

การศึกษาสมรรถนะของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM  
An Investigation of the Performance of TCP/IP over ATM Networks



สกุณา เจริญปัญญาศักดิ์  
Sakuna Charoenpanyasak

0

เลขหมู่	TK ๕๑๐๘.๕๘๘	ส ๒๗	๒๕๔๔	ค. ๒
Bib Key	210581			
	๕ ส.ย. ๒๕๔๔			

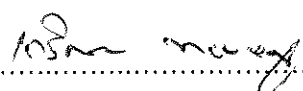
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
Master of Engineering Thesis in Electrical Engineering  
Prince of Songkla University

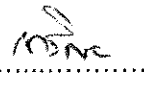
2544

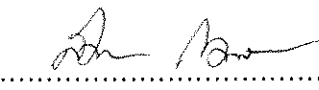
ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาสมรรถนะของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM  
ผู้เขียน นางสาว สกฤณา เจริญปัญญาศักดิ์  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

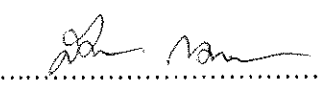
คณะกรรมการที่ปรึกษา

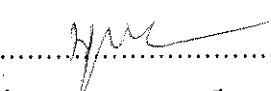
คณะกรรมการสอบ

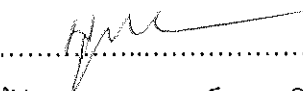
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

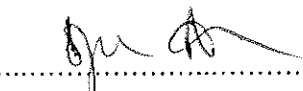
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

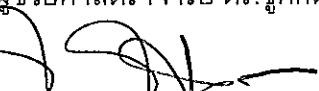
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินชัย กมลวิวงศ์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินชัย กมลวิวงศ์)


.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาจัน จิระพัฒน์พัฒนา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

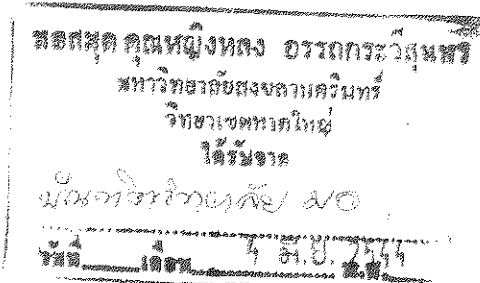
  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติ ทฤษฎีคุณ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์      การศึกษาสมรรถนะของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM  
ผู้เขียน                นางสาว สกฤณา เจริญปัญญาศักดิ์  
สาขาวิชา              วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา            2543

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการศึกษาสมรรถนะของ TCP/IP บนการบริการแบบ Available Bit Rate (ABR) และ Unspecified Bit Rate (UBR) ในการทำงานร่วมกับบริการแบบ Variable Bit Rate (VBR) ในโครงข่าย Asynchronous Transfer Mode (ATM) จากการศึกษาพบว่าส่วนใหญ่บทความที่วิจัยในหัวข้อเรื่องการศึกษาสมรรถนะของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM จะศึกษาสวิตช์ ATM จำนวนน้อยซึ่งในบางกรณีบางเงื่อนไขอาจจะมีปัญหาบนโครงข่ายที่มีจำนวนสวิตช์ ATM มากขึ้น จึงมีความสนใจในการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกับสวิตช์ ATM ในโครงข่ายที่มีจำนวนมาก เราจึงได้จำลองการทำงานออกเป็น 2 แบบคือ สวิตช์ ATM จำนวนน้อย (โมเดล 2 สวิตช์) และสวิตช์ ATM จำนวนใหญ่ (โมเดล 25 สวิตช์) เพื่อแสดงให้เห็นว่าสวิตช์ ATM จำนวนน้อยที่ใช้ TCP/IP กับรูปแบบของ ABR ทำงานร่วมกับ VBR เมื่อขนาดบัฟเฟอร์มีค่าเท่ากับ 500 เซลล์จะให้ประสิทธิภาพและสมรรถนะดีกว่า 25 สวิตช์อยู่ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มขนาดบัฟเฟอร์เป็น 10,000 เซลล์จะทำให้ประสิทธิภาพและสมรรถนะดีกว่า 25 สวิตช์เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อใช้การบริการแบบอื่นๆ เช่น การบริการแบบ ABR, การบริการแบบ UBR และการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR จะให้ค่าประสิทธิภาพและสมรรถนะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อจำนวนสวิตช์เปรียบเทียบระหว่าง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ ดังนั้นสรุปได้ว่าการศึกษาสมรรถนะการทำงาน of TCP/IP บนการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR บนโครงข่าย ATM จะทำงานไม่มีประสิทธิภาพเมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขที่มีการขยายขนาดของโครงข่าย ส่วนการบริการแบบ UBR และการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR ที่ใช้การควบคุมสภาวะการคับคั่งของข้อมูลโดยทดสอบด้วยอัลกอริทึมที่ปรับปรุงใหม่พบว่าเมื่อแบบจำลองนำมาทดสอบโดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน Throughput และ Fairness ของอัลกอริทึมที่ปรับปรุงใหม่มีค่าสูงกว่าการใช้อัลกอริทึมตัวเดิม



Thesis Title            An Investigation of the Performance of TCP/IP over ATM Networks  
Author                    Ms. Sakuna Charoenpanyasak  
Major Program        Electrical Engineering  
Academic Year        2000

#### Abstract

In this thesis, we present the performance study of TCP/IP over ABR and UBR services in presence of VBR traffic in ATM networks. There is a number of performance studies carried out in this research topic but so far no any literature has shown the result in a large number of ATM switches conditions. To that end, we set up two simulation scenarios: a small number of ATM switches (2-switch model) and a large number of ATM switches (25-switch model). We have shown that with a small number of travelling nodes (2-switch model) TCP/IP with ABR services in presence of VBR traffic when buffer size 500 cell for efficiently and system throughput of 25-switch model is around 10 percent lower than 2-switch model. But when increases buffer size 10,000 cell for efficiently and system throughput of 25-switch model is around 50 percent lower than 2-switch model. For other service classes such as ABR and UBR services and UBR services in presence of VBR traffic, the results of these simulations perform similarly and efficiently with comparison between 2-switch and 25-switch. We conclude that TCP/IP over ABR services in presence of VBR traffic in ATM networks does not perform efficiently on a large scale network conditions. With new proposed algorithm of UBR service, the simulation results have shown that System throughput and fairness have a significant improvement compared with ABR service even on a large number of ATM switches and long propagation time delay in presence of VBR traffic conditions.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนในด้านต่างๆเป็นอย่างดีไม่ว่าจะเป็นทำให้คำปรึกษา การแนะนำความรู้ในด้านต่างๆ เอกสารข้อมูล อุปกรณ์ในการทำวิจัยต่างๆ รวมทั้งกำลังใจในการแก้ปัญหา ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินชัย กมลภิงค์ เป็นบุคคลหนึ่งที่สำคัญต่องานวิจัยนี้ ที่กรุณาให้การสนับสนุนในด้านต่างๆเป็นอย่างดีไม่ว่าจะเป็นทำให้คำปรึกษา การแนะนำให้ความรู้ในทุกๆด้าน เช่น เอกสารข้อมูลที่ทันสมัยอยู่เสมอ อุปกรณ์ในการทำงานวิจัย รวมทั้งกำลังใจและสอนให้รู้จักการแก้ปัญหาด้วยตัวเอง ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยและการช่วยเหลือในการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆสำหรับการทำวิจัยตลอดจนช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาจัน จิรัชพีพัฒนา ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยและช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และ บุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในด้านต่างๆที่สำคัญจนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ ทุนการศึกษาของมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสารที่ได้ให้การสนับสนุนในเรื่องทุนการศึกษาตลอดระยะเวลา 2 ปีการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่นอและรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและกำลังใจเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

และที่สำคัญที่สุด ข้าพเจ้าขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของ บิดามารดา และครอบครัวที่ส่งเสริมและสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆเรื่องตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สกุณา เจริญปัญญาศักดิ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
Abstract.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
รายการตาราง.....	(9)
รายการภาพประกอบ.....	(13)
ตัวย่อและสัญลักษณ์.....	(19)

### บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย.....	1
1.2 การตรวจเอกสาร.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ทฤษฎีและหลักการทำงาน.....	7
2.1 การสื่อสารในชั้นโพรโตคอล ATM.....	7
2.1.1 ลักษณะเด่นของ ATM.....	8
2.1.2 รูปโครงสร้างของเซลล์.....	8
2.1.3 รูปแบบของชั้นสื่อสาร ATM.....	12
2.1.4 ประเภทการรับส่งข้อมูลของโครงข่าย ATM.....	14
2.1.5 คุณภาพของการให้บริการ.....	16
2.1.6 การจัดการการเชื่อมต่อ.....	16
2.2 การสื่อสารในชั้นโพรโตคอล TCP.....	18
2.2.1 รูปแบบบริการของ TCP.....	19
2.2.2 โพรโตคอล TCP.....	20

2.2.3	ข้อมูลส่วนหัวของ TCP เซกเมนต์.....	21
2.2.4	การควบคุมความคับคั่งของข้อมูลในโพรโตคอล TCP.....	24
2.2.4.1	Slow Start and Congestion Avoidance.....	24
2.2.4.2	Fast Retransmit and Recovery (FRR).....	25
2.2.4.3	Selective Acknowledgments (SACK).....	26
2.2.5	วิธีการนำพาแพ็กเก็ต.....	27
2.3	ชั้นโพรโตคอลของ TCP และ ATM .....	28
2.4	สมรรถนะของ TCP บนโครงข่าย ATM.....	29
2.4.1	TCP บนการบริการแบบ ABR.....	30
2.4.2	TCP บนการบริการแบบ UBR.....	31
2.5	IP บนโครงข่าย ATM.....	31
2.6	สรุป.....	32
3	อัลกอริทึมควบคุมความคับคั่งของข้อมูล.....	33
3.1	แนวความคิดพื้นฐานในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล.....	35
3.2	หลักเกณฑ์ในการหลีกเลี่ยงความคับคั่งของข้อมูล.....	38
3.3	หลักการควบคุมการรับส่งข้อมูล.....	40
3.4	การควบคุมลักษณะของทราฟฟิก.....	44
3.5	การควบคุมแบบป้อนกลับ.....	44
3.6	วิธีการควบคุมการคับคั่งของข้อมูลสำหรับ TCP/IP บนโครงข่าย ATM.....	45
3.6.1	อัลกอริทึม Explicit Rate Indication for Congestion Avoidance..... (ERICA <sup>+</sup> )	46
3.6.2	อัลกอริทึม Early Packet Discard (EPD).....	47
3.6.3	อัลกอริทึม Random Early Dection (RED).....	47
3.7	อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่.....	49
3.7.1	อัลกอริทึม EPD ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม RED.....	49
3.7.2	อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่ร่วมกับ RED.....	50
3.7.3	อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่รวมกับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์.....	51
3.8	สรุป.....	52
4	แบบจำลองการทำงาน.....	53

4.1	วิธีสร้างแบบจำลองการทำงาน.....	53
4.2	พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง.....	55
4.3	แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM .....	59
4.3.1	แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้.....	59
	การบริการแบบ ABR	
4.3.2	แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้.....	60
	การบริการแบบ UBR	
4.3.3	แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้.....	61
	การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR	
4.3.4	แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้.....	63
	การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR	
4.4	สรุป.....	64
5	ผลการทดสอบแบบจำลองและการวิเคราะห์ผล.....	65
5.1	ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR.....	65
5.2	ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR.....	70
5.3	ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR.....	82
5.4	ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR.....	98
5.5	สรุป.....	114
6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	118
6.1	สรุปลักษณะการทำงานของกรบริการแบบ UBR และการบริการแบบ ABR.....	118
6.2	สรุปผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง.....	119
6.3	สรุปข้อดีข้อเสียของการทดสอบแบบจำลองด้วยอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่..	120
6.4	บทวิจารณ์และข้อเสนอแนะ.....	121
	บรรณานุกรม.....	125
	ภาคผนวก.....	128
	ภาคผนวก ก วิธีการติดตั้งการทำงานของ Simulator NIST.....	128
	ภาคผนวก ข Parameter Information.....	129
	ภาคผนวก ค การแปล.....	140
	ประวัติผู้เขียน.....	142



รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2-1 แสดงประเภทข้อมูลในส่วน PTI	11
2-2 แสดงคำสั่งที่มีใช้ในระหว่างการจัดตั้งวงจรเสมือน	17
3-1 หลักเกณฑ์ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูลในชั้นสื่อสารต่างๆ	39
3-2 แสดงรูปแบบของเซลล์ RM	43
4-1 ค่าเฉลี่ยของการบริการแบบ VBR	55
4-2 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม EPD	57
4-3 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม RED	57
4-4 ค่า Z เมื่อจุดเริ่มเปลี่ยนสูงสุดเท่ากับ 400 เซลล์ และค่าขนาดของบัฟเฟอร์ เท่ากับ 500 เซลล์	58
4-5 ค่า Z เมื่อจุดเริ่มเปลี่ยนสูงสุดเท่ากับ 8,000 เซลล์ และค่าขนาดของบัฟเฟอร์ เท่ากับ 10,000 เซลล์	59
4-6 แสดงค่าพารามิเตอร์โดยทั่วไปที่ใช้ในแบบจำลองทุกตัว	64
5-1 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR	65
5-2 แสดงค่าเบี่ยงเบน และThroughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ เมื่อแบบจำลอง มีการบริการแบบ ABR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ เท่ากับ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์	68
5-3 แสดงค่าเบี่ยงเบน และThroughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ เมื่อแบบจำลอง มีการบริการแบบ ABR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ เท่ากับ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์	69
5-4 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR และมีขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์	70
5-5 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างอัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ เมื่อแบบจำลอง มีการบริการแบบ UBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์	74

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
5-6 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างอัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ เมื่อแบบจำลอง มีการบริการแบบ UBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์	75
5-7 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR และมีขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์	76
5-8 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างอัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ เมื่อแบบจำลอง มีการบริการแบบ UBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์	80
5-9 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างอัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ เมื่อแบบจำลอง มีการบริการแบบ UBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์	81
5-10 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์	82
5-11 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วย การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ,แหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์	87
5-12 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์	88
5-13 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วย การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ,แหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์	90
5-14 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ประกอบด้วย แหล่งข้อมูล 20 การเชื่อมต่อ ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์	91

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
5-15 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วย การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ,แหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์	94
5-16 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ประกอบด้วยแหล่งข้อมูล 20 การเชื่อมต่อ ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์	95
5-17 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลอง ประกอบด้วยการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ,แหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์	97
5-18 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR และมีแหล่งข้อมูล 10 การเชื่อมต่อ ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่	98
5-19 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลองที่ทดสอบด้วยอัลกอริทึม EPD และ อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละ การเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วยการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR, แหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อและมีขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์	101
5-20 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR และมีแหล่งข้อมูล 10 การเชื่อมต่อ ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่	102
5-21 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลองที่ทดสอบด้วยอัลกอริทึม EPD และ อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละ การเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วยการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR, แหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อและมีขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์	105
5-22 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR และมีแหล่งข้อมูล 20 การเชื่อมต่อ ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และ ใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่	106

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
5-23 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วยบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR, แหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อและมีขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์	109
5-24 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้บริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR และมีแหล่งข้อมูล 20 การเชื่อมต่อ ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่	110
5-25 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วยบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR, แหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์	113
5-26 สรุปค่า Throughput ทั้งหมดที่ได้มาจากการทดสอบแบบจำลอง	115
5-26 สรุปค่า Utilization ทั้งหมดที่ได้มาจากการทดสอบแบบจำลอง	116
5-27 สรุปค่า Fairness ทั้งหมดที่ได้มาจากการทดสอบแบบจำลอง	117
6-1 สรุปค่า Max Throughput	123

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2-1 แสดงลักษณะ ATM Cell Format at the UNI and NNI	9
2-2 แสดงโครงสร้างข้อมูลส่วนหัวของ ATM	10
2-3 แสดงรูปแบบของชั้นสื่อสาร	12
2-4 แสดงคุณลักษณะของการบริการแต่ละประเภทในโครงข่าย ATM	14
2-5 (a) ขั้นตอนการจัดตั้งวงจรเสมือนในระบบ ATM (b) ขั้นตอนการยกเลิกการสื่อสาร	18
2-6 ข้อมูลส่วนหัวของ TCP แพ็กเก็ต	22
2-7 TCP Slow Start and Congestion Avoidance	25
2-8 TCP Fast Retransmit and Recovery	26
2-9 TCP Selective Acknowledgments	27
2-10 วิธีการนำพาแพ็กเก็ต	28
2-11 TCP over ATM protocol stack	29
3-1 แสดงปริมาณข้อมูลในระบบโครงข่ายที่มากเกินไป	33
3-2 แสดงลักษณะ Preventive Flow Control และ Reactive Flow Control	41
3-3 แสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมการรับส่งแบบ FECN	42
3-4 แสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมแบบการป้อนกลับ (a) แบบต้นทาง-ปลายทาง (b) แบบต้นทาง-กลางทาง	45
3-5 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม EPD	47
3-6 (a) แสดงการทำงานของอัลกอริทึม RED โดยการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์	48
3-6 (b) เริ่มคำนวณความน่าจะเป็นในการทิ้งเซลล์ของอัลกอริทึม RED	48
3-7 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม EPD ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม RED	50
3.8 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่ร่วมกับ RED	51
3.9 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่รวมกับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์	52
4-1 แสดงการบริการของ VBR ที่มีลักษณะเป็น ON-OFF	54
4-2 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์กับการบริการแบบ ABR	59
4-3 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์กับการบริการแบบ ABR	60
4-4 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์กับการบริการแบบ UBR	60
4-5 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์กับการบริการแบบ UBR	61

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4-6 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์กับการบริการแบบ (ABR+VBR)	62
4-7 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์กับการบริการแบบ (ABR+VBR)	62
4-8 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์กับการบริการแบบ (UBR+VBR)	63
4-9 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์กับการบริการแบบ (UBR+VBR)	64
5-1 เปรียบเทียบจำนวนเซลล์ที่อยู่ในขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และ 10,000 เซลล์	66
5-2 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์	67
5-3 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์	67
5-4 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์	71
5-5 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์	71
5-6 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์	72
5-7 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์	72
5-8 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์	77

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5-9 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์	77
5-10 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์	78
5-11 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์	78
5-12 แสดงการบริการแบบ VBR ที่มีลักษณะของ ON เท่ากับ 2 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 8 มิลลิวินาที	83
5-13 แสดงการบริการแบบ VBR ที่มีลักษณะของ ON เท่ากับ 3 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 7 มิลลิวินาที	83
5-14 แสดงการบริการแบบ VBR ที่มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	84
5-15 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	84
5-16 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	85
5-17 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การทิ้งเซลล์ระหว่างจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมี แหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และการบริการ แบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	85

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5-18 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 3 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 7 มิลลิวินาที	88
5-19 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 3 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 7 มิลลิวินาที	89
5-20 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 3 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 7 มิลลิวินาที	91
5-21 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 3 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 7 มิลลิวินาที	92
5-22 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การทิ้งเซลล์ระหว่างจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 3 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 7 มิลลิวินาที	92
5-23 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	95



รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5-24 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	96
5-25 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	100
5-26 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPDที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	100
5-27 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	104
5-28 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPDที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	104
5-29 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPDซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และOFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	107

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5-30 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	108
5-31 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	111
5-32 แสดงค่า Throughput และFairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที	112

## ตัวย่อและสัญลักษณ์

$\alpha$	= ค่าเฉลี่ยของโหลด
AAL	= ATM Adaptation Layer
AAL1	= ATM Adaptation Layer Type 1
AAL2	= ATM Adaptation Layer Type 2
AAL3/4	= ATM Adaptation Layer Type 3/4
AAL5	= ATM Adaptation Layer Type 5
ABR	= Available Bit Rate
ACR	= Allowed Cell Rate
ATM	= Asynchronous Transfer Mode
B-ISDN	= Broadband ISDN
BN	= BECN Indicator
BRM	= Backward RM-cell
BTE	= Broadband Terminal Equipment
CAC	= Connection Admission Control
CBR	= Constant Bit Rate
CCR	= Current Cell Rate
CI	= Congestion Indication
CLP	= Cell Loss Priority
CLR	= Cell Loss Ratio
CS	= Convergence Sublayer
CWND	= Congestion Window
DER	= Desired Explicit Rate
DES	= Destination End-System
DIR	= Direction
EFCI	= Explicit Forward Congestion Indication
EPD	= Early Packet Discard
ER	= Explicit Rate

### ตัวอย่างและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ERICA	= Explicit Rate Indication for Congestion Avoidance
FECN	= Forward Explicit Congestion Notification
FICC	= Fair Intelligent Congestion Control
FIFO	= First In First Out queue service discipline
FMMRA	= Fast Max-Min Rate Allocation
FRM	= Forward RM-cell
FRR	= Fast Retransmit and Recovery
GCRA	= Generic Cell Rate Algorithm
GFC	= Generic Flow Control
GR	= Guaranteed Rate
HEC	= Header Error Check
ICR	= Initial Cell Rate
IP	= Internet Protocol
ISDN	= Integrated Services Digital Network
ITU	= International Telecommunications Union
LAN	= Local Area Network
MACR	= Mean Allowed Cell Rate
MCR	= Minimum Cell Rate
MSS	= Maximum Segment Size
MTU	= Maximum Transfer Unit
NI	= No Increase (bit in RM-cell)
NNI	= Network Network Interface
Nrm	= Maximum number of cells between RM-cell generation
nrt-VBR	= non-real-time VBR
OAM	= Operations, Administration and Maintenance
PCR	= Peak Cell Rate
PDU	= Protocol Data Unit

## ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

PHY	= Physical Layer
PM	= Physical Medium
PT	= Payload Type
PTI	= Payload Type Indicator
PVC	= Permanent Virtual Connection
QoS	= Quality of Service
RCVWND	= Receiver Congestion Window
RDF	= Rate Decrease Factor
RED	= Random Early Detection
RFC	= Request for Comment
RIF	= Rate Increase Factor
RM	= Resource Management
rt-VBR	= real-time VBR
RTT	= Round-trip Time
SACK	= Selective Acknowledgment
SAR	= Segmentation and Reassemble Sublayer
SSTHRESH	= Slow Start Threshold
SW	= Switch
TC	= Transmission Convergence
TCP	= Transmission Control Protocol
UBR	= Unspecified Bit Rate
UDP	= User Datagram Protocol
UNI	= User Network Interface
VBR	= Variable Bit Rate
VC	= Virtual Connection
VCC	= Virtual Channel Connection
VCI	= Virtual Circuit Identifier

ตัวย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

VPC	= Virtual Path Connection
VPI	= Virtual Path Identifier
VS/D	= Virtual Source / Virtual Destination
WAN	= Wide Area Network

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

การพัฒนาเทคโนโลยีเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอและรวดเร็วทำให้การรวบรวมข้อมูล การสื่อสารข้อมูล การเก็บรักษาข้อมูล และการประมวลผลข้อมูล ได้เกิดเป็นกระบวนการที่ผสมผสานกลมกลืนกัน ดังจะเห็นได้จากองค์กรจำนวนมากในปัจจุบันมีสาขาอยู่ตามสถานที่ต่าง ๆ ซึ่งบางสาขาอาจอยู่ในรัศมีใกล้เคียงกับสำนักงานใหญ่ ในขณะที่สาขาอื่นๆ อาจอยู่ไกลออกไปนับเป็นระยะทางหลายร้อยหรือหลายพันกิโลเมตร ศูนย์การบริหารส่วนกลาง (ที่สำนักงานใหญ่) ต้องสามารถเข้าไปดูแลและตรวจสอบข้อมูลตามสาขาต่างๆ ได้ทั้งหมด ในขณะที่เดียวกันสาขาต่างๆ ก็มีความต้องการที่จะใช้ข้อมูลรวมทั้งโปรแกรมและอุปกรณ์บางอย่างที่เก็บรักษาไว้ในศูนย์กลาง การวางโครงสร้างระบบคอมพิวเตอร์ จึงต้องพิจารณาในระดับของแต่ละสาขา แม้ว่าในปัจจุบันความสามารถในการรวบรวมข้อมูล การประมวลผล และการกระจายข่าวสารได้เพิ่มขีดความสามารถขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ความต้องการใช้บริการเหล่านี้กลับเพิ่มมากขึ้นในอัตราที่สูงกว่า

โพรโตคอล(Protocol)หรือกติกาการส่งข้อมูลที่จะนำมาใช้ในโครงข่ายผู้ส่งข้อมูลจะดำเนินการส่งข้อมูลตามกติกาที่ได้ตกลงกันได้ ผู้ส่งข้อมูลจะรับประกันที่จะนำข้อมูลไปส่งให้ตามช่วงเวลาที่เหมาะสม การควบคุมลักษณะของทราฟฟิกจะช่วยลดความคับคั่งของข้อมูล และช่วยให้ผู้นำส่งข้อมูลทั้งหลายสามารถทำตามข้อตกลงได้ กติกาที่ตกลงกันนั้นอาจจะไม่มีความสำคัญนักต่อการจัดส่งเพิ่มข้อมูล แต่จะมีความหมายอย่างยิ่งสำหรับระบบการนำส่งข้อมูลแบบเวลาจริง (Real Time) เช่นการส่งสัญญาณเสียงและสัญญาณภาพเคลื่อนไหว โพรโตคอลที่นำมาใช้ในโครงข่ายได้แก่โพรโตคอลในชั้นนำส่งข้อมูล (Transport Layer) คือโพรโตคอล Transmission Control Protocol(TCP)ซึ่งมีการควบคุมการส่งข้อมูลแบบต้นทาง-ปลายทาง (end-to-end) และโพรโตคอลที่อยู่ในชั้นเชื่อมต่อข้อมูล (Data Link Layer) หมายถึง Asynchronous Transfer Mode (ATM) มีการควบคุมการทำงานแบบโหนดต่อโหนด (hop-by-hop)

โครงข่ายแบบ ATM เป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นโครงข่ายหลัก ทั้งนี้เนื่องด้วย ATM สามารถให้แบนด์วิดท์ในการรับส่งข้อมูลสูงมากถึง 155 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) หรือสูงกว่าและยังสนับสนุนการให้บริการหลายๆอย่าง เช่น ข้อมูลเสียง, วิดีโอ และข้อมูลอื่นๆ ใช้เส้นทางในการส่งข้อมูลบนโครงข่ายได้พร้อมๆกัน การสื่อสารแบบ ATM มีการควบคุมการติดต่อรับ-ส่งข้อมูล

ระหว่างโหนดต่างๆ ในระบบโครงข่ายให้เป็นไปด้วยความเรียบร้อย สิ่งสำคัญที่สุดคือการกำหนดเส้นทางเดินของข้อมูลจากโหนดผู้ส่งข้อมูลไปตามโหนดต่างๆ จนถึงโหนดผู้รับข้อมูลในที่สุด ส่วนการสื่อสารแบบ Transmission Control Protocol / Internet Protocol (TCP/IP) มีความสามารถในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบโครงข่าย เช่นในกรณีที่ผู้ส่งและผู้รับยังคงมีการติดต่อกันอยู่ แต่โหนดกลางที่ใช้เป็นผู้ช่วยรับ-ส่งข้อมูลเกิดเสียหายใช้การไม่ได้ หรือสายสื่อสารบางช่วงถูกตัดขาด กฎการสื่อสารนี้จะต้องสามารถจัดการหาทางเลือกอื่นเพื่อทำให้การสื่อสารดำเนินต่อไปได้โดยอัตโนมัติ จึงมีความสนใจในการนำการสื่อสารทั้งสองแบบมาทำงานร่วมกัน วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาสมรรถนะการทำงานของ TCP/IP บนการบริการแบบ Available Bit Rate (ABR) และการบริการแบบ Unspecified Bit Rate (UBR) ในการทำงานร่วมกับบริการแบบ Variable Bit Rate (VBR) บนโครงข่าย ATM โดยใช้วิธีการจำลองการทำงาน (Simulation) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน และการจัดสรรแบนด์วิดท์อย่างเหมาะสมโดยที่การทำงานแบบ ABR จะใช้อัลกอริทึม (Algorithm) แบบ Explicit Rate Indication for Congestion Avoidance (ERICA<sup>+</sup>) ส่วนการบริการแบบ UBR จะใช้อัลกอริทึมแบบ Early Packet Discard (EPD) ทั้งการบริการแบบ ABR และการบริการแบบ UBR มีเป้าหมายอยู่ที่กลไกการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล (Congestion Control) เพื่อวัดค่าของ Throughput และ Fairness ซึ่งต้องการให้ได้ค่าของประสิทธิภาพการทำงาน (Efficiency) สูงสุด

## 1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 The ATM Forum Traffic Management Specification Version 4.0 (ATM Forum, 1996) ได้แบ่งระดับการให้บริการของโครงข่าย ATM เป็น 4 แบบ เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานแบบต่างๆ ดังนี้ 1. Constant Bit Rate (CBR) 2. Variable Bit Rate (VBR) 3. Available Bit Rate (ABR) 4. Unspecified Bit Rate (UBR)

1.2.2 Performance of TCP Over ATM with Time-Varying Available bandwidth (KAI-YEUNG S., 1996) เป็นบทความที่ได้ปรับปรุงสมรรถนะ TCP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้กับการบริการแบบ ABR และ UBR+EPD ผลที่ได้พบว่า Throughput ของ ABR และ UBR+EPD ให้ค่าใกล้เคียงกัน แต่ Fairness ของ ABR จะดีกว่า UBR+EPD

1.2.3 TCP/IP traffic over ATM networks with ABR flow and Congestion Control (LIPING A., 1997) เป็นบทความที่เปรียบเทียบสมรรถนะของ TCP/IP ที่เป็นการบริการแบบ ABR



โดยใช้อัลกอริทึมแบบ EFCI (Explicit Forward Congestion Indication), ERICA (Explicit Rate Indication for Congestion Avoidance) และ FMMRA (Fast Max-Min Rate Allocation) จากผลการทดสอบพบว่าอัลกอริทึม FMMRA ให้ค่า Throughput สูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมตัวอื่น

1.2.4 Performance Improvement of TCP over EFCI-Based ABR Service Class by Tuning of Congestion Control Parameters (Hasegawa, T., et al.,1997) เป็นบทความที่ศึกษาสมรรถนะของโพรโตคอล TCP บนโครงข่าย ATM โดยใช้เทคนิคในการทดสอบแบบจำลองที่ระดับ ATM Layer ซึ่งพิจารณา ดังนี้

1. การบริการแบบ UBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD กับ Per-VC Accounting ซึ่งพบว่าเทคนิค Per-VC Accounting สามารถปรับปรุงค่า Fairness โดยการสร้างแบบจำลองที่มีโครงข่ายแบบ Multi-hop Network

2. การบริการแบบ ABR ที่ใช้ การควบคุมแบบ Rate Based Flow Control ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ABR จะให้ Throughput สูงสุด และ Fairness ดีที่สุด อย่างไรก็ตามสมรรถนะของ TCP บน การบริการแบบ ABR จะมีค่าลดลง แต่สามารถปรับปรุงโดยใช้เทคนิค EPD ร่วมกับ ABR และปรับค่าของพารามิเตอร์ให้เหมาะสม ซึ่งได้แก่ Rate Increase Factor (RIF) และ Rate Decrease Factor (RDF)

1.2.5 TCP Performance in ATM Network: ABR Parameter Tuning and ABR/UBR Comparisons (Chien Fang.,1997) เป็นบทความที่เสนอสมรรถนะของ TCP บนโครงข่าย ATM โดยใช้การบริการแบบ ABR พร้อมกับใช้ พารามิเตอร์แบบปรับค่าได้ที่เป็นแบบ Binary Mode คือ RIF และ RDF จะให้สมรรถนะที่ดี แต่ถ้าเลือกค่าพารามิเตอร์ไม่ดีเป็นผลให้สมรรถนะของ ABR น้อยกว่า UBR+EPD

1.2.6 Improving Performance of TCP over ATM-UBR service (Rohit, Goyal.,et al. 1997) ในบทความนี้ศึกษาการปรับปรุงสมรรถนะของ TCP บนการบริการแบบ UBR โดยใช้สวิตช์จะเกี่ยวข้องกับการควบคุมความคับคั่ง ซึ่งจะทำการทิ้งแพ็กเก็ตเมื่อขนาดของบัฟเฟอร์เต็ม ความต้องการบัฟเฟอร์ของสวิตช์เท่ากับผลรวมของ Window Size ในทุกๆ TCP Connections ส่วนการปรับปรุงสมรรถนะของ TCP บนการบริการแบบ UBR ขึ้นอยู่กับความฉลาดในการทิ้งแพ็กเก็ตและข้อจำกัดขนาดของบัฟเฟอร์ เมื่อทดสอบแบบจำลองโดยใช้อัลกอริทึม EPD พบว่าสามารถปรับปรุงค่า Throughput ให้ดีขึ้น แต่ Fairness ยังมีปัญหา

1.2.7 Dynamics of TCP flow control over High Speed ATM Networks (Masatoshi, K., et al.,1998) เป็นบทความที่พิจารณาถึงสมรรถนะของ TCP บน โครงข่าย ATM โดยที่ TCP บน

UBR จะมีการสูญเสียแพ็กเก็ต เนื่องจากสภาวะความคับคั่งของข้อมูล จึงปรับปรุงด้วยวิธีการเพิ่มอัลกอริทึม EPD ผลทำให้ค่า Throughput ดีขึ้น แต่ค่า Fairness ยังคงมีปัญหาอยู่ ส่วนใน TCP บน ABR+ER จะมีสมรรถนะสูง เมื่อไม่มีผลกระทบจากการควบคุมการไหลของข้อมูล และถ้าต้องการปรับปรุงสมรรถนะให้ดีขึ้นก็ใช้การควบคุม TCP ด้วยวิธีการแบบ Implicit หรือ Explicit Congestion

1.2.8 Simulation and Measurement of TCP/IP over ATM Wide Area Networks (Georgios, Y., et al. 1998) การทำนายสมรรถนะของโครงข่าย ATM ที่มีลักษณะเป็น Wide Area Networks (WAN) ทำได้ยากและการคำนวณสมรรถนะโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ยังไม่สามารถทำได้ในขณะนี้ จึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองอื่นขึ้นมาเพื่อใช้ในการทำนายและหาสมรรถนะของระบบ ในบทความนี้ จึงใช้การวัดโดยการสร้างแบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่เป็น WAN ผลก็แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการทำงานที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมสามารถที่จะทำนายสมรรถนะที่ซับซ้อนของโครงข่ายได้

1.2.9 Performance of the Fair Intelligent Congestion for TCP Applications over ATM Networks: A Simulation Analysis (Hoang, D. B. and Yu, Q., 1999) เป็นบทความที่ศึกษาสมรรถนะของ TCP บนโครงข่าย ATM โดยใช้การบริการแบบ ABR กับอัลกอริทึม Fair Intelligent Congestion Control (FICC) โดยที่ส่วนสำคัญจะเป็นค่าของ Throughput, Packet Delay, Delay Variation และ Fairness ผลการทดสอบแบบจำลองพบว่า FICC ให้ค่า Fairness ที่ดี, ความต้องการบัฟเฟอร์ลดลง, Packet Delay Variation ลดลง, พารามิเตอร์เซ็ตง่ายขึ้น และสามารถนำไปสร้างได้ง่าย

### 1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาและตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM

1.3.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของการบริการแบบต่างๆ ที่มีอยู่ใน ATM เช่น การบริการแบบ VBR การบริการแบบ ABR และการบริการแบบ UBR ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM

1.3.3 เพื่อศึกษาสมรรถนะการทำงานของบริการแบบ VBR ร่วมกับการบริการแบบ ABR และการบริการแบบ VBR ร่วมกับการบริการแบบ UBR

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 สร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาสมรรถนะของ TCP/IP ผ่านการให้บริการแบบ ABR และการบริการแบบ UBR บนโครงข่าย ATM

1.4.2 สร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาสมรรถนะของ TCP/IP ที่ใช้การบริการแบบ VBR ร่วมกับการบริการแบบ ABR และการบริการแบบ UBR ร่วมกับการบริการแบบ UBR บนโครงข่าย ATM

1.4.3 ปรับปรุงการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น

#### 1.5 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

1.5.1 ศึกษาการทำงานของโครงข่าย ATM

1.5.2 ศึกษาการทำงานของ Simulator: National Institute of Standards and Technology (NIST)

1.5.3 ศึกษาการทำงานของอัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> และ อัลกอริทึม EPD

1.5.4 สร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM

1.5.5 ทดสอบแบบจำลองโดยใช้การบริการแบบ ABR และการบริการแบบ UBR

1.5.6 ศึกษาการทำงานของ VBR

1.5.7 สร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของ TCP/IP ที่ใช้การบริการแบบ VBR ร่วมกับการบริการแบบ ABR และการบริการแบบ UBR ร่วมกับการบริการแบบ UBR

1.5.8 ทดสอบแบบจำลองตามที้ออกแบบไว้

1.5.9 ปรับปรุงการทำงานของอัลกอริทึม EPD

1.5.10 ทดสอบแบบจำลองโดยใช้อัลกอริทึมที่ปรับปรุงใหม่

1.5.11 สรุปและรวบรวมผลการทดสอบ

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เรียนรู้การทำงานของ Simulator

1.6.2 เรียนรู้การทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM

1.6.3 ทราบผลของการบริการแบบ ABR และ UBR ที่มีต่อสมรรถนะของ TCP/IP

1.6.4 ทราบถึงความสามารถของ QoS ที่มีต่อโครงข่าย ATM เมื่อใช้การบริการแบบ ABR และการบริการแบบ UBR

1.6.5 เรียนรู้หลักการการทำงานของ TCP/IP ที่ใช้การบริการแบบ VBR ร่วมกับการบริการแบบ ABR และ การบริการแบบ VBR ร่วมกับการบริการแบบ UBR

1.6.6 ทราบผลของสมรรถนะการทำงานของ TCP/IP ที่ใช้การบริการแบบ VBR ร่วมอยู่กับการบริการแบบอื่นๆ เช่น ABR และ UBR

1.6.7 เรียนรู้การปรับปรุงอัลกอริทึมในส่วนของ ATM สวิตช์เพื่อให้ได้สมรรถนะการทำงานดีขึ้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการทํางาน

ในส่วนของทฤษฎีและหลักการทํางานได้แบ่งเนื้อหาหลักๆ ออกเป็น 5 ส่วน ส่วนแรกจะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทํางานของ ATM ส่วนที่สองจะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทํางานของ TCP ส่วนที่สามเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างชั้นโพรโตคอลของ TCP กับ ATM และส่วนที่สี่เป็นรายละเอียดของ TCP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้กับการบริการแบบ ABR และการบริการแบบ UBR และส่วนสุดท้ายเป็นลักษณะการทํางานของ IP บนโครงข่าย ATM

#### 2.1 การสื่อสารในชั้นโพรโตคอล ATM

ชั้นสื่อสารที่ใช้เทคโนโลยี ATM ติดต่อส่งข้อมูลจากผู้ส่งถึงผู้รับโดยตรงซึ่งจะเกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมการเลือกเส้นทางเดินข้อมูล การกำหนดที่อยู่ของผู้ส่งและผู้รับ ส่วนการทํางานในระดับพื้นฐานนั้นคือการจัดตั้งวงจรเสมือนหรือเรียกว่าช่องสื่อสารเสมือนขึ้นระหว่างผู้ส่งและผู้รับข้อมูล วงจรเสมือนเป็นการสื่อสารแบบทางเดียวดังนั้นถ้าต้องการสื่อสารสองทางในเวลาเดียวกันก็ต้องจัดตั้งวงจรเสมือนสองวงจร (จากผู้ส่งไปยังผู้รับและจากผู้รับกลับไปยังผู้ส่ง)แต่ทั้งนี้วงจรอาจมีคุณสมบัติแตกต่างกันได้ เช่นมีความกว้างของช่องสื่อสารและความเร็วในการส่งข้อมูลไม่เท่ากัน

เนื่องจากโครงข่าย ATM ได้รับการออกแบบมาให้ใช้กับสายสื่อสารใยแก้ว (Fiber Optic) จึงทำให้โครงข่าย ATM มีการรองรับการส่งข้อมูลสูงมากคือการสูญเสียหรือการบิดเบือนของสัญญาณในสายนั้นต่ำมากจนเกือบจะไม่เกิดขึ้นเลย ดังนั้นจึงไม่ต้องการแพ็กเกตตอบรับจากผู้รับ ข้อมูล การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลจึงขึ้นอยู่กับโพรโตคอลในชั้นสื่อสารเหนือขึ้นไป อันที่จริงแล้วการส่งแพ็กเกตตอบรับนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความซ้ำซ้อนของข้อมูลเนื่องจากเกิดความล่าช้าในขณะนำส่ง แต่ปัญหานี้มักจะไม่เกิดขึ้นในโครงข่ายที่ใช้ ATM โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบ ATM มักถูกนำไปใช้ในการส่งข้อมูลประเภทเสียงหรือภาพเคลื่อนไหว

การส่งข้อมูลในระบบ ATM นั้นรับประกันว่าเซลล์ทุกเซลล์จะมาถึงผู้รับตามลำดับที่ในแต่ละเซลล์ที่ถูกส่งออกมาจากแหล่งข้อมูล (Source) เดียวกัน ในกรณีที่เกิดความคับคั่งของข้อมูลขึ้นในระบบเซลล์บางส่วนอาจถูกทิ้งได้ส่วนเซลล์ที่เหลือก็จะอยู่ในตำแหน่งเดิมซึ่งจะไม่ถูกสลับตำแหน่ง

### 2.1.1 ลักษณะเด่นของ ATM

1. ATM ถูกพัฒนาให้เป็นมาตรฐานกลางของการสื่อสารทั่วโลก อุปกรณ์ต่างๆ สามารถนำมาทำงานร่วมกันได้และไม่จำเป็นต้องเป็นยี่ห้อหนึ่งยี่ห้อใดกล่าวคือเป็นมาตรฐานกลางที่ร่วมกันกำหนดเพื่อใช้ประโยชน์ได้ร่วมกัน

2. ATM ถูกพัฒนาเพื่อการส่งข้อมูลสำหรับทั้งโครงข่ายภายในระยะใกล้ (LAN: Local Area Network) และโครงข่ายภายในระยะไกล (WAN: Wide Area Network) แต่เดิมนั้นรูปแบบของการส่งข้อมูลใน LAN และ WAN จะแตกต่างกันซึ่งสร้างความยุ่งยากในการเชื่อมต่อ (Connection) และบริหารโครงข่าย แต่ ATM จะผนวกทั้ง LAN และ WAN เข้าเป็นโครงข่ายใหญ่ที่มีมาตรฐานเดียว

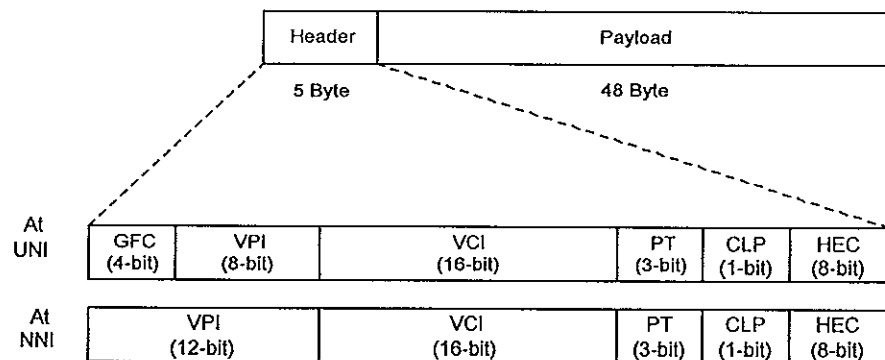
3. ATM ถูกพัฒนาให้ใช้กับข้อมูลทุกรูปแบบเดิมนั้นใช้ข้อมูลแต่ละรูปแบบได้แก่ ข้อมูลเสียง, ข้อมูล (Data) และข้อมูลภาพเคลื่อนไหวต่างก็มีโครงข่ายของตนเอง โดยสัญญาณเสียงที่ใช้ในโครงข่ายโทรศัพท์จะมีลักษณะที่มีอัตราการส่งข้อมูลคงที่เท่าๆกันตลอดเวลา ข้อมูลเสียงอาจยอมให้เกิดความผิดพลาดในการส่งข้อมูลได้บ้างแต่ต้องมีการหน่วงเวลาน้อยที่สุด ส่วนข้อมูลของคอมพิวเตอร์ที่เป็นข้อมูลทั่วไปไม่จำเป็นต้องมีอัตราการส่งข้อมูลคงที่และข้อมูลจะมีลักษณะเป็น Bursty คือบางเวลาจะมีข้อมูลมากเป็นกลุ่มก้อน แต่บางเวลาก็ไม่มีการเข้ามาเลยลักษณะนี้เรายอมให้มีการหน่วงเวลาได้บ้างแต่จะเกิดความผิดพลาดน้อยจะเห็นว่าข้อมูลต่างลักษณะกันต้องการคุณภาพในการส่งที่ต่างกัน สำหรับ ATM เราไม่จำเป็นต้องแยกโครงข่ายสำหรับข้อมูลเหล่านี้ เนื่องจากมันถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับข้อมูลทุกรูปแบบ

4. ATM สามารถใช้ได้ด้วยความเร็วสูงมากตั้งแต่ 1 เมกะบิตต่อวินาทีไปจนถึงจีกะบิตต่อวินาที (Gbps)

5. ATM สามารถส่งข้อมูลโดยมีการรับประกันคุณภาพการส่ง ทำให้สามารถเลือกคุณภาพตามระดับที่เหมาะสมกับความสำคัญและรูปแบบของข้อมูล

### 2.1.2 รูปโครงสร้างของเซลล์

ATM เป็นรูปแบบการส่งข้อมูลความเร็วสูงที่ถูกพัฒนามาสำหรับงานที่ต้องการความเร็วในการส่งข้อมูลสูงมากข้อมูลที่ส่งในโครงข่าย ATM จะถูกแบ่งเป็นกลุ่มย่อยเล็กๆ เรียกว่า เซลล์ ซึ่งมีขนาด 53 ไบต์ (Byte) ประกอบด้วยส่วนบรรจุข้อมูล (Payload) ขนาด 48 ไบต์ และส่วนหัว (Header) ขนาด 5 ไบต์ดังแสดงในภาพประกอบ 2-1



GFC : Generic Flow Control

PT : Payload Type Indicator

CLP : Cell Loss Priority

HEC : Header Error Check

ภาพประกอบ 2-1 แสดงลักษณะ ATM Cell Format at the UNI and NNI

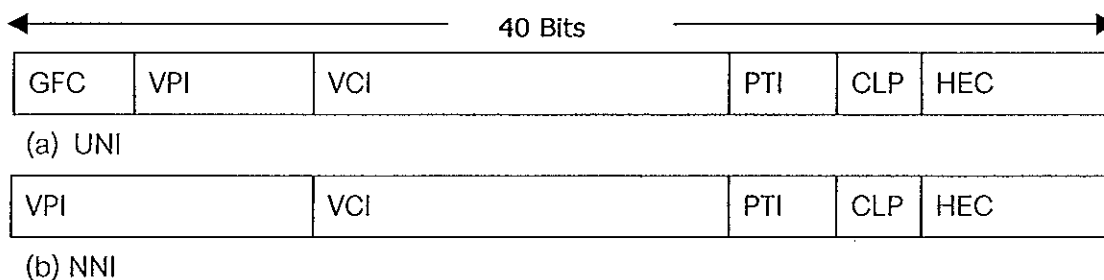
(ที่มา : Xiangrong, Cai.1996)

ส่วนหัวจะเก็บข้อมูลที่จำเป็นต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมการส่ง และจะเปลี่ยนแปลงระบบของการอินเทอร์เฟซอยู่ด้วยกัน 2 ระบบคือ UNI (User Network Interface) และ NNI (Network Network Interface) โดยจะประกอบด้วย GFC (Generic Flow Control) จัดอยู่ในตำแหน่งแรกของบิตส่วนควบคุมทั้งหมด ซึ่งจะมีเฉพาะในเซลล์ ATM ของระบบสัญญาณ UNI เท่านั้น, VPI (Virtual Path Identifier) เหมือนกับเป็นช่องทางเสมือนที่กำหนดทิศทางของการส่งเซลล์ ATM ไปตามเส้นทางที่ระบุไว้ในโครงข่าย, VCI (Virtual Circuit Identifier) ซึ่งทำหน้าที่กำหนดวงจรเสมือน (Virtual Circuit) ในการเดินทางให้กับเซลล์นั้น, PT (Payload Type) ใช้แสดงประเภทข้อมูลในส่วนที่บรรจุข้อมูล, CLP (Cell Loss Priority) เป็นบิตที่บอกให้ระบบหรือเครื่องปลายทางจะรับหรือไม่รับเอาเซลล์ ATM ที่ถูกส่งมา และ HEC (Header Error Check) ทำหน้าที่ตรวจสอบเซลล์ที่ไม่สอดคล้องตามที่ระบุไว้ในส่วนหัวเท่านั้น รายละเอียดเกี่ยวกับข้อมูลส่วนหัวจะกล่าวต่อไปดังภาพประกอบ 2-2 สวิตช์ ATM จะทำหน้าที่ในการมัลติเพล็กซ์และจัดการส่งข้อมูลนั้นตามที่กำหนดไว้ในข้อมูลส่วนหัวไป เมื่อข้อมูลของผู้ใช้เข้ามาจะถูกตัดแบ่งย่อยเป็นกลุ่ม กลุ่มละ 48 ไบต์และเติมส่วนหัวเข้าไปอีก 5 ไบต์ แล้วจึงส่งไปตามเส้นทางต่างๆ ในโครงข่าย ATM เมื่อถึงปลายทางแล้วจึงนำส่วนหัวออกแล้วประกอบเป็นข้อมูลใหญ่เหมือนเดิม ลักษณะของ ATM นี้คล้ายกับ Packet-Switching อื่นๆ ที่มีอยู่แต่ต่างกันที่ ATM จะมีขนาดแพ็กเก็ตเล็กและคงที่

รูปแบบการส่งข้อมูล ATM เป็นการเชื่อมต่อแบบ Connection Oriented กล่าวคือจะมีการสร้างการเชื่อมต่อจากต้นทางถึงปลายทางและกำหนดเส้นทางที่แน่นอนแล้วจึงเริ่มส่งข้อมูล เมื่อส่งข้อมูลเสร็จจึงหยุดการติดต่อเปรียบเทียบกับระบบโทรศัพท์ ซึ่งลักษณะนี้จะแตกต่างจากโครงข่าย IP ตรงที่ IP จะระบุที่อยู่ปลายทางและส่งข้อมูลไปเท่านั้น รวมทั้งการเลือกเส้นทางในแต่ละครั้งนั้นขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ระหว่างเส้นทางเดินว่าจะเลือกเส้นทางใด

โพรโตคอล ATM ได้แบ่งส่วนเชื่อมต่อออกเป็น 2 ส่วนคือ UNI ใช้กำหนดขอบเขตระหว่างโฮสต์ (Host) และโครงข่าย ATM ซึ่งก็คือ ขอบเขตระหว่างผู้ใช้และผู้ให้บริการ ส่วนที่สองเรียกว่า NNI ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่าง ATM (ซึ่งก็คือเราเตอร์)

จากที่กล่าวมาข้างต้น ATM เซลล์มีความยาวขนาดคงที่ 5 ไบต์สำหรับข้อมูลส่วนหัว ตามด้วยข้อมูลจริงขนาด 48 ไบต์ ภาพประกอบ 2-2 แสดงส่วนประกอบ ATM เซลล์ของ UNI และ NNI ซึ่งแตกต่างกันเล็กน้อย แต่เซลล์ทั้งสองแบบจัดส่งข้อมูลจากไบต์ทางซ้ายสุดก่อนเสมอ



ภาพประกอบ 2-2 แสดงโครงสร้างข้อมูลส่วนหัวของ ATM

(a) UNI (b) NNI

(ที่มา : Andrew, S Tanenbaum.1996)

เขตข้อมูล GFC ถูกสร้างขึ้นในเซลล์ UNI ซึ่งจะถูกลบทิ้งเมื่อเซลล์ตัวแรกนั้นถูกส่งมาถึง ATM เราเตอร์ตัวแรก ข้อมูลนี้ออกแบบมาเพื่อบอกให้ทราบรายละเอียดเกี่ยวกับการควบคุมการไหลของเซลล์หรือลำดับความสำคัญของเซลล์

เขตข้อมูล VPI เป็นเลขจำนวนเต็มขนาด 8 บิต ใช้บอกหมายเลขเส้นทางสื่อสารเสมือน และวงจรเสมือนหลายวงจรที่กำหนดหมายเลขไว้ในเขตข้อมูล VCI (ขนาด 16 บิต) อาจได้รับการจัดไว้ในเส้นทางเดียวกันได้ ในทางทฤษฎีแล้วโฮสต์หนึ่งสามารถจัดตั้งเส้นทางเสมือนได้ 256 เส้นทาง แต่ละเส้นทางมีวงจรเสมือนได้ 65,536 วงจรซึ่งในความเป็นจริงจะมีจำนวนน้อยกว่านี้เพราะวงจรเสมือนบางหมายเลขสงวนไว้ใช้งานเฉพาะด้าน



เขตข้อมูล PTI มีความยาว 3 บิตใช้กำหนดประเภทของข้อมูลจริง 8 ประเภท แสดงตามตารางที่ 2-1 ในที่นี้ผู้ส่งกำหนดข้อมูลเป็นประเภท 000 เพื่อบอกให้ทราบว่าเป็นข้อมูลของผู้ส่งเอง, ขณะทำการส่งไม่มีความคับคั่งเกิดขึ้นและเป็นเซลล์แบบ 0 โครจข่ายอาจเปลี่ยนแปลงประเภทข้อมูลเป็น 010 เพื่อบอกให้ผู้รับทราบว่าขณะนี้ในระบบได้เกิดความคับคั่งขึ้นแล้ว

ตารางที่ 2-1 แสดงประเภทข้อมูลในส่วน PTI

ประเภทข้อมูล	ความหมาย
000	ข้อมูลของผู้ส่ง ,ไม่มีความคับคั่ง , เป็นเซลล์แบบ 0
001	ข้อมูลของผู้ส่ง ,ไม่มีความคับคั่ง , เป็นเซลล์แบบ 1
010	ข้อมูลของผู้ส่ง ,มีความคับคั่งเกิดขึ้น , เป็นเซลล์แบบ 0
011	ข้อมูลของผู้ส่ง ,มีความคับคั่งเกิดขึ้น , เป็นเซลล์แบบ 1
100	การสื่อสารข้อมูลระหว่าง ATM เราเตอร์ที่อยู่ติดกัน
101	การสื่อสารข้อมูลระหว่าง ATM เราเตอร์ของผู้ส่งและผู้รับ
110	การสื่อสารข้อมูลสำหรับการบริหารทรัพยากรของระบบ
111	สำรองไว้ใช้ในอนาคต (ปัจจุบันไม่มีการใช้งาน)

(ที่มา : Andrew, S Tanenbaum.1996)

โอสต์สามารถกำหนด CLP บิตซึ่งใช้เป็นตัวบอกลำดับความสำคัญสูงหรือต่ำของเซลล์เมื่อเกิดความคับคั่งขึ้นในระบบ ATM เราเตอร์จะกำจัดเซลล์ที่มีความสำคัญต่ำ (CLP บิตเป็น 1) ให้หมดก่อนที่จะเริ่มกำจัดเซลล์ที่มีความสำคัญสูง (CLP บิตเป็น 0)

เขตข้อมูลสุดท้ายคือ HEC ขนาด 1 ไบต์เป็นข้อมูล Checksum สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลส่วนหัว หากใช้วิธีการแบบ Hamming จะใช้ข้อมูลขนาด 5 บิตเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล 40 บิต การกำหนดให้ HEC มีขนาดถึง 8 บิตนั้นเป็นการเผื่อไว้สำหรับวิธีการตรวจสอบข้อมูลแบบที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น วิธีการที่นำมาใช้ในปัจจุบันนั้นสามารถแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลในแต่ละบิตได้ทั้งหมด แต่มีประสิทธิภาพลดลงเหลือประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์สำหรับการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดขึ้นพร้อมกันหลายๆ บิต อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่าความผิดพลาดส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในระบบ ATM นั้นมักจะเกิดขึ้นบิตเดียว (ต่อเซลล์) มากกว่าที่จะเกิดขึ้นพร้อมกันหลายๆ บิต

### 2.1.3 รูปแบบของชั้นสื่อสาร ATM

ภาพประกอบ 2-3 เป็นการแสดงรูปแบบของชั้นสื่อสาร ATM (ATM Layer Model) โดยประกอบด้วยชั้นฟังก์ชัน 3 ชั้น คือ Physical Layer, ATM Layer และ ATM Adaptation Layer (AAL) ในแต่ละชั้นฟังก์ชันจะมีโครงสร้างการทำงานที่แตกต่างกันมีรายละเอียดดังนี้

	Higher Layer Functions	Layers	
	Layer Management	Convergence	CS
Segmentation and reassembly		SAR	
Generic Flow Control Header Generation/Extraction Cell VPI/VCI translation Cell Multiplex/Demultiplex		ATM	
Cell Rate Decoupling HEC header sequence generator/-Verification Cell Delineation Transmission Frame Adaptation Transmission Frame Generation		TC	Physical Layer
Bit Timing Physical Medium		PM	

ภาพประกอบ 2-3 แสดงรูปแบบของชั้นสื่อสาร ATM

(ที่มา : Xiangrong, Cai.1996)

#### 1. Physical Layer

เป็นฟังก์ชันที่มีโครงสร้างการทำงานเช่นเดียวกับชั้นฟังก์ชันสายสัญญาณของระบบโครงข่ายอื่นๆ ซึ่งมีฟังก์ชันที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อและแปลงระบบสัญญาณของสัญญาณต่างๆ โดยแบ่งเป็น 2 ฟังก์ชันย่อยคือ Physical Medium (PM) และ Transmission

Convergence (TC) โดยที่ PM เป็นชั้นฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับระบบสายสัญญาณโดยตรง ส่วน TC เป็นชั้นฟังก์ชันที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการแปลงรหัสระหว่างสัญญาณที่อยู่ในรูปของบิตข้อมูลกับสัญญาณที่อยู่ในรูปแบบเซลล์ ATM ที่จะส่งผ่านไปนในโครงข่าย

## 2. ATM Layer

เป็นชั้นฟังก์ชันที่ทำหน้าที่สร้างส่วนหัวของเซลล์ และประมวลผลในส่วนหัว ของเซลล์ที่รับเข้ามาโดยอ่านค่าVCI/VPI ของเซลล์และหาเส้นทางที่จะส่งเซลล์ออกไปแล้วจึงกำหนด VCI/VPI ใหม่ให้กับส่วนหัวของเซลล์ ซึ่งประกอบด้วย 4 ฟังก์ชันหลัก

1. การเข้ารหัสและถอดรหัสจากการเชื่อมต่อที่ต่างกันโดยใช้ VCI
2. เซลล์ส่วนหัวเข้า-ออกในชั้นฟังก์ชัน ATM
3. เป็นการแปลง VCI ที่สวิตช์ของ ATM
4. สร้างการควบคุมการไหลของข้อมูลใน UNI

## 3. AAL

AAL มีหน้าที่ในการปรับการบริการที่ได้รับจากชั้นATM ให้สอดคล้องกับความต้องการของโพรโตคอลและแอปพลิเคชันในระดับชั้นที่สูงขึ้นไป โดยแบ่งเป็น 4 ชนิด ด้วยกันเพื่อใช้กับแอปพลิเคชันที่ต่างกัน ดังต่อไปนี้

1. AAL1 เป็นวิธีการกำหนดให้มีการส่ง และรับข้อมูลด้วยอัตราคงที่โดยการจำลองวงจรการเชื่อมต่อระหว่างตัวรับตัวส่งข้อมูลที่มีลักษณะเป็นชุดข้อมูลเพื่อใช้กับแอปพลิเคชันที่มีการส่งสัญญาณแบบจุดต่อจุดอย่างต่อเนื่อง

2. AAL2 เป็นวิธีในการรับส่งข้อมูลแบบปรับค่าความเร็วของการรับส่งได้ตามที่ต้องการโดยเน้นการใช้อัตราความเร็วตามที่ต้องการ เหมาะกับการนำมาใช้กับการรับส่งสัญญาณเสียงและภาพได้

3. AAL3/4 เป็นวิธีการรับส่งข้อมูลแบบปรับค่าความเร็วของการรับส่งได้ตามที่ต้องการเช่นเดียวกับ AAL2 แต่ต่างกันที่สามารถรับส่งข้อมูลแบบ Asynchronous ได้ กล่าวคือ เวลาในการส่งและรับข้อมูลไม่จำเป็นต้องสัมพันธ์กัน

4. AAL5 เป็นวิธีการรับส่งข้อมูลเช่นเดียวกับ AAL3/4 ข้อแตกต่างคือ สามารถใช้กับการสื่อสารข้อมูลซึ่งเชื่อมต่อแบบไม่ต่อเนื่องได้ และมีข้อมูลส่วนหัวสั้นกว่า AAL3/4

โพรโตคอลในชั้นAALนี้จะควบคุมการสื่อสารจากต้นทางถึงปลายทางและจะถูกประมวลผลโดยผู้ส่งและผู้รับข้อความเท่านั้น ชั้น AAL แบ่งออกเป็นชั้นย่อย 2 ชั้นคือ ชั้น Convergence Sublayer (CS) มีหน้าที่ช่วยในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ไม่ใช่ ATM เข้ากับ ATM และ

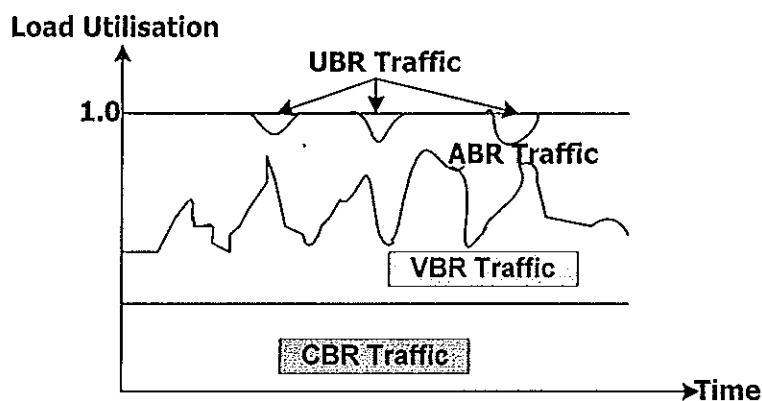
ชั้น Segmentation and Reassemble Sublayer (SAR) ทำหน้าที่ตัดข้อความที่เป็นโพรโตคอล หรือแอปพลิเคชันที่ต้องการส่งออกเป็นส่วนย่อยๆ เพื่อนำไปสร้างเซลล์หรือนำส่วนข้อมูล จากส่วน บรรจุข้อมูลของเซลล์มาต่อเป็นข้อความ

#### 2.1.4 ประเภทการรับส่งข้อมูลของโครงข่าย ATM

เมื่อผู้ใช้งานสองคนต้องการติดต่อผ่านระบบ ATM จะต้องให้ระบบกำหนดช่องทางติดต่อให้เรียบร้อยเสียก่อนจึงจะเริ่มติดต่อรับส่งข้อมูลกันได้ซึ่งในขั้นตอนนี้ผู้ใช้จะต้องกำหนดประเภท การบริการการส่งข้อมูลและคุณภาพการบริการที่ต้องการเพื่อที่ระบบจะสามารถให้บริการตาม ความต้องการของผู้ใช้งานแต่ละรายได้อย่างเหมาะสม เช่นต้องการอัตราความเร็วในการส่งข้อมูล เท่าไร ข้อมูลจะต้องมีค่านองไม่ช้ากว่าเท่าไร อัตราการสูญหายต้องไม่มากกว่าเท่าไร เป็นต้น

ATM มีการบริการหลัก 4 ประเภทด้วยกัน การที่จะกำหนดให้การติดต่อรับส่งข้อมูลที่ขอ การติดต่อเข้ามาแต่ละครั้งคือ CBR, VBR, ABR และ UBR

ภาพประกอบ 2-4 แสดงคุณลักษณะของการบริการแต่ละประเภทในโครงข่าย ATM การบริการ CBR จะส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วคงที่ ขณะที่ VBR จะเปลี่ยนแปลงอัตราความเร็ว การส่งข้อมูล ส่วน ABR จะใช้แบนด์วิดท์ส่วนที่เหลือ หากยังมีแบนด์วิดท์เหลืออยู่อีกจะถูกใช้โดย UBR



ภาพประกอบ 2-4 แสดงคุณลักษณะของการบริการแต่ละประเภทในโครงข่าย ATM

(ที่มา : Sinchai Kamolphiwong, 1998)

ประเภทบริการ CBR ถูกกำหนดขึ้นมาสำหรับการสื่อสารผ่านสายลวดทองแดงหรือใย แก้วนำแสง ข้อมูลแต่ละบิตจะถูกส่งเข้าในสายสื่อสารทางต้นทางและออกที่ปลายอีกด้านหนึ่งของ สายสื่อสารโดยไม่มี การตรวจสอบความผิดพลาด การควบคุมการไหลวิธีการนี้ได้รับความนิยมใน การนำไปใช้กับระบบโทรศัพท์ในปัจจุบัน และระบบ Broadband-ISDN (B-ISDN) ที่จะนำมาใช้ใน

อนาคตทั้งนี้เนื่องจากการส่งข้อมูลประเภทการสนทนาด้วยเสียงของมนุษย์นั้นไม่ต้องถูกต้องบริบูรณ์แต่ต้องการความเร็วอย่างสม่ำเสมอในการรับ-ส่งข้อมูลและเป็นประเภทที่ใช้จังหวะสัญญาณนาฬิกาจังหวะเดียวกัน การบริการแบบนี้จึงสามารถส่งผ่านระบบ ATM ได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างของข้อมูลได้แก่การส่งสัญญาณเสียงและภาพเคลื่อนไหว

ประเภทที่สองคือ VBR ยังถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทย่อยคือ แบบกำหนดเวลาจริง (real time, RT-VBR) และไม่กำหนดเวลาจริง(non-real time, NRT-VBR) แบบกำหนดเวลาจริง ออกแบบมาสำหรับการให้บริการที่มีความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลที่ไม่คงที่และมีการกำหนดเวลาสำหรับข้อมูลที่จะต้องได้รับภายในเวลาอันจำกัด เช่น การให้บริการประชุมทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องส่งสัญญาณข้อมูลภาพเคลื่อนไหวแบบมีการบีบอัดข้อมูล ซึ่งระบบโครงข่าย ATM จะต้องมี ความสามารถในการส่งข้อมูลภาพเหล่านี้ด้วยความเร็วแตกต่างกันโดยไม่ทำให้เกิดการสะดุดของภาพปรากฏขึ้นที่ผู้ใช้ นั่นก็คือจะต้องมีการบริหารการหน่วงเวลาในระบบอย่างเข้มงวด

การบริการ NRT-VBR จะไม่มีการกำหนดเวลาจริงที่เข้มงวดมากนัก เช่นการส่งภาพเคลื่อนไหวไปพร้อมกับจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ หรือการใช้โปรแกรมประเภท Web browser ข้อมูลที่ถูกส่งมาอาจเกิดการชะงักได้เป็นครั้งคราว

บริการประเภท ABR ได้รับการออกแบบมาใช้งานในระบบโครงข่ายที่มีปริมาณไหลเวียนค่อนข้างสูงทำให้ไม่ทราบอัตราการส่งข้อมูลที่แน่นอนตัวอย่างได้แก่องค์กรที่มีการใช้สายเช่าจำนวนหนึ่งโดยปกติอัตราความเร็วของสายเช่าจะต้องมากพอที่จะสามารถใช้งานในช่วงที่มีการส่งข้อมูลในปริมาณสูงสุดในแต่ละวัน ในช่วงเวลาอื่นสายเช่าบางส่วนจึงแทบไม่ได้ใช้งานเลย

บริการ ABR เป็นบริการแบบเดียวที่มีความสามารถในการส่งข้อมูลกลับไปยังผู้ส่งเพื่อขอให้ส่งข้อมูลช้าลงเมื่อเกิดความคับคั่งขึ้นในระบบ ถ้าผู้ส่งทำตามคำแนะนำอัตราการสูญหายของข้อมูลจะอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ข้อมูลที่รอการนำส่งจะอยู่ในสภาพเตรียมพร้อมซึ่งจะถูกนำส่งในทันทีที่สามารถทำได้และจะต้องรอต่อไปถ้ายังไม่สามารถนำส่งข้อมูลได้

บริการแบบสุดท้ายคือ UBR ซึ่งจะไม่มีการรับประกันและไม่บอกสถานะความคับคั่งของระบบซึ่งเหมาะกับการส่งแพ็กเก็ต IP เป็นอย่างยิ่งเพราะแพ็กเก็ต IP ไม่มีการรับประกันการนำส่งข้อมูลเหมือนกัน สวิตช์ทุกตัวจะรับเซลล์ที่ส่งมาทั้งหมดและจะจัดส่งเซลล์เหล่านั้นในทันทีที่ทำได้ ถ้าเกิดความคับคั่งขึ้น เซลล์แบบ UBR จะถูกทิ้งโดยไม่มีการแจ้งกลับไปยังผู้ส่งและระบบก็ไม่ได้คาดหวังว่าผู้ส่งจะส่งข้อมูลช้าลง บริการประเภทนี้เป็นที่น่าสนใจเพราะมีอัตราค่าบริการที่ถูกที่สุด เหมาะกับโปรแกรมประยุกต์ที่มีการควบคุมข้อผิดพลาดด้วยตนเองเช่นการจัดส่งเพิ่มข้อมูลผ่านโครงข่าย ,จดหมายอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

### 2.1.5 คุณภาพของการให้บริการ

ระบบ ATM ให้บริการรับส่งข้อมูลหลายประเภท ดังเช่นข้อมูลประเภทเสียง ซึ่งให้ความสำคัญกับคุณภาพในการบริการมาก เมื่อมีการจัดตั้งวงจรเสมือนขึ้นใช้งาน โปรแกรมในชั้นสื่อสารนำส่งข้อมูลของผู้ใช้จะต้องทำความเข้าใจกับโพรโตคอลควบคุมโครงข่ายของระบบ ATM เกี่ยวกับรายละเอียดในการรับส่งข้อมูลอันประกอบด้วย 3 เรื่องหลักคือ

1. อัตราการส่งข้อมูล
2. ประเภทของการให้บริการซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณภาพในการส่งข้อมูล
3. ข้อกำหนดที่ผู้ส่งข้อมูลควรปฏิบัติตามเพื่อที่ระบบโครงข่ายจะสามารถให้บริการได้

เพื่อให้ข้อตกลงที่สร้างขึ้นมีผลในการปฏิบัติจริง มาตรฐาน ATM ได้กำหนดคุณภาพของการบริการด้วยตัวแปรควบคุมคุณภาพจำนวนหนึ่งที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตามที่ระบบได้ทำความเข้าใจกับผู้ให้บริการ ตัวแปรแต่ละตัวจะระบุค่าที่ยอมรับได้ในระดับต่ำสุดไว้ เช่น PCR (Peak Cell Rate) กำหนดอัตราความเร็วสูงสุดที่ผู้ใช้งานวางแผน หรือคาดว่าจะจำเป็นต้องใช้ซึ่งอาจจะต่ำกว่าค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ หรือ MCR (Minimum Cell Rate) กำหนดค่าความเร็วต่ำสุดในการส่งข้อมูลที่ยอมรับได้ เป็นต้น

### 2.1.6 การจัดการเชื่อมต่อ

ระบบโครงข่าย ATM ให้การสนับสนุนวงจรเสมือนทั้งแบบถาวร (Permanent Virtual Circuit) และการสลับสาย (Switched Virtual Circuit) ตัวอย่างของแบบถาวรเช่นการใช้สายเช่าขององค์การโทรศัพท์ที่นั้นสามารถส่งได้ตลอดเวลาที่ต้องการส่วนแบบสลับสายจะต้องมีการจัดตั้งวงจรเสมือนขึ้นใหม่ทุกครั้งก่อนการใช้งาน เช่นระบบโทรศัพท์ที่ใช้อยู่ทั่วไป

ตารางที่ 2-2 แสดงประเภทของคำสั่ง 6 อย่างที่ใช้ในระหว่างการจัดตั้งวงจรเสมือน คำสั่งแต่ละคำสั่งประกอบด้วย ประเภท, ขนาด, และค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งอาจถูกส่งไปในเซลล์เดียวหรือหลายเซลล์เพื่อการได้ตอบระหว่างโฮสต์และระบบ

ตารางที่ 2-2 แสดงคำสั่งที่มีใช้ในระหว่างการจัดตั้งวงจรเสมือน

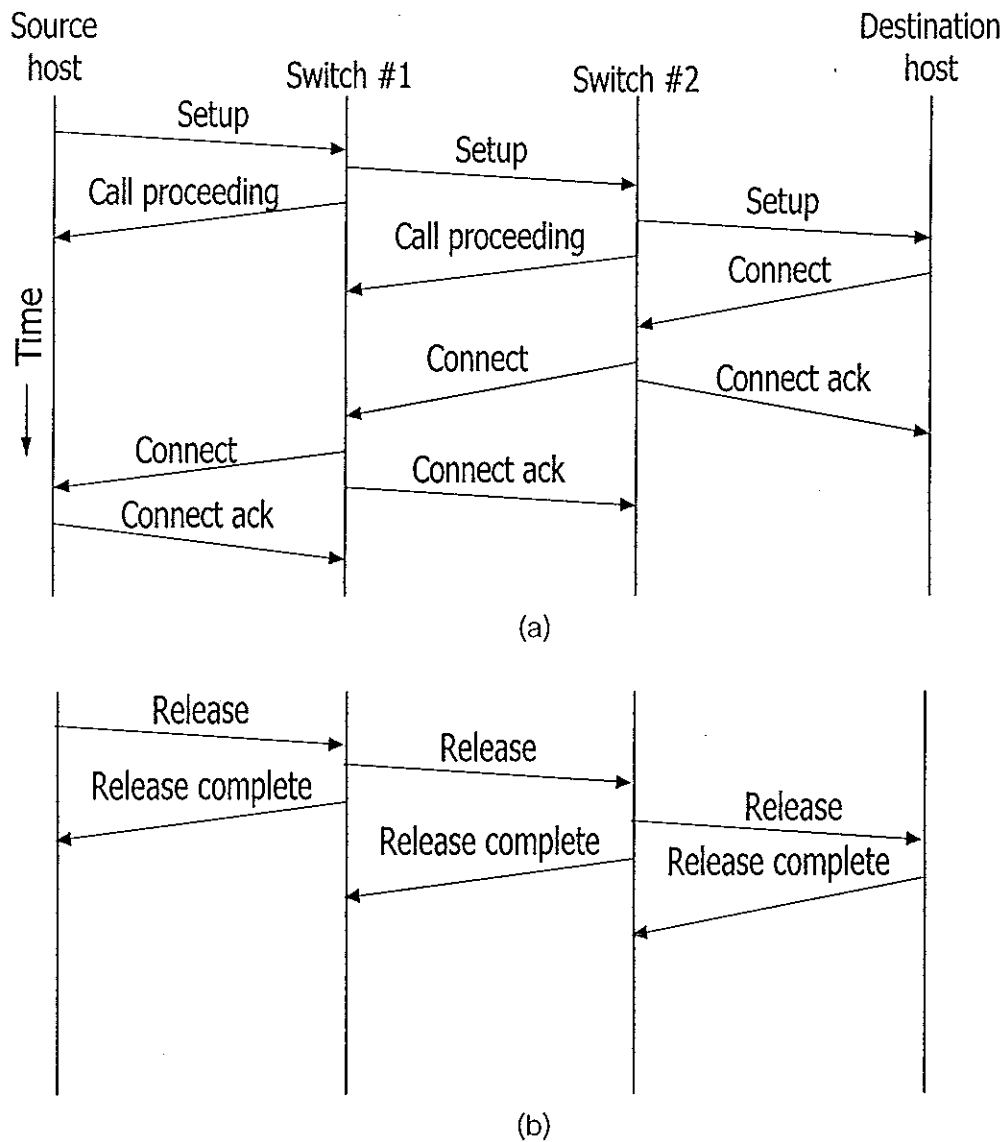
คำสั่ง	ความหมายเมื่อถูกส่งโดยโฮสต์	ความหมายเมื่อถูกส่งโดยระบบ
SETUP	ขอจัดตั้งวงจรเสมือน	มีผู้ต้องการตั้งวงจรเสมือน
CALL PROCEEDING	คำขอตั้งวงจรเสมือนกำลังเข้ามา	กำลังจัดตั้งวงจรเสมือน
CONNECT	ตอบตกลงคำขอตั้งวงจรเสมือน	ตอบตกลงคำขอตั้งวงจรเสมือน
CONNECT ACK	ตอบว่าได้รับ CONNECT แล้ว	ตอบว่าได้รับ CONNECT แล้ว
RELEASE	ขอยกเลิกวงจรเสมือน	โฮสต์อีกด้านต้องการยกเลิกวงจรเสมือน
RELEASE COMPLETE	ยกเลิกวงจรเสมือน	ยกเลิกวงจรเสมือน

(ที่มา : Andrew, S Tanenbaum.1996)

ขั้นตอนการทำงานเริ่มต้นจากโฮสต์ต้นทางทำการส่งข้อมูลและส่งเซลล์ที่มีคำสั่ง SETUP ไปยัง ATM เราเตอร์ซึ่งจะทำการเชื่อมต่อผ่านทางวงจรเสมือน ระบบจะตอบกลับมาด้วยคำสั่ง CALL PROCEEDING เพื่อยืนยันว่าได้รับคำขอจัดตั้งวงจรเสมือนแล้วกำลังดำเนินการอยู่ เมื่อเซลล์ที่มีคำสั่ง SETUP ถูกส่งต่อไปยัง ATM เราเตอร์ตัวอื่นๆที่อยู่ในเส้นทางเดินข้อมูล เราเตอร์เหล่านั้นจะตอบกลับมาด้วยคำสั่ง CALL PROCEEDING เสมอ

เมื่อการขอจัดตั้งวงจรเสมือนมาถึงโฮสต์ปลายทางซึ่งจะมีการตอบกลับไปด้วยคำสั่ง CONNECT ก็จะมาตอบกลับด้วยคำสั่ง CONNECT ACK แล้วคำสั่ง CONNECT ไปยังเราเตอร์ตัวต่อไปจนถึงโฮสต์ต้นทาง ลำดับการทำงานนี้แสดงให้เห็นในภาพประกอบ 2-5 (a)

ลำดับการขอยกเลิกวงจรเสมือนนั้นค่อนข้างง่าย ซึ่งแสดงให้เห็นในภาพประกอบ 2-5 (b) โฮสต์ที่ต้องการยกเลิกวงจรเสมือนจะส่งคำสั่ง RELEASE และคำสั่งนี้จะค่อยๆ ถูกส่งต่อไปยังเราเตอร์ทุกตัวจนไปถึงโฮสต์อีกด้านหนึ่งซึ่งในที่สุดเราเตอร์ที่ได้รับคำสั่งนี้ก็เพียงแค่ว่าส่งคำสั่ง RELEASE COMPLETE



ภาพประกอบ 2-5 (a) ขั้นตอนการจัดตั้งวงจรเสมือนในระบบ ATM

(b) ขั้นตอนการยกเลิกการสื่อสาร

(ที่มา : Andrew, S Tanenbaum.1996)

## 2.2 การสื่อสารในชั้นโพรโตคอล TCP (Transmission Control Protocol)

โพรโตคอล TCP ได้รับการออกแบบมาให้เป็นโพรโตคอลที่เชื่อถือได้ (Reliable) เพื่อใช้ในการสื่อสารผ่านระบบโครงข่ายทั่วไปที่อาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นในขณะนำส่งข้อมูลอยู่เสมอ ทั้งนี้การสื่อสารผ่านระบบโครงข่ายทั่วไปนั้นมีความแตกต่างกันมากมายในเรื่องรูปแบบโครงข่าย,



ขนาดช่องสัญญาณ, ขนาดแพ็กเก็ต และจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ TCP จึงถูกออกแบบมาให้สามารถปรับตัวเข้ากับ ความแตกต่างเหล่านี้ได้เป็นอย่างดีรวมทั้งสามารถทนทานต่อความล้มเหลว ในระหว่างการนำส่งข้อมูลที่อาจเกิดขึ้นเมื่อใดและใน ส่วนใดก็ได้

สามารถศึกษารายละเอียดโพรโตคอล TCP จาก RFC 793 [Andrew, S Tanenbaum, 1996] ต่อมาได้รับการปรับปรุงแก้ไขเรื่อยมาจนมาเป็น RFC 1122 และ RFC 1323 ตามลำดับ

โหนดที่สนับสนุนการทำงานโพรโตคอล TCP จะต้องมีเอนิตตี้ (Entity) TCP ซึ่งอาจเป็นส่วนประกอบของโพรเซสผู้ใช้หรือเป็นส่วนหนึ่งของระบบปฏิบัติการ มีหน้าที่ในการบริหารข้อมูลของ TCP และติดต่อกับชั้นสื่อสารที่ควบคุมแพ็กเก็ต IP โดยตรง เอนิตตี้ TCP รับข้อมูลจากโพรเซสผู้ใช้ แยกข้อมูลออกเป็น ส่วนย่อยที่มีขนาดไม่เกิน 64 กิโลไบต์ (โดยปกติมีขนาดประมาณ 1,500 ไบต์) แล้วจึงส่งไปยังผู้รับในรูปแบบของดาต้าแกรม (Datagram) IP แพ็กเก็ต เมื่อแพ็กเก็ตเดินทางมาถึง ก็จะถูกส่งต่อไปยังเอนิตตี้ TCP ซึ่งจะสร้างข้อมูลให้กลับไปอยู่ในสภาพเดิม

เนื่องจากชั้นสื่อสารที่ควบคุมการรับ-ส่งแพ็กเก็ต IP ไม่มีการรับประกันความสำเร็จในการนำส่งข้อมูล ดังนั้นจึงเป็นหน้าที่ของเอนิตตี้ TCP ที่จะต้องกำหนดระยะเวลารอคอยให้เหมาะสม และทำการส่งแพ็กเก็ตซ้ำในกรณีที่จำเป็น

### 2.2.1 รูปแบบบริการของ TCP

บริการ TCP เริ่มต้นจากฝ่ายผู้รับและผู้ส่งข้อมูลสร้างส่วนควบคุมการติดต่อกันแบบที่เรียกว่า "ซ็อกเก็ต (Socket)" ซ็อกเก็ตแต่ละตัวจะมีหมายเลขที่อยู่ประกอบด้วยสองส่วนคือ หมายเลข IP ของโหนดและหมายเลขขนาด 16 บิต ที่ใช้ภายในโหนดนั้นๆ เรียกว่า "พอร์ต (Port)" ซึ่งก็คือชื่อของเอนิตตี้ TCP

ซ็อกเก็ตแต่ละตัวสามารถนำมาใช้ควบคุมการติดต่อได้มากกว่าหนึ่งคู่การเชื่อมต่อในเวลาเดียวกันหรืออีกนัยหนึ่งการเชื่อมต่อหลายเส้นทางอาจใช้ซ็อกเก็ตตัวเดียวกันก็ได้ การระบุการเชื่อมต่อกระทำโดยการระบุคู่ของซ็อกเก็ตที่ต้องการหมายเลขวงจรมีอื่นหรือหมายเลขอื่นใดที่ไม่มีความสำคัญสำหรับการเชื่อมต่อในระบบนี้

พอร์ตหมายเลขต่ำกว่า 256 เป็นพอร์ตที่ใช้งานพื้นฐานทั่วไปซึ่งถูกสำรองไว้ใช้งานเฉพาะอย่างเท่านั้นเช่น โพรเซสใดๆ ที่ต้องการสร้างการเชื่อมต่อเข้ากับโหนด เพื่อการรับ-ส่งสำเนาเพิ่มข้อมูลผ่านโปรแกรม FTP จะต้องระบุพอร์ตหมายเลข 21 จึงจะสามารถติดต่อกับบริการ FTP ของโหนดนั้นได้ หรือการเชื่อมต่อผ่านโปรแกรม TELNET ก็จะต้องระบุพอร์ตหมายเลข 23 พอร์ตใช้งานพื้นฐานหมายเลขอื่นๆ อธิบายไว้ในมาตรฐาน RFC 1700

การเชื่อมต่อของเอ็นดีดี TCP เป็นการสื่อสารสองทางแบบสมบูรณ์ (Full-Duplex) และการเชื่อมต่อจุด-ต่อ-จุด (Point-to-Point) หมายความว่า การเชื่อมต่อจะมีโฮสต์อยู่เพียง 2 โฮสต์ที่ปลายสายแต่ละข้างซึ่งสามารถส่งข้อมูลสวนทางกันได้ตลอดเวลา TCP ไม่สนับสนุนการเชื่อมต่อหลายจุด (Multicasting) และแบบกระจาย (Broadcasting)

การส่งข้อมูลผ่านโพรโตคอล TCP เป็นไปในลักษณะชุดหรือกระแสไบต์ (Byte Stream) ไม่ใช่กลุ่มของข่าวสาร(Message) เช่นการส่งข่าวสารออกไป 4 ชุดชุดละ 512 ไบต์ผ่านโพรโตคอล TCP ข้อมูลทั้งหมดอาจถูกส่งไปยังผู้รับในลักษณะเป็นชุดละ 512 ไบต์ 4 ชุด หรือชุดละ 1024 ไบต์ 2 ชุด หรือชุดละ 2048 ไบต์ 1 ชุด หรืออย่างไรก็ได้ ทางผู้รับจึงไม่สามารถทราบได้เลยว่าข้อมูลที่ส่งมานั้นประกอบด้วยข่าวสารกี่ชุด

แฟ้มข้อมูลในระบบปฏิบัติการ Unix ก็ใช้วิธีการเดียวกันนี้ในการเก็บข้อมูล นั่นก็คือผู้ใช้ไม่อาจทราบได้เลยว่าข้อมูลในแฟ้มที่กำลังอ่านอยู่นั้นถูกอ่านขึ้นมาครั้งละบล็อกละไบต์ หรือทั้งแฟ้มพร้อมกัน TCP เอ็นดีดีจึงไม่มีความสนใจในโครงสร้างของข้อมูลที่กำลังทำการรับ-ส่งอยู่ เพียงแต่ให้ความสนใจในการรับ-ส่งให้ครบจำนวนไบต์อย่างถูกต้องเท่านั้น

### 2.2.2 โพรโตคอล TCP

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างโดยทั่วไปของโพรโตคอล TCP ข้อมูลในแต่ละกลุ่มที่ส่งออกไปจะมีหมายเลขลำดับขนาด 32 บิตเป็นของตนเองซึ่งจะไม่ซ้ำกันเลย ในทางทฤษฎี ระบบโครงข่ายเฉพาะบริเวณทำงานที่ความเร็ว 10 เมกะบิตต่อวินาทีอาจจะทำให้หมายเลขลำดับวนกลับมาซ้ำกันได้ภายในเวลาประมาณหนึ่งชั่วโมง แต่ในความเป็นจริงนั้นจะต้องใช้เวลานานกว่านี้มากทีเดียวหมายเลขลำดับถูกนำมาใช้สำหรับการส่งข้อมูลตอบรับและกระบวนการหน้าต่างเลื่อน (Sliding Window)

เอ็นดีดี TCP ของผู้ส่งและผู้รับจะแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันครั้งละเซกเมนต์ (Segment) แต่ละเซกเมนต์ประกอบด้วยข้อมูลส่วนหัวขนาดคงที่จำนวน 20 ไบต์ตามด้วยข้อมูลส่วนตัวที่เหลืออีกจำนวนหนึ่งและส่วนสุดท้ายคือข้อมูลจริง (อาจไม่มีอยู่เลยก็ได้) เอ็นดีดี TCP จะเป็นผู้กำหนดขนาดเซกเมนต์ที่จะใช้ ข้อมูลที่จะถูกส่งในแต่ละครั้งอาจรวบรวมมาจากหลายๆแหล่งหรือแบ่งข้อมูลจากแหล่งหนึ่งออกเป็นหลายๆ เซกเมนต์ องค์ประกอบที่บังคับขนาดของเซกเมนต์มีอยู่สองส่วน ส่วนแรกเป็นขนาดจำกัดสูงสุด 64 กิโลไบต์ (หรือ 65,535 ไบต์) ขนาดของแต่ละเซกเมนต์รวมทั้งข้อมูลส่วนหัวจะต้องไม่เกินนี้ ส่วนที่สองมาจากค่ากำหนดขนาดสูงสุดของแพ็กเก็ตแต่ละระบบโครงข่ายที่เรียกว่า MTU (Maximum Transfer Unit) ซึ่งบังคับให้เซกเมนต์จะต้องมีขนาดไม่เกินไปกว่านี้ ค่าของ MTU อาจมากกว่าหรือน้อยกว่า 64 กิโลไบต์ก็ได้ แต่โดยทั่วไปแล้วจะมีขนาดน้อยกว่า

ดังนั้นจึงกลายเป็นข้อจำกัดขนาดของเซกเมนต์ไปโดยปริยาย เซกเมนต์ที่ถูกส่งออกมาแล้วจากโฮสต์ผู้ส่งอาจเดินทางผ่านระบบโครงข่ายต่างๆ ที่มีขนาด MTU แตกต่างกันไป เมื่อใดก็ตามที่ MTU จากด้านที่รับเข้ามามีขนาดใหญ่กว่า MTU ทางด้านที่จะส่งออกไป เราเตอร์ตัวที่รับข้อมูลเข้ามาจะต้องแบ่งเซกเมนต์นั้นออกเป็นเซกเมนต์ย่อยก่อนที่จะส่งออกไป

เมื่อเซกเมนต์ถูกซอยออกไปเป็นส่วนเล็กๆ เซกเมนต์ใหม่แต่ละตัวจะต้องได้รับหมายเลข IP ใหม่ที่ซ้ำกันทำให้ค่าโอเวอร์เฮด (Overhead) ในการส่งข้อมูลสูงขึ้นเพราะอย่างน้อยที่สุดทุกเซกเมนต์จะต้องเพิ่มข้อมูลส่วนหัวขนาดไม่ต่ำกว่า 20 ไบต์เข้าไปด้วย

การควบคุมการไหลเวียนของข้อมูลแบบพื้นฐานนิยมใช้โพรโตคอลหน้าต่างเลื่อน เมื่อผู้รับจะส่งเซกเมนต์หนึ่งออกมาก็จะเริ่มจับเวลาในทันที เมื่อเซกเมนต์นั้นเดินทางมาถึงผู้รับแล้วเอ็นดีดี TCP ของผู้รับจะส่งเซกเมนต์ตอบกลับมา (อาจมีข้อมูลอยู่ในนี้ด้วยหรือไม่มีเลยก็ได้) พร้อมทั้งหมายเลขลำดับของเซกเมนต์ตัวต่อไปที่รอคอยถ้าหมดระยะเวลารอคอยก่อนที่เซกเมนต์ตอบรับจะเดินทางมาถึง ผู้ส่งก็จะต้องส่งเซกเมนต์เดิมมายังผู้รับอีกครั้งหนึ่ง

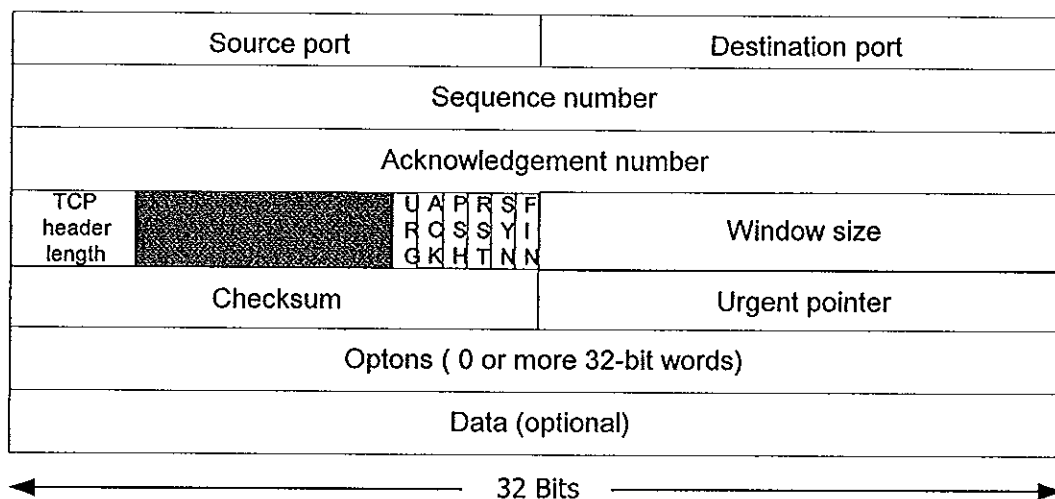
โพรโตคอลนี้แม้ว่าจะทำงานอย่างตรงไปตรงมาแต่ก็มีปัญหาหลายอย่าง เช่น เซกเมนต์ที่ถูกซอยออกเป็นส่วนเล็กๆ อาจมีเพียงเซกเมนต์ย่อยตัวแรกเท่านั้นที่เดินทางไปถึง ผู้รับจึงส่งเซกเมนต์ตอบกลับมายังผู้ส่งแต่เซกเมนต์ย่อยส่วนที่เหลืออาจสูญหายไปก็ได้ เซกเมนต์อาจเดินทางมาถึงผู้รับในลำดับที่ไม่ถูกต้อง เช่น ไบต์ที่ 1024-2047 เดินทางมาถึงก่อนไบต์ที่ 0-1023 เซกเมนต์อาจเสียเวลาในการเดินทางนานกว่าปกติทำให้ผู้ส่งต้องส่งเซกเมนต์เดิมออกมา ซึ่งผู้รับอาจได้รับทั้งสองเซกเมนต์ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าเซกเมนต์ตัวแรก (หรือตัวที่สอง หรือทั้งสองตัว) ถูกซอยออกเป็นเซกเมนต์ย่อยๆ เมื่อเซกเมนต์ทั้งหมดเดินทางมาถึงผู้รับต้องทำงานหนักกว่าเดิมในการรวบรวมเซกเมนต์ย่อยเข้ากลุ่มให้ถูกต้องและจะต้องทราบดีว่าข้อมูลทั้งสองชุดนั้นคือข้อมูลเดียวกัน

### 2.2.3 ข้อมูลส่วนหัวของ TCP เซกเมนต์

ภาพประกอบ 2-6 แสดงโครงสร้างของ TCP เซกเมนต์ เขตข้อมูลส่วนแรกของแต่ละเซกเมนต์เป็นข้อมูลส่วนหัว (Header) ที่มีขนาดคงที่จำนวน 20 ไบต์ซึ่งอาจตามด้วยข้อมูลตัวเลือกอีกจำนวนหนึ่ง ที่เหลือจะเป็นส่วนของข้อมูลที่ต้องการส่งไปยังผู้รับมีขนาดไม่เกิน 65,495 ไบต์ (เป็นข้อมูลของ IP 20 ไบต์และของ TCP อีก 20 ไบต์) เซกเมนต์ที่ไม่มีข้อมูลถูกใช้เป็นการตอบรับ (Acknowledgement) หรือข้อมูลสำหรับการควบคุม

รายละเอียดของเขตข้อมูลต่างๆ มีดังนี้ เขตข้อมูล Source Port และ Destination Port ใช้ในการระบุหมายเลขพอร์ตที่อยู่ทางด้านปลายทั้งสองข้างของสายสื่อสาร (พอร์ตของผู้ส่งและพอร์ตของผู้รับ) โฮสต์แต่ละตัวจะเป็นผู้กำหนดหมายเลขพอร์ตที่จะใช้ซึ่งจะเป็นหมายเลขระหว่าง 256

และ 64,535 หมายเลขพอร์ต (16 บิต) เมื่อรวมเข้ากับหมายเลข IP (32 บิต) จะกลายเป็นหมายเลขซ็อกเก็ตซึ่งจะใช้เป็นหมายเลขที่อยู่ของผู้ส่งและผู้รับข้อมูลของการเชื่อมต่อนั้น



ภาพประกอบ 2-6 ข้อมูลส่วนหัวของ TCP แพ็กเก็ต

(ที่มา : Andrew, S Tanenbaum.1996)

เขตข้อมูล Sequence Number และ Acknowledgement Number คือหมายเลขลำดับของแพ็กเก็ตและหมายเลขการตอบรับ ทั้งสองหมายเลขเป็นแพ็กเก็ตที่ส่งหมายเลขลำดับต่อไปให้กับผู้รับกำลังรอกคอย และหมายเลขทั้งสองมีขนาด 32 บิตซึ่งถูกควบคุมโดย TCP เ็นดีดี

เขตข้อมูล TCP Header Length บอกจำนวนข้อมูลควบคุมสำหรับแพ็กเก็ต ซึ่งข้อมูลแต่ละตัวมีขนาด 32 บิตเท่ากันทั้งหมด ทั้งนี้จะใช้เป็นตัวบอกขนาดของข้อมูลตัวเลือกที่มีขนาดไม่คงที่ ตัวเลขนี้ยังใช้ในการคำนวณหาจุดเริ่มต้นของข้อมูลจริงด้วย

ส่วนต่อไปเป็นเขตข้อมูลขนาด 6 บิต ซึ่งไม่ได้ใช้งานอะไร ตามด้วยบิตสัญญาณขนาด 1 บิต จำนวน 6 ชนิด บิต URG (Urgent) ใช้บอกว่าเป็นข้อมูลด่วน เมื่อถูกกำหนดค่าให้เป็น "1" เ็นดีดี TCP ของผู้รับจะทราบว่ามีข้อมูลพิเศษติดตามด้วย กระบวนการนี้เทียบเท่าได้กับการใช้อินเตอร์รัพต์ในระบบปฏิบัติการทั่วไป

บิต ACK (Acknowledgement) จะถูกกำหนดให้เป็น "1" เพื่อบอกให้ทราบว่าหมายเลขลำดับการตอบรับ (Acknowledgement Number) ซึ่งเป็นหมายเลขแพ็กเก็ตในลำดับต่อไปที่ผู้รับกำลังรอกคอยนั้นถูกต้อง แต่ถ้าเป็น "0" ก็ไม่ต้องสนใจหมายเลขนั้น

บิต PSH (Push) บอกให้เอ็นดีดี TCP ของผู้ส่งทำการส่งข้อมูลนั้นออกไปในทันที ส่วนทางด้านผู้รับก็จะบังคับให้จัดการส่งข้อมูลนั้นไปยังโพรเซสที่กำลังรออยู่ทันทีเช่นกัน

บิต RST (Reset) ใช้ในกรณีที่การสื่อสารในการเชื่อมต่อนั้นเกิดความสับสนด้วยเหตุผลต่างๆกัน เช่น โฮสต์เกิดทำงานล้มเหลวจึงต้องการให้ผู้รับยกเลิกการทำงานต่างๆ ที่ค้างอยู่แล้วเริ่มต้นกันใหม่ นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในการปฏิเสธการเชื่อมต่อ หรือการปฏิเสธเซกเมนต์ที่ส่งมาซึ่งอาจจะมีข้อผิดพลาดในข้อมูลติดมาด้วย โดยทั่วไปแล้วถ้าผู้รับพบว่าบิตนี้ถูกกำหนดค่าเป็น "1" แสดงว่าได้เกิดปัญหาในการเชื่อมต่อขึ้น

บิต SYN (Synchronous) ใช้สำหรับเริ่มต้นการเชื่อมต่อการสื่อสารซึ่งโดยปกติจะกำหนดค่าให้ SYN = 1 และ ACK = 0 ถ้าการเชื่อมต่อเรียบร้อยผู้รับจะตอบกลับมาด้วย SYN = 1 และ ACK = 1 ซึ่งเป็นค่าที่แทนความหมาย CONNECTION REQUEST และ CONNECTION ACCEPTED นั้นเอง

บิตสุดท้ายในกลุ่มนี้คือ บิต FIN (Finish) ใช้สำหรับการยกเลิกการเชื่อมต่อเมื่อผู้ส่งไม่ต้องการส่งข้อมูลใดๆ อีกแล้ว อย่างไรก็ตามโพรโตคอลนี้มีการทำงานแบบสมมาตร (Symmetric) ดังนั้นทางฝ่ายผู้รับจะยังสามารถส่งข้อมูลกลับมายังผู้ส่งได้ต่อไปตามที่ต้องการทั้ง SYN และ FIN เซกเมนต์มีหมายเลขลำดับของตนเอง ดังนั้นจึงรับประกันได้ว่าจะทำงานตามลำดับได้อย่างถูกต้อง

การควบคุมการไหลของข้อมูลในโพรโตคอล TCP ใช้วิธีการแบบหน้าต่างเลื่อน เขตข้อมูล Window Size บอกขนาดของข้อมูลที่อนุญาตให้ส่งได้ (มีหน่วยเป็นไบต์) ซึ่งข้อมูลจะอยู่ในลำดับที่ต่อจากเซกเมนต์ล่าสุดที่ส่งออกมา ค่าของ Window Size = 0 บอกให้ทราบว่าจะเซกเมนต์ทั้งหมดที่ส่งมานับจนถึงหมายเลขลำดับที่ "Acknowledgement Number - 1" นั้นผู้รับได้รับถูกต้องแต่ขอให้ผู้ส่งหยุดพักการส่งข้อมูลชั่วคราวเมื่อผู้รับพร้อมที่จะทำงานต่อไปก็จะส่งเซกเมนต์ใหม่ที่มีค่า Acknowledgement Number เท่าเดิมแต่กำหนดค่า Window Size เป็นค่ามากกว่า 0

เขตข้อมูล Checksum เป็นข้อมูลที่ช่วยในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล เป็นกระบวนการตรวจสอบเริ่มด้วยการกำหนดให้ค่าของทุกบิตใน Checksum เป็น 0 ทั้งหมดและไม่นำส่วนของข้อมูลจริงมาร่วมพิจารณา ถ้าจำนวนบิตรวมที่เหลืออยู่เป็นเลขคี่ ก็ให้เติมไบต์ 0 เข้าไป จากนั้นจึงบวกเลขทั้งหมดเข้าด้วยกัน (จำนวนละ 16 บิต) ด้วยวิธีการแบบ 1's complement แล้วนำมาคำนวณหา 1's complement ร่วมกับค่า Checksum ที่ได้รับมาถ้าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นมีค่าเป็น 0 แสดงว่าข้อมูลในเซกเมนต์นั้นถูกต้อง

เขตข้อมูล Option เตรียมไว้สำหรับการให้บริการพิเศษนอกเหนือไปจากที่มีอยู่ เช่น การนำไปใช้ในการบอกขนาดข้อมูลจริงในแต่ละเซกเมนต์ที่ผู้รับ/ผู้ส่งต้องการ เซกเมนต์ขนาดใหญ่มี

ประสิทธิภาพการใช้งานสูงกว่าการใช้เซกเมนต์ขนาดเล็ก แต่โฮสต์ที่ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก อาจไม่สามารถจัดการข้อมูลในเซกเมนต์ขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นในระหว่างการสร้างการเชื่อมต่อ ทั้งผู้ส่งและผู้รับจะประกาศขนาดของข้อมูลที่ตนเองต้องการ และขนาดข้อมูลที่เล็กกว่าจะถูกนำมาใช้ ในกรณีที่ไม่มีผู้ใดแสดงขนาดที่ตนเองต้องการก็จะใช้ขนาดมาตรฐาน 536 ไบต์แทน ดังนั้นโฮสต์ทุกตัวในระบบอินเทอร์เน็ตจะต้องยอมรับ TCP เซกเมนต์ขนาด  $536+20=556$  ไบต์

#### 2.2.4 TCP (Transmission Control Protocol)

จุดประสงค์ของโพรโตคอล TCP บนโครงข่าย ATM ที่สำคัญที่สุดก็คือ การควบคุมสถานะความคับคั่งของข้อมูลซึ่งต้องการตรวจสอบกลไกของการควบคุมการไหลของข้อมูลจากผู้ส่งถึงผู้รับโดยใช้ส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ

1. Slow Start and Congestion Avoidance
2. Fast Retransmit and Recovery (FRR)
3. Selective Acknowledgment (SACK)

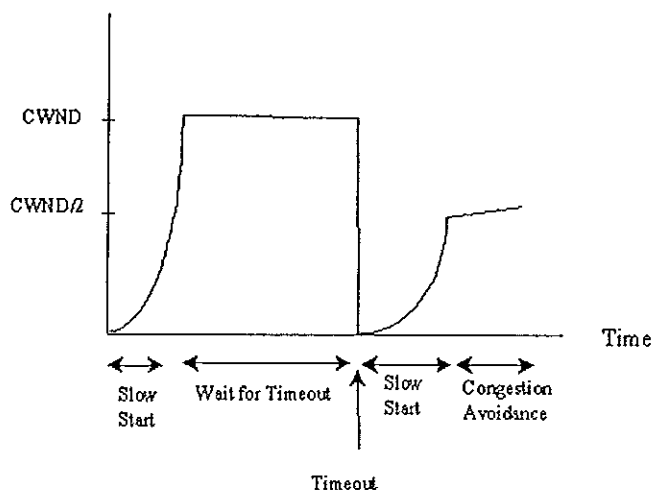
โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 1. Slow Start and Congestion Avoidance

โพรโตคอล TCP จะใช้โพรโตคอลที่อยู่ในรูปของหน้าต่าง (Window-based Protocol) สำหรับการควบคุมการไหลของข้อมูลโดยผู้ส่งจะสร้าง Congestion Window (CWND) ที่เปลี่ยนค่าได้เพื่อควบคุมจำนวนเซกเมนต์ของข้อมูลที่จะถูกส่งไปในโครงข่ายในเวลาที่ยกจำกัด ขณะที่ผู้รับจะมี Receiver Window (RCVWND) เพื่อบอกผู้ส่งว่าสามารถรับเซกเมนต์ของข้อมูลได้จำนวนเท่าใด โดยกระบวนการจะเริ่มดังนี้ CWND จะถูกเซตค่าเป็นหนึ่ง (1 เซกเมนต์) และจะเพิ่มค่าทีละหนึ่งเมื่อได้รับการตอบรับจากผู้รับจนกว่าจะถึงจุดที่ RCVWND มีค่าต่ำสุดและ CWND จะมีค่าสูงสุด (หรือ  $\min(\text{RCVWND}, \text{max}(\text{CWND}))$ ) โดยทั่วไปมักมีค่า 65,535 ไบต์ โดยขั้นตอนนี้จะเรียกว่าเป็นขั้นตอนเริ่มต้นหรือ Slow Start Stage ของ TCP โดยแสดงในภาพประกอบ 2-7 จะเห็นว่าในระหว่างขั้นตอนนี้ CWND จะใช้เวลาในการไป-กลับ (Round Trip Time, RTT) เป็น 2 เท่า

เมื่อมีเซกเมนต์สูญหายไปผู้รับจะส่งการตอบรับที่สร้างเข้าไปบนเซกเมนต์ที่ได้รับมาหลังจากนั้นผู้ส่งก็จะสร้างตัวจับเวลา (Timer) สำหรับแพ็กเก็ตสุดท้ายที่ยังไม่ได้ตอบรับถ้าเกิดหมดเวลา ก็จะสมมติว่าโครงข่ายเกิดสถานะการคับคั่งของข้อมูล โดยการใช้ข้อสมมติฐานนี้ก็จะทำให้เกิดการกระทำบางอย่างเพื่อช่วยลดโหลดของโครงข่ายลงซึ่งผู้ส่งจะเก็บค่า CWND ครั้งหนึ่งไว้ที่ตัวแปร Ssthresh และจะรีเซตค่า CWND ให้เป็นหนึ่งจากนั้นผู้ส่งก็จะส่งเซกเมนต์ไปใหม่โดยเริ่มจากเซกเมนต์ที่หายไปทีละตัว CWND จะเพิ่มค่าทีละหนึ่งในแต่ละครั้งของการได้รับการตอบกลับจน

กว่าจะถึงค่า Ssthresh (ทำ Slow Start อีกครั้ง) หลังจากนั้น CWND ก็เพิ่มขึ้นทีละหนึ่งเซกเมนต์ทุกๆเวลาไป-กลับเป็นผลให้ CWND มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า Congestion Avoidance Stage แสดงในภาพประกอบ 2-7 ซึ่งแสดงให้เห็นขั้นตอน Slow Start Stage และ Congestion Avoidance Stage ของการเชื่อมต่อ TCP แบบทั่วไป



ภาพประกอบ 2-7 TCP Slow Start and Congestion Avoidance

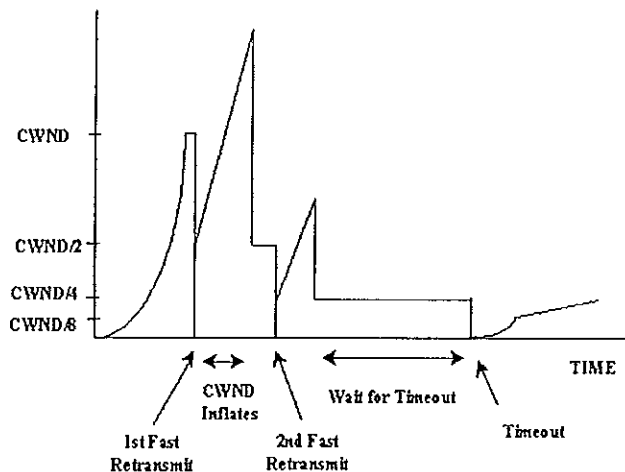
(ที่มา: Xiangrong CAI.1996)

## 2. Fast Retransmit and Recovery (FRR)

TCP จะใช้ตัวจับเวลาแบบหยวน (ประมาณ 500 มิลลิวินาที) สำหรับการจับเวลาในการส่งเซกเมนต์ไปใหม่ซึ่งทำให้การเชื่อมต่อ TCP สูญเสียเวลาที่จะต้องรอมากขึ้น เมื่อเกิดการสูญเสียเซกเมนต์ระหว่างช่วงเวลาที่ต้องรอนี้ TCP จะไม่ทำทั้งการส่งแพ็กเก็ตชุดใหม่หรือการส่งข้อมูลที่สูญหายไปใหม่ยิ่งกว่านั้นทันทีที่หมดเวลา CWND จะถูกเซตเป็น 1 เซกเมนต์ ซึ่งหมายความว่า การเชื่อมต่อจะใช้เวลาอีกหลายรอบเวลาในการไป-กลับ เพื่อเชื่อมต่อโครงข่ายอย่างสมบูรณ์ ทำให้ประสิทธิภาพลดลงการปรับปรุงสามารถทำได้โดยใช้ FRR เพื่อให้สามารถฟื้นการเชื่อมต่อจากการสูญเสียเซกเมนต์ได้เร็วขึ้น

เมื่อผู้รับได้รับเซกเมนต์ที่ไม่เรียงลำดับผู้รับก็จะส่งการตอบรับไปทันที เมื่อผู้ส่งได้รับการตอบรับที่ซ้ำกัน 3 ครั้งก็จะสมมติให้เซกเมนต์ที่มีการตอบรับนี้ว่าเกิดสูญหายไปซึ่งจะเกิดกระบวนการดังนี้ เมื่อผู้ส่งส่งเซกเมนต์ที่สูญหายไปใหม่ผู้ส่งจะลด CWND ลงครึ่งหนึ่ง (รวม 3 เซกเมนต์ ที่เกิดจากการตอบรับ 3 ครั้งด้วย) และจะเก็บค่า CWND เดิมไว้ใน Ssthresh สำหรับการตอบรับ

ที่ถูกสร้างซ้ำภายหลังผู้ส่งจะเพิ่ม CWND ที่ละหนึ่งและพยายามส่งเซกเมนต์ไปใหม่ ผลที่ได้ก็คือผู้ส่งจะยังคงให้ปริมาณการเชื่อมต่อที่ครึ่งหนึ่งของความจุเมื่อเกิดการส่งเซกเมนต์ไปใหม่อย่างรวดเร็วแสดงในภาพประกอบ 2-8

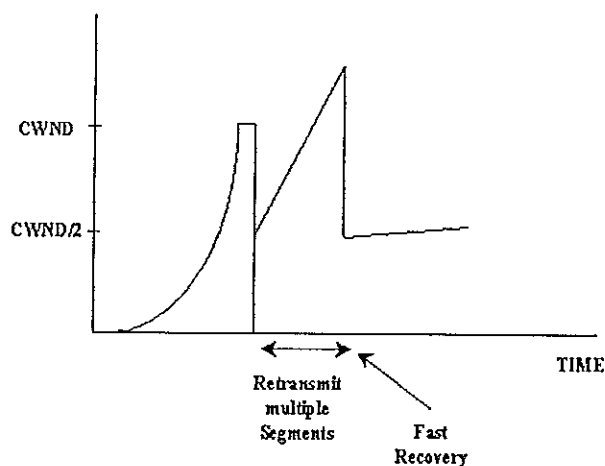


ภาพประกอบ 2-8 TCP Fast Retransmit and Recovery  
(ที่มา: Xiangrong CAI, 1996)

### 3. Selective Acknowledgments (SACK)

SACK สามารถทำงานได้ดีแม้จะอยู่ภายใต้การสูญเสียแพ็กเก็ตที่ซับซ้อน โดยจะประกอบด้วยข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับเซกเมนต์ที่ได้รับแล้วโดยปลายทาง เมื่อมีการตอบรับเซกเมนต์ที่สร้างซ้ำถูกรับจากปลายทาง TCP ที่ด้านส่งก็จะสร้างข้อมูลเกี่ยวกับเซกเมนต์ที่ไม่ได้รับที่ปลายทางใหม่ เมื่อผู้ส่งรับการตอบรับที่สร้างซ้ำ 3 ครั้งฝ่ายส่งก็จะส่งเซกเมนต์ที่หายไปเป็นตัวแรกไปและจะเพิ่ม CWND ที่ละหนึ่งสำหรับแต่ละเซกเมนต์ที่ตอบรับกลับมาหลังจากนั้นเมื่อไรก็ตามที่เกิดการส่งเซกเมนต์ไปอีกครั้งก็จะใช้ข้อมูลของ SACK เพื่อส่งเซกเมนต์ที่สูญหายไปก่อนที่จะส่งเซกเมนต์ตัวใหม่ไปทำให้ผู้ส่งสามารถฟื้นตัวจากเซกเมนต์ที่หายไปหลายเซกเมนต์ ได้ภายในเวลา 1 รอบแสดงในภาพประกอบ 2-9





ภาพประกอบ 2-9 TCP Selective Acknowledgments

(ที่มา: Xiangrong CAI.1996)

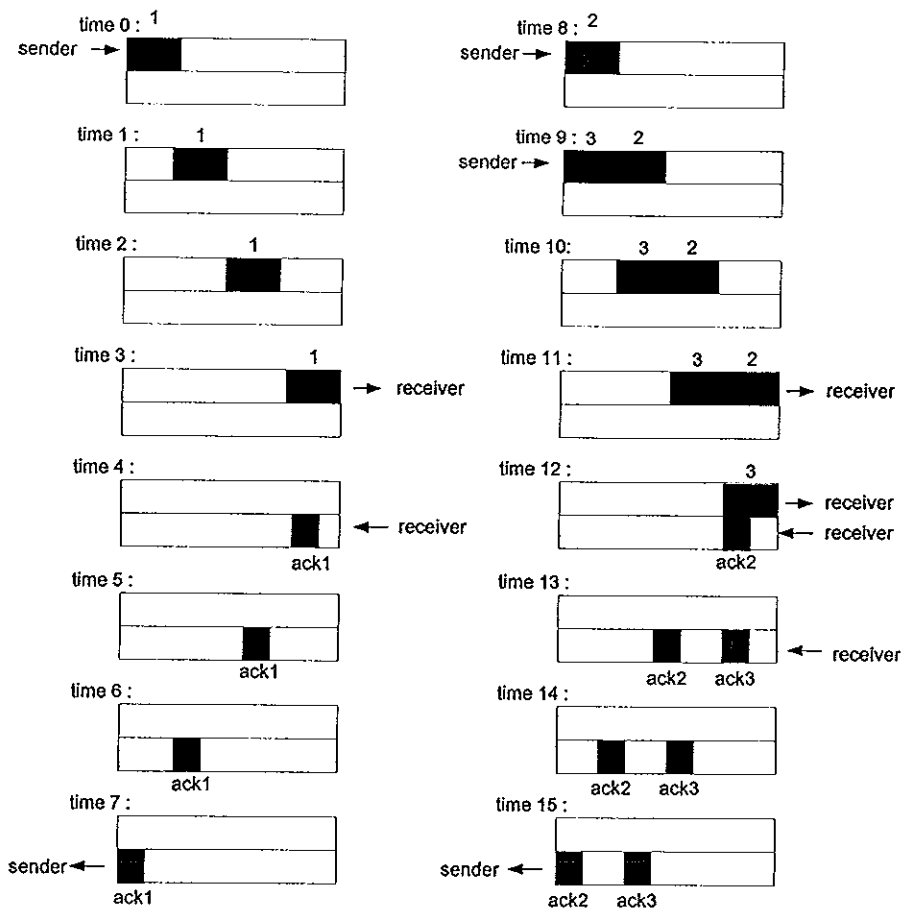
### 2.2.5 วิธีการนำพาแพ็กเกต

ความสัมพันธ์ของขนาดหน้าต่าง, การควบคุมแบบหน้าต่างเลื่อน และ Slow Start จะมีผลต่อ Throughput ของการเชื่อมต่อ TCP ในการนำพาแพ็กเกตขนาดใหญ่

จากภาพประกอบ 2-10 แสดงถึงช่วงเวลาที่เชื่อมต่อกันระหว่างผู้ส่งกับผู้รับซึ่งเป็นเวลาทั้งหมด 16 ช่วงเวลา และแสดงถึงการนำพาข้อมูลที่ถูกแบ่งเป็นแพ็กเกต แล้วนำส่งจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

ที่เวลา 0 ผู้ส่งจะส่ง 1 เซกเมนต์แล้วทำ Slow Start พร้อมกับกำหนดค่า CWND เป็น 1 เซกเมนต์ และผู้ส่งจะคอยการตอบรับเซกเมนต์ก่อนจึงส่งเซกเมนต์ตัวใหม่ต่อไป ที่เวลา 1,2,3 เซกเมนต์ถูกเคลื่อนไปครบ 1 Unit เมื่อถึงที่เวลา 4 ผู้รับอ่านเซกเมนต์ และสร้างการตอบรับออกมา ที่เวลา 5,6,7 การตอบรับเคลื่อนไปครบ 1 unit กลับไปยังผู้ส่ง ซึ่งเรียกว่า RTT

เมื่อผู้ส่งได้รับการตอบรับผู้ส่งสามารถส่งเซกเมนต์ได้มากกว่า 2 เซกเมนต์ พอถึงที่เวลา 8,9 ค่าของ CWND จะกำหนดค่าเป็น 2 เซกเมนต์เคลื่อนไปยังผู้รับ และสร้างการตอบรับกลับมาที่เวลา 12,13 เมื่อถึงเวลาที่ 15 เซกเมนต์ตัวที่ 2 ครบ 1 รอบเวลา

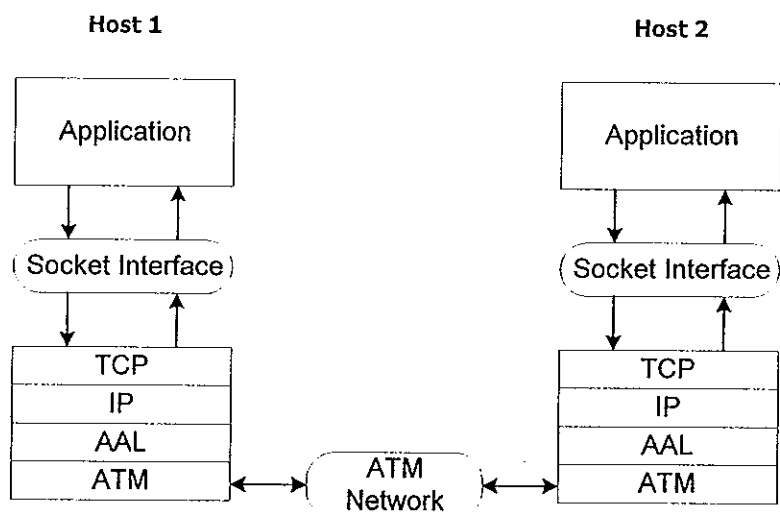


ภาพประกอบ 2-10 วิธีการนำพาแพ็กเก็ต

(ที่มา: Xiangrong CAI.1996)

### 2.3 ชั้นโพรโตคอลของ TCP และ ATM

ภาพประกอบ 2-11 แสดงตัวอย่างชั้นโพรโตคอลของ TCP และ ATM (TCP/ATM Protocol Stack) โพรโตคอลแต่ละชั้นแสดงการเชื่อมต่อกันของโพรโตคอล TCP แบบต้นทางถึงปลายทางหลังจากกระบวนการในแต่ละชั้นข้อมูลสุดท้ายจะถูกส่งผ่านโครงข่าย ATM กระบวนการนี้กล่าวถึง TCP บน ATM



ภาพประกอบ 2-11 แสดงตัวอย่างชั้นโพรโตคอลของ TCP และ ATM

(ที่มา: Brian Buchanan, 1997)

เลเยอร์ล่างสุดคือ ATM และ AAL ถูกนำมาใช้พร้อมกันในการเตรียมข้อมูลสำหรับการส่งผ่านโครงข่าย ATM หน่วยพื้นฐานของการแลกเปลี่ยนข้อมูลใน TCP/IP คือเซกเมนต์ บางครั้งก็เรียกว่าแพ็กเก็ตซึ่งประกอบด้วยข้อมูลของผู้ใช้จำนวนศูนย์หรือหลายไบต์ในส่วนของ TCP และส่วนหัวของ IP มีความยาวทั้งหมด 40 ไบต์ ส่วนของ ATM ใช้เซลล์เป็นหน่วยพื้นฐานที่มีขนาดจำกัด 53 ไบต์ และรวมถึงการจัดเส้นทางให้ข้อมูล โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างเซกเมนต์กับเซลล์ ถูกกระทำโดยชั้นของ AAL

## 2.4 สมรรถนะของ TCP บนโครงข่าย ATM

การวัดสมรรถนะของ TCP บนโครงข่าย ATM ได้จาก 2 ปัจจัยคือ Efficiency และ Fairness ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 สมการได้แก่

### 1. นิยามของ Efficiency คือ

$$\text{Efficiency} = (\text{Sum of TCP Throughputs}) / (\text{Maximum Possible TCP Throughputs})$$

โดยที่ TCP Throughput วัดที่ปลายทางของชั้น TCP และเป็นผลรวมตัวเลขที่ถูกส่งไปยังแอปพลิเคชันปลายทางด้วยเวลาในการจำลองทั้งหมด

## 2. นิยามของ Fairness คือ

$$\text{Fairness Index} = \text{Sqr}(\text{sum of } X_i) / (N * \text{sum of } \text{sqr}(X_i))$$

โดยที่  $X_i$  = Throughput ของต้นทางของ TCP ตัวที่  $i$  และ  $N$  = จำนวนของต้นทาง TCP

### 2.4.1 TCP บนการบริการแบบ UBR

สมรรถนะของ TCP บนการบริการแบบ UBR ขึ้นอยู่กับปัจจัย 4 อย่างคือ 1. หลักการในการทิ้งแพ็กเก็ต 2. หลักการการเชื่อมต่อจากผู้ส่งถึงผู้รับ 3. ความต้องการบัฟเฟอร์ และ 4. การรับประกันคุณภาพของการส่ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 1. หลักการในการทิ้งแพ็กเก็ต

สวิตช์ที่มีการใช้การบริการแบบ UBR เกือบทั้งหมดทำงานเกี่ยวกับการควบคุมสถานะการคับคั่งของข้อมูล โดยทำการทิ้งเซลล์ทันทีเมื่อเกิดความคับคั่ง ถ้าหากให้บัฟเฟอร์มีขนาดใหญ่ โดยไม่ต้องมีการควบคุมสถานะการคับคั่งของข้อมูลจะเห็นว่าถ้าขนาดของบัฟเฟอร์ใหญ่พอ ก็จะทำให้ไม่มีการสูญเสียเซลล์ แต่การใช้ขนาดบัฟเฟอร์ที่ใหญ่เป็นการเพิ่มค่าหน่วงให้มากขึ้น

การแก้ปัญหาที่ง่ายที่สุดคือการทิ้งเซลล์ทุกเซลล์ที่เข้ามาเมื่อบัฟเฟอร์ของสวิตช์เต็ม แล้วปล่อยให้ซอฟต์แวร์ในระดับชั้นที่สูงขึ้น เช่น TCP ทำการกู้ข้อมูลเอง

#### 2. หลักการเชื่อมต่อจากผู้ส่งถึงผู้รับ

วิธีการเชื่อมต่อแบบนี้จะใช้วิธีการ Slow Start และ Congestion Avoidance แล้วทำการปรับปรุงจึงได้วิธีการ FRR และ SACK ซึ่งวิธีการดังกล่าวอธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2.4

สำหรับ TCP Fast Retransmit and Recovery เมื่อมีการเชื่อมต่อแบบ WAN ซึ่งทำให้เวลาเข้าถึงข้อมูลโดยรวมช้าการส่งข้อมูลช้าและการกู้ข้อมูลที่รวดเร็วจะมีผลต่อสมรรถนะเป็นอย่างมาก เนื่องจากสถานะการคับคั่งของข้อมูลจะทำให้มีแพ็กเก็ตถูกทิ้งหลายแพ็กเก็ต ซึ่ง FRR ไม่สามารถกู้ข้อมูลหลายแพ็กเก็ตได้เป็นผลทำให้สมรรถนะลดลง สำหรับการเชื่อมต่อแบบ LAN FRR จะเพิ่มสมรรถนะการทำงานให้กับ TCP ที่ใช้การบริการ UBR เนื่องจากผลของการสูญหายของแพ็กเก็ตหลายแพ็กเก็ตน้อยกว่ากันมากเมื่อเทียบกับในระบบ WAN

ในระบบ LAN วิธีการของ SACK จะมีผลต่อหลักการการทิ้งแพ็กเก็ตอย่างมากส่วนในระบบ WAN วิธีการของ SACK เป็นส่วนสำคัญต่อค่า Throughput

#### 3. ความต้องการบัฟเฟอร์

สำหรับสวิตช์ที่มีบัฟเฟอร์จำนวนมากก็ไม่ใช่วิธีการแก้ปัญหาสถานะการคับคั่งของข้อมูลที่ TCP บนโครงข่าย ATM ก็ตามแต่จำนวนของบัฟเฟอร์สวิตช์ก็ยังคงมีความสำคัญในการรักษาค่า

ของประสิทธิภาพให้สูงไว้ กล่าวคือถ้าบัฟเฟอร์มีจำนวนน้อยเกินไปจะทำให้เกิดอัตราการสูญเสียของเซลล์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นทั้ง Slow Start และ Congestion Avoidance ของ TCP, FRR-TCP หรือ SACK TCP จะทำให้ CWND มีค่าลดลงอย่างน้อยครึ่งหนึ่ง เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพใช้แบนด์วิดท์ และค่าของสมรรถนะลดลง จุดประสงค์หนึ่งในการศึกษาความต้องการของบัฟเฟอร์คือการหาขนาดของบัฟเฟอร์ที่ต่ำที่สุดที่ทำให้อัตราการสูญเสียของเซลล์เป็นศูนย์

#### 4. การรับประกันคุณภาพของการส่ง

สมรรถนะของ TCP บนการบริการแบบ UBR จะลดลงเมื่อ VBR ใช้แบนด์วิดท์ครบ 100 เปอร์เซ็นต์ เพื่อแก้ปัญหานี้จึงควรให้การเชื่อมต่อ ทำการสำรองแบนด์วิดท์ของ UBR ไว้บางส่วน เรียกว่า การรับประกันคุณภาพของการส่ง สำหรับการบริการแบบ UBR จะเป็นการรับรองถึงการไหลของข้อมูลอย่างต่อเนื่องใน TCP แพ็กเก็ต การบริการแบบ UBR ทั่วไป การรับประกันคุณภาพของการส่งจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ถ้าการรับประกันคุณภาพของการส่งมีค่ามากกว่าศูนย์หมายถึงการบริการแบบ UBR สามารถรับรองได้ถึงที่เปอร์เซ็นต์นั้นๆของแบนด์วิดท์ทั้งหมด

##### 2.4.2 TCP บนการบริการแบบ ABR

เนื่องจาก TCP และ ABR มีกลไกในการควบคุมทางเดินของข้อมูลที่เป็นของตัวเอง ดังนั้น การรวม TCP และ ABR เข้าด้วยกัน จึงต้องมีการควบคุมกลไกทั้งสองส่วนไว้ด้วยกัน ใน TCP ทราฟฟิกที่มากที่สุดจะถูกควบคุมโดย CWND ขณะที่ ABR ทราฟฟิกจะถูกควบคุมโดย MCR (Minimum Cell Rate), PCR (Peak Cell Rate) และ ACR (Allowed Cell Rate) บั๊จจ่ายที่มีผลกระทบต่อผู้ใช้ และสมรรถนะของโครงข่ายสำหรับ TCP บนการบริการแบบ ABR คือกลไกในการจัดการทราฟฟิกที่ถูกนำมาใช้ในระบบการเชื่อมต่อระหว่างโหนด และการเชื่อมต่อจากผู้ส่งถึงผู้รับมารวมเข้าด้วยกันสำหรับการใช้สื่อสารข้อมูล

#### 2.5 IP บนโครงข่าย ATM

IP บนโครงข่าย ATM มีลักษณะการทำงานแบบ Connection less และอาศัยการเชื่อมต่อ กับ AAL5 โดยการกำหนดการให้บริการแปลงหมายเลข IP ไปเป็นหมายเลข ATM วิธีนี้จะทำการแทนที่ส่วนชั้นเชื่อมต่อข้อมูลของ Protocol Stack ดังภาพประกอบ 2-11 IP ยังรองรับการแบ่ง TCP เซกเมนต์ขนาดใหญ่ไปเป็น IP ดาต้าแกรมเล็กๆ เพื่อให้เกิดความเหมาะสมในการส่งข้อมูลบนโครงข่าย

การเชื่อมต่อโครงข่ายมักจะใช้ข้อมูลที่มีความยาวที่สุด เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลทั้งหมดได้ภายในเวลาที่จำกัด เรียกว่า MTU [Xiangrong, Cai, 1996]

ค่าของ MTU ที่เหมาะสมของ AAL5 คือ 9,180 ไบต์ โดย IP จะแบ่งเซกเมนต์ไปเป็นหลายๆ ดาต้าแกรม เนื่องจากในขั้นตอนการแบ่งเซกเมนต์นี้เกี่ยวข้องกับการทำงานของค่าไสลีย์ ดังนั้น TCP จะพยายามรักษาความยาวของทุกเซกเมนต์ให้มีขนาดเล็กกว่า MTU

## 2.6 สรุป

โดยภาพรวมแล้ว การนำระบบ ATM มาใช้ในโครงข่าย และทำงานร่วมกับระบบ TCP/IP ทำให้มีประสิทธิภาพต่อโครงข่ายมาก ซึ่งประสิทธิภาพของระบบโครงข่ายขึ้นอยู่กับองค์ประกอบสำคัญสองส่วนคือ โพรโตคอลที่ใช้ และค่าไสลีย์ในการประมวลผลข้อมูลส่วนหัวของแพ็กเก็ต

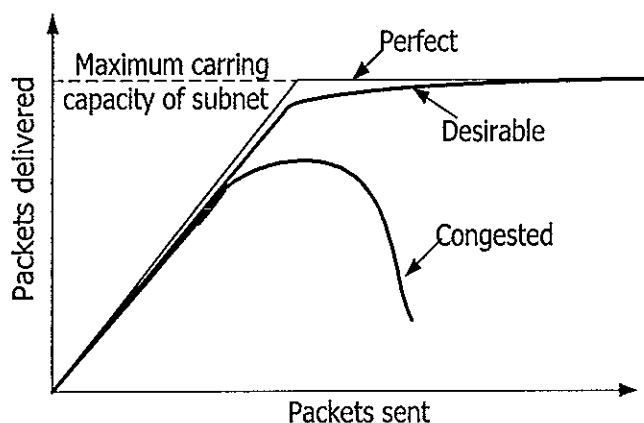
ส่วนหนึ่งในระบบโครงข่ายอาจจะเกิดความคับคั่งขึ้นได้ซึ่งจะเพิ่มเวลาในการส่งข้อมูลให้สูงขึ้นอันจะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลง ผู้ออกแบบระบบโครงข่ายพยายามที่จะหลีกเลี่ยงความคับคั่งโดยการออกแบบระบบโครงข่ายให้เหมาะสม ได้แก่การใช้วิธีควบคุมลักษณะของทราฟฟิก, การกำหนดคุณลักษณะการไหลของข้อมูล และวิธีการสำรองช่องสื่อสาร ถ้าหากว่าความคับคั่งเกิดขึ้นก็จะต้องหาทางแก้ไข ซึ่งได้อธิบายการควบคุมความคับคั่งของข้อมูลที่ใช้วิธีต่างๆ รายละเอียดจะกล่าวไว้ในบทต่อไป

### บทที่ 3

#### อัลกอริทึมการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล (Congestion Control Algorithms)

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวความคิดพื้นฐานในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล และหลักเกณฑ์ในการหลีกเลี่ยงความคับคั่งของข้อมูล รวมทั้งวิธีการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล สำหรับ TCP/IP บนโครงข่าย ATM เช่นอัลกอริทึม Explicit Rate Indication for Congestion Avoidance (ERICA<sup>+</sup>) ที่ใช้ในการบริการแบบ ABR หรืออัลกอริทึม Early Packet Discard (EPD) ที่ใช้กับการบริการแบบ UBR และนำแนวทางนี้ไปปรับปรุงอัลกอริทึม EPD เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด

ความคับคั่งของข้อมูลคือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบโครงข่ายเมื่อมีจำนวนแพ็กเกตถูกส่งมากเกินไปอันจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบโดยรวมลดลงดังภาพประกอบ 3-1 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพการทำงานของระบบเมื่อเปรียบเทียบระหว่างจำนวนแพ็กเกตที่ถูกส่งเข้าสู่ระบบกับจำนวนแพ็กเกตที่ส่งถึงผู้รับแล้ว ในภาวะปกติไฮสแตตต่างๆ จะส่งแพ็กเกตเข้าไปในระบบ ซึ่งแพ็กเกตทั้งหมดก็จะถูกส่งไปถึงผู้รับได้ (ยกเว้นบางแพ็กเกตที่อาจเสียหายหรือสูญหายระหว่างการส่ง) แสดงว่าจำนวนแพ็กเกตที่ถูกส่งนั้นเป็นอัตราส่วนที่พอเหมาะกับการส่งแพ็กเกตที่ส่งถึงผู้รับ อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการส่งแพ็กเกตเข้าสู่ระบบเริ่มมีปริมาณมากขึ้นๆ เราเตอร์เริ่มไม่สามารถจะจัดการส่งข้อมูลได้ทัน แพ็กเกตก็จะเกิดการสูญหายมากขึ้นและประสิทธิภาพของระบบมีค่าลดลง ในที่สุดเราเตอร์จะไม่สามารถจัดการส่งข้อมูลได้อีกต่อไป สมรรถนะในการทำงานของระบบจะลดลงจนถึงจุดหนึ่งที่ไม่สามารถส่งแพ็กเกตไปถึงผู้รับได้เลย



ภาพประกอบ 3-1 แสดงปริมาณข้อมูลในระบบโครงข่ายที่มากเกินไป

(ที่มา : Andrew, S Tanenbaum.1996)

ความคับคั่งอาจเกิดขึ้นได้จากแพ็กเก็ตจำนวนหนึ่งถูกส่งมาจากแหล่งข้อมูลหลายๆแห่งในทันทีทันใดพร้อมๆ กัน และแพ็กเก็ตทั้งหมดจะต้องถูกส่งออกไปทางสายสื่อสารเดียวกันอีก เราเตอร์นั้นจะต้องสร้างแถวคอย (Queue) โดยกำหนดให้หน่วยความจำส่วนหนึ่งเป็นที่สำหรับเก็บแพ็กเก็ตที่อยู่ในแถวคอย การเพิ่มขนาดของหน่วยความจำสำหรับแถวคอยอาจช่วยแก้ปัญหาได้ แต่พบว่าถ้าให้เราเตอร์มีหน่วยความจำอย่างไม่จำกัดแล้ว ความคับคั่งจะยิ่งแย่ลงไปอีกเพราะผู้ส่งข้อมูลจะตั้งกำหนดเวลาไว้สำหรับการรอคอยแพ็กเก็ตตอบรับจากผู้รับข้อมูล เรียกว่า Time out เมื่อหมดเวลาดังกล่าวผู้ส่งแพ็กเก็ตจะคิดว่าแพ็กเก็ตที่ส่งออกไปนั้นสูญหายไปแล้ว ดังนั้นจึงส่งแพ็กเก็ตตัวเดิมเข้ามาในระบบ อันที่จริงแล้วแพ็กเก็ตที่ส่งมาครั้งแรกไม่ได้สูญหายไปไหนแต่ยังคงอยู่ในแถวคอยของเราเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง การกระทำเช่นนี้จึงเป็นการเพิ่มปริมาณงานให้กับระบบโดยไม่จำเป็น

การใช้หน่วยประมวลผลที่ทำงานซ้ำก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งของความคับคั่งถ้าหน่วยประมวลผลของเราเตอร์ทำงานได้ช้าในการจัดการภายในของระบบได้แก่ การสร้างและการจัดการแถวคอย และการปรับปรุงข้อมูลในตารางเป็นต้น ทำให้แพ็กเก็ตที่รับเข้ามาเริ่มเกิดการสะสมในแถวคอยมากขึ้นเป็นลำดับแม้ว่าสายสื่อสารจะสามารถส่งข้อมูลได้เร็วมากก็ตาม การใช้สายสื่อสารที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลต่ำก็ทำให้เกิดความคับคั่งข้อมูลได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นการปรับปรุงสายสื่อสารแต่ไม่เปลี่ยนหน่วยประมวลผล หรือเปลี่ยนหน่วยประมวลผลแต่ไม่ปรับปรุงสายสื่อสารก็อาจจะช่วยได้เพียงเล็กน้อย ผลที่เกิดขึ้นเป็นเพียงการขยับจุดที่สร้างปัญหาไปอยู่ที่อื่นเท่านั้น จากที่กล่าวมานี้สามารถสรุปได้ว่า การปรับปรุงส่วนประกอบของระบบเพียงบางส่วนโดยไม่ปรับปรุงทั้งระบบนั้นไม่ได้เป็นการแก้ปัญหาแต่อย่างใด นั่นคือส่วนต่างๆ ในระบบยังคงทำงานไม่สอดคล้องกัน

ความคับคั่งของข้อมูลที่เกิดขึ้นในระบบจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมลดลง ถ้าพื้นที่เก็บข้อมูลในแถวคอยของเราเตอร์เต็มเราเตอร์ก็จำเป็นต้องละทิ้งแพ็กเก็ตที่เพิ่งจะรับเข้ามา และเมื่อแพ็กเก็ตถูกทิ้งไปแล้วเราเตอร์ผู้ส่งจะต้องส่งแพ็กเก็ตนั้นใหม่ บางกรณีอาจส่งซ้ำหลายครั้งจนกว่าจะได้รับแพ็กเก็ตตอบรับจากผู้รับข้อมูล ความคับคั่งของข้อมูลในเราเตอร์ทางฝั่งผู้รับนั้นจะบังคับให้เราเตอร์ทางฝั่งผู้ส่งระงับการรับข้อมูลในแถวคอยทิ้ง ทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อเราเตอร์ตัวอื่นๆ ด้วย

การควบคุมความคับคั่งของข้อมูล กับการควบคุมการไหลของข้อมูลมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก แต่ก็สามารถที่จะชี้ให้เห็นความแตกต่างระหว่างกันได้ การควบคุมความคับคั่งของข้อมูลนั้นจะมองภาพรวมของทั้งระบบที่จะต้องทำให้เกิดความมั่นใจว่าระบบโครงข่ายย่อยสามารถรองรับปริมาณข้อมูลหมุนเวียนภายในระบบได้ องค์ประกอบที่ต้องนำมาพิจารณาในการควบคุม



ความคับคั่งของข้อมูลจะเกี่ยวข้องกับการทำงานของโฮสต์และเราเตอร์ วิธีการรับส่งข้อมูลของเราเตอร์และปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการส่งผ่านข้อมูลภายในระบบโครงข่ายย่อย

การควบคุมการไหลของข้อมูลจะพิจารณาในทางกลับกัน คือจะมองภาพการทำงานที่เกิดขึ้นระหว่างผู้ส่งและผู้รับซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบจุดต่อจุด นั่นคือจะสร้างความมั่นใจได้ว่าผู้ส่งที่ทำการส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่องนั้นจะต้องไม่ส่งข้อมูลเร็วเกินกว่าที่ผู้รับจะรับไว้ได้ทั้งหมด การควบคุมการไหลของข้อมูลจะเกี่ยวข้องกับการโต้ตอบโดยตรงกับผู้รับเพื่อรายงานสถานะการทำงานให้ผู้ส่งข้อมูลทราบ

เพื่อให้เห็นข้อแตกต่างระหว่างหลักการทั้งสองอย่างนี้ พิจารณาตัวอย่างของระบบโครงข่ายที่ใช้สายใยแก้วนำแสงที่สามารถส่งข้อมูลได้ที่ความเร็ว 1 ล้านล้านบิตต่อวินาทีซึ่งเชื่อมต่อเครื่องซูเปอร์คอมพิวเตอร์ที่พยายามจะส่งเพิ่มข้อมูลให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์บุคคลที่ความเร็ว 1 พันล้านบิตต่อวินาที ในกรณีนี้แม้ว่าไม่เกิดความคับคั่งของข้อมูล แต่ก็ยังต้องการการควบคุมการไหลของข้อมูล เพื่อบังคับให้เครื่องซูเปอร์คอมพิวเตอร์หยุดส่งเป็นช่วงๆ เพื่อเปิดโอกาสให้เครื่องคอมพิวเตอร์บุคคลสามารถทำงานตามได้ทัน

เหตุที่การควบคุมความคับคั่งของข้อมูลกับการควบคุมการไหลของข้อมูลเกิดความสับสนกันอยู่บ่อยๆ ก็เป็นเพราะว่าการทำงานของอัลกอริทึมบางส่วนของวิธีการควบคุมความคับคั่งของข้อมูลนั้นมีการส่งข้อความไปบอกแหล่งส่งข้อมูลหลายแห่งให้ส่งข้อมูลช้าลงในขณะที่ระบบโครงข่ายเริ่มเกิดปัญหานั้นโฮสต์จึงได้รับข้อความให้ส่งข้อมูลช้าลงด้วยสาเหตุสองประการ คือผู้รับไม่สามารถจัดการข้อมูลในตอนนั้นได้ทัน และระบบโครงข่ายเริ่มมีปัญหาในการให้บริการ

### 3.1 แนวความคิดพื้นฐานในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล

ในระบบที่มีการทำงานแบบซับซ้อนเช่นระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์ จะเกิดปัญหามากมาย การแก้ปัญหาการทำงานของระบบมี 2 วิธีคือ การแก้ปัญหาแบบวงจรมเปิด (Open Loop) และการแก้ปัญหาแบบวงจรมปิด (Closed Loop) หัวใจสำคัญของวิธีการแก้ปัญหาแบบวงจรมเปิดคือจะเริ่มต้นด้วยการพยายามออกแบบระบบให้ดีที่สุดเพื่อสร้างความมั่นใจว่าจะไม่เกิดปัญหาขึ้นเลย ดังนั้นเมื่อนำระบบไปใช้ทำงานจริงแล้วเกิดปัญหาก็จะไม่มีการแก้ไขใดๆ

กระบวนการแก้ปัญหาแบบวงจรมเปิดประกอบด้วย

1. วิธีการตัดสินใจในการรับหรือไม่รับข้อมูลใหม่เข้ามาในระบบ
2. วิธีการตัดสินใจเมื่อจะต้องละทิ้งแพ็กเก็ตรวมทั้งวิธีการเลือกแพ็กเก็ตที่จะทิ้งไป

3. สร้างตารางการตัดสินใจของการทำงานตามจุดที่ต่างๆ กันในระบบ ซึ่งวิธีการทั้งหมดที่กล่าวมานี้ไม่ได้นำสถานะของระบบในขณะที่ทำงานมาร่วมพิจารณาเลย

หลักสำคัญของการแก้ปัญหาแบบวงจรปิดจะตั้งอยู่บนพื้นฐานของการนำข้อมูลสถานะของระบบในขณะนั้นเข้ามาเป็นข้อมูลสำคัญเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งมีขั้นตอนการทำงาน 3 ขั้นตอนเมื่อนำมาใช้แก้ไขความคับคั่งของข้อมูล

1. คอยตรวจสอบระบบ เพื่อค้นหาส่วนที่เกิดปัญหาความคับคั่งของข้อมูล
2. ส่งข่าวสารนี้ไปบอกยังหน่วยที่มีความรับผิดชอบในการแก้ปัญหา
3. ปรับการทำงานระบบเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

สิ่งสำคัญหลายๆแบบสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบและค้นหาจุดที่เกิดความคับคั่งของข้อมูลภายในโครงข่ายย่อย ซึ่งเป็นกระบวนการทำงานในขั้นตอนแรกที่ยินมนำมาใช้มากที่สุดคือ

1. จำนวนเปอร์เซ็นต์ของแพ็กเก็ตที่ถูกทิ้งไปเมื่อหน่วยความจำในแถวคอยไม่เพียงพอ
2. ความยาวเฉลี่ยของจำนวนแพ็กเก็ตในแถวคอย
3. ปริมาณของแพ็กเก็ตที่ถูกส่งไปใหม่ซึ่งเกิดจากไม่ได้รับแพ็กเก็ตตอบรับภายในเวลาที่กำหนด

ที่กำหนด

4. ค่าเฉลี่ยมาตรฐานของการรอคอยของแต่ละแพ็กเก็ต
5. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการรอคอยของแต่ละแพ็กเก็ต

ซึ่งตัวเลขที่กล่าวถึงมาทั้งหมดนี้จะมีค่าเป็นปฏิภาคโดยตรงกับระดับความคับคั่งของข้อมูลในระบบคือจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความคับคั่งสูงขึ้น

ขั้นตอนที่สองคือการส่งข่าวสารเกี่ยวกับจุดที่เกิดความคับคั่งของข้อมูลขึ้นให้แก่โหนด (อาจเป็นเราเตอร์หรือโฮสต์)ที่สามารถแก้ไขปัญหานั้นได้ วิธีที่ง่ายและชัดเจนคือให้เราเตอร์ผู้ตรวจพบปัญหาทำการแจ้งข่าวนี้ไปยังโหนดที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับปัญหาโดยตรง แน่ใจว่าข่าวสารที่ส่งไปนี้จะเป็นการเพิ่มปริมาณข้อมูลเข้าไปในส่วนที่กำลังเกิดปัญหาขึ้นซึ่งเป็นสิ่งที่ควรหลีกเลี่ยงอย่างยิ่ง

อย่างไรก็ตามหนทางหลีกเลี่ยงวิธีการแจ้งเตือนที่กล่าวถึงข้างต้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการกำหนดให้ 1 บิตหรือหนึ่งเขตข้อมูลของทุกๆ แพ็กเก็ตสงวนไว้เพื่อให้เราเตอร์ใช้สัญญาณแจ้งเตือนลงไปบนบิตพิเศษ หรือใส่ข้อความแจ้งเตือนลงไปบนเขตข้อมูลนี้เมื่อระดับความคับคั่งของข้อมูลสูงเกินกว่าระดับปลอดภัยที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้า เราเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับจุดที่เกิดปัญหาก็จะใส่ข่าวสารนี้ลงในทุกๆ แพ็กเก็ตเพื่อเตือนเราเตอร์ข้างเคียง วิธีการนี้จึงสามารถแจ้งเตือนปัญหาที่เกิดขึ้นโดยไม่มีการเพิ่มปริมาณข้อมูลเข้าไปในระบบเลย

บางอัลกอริทึมได้กำหนดให้โฮสต์หรือเราเตอร์ส่งแพ็กเกตออกเป็นระยะๆ เพื่อถามหาข่าวสารเกี่ยวกับความคับคั่งของข้อมูลที่อาจเกิดขึ้นเมื่อข่าวสารนี้ย้อนกลับมาถึง ผู้ส่งจะได้ทราบถึงเส้นทางที่กำลังมีปัญหาและจะสามารถส่งข้อมูลโดยใช้เส้นทางอื่นเพื่อหลีกเลี่ยงพื้นที่นั้นได้ ตัวอย่างเปรียบเทียบที่เห็นได้ชัดเจนคือ การที่สถานีวิทยุบางแห่งได้ใช้เครื่องบินเฮลิคอปเตอร์ทำการบินวนรอบเมืองเพื่อรายงานสภาพการจราจรของถนนสายที่ติดขัดหรือจุดที่มีอุบัติเหตุเกิดขึ้น โดยมุ่งให้ข่าวสารที่กระจายเสียงนั้นเป็นการเตือนให้บรรดารถยนต์ทั้งหลาย (ที่รับฟังการกระจายข่าว) ได้หลีกเลี่ยงไปใช้เส้นทางอื่น

วิธีการแบบที่มีการป้อนข้อมูลย้อนกลับ มีวัตถุประสงค์ที่จะแจ้งข่าวสารเพื่อให้โฮสต์ได้เตรียมหาเส้นทางหลีกเลี่ยงจุดที่เกิดปัญหาหรือจัดการอย่างเหมาะสมเพื่อช่วยลดความคับคั่งของข้อมูล การทำงานที่ถูกต้องนั้นจำเป็นจะต้องมีการจัดเวลาอย่างรอบคอบ เช่นในกรณีที่มีแพ็กเกตเข้ามา 2 แพ็กเกตติดต่อกัน เราเตอร์จะต้องส่งสัญญาณบอกให้ผู้ส่งหยุดส่งข้อมูลชั่วคราวและทุกครั้งที่เราเตอร์ว่างงานเป็นเวลา 20 ไมโครวินาทีก็จะส่งสัญญาณบอกให้เราเตอร์ข้างเคียงเริ่มส่งข้อมูลเข้ามาได้ ระบบที่ทำงานในลักษณะนี้จะเกิดการไหลเวียนของข้อมูลอย่างสม่ำเสมอและจะไม่เข้าสู่จุดอับ ในอีกกรณีหนึ่งเราเตอร์ได้กำหนดเวลารอคอยได้ถึง 30 วินาทีเพื่อให้เกิดความมั่นใจอย่างเต็มที่ก่อนที่จะส่งสัญญาณบอกให้เราเตอร์ข้างเคียงเริ่มส่งข้อมูลเข้ามาได้ กลไกในการควบคุมอัลกอริทึมอย่างนี้ตอบสนองช้าเกินไปจนไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเวลารอคอยจึงคำนวณมาจากการใช้ค่าเฉลี่ยมาตรฐานบางชนิด แต่การกำหนดค่าเวลาให้เหมาะสมที่สุดนั้นไม่ใช่เรื่องง่ายเลย

อัลกอริทึมสำหรับควบคุมความคับคั่งของข้อมูลมีใช้กันอย่างแพร่หลายมาก ซึ่งได้พัฒนาวิธีการแยกประเภทสำหรับวิธีการจัดการความคับคั่งของข้อมูลให้เหมาะสมโดยการแบ่งอัลกอริทึมทั้งหมดออกเป็นสองประเภท คือการแก้ปัญหาแบบวงจรเปิด และการแก้ปัญหาแบบวงจรปิดตามที่กล่าวไว้ข้างต้น การแก้ปัญหาแบบวงจรเปิดแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มที่กระทำกับต้นทางและกลุ่มที่กระทำกับปลายทาง การแก้ปัญหาแบบวงจรปิดก็แบ่งออกเป็นสองพวกย่อยคือการป้อนข้อมูลย้อนกลับด้วยค่าที่แน่นอน (Explicit Feedback) และการป้อนข้อมูลย้อนกลับโดยอนุมูล (Implicit Feedback) อัลกอริทึมที่ใช้การป้อนข้อมูลย้อนกลับด้วยการบังคับจะได้รับแพ็กเกตข้อมูลที่ถูกส่งกลับจากจุดที่เกิดความคับคั่งของข้อมูลโดยตรง ส่วนอัลกอริทึมที่ใช้การป้อนข้อมูลย้อนกลับโดยอนุมูลเราเตอร์จะต้องสรุปเองจากวิธีการสังเกตต่างๆเช่นเวลาในการรอคอยแพ็กเกตตอบรับ เป็นต้น

การเกิดสภาวะความคับคั่งของข้อมูลนั้นหมายความว่าถึงสภาวะของระบบที่มีปริมาณงานมากเกินไปที่ทรัพยากรของระบบจะจัดการได้ วิธีการแก้ปัญหาแบบตรงไปตรงมาคือการเพิ่มจำนวนทรัพยากรหรือการลดปริมาณของงานลงการเพิ่มจำนวนทรัพยากรทำได้หลายวิธีเช่น ระบบโครงข่ายย่อยอาจเพิ่มเส้นทางสื่อสารเป็นการชั่วคราวด้วยการใช้สายโทรศัพท์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการรับส่งข้อมูลระหว่างโหนดได้ ในระบบสื่อสารดาวเทียมการเพิ่มกำลังส่งก็จะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการกระจายข้อมูลเพื่อส่งผ่านเราเตอร์ในหลายเส้นทางแทนที่จะเลือกใช้เส้นทางที่ดีที่สุดเพียงเส้นทางเดียวก็เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลได้เหมือนกัน

อย่างไรก็ตาม บางครั้งการเพิ่มขีดความสามารถในการรับส่งข้อมูลก็ไม่อาจทำได้ หรืออาจเป็นเพราะได้เพิ่มขีดความสามารถจนเต็มที่แล้ว หนทางที่เหลืออยู่ก็คือจะต้องลดปริมาณงานลงให้ได้ การลดปริมาณงานทำได้หลายวิธีรวมถึงการงดให้บริการต่อผู้ใช้บางส่วน การลดระดับบริการของผู้ใช้บางคนหรือทุกคนและกำหนดให้ผู้ใช้ทุกคนจัดตารางความต้องการใช้งานเพื่อเป็นการทำนายปริมาณงานที่เกิดขึ้นได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

### 3.2 หลักเกณฑ์ในการหลีกเลี่ยงความคับคั่งของข้อมูล

การแก้ปัญหาความคับคั่งของข้อมูลแบบวงจรเปิด ผู้ออกแบบพยายามออกแบบระบบให้หลีกเลี่ยงโอกาสที่จะทำให้เกิดความคับคั่งของข้อมูลมากกว่าที่จะหาทางแก้ไขเมื่อเกิดความคับคั่งของข้อมูล แนวทางที่นำมาใช้คือการกำหนดหลักเกณฑ์ในการปฏิบัติสำหรับโพรโตคอลในชั้นสื่อสารต่างๆ ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 หลักเกณฑ์ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูลในชั้นสื่อสารต่างๆ

ชั้นสื่อสาร	หลักเกณฑ์ที่ใช้
ชั้นนำส่งข้อมูล	<ul style="list-style-type: none"> <li>• การส่งแพ็กเก็ตซ้ำ</li> <li>• การส่งแพ็กเก็ตตอบรับ</li> <li>• การควบคุมการไหลของข้อมูล</li> <li>• การกำหนดระยะเวลารอคอยแพ็กเก็ตตอบรับ</li> </ul>
ชั้นควบคุมโครงข่าย	<ul style="list-style-type: none"> <li>• การใช้วงจรเสมือน หรือ ดาต้าแกรมภายใต้โครงข่ายย่อย</li> <li>• การจัดแถวคอยแพ็กเก็ต และการให้บริการ</li> <li>• การลบแพ็กเก็ตทิ้ง</li> <li>• การเลือกเส้นทางเดินข้อมูล</li> <li>• การจัดการกับอายุของแพ็กเก็ต</li> </ul>
ชั้นเชื่อมต่อข้อมูล	<ul style="list-style-type: none"> <li>• การส่งแพ็กเก็ตซ้ำ</li> <li>• การส่งแพ็กเก็ตตอบรับ</li> <li>• การควบคุมการไหลของข้อมูล</li> </ul>

ในชั้นสื่อสารเชื่อมต่อข้อมูล การส่งแพ็กเก็ตซ้ำเป็นวิธีการที่ใช้ควบคู่กับการกำหนดระยะเวลารอคอยแพ็กเก็ตตอบรับมายังผู้ส่ง การติดต่อกับผู้ส่งที่มีเวลาการรอคอยสั้นและไม่เลือกส่งเฉพาะแพ็กเก็ตที่สูญหายซึ่งจะเป็นการเพิ่มปริมาณงานเข้าสู่ระบบในอัตราที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับผู้ส่งที่มีเวลารอคอยนานกว่าและเลือกการส่งแพ็กเก็ตซ้ำบางตัว

การส่งแพ็กเก็ตตอบรับมีผลต่อความคับคั่งของข้อมูลเช่นกัน ถ้าผู้รับส่งแพ็กเก็ตตอบรับทุกๆแพ็กเก็ตที่ส่งมาจะทำให้แพ็กเก็ตตอบรับเหล่านี้กลายเป็นตัวเพิ่มความหนาแน่นของข้อมูลโดยตรง อย่างไรก็ตามถ้ามีการเก็บสะสมแพ็กเก็ตตอบรับไว้เป็นจำนวนมากแล้ว การกำหนดระยะเวลารอคอยของผู้ส่งก็จะต้องขยายให้นานออกไป มิฉะนั้นการส่งข้อมูลซ้ำก็จะเกิดขึ้นอย่างแน่นอนจึงเกิดการควบคุมการไหลของข้อมูลเช่น กำหนดให้มีช่วงการส่งข้อมูลเป็นระยะเวลาสั้นๆ จะทำให้อัตราการส่งข้อมูลต่ำลงอันจะเป็นการช่วยลดปัญหาความคับคั่งของข้อมูลได้ด้วย

ในส่วนของชั้นสื่อสารควบคุมโครงข่ายการเลือกวิธีการส่งข้อมูลแบบการใช้วงจรเสมือนกับดาต้าแกรมมีผลต่อการเกิดความคับคั่งของข้อมูลเนื่องจากอัลกอริทึมสำหรับการแก้ไขปัญหาความคับคั่งของข้อมูลหลายๆแบบจะทำงานบนโครงข่ายย่อยที่ใช้วงจรเสมือนเท่านั้น การจัดแถว

คอยแพ็กเกตและการให้บริการหมายถึงการที่เราเตอร์เลือกจัดแถวคอยประจำสายสื่อสารขาเข้า จัดแถวคอยประจำสายสื่อสารขาออก หรือจัดทั้งสองอย่างซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการจัดลำดับในการทำงาน (เช่น การให้บริการแบบสลับหมุนเวียนกันไป หรือแบบตามลำดับความสำคัญ) การลบแพ็กเกตทิ้งเป็นกฎที่นำมาใช้ในการเลือกแพ็กเกตที่จะต้องทิ้งเนื่องจากเราเตอร์ไม่มีที่พอเพียงสำหรับเก็บแพ็กเกตทั้งหมดได้ หลักเกณฑ์ที่เหมาะสมจะช่วยให้การทำงานของระบบดีขึ้น และในทางกลับกันหลักเกณฑ์ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้การทำงานของระบบโครงข่ายเสียหายมาก

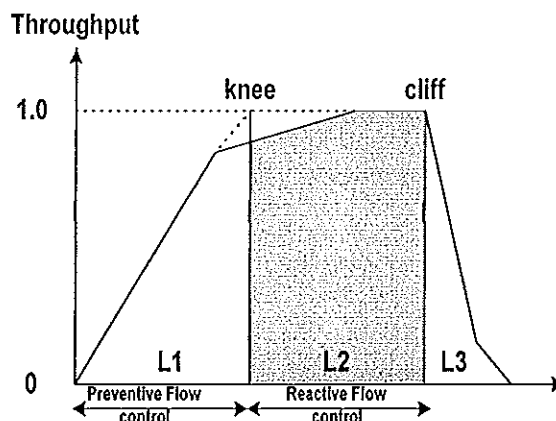
การเลือกเส้นทางเดินข้อมูลสามารถช่วยลดความเสี่ยงการเกิดความคับคั่งของข้อมูลได้โดยทำการแยกเส้นทางส่งข้อมูลออกไปในทุกๆ เส้นทางที่เป็นไปได้ แต่ถ้าเลือกอัลกอริทึมที่ไม่เหมาะสมทำให้เส้นทางนั้นเกิดความคับคั่งมากขึ้น ส่วนการจัดการกับอายุของแพ็กเกตใช้ในกรณีที่แพ็กเกตรออยู่ในบัฟเฟอร์นานเกินไป อายุจะเป็นตัวบอกว่าแพ็กเกตจะอยู่ในระบบได้นานเท่าใดก่อนที่แพ็กเกตจะถูกกำจัดออกไป ถ้าให้เวลาแพ็กเกตอยู่นานเกินไปแพ็กเกตที่รออยู่ในแถวคอยนานทำให้ความคับคั่งของข้อมูลมากขึ้น แต่ถ้ากำหนดเวลาให้น้อยเกินไปแพ็กเกตจะหมดอายุเสียก่อนที่จะเดินทางไปถึงปลายทางก็จะทำให้ต้องส่งแพ็กเกตนั้นใหม่อีก

ปัญหาที่เกิดขึ้นในชั้นสื่อสารเชื่อมต่อข้อมูลสามารถเกิดขึ้นได้ในชั้นนำส่งข้อมูล แต่การกำหนดระยะเวลาสำหรับการรอคอยแพ็กเกตตอบรับนั้นมีความสลับซับซ้อนกว่าชั้นนำส่งข้อมูลมาก เนื่องจากการคำนวณระยะเวลาการรอคอยในการส่งข้อมูลข้ามระหว่างเราเตอร์สองตัวที่อยู่คนละปลายสายสื่อสารนั้นทำได้ง่ายและเชื่อถือได้ แต่การคำนวณระยะเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านโครงข่ายนั้นไม่สามารถทำนายได้เพียงตรง ถ้าระยะเวลาการรอคอยสั้นเกินไปการส่งแพ็กเกตซ้ำกันก็จะถูกส่งออกไปอีกโดยไม่จำเป็น ถ้ากำหนดระยะเวลายาวเกินไป แม้จะไม่เพิ่มความคับคั่งของข้อมูลแต่อาจทำให้เวลาในการโต้ตอบระหว่างผู้รับและผู้ส่งยาวนานมากในกรณีที่แพ็กเกตเกิดสูญหาย

### 3.3 หลักการของการควบคุมการรับส่งข้อมูล

โดยทั่วไปแล้วระบบการควบคุมการรับส่งข้อมูลมีการทำงาน 2 รูปแบบใหญ่ๆ คือ Preventive Flow Control และ Reactive Flow Control

การทำงานในรูปแบบ Preventive Flow Control เป็นการทำงานที่จะป้องกันสถานะของโครงข่ายก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะงานมากเกินไปหรือเกือบหยุดทำงานเป็นสภาวะที่ประสิทธิภาพการทำงานลดลงอย่างมาก ในขณะที่รูปแบบ Reactive Flow Control จะลดสภาวะงานที่กำลังจะมากเกินไป (ไม่ใช่การป้องกัน) ให้เข้าสู่สภาวะที่ทำงานได้และยอมรับได้ แสดงในภาพประกอบ 3-2



ภาพประกอบ 3-2 แสดงลักษณะ Preventive Flow Control และ Reactive Flow Control

(ที่มา: Sinchai Kamolphiwong, 1998)

จะเห็นได้ว่า Preventive Flow Control นั้นเป็นการทำงานที่จะป้องกันสถานะของโครงข่ายก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะงานมากเกินไป (ช่วง L1) ในขณะที่ระบบ Reactive Flow Control จะทำงานเมื่อสถานะของระบบกำลังอยู่ในสภาวะงานมากเกินไป (ช่วง L2) ซึ่งจะลดสภาวะดังกล่าวให้เข้าสู่สภาวะที่ทำงานได้ปกติ จะเห็นว่าหากระบบ Reactive Flow Control ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะให้ค่า Throughput ที่สูงกว่า (ช่วง L2) แต่ถ้าหากล้มเหลวก็สามารถทำให้ค่า Throughput ลดลง (ช่วง L3)

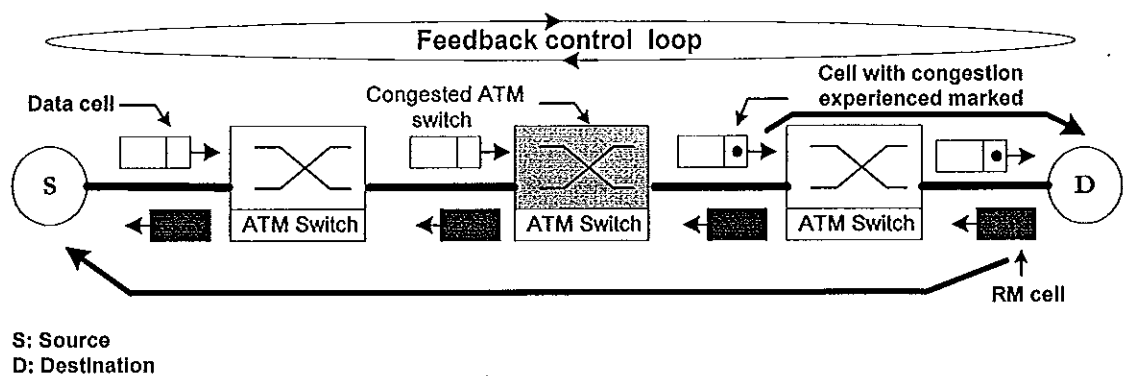
ข้อแตกต่างของ Preventive และ Reactive Flow Control คือ Preventive ทำงานในลักษณะวงจรเปิด ในขณะที่ Reactive flow Control ทำงานในลักษณะวงจรปิด นั่นก็คือว่า เมื่อโครงข่ายกำลังเข้าสู่สถานะที่งานมากเกินไประบบก็จะส่งข้อมูลกลับไปบอกผู้ใช้ในโครงข่ายให้ทราบสถานะของระบบซึ่งผู้ใช้จะต้องปรับอัตราการส่งข้อมูลให้ต่ำลงเพื่อที่ป้องกันไม่ให้โครงข่ายล้มเหลวเนื่องจากงานมากเกินไป ในขณะที่ Preventive Flow Control จะไม่มีการส่งข้อมูลกลับไปบอกผู้ใช้ให้รับทราบ แต่กลับใช้วิธีรับหรือไม่รับข้อมูลในขณะนั้นแทน

ระบบ Preventive Flow Control เมื่อนำมาใช้ในระบบที่มีการรับส่งด้วยความเร็วสูง อย่างเช่น ATM อาจจะทำให้ระบบมีการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงได้ยาก เนื่องจากว่าการะงานของระบบไม่แน่นอน (ยากที่จะพยากรณ์ได้ล่วงหน้า) และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่สูงมาก เป็นข้อจำกัดที่ทำให้ Preventive Flow Control ยากที่จะทำงานให้มีประสิทธิภาพสูงได้ และยากที่รับประกันคุณภาพการบริการใดๆได้ นอกจากนี้การใช้ Preventive Flow Control เพียงอย่างเดียวอาจจะทำให้การใช้ทรัพยากรในโครงข่ายมีประสิทธิภาพต่ำ เช่นอาจจะปิดกั้นผู้ใช้รายอื่นไม่ได้รับการบริการซึ่งในที่สุดแล้วระบบอาจจะยังพอมีแบนด์วิดท์เหลืออยู่ ดังนั้นการนำ Reactive

Flow Control มาให้เสริมเข้ากับ Preventive Flow Control จะสามารถทำให้ระบบโครงข่ายทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

การที่จะลดสถานะความคับคั่งของระบบได้นั้นการควบคุมอัตราความเร็วการส่งข้อมูลของต้นทางเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับที่ ATM Forum ได้กำหนดให้เป็นมาตรฐานในการควบคุมโครงข่าย ATM หลักการของการควบคุมอัตราความเร็วการส่งข้อมูล ก็คือต้นทางจะควบคุมอัตราความเร็วการส่งข้อมูลเข้าไปยังระบบโดยอาศัยข้อมูล (notification cell) ที่ส่งกลับมาจากระบบ ซึ่งจากภาพประกอบ 3-2 แสดงหลักการทำงานของสวิตช์ในการตรวจสอบสถานะการคับคั่งของข้อมูลเพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าของ congestion bit เมื่อสถานะงานสูงกว่าจุดที่เรียกว่า knee เซลล์ข้อมูลในขณะที่เกิดสถานะความคับคั่งของข้อมูลจะถูกทำเครื่องหมาย (Mark) ไว้ที่ cell header ก่อนที่จะถูกส่งไปยังปลายทาง ความกว้างระหว่าง knee และ cliff (ช่วง L2) จะขึ้นอยู่กับค่าอัตราความเร็วการส่งข้อมูล อัตราการให้บริการ ค่าเวลาหน่วงของข้อมูลระหว่างต้นทางกับจุดรับส่ง และค่าเวลาหน่วงของวงจรป้อนกลับเช่นระบบที่มีค่าเวลาหน่วงของวงจรป้อนกลับมากจะมีความกว้างของช่วง L2 กว้างกว่าระบบที่มีค่าเวลาหน่วงของวงจรป้อนกลับน้อย และโครงข่ายนี้ได้ใช้วิธี Forward Explicit Congestion Notification (FECN) และ Explicit rate (ER) Feedback Notification

ภาพประกอบ 3-3 แสดงหลักการทำงานของ FECN เมื่อเซลล์ข้อมูลถูกส่งออกจากต้นทาง Congestion bit ในเซลล์ส่วนหัวของ ATM จะยังไม่ถูกเซ็ท เมื่อเซลล์ดังกล่าวเดินทางมาถึงสวิตช์ ATM ถ้าหากระบบยังไม่เกิดสถานะการคับคั่งของข้อมูล congestion bit จะไม่ถูกเปลี่ยนแปลงและจะถูกจัดส่งต่อไปยังปลายทาง แต่ถ้าหากเมื่อไรก็ตามเกิดสถานะการคับคั่งของข้อมูล ขึ้นที่สวิตช์ ATM ตัวใดตัวหนึ่งในระบบที่ congestion bit จะถูกเซ็ท จากนั้นเซลล์ดังกล่าวก็ยังคงถูกจัดส่งต่อไปยังปลายทาง เมื่อปลายทางได้รับเซลล์ข้อมูลที่มี congestion bit ถูกเซ็ท



ภาพประกอบ 3-3 แสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมการรับส่งแบบ FECN

(ที่มา: Sinchai Kamolphiwong, 1998)



ปลายทางทราบว่ากำลังเกิดสภาวะการคับคั่งของข้อมูลขึ้นในระบบ ปลายทางก็จะส่ง เซลล์ซึ่งเรียกว่า เซลล์ Resource Management Cell (RM) กลับไปบอกยังต้นทาง ในขณะที่เซลล์ RM เดินทางไปยังต้นทาง สวิตช์ ATM ทุกตัวก็จะจัดส่ง RM เซลล์ไปยังต้นทางโดยการทำงานแบบ ปรกติ เมื่อต้นทางได้รับเซลล์ RM ดังกล่าวก็จะปรับอัตราความเร็วในการจัดส่งข้อมูลลง ตารางที่ 3-2 แสดงรูปแบบของเซลล์ RM

ตารางที่ 3-2 แสดงรูปแบบของเซลล์ RM

Field	Byte(s)	Bit(s)	Name
Header	1-5	All	ATM Cell Header PTI = 10 for VC VCI = 6 and PTI = 110 for VP
ID	6	All	1.371 RM Protocol ID
DIR	7	8	Direction
CI	7	7	Congestion Indicator
BN	7	6	BECN Indicator
Reserved	7	1-5	Reserved for Future use
Reserved	8-9	all	Reserved for Future use
CCR	10-11	all	Current Cell Rate
MCR	12-13	all	Minimum Cell Rate
ER	14-15	all	Explicit Rate
Reserved	16-51	all	Reserved for Future use
Reserved	52	3-8	1.371 Reserved
Error Detection	52	1-2	10-bit CRC
Code	53	all	10-bit CRC

(ที่มา: Sinchai Kamolphiwong.1998)

ส่วนการทำงานของ ER อาศัยหลักการทำงานของ FECN แต่แทนที่จะใช้วิธีการเพิ่มหรือลดความเร็วการส่งข้อมูลแบบเป็นสัดส่วนกับอัตราการส่งข้อมูลปัจจุบันวิธีนี้จะใช้การส่งอัตราความเร็วที่ต้องการซึ่งคำนวณโดยระบบกลับไปยังต้นทาง นอกจากนี้ยังทำงานได้ถ้าหากว่าเซลล์ RM สูญหายหรือมีเวลาหน่วงมาก เนื่องจากเซลล์ RM ถัดไปจะทำให้ระบบทำงานได้ถูกต้อง หลักการทำงานในวิธีนี้คือ Current Cell rate (CCR) และอัตราความเร็วที่ต้องการ (Desired Explicit

Rate: DER) ถูกกำหนดไว้ในเซลล์ RM เมื่อเซลล์ RM ถูกส่งไปยังสวิตช์ และสวิตช์พบว่าค่า DER มีค่าน้อยกว่าค่า Fair Share ในสวิตช์ สวิตช์จะแทนค่า DER ด้วยค่า Fair Share แต่ถ้าค่า DER มีค่ามากกว่าค่า Fair Share ในสวิตช์ ค่า DER จะถูกลดลงมาเท่ากับค่า Fair Share เมื่อต้นทางได้รับเซลล์ RM ก็จะไปปรับความเร็วให้มีค่าเท่ากับค่า DER

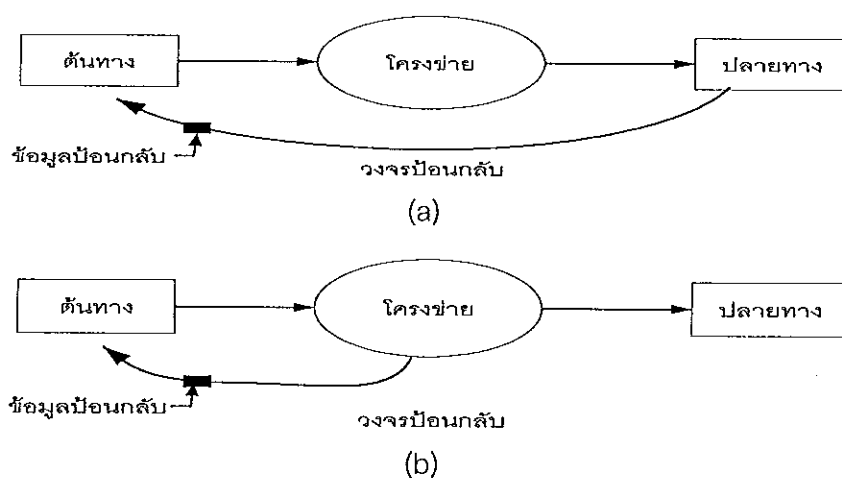
### 3.4 การควบคุมลักษณะของทราฟฟิก

สาเหตุหลักของการเกิดความคับคั่งของข้อมูลคือเราเตอร์และโฮสต์ส่วนมากจะส่งข้อมูลเป็นช่วงๆ ด้วยความเร็วสูงมากภายในระยะเวลาสั้นๆ ที่เรียกว่า "Burst" สลับกับการหยุดนิ่ง ถ้าเราเตอร์และโฮสต์สามารถส่งข้อมูลในอัตราความเร็วสม่ำเสมอโอกาสที่จะเกิดความคับคั่งของข้อมูลก็จะลดลง การบังคับให้แพ็กเก็ตถูกส่งออกมาในอัตราความเร็วที่สามารถคาดเดาหรือคำนวณได้เป็น อีกวิธีการหนึ่งของการแก้ปัญหาความคับคั่งของข้อมูลแบบวงจรเปิด วิธีการนี้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในระบบโครงข่ายแบบ ATM โดยเรียกว่าการควบคุมลักษณะของทราฟฟิก (Traffic Shaping)

การควบคุมรูปร่างของทราฟฟิกเกี่ยวกับการกำหนดอัตราเฉลี่ยของการส่งข้อมูลและการจัดการ Burst ซึ่งไม่เหมือนกับโพรโตคอลหน้าต่างเลื่อนไหล ซึ่งจะกำหนดขีดจำกัดปริมาณข้อมูลสำหรับการส่งในแต่ละครั้งแต่ไม่ได้กำหนดอัตราความเร็วในการส่งข้อมูล เมื่อวงจรเสมือนได้ถูกสร้างขึ้นมาทั้งผู้ใช้(โฮสต์)และโครงข่ายย่อย(เราเตอร์)ต้องทำความตกลงกันเกี่ยวกับอัตราความเร็วในการส่งข้อมูล รวมเรียกว่า กติกาการส่งข้อมูล

### 3.5 หลักการของการควบคุมแบบป้อนกลับ

ดังที่ได้กล่าวมาในเบื้องต้นแล้วว่า Reactive Flow Control พยายามที่จะลดสภาวะการล้นของข้อมูล (Buffer Overflow) ในโครงข่ายให้เข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งสามารถทำได้โดยการส่งข้อมูลสถานะของโครงข่าย (Notification Information) ให้กับต้นทางได้ทราบเพื่อลดอัตราการส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบ เพื่อให้ระบบดังกล่าวเข้าสู่สภาวะปรกติก่อน แล้วจึงเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลใหม่แสดงในภาพประกอบ 3-4 (a) แสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) แบบต้นทาง-ปลายทาง (End-to-End) ภาพประกอบ 3-4 (b) แสดงระบบควบคุมการป้อนกลับแบบต้นทาง-กลางทาง (Intermediate Feedback) โดยหลักการแล้วการป้อนกลับแบบต้นทาง-กลางทางจะทำการตอบสนองได้รวดเร็วกว่าแบบต้นทาง-ปลายทาง



ภาพประกอบ 3-4 แสดงหลักการทำงานของระบบควบคุมแบบการป้อนกลับ

(a) แบบต้นทาง-ปลายทาง (b) แบบต้นทาง-กลางทาง

(ที่มา: Sinchai Kamolphiwong, 1998)

หลักการควบคุมการรับส่งข้อมูลแบบป้อนกลับนี้หากสามารถป้อนกลับให้ผู้ใช้แต่ละรายได้ จะทำให้ระบบโครงข่ายสามารถควบคุมการส่งข้อมูลของผู้ใช้เป็นรายๆได้ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น เนื่องจากเป็นไปได้ว่าผู้ใช้งานแต่ละรายอาจจะรับส่งประเภทของข้อมูลที่แตกต่างกันไปตามความต้องการ (อัตราความเร็วการส่งข้อมูล) อาจจะแตกต่างกันออกไปจึงมีความเหมาะสมที่ระบบโครงข่ายจะต้องควบคุมผู้ใช้งานแต่ละรายไป

### 3.6 วิธีการควบคุมความคับคั่งของข้อมูลสำหรับ TCP/IP บนโครงข่าย ATM

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอัลกอริทึมต่างๆที่ใช้ในการควบคุมคับคั่งของข้อมูลเช่นอัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> ที่ใช้กับการบริการแบบ ABR อัลกอริทึม EPD ที่ใช้กับการบริการแบบ UBR และได้ปรับปรุงการทำงานของอัลกอริทึม EPD ได้แก่ การนำการทำงานของอัลกอริทึม EPD มาทำงานร่วมกับอัลกอริทึม Random Early Detection (RED), การทำงานของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่มาทำงานร่วมกับ RED, การทำงานของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่มาทำงานร่วมกับการหาค่าเฉลี่ยของบัพเฟอร์ ดังนี้

### 3.6.1 อัลกอริทึม Explicit Rate Indication for Congestion Avoidance (ERICA<sup>+</sup>)

หลักการการทำงานของ ERICA<sup>+</sup> มีวิธีการจัดสรรแบนด์วิดท์และใช้แบนด์วิดท์ในส่วนที่เหลือได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่สวิตช์ จะตรวจสอบปริมาณของทราฟฟิกในแต่ละการเชื่อมต่อ โดยมีโหลดแพกเตอร์ (Z) ดังสมการที่ 1 ซึ่งแสดงระดับความคับคั่งของโครงข่าย ถ้าหากค่านี้สูงจะแสดงว่าเกิดสภาวะการคับคั่งของข้อมูลมาก แต่ถ้าค่านี้ต่ำ แสดงว่ามีการใช้แบนด์วิดท์ไม่เต็มที่ต้องการหาค่าโหลดแพกเตอร์, ความจุของการบริการ ABR และค่าเฉลี่ยของโหลด ( $\alpha$ ) ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$Z = \frac{(1 - \alpha) \times Z + (\alpha \times \text{ABR Input rate})}{\text{ABR Capacity}} \quad (1)$$

โดยที่  $\text{ABR Capacity} = \text{Link Capacity} - \text{VBR Capacity}$

จากสมการที่ 2 แสดงเป้าหมายความจุของ ABR ที่เกิดจากผลรวมของความจุของการบริการ ABR กับค่าหน่วงของบัฟเฟอร์ ( $T_q$ ) ที่สวิตช์ คำนวณจากสมการที่ 2

$$\text{Target ABR Capacity} = f(T_q) \times \text{Total ABR Capacity} \quad (2)$$

โดยที่

$$f(T_q) = \begin{cases} \text{Max} \left( \text{QDLF}, \frac{a \times Q}{(a - 1) \times q + Q} \right) & \text{เมื่อ } q > Q \\ \frac{b \times Q}{(b - 1) \times q + Q} & \text{เมื่อ } q \leq Q \end{cases}$$

$Q = \text{Total ABR Capacity} \times T_0$

อัตราการส่งแบบเท่าเทียมกันเป็นอัตราส่งของความจุของการบริการแบบ ABR ต่อจำนวนการเชื่อมต่อที่กำลังทำงานอยู่ คำนวณจากสมการที่ 3

$$\text{FairShare} = \text{ABR Capacity} / \text{Number of Active Sources} \quad (3)$$

ถ้าแหล่งกำเนิดมีอัตราการส่งต่ำกว่าค่าอัตราการส่งแบบเท่าเทียมกัน สวิตช์ควรมีการจัดสรรแบนด์วิดท์ให้แก่แหล่งกำเนิดอื่นจึงได้กำหนดค่า VCShare ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 4

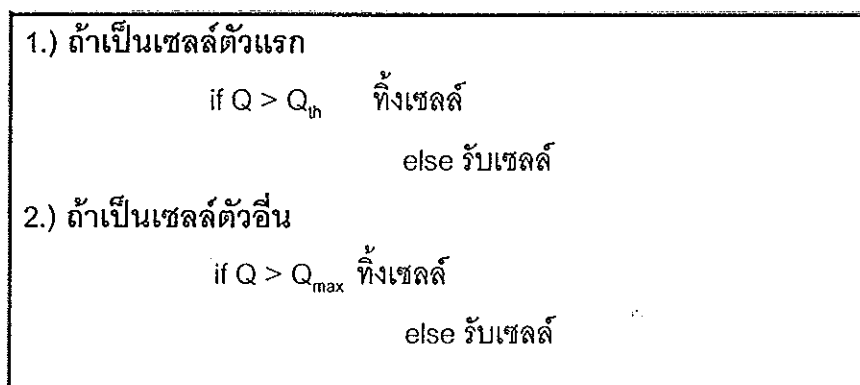
$$\text{VCShare} = \text{CCR} / Z \quad (4)$$

สวิตช์จะคำนวณค่า ER เพื่อส่งกลับไปยังแหล่งกำเนิดตามสมการที่ 5

$$\text{ER} = \begin{cases} \text{Max} (\text{FairShare}, \text{VCShare}) \\ \text{Min} (\text{ER Calculated}, \text{ABR Capacity}) \\ \text{Min} (\text{ER in RM cell}, \text{ER Calculated}) \end{cases} \quad (5)$$

### 3.6.2 อัลกอริทึม EPD

เมื่อมีเซลล์เข้ามาที่บัฟเฟอร์ของสวิตช์ สวิตช์จะทำการตรวจสอบขนาดของบัฟเฟอร์ ถ้าหากเซลล์ที่เข้ามาเกิดค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ( $Q_{th}$  หรือ  $max_{th}$ ) เซลล์ที่เข้ามาใหม่ก็จะถูกทิ้ง โดยที่  $Q_{max}$  เป็นค่าของขนาดบัฟเฟอร์สูงสุด และ  $Q_{th}$  เป็นค่าขนาดบัฟเฟอร์ที่จุดเริ่มเปลี่ยนดังภาพประกอบ 3-5 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม EPD



ภาพประกอบ 3-5 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม EPD

### 3.6.3 อัลกอริทึม RED

อัลกอริทึม RED จะใช้การคำนวณหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ (Average Queue Size: avg) เพื่อหลีกเลี่ยงความคับคั่งของข้อมูลซึ่งเป็นการตรวจสอบหาความคับคั่ง ถ้าหากเกิดความคับคั่งก็จะทิ้งแพ็กเก็ตที่เข้ามายัง ATM สวิตช์ เริ่มต้นทำงานเมื่อมีเซลล์เข้ามายัง ATM สวิตช์ตัวแรกโดยที่แต่ละเซลล์ที่เข้ามาจะเริ่มคำนวณหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ที่ ATM สวิตช์ ซึ่งคำนวณจากค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ที่คำนวณได้ล่าสุด (เกิดจากการรวมกันระหว่างช่วงที่มีการส่งเซลล์กับช่วงที่อยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง) รวมกับช่วงที่มีการส่งเซลล์อยู่ในปัจจุบันและต้องอยู่ระหว่างค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสูงสุด ( $max_{th}$ ) และจุดเริ่มเปลี่ยนต่ำสุด ( $min_{th}$ ) แต่ละเซลล์ที่เข้ามาจะถูกทิ้งเซลล์ด้วยความน่าจะเป็น ( $P_q$ ) โดยที่  $P_q$  เป็นฟังก์ชันของค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์มีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นจาก 0 ถึงค่า  $max_p$  และการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ก็คือค่า  $Wq$  ถ้าหากค่านี้ต่ำมากจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์อย่างช้าๆ มีผลทำให้ไม่สามารถตรวจสอบความคับคั่งในช่วงแรกได้ หลักการทำงานของอัลกอริทึมมีรายละเอียดดังนี้

เริ่มต้นการทำงานคำนวณจำนวนเซลล์ที่เข้ามายัง ATM สวิตช์ตัวแรกแล้วนำไปใช้  
ในการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์

$$\text{avg} = 0$$

$\text{count} = -1$  ; โดยที่  $\text{count}$  คือเซลล์ที่เข้ายังบัฟเฟอร์

เมื่อทุก ๆ เซลล์เข้ามาที่บัฟเฟอร์จะคำนวณค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์  $\text{avg}$ :

if  $\text{avg} > \min_{th}$

$$\text{count} = \text{count} + 1$$

else  $\text{count} = 0$

if (บัฟเฟอร์ไม่ว่าง)

$\text{avg} = (1 - Wq)\text{avg} + WqQ$  ; โดยที่  $Q$  คือขนาดของบัฟเฟอร์ปัจจุบัน

else (บัฟเฟอร์ว่าง)

$$m = (\text{time} - q\_time) / 1000$$

โดยที่  $\text{time}$  เป็นเวลาจริง และ  $q\_time$  เป็นเวลาที่บัฟเฟอร์เริ่มอยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง(บัฟเฟอร์ว่าง)

$$\text{avg} = (1 - Wq)^m \text{avg}$$

ภาพประกอบ 3-6 (a) แสดงการทำงานของอัลกอริทึม RED โดยการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์

if  $\min_{th} \leq \text{avg} < \max_{th}$

$$\text{count} = \text{count} + 1$$

คำนวณความน่าจะเป็นของ  $P_a$ :

$$P_b = \max_p (\text{avg} - \min_{th}) / (\max_{th} - \min_{th})$$

$P_a = P_b / (1 - \text{count} \times P_b)$  ; ความน่าจะเป็น ( $P_a$ ) ที่เซลล์ถูกทิ้งเมื่อเข้ามาที่บัฟเฟอร์

$$\text{count} = 0$$

else if  $\max_{th} \leq \text{avg}$

$$\text{count} = 0$$

else  $\text{count} = -1$

เมื่อบัฟเฟอร์ว่าง  $q\_time = \text{time}$

ภาพประกอบ 3-6 (b) เริ่มคำนวณความน่าจะเป็นในการทิ้งเซลล์ของอัลกอริทึม RED

### 3.7 อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

อัลกอริทึมที่ปรับปรุงใหม่จะประกอบด้วย 3 อัลกอริทึมคือ 1. อัลกอริทึม EPD ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม RED 2. อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม RED 3. อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่กับการหาค่าเฉลี่ยของบัพเฟอร์ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.7.1 อัลกอริทึม EPD ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม RED (EPD+RED)

การนำอัลกอริทึม EPD มาทำงานร่วมกับอัลกอริทึม RED ก็เพื่อปรับปรุงสมรรถนะให้ดีขึ้น อัลกอริทึมทั้งสองจะใช้วิธีการทิ้งเซลล์เมื่อเซลล์ที่เข้ามายัง ATM สวิตช์เกินค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ อัลกอริทึม RED จะใช้จุดเริ่มเปลี่ยนต่ำสุด ( $min_n$ ) และจุดเริ่มเปลี่ยนสูงสุด ( $max_n$ ) โดยการคำนวณค่าเฉลี่ยของบัพเฟอร์ ( $avg$ ) จากสมการ  $avg = (1 - Wq) avg + WqQ$  โดยที่  $Wq$  เป็นค่า Weighting coefficient และค่า  $Q$  เป็นความยาวของบัพเฟอร์ปัจจุบัน สวิตช์จะเปรียบเทียบค่า  $avg$  จาก  $min_n$  และ  $max_n$  เมื่อค่า  $avg$  น้อยกว่า  $min_n$  จะทำการรับเซลล์เข้ามา และ  $avg$  มากกว่า  $max_n$  จะทิ้งเซลล์ที่เข้ามา และถ้าหากค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง  $min_n$  และ  $max_n$  เซลล์ที่เข้ามาจะถูกทิ้งด้วยความน่าจะเป็นของ  $P_s$  ส่วนเซลล์ถูกทิ้งจากอัลกอริทึม RED ก็เข้าสู่การทำงานในอัลกอริทึม EPD เซลล์ที่ถูกทิ้งนี้จะได้รับการตรวจสอบก่อนว่าเป็นเซลล์ชนิดใด ถ้าหากว่าเป็นเซลล์ตัวอื่นซึ่งไม่ใช่เป็นเซลล์ตัวแรกก็จะไม่ถูกทิ้ง แต่ถ้าหากเป็นเซลล์ตัวแรกก็จะถูกทิ้งโดยอัลกอริทึม EPD อีกซึ่งแสดงให้เห็นตามกระบวนการดังนี้

1.) ตรวจสอบเซลล์ที่เข้ามายัง ATM สวิตช์ตัวแรกโดยพิจารณาว่าเป็นเซลล์ตัวแรก

if  $Q > \max_{th}$  ทิ้งเซลล์

else { เมื่อเซลล์เข้ามาที่บัฟเฟอร์จะคำนวณค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ avg:

$avg = (1 - Wq)avg + WqQ$  ; โดยที่  $Q$  คือขนาดของบัฟเฟอร์ปัจจุบัน

if ( $\min_{th} \leq avg < \max_{th}$ )

{ count = count + 1

คำนวณความน่าจะเป็นของ  $P_a$ :

$P_b = \max_p (avg - \min_{th}) / (\max_{th} - \min_{th})$

$P_a = P_b / (1 - count \times P_b)$

if (cell ถูกทิ้ง) count = 0

}

if ( $avg > \max_{th}$ ) ทิ้งเซลล์

}

2.) ตรวจสอบพบว่าเป็นเซลล์ตัวอื่น

if  $Q > Q_{max}$  ทิ้งเซลล์

else รับเซลล์

ภาพประกอบ 3-7 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม EPD ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม RED

### 3.7.2 อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่ร่วมกับ RED (AEPD+RED)

เพิ่มเติมจากอัลกอริทึมข้างต้นคือเพิ่มในส่วนของอัลกอริทึม EPD ซึ่งเป็นการปรับปรุงใหม่ในส่วนของการตรวจสอบจำนวนเซลล์และจำนวนการเชื่อมต่อซึ่งแสดงให้เห็นจากสมการคือ

$$\frac{\text{จำนวนcell} \times \text{จำนวนVC}}{Q} > Z \left( \frac{Q_{max} - \max_{th}}{Q - \max_{th}} \right)$$

นอกจากการตรวจสอบความยาวของบัฟเฟอร์แล้วยังตรวจสอบว่าเมื่อเซลล์ที่เข้ามายัง ATM สวิตช์ในระยะเวลาหนึ่งมีจำนวนการเข้าออกของเซลล์เท่าไรและมีจำนวนการเชื่อมต่อในขณะนั้นเท่าไร ส่วน  $Z$  เป็นค่า linear factor ที่มีผลต่อสมรรถนะของโครงข่ายรายละเอียดของการคำนวณค่า  $Z$  จะกล่าวไว้ในบทที่ 5 อัลกอริทึมที่ปรับปรุงใหม่มีการทำงานดังนี้



1.) ตรวจสอบเซลล์ที่เข้ามาถึง ATM สวิตช์ตัวแรกโดยพิจารณาว่าเป็นเซลล์ตัวแรก

$$\text{if } Q > \max_{th} \quad \text{และ} \quad \frac{\text{จำนวนcell} \times \text{จำนวนVC}}{Q} > Z \left( \frac{Q_{max} - \max_{th}}{Q - \max_{th}} \right)$$

ทิ้งเซลล์

else { เมื่อเซลล์เข้ามาที่บัฟเฟอร์จะคำนวณค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ avg:

$$\text{avg} = (1 - Wq)\text{avg} + WqQ \quad ; \text{ โดยที่ } Q \text{ คือขนาดของบัฟเฟอร์ปัจจุบัน}$$

if ( $\min_{th} \leq \text{avg} < \max_{th}$ )

{ count = count + 1

คำนวณความน่าจะเป็นของ  $P_a$ :

$$P_b = \max_p (\text{avg} - \min_{th}) / (\max_{th} - \min_{th})$$

$$P_a = P_b / (1 - \text{count} \times P_b)$$

if (cell ถูกทิ้ง) count = 0

}

if ( $\text{avg} > \max_{th}$ ) ทิ้งเซลล์

}

2.) ตรวจสอบพบว่าเป็นเซลล์ตัวอื่น

if  $Q > Q_{max}$  ทิ้งเซลล์

else รับเซลล์

ภาพประกอบ 3-8 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่ร่วมกับ RED

### 3.7.3 อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่รวมกับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ (AEPD+Avg)

อัลกอริทึมนี้ได้นำวิธีการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์มาใช้ร่วมกับการทำงานของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งต้องการตรวจสอบให้เห็นว่าการทิ้งเซลล์ด้วยความน่าจะเป็นของ  $P_a$  ดังอัลกอริทึมข้างต้นกับการทิ้งเซลล์เมื่อขนาดของบัฟเฟอร์เกินค่า  $\max_{th}$  อัลกอริทึมแบบใดจะให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่าซึ่งมีการทำงานดังนี้

1.) ตรวจสอบเซลล์ที่เข้ามายัง ATM สวิตช์ตัวแรกโดยพิจารณาว่าเป็นเซลล์ตัวแรก

$$\text{if } Q > \max_{th} \quad \text{และ} \quad \frac{\text{จำนวนcell} \times \text{จำนวนVC}}{Q} > Z \left( \frac{Q_{max} - \max_{th}}{Q - \max_{th}} \right)$$

ทิ้งเซลล์

else { เมื่อเซลล์เข้ามาที่บัฟเฟอร์จะคำนวณค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ avg:

$$\text{avg} = (1 - Wq)\text{avg} + WqQ \quad ; \quad \text{โดยที่ } Q \text{ คือขนาดของบัฟเฟอร์ปัจจุบัน}$$

if ( avg >  $\max_{th}$  ) ทิ้งเซลล์

else รับเซลล์

}

2.) ตรวจสอบพบว่าเป็นเซลล์ตัวอื่น

if  $Q > Q_{max}$  ทิ้งเซลล์

else รับเซลล์

ภาพประกอบ 3-9 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่รวมกับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์

### 3.8 สรุป

อัลกอริทึมที่ใช้ควบคุมความคับคั่งของข้อมูลจะมีทั้งหมด 2 แบบใหญ่ๆ คืออัลกอริทึมที่ใช้ควบคุมความคับคั่งของข้อมูลเมื่อใช้การบริการแบบ ABR ซึ่งได้แก่อัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> และอัลกอริทึมที่ใช้ควบคุมความคับคั่งของข้อมูลเมื่อใช้การบริการแบบ UBR ในส่วนนี้ใช้อัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ในอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ได้ปรับปรุงอัลกอริทึมออกเป็น 3 แบบได้แก่ 1. อัลกอริทึม EPD มาทำงานร่วมกับอัลกอริทึม RED 2. อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่มาทำงานร่วมกับอัลกอริทึม RED 3. อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ทำงานการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทั้งหมด ส่วนผลการทดสอบอัลกอริทึมใหม่จะอยู่ในบทที่ 5 โดยที่พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม วิธีการสร้างแบบจำลอง และแบบจำลองทั้งหมดจะกล่าวไว้ในบทต่อไป

## บทที่ 4

### แบบจำลองการทำงาน (Simulation Models)

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลอง, พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองซึ่งได้แก่พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม RED และพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ รวมถึงแบบจำลองทั้งหมดที่นำมาทดสอบโดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 วิธีสร้างแบบจำลองการทำงาน

วิธีการสร้างและทดสอบแบบจำลองจะทำงานบนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ (Linux) สามารถสร้างได้โดยการนำ Simulator NIST [NIST, 1999] มาใช้ในการสร้างและทดสอบแบบจำลอง และปรับปรุง Simulator ในส่วนของ ATM สวิตช์ ส่วนการจำลองโครงข่าย ATM ใช้วิธีการควบคุมการไหลของข้อมูลในรูปแบบของ TCP-Reno [Kalyanaraman, S.; Jain, R. and Fahmy, S., 1998] ที่มีคุณลักษณะแบบ Fast Retransmit and Recovery และปรับปรุงอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน

ส่วนการวัดค่าสมรรถนะจะวัดจาก 2 ปัจจัยคือ Throughput และ Fairness โดยที่ค่า Throughput มาจากแหล่งข้อมูลที่วัดได้ทุกแหล่งมารวมกันแล้วหารด้วยจำนวนการเชื่อมต่อ โดยที่ค่า Throughput เกิดจากการวัดจำนวนของแพ็กเก็ต (จากแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ) ที่ส่งจากต้นทางไปถึงปลายทางต่อเวลาที่ใช้ในการทดสอบ และค่า Throughput ที่วัดได้จากแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อจะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า Fairness ดังนั้นเหตุที่เลือกค่า Throughput และ Fairness ไว้สำหรับวัดสมรรถนะของโครงข่ายนั้นก็เพื่อตรวจสอบดูจำนวนแพ็กเก็ตที่ส่งไปยังปลายทางมีจำนวนเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนแพ็กเก็ตที่ส่งจากต้นทาง และสามารถตรวจสอบว่าในแต่ละแหล่งข้อมูลมีการจัดสรรการส่งอย่างไร ส่วนแบบจำลองที่นำมาทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบจำลองได้แก่

1. แบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR
2. แบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR
3. แบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR
4. แบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR

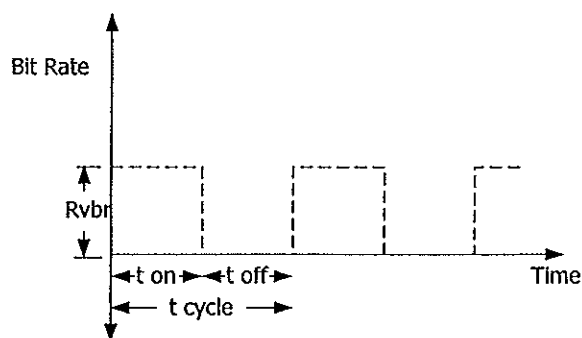
โดยที่การทดสอบแบบจำลองทั้งหมดนี้จะใช้ขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และ 10,000 เซลล์ จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ ส่วนแหล่งข้อมูลจะเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และ 20 การเชื่อมต่อ

การบริการแบบ ABR จะใช้อัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> เพราะใช้อัลกอริทึมนี้เป็นการออกแบบไว้ใช้สำหรับการบริการแบบ ABR โดยจะมีในส่วนของวงจรม้วนกลับเพื่อกำหนดค่า RM เซลล์ส่งกลับไปที่ต้นทาง และการบริการแบบ UBR จะใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ส่วนพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 4.2.2

วิธีการวิเคราะห์ขนาดของบัฟเฟอร์จะใช้การทดสอบแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่างขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ซึ่งถือว่าเป็นบัฟเฟอร์ที่มีขนาดเล็กมาก และขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ ซึ่งเป็นจำนวนมากพอที่จะรองรับเซลล์ที่เข้ามาถึงสวิตช์ในช่วงเวลาหนึ่ง เหตุที่เปรียบเทียบขนาดบัฟเฟอร์ระหว่าง 500 เซลล์ และ 10,000 เซลล์ เพราะต้องการพิจารณาความสามารถของอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้เมื่อบัฟเฟอร์มีขนาดเล็กมากจะส่งผลอย่างไรต่อการทำงานทั้งระบบ โดยส่วนสำคัญสามารถตรวจสอบจากเปอร์เซ็นต์การทิ้งเซลล์ และเมื่อเปลี่ยนขนาดของบัฟเฟอร์เป็น 10,000 เซลล์จำนวนเซลล์ที่ถูกทิ้งจะลดลงดังนั้นความสามารถในการทำงานของระบบต้องดีขึ้น

การวิเคราะห์จำนวนสวิตช์ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์เพราะต้องการพิจารณาสมรรถนะการทำงานของโครงข่ายเมื่อโครงข่ายมีขนาดใหญ่ซึ่งจะส่งผลให้ค่าของสมรรถนะเป็นอย่างไรและแหล่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นจาก 10 การเชื่อมต่อเป็น 20 การเชื่อมต่อจะมีผลต่อสมรรถนะอย่างไรเมื่อใช้การบริการแบบ UBR หรือการบริการแบบ ABR

การบริการแบบ VBR จะมีการส่งข้อมูลเป็นช่วงๆ กล่าวคือ ช่วงที่มีการส่งข้อมูล (ON) ในแบบทดสอบแบบจำลองนี้จะแบ่งเป็น 2, 3 และ 5 มิลลิวินาที และช่วงที่ไม่มีการส่งข้อมูล (OFF) จะเป็น 5, 7 และ 8 มิลลิวินาที จากภาพประกอบ 4-1 แสดงการบริการของ VBR ที่มีลักษณะเป็น ON-OFF



ภาพประกอบ 4-1 แสดงการบริการของ VBR ที่มีลักษณะเป็น ON-OFF

ค่าเฉลี่ยของ VBR สามารถคำนวณจากสมการที่ 1 [Kalyanaraman, S.; Jain, R. and Fahmy, S., 1998]

$$\overline{Rvbr} = \frac{Rvbr.ton}{t_{cycle}} \quad (1)$$

เช่น ON เท่ากับ 2 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 8 มิลลิวินาที ส่วนค่า Rvbr เท่ากับ 100 เมกะบิตต่อวินาที ดังนั้นค่าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \overline{Rvbr} &= \frac{100 \times 2}{(2 + 8)} \\ &= 20 \text{ เมกะบิตต่อวินาที} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของการบริการแบบ VBR สรุปได้ตามตารางที่ 4-1 โดยการใช้การคำนวณจากสมการที่ 1

ตารางที่ 4-1 ค่าเฉลี่ยของการบริการแบบ VBR

การบริการแบบ VBR ที่มีลักษณะ ON -OFF	ค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้ (เมกะบิตต่อวินาที)
ON=2 มิลลิวินาที , OFF =8 มิลลิวินาที	20
ON=3 มิลลิวินาที , OFF =7 มิลลิวินาที	30
ON=5 มิลลิวินาที , OFF =5 มิลลิวินาที	50

#### 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองสำหรับการบริการแบบ VBR, ABR และ UBR และพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมต่างๆ ได้แก่

##### 4.2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองสำหรับการบริการแบบ VBR, ABR และ UBR

1. แบบจำลองจะประกอบด้วย TCP Sources หรือแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และ 20 การเชื่อมต่อ
2. แหล่งข้อมูลแต่ละตัวมีขนาดข้อมูลเท่ากับ 60 เมกะไบต์ ซึ่งเป็นขนาดข้อมูลที่ใหญ่เพื่อต้องการให้สามารถส่งข้อมูลอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาในการทดสอบ
3. ATM แอปพลิเคชันส่งข้อมูลบน Optical Carrier (OC) 3 ซึ่งมีแบนด์วิดท์เท่ากับ 155 เมกะบิตต่อวินาที

4. ระยะทางระหว่าง Broadband Terminal Equipment (BTE) กับ ATM สวิตช์ในแต่ละการเชื่อมต่อมีระยะทาง 20 กิโลเมตร และระยะทางระหว่างสวิตช์มีขนาดเท่ากับ 1,000 กิโลเมตร

5. การบริการแต่ละชนิดจะมีลักษณะการส่งข้อมูลแบบทางเดียว (Unidirectional) หมายถึงต้นทางสามารถส่งข้อมูลได้เท่านั้น ส่วนปลายทางจะเป็นตัวรับข้อมูลและส่งเฉพาะข้อมูลตอบรับ

6. TCP มีการจับเวลาในการส่งข้อมูลช้าเท่ากับ 100 มิลลิวินาที

7. TCP RCWND (Recived Congestion windows) มีค่าเท่ากับ 64 กิโลไบต์

8. ค่า Maximum Segment Size (MSS) มีค่าเท่ากับ 9,180 ไบต์

9. แหล่งข้อมูลทุกตัวส่งข้อมูลพร้อมกัน และการทดสอบแบบจำลองจะใช้เวลาเท่ากับ 25 วินาที

10. สวิตช์จะมีจำนวนเท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์

11. อัตราความเร็วในการส่งข้อมูลที่ต้นทาง เท่ากับขนาดของแบนด์วิดท์ต่อจำนวนการเชื่อมต่อ

#### 4.2.2 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

##### 1. อัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> ประกอบด้วยพารามิเตอร์

-Target Utilization กำหนดไว้ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของแบนด์วิดท์ของการเชื่อมต่อซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 140 เมกะบิตต่อวินาที

-Average Interval (AI) มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิวินาที

-Target Queuing Delay (TQ) มีค่าเท่ากับ 0.1 มิลลิวินาทีซึ่งค่านี้จะขึ้นกับขนาดของบัฟเฟอร์ที่ ATM สวิตช์

-Queue Drain Limit Factor (QDLF) เท่ากับ 0.5 ซึ่งเป็นแฟกเตอร์ที่จำกัดจำนวนความจุของ ABR

-a เท่ากับ 1.15 และ b เท่ากับ 1.05 ใช้สำหรับพิจารณาการจัดสรรความจุให้กับ ABR ซึ่งจะมีความชันที่มีลักษณะเป็น hyperbola

-DecayFactor ( $\alpha$ ) มีค่าเท่ากับ 0.9 ซึ่งช่วยให้จำนวนการเชื่อมต่อที่ไม่ทำงานสามารถทำงานได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยปกติจะเลือกค่านี้มีค่าเท่ากับ 0.9 เพราะสามารถทำให้จำนวนการเชื่อมต่อที่อยู่ในสภาวะหยุดนิ่งสามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น

## 2. อัลกอริทึม EPD ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม EPD

ลำดับที่	ขนาดบัฟเฟอร์สูงสุด (เซลล์)	ขนาดของจุดเริ่มเปลี่ยน (เซลล์)
พารามิเตอร์ลำดับที่ 1	500	400
พารามิเตอร์ลำดับที่ 2	10,000	8,000

## 3. อัลกอริทึม RED ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึม RED

ชื่อพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด
$Wq$	0.002
$max_p$	0.02
$(max_{th}, min_{th})$	(400, 200) เซลล์
	(8,000, 4,000) เซลล์

## 4. อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่ประกอบด้วยพารามิเตอร์

พารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่เหมือนกับพารามิเตอร์ EPD แต่มีพารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้นมาใหม่คือ  $Z$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานเมื่อแบบจำลองมีการทำงานร่วมกับการบริการแบบ VBR โดยมีสมการดังนี้ (จากสมการในบทที่ 3 อยู่ในหัวข้อ 3.7.2)

$$\frac{\text{จำนวนcell} \times \text{จำนวนVC}}{Q} > Z \left( \frac{Q_{max} - max_{th}}{Q - max_{th}} \right)$$

แบ่งการคำนวณออกเป็น 2 รูปแบบคือ

1. ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสูงสุดเท่ากับ 400 เซลล์ และค่าขนาดของบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ เช่น ON เท่ากับ 2 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 8 มิลลิวินาที จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณจำนวน cell จากค่าแบนด์วิดท์ของการเชื่อมต่อ (Link bandwidth) ซึ่งจะใช้ค่าเท่ากับ 140 เมกะบิตต่อวินาทีแล้วลบออกด้วย 20 เมกะบิตต่อวินาทีซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 120 เมกะบิตต่อวินาทีแล้ว

เปลี่ยนหน่วยเมกะบิตต่อวินาทีเป็นเซลล์ต่อมิลลิวินาทีจะมีค่าเท่ากับ 283 เซลล์ต่อมิลลิวินาที ส่วนค่าของจำนวน VC เท่ากับ 283 และใช้ค่า Q เท่ากับ 401 เซลล์ นำค่าที่คำนวณได้ไปแทนในสมการข้างต้นคือ

$$\frac{283 \times 283}{401} > Z \left( \frac{500 - 400}{401 - 400} \right)$$

$$Z \cong 2$$

ซึ่งจะมีค่าประมาณ 2 จากตารางที่ 4-4 เป็นการสรุปค่า Z ดังนี้

ตารางที่ 4-4 ค่า Z เมื่อจุดเริ่มเปลี่ยนสูงสุดเท่ากับ 400 เซลล์ และค่าขนาดของบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์

การบริการแบบ VBR ที่มีลักษณะ ON -OFF	ค่า Z
ON=2 มิลลิวินาที , OFF=8 มิลลิวินาที	2
ON=3 มิลลิวินาที , OFF=7 มิลลิวินาที	1.67
ON=5 มิลลิวินาที , OFF=5 มิลลิวินาที	1.12

2. ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนสูงสุดเท่ากับ 8,000 เซลล์ และค่าขนาดของบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์ เช่น ON เท่ากับ 2 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 8 มิลลิวินาที จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณจำนวน cell จากค่าแบนด์วิดท์ของการเชื่อมต่อซึ่งจะใช้ค่าเท่ากับ 140 เมกะบิตต่อวินาที แล้วลบออกไปอีก 20 เมกะบิตต่อวินาทีซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 120 เมกะบิตต่อวินาทีแล้วเปลี่ยนหน่วยเมกะบิตต่อวินาทีเป็นเซลล์ต่อมิลลิวินาทีจะมีค่าเท่ากับ 283 เซลล์ต่อมิลลิวินาทีส่วนค่าของจำนวน VC เท่ากับ 283 และใช้ค่า Q เท่ากับ 8,001 เซลล์ นำค่าที่คำนวณได้ไปแทนในสมการข้างต้นคือ

$$\frac{283 \times 283}{8,001} > Z \left( \frac{10,000 - 8,000}{8,001 - 8,000} \right)$$

$$Z \cong 0.005$$

ซึ่งจะมีค่าประมาณ 0.005 จากตารางที่ 4-5 เป็นการสรุปค่า Z ดังนี้



ตารางที่ 4-5 ค่า Z เมื่อจุดเริ่มเปลี่ยนสูงสุดเท่ากับ 8,000 เซลล์ และค่าขนาดของบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์

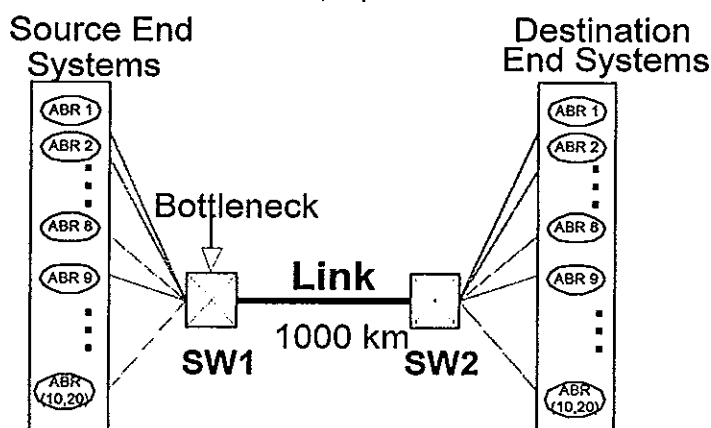
การบริการแบบ VBR ที่มีลักษณะ ON -OFF	ค่า Z
ON=2 มิลลิวินาที , OFF=8 มิลลิวินาที	0.005
ON=3 มิลลิวินาที , OFF=7 มิลลิวินาที	0.004
ON=5 มิลลิวินาที , OFF=5 มิลลิวินาที	0.003

### 4.3 แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM

ในหัวข้อนี้เป็นการสร้างแบบจำลองการทำงานของโพรโตคอล TCP/IP บนโครงข่าย ATM โดยใช้อัลกอริทึมแบบต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แบบจำลองประกอบด้วย 4 รูปแบบคือ (1) แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้การบริการแบบ ABR (2) แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้การบริการแบบ UBR (3) แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR (4) แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

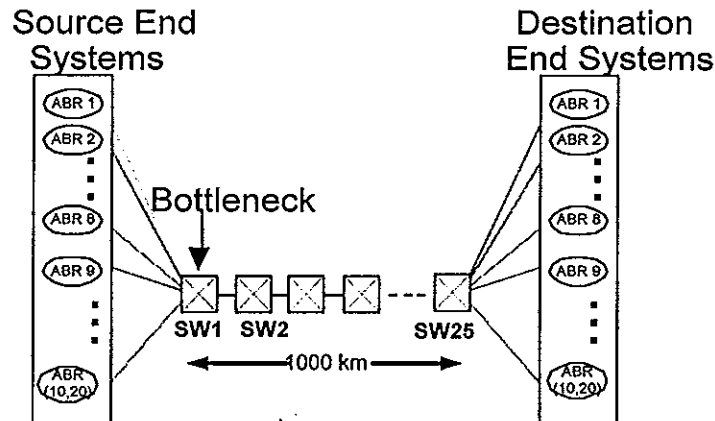
#### 4.3.1 แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้การบริการแบบ ABR

1. แบบจำลองการทำงานที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์ คือ SW1 และ SW 2 และมีการบริการแบบ ABR ซึ่งจะนำอัลกอริทึมแบบ ERICA<sup>+</sup> มาทดสอบแบบจำลองซึ่งประกอบด้วยบริการแบบ ABR 10 การเชื่อมต่อ และ 20 การเชื่อมต่อทั้งต้นทางและปลายทาง ดังภาพประกอบ 4-2 ABR มีค่า Link propagation time delay เท่ากับ 5 มิลลิวินาที(ระยะทางระหว่างสวิตช์เท่ากับ 1,000 กิโลเมตร), แบนด์วิดท์ของการเชื่อมต่อทุก ๆ ตัวมีค่าเท่ากับ 155 เมกะบิตต่อวินาที



ภาพประกอบ 4-2 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์กับการบริการแบบ ABR

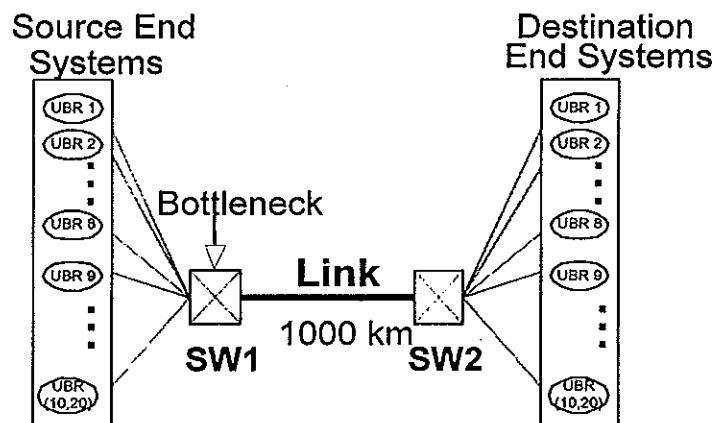
2. แบบจำลองการทำงานที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์มาต่ออนุกรมกันคือ SW1 ถึง SW25 และประกอบด้วยบริการแบบ ABR 10 การเชื่อมต่อ และ 20 การเชื่อมต่อทั้งต้นทางและปลายทางดังภาพประกอบ 4-3 โดยมี Link propagation time delay ระหว่างสวิตช์เท่ากับ 0.2 มิลลิวินาที (ระยะทางระหว่างสวิตช์เท่ากับ 40 กิโลเมตร และระยะทางของสวิตช์ตัวที่ 1 ถึง 25 เท่ากับ 1,000 กิโลเมตร) และแบนด์วิดท์ของการเชื่อมต่อทุก ๆ ตัวมีค่าเท่ากับ 155 เมกะบิตต่อวินาที



ภาพประกอบ 4-3 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์กับการบริการแบบ ABR

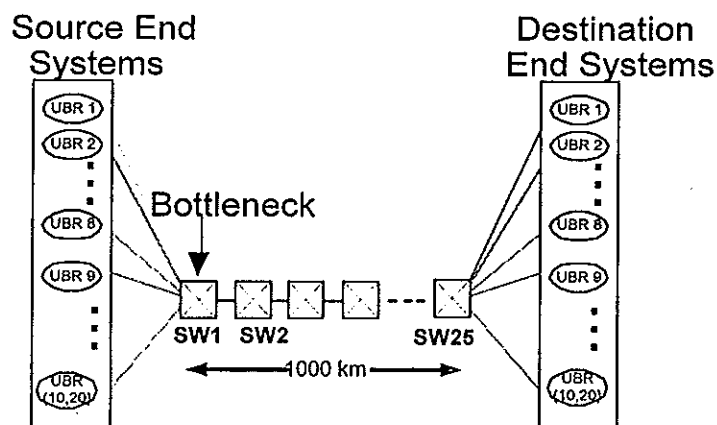
#### 4.3.2 แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้การบริการแบบ UBR

1. แบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์คือ SW1 และ SW2 และมีการบริการแบบ UBR โดยใช้โพรโตคอล TCP/IP บนโครงข่าย ATM และใช้กลไกการทำงานแบบ EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วยบริการแบบ UBR 10 การเชื่อมต่อ และ 20 การเชื่อมต่อทั้งต้นทางและปลายทางดังภาพประกอบ 4-4 UBR มีค่า Link propagation time delay เท่ากับ 5 มิลลิวินาที (ระยะทางระหว่างสวิตช์เท่ากับ 1,000 กิโลเมตร) และแบนด์วิดท์ของการเชื่อมต่อทุก ๆ ตัวมีค่าเท่ากับ 155 เมกะบิตต่อวินาที



ภาพประกอบ 4-4 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์กับการบริการแบบ UBR

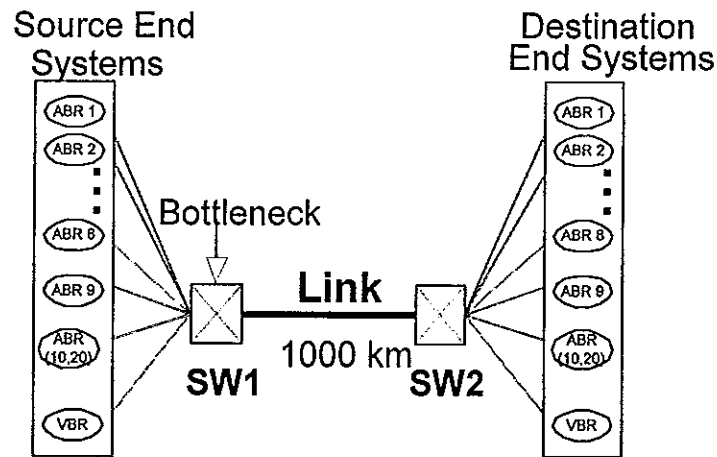
2. แบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์มาต่ออนุกรมกันคือ SW1 ถึง SW 25 และมีการบริการแบบ UBR 10 การเชื่อมต่อหรือ 20 การเชื่อมต่อทั้งต้นทางและปลายทางดังภาพประกอบ 4-5 โดยมี Link propagation time delay ระหว่างสวิตช์เท่ากับ 0.2 มิลลิวินาที(ระยะทางระหว่างสวิตช์เท่ากับ 40 กิโลเมตร และระยะทางระหว่างสวิตช์ตัวที่ 1 ถึงสวิตช์ตัวที่ 25 มีค่าเท่ากับ 1,000 กิโลเมตร) และแบนด์วิดท์ของการเชื่อมต่อทุก ๆ ตัวมีค่าเท่ากับ 155 เมกะบิตต่อวินาที



ภาพประกอบ 4-5 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์กับการบริการแบบ UBR

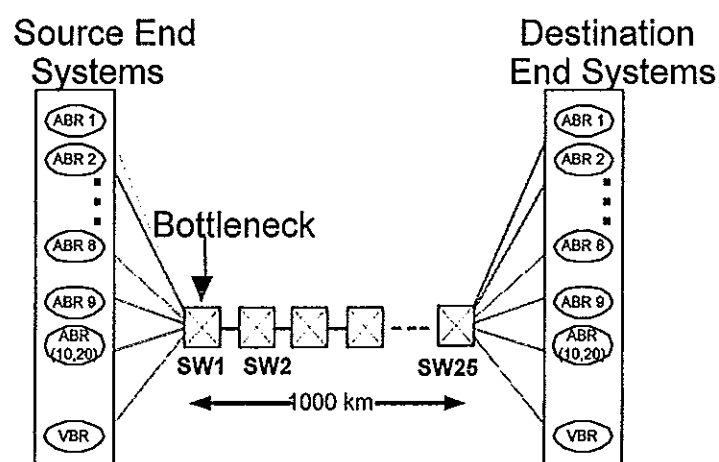
4.3.3 แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR

1. แบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์คือ SW1 และ SW 2 ที่มีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้โพรโตคอล TCP/IP บนโครงข่าย ATM และใช้กลไกการทำงานแบบ ERICA<sup>+</sup> ซึ่งประกอบด้วยบริการแบบ VBR ทั้งต้นทางและปลายทาง 1 การเชื่อมต่อ, การบริการแบบ ABR 10 การเชื่อมต่อหรือ 20 การเชื่อมต่อทั้งต้นทางและปลายทางดังภาพประกอบ 4-6 ใน VBR และ ABR มีค่า Link propagation time delay เท่ากับ 5 มิลลิวินาที (ระยะทางระหว่างสวิตช์เท่ากับ 1,000 กิโลเมตร) การบริการแบบ VBR มีลักษณะเป็น ON-OFF เมื่อมีการส่งข้อมูลจะเป็นจะมีคาบเวลาแบบ ON และเมื่อไม่มีการส่งข้อมูลจะเป็นคาบเวลาแบบ OFF การบริการแบบ VBR จะมีอัตราความเร็วสูงสุดที่ 100 เมกะบิตต่อวินาทีโดยที่คาบเวลา ON เท่ากับ 2,3 และ 5 มิลลิวินาที ส่วนคาบเวลา OFF เท่ากับ 5,7 และ 8 มิลลิวินาที และแบนด์วิดท์ของการเชื่อมต่อทุก ๆ ตัวมีค่าเท่ากับ 155 เมกะบิตต่อวินาที สวิตช์จะให้ลำดับความสำคัญของ VBR สูงกว่า ABR เสมอ



ภาพประกอบ 4-6 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์กับการบริการแบบ (ABR+VBR)

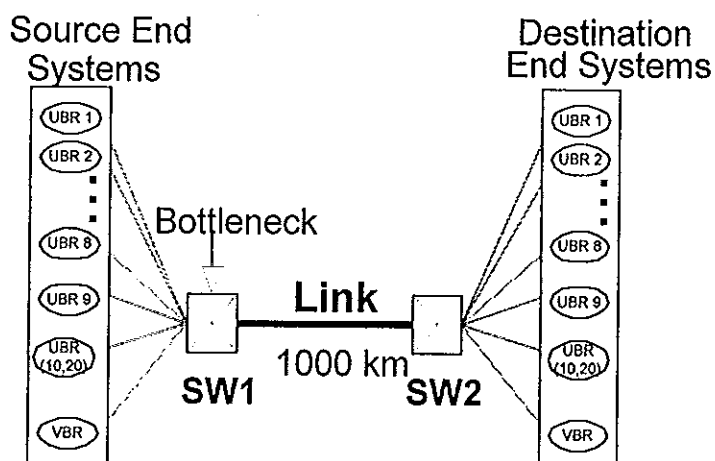
2. แบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์มาต่ออนุกรมกันคือ SW1 ถึง SW 25 แล้วใช้การบริการแบบ VBR และ ABR เหมือนกับแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์และการบริการแบบ VBR ใช้เงื่อนไขเดิม ภาพประกอบ 4-7 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์กับการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมี Link propagation time delay ระหว่างสวิตช์เท่ากับ 0.2 มิลลิวินาที(ระยะทางระหว่างสวิตช์เท่ากับ 40 กิโลเมตร และระยะทางของสวิตช์ตัวที่ 1 ถึง 25 เท่ากับ 1,000 กิโลเมตร) และแบนด์วิดท์ของการเชื่อมต่อทุก ๆ ตัวมีค่าเท่ากับ 155 เมกะบิตต่อวินาที สวิตช์จะให้ลำดับความสำคัญของ VBR สูงกว่า ABR เสมอ



ภาพประกอบ 4-7 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์กับการบริการแบบ (ABR+VBR)

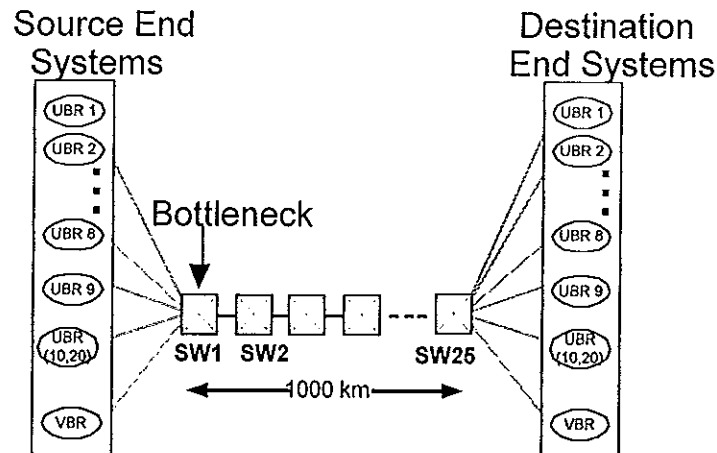
4.3.4 แบบจำลองการทำงานของ TCP/IP บนโครงข่าย ATM ที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR

1. แบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์ คือ SW1 และ SW 2 ที่มีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้โพรโตคอล TCP/IP บนโครงข่าย ATM และใช้กลไกการทำงานแบบ EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วยบริการแบบ VBR ทั้งต้นทางและปลายทาง 1 การเชื่อมต่อ, การบริการแบบ UBR 10 การเชื่อมต่อหรือ 20 การเชื่อมต่อทั้งต้นทางและปลายทาง ดังภาพประกอบ 4-8 ใน VBR และ UBR มีค่า Link propagation time delay เท่ากับ 5 มิลลิวินาที (ระยะทางระหว่างสวิตช์เท่ากับ 1,000 กิโลเมตร) การบริการแบบ VBR มีลักษณะเป็น ON-OFF เมื่อมีการส่งข้อมูลจะเป็นคาบเวลาแบบ ON และเมื่อไม่มีการส่งข้อมูลจะเป็นคาบเวลาแบบ OFF การบริการแบบ VBR จะมีอัตราความเร็วสูงสุดที่ 100 เมกะบิตต่อวินาทีโดยที่คาบเวลา ON เท่ากับ 2, 3 และ 5 มิลลิวินาที ส่วนคาบเวลา OFF เท่ากับ 5, 7 และ 8 มิลลิวินาที และแบนด์วิดท์ของการเชื่อมต่อทุก ๆ ตัวมีค่าเท่ากับ 155 เมกะบิตต่อวินาที สวิตช์จะให้ลำดับความสำคัญของ VBR สูงกว่า UBR เสมอ



ภาพประกอบ 4-8 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์กับการบริการแบบ (UBR+VBR)

2. แบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์มาต่ออนุกรมกันคือ SW1 ถึง SW 25 แล้วใช้การบริการแบบ VBR และ UBR เหมือนกับแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์และการบริการแบบ VBR ใช้เงื่อนไขเดิม ภาพประกอบ 4-9 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์กับการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมี Link propagation time delay ระหว่างสวิตช์เท่ากับ 0.2 มิลลิวินาที (ระยะทางระหว่างสวิตช์เท่ากับ 40 กิโลเมตร และระยะทางของสวิตช์ตัวที่ 1 ถึง 25 เท่ากับ 1,000 กิโลเมตร) และแบนด์วิดท์ของการเชื่อมต่อทุก ๆ ตัวมีค่าเท่ากับ 155 เมกะบิตต่อวินาที สวิตช์จะให้ลำดับความสำคัญของ VBR สูงกว่า UBR เสมอ



ภาพประกอบ 4-9 แสดงแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์กับการบริการแบบ (UBR+VBR)

#### 4.4 สรุป

สรุปว่าแบบจำลองที่สร้างรวมทั้งหมดมี 8 แบบโดยที่การบริการแบบ ABR ใช้อัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> ส่วนการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ส่วนตารางที่ 4-6 แสดงค่าพารามิเตอร์โดยทั่วไปที่ใช้ในแบบจำลองทุกตัว แล้วทำการทดสอบแบบจำลองส่วนผลจากการจำลองการทำงานและการวิเคราะห์ผลจะกล่าวในบทต่อไป

ตารางที่ 4-6 แสดงค่าพารามิเตอร์โดยทั่วไปที่ใช้ในแบบจำลองทุกตัว

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
ขนาดข้อมูล	60 เมกะไบต์
แบนด์วิดท์	155 เมกะบิตต่อวินาที
ระยะทางระหว่างสวิตช์	1,000 กิโลเมตร
MSS	9,180 ไบต์
TCP RCWND	64 กิโลไบต์

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบแบบจำลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้เป็นผลการทดสอบแบบจำลองการทำงานของโครงข่าย ATM ที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 ได้แก่

1. ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR
  2. ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR
  3. ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR
  4. ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR
- โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 5.1 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR

พารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วยขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และ 10,000 เซลล์ จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และ 20 การเชื่อมต่อ และใช้อัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล

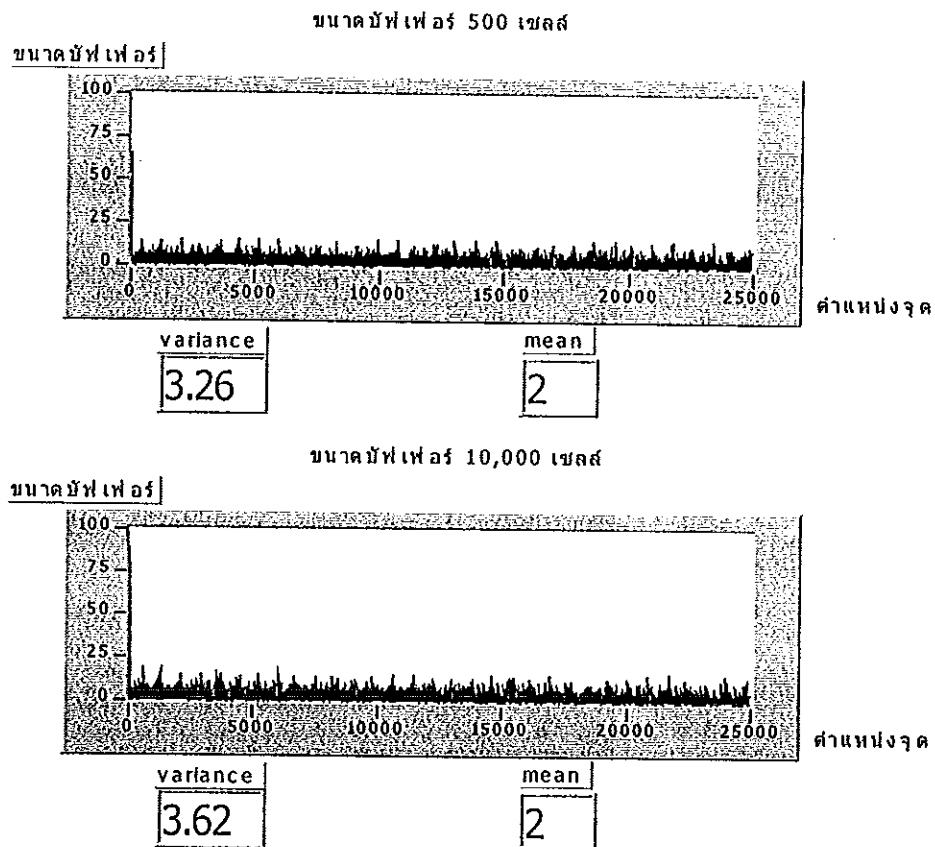
#### ตารางที่ 5-1 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR

Traffic Source	จำนวนแหล่งข้อมูล	ขนาดบัฟเฟอร์ (เซลล์)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-2)			25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-3)		
			System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
1. ABR	10	500	125	81	1	125	81	1
2. ABR	10	10,000	125	81	1	125	81	1
3. ABR	20	500	125	81	1	123	79	0.9997
4. ABR	20	10,000	125	81	1	123	79	0.9999

#### ผลการวิเคราะห์

- ผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อแหล่งข้อมูลมีจำนวน 10 การเชื่อมต่อ การเพิ่มขนาดของบัฟเฟอร์และจำนวนสวิตช์ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่า Throughput และ Fairness แต่เมื่อแบบจำลองเพิ่มขนาดของแหล่งข้อมูลเป็น 20 การเชื่อมต่อ ค่า Throughput และ Fairness ที่มีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์มีค่าลดลง จากภาพประกอบ 5-1 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนเซลล์ที่อยู่ในขนาด

ของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และ 10,000 เซลล์ โดยที่ส่วนนี้จะแสดงให้เห็นว่าถ้าหากเซลล์ที่อยู่ในบัฟเฟอร์มีจำนวนน้อย ความต้องการในขนาดบัฟเฟอร์ก็มีค่าน้อยถึงแม้ว่าจะเปลี่ยนขนาดบัฟเฟอร์ให้ใหญ่ขึ้นก็ไม่มีผลต่อค่า Throughput และ Fairness และจากภาพประกอบ 5-1 จะเห็นว่าจำนวนเซลล์ที่อยู่ในบัฟเฟอร์มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2 เซลล์ทั้งขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และ 10,000 เซลล์

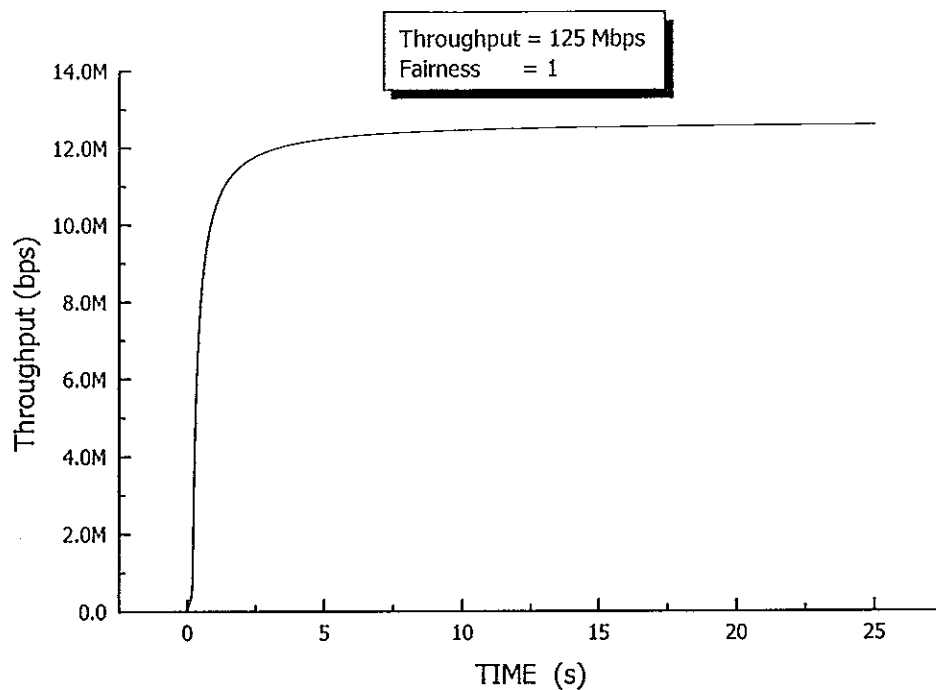


ภาพประกอบ 5-1 เปรียบเทียบจำนวนเซลล์ที่อยู่ในขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และ 10,000 เซลล์

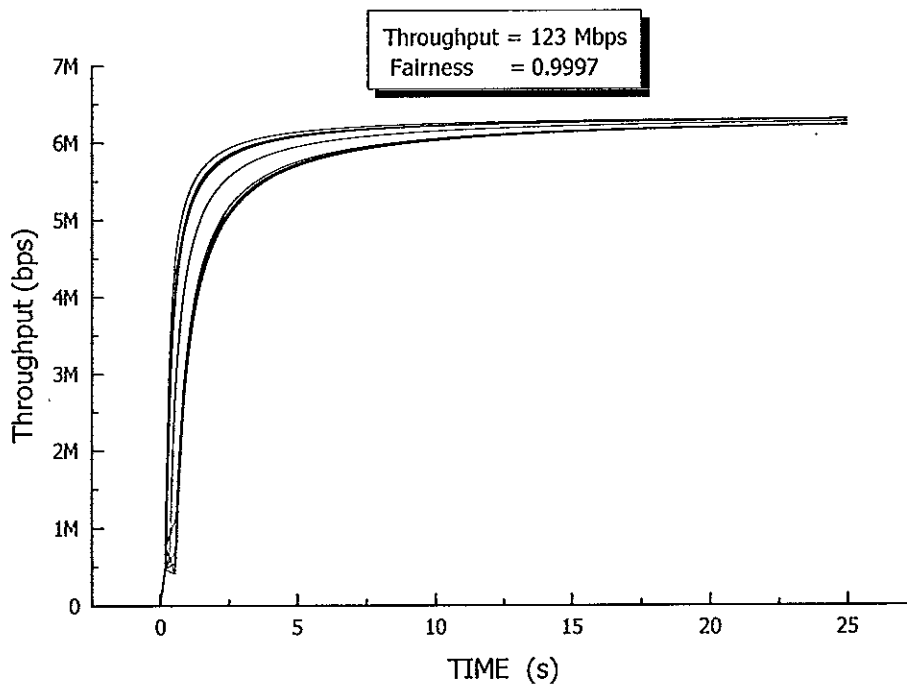
- ผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อแหล่งข้อมูลมีจำนวน 10 การเชื่อมต่อ การเพิ่มขนาดของบัฟเฟอร์และจำนวนสวิตช์ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่า Throughput และ Fairness ดังภาพประกอบ 5-2 แสดงค่า Throughput และ Fairness ที่มีขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และจำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์

- ผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ จะเห็นว่าค่า Throughput และ Fairness มีค่าเท่ากัน แต่เมื่อทดสอบแบบจำลองที่ใช้สวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ ค่าของ Throughput และ Fairness มีค่าลดลงดังภาพประกอบ 5-3





ภาพประกอบ 5-2 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์



ภาพประกอบ 5-3 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์

### สรุปผลการวิเคราะห์กราฟ ดังนี้

- ภาพประกอบ 5-2 แหล่งข้อมูลมีค่าเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และในแต่ละการเชื่อมต่อวัดค่า Throughput ได้เท่ากับ 12.52 เมกะบิตต่อวินาที (แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อในตารางที่ 5-2) จึงทำให้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นกราฟเส้นเดียว ดังนั้นเมื่อนำค่า Throughput ที่ได้มาไปหาค่า Fairness จึงทำให้ค่านี้มีค่าเท่ากับ 1

- ภาพประกอบ 5-3 จะเห็นว่าในช่วงแรกของการส่งข้อมูล มีการจัดสรรแบนด์วิดท์ให้กับแหล่งข้อมูลแต่ละตัวไม่เท่ากัน แต่เมื่อการส่งข้อมูลผ่านไปในช่วงเวลาหนึ่งการจัดสรรแบนด์วิดท์จะดีขึ้น ซึ่งเหตุที่ทำให้การจัดสรรแบนด์วิดท์ให้กับแหล่งข้อมูลแต่ละตัวไม่เท่ากันเกิดจากจำนวนของแหล่งข้อมูลเพิ่มขึ้น และจำนวนสวิตช์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การส่งค่า RM เซลล์ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดอัตราการส่งข้อมูลกลับไปยังต้นทางช้าลง จึงทำให้ค่า Fairness ลดลง และจากตารางที่ 5-3 จะแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ

ตารางที่ 5-2 แสดงค่าเบี่ยงเบน และ Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์

หมายเลขแหล่งข้อมูล	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	12.52	0.08
2	12.52	0.08
3	12.52	0.08
4	12.52	0.08
5	12.52	0.08
6	12.52	0.08
7	12.52	0.08
8	12.52	0.08
9	12.52	0.08
10	12.52	0.08

จากตารางที่ 5-2 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ ส่วนค่าเบี่ยงเบนสามารถวัดจากสมการนี้

$$\text{ค่าเบี่ยงเบน (Mbps)} = \text{Max Throughput} - \text{Throughput}$$

จากสมการข้างต้น ค่า Max Throughput มีค่าเท่ากับ 12.6 เมกะบิตต่อวินาทีต่อหนึ่งการเชื่อมต่อซึ่งค่านี้แสดงการคำนวณอยู่ในบทที่ 6 ส่วนของข้อเสนอแนะ

ตารางที่ 5-3 แสดงค่าเบี่ยงเบน และ Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์

หมายเลขแหล่งข้อมูล	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	6.25	0.09
2	6.13	0.21
3	6.24	0.1
4	6.11	0.23
5	6.17	0.17
6	6.12	0.22
7	6.11	0.23
8	6.11	0.23
9	6.24	0.1
10	6.13	0.21
11	6.27	0.07
12	6.12	0.22
13	6.11	0.23
14	6.24	0.1
15	6.11	0.23
16	6.24	0.1
17	6.11	0.23
18	6.11	0.23
19	6.24	0.1
20	6.19	0.15

จากตารางที่ 5-3 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ ส่วนค่าเบี่ยงเบนสามารถวัดจากค่า Max Throughput ลบด้วยค่า Throughput ที่ได้มาจากการทดสอบแบบจำลอง โดยที่ค่า Max Throughput มีค่าเท่ากับ 6.34 เมกะบิตต่อวินาทีต่อหนึ่งการเชื่อมต่อ

จากตารางที่ 5-2 และ 5-3 จะเห็นว่าค่าเบี่ยงเบนของแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อมีค่าน้อยกว่า 20 การเชื่อมต่อ แสดงว่าแหล่งข้อมูลที่ใช้ 10 การเชื่อมต่อมีค่า Throughput และ Fairness ดีกว่าเมื่อเทียบกับค่า Max Throughput และเห็นว่าค่าเบี่ยงเบนของแบบจำลองที่ใช้แหล่งข้อมูล 20 การเชื่อมต่อมีค่าเบี่ยงเบนที่ต่างกันซึ่งเกิดจากการจัดสรรแบนด์วิดท์ที่ให้กับแหล่งข้อมูลแต่ละตัวไม่ดีเมื่อมีการเพิ่มจำนวนการเชื่อมต่อซึ่งในส่วนี้เกิดจากอัลกอริทึมที่นำมาทดสอบแบบจำลอง

## 5.2 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR

5.2.1 พารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย ขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และ 20 การเชื่อมต่อ และใช้อัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

ตารางที่ 5-4 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR และมีขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์

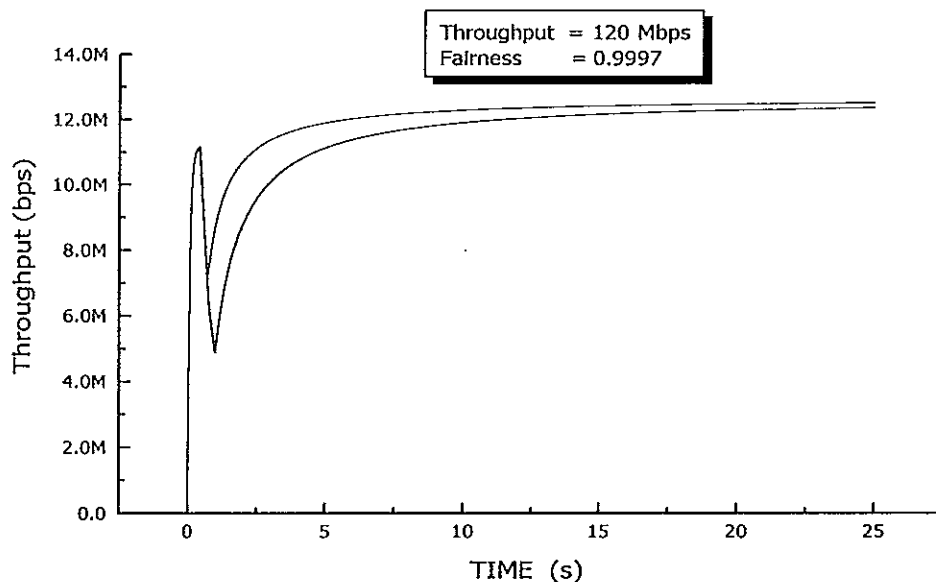
Traffic Source	อัลกอริทึม	จำนวนแหล่งข้อมูล	ขนาดบัฟเฟอร์ (เซลล์)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-4)			25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-5)		
				System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
1. UBR	EPD	10	500	120	77	0.9997	118	76	0.9995
2. UBR	EPD+RED	10	500	124	80	1	123	79	0.9996
3. UBR	AEPD+RED	10	500	124	80	1	124	80	1
4. UBR	AEPD+Avg	10	500	124	80	1	123	79	1
5. UBR	EPD	20	500	120	77	0.9998	118	76	0.9998
6. UBR	EPD+RED	20	500	124	80	0.9999	123	79	0.9997
7. UBR	AEPD+RED	20	500	124	80	1	124	80	1
8. UBR	AEPD+Avg	20	500	124	80	1	124	80	1

### ผลการวิเคราะห์

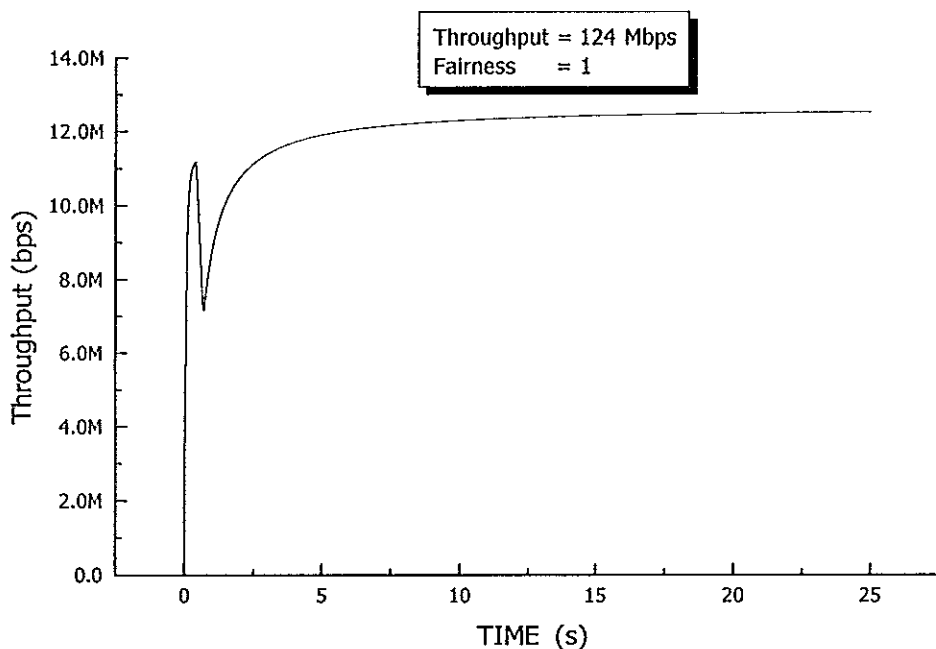
- จากตารางที่ 5-4 เป็นผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อมีการบริการแบบ UBR และใช้อัลกอริทึม EPD เปรียบเทียบกับอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ โดยให้ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์

- ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่า Throughput และ Fairness ของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่มีค่าดีกว่าอัลกอริทึม EPD ดังแสดงในภาพประกอบ 5-4 และ 5-5 ซึ่งในส่วนนี้เกิดจากการปรับปรุงอัลกอริทึมในส่วนของการควบคุมความคับคั่งของข้อมูลจึงทำให้มีจำนวนแพ็กเกตไปถึงปลายทางมากขึ้นดังนั้นเป็นผลให้การวัดค่า Throughput และ Fairness มีค่าสูงขึ้น

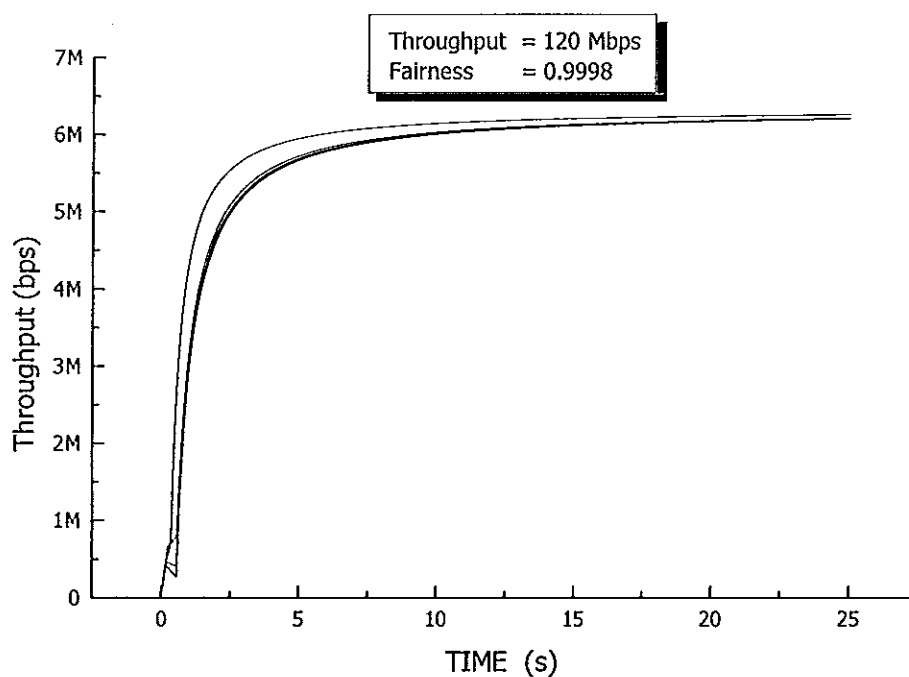
- ส่วนผลการทดสอบเมื่อจำนวนแหล่งข้อมูลเพิ่มขึ้นค่าของ Throughput และค่า Fairness มีค่าเท่าเดิม ดังแสดงในภาพประกอบ 5-6 และ 5-7



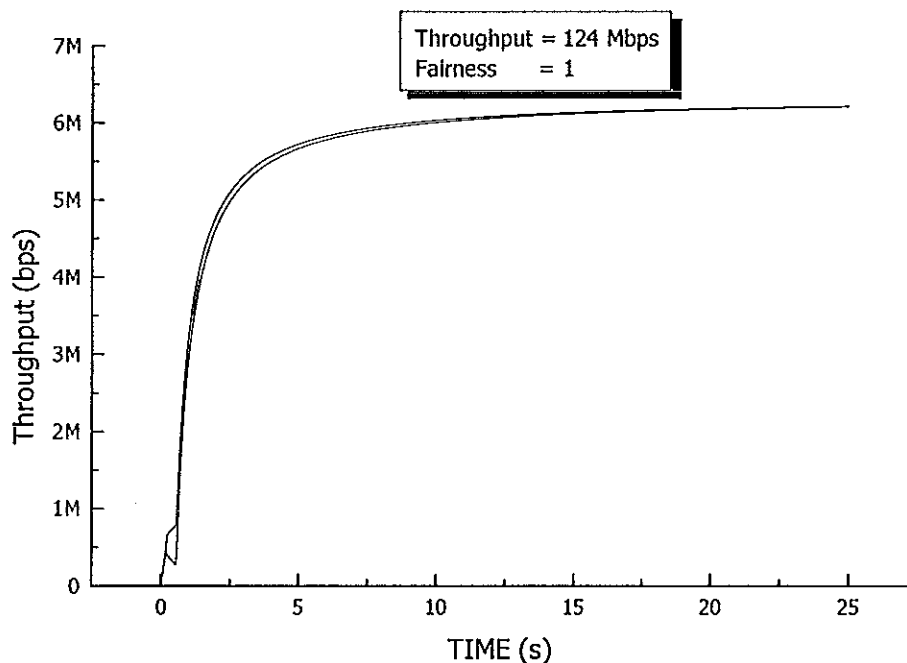
ภาพประกอบ 5-4 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้ อัลกอริทึม EPD โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัพเฟอร์ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์



ภาพประกอบ 5-5 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้ อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ ต่อ, ขนาดบัพเฟอร์ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์



ภาพประกอบ 5-6 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้ อัลกอริทึม EPD โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์



ภาพประกอบ 5-7 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้ อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์

สรุปผลการวิเคราะห์กราฟในภาพประกอบ ดังนี้

- ภาพประกอบ 5-4 เป็นการทดสอบแบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD โดยมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ จะเห็นว่ากราฟในช่วงแรกของการส่งข้อมูลมีค่า Throughput สูงสุดและลดลงอย่างรวดเร็วจากนั้นค่า Throughput ก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สถานะอยู่ตัว (Steady State) เหตุที่ทำให้ค่า Throughput ลดลงนั้นเกิดจากการทิ้งเซลล์ในบัฟเฟอร์ และค่า RM เซลล์ที่ส่งไปยังต้นทาง ในขณะที่จำนวนสวิตช์มีค่าเท่ากับ 2 สวิตช์ ค่า RM เซลล์ส่งกลับไปยังต้นทางได้เร็วกว่า 25 สวิตช์ และต้นทางก็จะปรับอัตราความเร็วที่ส่งมากับค่า RM เซลล์จึงทำให้กราฟมีลักษณะดังที่กล่าวมาข้างต้น

- ส่วนภาพประกอบ 5-5 เป็นการทดสอบแบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งจะมีกราฟลักษณะเดียวกับกราฟในภาพประกอบ 5-4 แต่มีค่า Throughput และ Fairness ดีกว่าเพราะว่าอัลกอริทึม EPD ตรวจสอบเพียงดูจากจำนวนเซลล์ที่เข้ามายัง ATM สวิตช์ ถ้าหากว่าเกินค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ก็ให้ทิ้งเซลล์ทันทีจึงทำให้เซลล์ที่มาจากแหล่งข้อมูลนั้นจะต้องส่งข้อมูลไปใหม่ ในขณะที่อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ตรวจสอบจำนวนเซลล์และจำนวนการเชื่อมต่อที่เข้ามายัง ATM สวิตช์เพื่อนำไปใช้คำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับขนาดของบัฟเฟอร์ดังสมการในหัวข้อ 3.7.2 ของบทที่ 3 ซึ่งทำให้เซลล์ที่เข้ามาเกินค่าจุดเริ่มเปลี่ยนไม่ถูกทิ้งเซลล์ทันที และตารางที่ 5-5 แสดงค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput

- ภาพประกอบ 5-6 เป็นการทดสอบแบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD โดยมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ จะเห็นว่าเส้นกราฟมีลักษณะการส่งข้อมูลเรียบกว่าเมื่อแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ เพราะว่าเมื่อดูจากกราฟของแหล่งข้อมูล 10 การเชื่อมต่อ (ภาพประกอบ 5-4) กราฟจะมีค่า Throughput ลดลงในช่วงแรกของการส่งข้อมูลซึ่งจะลดลงอยู่ในช่วง 4-7 เมกะบิตต่อวินาทีซึ่งเกิดจากเซลล์ถูกทิ้งในระดับชั้นสื่อสาร ATM จึงทำให้ระดับชั้นสื่อสาร TCP จะต้องทำการส่งข้อมูลใหม่และในส่วนนี้จะต้องลดค่า Throughput ลงครึ่งหนึ่งจึงทำให้กราฟมีลักษณะดังกล่าว แต่เมื่อแบบจำลองเพิ่มจำนวนแหล่งข้อมูลเป็น 20 การเชื่อมต่อเส้นกราฟจะมีลักษณะที่เรียบกว่าก็เพราะว่าในช่วงแรกไม่มีเซลล์ที่ถูกทิ้งในชั้นสื่อสาร ATM

- ส่วนภาพประกอบ 5-7 เป็นการทดสอบแบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งจะมีกราฟลักษณะเดียวกับกราฟในภาพประกอบ 5-6 แต่มีค่า Throughput และ Fairness ดีกว่า ตารางที่ 5-6 แสดงค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput

ตารางที่ 5-5 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างอัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์

หมายเลขแหล่งข้อมูล	ภาพประกอบ 5-4		ภาพประกอบ 5-5	
	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	12.01	0.59	12.40	0.2
2	11.50	1.10	12.40	0.2
3	11.49	1.11	12.40	0.2
4	11.47	1.13	12.40	0.2
5	12.01	0.59	12.40	0.2
6	11.49	1.11	12.40	0.2
7	12.01	0.59	12.40	0.2
8	11.49	1.11	12.40	0.2
9	12.01	0.59	12.40	0.2
10	12.01	0.59	12.40	0.2

จากตารางที่ 5-5 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ ส่วนค่าเบี่ยงเบนสามารถวัดจากค่า Max Throughput ลบด้วยค่า Throughput ที่ได้มาจากการทดสอบแบบจำลอง โดยที่ค่า Max Throughput มีค่าเท่ากับ 12.6 ต่อหนึ่งการเชื่อมต่อและค่าเบี่ยงเบนที่คำนวณได้พบว่าการทำงานของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ (ภาพประกอบ 5-5)มีค่าเบี่ยงเบนน้อยกว่าอัลกอริทึม EPD (ภาพประกอบ 5-4)



ตารางที่ 5-6 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างอัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์

หมายเลขแหล่งข้อมูล	ภาพประกอบ 5-6		ภาพประกอบ 5-7	
	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	6.01	0.33	6.21	0.13
2	6.08	0.26	6.21	0.13
3	6.01	0.33	6.21	0.13
4	6.02	0.32	6.21	0.13
5	6.01	0.33	6.21	0.13
6	6.01	0.33	6.21	0.13
7	6.02	0.32	6.21	0.13
8	6.01	0.33	6.21	0.13
9	6.01	0.33	6.21	0.13
10	6.08	0.26	6.21	0.13
11	6.01	0.33	6.21	0.13
12	6.02	0.32	6.21	0.13
13	6.01	0.33	6.21	0.13
14	6.01	0.33	6.21	0.13
15	6.01	0.33	6.21	0.13
16	6.01	0.33	6.21	0.13
17	6.01	0.33	6.21	0.13
18	6.01	0.33	6.21	0.13
19	6.01	0.33	6.21	0.13
20	6.01	0.33	6.21	0.13

จากตารางที่ 5-6 ค่าเบี่ยงเบนที่คำนวณได้พบว่าการทำงานของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ (ภาพประกอบ 5-6) มีค่าเบี่ยงเบนน้อยกว่าอัลกอริทึม EPD (ภาพประกอบ 5-7)

5.2.2 พารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย ขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และ 20 การเชื่อมต่อ และใช้อัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

ตารางที่ 5-7 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR และมีขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์

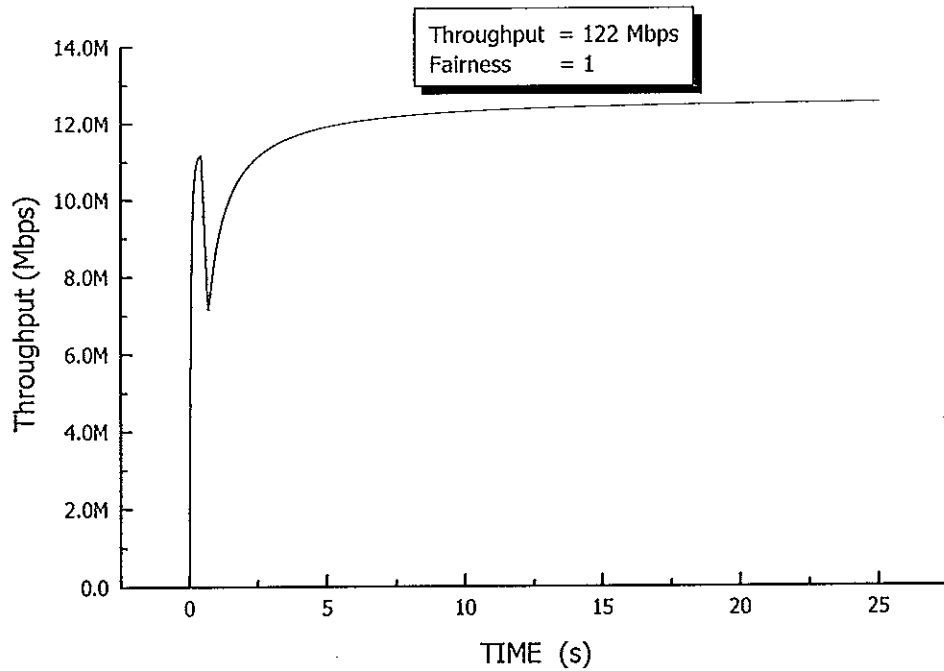
Traffic Source	อัลกอริทึม	จำนวนแหล่งข้อมูล	ขนาดบัฟเฟอร์ (เซลล์)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-4)			25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-5)		
				System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
1. UBR	EPD	10	10,000	122	79	1	120	77	1
2. UBR	EPD+RED	10	10,000	124	80	1	124	80	1
3. UBR	AEPD+RED	10	10,000	124	80	1	124	80	1
4. UBR	AEPD+Avg	10	10,000	126	81	1	125	81	1
5. UBR	EPD	20	10,000	122	79	0.9997	120	77	1
6. UBR	EPD+RED	20	10,000	124	80	1	124	80	1
7. UBR	AEPD+RED	20	10,000	125	81	0.9998	124	80	1
8. UBR	AEPD+Avg	20	10,000	126	81	1	125	81	1

#### ผลการวิเคราะห์

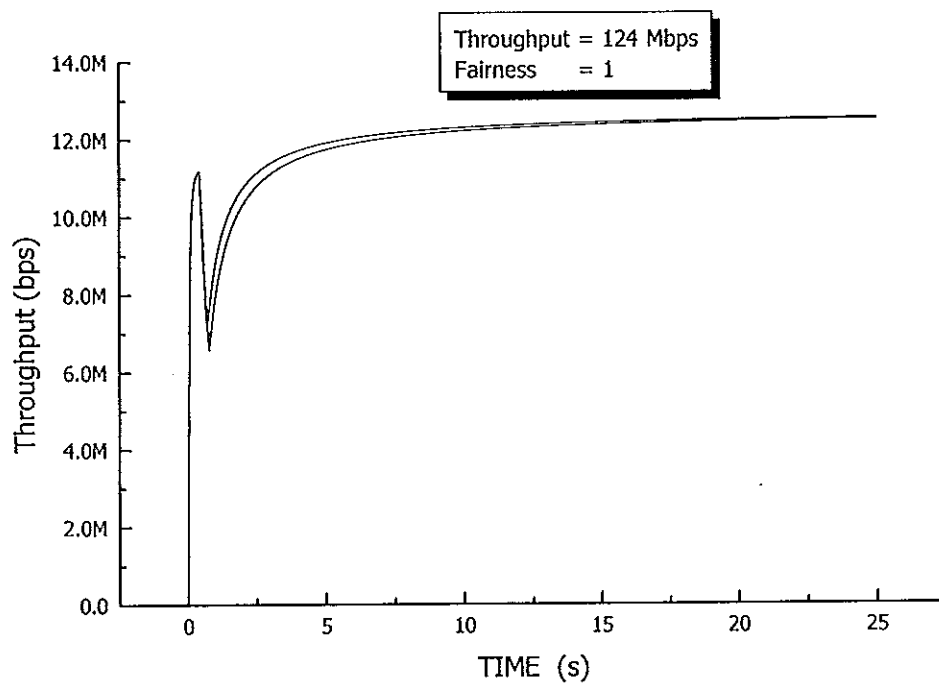
- จากตารางที่ 5-7 เป็นผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อมีการบริการแบบ UBR และใช้อัลกอริทึม EPD เปรียบเทียบกับอัลกอริทึมที่ปรับปรุงใหม่ โดยใช้ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์

- ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่า Throughput และค่า Fairness ของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่มีค่ามากกว่าอัลกอริทึม EPD ดังแสดงในภาพประกอบ 5-8 และ 5-9

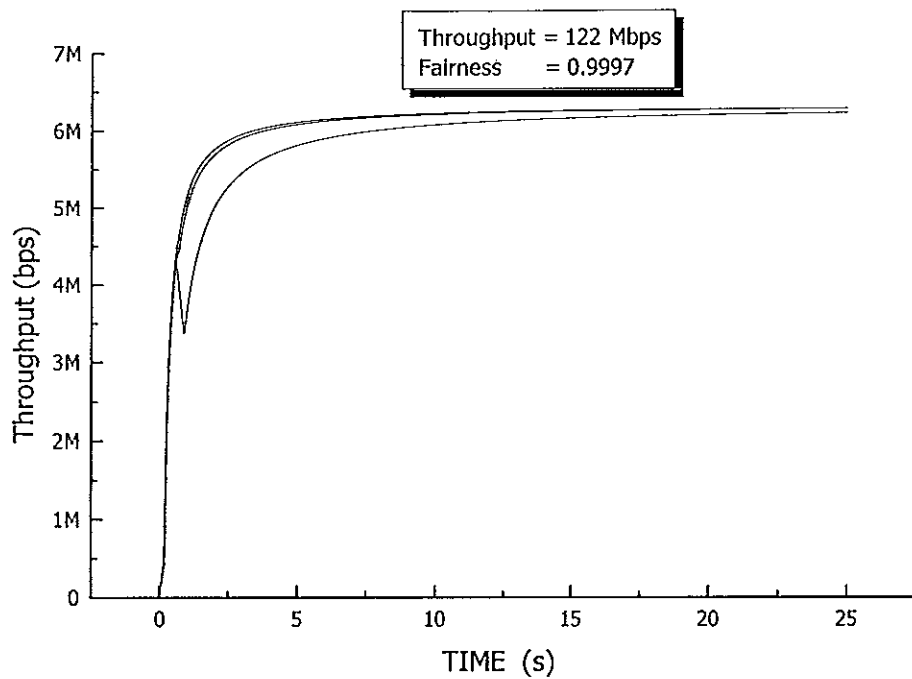
- ส่วนผลการทดสอบเมื่อจำนวนแหล่งข้อมูลเพิ่มขึ้นค่าของ Throughput และค่า Fairness มีค่าเท่าเดิม ดังแสดงในภาพประกอบ 5-10 และ 5-11



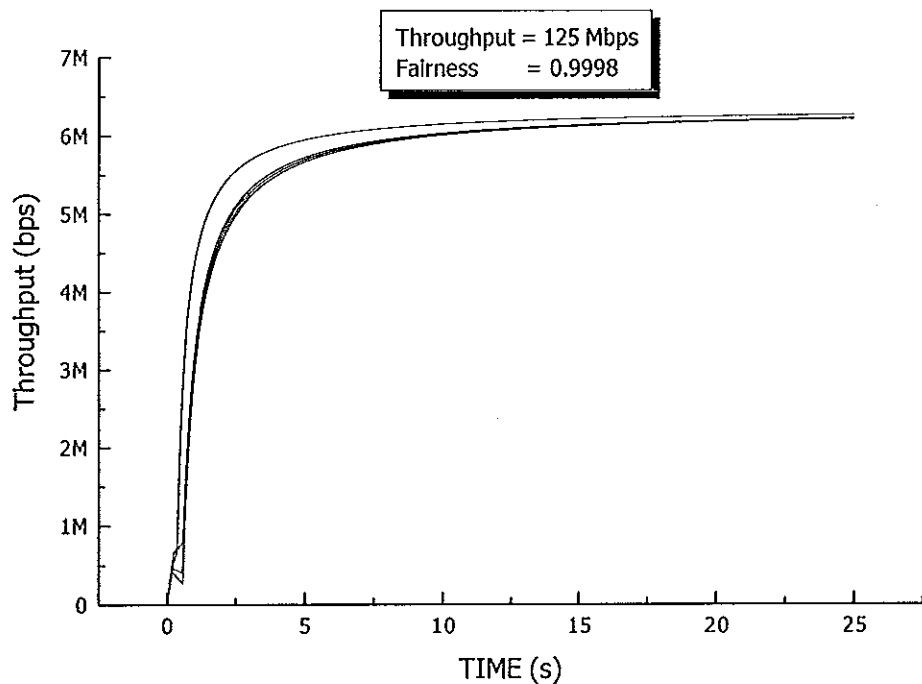
ภาพประกอบ 5-8 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้ อัลกอริทึม EPD โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์



ภาพประกอบ 5-9 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้ อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ ต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์



ภาพประกอบ 5-10 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์



ภาพประกอบ 5-11 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์

### สรุปผลการวิเคราะห์กราฟในภาพประกอบ ดังนี้

- ภาพประกอบ 5-8 เป็นการทดสอบแบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD โดยมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์, แหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และมีขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์ซึ่งต่างจากภาพประกอบ 5-4 (มีขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์) จะเห็นว่ากราฟที่ได้จะมีลักษณะเดียวกับภาพประกอบ 5-4 แต่ค่า Throughput และ Fairness ดีกว่าการใช้ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์เพราะว่าเมื่อขนาดบัฟเฟอร์มากขึ้นการทิ้งเซลล์ที่ ATM สวิตช์มีค่าลดลง และในภาพประกอบ 5-8 จะเห็นว่าช่วงแรกของการส่งข้อมูลมีค่าลดลงเพราะว่าเกิดจากการที่เซลล์ถูกทิ้งที่ ATM สวิตช์จึงทำให้โพรโตคอล TCP จะลดค่า Congestion Windows ลงครึ่งหนึ่งแล้วทำ Slow Start อีกครั้งทำให้ค่า Throughput มีค่าลดลงครึ่งหนึ่งกราฟที่ได้จึงมีลักษณะดังกล่าว

- ส่วนภาพประกอบ 5-9 เป็นการทดสอบแบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ซึ่งจะมีกราฟลักษณะเดียวกับกราฟในภาพประกอบ 5-8 แต่มีค่า Throughput และ Fairness ดีกว่าและจากตาราง 5-8 แสดงค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput

- ภาพประกอบ 5-10 เป็นการทดสอบแบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD โดยมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ จะเห็นว่าเส้นกราฟมีลักษณะการส่งข้อมูลเรียบกว่าแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ เพราะว่าเมื่อดูจากกราฟของแหล่งข้อมูล 10 การเชื่อมต่อ กราฟจะมีค่า Throughput ลดลงในช่วงแรกของการส่งข้อมูลซึ่งจะลดลงอยู่ในช่วง 6.5 เมกะบิตต่อวินาทีซึ่งเกิดจากเซลล์ถูกทิ้งในระดับชั้นสื่อสาร ATM จึงทำให้ระดับชั้นสื่อสาร TCP จะต้องทำการส่งข้อมูลใหม่และในส่วนนี้จะต้องลดค่า Throughput ลงครึ่งหนึ่งจึงทำให้กราฟมีลักษณะดังกล่าว แต่เมื่อแบบจำลองเพิ่มจำนวนแหล่งข้อมูลเป็น 20 การเชื่อมต่อเส้นกราฟจะมีลักษณะที่เรียบกว่าก็เพราะว่าในช่วงแรกไม่มีเซลล์ที่ถูกทิ้งในชั้นสื่อสาร ATM

- ส่วนภาพประกอบ 5-11 เป็นการทดสอบแบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ซึ่งจะมีกราฟลักษณะเดียวกับกราฟในภาพประกอบ 5-10 แต่มีค่า Throughput และ Fairness ดีกว่า และจากตารางที่ 5-8 แสดงค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput

ตารางที่ 5-8 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างอัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์

หมายเลข แหล่งข้อมูล	ภาพประกอบ 5-8		ภาพประกอบ 5-9	
	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	12.21	0.39	12.41	0.19
2	12.21	0.39	12.41	0.19
3	12.21	0.39	12.41	0.19
4	12.21	0.39	12.41	0.19
5	12.21	0.39	12.41	0.19
6	12.21	0.39	12.41	0.19
7	12.21	0.39	12.41	0.19
8	12.21	0.39	12.41	0.19
9	12.21	0.39	12.41	0.19
10	12.21	0.39	12.41	0.19

จากตารางที่ 5-8 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ และค่าเบี่ยงเบนที่คำนวณได้พบว่าการทำงานของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ (ภาพประกอบ 5-9) มีค่าเบี่ยงเบนน้อยกว่าอัลกอริทึม EPD (ภาพประกอบ 5-8)

ตารางที่ 5-9 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างอัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์

หมายเลขแหล่งข้อมูล	ภาพประกอบ 5-10		ภาพประกอบ 5-11	
	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	6.12	0.22	6.25	0.09
2	6.10	0.24	6.21	0.13
3	6.14	0.20	6.25	0.09
4	6.10	0.24	6.21	0.13
5	6.10	0.24	6.25	0.09
6	6.12	0.22	6.24	0.10
7	6.10	0.24	6.29	0.05
8	6.12	0.22	6.25	0.09
9	6.10	0.24	6.25	0.09
10	6.10	0.24	6.24	0.10
11	6.12	0.22	6.25	0.09
12	6.10	0.24	6.21	0.13
13	6.14	0.20	6.25	0.09
14	6.10	0.24	6.21	0.13
15	6.10	0.24	6.25	0.09
16	6.12	0.22	6.24	0.10
17	6.10	0.24	6.29	0.05
18	6.12	0.22	6.25	0.09
19	6.10	0.24	6.25	0.09
20	6.10	0.24	6.24	0.10

จากตารางที่ 5-9 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ และค่าเบี่ยงเบนที่คำนวณได้พบว่าการทำงานของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ (ภาพประกอบ 5-11) มีค่าเบี่ยงเบนน้อยกว่าอัลกอริทึม EPD (ภาพประกอบ 5-10)

### 5.3 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR

5.3.1 พารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย ขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และใช้อัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล

ตารางที่ 5-10 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์

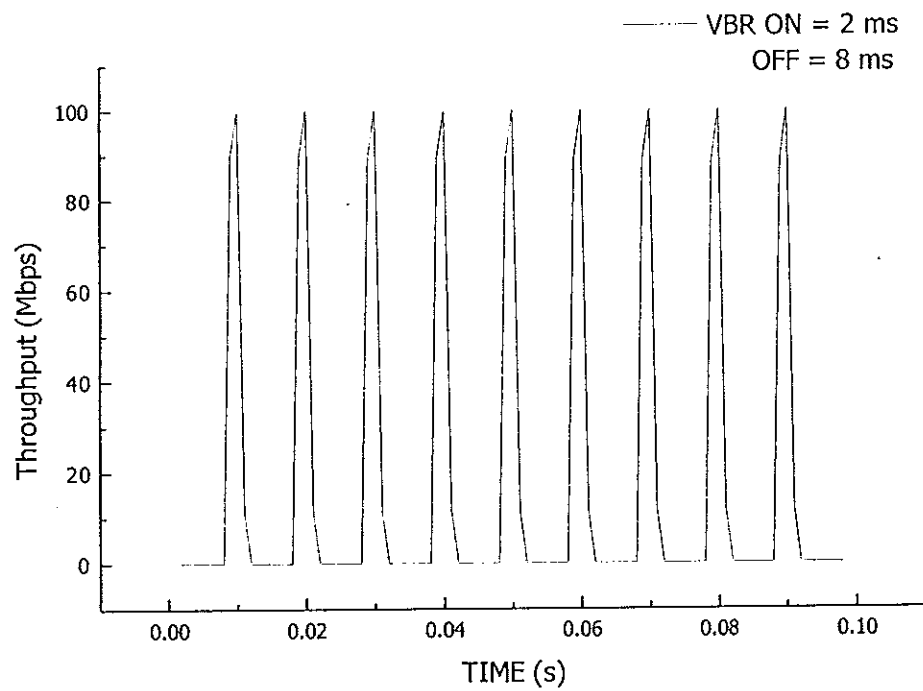
Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-6)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-7)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	ABR				VBR	ABR			
1. ABR+VBR	ERICA <sup>+</sup>	2	8	20	56	76	49	0.9985	20	92	112	72	0.9983
2. ABR+VBR	ERICA <sup>+</sup>	3	7	30	54	84	54	0.9654	30	53	83	54	0.9980
3. ABR+VBR	ERICA <sup>+</sup>	5	5	50	42	92	59	0.9643	50	37	87	56	0.9927

#### ผลการวิเคราะห์

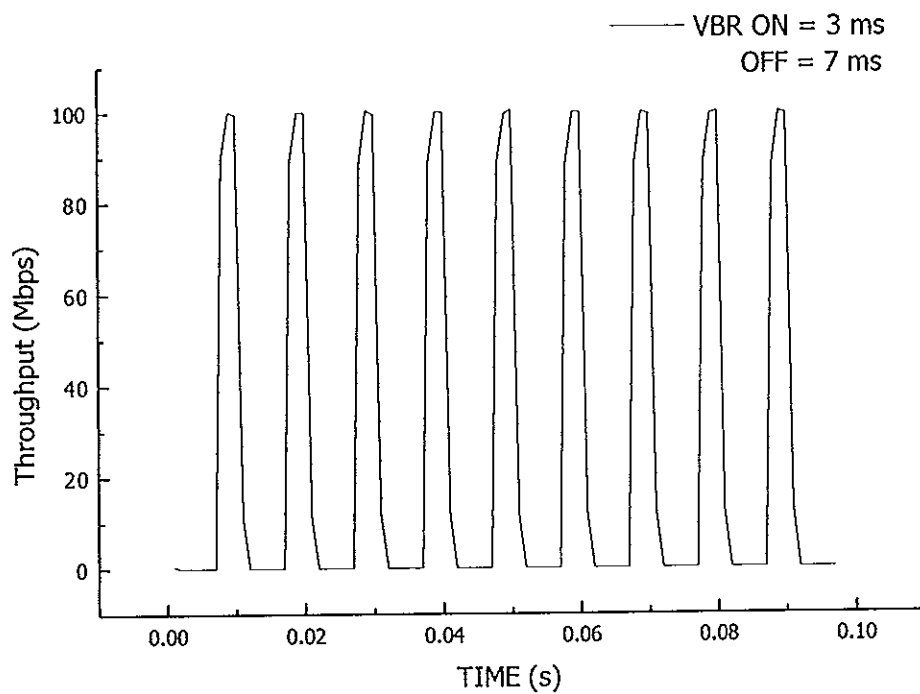
- จากตารางที่ 5-10 เป็นผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีลักษณะเป็นแบบ ON-OFF ช่วงที่มีการส่งข้อมูล(ON) ในแบบทดสอบแบบจำลองนี้จะแบ่งเป็น 2,3 และ 5 มิลลิวินาที และช่วงที่ไม่มีการส่งข้อมูล(OFF) จะเป็น 5,7 และ 8 มิลลิวินาที ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากค่าการบริการแบบ VBR หรือที่เรียกว่า VBR Traffic ค่านี้สามารถวัด VBR ทราฟฟิกที่อยู่ในส่วนของ ATM สวิตช์ ดังภาพประกอบ 5-12, 5-13 และ 5-14

- จากผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์เปรียบเทียบกับ 25 สวิตช์ พบว่า System Throughput (เป็นค่า Throughput ของ VBRร่วมกับABR) มีค่าลดลงเมื่อจำนวนสวิตช์มากขึ้น แต่ Fairnessมีค่าเพิ่มขึ้นดังภาพประกอบ 5-15 และ 5-16 ยกเว้นเมื่อ ON เท่ากับ 2 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 8 มิลลิวินาที ซึ่งเกิดจากช่วงที่ OFF การบริการแบบ ABR สามารถส่งข้อมูลได้เต็มที่ แต่ขนาดของบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอทำให้เซลล์ที่เข้ามายังบัฟเฟอร์ถูกทิ้ง ดังภาพประกอบ 5-17 แสดงเปอร์เซ็นต์การทิ้งเซลล์ที่อยู่ในบัฟเฟอร์

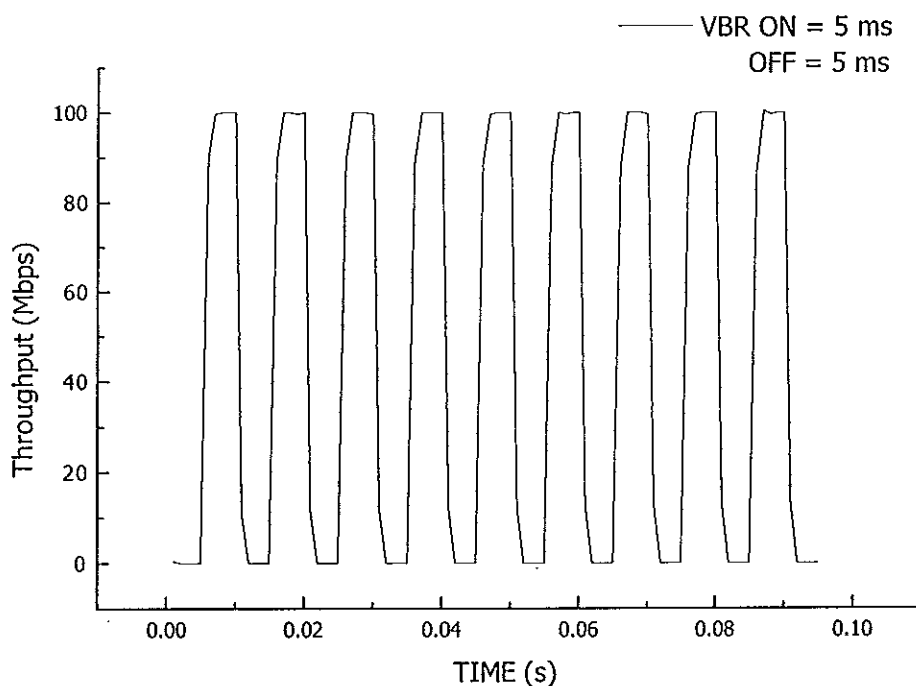




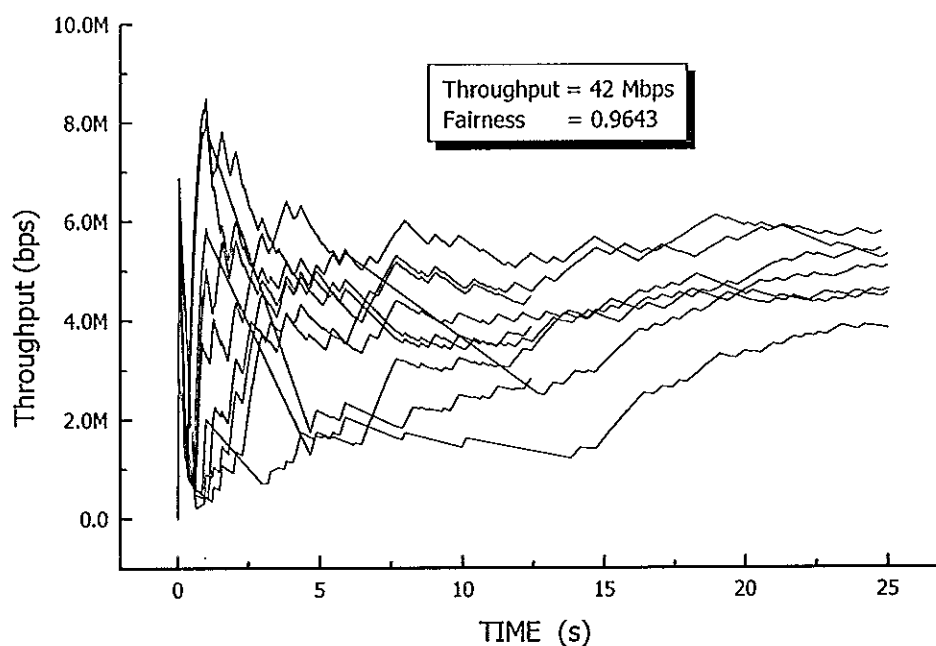
ภาพประกอบ 5-12 แสดงการบริการแบบ VBR ที่มีลักษณะของ ON เท่ากับ 2 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 8 มิลลิวินาที



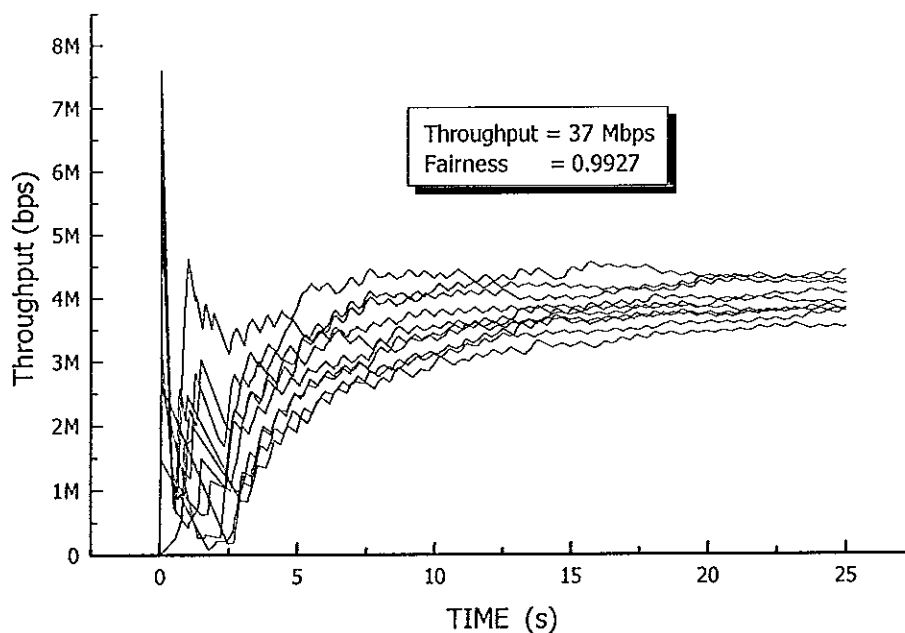
ภาพประกอบ 5-13 แสดงการบริการแบบ VBR ที่มีลักษณะของ ON เท่ากับ 3 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 7 มิลลิวินาที



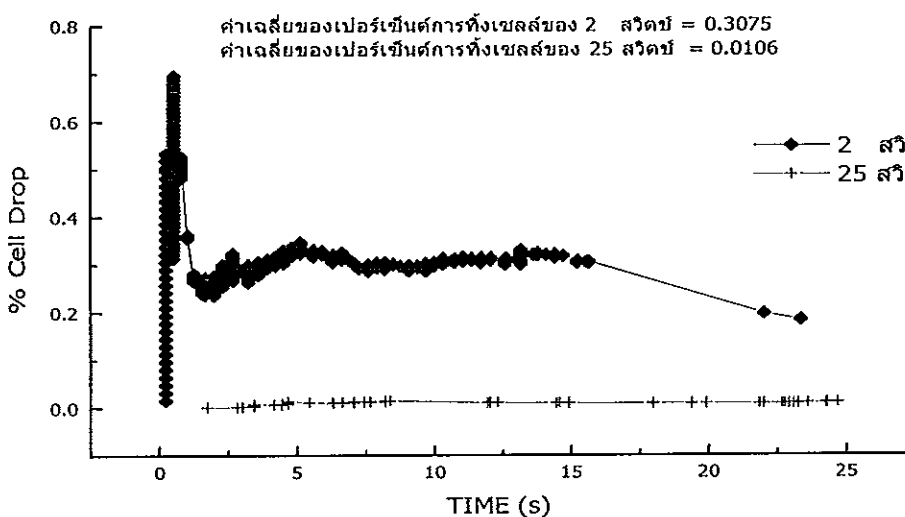
ภาพประกอบ 5-14 แสดงการบริการแบบ VBR ที่มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 5-15 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 5-16 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 5-17 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การทิ้งเซลล์ระหว่างจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์และ 25 สวิตช์ เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 2 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 8 มิลลิวินาที

สรุปผลการวิเคราะห์กราฟในภาพประกอบ ดังนี้

- ภาพประกอบ 5-12 ,5-13 และ5-14 เป็นการทำงานของกรบริการแบบ VBR ที่มีลักษณะเป็น ON-OFF โดยมีค่า Throughput สูงสุดเท่ากับ 100 เมกะบิตต่อวินาที

- ภาพประกอบ 5-15 เป็นการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR โดยมีจำนวน สวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์, แหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และมีขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ จากกราฟจะเห็นว่ากราฟมีลักษณะแกว่งมากในช่วงแรกหลังจากนั้นก็ดีขึ้น เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ 25 สวิตช์จากภาพประกอบ 5-16 จะพบว่ากราฟที่ใช้ 25 สวิตช์ มีค่า Fairness ดีกว่า 2 สวิตช์ ซึ่งเกิดจากค่า RM เซลล์กล่าวคือการบริการแบบ ABR ได้นำการบริการแบบ VBR มาทำงานร่วมกันทำให้จะมีแบนด์วิดท์ที่เหลือใช้จากการบริการแบบ VBR ก็คือ 50 เมกะบิตต่อวินาที และเมื่อนำแบบจำลองที่ใช้จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ มาเปรียบเทียบกับ 25 สวิตช์ค่า RM เซลล์จึงเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ค่า Fairness ต่างกัน นั่นก็คือเมื่อใช้จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ทำให้สวิตช์แต่ละตัวตรวจพบค่าแบนด์วิดท์ของการบริการแบบ VBR อยู่เกือบตลอดเวลาจึงทำให้ค่า RM เซลล์ที่ส่งกลับไปยังต้นทางมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 50 เมกะบิตต่อวินาทีและทำให้ค่า Fairness ดีกว่าแบบจำลองที่ใช้ 2 สวิตช์ ส่วนแบบจำลองที่ใช้ 2 สวิตช์อาจจะมีช่วงเวลานึงพบค่าแบนด์วิดท์ที่ 155 เมกะบิตต่อวินาทีทำให้ RM เซลล์ส่งค่าที่ 155 เมกะบิตต่อวินาทีกลับไปยังต้นทาง เมื่อต้นทางรับค่ามาก็ทำการส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 155 เมกะบิตต่อวินาทีไปยัง ATM สวิตช์ซึ่งในเวลานี้อาจเกิดช่วงที่ VBR มีลักษณะ ON อยู่ทำให้กราฟมีลักษณะลดลงอย่างทันทีจึงทำให้ Fairness มีค่าลดลง และตารางที่ 5-11 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์

- ภาพประกอบ 5-17 เป็นกราฟที่เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การทิ้งเซลล์ระหว่างจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ ค่าเฉลี่ยของการทิ้งเซลล์ของ 2 สวิตช์จะสูงกว่า 25 สวิตช์ จากกราฟค่าเปอร์เซ็นต์การทิ้งเซลล์ของ 2 สวิตช์จะเห็นว่าช่วงแรกจะมีการทิ้งเซลล์สูงมากซึ่งเกิดจากการขนาดของบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอ และค่า RM เซลล์ที่อธิบายในข้างต้น

ตารางที่ 5-11 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วยบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ,แหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์

หมายเลขแหล่งข้อมูล	ภาพประกอบ 5-15		ภาพประกอบ 5-16	
	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	4.01	5.5	3.66	5.85
2	5.53	3.98	3.71	5.8
3	2.89	6.62	3.75	5.76
4	2.89	6.62	4.09	5.42
5	4.22	5.29	4.32	5.19
6	4.27	5.24	4.09	5.42
7	4.30	5.21	3.49	6.02
8	4.23	5.28	3.42	6.09
9	5.30	4.21	3.23	6.28
10	4.44	5.07	3.63	5.88

จากตารางที่ 5-11 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ และค่าเบี่ยงเบนสามารถคำนวณจาก Max Throughput ลบด้วยค่า Throughput ก็จะได้ค่าเบี่ยงเบน โดยที่ค่า Max Throughput มีค่าเท่ากับ 9.51 เมกะบิตต่อวินาที และผลที่ได้พบว่าแบบจำลองที่มีจำนวนสวิตช์มากกว่าจะมีค่า Fairness ดีกว่าแต่จะมีค่า Throughput ต่ำกว่า

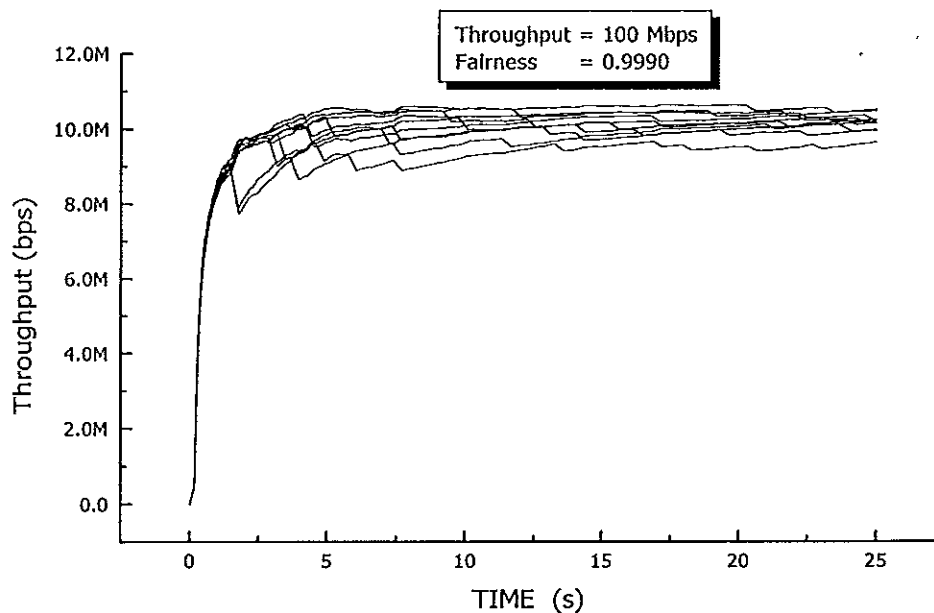
5.3.2 พารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย ขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และใช้อัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล

ตารางที่ 5-12 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ประกอบด้วย  
ด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์

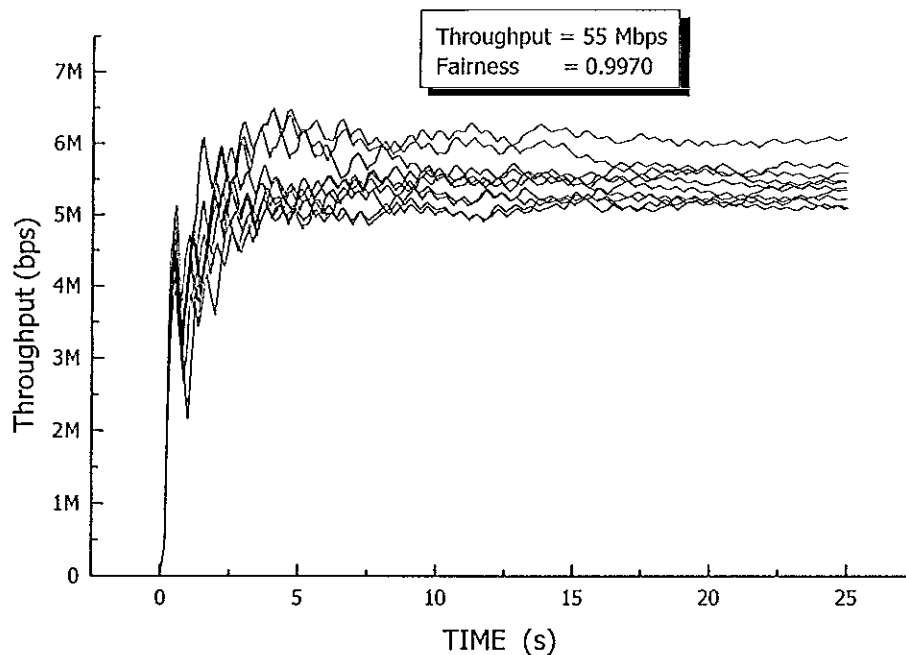
Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-6)					25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-7)				
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	ABR				VBR	ABR			
1. ABR+VBR	ERICA*	2	8	20	107	127	82	0.9997	20	97	117	75	0.9996
2. ABR+VBR	ERICA*	3	7	30	100	130	84	0.9990	30	55	85	55	0.9970
3. ABR+VBR	ERICA*	5	5	50	79	129	83	0.9952	50	41	91	59	0.9950

#### ผลการวิเคราะห์

- จากตารางที่ 5-12 เป็นผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อขนาดของบัฟเฟอร์มีค่าเท่ากับ 10,000 เซลล์ ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ เหมือนกับข้อหัว 5.3.1 ซึ่งพบว่า System Throughput และ Fairness มีค่าลดลงเมื่อจำนวนสวิตช์มากขึ้น ดังภาพประกอบ 5-18 และ 5-19



ภาพประกอบ 5-18 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 3 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 7 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 5-19 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 3 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 7 มิลลิวินาที

#### สรุปผลการวิเคราะห์กราฟในภาพประกอบ ดังนี้

- ภาพประกอบ 5-18 จะเห็นว่าลักษณะกราฟที่เกิดจากแหล่งข้อมูลแต่ละตัวมีค่า Throughput ที่ใกล้เคียงกันและค่า Fairness ดีกว่าภาพประกอบ 5-15 ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขนาดบัฟเฟอร์เป็น 10,000 เซลล์ทำให้กราฟมีลักษณะไม่แกว่งมากเพราะว่าเมื่อขนาดบัฟเฟอร์มากขึ้นทำให้เซลล์ถูกทิ้งลดลงจึงทำให้ระดับชั้นสื่อสาร TCP ทำ Slow Start ลดลง และทำให้ค่า Throughput และค่า Fairness มากขึ้น ส่วนภาพประกอบ 5-19 เป็นแบบจำลองที่ใช้จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ จะมีค่า Throughput และ Fairness น้อยกว่าจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์เพราะว่าการที่เพิ่มขนาดของบัฟเฟอร์ทำให้เกิดการทิ้งเซลล์น้อยลง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการทำให้ Throughput และ Fairness ดีขึ้น แต่เมื่อจำนวนสวิตช์เพิ่มขึ้นทำให้ไปขยายขนาดของโครงข่ายเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลลดลง และตารางที่ 5-13 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์

ตารางที่ 5-13 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วย การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ,แหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์

หมายเลข แหล่งข้อมูล	ภาพประกอบ 5-18		ภาพประกอบ 5-19	
	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	10.38	0.94	6.11	5.21
2	9.79	1.53	5.32	6
3	10.18	1.14	5.51	5.81
4	9.98	1.34	5.60	5.72
5	10.47	0.85	5.53	5.79
6	10.29	1.03	5.22	6.1
7	9.40	1.92	5.18	6.14
8	9.71	1.61	5.16	6.16
9	10.03	1.29	5.88	5.44
10	10.14	1.18	5.23	6.09

จากตารางที่ 5-13 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ และค่า Max Throughput มีค่าเท่ากับ 11.32 เมกะบิตต่อวินาที และผลที่ได้พบว่าเมื่อแบบจำลองมีการเพิ่มขนาดบัฟเฟอร์ค่าเบี่ยงเบนมีค่าลดลง โดยเฉพาะแบบจำลองที่ใช้ 2 สวิตช์จะมีค่าเบี่ยงเบนลดลงมาก

5.3.3 พารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย ขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์, จำนวน สวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ และใช้อัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล

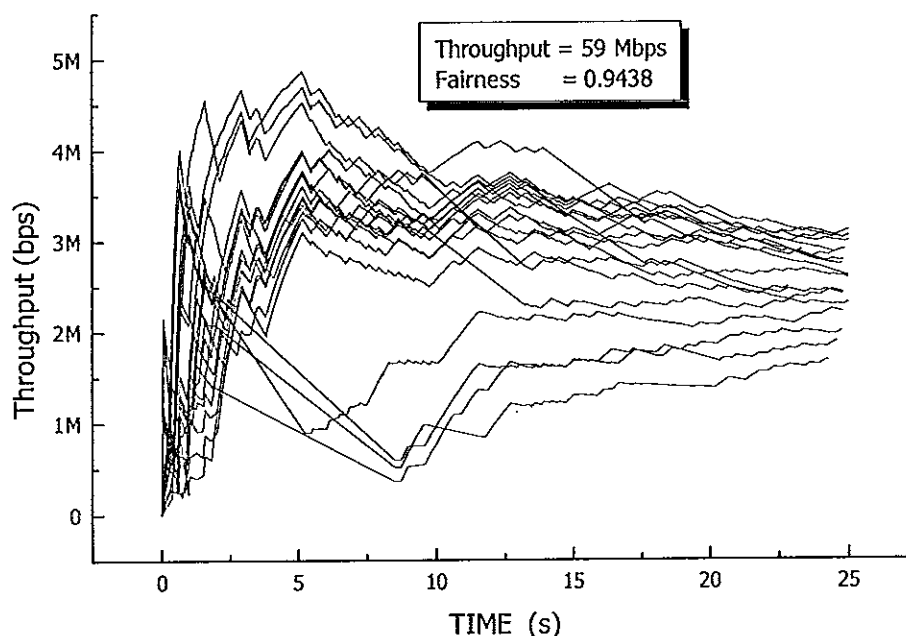


ตารางที่ 5-14 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ประกอบด้วย แหล่งข้อมูล 20 การเชื่อมต่อ ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์

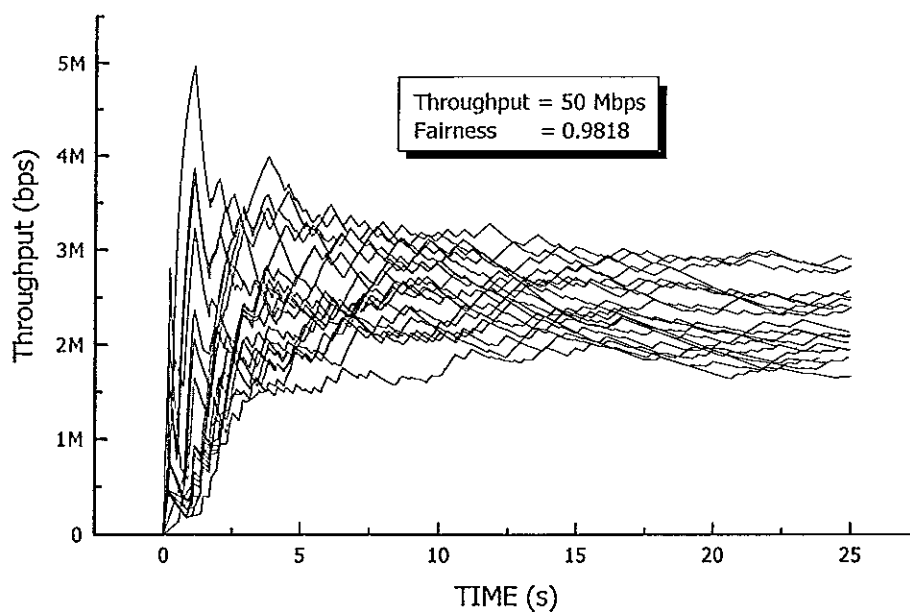
Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-6)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-7)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	ABR				VBR	ABR			
1. ABR+VBR	ERICA*	2	8	20	54	74	48	0.9912	20	76	96	62	0.9974
2. ABR+VBR	ERICA*	3	7	30	59	89	57	0.9438	30	50	80	52	0.9818
3. ABR+VBR	ERICA*	5	5	50	47	97	62	0.8919	50	37	87	56	0.9832

#### ผลการวิเคราะห์

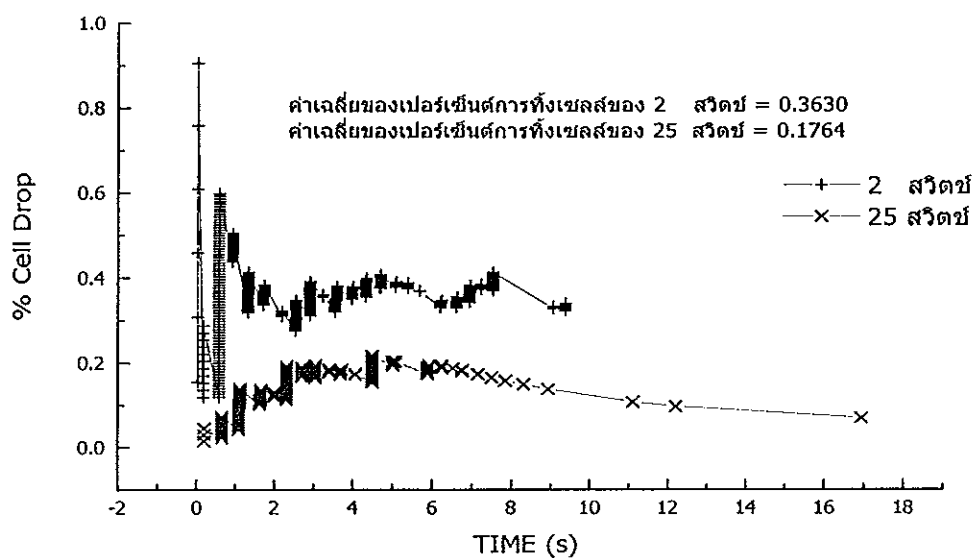
- จากตารางที่ 5-14 เป็นผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อแหล่งข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็น 20 การเชื่อมต่อ ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ เหมือนกับข้อหัว 5.3.1 พบว่า System Throughput มีค่าลดลงเมื่อจำนวนสวิตช์มากขึ้น แต่ Fairness มีค่าเพิ่มขึ้นดังภาพประกอบ 5-20 และ 5-21 ยกเว้นเมื่อ ON เท่ากับ 2 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 8 มิลลิวินาที ซึ่งเกิดจากช่วงที่ OFF การบริการแบบ ABR สามารถส่งข้อมูลได้เต็มที่ แต่ขนาดของบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอทำให้เซลล์ที่เข้ามาถึงบัฟเฟอร์ถูกทิ้ง ดังภาพประกอบ 5-22 แสดงเปอร์เซ็นต์การทิ้งเซลล์ที่อยู่ในบัฟเฟอร์



ภาพประกอบ 5-20 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 3 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 7 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 5-21 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 3 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 7 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 5-22 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การทิ้งเซลล์ระหว่างจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 2 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 8 มิลลิวินาที

สรุปผลการวิเคราะห์กราฟจากภาพประกอบ ดังนี้

- ภาพประกอบ 5-20 ค่า Fairness มีค่าน้อยมากซึ่งเกิดจากแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อมีค่า Throughput ที่แตกต่างกันมาก จากกราฟจะเห็นว่าแหล่งข้อมูลจำนวนหนึ่งที่มีค่า Throughput ลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งในส่วนี้เกิดจากค่า RM เซลล์ที่ป้อนกลับไปยังต้นทาง

- ภาพประกอบ 5-21 เป็นแบบจำลองที่ใช้จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์จะเห็นว่าค่า Fairness ที่ดีกว่าภาพประกอบ 5-20 (แบบจำลอง 2 สวิตช์) เพราะค่า RM เซลล์ที่ส่งไปยังต้นทางมีการแกว่งค่าของอัตราการส่งข้อมูลเล็กน้อย ซึ่งเกิดจาก VBR ที่มีลักษณะ ON ซึ่งทำให้แบนด์วิดท์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 50 เมกะบิตต่อวินาที และค่านี้จะใส่ให้กับ RM เซลล์ แต่ค่า Throughput ของแบบจำลอง 2 สวิตช์มีค่ามากกว่า 25 สวิตช์ เพราะว่าเป็นแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่และทำให้ค่า RM เซลล์ที่ส่งไปยังต้นทางช้ากว่าแบบจำลอง 2 สวิตช์ ส่วนค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อแสดงในตารางที่ 5-15

- ภาพประกอบ 5-22 เปรอ์เซ็นต์การทิ้งเซลล์ของ 2 สวิตช์ มีค่ามากกว่า 25 สวิตช์ แต่เมื่อส่งข้อมูลอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 10 วินาทีการทิ้งเซลล์ของ 2 สวิตช์จะไม่เกินขึ้น ในขณะที่ 25 สวิตช์จะทิ้งเซลล์ไปจนถึง 17 วินาที และเมื่อนำภาพประกอบ 5-20 มาเปรียบเทียบกับภาพประกอบ 5-22 พบว่าแบบจำลองที่ใช้ 2 สวิตช์จะมีค่า Throughput เข้าสู่สถานะอยู่ตัวเมื่อเวลาประมาณ 10 วินาที ส่วนแบบจำลอง 25 สวิตช์พบว่าในช่วงเวลาประมาณ 6 วินาที การทิ้งเซลล์เริ่มลดลงทำให้ค่า Throughput เริ่มเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเช่นกัน

ตารางที่ 5-15 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วย การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ,แหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์

หมายเลข แหล่งข้อมูล	ภาพประกอบ 5-20		ภาพประกอบ 5-21	
	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	3.19	2.47	2.86	2.80
2	3.37	2.29	2.54	3.12
3	2.71	2.95	2.33	3.33
4	1.61	4.05	2.67	2.99
5	3.07	2.59	2.22	3.44
6	3.42	2.24	2.15	3.51
7	3.28	2.38	3.02	2.64
8	3.33	2.33	2.80	2.86
9	3.03	2.63	2.09	3.57
10	2.00	3.66	2.36	3.30
11	1.36	4.30	3.05	2.61
12	3.92	1.74	1.81	3.85
13	2.91	2.75	2.64	3.02
14	3.87	1.79	2.79	2.87
15	3.41	2.25	2.24	3.42
16	3.16	2.50	2.08	3.58
17	3.61	2.05	2.64	3.02
18	1.66	4.00	2.46	3.20
19	2.71	2.95	2.18	3.48
20	3.32	2.34	2.83	2.83

จากตารางที่ 5-15 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ และค่า Max Throughput มีค่าเท่ากับ 5.66 เมกะบิตต่อวินาที และผลที่ได้พบว่าแบบจำลอง 2 สวิตช์มีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยน้อยกว่า 25 สวิตช์

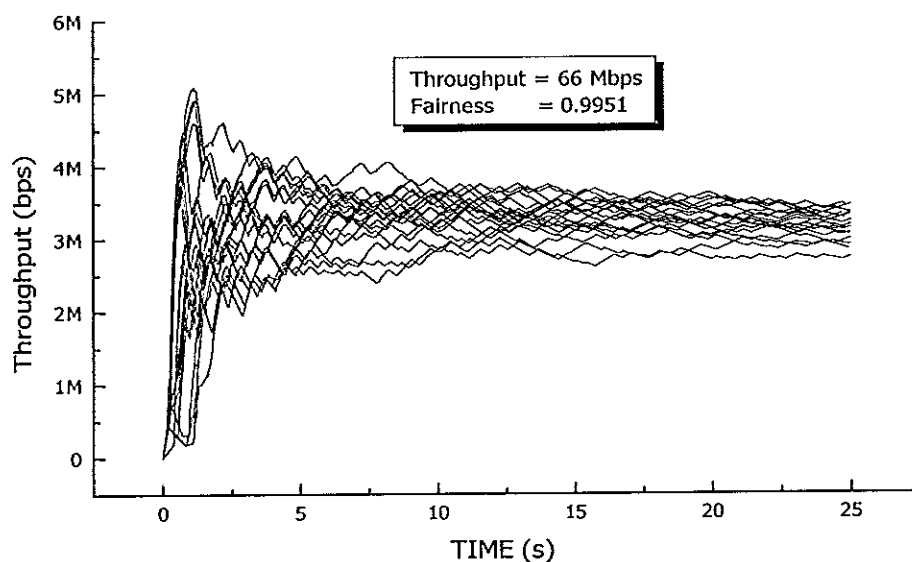
5.3.4 พารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย ขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ และใช้อัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล

ตารางที่ 5-16 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ประกอบด้วยแหล่งข้อมูล 20 การเชื่อมต่อ ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์

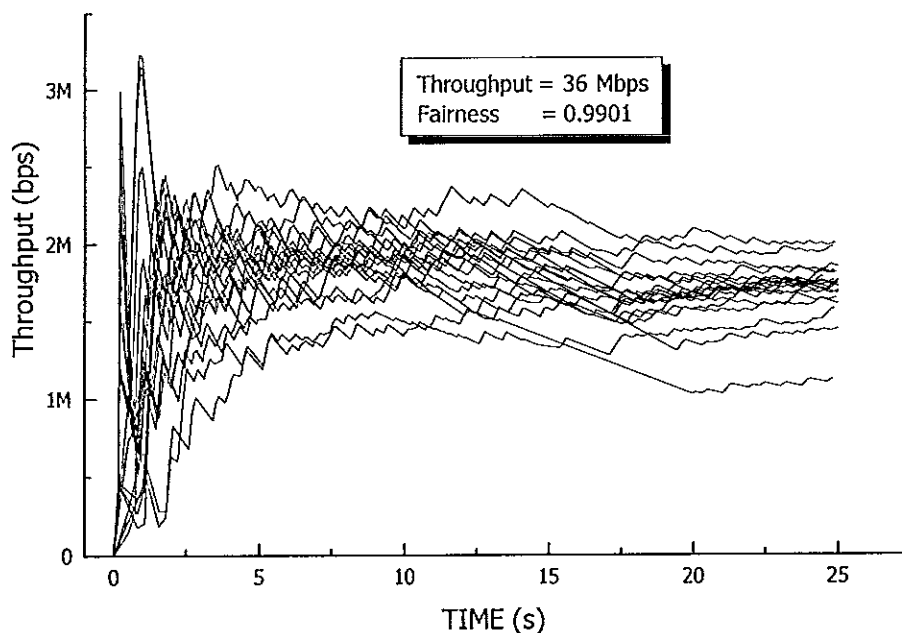
Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-6)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-7)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	ABR				VBR	ABR			
1. ABR+VBR	ERICA <sup>+</sup>	2	8	20	97	117	75	0.9971	20	89	109	70	0.9970
2. ABR+VBR	ERICA <sup>+</sup>	3	7	30	83	113	73	0.9970	30	54	84	54	0.9842
3. ABR+VBR	ERICA <sup>+</sup>	5	5	50	66	116	75	0.9951	50	36	86	55	0.9901

#### ผลการวิเคราะห์

- จากตารางที่ 5-16 เป็นผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อขนาดของบัฟเฟอร์มีค่าเท่ากับ 10,000 เซลล์ ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ เหมือนกับข้อหัว 5.3.3 ซึ่งพบว่า System Throughput และ Fairness มีค่าลดลงเมื่อจำนวนสวิตช์มากขึ้น ดังภาพประกอบ 5-23 และ 5-24



ภาพประกอบ 5-23 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 5-24 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที

#### สรุปผลการวิเคราะห์กราฟจากภาพประกอบ ดังนี้

- ภาพประกอบ 5-23 เป็นการเพิ่มขนาดของบัฟเฟอร์จากแบบจำลองในภาพประกอบ 5-20 จะเห็นว่าค่า Throughput และ Fairness จะดีกว่าแบบจำลองในภาพประกอบ 5-20 และขนาดบัฟเฟอร์ที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ค่า Throughput และ Fairness ดีกว่าแบบจำลองที่ใช้ 25 สวิตช์ เพราะว่าการที่เพิ่มขนาดของบัฟเฟอร์ทำให้เกิดการทิ้งเซลล์น้อยลง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการทำให้ Throughput และ Fairness ดีขึ้น แต่เมื่อจำนวนสวิตช์เพิ่มขึ้นทำให้ไปขยายขนาดของโครงข่ายเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลลดลงดังภาพประกอบ 5-24 ส่วนตารางที่ 5-17 แสดงค่าเปรียบเทียบที่เปรียบเทียบกันระหว่าง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์

ตารางที่ 5-17 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วย การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับ VBR ,แหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์

หมายเลข แหล่งข้อมูล	ภาพประกอบ 5-23		ภาพประกอบ 5-24	
	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	3.66	1.10	2.16	2.60
2	3.25	1.51	1.76	3.00
3	2.76	2.00	1.31	3.45
4	2.92	1.84	1.68	3.08
5	3.28	1.48	1.73	3.03
6	3.23	1.53	1.76	3.00
7	3.48	1.28	1.81	2.95
8	2.82	1.94	1.86	2.90
9	3.26	1.50	1.99	2.77
10	3.16	1.60	1.84	2.92
11	3.48	1.28	1.88	2.88
12	3.45	1.31	1.80	2.96
13	3.42	1.34	1.98	2.78
14	3.40	1.36	1.87	2.89
15	3.34	1.42	1.68	3.08
16	3.26	1.50	1.67	3.09
17	3.37	1.39	1.81	2.95
18	3.57	1.19	1.44	3.32
19	3.14	1.62	1.74	3.02
20	3.50	1.26	1.87	2.89

จากตารางที่ 5-17 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ และค่า Max Throughput มีค่าเท่ากับ 4.76 เมกะบิตต่อวินาที และผลที่ได้พบว่าแบบจำลอง 2 สวิตช์มีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยน้อยกว่า 25 สวิตช์

#### 5.4 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR

5.4.1 พารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย ขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล

ตารางที่ 5-18 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR และมีแหล่งข้อมูล 10 การเชื่อมต่อ ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่

##### 18.1 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD

Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)					25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)				
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	EPD	2	8	20	90	110	71	0.9969	20	88	108	70	0.9955
2. UBR+VBR	EPD	3	7	30	69	99	64	0.9875	30	68	98	63	0.9852
3. UBR+VBR	EPD	5	5	50	52	102	66	0.9714	50	50	100	64	0.9784

##### 18.2 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD กับ RED

Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)					25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)				
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	EPD+RED	2	8	20	93	113	73	0.9957	20	90	110	71	0.9945
2. UBR+VBR	EPD+RED	3	7	30	72	102	66	0.9812	30	70	100	64	0.9807
3. UBR+VBR	EPD+RED	5	5	50	53	105	68	0.9876	50	53	103	66	0.9912

##### 18.3 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่

Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)					25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)				
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	AEPD+RED	2	8	20	96	116	75	0.9980	20	95	115	74	0.9988
2. UBR+VBR	AEPD+RED	3	7	30	74	104	67	0.9891	30	73	103	66	0.9885
3. UBR+VBR	AEPD+RED	5	5	50	55	103	66	0.9905	50	53	103	66	0.9852



#### 18.4 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ กับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์

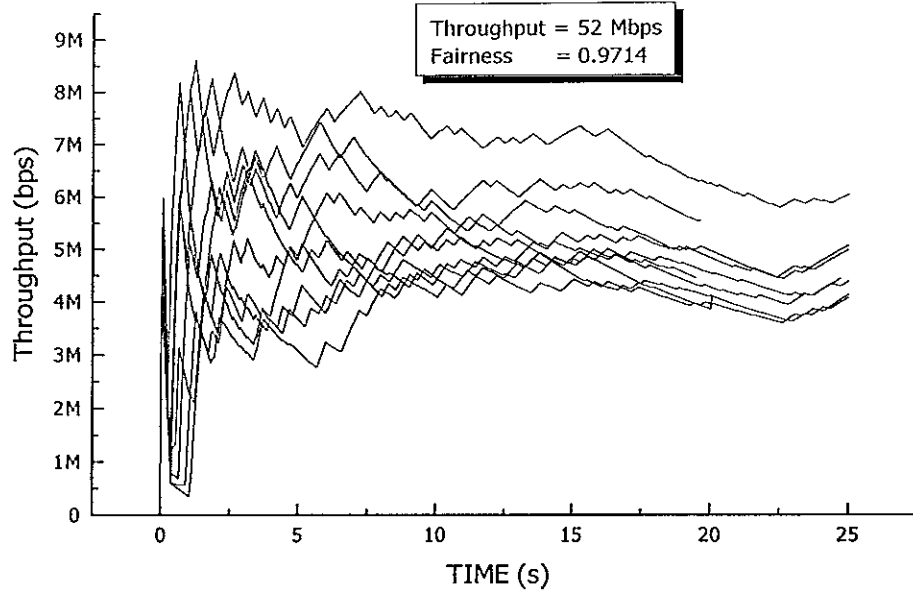
Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)					25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)				
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	AEPD+Avg	2	8	20	94	114	74	0.9952	20	93	113	73	0.9982
2. UBR+VBR	AEPD+Avg	3	7	30	72	102	66	0.9962	30	70	100	64	0.9946
3. UBR+VBR	AEPD+Avg	5	5	50	53	103	66	0.9845	50	52	102	66	0.9825

#### ผลการวิเคราะห์

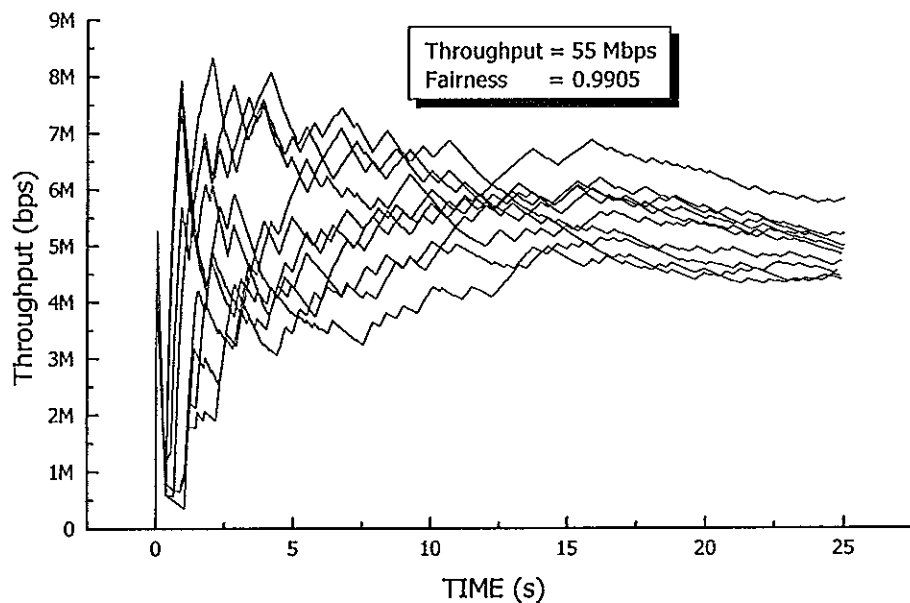
- จากตารางที่ 5-18 เป็นผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับVBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD เปรียบเทียบกับอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ทุกตัว และบัฟเฟอร์มีขนาดเท่ากับ 500 เซลล์ ซึ่งพบว่าอัลกอริทึมที่นำมาทดสอบทั้งหมดมีค่า System Throughput ลดลงเมื่อจำนวนของสวิตช์มากขึ้น ส่วนค่า System Throughput และFairness ของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่จะมากกว่าอัลกอริทึม EPD ดังภาพประกอบ 5-25 และ5-26

- อัลกอริทึม EPD (ตารางที่ 18.1) กับอัลกอริทึม EPD ทำงานร่วมกับ RED (ตารางที่ 18.2) มีค่า Fairness ลดลงเมื่อจำนวนของสวิตช์มากขึ้น ยกเว้นเมื่อค่า ON เป็น 5 มิลลิวินาทีค่า Fairness มีค่ามากขึ้น

- ส่วนค่า Fairness ของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ (ตารางที่ 18.3) กับอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่กับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ (ตารางที่ 18.4) มีค่าลดลงเมื่อจำนวนของสวิตช์มากขึ้น ยกเว้นเมื่อค่า ON เป็น 2 มิลลิวินาทีค่า Fairness มีค่ามากขึ้น



ภาพประกอบ 5-25 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 5-26 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที

สรุปผลการวิเคราะห์กราฟจากภาพประกอบ ดังนี้

- ภาพประกอบ 5-25 เป็นแบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD โดยที่เส้นกราฟแต่ละเส้นแสดงถึงแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับภาพประกอบ 5-26 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ส่วนตาราง 5-19 จะแสดงค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput ที่เปรียบเทียบกันระหว่าง 2 อัลกอริทึม

ตารางที่ 5-19 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลองที่ทดสอบด้วยอัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วยบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR, แหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อและมีขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์

หมายเลขแหล่งข้อมูล	ภาพประกอบ 5-25		ภาพประกอบ 5-26	
	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	5.09	4.42	5.42	4.09
2	4.88	4.63	6.36	3.15
3	4.31	5.2	6.52	2.99
4	4.55	4.96	4.30	5.21
5	5.59	3.92	5.37	4.14
6	7.09	2.42	4.78	4.73
7	4.15	5.36	5.57	3.94
8	4.65	4.86	6.13	3.38
9	6.36	3.15	5.23	4.28
10	4.91	4.6	4.98	4.53

จากตารางที่ 5-19 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ และค่า Max Throughput มีค่าเท่ากับ 9.51 เมกะบิตต่อวินาที และผลที่ได้พบว่าแบบจำลองที่ทดสอบด้วยอัลกอริทึม EPD มีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยมากกว่า อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

5.4.2 พารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย ขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์, จำนวน สวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ และใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล

ตารางที่ 5-20 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR และมี แหล่งข้อมูล 10 การเชื่อมต่อ ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่

### 20.1 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD

Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	EPD	2	8	20	119	139	90	0.9999	20	119	139	90	0.9995
2. UBR+VBR	EPD	3	7	30	109	139	90	0.9999	30	108	138	89	0.9998
3. UBR+VBR	EPD	5	5	50	92	142	92	0.9862	50	92	142	92	0.9954

### 20.2 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD กับ RED

Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	EPD+RED	2	8	20	119	139	90	0.9998	20	120	140	90	0.9999
2. UBR+VBR	EPD+RED	3	7	30	110	140	90	0.9996	30	110	140	90	0.9995
3. UBR+VBR	EPD+RED	5	5	50	93	143	93	0.9989	50	93	143	93	0.9986

### 20.3 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่

Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	AEPD+RED	2	8	20	119	139	90	0.9999	20	119	139	90	0.9998
2. UBR+VBR	AEPD+RED	3	7	30	111	141	91	0.9999	30	110	140	90	0.9998
3. UBR+VBR	AEPD+RED	5	5	50	94	144	93	0.9983	50	93	143	92	0.9997

## 20.4 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่กับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์

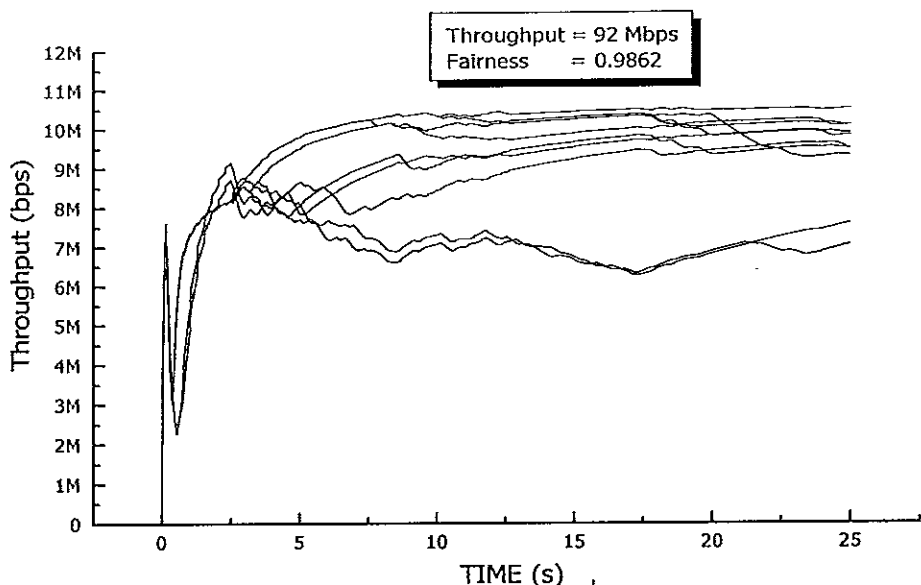
Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)					25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)				
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	AEPD+Avg	2	8	20	115	135	87	0.9999	20	114	134	86	0.9998
2. UBR+VBR	AEPD+Avg	3	7	30	110	140	90	0.9999	30	109	139	90	0.9998
3. UBR+VBR	AEPD+Avg	5	5	50	90	140	90	0.9995	50	90	140	90	0.9991

### ผลการวิเคราะห์

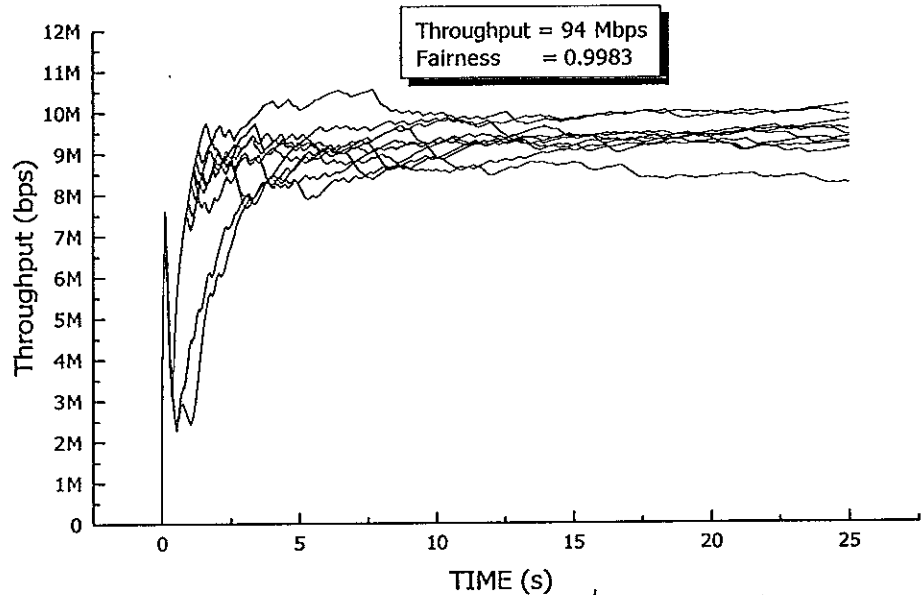
- จากตารางที่ 5-20 เป็นผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD เปรียบเทียบกับอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ทุกตัว และบัฟเฟอร์มีขนาดเท่ากับ 10,000 เซลล์ ซึ่งอัลกอริทึมที่นำมาทดสอบทั้งหมดจะเปรียบเทียบค่า System Throughput กับ ค่า Fairness ระหว่าง 2 สวิตช์ กับ 25 สวิตช์ และพบว่า System Throughput มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่า System Throughput และ Fairness ของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่จะดีกว่าอัลกอริทึม EPD ดังภาพประกอบ 5-27 และ 5-28

- อัลกอริทึม EPD (ตารางที่ 20.1), อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ (ตารางที่ 20.3) และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่กับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ (ตารางที่ 20.4) มีค่า Fairness ลดลงเมื่อจำนวนของสวิตช์มากขึ้น ยกเว้นเมื่อค่า ON เป็น 5 มิลลิวินาทีค่า Fairness มีค่ามากขึ้น

- ส่วนค่า Fairness ของอัลกอริทึม EPD ทำงานร่วมกับ RED (ตารางที่ 20.2) ลดลงเมื่อจำนวนของสวิตช์มากขึ้น ยกเว้นเมื่อค่า ON เป็น 2 มิลลิวินาทีค่า Fairness มีค่ามากขึ้น



ภาพประกอบ 5-27 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 5-28 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที

สรุปผลการวิเคราะห์กราฟจากภาพประกอบ ดังนี้

- ภาพประกอบ 5-27 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มขนาดของบัฟเฟอร์เป็น 10,000 เซลล์จะทำให้ค่า Throughput และ Fairness ดีกว่าการใช้ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์(จากภาพประกอบ 5-25)
- ส่วนภาพประกอบ 5-28 เป็นอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ทำให้เส้นกราฟแต่ละเส้นมีค่า Throughput และ Fairness ที่ดีขึ้น ส่วนตารางที่ 5-21 แสดงค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput เปรียบเทียบกันระหว่างอัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

ตารางที่ 5-21 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลองที่ทดสอบด้วยอัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วยการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR, แหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อและมีขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์

หมายเลขแหล่งข้อมูล	ภาพประกอบ 5-27		ภาพประกอบ 5-28	
	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	9.89	-0.38	9.07	0.44
2	9.32	0.19	9.50	0.01
3	9.00	0.51	8.93	0.58
4	9.99	-0.48	9.03	0.48
5	7.15	2.36	9.29	0.22
6	7.17	2.34	9.08	0.43
7	9.24	0.27	9.32	0.19
8	9.92	-0.41	9.98	-0.47
9	10.24	-0.73	9.69	-0.18
10	10.07	-0.56	9.11	0.4

จากตารางที่ 5-21 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ และค่า Max Throughput มีค่าเท่ากับ 9.51 เมกะบิตต่อวินาที และผลที่ได้พบว่าแบบจำลองที่ทดสอบด้วยอัลกอริทึม EPD มีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยมากกว่า อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

5.4.3 พารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย ขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์, จำนวน สวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ และใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล

ตารางที่ 5-22 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR และมี แหล่งข้อมูล 20 การเชื่อมต่อ ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ และใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่

### 22.1 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD

Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	EPD	2	8	20	91	111	72	0.9951	20	89	109	70	0.9957
2. UBR+VBR	EPD	3	7	30	76	106	68	0.9764	30	76	106	68	0.9783
3. UBR+VBR	EPD	5	5	50	44	94	61	0.9560	50	38	88	57	0.9328

### 22.2 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD กับ RED

Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	EPD+RED	2	8	20	91	111	72	0.9968	20	88	108	70	0.9951
2. UBR+VBR	EPD+RED	3	7	30	72	102	66	0.9847	30	72	102	66	0.9842
3. UBR+VBR	EPD+RED	5	5	50	47	97	62	0.9678	50	47	97	62	0.9316

### 22.3 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่

Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	AEPD+RED	2	8	20	91	111	72	0.9966	20	90	110	71	0.9967
2. UBR+VBR	AEPD+RED	3	7	30	80	110	71	0.9718	30	79	109	70	0.9853
3. UBR+VBR	AEPD+RED	5	5	50	55	105	68	0.9720	50	55	105	68	0.9559



## 22.4 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่กับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์

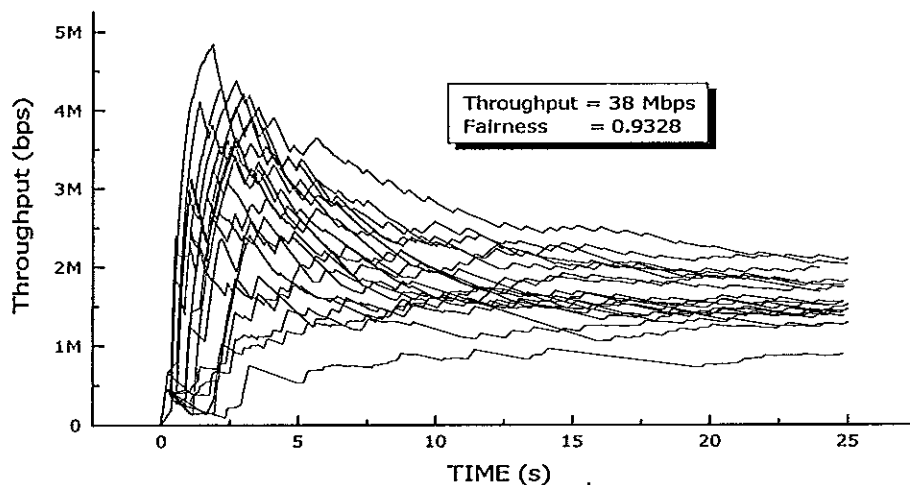
Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	AEPD+Avg	2	8	20	90	110	71	0.9952	20	90	110	71	0.9985
2. UBR+VBR	AEPD+Avg	3	7	30	78	108	70	0.9651	30	75	105	68	0.9852
3. UBR+VBR	AEPD+Avg	5	5	50	48	98	63	0.9570	50	48	98	63	0.9446

### ผลการวิเคราะห์

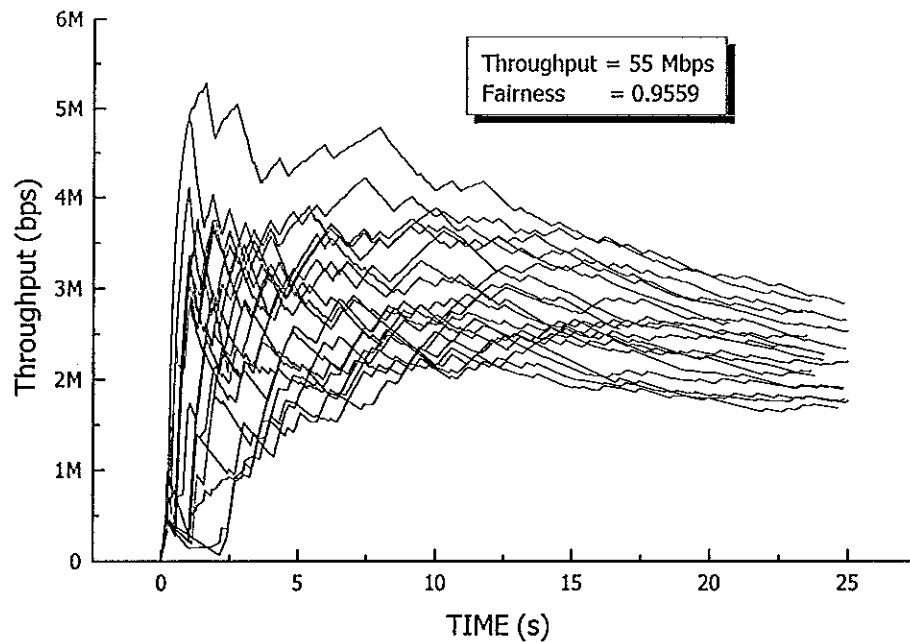
- จากตารางที่ 5-22 เป็นผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD เปรียบเทียบกับอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ทุกตัว และบัฟเฟอร์มีขนาดเท่ากับ 500 เซลล์ ซึ่งพบว่าอัลกอริทึมที่นำมาทดสอบทั้งหมดมีค่า System Throughput ลดลงเมื่อจำนวนของสวิตช์มากขึ้น ส่วนค่า System Throughput และ Fairness ของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่จะมากกว่าอัลกอริทึม EPD ดังภาพประกอบ 5-29 และ 5-30

- อัลกอริทึม EPD (ตารางที่ 22.1), อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ (ตารางที่ 22.3) และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่กับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ (ตารางที่ 22.4) มีค่า Fairness มากขึ้นเมื่อจำนวนของสวิตช์มากขึ้น ยกเว้นเมื่อค่า ON เป็น 5 มิลลิวินาทีค่า Fairness มีค่าลดลง

- ส่วนค่า Fairness ของอัลกอริทึม EPD ทำงานร่วมกับ RED (ตารางที่ 22.2) ลดลงเมื่อจำนวนของสวิตช์มากขึ้น ยกเว้นเมื่อค่า ON เป็น 5 มิลลิวินาทีค่า Fairness มีค่ามากขึ้น



ภาพประกอบ 5-29 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และ VBR มีลักษณะของ ON-OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 5-30 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วย แหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที

#### สรุปผลการวิเคราะห์กราฟจากภาพประกอบ ดังนี้

- ภาพประกอบ 5-29 จะเห็นว่ามีการจัดสรรแบนด์วิดท์ให้กับแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อไม่ดีจึงทำให้ค่า Fairness มีค่าต่ำ

- ภาพประกอบ 5-30 ค่า Throughput และ Fairness มีค่าสูงกว่าภาพประกอบ 5-29 ซึ่งในส่วนของภาพประกอบ 5-30 ได้ปรับปรุงอัลกอริทึม EPD ให้มีการจัดสรรแบนด์วิดท์ให้ดีขึ้น ส่วนตารางที่ 5-23 แสดงค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput เปรียบเทียบกันระหว่างการใช้อัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

ตารางที่ 5-23 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วย การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR, แหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 500 เซลล์

หมายเลข แหล่งข้อมูล	ภาพประกอบ 5-29		ภาพประกอบ 5-30	
	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	1.59	3.17	3.40	1.36
2	2.52	2.24	2.74	2.02
3	1.78	2.98	3.34	1.42
4	2.06	2.7	2.03	2.73
5	2.40	2.36	2.34	2.42
6	1.46	3.3	3.02	1.74
7	1.51	3.25	2.62	2.14
8	2.13	2.63	2.59	2.17
9	2.64	2.12	1.84	2.92
10	1.61	3.15	3.63	1.13
11	1.52	3.24	2.07	2.69
12	2.42	2.34	2.87	1.89
13	1.51	3.25	1.91	2.85
14	1.30	3.46	2.25	2.51
15	2.96	1.8	2.38	2.38
16	1.70	3.06	3.06	1.7
17	1.72	3.04	3.36	1.4
18	1.93	2.83	2.64	2.12
19	2.31	2.45	2.38	2.38
20	1.90	1.59	3.96	0.8

จากตารางที่ 5-23 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ และค่า Max Throughput มีค่าเท่ากับ 4.76 เมกะบิตต่อวินาที และผลที่ได้พบว่าแบบจำลองที่ทดสอบด้วยอัลกอริทึม EPD มีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยมากกว่า อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

5.4.4 พารามิเตอร์ในแบบจำลองนี้ประกอบด้วย ขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ โดยมีแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ และใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล

ตารางที่ 5-24 ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR และมีแหล่งข้อมูล 20 การเชื่อมต่อ ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และใช้อัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่

24.1 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD

Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	EPD	2	8	20	116	136	88	0.9990	20	116	136	88	0.9995
2. UBR+VBR	EPD	3	7	30	105	135	87	0.9996	30	102	132	85	0.9978
3. UBR+VBR	EPD	5	5	50	80	130	84	0.9981	50	79	129	83	0.9908

24.2 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD กับ RED

Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	EPD+RED	2	8	20	118	138	89	0.9997	20	118	138	89	0.9998
2. UBR+VBR	EPD+RED	3	7	30	104	134	86	0.9977	30	104	134	86	0.9988
3. UBR+VBR	EPD+RED	5	5	50	80	130	84	0.9968	50	80	130	84	0.9966

24.3 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่

Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)				25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)					
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	AEPD+RED	2	8	20	118	138	89	0.9996	20	118	138	89	0.9998
2. UBR+VBR	AEPD+RED	3	7	30	106	136	88	0.9990	30	106	136	88	0.9984
3. UBR+VBR	AEPD+RED	5	5	50	80	130	84	0.9985	50	79	129	83	0.9962

#### 24.4 แบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่กับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์

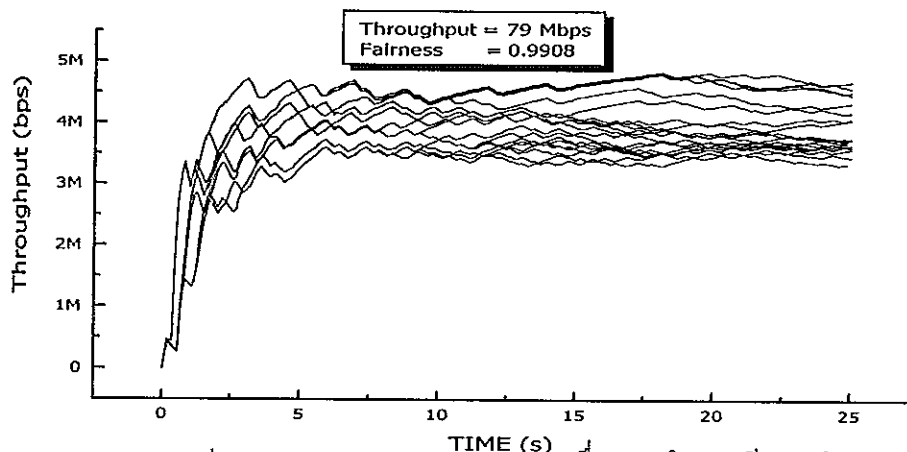
Traffic Source	อัลกอริทึม	ON (ms)	OFF (ms)	2 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-8)					25 สวิตช์ (จากภาพประกอบ 4-9)				
				Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness	Throughput (Mbps)		System Throughput (Mbps)	Utilization (เปอร์เซ็นต์)	Fairness
				VBR	UBR				VBR	UBR			
1. UBR+VBR	AEPD+Avg	2	8	20	119	139	90	0.9997	20	119	139	90	0.9999
2. UBR+VBR	AEPD+Avg	3	7	30	104	134	86	0.9971	30	103	133	86	0.9996
3. UBR+VBR	AEPD+Avg	5	5	50	79	129	83	0.9956	50	79	129	83	0.9953

#### ผลการวิเคราะห์

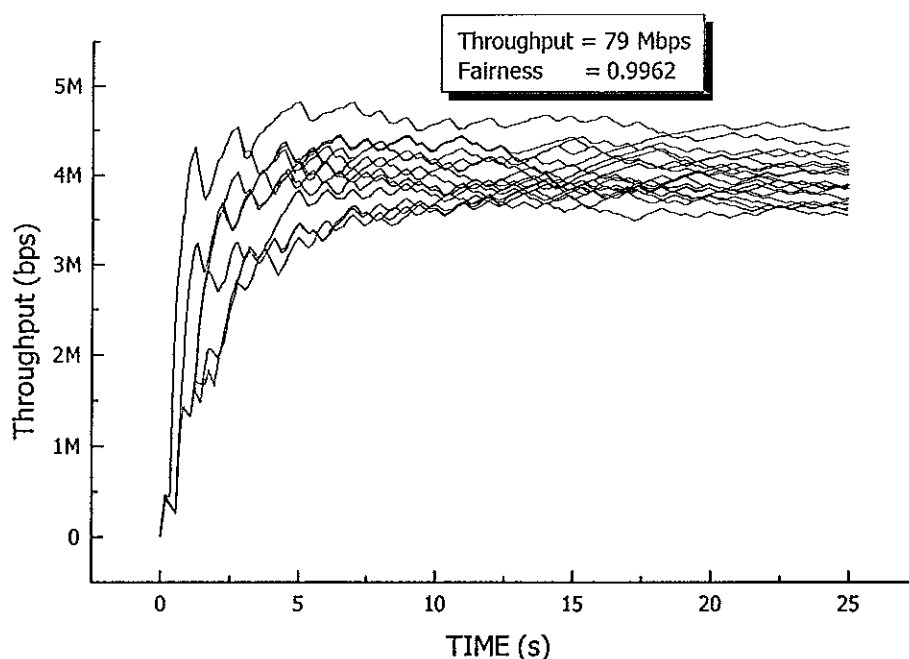
- จากตารางที่ 5-24 เป็นผลการทดสอบแบบจำลองเมื่อใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD เปรียบเทียบกับอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ทุกตัว และบัฟเฟอร์มีขนาดเท่ากับ 10,000 เซลล์ ซึ่งอัลกอริทึมที่นำมาทดสอบทั้งหมดจะเปรียบเทียบค่า System Throughput กับ ค่า Fairness ระหว่าง 2 สวิตช์ กับ 25 สวิตช์ และพบว่า System Throughput มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่า System Throughput และ Fairness ของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่จะดีกว่าอัลกอริทึม EPD ดังภาพประกอบ 5-31 และ 5-32

- อัลกอริทึม EPD (ตารางที่ 24.1), อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ (ตารางที่ 24.3) และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่กับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ (ตารางที่ 24.4) ค่า Fairness มากขึ้นเมื่อจำนวนของสวิตช์เพิ่มขึ้น ยกเว้นเมื่อค่า ON เป็น 5 มิลลิวินาทีค่า Fairness มีจะลดลง

- ส่วนค่า Fairness ของอัลกอริทึม EPD ทำงานร่วมกับ RED (ตาราง 24.2) ลดลงเมื่อจำนวนของสวิตช์มากขึ้น ยกเว้นเมื่อค่า ON เป็น 5 มิลลิวินาทีค่า Fairness มีค่ามากขึ้น



ภาพประกอบ 5-31 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูล 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์ เท่ากับ 25 สวิตช์ และ VBR มีลักษณะของ ON-OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 5-32 แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วย แหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที

#### สรุปผลการวิเคราะห์กราฟจากภาพประกอบ ดังนี้

- ภาพประกอบ 5-31 มีค่า Throughput และ Fairness ดีกว่าการใช้ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ (จากภาพประกอบ 5-29) ลักษณะของเส้นกราฟจะมีการแกว่งขึ้นๆลงๆอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเกิดจาก VBR ที่มีลักษณะการส่งข้อมูลแบบ ON-OFF และช่วงเวลาที่ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาทีจึงทำให้ค่า Fairness มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับ ON เท่ากับ 2 มิลลิวินาที

- ภาพประกอบ 5-32 กราฟแสดงค่า Throughput และ Fairness โดยการใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ทำให้ค่า Throughput และ Fairness ดีกว่าอัลกอริทึม EPD ส่วนตารางที่ 5-25 แสดงค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput เปรียบเทียบกันระหว่างการใช้อัลกอริทึม EPD และอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

ตารางที่ 5-25 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนระหว่างแบบจำลอง 2 สวิตช์ และ 25 สวิตช์ และแสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ โดยที่แบบจำลองประกอบด้วย การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR, แหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ และมีขนาดของบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์

หมายเลข แหล่งข้อมูล	ภาพประกอบ 5-29		ภาพประกอบ 5-30	
	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)	Throughput (Mbps)	ค่าเบี่ยงเบนจากค่า Max Throughput (Mbps)
1	3.69	1.07	3.95	0.81
2	4.58	0.18	4.28	0.48
3	4.45	0.31	4.20	0.56
4	3.87	0.89	3.75	1.01
5	3.62	1.14	3.70	1.06
6	4.13	0.63	3.88	0.88
7	4.57	0.19	4.20	0.56
8	3.44	1.32	4.05	0.71
9	4.15	0.61	4.55	0.21
10	4.12	0.64	3.68	1.08
11	3.43	1.33	3.96	0.8
12	3.58	1.18	3.54	1.22
13	4.55	0.21	4.21	0.55
14	3.71	1.05	3.72	1.04
15	3.63	1.13	3.89	0.87
16	4.12	0.64	4.05	0.71
17	3.95	0.81	3.87	0.89
18	3.98	0.78	4.03	0.73
19	3.50	1.26	3.63	1.13
20	4.40	0.36	3.89	0.87

จากตารางที่ 5-25 แสดงค่า Throughput ของแหล่งข้อมูลแต่ละการเชื่อมต่อ และค่า Max Throughput มีค่าเท่ากับ 4.76 เมกะบิตต่อวินาที และผลที่ได้พบว่าแบบจำลองที่ทดสอบด้วยอัลกอริทึม EPD มีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยมากกว่า อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

## 5.5 สรุป

ในบทนี้ได้แสดงผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบในแบบจำลองทั้งหมด เช่นแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR เปรียบเทียบกับการบริการแบบ UBR จะเห็นว่าการบริการแบบ UBR มีความต้องการบัฟเฟอร์มากกว่าการบริการแบบ ABR หรือแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ทำงานร่วมกับบริการแบบ VBR ซึ่งมีลักษณะการส่งข้อมูลเป็น ON-OFF ในส่วนนี้จะทำให้ Throughput และ Fairness ที่ได้มีค่าต่างกันเมื่อลักษณะ ON-OFF มีการเปลี่ยนแปลง หรือแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับบริการแบบ VBR ในแบบจำลองนี้จะมีการปรับปรุงอัลกอริทึม EPD และสามารถทำให้ค่า Throughput และ Fairness มีค่าสูงขึ้นเป็นต้น และจากตารางข้างล่างนี้จะเป็นการสรุปผลการทดสอบแบบจำลองทั้งหมด ซึ่งได้แก่ตารางที่ 5-26 สรุปค่า Throughput ทั้งหมดที่ได้มาจากการทดสอบแบบจำลอง ตารางที่ 5-27 สรุปค่า Utilization ทั้งหมดที่ได้มาจากการทดสอบแบบจำลอง และตารางที่ 5-28 สรุปค่า Fairness ทั้งหมดที่ได้มาจากการทดสอบแบบจำลอง ส่วนในบทต่อไปเป็นการสรุปผลและข้อเสนอแนะจากการวิจัย



ตารางที่ 5-26 สรุปค่า Throughput ทั้งหมดที่ได้มาจากการทดสอบแบบจำลอง

Test Function	ลักษณะ ของกาบริการ	จำนวน แหล่งข้อมูล	ขนาด บัฟเฟอร์ (เซลล์)	2 สวิตช์					25 สวิตช์					
				ABR	EPD	EPD+RED	AEPD+RED	AEPD+Avg	ABR	EPD	EPD+RED	AEPD+RED	AEPD+Avg	
Throughput (Mbps)	ไม่มี VBR ON-OFF	10	500	125	120	124	124	124	125	118	123	124	123	
		10	10,000	125	122	124	124	126	125	120	124	124	125	
		20	500	125	120	124	124	124	123	118	124	124	124	
		20	10,000	125	122	124	125	126	123	120	124	124	125	
	VBR ON-OFF	2 ms	10	500	76	110	113	116	114	112	108	110	115	113
		3 ms	10	500	84	99	102	104	102	83	98	100	103	100
		5 ms	10	500	92	102	105	103	103	87	100	103	103	102
		2 ms	10	10,000	127	139	139	139	135	117	139	140	139	134
		3 ms	10	10,000	130	139	140	141	140	85	138	140	140	139
		5 ms	10	10,000	129	142	143	144	140	91	142	143	143	140
		2 ms	20	500	74	111	111	111	110	96	109	108	110	110
		3 ms	20	500	89	106	102	110	108	80	106	102	109	105
		5 ms	20	500	97	94	97	105	98	87	88	97	105	98
		2 ms	20	10,000	117	136	138	138	139	109	136	138	138	139
		3 ms	20	10,000	113	135	134	136	134	84	132	134	136	133
		5 ms	20	10,000	116	130	130	130	129	86	129	130	129	129

ตารางที่ 5-27 สรุปค่า Utilization ทั้งหมดที่ได้มาจากการทดสอบแบบจำลอง

Test Function	ลักษณะ ของบริการ	จำนวน แหล่งข้อมูล	ขนาด บัฟเฟอร์ (เซลล์)	2 สวิตช์					25 สวิตช์					
				ABR	EPD	EPD+RED	AEPD+RED	AEPD+Avg	ABR	EPD	EPD+RED	AEPD+RED	AEPD+Avg	
Utilization (เปอร์เซ็นต์)	ไม่มี VBR ON-OFF	10	500	81	77	80	80	80	81	76	79	80	79	
		10	10,000	81	79	80	80	81	81	77	80	80	81	
		20	500	81	77	80	80	80	79	76	79	80	80	
		20	10,000	81	79	80	81	81	79	77	80	80	81	
	VBR ON-OFF	2 ms	10	500	49	71	73	75	74	72	70	71	74	73
		3 ms	10	500	54	64	66	67	66	54	63	64	66	64
		5 ms	10	500	59	66	68	66	66	56	64	66	66	66
		2 ms	10	10,000	82	90	90	90	87	75	90	90	90	86
		3 ms	10	10,000	84	90	90	91	90	55	89	90	90	90
		5 ms	10	10,000	83	92	93	93	90	59	92	93	92	90
		2 ms	20	500	48	72	72	72	71	62	70	70	71	71
		3 ms	20	500	57	68	66	71	70	52	68	66	70	68
		5 ms	20	500	62	61	62	68	63	56	57	62	68	63
		2 ms	20	10,000	75	88	89	89	90	70	88	89	89	90
		3 ms	20	10,000	73	87	86	88	86	54	85	86	88	86
		5 ms	20	10,000	75	84	84	84	83	55	83	84	83	83

ตารางที่ 5-28 สรุปค่า Fairness ทั้งหมดที่ได้มาจากการทดสอบแบบจำลอง

Test Function	ลักษณะ ของกรบริการ	จำนวน แหล่งข้อมูล	ขนาด บัพเฟอร์ (เซลล์)	2 สวิตช์					25 สวิตช์					
				ABR	EPD	EPD+RED	AEPD+RED	AEPD+Avg	ABR	EPD	EPD+RED	AEPD+RED	AEPD+Avg	
Fairness	ไม่มี VBR ON-OFF	10	500	1	0.9997	1	1	1	1	0.9995	0.9996	1	1	
		10	10,000	1	1	1	1	1	1	.1	1	1	1	
		20	500	1	0.9998	0.9999	1	1	0.9997	0.9998	0.9997	1	1	
		20	10,000	1	0.9997	1	0.9998	1	0.9999	1	1	1	1	
	VBR ON-OFF	2 ms	10	500	0.9985	0.9969	0.9957	0.9980	0.9952	0.9983	0.9955	0.9945	0.9988	0.9982
		3 ms	10	500	0.9654	0.9875	0.9812	0.9891	0.9962	0.9980	0.9852	0.9807	0.9885	0.9946
		5 ms	10	500	0.9643	0.9714	0.9876	0.9905	0.9845	0.9927	0.9784	0.9912	0.9852	0.9825
		2 ms	10	10,000	0.9997	0.9999	0.9998	0.9999	0.9999	0.9996	0.9995	0.9999	0.9998	0.9998
		3 ms	10	10,000	0.9990	0.9999	0.9996	0.9999	0.9999	0.9970	0.9998	0.9995	0.9998	0.9998
		5 ms	10	10,000	0.9952	0.9862	0.9989	0.9983	0.9995	0.9950	0.9954	0.9986	0.9997	0.9991
		2 ms	20	500	0.9912	0.9951	0.9968	0.9966	0.9952	0.9974	0.9957	0.9951	0.9967	0.9985
		3 ms	20	500	0.9438	0.9764	0.9847	0.9718	0.9651	0.9818	0.9783	0.9842	0.9853	0.9852
		5 ms	20	500	0.8919	0.9560	0.9678	0.9720	0.9570	0.9832	0.9328	0.9316	0.9559	0.9446
		2 ms	20	10,000	0.9971	0.9990	0.9997	0.9996	0.9997	0.9970	0.9995	0.9996	0.9998	0.9999
		3 ms	20	10,000	0.9970	0.9996	0.9977	0.9990	0.9971	0.9842	0.9978	0.9990	0.9984	0.9996
		5 ms	20	10,000	0.9951	0.9981	0.9968	0.9985	0.9956	0.9901	0.9908	0.9985	0.9962	0.9953

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยการสร้างแบบจำลองโครงข่าย ATM ที่ใช้การบริการแบบ ABR และการบริการแบบ UBR หรือการบริการแบบ ABR ที่มาทำงานร่วมกับบริการแบบ VBR และการบริการแบบ UBR โดยการนำอัลกอริทึมต่างๆมาใช้ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล ซึ่งสามารถสรุปการทำงานและผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองดังนี้

#### 6.1 สรุปลักษณะการทำงานของบริการแบบ UBR และการบริการแบบ ABR

การบริการแบบ UBR ไม่มีการควบคุมการไหลของข้อมูลดังนั้นทำให้การควบคุมการไหลของข้อมูลในการบริการแบบ UBR ต้องขึ้นกับขั้นนำส่งข้อมูลและเมื่อเกิดการทิ้งเซลล์ที่ชั้น ATM จะทำให้เกิดการใช้กลไกการควบคุมความคับคั่งของข้อมูลโดย TCP

เมื่อสวิตช์มีการจำกัดขนาดของบัฟเฟอร์จึงเกิดการทิ้งเซลล์ที่ระดับชั้น ATM ทำให้แพ็กเก็ตที่ระดับชั้น TCP ถูกทิ้งด้วย เมื่อเซลล์ถูกทิ้งทำให้ TCP ต้องส่งแพ็กเก็ตที่ถูกทิ้งไปใหม่เมื่อเกิดการหน่วงขึ้นทำให้ Throughput มีค่าต่ำ และค่า Fairness ในแต่ละการเชื่อมต่อไม่ดี

การที่ทำให้ TCP Throughput มีค่าสูงเมื่อใช้การบริการแบบ UBR จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อสวิตช์มีขนาดบัฟเฟอร์ที่เพียงพอที่จะทำให้ TCP ไม่มีการสูญหายแพ็กเก็ตหรือสูญหายน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อมีการจำกัดขนาดของบัฟเฟอร์ TCP Throughput และ Fairness บนการบริการแบบ UBR จะมีค่าลดลงแต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานได้โดยการปรับปรุงอัลกอริทึม ได้แก่ อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

TCP ที่ใช้การบริการแบบ UBR มีความต้องการบัฟเฟอร์เท่ากับผลรวมของ TCP receiver window sizes ในทุกๆการเชื่อมต่อ และเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญหายของเซลล์ UBR จะไม่ขึ้นกับแพ็กเก็ตเหล่านี้เช่น จำนวนการเชื่อมต่อ, RTT และรูปแบบของโครงข่ายเป็นต้น

ส่วนลักษณะการทำงานของ ABR จะต่างจาก UBR ตรงที่ การบริการแบบ ABR จะควบคุมการไหลของข้อมูลที่ระดับชั้น ATM พื้นฐานของการบริการแบบ ABR ก็คือ ABR สวิตช์จะส่ง RM เซลล์กลับมายังแหล่งข้อมูล (Source) ซึ่ง RM เซลล์จะแสดงค่าบ่อนกลับต่ำสุดจากสวิตช์ทุกตัวเมื่อแหล่งข้อมูลรับ RM เซลล์จากโครงข่าย ก็จะปรับอัตราการส่งตามค่าบ่อนกลับที่ได้รับมา

ดังนั้น Throughput จะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้การบริการแบบ ABR และ UBR เมื่อมีขนาดบัฟเฟอร์ที่สวิทช์เพียงพอ และไม่มีการสูญหายของเซลล์ในโครงข่าย ATM หรือเมื่อบัฟเฟอร์มีขนาดเล็ก แต่หากไม่มีการสูญหายของเซลล์ค่า Throughput ที่ได้ก็จะมีค่าสูง

## 6.2 สรุปผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง

แบบจำลองที่นำมาทดสอบได้แก่การบริการแบบ ABR, การบริการแบบ UBR, การบริการแบบ ABR ร่วมกับการบริการแบบ VBR และการบริการแบบ UBR ร่วมกับการบริการแบบ VBR สามารถสรุปผลการทดสอบแบบจำลองดังนี้

- ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR และทดสอบด้วยอัลกอริทึม ERICA<sup>+</sup> ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มขนาดของบัฟเฟอร์มากขึ้น Throughput มีค่าเท่าเดิมก็เพราะว่าไม่มีการสูญหายของเซลล์ในโครงข่าย ส่วนค่า Fairness มีค่าเท่ากับ 1 ในทุกแบบจำลองที่นำมาทดสอบ

- ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR และทดสอบด้วยอัลกอริทึม EPD และ EPD ที่ปรับปรุงใหม่ทั้งหมด พบว่าค่า Throughput และ Fairness มีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดของบัฟเฟอร์เพราะว่าเมื่อขนาดบัฟเฟอร์มีค่า 10,000 เซลล์ ทำให้เซลล์ถูกทิ้งลดลง โดยทำให้ระดับชั้นสื่อสาร TCP ทำการส่งข้อมูลช้าลง จึงเป็นผลทำให้มีการส่งข้อมูลจากต้นทางไปถึงปลายทางได้ดีกว่าการใช้ขนาดบัฟเฟอร์ 500 เซลล์ ส่วนการปรับปรุงอัลกอริทึมทำให้ค่า Throughput และ Fairness มีค่าสูงขึ้นเพราะว่าอัลกอริทึมที่ปรับปรุงใหม่จะมีวิธีการที่ทำให้เซลล์ไม่ถูกทิ้งทันทีโดยที่มีการคำนวณหาขนาดของบัฟเฟอร์อยู่ตลอดเวลาเพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับจำนวนเซลล์และจำนวนการเชื่อมต่อที่เข้ามาใน ATM สวิตช์ แล้วนำไปหาค่าเฉลี่ยของขนาดบัฟเฟอร์และนำค่านี้ไปใช้ในการคำนวณหาความน่าจะเป็นในการทิ้งเซลล์

- ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ ABR ร่วมกับการบริการแบบ VBR พบว่าเมื่อจำนวนสวิทช์มากขึ้น ค่าของ Throughput และ Fairness มีค่าต่ำลง และเมื่อขนาดบัฟเฟอร์ลดลงค่า Fairness ที่ใช้ 25 สวิทช์มีค่ามากกว่า 2 สวิทช์ แต่ค่า Throughput มีค่าน้อยกว่า ยกเว้น ON เท่ากับ 2 มิลลิวินาที Throughput มีค่ามากกว่า

- ผลการทดสอบแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ UBR ร่วมกับการบริการแบบ VBR พบว่าเมื่อจำนวนสวิทช์มากขึ้น Throughput มีค่าใกล้เคียงกัน และค่า Fairness ขึ้นอยู่กับอัลกอริทึมและ VBR ที่มีลักษณะ ON-OFF ซึ่งนำมาใช้ในการทดสอบ

จากการทดสอบแบบจำลองการบริการแบบ ABR มีความต้องการบัฟเฟอร์น้อยกว่า UBR กล่าวคือเมื่อขนาดบัฟเฟอร์ลดลงค่า Throughput มีค่าเหมือนกับขนาดบัฟเฟอร์มากขึ้น แต่การ

บริการแบบ UBR จะมีค่า Throughput ลดลง ส่วนค่า Fairness ของการบริการแบบ ABR จะมีค่าดีกว่า UBR สำหรับแบบจำลองที่ใช้การบริการแบบ VBR มาทำงานร่วมกับการบริการแบบ ABR และ UBR พบว่า ABR มีความต้องการบัฟเฟอร์มากกว่า UBR และเมื่อจำนวนสวิตช์มากขึ้นโครงข่ายที่ใช้การบริการแบบ ABR จะแย่มาก

### 6.3 สรุปข้อดีข้อเสียของการทดสอบแบบจำลองด้วยอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

อัลกอริทึมที่ปรับปรุงใหม่จะประกอบด้วย 3 อัลกอริทึมคือ 1. อัลกอริทึม EPD ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม RED 2. อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่ทำงานร่วมกับอัลกอริทึม RED 3. อัลกอริทึม EPD ปรับปรุงใหม่กับการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ โดยที่อัลกอริทึมมีข้อดีข้อเสียดังนี้

#### 6.3.1 ข้อดีของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

1. นอกจากตรวจสอบขนาดของบัฟเฟอร์แล้วยังตรวจสอบว่าเมื่อเซลล์ที่เข้ามายัง ATM สวิตช์ในระยะเวลาหนึ่งมีจำนวนการเข้าออกของเซลล์และจำนวนการเชื่อมต่อในขณะนั้นเท่าไรเป็นผลให้ไม่มีการทิ้งเซลล์ทันทีดังภาพประกอบ 5-11 (แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่โดยมีจำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์) เส้นกราฟที่เกิดจากแหล่งข้อมูลแต่ละตัวมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งหมายความว่ามีการจัดสรรแบนด์วิดท์ในแต่ละแหล่งข้อมูลดีจึงทำให้ค่า Fairness สูง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม EPD ดังภาพประกอบ 5-10 (แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ใช้อัลกอริทึม EPD โดยที่จำนวนแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์ 10,000 เซลล์ และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์) จะเห็นว่าแหล่งข้อมูลบางตัวมีค่า Throughput ลดลงประมาณ 1 เมกะบิตต่อวินาทีก่อนที่จะเข้าสู่สถานะอยู่ตัว เพราะว่าเซลล์ถูกทิ้งทันทีเมื่อเซลล์ที่เข้ามายัง ATM สวิตช์เกินค่าจุดเริ่มเปลี่ยนทำให้ระดับชั้นสื่อสาร TCP จะต้องลดค่า Throughput เป็นผลทำให้กราฟมีลักษณะแกว่งก่อนที่จะเข้าสู่สถานะอยู่ตัว

2. เมื่อผ่านขั้นตอนที่ 1 แล้วยังมีการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ที่คำนวณได้ล่าสุด(เกิดจากการรวมกันระหว่างช่วงที่มีการส่งเซลล์กับช่วงที่อยู่ในสถานะหยุดนิ่ง)รวมกับช่วงที่มีการส่งเซลล์อยู่ในปัจจุบันซึ่งเป็นผลทำให้ Fairness มีค่าสูงขึ้นดังภาพประกอบที่ 5-28 (แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 10 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 10,000 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ และ

การบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที) ส่วนภาพประกอบ 5-27 เป็นทดสอบแบบจำลองโดยใช้อัลกอริทึม EPD ค่า Fairness จะมีค่าน้อยกว่าการใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

3. ค่า Z ที่เหมาะสม (ขึ้นกับแบบจำลองที่นำมาทดสอบหรือลักษณะของการบริการแบบ VBR)ซึ่งจะทำให้ Throughput และ Fairness มีค่าสูงและมีค่าสูงกว่าการใช้อัลกอริทึม EPD ดังภาพประกอบ 5-30 (แสดงค่า Throughput และ Fairness เมื่อแบบจำลองมีการบริการแบบ UBR ทำงานร่วมกับ VBR โดยใช้อัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งข้อมูลเท่ากับ 20 การเชื่อมต่อ, ขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์, จำนวนสวิตช์เท่ากับ 25 สวิตช์ และการบริการแบบ VBR มีลักษณะของ ON เท่ากับ 5 มิลลิวินาที และ OFF เท่ากับ 5 มิลลิวินาที) แสดงค่า Throughput และ Fairness มีค่าสูงกว่าภาพประกอบ 5-29 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบจำลองที่ใช้ อัลกอริทึม EPD

### 6.3.2 ข้อเสียของอัลกอริทึม EPD ที่ปรับปรุงใหม่

1. ต้องใช้ค่า Z ที่เหมาะสมในการทดสอบแบบจำลองในแต่ละ Configuration ดังแสดงในหัวข้อ 4.2.2 ของบทที่ 4 ซึ่งค่า Z จะมีค่าที่เหมาะสมเพียงค่าเดียว (เฉพาะที่ใช้ลักษณะของการบริการแบบ VBR) ถ้าหากมากหรือน้อยเกินไปจะทำให้ Throughput มีค่าลดลง

2. การกำหนดค่า  $W_q$  ถ้าหากค่านี้ต่ำมากจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์อย่างช้าๆ มีผลทำให้ไม่สามารถตรวจสอบความคับคั่งในช่วงแรกได้เพราะการหาค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์จะมีลักษณะการทำงานแบบ Low-pass filter จึงทำให้เมื่อค่า  $W_q$  ต่ำมากการหาค่าเฉลี่ยในช่วงแรกจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จึงแก้ปัญหาในการกำหนดค่าของ  $\max_n$  และ  $\min_n$  โดยที่ค่า  $\max_n$  ต้องมีค่ามากกว่าค่า  $\min_n$  2 เท่า เพราะว่าค่าของ  $\max_n - \min_n$  ถ้าหากมีค่ามากกว่า การเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยของบัฟเฟอร์ในหนึ่งรอบเวลาจะทำให้เกิดประสิทธิภาพต่อการทำงานที่ดีที่สุด

## 6.4 บทวิจารณ์และข้อเสนอแนะ

### 6.4.1 ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับตัว Simulator

1. ซอฟต์แวร์ของ NIST จะต้องทำการทดสอบแบบจำลองในระบบปฏิบัติการลินุกซ์ ซึ่งในส่วนนี้จะต้องใช้โหมดของระดับความละเอียดของจอภาพน้อยมากจึงสามารถทดสอบแบบจำลองที่สร้างไว้ได้ซึ่งในส่วนของงานวิจัยนี้ได้ใช้ Red Hat version 6.0 และจะต้องทดสอบแบบจำลองในโหมดของ LessTif โปรแกรมนี้จึงจะสามารถทำงานได้

2. หน่วยประมวลผล (CPU) และหน่วยความจำ (RAM) ที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองจะต้องมีความเร็ว 300 MHz ขึ้นไป และหน่วยความจำประมาณ 64 เมกะไบต์ ถ้าหากมีค่าน้อยกว่านี้จะทำให้ใช้เวลาในการลงโปรแกรมและทดสอบแบบจำลองช้าลง

#### 6.4.2 ในส่วนที่เกี่ยวกับงานที่ทำ

1. การสร้างแบบจำลองโครงข่าย ATM ขนาดใหญ่กล่าวคือการสร้างแบบจำลองที่มีขนาดสวิตช์จำนวนมากโดยใช้ซอฟต์แวร์ของ NIST จะเกิดปัญหาคือไม่สามารถทำการทดสอบแบบจำลองที่สร้างไว้ได้จึงแก้ปัญหาโดยการให้สวิตช์แต่ละตัวมีแหล่งข้อมูลทั้งต้นทางและปลายทางแต่จะไม่ใส่ค่าพารามิเตอร์ในแหล่งข้อมูลเหล่านั้น เมื่อทำด้วยวิธีดังกล่าวสามารถทำการทดสอบแบบจำลองได้ดังนั้นก็จะมีข้อเสนอแนะในการปรับปรุงโดยการพัฒนาโปรแกรมในส่วนของสวิตช์ให้สวิตช์หนึ่งตัวสามารถแทนสวิตช์ได้หลายตัว

2. การทดสอบแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 2 สวิตช์จะใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 2 ชั่วโมง ส่วนแบบจำลองที่ใช้สวิตช์ 25 สวิตช์จะใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 7 ชั่วโมง ดังนั้นถ้าหากโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้นเวลาที่ใช้ในการทดสอบก็จะต้องมากขึ้น

3. การปรับปรุงอัลกอริทึมที่นำมาทดสอบจะต้องเข้าใจหลักการทำงาน และการเขียนโปรแกรมของอัลกอริทึมที่มีอยู่ก่อนแล้ว ซึ่งในส่วนของซอฟต์แวร์นี้ใช้ภาษา C ในการเขียนโปรแกรม

4. วิธีการทดสอบหาจำนวนแพ็กเก็ตที่ส่งและการหาค่า Throughput สูงสุด ยกตัวอย่างผลการทดลองที่ใช้การบริการแบบ ABR มีขนาดบัฟเฟอร์เท่ากับ 500 เซลล์และมีจำนวนสวิตช์เท่ากับ 2 สวิตช์ โดยการแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 กรณี

4.1 ทดสอบหาจำนวนแพ็กเก็ตที่ส่ง(จำนวนแพ็กเก็ตที่ส่งเท่ากับ 60 เมกะไบต์) ในกรณีนี้ค่า Throughput ได้มาจากการทดสอบแบบจำลอง และกำหนดเวลาที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองเท่ากับ 25 วินาที จุดประสงค์ในการแสดงวิธีการหาจำนวนแพ็กเก็ตก็เพื่อตรวจสอบว่าจำนวนแพ็กเก็ตที่ส่งเท่ากับ 60 เมกะไบต์เมื่อทำการทดสอบแบบจำลองแล้ว จำนวนของแพ็กเก็ตที่ส่งจะมีค่าเท่ากับเท่าไร เมื่อกำหนดเวลาการส่งข้อมูลเท่ากับ 25 วินาที จะวิเคราะห์จากสมการ

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Amount of Data Sent}}{\text{Time}} \quad (1)$$

ค่า Throughput ที่ได้มาจากการทดสอบแบบจำลองเท่ากับ 12.5 เมกะบิตต่อวินาทีต่อหนึ่งการเชื่อมต่อ และใช้เวลาในการทดสอบแบบจำลองเท่ากับ 25 วินาทีนำค่าเหล่านี้ไปแทนในสมการที่ 1 จะได้



$$\begin{aligned}
 \text{Amount of Data Sent} &= \text{Throughput} \times \text{Time} \\
 &= 12.5 \text{ Mbps} \times 25 \text{ s} \\
 &= \frac{12.5}{8} \text{ Mbyte} \times 25 \\
 &\cong 39 \text{ Mbyte}
 \end{aligned}$$

จากการคำนวณแสดงว่ามีแพ็กเก็ตบางส่วนยังส่งไม่ถึงปลายทางประมาณ 21 เมกะไบต์ และทำการทดสอบต่อไปเมื่อใช้เวลาในการทดสอบมากพอที่จะส่งแพ็กเก็ตไปถึงปลายทางได้ทั้งหมด

4.2 กำหนดเวลาการทดสอบให้มากกว่าจำนวนแพ็กเก็ตที่ส่ง(60 เมกะไบต์)และได้ใช้เวลาเท่ากับ 200 วินาที ซึ่งมากพอที่จะส่งแพ็กเก็ตทั้งหมดได้ จุดประสงค์เพื่อต้องการตรวจสอบค่า Throughput สูงสุด

$$\begin{aligned}
 \text{Amount of Data Sent} &= \text{Throughput} \times \text{Time} \\
 &= 12.6 \text{ Mbps} \times 38 \text{ s} \\
 &\cong 60 \text{ MByte}
 \end{aligned}$$

ค่า Throughput สูงสุดเท่ากับ 12.6 เมกะบิตต่อวินาทีโดยใช้เวลาในการทดสอบเท่ากับ 38 วินาที หรือคำนวณค่า Throughput สูงสุดจากสมการ

$$\begin{aligned}
 \text{Max Throughput} &= \frac{\text{Amount of Data Sent}}{\text{Processing Delay}} \\
 &= \frac{9180 \text{ Byte} \times 8}{5.8 \text{ ms}} \\
 &\cong 12.6 \text{ Mbps}
 \end{aligned}$$

โดยที่ Processing Delay มีค่าเท่ากับ  $\text{interval} \times \frac{\text{MSS}}{\text{ATM cells}}$ ;  $\text{interval} = \frac{53 \times 8}{14 \text{ Mbps}}$

ดังนั้น Processing Delay มีค่าเท่ากับ  $0.03029 \text{ ms} \times \frac{9180}{48}$  หรือประมาณ 5.8 มิลลิวินาที

ดังนี้

5. สรุปค่า Max Throughput ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนที่อยู่ในบทที่ 5 ได้

ตารางที่ 6-1 สรุปค่า Max Throughput

ลักษณะของการบริการ	จำนวนแหล่งข้อมูล	Max Throughput (Mbps)	
ไม่มี VBR : ON-OFF	10	12.60	
	20	6.34	
VBR : ON-OFF	10	ON=2 ms,OFF=8ms	12.22
		ON=3 ms,OFF=7ms	11.32
		ON=5 ms,OFF=5ms	9.51
VBR : ON-OFF	20	ON=2 ms,OFF=8ms	6.11
		ON=3 ms,OFF=7ms	5.66
		ON=5 ms,OFF=5ms	4.76

6. จากการทดสอบแบบจำลองของโครงข่าย ATM จึงมีข้อเสนอแนะวิธีการพัฒนา และปรับปรุงซอฟต์แวร์ของ NIST กล่าวคือพัฒนาการทำงานให้กับการบริการที่ใช้ใน ATM หรือสามารถส่งข้อมูลที่เป็นเสียงและทำงานได้ในระบบชั้น AAL2 ได้ ปรับปรุงการทำงานของแหล่งข้อมูลในแต่ละตัวให้สามารถกำหนดจำนวนของแหล่งข้อมูลได้ตามที่ต้องการ และปรับปรุงในส่วนของอัลกอริทึมที่ใช้ในการควบคุมความคับคั่งของข้อมูล

## บรรณานุกรม

- Ait-Hellal, O. and Altman, E. 1997. "Analysis of TCP Vegas and TCP Reno Communications", IEEE International Conference, 1(1997), 495 –499.
- Andrew, S Tanenbaum. 1996. "Computer Networks", Prentice Hall PTR, New Jersey, Third Edition(1996).
- Ano, S.; Hasegawa, T. and Kato, T. 1999. "A study on accommodation of TCP/IP best-effort traffic to wide area ATM network with VBR service category using selective cell discard ATM Workshop", IEEE Proceedings, (1999), 535 –540.
- Ano, S., et al. 1998. "A study on accommodation of TCP/IP traffic using window scale option to international ATM network with VBR service category ATM", 1<sup>st</sup> ICATM-98 IEEE International Conference on, (1998), 484-491.
- ATM Forum. 1996. "The ATM Forum Traffic Management Specification Version 4.0", <ftp://ftp.atmforum.com/pub/approved-specs/af-tm-0056.000.ps>
- Brian, Buchanan. 1997. "TCP/IP Header Compression over ATM", <http://hegel.ittc.ukans.edu/projects/header-comp/index.html>
- Chien, Fang. 1997. "TCP Performance in ATM Network: ABR Parameter Tuning and ABR/UBR Comparisons", Proceedings IEEE SICON, (April 1997), 1-23.
- Georgios, Y., et al. 1998."Simulation and Measurement of TCP/IP over ATM Wide Area Networks",IEICE TRANS. COMMUN, (February 1998), 307-314.

- Hasegawa, T., et al. 1998. "Protocol architecture of high speed TCP/IP service over international ATM networks", ATM Workshop Proceedings, (1998), 159-168.
- Hasegawa, G., Ohsaki, H. and Miyahara, H. 1997. "Performance Improvement of TCP over EFCI-Based ABR Service Class by Tuning of Congestion Control Parameters", IEEE TRAN. Communication, 10 (October 1997), 1444-1453.
- Hoang, D. B. and Yu, Q. 1999. "Performance of the Fair Intelligent Congestion Control for TCP Application over ATM Networks: A Simulation Analysis", IEEE Communications Magazine, (January 1999), 390-395.
- Johansson, P.; Wedlund, E. and Karlsson, J.M. 1997. "Interaction between TCP flow control and ABR rate control", IEEE ATM Workshop Proceedings, (1997), 455-464.
- Kai-Yeung, S. and Hong-Yi, T. 1996. "Performance of TCP Over ATM with Time-Varying Available bandwidth", Computer Communication, 19 (1996), 927-936.
- Kalyanaraman, S., et al. 1996. "Performance of TCP/IP over ABR service on ATM networks", Global Telecommunications Conference, 1 (1996), 468-475
- Kalyanaraman, S.; Jain, R. and Fahmy, S. 1998. "Performance and buffering requirements of Internet protocols over ATM ABR and UBR services", IEEE Communications Magazine, 36 (6 June 1998), 152-157.
- Kalyanaraman, S., et al. 1999. "The ERICA Switch Algorithm for ABR Traffic Management in ATM Networks", IEEE Transactions on Networking, (1999).  
<http://www.cis.ohio-state.edu/jain/papers/erica.htm>

- Liping An; Ansari, N. and Arulambalam, A. 1997. "TCP/IP traffic over ATM networks with ABR flow and Congestion Control", Global Telecommunications Conference, 3 (1997), 1845-1849.
- Masatoshi, K., Mika, I. and Arata, K. 1998. "Dynamics of TCP flow control over High Speed ATM Networks", IEEE TRANS. Communication. (1998).
- NIST.1999."NIST ATM simulator",  
[http://www.hsnt.nist.gov/misc/hsni/prd\\_atm-sim.html](http://www.hsnt.nist.gov/misc/hsni/prd_atm-sim.html)
- Romanow, A. and Floyd ,S. 1995. "Dynamics of TCP Traffic over ATM Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 13 (May 1995), 633-641.
- Rohit, Goyal., et al. 1997."Improving Performance of TCP over ATM-UBR service"  
<http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/papers/icc97.ps>
- Sinchai Kamolphiwong. 1998. "Survey Flow Control in ATM Networks: a survey",  
Computer Communication 21. (1998), 951-969.
- Xiangrong, Cai.1996. "The Performance of over ATM ABR and UBR Service",  
<http://www.cis.ohio-state.edu/~jain/papers>.
- Yan-Jun Li and Elby, S. 1996. "TCP/IP performance and behavior over an ATM network",  
Global Telecommunications Conference, (1996), 1-9.

## ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก วิธีการติดตั้งการทำงานของ Simulator NIST

การทำงานของ NIST จะต้องใช้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ในการติดตั้งโปรแกรม และจะต้องทำงานในโหมดของความละเอียดของจอภาพต่ำ ซึ่งวิธีการติดตั้งการทำงานจะประกอบด้วย

1. ขยายไฟล์ sim4.1.tar.Z ด้วยคำสั่ง `zcat sim4.1.tar.Z |tar -xvf-`
2. ทำการ Setup โปรแกรม sim4.1 โดยการเข้าไปในไดเรกทอรีของ sim4.1 แล้วพิมพ์คำสั่ง `./configure`
3. จากนั้นตัวโปรแกรมก็จะถามว่าต้องการย้ายไดเรกทอรีที่เก็บไฟล์เกี่ยวกับองค์ประกอบ (Components) ต่างๆหรือไม่ ถ้าหากต้องการจะต้องพิมพ์คำสั่ง `/root/sim4.1/...` ในส่วนของช่องว่างจะต้องตั้งชื่อซึ่งจะเป็นชื่ออะไรก็ได้
4. ตัวโปรแกรมก็จะสร้างไฟล์ที่ใช้สำหรับคอมไพล์ (Compile) โปรแกรม ซึ่งเมื่อผ่านขั้นตอนที่ 3 ตัวโปรแกรมก็จะถามว่าให้เก็บไฟล์คอมไพล์ไปไว้ที่ไหน และจะต้องพิมพ์ว่า `/root/sim4.1/...` ในส่วนของช่องว่างจะต้องตั้งชื่อขึ้นมาใหม่ หลังจากลงโปรแกรมเสร็จแล้วไฟล์คอมไพล์ก็จะอยู่ในชื่อที่ตั้งขึ้นมาใหม่นี้
5. เข้าไปในไดเรกทอรีตามข้อ 4 แล้วพิมพ์คำว่า `./sim`
6. สามารถสร้างแบบจำลองตามที่ได้ออกแบบไว้

ภาคผนวก ข Parameter Information

ในส่วนของการสร้างแบบจำลองโครงข่าย ATM ต้องประกอบด้วย ATM สวิตช์, BTE, ATM Applications และ Link Components แบบต่างๆ ซึ่งจะยกตัวอย่างพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับในงานวิจัยนี้ได้แก่

1. พารามิเตอร์ในส่วนของATMสวิตช์

A.1.1 Generic Switches

	Name:
	Delay to process a cell (usec): 0
	Slot time (Mbits/sec): 0
	Output queue size (cells, -1=inf): 0
	High Threshold, Q cong. flag (cells): 0
	Low Threshold, Q cong. flag (cells): 0
	Logging every (n ticks) (e.g., 1, 100): 0
	Cells received: 0
	Percent cell drop: 0
	Cells in VBR Q to link n: 0
	Cells dropped in VBR Q to link n: 0
	Cells in ABR Q to link n: 0
	Cells dropped in ABR Q to link n: 0
	Congestion for link n: FALSE

Delay to process a cell. An increment of time after the arrival of a cell at the switch before the switch places the cell on the outgoing link.

Slot time. The rate at which cells are switched from an input port to an output port. The program calculates the cell slot time from the bit rate entered. The actual switching of a cell from input port to output port occurs at the beginning of a slot period.

Output queue size. Available buffer space for a queue; the same value is used for every queue in the switch. When a cell is ready for transmission but a slot on that link is not available it waits in a queue at that port.

High Threshold, Q congestion flag. If the number of cells in any queue exceeds this value the congestion flag is set.

Low Threshold, Q congestion flag. The congestion flag is cleared when the number of cells in all queues fall below this value.

Logging every n ticks. If n is set to 1, data will be logged for a parameter anytime there is a change in its value. Potentially, this could occur at every tick. Since this may result in an extremely large data file, it may be desirable to set n to a larger number. For example, if n = 100, logging will occur only if a change occurred and 100 ticks had gone by since the last logging activity.

Cells Received. Total number of cells received by the switch.

Percent cell drop. Number of cells dropped by the switch as a percentage of the total cells received.

Cells in xBR Q to link n. Cells awaiting transmission in a given priority queue. There are two types of queues for each port - a CBR/VBR queue and an ABR queue. Cells in the CBR/VBR queue have top priority; a cell from the ABR queue will be sent only if the CBR/VBR queue is empty.

Cells dropped in xBR Q to link n. Cells dropped at a port when a queue exceeds its maximum size.

Congestion for link n. There is one congestion flag for each port. The flag is set when a queue exceeds its High Threshold value, cleared when both queues fall below the Low Threshold.

## A.1.2 Rate-Based Switches

	Name:
	Delay to process a cell (usec): 0
	Slot time (Mbits/sec): 0
	Output queue size (cells, -1=inf): 0
	High Threshold, Q cong. flag (cells): 5
	Low Threshold, Q cong. flag (cells): 5
	buf mgmtEPD(0),FBA(1),RED(2),FQ(3)
	EPD Threshold (Cells): 0
	MIN threshold for RED: 0
	Linear scale factor Z for FBA: 0
	Logging every (n ticks) (e.g., 1, 100): 0
	1 (EFICI), 2 (NIST ER), 3 (EPRCA) 4 (ERICA) 5(PHANTOM) 6(DERA): 2
	MACR Additive Increase Rate (Mbits/s):
	Target Rate (Mbits/s): 142
	Explicit Reduction Factor (ERF): 0.9375
	Measurement Interval in cells (N): 100
	Congestion Tolerance in cells (tau): 0
	VC Separator: 0.875
	Average Factor (AV): 0.0625
	DQT (Cells): 2000
	Major Reduction Factor (MRF): 0.95
	Down Pressure Factor (DPF): 0.875
	Congestion (True/False): 0
	% cell drop

Buffer Management: EPD (0), FBA (1), RED (2), FO (3). The buffer management algorithm for the UBR service:

0-EPD algorithm

1-Fair Buffer Allocation algorithm (described in the paper by Goyal and al.<sup>3</sup>).

2-Random Early Detection (described in the paper by Elloumi and Affifi<sup>4</sup>).

3-Fair Queuing Algorithm.

EPD Threshold (Cells). EPD algorithm threshold used for cell discarding. If the value of the threshold is equal to the output buffer size, the EPD discard algorithm is not triggered.

MIN threshold for RED. Minimum threshold for RED algorithm. When the average queue size in the output buffer reaches this value, packets are randomly discarded according to the RED algorithm.

Linear scale factor Z for FBA. Linear scale factor for RED algorithm. See reference to FBA given above for more details.

1 (EFICI), 2 (NIST ER), 3 (EPRCA), 4 (ERICA) 5(PHANTOM) 6(DERA). The switch ABR mechanism.

1-EFICI: the EFICI bit of ATM cells is set to 1 when the ABR output queue is congested (congestion flag set).

2-NIST ER: switch algorithm proposed by Golmie et al.<sup>5</sup>.

3-EPRCA: Enhanced Proportional Rate-Control Algorithm proposed by Roberts.<sup>6</sup>

4- ERICA: Explicit Rate Indication for Congestion Avoidance<sup>7</sup> and <sup>8</sup>.

5- PHANTOM<sup>9</sup>

<sup>3</sup> Goyal, R. et al., "UBR+: Improving performance of TCP over ATM UBR service", Proc. of IEEE ICC'97, Montreal, Canada.

<sup>4</sup> Elloumi, O., Affifi, H., "Red Algorithm in ATM Networks", Proc. of IEEE ATM'97, Lisboa, Portugal.

<sup>5</sup> Golmie, N., Chang, Y., Su, D., "NIST ER Switch Mechanism (An Example)", ATM Forum'95-695.

<sup>6</sup> Roberts, L., "Enhanced PRCA (Proportional Rate-control Algorithm)", ATM Forum'94-0735R1.

<sup>7</sup> Kalyanaraman, S. et al., "The ERICA Switch Algorithm for ABR Traffic Management in ATM Networks" Submitted to IEEE/ACM Transactions and Networking.

<sup>8</sup> Jain, R. et al., "ERICA Switch Algorithm: A complete description", ATM Forum'96-1172, August 1996.



	HFC Backward RM Cells(True/False): 0
	Max BRM rate (cells/s): 0
	Delta [0.05...1]: 0.1
	T0 (in usecs): 1500
	Factor a: 1.15
	Factor b: 1
	Queue Drain Limit Factor (QDLF): 0.5
	Decay Factor: 0.9
	Alpha: 0.8
	Averaging Interval in usecs (AI): 5000
	Phantom Tau: 500
	Phantom Alpha: 0.0625
	Beta: 0.125
	Decreasing Factor: 0.75
	H: 0.0625
	Utilization Factor: 1
	Initial Portion: 0.1
	Cells in VBR Q to link: 0
	Cells dropped in VBR Q to link: 0
	Cells in UBR Q to link: 0
	Cells dropped in UBR Q to link: 0
	Cells in ABR Q to link: 0
	Cells dropped in ABR Q to link: 0
	ERS for Q to link: 0
	MACR rate for Q to link: 0
	Phantom MACR rate for Q to link: 0
	Delta for Q to link: 0
	Alpha Inc for Q to link: 0
	Alpha Dec for Q to link: 0
	Fast MACR rate for Q to link: 0

#### 6- DERA: Distributed Explicit Rate Allocation<sup>10</sup>

The pseudocodes of the NIST ER and EPRCA schemes can be found at the end of this subsection.

#### MACR Additive Increase Rate (Mbits/s).

This parameter is used by the NIST ER algorithm to control the increase of the MACR (see pseudocode for more details).

Target Rate (Mbits/s). Used only by the NIST ER algorithm. Usually set to 95 % of the rate of the outgoing link, it is used for load monitoring. When the ABR input rate becomes larger than the Target Rate, the link is considered overloaded.

Explicit Reduction Factor (ERF). Used only by the EPRCA algorithm. It controls the proportion of the MACR which may be set in the ER field of backward RM when the link is congested (normal congestion).

#### Measurement Interval in Cells (N).

Measurement Interval of the NIST ER algorithm between each estimation of the input rate and update of the state of the output queue.

Congestion tolerance in cells (tau). Used only by NIST ER algorithm. The state of the output queue is set to the congested state if more than <tau> cells arrive during one measurement interval.

VC Separator. This factor is used for the EPRCA algorithm to trigger the calculation of MACR when the link is not congested.

Average Factor (AV). Average factor used in the NIST ER and EPRCA algorithms in the calculation of the Mean Allowed Cell Rate (MACR) - the exponential weighted average of the CCR values read from each forward RM cells.

DOT (Cells). Very Congested Queue Threshold used in EPRCA.

<sup>9</sup> Afek, Y. et al., "Phantom: A simple and Effective Flow Control Scheme", Proceeding of SIGCOMM '96 pp. 169-182, California, August 1996.

<sup>10</sup> Charny, A. and Ramakrishnan, K.K., "Time Scale Analysis of Explicit Rate Allocation in ATM Networks", Proceedings of IEEE INFOCOM '96, Vol 3 pp. 1182-1189, San Francisco, March 1996.

	ABR Traffic for Q to link: 0
	ABR/VBR Traffic for Q to link: 0
	VBR Traffic for Q to link: 0
	ERR for Q to link: 0
	Sigma Neg for Q to link: 0
	Sigma Pos for Q to link: 0
	Ratio for Q to link: 0

**Major Reduction Factor (MRF).** Factor used by NIST ER and EPRCA to reduce the explicit rate if the link is congested (NIST algorithm) or very congested (EPRCA).

**Down Pressure Factor (DPF).** Factor used in EPRCA to trigger the reduction of the explicit rate under normal congestion, i.e. when the output queue size is below DQT but above the High Threshold.

**Congestion (True/False).** Indicate the congestion status of the switch.

**% cell drop.** Number of cells dropped by the switch as a percentage of the total cells received.

**HFC Backward RM Cells (True/False).** This parameter indicates if backward RM cells are generated by the switch. This may occur when the neighboring component of the switch is an HFC<sup>11</sup>

**Max BRM rate (cells/sec).** Maximum rate at which backward RM cells may be generated.

**Delta [0.05...1].**  $\delta$  parameter of the ERICA algorithm.  $\delta$  is a small fraction, and it determines the use of the basic ERICA algorithm and allocation scheme or the attempt to make all the rate allocations equal:

$$\begin{array}{ll} \text{If } z > 1 + \delta & \text{ER} = \text{Max}(\text{FairShare}, \text{VCShare}) \quad (\text{basic ERICA}) \\ \text{If } z \leq 1 + \delta & \text{ER} = \text{Max}(\text{FairShare}, \text{VCShare}, \text{MaxAllocPrevious}) \end{array}$$

**T0 (in usecs).** T0 parameter used in ERICA, defined as the threshold value which limit the queuing delay ( $T_q$ ).

**Factor a and b.** a and b are the intercepts of the a-hyperbola and b-hyperbola. b determines how much excess capacity would be allocated when the queuing delay is zero. Larger values of a and b make the scheme very sensitive to the queuing delay, whereas, smaller values increase the time required to reach the desired operating point.

**Queue Drain Limit Factor (ODLF).** This parameter ensure that there is enough drain capacity to drain out the transient queues.

**Decay Factor.** The Decay Factor used in decaying the contribution of each VC is a value between 0 and 1. The decay Factor is usually close to 1 (typ. 0.9).

**Alpha. [0..1]** This parameter is used in the ERICA algorithm to regulate the average ABR capacity.

**Averaging Interval in usecs (AI).** If a VC is seen during an interval, its activity level is reset to one (and not decayed). The averaging interval must be set to be sufficiently long to avoid the problem of underestimating the number of active VCs.

**Phantom Tau.** The amount of residual bandwidth,  $\Delta$ , is measured in fixed time intervals of length  $\tau$  (cell time)

**Phantom Alpha. [0..1]** used in the calculation of the MACR (see Decreasing Factor).

<sup>11</sup> Golnic, N., Corner, M., Liebeherr, J., Su, D., "Improving the Effectiveness of ATM Traffic Control over Hybrid Fiber-Coax Networks", Proc. of IEEE Globecom 1997.

Beta, [0..1] Similar to  $\alpha$ , but larger than  $\alpha$ . The  $\beta$  parameter is used in the calculation of the Fast MACR.

Decreasing Factor, [0..1] Prevent MACR from dropping sharply. The MACR has to be computed as follow:

$$\text{MACR} = \text{Max}(\text{MACR} * (1 - \alpha) + \Delta * \alpha, \text{MACR} * \text{Decreasing Factor})$$

H, [0..1] used in the calculation of  $\sigma$  as follow:  $\sigma = \sigma * (1 - H) + |\text{ERR}| * h$

Utilization Factor. Restrict the sessions by this factor times MACR. If the utilization factor is set to 3, and 3 sessions are sharing a 100Mbs link, then each session is allocated 30Mbs, and the Phantom session gets 10Mbs.

Initial Portion.

Cells in xBR O to link n. Cells awaiting transmission in a given priority queue. There are two types of queues for each port - a CBR/VBR queue and an ABR queue. Cells in the CBR/VBR queue have top priority; a cell from the ABR queue will be sent only if the CBR/VBR queue is empty.

Cells dropped in xBR O to link n. Cells dropped at a port when a queue exceeds its maximum size.

ERS for O to linkn. The value written in the ER field of returning RM cells for a given port. This output parameter is used for the NIST ER algorithm only.

MACR rate for O to linkn. The current value of the MACR (Mean Allowed Cell Rate) for a given port. This output parameter is used for both NIST ER and EPRCA algorithms.

Phantom MACR rate for O to linkn. The current value of the MACR (Mean Allowed Cell Rate) for a given port. This output parameter is used by the Phantom algorithm only.

Delta for O to linkn. Delta as been defined to be the unused link capacity of the link (in Phantom algorithm only).

Alpha Inc for O to linkn. Used in the Phantom algorithm instead of  $\alpha$  when  $\Delta > \text{Phantom MACR}$ .

Alpha Dec for O to linkn. Used in the Phantom algorithm instead of  $\alpha$  when  $\Delta \leq \text{Phantom MACR}$ .

Fast MACR rate for O to linkn. Used in the Phantom algorithm to monitor the bandwidth more accurately than the MACR. It is computed in the same way as MACR but use the  $\beta$  factor which is larger than  $\alpha$ :

$$\text{Fast MACR} = \text{Fast MACR} * (1 - \beta) + \Delta * \beta$$

xBR Traffic for O to linkn. Current traffic of the queue. The ABR/VBR traffic is the sum of the ABR and the VBR traffic.

ERR for O to linkn. The standard deviation is approximate by the mean deviation as  $\text{ERR} = \text{MACR} - \Delta$  in the Phantom algorithm.

Sigma Neg for O to linkn. Used in the Phantom algorithm instead of  $\sigma$  when  $\Delta \geq \text{Phantom MACR}$ .

Sigma Pos for O to linkn. Used in the Phantom algorithm instead of  $\sigma$  when  $\Delta \leq \text{Phantom MACR}$ .

Ratio for O to linkn. This ratio can be computed from the value of  $\sigma$  as follow

$\sigma \leq \text{MACR}$	Ratio = 1
$\text{MACR} < \sigma \leq 2 * \text{MACR}$	Ratio = 1/2
$2 * \text{MACR} < \sigma \leq 4 * \text{MACR}$	Ratio = 1/4
$4 * \text{MACR} < \sigma \leq 8 * \text{MACR}$	Ratio = 1/8
$8 * \text{MACR} < \sigma$	Ratio = 1/16

## 2. พารามิเตอร์ในส่วนของ BTE

### A.2.1 Generic B-TE

Unlike a switch, there can be only one physical link attached to a B-TE component. Cells received from the Application side (there may be multiple Applications) are queued in one of two priority queues if no link slot is available for transmission. If either queue exceeds its size limit cells will be dropped.

	Name:
	Max. Output Queue Size (-1=inf): 0
	Logging every (n ticks) (e.g. 1, 100): 0
	Cells Received: 0
	Cells in VBR Q to link n: 0
	Cell Dropped in VBR Q to link n: 0
	Cells in ABR Q to link n: 0
	Cell Dropped in ABR Q to link n: 0

Maximum Output Queue Size. Available buffer space for each type of queue.

Logging every n ticks. If n is set to 1, data will be logged for a parameter anytime there is a change in its value. Potentially, this could occur at every tick. Since this may result in an extremely large data file, it may be desirable to set n to a larger number. For example, if n = 100, logging will occur only if a change occurred and 100 ticks had gone by since the last logging activity.

Cells Received. Total number of cells received by the B-TE.

Cells in xBR Q to link n. Cells awaiting transmission in a given priority queue. There are two types of queues - a CBR/VBR queue and an ABR queue. Cells in the CBR/VBR queue have top priority; a cell from the ABR queue will be sent only if the CBR/VBR queue is empty.

Cells dropped in xBR Q to link n. Cells dropped at the network port when a queue exceeds its maximum size.

## A.2.2 Rate-Based Broadband Terminal Equipment (RB-B-TE)

	Name:
	Max. Output Queue Size (-1=inf): 0
	Max Input Queue Size (-1=inf): 0
	Cells Received: 0
	Logging every (ticks)(e.g. 1, 100): 0
	Stop sending at: 0
	Cells in xBR Q to link n: 0
	Cells dropped in xBR Q to link n: 0
	Peak Cell Rate of ABR1: 149.76
	Nrm of ABR1: 32
	ICR of ABR1: 7.49
	MCR of ABR1: 1.49
	RIF of ABR1: 0.0625
	RDF of ABR1: 0.0625
	CRM (Cells) of ABR1: 32
	CDF of ABR1: 0.0625
	MRM of ABR1: 2
	TRM (in us) of ABR1: 100000
	TCR (in Mbit/s) of ABR1: 0.00424
	ADTF (in usecs) of ABR1: 500000
	ACR (in Mbit/s) for ABR ABR1:
	Received count (in cells) for ABR1:
	Cells Dropped ABR Input Q from ABR 1:
	Cells in ABR Input Q from ABR 1:

**Maximum Output Queue Size.** Available buffer space for each type of queue. There is one output queue for class of service (CBR/VBR, ABR, UBR). There is one Input Queue for each ABR ATM application, and it is used to store incoming ABR cells. The ABR cells move from their Input Queue to the ABR Output Queue at their ACR rate.

**Cells Received.** Total number of cells received by the B-TE.

**Logging every n ticks.** If n is set to 1, data will be logged for a parameter anytime there is a change in its value. Potentially, this could occur at every tick. Since this may result in an extremely large data file, it may be desirable to set n to a larger number. For example, if n = 100, logging will occur only if a change occurred and 100 ticks had gone by since the last logging activity.

**Stop sending at.** Time (in usecs) at which the BTE stops forwarding cell to the outgoing ATM link.

**Cells in xBR Q to link n.** Cells awaiting transmission in a given output priority queue. There are three types of queues - a CBR/VBR queue, an ABR queue and a UBR queue. Cells in the CBR/VBR queue have top priority; a cell from the ABR queue will be sent only if the CBR/VBR queue is empty, and a cell from the UBR queue will be sent only if the ABR queue is empty.

**Cells dropped in xBR Q to link n.** Cells dropped at the network port when a queue exceeds its maximum size.

**Peak Cell Rate.** Maximum allowed cell rate. This value should be entered in Mbits/s.

**Nrm.** Number of data cells between each RM cell.

**ICR (Initial Cell Rate).** Rate (in Mbits/s) at which the source should send initially and after an idle period.

**MCR (Minimum Cell Rate).** Minimum allowed cell rate (in Mbits/s).

**RIF (Rate Increase Factor).** Proportion of the PCR that may be added to the ACR when an RM cell is received with congestion indication bit CI = 0.

**RDF (Rate Decrease Factor).** Proportion by which the ACR may be reduced when an RM cell is received with congestion indication bit CI = 1.

**CRM (Missing RM-cell count).** Threshold on the number of forward RM cells sent in the absence of backward RM cells. When the threshold is reached, the ACR is decreased (see CDF factor). CRM should take into account the round-trip delay of the flow control loop.

**CDF (Cutoff Decrease Factor).** Factor used to decrease the ACR when more than CRM RM cells have been forwarded in the absence of backward RM cells.

**MRM.** Minimum number of data cell separating each forward RM cell when at least TRM time has elapsed. The ATM Forum specification requires the use of a constant value of 2.

**TRM.** Upper bound of the time between forward RM cells.

**TCR (Tagged Cell Rate).** The rate (in Mbits/s) used for out-of-rate RM cells. The ATM Forum specification requires the use of a constant value of 10 cells/second (0.00424 Mbits/s).

**ADTF (ACR Decrease Time Factor).** Interval between forward RM cells which, when exceeded, triggers a reset of ACR to ICR.

**ACR.** Allowed Cell Rate (in Mbits/s)

**Received count (in cells) for X.** Number of ABR cells received whose destination is X.

**Cells Dropped ABR Input Queue.** Number of ABR Cells awaiting to be forwarded to the ABR Output Queue.

**Cells in ABR Input Queue.** Cells dropped at the input when the queue exceeds its maximum size.

### 3. พารามิเตอร์ในส่วนขอ ATM Applications

#### Variable Bit-Rate.(VBR).(Poisson) Information Window

	Name
	Bit Rate (Mbits/s): 0
	Mean Burst Length (usecs): 0
	Mean Interval Between Bursts(usecs): 0
	Start Time (usecs): 0
	Number of Mbits to be sent: 0
	Other End Connection: Name

Traffic is generated as an ON - OFF source. Cells are generated at the specified bit rate during a burst. Mean burst length and mean interval between bursts are user specified, but the actual periods of both are drawn from an exponential distribution.

	Name:
	Bit Rate (Mbits/sec): 0
	Buffer Size (bytes): 0
	Transmitter's State: FALSE
	Start Time (usec): 0
	Start Random Period (sec): 0
	Transmission Size (bytes): 0
	Number of bytes unsent: 0
	Sender sequence number logging
	Sender ACK sequence number logging
	Receiver sequence number logging
	Mean packet processing time (usec): 0
	Packet processing time variation (usec): 0
	TCP open time (usec): 0
	TCP close time (usec): 0
	Connection Busy: FALSE
	Packet input queue has: 0 pkts
	Max segment size (octets): 0
	My Receive Window size (octets): 0
	Peer Receive Window size (octets): 0
	Tahoe (0), Reno (1), standard (2): 0
	timer granu. in us (e.g 100000,500000): 0
	RTT (usecs): 0
	Forward Trip Time FTT (uSecs): 0
	cwnd in bytes: 0
	RTO (usecs): 0
	RTO (current): 0
	Average throughput (bytes/sec): 0
	Retransmission percentage: 0
	Other end connection: Name

#### TCP/IP (ABR or UBR) Information Window

The TCP/IP Application sends data in large packets. These packets must be segmented to fit into the ATM cell structure before being put on the network. A rather extensive set of parameters are provided that give the user flexibility in controlling and monitoring this type of application.

#### Input Parameters.

**Bit Rate.** The bit rate for the cells on the ATM route.

**Buffer Size.** The size of the user's buffer large enough to hold many packets, but a fraction of the total transmission size.

**Transmitter's State.** A TRUE/FALSE control. If FALSE, no transmission will take place, but the Application can still receive.

**Start Time.** When this is a positive number, it is the number of microseconds after the program starts that the Application will begin to generate traffic. If a negative value is placed here the Random Start feature will be activated (see below).

**Random Start Period.** If Start Time is negative, the value entered here is the mean for a random start time.

**Transmission Size.** The total number of data bytes (payload) to be sent.

**Mean Packet Processing Time.** The mean delay to process the packet.

Packet Processing Time Variation. A computation based on a random perturbation in the processing delay in the range [-Packet Processing Time Variation, +Packet Processing Time Variation].

Maximum Segment Size. The maximum size of the TCP/IP packet, whether it is being sent or being received.

My Receive Window Size. This number determines how many packets are going to be sent without waiting for an acknowledgment.

Tahoe (0), Reno (1), standard (2). Version of the TCP congestion avoidance and control algorithm. Three possible values can be specified.

-0 corresponds to TCP-Tahoe

-1 corresponds to TCP-Reno

-2 corresponds to Standard TCP (without fast retransmit fast recovery)

A detailed description of TCP Tahoe and Reno can be found in RFC 2001.

Timer granu. The TCP time granularity is the minimum time separating the release of a TCP packet and the expiry of the associated timer. Most TCP implementations use a coarse grained timer of 500 ms.

#### Output Parameters

Number of Bytes Unsent. This is the number of bytes remaining from the total specified under *Transmission Size*.

Every TCP/IP packet has a sequence number, including the ACK packets. The following three parameters let the user enable the logging of these numbers as the packets are sent or received. Note that only the logging function applies, no metering is possible.

Sender Sequence Number Logging

Sender ACK Sequence Number Logging

Receiver Sequence Number Logging.

TCP Open Time. The time that the first TCP packet was sent.

TCP Close Time. The end of the TCP transmission (all bytes have been sent).

Connection Busy. Activity flag for TCP processing; TRUE = busy, FALSE = not busy.

Packet input queue has *n* packets. This queue contains packets waiting for TCP processing, both for transmission (before segmentation) and for reception (after reassembly).

Peer Receive Window Size. This is the other-end companion to *My Receive Window Size*.

RTT. Round Trip Time - time from packet sent to ACK received. This is set to a default value at the beginning of a simulation run, then actual measurements are made and Jacobson's<sup>29</sup> algorithm is used to "smooth" the result.

---

<sup>29</sup>Jacobson, V., "Congestion Avoidance and Control", *Proceedings of the ACM SIGCOMM '88*, August 1988.



Forward Trip Time (FTT). gives the time separating the release of a TCP packet and its reception by the Receiver. This is done using TCP timestamps option (see RFC1323).

cwnd in bytes. The TCP congestion window size which gives the maximum number of bytes that TCP can send before waiting for an acknowledgement.

RTO. Retransmission Time Out - the time interval to wait before deciding an unacknowledged packet has been lost. At the start of a simulation this is set equal to RTT (a default value) then, as measurements of RTT are accumulated, Kam's exponential backoff multiplier is incorporated to calculate this parameter.

RTO (current). This is the Retransmission Time Out interval currently being used.

Average Throughput. This is based on the average number of packets successfully transmitted.

Retransmission Percentage. Retransmissions as a percentage of total packets sent.

#### 4. พารามิเตอร์ในส่วนของ Link Components

	Name
	Link Speed (Mbits/sec): 0
	STS-1 51.840 Mbits/sec
	STS-3C 155.520 Mbits/sec
	STS-12C 622.080 Mbits/sec
	STS-24C 1244.160 Mbits/sec
	DS-3 44.736 Mbits/sec
	ATM-F Multimode Fiber 100 Mbits/sec
	Distance (km):
	Link Rate (Mbits/sec) to Switch n:
	Link Rate (Mbits/sec) to B-TE n:

There are only two input parameters for a Physical Link, link speed and distance. The link speeds shown in the window are not selectable with the mouse; the desired speed (in Mbits/s) must be typed into the text window. However, the bit rate typed in need not be exact; the software will accept a round number near the standard rate and make the necessary adjustment. The bit rates shown include overhead bits. The simulator maps the entry into the correct payload rate when doing calculations for bits transmitted. One exception: if the entry is less than 40 Mbits/s, the entered rate is accepted directly with no mapping. The link output parameter is link utilization (in each direction) in terms of bit rate (Mbits/s).

## ภาคผนวก ค การแปล

Acknowledgement	= การตอบรับ
Algorithm	= อัลกอริทึม
Bandwidth	= แบนด์วิดท์
Buffer	= บัฟเฟอร์
Byte Stream	= กระแสไบต์, ลักษณะชุด
Cell	= เซลล์
Closed Loop	= วงจรปิด
Connection	= การเชื่อมต่อ
Data	= ข้อมูล
Datagram	= ดาต้าแกรม
Data Link Layer	= ชั้นเชื่อมต่อข้อมูล
Destination	= ปลายทาง
end-to-end	= ต้นทางปลายทาง
Entity	= เอนิตี
Function	= ฟังก์ชัน
Gbps	= จิกะบิตต่อวินาที
Header	= ส่วนหัว
hop-by-hop	= โหนดต่อโหนด
Host	= โฮสต์
Intermediate Feedback	= การป้อนกลับแบบต้นทาง-กลางทาง
kbyte	= กิโลไบต์
Layer	= ชั้นสื่อสาร
Linux	= ลินุกซ์
Mbps	= เมกะบิตต่อวินาที
Message	= ข่าวสาร
ms	= มิลลิวินาที
Network Layer	= ชั้นควบคุมโครงข่าย

## การแปล (ต่อ)

Overhead	= ค่าใช้จ่าย
Open Loop	= วงจรเปิด
Packet	= แพ็กเกต
Payload	= ส่วนบรรจุข้อมูล
Port	= พอร์ต
Protocol	= โพรโตคอล
Real Time	= เวลาจริง
Router	= เราเตอร์
Segment	= เซกเมนต์
Service	= การบริการ
Simulation	= การจำลอง
Sliding Window	= หน้าต่างเลื่อน
Source	= แหล่งข้อมูล, ต้นทาง
Switch	= สวิตช์
Steady State	= สถานะอยู่ตัว
Symmetric	= สมมาตร
Timer	= ตัวจับเวลา
Traffic	= ทราฟฟิก
Transport Layer	= ชั้นนำส่งข้อมูล

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวสฤณา เจริญปัญญาศักดิ์

วัน เดือน ปี เกิด 2 พฤษภาคม 2517

## วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร)	มหาวิทยาลัยสยาม	2540

## ทุนการศึกษาที่ได้รับระหว่างศึกษา

ทุนการศึกษาของมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร

## ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

นักวิชาการคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์