

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

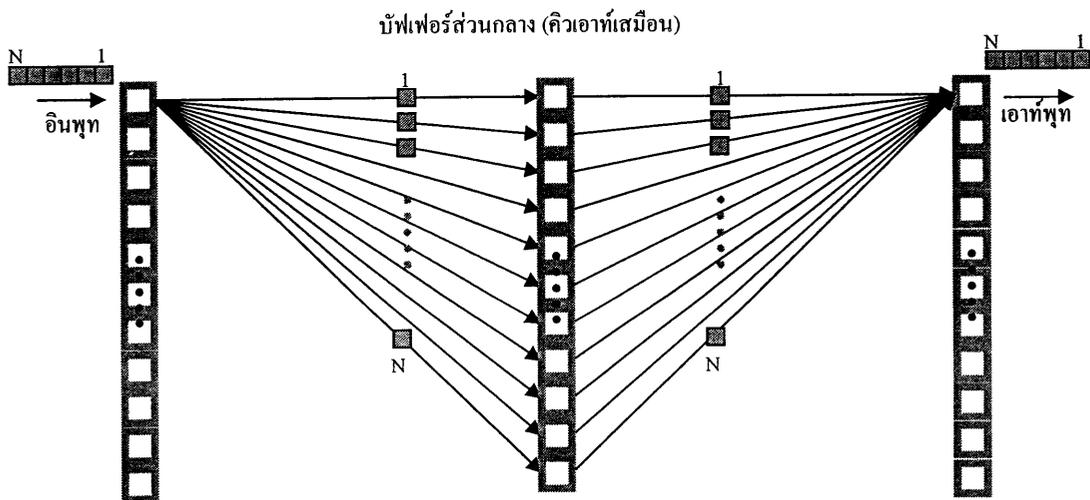
ในการวิจัยครั้งนี้ ได้พัฒนาขั้นตอนวิธีเพื่อแก้ปัญหาคำสั่งการจราจรที่แออัดของแพ็คเกจในเราเตอร์แบบวงแหวนสมมูลโดยอาศัยหลักการป้องกันการจราจรที่แออัดใหม่ของแพ็คเกจตลอดเส้นทางภายในเราเตอร์ ขั้นตอนวิธีนี้เรียกว่า Adaptation-Size Frames-Round Robin with 3 Dimensional Queues (ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ) ซึ่งพัฒนามาจากขั้นตอนวิธี FFF ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์ (analysis) ขั้นตอนวิธีดังกล่าวเพื่อหาประสิทธิภาพในเทอมของค่าหน่วงและค่าประสิทธิผล โดยทำการเปรียบเทียบกับเราเตอร์ในอุดมคติซึ่งได้แก่สวิตช์คิวเอาท์พุทและคิวเอาท์พุทแบบหน่วง เนื่องจากขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ นี้จะแก้ไขปัญหาค่าหน่วงที่เกิดขึ้นกับขั้นตอนวิธี FFF ด้วย ดังนั้นจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างขั้นตอนวิธี FFF และ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ โดยใช้วิธีจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รายละเอียดของวิธีดำเนินการวิจัยมีดังต่อไปนี้

#### 1. หลักการออกแบบขั้นตอนวิธี Adaptation-Size Frames-Round Robin

ASF-RR เป็นขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาคำสั่งการจราจรที่แออัดของแพ็คเกจในเราเตอร์แบบวงแหวนสมมูลและแก้ปัญหาคำสั่งการจราจรที่แออัดของสวิตช์แพบริคทุกสล็อตเวลาในส่วนของคำสั่งการจราจรที่แออัดของสวิตช์แพบริคทุกสล็อตเวลานั้นขั้นตอนวิธีนี้สามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้โครงสร้างแบบเมซจิงที่ซึ่งเป็นเส้นใยแก้วนำแสงแทนการใช้สวิตช์แบบครอสบาร์ ในแง่ของปัญหาคำสั่งการจราจรที่แออัดของแพ็คเกจที่ขั้นตอนวิธีนี้ได้พัฒนามาจากขั้นตอนวิธี FFF ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่สามารถนำมาใช้งานได้จริง รับประกันประสิทธิภาพ 100 % และรับประกันค่าหน่วง แต่พบว่ามีข้อบกพร่องบางประการ ได้แก่ ปัญหาที่มีการสะสมแพ็คเกจที่แออัดถ้าหากว่ามีบางแพ็คเกจสูญหายไปเนื่องจากขั้นตอนวิธี FFF นี้จะยอมให้แพ็คเกจที่ไม่เต็มเฟรมส่งได้นั่นเอง ซึ่งข้อบกพร่องนี้ถ้าหากเกิดขึ้นแล้วจะทำให้การจราจรที่แออัดของแพ็คเกจที่แออัดล้มเหลวเพราะว่ามีแพ็คเกจที่แออัดสะสมในคิวและไม่มีกลไกใดๆที่จะจัดเรียงให้ถูกต้อง และปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการที่เฟรมที่ไม่เต็มจะไม่ได้รับการส่งถ้าหากมีเฟรมเต็มจากอินพุทใดๆ เข้ามาอย่างต่อเนื่อง ปัญหาดังกล่าวนี้เกิดจากการที่มีแพ็คเกจที่ไม่เต็มเฟรมได้รับการส่งนั่นเอง ดังนั้นต้องหาแนวทางที่ให้มีการส่งได้เฉพาะแพ็คเกจที่เต็มเฟรม

## 2. กลไกในการป้องกันการจัดเรียงตัวใหม่ของแพ็กเก็ต

ขั้นตอนวิธี ASF-RR มีแนวทางในการป้องกันการจัดเรียงตัวใหม่ของแพ็กเก็ตในเราเตอร์แบบถ่วงสมดุลย์โดยการทำให้ความยาวของคิวในบัฟเฟอร์ส่วนกลางเท่ากัน นั่นก็คืออินพุตต้องส่งเฉพาะเฟรมเต็มเท่านั้น เพราะว่าเฟรมที่เต็มเท่านั้นที่จะถูกถ่วงสมดุลย์ไปยังทุกไลน์คาร์ดของบัฟเฟอร์ ดังภาพที่ 11 ทำให้คิวของบัฟเฟอร์มีความยาวคิวที่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อถึงรอบ แพ็กเก็ตในคิวของบัฟเฟอร์จาก N ไลน์คาร์ดจะออกไปยังเอาท์พุทโดยผ่านเมซจันตอนที่ 2 ตามลำดับของการวนรอบ ทำให้แพ็กเก็ตยังคงอยู่ในลำดับที่ถูกต้อง นี่คือกุญแจสำคัญในการป้องกันการจัดเรียงตัวใหม่ของแพ็กเก็ตในเราเตอร์แบบถ่วงสมดุลย์ของขั้นตอนวิธีนี้ แพ็กเก็ตที่เข้ามาจะได้รับการจัดรวมกลุ่มให้เป็นเฟรมทุก ๆ N สล็อตเวลา และการที่จะทำให้เฟรมที่ไม่เต็มเป็นเฟรมเต็มได้นั้นสามารถทำได้โดยการเติมแพ็กเก็ตว่างที่มีขนาดเดียวกับแพ็กเก็ตเข้าไปในเฟรมที่ไม่เต็มจนกระทั่งเฟรมนั้นเต็ม สำหรับเฟรมที่เต็มอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องเติมแพ็กเก็ตว่าง ขั้นตอนวิธี ASF-RR จะอนุรักษ์การทำงานสำหรับเฟรมที่เต็ม (work conserving for full frames) กล่าวคือถ้ามีเหลืออยู่ในคิวอย่างน้อย 1 เฟรมเต็มแล้วก็จะมียังน้อย 1 เฟรมเต็มที่ได้รับการ ดังนั้นถึงแม้ว่าจะมีแพ็กเก็ตที่ไม่เต็มเฟรมเข้ามาในระบบก็ตามแพ็กเก็ตนั้นก็ยังสามารที่จะได้รับการบริการ โดยการเติมแพ็กเก็ตว่างเข้าไปจนครบ



ภาพที่ 11 การส่งเฟรมเต็มในเราเตอร์แบบถ่วงสมดุลย์

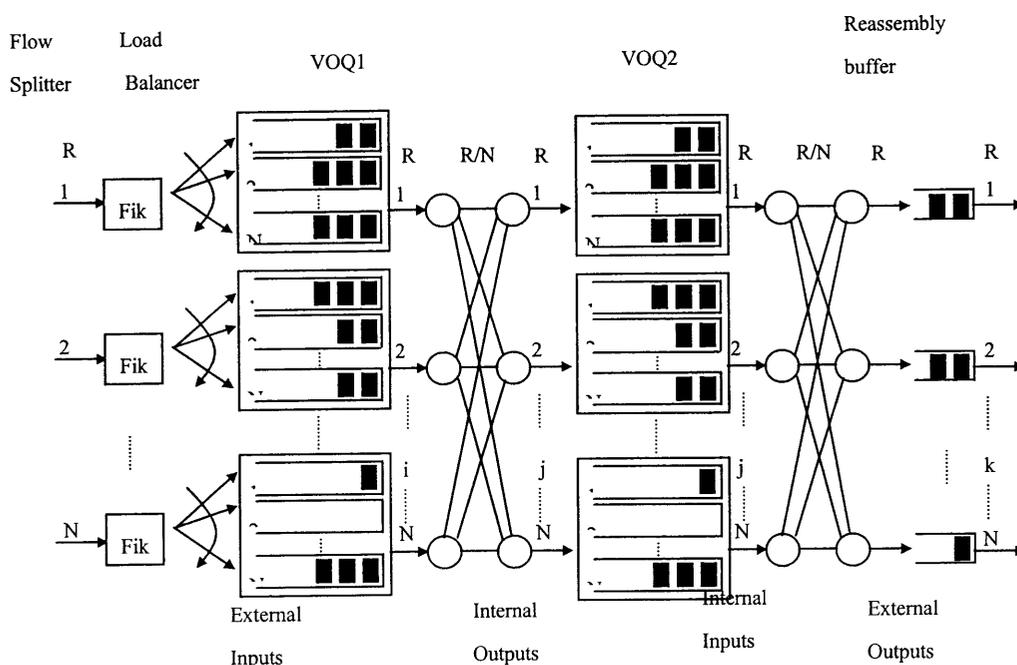
จะเห็นว่าวิธีการนี้เป็นการรักษาความยาวคิวของบัฟเฟอร์ส่วนกลางให้เท่ากัน ซึ่งทำให้ลำดับของแพ็กเก็ตไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นขั้นตอนวิธีนี้จึงสามารถป้องกันการจัดเรียงตัวใหม่ของแพ็กเก็ตได้เป็นอย่างดี และในขณะเดียวกันขั้นตอนวิธีนี้สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับขั้นตอนวิธี FFF ได้แก่

การที่เฟรมที่ไม่เต็มจะไม่ได้รับการส่งเลยถ้าหากมีเฟรมเต็มจากอินพุตใดๆ เข้ามาอย่างต่อเนื่อง เพราะที่ขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ จะส่งเฉพาะเฟรมเต็ม ดังนั้นจึงทำให้ทุกแพ็กเก็ตมีโอกาสเท่าเทียมกันที่จะได้รับการส่ง ขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ สามารถนำไปใช้งานได้จริงเนื่องจากการเติมแพ็กเก็ตว่างให้เต็มเฟรมและแยกแพ็กเก็ตว่างออกนั้นสามารถที่จะทำได้ (Keslassy et al., 2005)

ขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติพบว่ามีข้อเสียได้แก่ การใช้เมฆแพบริคจำนวน  $N^2$  เส้น เป็นจำนวน 2 ชุด ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสวิตช์แบบครอสบาร์ อย่างไรก็ตามสามารถที่จะลดค่าใช้จ่ายลงถ้าลดรูปเมฆ 2 ขั้นตอนให้เหลือเพียงขั้นตอนเดียว ข้อเสียจากการที่ต้องใช้บัฟเฟอร์ที่เอาท์พุทเพื่อแยกแพ็กเก็ตว่างออกซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุน ข้อเสียจากค่าหน่วงที่เพิ่มขึ้นถ้าต้องเติมแพ็กเก็ตว่างตลอดเวลา แต่ถ้าแพ็กเก็ตมีการเข้ามาอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา กรณีนี้จะไม่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธีนี้สามารถแก้ปัญหาในเราเตอร์แบบถ่วงสมดุลซึ่งได้แก้ปัญหาการจัดเรียงตัวใหม่ของแพ็กเก็ตได้ 100 % และแก้ปัญหการจัดค่าคอนฟิกูเรชันของสวิตช์แพบริคทุกสล็อตเวลา

### 3. สถาปัตยกรรมของขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ

#### 3.1 สถาปัตยกรรมของขั้นตอนวิธี ASF-RR



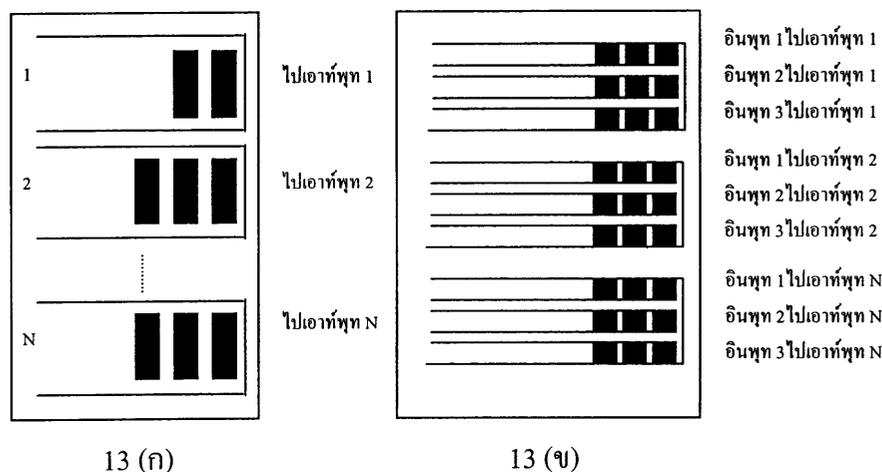
ภาพที่ 12 สถาปัตยกรรมของ ASF-RR

สถาปัตยกรรมนี้ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 12 ประกอบไปด้วยเมชคงที่ 2 ชุดแต่ละชุดมี  $N^2$  ช่องสัญญาณ ส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็ว  $\frac{R}{N}$  เท่ากันทั้ง 2 ชุด บัฟเฟอร์จำนวน 3 ชุด บัฟเฟอร์ชุดแรก หรือคิวเอาต์พุตเสมือน 1 (VOQ1) ช่วยในการจำกัดขอบเขตจำนวนแพ็กเก็ตที่เรียงตัวติดลำดับ เมชชุดแรก (ทำหน้าที่แทนสวิตช์ขั้นตอนที่ 1) จะส่งแพ็กเก็ต โดยการกระจายแพ็กเก็ตในรูปแบบวนรอบไปยังบัฟเฟอร์ชุดที่ 2 หรือคิวเอาต์พุตเสมือน 2 (VOQ2) ดังนั้นกล่าวได้ว่าเมชชุดแรกจะกระทำการถ่วงสมดุลแก่การจราจรที่เข้ามา แพ็กเก็ตจะถูกส่งข้ามเมชชุดที่ 2 ไปยังบัฟเฟอร์ชุดที่ 3 บัฟเฟอร์ชุดสุดท้ายนี้ใช้สำหรับการรวมตัวกลับคืนของแพ็กเก็ตเมื่อจะออกจากเราเตอร์ เมชแต่ละชุดมีการจัดตั้งค่าให้มีการวนรอบที่เหมือนกัน

### 3.2 โครงสร้างคิวแบบ 3 มิติ

ขั้นตอนวิธี FFF ได้นำคิวแบบ 3 มิติมาใช้ร่วมด้วยเพื่อแก้ปัญหาการขัดขวางแพ็กเก็ตหัวแถว (head of line blocking) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ถ้าใช้คิวเอาต์พุตเสมือนทั่วไป วิธีแก้ปัญหาคือ แบ่งแต่ละคิวเอาต์พุตเสมือนไปเป็นคิวที่แยกกันสำหรับแต่ละอินพุตภายนอก (คิว 3 มิติ) ดังภาพที่ 13 โครงสร้างเช่นนี้ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้นและเพิ่มความซับซ้อนในการจัดการบัฟเฟอร์นี้มากยิ่งขึ้นเนื่องจากใช้คิว 3 มิติจำนวน  $N^3$  คิวแทนคิวเอาต์พุตเสมือนจำนวน  $N^2$  คิว

ขั้นตอนวิธี ASF-RR ได้นำคิว 3 มิติมาใช้ร่วมด้วย เช่นเดียวกับ FFF เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาการขัดขวางแพ็กเก็ตหัวแถว



ภาพที่ 13 คิวเอาต์พุตเสมือนแบบดั้งเดิม (13 ก) และคิวเอาต์พุตเสมือนแบบ 3 มิติ (13 ข)

### 3.3 การรวมกันของ ASF-RR และ คิว 3 มิติ

ได้นำ ASF-RR ใช้ร่วมกับคิว 3 มิติ ในสวิตช์ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาเอาต์พุตภายนอก  $k$  กำหนดรอบ (cycle) ให้เป็นเซตของสล็อตเวลาที่ต่อเนื่องกันตามลำดับในขณะที่เอาต์พุตภายนอก  $k$  ได้รับแพ็กเก็ตเรียบร้อยแล้วจากอินพุตภายใน  $1$  ถึง  $N$  และได้กำหนดเซตของคิว 3 มิติ สำหรับ  $(i, k)$  ดังนี้  $\{(i, 1, k), (i, 2, k), \dots, (i, N, k)\}$  สมมติให้แพ็กเก็ตสุดท้ายที่ได้รับการบริการในเซตของคิว 3 มิติ มาจาก อินพุตภายใน  $j_{last}$  เพราะว่าคุณสมบัติของตัวถังสมดุทธ์ จะพบว่าลำดับถัดไปของแพ็กเก็ตของสายข้อมูล  $F_{ik}$  จะมาจาก อินพุตภายใน  $j_{last} + 1 \pmod{N}$  ให้  $P_{ik}$  เป็นพอยน์เตอร์ที่ชี้ไปยังแพ็กเก็ตถัดไปที่ต้องทำตามลำดับ  $p_{ik} \leftarrow j_{last} + 1 \pmod{N}$  กำหนดเฟรมสำหรับ  $(i, k)$  ดังนี้  $f(i, k) = \{(i, P_{ik}, k), (i, P_{ik} + 1, k), (i, N, k)\}$  และเฟรม  $f(i, k)$  เต็ม ถ้าทุก คิว 3 มิติ  $(i, j, k)$  สำหรับ  $j = \{P_{ik}, \dots, N\}$  นั้นไม่ว่างถ้าเฟรมเต็ม ดังนั้นแพ็กเก็ตตามลำดับถัดไปจะอยู่ในคิว 3 มิติ  $(i, P_{ik}, k)$  และถัดไปอีกจะอยู่ใน  $(i, P_{ik} + 1, k)$  และเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึง  $(i, N, k)$

ใน ASF-RR ที่ใช้ คิว 3 มิติ นั้น เอาต์พุตภายนอก จะอ่านแพ็กเก็ตทั้งหมดในเฟรมที่เต็มจากอินพุตภายนอกก่อนที่จะย้ายไปอ่านเฟรมที่เต็มจากอินพุตภายนอกถัดไป เอาต์พุตภายนอก  $k$  ใช้พอยน์เตอร์  $P_{ff}(k)$  แบบวนรอบในการจำว่าเฟรมเต็มนี้มาจากอินพุตภายนอกตัวใด เพื่อความต้องการคำนวณจะกระทำ ณ เอาต์พุตภายนอก  $k$  ณ จุดเริ่มต้นของทุกๆรอบ โดยการเริ่มต้นที่  $P_{ff}(k)$  จะหาเฟรมถัดไปที่มาถึงอินพุตภายนอกแล้วทำการปรับเปลี่ยน (update)  $P_{ff}(k) \leftarrow i_{ff} + 1 \pmod{N}$

## 4. ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ

กำหนดให้ทุกแพ็กเก็ตที่เข้ามาจะถูกแบ่งออกให้มีขนาดคงที่ และจะถูกนำมารวมตัวกันอีกครั้งเมื่อออกจากเราเตอร์ เวลาจะถูกแบ่งเป็นสล็อต ดังนั้นในแต่ละสล็อตเวลาจะมีอย่างมากเพียง 1 แพ็กเก็ตเท่านั้นที่เดินทางเข้ามายังพอร์ตอินพุตและอย่างมาก 1 แพ็กเก็ตเท่านั้นที่เดินทางออกไปยังพอร์ตเอาต์พุต สถาปัตยกรรมของ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติประกอบด้วยเมฆ 2 ขั้นตอนดังภาพที่ 12 อินพุตของขั้นตอนที่ 1 เรียกว่าอินพุตภายนอก (external inputs: EIs) ให้แทนด้วย  $i = 1, \dots, N$  เอาต์พุตของขั้นตอนที่ 1 เรียกว่าเอาต์พุตภายใน (internal outputs: IOs) ซึ่งจะเป็นอินพุตให้แก่เมฆขั้นตอนที่ 2 เรียกว่าอินพุตภายใน (internal inputs: IIs) เอาต์พุตภายในและอินพุตภายใน จะใช้แทนซึ่งกันและกัน ให้แทนด้วย  $j = 1, \dots, N$  และสุดท้ายเอาต์พุตของขั้นตอนที่ 2 เรียกว่าเอาต์พุตภายนอก (external outputs: EOs) ให้แทนด้วย  $k = 1, \dots, N$  ขั้นตอนการทำงานของ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ มีดังต่อไปนี้

(1) สายข้อมูลจะถูกแบ่งออกโดยตัวแยก (flow splitter) และทำการลาเบลแต่ละแพ็กเก็ตที่อินพุทภายนอก  $i$  ซึ่งเป็นของสายข้อมูล  $F_{ik}$  เมื่อ  $k$  เป็น เอาท์พุทภายนอก ซึ่งเป็นปลายทางที่แพ็กเก็ตจะออกไป ดังนั้นจึงมีเอาท์พุทภายนอกที่แตกต่างกันเป็นจำนวน  $N$  สายข้อมูลที่เป็นไปได้ต่อ 1 อินพุทภายนอก

(2) ตัวถ่วงสมดุลย์ (load balacer) ส่งแพ็กเก็ตทั้งหมดจาก  $F_{ik}$  ไปยังคิวเอาท์พุทเสมือน 1 จำนวน  $N$  ตัว แบบวนรอบ (round-robin) ตัวอย่างเช่นแพ็กเก็ตแรกจากสายข้อมูลที่กำหนดจะถูกส่งออกไปที่คิวเอาท์พุทเสมือน 1 สำหรับเอาท์พุทภายใน 1 แพ็กเก็ตที่ 2 ถูกส่งออกไปที่คิวเอาท์พุทเสมือน 1 สำหรับ เอาท์พุทภายใน 2 และต่อๆไป อย่างเป็นอิสระจากเวลาที่เข้ามา ถ้าสายข้อมูลมีแพ็กเก็ตที่ไม่ครบจำนวน  $N$  จะมีการเติมแพ็กเก็ตว่างที่มีขนาดเดียวกันเข้าไปที่ คิวเอาท์พุทเสมือน 1 จนครบจำนวน  $N$  เพราะว่าตัวถ่วงสมดุลย์ไม่จำเป็นต้องเข้าจังหวะ (synchronize) กับลำดับของการทำงานของ สวิตช์ขั้นตอนที่ 1 แพ็กเก็ตที่มาถึงจะถูกเก็บไว้ในบัฟเฟอร์และไม่จำเป็นที่จะต้องออกจากคิวเอาท์พุทเสมือน 1 ในทันที สังเกตว่าความยาวของคิวในแต่ละคิวเอาท์พุทเสมือน 1 จะมีขนาดเดียวกันทั้งหมดเพื่อจำกัดขอบเขตจำนวนที่จะทำให้เกิดการเรียงลำดับที่ผิดอย่างไม่มีขอบเขตที่จะเข้าไปสะสมในคิวเอาท์พุทเสมือน 2

(3) คิวเอาท์พุทเสมือน 1 จะให้บริการในลักษณะที่เป็นลำดับตามที่กำหนดโดยสวิตช์ขั้นตอนที่ 1 และเมื่อถึงรอบ แพ็กเก็ตจะออกจากคิวเอาท์พุทเสมือน 1 และผ่าน สวิตช์ขั้นตอนที่ 1 ออกไป

(4) หลังจากที่ออกจากสวิตช์ขั้นตอนที่ 1 แล้วแพ็กเก็ตจะถูกเก็บไว้ในคิวเอาท์พุทเสมือน 2 อินพุทของคิวเอาท์พุทเสมือน 2 คืออินพุทภายในและเอาท์พุทคือเอาท์พุทภายนอก

(5) คิวเอาท์พุทเสมือน 2 ได้รับบริการจากสวิตช์ขั้นตอนที่ 2 ในลักษณะที่เป็นลำดับตามที่กำหนด และเมื่อถึงรอบ แพ็กเก็ตจะออกจากคิวเอาท์พุทเสมือน 2 และผ่าน สวิตช์ขั้นตอนที่ 2 ออกไป

(6) หลังจากที่ออกจากสวิตช์ขั้นตอนที่ 2 แพ็กเก็ตจะรวมตัวกลับคืนในบัฟเฟอร์สำหรับรวมตัวกัน ดังนั้นคิวทั้งหมดที่มีแพ็กเก็ตมาจากอินพุทภายนอกใดๆจะอยู่ติดกัน

(7) สุดท้ายแพ็กเก็ตจะออกจากบัฟเฟอร์สำหรับรวมตัวกันและออกจากเราเตอร์ไป

คุณสมบัติของสวิตช์ดังต่อไปนี้ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้และได้ทำการพิสูจน์ไว้ใน (Chang et al., 2002)

**คุณสมบัติ 1:** ถ้าแพ็กเก็ตมาถึงสวิตช์ ณ เวลา  $t$  แพ็กเก็ตนั้นจะมาถึงคิวเอาท์พุทเสมือน 2 ระหว่างเวลา  $t$  ถึง  $t + N^2$

**คุณสมบัติ 2:** แพ็กเก็ตที่เรียงตัวมิดลำดับได้ถูกจำกัดขอบเขตเป็นจำนวน  $2N^2 + N$  แพ็กเก็ต

**คุณสมบัติ 3:** ค่าหน่วยของแพ็กเก็ตใน EDF ได้ถูกจำกัดขอบเขตด้วยค่าผลรวมระหว่างค่าหน่วยของแพ็กเก็ตในสวิตช์คิวเอาต์พุตแบบ FCFS และค่าคงที่  $2N^2 + N$

## 5. ประสิทธิภาพของ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ

การหาประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ นั้นจะใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับเรเตอร์ในอุดมคติซึ่งในที่นี้คือสวิตช์คิวเอาต์พุตและคิวเอาต์พุตแบบหน่วย ประสิทธิภาพที่จะทำการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จะอยู่ในเทอมของค่าหน่วยเฉลี่ยและค่าประสิทธิภาพ การหาประสิทธิภาพโดยการวิเคราะห์นี้จะทำให้ได้ผลที่อยู่ในรูปแบบทั่วไปซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการจราจรที่เข้ามาทุกรูปแบบ ซึ่งจะแตกต่างจากวิธีการจำลองแบบ ซึ่งแต่ละการทดลองอยู่ภายใต้พารามิเตอร์ที่จำกัด ต้องทดลองกับหลายๆ แบบจำลองจึงจะได้ผลที่ครอบคลุม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์ ในการหาค่าประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติเพื่อที่จะได้ผลการวิเคราะห์ที่สามารถใช้ได้กับทุกรูปแบบของการจราจร การพิสูจน์จะใช้คุณสมบัติของ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ ในการทำงานแบบอนุรักษ์การทำงานสำหรับเฟรมเต็ม ก่อนอื่นขอแนะนำนิยามและสัญลักษณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 5.1 คำจำกัดความ

พิจารณาเฉพาะแพ็กเก็ตที่มีปลายทางไปยังเอาต์พุตภายนอก  $k$  ที่กำหนด และนิยามสัญลักษณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้ ดังในภาพที่ 14

(1)  $A_i^o(t)$  เป็นจำนวนสะสมของแพ็กเก็ตที่จะไปยังเอาต์พุตภายนอก  $k$  ซึ่งมาถึงอินพุตภายนอก  $i$  จนกระทั่งเวลา  $t$  โดยจะรวมสล็อตเวลา  $t$  เข้าไปด้วย เป็นดัชนีของแพ็กเก็ตสุดท้ายจาก  $F_{ik}$  ที่มาถึง อินพุตภายนอก  $i$

(2)  $A^o(t) = \sum_{i=1}^N A_i^o(t)$  เป็นจำนวนทั้งหมดของแพ็กเก็ตที่มีปลายทางไปยัง  $k$  ซึ่งมาถึงสวิตช์จนกระทั่งเวลา  $t$

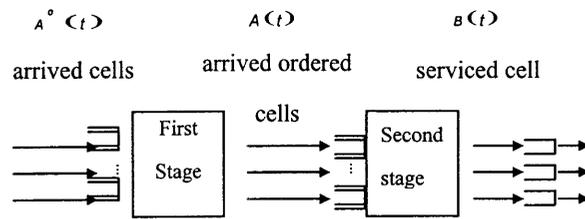
(3)  $A_i(t)$  เป็นดัชนีของแพ็กเก็ตสุดท้ายในสายข้อมูล  $F_{ik}$  ที่มาถึง อินพุตภายใน โดยการเริ่มต้นของรอบปัจจุบันและไม่มีแพ็กเก็ตใดที่ผิดไปจากลำดับก่อนหลังของสายข้อมูลที่เข้ามา ไม่มีแพ็กเก็ตใดที่อยู่ข้างหน้าผิดไปจากลำดับ เรียกว่า แพ็กเก็ตลำดับ (ordered cells) จำนวนทั้งหมดของแพ็กเก็ตลำดับคือ  $A(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t)$  โดยนิยาม ถ้า  $t'$  เป็นเวลาเริ่มต้นของรอบของเอาต์พุตภายนอก  $k$  (ซึ่ง  $t' = k + 1 + l \cdot N$ ,  $l$  เป็น เลขจำนวนเต็ม) แล้ว  $A_i(t) = A_i(t')$  เมื่อ

$t' \leq t \leq t' + N - 1$  ดังได้แสดงในคุณสมบัติ 1 จะได้ว่า  $A_i^{\circ}(t' - N^2) \leq A_i(t) \leq A_i^{\circ}(t)$  (สมมติให้ค่าเหล่านี้เป็น 0 เมื่อ  $t' \leq 0$ )

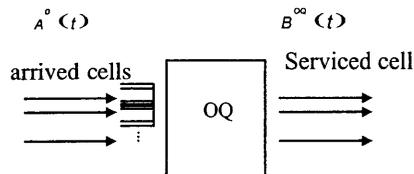
(4)  $B_i(t)$  เป็นจำนวนแพ็กเก็ตตามลำดับที่ได้รับการบริการแล้วโดยสวิตช์ขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งสล็อตเวลา  $t$  และ  $B(t) = \sum_{i=1}^N B_i(t)$

(5)  $q(t) = A(t) - B(t)$  เป็นจำนวนของแพ็กเก็ตที่ล้นคิว 3 มิติ ที่มีปลายทางไปยัง  $k$

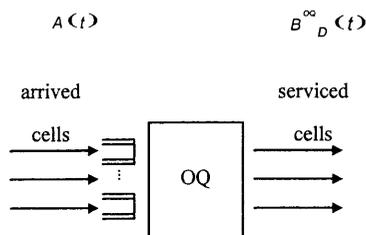
(6)  $A_{\mathcal{F}}(t) = \sum_{i=1}^N N \cdot \left[ \frac{A_i(t)}{N} \right]$  เป็นจำนวนของแพ็กเก็ต ในเฟรมเต็ม ที่ได้มาถึงคิว 3 มิติเรียบร้อยแล้ว และมีปลายทางไปยัง  $k$



(ก) สวิตช์ 2 ขั้นตอนกับ AFS-RR ร่วมกับคิวแบบ 3 มิติ



(ข) แบบจำลอง คิวเอาท์พุท สำหรับสวิตช์ขั้นตอนที่ 1 (กับการมาถึงของ  $A^{\circ}(t)$ )



(ค) แบบจำลอง คิวเอาท์พุท สำหรับสวิตช์ขั้นตอนที่ 2 (กับการมาถึงของ  $A(t)$ )

ภาพที่ 14 ความหมายของสัญลักษณ์ต่างๆ

$$(7) B_{ff}(t) = \sum_{i=1}^N N \cdot \left[ \frac{B_i(t)}{N} \right] \text{ เป็นจำนวนของแพ็กเก็ตในเฟรมเต็มที่ได้รับการบริการ}$$

เรียบร้อยแล้วโดยสวิตช์ขั้นตอนที่ 2

$$(8) ff(t) = \frac{A_{ff}(t)}{N} - \frac{B_{ff}(t)}{N} = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{A_i(t)}{N} \right] - \left[ \frac{B_i(t)}{N} \right] \text{ เป็นจำนวนของเฟรมเต็มที่}$$

ได้รับการเก็บไว้ในคิว 3 มิติ และ  $q_{ff}(t) = N \cdot ff(t) = A_{ff}(t) - B_{ff}(t)$

(9)  $B^{oo}(t)$  และ  $q^{oo}(t)$  เป็นจำนวนสะสมของแพ็กเก็ตที่ได้รับการบริการและความยาวของคิวตามลำดับในสวิตช์คิวเอาต์พุตแบบ FCFS สปีดอัพ 1 (speed up 1) ซึ่งมีจำนวนการมาถึงสะสมคือ  $A^o(t)$

(10)  $B_D^{oo}(t)$  และ  $q_D^{oo}(t)$  เป็นจำนวนสะสมของแพ็กเก็ตที่ได้รับการบริการและความยาวของคิวตามลำดับในคิวเอาต์พุตแบบหน่วง ซึ่งมีจำนวนการเข้ามาสะสมคือ  $A(t)$  หรืออีกนัยหนึ่งคือคิวเอาต์พุตแบบหน่วงเป็นตัวแทนของสวิตช์คิวเอาต์พุตสปีดอัพ 1 ที่มีลำดับการมาถึงแบบเดียวกับอินพุตภายในของสวิตช์ขั้นตอนที่ 2 คุณสมบัติของคิวเอาต์พุตต่อไปนี้ได้ถูกนำมาใช้ได้แก่

$$q_D^{oo}(t) = A(t) - B_D^{oo}(t),$$

$$q_D^{oo}(t) = \max_{0 \leq s \leq t} (A(t) - A(s) - (t - s)),$$

$$B_D^{oo}(t) = \max_{0 \leq s \leq t} (A(s) + (t - s)), \text{ และ}$$

$$B_D^{oo}(t) - B_D^{oo}(s) \leq t - s, \text{ เมื่อ } s \leq t \text{ (Keslassy and McKeown, 2002)}$$

(11)  $t' = k + l + l \cdot N$  เมื่อ  $l$  เป็นเลขจำนวนเต็ม เป็นสล็อตเวลาใดๆ เมื่อรอบของเอาต์พุตภายนอก  $k$  เริ่มต้น

**5.2 ค่าหน่วงเฉลี่ยของ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติอยู่ในค่าหน่วงเฉลี่ยของคิวเอาต์พุตรวมกับค่าคงที่**

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นว่าค่าหน่วงเฉลี่ยสำหรับ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ อยู่ในค่าหน่วงเฉลี่ยของสวิตช์คิวเอาต์พุตรวมกับค่าคงที่ สำหรับการจราจรที่เข้ามาเป็นแบบเดียวกัน จะทำการเปรียบเทียบ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ และคิวเอาต์พุตแบบหน่วงเป็นอันดับแรก ซึ่งคิวเอาต์พุตแบบหน่วงเป็นคิวเอาต์พุตที่มีลำดับการเข้ามาของแพ็กเก็ตเป็นแบบเดียวกันกับสวิตช์ขั้นตอนที่ 2 และจะแสดงว่า ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติอนุรักษ์การทำงานสำหรับเฟรมเต็ม ดังนั้นจึงมีจำนวนแพ็กเก็ตที่ใกล้เคียงกับคิวเอาต์พุตแบบหน่วงที่มีขนาดของคิวเล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดการจำกัดขอบเขตค่าหน่วงเฉลี่ยให้อยู่ในค่าหน่วงเฉลี่ยของคิวเอาต์พุตแบบหน่วงรวมกับค่าคงที่แล้วจะทำการเปรียบเทียบสวิตช์คิวเอาต์พุตแบบหน่วงกับสวิตช์คิวเอาต์พุต เริ่มต้นเมื่อมีอย่าง

น้อย 1 เฟรมเข้ามาที่คิว 3 มิติ จำนวนของเฟรมที่ให้บริการจะเพิ่มขึ้นทีละ 1 เฟรมในรอบถัดไป

**บทตั้ง 1:** ถ้ามีอย่างน้อย 1 เฟรมมาถึงสวิตช์ขั้นตอนที่ 2 แล้ว  $B_{ff}(t'+N) = B_{ff}(t') + N$

**พิสูจน์:** เพราะว่าทุกๆ เฟรมที่มาถึงสวิตช์ขั้นตอนที่ 2 จะเต็มเฟรมเสมอ ดังนั้น  $ff(t') > 0$  และ โดยคุณสมบัติของคิว 3 มิติ ที่ว่าต้องมีอย่างน้อย 1 เฟรมเต็มที่จะได้รับการบริการ ดังนั้น

$$B_{ff}(t'+N) = B_{ff}(t') + N \quad \square$$

เนื่องจากบทตั้ง 1 แสดงให้เห็นว่า ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ นั้นอนุรักษ์การทำงานสำหรับทุกๆ เฟรมที่มาถึงคิว 3 มิติ บทตั้ง 2 จะแสดงว่าแพ็กเก็ตที่ให้บริการโดย ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติจะมีจำนวนใกล้เคียงกับจำนวนของแพ็กเก็ตที่ให้บริการโดยสวิตช์คิวเอาท์พุท

**บทตั้ง 2:**  $B_{ff}(t') \geq B_D^{oo}(t') - N^2$

**พิสูจน์:** โดยวิธีอุปนัย (induction)

$$t' = \{k+l-N, k+l, \dots, k+l+l \cdot N\}$$

ถ้า  $t' = k+l-N, B_{ff}(t') = 0$  และ  $B_D^{oo}(t') \leq t' \leq k+l \leq N^2$ , ดังนั้นสมการนี้จะ เป็นจริงได้ ให้อสมการเป็นจริงสำหรับ  $t'$

**กรณีที่ 1:** เมื่อ  $ff(t') = 0$ . ดังนั้น

$$\begin{aligned} B_{ff}(t') &= A_{ff}(t') \\ &= \sum_{i=1}^N N \cdot \left\lfloor \frac{A_i(t')}{N} \right\rfloor \\ &\geq \left\lfloor \sum_{i=1}^N A_i(t') \right\rfloor - N(N-1) \\ &\geq A(t') - N(N-1) \\ &\geq B_D^{oo}(t') - N(N-1) \\ B_{ff}(t'+N) &\geq B_D^{oo}(t') - N(N-1) \\ &\geq B_D^{oo}((t'+N) - N) - N(N-1) \\ &\geq B_D^{oo}(t'+N) - N^2 \end{aligned}$$

กรณีที่ 2: เมื่อ  $ff(t') > 0$ , และจากบทตั้ง 1 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} B_{ff}(t'+N) &\geq B_{ff}(t') + N \\ &\geq B_D^{oo}(t') - N^2 + N \\ &\geq B_D^{oo}(t'+N) - N^2 \end{aligned} \quad \square$$

เนื่องจากบทตั้ง 2 ได้แสดงให้เห็นว่าจำนวนของแพ็กเก็ตที่ได้รับบริการโดย ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ มีค่าใกล้เคียงกับคิวเอาต์พุตแบบหน่วงในบางกรณี บทตั้ง 3 สรุปว่าขนาดของคิวใน ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ ไม่ได้ถูกจำกัดขอบเขตโดยผลรวมของขนาดของคิวสำหรับคิวเอาต์พุตแบบหน่วงกับค่าคงที่ อย่างไรก็ตามสำหรับการจราจรที่คับคั่ง ขนาดคิวของ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ ใกล้เคียงกับขอบเขตนี้

บทตั้ง 3:  $q_{ff}(t') - q_D^{oo}(t') \leq N^2 + N - 1$  และ  $q(t') - q_D^{oo}(t') \leq N^2$

พิสูจน์: จากคำจำกัดความ และ บทตั้ง 2 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} q_{ff}(t') - q_D^{oo}(t') &= [A_{ff}(t') - B_{ff}(t')] - [A(t') - B_D^{oo}(t')] \\ &= [A_{ff}(t') - A(t')] + [B_D^{oo}(t') - B_{ff}(t')] \end{aligned}$$

เนื่องจาก

$$\max [A_{ff}(t') - A(t')] = N - 1 \quad \text{และ} \quad \max [B_D^{oo}(t') - B_{ff}(t')] = N^2$$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} q_{ff}(t') - q_D^{oo}(t') &\leq N - 1 + N^2 \\ &\leq N^2 + N - 1 \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\begin{aligned} q(t') - q_D^{oo}(t') &= [A(t') - B(t')] - [A(t') - B_D^{oo}(t')] \\ &= B_D^{oo}(t') - B(t') \\ &\leq B_D^{oo}(t') - B_{ff}(t') \end{aligned}$$

จากบทตั้ง 2 จะได้  $q(t') - q_D^{oo}(t') \leq N^2$  □

สำหรับบทตั้งถัดไป จะแสดงว่า ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ มีประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิธเพื่อที่จะย้ายแพ็กเก็ตออกจากคิว เนื่องจาก ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ อนุรักษ์การทำงาน

สำหรับทุกเฟรม บทตั้ง 4 จะแสดงว่าถ้ามี  $ff(t)$  เต็มเฟรม ณ เวลา  $t'$  ดังนั้น  $ff(t')$  เต็มเฟรมจะได้รับการบริการในรอบ  $ff(t)$  ถัดไป

บทตั้ง 4: ถ้ามีอย่างน้อย 1 เฟรมมาถึงสวิทช์ขั้นตอน 2 แล้ว

$$B_{ff}(t' + q_{ff}(t')) = A_{ff}(t')$$

พิสูจน์: ให้  $ff(t) = 0$  โดยนิยาม  $q_{ff}(t) = 0$  และ  $B_{ff}(t) = A_{ff}(t)$   $ff(t) \geq 1$  และใช้บทตั้ง 1 ทำซ้ำ ๆ จน  $ff(t)$  ครั้ง

$$(1) \text{ เมื่อ } ff(t) \geq 1 \text{ แล้ว } B_{ff}(t' + N) = B_{ff}(t') + N \quad (\text{จากบทตั้ง 1})$$

$$(2) \text{ เมื่อ } ff(t' + N) \geq ff(t) - 1 \text{ แล้ว } B_{ff}(t' + 2N) = B_{ff}(t') + 2N$$

$$(3) \text{ เมื่อ } ff(t' + 2N) \geq ff(t) - 2 \text{ แล้ว } B_{ff}(t' + 3N) = B_{ff}(t') + 3N \quad \text{ ฯลฯ}$$

สุดท้ายจะได้ว่า

$$ff(t' + [ff(t) - 1] \cdot N) \geq 1$$

$$\text{ดังนั้น} \quad B_{ff}(t' + ff(t) \cdot N) = B_{ff}(t') + ff(t) \cdot N = A_{ff}(t')$$

$$\text{จากนิยาม} \quad q_{ff}(t) = N \cdot ff(t) \text{ สำหรับ ทุก } t$$

$$\text{ดังนั้น} \quad B_{ff}(t' + q_{ff}(t)) = A_{ff}(t') \quad \square$$

บทตั้ง 5:  $B(t' + q_{ff}(t) + N(2N - 2)) \geq A(t')$

พิสูจน์: จากบทตั้ง 4 ได้ว่า  $B_{ff}(t' + q_{ff}(t)) = A_{ff}(t')$  จะแสดงว่าในขณะที่  $(2N - 2)$  รอบถัดไป มีแพ็คเกจอย่างน้อย  $A(t) - A_{ff}(t)$  จะได้รับการบริการ ในช่วง  $(2N - 2)$  รอบนี้มีอย่างน้อย  $(2N - 2)$  เฟรมเต็มที่จะได้รับบริการ ดังนั้น จากบทตั้ง 1 และ 4 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} B_{ff}(t' + q_{ff}(t) + N(2N - 2)) &= A_{ff}(t') + N(2N - 2) \\ &\geq A(t') \end{aligned}$$

$$\text{เนื่องจาก} \quad B_{ff}(t) \leq B(t)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad B(t' + q_{ff}(t) + N(2N - 2)) \geq A(t') \quad \square$$

**ทฤษฎี 1:** ค่าหน่วยเฉลี่ยของ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ มีค่าน้อยกว่าค่าหน่วยเฉลี่ยสำหรับคิวเอาท์พุทแบบหน่วยรวมกับค่าคงที่  $3N^2 - 2$

พิสูจน์: จาก  $q_f(t) \leq N^2 + N - 1 + q_D^{oo}(t)$

และ  $B(t' + q_f(t) + N(2N - 2)) \geq A(t')$  (จากบทตั้ง 3 และ 5)

ดังนั้น  $B(t' + [q_D^{oo}(t) + N^2 + N - 1] + N(2N - 2)) \geq A(t')$

หรือ  $B(t' + q_D^{oo}(t) + N(3N - 1) - 1) \geq A(t')$

เนื่องจาก  $B_D^{oo}(t' + q_D^{oo}(t)) \leq B_D^{oo}(t') + q_D^{oo}(t) = A(t')$

ดังนั้น  $B(t' + q_D^{oo}(t) + N(3N - 1) - 1) \geq B_D^{oo}(t' + q_D^{oo}(t))$  ซึ่งบ่งบอกถึงค่าหน่วยเฉลี่ยของแพ็กเก็ต 1 แพ็กเก็ตที่เข้ามา ณ เวลา  $t'$  นั้นเป็นค่าหน่วยที่อยู่ภายใต้ค่าหน่วยของคิวเอาต์พุตแบบหน่วยรวมกับค่า  $N(3N - 1) - 1$  การคำนวณทั้งหมดจนมาถึงขณะนี้ เป็นของเวลา  $t'$  ที่เริ่มต้นรอบสำหรับเอาต์พุต  $k$  ถ้าเลือกจำนวนเต็มบวก  $t$  ใดๆ แล้วให้

$$t' = N \cdot \left\lfloor \frac{t - (k + 1)}{N} \right\rfloor + k + 1 \text{ เป็นจุดเริ่มต้นของรอบของ } t \text{ และ}$$

ให้  $C = N(3N - 1) - 1 + (N - 1) = 3N^2 - 2$  จะได้

$$\begin{aligned} B(t + q_D^{oo}(t) + C) &\geq B(t' + [A(t) - B_D^{oo}(t)] + C) \\ &\geq B(t' + A(t) - B_D^{oo}(t) - (N - 1) + C) \\ &\geq B(t' + q_D^{oo}(t) + N(3N - 1) - 1) \\ &\geq A(t) = A(t) \end{aligned}$$

ดังนั้น  $B(t + q_D^{oo}(t) + C) \geq B_D^{oo}(t + q_D^{oo}(t))$  □

**ทฤษฎี 2:** ค่าหน่วยเฉลี่ยของ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ มีค่าน้อยกว่าค่าหน่วยเฉลี่ยของคิวเอาต์พุตรวมกับค่าคงที่  $4N^2 + N - 3$

**พิสูจน์:** เปรียบเทียบค่าหน่วยของคิวเอาต์พุตกับคิวเอาต์พุตแบบหน่วย ให้  $D = N^2 + N - 1$  อันดับแรกจะแสดงว่าค่าหน่วยของแพ็กเก็ตใดๆ ในคิวเอาต์พุตแบบหน่วยมีค่าน้อยกว่าค่าหน่วยของคิวเอาต์พุตรวมกับ  $D$

สำหรับสล็อตเวลาใดๆ  $s$  ให้  $s'(s)$  เป็นสล็อตเวลาที่เริ่มต้นรอบของ  $s$

$$s'(s) = N \cdot \left\lfloor \frac{s - (k + 1)}{N} \right\rfloor + k + 1 \text{ และ } s - (N - 1) \leq s'(s) \leq s$$

จากคุณสมบัติของคิวเอาต์พุตแบบหน่วย ได้ว่า

$$\begin{aligned}
B_D^{OO}(t) &= \min_{0 \leq s \leq t} [A(s) + (t-s)] \\
&= \min_{0 \leq s \leq t} [A(s'(s)) + (t-s)] \\
&\geq \min_{0 \leq s \leq t} [A^\circ(s'(s) - N^2) + (t-s)] \\
&\geq \min_{0 \leq s \leq t} [A^\circ(s-D) + (t-s)]
\end{aligned}$$

ให้  $\tau = s - D$  เพราะว่่าแพ็กเก็ตไม่สามารถมาถึงก่อนสล็อตเวลา 0

$$\begin{aligned}
B_D^{OO}(t) &\geq \min_{D \leq \tau \leq t-D} [A^\circ(\tau) + (t-D) - \tau] \\
&\geq \min_{0 \leq \tau \leq t-D} [A^\circ(\tau) + (t-D) - \tau] \\
&\geq B^{OO}(t-D) \quad \square
\end{aligned}$$

เนื่องจากคิวเอาต์พุตแบบหน่วง และ คิวเอาต์พุตทั้งสองชนิดเป็น FCFS ความแตกต่างของค่านั่งงของแต่ละแพ็กเก็ตระหว่างคิวเอาต์พุตทั้งสองมีได้อย่างมากไม่เกิน  $D$  ดังนั้นความแตกต่างของค่านั่งงเฉลี่ยระหว่าง ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติและคิวเอาต์พุตอย่างมากที่สุดจะมีค่าเป็น  $3N^2 - 2 + N^2 + N - 1 = 4N^2 + N - 3$

การปรับปรุงค่าขอบเขตนี้สามารถทำได้โดยการใช้ขั้นตอนวิธีที่แตกต่างจากนี้ที่ทำงานได้แม้กับเฟรมที่ไม่เต็ม อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวมีความซับซ้อนและต้องการการติดต่อสื่อสารกันภายในสวิตช์

### 5.3 ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ มีค่าประสิทธิผลเช่นเดียวกับคิวเอาต์พุต

พิจารณาสวิตช์ที่มีอัตราเข้ามาของแพ็กเก็ตเป็น  $(\rho_{ik})$  (จากอินพุตภายนอก  $i$  ไปยังเอาต์พุตภายนอก  $k$ ) และขนาดของคิวทั้งหมดเป็น  $Q(t)$  เมื่อ  $t$  เป็นสล็อตเวลาในปัจจุบัน

(1) โหลดของการจราจรที่เข้ามาเป็น

$$\rho = \max_k \left( \max_{i=1}^N \rho_{ik} \right), \max_i \left( \sum_{k=1}^N \rho_{ik} \right)$$

การจราจรที่เข้ามานั้นจะสามารถรับได้ถ้า  $\rho < 1$

(2) สวิตช์จะมีความคงตัวอย่างมากถ้า  $\limsup_{t \rightarrow \infty} (E[Q(t)]) < \infty$

(3) สวิตช์จะมีค่าประสิทธิผล 100% ถ้ามีความคงตัวอย่างมากเมื่อไรก็ตามที่การจราจรที่เข้ามานั้นสามารถรับได้

ขอบเขตของค่าหน่วยเฉลี่ยที่ต่างกันระหว่าง ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ และสวิตช์คิว เอทพุทนั้นมียุ่จริง และ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ มีค่าประสิทธิผลเหมือนคิวเอทพุท ดังเช่น แสดงไว้ใน ทฤษฎี 3

**ทฤษฎี 3:** ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ และคิวเอทพุท มีค่าประสิทธิผลเหมือนกัน

**พิสูจน์:** ให้  $Q^{OO}(t)$  และ  $Q^{ASF}(t)$  เป็นขนาดของคิวทั้งหมด ณ สลื่อทเวลา  $t$  ในสวิตช์ที่ใช้คิว เอทพุท และ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ ตามลำดับ และให้  $C = 4N^3 + N^2 - 2N$  และสมมติให้ รอบของเอทพุทภายนอก  $k$  เริ่มต้น ณ  $t'(t)$  ซึ่ง  $t - (N-1) \leq t'(t) \leq t$  โดยการใช้บทตั้ง 3 และการพิสูจน์ทฤษฎี 2 จะได้

$$\begin{aligned} q(t) &\leq q(t'(t)) + N(N-1) \\ &\leq q_D^{OO}(t'(t)) + N^2 + N(N-1) \\ &\leq [A(t'(t)) - B_D^{OO}(t'(t))] + 2N^2 - N \\ &\leq [A(t) - B_D^{OO}(t)] + (N-1) + 2N^2 - N \\ &\leq A(t) - B_D^{OO}(t-D) + 2N^2 - 1 \\ &\leq A^O(t) - B^{OO}(t) + D + 2N^2 - 1 \\ &\leq q^{OO}(t) + 3N^2 + N - 2 \end{aligned}$$

พิจารณาบัฟเฟอร์ทั้งในคิว 3 มิติสำหรับ  $N$  เอทพุทภายนอกและในคิวเอทพุทเสมือน 1 จาก อินพุท ภายนอกจำนวน  $N$  (โดยการใช้  $q_k(t) \equiv q(t)$  สำหรับเอทพุทภายนอก  $k$ )

$$\begin{aligned} Q^{ASF}(t) &\leq N \sum_{k=1}^N q_k^{ASF}(t) + N \cdot N^2 \\ &\leq N \sum_{k=1}^N q_k^{OO}(t) + N \cdot (3N^2 + N - 2) + N^3 \\ &\leq Q^{OO}(t) + C \end{aligned}$$

ดังนั้น  $Q^{OO}(t) \leq Q^{ASF}(t) \leq Q^{OO}(t) + C$  เนื่องจากคิวเอทพุทอนุรักษ์การทำงาน ดังนั้นจึงมี ค่าประสิทธิผลเหมือนกัน

**คุณสมบัติ 4:** สมมติให้รูปแบบการจราจรที่เข้ามาจากอินพุทภายนอก  $i$  ไปยัง เอทพุทภายนอก  $k$  เป็น  $(\sigma, \rho_{ik})$  ถ้าการจราจรพอที่จะรับได้ ดังนั้น ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ ให้ค่าประสิทธิผล 100%

พิสูจน์: ให้  $A_{ik}(n)$  เป็นจำนวนสะสมของแพ็กเก็ตที่มาถึงโดยเข้ามาที่  $i$  และไปที่  $k$  ณ สล็อตเวลา  $n$  และให้  $A_k(n) = \sum_{i=1}^N A_{ik}(n)$ . ดังนั้นโดยนิยาม สำหรับ  $1 \leq i, k \leq N$  และ  $0 \leq m \leq n$  ได้ว่า  $A_{ik}(n) - A_{ik}(m) \leq \rho_{ik} \cdot (n - m) + \sigma$  บ่งชี้ถึงว่า  $A_{ik}(n) - A_{ik}(m) \leq \rho_{ik} \cdot (n - m) + N\sigma$  ดังนั้นการมาถึงที่เอาท์พุทใดๆ เป็น  $(N\sigma, \rho)$  เนื่องจาก  $\rho < 1$  ขนาดความยาวคิวสูงสุดคือ  $N\sigma$  (Keslassy and McKeown, 2002) ผลที่ได้เหมือนทฤษฎี 3

## 6. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ และ FFF

ในปัจจุบันนี้ยังไม่มียานวิจัยใดที่ใช้วิธีการจำลองแบบในการหาประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่แก้ปัญหาคิวจัดเรียงตัวใหม่ของแพ็กเก็ตในเราเตอร์แบบถ่วงสมดุล เพราะว่างานวิจัยเหล่านั้นนิยมใช้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ แต่จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ ได้แก้ปัญหาคิวสะสมแพ็กเก็ตที่ผิดลำดับถ้าหากมีบางแพ็กเก็ตสูญหายและปัญหาที่แพ็กเก็ตไม่เต็มเฟรมไม่ได้รับการส่ง ของ FFF ถึงแม้ว่า FFF จะเผชิญกับปัญหาเหล่านี้ แต่ FFF เป็นขั้นตอนวิธีที่สามารถรับประกันประสิทธิภาพและสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานจริงได้ ดังนั้นจึงควรที่จะมีการทดสอบเทียบเคียงประสิทธิภาพซึ่งกันและกันระหว่างทั้งสองขั้นตอนวิธี การทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองขั้นตอนวิธี จะใช้วิธีการจำลองแบบด้วยโปรแกรม MATLAB นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติจากการวิเคราะห์ได้ โดยการทดลอง โดยตรวจสอบได้ว่าผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ทำการพิสูจน์ไว้หรือไม่

### 6.1 แนวคิดสำหรับแบบจำลอง

ในการทดลองนั้นต้องพิจารณาเลือกแบบจำลองให้เหมาะสม แบบจำลองหนึ่งอาจมีความเหมาะสมต่อการทำงานของระบบภายใต้สภาวะการทำงานแบบหนึ่ง แต่อาจจะไม่เหมาะสมกับอีกสภาวะหนึ่ง

ในการทดลองครั้งนี้จะใช้แบบจำลอง Geom/Geom/1 (McKeown, 2001) เนื่องจากการเข้ามาในคิวของแพ็กเก็ต แต่ละสล็อตเวลาจะมีได้สองลักษณะคือมีแพ็กเก็ตเข้ามาหรือไม่เข้ามาในคิว และเช่นเดียวกันสำหรับการให้บริการแต่ละสล็อตจะมีได้สองลักษณะ คือแพ็กเก็ตได้รับการหรือไม่ได้รับการ ดังนั้นจึงเป็นแบบจำลองของคิวที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา ซึ่งการเข้ามามีการแจกแจงแบบแบร์นูลลี และการให้บริการมีการแจกแจงแบบแบร์นูลลี มี 1 เซิร์ฟเวอร์ให้บริการ และบัฟเฟอร์มีขนาดไม่จำกัด การทดลองทั้งหมดจะกระทำที่สภาวะคงตัวเนื่องจากเป็นระบบที่ทำงานอย่างต่อเนื่องการวัดค่าประสิทธิภาพควรจะทำที่สภาวะคงตัวจึงจะได้ค่าที่ใกล้เคียงความเป็นจริง ไม่เช่นนั้นแล้วสภาวะเริ่มต้นของระบบอาจส่งผลให้ค่าที่ได้มีความผิดพลาดได้

พิจารณาการเข้ามามีการแจกแจงแบบแบร์นูลลี หมายความว่าในการเข้ามาสู่ระบบ ณ เวลา  $t$  ของแพ็กเก็ตทำให้มีความน่าจะเป็นเท่ากับ  $p$  ดังนั้นความน่าจะเป็นในการไม่เข้าสู่ระบบของแพ็กเก็ตจึงเท่ากับ  $1-p$  ระยะห่างเวลาการเข้าสู่ระบบจะมีการแจกแจงแบบเรขาคณิต มีค่าเฉลี่ยเป็น  $\frac{1}{p}$  โดยที่  $P(A=k) = p(1-p)^{k-1}$  เมื่อ  $k$  คือ จำนวนครั้งในการทดลองจนกระทั่งมี 1 แพ็กเก็ตเข้ามาในระบบ (แพ็กเก็ตเข้ามา ณ ครั้งที่  $k$  ดังนั้นจึงมี  $k-1$  ครั้งที่แพ็กเก็ตไม่เข้ามา) และ  $A$  คือ การเข้ามาของแพ็กเก็ต

การให้บริการมีการกระจายแบบแบร์นูลลีหมายความว่า ถ้าคิวนั้นเป็นคิวไม่ว่าง ณ เวลา  $t$  จะได้ว่าความน่าจะเป็นที่แพ็กเก็ตหัวแถวจะได้รับบริการ ณ เวลา  $t$  เป็น  $q$  ความน่าจะเป็นที่แพ็กเก็ตหัวแถวจะไม่ได้รับบริการจึงเป็น  $1-q$  ดังนั้นเวลาในการให้บริการ (service time) จะมีการแจกแจงแบบเรขาคณิตมีค่าเฉลี่ยเป็น  $\frac{1}{q}$  โดย  $P(S=k) = q(1-q)^{k-1}$  เมื่อ  $k$  คือ จำนวนครั้งในการทดลองจนกระทั่งมี 1 แพ็กเก็ตได้รับการบริการ (แพ็กเก็ตได้รับการ ณ ครั้งที่  $k$  ดังนั้นจึงมี  $k-1$  ครั้งที่แพ็กเก็ตไม่ได้รับการบริการ) และ  $S$  คือการบริการแก่แพ็กเก็ต

กำหนดให้ความน่าจะเป็นในการเข้ามาของแพ็กเก็ตเป็น  $p$  เท่ากับ 0.5 ที่ทำให้โอกาสในการเข้ามาหรือไม่เข้ามาของแพ็กเก็ตในระบบเท่ากัน

การใช้บัฟเฟอร์ขนาดไม่จำกัดนี้เพื่อหาว่าขนาดสูงสุดของบัฟเฟอร์ที่ใช้ในระบบจะเป็นเท่าใดที่จะไม่ทำให้เกิดปัญหาขัดขวาง (block) เกิดขึ้นกับแพ็กเก็ต (ปัญหาขัดขวางแพ็กเก็ตนี้เกิดเนื่องจากบัฟเฟอร์มีจำนวนจำกัด) เพื่อจะนำไปสู่การออกแบบที่ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 6.2 ความหมายของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการจำลองแบบ

การทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีทั้งสองจะทำการทดสอบในเทอมของค่าเฉลี่ยของคิว ค่าหน่วยเฉลี่ย และประสิทธิผล ซึ่งแต่ละเทอมต้องระบุพารามิเตอร์ที่ใช้ เช่นการหาค่าหน่วยเฉลี่ย โดยทั่วไปแล้วจะทำการทดลองเทียบกับค่าโหลดแฟคเตอร์ ส่วนการหาประสิทธิผลจะเปรียบเทียบกับอัตราการเข้ามาของแพ็กเก็ต เนื่องจากเทอมต่าง ๆ เหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงถ้าค่าโหลดแฟคเตอร์ หรืออัตราการเข้ามามีการเปลี่ยนแปลง พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นตัวที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีทั้งสอง พารามิเตอร์เหล่านี้ได้แก่

(1) โหลดแฟคเตอร์ หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความน่าจะเป็นในการเกิดของแพ็กเก็ตในคิว ( $u$ ) กับความน่าจะเป็นในการดับของแพ็กเก็ตในคิว ( $d$ ) โดยที่ความน่าจะเป็นในการเกิดของแพ็กเก็ตในคิวเกิดขึ้นเนื่องจากการมีแพ็กเก็ตเข้ามาในคิวและการที่แพ็กเก็ตยังไม่ได้รับบริการ ดังนั้น  $u = p(1-q)$  สำหรับความน่าจะเป็นในการดับของแพ็กเก็ตในคิว คือการที่ไม่มีแพ็กเก็ตเข้ามาใน

คิวและมีแพ็กเก็ตออกไปจากคิว ดังนั้น  $d = q(1-p)$  ค่าอัตราส่วนนี้บ่งบอกถึงความคงตัว (stability) ของระบบ ซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่า 1 จึงจะมีความคงตัวและ ค่านี้อาจมีผลต่อค่านองของแพ็กเก็ตเกิด ถ้าค่าโพลีแฟคเตอร์มากทำให้ค่านองมากด้วย

เนื่องจากโพลีแฟคเตอร์ที่ทำให้ระบบคงตัวนั้นจะพิจารณาที่โพลีแฟคเตอร์มากกว่า 0 แต่ น้อยกว่า 1 ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้จึงเลือกค่าโพลีแฟคเตอร์มีค่าดังนี้คือ 0.01, 0.02, 0.03, ..., 0.09, 0.1, 0.2, ..., 0.9, 0.91, 0.92, ..., 0.99 เพื่อให้ครอบคลุมทุกช่วง

(2) สล็อตเวลา (time slot) หมายถึง เวลาที่ถูกแบ่งเป็นช่วงที่คงที่ ในแต่ละสล็อตเวลา มี อย่างมาก 1 แพ็กเก็ตที่เข้ามาหรือออกไปจากคิว ค่าสล็อตเวลาจะขึ้นกับขนาดของแพ็กเก็ตและ อัตราเร็วของเส้นทางเชื่อมต่อ 1 สล็อตเวลามีค่าเท่ากับ ขนาดของแพ็กเก็ต (ไบต์)/อัตราเร็วของ เส้นทางเชื่อมต่อ (ไบต์/วินาที) มีหน่วยเป็นวินาที ตัวอย่างเช่น ค่านองเฉลี่ยของขั้นตอนวิธี FFF มี ค่าเป็น 20 สล็อตหรือถ้าคิดเป็นวินาทีทำได้ดังนี้ กำหนดให้แพ็กเก็ตที่ใช้มีขนาด 64 ไบต์ อัตราเร็ว ของเส้นทางเชื่อมต่อเป็น 160 กิกะบิตต่อวินาที ดังนั้นค่านองเฉลี่ยเท่ากับ  $(20 \times 64 \times 8) / (160 \times 10^9)$  วินาที เป็นต้น

(3) ประสิทธิภาพ (throughput) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างจำนวนแพ็กเก็ตสะสมที่เข้ามา สู่ระบบ ณ สล็อตเวลา  $t$  กับจำนวนสล็อตเวลาทั้งหมด เนื่องจากในแต่ละสล็อตเวลามีได้ อย่างมาก เพียง 1 แพ็กเก็ตที่เข้ามา ดังนั้นอัตราส่วนนี้อยู่ระหว่าง 0-1 เป็นการวัดความสามารถของระบบที่จะ รับจำนวนการเข้าสู่ระบบของแพ็กเก็ตได้มากน้อยเพียงใดที่ความน่าจะเป็นในการเข้ามาของแพ็กเก็ต ในระบบมีค่าต่าง ๆ การที่พิจารณาความน่าจะเป็นในการเข้ามาแทนที่จะพิจารณาอัตราการเข้า มา นั้นเนื่องจากคิวที่ใช้เป็นคิวแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา ดังนั้นจึงพิจารณาที่ความน่าจะเป็นแทน

ระบบที่มีประสิทธิภาพสูงจะดีกว่าระบบที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า ระบบที่สามารถรับการเข้าสู่ ระบบของแพ็กเก็ตได้ทั้งหมดไม่ว่าความน่าจะเป็นในการเข้ามาของแพ็กเก็ตจะเป็นเท่าใดนั่นถือว่า เป็นระบบที่มีค่าประสิทธิภาพ 100 % ระบบที่มีการอนุรักษ์การทำงานจะเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพ 100 % เนื่องจากระบบนี้จะทำงานทันทีที่มีแพ็กเก็ตเข้ามา

(4) ค่านองเฉลี่ย (average delay) หมายถึง ระยะเวลาโดยเฉลี่ยที่เริ่มวัดเมื่อแพ็กเก็ตมาถึง อินพุทจนกระทั่งออกไปที่เอาต์พุท ค่านองเฉลี่ยที่มากหมายความว่าแพ็กเก็ตจะใช้เวลาอยู่ในระบบ นาน ค่านองเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับโพลีแฟคเตอร์ ค่านองเฉลี่ยมีค่ามากขึ้นถ้าโพลีแฟคเตอร์ มีค่ามากขึ้น เนื่องจากเมื่อโพลีแฟคเตอร์มีค่ามากขึ้นจะทำให้แพ็กเก็ตออกจากคิวได้ช้าลง ค่านอง เฉลี่ยหาได้จากค่าเฉลี่ยของแพ็กเก็ตในคิวซึ่งรวม 1 แพ็กเก็ตที่กำลังได้รับการบริการ / ความน่าจะเป็น ในการเข้ามาของแพ็กเก็ต

ค่านองเฉลี่ยในการทดลองนี้มีหน่วยเป็นสล็อตเวลา ซึ่งสามารถแปลงเป็นวินาทีได้ ดังตัวอย่างใน (2) ค่านองเฉลี่ยเป็นอีกตัวหนึ่งที่ยบบอกถึงประสิทธิภาพของระบบ ถ้าค่านองเฉลี่ยของระบบหนึ่งมีค่าต่ำกว่าค่านองเฉลี่ยของอีกระบบหนึ่ง กล่าวได้ว่าระบบที่มีค่านองเฉลี่ยที่ต่ำกว่านั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าอีกระบบหนึ่ง ในเทอมของค่านอง

(5) ค่าเฉลี่ยของคิว (average queue size) หมายถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนแพ็กเก็ตที่ค้างในคิวซึ่งไม่รวม 1 แพ็กเก็ตที่กำลังได้รับการบริการ ค่านี้จะได้จากการจำลองแบบ ค่าเฉลี่ยของคิวมีความสัมพันธ์กับค่าโหลดแฟคเตอร์กล่าวคือ ถ้าค่าโหลดแฟคเตอร์ต่ำจะทำให้มีแพ็กเก็ตค้างในคิวน้อย แต่ถ้าโหลดแฟคเตอร์สูงจะทำให้มีแพ็กเก็ตค้างในคิวมากขึ้น ค่าเฉลี่ยของคิวมีหน่วยเป็นจำนวนแพ็กเก็ต ดังนั้นระบบที่ทำงานได้เร็วจะมีค่านี้ต่ำ

ค่าเฉลี่ยของคิวแตกต่างจากค่านองเฉลี่ย โดยที่ค่าเฉลี่ยของคิวจะเป็นการหาจำนวนแพ็กเก็ตเฉลี่ยในคิวโดยไม่รวม 1 แพ็กเก็ตที่กำลังได้รับการบริการ และค่านี้ไม่ต้องถูกหารด้วยความน่าจะเป็นในการเข้ามาของแพ็กเก็ต

(6) ขนาดของแพ็กเก็ต (packet sizes) ขนาดของแพ็กเก็ตมีผลต่อเวลาในการให้บริการ ขนาดแพ็กเก็ตที่มากทำให้ใช้เวลานานในการบริการ ดังนั้นจึงส่งผลถึงความหน่วงของระบบ จึงเกิดแนวความคิดที่จะหาว่าขนาดของแพ็กเก็ตต่างๆ มีผลต่อค่านองอย่างไร ขนาดของแพ็กเก็ตที่ใช้จะอ้างอิงจากขนาดของแพ็กเก็ตที่มีการใช้จริงในระบบเครือข่าย เช่นขนาด 512 ไบต์ซึ่งเป็นขนาดของแพ็กเก็ตที่ใช้กับโปรโตคอลทีซีพี/ไอพี (Touch, J. et al, 1996) ขนาด 1500 ไบต์ เป็นขนาดแพ็กเก็ตอีเธอร์เน็ต (Katz, D., 1989) ขนาด 4500 ไบต์ เป็นขนาดของ Fiber Distributed Data Interface (FDDI) (Katz, D., 1989) และขนาด 9180 ไบต์ เป็นขนาดทีซีพีบนเครือข่ายเอทีเอ็ม (Laubach, M. and Halpern, J., 1998)

ในการทดลองนี้จะใช้แพ็กเก็ตที่มีขนาดต่าง ๆ กัน โดยอ้างอิงจากขนาดของแพ็กเก็ตที่มีการใช้จริงในระบบเครือข่าย ได้แก่ขนาด 512, 1500 และ 4500 ไบต์

(7) ค่าเฉลี่ยของคิวแบบ Geom/Geom/1 เป็นค่าทางสถิติตัวหนึ่งที่ใช้ในการบอกว่าต้องทำการจำลองนานเพียงใด จึงจะได้ค่าที่เชื่อถือได้ ซึ่งค่านี้มีค่าเท่ากับ  $\frac{P}{q(1-\rho)}$  (McKeown, 2001)

(8) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของคิว Geom/Geom/1 เป็นค่าทางสถิติอีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการบอกว่าต้องทำการจำลองนานเพียงใด จึงจะได้ค่าที่เชื่อถือได้ ซึ่งค่านี้มีค่าเท่ากับ  $\frac{P}{q(1-\rho)}$  (วิธีหาค่าดูใน

ภาคผนวก)

(9) ค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบเบร์นูลลีมีค่าเท่ากับ  $p$  ค่าความแปรปรวนมีค่าเท่ากับ  $p(1-p)$

### 6.3 ข้อกำหนดของแบบจำลอง

#### 6.3.1 ข้อตกลงเบื้องต้น

- (1) ทำการจำลองที่สภาวะคงตัว (steady state)
- (2) ข้อมูลที่เข้ามาเป็นแบบแบร์นูลลี
- (3) การให้บริการเป็นแบบแบร์นูลลี
- (4) ข้อมูลมีขนาดคงที่
- (5) เวลาถูกแบ่งออกเป็นสล็อตที่เรียกว่าสล็อตเวลา
- (6) ให้  $N$  เป็น 640
- (7) อัตราเร็วของการรับส่งข้อมูลของเส้นทางเชื่อมต่อเป็น 160 กิกะบิตต่อวินาที

#### 6.3.2 การแบ่งกลุ่มการทดลอง

ในการจำลองแบบครั้งนี้จะทำการแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุดคือ

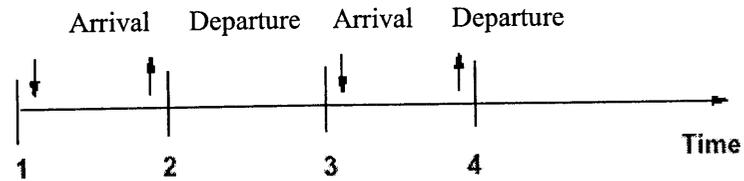
- (1) ทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของคิวระหว่างขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับ คิว 3 มิติ และ FFF
- (2) ทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าห้วงเฉลี่ยระหว่างขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับ คิว 3 มิติ และ FFF
- (3) ทำการหาค่าห้วงเฉลี่ยเทียบกับค่าโพลดแฟกเตอร์ต่างๆ ที่ขนาดของแพ็กเก็ตต่างๆ ของขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ
- (4) ทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลที่ความน่าจะเป็นการเข้ามาของแพ็กเก็ตเกิดต่างๆ กันระหว่าง ขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ และ FFF

### 6.4 วิธีทำการจำลองแบบ

#### 6.4.1 จำลองการเกิดของข้อมูลในระบบ

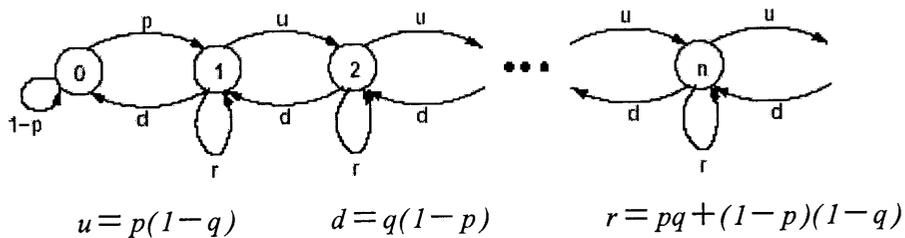
การจำลองแบบครั้งนี้ใช้รูปแบบของคิวที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time queueing model) ซึ่งในส่วนของขบวนการเข้ามาของแพ็กเก็ตจะเป็นแบบแบร์นูลลีที่เป็นอิสระและมีการกระจายแบบเดียวกัน (bernoulli independently and identically distributed : i.i.d) การให้บริการมีการกระจายแบบแบร์นูลลี

จากภาพที่ 15 แพ็กเก็ตเข้ามา ณ ระยะเวลาเริ่มต้นของสล็อตเวลาและออกไป ณ จุดสุดท้ายของสล็อตเวลา มีอย่างมากเพียง 1 แพ็กเก็ตที่เข้ามา และอย่างมากเพียง 1 แพ็กเก็ตที่ออกไปในแต่ละสล็อตเวลา



ภาพที่ 15 การเข้าและออกของแพ็กเก็ตในสล็อตเวลาหนึ่งๆ

ให้  $Q(t)$  = ขนาดของคิว (queue size) ณ เวลา  $t$  หลังการมาถึงและก่อนการออกไป ดังนั้น  $Q(t)$  เป็นห่วงโซ่มาร์คอฟแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete-time markov chain) มีสเปซสถานะเป็น  $\{0, 1, 2, \dots\}$  และมีผังแสดงการเปลี่ยนสถานะ (transition diagram) ดังภาพที่ 16 จากผังดังกล่าว จะเห็นว่าเป็นลักษณะของห่วงโซ่ของการเกิด-ดับ (birth-death chain) โดยมีค่าความน่าจะเป็นของการเกิดเป็น  $u = p(1 - q)$  และค่าความน่าจะเป็นของการดับเป็น  $d = q(1 - p)$  และเมตริกซ์ของการเปลี่ยนสถานะ (transition matrix) มีลักษณะดังภาพที่ 17



ภาพที่ 16 ผังแสดงการเปลี่ยนสถานะ

เนื่องจากระบบเข้าสู่สถานะคงที่จึงสามารถหาเวกเตอร์ของความน่าจะเป็นได้ จากสมการ  $\pi = \pi P$

จะได้ว่า  $\pi_0 = (1 - p)\pi_0 + d\pi_1; \pi_0 = \frac{d}{p}\pi_1$  และ  $\pi_1 = p\pi_0 + r\pi_1 + d\pi_2; u\pi_1 = d\pi_2$

สำหรับ  $i \geq 2, \pi_i = u\pi_{i-1} + r\pi_i + d\pi_{i+1} = u\pi_i = d\pi_{i+1}$

ดังนั้น  $\pi_i = \left(\frac{u}{d}\right)^{i-1} \pi_1, i \geq 1$ , และ  $\pi_0 = \frac{q(1 - p)}{p} \pi_1$  (1)

$$P = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} (1-p) & p & 0 & 0 & \dots \\ d & r & u & 0 & 0 & \dots \\ 0 & d & r & u & 0 & \dots \\ \vdots & & & & & \vdots \\ 0 & \dots & d & r & u & 0 \dots \\ \vdots & & & & & \vdots \end{bmatrix}$$

ภาพที่ 17 เมทริกซ์ของการเปลี่ยนสถานะ

เนื่องจาก  $\sum_{i \geq 0} \pi_i = 1$  จะได้  $\pi_1 = \frac{p(q-p)}{q^2(1-p)}$  และ  
 $u < d$  เป็นสิ่งที่จำเป็น ไม่เช่นนั้นแล้ว  $\sum_{i \geq 0} \pi_i = \infty$

ให้  $\rho = \frac{u}{d}$  จะได้ว่า  $\pi_i = \frac{p(1-\rho)}{q}$  (2)

เมื่อ  $\rho$  คือ โหลดแฟคเตอร์

และ  $\pi_i = \pi_1 \rho^{i-1}, i \geq 1$  (3)

จากสมการที่ (1) (2) (3) สามารถนำมาหาเวกเตอร์ความน่าจะเป็น  $\pi$  สำหรับแต่ละสถานะได้  
 ดังผังลำดับงานการหาค่า  $\pi$  ในภาพที่ 18

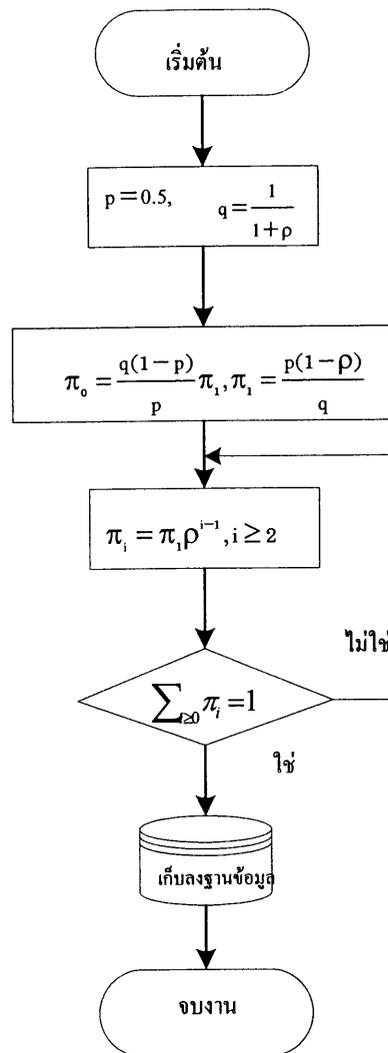
#### 6.4.2 การทดลอง

(1) การทดลองชุดที่ 1 ทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของคิวระหว่างขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ และ FFF การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของคิวที่โหลดแฟคเตอร์ต่าง ๆ ของทั้ง 2 ขั้นตอนวิธี การทดลองนี้กำหนดให้การเข้าสู่ระบบมีการแจกแจงแบบแบร์นูลลีด้วยความน่าจะเป็น  $p$  เท่ากับ 0.5 และโหลดแฟคเตอร์มีค่าเป็น 0.01, 0.02, 0.03, ..., 0.09, 0.1, 0.2, ..., 0.9 จาก  $\rho = \frac{u}{d}$  ซึ่ง  $u = p(1-q)$  และ  $d = q(1-p)$  ทำให้สามารถคำนวณหาค่า  $q$  ณ ค่าโหลดแฟคเตอร์ต่าง ๆ กันได้ จากนั้นทำการจำลอง ณ สถานะคงตัว แล้วหาค่าเฉลี่ยของแพ็กเก็ตในคิว ทำการทดลองจนกระทั่งได้ค่าเฉลี่ยและเบี่ยงเบนมาตรฐานของแพ็กเก็ตในคิวเท่ากับ  $\frac{P}{q(1-\rho)}$  ซึ่งเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแพ็กเก็ตในคิว Geom/Geom/1 ดังผังลำดับงานในภาพที่ 19

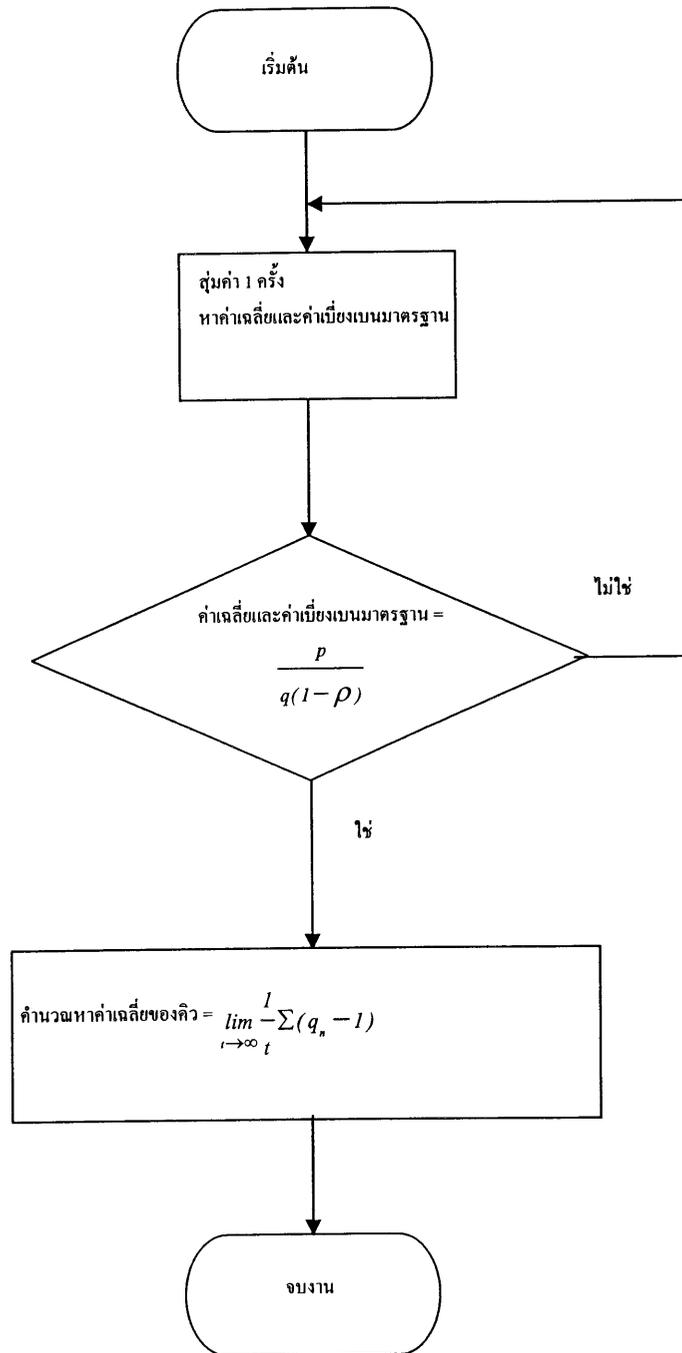
(2) การทดลองชุดที่ 2 ทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าหน่วยเฉลี่ยระหว่างขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ และ FFF การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะเปรียบเทียบค่าหน่วยเฉลี่ยของแพ็กเก็ตที่โหนดแพคเตอร์ต่าง ๆ ของทั้ง 2 ขั้นตอนวิธี

การทดลองนี้กำหนดให้การเข้าสู่ระบบมีการแจกแจงแบบแบร์นูลลีด้วยความน่าจะเป็นการเข้าสู่ระบบของแพ็กเก็ตเฉลี่ยเป็น 0.5 และ โหนดแพคเตอร์มีค่าเป็น 0.01, 0.02, 0.03, ..., 0.09, 0.1, 0.2, ..., 0.9, 0.91, ..., 0.99 จาก  $\rho = \frac{u}{d}$  ซึ่ง  $u = p(1-q)$  และ  $d = q(1-p)$  ทำให้สามารถคำนวณหาค่า  $q$  ณ ค่าโหนดแพคเตอร์ ต่างๆ กันได้ จากนั้นทำการจำลอง ณ สถานะคงตัว แล้วหาค่าหน่วยเฉลี่ยของแพ็กเก็ตในคิว ทำการทดลองจนกระทั่งได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแพ็กเก็ตในคิว เท่ากับ  $\frac{p}{q(1-p)}$  ซึ่งเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแพ็กเก็ตในคิว Geom/Geom/1 ดังผังลำดับงานใน

ภาพที่ 20

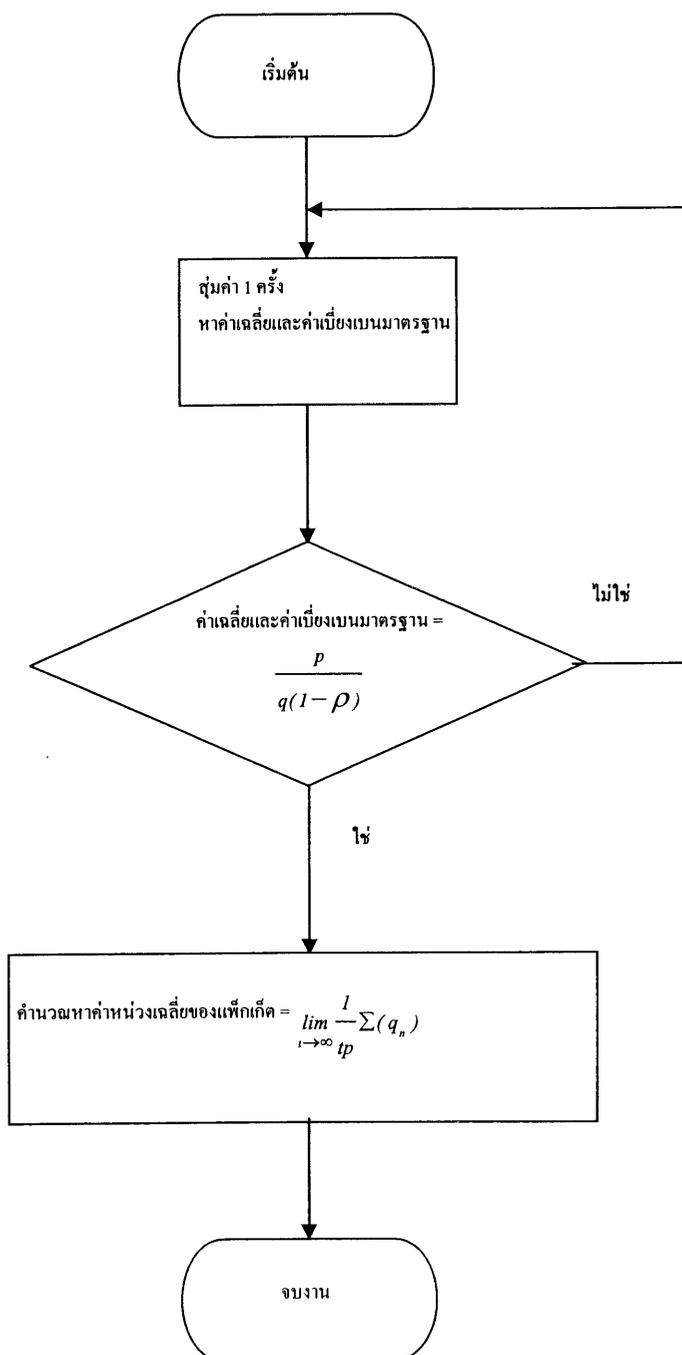


ภาพที่ 18 ฟังก์ชันการหา ค่า  $\pi$



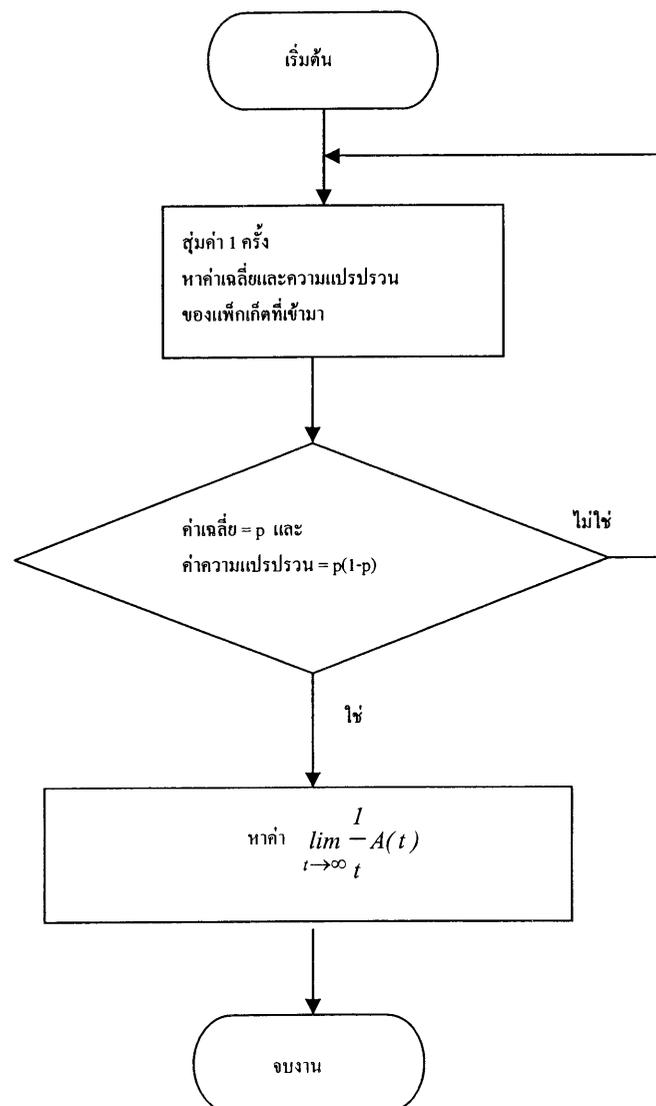
ภาพที่ 19 ผังลำดับงานการหาค่าเฉลี่ยของคิว

(3) การทดลองชุดที่ 3 หาค่าหน่วยเฉลี่ยเทียบกับค่าโหลดแฟคเตอร์ต่าง ๆ ของ ขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ ที่ขนาดของแพ็กเก็ตต่าง ๆ กัน การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อที่จะหาว่าขนาดของแพ็กเก็ตมีผลต่อค่าหน่วยเฉลี่ยอย่างไร ณ ค่าโหลดแฟคเตอร์ต่างๆ ในการ ทดลองนี้จะทำคล้ายกับการทดลองชุดที่ 2 แต่จะทำการหาค่าหน่วยเฉลี่ยของแพ็กเก็ตที่เข้ามาที่มี ขนาด 512, 1500, และ 4500 ไบต์



ภาพที่ 20 ฟังลำดับงานการหาค่าหน่วยของแพ็กเก็ต

(4) การทดลองชุดที่ 4 ทำการหาค่าประสิทธิผลของขั้นตอนวิธี ASF-RR ร่วมกับ คิว 3 มิติ เปรียบเทียบกับ FFF โดยกำหนดให้การเข้าสู่ระบบมีการแจกแจงแบบแบร์นูลลีด้วยความน่าจะเป็นการเข้าสู่ระบบของแพ็กเก็ตมีค่าตั้งแต่ 0.1, 0.2, ..., 0.9, 1.0 ทำการทดลองจนกระทั่งได้ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของค่าจากการทดลอง ณ แต่ละค่าของความน่าจะเป็นในการเข้ามาของแพ็กเก็ตมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนสำหรับการแจกแจงแบบแบร์นูลลี ดังผังลำดับงานในภาพที่ 21 จากนั้นหาค่าประสิทธิผล แล้วทำการเปรียบเทียบกับ FFF



ภาพที่ 21 ผังลำดับงานการหาค่าประสิทธิผลของ ASF-RR ร่วมกับคิว 3 มิติ

### 6.4.3 การประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการจำลอง

การประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการจำลองแบบ ณ สภาวะคงตัวมีดังนี้

กำหนดให้

$q_n$  เป็นจำนวนแพ็กเก็ตเกิดในคิว ซึ่งรวมแพ็กเก็ตที่กำลังได้รับการ

$t$  เป็นจำนวนสล็อตเวลา

$p$  คือความน่าจะเป็นการเข้ามาของแพ็กเก็ต = 0.5

$A(t)$  เป็นจำนวนแพ็กเก็ตสะสมที่เข้ามาสู่ระบบ ณ สล็อตเวลา  $t$

(1) ค่าเฉลี่ยของคิว

$$= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum (q_n - 1)$$

(2) ค่าหน่วยเฉลี่ย (สล็อตเวลา)

$$= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{tp} \sum (q_n)$$

(3) ค่าหน่วยเฉลี่ย (วินาที)

$$= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{tp \times 160} \sum (q_n) \times 8 \times 10^{-9} \times \text{ขนาดของแพ็กเก็ต (ไบต์)}$$

(4) ค่าประสิทธิภาพ

$$= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} A(t)$$