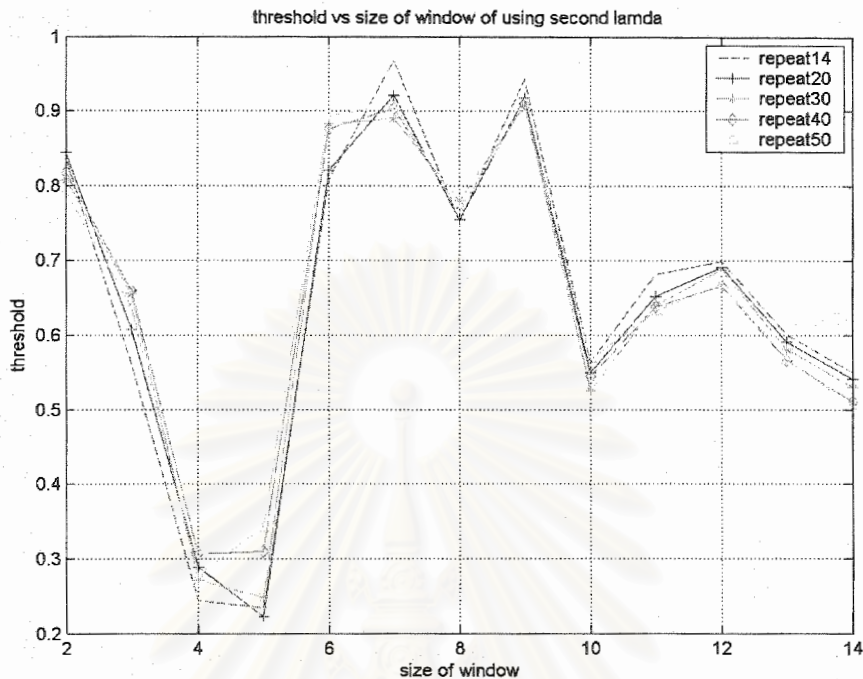


รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า *Threshold* และขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายโดยการเลือกค่า *Threshold* จากวิธีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า *Threshold* และขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายโดยการเลือกค่า *Threshold* จากค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด



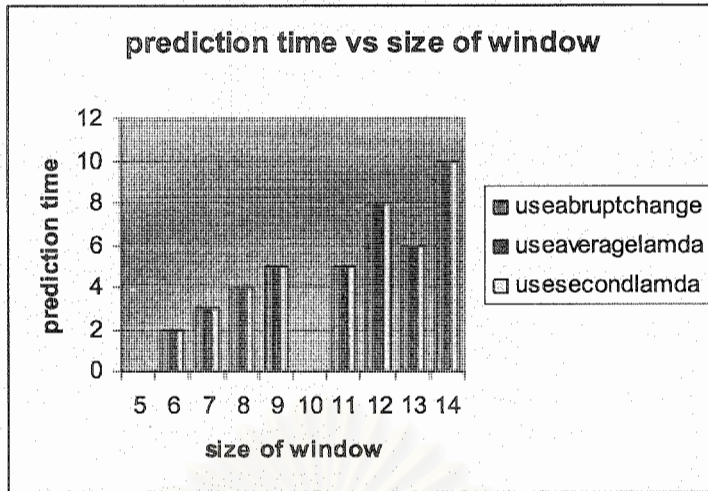


รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า *Threshold* และขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายโดยการเลือกค่า *Threshold* จากค่ากลางของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าระบบโครงข่ายเกิดความผิดปกติหรือไม่ของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบทันทีทันใด วิธีการที่เรานำเสนอโดยการเลือกใช้ค่ากลางของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด และการเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณค่าเมตริกซ์  $A$  ซึ่งค่าเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าระบบโครงข่ายเกิดความผิดปกติของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบทันทีทันใดในแต่ละรอบของการคำนวณค่าเมตริกซ์  $A$  นั้นมีค่าที่ต่างกันอย่างมาก เพราะฉะนั้นจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณค่าเมตริกซ์  $A$  มีผลอย่างมาก ในกรณีที่จำนวนรอบในการคำนวณค่าเมตริกซ์  $A$  ถูกเลือกไม่เหมาะสม จะส่งผลให้ระบบโครงข่ายของเราเกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดบ่อยครั้ง ในส่วนของการเลือกใช้ค่ากลางของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด การเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด จำนวนรอบในการคำนวณค่าเมตริกซ์  $A$  ไม่ค่อยมีผลมากนักต่อค่าเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าระบบโครงข่ายเกิดความผิดปกติ

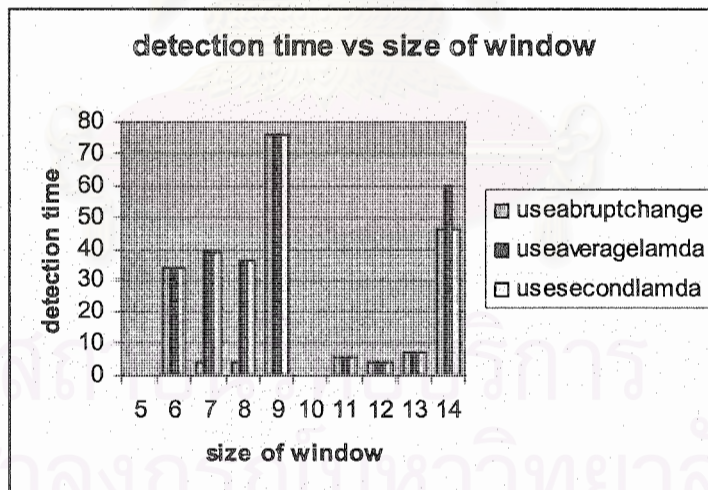
### 3.3.2 จำนวนรอบที่ใช้ในการหาค่าเมตริกซ์ $A$ มีค่าคงที่เท่ากับ 14 รอบ แต่ปรับเปลี่ยนค่าความกว้างของหน้าต่างในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

ในการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบทันทีทันใดที่นำเสนอทั้งสิ้น 3 วิธี ในส่วนแรกนั้นได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.11-3.15



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติก่อนเกิดความเสียหายและขนาดความกว้างของหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ

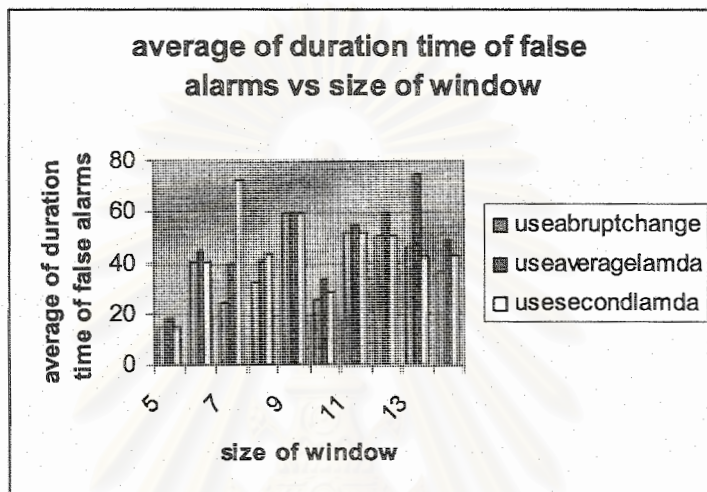
จากผลการทดลองดังรูปที่ 3.11 ขนาดของหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายที่แตกต่างกันจะให้ผลของเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติก่อนเกิดความเสียหายที่ต่างกัน โดยที่ทั้ง 3 วิธีที่ทดสอบนั้นให้ผลของเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติก่อนเกิดความเสียหายเท่ากัน ทุกขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกราฟฟิกที่ใกล้กับช่วงเวลา 500 มีการเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมากเป็นผลให้ค่าความผิดปกติในช่วงนี้มีค่าที่สูงมาก ดังนั้นค่าเกณฑ์ของทั้ง 3 วิธีซึ่งให้ค่าเกณฑ์ที่แตกต่างกัน ไม่มีผลเพราะ ค่าความผิดปกติของโนดเกินค่าเกณฑ์ของทั้ง 3 วิธี



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติหลังเกิดความเสียหายและขนาดความกว้างของหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าขนาดของหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายที่แตกต่างกันและการเลือกใช้วิธีที่หาค่าเกณฑ์แตกต่างกัน จะให้ผลของเวลาที่สามารถ

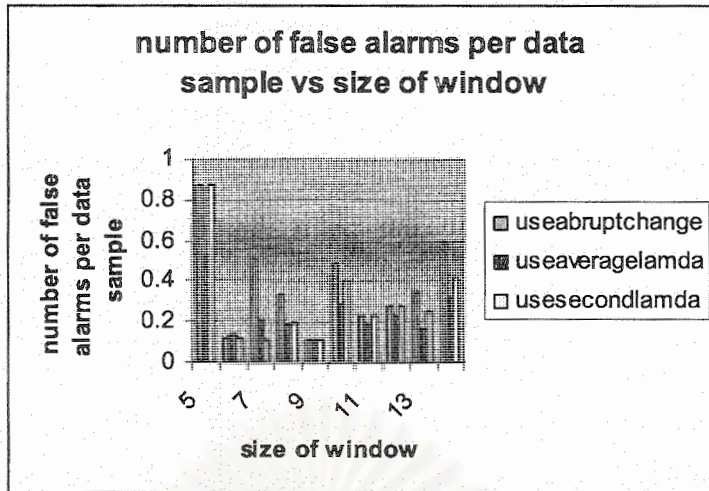
ตรวจจับความผิดปกติหลังเกิดความเสียหายที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากค่าเกณฑ์ที่เลือกใช้เพื่อระบุวาระบบโครงข่ายเกิดความผิดปกติหรือไม่มีค่าที่ต่างกัน และที่ขนาดหน้าต่างเท่ากันนั้น บางขนาดหน้าต่างเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติหลังเกิดความเสียหายมีค่าต่างกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าความผิดปกติของโหนดอาจไม่มากเกินค่าเกณฑ์ของบางวิธีทำให้เวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติหลังเกิดความเสียหายที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่เกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดและขนาดความกว้างของหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ

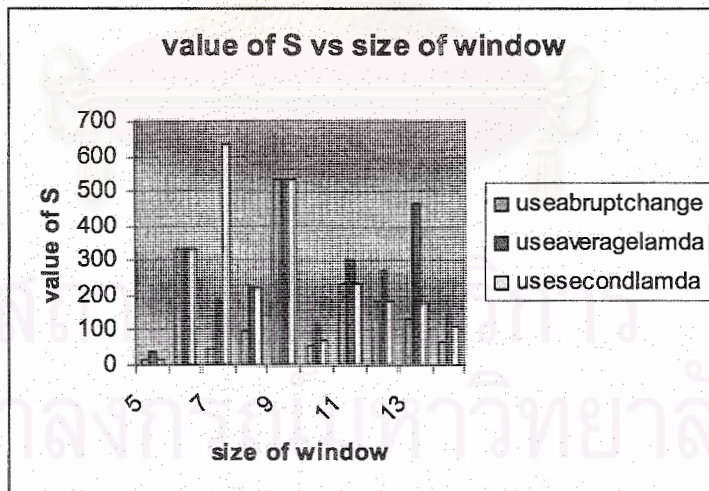
จากผลการทดลองดังรูปที่ 3.13 จะเห็นได้ว่า ขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายที่แตกต่างกันจะให้ผลของค่าเฉลี่ยของช่วงสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากค่าเกณฑ์ที่เลือกใช้เพื่อระบุวาระบบโครงข่ายเกิดความผิดปกติหรือไม่มีค่าที่ต่างกัน และวิธีที่นำเสนอทั้ง 2 วิธีคือ การเลือกใช้ค่ากลางของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด และการเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด ให้ผลของค่าเฉลี่ยของช่วงสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดที่สูงกว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบทันทีทันใด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าเกณฑ์ของทั้ง 2 วิธีมีค่าที่สูงกว่า





รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดต่อจำนวนหน้าต่างข้อมูลและขนาดความกว้างของหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่ายที่แตกต่างกันจะให้ผลของจำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดต่อจำนวนหน้าต่างข้อมูลที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากค่าเกณฑ์ที่เลือกใช้เพื่อระบุว่าระบบ โครงข่ายเกิดความผิดปกติหรือไม่มีค่าที่ต่างกัน และวิธีที่นำเสนอทั้ง 2 วิธีคือ การเลือกใช้ค่ากลางของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด และการเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด ให้ผลของจำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดต่อจำนวนหน้าต่างข้อมูลที่ต่ำกว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่ายแบบทันทีทันใดที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าเกณฑ์ของทั้ง 2 วิธีมีค่าที่สูงกว่า



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง value of S และขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

จากผลการทดลองในกรณีนี้ จะเห็นได้ว่า ขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติที่เปลี่ยนไป จะให้ผลของค่า S ที่แตกต่างกัน และวิธีที่นำเสนอทั้ง 2 วิธีคือ การเลือกใช้ค่ากลางของค่าความ

ผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด และการเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด ให้ผลของค่า  $S$  ที่สูงกว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่ายแบบทันทีทันใด ในทุกขนาดหน้าต่าง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากค่าเกณฑ์ของทั้ง 2 วิธีมีค่าที่สูงกว่า

### 3.3.3 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าจำนวนหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่าย จำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณเมตริกซ์  $A$  และวิธีการที่เราเลือกใช้ในการหาค่าเกณฑ์ในการระบุ ว่าเกิดความผิดปกติในโครงข่ายหรือไม่ มีผลต่อประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่าย ดังนั้นเราควรที่จะทดสอบเพื่อหาขนาดความกว้างหน้าต่างที่เหมาะสมที่สุดและจำนวนรอบที่ใช้ ในการคำนวณเมตริกซ์  $A$  ที่เหมาะสมที่สุดเช่นเดียวกัน เพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการตรวจจับ ความผิดปกติของระบบ โครงข่าย

## 4.วิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกร่วมกับการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดโดยใช้กรรมวิธีของฟัซซีในการตัดสินใจ

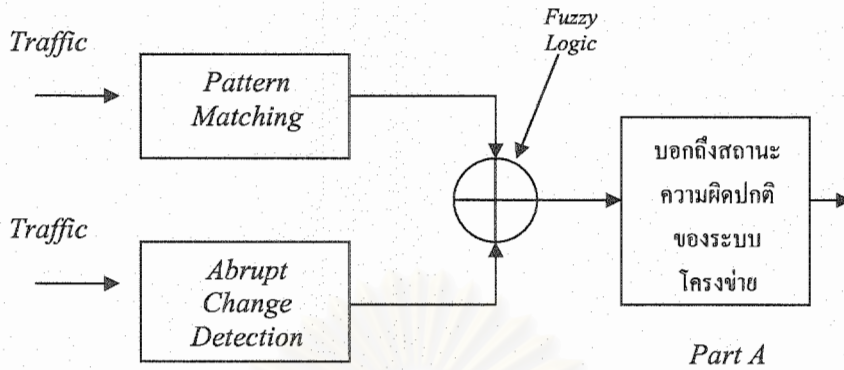
ในหัวข้อที่ผ่านมาเราได้มีการนำเสนอเนื้อหาทางทฤษฎีของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่ายแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก (*Pattern Matching*) และการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด (*Abrupt Change*) ซึ่งได้เห็นถึงข้อดีข้อเสียของวิธีการทั้งสองในการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่าย ดังนั้น ในบทนี้เราจะนำเสนอวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่าย โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกร่วมกับการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด โดยใช้กรรมวิธีของฟัซซี (*Fuzzy*) ในการตัดสินใจ โดยที่ฟังก์ชัน การเป็นสมาชิกของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่ายของวิธีการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกและการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดของค่าที่ผิดปกติและไม่ผิดปกติจะเป็นแบบรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู อีกทั้งยังวิเคราะห์ถึงผลของขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติที่มีผลต่อความแน่นอน ในการตรวจจับความผิดปกติที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

เนื้อหาในหัวข้อนี้ จะแบ่งเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 จะเกี่ยวข้องกับวิธีการที่เรานำเสนอในการ ตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกร่วมกับการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ส่วนที่ 2 แสดงถึงดัชนีชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของวิธีตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่าย ส่วนที่ 3 จะแสดงถึงผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

### 4.1 วิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกร่วมกับการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดโดยใช้กรรมวิธีของฟัซซีในการตัดสินใจ

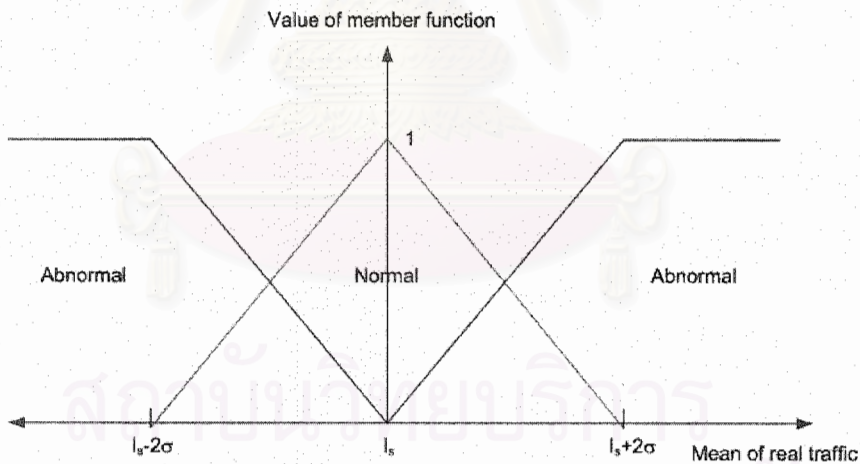
โดยการตรวจจับความผิดปกติของกราฟฟิกร่วมกับการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด เราจะใช้ 2 วิธี ร่วมกันในการตรวจจับความผิดปกติ ของระบบ โครงข่ายเบื้องต้น ในการบอกว่าข้อมูลในช่วงนั้นมีความผิดปกติมากน้อยเพียงใด เราจะนำวิธีการ ของการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก และ แบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด

ร่วมกันในการตรวจจับความผิดปกติ โดยที่ใช้กรรมของฟัซซี มาใช้เป็นหลักในการตัดสินใจว่า โหนดในระบบ โครงข่ายเกิดความผิดปกติหรือไม่ แสดงดังรูปที่ 4.1



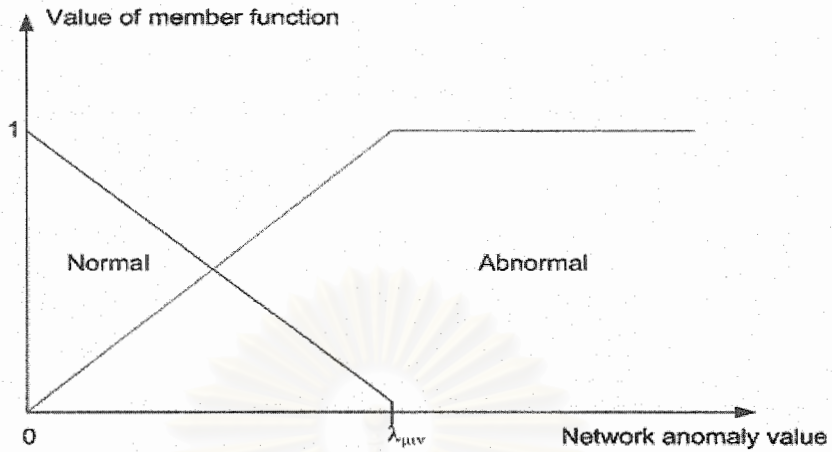
รูปที่ 4.1 การตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่าย โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกร่วมกับการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด โดยใช้กรรมวิธีฟัซซีในการตัดสินใจ

ในการใช้วิธีฟัซซีต้องมีการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกขึ้นมา ซึ่งในที่นี้เรามีการกำหนดให้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่ายแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกและเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด เป็นแบบรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมคางหมู ประกอบไปด้วย แบบ A และแบบ B แสดงดังรูปที่ 4.2-4.9



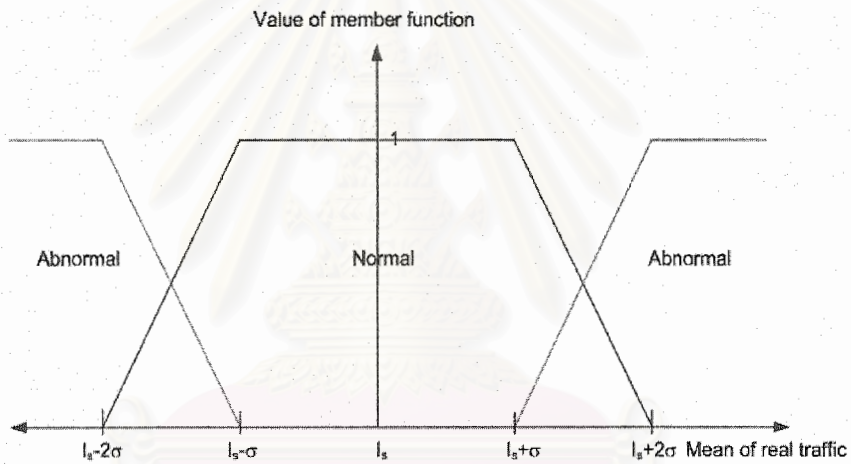
รูปที่ 4.2 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ วิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่ายแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกแบบสามเหลี่ยม แบบ A





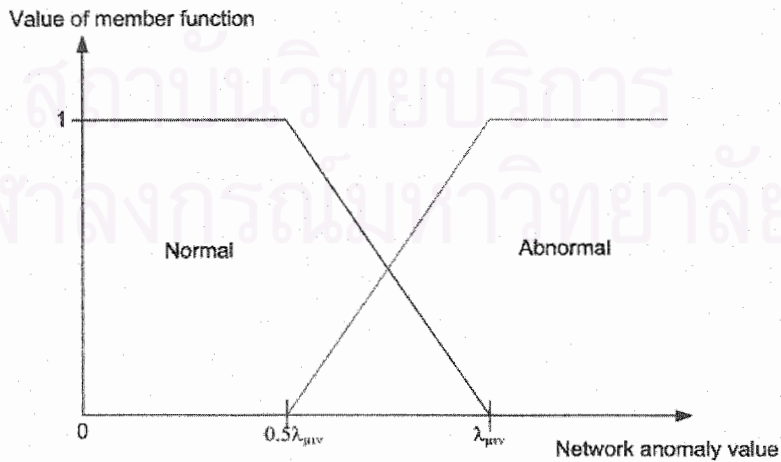
รูปที่ 4.3 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปลี่ยนแปลง

ทันทีทันใดแบบสามเหลี่ยม แบบ A



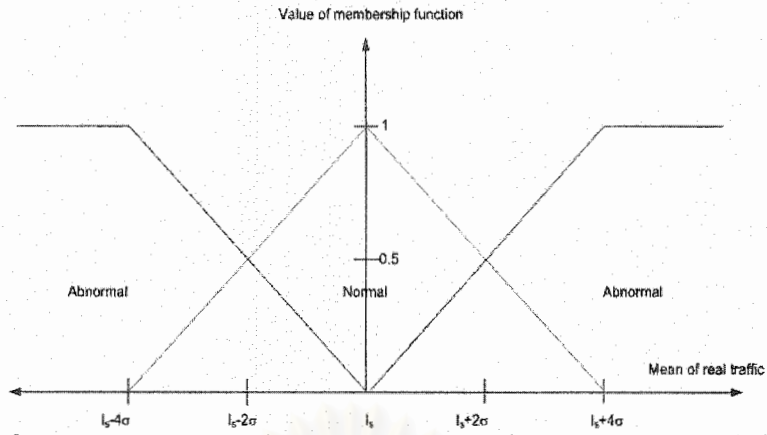
รูปที่ 4.4 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปรียบเทียบ

รูปแบบทราฟฟิก แบบสี่เหลี่ยมคางหมู แบบ A

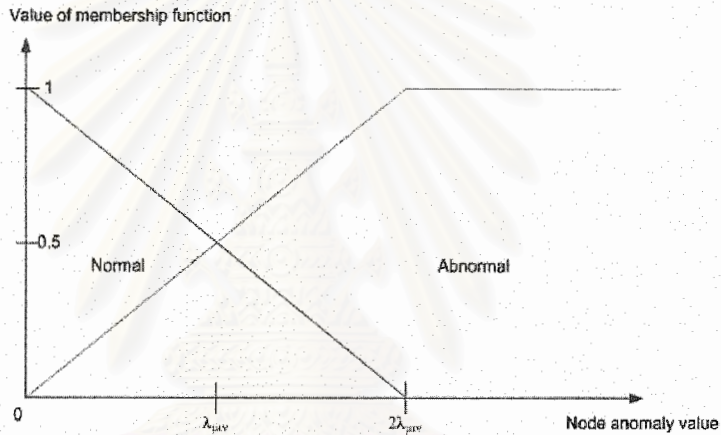


รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปลี่ยนแปลง

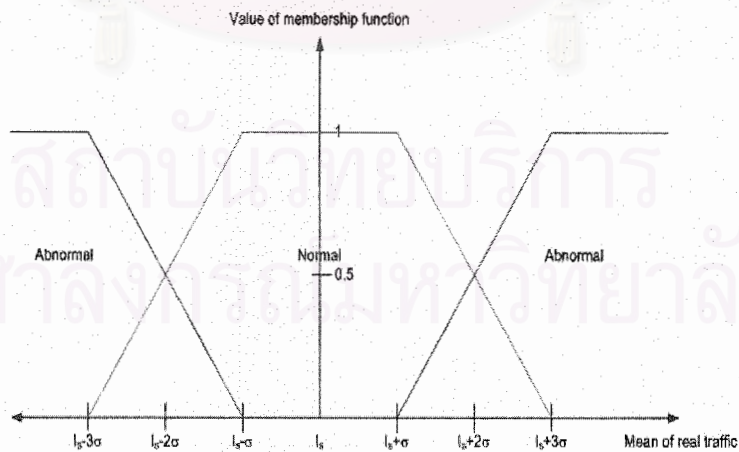
ทันทีทันใด แบบสี่เหลี่ยมคางหมู แบบ A



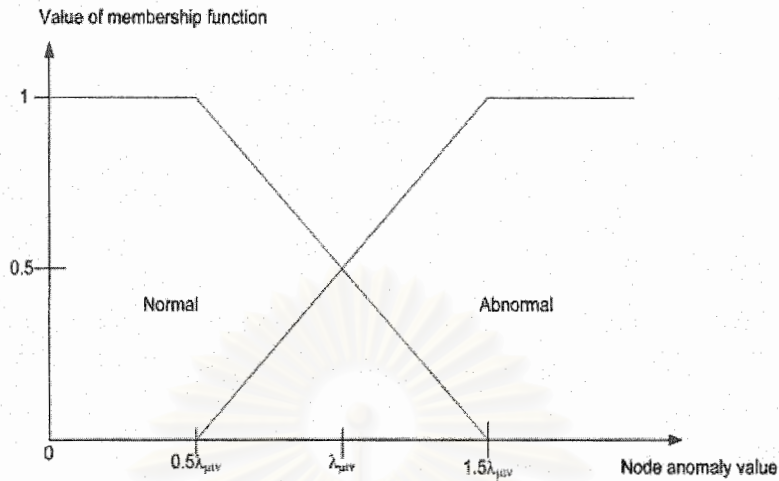
รูปที่ 4.6 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกแบบสามเหลี่ยม แบบ B



รูปที่ 4.7 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดแบบสามเหลี่ยม แบบ B



รูปที่ 4.8 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก แบบสี่เหลี่ยมคางหมู แบบ B



รูปที่ 4.9 ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่ายแบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด แบบสี่เหลี่ยมคางหมู แบบ B

โดยที่ แบบ A นั้นเป็นการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบโอเนอเดียไปทางทางด้านความผิดปกติ แต่แบบ B นั้นเป็นการกำหนดฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบมีความยุติธรรม เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกและแบบทันทีทันใดมีค่าเกณฑ์ของความผิดปกติอยู่ที่  $\pm 2\sigma$  และ  $\lambda_{min}$  ตามลำดับ ดังนั้นที่ค่านี้จึงกำหนดให้ค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของสถานะปกติและสถานะผิดปกติของแต่ละวิธี มีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็น 0.5

ในที่นี้กำหนดให้ทั้งวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกและแบบทันทีทันใด มีสถานะของ โหนดทั้งสิ้น 2 สถานะ คือ 0 แทนสถานะที่ไม่เกิดความผิดปกติ และ 1 แทนสถานะที่เกิดความผิดปกติ หลังจากนั้นต้องมีการกำหนดสถานะของ โหนดเมื่อสถานะของแต่ละวิธีในการตรวจจับความผิดปกติแสดงขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.1-4.4

		Pattern Matching		
		Normal(0)	Alarm(1)	
Normal(0)		0	0	Abrupt Change Detection
Alarm(1)		1	1	

ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนสถานะของ โหนดเมื่อมีการใช้ข้อมูลแสดงสถานะความผิดปกติของวิธี ตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก และ เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ในกรณีที่เกี่ยวข้อง ในวิธีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด



Pattern Matching

	Normal(0)	Alarm(1)	
Normal(0)	0	1	Abrupt Change Detection
Alarm(1)	0	1	

ตารางที่ 4.2 การเปลี่ยนสถานะของ โหนดเมื่อมีการใช้ข้อมูลแสดงสถานะความผิดปกติของวิธี ตรวจสอบความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก และ เปลี่ยนแปลงทันทีที่โหนด ในกรณีที่เชื่อในวิธีของการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก

Pattern Matching

	Normal(0)	Alarm(1)	
Normal(0)	0	1	Abrupt Change Detection
Alarm(1)	1	1	

ตารางที่ 4.3 การเปลี่ยนสถานะของ โหนดเมื่อมีการใช้ข้อมูลแสดงสถานะความผิดปกติของวิธี ตรวจสอบความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก และ เปลี่ยนแปลงทันทีที่โหนด ในกรณีที่เชื่อในวิธีของการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกและ เปลี่ยนแปลงทันทีที่โหนด

Pattern Matching

	Normal(0)	Alarm(1)	
Normal(0)	0	0	Abrupt Change Detection
Alarm(1)	0	1	

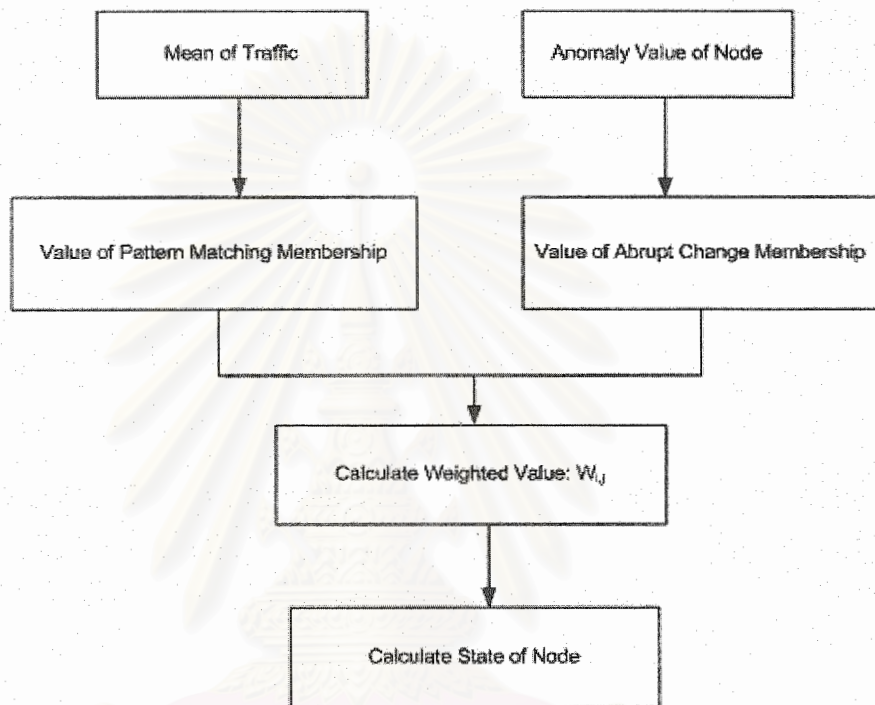
ตารางที่ 4.4 การเปลี่ยนสถานะของ โหนดเมื่อมีการใช้ข้อมูลแสดงสถานะความผิดปกติของวิธี ตรวจสอบความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก และ เปลี่ยนแปลงทันทีที่โหนด ในกรณีที่เชื่อว่าจะเกิดความผิดปกติขึ้นถ้าสถานะความผิดปกติของวิธีของการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกและเปลี่ยนแปลงทันทีที่โหนดมีสถานะผิดปกติ

โดยที่  $w_{i,j}$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของ สถานะที่  $i$  ของวิธีตรวจสอบความผิดปกติแบบเปลี่ยนแปลงทันทีที่โหนดและ สถานะที่  $j$  ของวิธีเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก และผลของสถานะของ โหนดในระบบโครงข่ายหาได้จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) ตามลำดับ

$$w_{i,j} = \min \{F_{state}(Abruptchange), F_{state}(Patternmatch)\} \quad (4.1)$$

$$State\_of\_node = \frac{\sum w_{i,j} * state}{\sum w_{i,j}} \quad (4.2)$$

หลักการในการดำเนินงานของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดโดยกรรมวิธีการของฟัซซีในการตัดสินใจแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การดำเนินงานของการตรวจจับความผิดปกติโดยใช้ฟัซซี

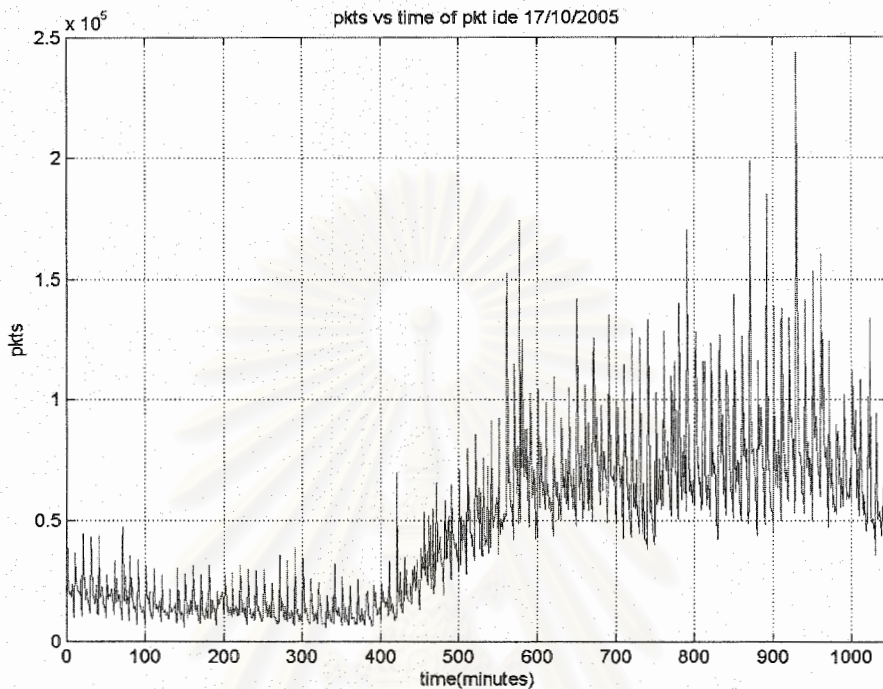
จากรูป 4.10 จะเห็นว่าขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีฟัซซีเริ่มจาก วิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบ เปรียบเทียบ รูปแบบกราฟฟิกคำนวณหาค่าเฉลี่ยของกราฟฟิก เช่นเดียวกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบทันทีทันใดคำนวณหาค่าความผิดปกติของ โหนด หลังจากนั้นนำค่าทั้งสองไปหาฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของแต่ละวิธีจากรูปที่ 4.2-4.9 เมื่อคำนวณหาค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแล้ว ทำการคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักของสถานะที่  $i$  ของวิธีตรวจจับความผิดปกติแบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดและ สถานะที่  $j$  ของวิธีเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก ตามสมการที่ (4.1) หลังจากนั้นจะทำการคำนวณสถานะของโดยสมการที่ (4.2) โดยถ่วงน้ำหนักของ โหนดมีค่าใกล้เคียง 0 (สถานะปกติ) มากกว่า 1 (สถานะผิดปกติ) แสดงว่าในขณะนั้น โหนดที่ถูกตรวจจับความผิดปกติอยู่ในสถานะปกติ ในทางตรงกันข้าม โหนดจะอยู่ในสถานะผิดปกติ

#### 4.2 ดัชนีชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของวิธีตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

ดัชนีชี้วัดในการประเมินประสิทธิภาพของวิธีตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายในบทนี้จะใช้ดัชนีชี้วัดเหมือนกับดัชนีชี้วัดในหัวข้อที่ 3

#### 4.3 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

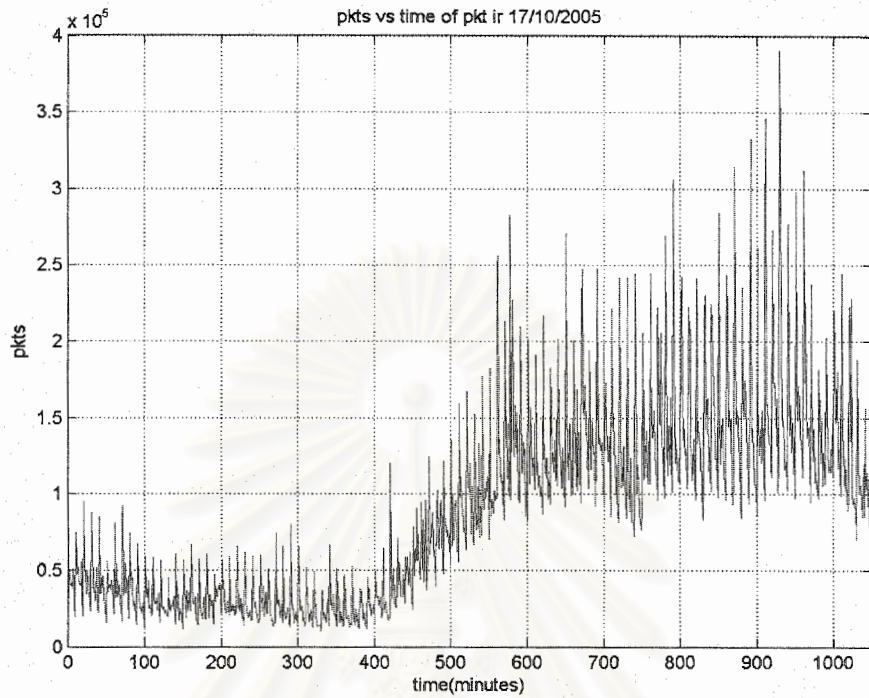
โดยการทดลองนี้เราจะใช้ข้อมูลกราฟที่มาจากโครงข่ายของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจำนวนทั้งสิ้น 6 วัน ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย ซึ่งประกอบไปด้วย วันที่ 17, 18, 19, 20, 21 และ 24 ของเดือนตุลาคม พ.ศ.2548 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.11-4.28



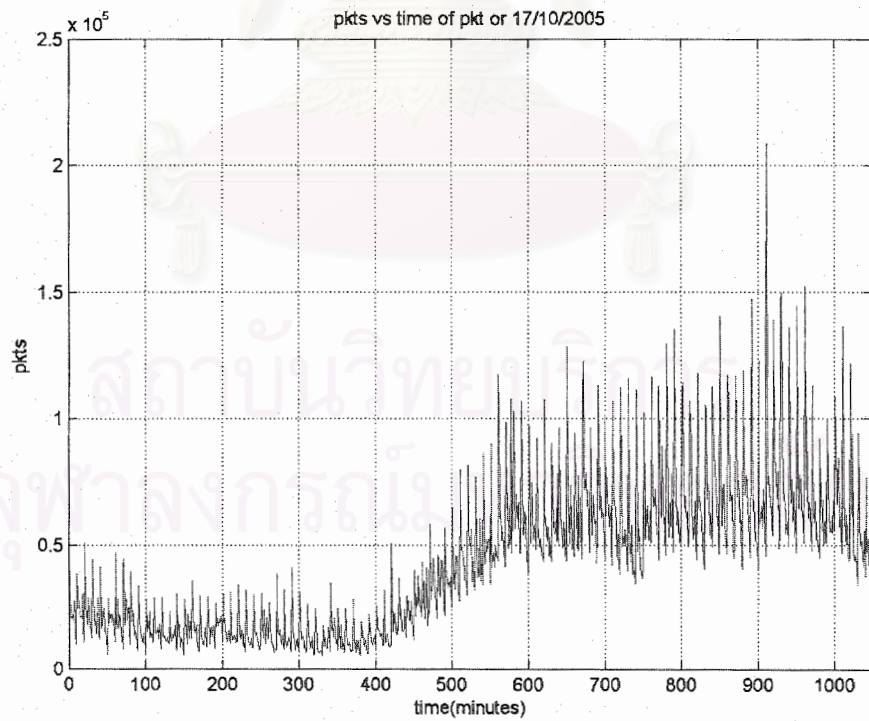
รูปที่ 4.11 ข้อมูล *ipIDE* ของรouters 7513 ในวันที่ 17/10/2005

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

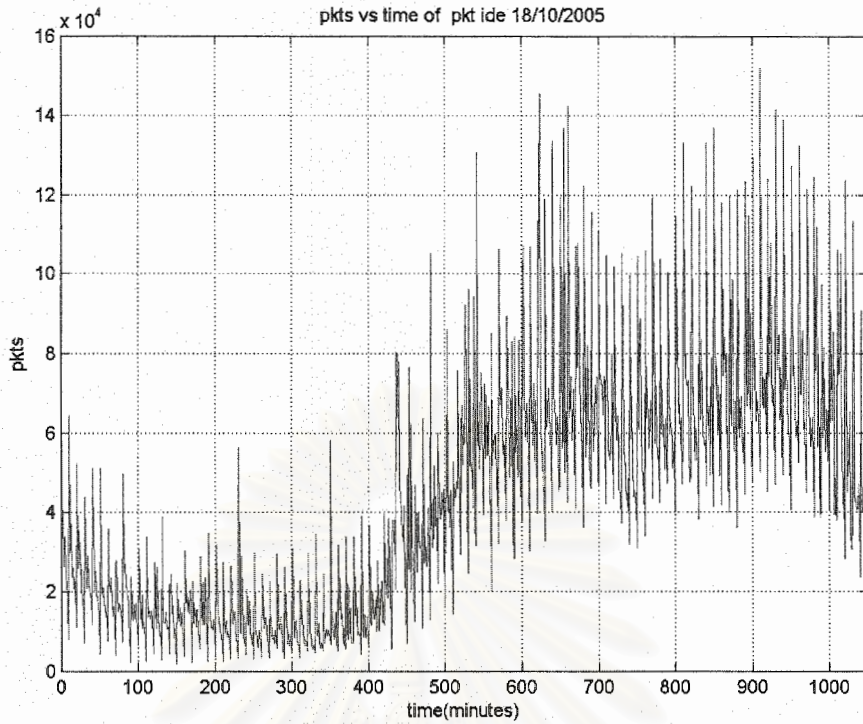




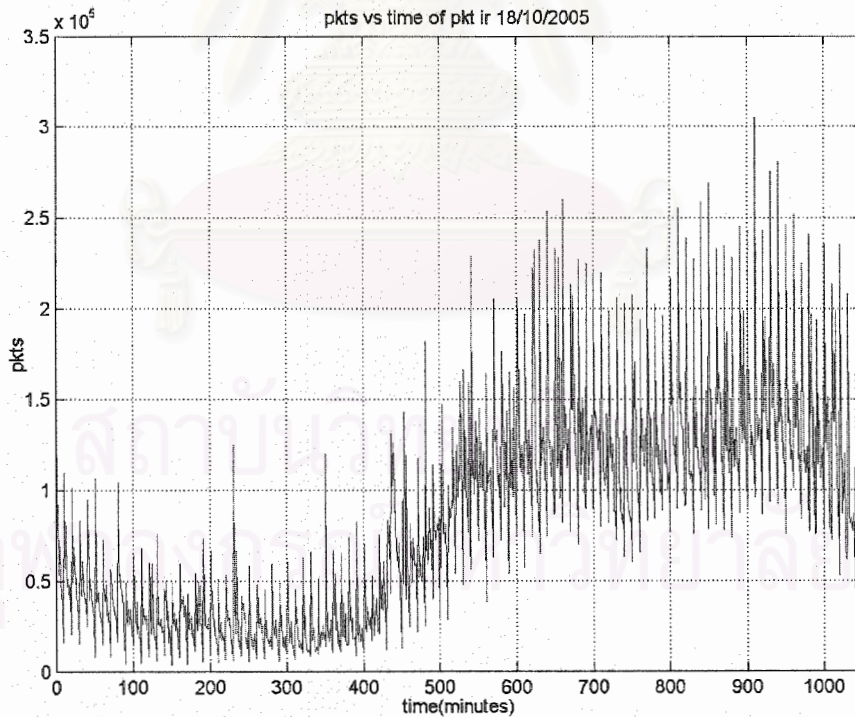
รูปที่ 4.12 ข้อมูล *ipIR* ของรุตเทอร์ 7513 ในวันที่ 17/10/2005



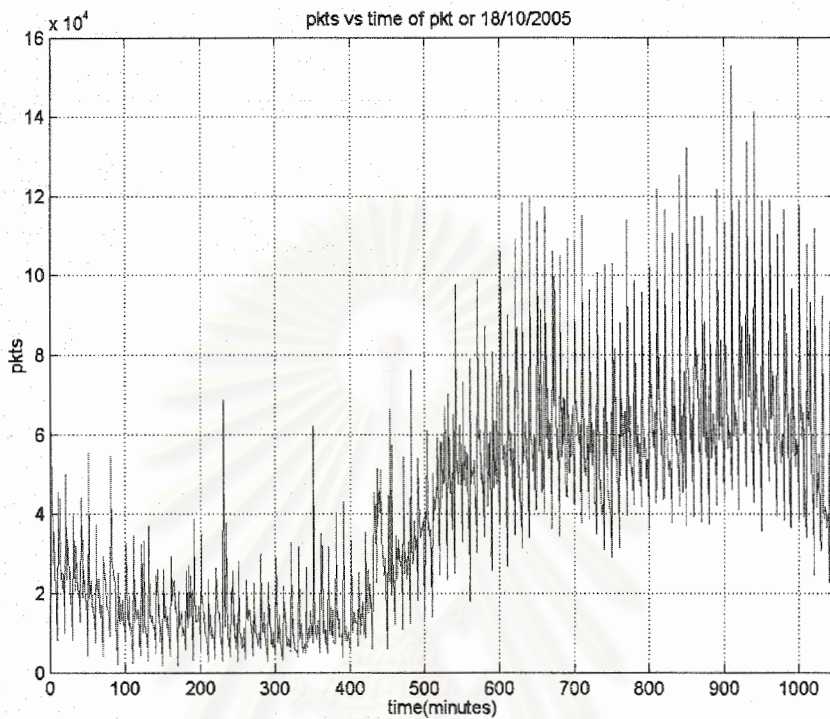
รูปที่ 4.13 ข้อมูล *ipOR* ของรุตเทอร์ 7513 ในวันที่ 17/10/2005



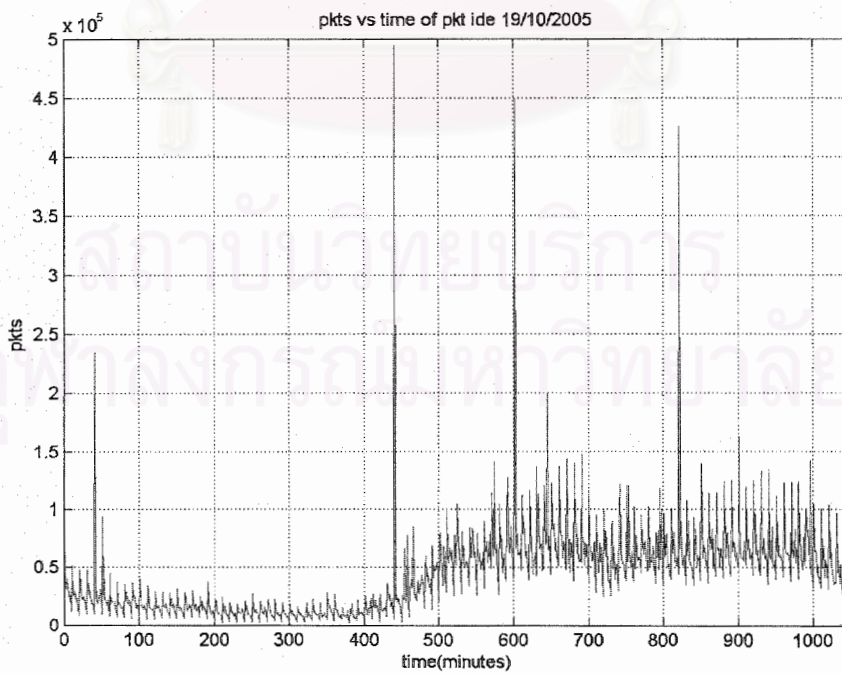
รูปที่ 4.14 ข้อมูล *ipIDE* ของรุตเตอร์ 7513 ในวันที่ 18/10/2005



รูปที่ 4.15 ข้อมูล *ipIR* ของรุตเตอร์ 7513 ในวันที่ 18/10/2005

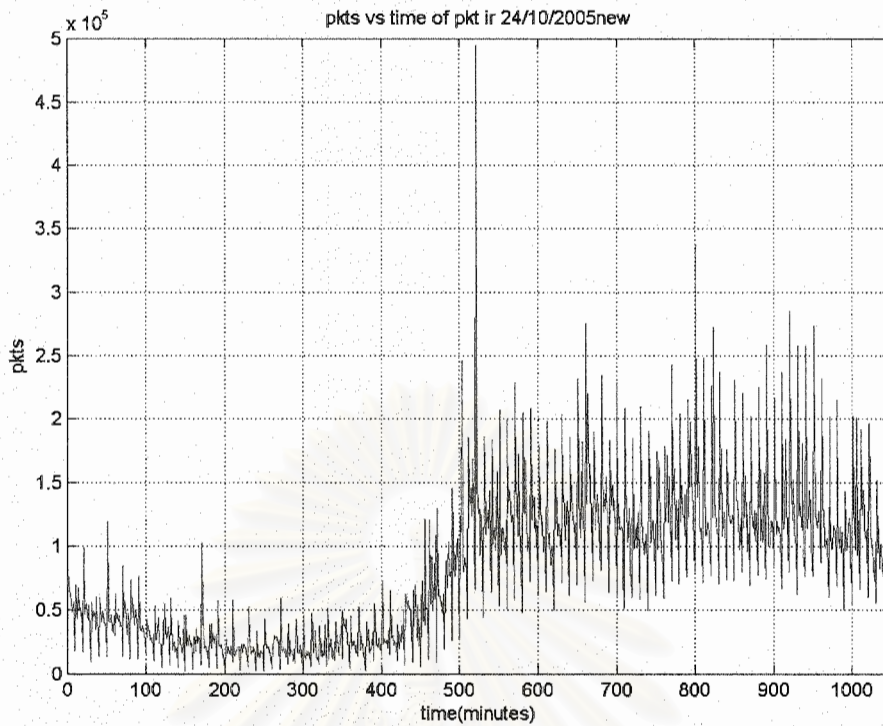


รูปที่ 4.16 ข้อมูล *ipOR* ของรุตเทอร์ 7513 ในวันที่ 18/10/2005

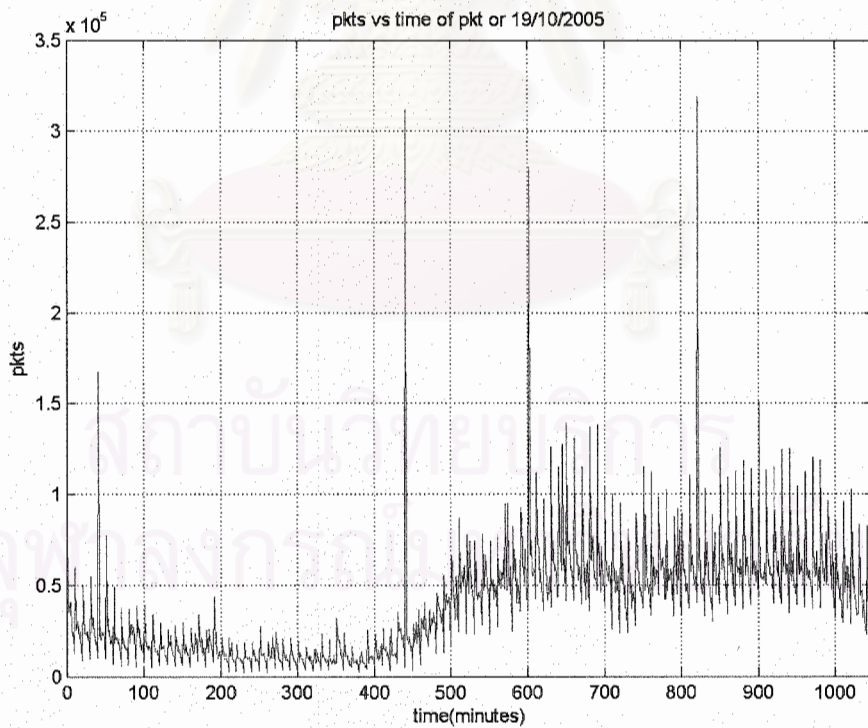


รูปที่ 4.17 ข้อมูล *ipIDE* ของรุตเทอร์ 7513 ในวันที่ 19/10/2005

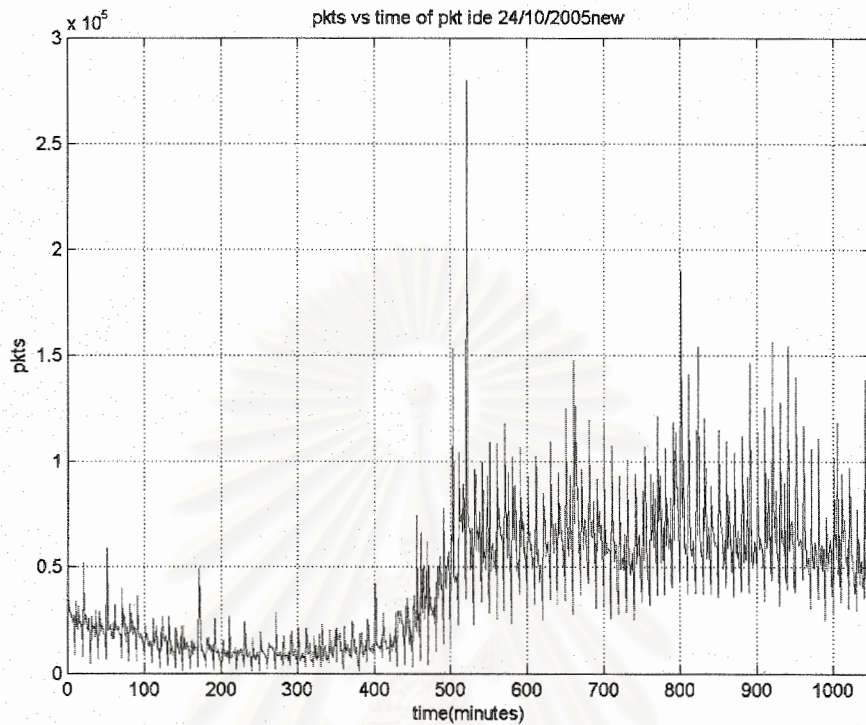




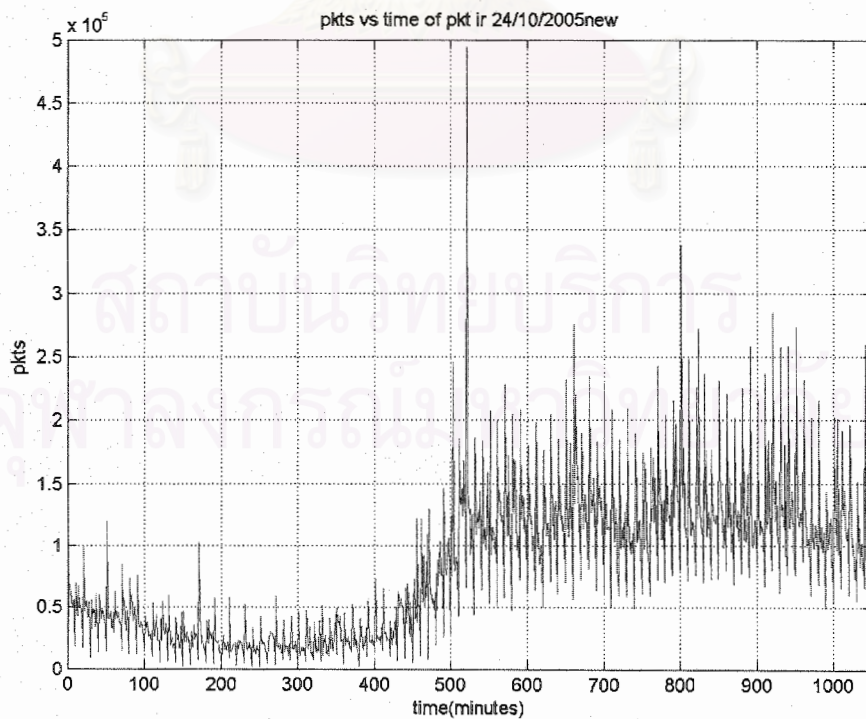
รูปที่ 4.18 ข้อมูล *ipIR* ของรูกทเทอร์ 7513 ในวันที่ 19/10/2005



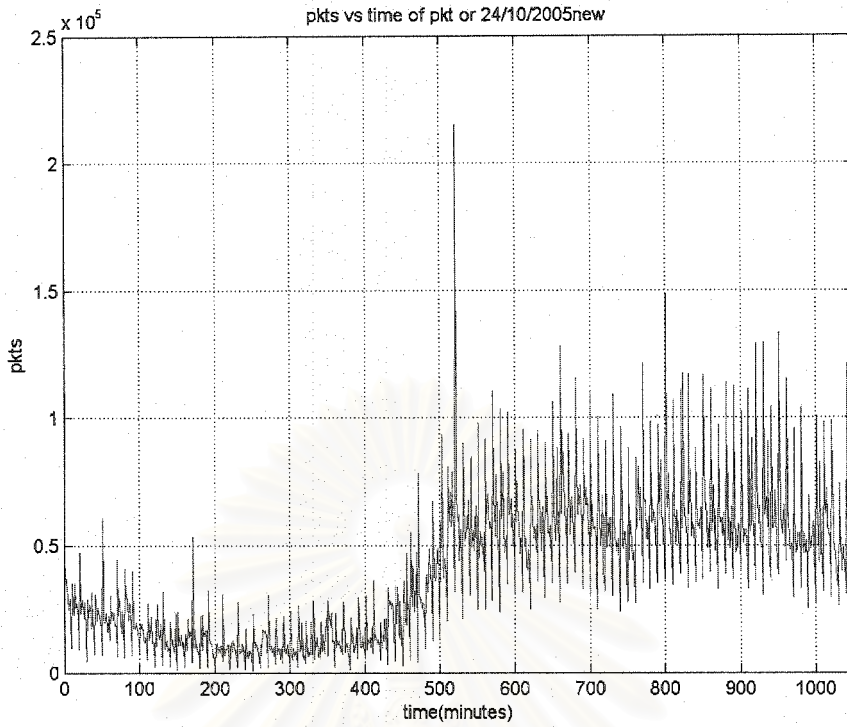
รูปที่ 4.19 ข้อมูล *ipOR* ของรูกทเทอร์ 7513 ในวันที่ 19/10/2005



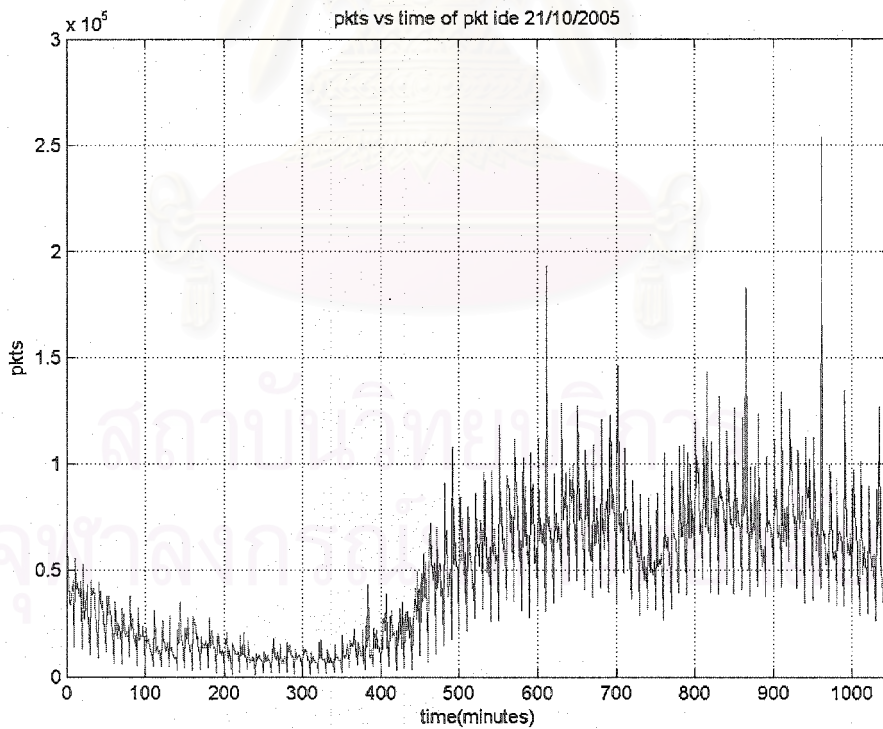
รูปที่ 4.20 ข้อมูล *ipIDE* ของรูกเตอร์ 7513 ในวันที่ 20/10/2005



รูปที่ 4.21 ข้อมูล *ipIR* ของรูกเตอร์ 7513 ในวันที่ 20/10/2005

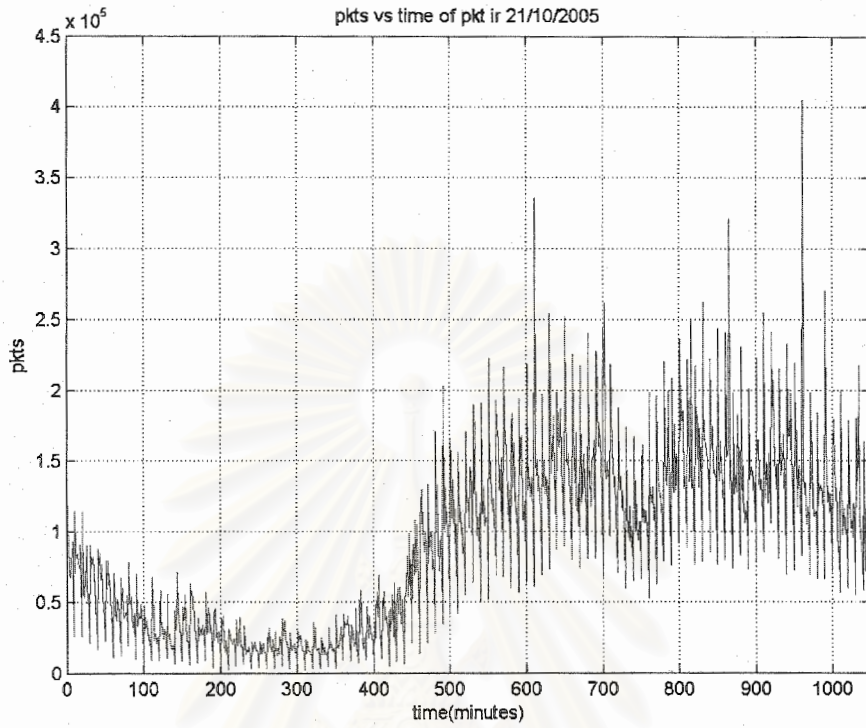


รูปที่ 4.22 ข้อมูล *ipOR* ของรูกทเทอร์ 7513 ในวันที่ 20/10/2005

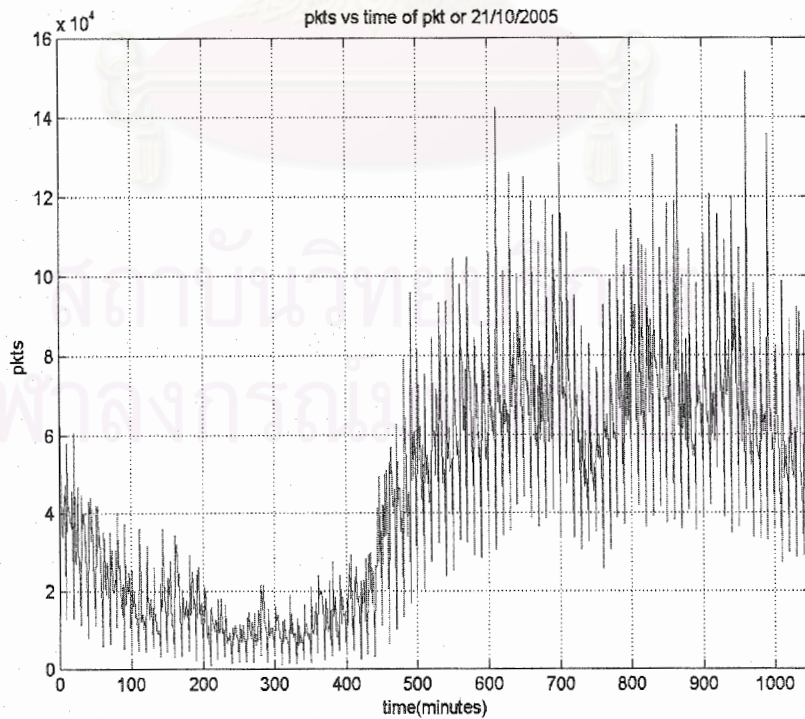


รูปที่ 4.23 ข้อมูล *ipIDE* ของรูกทเทอร์ 7513 ในวันที่ 21/10/2005

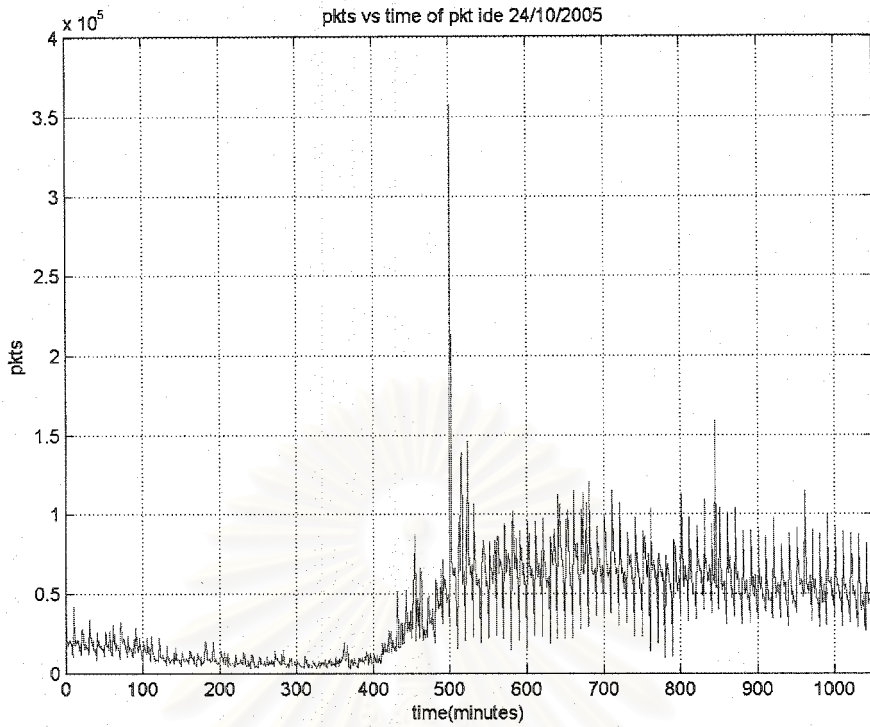




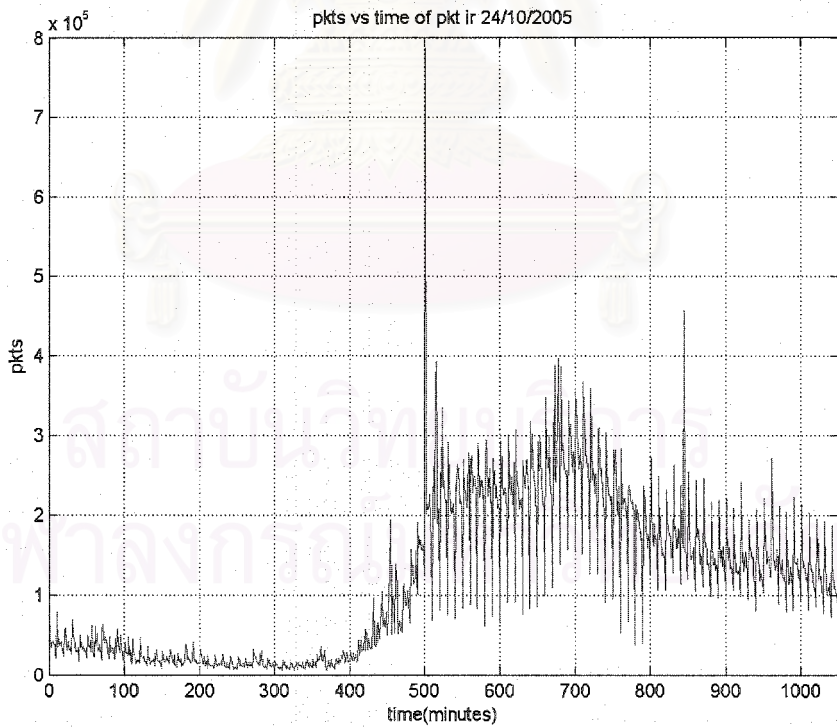
รูปที่ 4.24 ข้อมูล *ipIR* ของรูกทเทอร์ 7513 ในวันที่ 21/10/2005



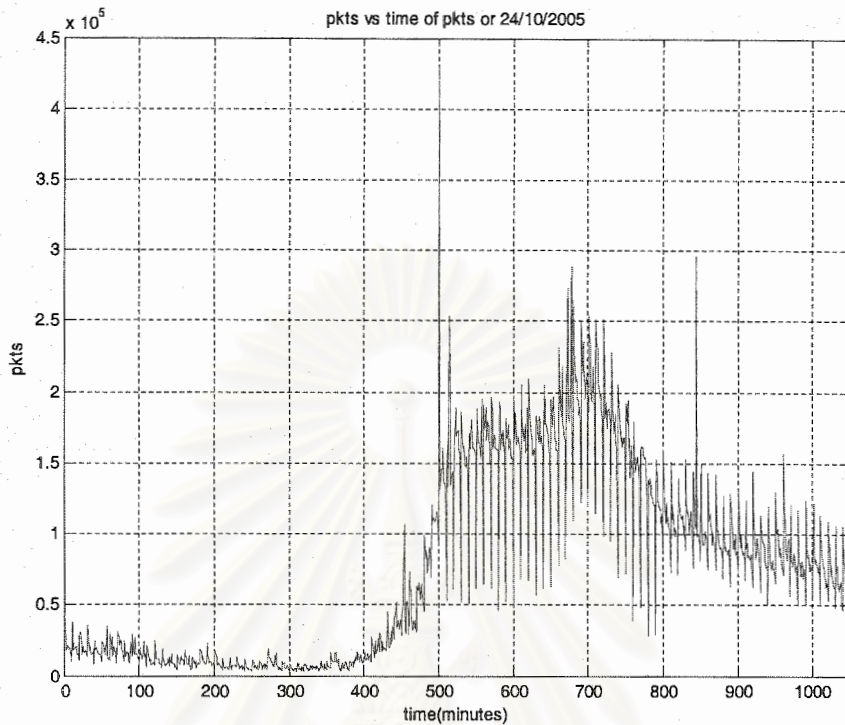
รูปที่ 4.25 ข้อมูล *ipOR* ของรูกทเทอร์ 7513 ในวันที่ 21/10/2005



รูปที่ 4.26 ข้อมูล *ipIDE* ของรุตเทอร์ 7513 ในวันที่ 24/10/2005



รูปที่ 4.27 ข้อมูล *ipIR* ของรุตเทอร์ 7513 ในวันที่ 24/10/2005



รูปที่ 4.28 ข้อมูล *ipOR* ของรูลเตอร์ 7513 ในวันที่ 24/10/2005

ในการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติของวิธีการพีชชี เราจะทำการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในวันที่ 24 ตุลาคม 2548 และใช้ข้อมูลของวันที่ 17-24 ตุลาคม 2548 สำหรับเป็นฐานข้อมูลในอดีตในการใช้วิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก เราได้แบ่งการทดลองออกเป็น 1 ส่วน คือ กำหนดให้จำนวนรอบที่ใช้ในการหาค่าเมตริกซ์  $A$  มีค่าคงที่เท่ากับ 14 รอบ แต่ปรับเปลี่ยนค่าความกว้างของหน้าต่างในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

เนื่องจากข้อมูลกราฟฟิกที่บันทึกได้จากโปรแกรม *NETFLOW* ที่ได้จากโครงข่ายจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนั้น ไม่ได้มีการบันทึกว่าในช่วงเวลาที่ผ่านมามีความผิดปกติขึ้นเมื่อใด ด้วยสาเหตุใด เป็นเวลานานเท่าใด ดังนั้นจากรูปที่ 4.22-4.24 ของกราฟฟิกวันที่ 24 ตุลาคม 2548 เราจึงได้กำหนดให้มีความผิดปกติเกิดขึ้นที่ระบบโครงข่ายที่เวลา 500 นาที ด้วยเหตุผลที่ว่าที่เวลานี้จำนวนแพ็กเก็ตเกิดความเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อเทียบกับช่วงเวลาที่ติดกัน

ในการทดลองนั้นเราได้มีการกำหนดตัวแปรในการแสดงผลของแต่ละวิธีในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายดังนี้

*patternmatching* หมายถึง การตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก

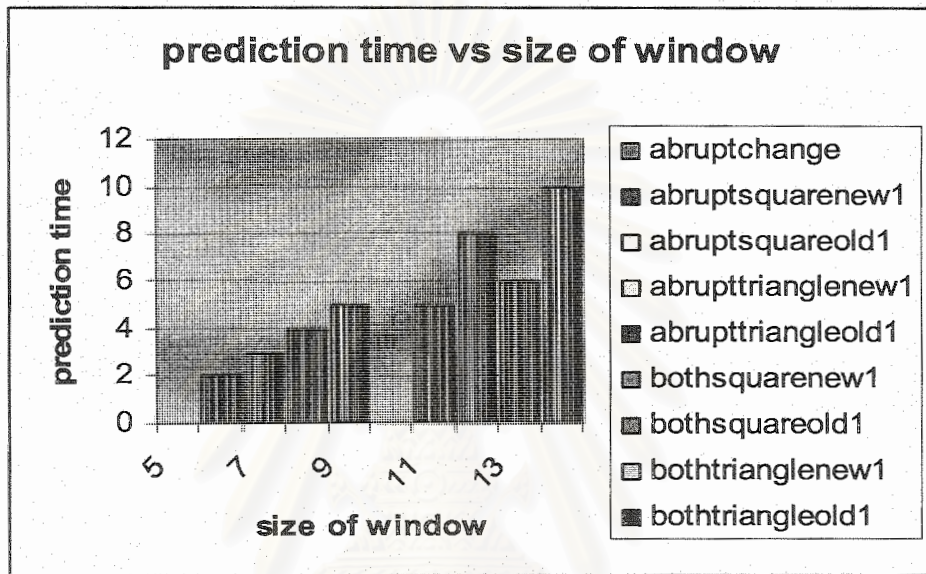
*abruptchange* หมายถึง การตรวจจับความผิดปกติแบบทันทีทันใด



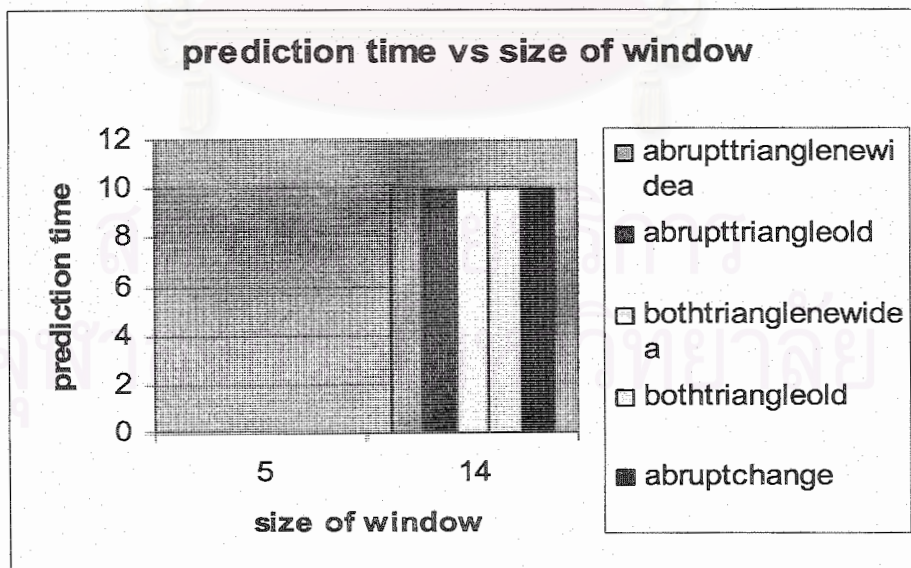


4.3.1 จำนวนรอบที่ใช้ในการหาค่าเมตริกซ์  $A$  มีค่าคงที่ 14 รอบ แต่ปรับเปลี่ยนค่าความกว้างของหน้าต่างในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

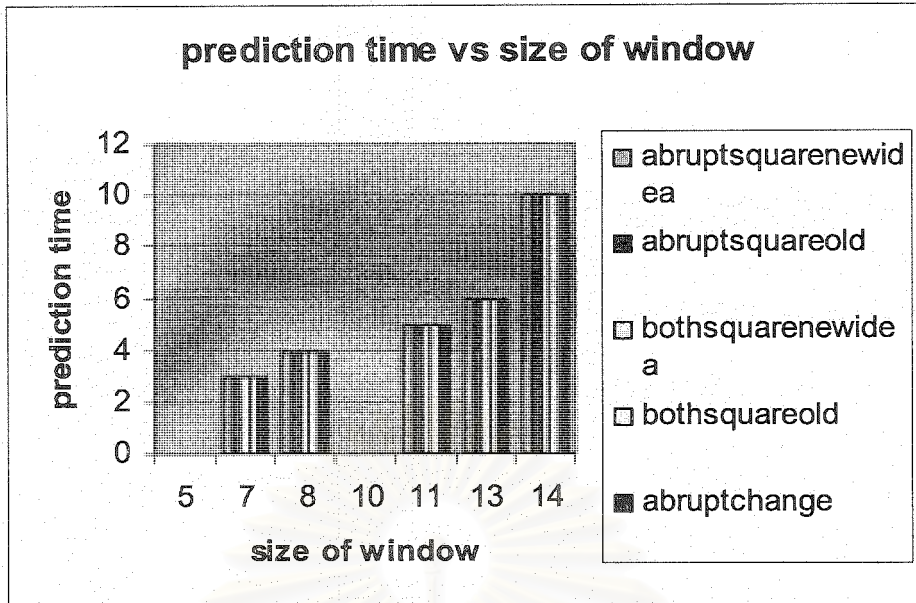
ในการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการตรวจจับความผิดปกติโดยใช้พีชชีได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.29-4.31



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่ายก่อนเกิดความเสียหายและขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่าย แบบ A



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่ายก่อนเกิดความเสียหายและขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่าย ของฟังก์ชันการเป็นสมาชิก แบบ B



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติในระบบ โครงข่ายก่อนเกิดความเสียหายและขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติในระบบ โครงข่าย ของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบ  $B$

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.29-4.31 จะเห็นได้ว่าขนาดหน้าต่างในการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่ายที่แตกต่างกันจะให้ผลของเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติในระบบ โครงข่ายก่อนเกิดความเสียหายที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่ายก่อนเกิดความเสียหายมีค่าเท่ากันทุกวิธีเนื่องจาก ลักษณะกราฟฟิคที่เวลาใกล้ช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติให้ค่าความผิดปกติของ โหนด ของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ที่มีค่าสูงมาก เกินค่าเกณฑ์ และค่าเฉลี่ยกราฟฟิคจริงที่วัด ได้เกินค่าที่ทำนาย ได้ของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิคดังนั้นทำให้เกินสัญญาณเตือนเกิดขึ้น

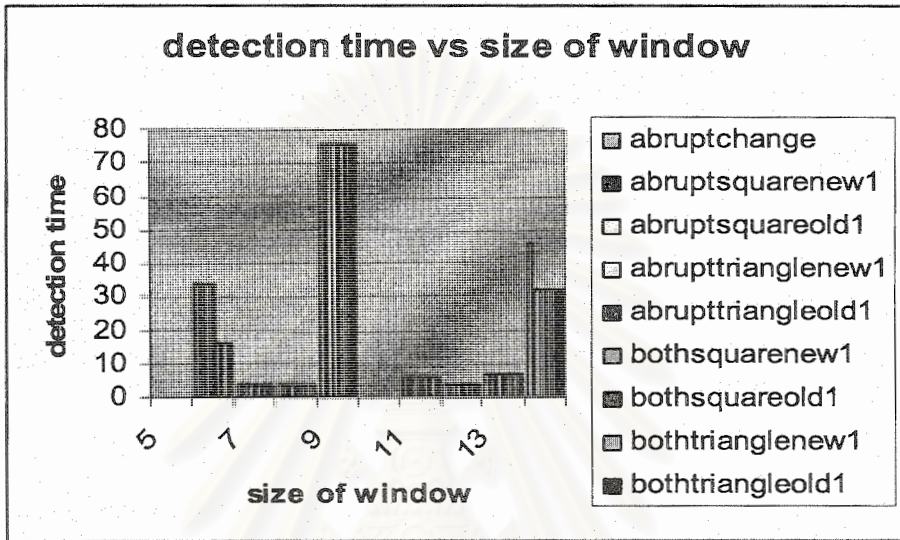
win	$T_p(ipIDE)$
5	230
6	336
7	199

ตารางที่ 4.5 เวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติก่อนระบบ โครงข่ายเกิดความเสียหาย ของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิค

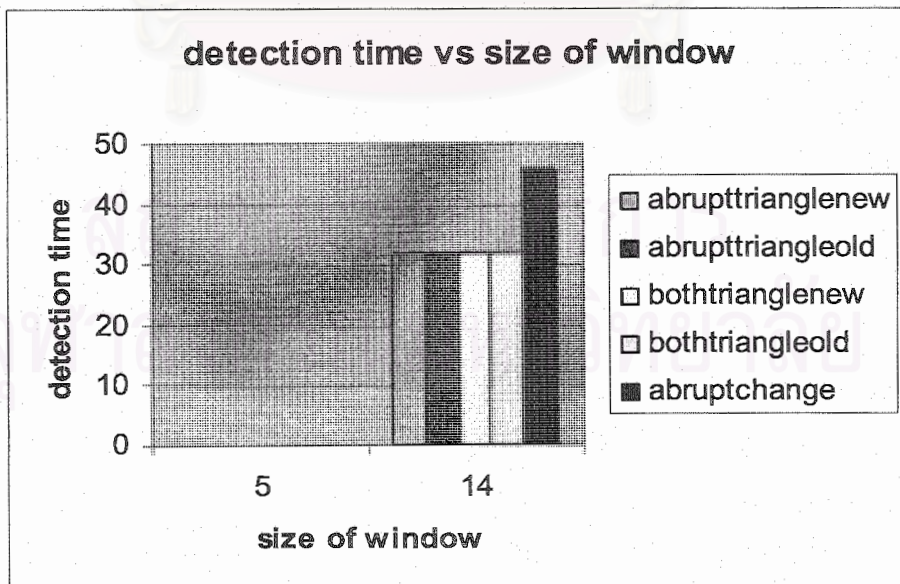
จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิคไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติก่อนเกิดความเสียหายได้ในบางขนาดหน้าต่าง และที่



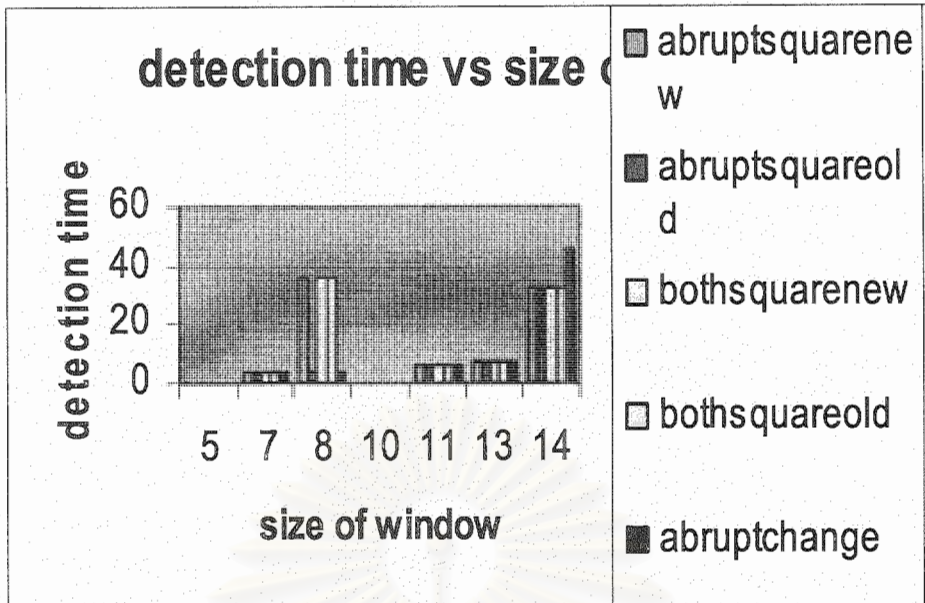
ขนาดหน้าต่างที่สามารถตรวจจับความผิดปกติก่อนเกิดความเสียหายได้นั้น ค่าเวลาที่สารตรวจจับความผิดปกติก่อนเกิดความเสียหายมีค่าสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบทันทีทันใด และวิธีพีชชี ดังนั้นวิธีการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกจึงให้ประสิทธิภาพที่แย่กว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบทันทีทันใด และวิธีพีชชี



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติในระบบ โครงข่ายหลังเกิดความเสียหายและขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติในระบบ โครงข่าย แบบ A



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติในระบบ โครงข่ายหลังเกิดความเสียหายและขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติในระบบ โครงข่าย แบบ B



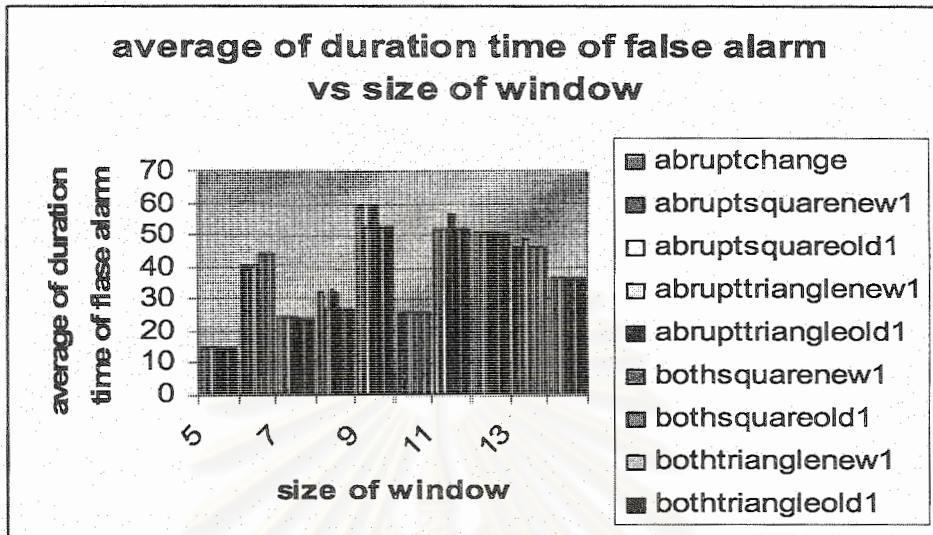
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่ายหลังเกิดความเสียหายและขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่ายแบบ B

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.32-4.34 จะเห็นได้ว่าขนาดของหน้าต่างในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายที่แตกต่างกันจะให้ผลของเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติหลังเกิดความเสียหายที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายหลังเกิดความเสียหายมีค่าเท่ากันเกือบทุกขนาดหน้าต่างเนื่องจาก ลักษณะกราฟฟิคที่เวลาใกล้ช่วงเวลาที่เกิดความผิดปกติให้ค่าความผิดปกติของโนด ของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ที่มีค่าสูงมาก เกินค่าเกณฑ์และค่าเฉลี่ยกราฟฟิคจริงที่วัดได้เกินค่าที่ทำนายได้ของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิคดังนั้นทำให้เกินสัญญาณเตือนเกิดขึ้น

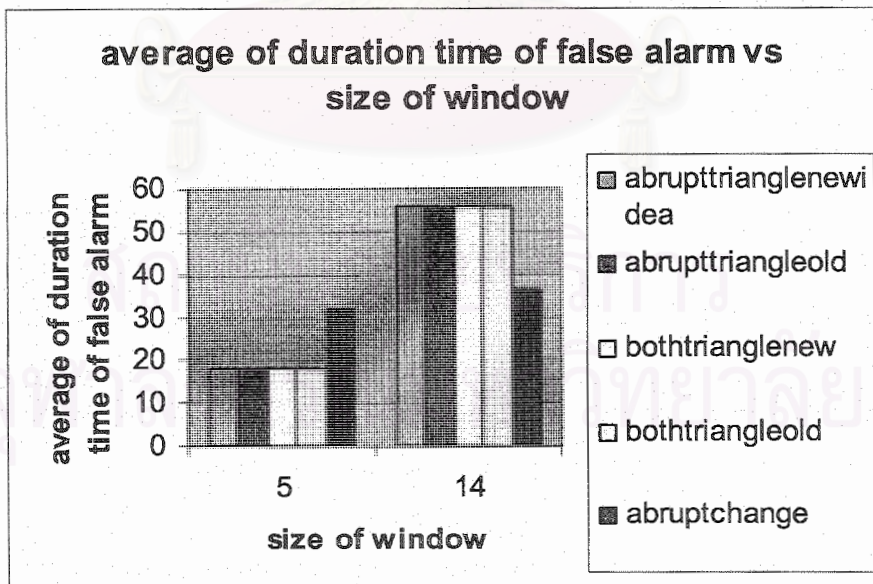
win	$T_d(ipIDE)$
5	5
6	16
7	18

ตารางที่ 4.6 เวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติหลังระบบโครงข่ายเกิดความเสียหาย ของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิค

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิคไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติหลังเกิดความเสียหายได้ในบางขนาดหน้าต่าง

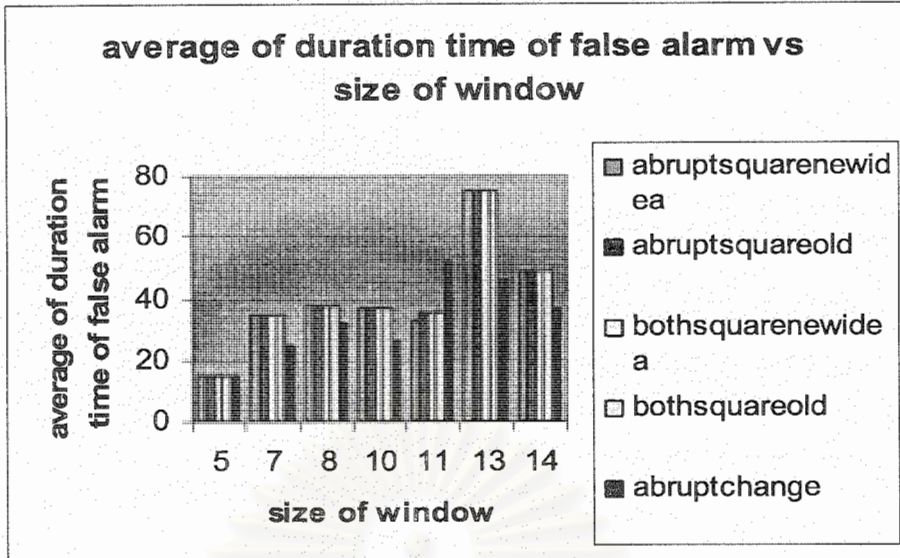


รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่将会เกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดและขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่าย แบบ A



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่将会เกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดและขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่าย แบบ B





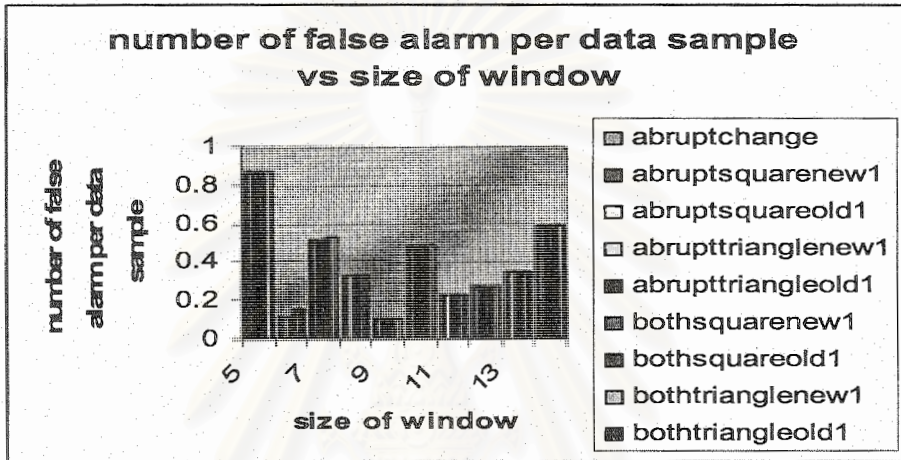
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่จะเกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดและขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติในระบบ โครงข่าย แบบ B

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.35-4.37 จะเห็นได้ว่าการใช้ขนาดหน้าต่างในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายที่แตกต่างกันจะให้ผลของค่าเฉลี่ยของช่วงสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดที่ต่างกัน และการใช้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของ แบบ A และ แบบ B ให้ผลของค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่จะเกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดที่ต่างกัน โดยที่แบบ B นั้นให้ผลของค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่จะเกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดที่สูงกว่าแบบ A เนื่องจากแบบ A มีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกโน้มเอียงไปทางด้านความผิดปกติมากกว่าแบบ B ค่าค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่จะเกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดของแบบ B มีค่าที่สูงกว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบทันทีทันใดอย่างมาก ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้น แต่ข้อเสียคือในบางขนาดหน้าต่างนั้น แบบ B ไม่สามารถตรวจจับความผิดปกติได้เลย

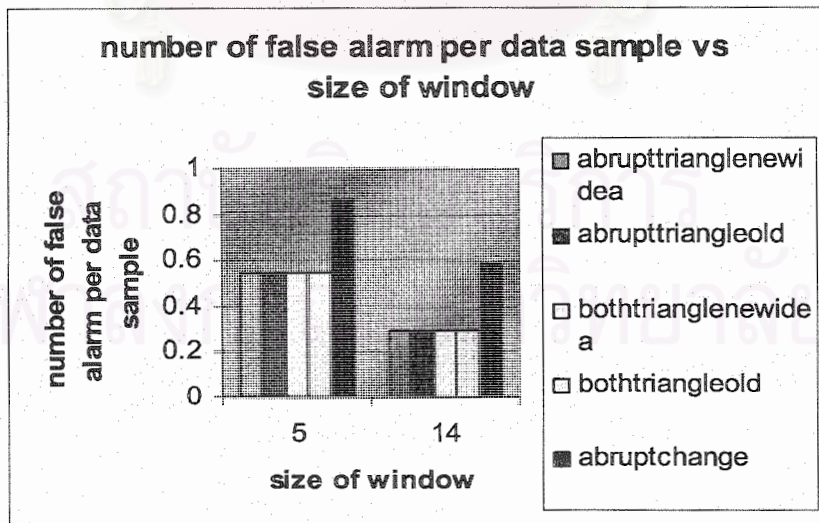
win	$T_f(ipIDE)$
5	-
6	120
7	140

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่จะเกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาด ของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก

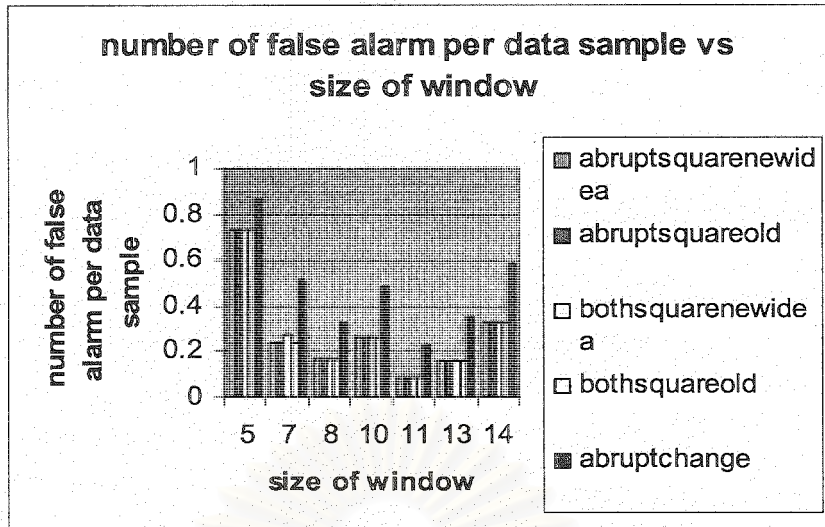
จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกให้ค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่将会เกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดที่สูงกว่าวิธีการของพีชชี ในบางขนาดหน้าต่าง แต่ว่าเมื่อย้อนกลับไปที่ถึงเวลาที่สามารรถตรวจจับความผิดปกติก่อนเกิดความเสียหายนั้น วิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกให้ผลที่แม่นยำมากขึ้นผลของค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่将会เกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดที่สูงไม่สามารถแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีได้



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดต่อจำนวนหน้าต่างข้อมูลและขนาดความกว้างของหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ แบบ A



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดต่อจำนวนหน้าต่างข้อมูลและขนาดความกว้างของหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ แบบ B



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดต่อจำนวนหน้าต่างข้อมูลและขนาดความกว้างของหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ แบบ B

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.38-4.40 จะเห็นได้ว่าการใช้ขนาดหน้าต่างในการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่ายที่แตกต่างกันจะให้ผลของจำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดต่อจำนวนหน้าต่างข้อมูลที่แตกต่างกัน และการใช้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบ B ให้ผลของการปรับปรุงจำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดต่อจำนวนหน้าต่างข้อมูล จากการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบทราฟฟิก ดีกว่าแบบ A ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแบบ A มีฟังก์ชันการเป็นสมาชิกโน้มเอียงไปทางความผิดปกติมากกว่าแบบ A เป็นผลให้จำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดมีค่าสูงกว่า แบบ B

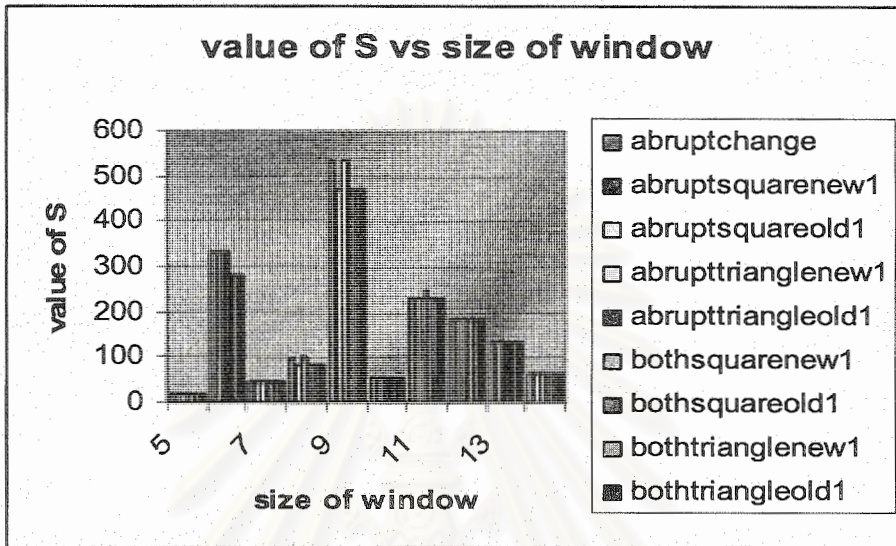
win	$N_f(ipIDE)$
5	0
6	0.0243
7	0.0142

ตารางที่ 4.8 จำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดต่อจำนวนหน้าต่างข้อมูล ของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบทราฟฟิก

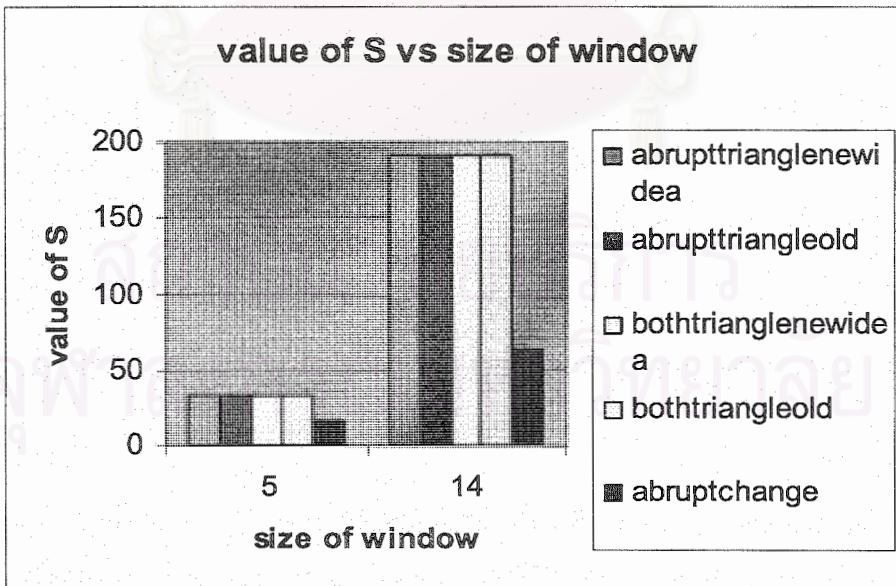
จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบทราฟฟิกให้จำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดต่อจำนวนหน้าต่างข้อมูลที่ต่ำกว่าวิธีการของพีชชี ในบางขนาดหน้าต่าง แต่เมื่อย้อนกลับไปดูถึงเวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติก่อนเกิดความเสียหายนั้น



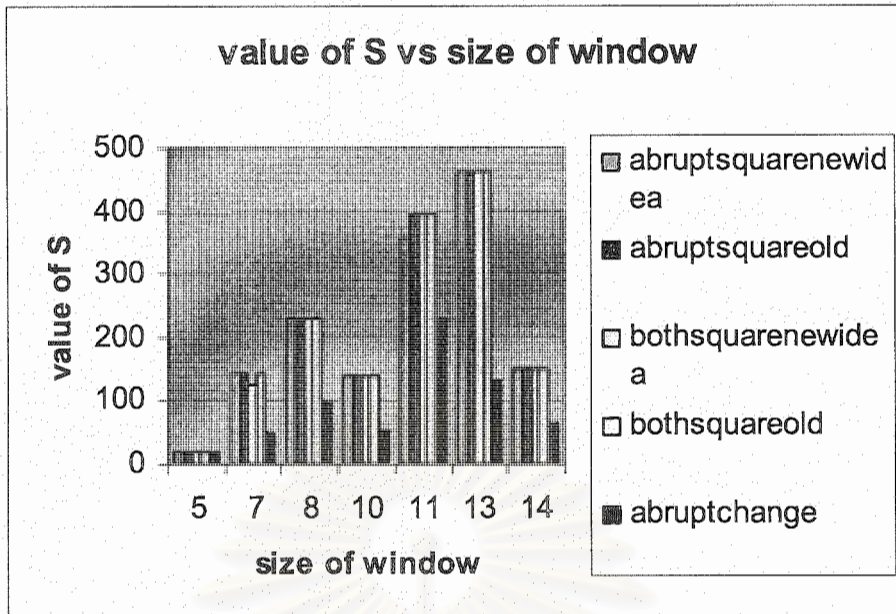
วิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกให้ผลที่แม่นยำมากขึ้นผลของค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาที่将会เกิดสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดที่สูงไม่สามารถแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีได้



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง *value of S* และขนาดความกว้างของหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ แบบ A



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่าง *value of S* และขนาดความกว้างของหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ แบบ B



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง *value of S* และขนาดความกว้างของหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ แบบ *B*

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.41-4.43 จะเห็นได้ว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบใช้พีชชี แบบ *B* ให้ผลที่ดีกว่าแบบ *A* อย่างมาก และปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจจับความผิดปกติแบบทันทีทันใดทุกขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติ

win	<i>S(ipIDE)</i>
5	-
6	4938.27
7	9859.15

ตารางที่ 4.9 ค่า *S* ของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิก

จากผลการทดลองดังตารางที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกให้ผลของค่า *S* ที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีพีชชี แต่ในการที่เราจะบอกว่าวิธีการตรวจจับความผิดปกติมีประสิทธิภาพหรือไม่ต้องคำนึงถึง เวลาที่สามารถตรวจจับความผิดปกติก่อนระบบโครงข่ายเกิดความเสียหาย ซึ่งวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกให้ผลที่แย่

มาก ดังนั้น ประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีการนี้จึงต่ำกว่า วิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบทันทีทันใด และวิธีการตรวจจับความผิดปกติโดยใช้พีชชี

#### 4.3.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกให้ผลดีที่สุด และการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายโดยใช้พีชชีแบบ  $B$  ปรับปรุงประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกและแบบทันทีทันใด ดีกว่าแบบ  $A$  เนื่องจากแบบ  $A$  นั้นฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมีความโน้มเอียงไปทางความผิดปกติมาก ทำให้จำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดมีจำนวนมากกว่าแบบ  $B$

### 5. บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการปรับปรุงวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย 3 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการปรับปรุงวิธีการตรวจจับความผิดปกติของการเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกด้วยกัน 4 วิธีคือ การเสนอการหาค่าถ่วงน้ำหนักแบบใหม่ การปรับค่าถ่วงน้ำหนักให้เปลี่ยนตามเวลา การใช้ข้อมูลมากกว่าหนึ่งชนิดข้อมูลร่วมกันในการตรวจจับความผิดปกติ และการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาร่วมกับการใช้ข้อมูลมากกว่าหนึ่งชนิดข้อมูลในการตรวจจับความผิดปกติ อีกทั้งยังวิเคราะห์ถึงผลของขนาดหน้าต่างที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติที่มีผลต่อความแน่นอนในการตรวจจับความผิดปกติที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต โดยการใช้โปรแกรม *NS (Network Simulator)* ในการก่อเกิดกราฟฟิกและทดลองในการตรวจจับความผิดปกติ จะเห็นได้ว่าการใช้ขนาดหน้าต่างที่สั้นเกินไปในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย จะมีผลให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากจำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ในการทำนายค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนมีน้อยเกินไปส่งผลให้เกิดความผิดพลาดและชนิดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติที่แตกต่างกันให้ผลของประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติที่แตกต่างกันที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแต่ละชนิดข้อมูลมีความคล้ายคลึงกันระหว่างข้อมูลในอดีตและปัจจุบันที่แตกต่างกัน วิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกนั้นเหมาะสำหรับตรวจจับความผิดปกติที่เป็นแบบค่าเฉลี่ยของกราฟฟิกเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเกิดในกรณีของ ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหาย แต่ไม่เหมาะสำหรับความผิดปกติที่กราฟฟิกมีลักษณะค่าเบี่ยงเบนกราฟฟิกเฉลี่ยเปลี่ยนแปลง เนื่องจากวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยของกราฟฟิกในการตรวจจับ และวิธีการที่นำเสนอในการปรับปรุงวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิกให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติที่ดีขึ้นกว่าวิธีการเดิม



ในส่วนที่สองทำการวิเคราะห์ผลของวิธีการตรวจจับความผิดปกติของระบบ โครงข่ายแบบทันทีทันใดโดยใช้กราฟฟิคที่ได้จากโครงข่ายจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่รูทเทอร์ 7513 และนำเสนอการเลือกใช้เกณฑ์ในการบอกวาระบบโครงข่ายเกิดความผิดปกติหรือไม่ด้วยกัน 2 วิธี คือ การเลือกใช้ค่ากลางของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด และ การเลือกใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของเวกเตอร์ความผิดพลาด จะเห็นได้ว่าจำนวนหน้าตาที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย จำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณเมตริกซ์  $A$  และวิธีการที่เราเลือกใช้ในการหาค่าเกณฑ์ในการระบุว่าเกิดความผิดปกติในโครงข่ายหรือไม่ มีผลต่อประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย ดังนั้นเราควรที่จะทดสอบเพื่อหาขนาดความกว้างหน้าตาที่เหมาะสมที่สุดและจำนวนรอบที่ใช้ในการคำนวณเมตริกซ์  $A$  ที่เหมาะสมที่สุดเช่นเดียวกัน เพื่อที่จะได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่าย

ในส่วนที่สามทำการใช้วิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิค และเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ร่วมกันโดยใช้กรรมวิธีการของพีชชีในการตัดสินใจว่าในขณะที่นั้นเกิดความผิดปกติหรือไม่โดยใช้กราฟฟิคที่ได้จากโครงข่ายจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่รูทเทอร์ 7513 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิคให้ผลแย่ที่สุด และการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายโดยใช้พีชชี แบบ  $B$  ปรับปรุงประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติของวิธีการตรวจจับความผิดปกติแบบเปรียบเทียบรูปแบบกราฟฟิคและแบบทันทีทันใด ดีกว่าแบบ  $A$  เนื่องจากแบบ  $A$  นั้นฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมีความโน้มเอียงไปทางความผิดปกติมาก ทำให้จำนวนสัญญาณเตือนที่ผิดพลาดมีจำนวนมากกว่าแบบ  $B$

## 6. ข้อเสนอแนะ

1. การใช้ระบบการตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่ายในวิทยานิพนธ์ที่เสนอนี้ เมื่อนำไปใช้ในโครงข่ายต่าง ๆ นั้นควรที่จะเลือกขนาดหน้าตาที่ใช้ในการตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่ายให้เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพที่ดีในการตรวจจับความผิดปกติในระบบโครงข่าย

2. เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านกราฟฟิคในระบบโครงข่ายของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คือ ไม่มีการบันทึกข้อมูลการเกิดความเสียหายในระบบโครงข่าย และหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่บรรจุข้อมูลกราฟฟิคผ่านโปรแกรม *NETFLOW* มีขนาดเล็กไม่ใหญ่นัก เป็นผลให้กราฟฟิคที่นำมาใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายมีจำนวนน้อย ดังนั้นถ้าสามารถหา กราฟฟิคของระบบโครงข่ายอื่นที่มีการบันทึกข้อมูลการเกิดความเสียหายในระบบโครงข่าย และหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่บรรจุข้อมูลกราฟฟิคผ่านโปรแกรม *NETFLOW* มีขนาดใหญ่พอ เราสามารถที่จะตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบการตรวจจับความผิดปกติของระบบโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

## รายการอ้างอิง.

1. W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, and D. V. Wilson. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (extended version). IEEE/ACM Trans Networking. (1994) : 1-15.
2. J. L. Vehe, E. Lutton, and C. Tricot. Fractals in Engineering: From Theory to Industrial Applications. New York: Springer-Verlag. (1997) : 185-202.
3. Marina Thottan and Chuanyi Ji. Anomaly Detection in IP Network. IEEE Transactions on Signal Processing. (August 2003) : 2191-2204.
4. L.Lewis. A Case Based Reasoning Approach to the Management of Faults in Communication Networks. in Proc. IEEE INFOCOM. (March 1993) : 1422-1429.
5. A.Lazar, W. Wang, and R. Deng. Models and Algorithms for Network Fault Detection and Identification. in Proc. IEEE Int. Contr. Conf. (November 1992) : 999-1003.
6. C. Hood and C. Ji. Proactive Network Fault Detection. in Proc. IEEE INFOCOM. (April 1997) : 1147-1155
7. S. Papavassiliou, M.Pace, A. Zawadzki, and L.Ho. Implementing Enhanced Network Maintenance for Transaction Access Services: Tools and Applications. Proc. IEEE Int. Contr. Conf. (2000) : 211-215
8. Peter V. de Souza. Statistical Tests and Distance Measures for LPC Coefficients. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. (December 1997) : 554-559.
9. Yan Qiao and Xie Weixin. A Network IDS with Low False Positive Rate. IEEE Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. (May 2002) : 1121-1126.
10. Hassan Hajji. Baselineing Network Traffic and Online Faults Detection. IEEE International Conference on Communications. (May 2003) : 301-308.
11. Xiaolin Li, Marc Parizeau and Rejean Plamondon. Training Hidden Markov Models with Multiple Observations-A Combinatorial Method. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. (April 2000) : 371-377
12. Sung-Bae Cho. Incorporating Soft Computing Techniques Into a Probabilistic Intrusion Detection System. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews. (May 2002) :154-160

## 1. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อศึกษาและพัฒนาอัลกอริธึมการจัดสรรเส้นทางสำหรับโครงข่ายไร้สายแอดฮอค เพื่อให้โครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานนานที่สุด โดยอายุการใช้งานของโครงข่ายได้นิยามว่าเป็นระยะเวลาตั้งแต่ทุก ๆ โหนดในโครงข่ายเริ่มทำงานจนกระทั่งมีโหนดใดโหนดหนึ่งในโครงข่ายไม่สามารถทำงานได้อีกเนื่องจากแบตเตอรี่หมด

## 2. ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คุณลักษณะของโครงข่ายแบบแอดฮอค (Characteristic of Ad Hoc Networks)

โครงข่ายแอดฮอคเป็นโครงข่ายที่ก่อรูปขึ้นโดยไม่มีการอำนวยความสะดวกจากส่วนกลาง (Infrastructureless) และเป็นการทำงานแบบกระจายศูนย์ (Distributed) โดยโครงข่ายจะประกอบด้วย โหนดเคลื่อนที่ (Mobile nodes) ที่มีการติดต่อกันแบบไร้สาย อีกทั้งโหนดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทำให้ทอพอโลยีของโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและไม่สามารถทำนายได้ล่วงหน้า และเมื่อโหนดต้นทางต้องการสื่อสารกับโหนดปลายทางที่ไม่อยู่ในระยะการส่งของโหนดต้นทาง โหนดต้นทางจำเป็นต้องส่งแพ็กเก็ตผ่านโหนดระหว่างทาง (Intermediate nodes) แล้วให้โหนดระหว่างทางทำหน้าที่ส่งแพ็กเก็ตนั้นต่อไปยังโหนดปลายทาง ดังนั้นจึงทำให้ทุกโหนดในโครงข่ายต้องมีความสามารถในการจัดสรรเส้นทางเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารกันภายในโครงข่าย (ซึ่งโหนดต้องทำหน้าที่เสมือนเราเตอร์ (Router)) [1]

โหนดในโครงข่ายแอดฮอคจะต้องทำงานร่วมกันเพื่อให้โครงข่ายสามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่จำเป็นต้องพึ่งสถานีฐาน จึงทำให้จำนวนโหนดในโครงข่ายมีผลต่อระบบ นอกจากนั้นโหนดจะสามารถปฏิบัติงานได้โดยระดับพลังงานจากแบตเตอรี่มีเพียงพอและจะไม่สามารถปฏิบัติงานตามหน้าที่ได้ถ้าระดับพลังงานที่เหลืออยู่ต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ อีกทั้งการออกแบบอุปกรณ์การสื่อสารในปัจจุบันเช่นโทรศัพท์ พีดีเอ (PDA) และ Mobile IP ยังมีขนาดเล็กลงไปเรื่อย ๆ ฉะนั้นพลังงานที่ใช้ในการสื่อสารก็กลายเป็นส่วนที่สำคัญเมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการปฏิบัติงาน ถึงแม้ว่าโหนดจะสามารถเพิ่มพลังงานเข้าไปใหม่ได้แต่ในหลาย ๆ สถานการณ์ อย่างเช่น ในสนามรบ ในสถานการณ์การช่วยเหลือฉุกเฉิน ผู้ใช้ไม่สามารถทำการเพิ่มพลังงานใหม่ได้ซึ่งจะส่งผลให้โครงข่ายไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ จากข้อจำกัดนี้ทำให้การออกแบบเพื่อทำให้โหนดหรือโครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพหรืออนุรักษ์พลังงานให้มากที่สุดเป็นประเด็นที่สำคัญสำหรับโครงข่ายแอดฮอค [2] ในงานวิจัยนี้จึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญ ณ จุดนี้โดยการออกแบบโพรโทคอลเพื่อทำให้โครงข่ายสามารถใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่าย



โดยเลือกแนวทางในหมวดวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลัง (Power-Aware routing) เพื่อให้โครงข่ายบรรลุตามวัตถุประสงค์ เนื่องจากเป็นแนวทางที่ไม่มีความซับซ้อนในการแก้ปัญหาและเป็นแนวทางที่ช่วยให้สามารถทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายอยู่ในระดับที่สูง

## 2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางสำหรับโครงข่ายแบบแอดฮอค (Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Network)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอคถูกแบ่งตามคุณสมบัติกว้าง ๆ ออกเป็น 2 ประเภทคือ แบบการเตรียมเส้นทางไว้ล่วงหน้า (Proactive) และแบบการจัดเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (Reactive or On-demand) เนื่องจากในงานวิจัยนี้สนใจเรื่องการอนุรักษ์พลังงาน โดยออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางเพื่อทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น เพราะฉะนั้นในงานวิจัยจึงเลือกรูปแบบการทำงานของโพรโทคอลแบบ On-demand เพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาให้บรรลุตามเป้าหมาย เหตุผลที่เลือกโพรโทคอลแบบ On-demand เพราะว่าเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานและสมรรถนะด้านอื่น (Throughput, Data Delivery Ratio, etc.) ในบทความ [3] ได้ทดสอบการทำงานของโพรโทคอลแบบ On-demand กับ Proactive จากการพิจารณาได้ชี้ให้เห็นว่าโพรโทคอลแบบ On-demand ให้ประสิทธิภาพได้ดีไม่เพียงแต่ในเทอมของปริมาณงาน (Throughput) โอเวอร์เฮดของการจัดสรรเส้นทาง (Overhead Routing) และแพ็กเก็ตที่สูญหาย (Packet loss) แต่ยังมีประสิทธิภาพในด้านการอนุรักษ์พลังงานด้วย โดยโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ On-demand ที่ได้รับความสนใจและมีประสิทธิภาพในด้านการใช้พลังงานมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV [4] และ DSR [5] ในงานวิจัยนี้ได้เลือกโพรโทคอลแบบ AODV มาเป็นต้นแบบเพื่อใช้ในการพัฒนาให้สามารถรองรับในเรื่องการอนุรักษ์พลังงาน เพราะว่าโพรโทคอลแบบ AODV มีฟังก์ชันการทำงานที่รองรับกับวิธีการที่นำเสนอ และ AODV ยังใช้พลังงานน้อยกว่าโพรโทคอลแบบ DSR ในหลาย ๆ สถานะการณ์ [6]

### 2.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Ad hoc on-demand distance vector (AODV) ใช้เทคนิคตามความต้องการสำหรับการจัดสรรเส้นทางหรือกล่าวได้ว่าเส้นทางระหว่างโหนดสื่อสารจะถูกสร้างขึ้นก็ต่อเมื่อโหนดต้นทางมีความต้องการจะติดต่อสื่อสารกับโหนดปลายทาง โดยใช้หมายเลขแสดงลำดับของปลายทาง (destination sequence number) สำหรับระบุว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่ใหม่ที่สุด โดยโหนดต้นทางและโหนดระหว่างทาง (Intermediate node) จะทำการเก็บข้อมูลเส้นทางเฉพาะโหนดถัดไปหรือกล่าวได้ว่าทุกโหนดไม่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลเส้นทางทั้งหมดระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง และโพรโทคอลได้ใช้ destination sequence number ในการตัดสินใจว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่ใหม่ล่าสุดระหว่างโหนดหนึ่ง ๆ และ

เลือกเส้นทางที่เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-Path) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมกับโครงข่ายที่พลังงานของโหนดมีความสำคัญ

## 2.3 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลัง (Power-Aware Routing Protocols)

วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลัง (Power-Aware Routing) เน้นการออกแบบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางในชั้นเครือข่ายเพื่อจุดประสงค์สองประการคือ “ทำอย่างไรให้โครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด” หรือ “ทำให้โหนดหรือโครงข่ายมีอายุการใช้งานนานที่สุด” ซึ่งยังสามารถแบ่งวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงกำลังออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้ ประเภทแรกคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง (Energy or Transmission Power-Aware Routing Protocols) ประเภทที่สองคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด (Battery-Aware Routing Protocols) สุดท้ายเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols) โดยจัดแบ่งตามทรัพยากรที่นำมาใช้เป็นปัจจัยหลักในการพิจารณาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด (Optimal route) อย่างเช่น ระดับความจุของแบตเตอรี่ กำลังที่ใช้ในการส่งสัญญาณ พลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เป็นต้น

### 2.3.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลังส่ง (Energy or Transmission Power-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลังมีเป้าหมายหลักในการออกแบบเพื่อ “ลดการใช้พลังงานรวมให้มากที่สุด (Minimizing the total energy consumption)” โดยนำปัจจัยและเทคนิคต่าง ๆ ที่สะท้อนถึงการใช้พลังงานของโหนดหรือข่ายเชื่อมโยงมากำหนดเป็นค่าต้นทุน โดยจะเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดจากเส้นทางที่ใช้ค่าต้นทุนต่ำที่สุด ต่อไปจะกล่าวถึงโพรโทคอลที่ถูกลำเสนอและได้รับความไว้วางใจก่อนหน้านี้

#### 2.3.1.1 Minimum Total Transmission Power Routing (MTPR) [7]

ในบทความอ้างอิงนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimum Transmission Power Routing (MTPR) โดยมีเป้าหมายเพื่อลดการใช้พลังงานของโหนดในโครงข่าย ซึ่งโพรโทคอล MTPR ได้กำหนดค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด  $i$  กับโหนด  $j$  เป็นกำลังที่โหนด  $i$  ใช้ในการส่งข้อมูลไปยังโหนด  $j$  ได้อย่างสำเร็จ ซึ่งแสดงแทนด้วย  $P(n_i, n_j)$  เพราะฉะนั้นค่าต้นทุนรวมสำหรับเส้นทาง  $l$  แสดงแทนด้วย  $(C_l)$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$C_l = \sum_{i=1}^{D-1} P(n_i, n_{i+1}) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $n_s$  และ  $n_d$  เป็นโหนดต้นทางและโหนดปลายทางตามลำดับ ดังนั้นโพรโทคอลการหาเส้นทางแบบ MTPR จะเลือกเส้นทางที่ใช้กำลังส่งรวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุดเพื่อช่วยทำให้โหนดในโครงข่ายใช้พลังงานลดต่ำลง ในขั้นตอนการเลือกเส้นทางที่ใช้กำลังต่ำที่สุดนั้นจะทำการเลือกจากเซตของเส้นทางที่เป็นได้ทั้งหมด ( $A$ ) ตามสมการที่ (2.2) ซึ่งโหนดปลายทางจะเป็นผู้ทำการตัดสินใจ

$$P_r = \min_{l \in A} P_l \tag{2.2}$$

เมื่อ  $P_r$  แสดงเส้นทางที่ใช้กำลังส่งรวมต่ำที่สุด แต่ด้วยความสามารถของอุปกรณ์ไร้สายที่แตกต่างกันคือใช้กำลังส่งคงที่และกำลังส่งปรับเปลี่ยนได้อย่างพลวัต ซึ่งทั้งสองแบบจะให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันดังนี้

- ในกรณีที่กำหนดให้กำลังส่งของทุก ๆ โหนดในโครงข่ายมีค่าคงที่ (Constant-Power) จากข้อกำหนดนี้ทำให้เส้นทางที่มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อต่ำที่สุดหรือเส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นเส้นทางที่มีกำลังส่งรวมที่ต่ำที่สุด ในกรณีนี้จะให้ผลลัพธ์เหมือนกับการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-Path) ของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั่ว ๆ ไป

- อีกกรณีหนึ่งคือ โหนดมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนกำลังส่งได้อย่างพลวัต (Variable - Power) โดยกำลังที่ใช้ส่งจะถูกเลือกตามระยะห่างระหว่างโหนดตัวส่งและโหนดตัวรับ ดังนั้นการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดจะเป็นเส้นทางที่มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อมาก ๆ ซึ่งในแต่ละช่วงเชื่อมต้อมีระยะทางที่สั้น

### 2.3.1.2 Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks [8]

ในบทความอ้างอิง [8] เสนอตัวชี้วัด 5 ตัวซึ่งในส่วนนี้จะพิจารณาตัววัด 2 ตัวคือ “Minimize energy consumed per packet และ Minimize cost per packet (โดยค่า Cost อาจจะเป็นพลังงานที่ใช้ในการส่งหรือรับ)” เพื่อนำมาใช้แทนการจัดสรรเส้นทางแบบเดิม โดยมองว่าถ้าเลือกให้เส้นทางที่ใช้พลังงานต่อหนึ่งแพ็กเกตที่มีค่าต่ำที่สุดก็จะทำให้พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในโครงข่ายมีค่าที่ต่ำด้วย

อย่างไรก็ตามเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการรับและส่งแพ็กเกตในหนึ่งช่วงเชื่อมต้อมีค่าคง (ในกรณีกำลังส่งคงที่) ผลลัพธ์ที่ได้จากการเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดก็จะเหมือนกับกรณีการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด (กรณีที่โครงข่ายมีโหลดต่ำ ๆ) แต่ถ้าคำนึงถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการแย่งชิงช่องสัญญาณของข้อมูลที่จะส่ง ผลที่ได้จะแตกต่างออกไปจากข้างต้นในกรณีที่ปริมาณโหลดสูง ๆ โดยเส้นทางที่ได้จะพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่ง (Congestion) สูง ๆ

การใช้ตัววัดนี้ถึงแม้ว่าจะสามารถลดการใช้พลังงานโดยรวมได้แต่ไม่ได้ช่วยรักษาสมดุลของการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในแต่ละโหนดเนื่องจากบางโหนดที่อยู่ในเส้นทางจะต้องรับภาระในการส่งแพ็กเกตเป็นจำนวนมากและทำให้โหนดดังกล่าวหมดอายุการใช้งานลดลงอย่างรวดเร็วหรือกล่าวได้ว่าถ้าต้องการออกแบบ โพรโทคอลเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงข่าย การใช้ตัววัดนี้อาจจะไม่เหมาะสมที่จะนำไปพิจารณา



### 2.3.1.3 Reliable Energy-Aware Routing Protocol (RA) [9]

ในบทความอ้างอิง [9] กล่าวว่า “การใช้พลังงานในการส่งแพ็กเก็ตเพียงอย่างเดียวเป็นตัวชี้วัดนั้น อาจจะไม่ได้อันที่ใช่พลังงานต่ำที่สุดสำหรับในกรณีที่จะต้องรับรองความถูกต้องของการส่งแพ็กเก็ต จากต้นทางไปยังปลายทาง” เพราะการส่งแพ็กเก็ตผ่านเชื่อมโยงไร้สายมีโอกาสที่แพ็กเก็ตจะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นระหว่างการส่ง ในบทความนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Reliable Energy-Aware Routing (RA) ซึ่งกำหนดให้ค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงไม่เพียงแต่เป็นพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตผ่านข่ายเชื่อมโยง แต่รวมถึงพลังงานที่สะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบของความผิดพลาดของข่ายเชื่อมโยง (Link error rate) ซึ่งพลังงานที่ใช้ในส่วนหลังนี้ก็คือ พลังงานที่ต้องใช้ในการส่งแพ็กเก็ตซ้ำ (Retransmission)

สมมุติว่าทุกโหนดมีกำลังส่งคงที่และอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตบนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด  $i$  และ  $j$  เป็นอิสระไม่ขึ้นอยู่กัข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ ดังนั้นเราสามารถนิยามความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเก็ตข้ามข่ายเชื่อมโยงหรืออัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตบนข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวได้เป็น  $p_{i,j}$  แต่เนื่องจากมาตรฐาน IEEE802.11 ได้กำหนดให้มีการแก้ไขความผิดพลาดแบบ ARQ ที่สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ประเภทคือ Hop-by-Hop Retransmission และ End-to-End Retransmission ดังที่ได้กล่าวข้างต้น ในแต่ละวิธีจะให้ค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงที่แตกต่างกันดังนี้ โดยในงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะวิธีการแบบ HHR เพราะเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงกว่า

- การส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ (Hop-by-Hop Retransmission or HHR)

วิธีการนี้สามารถคำนวณค่าต้นทุนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด  $i$  และ  $j$  ซึ่งแสดงด้วย  $C_{i,j}$  ได้ดังนี้

$$C_{i,j} = \frac{E_{i,j}}{1 - p_{i,j}} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_{i,j}$  เป็นพลังงานที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตจากโหนด  $i$  ไปยังโหนด  $j$  (ในกรณีกำลังส่งคงที่ ค่า  $E_{i,j}$  มีค่าคงที่สำหรับทุก ๆ ข่ายเชื่อมโยงและ  $p_{i,j}$  ขึ้นอยู่กับระยะทางแต่ในกรณีที่กำลังส่งสามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างพลวัติ ค่า  $E_{i,j}$  มีค่าขึ้นอยู่กัระยะทางระหว่างโหนด  $i$  และ  $j$  ส่วนค่า  $p_{i,j}$  จะมีค่าคงที่) เพื่อให้สอดคล้องกับงานวิจัยฉบับนี้ เราจะพิจารณาเฉพาะกรณีที่ทุกโหนดมีกำลังส่งคงที่และเท่ากันทั้งหมด เพราะฉะนั้นค่าต้นทุนพลังงานรวมตลอดทั้งเส้นทาง (Energy route cost) จากโหนดต้นทาง (1) ถึงโหนดปลายทาง ( $D$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

$$E_p = \sum_{i=1}^{D-1} \frac{E_{i,i+1}}{1 - p_{i,i+1}} \quad (2.4)$$

ในบทความอ้างอิง [9] ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ RA กับ โพรโทคอลแบบต่าง ๆ (Minimum Energy, Shortest Path) ภายใต้สถานการณ์ที่โหนดไม่มีการเคลื่อนที่ และทำการสุ่มค่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตให้กับแต่ละสายเชื่อมโยง จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ทั้งกรณี HHR และ EER สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้มากเมื่อเทียบกับการเลือกเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำสุด

### 2.3.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด (Battery-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบรู้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดโดยมีเป้าหมายหลักในการออกแบบเพื่อ “ยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้นานที่สุด (Maximizing the network lifetime)” โดยพยายามรักษาสมดุลการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของโหนดให้มากแทนที่จะลดการใช้พลังงานเหมือนกับในกรณีของ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง เพราะการใช้เทคนิคแบบรู้พลังงาน ไม่สามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้มากนัก โดยวิธีนี้นำปัจจัยและเทคนิคต่าง ๆ ที่สะท้อนถึงอายุการใช้งานของโหนดหรือสายเชื่อมโยงมากำหนดค่าต้นทุนหลักในการพิจารณาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด ตัวอย่างปัจจัยที่นำมากำหนดเป็นค่าต้นทุนอย่างเช่น ระดับความจุของแบตเตอรี่ (Battery Capacity) อัตราการลดลงของระดับความจุของแบตเตอรี่ (Battery Drain Rate) อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (Battery Life) เป็นต้น โพรโทคอลที่ถูกนำเสนอและได้รับความสนใจมีดังนี้

#### 2.3.2.1 Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks [8]

Singh et al [8] นอกจากได้เสนอตัวชี้วัดดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นยังได้เสนอตัวชี้วัดอีกหนึ่งตัวคือ “Minimize maximize node cost” ในกรณีของ Minimize cost per packet ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นต่อมา ได้รับการพัฒนามาเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimize Battery Cost Routing (MBCR) ส่วนกรณีของ Minimize maximize node cost ได้รับการพัฒนาไปเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimize Maximize Battery Cost Routing (MMBCR) ซึ่งทั้งสองมีหลักการที่แตกต่างกันดังนี้

- **Minimize Battery Cost Routing (MBCR)**

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MBCR มีจุดประสงค์ในการออกแบบเพื่อยืดอายุการใช้งานของโหนดในโครงข่าย โดยมีหลักการว่าไม่ควรให้โหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดที่ต่ำอยู่รวมในเส้นทางหรือ กล่าวได้ว่าพยายามหลีกเลี่ยงการใช้งานโหนดที่มีความจุแบตเตอรี่ต่ำนั่นเอง

โดยกำหนดให้  $C_i$  เป็นระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโหนด  $n_i$  ณ เวลา  $t$  ซึ่งมีค่าที่ทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalize) อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 (0 หมายถึงความจุของแบตเตอรี่เป็นศูนย์และ 1 หมายถึง ระดับความจุของแบตเตอรี่มีอยู่เต็ม) ถ้ามองในแง่ของความพึงพอใจในการส่งต่อ (Forward) แพ็ก

เกิดแล้ว โหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำจะไม่ค่อยมีความสมัครใจมากนัก จากจุดนี้ทำให้ผู้เสนอได้กำหนดฟังก์ชันต้นทุนของแบตเตอรี่ ( $f_i(c'_i)$ ) สำหรับแต่ละโหนด  $n_i$  ตามสมการที่ (2.5) ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความจุที่เหลืออยู่ของโหนด ณ ปัจจุบัน

$$f_i(c'_i) = 1/c'_i \quad (2.5)$$

จากสมการหมายความว่าถ้าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโหนดลดลงค่าฟังก์ชันต้นทุนของโหนด  $n_i$  จะเพิ่มขึ้น และกำหนดให้ค่าต้นทุนแบตเตอรี่ (Battery Cost) ของแต่ละเส้นทางซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$R_p = \sum_{i=0}^{D-1} f_i(c'_i) \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) เป็นตัวอย่างการคำนวณค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทาง  $P$  ซึ่งประกอบไปด้วยโหนด 0 ซึ่งเป็นโหนดต้นทางไปยังโหนด  $D$  ซึ่งเป็นโหนดปลายทาง ดังนั้นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่สูงก็จะถูกเลือกให้เป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในกรณีนี้คือ เส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางต่ำที่สุด สมมุติว่าเส้นทาง  $P^*$  เป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.7)

$$R_{p^*} = \min \{R_p | P \in A\} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $A$  เป็นเซตของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทาง เพราะฉะนั้น MBCR สามารถป้องกันไม่ให้โหนดมีการใช้พลังงานมากเกินไป ซึ่งก็สามารถทำให้โครงข่ายยืดอายุการใช้งานไปได้ อย่างไรก็ตามผลเสียของการใช้ค่าที่เกิดจากการบวกของแต่ละ  $f_i(c'_i)$  มาเป็นค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางคือ ในเส้นทางที่ได้รับการพิจารณาว่าเป็นเส้นทางที่มีระดับความจุของแบตเตอรี่สูงสุดนั้น อาจจะประกอบไปด้วยโหนดที่มีระดับพลังงานที่ต่ำร่วมอยู่ก็ได้ ต่อมาทางผู้เสนอจึงได้พัฒนาวิธีใหม่ขึ้นมาเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่มีกรณีเช่นนี้เกิดขึ้นซึ่งนั่นก็คือ วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimize Maximize Battery Cost Routing (MMBCR) ที่กำลังจะกล่าวต่อไป

- **Minimize Maximize Battery Cost Routing (MMBCR)**

ในโครงข่ายการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR ได้ทำการดัดแปลงค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทาง  $P$  จากค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้นทางตามสมการที่ (2.6) ข้างต้นที่ได้นำเสนอไว้ในโครงข่ายการจัดสรรเส้นทางแบบ MBCR ซึ่งสามารถแสดงได้จากสมการที่ (2.8)

$$R_p = \max_{i \in \text{route } P} f_i(c'_i) \quad (2.8)$$



จากสมการที่ (2.8) สามารถตีความหมายได้ว่า ในเส้นทาง  $P$  โหนดใดที่มีค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ต่ำที่เหลือน้อยที่สุดหรือมีค่า  $f_i(c_i)$  สูงที่สุดก็จะถูกกำหนดให้ค่าดังกล่าวของโหนดนั้นเป็นค่าต้นทุนแบตเตอรี่ของเส้น อย่างไรก็ตามการพิจารณาว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโพรโทคอลแบบ MMBCR ยังคงใช้สมการเดิมคือ สมการที่ (2.7) ซึ่งทำให้เราสามารถมองภาพรวมของโพรโทคอลนี้ได้ว่า เส้นทางที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลือน้อยสูงจากโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลือน้อยที่ต่ำที่สุดของแต่ละเส้นทาง จากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพราะฉะนั้น วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR จะรักษาสมดุลของการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้ดีกว่าวิธีการจัดสรรเส้นทางแบบ MBCR

### 2.3.2.2 A Fully Distributed Routing Algorithm for Maximizing Lifetime of a Wireless Ad Hoc Network [10]

ในบทความอ้างอิง [10] ได้ออกแบบโพรโทคอลที่มีลักษณะการทำงานแบบ Fully Distributed โดยได้อ้างว่า ในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากสมการที่ (2.7) สำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งแบบ MBCR และ MMBCR โหนดที่เป็นตัวตัดสินใจเลือกเส้นทางจะต้องมีข้อมูลทั้งหมดหรือมากที่สุดจึงจะทำให้ได้เส้นทางที่ดีที่สุด ซึ่งการที่จะได้ข้อมูลทั้งหมดนั้นจะต้องมีการทำงานแบบรวมศูนย์ ซึ่งก็ไม่ใช่ไปตามข้อกำหนดของการทำงานภายในโครงข่ายแอดฮอค นอกจากนั้น ในขั้นตอนของการป้องกันไม่เกิดลูปของเส้นทางที่กำหนดให้ในระหว่างทำการลบแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางที่ซ้ำที่ อาจจะทำให้โหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงถูกบล็อกไม่ให้อยู่ในเส้นทางก็เป็นไปได้

ในบทความนี้จึงเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Time Delay On-demand Routing (TDOR) ซึ่งมีหลักการคือ แทนที่ในระหว่างทางจะแพร่กระจายแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (RREQ) ทันทีหลังจากได้รับแพ็กเก็ต ในระหว่างทางจะต้องทำการหยุดแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางดังกล่าวไว้เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาที่หยุดนั้นจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลือน้อย ณ ปัจจุบันของโหนด โดยกำหนดให้  $td_i^t$  เป็นฟังก์ชันการประวิงเวลา (Delay time) ของโหนด  $i$  ณ เวลา  $t$  ดังนั้นเราสามารถหาเวลาที่โหนดทำการหยุดแพ็กเก็ตการร้องขอได้จากสมการที่ (2.8)

$$td_i^t = 1/c_i^t \quad (2.8)$$

โดยค่า  $c_i^t$  เป็นระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลือน้อยของโหนด  $n$  ณ เวลา  $t$  จะมีค่าที่ให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalize) แล้วอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จากจุดนี้จะเห็นได้ว่าถ้าโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำ ๆ จะมีการประวิงเวลาไว้สูงกว่ากรณีที่มีระดับความจุแบตเตอรี่สูง ๆ ฉะนั้นโอกาสที่แพ็กเก็ตที่ออกจากโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่ต่ำจะถูกบล็อกทิ้งก็มีสูง ซึ่งทำให้เส้นทางที่ได้เป็นเส้นทางที่ผ่านโหนดที่มีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงจริง ๆ โดยขั้นตอนของการตัดสินใจเลือกเส้นทางของโหนดปลายทางนั้นก็ทำการตอบรับเส้นทางทันทีเมื่อได้รับ แพ็กเก็ตการร้องขอแรก โดยการส่งแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทาง (RREP) กลับไป

ยังโนดต้นทางโดยใช้เส้นทางย้อนกลับเหมือนกรณีของกระบวนการทำงานของโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบแบบ AODV

ในบทความนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางโดยทำการทดลองในกรณีที่โนดไม่มีการเคลื่อนที่ (Static Network) ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ TDOR มีอายุการใช้งานของโครงข่าย (Network Lifetime) ดีกว่ากรณีของ Shortest-Path, MBCR, และ MMBCR นอกจากนี้ก็ยังให้ผลในการรักษาสมดุลของการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้ดีกว่า

### 2.3.2.3 DSR-based Energy-aware Routing Protocols in Ad Hoc Networks [11]

ในบทความอ้างอิง [11] ได้เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Request-Delay Routing Protocol (RDRP) โดยในระหว่างทางจะต้องทำการหยุดพักเกิดร่องขอเส้นทางดังกล่าวไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะแพร่กระจายแพ็กเกตดังกล่าวต่อไป โดยระยะเวลาในการหน่วงพักเกิดจะถูกกำหนดโดยฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ขึ้นอยู่กับระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโนด ณ ปัจจุบัน ซึ่งในบทความนี้ได้ใช้ฟังก์ชันที่แสดงในสมการที่ (2.9)

$$d_i = \frac{D \times E}{e + E} \quad (2.9)$$

ในบทความนี้ได้ทำการทดสอบในกรณีที่โนดไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งผลการทดลองแสดงว่าโพรโทคอลแบบ RDRP ให้ประสิทธิภาพทั้งในด้านการใช้พลังงานและปริมาณข้อมูลทั้งหมดที่ส่งได้ดีกว่ากรณีการเลือกเส้นทางแบบ Shortest-Path (ในบทความนี้ได้ใช้โพรโทคอลการทำงานแบบ DSR เป็นโพรโทคอลพื้นฐานและทำการดัดแปลงเพื่อให้ได้มาซึ่งโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ RDRP)

### 2.3.2.4 Routing Mechanisms for Mobile Ad Hoc Networks Based on the Energy Drain Rate (MDR)

ในบทความอ้างอิง [12] กล่าวว่ากลไกการเลือกเส้นทางจากการพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่ของโนดจะให้ผลในทางที่ไม่ดี เพราะถ้าโนดเต็มใจที่จะรับทุก ๆ การร้องขอเพียงเพราะว่ามีระดับความจุของแบตเตอรี่ที่สูง ก็จะทำให้ปริมาณไหลลดจำนวนมากจะไหลเข้ามาที่โนดนี้ทำให้โนดใช้พลังงานหมดเร็วกว่าที่กำหนดไว้ ในบทความนี้จึงนำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Minimum Drain Rate (MDR) โดยเสนอตัววัดใหม่ที่แสดงอัตราการใช้พลังงาน (Drain Rate) ซึ่งเป็นค่าที่พิจารณาถึงคุณลักษณะของกราฟฟิคไหลลด ณ ขณะเวลานั้นของโนด ซึ่งสามารถคำนวณค่าอัตราการใช้พลังงาน ( $DR_i$ ) ของโนด  $i$  ได้จากสมการที่ (2.10)

$$DR_i = \frac{RE_i - RE_{i+1}}{T} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $RE_i$  เป็นระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ของโหนด  $i$  ณ เวลาสุ่ม  $t$  และ  $T$  เป็นระยะห่างของเวลาที่ใช้ในการสุ่มในครั้งที่  $t+1$  และ  $t$  โดยในบทความนี้กำหนดให้ทุก ๆ โหนดจะต้องทำการปรับปรุงค่าอัตราการใช้พลังงานทุก ๆ 6 วินาที ( $T_{t+1} - T_t = 6$  วินาที) ซึ่งค่าที่ได้มาใหม่นี้ ( $DR_{sample}$ ) จะต้องนำไปถ่วงน้ำหนักกับค่าเดิมที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้โดยใช้สมการที่ (2.11)

$$DR_i = \alpha \times DR_{old} + (1 - \alpha) \times DR_{sample}, \alpha = 0.3 \quad (2.11)$$

ในการคำนวณค่าต้นทุนพลังงานของโหนดซึ่งแสดงด้วยค่าอายุการใช้ของโหนดจะสามารถหาได้สมการที่ (2.12) จากสมการ ( $C_i$ ) แสดงค่าต้นทุนพลังงานของโหนด  $i$  ณ เวลาใด ซึ่งสามารถอธิบายความหมายในทางกายภาพได้ว่าเป็นเวลานานเท่าไรที่โหนด  $i$  จะสามารถทำงานในเส้นทางนี้ได้ภายใต้คุณลักษณะของกราฟฟิกและระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด ณ ขณะเวลานั้น หรือกล่าวอีกอย่างได้ว่าเป็นอายุการใช้งานที่เหลือของโหนด  $i$

$$C_i = \frac{RE_i}{DR_i} \quad (2.12)$$

ขั้นตอนการตัดสินใจเส้นทางที่ดีที่สุดนั้นได้ใช้หลักการของ min-max เหมือนกับกรณีของ MMBCR นั่นคือจะเลือกเส้นทางที่ให้ค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทางมากที่สุด โดยค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทาง  $p$  ใด ๆ สามารถกำหนดได้จาก  $L_p = \min_{v \in r_p} C_i$  ฉะนั้นแล้วเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดก็จะกำหนดได้จาก  $r_M = \max_{v \in r^*} L_i$  เมื่อ  $r^*$  เป็นเซตของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทาง ซึ่งมีความหมายว่า เส้นทางที่ดีที่สุดจะเป็นเส้นทางที่ให้ค่าอายุการใช้งานมากที่สุดจากอายุการใช้งานที่ต่ำที่สุดของแต่ละเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด

### 2.3.3 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมเป็นการนำเอาข้อดีของการจัดสรรเส้นทางทั้งแบบ Energy-Aware routing protocols และ Battery-Aware Routing protocols มาพิจารณาพร้อมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายทั้งในด้านการใช้พลังงานและอายุการใช้งานให้ดีขึ้น โดยมองว่าการยืดอายุของโครงข่ายให้ได้สูงสุดนั้นการพิจารณาเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่ง ระหว่างการใช้พลังงานต่ำที่สุด (ในกรณี Energy-Aware Routing protocols) หรือการยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด (ในกรณี Battery-Aware Routing protocols) ไม่เพียงพอที่จะยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้ปัจจัยทั้งสองตัวเข้ามาพิจารณาพร้อมกันจึงจะสามารถยืดอายุการใช้งานให้มากขึ้นได้ ซึ่งปัจจัยที่นำมากำหนดเป็นค่าต้นทุนก็จะพิจารณาจากทั้งสองแบบดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



### 2.3.3.1 Conditional Max-Min Battery Capacity Routing (CMMBBCR) [13]

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBBCR ได้รับการเสนอในบทความอ้างอิง [13] โดยมีเป้าหมายเพื่อต้องการบรรลุเป้าหมายทั้ง การใช้พลังงานต่ำที่สุดและการรักษาสมดุลของการใช้พลังงานของแบตเตอรี่ของโครงข่าย เพื่อให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานที่สุดพร้อมกัน ซึ่งเป็นความพยายามที่จะรวมวิธีการทั้งแบบ Energy-Aware และ Battery-Aware เข้าด้วยกัน การจะทำให้การทำงานทั้งสองแบบสามารถใช้งานพร้อมกันได้นั้นผู้เสนอได้กำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนขึ้นมาเป็นเงื่อนไขในการตัดสินใจว่า ณ เวลาใดควรจะใช้วิธีการจัดสรรเส้นทางแบบใด ซึ่งผู้เสนอได้ให้ความเห็นว่า ในกรณีที่โหนดในโครงข่ายมีค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่สูงนั้นโครงข่ายควรที่จะใช้พลังงานอย่างประหยัดมากกว่าการรักษาสมดุลของการใช้พลังงาน ในทางกลับกัน กรณีที่ค่าระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดในโครงข่ายส่วนมากมีระดับที่ต่ำโครงข่ายควรจะใช้พลังงานอย่างสมดุลมากกว่าการประหยัดพลังงาน โดยจากข้อสมมุติดังกล่าวสามารถอธิบายกระบวนการทำงานและการพิจารณาเส้นทางได้ดังนี้

ในโพรโทคอลได้กำหนดให้เส้นทางทุก ๆ เส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางจะต้องคำนวณค่าฟังก์ชันต้นทุน (Cost function) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ แต่จะใช้ค่าที่ได้จากโหนดที่ให้ค่าระดับความจุของแบตเตอรี่ที่ต่ำที่สุดในเส้นทางซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.13)

$$R'_j = \min_{i \in \text{route } j} c'_i \quad (2.13)$$

จากนั้นเมื่อโหนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางแพ็กเก็ตแรกแล้วโหนดปลายทางจะต้องรอแพ็กเก็ตการร้องขอจากเส้นทางอื่น ๆ ที่ไม่มีเส้นทางร่วมกันเป็นระยะเวลาหนึ่ง เมื่อหมดระยะเวลาที่กำหนดไว้โหนดจะทำการตรวจสอบจากเซตของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ( $Q$ ) มีเซตของเส้นทางใดบ้างที่ตรงกับเงื่อนไขในสมการที่ (2.14) ซึ่งแสดงด้วยเซต  $A$

$$R'_j \geq \gamma, \forall j \in A \quad (2.14)$$

โดย  $\gamma$  เป็นค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 (หรืออาจจะกำหนดค่าให้เป็นร้อยละเท่าใดของระดับความจุแบตเตอรี่เริ่มต้นของโหนดในโครงข่าย โดยค่าระดับความจุแบตเตอรี่เริ่มต้นเท่ากับ 100) จากขั้นตอนข้างต้นเปรียบเสมือนกับการพิจารณาว่าขณะนี้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดในโครงข่ายส่วนมากเป็นอย่างไร ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการตัดสินใจว่าจะใช้วิธีการแบบใดในการเลือกเส้นทาง โดยดูจากจากสภาพของโครงข่าย ณ ขณะนี้ โดยการเลือกจะใช้จะพิจารณาได้ดังนี้

- กรณีที่  $A \cap Q \neq \emptyset$  แสดงว่ามีบางเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีค่าระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำที่สุดในเส้นทางมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าโหนดในโครงข่ายยังมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงอยู่ เพราะฉะนั้นควรที่จะเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงาน

ต่ำที่สุด ซึ่งใน CMMBCR ได้ใช้วิธี MTPR ในการเลือกเส้นทางจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากเซต  $A$

- กรณีที่  $A \cap Q = \emptyset$  แสดงว่ามีไม่มีเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีค่าระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำที่สุดในเส้นทางมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ ซึ่งได้สะท้อนให้เห็นว่าโหนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ เพราะฉะนั้นควรที่จะเลือกเส้นทางที่รักษาสมดุลของการใช้พลังงานเพื่อยืดอายุการใช้งานของโหนด ซึ่งใน CMMBCR ได้ใช้วิธี MMBCR ในการเลือกเส้นทางที่ดีจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากเซต  $Q$

สังเกตได้ว่าถ้าเรากำหนดค่า  $\gamma=0$  โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBCR ก็จะกลายเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR และถ้ากำหนดให้  $\gamma=100$  ก็จะทำให้ผลลัพธ์เหมือนกับกรณีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MMBCR ดังนั้นสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMMBCR จะขึ้นอยู่กับกำหนัดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนเป็นหลัก

### 2.3.3.2 Conditional Minimum Drain Rate (CMDR)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMDR ถูกเสนอขึ้นในบทความ [12] เช่นเดียวกับ โพรโทคอล MDR ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.6.2.5 เนื่องจากโพรโทคอลแบบ MDR ไม่ได้ยืนยันว่าเส้นทางที่ใช้นั้นเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำสุดเหมือนกับกรณีของ MMBCR โดยผู้เสนอได้เลียนแบบการทำงานของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง CMMBCR แต่ข้อแตกต่างระหว่างทั้งสองคือ ในโพรโทคอล CMDR ได้ใช้ค่าอายุการใช้งานของโหนด ( $C_i$  ในสมการที่ (2.12)) เป็นตัวกำหนดว่าจะเลือกใช้โพรโทคอลแบบใดในการทำงานแทนการใช้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนด ( $R'_i$  ในสมการที่ (2.13))

ถ้ามีค่าอายุการใช้งานของโหนดที่ต่ำที่สุดในเส้นทางมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน ( $\delta$ ) จากเซตของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถแสดงได้จาก  $C_i = \frac{RBP_i}{DR_i} > \delta$  โพรโทคอลนี้จะเลือกเส้นทางที่เหมาะสมจาก โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTPR แต่ถ้าไม่เส้นทางใดที่ตรงตามเงื่อนไขจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดก็จะใช้โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MDR อย่างไรก็ตามสมรรถนะของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ CMDR ก็ยังขึ้นอยู่กับกำหนัดค่า ขีดเริ่มเปลี่ยนที่นำมาพิจารณาเหมือนกับ CMMBCR

## 3. งานวิจัยที่น่าเสนอ

งานวิจัยนี้ได้เสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงกำลัง 3 โพรโทคอลโดยแบ่งตามทรัพยากรหลักที่นำมาใช้ในการพิจารณาเส้นทางได้แก่

- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocols) แสดงแทนด้วย *Proposed-Energy*

- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Maximum Battery Lifetime Routing Protocols) แสดงแทนด้วย *Proposed-Battery*
- โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Minimum Energy Consumption and Maximum Battery Lifetime Routing Protocols) แสดงแทนด้วย *Proposed-Hybrid*

### 3.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่น่าเสนอในหัวข้อนี้จัดได้ว่าอยู่ในกลุ่มของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบรู้พลังงานหรือกำลังส่งที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยเป้าหมายของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่น่าเสนอนี้คือ “ลดการใช้พลังงานของโครงข่ายให้มากที่สุด” โดยนำเสนอวิธีการกำหนดค่าต้นทุนพลังงานข่ายเชื่อมโยง หรือ Energy Link Cost ขึ้นมาใหม่เพื่อนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process) ซึ่งเส้นทางที่ดีที่สุดจากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่น่าเสนอจะเป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด

#### 3.1.1 การคำนวณค่าต้นทุนพลังงานข่ายเชื่อมโยง (Energy Link Cost Computation)

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดของวิธีการคำนวณค่าต้นทุนพลังงานในการสื่อสาร โดยขั้นตอนหลัก ๆ คือ คำนวณค่าต้นทุนพลังงานข่ายเชื่อมโยง (Energy Link Cost) โดยการคำนวณค่าต้นทุนพลังงานข่ายเชื่อมโยงใด ๆ ( $E_{i,j}$ ) จากโหนด  $i$  ไปยังโหนด  $j$  นิยามออกเป็น 2 ส่วนคือ พลังงานที่ต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตควบคุม ( $E_{control}$ ) โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง หรือ Route Request packet (RREQ) เท่านั้นและ พลังงานที่ต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล ( $E_{data}$ ) โดยแบบจำลองการใช้พลังงานที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงลักษณะกราฟฟิกที่กำลังใช้งานอยู่ ซึ่งลักษณะกราฟฟิกของแพ็กเก็ต RREQ คือ แบบแพร่กระจาย (Broadcast) นั้นหมายถึง โหนดที่ทำการส่งแพ็กเก็ต RREQ จะต้องเสียพลังงานเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ต RREQ ซึ่งแสดงแทนด้วย  $E_{send}^c$  และ โหนดข้างเคียงที่อยู่ในระยะการส่งของโหนดที่ส่งแพ็กเก็ตทุกโหนดจะต้องเสียพลังงานเนื่องจากการรับแพ็กเก็ต RREQ แทนด้วย  $E_{recv}^c$  เพราะฉะนั้นพลังงานทั้งหมดที่จะต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตควบคุม RREQ สามารถแสดงได้ในสมการที่ (3.1)

$$E_{control} = E_{send}^c + N_{area(s)} \times E_{recv}^c \quad (3.1)$$

โดยที่พลังงานที่ต้องสูญเสียในการส่งและรับแพ็กเก็ตควบคุม RREQ สามารถคำนวณได้จากกำลังที่ใช้ในการส่งคูณด้วยเวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต และกำลังที่ใช้ในการรับคูณกับเวลาที่ใช้ในการรับ



ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) โดยความหมายของตัวแปรต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.1

$$E_{send}^c = P_{send}^c \times \frac{L_{rreq}}{f} = P_{send}^c \times T_{send}^c \quad (3.2)$$

$$E_{recv}^c = P_{recv}^c \times \frac{L_{rreq}}{f} = P_{recv}^c \times T_{recv}^c \quad (3.3)$$

เพราะฉะนั้นพลังงานทั้งหมดที่สูญเสียไปเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตควบคุม RREQ สามารถแสดงได้อีกรูปแบบหนึ่งในสมการที่ (3.4)

$$E_{control} = E_{send}^c + N_{area(s)} \times E_{recv}^c = \frac{(P_{send}^c + N_{area(s)} \times P_{recv}^c) \times L_{rreq}}{f} \quad (3.4)$$

ในส่วนพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลนั้น เนื่องจากการแพ็กเก็ตข้อมูลมีลักษณะทราฟฟิกแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point หรือ Unicast) คือ โหนดที่ส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจะต้องสูญเสียพลังงานจากการส่ง และโหนดที่เป็นโหนดปลายทางของแพ็กเก็ตข้อมูลจะต้องสูญเสียพลังงานจากการรับ นอกจากนี้ โหนดข้างเคียงที่อยู่ในระยะการส่งของโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต และตัวรับจะต้องเสียพลังงานจากการได้ยินแพ็กเก็ตที่สื่อสารกันระหว่างโหนดตัวส่งและโหนดตัวรับ

จากข้างต้นทำให้พลังงานที่ต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งข้อมูลจากโหนดหนึ่งไปยังอีกโหนดหนึ่งโดยผ่านข่ายเชื่อมโยงแบบไร้สายประกอบไปด้วย 3 ส่วน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.5) จากสมการพลังงานที่สูญเสียจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดที่ส่งแพ็กเก็ตแทนด้วย  $E_{send}^d$  พลังงานที่สูญเสียจากการรับข้อมูลของโหนดปลายทางของแพ็กเก็ตแทนด้วย  $E_{recv}^d$  และพลังงานที่สูญเสียจากการลบแพ็กเก็ตทิ้งเนื่องจากการได้ยินแทนด้วย  $E_{overhear}^d$  โดยรายละเอียดของการคำนวณพลังงานที่ต้องสูญเสียในแต่ละส่วนแสดงในสมการที่ (3.6) ถึงสมการที่ (3.9) ซึ่งสมการทั้งหมดคำนวณอยู่ภายใต้ข้อสมมติที่ว่าโหนดต้นทางทราบจำนวนข้อมูลที่ต้องการจะสื่อสารกับโหนดปลายทางทั้งหมด และแจ้งข้อมูลดังกล่าวให้โหนดในโครงข่ายทราบโดยผ่านแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางที่แทนด้วย  $L_{data}$  (หน่วยเป็นบิต)

$$E_{data} = E_{send}^d + E_{recv}^d + E_{overhear}^d \quad (3.5)$$

$$E_{send}^d = P_{send}^d \times \frac{N_{total} \times L_{data}}{f} \quad (3.6)$$

$$E_{recv}^d = P_{recv}^d \times \frac{N_{total} \times L_{data}}{f} \quad (3.7)$$

$$E_{overhear}^d = P_{overhear}^d \times \frac{N_{total} \times L_{data} \times (N_{area(s)} - 1)}{f} \quad (3.8)$$

$$E_{data} = (P_{send}^d + P_{recv}^d + (N_{area(s)} - 1) \times P_{overhear}^d) \times \frac{N_{total} \times L_{data}}{f} \quad (3.9)$$

ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการแสดงในตารางที่ 3.1 จากการคำนวณทั้งพลังงานที่ต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตควบคุม และพลังงานที่ต้องสูญเสียไปเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลที่แสดงข้างต้นเป็นการคำนวณโดยไม่พิจารณาผลกระทบจากคุณภาพของช่องสัญญาณที่ไม่มีแน่นอน

ในการส่งข้อมูล (โดยคุณภาพของช่องสัญญาณแสดงแทนด้วยค่าอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตหรือ Packet Error Rate โดยการคำนวณค่านี้ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4) อย่างไรก็ตามจากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่สองว่า คุณภาพของช่องสัญญาณหรือสายเชื่อมโยงในความเป็นจริงย่อมที่จะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้เสมอและจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งก็จะมีผลกระทบต่อพลังงานที่โนดจะต้องสูญเสียในแต่ละโมดการทำงานด้วยเช่นกัน นอกจากนี้การทดลองในบทที่ 2 ยังชี้ให้เห็นว่าจะต้องนำพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากผลกระทบนี้มาใช้ในการคำนวณค่าพลังงานที่โครงข่ายจะต้องสูญเสียจึงจะทำให้โพรโทคอลที่ออกแบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [9] เพราะฉะนั้นพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตจริง ๆ แล้วไม่เพียงแต่เป็นพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลโดยปราศจากความผิดพลาดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น (สมการที่ (3.9)) แต่จะรวมถึงพลังงานที่จะต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตที่เกิดความผิดพลาดซ้ำบนช่องสัญญาณ ณ เวลาใด ๆ ซึ่งเราเรียกพลังงานทั้งสองส่วนรวมกันว่า พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือ (Reliable Energy Consumption, REC) โดยงานวิจัยนี้จะพิจารณาแบบจำลองการส่งซ้ำแบบ การส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ (Hop-by-Hop Retransmission หรือ HHR) เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณพลังงานที่จะต้องใช้ในแต่ละส่วน

ตารางที่ 3.1 ความหมายของตัวแปรในสมการที่ (3.1) ถึงสมการที่ (3.9)

$P_{send}^d$	กำลังที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (Watts)
$P_{recv}^d$	กำลังที่ใช้ในการรับแพ็กเก็ตข้อมูล (Watts)
$P_{overhear}^d$	กำลังที่ใช้ในการลบทิ้งแพ็กเก็ตข้อมูล (Watts)
$P_{send}^c$	กำลังที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตควบคุม RREQ (Watts)
$P_{recv}^c$	กำลังที่ใช้ในการรับแพ็กเก็ตควบคุม RREQ (Watts)
$L_{data}$	ขนาดของแพ็กเก็ตข้อมูลที่ต้องการส่ง (Bits)
$L_{rreq}$	ขนาดของแพ็กเก็ตควบคุม (Bits)
$N_{total}$	จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โนดค้นทางต้องการจะส่ง)Packets(
$f$	อัตราในการส่งแพ็กเก็ต (Mbps)
$N_{area(s)}$	จำนวนโนดที่อยู่ในระยะการส่งของ โหนดตัวส่ง) s(

กรณีของการส่งซ้ำระหว่างช่วงเชื่อมต่อ แพ็กเก็ตที่ผิดพลาดจากการส่งบนข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จำเป็นจะต้องส่งข้อมูลที่ผิดพลาดซ้ำบนข่ายเชื่อมโยงนั้นเท่านั้น วิธีการนี้เหมาะสมสำหรับสภาพแวดล้อมที่มีการทำงานโครงข่ายแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ ซึ่งทั่วไปจะใช้ใน Link-Layer Retransmission จากลักษณะการทำงานที่ว่านี้ทำให้พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตผ่านข่ายเชื่อมโยงที่กำลังพิจารณาจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตของข่ายเชื่อมโยงตัวอื่น ๆ ที่อยู่ในเส้นทาง สำหรับการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เราจะไม่จำกัดจำนวนครั้งสูงสุดที่อนุญาตให้มีการส่งซ้ำได้ (ในทางปฏิบัติ ระบบอาจจะกำหนดค่าสูงสุดในการส่งซ้ำไว้ที่ค่าหนึ่งเพื่อจำกัดการล่าช้าในการส่งแพ็กเก็ต)

เนื่องจากจำนวนของแพ็กเก็ตข้อมูลที่ต้องการส่งบนข่ายเชื่อมโยงที่กำลังพิจารณาอยู่จะเป็นอิสระกับ ข่ายเชื่อมโยงอื่น ๆ และมีการกระจายแบบ Geometric เพราะฉะนั้นเราสามารถคำนวณค่าพลังงานที่ สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือบนข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จากโหนด  $i$  ไปยังโหนด  $j$  แทน ด้วย  $REC_{i,j}$  ได้จากการนำพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลในสมการที่ (3.9) มาพิจารณาถึง ผลกระทบจากคุณภาพของช่องสัญญาณบนข่ายเชื่อมโยงระหว่างโหนด  $i$  ไปยังโหนด  $j$  ณ ขณะเวลาที่ พิจารณา ซึ่งจะได้ผลออกมาดังสมการที่ (3.10)

$$REC_{i,j} = \frac{(P_{send}^d + P_{recv}^d + P_{overhear}^d \times (N_{area(s)} - 1)) \times N_{total} \times L_{data}}{(1 - p^{ij}) \times f} \quad (3.10)$$

เพราะฉะนั้นค่าต้นทุนพลังงานของข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จากโหนด  $i$  ไปยังโหนด  $j$  แทนด้วย  $E_{i,j}$  สามารถแสดงได้ในสมการที่ (3.11) โดยนำสมการที่ (3.4) รวมกับสมการที่ (3.10) จะได้ดังนี้

$$E_{i,j} = E_{control} + REC_{i,j} \\ = \frac{(P_{send}^d + P_{recv}^d + P_{dis}^d \times (N_{area(s)} - 1)) \times N_{total} \times L_{data}}{(1 - p^{ij}) \times f} + \frac{(P_{send}^c + P_{recv}^c \times N_{area(s)}) \times L_{rreq}}{f} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.11) จะเห็นได้ว่าในกรณีของการส่งแพ็กเก็ตควบคุมไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบ จากคุณภาพของช่องสัญญาณ เนื่องจากแพ็กเก็ตควบคุม RREQ เป็นแพ็กเก็ตแบบแพร่กระจายซึ่งไม่ จำเป็นจะต้องส่งยืนยันการส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนดข้างเคียงอย่างถูกต้อง (ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 กำหนดให้การส่งแพ็กเก็ตแบบ Unicast เท่านั้นที่โหนดส่งจะต้องส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนดปลายทางของแพ็กเก็ต ต่ออย่างถูกต้อง โดยโหนดปลายทางจะส่งแพ็กเก็ต Acknowledgment กลับไปยังโหนดที่ส่งแพ็กเก็ตมาให้เพื่อ บอกว่าได้รับแพ็กเก็ตนั้นอย่างถูกต้อง)

### 3.1.2 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process)

กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอส่วนใหญ่จะคล้ายกับกระบวนการค้นหา เส้นทางของโพรโทคอล AODV นั่นคือ เมื่อโหนดต้องการจะส่งข้อมูลไปยังปลายทาง โหนดจะต้อง แพร่กระจายแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง (Route Request Packet หรือ RREQ) ไปทั่วทั้งโครงข่าย แต่ก่อนที่โหนด ต้นทางจะแพร่กระจายแพ็กเก็ตออกไป โหนดจะต้องบันทึกค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นลงในแพ็กเก็ต RREQ ซึ่งแสดง ดังรูปที่ 3.1 โดยแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทางที่นำมาใช้กับโพรโทคอลที่นำเสนอได้เพิ่มพื้นที่จากเดิมขึ้น 3 ส่วนดังนี้

- จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โหนดต้นทางจะใช้สื่อสาร (Number of Data packet) แทนด้วย  $N_{total}$  ซึ่งค่าในส่วนนี้จะแสดงจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โหนดต้นทางต้องการจะใช้สื่อสารกับโหนด ปลายทาง สาเหตุที่จะต้องกำหนดไว้เพื่อให้โหนดที่ได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางใช้ประมาณ ค่าพลังงานที่จะต้องสูญเสียเพื่อรองรับการสื่อสารนี้
- พลังงานที่โหนดจะต้องสูญเสีย (Energy consumption of node) เป็นพลังงานที่โหนดจะต้อง สูญเสียโดยไม่พิจารณาพลังงานที่จะต้องเสียเนื่องจากผลกระทบจากคุณภาพของ



ของสัญญาณ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตควบคุม (Energy consumption for transmission control packet) คำนวณได้จากสมการที่ (3.4) และพลังงานที่ต้องสูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (Energy consumption for transmission data packets) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.9)

- ค่าต้นทุนพลังงานรวมที่ต้องสูญเสีย (Total Energy cost) ซึ่งแสดงแทนด้วย  $E_p^{Total}$  หมายความว่า เป็นพลังงานทั้งหมดที่โครงข่ายจะต้องสูญเสียสำหรับเส้นทาง  $p$

Source address	Source Sequence number	• • •	Hop Count	Num. of Data packet	$\langle E_{control}^i, E_{data}^i \rangle$	Total Energy Cost $\langle E_p^{Total} \rangle$
----------------	------------------------	-------	-----------	---------------------	---	---

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางในโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy

โดยโนดต้นทางจะต้องทำการคำนวณค่า  $E_{control}$  และ  $E_{data}$  จากสมการที่ (3.4) และ (3.9) ตามลำดับแล้วบรรจุค่าที่ได้ลงในฟิลด์  $\langle E_{control}, E_{data} \rangle$  ของแพ็กเก็ต RREQ และกำหนดค่าเริ่มต้นของ  $E_p^{Total}$  ให้เท่ากับศูนย์ จากนั้นก็ทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยังโนดข้างเคียง ต่อมาเมื่อโนดข้างเคียงได้รับแพ็กเก็ต RREQ จะต้องทำการคำนวณ 2 ค่าคือ พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือของข่ายเชื่อมโยงระหว่างตัวเอง (สมมติว่าเป็นโนด  $j$ ) กับโนดที่ส่งแพ็กเก็ต RREQ มาให้ (สมมติว่าเป็นโนด  $i$ ) และอีกค่าหนึ่งเป็น พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากตัวเองจะต้องส่งแพ็กเก็ตควบคุมและแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังโนดข้างเคียง (ตามสมการที่ (3.4) และ (3.9) ตามลำดับ) โดยการคำนวณค่าพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลอย่างน่าเชื่อถือจะเริ่มจากโนดนำค่า  $E_{data}$  ซึ่งอยู่ในแพ็กเก็ต RREQ ที่ได้รับมาทำการคำนวณค่า  $REC_{i,j}$  โดยใช้สมการที่ (3.10) จากนั้นโนด  $j$  จะต้องคำนวณค่าต้นทุนพลังงานของข่ายเชื่อมโยงใด ๆ จากโนด  $i$  ไปยังโนด  $j$  ( $E_{i,j}$ ) ได้จากสมการที่ (3.11) ซึ่งเป็นค่าต้นทุนพลังงานของข่ายเชื่อมโยงระหว่างโนดที่พิจารณาอยู่ปัจจุบันกับโนดที่ส่งแพ็กเก็ต RREQ มายังโนดที่พิจารณา ส่วนอีกหนึ่งค่าที่โนดจะต้องทำการคำนวณคือ พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่งแพ็กเก็ตควบคุมและแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังโนดข้างเคียงตามสมการที่ (3.4) และ (3.9) ตามลำดับ ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้บนข่ายเชื่อมโยงถัดไปโดยไม่คำนึงถึงความผิดพลาดในการส่งข้อมูลบนข่ายเชื่อมโยง เมื่อโนดคำนวณค่าทั้งสองเรียบร้อยแล้วโนดจะนำ  $E_{i,j}$  ที่คำนวณได้ไปบวกกับค่าต้นทุนพลังงานรวมข่ายเชื่อมโยงที่คำนวณได้ก่อนหน้านี้ (อยู่ในฟิลด์ Total Energy Cost) แล้วบรรจุค่าใหม่ที่ได้ลงในฟิลด์ของค่าต้นทุนพลังงานรวมของเส้นทางที่คำนวณได้ดังนี้

$$E_p^{Total} = E_p^{Total} + E_{i,j} = \sum_{k=1}^{i-1} E_{k,k+1} + E_{i,j} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.12) ถ้าสมมติให้โนดในเส้นทาง  $p$  ประกอบไปด้วย  $(S=1,2,\dots,N=D)$  สามารถคำนวณหาต้นทุนรวมพลังงานของเส้นทาง  $p$  ได้เป็น  $E_p^{Total} = \sum_{i=1}^{N-1} E_{i,i+1}$  ภายหลังจากบรรจุค่าทั้ง

สองลงในฟิลด์ของแพ็กเก็ต RREQ เรียบร้อยแล้วโนดก็จะแพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยังโนดข้างเคียงของตัวเองต่อไป ขั้นตอนที่กำลังกล่าวมาข้างต้นจะดำเนินไปจนกระทั่งแพ็กเก็ต RREQ ไปถึงยังโนดปลายทาง

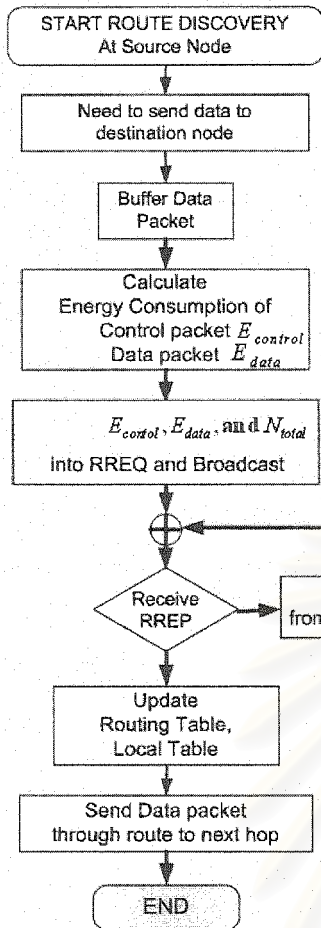
โดยขั้นตอนสุดท้ายหลังจากที่โนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางเป็นจำนวนหนึ่งคือพิจารณาว่าเส้นทางใดเป็นเส้นทางที่เหมาะสมในจำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโนดต้นทางกับโนดปลายทาง โดยพิจารณาได้จากสมการที่ (3.13) นั่นคือ เป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานรวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุดหรือกล่าวได้ว่าเป็นพลังงานที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งแตกต่างจากโพรโทคอลที่นำเสนอก่อนหน้านี้ที่พิจารณาจากเส้นทางที่สูญเสียพลังงานเฉพาะโนดในเส้นทางต่ำที่สุดเท่านั้น [7, 9]

$$P^* = \min_{P \in A} (E_p^{Total}) \quad (3.13)$$

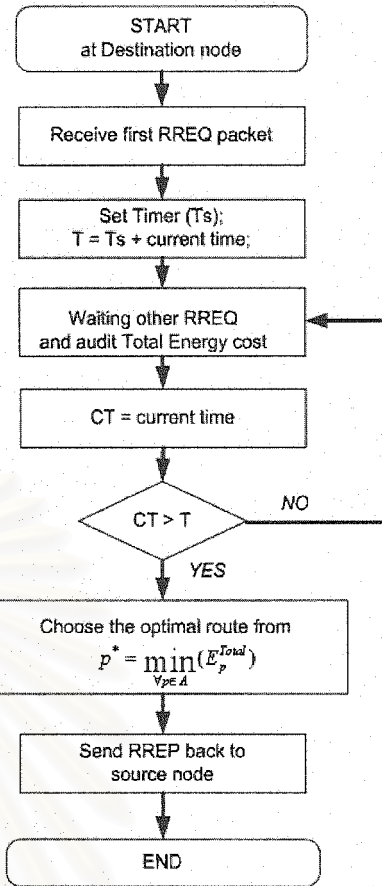
เมื่อ  $A$  เป็นเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่โนดปลายทางได้รับ ภายหลังจากที่โนดเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดจากสมการที่ (3.13) ได้แล้วโนดปลายทางจะสร้างแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทาง (Route Reply Packet, RREP) เพื่อตอบกลับไปบอกโนดต้นทางให้ทราบ โดยเส้นทางที่โนดปลายทางใช้ส่งจะเป็นเส้นทางเดียวกันกับเส้นทางที่ดีที่สุด โดยที่ทุกโนดที่อยู่ในเส้นทางเมื่อได้รับแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทางแล้วจะต้องทำการปรับปรุงตารางการจัดเส้นทางและส่งแพ็กเก็ตตั้ง กล่าวต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงโนดต้นทาง ภายหลังจากโนดต้นทางได้รับแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทางแล้วโนดก็จะทำการปรับปรุงเส้นทางที่ได้ในตารางการจัดเส้นทางของตัวเองแล้วก็เริ่มทำการส่ง แพ็กเก็ตข้อมูลไปตามเส้นทางที่ได้มาก็เป็นอันเสร็จกระบวนการค้นหาเส้นทาง

โดยขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ในผังงานในรูปที่ 3.2 ถึงรูปที่ 3.4 โดยแยกตามกระบวนการที่โนดแต่ละโนดจะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนที่เกิดขึ้นกับโนดต้นทาง ส่วนผังงานในรูปที่ 3.3 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโนดปลายทางและสุดท้ายเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโนดระหว่างทางแสดงด้วยผังงานในรูปที่ 3.4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

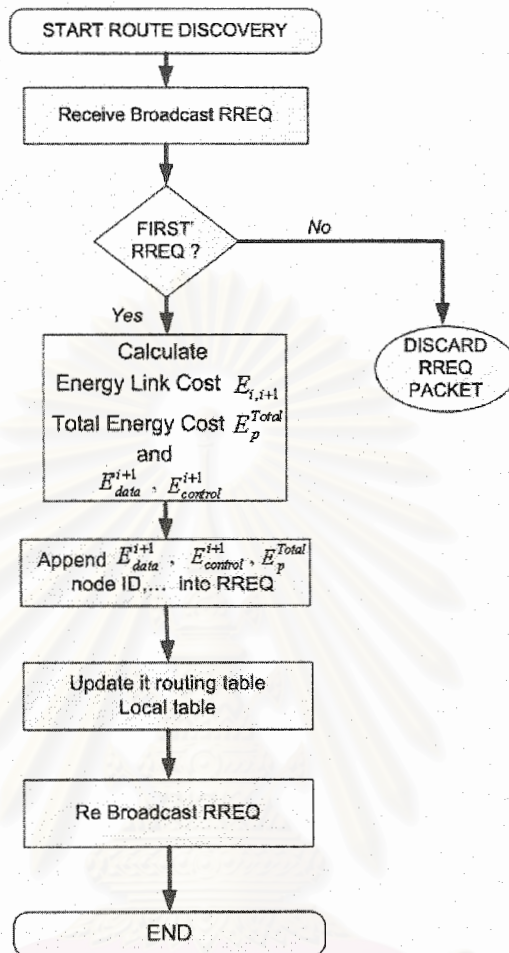


รูปที่ 3.2 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy)



รูปที่ 3.3 ผังกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy)





รูปที่ 3.4 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดระหว่างทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy)

### 3.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Maximum Battery Lifetime Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในหัวข้อนี้จัดได้ว่าอยู่ในกลุ่มของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบรู้ระดับความจุแบตเตอรี่ของโหนดที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.6.2 โดยจุดประสงค์สำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอนี้เพื่อ “เพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด” โดยนำเสนอวิธีการกำหนดค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนด (Battery lifetime) ขึ้นใหม่เพื่อนำไปใช้ร่วมกับกระบวนการค้นหาเส้นทางที่เพิ่มกลไกการประวิงเวลา (Delay mechanism) ของแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางให้แก่แต่ละโหนด ซึ่งเส้นทางที่ดีที่สุดจะไม่ใช้เส้นทางที่พลังงานที่ต่ำที่สุดเหมือนกับโพรโทคอลที่นำเสนอก่อนหน้านี้แต่จะเป็นเส้นทางที่ประกอบด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งาน

จากแบตเตอรี่สูงหรือพยายามหลีกเลี่ยงโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ที่ต่ำ เพราะฉะนั้นขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางจะแตกต่างจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

### 3.2.1 การคำนวณค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนด (Battery Lifetime Computation)

โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางในบทความอ้างอิง [8, 10, 11] ได้กำหนดให้อายุการใช้งานจากแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ และในบทความอ้างอิง [12] ได้กำหนดจากความจุของแบตเตอรี่ที่เหลือและอัตราการใช้พลังงานงานของโนด แต่ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนดที่แตกต่างกันออกไป โดยจะพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่แต่จะพิจารณาถึงพลังงานที่โนดจะต้องใช้เพื่อที่จะส่งแพ็กเก็ตในบัฟเฟอร์ไปยังโนดปลายทางของแพ็กเก็ตและพลังงานสูงสุดที่โนดจะต้องสูญเสียเพื่อส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปยังโนดถัดไป (ซึ่งเป็นจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โนดต้นทางต้องการจะติดต่อกับโนดปลายทาง) สาเหตุที่กำหนดจากค่าสูงสุดเพราะว่าโนดไม่ทราบว่าโนดถัดไปของเส้นทางที่ดีที่สุดคือโนดใดเพราะฉะนั้นจะต้องพิจารณาจากพลังงานที่จะต้องส่งข้อมูลไปยังโนดที่อยู่ไกลที่สุดแต่อยู่ในระยะการส่งข้อมูลซึ่งก็จะเป็นพลังงานที่ใช้สูงสุดนั่นเอง จากข้างต้นเราสามารถกำหนดค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนดได้จากสมการที่ (3.14)

$$\begin{aligned} BL(i,t) &= \text{Residual Energy}(i,t) - \text{Energy consume}_{queue}^i - \max_{\forall j \in \text{neighbor of node } i} \{E_{i,j}^{send}\} \\ &= RE(i,t) - E_{queue}^i - \max_{\forall j \in \text{neighbor of node } i} \{E_{i,j}^{send}\} \end{aligned} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $BL(i,t)$  คือ อายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนด  $i$  ณ เวลา  $t$  ส่วนค่า  $E_{queue}^i$  คือพลังงานที่โนด  $i$  ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตที่อยู่ในบัฟเฟอร์ ซึ่งอาจจะเป็นแพ็กเก็ตควบคุมหรือ แพ็กเก็ตข้อมูลซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.15) และ  $\max_{\forall j \in \text{neighbor of node } i} \{E_{i,j}^{send}\}$  เป็นค่าพลังงานที่โนด  $i$  จะต้องสูญเสียจากการส่งสูงสุดระหว่างโนด  $i$  ไปยังโนดข้างเคียง  $j$  ทุกตัวที่อยู่ในระยะการส่งของโนด  $i$  ยกเว้นโนดที่ส่งแพ็กเก็ต RREQ มาให้โนด  $i$  ซึ่งพลังงานที่สูญเสียจากการส่งระหว่างโนด  $i$  และโนด  $j$  ใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.16)

$$\begin{aligned} E_{queue}^i &= N_{rreq} \times (P_{send}^c \times T_{send}) + \sum_{k=1}^{N_{data}} P_{send}^d \times T_{send}^k \\ &= N_{rreq} \times \left( \frac{P_{send}^c \times L_{rreq}}{f} \right) + \sum_{k=1}^{N_{data}} \left( P_{send}^d \times \frac{L_{data}^k}{(1-p_k^{i,j}) \times f} \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$E_{i,j}^{send} = P_{send}^c \times \frac{L_{rreq}}{f} + P_{send}^d \times \frac{N_{total} \times L_{data}}{(1-p^{i,j}) \times f} \quad (3.16)$$

ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (3.14) ถึง (3.16) สามารถแสดงได้ในตารางที่ 3.2 ซึ่งการกำหนดค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโนดในลักษณะนี้จะทำให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำและถูกต้องมากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอก่อนในบทความอ้างอิง [8, 10, 11, 13] และทำให้การตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 3.2 ความหมายของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (3.14) ถึงสมการที่ (3.16)

$P_{send}^d$	กำลังที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (Watts)
$P_{send}^c$	กำลังที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตควบคุม RREQ (Watts)
$T_{send}$	เวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต (sec)
$T_{send}^k$	เวลาที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ต $k$ (sec)
$L_{data}$	ขนาดของแพ็กเก็ตข้อมูลที่ต้องการส่ง (Bits)
$L_{data}^k$	ขนาดของแพ็กเก็ตข้อมูล $k$ ที่อยู่ในบัฟเฟอร์ (Bits)
$L_{rreq}$	ขนาดของแพ็กเก็ตควบคุม (Bits)
$N_{rreq}$	จำนวนแพ็กเก็ต RREQ ทั้งหมดอยู่ในบัฟเฟอร์)Packets(
$N_{data}$	จำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในบัฟเฟอร์)Packets(
$N_{total}$	จำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โนดต้นทางต้องการจะส่ง)Packets(
$f$	อัตราในการส่งแพ็กเก็ต (Mbps)
$p^{i,j}$	อัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตบนขั้วเชื่อม โยระหว่าง โหนด $i$ และ $j$
$P_k^{i,j}$	อัตราความผิดพลาดแพ็กเก็ตของแพ็กเก็ต $k$ บนขั้วเชื่อม โยระหว่าง โหนด $i$ และ $j$ โดย โหนด $j$ เป็น โหนดปลายทางของแพ็กเก็ต $k$

### 3.2.2 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยึดอายุการใช้งานของโหนดให้มากที่สุดที่นำเสนออยู่บนพื้นฐาน โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ AODV โดยได้ทำการดัดแปลงกระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV เพื่อให้กระบวนการเลือกเส้นทางสามารถยึดอายุการใช้งานของโหนดและโครงข่ายกระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มขึ้นเมื่อโนดต้นทางต้องการที่จะส่งข้อมูลจะไปยังโนดปลายทาง แต่ไม่ทราบเส้นทางไปยังโนดปลายทางนั้น โหนดต้นทางจะต้องแพร่กระจายแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง (RREQ) ไปยังโนดข้างเคียงที่อยู่ภายในระยะการส่ง โดยในแพ็กเก็ต RREQ จะต้องมีบรรจุจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่โนดต้นทางต้องการจะสื่อสารกับโนดปลายทาง และภายหลังจากโนดข้างเคียงได้รับแพ็กเก็ต RREQ โหนดจะต้องคำนวณว่า ณ ขณะเวลานั้นโหนดสามารถจะทำงานได้อีกนานเท่าไรภายหลังจากได้รับรับการสื่อสารระหว่างโนดต้นทางและปลายทางที่ร้องขอมา (เวลาที่โหนดสามารถทำงานต่อไปได้ภายหลังจากการสื่อสารระหว่างโนดต้นทางและโนดปลายทางเสร็จสิ้นลง) ซึ่งคำนวณได้จากค่าอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนด (Battery Lifetime หรือ BL) จากสมการที่ (3.14) ต่อจากนั้นโนดระหว่างทางก็จะทำการหน่วงเวลาแพ็กเก็ต RREQ ไว้เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งตามฟังก์ชันการประวิงเวลา (Delay function) ก่อนที่จะแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ไปยังโนดข้างเคียงต่อไป ซึ่งช่วงเวลาในการหน่วงจะขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนด ณ ขณะเวลาปัจจุบัน โดยเราเรียกขั้นตอนนี้ว่า กลไกการประวิงเวลา (Delay mechanism) ขั้นตอนนี้จะดำเนินไปจนกระทั่งโนดปลายทางได้รับแพ็กเก็ต RREQ แรกเข้ามา โหนด



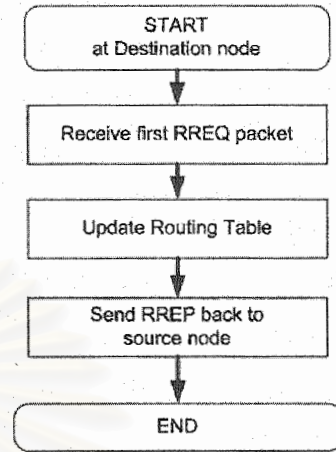
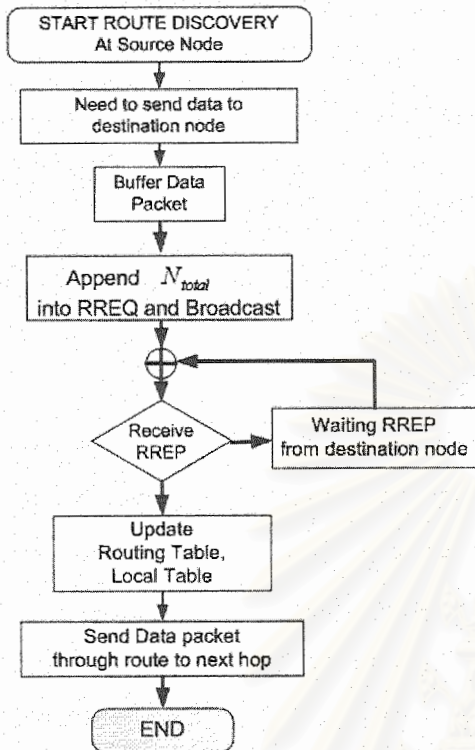
ปลายทางก็จะตอบรับเส้นทางนี้ทันทีโดยการส่งแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทางกลับไปยังโหนดต้นทางผ่านทางเส้นทางเดิมที่แพ็กเก็ต RREQ เดินทางมาถึง ซึ่งจะแตกต่างจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำสุด (*Proposed-Energy*) ที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้นที่กำหนดให้โหนดปลายทางจะต้องรอเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งเพื่อรอแพ็กเก็ตจากเส้นทางอื่น ๆ แล้วจึงตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ดีที่สุด สาเหตุที่ไม่กำหนดให้โหนดปลายทางจะต้องหยุดรอเนื่องจาก กลไกการประวิงเวลาที่กล่าวข้างต้น โดยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ต่ำจะหน่วงเวลาแพ็กเก็ต RREQ ไว้เป็นเวลานานก่อนที่จะแพร่กระจายไปยังโหนดข้างเคียงเมื่อเทียบกับโหนดที่มีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่สูง เพราะฉะนั้นส่วนมากแล้วแพ็กเก็ต RREQ ที่ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ต่ำจะถูกทิ้ง (Discard) ดังนั้นแพ็กเก็ตที่ไปถึงยังโหนดปลายทางจะเป็นแพ็กเก็ตแรกก็จะเป็นแพ็กเก็ตที่ผ่านเส้นทางซึ่งประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ที่อยู่ในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับโหนดอื่น ๆ ในโครงข่าย

โดยขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ในผังงานในรูปที่ 3.5 ถึงรูปที่ 3.7 โดยแยกตามกระบวนการที่โหนดแต่ละโหนดจะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนที่เกิดขึ้นกับโหนดต้นทาง ส่วนผังงานในรูปที่ 3.6 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดปลายทางและสุดท้ายเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดระหว่างทางแสดงด้วยผังงานในรูปที่ 3.7

จากกระบวนการค้นหาเส้นทางที่กล่าวข้างต้นสรุปได้ว่าเส้นทางที่ดีที่สุดจะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ที่อยู่ในระดับที่สูงเมื่อเทียบกับโหนดอื่น ๆ ในโครงข่ายหรือพยายามหลีกเลี่ยงโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ต่ำ ซึ่งจะทำให้โหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ในระดับที่ต่ำไม่ถูกใช้งานมากเกินไป ซึ่งสามารถทำให้โครงข่ายและโหนดสามารถที่จะขยายเวลาที่จะทำงานในโครงข่ายแยกออกไปได้และก็จะส่งผลทำให้สมรรถนะในด้านอื่น ๆ ของระบบดีขึ้นตามไปด้วย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของ  
โหนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทาง  
แบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด  
(Proposed-Battery)

รูปที่ 3.6 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของ  
โหนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรร  
เส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมาก  
ที่สุด (Proposed-Battery)

### 3.2.3 ฟังก์ชันการประวิงเวลา (Delay Function)

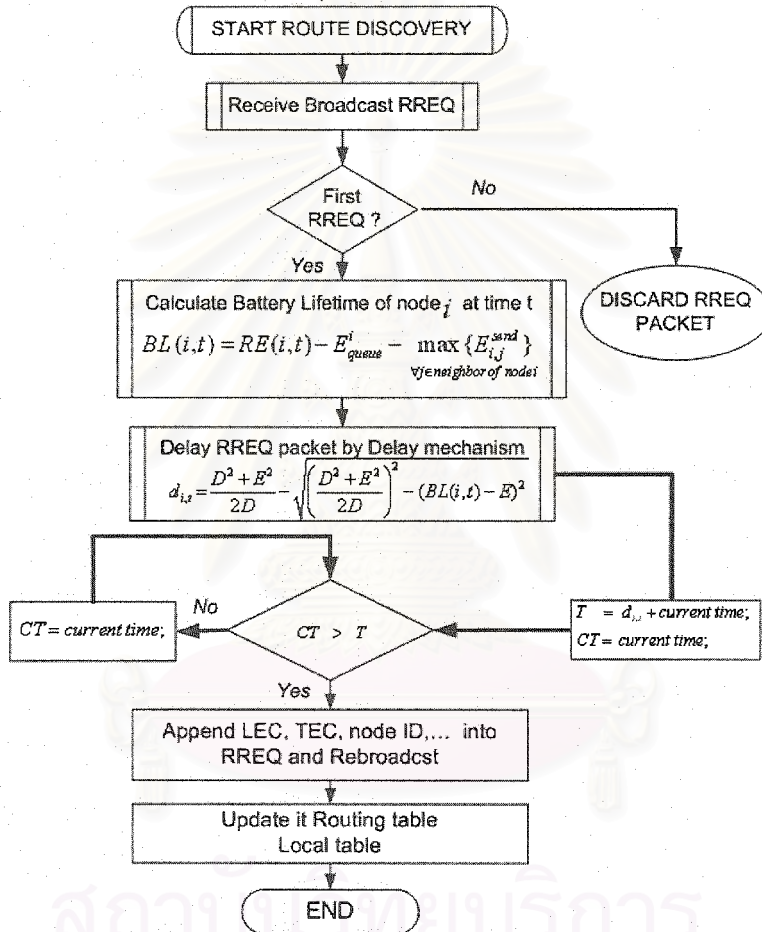
กลไกการประวิงเวลาจะเปรียบเสมือนกับฟังก์ชันที่แปลงจากอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนดที่แสดงด้วยสมการที่ (3.14) ไปเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการหน่วงแพ็กเก็ต RREQ ก่อนที่จะดำเนินการอื่น ๆ ต่อไป ซึ่งมีหลายฟังก์ชันที่ถูกนำมาเสนอในบทความอ้างอิง [11] เช่น Linear Convex และ Concave ซึ่งฟังก์ชันแบบ Concave ให้ผลลัพธ์ในการยืดอายุการใช้ของโครงข่ายได้ดีที่สุด โดยที่ Yu และ Lee [11] ได้เสนอฟังก์ชันการประวิงเวลาง่าย ๆ เพื่อนำมาใช้งานซึ่งมีลักษณะของฟังก์ชันแสดงในสมการที่ (3.17)

$$d_{i,t} = \frac{E * D}{e_{i,t} + E} \quad (3.17)$$

เมื่อ  $d_{i,t}$  คือ ระยะเวลาที่โหนดใช้ในการหน่วงแพ็กเก็ต RREQ ของโหนด  $i$  ณ เวลา  $t$  มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที ส่วนค่า  $E$  คือ ค่าพลังงานสูงสุดของโหนด (Maximum energy) มีหน่วยเป็นจูล (Joules)  $D$  เป็น เวลาที่ใช้ในการประวิงเวลาแพ็กเก็ตสูงสุด (Maximum delay) และ  $e_{i,t}$  คือ พลังงานที่เหลืออยู่ของโหนด  $i$  ณ เวลา  $t$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟังก์ชันในสมการที่ (3.17) ยังคงมีปัญหาคือ ค่าต่ำสุดของการหน่วงเวลาแพ็กเก็ต

คือ  $D/2$  ก็หมายความว่าถึงแม้ว่าโหนดจะมีพลังงานจากแบตเตอรี่อยู่เต็มแต่โหนดก็ยังคงถูกหน่วงเวลาแพ็กเก็ตไว้ถึง  $D/2$  ในงานวิจัยนี้จึงเสนอว่าฟังก์ชันที่นำมาใช้ไม่ควรที่จะมีการหน่วงเวลามากเกินความจำเป็นในกรณีที่โหนดมีพลังงานจากแบตเตอรี่เต็มหรือค่า  $BL(i,t)$  เท่ากับค่าพลังงานสูงสุดของโหนดเพราะอาจจะทำให้สมรรถนะด้านอื่น ๆ ของระบบลดต่ำลงเช่น การประวิงเวลาเฉลี่ยของแพ็กเก็ตข้อมูลจากปลายถึงปลาย (Average End-to-End Delay) โดยโพรโทคอลที่นำเสนอจะยังคงใช้ฟังก์ชันแบบ Concave ซึ่งมีลักษณะของฟังก์ชันแสดงในสมการที่ (3.18)

$$d_{i,t} = \frac{D^2 + E^2}{2D} - \sqrt{\left(\frac{D^2 + E^2}{2D}\right)^2 - (BL(i,t) - E)^2} \quad (3.18)$$

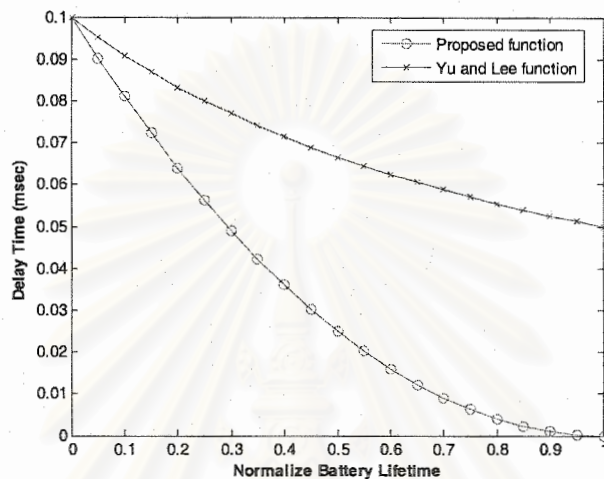


รูปที่ 3.7 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดระหว่างทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Proposed-Battery)

โดยฟังก์ชันที่นำเสนอจะลดค่าเฉลี่ยเวลาที่หน่วงแพ็กเก็ต และเพิ่มความแตกต่างของเวลาที่ใช้หน่วงแพ็กเก็ตระหว่างโหนดที่ใกล้หมดอายุการใช้งานกับโหนดที่มีอายุการใช้งานเหลืออยู่เต็ม เพราะฉะนั้นเส้นทางที่แพ็กเก็ต RREQ ไปถึงยังโหนดปลายทางเป็นอันดับต้น ๆ จะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูงเพราะแพ็กเก็ต RREQ ที่ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่ต่ำจะ



ถูกหน่วงเวลาไว้นาน ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วแพ็กเก็ตเหล่านี้ก็จะถูกในดอื่น ๆ ละทิ้งเนื่องจากแพ็กเก็ตที่เข้ามาไม่ใช่แพ็กเก็ตแรก โดยความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันที่นำเสนอกับฟังก์ชันที่นำเสนอโดย Yu และ Lee สามารถแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ฟังก์ชันการประวิงเวลาที่ใช้นในงานวิจัยนี้และในบทความอ้างอิง [11] ของ Yu และ Lee

### 3.3 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Minimum Energy Consumption and Maximum Battery Lifetime Routing Protocols)

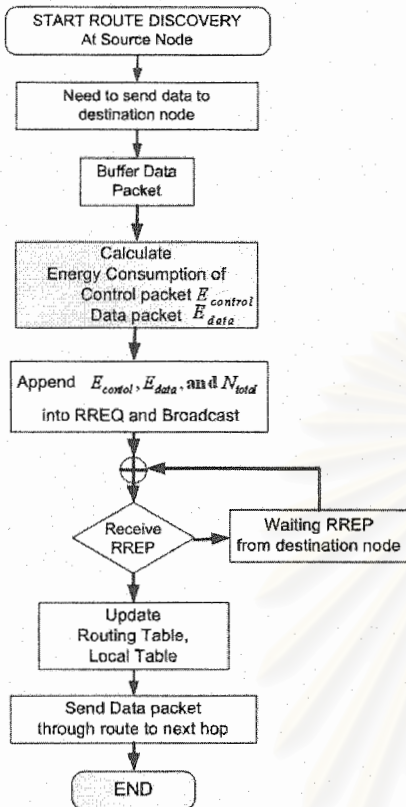
โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในหัวข้อนี้จัดได้ว่าอยู่ในกลุ่มของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม โดยเป้าหมายสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอนี้เพื่อ “เพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้มากที่สุด” จะเห็นได้ว่าเป้าหมายจะเหมือนกับโพรโทคอลแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (*Proposed-Battery*) โดยโพรโทคอลแบบผสมเกิดจากแนวความคิดที่ว่า การจะช่วยให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานให้มากที่สุดนั้นเราจะต้องเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานที่ต่ำและขณะเดียวกันก็จะต้องเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่อยู่ในระดับที่สูง ซึ่งถ้าพิจารณาเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่งก็สามารถจะช่วยยืดอายุได้เช่นกันแต่ไม่ประสิทธิภาพเท่ากับนำทั้งสองเงื่อนไขมาพิจารณาพร้อม ๆ กัน

เพราะฉะนั้นโพรโทคอลที่จะนำเสนอในหัวข้อนี้จะนำเอาโพรโทคอลใช้พลังงานต่ำที่สุดและโพรโทคอลแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (*Proposed-Hybrid*) ที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้นมาทำการดัดแปลงกระบวนการค้นหาเส้นทางเพื่อให้สามารถบรรลุเป้าหมายทั้งสองอย่างพร้อมกัน

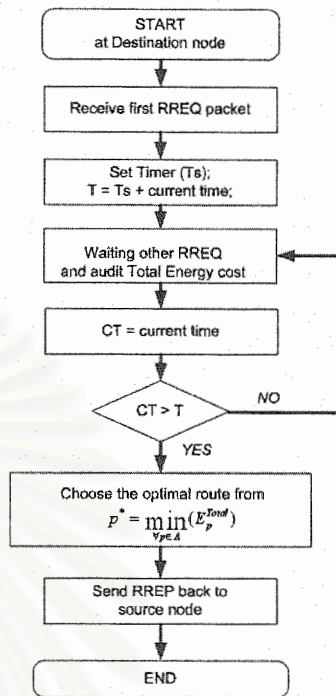
#### 3.3.1 กระบวนการค้นหาเส้นทาง (Route Discovery Process)

กระบวนการค้นหาเส้นทางเริ่มขึ้นเมื่อโหนดต้นทางต้องการที่จะส่งข้อมูลจะไปยังโหนดปลายทางแต่ไม่ทราบเส้นทางไปยังโหนดปลายทางนั้น โหนดต้นทางจะต้องแพร่กระจายแพ็กเก็ตการร้องขอเส้นทาง

(RREQ) ไปยังโหนดข้างเคียงที่อยู่ภายในระยะการส่ง โดยในแพ็กเก็ต RREQ จะต้องบรรจุจำนวนแพ็กเก็ต ข้อมูลที่โหนดต้นทางต้องการจะสื่อสารกัน โหนดปลายทางรวมทั้งค่า  $E_{control}$  และ  $E_{data}$  จากสมการที่ (3.4) และ (3.9) ตามลำดับ และสุดท้ายคือ กำหนดค่าเริ่มต้นของ  $E_p^{Total}$  ให้เท่ากับศูนย์ จากนั้นก็ทำการ แพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยังโหนดข้างเคียง หลังจากโหนดข้างเคียงได้รับแพ็กเก็ต RREQ โหนดจะทำการหน่วง เวลาแพ็กเก็ต RREQ ไว้เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งด้วยฟังก์ชันการประวิงเวลาที่เสนอในหัวข้อที่ 3.2.3 ซึ่ง ช่วงเวลาในการหน่วงจะขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ของโหนด ณ ขณะเวลาปัจจุบัน (สมการที่ (3.14)) ก่อนที่จะทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต RREQ ไปยังโหนดข้างเคียง และในเวลาที่แพ็กเก็ตถูก หน่วงอยู่นั้น (หรือก่อนที่หมดเวลาการหน่วงแพ็กเก็ต RREQ ที่ได้ตั้งไว้) โหนดต้องคำนวณค่าต้นทุนพลังงาน ข่ายเชื่อมโยง (Energy Link Cost) และค่าต้นทุนรวมพลังงาน (Total Energy Cost) เหมือนกับขั้นตอนของ การคำนวณพลังงานที่สูญเสียในโพรโทคอลแบบใช้พลังงานที่ต่ำที่สุด เมื่อคำนวณค่าต่าง ๆ เสร็จก็จะบรรจุ ค่าดังกล่าวลงในแพ็กเก็ต RREQ และแพร่กระจายแพ็กเก็ตไปยังโหนดข้างเคียงต่อไป กระบวนการ ดังกล่าวจะดำเนินไปจนกระทั่งแพ็กเก็ต RREQ ไปถึงยังโหนดปลายทาง หลังจากโหนดปลายทางได้รับ RREQ แรกแล้วจะตั้งเวลาที่เหมาะสมค่าหนึ่ง เพื่อรอ RREQ ที่ได้จากเส้นทางอื่น ๆ หรืออาจจะกำหนดจำนวน RREQ ที่จะรับ โดยแพ็กเก็ต RREQ ที่เข้ามาหลังจากเวลาที่กำหนดไว้จะถูกลบทิ้งทั้งหมด เมื่อหมดเวลา ที่ตั้งไว้หรือได้รับแพ็กเก็ต RREQ ครบตามจำนวนที่กำหนดไว้ ขั้นตอนต่อไปคือ พิจารณาว่าเส้นทางใดเป็น เส้นทางที่เหมาะสมในจำนวนเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดระหว่างโหนดต้นทางกับโหนดปลายทาง โดย พิจารณาจากสมการที่ (3.13) คือ เป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานรวมตลอดทั้งเส้นทางต่ำที่สุดหรือกล่าวได้ว่าเป็น พลังงานที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด หลังจากโหนดเลือกเส้นทางเส้นทางได้แล้ว โหนด ปลายทางจะสร้างแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทาง (RREP) เพื่อตอบกลับไปยังโหนดต้นทางให้ทราบ โดยใช้ เส้นทางที่เลือกไว้ข้างต้นในการส่งแพ็กเก็ตไปให้โหนดต้นทาง โดยระหว่างที่ส่งแพ็กเก็ตตอบรับเส้นทาง กลับไปนั้นโหนดทุกโหนดที่ได้รับแพ็กเก็ตจะต้องทำการปรับปรุงตารางการจัดเส้นทางและส่งแพ็กเก็ตดังกล่าว ต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงโหนดต้นทาง ภายหลังจากโหนดต้นทางได้รับแพ็กเก็ตการตอบรับเส้นทางแล้วโหนดก็จะทำ การปรับปรุงเส้นทางที่ได้ในตารางการจัดเส้นทางของตัวเองแล้วก็เริ่มทำการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลไปตาม เส้นทางที่ได้มาก็เป็นอันเสร็จกระบวนการค้นหาเส้นทาง



รูปที่ 3.9 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของ โหนดต้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid)

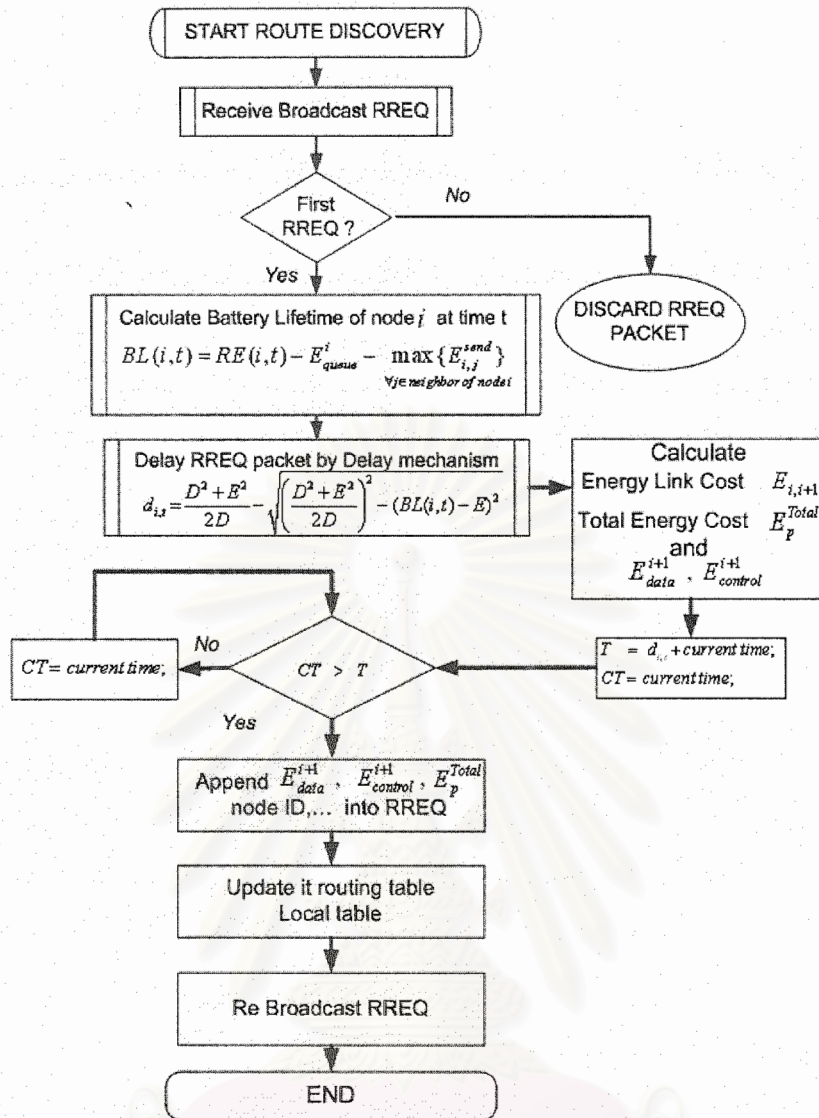


รูปที่ 3.10 ผังงานกระบวนการค้นหาเส้นทางของ โหนดปลายทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid)

จากกระบวนการค้นหาเส้นทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่ได้กล่าวข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า เส้นทางที่ดีที่สุดจะเป็นเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดจากเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดในช่วงเวลาที่โหนดปลายทางทำการรอแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทาง และจากการใช้กลไกการประวิงเวลาทำให้เส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานจากแบตเตอรี่ (Battery Lifetime) อยู่ในระดับที่สูง ซึ่งทำให้เส้นทางที่ดีที่สุดเป็นเส้นทางที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานและอายุการใช้งานของโครงข่ายดีกว่าเมื่อเทียบกับเส้นทางที่ดีที่สุดของโพรโทคอลทั้งแบบการใช้พลังงานต่ำที่สุด และยืดอายุการใช้งานมากที่สุดที่ได้นำเสนอไว้ข้างต้น

โดยขั้นตอนของกระบวนการค้นหาเส้นทางทั้งหมดที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปได้ในผังงานในรูปที่ 3.9 ถึงรูปที่ 3.11 โดยแยกตามกระบวนการที่โหนดแต่ละโหนดจะต้องกระทำซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในผังงานในรูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนที่เกิดกับโหนดต้นทาง ส่วนผังงานในรูปที่ 3.10 เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดปลายทางและสุดท้ายเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับโหนดระหว่างทางแสดงด้วยผังงานในรูปที่ 3.11





รูปที่ 3.11 ฟังก์ชันกระบวนการค้นหาเส้นทางของโหนดระหว่างทางสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid)

#### 4. สภาพแวดล้อมของการจำลอง ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง

##### 4.1 สภาพแวดล้อมของการจำลอง (Simulation Environment)

ในการจำลองกระบวนการทำงานทั้งหมดในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Network Simulator 2 (NS2) เวอร์ชัน 2.8 [14] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่จำลองแบบตามลำดับเหตุการณ์ (Discrete Event Simulation) โดยจะทำการจำลองโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้งสามแบบภายใต้สถานการณ์ที่โครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง ซึ่งพารามิเตอร์หลัก ๆ ที่ใช้ในการจำลองมีดังนี้

#### 4.1.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของโหนดต้นทาง

ในการทดสอบนี้ต้องการจะประเมินว่าโพรโทคอลที่นำเสนอจะส่งผลกระทบต่อโครงข่ายอย่างไร เมื่อปริมาณโหลดที่ป้อนให้โครงข่ายเพิ่มขึ้น ซึ่งพารามิเตอร์ที่จะแสดงถึงปริมาณโหลดที่ป้อนให้โครงข่ายดีที่สุดคือ อัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของแต่ละการเชื่อมต่อ โดยการเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลก็จะทำให้ปริมาณโหลดในแต่ละการเชื่อมต่อเพิ่มขึ้น ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลของโหนดต้นทางสามารถสรุปได้ในตารางที่ 4.1

- แบบจำลองการใช้พลังงานและคุณสมบัติทางด้านกายภาพของคลื่นวิทยุที่ใช้งาน
  - พลังงานเริ่มต้นของโหนดมีค่าเท่ากับ 10 จูล
  - ค่ากำลังงานที่ใช้ในการส่ง ( $P_t$ ) การรับ ( $P_r$ ) และการได้ยิน ( $P_{overhear}, P_o$ ) มีค่าเท่ากับ 0.6635, 0.395 และ 0.200 วัตต์ ตามลำดับ ส่วนค่ากำลังงานที่ใช้ในโหมดสถานะหลับและสถานะว่างมีค่าเท่ากับศูนย์หรือไม่มีการพิจารณาพลังงานที่สูญเสียในสภาวะนี้
  - กำหนดให้ทุกโหนดมีกำลังในการส่งสัญญาณคงที่และเท่ากันทุกโหนด (Constant-Power)
  - อัตราเร็วในการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 11 Mbps ด้วยระยะทาง 180 เมตร
  - อัตราเร็วในการส่งแพ็กเก็ตควบคุมในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (RTS/CTS/ACK) เท่ากับ 2 Mbps ด้วยระยะทาง 270 เมตร

#### 4.1.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกประสิทธิภาพของโพรโทคอล

การประเมินผลว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่ทำการออกแบบให้ผลในทางที่ดีหรือว่าแย่ นั้นจะต้องมีพารามิเตอร์หรือตัววัดเพื่อมาใช้ในการชี้วัด โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการชี้วัดประสิทธิภาพสำหรับโพรโทคอลที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน และพารามิเตอร์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงานซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ชี้วัดคุณภาพการให้บริการของโพรโทคอลทั่วไป ๆ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละส่วนแสดงได้ดังนี้

- พารามิเตอร์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงาน
  - อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จ (Packet delivery ratio) สามารถคำนวณได้จาก จำนวนแพ็กเก็ตที่โหนดปลายทางได้รับสำเร็จต่อจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่ส่งออกจากโหนดต้นทาง
  - ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลาย (Average end-to-end delay) เป็นค่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตหนึ่งแพ็กเก็ตจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทาง ซึ่งมีหน่วยเป็น วินาที

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในกรณีเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
จำนวนโหนด	50 โหนด
ขนาดของพื้นที่ในการจำลอง	1000 เมตร X 1000 เมตร
เวลาที่ใช้ในการจำลอง	900 วินาที
จำนวนครั้งที่ใช้ในการทดสอบ	50 ครั้ง
ลักษณะของทราฟฟิก	
จำนวนการเชื่อมต่อ	20 การเชื่อมต่อ
ทราฟฟิกที่ใช้ในการสื่อสาร	Constant Bit Rate (CBR)
อัตราการส่งแพ็กเก็ต	4, 10, 15, 20, 25 แพ็กเก็ต/วินาที
ขนาดของแพ็กเก็ต	512 ไบต์
รูปแบบการเคลื่อนที่	
แบบจำลองการเคลื่อนที่	Random Waypoint [15]
ความเร็วสูงสุดของโหนด	10.0 เมตร/วินาที
เวลาหยุด (Pause Time)	60 วินาที

■ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน

- พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ (Energy per Good-put) เป็นจำนวนพลังงานทั้งหมดที่โครงข่ายสูญเสียต่อจำนวนแพ็กเก็ตทั้งหมดที่โหนดปลายทางได้รับอย่างถูกต้อง ซึ่งเป็นค่าที่สะท้อนให้เห็นว่าโครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ ถ้าค่าที่ได้มีค่าที่ต่ำนั้นแสดงว่าโครงข่ายมีประสิทธิภาพด้านพลังงานที่สูง หน่วยที่ใช้คือ จูล/แพ็กเก็ต
- ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนด (Standard deviation of remaining energy per node) เป็นค่าที่แสดงว่าแต่ละโหนดมีการใช้พลังงานหรือสูญเสียพลังงานอย่างสม่ำเสมอหรือไม่ ถ้าผลที่ได้มีค่าต่ำแสดงว่า โหนดในโครงข่ายถูกใช้งานอย่างสม่ำเสมอ (ในแง่การใช้พลังงานจากแบตเตอรี่)
- อายุการใช้งานของโครงข่าย (Network lifetime) สามารถวัดได้จากเวลาเริ่มต้นในการจำลองจนกระทั่งมีโหนดแรกในโครงข่ายไม่มีพลังงานจากแบตเตอรี่เหลืออยู่หรือโหนดนั้นไม่สามารถทำงานได้อีกต่อไป



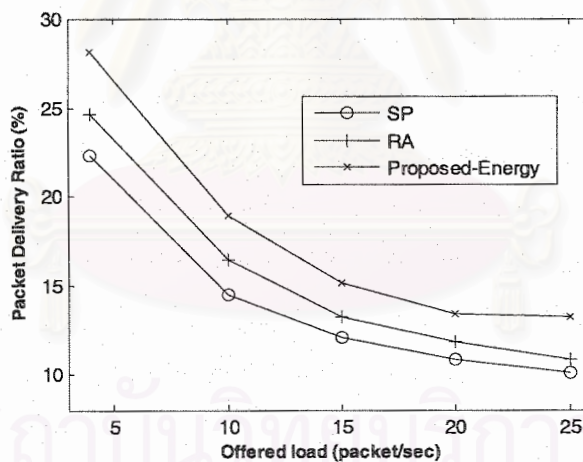
#### 4.2 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลองสำหรับโพรโทคอลทั้งสามประเภท

ในส่วนนี้จะแสดงผลและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบของโพรโทคอลที่นำเสนอเปรียบเทียบกับโพรโทคอลที่อยู่ในประเภทเดียวกัน ซึ่งโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแต่ละประเภทจะทำการทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทางดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1

##### 4.2.1 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง (Energy or Transmission Power-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลที่นำเสนอและจัดอยู่ในโพรโทคอลประเภทนี้คือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocol) โดยจะใช้สัญลักษณ์ *Proposed-Energy* แทนโพรโทคอลที่นำเสนอ ซึ่งโพรโทคอลที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ MTRP [7] แต่เนื่องจากในการจำลองได้กำหนดให้โหนดมีกำลังส่งคงที่ ผลที่ได้จากโพรโทคอลแบบ MTRP จะเหมือนกับกรณีของโพรโทคอลแบบ AODV [4] และ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Retransmission-Aware (RA) [9]

##### 4.2.1.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



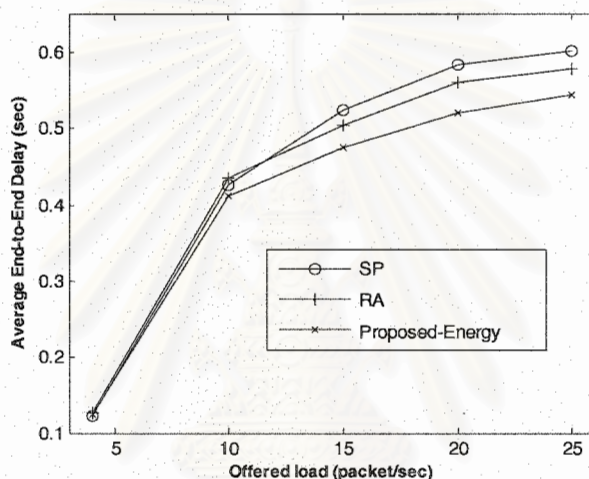
รูปที่ 4.1 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทคำนึงถึงพลังงานหรือกำลัง)

จากรูปที่ 4.1 เมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลสำเร็จของโครงข่ายสำหรับทุก ๆ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อโหนดเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลก็จะทำให้โครงข่ายมีความคับคั่ง (Congestion) เพิ่มขึ้น ซึ่งก็จะทำให้แพ็กเก็ตถูกละทิ้งมากขึ้นโดยเฉพาะการละทิ้งเพราะบัฟเฟอร์ของแต่ละโหนดไม่สามารถรองรับแพ็กเก็ตที่มากขึ้นได้ นอกจากนั้นโอกาสของการเกิดการชนกันของข้อมูลก็เพิ่มมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ได้ให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP และ RA ในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล โดยในกรณีที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 25 แพ็ก

เกิดต่อวินาที ค่าที่ได้จากโพรโทคอลที่นำเสนอมากกว่า โพรโทคอลแบบ SP ร้อยละ 30.57 ซึ่งสาเหตุหลัก ๆ ที่ทำให้โพรโทคอลการหาเส้นทางที่นำเสนอให้ค่าที่ดีที่สุดนั้นคือ

- เส้นทางที่ได้จากการตัดสินใจของโหนดปลายทางเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งต่ำ เพราะเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (3.11) ซึ่งคำนวณค่าต้นทุนพลังงานของข่ายเชื่อมโยงจะพิจารณาพลังงานที่โหนดข้างเคียงจะต้องสูญเสีย ดังนั้นถ้าโหนดของข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวมีจำนวนโหนดข้างเคียงอยู่ไม่หนาแน่นหรือจำนวนน้อยก็จะส่งผลให้ค่าต้นทุนพลังงานของข่ายเชื่อมโยงและค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทางมีค่าต่ำตามไปด้วย

- เส้นทางที่ได้ถือได้ว่าเป็นเส้นทางที่มีความน่าเชื่อถือ โดยโพรโทคอลที่นำเสนอจะเลือกเส้นทางที่มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อมาก ๆ ซึ่งในแต่ละช่วงเชื่อมต้อมีระยะทางที่สั้น เนื่องจากการส่งที่ใช้ระยะทางยาว ๆ ก็จะทำให้คุณภาพของข่ายเชื่อมโยงดังกล่าวไม่มีคุณภาพ

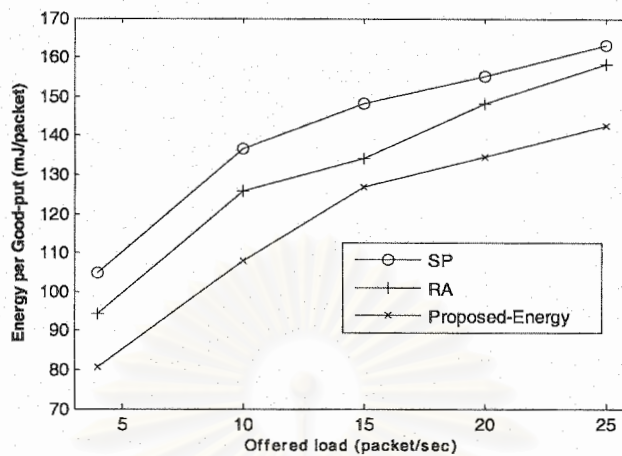


รูปที่ 4.2 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

(กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านึงถึงพลังงานหรือกำลัง)

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้เส้นทางที่ได้จากโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถใช้งานได้นานกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบอื่น ๆ ทั้งสองแบบ

รูปที่ 4.2 แสดงการประวิงเวลาของแพ็กเก็ต ถึงแม้ว่าโพรโทคอลแบบ SP จะใช้เส้นทางที่สั้นที่สุด แต่การใช้เส้นทางที่สั้นที่สุดไม่ได้หมายความว่า แพ็กเก็ตจะใช้เวลาในการส่งที่ต่ำเสมอไป เพราะเมื่อดูจากผลการทดสอบในรูปที่ 4.2 ในกรณีที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลมีค่าเท่ากับ 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที โพรโทคอลที่ใช้เส้นทางต่ำที่สุดจะให้การประวิงเวลาตลอดทั้งเส้นทางของแพ็กเก็ตมีค่าสูงสุด เพราะฉะนั้นการประวิงเวลาของแพ็กเก็ตนอกจากจะขึ้นอยู่กับจำนวนฮอป (Hop count) แล้วยังขึ้นอยู่กับความคับคั่งที่เกิดขึ้นกับเส้นทางนั้นด้วย ซึ่งโพรโทคอลการที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy จะให้ค่าการประวิงเวลาที่ต่ำที่สุด เพราะโพรโทคอลที่นำเสนอจะพยายามหลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความคับคั่งสูงดังที่กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 4.3 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง)

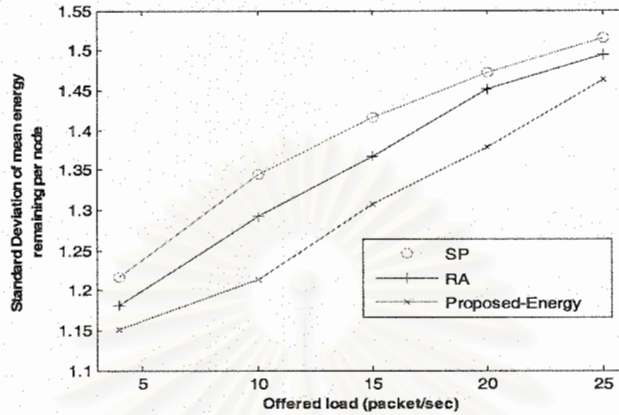
รูปที่ 4.3 ถึง 4.5 เป็นผลจากการทดสอบประสิทธิภาพเมื่อใช้พารามิเตอร์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพด้านพลังงานและอายุการใช้งานของโครงข่าย จากรูปที่ 4.3 เมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานมีค่าลดลง เนื่องจากความคับคั่งของโครงข่าย ทั้งการชนกันของข้อมูลที่มากขึ้นและข้อจำกัดของปริมาณแพ็กเก็ตที่แต่ละโหนดสามารถรองรับได้ เพิ่มขึ้นตามอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล นอกจากประสิทธิภาพการใช้พลังงานลดต่ำลงแล้วยังส่งผลทำให้พลังงานที่แต่ละโหนดสูญเสียไม่เสมอภาคกันซึ่งแสดงในรูปที่ 4.4 นอกจากนี้ยังทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายลดลงเมื่ออัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงในรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.3 แสดงพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ ซึ่งเป็นค่าที่จะใช้สำหรับประเมินว่า โพรโทคอลที่นำมาทดสอบมีประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานมากหรือน้อยเพียงใด เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นได้ว่า โพรโทคอลแบบ RA และ Proposed-Energy จะให้ประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานที่ดีกว่าโพรโทคอลแบบ SP เพราะโพรโทคอลแบบ RA และ Proposed-Energy ได้คำนึงถึงการสูญเสียพลังงานของโหนดมาใช้พิจารณา อย่างไรก็ตามโพรโทคอลการที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ให้ประสิทธิภาพด้านพลังงานดีที่สุด เพราะโพรโทคอลที่นำเสนอจะเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายเสียพลังงานต่ำที่สุด แต่ในขณะที่โพรโทคอลแบบ RA จะใช้เส้นทางที่ใช้พลังงานที่ต่ำที่สุดเช่นกันแต่ไม่ได้พิจารณาผลของการสูญเสียพลังงานจากโหนดที่รับข้อมูล (Receive) และโหนดข้างเคียงที่ได้ยินข้อมูล (Overhear) แต่พิจารณาเฉพาะพลังงานที่โหนดในเส้นทางใช้ในการส่งเท่านั้น

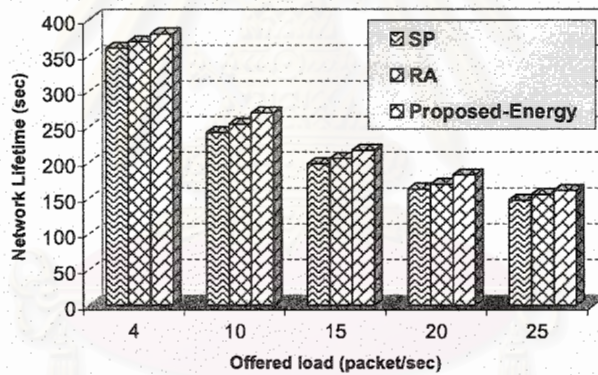
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนด ซึ่งก็เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญที่จะส่งผลต่ออายุการใช้งานของโครงข่ายและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของโครงข่าย จากรูปโพรโทคอลที่ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนดต่ำที่สุดคือ โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอมีการกระจายปริมาณไหลไปยังเส้นทางอื่นแทนที่จะใช้



เส้นทางเดิมอยู่ตลอดเวลาจนโหนดในเส้นทางหมดอายุเร็วกว่ากำหนด ส่วนในกรณีของ SP และ RA ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางเหมือนกัน แต่โอกาสที่จะได้เส้นทางเดิมมีค่าสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ เพราะปัจจัยที่นำมาใช้ในการคำนวณค่าต้นทุนของเส้นทางมีน้อยกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ



รูปที่ 4.4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง)



รูปที่ 4.5 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบประเภทค่านิ่งถึงพลังงานหรือกำลัง)

เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอ (Proposed-Energy) มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพดังแสดงในรูปที่ 4.3 และแต่ละโหนดในโครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างเสมอภาคดังแสดงในรูปที่ 4.4 จึงทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ RA และ SP ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP ประมาณ 19.96 วินาที หรือร้อยละ 5.54 ณ ที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 4 แพ็กเก็ตต่อวินาที ส่วนขณะที่อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 25 แพ็กเก็ตต่อวินาทีจะเพิ่มอายุการใช้งานได้ร้อยละ 13.73 วินาทีแต่เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์จะได้ร้อยละ 9.34

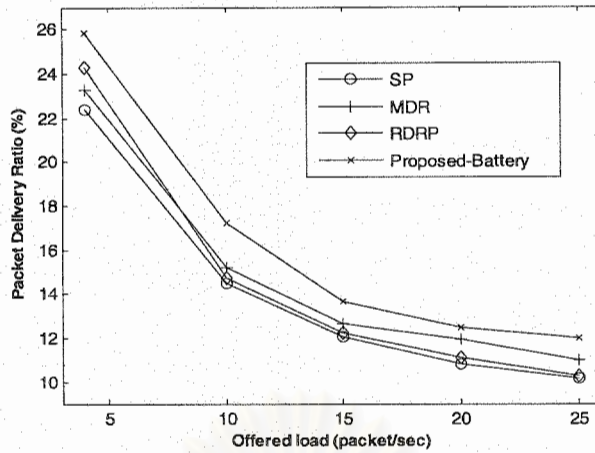
จากการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดที่นำเสนอ (Proposed-Energy) สามารถทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งก็ส่งผลทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่ไม่พิจารณาถึงพลังงานอย่างเช่น โพรโทคอลแบบ SP นอกเหนือจากประสิทธิภาพด้านพลังงานแล้ว โพรโทคอลที่นำเสนอยังให้คุณภาพการให้บริการคือ อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จในระดับที่ดีกว่าโพรโทคอลแบบ SP นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า โครงข่ายที่ใช้โพรโทคอลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าว่า โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่คำนึงถึงพลังงานแบบอื่น ๆ (โพรโทคอลแบบ RA) เนื่องจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอได้คำนวณค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทางที่สะท้อนถึงพลังงานที่โครงข่ายจะต้องสูญเสียได้ดีกว่าค่าต้นทุนพลังงานที่กำหนดขึ้นจาก โพรโทคอลแบบ RA

#### 4.2.2 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่ (Battery-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลที่นำเสนอและจัดอยู่ในโพรโทคอลประเภทนี้คือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยึดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Maximum Battery Lifetime Routing Protocol) โดยจะใช้สัญลักษณ์ Proposed-Battery แทนโพรโทคอลที่นำเสนอ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้โพรโทคอล โพรโทคอลแบบ AODV [4], โพรโทคอลแบบ Request-Delay Routing Protocol (RDRP) [11] และสุดท้ายคือ โพรโทคอลแบบ Minimum Drain Rate (MDR) [12] ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

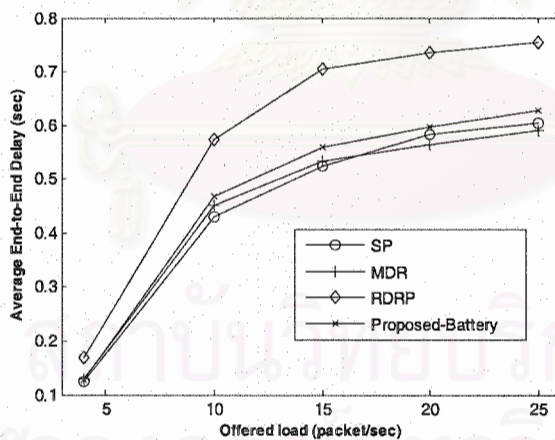
##### 4.2.2.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล

จากรูปที่ 4.6 ผลที่ได้จากการทดสอบจะเหมือนกับการทดสอบในหัวข้อที่ 4.2.1 นั่นคือ เมื่อเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจาก 4 ไปถึง 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที ก็จะทำให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จลดลงอย่างรวดเร็ว โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลที่นำเสนอ (Proposed-Battery) จะให้ค่าสูงสุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เนื่องจากกระบวนการค้นหาเส้นทาง ทำให้เส้นทางที่ได้นั้นเป็นเส้นทางที่ประกอบไปด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานในระดับสูง อีกทั้งสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าอายุการใช้งานของโหนด (Battery Lifetime) ในสมการที่ (3.14) ได้คำนึงถึงพลังงานที่จะต้องสูญเสียให้กับปริมาณไหลที่อยู่ในบัฟเฟอร์ เพราะฉะนั้นเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่มีปริมาณไหลอยู่ในระดับที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งทั้งสองส่วนที่กล่าวมาทำให้เส้นทางที่ได้มีประสิทธิภาพจึงสามารถส่งแพ็กเก็ตได้มากกว่าโพรโทคอลแบบอื่น ๆ



รูปที่ 4.6 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)

โดยจากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าโพรโทคอลที่นำเสนอสามารถเพิ่มอัตราการส่งแพ็กเก็ตได้สำเร็จมากกว่าโพรโทคอลแบบ SP ร้อยละ 18.00 ส่วนโพรโทคอลแบบ MDR เพิ่มได้เพียงร้อยละ 8.45 ณ อัตราการส่งแพ็กเก็ตสูงสุด แต่ขณะที่โพรโทคอลแบบ RDRP จะพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่ในการเลือกเส้นทาง ซึ่งทำให้ปริมาณโหนดจำนวนมากไหลเข้ามา นั่นก็จะส่งผลให้โหนดดังกล่าวหมดพลังงานอย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้ก็จะดีกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ SP เพราะอย่างน้อยโพรโทคอลแบบ RDRP ก็ยังคงเลือกเส้นทางที่ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานนานกว่าวิธีการหาเส้นทางแบบ Shortest-Path

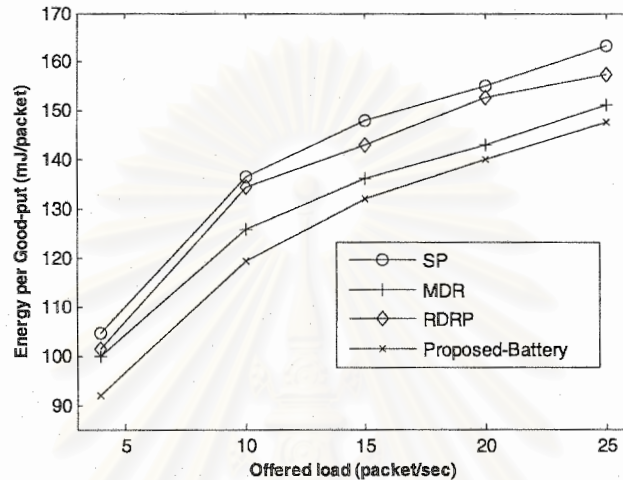


รูปที่ 4.7 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)

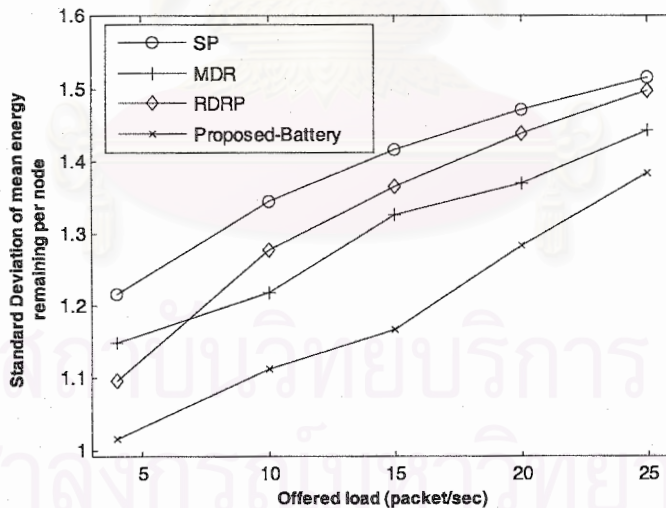
รูปที่ 4.7 แสดงว่าถึงแม้กระบวนการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอลที่นำเสนอจะเพิ่มการประวิงเวลาให้กับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางและเส้นทางที่ได้มีจำนวนช่วงเชื่อมต่อที่สูง แต่การประวิงเวลาจากปลายถึงปลายของข้อมูลที่ได้ไม่แตกต่างจากการกระบวนการค้นหาเส้นทางแบบ MDR และ SP มากนัก เนื่องจาก



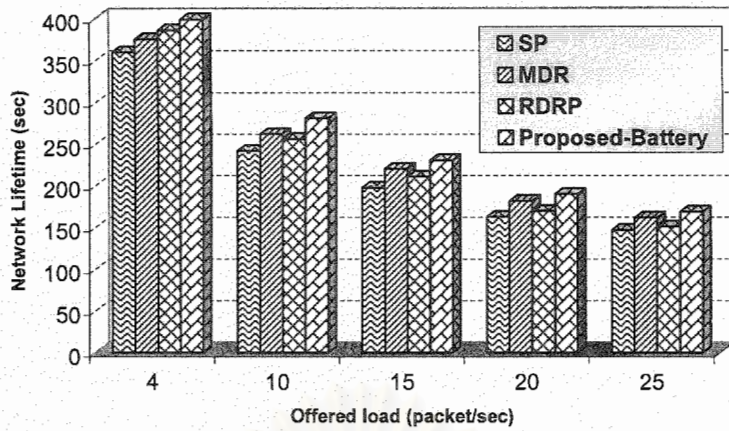
เส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งของแพ็กเก็ตต่ำและเป็นเส้นทางที่สามารถใช้งานได้นานกว่าโพรโทคอลแบบ SP และ MDR แต่ขณะที่โพรโทคอลแบบ RDRP นั้นจะมีค่าการประวิงเวลาจากปลายถึงปลายมากที่สุด โดยเวลาที่เพิ่มขึ้นมาเนื่องจากการประวิงเวลาแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางที่ยังคงอยู่ในระดับที่สูงคือ 0.05 วินาทีถึงแม้ว่าโหนดจะมีระดับความจุของแบตเตอรี่สูงสุด



รูปที่ 4.8 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ต ข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบค่านิ่งถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)



รูปที่ 4.9 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ต ข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบค่านิ่งถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)



รูปที่ 4.10 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่)

รูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.10 แสดงถึงประสิทธิภาพทางด้านพลังงานของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางโดยแนวโน้มของค่าทั้ง 4 ค่าแยลงเมื่อปริมาณโหลดในโครงข่ายมีค่าเพิ่มขึ้น

โพรโทคอลที่นำเสนอ (Proposed-Battery) มีประสิทธิภาพในแง่ของการใช้พลังงาน หรือกล่าวได้ว่าพลังงานที่โครงข่ายสูญเสียไปนั้นมีความคุ้มค่ามากกว่าโพรโทคอลแบบ MDR, RDRP และ SP ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.8 นั้นก็เป็นไปตามที่ได้คาดหวังไว้ โดยสาเหตุที่โพรโทคอลที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าเนื่องจากเส้นทางที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางเป็นเส้นทางที่ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่สูงและปริมาณโหลดอยู่ในระดับไม่สูง ซึ่งก็จะทำให้พลังงานที่จะสูญเสียเพื่อค้นหาเส้นทางใหม่มีค่าลดลง และโครงข่ายมีอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลสำเร็จเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอ (Proposed-Battery) ไม่ได้เลือกเส้นทางจากเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำ เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพในด้านการใช้พลังงานจะมีค่าต่ำกว่า โพรโทคอลที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดที่นำเสนอ (Proposed-Energy)

จากรูปที่ 4.9 เป็นการยืนยันสิ่งที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยการแสดงว่าโหนดในโครงข่ายที่ใช้โพรโทคอลที่นำเสนอมีการใช้พลังงานอย่างเสมอภาคนั่นคือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนดมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลทั้งสามแบบในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล โดยจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 9.61 ขณะที่โครงข่ายมีปริมาณโหลดสูงสุด (25 แพ็กเก็ตต่อวินาที) เมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ SP และต่ำกว่าร้อยละ 4.36 เมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ MDR

เส้นทางที่ได้จากการตัดสินใจของโพรโทคอลที่นำมาใช้จะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้ของโครงข่ายเป็นอย่างมาก ซึ่งจากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลการหาเส้นทางที่พิจารณาถึงระดับความจุของแบตเตอรี่ของโหนดในโครงข่ายสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายให้สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่ของโหนดเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอที่จะช่วยยืดอายุของโครงข่ายได้สูงมากนัก เพราะฉะนั้นโพรโทคอลแบบ MDR และ โพรโทคอลที่นำเสนอ (Proposed-Battery) นอกจากจะพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่แล้วยังคงพิจารณาถึงปริมาณโหลดที่อยู่ในแต่ละโหนด

ซึ่งจากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery มีอายุการใช้งานของโครงข่ายสูงที่สุดในทุก ๆ อัตราการการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดต้นทาง เพราะโพรโทคอลที่นำเสนอมีการใช้พลังงานงานอย่างมีประสิทธิภาพจากรูปที่ 4.8 อีกทั้งโหนดมีการใช้พลังงานอย่างเสมอภาคดังแสดงในรูปที่ 4.9 ดีกว่าโพรโทคอลการแบบ MDR โดยจากรูปที่ 4.10 โพรโทคอลที่นำเสนอสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ 21.84 วินาทีคือ ร้อยละ 14.86 ขณะที่ โพรโทคอลแบบ MDR สามารถยืดอายุได้เพียงร้อยละ 10.04 เมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่ไม่คำนึงถึงระดับความจุของแบตเตอรี่ (SP) ขณะที่ปริมาณไหลคในโครงข่ายมีค่าสูงสุด

จากการทดสอบนี้เราสามารถสรุปได้ว่า โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายสูงที่สุดที่นำเสนอ (Proposed-Battery) ไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าโพรโทคอลทั้งสามแบบทั้งในเชิงของพลังงานเช่น อายุการใช้งานของโครงข่ายและพลังงานที่ใช้งาน แต่ยังมีประสิทธิภาพในเชิงของคุณภาพในการให้บริการซึ่งแสดงได้จากการค่า อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จที่เพิ่มขึ้นและการประวิงเวลาของแพ็กเก็ตที่ไม่สูงมากนัก โดยจุดเด่นของโพรโทคอลแบบ Proposed-Battery คือ การรักษาสมดุลของการใช้พลังงานของแต่ละโหนดในโครงข่ายเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่าย ผลที่ได้ทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนดและอายุการใช้งานของโครงข่ายให้ค่าที่ดีกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy

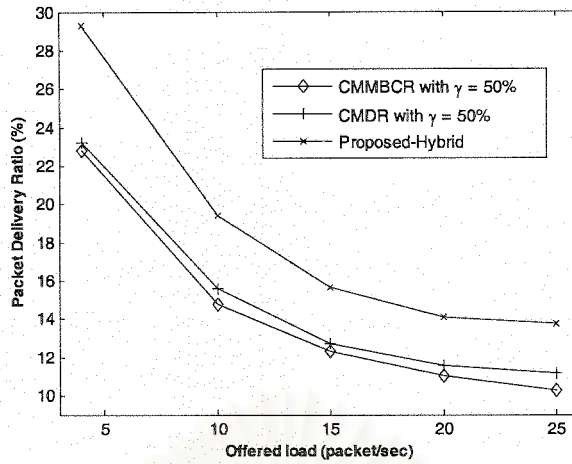
#### 4.2.3 โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม (Hybrid-Aware Routing Protocols)

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอและจัดอยู่ในโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางประเภทนี้คือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Minimum Energy Consumption and Maximum Battery Lifetime Routing Protocol) หรือเรียกกว่าเป็นโพรโทคอลแบบผสมซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ Proposed-Hybrid แทนโพรโทคอลที่นำเสนอ ในส่วนของโพรโทคอลจะนำเปรียบเทียบกับดังนี้ แบบแรกคือ โพรโทคอลแบบ Conditional Max-Min Battery Capacity Routing with  $\gamma=50\%$  [13] แบบที่สองคือ โพรโทคอลแบบ Condition Minimum Drain Rate with  $\gamma=50\%$  [12]

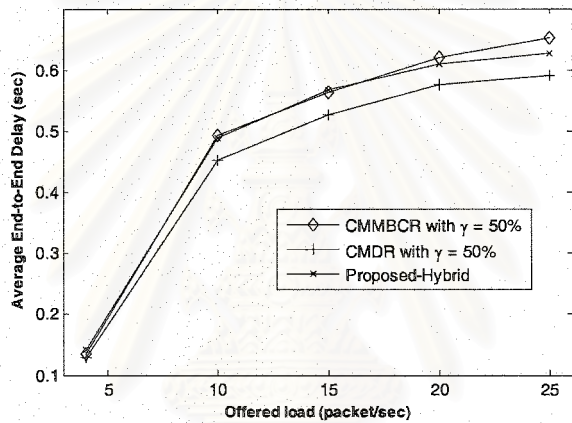
โดยในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยน ( $\gamma$ ) มีค่าเท่ากับร้อยละ 50 ของความจุแบตเตอรี่สูงสุด เพื่อกำหนดให้โพรโทคอลแบบ CMMBCR ได้ใช้โพรโทคอลแบบ MTPR และ MMBCR และโพรโทคอลแบบ CMDR ได้เลือกใช้โพรโทคอลแบบ MTPR และ MDR อย่างเท่าเทียมกัน โดยจะไม่ใช่โพรโทคอลแบบใดแบบหนึ่งมากเกินไป

##### 4.2.3.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล





รูปที่ 4.11 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม)

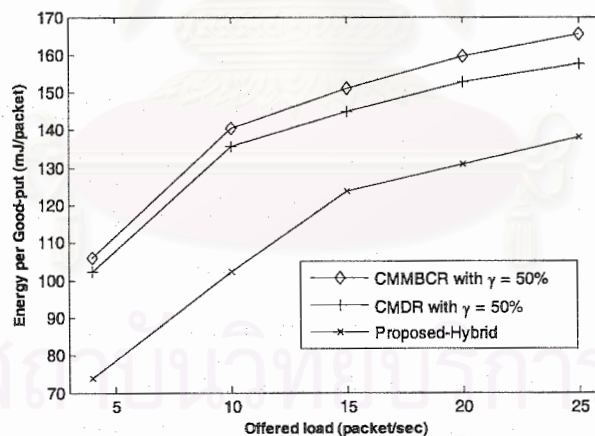


รูปที่ 4.12 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยจากปลายถึงปลายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม)

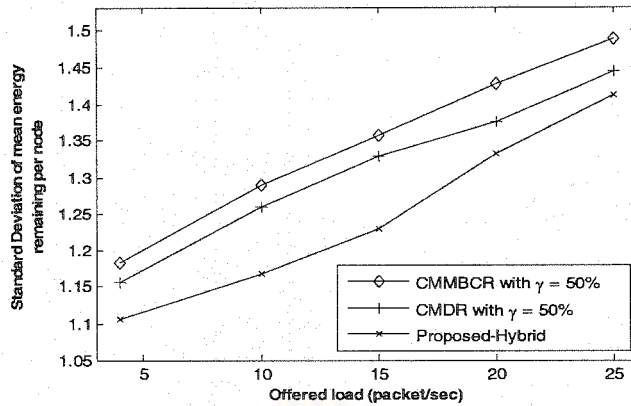
รูปที่ 4.11 แสดงค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลของโพรโทคอลทั้งสามแบบ จากรูปโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) จะให้ค่าสูงสุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เนื่องจากเส้นทางได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางเป็นเส้นทางที่พิจารณาถึงอายุการใช้งานของโหนด ปริมาณทราฟฟิกโหลดของโหนด อีกทั้งความคับคั่งเนื่องจากจำนวนโหนดข้างเคียง โดยเส้นทางที่ได้จะเป็นเส้นทางมีอายุการใช้งานอยู่ในระดับที่สูงเพราะผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่สูงและความคับคั่งที่เกิดจากปริมาณโหลดและจำนวนโหนดข้างเคียงอยู่ในระดับที่ต่ำ จากเหตุผลดังกล่าวทำให้เส้นทางที่ได้สามารถส่งแพ็กเก็ตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจากรูปที่แสดงค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จที่ได้จะมากกว่าโพรโทคอลแบบ CMMBCR ร้อยละ 33.703 ณ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 25 แพ็กเก็ตต่อวินาที แต่ขณะที่โพรโทคอลแบบ CMDR ให้ค่ามากกว่าโพรโทคอลแบบ CMMBCR เพียงร้อยละ 8.37 โดยสาเหตุที่โพรโทคอลแบบ CMDR มีค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จน้อยกว่าโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอเพราะว่า ในช่วงแรกที่โหนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบตเตอรี่ที่สูงโพรโทคอลแบบ CMDR จะใช้

โพรโทคอลแบบ MTPR (ผลที่ได้เหมือนกับโพรโทคอลแบบ SP เพราะกำหนดให้โหนดมีกำลังส่งคงที่) อย่างไรก็ตามโพรโทคอลแบบ CMDR ยังคงให้ประสิทธิภาพดีกว่า โพรโทคอลแบบ CMMBCR เนื่องจากในช่วงที่โหนดในโครงข่ายมีระดับความจุแบตเตอรี่ต่ำ ๆ โพรโทคอลแบบ CMDR จะเลือกใช้โพรโทคอลแบบ MDR ซึ่งได้พิจารณาถึงปริมาณทราฟฟิกหรืออัตราการใช้พลังงานของโหนด และระดับความจุแบตเตอรี่ในการพิจารณาเส้นทาง ขณะที่โพรโทคอลแบบ MMBCR จะพิจารณาเฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ซึ่งเส้นทางที่ได้จากโพรโทคอลแบบ CMDR จะมีคุณภาพดีกว่า โพรโทคอลแบบ CMMBCR

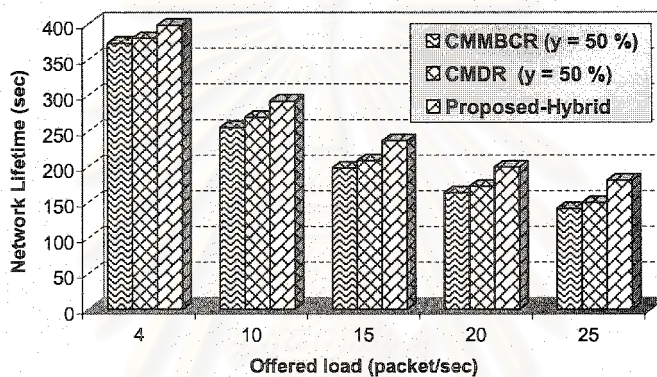
เนื่องจากโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอได้กำหนดให้ทุกโหนดยกเว้นโหนดต้นทางและปลายทางจะต้องทำกระบวนการประวิงเวลา และโหนดปลายทางจะต้องรอเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งภายหลังจากได้รับแพ็กเก็ตร้องขอเส้นทางแพ็กเก็ตแรก ก่อนที่จะตัดสินใจเลือกเส้นทาง ทำให้ โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอนี้มีการประวิงเวลาจากปลายถึงปลายเพิ่มขึ้น แต่จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าค่าการประวิงเวลาที่เพิ่มขึ้นมามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMDR ที่มีค่าประวิงเวลาต่ำที่สุด เนื่องจากเส้นทางที่ได้จากกระบวนการค้นหาเส้นทางมีความน่าเชื่อถือในแง่ของอายุการใช้งาน และเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งในระดับที่ต่ำกว่า โพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR



รูปที่ 4.13 พลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม)



รูปที่ 4.14 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนดเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ต  
ข้อมูล (กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม)



รูปที่ 4.15 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล  
(กรณีโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม)

เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนด และค่าอายุการใช้งานของโครงข่าย ของโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) กับโพรโทคอลแบบ CMMBCR และ CMDR ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 ตามลำดับ พบว่าในทุกอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอจะให้ค่าต่าง ๆ ดังกล่าวดีกว่าโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR นั้นหมายความว่า

- โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) มีประสิทธิภาพทางด้านการใช้พลังงานมากกว่าโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR เพราะว่าโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอให้ค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR ซึ่งแสดงว่าพลังงานที่โครงข่ายสูญเสียไปนั้นมีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่โหนดปลายทางได้รับสำเร็จของโครงข่าย

- โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ดีกว่าโพรโทคอลแบบ CMDR และ CMMBCR ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เพราะว่าโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอมีการใช้





จากการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า การนำข้อมูลทั้งในด้านของการใช้พลังงาน และอายุการใช้งานของโหนดมาใช้เป็นเงื่อนไขในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดอย่างไร้โทคอลแบบผสมที่นำเสนอสามารถช่วยทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาว่าเมื่อใดที่โครงข่ายควรจะใช้เงื่อนไขใดระหว่าง “การใช้พลังงานต่ำที่สุด (Energy aware routing protocol)” หรือ “ทำให้โหนดในโครงข่ายใช้พลังงานอย่างเสมอภาค (Battery aware routing protocol)” เป็นสิ่งที่สำคัญเพราะจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่าย โดยโพรโทคอลแบบ CMMBCR และ CMDR ได้กำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนขึ้นมาเพื่อใช้ตัดสินใจว่าเมื่อใดที่ใช้โพรโทคอลที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดและเมื่อใดควรจะทำให้โหนดในโครงข่ายใช้พลังงานอย่างเสมอภาค ซึ่งในช่วงเวลาใด ๆ จะเลือกใช้เพียงโพรโทคอลใดโพรโทคอลหนึ่งเท่านั้น แต่สำหรับโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอจะไม่มีกำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยน แต่จะทำให้โพรโทคอลนั้นสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ทั้งสองประการ ณ ขณะเวลาเดียวกัน ซึ่งจากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.15 ได้แสดงให้เห็นว่า โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) จะให้ผลที่ดีกว่าทั้งในด้านของการใช้พลังงานซึ่งในรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 และในด้านคุณภาพการให้บริการทั่ว ๆ ไปดังแสดงในรูป 4.11 ถึงรูปที่ 4.12

#### 4.2.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามประเภท

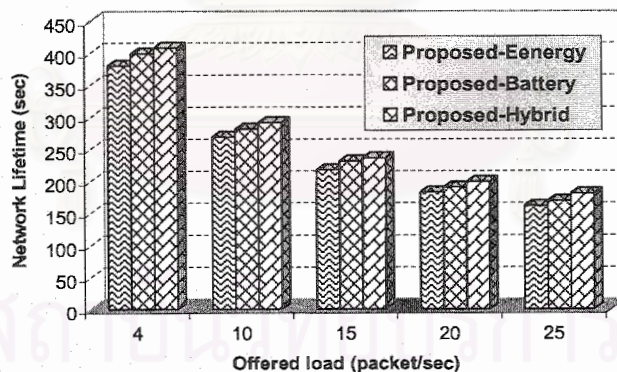
การทดสอบในส่วนนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพเฉพาะโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ทั้งสามโพรโทคอลคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Minimum Energy Consumption Routing Protocol) แบบที่สองคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายสูงสุด (Maximum Battery Lifetime Routing Protocols) แบบสุดท้ายคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุดและยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายสูงสุดหรือเรียกว่าเป็นโพรโทคอลแบบผสม (Minimum Energy Consumption and Maximum Battery Lifetime Routing Protocol) เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามที่ได้ออกแบบไว้ มีจุดประสงค์หลักเหมือนกันนั่นคือ “ยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด” แต่จะมีความแตกต่างกันด้วยวิธีการที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่นำมาใช้งาน

จากรูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายสำหรับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอในงานวิจัยทั้งสามประเภท เมื่อทำการหาค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จดังกล่าว ในช่วงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 4 จนถึง 25 แพ็กเก็ตต่อวินาทีจะพบว่า

■ โพรโทคอลที่มีอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุดคือ โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) รองลงมาคือโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery และสุดท้ายคือ โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy เนื่องจากโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอเกิดจากการรวมเอาข้อดีของทั้งโพรโทคอลแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด ที่เลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด และโพรโทคอลแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด ซึ่งเลือกเส้นทางที่ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานในระดับที่สูง ซึ่งการผสมปัจจัยทั้งสองประการเข้าด้วยกันทำให้เส้นทางที่ได้เป็นเส้นทางที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้าน

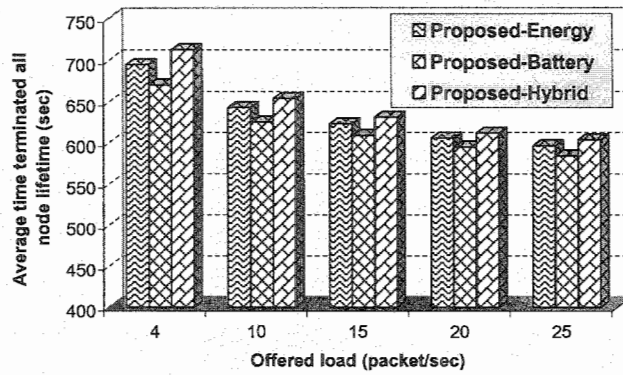
พลังงานและการส่งแพ็กเก็ตไปยังโหนดปลายทางมากกว่าการพิจารณาเฉพาะปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงอย่างเดียว โดยสามารถยืดอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นได้ถึงร้อยละ 12.15 เมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ณ อัตราการส่งแพ็กเก็ตสูงสุด และเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.76 เมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery

■ เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery พยายามกระจายทราฟฟิกให้ผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่สูง แต่ขณะที่โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy เลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุดโดยไม่ได้พิจารณาว่าเส้นทางที่เลือกนั้นผ่านโหนดที่มีอายุการใช้งานที่สูงหรือไม่ จึงทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery สามารถทำให้โหนดในโครงข่ายใช้พลังงานอย่างเหมาะสมมากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ซึ่งแสดงได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของพลังงานที่เหลืออยู่ต่อโหนดจากรูปที่ 4.9 และ 4.4 จากเหตุผลตรงนี้ทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery มีอายุการใช้งานของโครงข่ายสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy โดยเมื่อเทียบกับโพรโทคอลที่ไม่พิจารณาพลังงานอย่างเช่น โพรโทคอลแบบ SP จะพบว่า โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery สามารถยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายได้ร้อยละ 14.86 (21.84 วินาที) ส่วนโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy สามารถยืดอายุได้เพียงร้อยละ 9.34 (13.73 วินาที) ขณะที่โครงข่ายมีปริมาณโหลดสูงสุด



รูปที่ 4.16 อายุการใช้งานของโครงข่ายเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล)





รูปที่ 4.17 อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดเมื่อเปลี่ยนแปลง อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล)

จากรูปที่ 4.17 แสดงการพิจารณาค่าอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัด ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอายุการใช้งานโดยเฉลี่ยของทุก ๆ โหนดในโครงข่ายจนหมดระยะเวลาการทดสอบ ซึ่งผลของการทดสอบของโพรโทคอลที่นำเสนอในงานวิจัยทั้งสามประเภทด้วยค่านี้แสดงดังรูปที่ 4.17

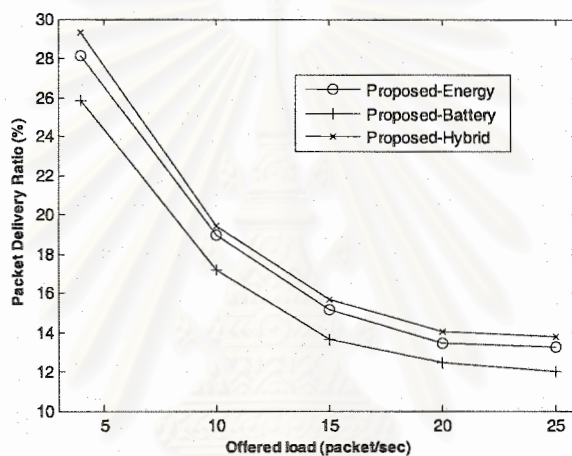
โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) ทำให้อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy และสุดท้ายคือ Proposed-Battery โดยจากรูปเมื่อเทียบเปรียบค่าที่ได้จากทั้งสามโพรโทคอลกับโพรโทคอลแบบ SP ณ ที่อัตรา

- การส่งแพ็กเก็ตข้อมูลเท่ากับ 25 แพ็กเก็ตต่อวินาทีจะได้ว่า โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ Proposed-Hybrid มีค่ามากกว่าร้อยละ 11.11 (60.37 วินาที) ส่วนโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy มีค่ามากกว่าร้อยละ 9.74 (52.92 วินาที) และโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery มีค่ามากกว่าร้อยละ 7.54 (40.97 วินาที)

- สาเหตุที่ทำให้โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) ให้ค่าอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดดีที่สุดสุดเหมือนกับที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ในกรณีของโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ที่ให้ค่าดังกล่าวสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ทั้ง ๆ ที่โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ให้ค่าอายุการใช้งานของโครงข่ายจากรูปที่ 4.16 ดีกว่านั้น เนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ได้พยายามลดการใช้พลังงานของโหนดอื่น ๆ ในโครงข่ายด้วย (จากที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.2.1.1) โดยการเลือกเส้นทางที่มีจำนวนโหนดข้างเคียงที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารของโหนดในเส้นทางอยู่ต่ำ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าพลังงานที่ใช้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ได้รับสำเร็จมีค่าที่ต่ำกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery (จากรูปที่ 4.3 และ 4.8) แต่ขณะที่โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ไม่ได้พิจารณาในส่วนนี้

จากผลการทดสอบของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้งสามแบบสามารถที่จะสรุปได้ว่า โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy สามารถทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมี

ประสิทธิภาพมากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery (โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.8) แต่ขณะที่โหนดในโครงข่ายสำหรับโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery มีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมมากกว่า (โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากรูปที่ 4.4 และ 4.9) จึงทำให้โครงข่ายมีอายุการใช้งานนานกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy และเนื่องจากทั้งพลังงานที่โหนดจะต้องสูญเสียและอายุการใช้งานของโหนดต่างก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพในด้านพลังงานมากขึ้น จึงทำให้โพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) ซึ่งนำเอาข้อดีจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งสองแบบที่กล่าวไว้ข้างต้นมีประสิทธิภาพในด้านพลังงานสูงที่สุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล



รูปที่ 4.18 อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล (กรณีเปรียบเทียบเฉพาะโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งสามโพรโทคอล)

ส่วนในรูปที่ 4.18 แสดงค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จซึ่งจะสะท้อนถึงวิสัยสมรรถ (Throughput) ของโครงข่าย โดยถ้าเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางมีคุณภาพดีนั่นคือเป็นเส้นทางที่มีโหลดอยู่ในระดับที่ต่ำและมีความน่าเชื่อถือสูง (เป็นเส้นทางที่สามารถใช้งานได้นาน) ก็จะทำให้คุณภาพการให้บริการของโครงข่ายมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากรูปแสดงว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสมให้ค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จสูงสุดในทุก ๆ อัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล เนื่องจากเส้นทางที่ได้จากการตัดสินใจของ โพรโทคอลการเส้นทางแบบผสมมีลักษณะดังนี้

- เป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งในระดับที่ต่ำ โดยความคับคั่งที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้เป็นสองส่วนคือ ความคับคั่งที่เกิดจากปริมาณโหลดที่อยู่ในบัฟเฟอร์ของโหนดและความคับคั่งที่เกิดจากจำนวนโหนดข้างเคียง (โอกาสที่แพ็กเก็ตเกิดการชนกันสูงเมื่อมีจำนวนโหนดข้างเคียงสูง) เนื่องจากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางจะเลือกเส้นทางที่โหนดมีอายุการใช้งานที่สูง ซึ่งในการคำนวณค่าอายุการใช้งานในสมการที่ (3.14) ได้พิจารณาถึงปริมาณทราฟฟิกโหลดที่อยู่ในบัฟเฟอร์เข้าไปด้วย เพราะฉะนั้นถ้าโหนดมีปริมาณโหลดอยู่มากก็จะทำให้อายุการใช้งานของโหนด (ค่า BL ในสมการที่ (3.14)) มีค่าที่ต่ำ นอกจากนั้นยังเป็นเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายเสียพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งในการคำนวณค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทางดังสมการที่ (3.12) ได้

พิจารณาถึงจำนวนโนดข้างเคียงในการคำนวณด้วย โดยถ้าโนดที่อยู่ในเส้นทางมีจำนวนโนดข้างเคียงที่สูงก็จะส่งผลให้ค่าต้นทุน พลังงานมีค่าที่สูง ซึ่งก็แสดงว่าเส้นทางดังกล่าวทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานในระดับที่สูงด้วยเช่นกัน เพราะฉะนั้นแล้วเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำที่สุดก็จะหมายถึงเป็นเส้นทางที่มีความคับคั่งเนื่องจากจำนวนโนดข้างเคียงต่ำด้วยเช่นกัน

■ เป็นเส้นทางที่มีความน่าเชื่อถือในระดับที่สูง เพราะเนื่องจากการคำนวณค่าพลังงานของข่ายเชื่อมโยงระหว่างคุโนดใด ๆ ในเส้นทางสำหรับโพรโทคอลแบบผสมที่นำเสนอ (Proposed-Hybrid) และโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ได้พิจารณาถึงคุณภาพของช่องสัญญาณระหว่างโนด ซึ่งแสดง ในสมการที่ (3.11) จากสมการจะเห็นได้ว่าถ้าคุณภาพของช่องสัญญาณไม่ดีก็จะส่งผลให้พลังงานของโนดจะต้องสูญเสียทั้งโนดที่สูง รับและโนดที่ไต่กันต่างก็จะยิ่งเสียพลังงานเพิ่มมากขึ้น เพราะฉะนั้นการเลือกเส้นทางที่ใช้พลังงานที่ต่ำก็จะแสดงว่าเส้นทางดังกล่าวเป็นเส้นทางที่มีคุณภาพของช่องสัญญาณระหว่างโนดในเส้นทางที่ดี

■ เป็นเส้นทางที่ผ่านโนดที่มีอายุการใช้งานที่สูง (สามารถทำงานร่วมกับโนดอื่น ๆ ได้นาน) เพราะฉะนั้นทำให้โอกาสที่เส้นทางจะเกิดความเสียหายเนื่องจากโนดในเส้นทางหมดอายุการใช้งานก็จะต่ำลง จึงทำให้เส้นทางที่ได้สามารถใช้งานได้นานยิ่งขึ้น

■ สำหรับกรณีของโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Battery นั้นเนื่องจากโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy มีอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดสูงกว่า ก็เปรียบเสมือนกับการเพิ่มโอกาสให้โนดสามารถทำงานร่วมกันได้มากขึ้น จึงส่งผลทำให้อัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จมีค่ามากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery

จากผลการทดสอบของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้ง 3 แบบที่แสดงในรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18 สามารถสรุปได้ว่า

■ โพรโทคอลที่นำเสนอที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ทำให้โครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery จึงส่งผลให้ทำให้อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัด (Average time terminated node lifetime) มีค่าสูงขึ้นไปตามไปด้วย แต่เนื่องจากไม่ได้พิจารณาถึงอายุการใช้งานของโนดจึงทำให้อายุการใช้งานของโครงข่าย (Network lifetime) ที่ได้มีค่าต่ำกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery

■ โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ช่วยทำให้โนดในโครงข่ายมีการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม อีกทั้งการเลือกเส้นทางยังพิจารณาถึงอายุการใช้งานของโนดจึงส่งผลให้อายุการใช้งานของโครงข่ายมีค่าสูงกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy แต่เนื่องจาก โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ไม่พิจารณาถึงพลังงานที่โครงข่ายต้องสูญเสียในการเลือกเส้นทางทำให้เส้นทางที่ได้ อาจจะทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานสูงจึงทำให้โนดอื่น ๆ ต้องสูญเสียพลังงานมากตามไปด้วย ตรงจุดนี้ทำให้อายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโนดในโครงข่ายในระยะเวลาทดสอบที่จำกัดของโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery มีค่าต่ำกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy



■ โพรโทคอลที่นำเสนอแบบผสม (Proposed-Hybrid) ได้พิจารณาข้อดีของโพรโทคอลที่นำเสนอทั้งแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Battery ที่กล่าวข้างต้นมาพิจารณารวมกันในกระบวนการค้นหาเส้นทางจึงทำให้โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Hybrid มีประสิทธิภาพมากกว่าโพรโทคอลทั้งสองแบบไม่เฉพาะในด้านของพลังงาน แต่ยังมีประสิทธิภาพในด้านคุณภาพการให้บริการที่ดีกว่า

## 5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางบนพื้นฐานประสิทธิภาพของพลังงานสำหรับโครงข่ายแอดฮอก โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้โครงข่ายใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานนานที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางขึ้นมา 3 โพรโทคอล โพรโทคอลแรกที่นำเสนอคือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานต่ำที่สุด (Proposed-Energy (โดยเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งเป็นวิธีที่นำเอาพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการส่ง การรับ และการได้ยินจากแบบจำลองการใช้พลังงานของ โนด รวมทั้งผลกระทบของการใช้พลังงานเนื่องจากคุณภาพของช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาใช้ในการกำหนดค่าต้นทุนพลังงานของเส้นทาง ซึ่งแตกต่างจากโพรโทคอลที่เคยมีผู้เสนอมาก่อนหน้านี้ตรงที่วิธีการกำหนดค่าต้นทุนพลังงานจากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า

■ โครงข่ายมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมากขึ้น ซึ่งก็จะส่งผลทำให้เพิ่มอายุการใช้งานเฉลี่ยของทุกโหนดในโครงข่ายเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงพลังงานหรือกำลังส่งแบบ MTPR และ RA นอกจากนั้นยังทำให้อายุการใช้งานของโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันแต่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของ โหนด เพราะการพิจารณาเส้นทางไม่ได้คำนึงถึงอายุการใช้งานของโหนดในโครงข่าย

แบบที่สองเป็นโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุด (Proposed-Battery (ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อรักษาสมดุลในการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ของโหนดในโครงข่าย โดยการพยายามเลือกเส้นทางที่ประกอบด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานที่อยู่ในระดับสูง ซึ่งวิธีการที่นำเสนอนี้ได้กำหนดวิธีการคำนวณอายุการใช้งานของโหนดขึ้นมาใหม่เพื่อให้มีความแม่นยำในการประมาณแทนที่จะใช้เฉพาะระดับความจุของแบตเตอรี่เหมือนกับโพรโทคอลที่เคยถูกนำเสนอ แต่จะพิจารณาถึงพลังงานที่โหนดจะต้องใช้ในการส่งแพ็กเก็ตที่อยู่ในบัฟเฟอร์ นอกจากนั้นยังรวมถึงพลังงานที่โหนดจะต้องใช้เพื่อรองรับการสื่อสารที่โหนดค้นหาหรือขอมา จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า

■ โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery ให้ประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานนั้นคือ อายุการใช้งานของโครงข่ายและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งคุณภาพการให้บริการที่พิจารณาจากค่าอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จมากกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบคำนึงถึงระดับความจุแบตเตอรี่ของ โหนดแบบ MMBCR, RDRP และ MDR ที่ได้ถูกนำเสนอมาก่อนหน้านี้เพราะว่า การคำนวณค่าอายุการใช้งานของโหนด (Battery Lifetime (มีความแม่นยำมากกว่าทำให้เส้นทางที่ถูกเลือกนั้นเป็นเส้นทางที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า อีกทั้งกระบวนการค้นหาเส้นทางจะช่วยทำให้โหนดโครงข่ายสามารถรักษาสมดุลของ

การใช้พลังงานได้ดีกว่า โพรโทคอลแบบอื่น ๆ และเมื่อเปรียบเทียบโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Proposed-Energy ที่นำเสนอจะพบว่าประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานมีค่าต่ำกว่าโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ถึงแม้ว่า โพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery จะสามารถรักษาสมดุลการใช้พลังงานของโหนดในโครงข่ายได้มากกว่าเนื่องจากเป็นโพรโทคอลที่ไม่ได้พิจารณาถึงพลังงานที่โครงข่ายจะต้องสูญเสีย หรือเป็นเส้นทางที่ไม่ทำให้โครงข่ายเสียพลังงานค่าที่สุด )ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่ำกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบ Proposed-Energy(

โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบสุดท้ายที่นำเสนอในงานวิจัยนี้คือ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสม )Proposed-Hybrid (โดยการนำเอาข้อดีของโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบใช้พลังงานค่าที่สุด และโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบยืดอายุการใช้งานของโครงข่ายมากที่สุดที่นำเสนอข้างต้นมาพิจารณารวมเข้าด้วยกัน เพื่อให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและเพิ่มอายุการใช้งานของโครงข่ายให้ได้นานที่สุด โดยเลือกเส้นทางที่ทำให้โครงข่ายสูญเสียพลังงานค่าที่สุด และขณะเดียวกันก็เป็นเส้นทางที่ประกอบด้วยโหนดที่มีอายุการใช้งานในระดับที่สูง โดยข้อแตกต่างหลักเมื่อเปรียบเทียบกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR และ CMDR นั่นก็คือ โพรโทคอลแบบ Proposed-Hybrid ที่นำเสนอ ไม่มีการกำหนดว่า ณ ช่วงเวลาใดจะต้องใช้โพรโทคอลแบบใดระหว่างโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy หรือ Proposed-Battery เหมือนกับโพรโทคอลแบบ CMMBCR และ CMDR แต่จะใช้ทั้งสองโพรโทคอล ณ ขณะเวลาเดียวกันในกระบวนการค้นหาเส้นทาง ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า

■ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางแบบผสมที่นำเสนอจะให้ประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานนั้นคือ อายุการใช้งานของโครงข่ายและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จสูงกว่า โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางทั้งแบบ CMMBCR และ CMDR

จากโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้ง 3 โพรโทคอลที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปประสิทธิภาพทั้งในแง่ของพลังงานและคุณภาพการให้บริการของโพรโทคอลทั้งสามประเภทโดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ที่วัดประสิทธิภาพที่แตกต่างกันดังตารางที่ 5.1

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่า โพรโทคอลการแบบ Proposed-Hybrid ที่นำเสนอจะให้ประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานนั้นคือ อายุการใช้งานของโครงข่ายและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งอัตราการส่งแพ็กเก็ตสำเร็จมากกว่าโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้งแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Battery แต่เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะ โพรโทคอลแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Battery แล้วจะพบว่า โพรโทคอลแบบ Proposed-Energy จะมีประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานมากกว่า แต่ขณะที่โพรโทคอลแบบ Proposed-Battery จะรักษาสมดุลการใช้พลังงานของโหนดได้ดีกว่าโพรโทคอลแบบ Proposed-Energy เพราะฉะนั้นแล้วการเลือกโพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางไปใช้งานเพื่อทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดนั้นควรจะคำนึงถึงสถานการณ์หรือเงื่อนไขของโครงข่ายที่จะนำไปใช้งาน โดยโพรโทคอลแบบ Proposed-Energy และ Proposed-Battery จะเหมาะสมในการนำไปใช้งานกับโครงข่ายที่มีลักษณะดังนี้

■ โพรโทคอลการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy จะเหมาะสมสำหรับโครงข่ายที่มีจำนวนโหนดหรือความหนาแน่นของโหนดในโครงข่ายที่สูง อย่างเช่น โครงข่ายเซ็นเซอร์ )Sensor

Network( เนื่องจากโพรโทคอลแบบนี้พิจารณาถึงจำนวน โนครอบข้างเพื่อลดปริมาณพลังงานที่โครงข่าย จะต้องสูญเสีย แต่จะไม่เหมาะสมกับโครงข่ายที่ปริมาณ โหลดที่ใช้สื่อสารมีปริมาณมาก ๆ )ทั้งอัตราการส่ง แพ็กเก็ตระหว่าง โหนดต้นทางกับ โหนดปลายทาง หรือจำนวนการเชื่อมต่อของ โหนดในโครงข่าย ( เพราะโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Energy ไม่ได้พิจารณาถึงปริมาณ โหลดที่ โหนดกำลังรับภาระอยู่ ณ ขณะเวลานั้น

■ โพรโทคอลการจัดการสรรเส้นทางที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery จะเหมาะสมสำหรับโครงข่ายที่มีปริมาณ โหลดที่ใช้สื่อสารในโครงข่ายอยู่ในระดับสูง เพราะโพรโทคอลที่นำเสนอแบบ Proposed-Battery จะพิจารณาถึงปริมาณ โหลดที่ โหนดกำลังรับภาระอยู่ ณ ขณะเวลานั้น แต่จะไม่เหมาะสมกับกรณีที่โครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงทอพอโลยีบ่อยครั้ง )เนื่องจากการเคลื่อนที่ของ โหนด (เพราะว่าการเลือกเส้นทางของ โหนดไม่ได้พิจารณาถึงคุณภาพของช่องสัญญาณกับ โหนดถัดไปที่อยู่ในเส้นทางเพราะฉะนั้นเส้นทางที่ได้ อาจจะเป็นเส้นทางที่มีระยะห่างระหว่าง โหนดสอง โหนดที่ยาว ทำให้โอกาสที่เส้นทางจะเกิดความเสียหายเนื่องจากการเคลื่อนที่ของ โหนดก็สูง

ตารางที่ 5.1 สรุปเปรียบเทียบผลจากการทดสอบของโพรโทคอลการจัดการสรรเส้นทางที่นำเสนอทั้ง 3 โพรโทคอล โดยใช้พารามิเตอร์ที่ชี้วัดประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน

	ผลที่ได้จากการทดสอบของโพรโทคอลการจัดการสรรเส้นทางทั้ง 3 แบบ
Packet Delivery Ratio	Proposed-Battery < Proposed-Energy < Proposed-Hybrid
Energy per Good-put	Proposed-Battery < Proposed-Energy < Proposed-Hybrid
Standard deviation of mean energy remaining per node	Proposed-Energy < Proposed-Hybrid < Proposed-Battery
Network Lifetime	Proposed-Energy < Proposed-Battery < Proposed-Hybrid
Average all node lifetime	Proposed-Battery < Proposed-Energy < Proposed-Hybrid

#### 6. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

สำหรับงานที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไป

- (1) การตัดสินใจเลือกเส้นทางควรจะมีการเพิ่มการสูญเสียพลังงานในชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง )Medium access control layer( เพื่อให้เส้นทางที่ได้มีประสิทธิภาพทั้งด้านพลังงานและคุณภาพการให้บริการมากยิ่งขึ้น
- (2) แบบจำลองการใช้พลังงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองที่ไม่คำนึงพลังงานที่สูญเสียขณะที่ โหนดอยู่ในสถานะหลับ )Sleep mode (สถานะว่าง )Idle mode (และพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสถานะ ดังนั้นหากพิจารณาพลังงานในส่วนนี้ก็จะทำให้ระบบที่ใช้มีความเป็นจริงมากขึ้น



- (3) โหนดที่ใช้ในการทดสอบควรจะมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนกำลังส่ง เพื่อลดการใช้พลังงานที่สูญเสียโดยไม่จำเป็นและสามารถลดปัญหาในเรื่องสัญญาณรบกวน ซึ่งก็จะทำให้แบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลของโครงข่ายเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ โหนดควรจะรู้ตำแหน่งของโหนดในโครงข่ายเพื่อลดพลังงานที่ใช้ในการจัดสรรเส้นทาง เนื่องจากการส่งข้อมูลของโหนดได้ทราบทิศทางในการส่งที่แน่นอน



## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 7. รายการอ้างอิง

1. E. M. Royer and C. -K. Toh. A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks. IEEE Personal Communication Magazine (April 1999): 44-50.
2. C. E. Jones, K. M. Sivalingam, P. Agrawal, and J. Chen. A survey of energy efficient network protocols for wireless networks. Wireless Networks 7, 4 (July 2001): 343-358.
3. J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y. C. Hu, and J. Jetcheva. A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols. Proceedings of the 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (October 1998): 85-97.
4. C. E. Perkins, E. M. Royer and S. R. Das. Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV) routing. IETF internet Draft (work in progress) (November 2002).
5. D.B. Johnson, D.A. Maltz. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. Mobile Computing, (ed. T. Imielinski and H. Korth), Kluwer Academic Publishers (1996).
6. C. B. Margi and K. Obraczka. Instrument Network Simulators for Evaluating Energy Consumption in Power-Aware Ad-Hoc Network Protocols. The IEEE Computer Society's 12<sup>th</sup> Annual International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (October 2004): 337-346.
7. K. Scott and N. Bambos. Routing and channel assignment for low power transmission in PCS. IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Universal Personal Communications, 2 (October 1996): 498-502.
8. S. Singh, M. Woo, and C. S. Raghavendra. Power-Aware Routing in Mobile ad hoc Networks. International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'98) (October 1998): 181-190.
9. S. Banerjee and A. Misra. Minimum energy paths for reliable communication in multi-hop wireless networks. International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (June 2002): 146-156.
10. W. Cho and S.L. Kim. A fully distributed routing algorithm for maximizing lifetime of a wireless ad hoc network. IEEE 4<sup>th</sup> International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network (September 2003): 670-674.
11. W. Yu and J. Lee. DSR-based energy-aware routing protocols in Ad-Hoc networks. International Conference on Wireless Network (June 2002).
12. D. Kim, J.J. Garcia-Luna-Aceves, K. Obraczka, J-C. Cano and P. Manzoni. Routing Mechanisms for Mobile Ad Hoc Networks based on the Energy Drain Rate. IEEE

- Transactions on Mobile Computing 2, 2 (April-June 2003): 161-173.
13. C. -K. Toh. Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks. IEEE Communications Magazine 39 (June 2001): 138-147.
  14. "NS2 Network Simulator" Available form: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
  15. T. Camp, J. Boleng, and V. Davies. A Survey of Mobility Model for Ad Hoc Network Research. Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications, (2002): 483-502.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย