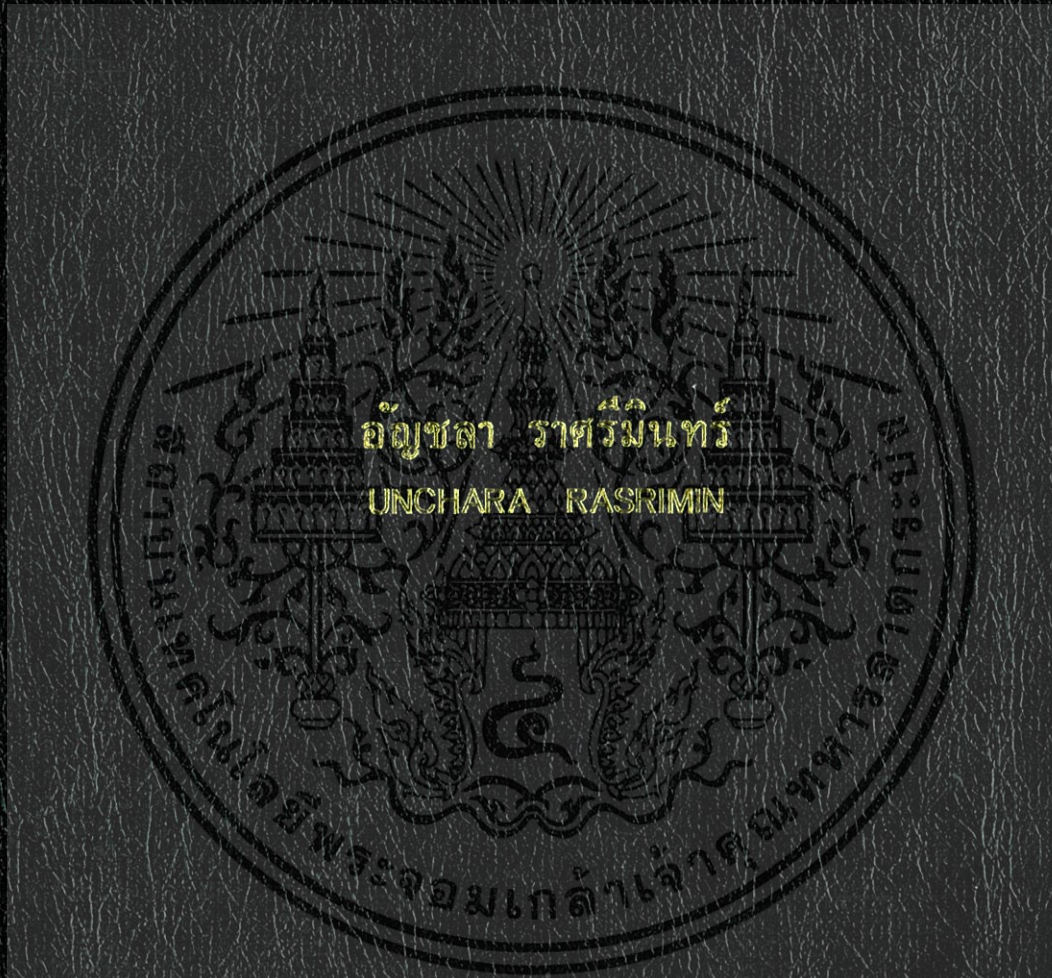


การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบทวนการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ด้วย  
กราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองในเครือข่าย WDM

PERFORMANCE ANALYSIS OF CSMA/CA VIA SELF-SIMILAR TRAFFIC BY  
SIMULATION METHOD ON WDM NETWORK



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1071-3

การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่มีวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ด้วย  
ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองในเครือข่าย WDM

PERFORMANCE ANALYSIS OF CSMA/CA VIA SELF-SIMILAR TRAFFIC BY  
SIMULATION METHOD ON WDM NETWORK



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2547

วนไว้สำหรับการใช้งาน ISBN 974-15-1071-3 ไม่อนุญาตให้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร

PERFORMANCE ANALYSIS OF CSMA/CA VIA SELF-SIMILAR TRAFFIC BY  
SIMULATION METHOD ON WDM NETWORK



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

ISBN 974-15-1071-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่มีวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ด้วยทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองในเครือข่าย WDM
นักศึกษา	นางสาวอัญชลา ราชศรีมินทร์
รหัสประจำตัว	42061139
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิมล สิริทิวภา

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการนำหลักการการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบโครงข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย ไปประยุกต์ใช้กับตัวกลางที่เป็นใยแก้วนำแสงที่ใช้เทคโนโลยีในการส่งสัญญาณด้วยการมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่น หรือที่เรียกว่า WDM ในลักษณะของเครือข่ายท้องถิ่นที่มีสถาปัตยกรรมแบบ WDM Bus การวิเคราะห์สมรรถนะของเครือข่ายนั้นจะกระทำด้วยวิธีการจำลอง โดยมีอินพุตเป็นทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองซึ่งเป็นรูปแบบทราฟฟิกในระบบอินเทอร์เน็ต ในการวิเคราะห์จะวิเคราะห์สมรรถนะของระบบออกมาในรูปของค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย ค่าวิสัยสามารถ ค่าการใช้ประโยชน์ และอัตราการชนกันของข้อมูล เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ เช่น ความยาวของแพ็กเก็ต ความยาวของสายสัญญาณ จำนวนสถานี และอัตราการส่งข้อมูล จากผลการทดลองพบว่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบเครือข่าย ทั้งนี้เพื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้หรือศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

Thesis Title	Performance Analysis of CSMA/CA via Self-Similar Traffic by Simulation Method on WDM Network
Student	Miss Unchara Rasrimin
Student ID.	42061139
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2547
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suvepon Sittichevapak

### ABSTRACT

This thesis proposes CSMA/CA Multiple Access Scheme, MAC protocol in wireless LAN, in wire – WDM network as Local Area Network of WDM Bus architecture. The Network Performance Analysis is done by Simulation Method with Self-Similar Traffic as an input of the system which is the traffic pattern in the Internet system. The performance is investigated by measurement of average delay, throughput, utilization and collision rate when network's parameters are varied. The simulation results show that variation of parameters such as packet range, number of station and transmission rate effect to network performance. By the way, the results are analyzed and the outcome can be applied or considered for further study.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี ด้วยคำแนะนำและการให้คำปรึกษา เกี่ยวกับการทำงานวิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอดจาก รศ. ดร. สุวิพล สิริทธิวิภาค และ ผศ. เกียรติ ไกร วงศ์โรจน์ภรณ์ โดยเฉพาะความเอาใจใส่ ความช่วยเหลือ การแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหารวมทั้งยังเป็นแรงกระตุ้นในการทำงานวิจัยของผู้วิจัยด้วย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณรุ่นน้องหลายๆคน โดยเฉพาะคุณกฤษณะพงษ์ พันธุ์ศรี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ในระหว่างการทำเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณหัวหน้าหน่วยงานที่เข้าใจ และอนุญาตให้ลาหยุดงานมาทำงานวิจัยเป็นครั้ง คราว

สุดท้ายขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และเพื่อนๆ สำหรับกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ทำงานวิจัยในด้านนี้บ้าง

อัญชลา ราชศรีมินทร์

ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญรูป .....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	1
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย .....	2
บทที่ 2 วิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA .....	3
2.1 เครือข่ายท้องถิ่น .....	3
2.2 ระเบียบการจัดการในเครือข่ายท้องถิ่น .....	4
2.3 ระดับชั้น MAC ในมาตรฐาน IEEE 802.11 .....	5
2.4 วิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA .....	8
2.5 ช่วงเวลาการ Backoff แบบสุ่ม .....	10
บทที่ 3 WDM เทคโนโลยี .....	11
3.1 กล่าวนำ .....	11
3.1.1 การสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง .....	11
3.2 เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่น (WDM) .....	14
3.2.1 ความเป็นมา .....	14
3.2.2 การมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่น .....	15
3.3 ประเภทของ WDM .....	15
3.3.1 Wavelength-Selective WDM .....	16
3.3.2 Broadcast-and-Select WDM .....	17
3.4 ตัวมัลติเพล็กซ์เซอร์ .....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1 อุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุม .....	18
3.4.2 อุปกรณ์ฟิลเตอร์ .....	19
3.4.2.1 Interference ฟิลเตอร์ .....	19
3.4.2.2 ฟิลเตอร์เรโซแนนซ์แบบ Fabry-Perot .....	20
3.4.2.3 ฟิลเตอร์แบบอุปกรณ์ขยายกิ่งตัวนำ .....	20
3.4.2.4 ฟิลเตอร์ไฟฟ้าแบบ Coherent Detection .....	20
3.5 แหล่งกำเนิดแสง .....	21
3.5.1 LED .....	21
3.5.2 เลเซอร์ไดโอดแบบ Fabry-Perot .....	21
3.5.3 เลเซอร์ไดโอด DFB .....	22
3.5.4 เลเซอร์ที่กำหนดค่าความถี่ .....	22
3.6 ระบบเครือข่ายแบบหลายความยาวคลื่น .....	22
3.6.1 ตัวส่งที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้ .....	22
3.6.1.1 การปรับเปลี่ยนโดยใช้อุณหภูมิหรือกระแส .....	22
3.6.1.2 การปรับเปลี่ยนด้วย DFB และ DFR .....	23
3.6.1.3 การปรับเปลี่ยนโดยใช้อุปกรณ์ภายนอก .....	23
3.6.2 ตัวรับที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้ .....	23
3.6.2.1 ฟิลเตอร์แบบหลายชั้น .....	23
3.6.2.2 ฟิลเตอร์แบบ Fabry-Perot Interferometer .....	23
3.6.2.3 เลเซอร์แบบ DFB ที่ทำงานที่ต่ำกว่าค่าเทรชโฮลด์ .....	23
บทที่ 4 ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง (Self-Similar Traffic) .....	24
4.1 ความคล้ายคลึงตัวเอง (Self-Similarity) .....	24
4.2 ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง .....	25
4.3 คุณสมบัติของทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง .....	26
4.3.1 การขึ้นกับช่วงเวลาที่ยาวๆ .....	27
4.3.2 การกระจายแบบพาวเรได้ .....	28
4.3.3 การกำเนิดช่วงเวลาการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ต .....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การสเกลของเวลา (Time Scale) .....	31
.....	
บทที่ 5 การวิเคราะห์ระบบ .....	32
5.1 รูปแบบในการจำลอง .....	32
5.2 โมเดลการออกแบบระบบ .....	35
5.2.1 สมมติฐานของการจำลอง .....	35
5.2.2 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง .....	36
.....	
บทที่ 6 ผลการวิเคราะห์ .....	38
.....	
บทที่ 7 สรุปผลการวิเคราะห์ .....	49
.....	
เอกสารอ้างอิง .....	51
.....	
ภาคผนวก .....	52
.....	
ประวัติผู้เขียน .....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงค่าแบนวิดท์ที่ใช้ในเทคนิคการกรองต่างๆ .....	20
3.2 ความกว้างสเปคตรัมของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่างๆ .....	21



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระดับการสื่อสารของเครือข่ายท้องถิ่นเทียบกับ OSI .....	5
2.2 กลไกการทำงานของระบบที่ใช้เฟรมสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูล .....	6
2.3 สถาปัตยกรรมของระเบียบวิธีการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE 802.11 .....	7
2.4 กรรรมวิธีในการส่งข้อมูลใน CSMA/CA .....	8
2.5 กรรรมวิธีในการเข้าถึงของ CSMA/CA .....	9
2.6 ลักษณะของ Contention Window .....	11
3.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง .....	13
3.2 ลักษณะโครงสร้างแบบบัส .....	14
3.3 การทำงานของการมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่น .....	15
3.4 เทคนิค Wavelength-Selective WDM .....	17
3.5 เทคนิค Broadcast-and-Select WDM .....	17
3.6 ระบบการแยกความยาวคลื่นโดยอุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุมและเลนส์ .....	19
3.7 การทำงานของเกรตติงในตัวรับ WDM .....	19
4.1 วัตถุที่มีความคล้ายคลึงกัน .....	24
4.2 แสดงความคล้ายคลึงกันในเชิงของเวลา .....	25
4.3 เปรียบเทียบระหว่างกราฟฟิกรูปแบบคล้ายคลึงตัวเองและกราฟฟิกรูปแบบไม่คล้ายคลึงตัวเอง .....	26
4.4 ความน่าจะเป็นที่จะเชื่อมลงตามกฎของพลังงานระหว่างการกระจายแบบพาราเรลได้และ การกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล .....	30
4.5 เปรียบเทียบระหว่างกราฟฟิกรูปแบบที่เกินขึ้นจริงและกราฟฟิกรูปแบบที่สังเคราะห์ขึ้น .....	32
5.1 ลักษณะการเชื่อมต่อของเครือข่ายแบบ WDM บัส .....	34
5.2 โครงสร้างลักษณะของสถานีในเครือข่าย WDM บัส โดยละเอียด .....	34
5.3 การจัดคิวและบัฟเฟอร์ของด้านส่ง .....	35
5.4 ขั้นตอนการทำงานของระบบที่ใช้ในการจำลอง .....	37
6.1 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อความยาวแพ็กเก็ตเป็น 600 บิต, 6,000 บิต และ 12,000 บิต ตามลำดับ .....	38
6.2 อัตราการชนต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อความยาวแพ็กเก็ตเป็น 600 บิต, 6,000 บิต และ 12,000 บิต ตามลำดับ .....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3 อัตราการใช้ช่องสัญญาณต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อความยาวแพ็กเก็ตเป็น 600 บิต, 6,000 บิต และ 12,000 บิต ตามลำดับ .....	39
6.4 ค่าวิสัยสามารถของระบบต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อความยาวแพ็กเก็ตเป็น 600 บิต, 6,000 บิต และ 12,000 บิต ตามลำดับ .....	40
6.5 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อความยาวของสายสัญญาณเป็น 1, 5 และ 10 กิโลเมตร ตามลำดับ .....	41
6.6 อัตราการชนต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อความยาวของสายสัญญาณเป็น 1, 5 และ 10 กิโลเมตร ตามลำดับ .....	42
6.7 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อจำนวนสถานีเป็น 10, 20 และ 30 สถานี ตามลำดับ .....	43
6.8 อัตราการชนต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อจำนวนสถานีเป็น 10, 20 และ 30 สถานี ตามลำดับ .....	44
6.9 อัตราการใช้ช่องสัญญาณต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อจำนวนสถานีเป็น 10, 20 และ 30 สถานี ตามลำดับ .....	44
6.10 ค่าวิสัยสามารถของระบบต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อจำนวนสถานีเป็น 10, 20 และ 30 สถานี ตามลำดับ .....	45
6.11 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเป็น 155 เมกะบิตต่อวินาที และ 625 เมกะบิตต่อวินาที ตามลำดับ .....	46
6.12 อัตราการชนต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเป็น 155 เมกะบิตต่อวินาที และ 625 เมกะบิตต่อวินาที ตามลำดับ .....	47
6.13 อัตราการใช้ช่องสัญญาณต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเป็น 155 เมกะบิตต่อวินาที และ 625 เมกะบิตต่อวินาที ตามลำดับ .....	47
7.1 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยและอัตราการชนต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตของระบบที่เสถียร ..	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารทศวงนเวสาหรบการเขงานเพอการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากกราฟฟิกข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสารทุกวันนี้ มีขนาดเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว เทคโนโลยีต่างๆจึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้การส่งข้อมูลเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว เพื่อรองรับต่อความต้องการในการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นในระดับของเครือข่ายท้องถิ่นหรือเครือข่ายระดับเมือง โดยในระดับของเครือข่ายท้องถิ่นนั้น เครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless LAN) ก็เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ และมีบทบาทชัดเจนมากขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งการสื่อสารภายในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายนั้นจะเป็นไปตามมาตรฐานของ IEEE 802.11 มีวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) แต่การสื่อสารในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความเร็วในการรับส่งข้อมูล, พื้นที่ที่ครอบคลุมในการให้บริการ รวมไปถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารแบบไร้สายมีค่าค่อนข้างสูง วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการนำหลักการการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ซึ่งเป็นกรรมวิธีของการเข้าถึงที่มีประสิทธิภาพสูงในระบบเครือข่ายท้องถิ่นไปใช้กับตัวกลางแบบมีสายที่เป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่มีการมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่น หรือที่เรียกว่า WDM และจะทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบใหม่ในรูปแบบของค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย (Average Delay) ค่าการใช้ประโยชน์ (Utilization) ค่าวิสัยสามารถของระบบ (Throughput) และค่าอัตราการชนกันของข้อมูล (Collision Rate) ในระบบ

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อที่จะทำการศึกษาวเคราะห์สมรรถนะของเครือข่ายท้องถิ่นที่มีลักษณะสถาปัตยกรรมแบบ WDM Bus และมีวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ซึ่งในการวิเคราะห์กระทำโดยวิธีการจำลองที่มีอินพุตกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง (Self-Similar Traffic) ที่เป็นรูปแบบกราฟฟิกในระบบอินเทอร์เน็ต โดยจะวิเคราะห์คุณสมบัติของเครือข่ายในรูปแบบของค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย (Average Delay) ค่าการใช้ประโยชน์ (Utilization) ค่าวิสัยสามารถของระบบ (Throughput) และค่าอัตราการชนกันของข้อมูล (Collision Rate) เมื่อทดลองเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ เช่น ความยาวของแพ็กเก็ต ความยาวของสายสัญญาณ จำนวนสถานี และอัตราการส่งข้อมูล ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้ถือเป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพหลักของระบบการสื่อสาร

### 1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA เดิมนั้นเป็นเทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อนำมาใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย ตามระเบียบวิธีการสื่อสารของชั้น MAC (MAC Protocol) ของมาตรฐาน IEEE 802.11 แต่จากการศึกษาในยุคต่อมาพบว่า CSMA/CA นั้นยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเครือข่ายแบบไร้สายได้ โดยเฉพาะกับเครือข่ายท้องถิ่นและเครือข่ายเมืองที่ใช้ตัวกลางแบบ WDM ที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายในรูปแบบของเครือข่ายท้องถิ่นที่มีสถาปัตยกรรมแบบริง ลักษณะเด่นของตัวกลางแบบ WDM คือ WDM เป็นวิธีในการเพิ่มความจุของตัวกลางที่เป็นเส้นใยแก้วนำแสง ด้วยวิธีการรวมความยาวคลื่นหลายๆความยาวคลื่น แล้วส่งไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเดียวกันซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการทางด้านแบนด์วิดท์ของการสื่อสารในยุคปัจจุบันได้

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอและดัดแปลงกรรมวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA มาใช้สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นที่มีสถาปัตยกรรมแบบ WDM บัส ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการดัดแปลงสถาปัตยกรรมการรับ-ส่งข้อมูลให้เหมาะสม

โดยในการวิเคราะห์สมรรถนะ หรือประสิทธิภาพของระบบเครือข่ายในวิทยานิพนธ์นี้กระทำด้วยวิธีการจำลองโดยมีอินพุตกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง ซึ่งกราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองจะแสดงสหสัมพันธ์ (Correlation) บนสเกลของช่วงเวลาที่ยาวๆ (Long-Range Dependent) ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟฟิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบการสื่อสารข้อมูลมากกว่าเมื่อเทียบกับ กราฟฟิกแบบดั้งเดิม เช่น กราฟฟิกแบบพัชซอง (Poisson) ซึ่งเป็นกราฟฟิกที่ขึ้นกับช่วงเวลาสั้นๆ (Short-Range Dependent) ดังนั้นที่สเกลของเวลาที่ยาวๆ รูปแบบกราฟฟิกแบบพัชซองจะมีลักษณะราบเรียบ เนื่องจากไม่สามารถแยก White Noise ได้

## วิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA

### 2.1 เครือข่ายท้องถิ่น

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างมาก และจำนวนผู้ใช้คอมพิวเตอร์ที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณข้อมูลในการติดต่อสื่อสารเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งข้อมูลบางอย่างอาจเป็นที่ต้องการของผู้ใช้หลายคน จึงทำให้เกิดการสร้างเครือข่ายเพื่อการสื่อสารขึ้นมา โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ การใช้อุปกรณ์ส่วนกลางร่วมกัน เช่น เครื่องพิมพ์ การใช้โปรแกรมและข้อมูลร่วมกัน และการรับส่งข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างกัน ซึ่งระบบเครือข่ายได้มีการพัฒนาขึ้นมาเรื่อยๆ โดยเครือข่ายขนาดเล็กเราจะเรียกว่า เครือข่ายท้องถิ่น (LAN : Local Area Network) เครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมาก็เรียกว่า เครือข่ายในเขตเมือง (MAN : Metropolitan Area Network) หรือเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่หลายๆ (WAN : Wide Area Network)

เครือข่ายท้องถิ่นนั้นหมายถึง เครือข่ายคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ที่เป็นของกลุ่มผู้ใช้ขนาดเล็ก ๆ กลุ่มหนึ่ง ปกติจะเป็นเครือข่ายที่มีขอบเขตอยู่ภายในอาคารเดียวกัน หรือกลุ่มอาคารที่อยู่ติดกัน มีระยะทางไม่เกิน 2 - 3 กิโลเมตร เหมาะสำหรับการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กของพนักงานในองค์กรเข้าด้วยกัน ลักษณะเฉพาะของเครือข่ายท้องถิ่นหลักๆแล้วมี 3 ประการ คือ ขนาดของเครือข่าย, เทคโนโลยีที่ใช้ในการรับส่งข้อมูล และรูปแบบการจัดโครงสร้างหรือสถาปัตยกรรมของระบบ

เครือข่ายท้องถิ่นจะถูกจำกัดด้วยขนาด ซึ่งหมายถึงจำนวนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน และระบบที่มีการวางแผนอย่างดีนั้น เวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลจะสามารถคำนวณได้ล่วงหน้า ซึ่งจะใกล้เคียงกับความจริงมาก ความสามารถที่ใช้ในการคำนวณได้อย่างล่วงหน้านี้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งที่จะนำมาใช้ในการออกแบบระบบเครือข่ายให้มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังทำให้การบริหารเครือข่ายง่ายขึ้นด้วย ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลบนเครือข่ายนั้น ปกติจะเป็นเพียงสายเคเบิลเส้นเดียวซึ่งจะเชื่อมต่อทั้งระบบเข้าด้วยกัน ซึ่งมีความเร็วในการส่งข้อมูลที่ 10 เมกะบิตต่อวินาที หรือ 100 เมกะบิตต่อวินาที มีระยะเวลาในการรอคอยเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งข้อมูลไม่เกิน 100 ไมโครเซคคัน และมีโอกาสที่จะผิดพลาดน้อยมาก ส่วนรูปแบบการจัดโครงสร้างสำหรับระบบเครือข่ายนั้นมีหลายรูปแบบ และที่นิยมใช้คือ แบบบัสและแบบวงแหวน โครงสร้างแบบบัสนั้นยอมให้ผู้ใช้ส่งข้อมูลได้คราวละ 1 คนเท่านั้น ผู้ใช้คนอื่น ๆ ที่ต้องการส่งข้อมูลจะต้องรอจนกว่าสายเคเบิลจะว่าง หรือว่าไม่มีการส่งข้อมูลเกิดขึ้นจึงจะสามารถส่งข้อมูลได้ ในกรณีที่ผู้ใช้สองคนขึ้นไปทำการส่งข้อมูลพร้อม ๆ กัน จะเกิดการชนกันของข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณในสายเคเบิลจะเกิดการรบกวนกันเองจนใช้งานไม่ได้ เมื่อผู้ส่งข้อมูลตรวจพบความผิดปกติก็จะหยุดส่งข้อมูลแล้วรอเป็นระยะเวลาต่าง ๆ กัน จากนั้นจึงจะเริ่มพยายามส่งข้อมูลนั้นใหม่ การกำหนดระยะเวลาในการรอคอย ตามมาตรฐานของ IEEE 802.3 (Ethernet) นั้น กำหนดจากการสุ่ม (Random) ตัวเลขขึ้นมาจากระยะเวลาช่วงหนึ่งซึ่งได้มีการกำหนดไว้ล่วงหน้าแล้ว วิธีนี้สามารถรับประกันได้ว่าจะไม่มีการเกิดการชนกันของข้อมูลจากผู้ส่งชุดเดิมอีกอย่างแน่นอน

ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นคือเครือข่ายท้องถิ่นแบบใช้สาย ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาไปเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย หรือเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สาย (Wireless LAN) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจ โดยเฉพาะสำหรับบุคคลที่ใช้คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กและมักมีการเดินทางไปมายังสถานที่ต่างๆ ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องทำการติดต่อสื่อสารหรือทำงานได้ตลอดเวลา แต่การสื่อสารในเครือข่ายท้องถิ่นแบบไร้สายนี้ยังมีข้อด้อยในเรื่องอัตราการส่งข้อมูลที่มีความเร็วต่ำกว่าเครือข่ายท้องถิ่นแบบใช้สาย

## 2.2 ระเบียบการจัดการในเครือข่ายท้องถิ่น

จากรูปแบบของการสื่อสารข้อมูล ตามการกำหนดโดย ISO ได้แบ่งระดับการสื่อสารข้อมูลออกเป็น 7 ระดับ การสื่อสารระดับต่าง ๆ จะอาศัยการควบคุมเพื่อให้ระบบการทำงานนั้นเป็นไปอย่างถูกต้องมีมาตรฐาน โดยการสื่อสารข้อมูลแบบแพ็กเก็ตจะเกี่ยวข้องกับ 3 ระดับล่างซึ่งได้แก่

1. ระดับฟิสิคัล (Physical Layer) คือ ระดับที่เกี่ยวข้องกับการรับส่งข้อมูลเป็นบิต ซึ่งเกี่ยวข้องกับระดับแรงดันไฟฟ้า ช่วงความถี่ คาบเวลา เกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของอุปกรณ์ ที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อที่ทำให้เกิดการสื่อสารได้

2. ระดับดาต้าลิงค์ (Data Link Layer) เป็นระดับที่ทำการแปลงการรับส่งข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนให้แน่นอนขึ้น โดยการจัดรูปแบบข้อมูลเป็นบิตล็อก เป็นเฟรม พร้อมทั้งมีการตรวจสอบข้อผิดพลาด เช่น CRC เพื่อจะรับรู้ว่ามีข้อมูลที่รับมานั้นถูกต้องหรือไม่

3. ระดับเน็ตเวิร์ค (Network Layer) ทำการหาเส้นทางในการส่งข้อมูลเข้าไปในเครือข่าย

โดยอาจจะต้องใช้อุปกรณ์การเชื่อมต่อเช่น ไรต์เตอร์ เป็นต้น

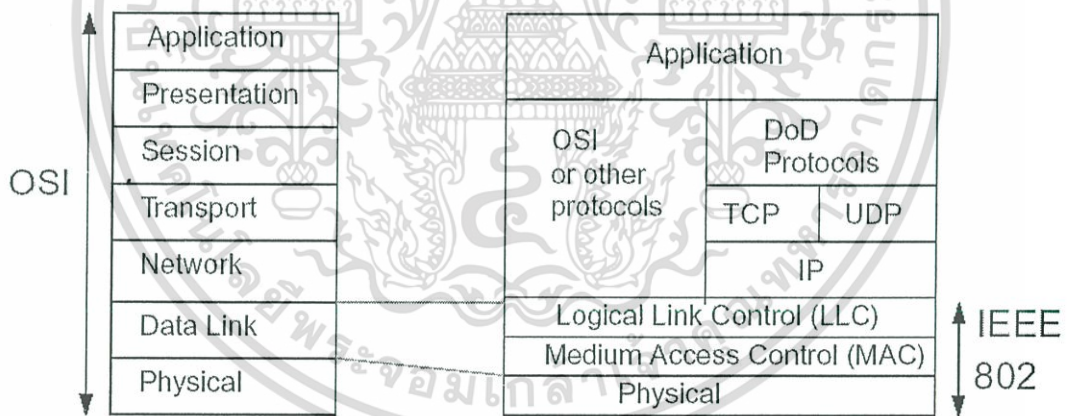
และตามข้อกำหนดของ IEEE 802 ได้จัดแบ่งระดับการสื่อสารของเครือข่ายท้องถิ่นขึ้นใหม่เป็นการแยกระดับออกเป็น 3 ระดับ ซึ่งเทียบได้กับ OSI สองระดับ ดังรูปที่ 2.1 โดยแต่ละระดับมีรายละเอียดดังนี้

### 1. Physical Layer มีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- เข้ารหัสและถอดรหัสสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำหน้าที่ซึ่งใครโน้สร้างสัญญาณ
  - ทำการรับและส่งบิตข้อมูล
2. Medium Access Control (MAC) ซึ่งอยู่ในระดับล่างถัดลงมา แต่เมื่อเทียบกับ OSI โมเดล ก็ยังอยู่ในระดับดาต้าลิงค์ จะทำงานในหน้าที่ต่อไปนี้
- เป็นการจัดการสำหรับการเข้าถึงข้อมูลที่มาจากต้นทางหลายแห่ง และไปยังปลายทางได้หลายที่
3. Logical Link Control (LLC) ซึ่งอยู่ในชั้นดาต้าลิงค์ จะมีหน้าที่สำคัญดังนี้
- มีจุดเชื่อมต่อที่เรียกว่า SAP (Service Access Point) เพื่อให้เชื่อมต่อกับระดับที่อยู่ข้างเคียงได้
  - ในการส่งข้อมูล จะจัดข้อมูลเป็นเฟรม มีการกำหนดแอดเดรสต้นทางและปลายทาง และฟิลด์ที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง (CRC)
  - ในการรับข้อมูล จะตรวจสอบแอดเดรส ถ้าเป็นแอดเดรสของผู้รับจะแยกข้อมูลออกจากเฟรมและตรวจสอบความถูกต้องของเฟรมที่ส่ง



รูปที่ 2.1 ระดับการสื่อสารของเครือข่ายท้องถิ่นเทียบกับ OSI

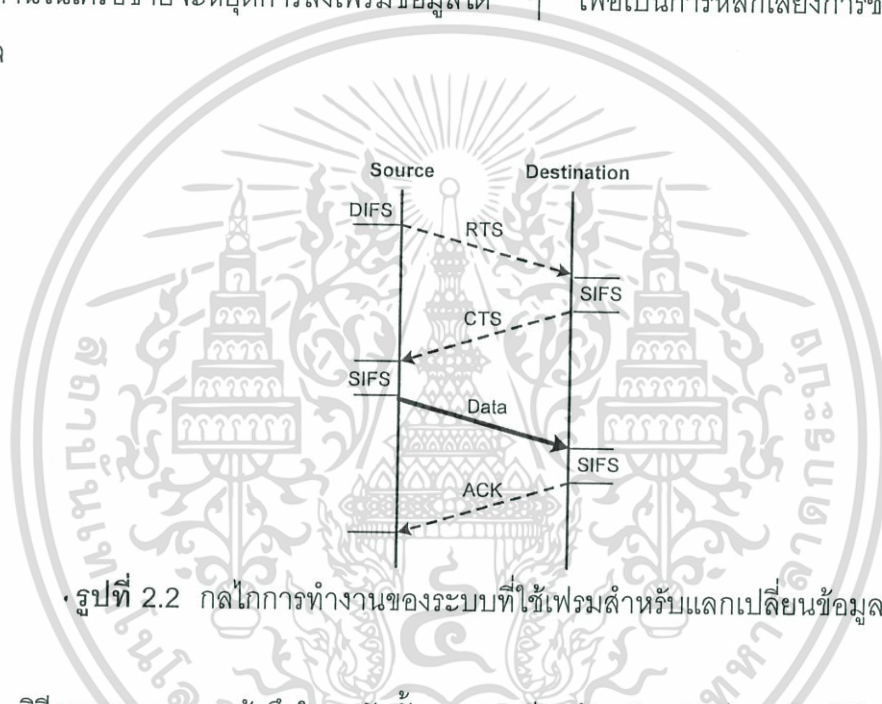
### 2.3 ระดับชั้น MAC ในมาตรฐาน IEEE 802.11

ระดับชั้น MAC ในมาตรฐาน IEEE 802.11 นั้นจะครอบคลุมถึงเรื่อง การส่งข้อมูลที่นำเชื่อถือได้, การควบคุมวิธีการเข้าถึง และความปลอดภัยของข้อมูล

ในด้านของการส่งข้อมูลที่นำเชื่อถือได้นั้น เราจะพิจารณาจากปริมาณการสูญเสียเฟรมข้อมูลในการสื่อสารที่เกิดจากการสอดแทรกหรือการรบกวน ทำให้ต้องสูญเสียเวลากับการที่ต้องส่งเฟรมข้อมูลใหม่ ในระดับชั้น MAC จึงมีการจัดการกับความผิดพลาดนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ

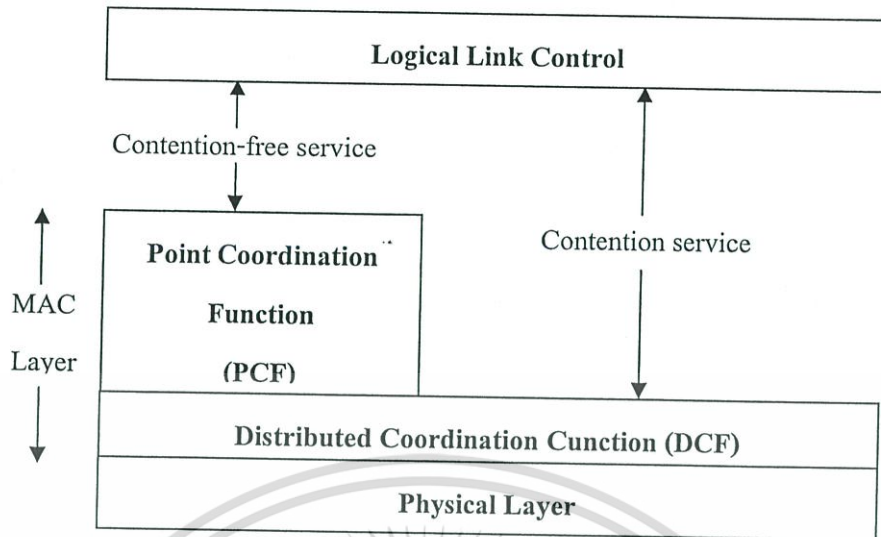
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสาร โดยได้มีการกำหนดเฟรมที่ใช้สำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลขึ้นมา[1] เป็นการเปลี่ยนเฟรมข้อมูล 4 แบบดังรูปที่ 2.2 ซึ่งในรูปแบบนี้สถานีที่ต้องการจะส่งข้อมูลจะส่งเฟรม RTS (Request To Send) ไปยังสถานีผู้รับปลายทางก่อน จากนั้นสถานีผู้รับปลายทางจึงตอบกลับด้วยการส่งเฟรม CTS (Clear To Send) ไปยังสถานีที่ต้องการส่งข้อมูลถ้าในขณะนั้นสถานีรับพร้อมที่จะทำการรับข้อมูล แต่ในกรณีที่สถานีรับไม่ว่าง สถานีรับจะส่งเฟรม RxBUSY กลับไปแทน และเมื่อสถานีที่ต้องการส่งข้อมูลได้รับเฟรม CTS แล้วจึงจะทำการส่งเฟรมข้อมูลที่ต้องการ เมื่อสถานีผู้รับปลายทางได้รับเฟรมข้อมูลเรียบร้อยแล้วก็จะส่งเฟรม ACK (Acknowledgement Frame) กลับไปยังสถานีส่งอีกครั้งหนึ่งเพื่อเป็นการยืนยันการได้รับข้อมูล และโดยปกติแล้ว เมื่อมีการส่งเฟรม RTS ทุกสถานีในเครือข่ายจะหยุดการส่งเฟรมข้อมูลใด ๆ เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการชนกันของเฟรมข้อมูล



รูปที่ 2.2 กลไกการทำงานของระบบที่ใช้เฟรมสำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูล

วิธีการควบคุมการเข้าถึงในระดับชั้น MAC มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี[1] คือ วิธีการเข้าถึงแบบกระจาย (Distributed Access Protocols) และวิธีการเข้าถึงแบบศูนย์กลาง (Centralized Access Protocols) ซึ่งวิธีการเข้าถึงแบบกระจายนั้น จะใช้วิธีในการฟังช่องสัญญาณว่าว่างหรือไม่ ถ้าว่างจึงทำการส่งข้อมูลออกไป ส่วนวิธีการเข้าถึงแบบศูนย์กลางนั้น จะใช้ลำดับความสำคัญก่อนหลังของข้อมูลในการพิจารณาในการส่ง โดยสถาปัตยกรรมของระเบียบวิธีการสื่อสารแบบนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สถาปัตยกรรมของระเบียบวิธีการสื่อสารตามมาตรฐาน IEEE 802.11

#### การทำงานของ DCF (Distribution Coordination Function)

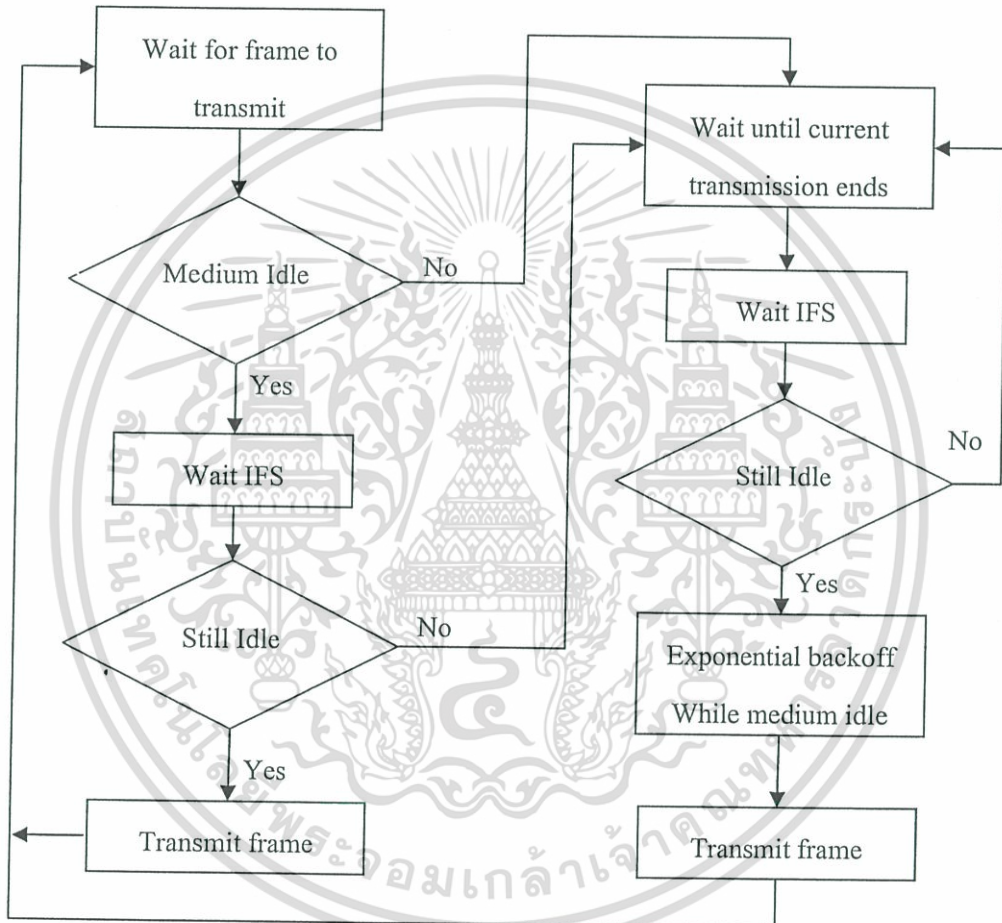
ในระดับชั้นของ DCF นี้ จะใช้วิธีการเข้าถึงโดยการฟังคลื่นสัญญาณพาหะ (CSMA : Carrier Sense Multiple Access) คือเมื่อสถานีต้องการที่จะส่งเฟรมข้อมูล จะต้องทำการตรวจสอบช่องสัญญาณก่อนว่าว่างหรือไม่ ถ้าช่องสัญญาณว่างจึงจะส่งข้อมูลนั้นออกไป โดยในมาตรฐาน IEEE 802.11 นั้นจะใช้กรรมวิธีที่เรียกว่า CSMA/CA (Collision Avoidance) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการตรวจสอบว่าเกิดการชนกันของเฟรมข้อมูลหรือไม่แบบเป็นนัย ด้วยวิธีแลกเปลี่ยนเฟรมข้อมูลดังที่กล่าวข้างต้น และการที่จะหลีกเลี่ยงการชนกันนั้น ในระดับชั้น DCF ได้มีการกำหนดให้มีช่วงเวลาในการหน่วงเวลาที่เรียกว่า IFS (Interframe Space) ขึ้นอีกโดยที่ IFS นี้ก็ได้มีการแบ่งออกเป็นช่วงเวลาย่อยอีก 3 ช่วงเวลาดังจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

#### การทำงานของ PCF (Point Coordination Function)

PCF นั้นจะทำหน้าที่ในการตัดสินใจหรือเลือกสถานีที่จะทำการส่งข้อมูล โดยจะมีคอมพิวเตอร์ศูนย์กลางในการควบคุม เมื่อสถานีใดที่ได้รับสัญญาณให้ทำการส่งข้อมูลนี้แล้ว ก็ส่งเฟรม ACK กลับไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ศูนย์กลางเพื่อแจ้งความพร้อม จากนั้นจึงทำการส่งข้อมูลต่อไป

## 2.4 วิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA

ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมาถึงเทคนิคในการตรวจสอบว่าเกิดการชนกันของเฟรมข้อมูลหรือไม่แบบเป็นนัยของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA นั้นกระทำโดยการแลกเปลี่ยนเฟรมข้อมูล โดยสถานีผู้ส่งเฟรมข้อมูลจะต้องรอรับเฟรม ACK จากสถานีที่ส่งข้อมูลไปให้ หากไม่ได้รับเฟรม ACK กลับมาภายในเวลาที่กำหนดจะถือว่าเกิดการชนกันของเฟรมข้อมูล และต้องทำการส่งข้อมูลเดิมซ้ำอีกต่อไป ซึ่งกรรมวิธีในการส่งข้อมูลนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กรรมวิธีในการส่งข้อมูลใน CSMA/CA

จากโฟลว์ชาร์ตในรูปที่ 2.4 อธิบายได้ดังนี้

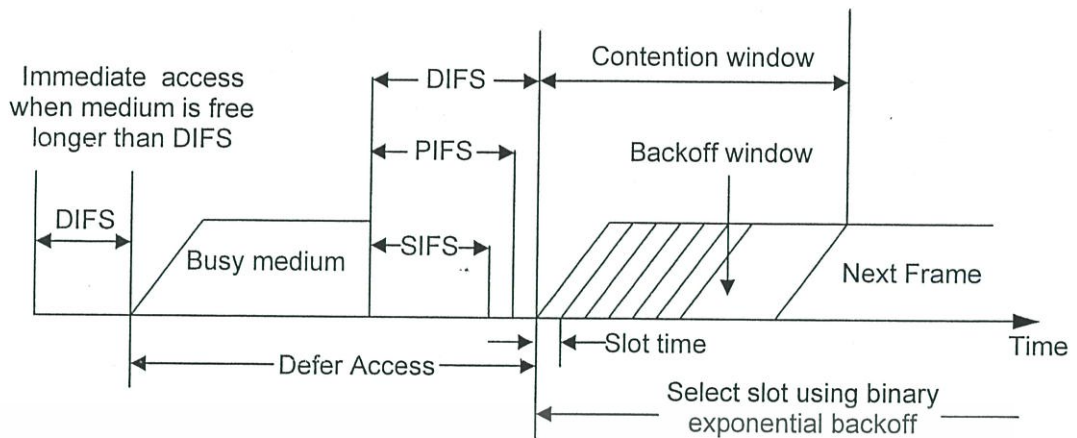
1. สถานีที่ต้องการส่งเฟรมข้อมูลจะคอยตรวจสอบช่องสัญญาณ เมื่อพบว่าช่องสัญญาณว่าง สถานีจะทำการรอเป็นเวลา IFS (Interframe Space) และถ้าช่องสัญญาณยังคงว่างอยู่หลังช่วงเวลา IFS สถานีก็จะส่งเฟรมข้อมูลออกไปทันที

2. ถ้าช่องสัญญาณไม่ว่าง ไม่ว่าจะเป็นการไม่ว่างจากการตรวจสอบในครั้งแรกหรือไม่ว่างในขณะช่วงเวลา IFS สถานีจะทำการหน่วงเวลาในการส่งออกไป และคอยตรวจสอบช่องสัญญาณอย่างต่อเนื่องว่าช่องสัญญาณนั้นว่างหรือไม่ จนกระทั่งการส่งในขณะนั้นสิ้นสุด
3. เมื่อการส่งในขณะนั้นสิ้นสุด สถานีจะทำการรอเป็นช่วงเวลา IFS อีกครั้ง ซึ่งถ้าช่องสัญญาณยังคงว่างอยู่ที่ช่วงเวลานี้ สถานีก็จะใช้กระบวนการ Backoff ในการสุ่มหาเวลาหน่วงก่อนที่จะตรวจสอบช่องสัญญาณใหม่อีกครั้งหนึ่ง และถ้าช่องสัญญาณยังคงว่างอยู่ สถานีก็จะทำการส่งเฟรมข้อมูลออกไป และในระหว่างกระบวนการ Backoff นั้น ถ้าหากช่องสัญญาณเกิดไม่ว่างขึ้นมา กระบวนการ Backoff ก็จะหยุดแล้วเริ่มใหม่อีกครั้งเมื่อช่องสัญญาณว่าง

กระบวนการ Backoff นั้น จะใช้วิธีการที่เรียกว่า Binary Exponential Backoff ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากในกรณีที่ทราฟฟิกข้อมูลมีขนาดใหญ่ สถานีจะทำการส่งเฟรมข้อมูลซ้ำเมื่อเกิดการชนกันของเฟรมข้อมูล ซึ่งในแต่ละครั้ง ค่าเวลาสุ่มของการหน่วงเวลาก็จะมากขึ้นเป็นสองเท่า ดังนั้นถ้ามีการส่งที่ไม่ประสบความสำเร็จเป็นจำนวนมากก็จะทำให้ค่าเวลาหน่วงนี้เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แต่ถ้าหากไม่มีการนำกระบวนการ Backoff มาใช้ เมื่อสถานีมากกว่าหนึ่งสถานีต้องการจะส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันก็จะทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลขึ้น และสถานีนั้นก็จะต้องพยายามส่งข้อมูลใหม่อีกครั้งซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการชนกันอีกครั้งหนึ่ง โดยรายละเอียดของกระบวนการ Backoff นั้นจะได้กล่าวถึงอีกครั้งในหัวข้อถัดไป

อีกวิธีการหนึ่งที่จะหลีกเลี่ยงการชนกันของวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA นั่นก็คือการนำช่วงเวลาในการหน่วงเวลาที่เรียกว่า IFS มาใช้โดยได้มีการแบ่งช่วงเวลาในการหน่วง IFS ออกเป็นช่วงเวลาย่อยอีก 3 ช่วงเวลา ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งช่วงเวลาของ IFS ต่าง ๆ พอจะสรุปได้ดังนี้

- SIFS (Short IFS) คือ ช่วงเวลาสั้น ๆ ของ IFS ที่ใช้สำหรับการตอบสนองอย่างทันทีทันใด เช่น เฟรมตอบกลับ (ACK Frame) เป็นต้น
- PIFS (Priority Coordination Function IFS) คือ ช่วงเวลาขนาดกลางของ IFS ที่จะใช้โดยระเบียบวิธีการสื่อสารของ PCF ที่ให้ความสำคัญก่อนและหลังในการส่งเฟรมข้อมูล
- DIFS (Distribution Coordination Function IFS) คือ ช่วงเวลาที่ยาวที่สุดของ IFS ที่ใช้สำหรับการหน่วงในการเข้าใช้ช่องสัญญาณของการส่งแบบอะซิงโครนัส



รูปที่ 2.5 กรรมวิธีในการเข้าถึงของ CSMA/CA

จะเห็นได้ว่า ช่วงเวลา SIFS นั้น สถานีจะใช้สำหรับกำหนดโอกาสความเป็นไปได้ของการส่งเฟรมข้อมูล ซึ่งช่วงเวลา SIFS นี้จะถูกนำมาใช้กับเฟรมต่าง ๆ ดังนี้ คือ

- เฟรม ACK : เมื่อสถานีใด ๆ ได้รับเฟรมข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ก็จะส่งเฟรม ACK กลับไปยังสถานีต้นทางเพื่อเป็นการยืนยันการรับเฟรมข้อมูล
- เฟรม CTS : สถานีที่พร้อมที่จะรับข้อมูลหลังจากที่ได้รับเฟรม RTS จากสถานีที่ต้องการส่งข้อมูลแล้วนั้น จะส่งเฟรม CTS เพื่อเป็นการยืนยัน

## 2.5 ช่วงเวลาการ Backoff แบบสุ่ม

โดยปกติแล้วเมื่อสถานีทำการเช็คช่องสัญญาณแล้วพบว่าช่องสัญญาณไม่ว่าง สถานีจะทำการ Backoff แบบสุ่มเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการส่งเฟรมข้อมูลพร้อมๆกันของหลายๆสถานี กระบวนการ Backoff จะทำการเลือกสล็อตแบบสุ่มจากจำนวนสล็อตที่มีในช่วงเวลาที่เรียกว่า Contention Window (ดูรูปที่ 2.5) ดังสมการ

$$BackoffTime = INT(CW * Random()) * Slot - Time \quad (2.1)$$

เมื่อ  $CW$  คือค่าจำนวนเต็มที่มีค่าระหว่าง  $CW_{min}$  และ  $CW_{max}$

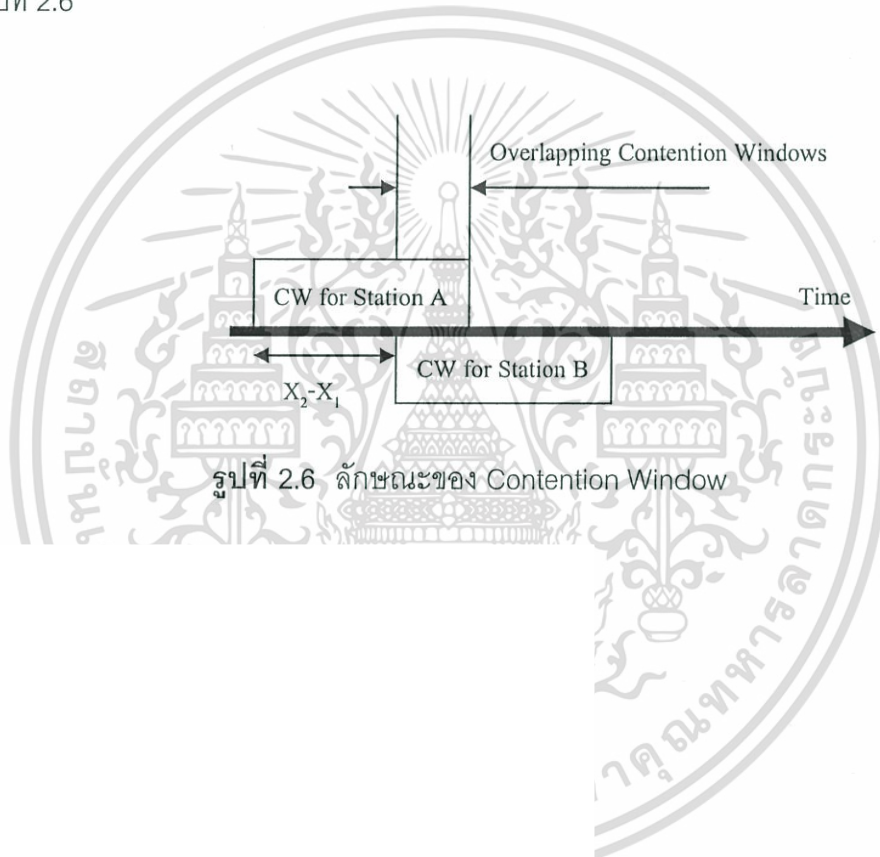
$Random()$  คือตัวเลขที่ได้จากการสุ่มระหว่าง 0-1

$Slot - Time$  คือ ค่าคงที่ของเวลาสำหรับแต่ละสล็อต

ค่าเวลาของการ Backoff จะลดลงเป็นจำนวนตามเวลาของสล็อตเมื่อช่องสัญญาณนั้นว่าง แต่ค่าเวลานี้จะถูกทำให้คงที่เมื่อช่องสัญญาณไม่ว่าง และตัวคอนโทรลเลอร์จะเริ่มทำการนับเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องสัญญาณว่าง การส่งจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อตัวเคอร์เตอร์ทำการนับถึงศูนย์ ส่วนสถานีที่ทำการส่งเสร็จสิ้นแล้วและมีเฟรมข้อมูลที่จะทำการส่งอีกก็จะกลับไปเริ่มต้นที่กระบวนการเดิม[2] คือการตรวจสอบช่องสัญญาณและการ Backoff ดังแสดงในรูปที่ 2.5

ด้วยกรรมวิธีเช่นนี้สถานีที่ทำการส่งเลือกสล็อตที่มีช่วงเวลาที่สั้นที่สุดก็จะได้ทำการส่งเฟรมข้อมูลก่อน ถือว่าเป็นวิธีที่ยุติธรรมในระบบเครือข่าย คือสถานีที่มาก่อนก็จะได้ใช้บริการก่อน โดยค่า  $CW$  ในสมการที่ (2.1) จะเป็นตัวกำหนดการเข้าใช้ช่องสัญญาณของสถานี เช่น ถ้าสถานี A พร้อมทั้งจะทำการส่งเฟรมข้อมูลใช้เวลา  $X_1$  ขณะที่สถานี B พร้อมทั้งจะทำการส่งข้อมูลใช้เวลา  $X_2$  และเมื่อกำหนดให้  $X_2 > X_1$  โอกาสความเป็นไปได้ที่สถานี A จะได้ทำการส่งจึงมีมากกว่าสถานี B ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของ Contention Window

# บทที่ 3

## WDM เทคโนโลยี

### 3.1 กล่าวนำ

WDM (Wavelength Division Multiplexing) เป็นเทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่นที่ใช้ในเส้นใยแก้วนำแสง แต่ก่อนที่เราจะกล่าวถึงรายละเอียดของ WDM ลองมาพิจารณาคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงดูว่าเหตุใดจึงเป็นที่นิยมใช้เป็นตัวกลางในการสื่อสารข้อมูล

เส้นใยแก้วนำแสงมักถูกนำมาใช้กับแอปพลิเคชันที่ต้องการคุณสมบัติเฉพาะของเส้นใยแก้วนำแสงที่ซึ่งตัวกลางอื่นๆไม่มี แต่ถ้ากับแอปพลิเคชันที่ไม่ได้มีความต้องการคุณภาพของตัวกลางสูงมากนัก การนำเส้นใยแก้วนำแสงมาใช้อาจเป็นวิธีที่ทำให้เสียค่าใช้จ่ายมากเกินไป

#### ข้อดีของเส้นใยแก้วนำแสง

- มีแบนด์วิธขนาดใหญ่ และขนาดของการลดทอนของสัญญาณต่ำ
- ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง และการบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากแบนด์วิธที่ใหญ่และมีการลดทอนน้อย สามารถส่งได้เป็นระยะทางไกลๆโดยไม่จำเป็นต้องมีรีพีตเตอร์
- มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และมีโครงสร้างที่มีความแข็งแรงคงทนสูง
- เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก อย่างเช่น แก้ว หรือพลาสติก สามารถป้องกันการเกิดการแทรกสอดของสัญญาณ หรือการกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณที่มีคุณภาพสูง
- โดยทั่วไปสภาวะแวดล้อมไม่มีผลต่อคุณภาพของสัญญาณที่ส่งด้วยเส้นใยแก้วนำแสง ยกเว้นกรณีที่เป็นมาก ๆ ถึง -20 ถึง -40 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิระดับนี้อาจทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณลงได้

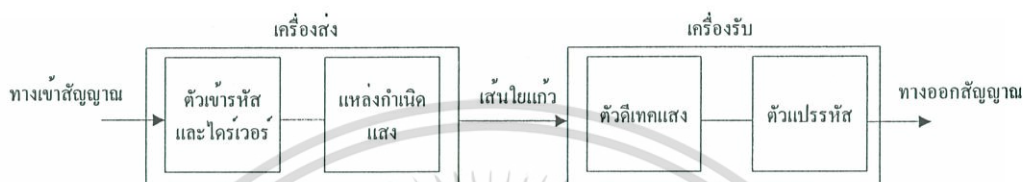
#### 3.1.1 การสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง

อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการสื่อสารโดยเส้นใยแก้วนำแสงได้แก่ เครื่องรับส่งแสง, เส้นใยแก้วนำแสง, ตัวคอนเนคเตอร์ (Connector) และตัวคัปเปอ์ (Coupler)[3] ดังรูปที่ 3.1

ส่วนของวงจรเข้ารหัสและดีโคเดอร์ จะเป็นส่วนเข้ารหัสสัญญาณในรูปแบบลักษณะต่างๆ จากนั้นจึงส่งไปยังแหล่งกำเนิดแสงซึ่งอาจเป็นเลเซอร์ หรือ LED แสงที่ถูกโมดูเลทแล้วจะถูกส่งไปในเส้นใยแก้วนำแสงโดยผ่านตัวคอนเนคเตอร์ไปยังตัวดีเทคเตอร์ ซึ่งแสงจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าและถูกขยาย ต่อจากนั้นจะถูกถอดรหัสและสัญญาณเดิมจะถูกสร้างใหม่ และ

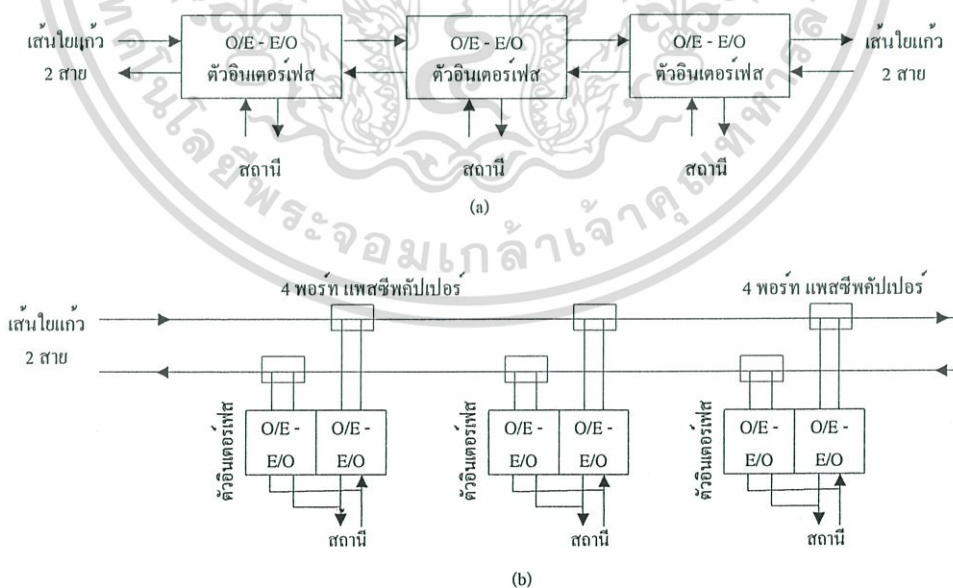
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าไม่เหมาะสมในด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

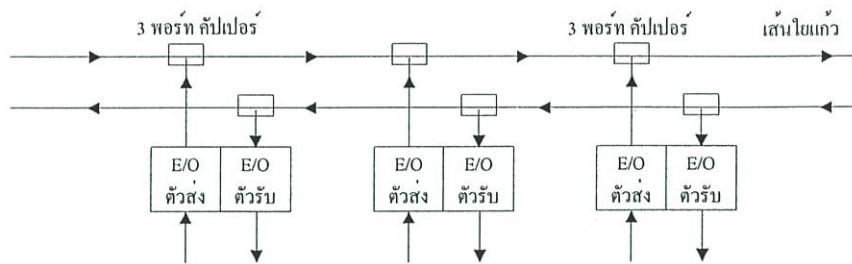
อุปกรณ์เหล่านี้จะประกอบเป็นโครงสร้างของเครือข่ายท้องถิ่นที่มีลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายที่แตกต่างกันไป ในที่นี้จะพิจารณาลักษณะโครงสร้างแบบบัส ซึ่งแบบบสนั้นสามารถแยกแยะลงไปอีกจากการใช้อุปกรณ์ คืออุปกรณ์แอดทีพ หรือแพสซีพ ในกรณีแพสซีพนั้นอินเตอร์เฟสจะรับ-ส่งสัญญาณแสงโดยตรง สำหรับกรณีแอดทีพนั้น สัญญาณแสงที่จะผ่านสู่สถานีนั้นจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าเข้าออกสู่สถานีซึ่งจะมีการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณแสงในตัวอินเตอร์เฟส ดังนั้นข้อมูลทีผ่านสถานีจึงสามารถทำการปรับแต่งได้



รูปที่ 3.1 ระบบสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสง

ลักษณะของเครือข่ายที่มีลักษณะโครงสร้างแบบบัสทั้งที่เป็นแอดทีพและแพสซีพแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โดยแอดทีพบัสจะประกอบไปด้วยแอดทีพคัปเปอริ์นแต่ละจุดสัมผัสกับเครือข่ายทิศทางละอัน ส่วนแพสซีพบัสจะประกอบด้วยแพสซีพคัปเปอริ์ที่ซับซ้อนน้อยกว่า แต่มีข้อจำกัดด้านจำนวนสถานีในเครือข่ายเนื่องจากการสูญเสียพลังงานของตัวคัปเปอริ์ ในขณะที่ความซับซ้อนของแอดทีพบัสทำให้การพัฒนาของเครือข่ายลักษณะนี้ไม่ก้าวหน้านัก





(c)

- รูปที่ 3.2 ลักษณะโครงสร้างแบบบัส (a) โครงสร้างแบบแฉกที่พบบัส 2 ทาง  
 (b) โครงสร้างแบบแพชชีพบบัส 2 ทาง  
 (c) โครงสร้างแบบลูปบัส

## 3.2 เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่น (WDM)

### 3.2.1 ความเป็นมา

จากการที่ความต้องการใช้งานแบนวิidthของเครือข่ายเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเติบโตของทราฟฟิกข้อมูลต่างๆ นอกจากนั้นรูปแบบหรือธรรมชาติของทราฟฟิกเองก็ซับซ้อนขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นเพื่อสนองต่อความต้องการข้างต้น ผู้ให้บริการส่วนใหญ่จึงปรับเปลี่ยนการใช้งานทราฟฟิกผ่านเครือข่ายแบบ TDM ที่มีต้นทุนต่อประสิทธิภาพที่สูงกว่าไปเป็นการใช้งานทราฟฟิกผ่านเครือข่ายแบบ IP แทน ซึ่งลักษณะการใช้งานจะอยู่ในรูปแบบที่ต้องการการส่งได้จำนวนมาก และสามารถทำการติดตั้งให้ใช้งานได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งกับการใช้งานด้วย WDM

โดยในช่วงแรก ในปี 1980 นั้น บริษัทด้านโทรคมนาคมทั้งหลายยังคงใช้งานเส้นใยแก้วนำแสงแบบที่เรียกว่ามัลติโหมด (Multimode Fiber) อยู่ และได้มีการทดสอบโดยการใส่แสงที่มีความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร และ 1300 นาโนเมตร เข้าไปที่ด้านหนึ่งโดยใช้ไฟร์คอปเปิลอร์แบบง่ายๆ เป็นตัวรวมแสง ส่วนที่ปลายทางก็นำคอปเปิลอร์อีกตัวหนึ่งมาทำการแยกแสงออกเป็นสองทางเพื่อส่งไปยังเส้นใยแก้วนำแสงสองเส้น โดยที่แต่ละเส้นจะมีตัวดีเทคเตอร์ที่มีความไวต่อความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร และ 1300 นาโนเมตร อยู่ตามลำดับ นอกจากนี้ก็ยังมีตัวกรองสัญญาณที่ปลายทั้งสองด้านเพื่อกรองสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการออกไปด้วย ดังนั้นตัวดีเทคเตอร์แต่ละตัวจึงสามารถรับเอาเฉพาะสัญญาณที่ต้องการออกมาได้

ต่อจากนั้นในช่วงปลายของยุค 80 จึงได้มีการนำเส้นใยแก้วนำแสงแบบซิงเกิลโหมด (Single Mode Fiber) มาใช้งาน ซึ่งเส้นใยแก้วนำแสงแบบนี้จะถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับความยาวคลื่นช่วง 1300 นาโนเมตร หรือ 1550 นาโนเมตร โดยในยุคนี้ผู้ผลิตอุปกรณ์คอปเปิลอร์ก็

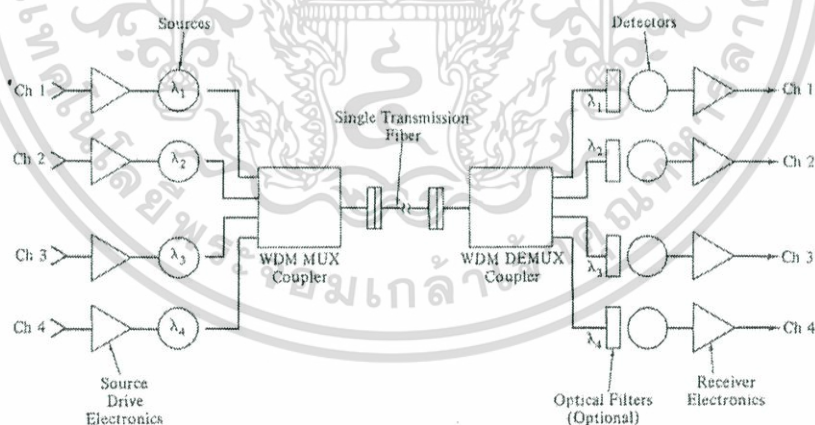
สามารถผลิตอุปกรณ์ที่สามารถแยกความยาวคลื่นทั้งสองออกจากกันได้ ซึ่งก็เป็นพื้นฐานการใช้งาน WDM ในยุคต่อไป

### 3.2.2 การมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่น

เทคโนโลยีการมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่นได้นำเสนอการมัลติเพล็กซ์ในอีกรูปแบบหนึ่ง ที่ในการส่งข้อมูลนั้น ข้อมูลในแต่ละช่องสัญญาณสามารถส่งไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวกันได้ โดยแต่ละช่องสัญญาณจะถูกแยกกันด้วยความยาวคลื่น วิธีนี้จะช่วยลดปริมาณการใช้งานของเส้นใยแก้วนำแสงลงได้

#### การทำงานของมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่น

รูปที่ 3.3 จะแสดงลักษณะการทำงานของมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่น[4] คือแต่ละช่องสัญญาณจะมีแหล่งกำเนิดแสง เช่น เลเซอร์ หรือ LED โดยแหล่งกำเนิดแสงแต่ละตัวจะมีความยาวคลื่นต่างกัน จากนั้นความยาวคลื่นหลายๆความยาวคลื่นจะถูกมัลติเพล็กซ์รวมกันไปบนเส้นใยแก้วนำแสงเส้นเดียวกันด้วยตัวคัปเปอ์ และที่ปลายทางก็จะมีตัวคอปเปลอร์ที่ทำหน้าที่ในการแยกแสงหรือสัญญาณออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ ด้วยการส่งออกด้วยมุมที่ต่างกันไปยังเส้นใยแก้วนำแสงที่ด้านรับ ในกรณีที่ตัวคอปเปลอร์ไม่สามารถแยกแยะสัญญาณรบกวนออกได้หมด อาจมีการนำตัวกรองความถี่มาช่วยอีกขั้นตอนหนึ่งเพื่อคุณภาพที่ดีขึ้นของสัญญาณ



รูปที่ 3.3 การทำงานของมัลติเพล็กซ์ด้วยความยาวคลื่น

### 3.3 ประเภทของ WDM

WDM เทคโนโลยีนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 เทคนิค[5] คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 Wavelength-Selective WDM

เทคนิค Wavelength-Routed หรือ Wavelength-Selective ของ WDM สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 แหล่งกำเนิดแสงทางด้านส่งจะทำงานกันที่ความถี่ต่างกัน กำลังในการส่งสัญญาณโดยทางอุดมคติแล้วจะเป็นผลรวมกำลังส่งของทุกๆตัวส่งรวมกันโดยไม่มีการสูญเสียของสัญญาณและทางด้านรับซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดีมัลติเพล็กซ์นั้นจะทำการแยกแต่ละความยาวคลื่นไปยังตัวรับแต่ละตัว และโดยทางอุดมคติแล้วการแยกแต่ละความยาวคลื่นไปยังตัวรับแต่ละตัวนั้นถือว่าไม่มีการสูญเสียของสัญญาณเช่นเดียวกัน ในทางทฤษฎีเราอาจถือได้ว่าการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์นั้นมีความสูญเสียของสัญญาณต่ำ เนื่องจากกำลังส่งที่เกิดขึ้นในแต่ละความยาวคลื่นนั้นจะส่งไปยังเส้นทางที่ต้องการเพียงทางเดียว คือแต่ละความยาวคลื่นก็จะถูกส่งไปยังเส้นทางที่ต่างกัน และถ้าไม่คำนึงถึงความสูญเสียของสัญญาณที่เกิดจากการรบกวนกันของสัญญาณ เราจะได้

$$P_{out}(\lambda_j) = P_{in}(\lambda_j) \quad (3.1)$$

แสงที่หลุดรอดจากช่องสัญญาณหนึ่งไปยังช่องสัญญาณอื่นๆนั้น ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนที่เรียกว่า Crosstalk โดยเฉพาะในระบบที่เป็นการสื่อสารแบบหลายช่องทาง โดย Crosstalk-CT ที่เกิดจากช่องสัญญาณ  $j$  ไปรบกวนช่องสัญญาณ  $i$  ในหน่วยเดซิเบล สามารถแสดงได้ดังสมการ

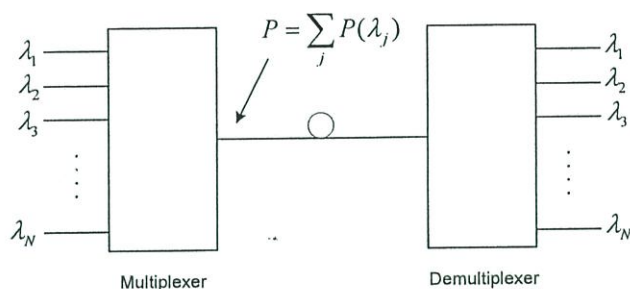
$$CT_{ij} = 10 \log\left(\frac{P_{ij}}{P_{ii}}\right) \quad (3.2)$$

เมื่อ  $P_{ij}$  คือกำลังส่งที่วัดได้ในช่องสัญญาณ  $i$  เมื่อมีเพียงช่องสัญญาณ  $j$  เท่านั้นที่ทำการส่งสัญญาณในขณะนั้น และ  $P_{ii}$  เป็นกำลังในการส่งสัญญาณในช่องสัญญาณ  $i$  เมื่อช่องสัญญาณ  $i$  เป็นเพียงช่องสัญญาณเดียวที่ทำการส่ง ค่าของ Crosstalk จะสามารถแสดงได้ทั้งในรูปแบบของการเปรียบเทียบเป็นคู่ หรือค่าโดยรวม คือ

$$CT_{total} = 10 \log\left(\frac{\sum_j P_{ij}}{P_{ii}}\right) \quad (3.3)$$

โดยค่าในส่วนที่เป็นเศษของสมการที่ 3.3 คือผลรวมของกำลังส่งที่เกิดจากช่องสัญญาณอื่นๆที่วัดได้ในช่องสัญญาณ  $i$

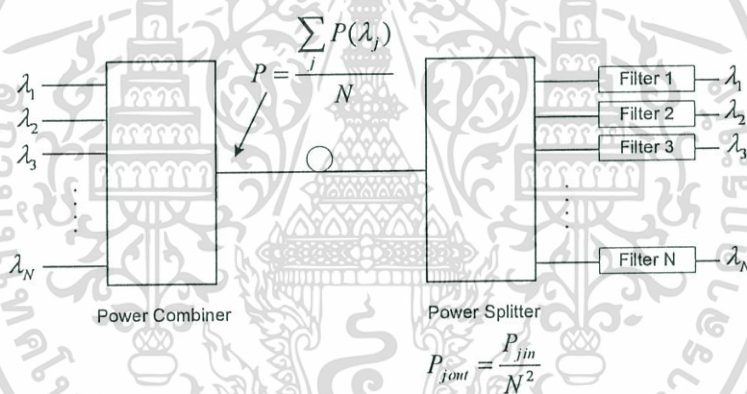
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เทคนิค Wavelength-Selective WDM

### 3.3.2 Broadcast-and-Select WDM

เทคนิค Broadcast-and-Select หรือ Broadband สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ด้วยกรรมวิธีนี้กำลังในการส่งสัญญาณจะเกิดจากผลรวมกำลังส่งทั้งหมดของแหล่งกำเนิดแสงที่ด้านส่ง และเมื่อถึงปลายทางผลรวมของกำลังส่งทั้งหมดนี้ก็จะถูกแบ่งไปยังตัวรับแต่ละตัว



รูปที่ 3.5 เทคนิค Broadcast-and-Select WDM

จากรูปที่ 3.5 ตัวส่งแต่ละตัวจะถูกกำหนดให้ทำงานที่ความยาวคลื่นที่กำหนดไว้ จากนั้นทุกๆความยาวคลื่นก็จะถูกส่งกระจายไปยังตัวรับทุกตัว ซึ่งตัวรับจะต้องมีส่วนที่ทำหน้าที่ในการแยกแยะช่องสัญญาณ สัญญาณที่ส่งมายังตัวรับก็จะถูกกรองเอาเฉพาะความยาวคลื่นที่ต้องการแล้วจึงส่งผ่านสัญญาณนั้นไปยังตัวดีเทคเตอร์ (การทำงานจะคล้ายคลึงกับการส่งสัญญาณของระบบ TV Broadcast) นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังสามารถเลือกรูปแบบของตัวส่งให้เป็นแบบที่สามารถทำงานที่ความยาวคลื่นใดๆก็ได้ (Tunable Transmitter) ในขณะที่ทางตัวรับจะทำงานที่ความยาวคลื่นที่กำหนด (Fixed Receiver) หรืออาจเป็นในลักษณะที่ตัวส่งและตัวรับสามารถที่จะทำงานที่ความยาวคลื่นใดๆได้ทั้งคู่ (Tunable Transceiver) ก็เป็นได้

ในระบบเหล่านี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ทำหน้าที่ในการแยกแยะและรวมสัญญาณ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณในขั้นตอนนี้เป็นปริมาณ  $1/N$  ในอุปกรณ์แต่ละตัว[5] และความสูญเสียของสัญญาณจะเป็น  $1/N^2$  (เมื่อ  $N$  คือจำนวนของตัวรับ-ส่ง) ดังนั้นความสูญเสียของสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณโดยไม่คำนึงถึงความสูญเสียของสัญญาณที่เกิดจากการกวนกันของสัญญาณแล้ว จะแสดงได้ดังสมการ

$$P_{out}(\lambda_j) = \frac{P_{in}(\lambda_j)}{N^2} \quad (3.4)$$

ความสูญเสียของสัญญาณที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกแยะสัญญาณมีค่า  $1/N$  หรือ  $10 \log N$  เดซิเบล ซึ่งอาจมีผลเสียต่อระบบอย่างมากถ้าไม่มีอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงมาช่วย ซึ่งถือเป็นข้อดีอย่างหนึ่งของเทคนิคนี้ นอกจากนั้นเทคนิคนี้ยังเป็นที่นิยมใช้ในทางทหารเนื่องจากความคล่องตัวของระบบ สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นที่ใช้ในการรับ-ส่งได้อย่างสะดวกและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบการส่งสัญญาณ

### 3.4 ตัวมัลติเพล็กซ์เซอร์

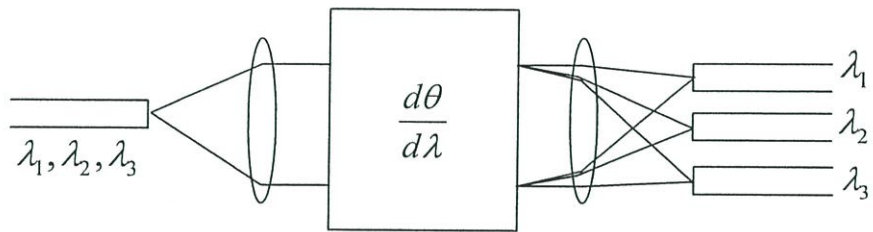
ระบบ WDM นั้นจะมีเทคนิคในการมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์ที่หลากหลาย ซึ่งรวมถึงเกรตติงและตัวกรองสเปคตรัม โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการแยกความยาวคลื่นมี 2 ประเภท คือ อุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุมและอุปกรณ์ฟิลเตอร์

#### 3.4.1 อุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุม

อุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุม เช่น ปริซึม และ เกรตติง เป็นอุปกรณ์ที่ส่งผ่านหรือสะท้อนแสงที่มุม ซึ่งขึ้นกับค่าความยาวคลื่นของแสงตกกระทบ ค่าพารามิเตอร์หลักที่อธิบายถึงคุณลักษณะที่สำคัญของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ ความสูญเสียส่วนเกินและการกระจายมุมของอุปกรณ์ ความสูญเสียส่วนเกินเป็นความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการผ่านเข้าสู่อุปกรณ์แล้วมีความสูญเสียมากกว่า  $1/N$  ซึ่งเป็นค่าที่ควรเป็น เนื่องจากว่าอุปกรณ์เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่มีช่วงความถี่กว้าง ความสูญเสียส่วนเกินนี้จึงควรจะถูกระบุไว้ที่ค่าความยาวคลื่นนั้นๆ

การกระจายเชิงมุมของอุปกรณ์ เป็นค่าประเมินการกระจายของมุม  $d\theta$  ระหว่างสองลำแสงซึ่งตกกระทบในเวลาเดียวกันที่อินพุตโดยมีความแตกต่างของความยาวคลื่น  $d\lambda$  การกระจายเชิงมุมจะเป็น  $d\theta/d\lambda$  และการกระจายเชิงมุมนี้สามารถถูกเปลี่ยนกลับได้จากการใช้เลนส์ช่วยในการรวมกันของแสงดังรูปที่ 3.6

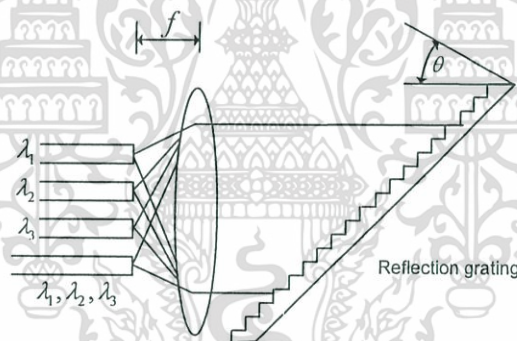
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ระบบการแยกความยาวคลื่นโดยอุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุมและเลนส์

อุปกรณ์แบบกระจายเชิงมุมต้องการตกกระทบของแสง ในรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นเลนส์ตัดขวางแสงจากอินพุตเส้นใยแก้วนำแสง ที่ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงจะอยู่ในแนวระนาบส่วนหน้าของเลนส์ ส่วนอุปกรณ์แบบกระจายอยู่ในแนวระนาบส่วนหลังของเลนส์

ในระบบการกระจายเชิงมุมส่วนใหญ่ เกรตติ้งเป็นอุปกรณ์ซึ่งถูกใช้ร่วมกับเลนส์ดังรูปที่ 3.7 เกรตติ้งจะเป็นส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ในการสะท้อนและส่งผ่านโดยที่พื้นผิวจะมีลักษณะเป็นลายเส้นฝังอยู่ และโดยทั่วไปอุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์นี้จะมีค่าความสูญเสียส่วนเกินอยู่ที่ 1-3 เดซิเบล มีขนาดความห่างของแต่ละช่องสัญญาณเป็นค่า 1-10 นาโนเมตร



รูปที่ 3.7 การทำงานของเกรตติ้งในตัวรับ WDM

### 3.4.2 อุปกรณ์ฟิลเตอร์

อุปกรณ์ฟิลเตอร์จะทำการสะท้อนหรือส่งผ่านแสงตามค่าความยาวคลื่น อุปกรณ์ฟิลเตอร์ที่นำมาใช้เพื่อแยกความยาวคลื่นนั้นมีหลากหลายประเภท โดยในตารางที่ 3.1 จะแสดงค่าแบนวิดท์ที่สามารถใช้กับประเภทของตัวกรองต่างๆ

#### 3.4.2.1 Interference ฟิลเตอร์

ฟิลเตอร์ทางแสงส่วนใหญ่ที่ใช้วิธีมักเป็นลักษณะของการใช้งานทางไฟฟ้ามากกว่า เพื่อคุณภาพในการสะท้อนที่ค่าความยาวคลื่นที่ต้องการและลดปริมาณความสูญเสียของสัญญาณในการทำงานของฟิลเตอร์ ฟิลเตอร์จะยอมให้ค่าความยาวคลื่นค่าหนึ่งส่งผ่านไปได้ (ที่มีการตอบสนองแบบเรโซแนนซ์) และจะสะท้อนค่าความยาวคลื่นอื่นๆเป็นค่ามากกว่า 10% เทียบจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความยาวคลื่นศูนย์กลางของฟิลเตอร์ สำหรับในการใช้งานเมื่อมีมากกว่า 2 ช่องสัญญาณ การจัดการฟิลเตอร์ให้เหมาะสมก็เป็นเรื่องที่ต้องพิจารณาถึงความสูญเสียของสัญญาณ ในทางปฏิบัติจำนวนของฟิลเตอร์ที่นำมาใช้งานก็มีข้อจำกัด อย่างเช่นในระบบบรอดแบนด์จะจำกัดอยู่ที่ 5-6 ช่องสัญญาณ เพราะจำนวนฟิลเตอร์ที่มากขึ้นนำไปสู่ความสูญเสียของสัญญาณเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าแบนด์วิดท์ที่ใช้ในเทคนิคการกรองต่างๆ

Method	Typical Channel Bandwidth
Interference Filters	5 nm
Fabry-Perot Filter	0.1-10 nm
Tuned Semiconductor Amplifier	1-10 GHz
Heterodyne Receiver	1-10 GHz

#### 3.4.2.2 ฟิลเตอร์เรโซแนนซ์แบบ Fabry-Perot

ตัวเรโซแนนซ์แบบ Fabry-Perot เป็นฟิลเตอร์ทางแสงแบบแบนด์พาสที่ยอมให้ส่งผ่านความยาวคลื่นที่มีความถี่ค่าหนึ่งและสะท้อนส่วนอื่นๆ ความถี่ในการส่งผ่านของฟิลเตอร์เกิดขึ้นทุก  $c/2L$  เมื่อ  $L$  คือ ช่องว่างระหว่างกระจกสะท้อนของตัวเรโซแนนซ์

#### 3.4.2.3 ฟิลเตอร์แบบอุปกรณ์ขยายกึ่งตัวนำ

เลเซอร์ไดโอดที่ถูกบีบต่ำกว่าค่าเทรชโลด์จะเป็นตัวขยายที่สามารถปรับค่าความถี่ที่จะให้ส่งผ่านได้โดยค่าความถี่ที่จะให้ส่งผ่านนั้นจะเป็นเพียงช่วงแบนด์แคบๆ ความถี่ศูนย์กลางจะถูกกำหนดได้จากส่วนประกอบของวัสดุ ซึ่งอาจใช้เลเซอร์แบบกระจาย (DFB : Distributed-Feedback Laser) หรือเลเซอร์สะท้อนกลับแบบกระจาย (DFR : Distributed-Feedback Reflector Laser) ที่มีค่าอิมพีแดนซ์แบบหลากหลายเพื่อปรับค่าความยาวคลื่นที่ถูกขยายเพิ่มขึ้น

#### 3.4.2.4 ฟิลเตอร์ไฟฟ้าแบบ Coherent Detection

เทคนิคนี้จะถูกนำมาใช้เมื่อแหล่งกำเนิดแสงมีเส้นที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่เป็นไปได้ ในเทคนิคนี้ สัญญาณจะถูกผสมเข้ากับสัญญาณอ้างอิงที่เป็นค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าความถี่ที่กำหนดไว้ในเลเซอร์ภายใน สัญญาณที่ผสมนี้จะสร้างเป็นความถี่ใหม่ขึ้นมา ระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณของสัญญาณที่ดีจะถูกกำหนดได้จากค่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณที่ถูกโมดูเลต และวิธีการจัดเรียงทางด้านตัวรับ

### 3.5 แหล่งกำเนิดแสง

ในระบบ WDM แหล่งกำเนิดแสงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญของระบบ แหล่งกำเนิดแสงจะต้องมีความคงที่และมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนเพื่อใช้ในการเลือกค่าความยาวคลื่นที่ต้องการได้ ในตารางที่ 3.2 จะแสดงถึงความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงที่จะกล่าวถึงในที่นี้

ตารางที่ 3.2 ความกว้างสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่างๆ

Type	Typical Spectral Width	Typical Spectral Width
LED	50-100 nm (or more)	5000-10000 GHz
Fabry-Perot Laser	3-6 nm	300-600 GHz
DFB Laser	<0.01 nm	10-100 MHz
External Cavity Laser		<1 MHz

#### 3.5.1 LED

ค่าแบนวิดท์ที่กว้างของ LED นั้นมักจะถูกพิจารณาเป็นข้อด้อยเนื่องจากทำให้เกิดการกระจายของเส้นใยแก้ว แต่เราก็สามารถนำไปผ่านสเปกตรัมฟิลเตอร์เพื่อทำให้ความกว้างของสเปกตรัมของ LED แคบลงได้ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า Spectral Slicing หลักการนี้มีข้อดีคือเราสามารถนำ LED ซึ่งราคาไม่แพงนี้เป็นแหล่งกำเนิดแสงได้ในตัวส่งหลายๆตัวทางด้านส่ง จากนั้นจึงใช้ฟิลเตอร์มาช่วยในการเลือกค่าความยาวคลื่นที่จะใช้งาน แต่ฟิลเตอร์นี้ก็จะไปลดระดับกำลังส่งที่ได้จากแหล่งกำเนิด LED ซึ่งทำให้ค่าแบนวิดท์ลดลงไปด้วย วิธีการนี้ในทางปฏิบัติแล้วจึงเหมาะสมสำหรับการสื่อสารที่มีอัตราการส่งข้อมูลต่ำและระยะทางสั้น

#### 3.5.2 เลเซอร์ไดโอดแบบ Fabry-Perot

เลเซอร์ไดโอดแบบนี้โดยทั่วไปจะมีรูปแบบการสันสะท้อน 6-8 แบบ และมีช่องว่างเป็นค่า  $c/2L$  เฮิร์ตซ์ สำหรับเลเซอร์ชนิดนี้ค่าความยาวคลื่นศูนย์กลางมีค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้อยู่ที่  $\pm 3$  นาโนเมตรและมีความกว้างของเส้นที่ 6 นาโนเมตร ค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้ของตัวมัลติเพล็กซ์และดีมัลติเพล็กซ์จะเป็น  $\pm 1$  นาโนเมตร ดังนั้นช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณที่ดีที่สุดจะเป็น 14 นาโนเมตร และถ้ากำหนดให้ช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับความกว้างของช่องสัญญาณเองจะพบว่าในหนึ่งช่องสัญญาณเราจะต้องใช้ขนาดถึง 28 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.3 เลเซอร์ไดโอด DFB

เลเซอร์ไดโอดชนิดนี้จะมีค่าความกว้างสเปกตรัมของสัญญาณอยู่ที่ 10-100 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดสเปกตรัมของสัญญาณเองที่อัตราการส่งข้อมูลสูงๆ หรือความยาวคลื่นที่สูงโด่งขึ้นมา (Chirp) ที่เกิดที่เอาท์พุทของเลเซอร์เมื่อเกิดการสั่น ความกว้างของช่องสัญญาณจะประมาณได้จากค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้ของความยาวคลื่นศูนย์กลางของแหล่งกำเนิดที่มีค่า  $\pm 0.5$  นาโนเมตร ค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้ของ Chirp ซึ่งมีค่า  $\pm 0.2$  นาโนเมตร และค่าความเปลี่ยนแปลงที่สามารถยอมรับได้ของฟิลเตอร์ซึ่งมีค่า  $\pm 1$  นาโนเมตร ดังนั้นความกว้างของช่องสัญญาณจะอยู่ที่ประมาณ 3.5 นาโนเมตร และถ้ากำหนดให้ช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับความกว้างของช่องสัญญาณ จะได้หนึ่งช่องสัญญาณมีความกว้าง 7 นาโนเมตร

### 3.5.4 เลเซอร์ที่กำหนดค่าความถี่

เลเซอร์ชนิดนี้สามารถมีขนาดเส้นที่เล็กถึง 5 เมกะเฮิรตซ์ได้ ซึ่งขนาดความกว้างของเส้นที่มีค่าน้อยนี้ทำให้แบนด์วิธของช่องสัญญาณนั้นขึ้นอยู่กับค่าแบนด์วิธ ของสัญญาณโดยตรง โดยที่ค่าขนาดความกว้างของเส้นของแหล่งกำเนิดแสงไม่มีผลเลย ในกรณีนี้ การดีมัลติเพล็กซ์จะไม่สามารถใช้ฟิลเตอร์แบบที่กำหนดตายตัวได้ ต้องใช้ฟิลเตอร์แบบที่สามารถปรับเปลี่ยนได้แบบแบนด์วิธแคบ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าค่าความยาวคลื่นที่ส่งผ่านมาจากฟิลเตอร์นั้นจะตรงกับความยาวคลื่นที่มาจากแหล่งกำเนิด

## 3.6 ระบบเครือข่ายแบบหลายความยาวคลื่น

ระบบ WDM เป็นระบบเครือข่ายที่ทำงานที่หลายๆความยาวคลื่น ดังนั้นอุปกรณ์ตัวรับ-ส่งจึงอาจจะต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นไปตามที่ต้องการได้

### 3.6.1 ตัวส่งที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้

กรรมวิธีในการปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นในตัวส่งที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้จากกล่าวพอสังเขปดังนี้

#### 3.6.1.1 การปรับเปลี่ยนโดยใช้อุณหภูมิหรือกระแส

ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงในตัวส่งจะสามารถถูกปรับเปลี่ยนได้โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวส่ง ซึ่งจะสามารถปรับความยาวคลื่นได้ถึงประมาณ 0.08 นาโนเมตรต่อหนึ่งองศาเซลเซียส และในกรณีที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบเลเซอร์ DFB อาจทำได้ถึง 1 นาโนเมตร หรือการเปลี่ยนแปลงกระแสขั้วเลเซอร์ก็สามารถปรับความยาวคลื่นได้เช่นกัน โดยจะสามารถปรับได้ประมาณ 200 เมกะเฮิรตซ์ต่อมิลลิแอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.1.2 การปรับเปลี่ยนด้วย DFB และ DFR

ในการปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นแบบครั้งละมากๆ อาจทำได้โดยการรวมเลเซอร์ DFB กับ ส่วนที่ควบคุมเฟสและส่วนที่แอกทีฟ หรือกระทำโดยการปรับเปลี่ยนในระดับของโครงสร้างของตัวชิพที่ทำหน้าที่ในการควบคุมตัวเลเซอร์เพื่อที่จะให้เลเซอร์นั้นสามารถทำการจ่ายได้หลายๆความยาวคลื่น

### 3.6.1.3 การปรับเปลี่ยนโดยใช้อุปกรณ์ภายนอก

นอกจากนั้นเรายังสามารถใช้เลเซอร์แบบ Fabry-Perot กับอุปกรณ์ภายนอกแบบที่เป็นโพรงหรือรูที่มีเกรตติงเคลือบที่ติดอยู่ การปรับเปลี่ยนโดยเทคนิคนี้สามารถปรับได้ครั้งละมากกว่า 55 นาโนเมตร และด้วยความเร็วในการปรับเปลี่ยนนี้จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องด้วย

### 3.6.2 ตัวรับที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้

ในการปรับแต่งที่ตัวรับ ฟิลเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นได้นั้นสามารถเป็นฟิลเตอร์แบบต่างๆเหล่านี้

#### 3.6.2.1 ฟิลเตอร์แบบหลายชั้น

ฟิลเตอร์ชนิดนี้จะประกอบไปด้วยหลายๆชั้น แต่ละชั้นก็จะมีขนาดความหนาแตกต่างกัน ในการปรับเปลี่ยนจะทำการปรับฟิลเตอร์ ด้วยวิธีการนี้จะสามารถครอบคลุมได้ถึง 270 นาโนเมตร โดยมีพาสแบนด์อยู่ที่ 7 นาโนเมตร

#### 3.6.2.2 ฟิลเตอร์แบบ Fabry-Perot Interferometer

การปรับเปลี่ยนในวิธีนี้จะกระทำโดยการเปลี่ยนความยาวของโพรงหรือรูของฟิลเตอร์ ซึ่งจากการทดลองสามารถรองรับได้ถึง 30 ช่องสัญญาณ โดยในการปรับเปลี่ยนนั้นจะใช้เวลาเพียงไม่กี่ไมโครเซคคัน

#### 3.6.2.3 เลเซอร์แบบ DFB ที่ทำงานที่ต่ำกว่าค่าเทรโซลด์

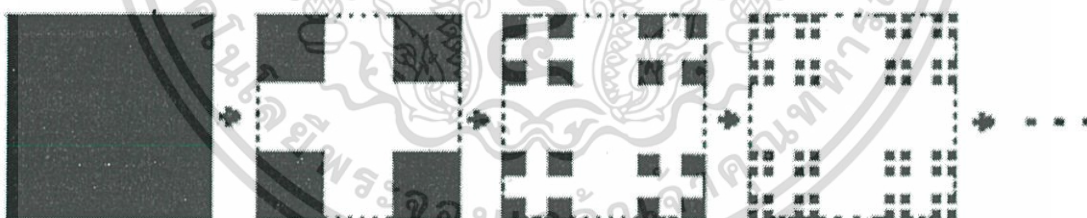
เลเซอร์แบบ DFB ที่ทำงานที่ต่ำกว่าค่าเทรโซลด์นี้จะทำหน้าที่คล้ายเป็นตัวขยายสัญญาณ และในที่นี้ทำหน้าที่เป็นฟิลเตอร์ที่ยอมให้แบนด์แคบๆผ่านได้ โดยในการปรับเปลี่ยนจะกระทำได้โดยการทำงานร่วมกับส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมทางเฟส ซึ่งช่วงเวลาในการตอบสนองทำได้เร็วและมีช่วงในการปรับเปลี่ยนอยู่ที่ 71 กิกะเฮิรซ์ สำหรับในการทำงานของ 10 ช่องสัญญาณ

## ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง (Self-Similar Traffic)

ในการออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ บางครั้งเราพบว่าผลลัพธ์ของการทำนายจากการวิเคราะห์โดยระบบมีความแตกต่างจากประสิทธิภาพที่วัดได้จริงมาก แต่ก่อนการวิเคราะห์ระบบควมจะใช้รูปแบบของทราฟฟิกแบบพัวซอง (Poisson) ซึ่งพบว่าผลลัพธ์จากการทำนายมีความแตกต่างจากประสิทธิภาพจริงที่เกิดขึ้น เนื่องจากทราฟฟิกแบบพัวซองเป็นทราฟฟิกที่ขึ้นกับช่วงเวลาสั้นๆ และที่สเกลของเวลาที่ยาวๆ รูปแบบของทราฟฟิกแบบพัวซอง จะมีลักษณะราบเรียบไม่ใกล้เคียงกับทราฟฟิกที่เกิดขึ้นจริงในระบบการสื่อสารข้อมูล หลายปีมานี้จึงได้มีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับรูปแบบทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง (Self-Similar Traffic) มากขึ้น

### 4.1 ความคล้ายคลึงตัวเอง (Self-Similarity)

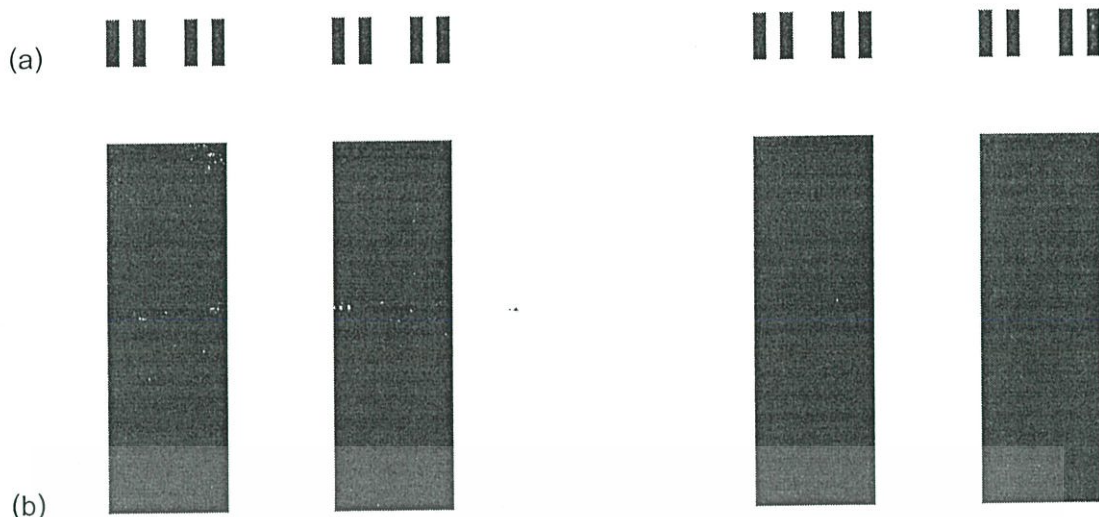
เราสามารถอธิบายปรากฏการณ์ความคล้ายคลึงตัวเองนี้ได้ด้วยวัตถุหรือสิ่งของต่างๆ ไป เช่น รูปร่างต่างๆ ไป หรือการเปรียบเทียบในเชิงของเวลา (Time Series) ซึ่งเมื่อวัตถุหรือสิ่งของนั้นๆ มีความคล้ายคลึงกันแล้ว เมื่อถูกเพิ่มหรือลดขนาดลง วัตถุนั้นๆ ก็ยังคงรักษาสภาพเดิมไว้เสมอ ดังรูปที่ 4.1 หรือแม้แต่ในการเปรียบเทียบเชิงเวลา การเพิ่มหรือลดเวลาลงก็ยังคงมีความคล้ายคลึงกันอยู่อย่างเดิมดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 วัตถุที่มีความคล้ายคลึงกัน

จากรูปที่ 4.1 สีเหลี่ยมทางด้านซ้ายมือสุดถูกลดขนาดไปในอัตราส่วน  $1/3$  ในแนวกลางของวัตถุทั้งในแนวขวางและแนวตั้ง (เป็นลักษณะเหมือนกากบาทตรงกลางวัตถุ) จะได้ดังรูปที่ 2 จากซ้ายมือ จากนั้นกระทำการเช่นเดิมต่อไปเรื่อยๆ ก็จะได้ดังรูปที่ 3 และ 4 ถัดมาทางขวามือจนถึงอนันต์ ซึ่งจะพบว่าเมื่อขยายรูปกลับมาดังเดิมก็ยังคงได้รูปร่างสีเหลี่ยมดังเดิม เช่นนี้จึงสรุปได้ว่ามีความคล้ายคลึงตัวเอง และในเชิงของเวลาก็เช่นเดียวกัน ไม่ว่าจะพิจารณาที่เวลาใดเวลาหนึ่งหรือที่ผลรวมของช่วงเวลาก็ตาม จะพบว่าเราจะยังคงได้ลักษณะเดิมๆ หรือแพทเทิร์นเดิมๆ อยู่ก็ ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นการแสดงในเชิงของเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



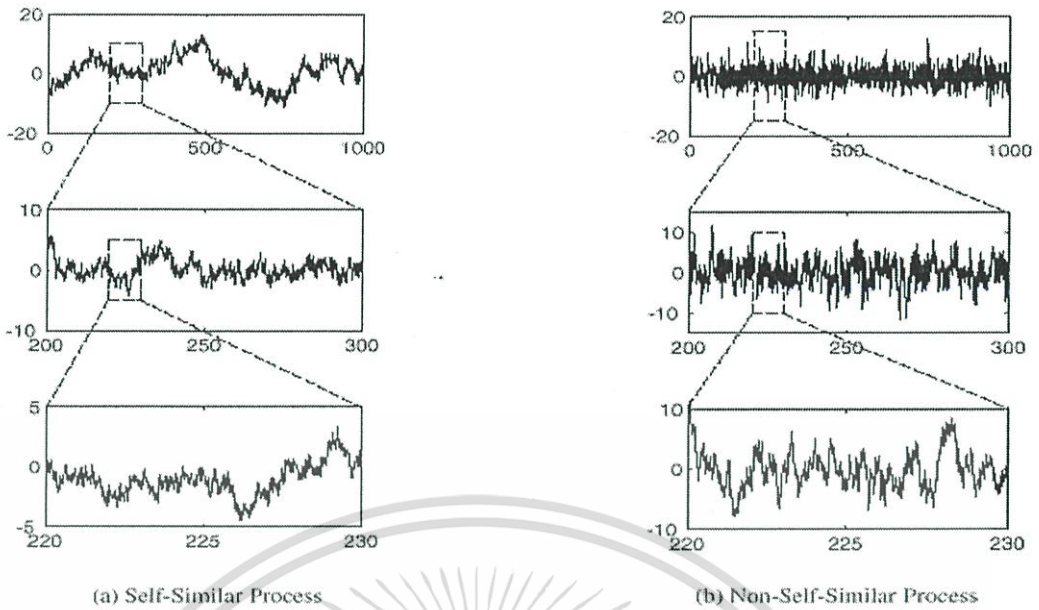
รูปที่ 4.2 แสดงความคล้ายคลึงกันในเชิงของเวลา

(a) พิจารณาที่ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง

(b) พิจารณาที่ผลรวมของช่วงเวลา

#### 4.2 ทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง

สำหรับทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองนั้นอาจสามารถกล่าวได้ว่า รูปร่างของทราฟฟิกที่มีความคล้ายคลึงตัวเองเมื่อถูกสเกลด้วยเวลา คือถูกลดหรือเพิ่มทางเวลาแล้ว ลักษณะของทราฟฟิกจะยังคงมีรูปร่างหน้าตาคล้ายคลึงกันอยู่เช่นเดิม ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 4.3 เป็นตัวอย่างทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง โดยที่แกน  $x$  แทนด้วยเวลา ส่วนแกน  $y$  แทนด้วยขนาด ซึ่งทราฟฟิกทั้งในรูป (a) และรูป (b) ถูกสเกลด้วยเวลาหรือขยายออกทางด้านเวลาด้วยค่าที่เท่าๆกัน จะพบว่ารูปร่างหน้าตาของทราฟฟิกรูปร่างสุดและรูปบนสุดของรูป (a) นั้นจะยังคงมีรูปร่างหน้าตาของทราฟฟิกคล้ายคลึงกันอยู่ ในขณะที่รูปร่างสุดของรูป (b) นั้น จะมองดูเหมือนถูกยืดออกให้ห่างขึ้น (ความหนาแน่นของทราฟฟิกลดลง) ยิ่งมีความห่างออกไปเรื่อยๆเมื่อถูกสเกลด้วยเวลาที่น้อยลง นั่นคือรูปร่างหน้าตาของทราฟฟิกจะไม่เหมือนเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับรูปร่างสุดกับรูปบนสุดดังรูป (b)[6]



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบระหว่างกราฟฟีกแบบคล้ายคลึงตัวเองและกราฟฟีกแบบไม่คล้ายคลึงตัวเอง

(a) กราฟฟีกแบบคล้ายคลึงตัวเอง

(b) กราฟฟีกแบบไม่คล้ายคลึงตัวเอง

#### 4.3 คุณสมบัติของกราฟฟีกแบบคล้ายคลึงตัวเอง

กราฟฟีกแบบคล้ายคลึงตัวเองนี้ จะมีคุณสมบัติทางสถิติอยู่ 2 รูปแบบที่สำคัญๆ คือการขึ้นกับช่วงเวลาที่ยาวๆ (Long-Range Dependent) และค่าความแปรปรวนจะมีการลดลงอย่างช้าๆตามกฎของพลังงาน (Slowly Decaying Variance) นอกจากนี้กราฟฟีกแบบคล้ายคลึงตัวเองนี้จะมีตัวแปรที่สำคัญคือ Hurst พารามิเตอร์ โดยที่ตัวแปร  $H$  หรือ Hurst พารามิเตอร์นี้เป็นตัววัดหรือตรวจสอบระดับของความคล้ายคลึงตัวเองของกราฟฟีกของลำดับเวลา ดังนั้นถ้าสังเกตด้วยเวลาแล้วกราฟฟีกยังคงคล้ายคลึงตัวเองอยู่ ค่า  $H$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1[6]

กำหนดให้  $X$  คือ Wide Sense Stationary Random Process ที่มีค่าเฉลี่ยเป็น  $\mu$ , ค่าความแปรปรวนเป็น  $\sigma^2$  และฟังก์ชันสหสัมพันธ์ตัวเอง (Auto-Correlation Function) เป็น  $\rho$  โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าดังสมการ[7]

$$\rho(\tau) \approx \tau^{-\beta} \quad \text{เมื่อ } \tau \rightarrow \infty \quad (4.1)$$

และที่  $L(\tau)$  คือการลดลงอย่างช้าๆ ที่จุดอนันต์แล้ว จะได้เป็น

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{L(x\tau)}{L(\tau)} = 1 \quad \text{ที่ } x > 0 \quad (4.2)$$

กำหนดให้  $X^{(m)}$  แทน Wide Sense Stationary Random Process ตัวใหม่ กำหนดได้จากลำดับของ  $X$  ซึ่งค่าของ  $(m)$  นี้จะมีค่าไม่ซ้ำกัน และจะได้  $X^{(m)}$  ใหม่นี้เป็น

$$X^{(m)}(t) = \frac{1}{m} (X_{tm-m+1} + X_{tm-m+2} + \dots + X_{tm}) \quad (4.3)$$

จากสมการที่ (4.3) สามารถอธิบายได้ดังนี้ ตัวอย่างเช่น กำหนดให้  $(m) = 3$  จะได้

$$X^{(3)}(t) = \frac{X_{3t-2} + X_{3t-1} + X_{3t}}{3} \quad (4.4)$$

และสำหรับทุกๆ ค่าของ  $(m)$  นี้  $X^{(m)}$  ตัวใหม่นี้สามารถเรียกได้ว่าความคล้ายคลึงกันอันดับที่สอง (Second-order Self-Similar) ซึ่งจะมีตัวแปรที่สำคัญคือตัวแปร  $H$  มีค่าเท่ากับ

$$H = 1 - \frac{\beta}{2} \quad \text{ที่ } (0 < \beta < 1) \quad (4.5)$$

ส่วนค่าสหสัมพันธ์ตัวเองจะได้เป็น

$$\rho^{(m)}(\tau) \rightarrow 0 \quad \text{เมื่อ } (m) \rightarrow \infty \text{ และ } \tau = 1, 2, 3, \dots \quad (4.6)$$

#### 4.3.1 การขึ้นกับช่วงเวลาที่ยาวๆ

การขึ้นกับช่วงเวลาที่ยาวๆ นั้นเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง โดยที่ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ตัวเองที่ลดลงอย่างช้าๆ มีค่าดังสมการ

$$\rho(\tau) = \tau^{-\beta} L(\tau) \quad \text{เมื่อ } \tau \rightarrow \infty, \quad 0 < \beta < 1 \quad (4.7)$$

ซึ่ง  $L(\tau)$  จะมีค่าลดลงอย่างช้าๆ แต่ไม่เป็นศูนย์ เมื่อ  $\tau \rightarrow \infty$  โดย  $\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{L(x\tau)}{L(\tau)} = 1$  เมื่อ  $x > 0$

สมการที่ (4.7) แสดงถึงคุณสมบัติการขึ้นกับช่วงเวลาที่ยาว ๆ โดยค่าสหสัมพันธ์ตัวเองจะลดลงแบบไฮเปอร์โบลิกเมื่อ  $\tau$  มีค่าเพิ่มขึ้น และผลรวมของค่าสหสัมพันธ์ตัวเองจะเป็น

$$\sum_{\tau} \rho(\tau) = \infty \quad (4.8)$$

ในขณะที่คุณสมบัติของการขึ้นกับช่วงเวลาที่สั้นๆจะเป็นไปในทางตรงกันข้าม คือค่าสหสัมพันธ์ตัวเองจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อ  $\tau$  มีค่าเพิ่มขึ้น และผลรวมของค่าสหสัมพันธ์ตัวเองจะมีค่าจำกัด คือ

$$\sum_{\tau} \rho(\tau) < \infty \quad (4.9)$$

#### 4.3.2 การกระจายแบบพาเรโต

การกระจายแบบพาเรโตเป็นการกระจายแบบหางหนัก (Heavy-tailed Distribution) ที่มีรูปแบบอย่างง่าย[6],[7]

ให้  $X$  เป็นตัวแปรสุ่มที่มีฟังก์ชันการกระจายสะสม (Cumulative Distribution Function : cdf) ดังนี้

$$F(x) = P[X \leq x] \quad (4.10)$$

และฟังก์ชัน cdf ประกอบ (Complementary cdf) มีค่า

$$1 - F(x) = P[X > x] \quad (4.11)$$

กล่าวได้ว่า  $F(x)$  จะมีการกระจายแบบหางหนักเมื่อถ้า[6]

$$P[X > x] \approx cx^{-\alpha} \quad \text{เมื่อ } 0 < \alpha < 2 \quad (4.12)$$

ซึ่ง  $x \rightarrow \infty$  ค่า  $c$  เป็นค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าบวก และ  $\alpha$  คือ Shape Parameter ของการกระจายแบบพาเรโต มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ซึ่งจะได้การกระจายแบบพาเรโตดังนี้

$$P[X > x] = \left(\frac{k}{x}\right)^\alpha \quad \text{เมื่อ } 0 < \alpha < 2, x \geq k \quad (4.13)$$

โดย  $k$  คือ Location Parameter ของกระจายแบบ พาวเรโต้ เป็นค่าที่บอกถึงค่าต่ำสุดที่ยังสามารถเกิดการกระจายแบบพาวเรโต้ได้ ( $x \geq k$ ) โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีค่ามากกว่า 0.75 ระบบจึงจะมีเสถียรภาพ แต่จะมีค่าไม่เกิน 1[8] ในที่นี้ให้  $k = 1$  จะได้ฟังก์ชันการกระจายสะสม (cdf) ของการกระจายแบบพาวเรโต้เป็น

$$F(x) = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^\alpha \quad (4.14)$$

และฟังก์ชันความน่าจะเป็น (pdf : Probability Density Function) ของการกระจายแบบพาวเรโต้คือ

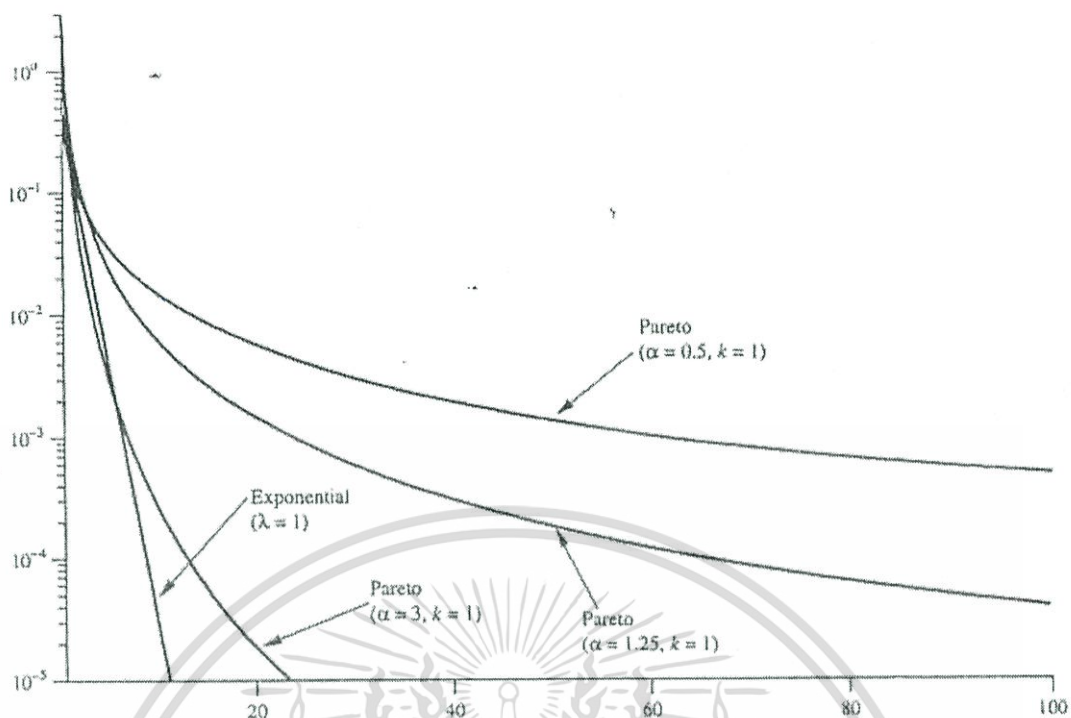
$$f(x) = \left(\frac{\alpha}{k}\right) \cdot \left(\frac{k}{x}\right)^{\alpha+1} \quad (4.15)$$

ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของการกระจายแบบพาวเรโต้จะเป็น

$$E[X] = k \cdot \frac{\alpha}{\alpha-1} \quad (4.16)$$

ในส่วนของการกระจายแบบพาวเรโต้ จะมีความน่าจะเป็นที่จะเสื่อมลงตามกฎของพลังงานนั้นช้ากว่าการกระจายแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล แสดงดังรูปที่ 4.4 ดังนั้น อัตราการเข้ามาถึงจะเป็นดังสมการ

$$\lambda = \frac{\alpha-1}{\alpha k} \quad (4.17)$$



รูปที่ 4.4 ความน่าจะเป็นที่จะเสื่อมลงตามกฎของพลังงานระหว่างการกระจายแบบพาราไต์และการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล

#### 4.3.3 การกำเนิดช่วงเวลาการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ต

จากสมการที่ (4.15) เราจะสามารถสร้างการกำเนิดช่วงเวลาระหว่างการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตที่ใช้การกระจายแบบพาราไต์ได้ โดยการแปลงผกผันกลับของฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม (cdf) โดยที่จะกำหนดให้จำนวนการสุ่มเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform Random Number) เท่ากับ  $r$  ซึ่งจะอยู่ในช่วง 0.001 ถึง 0.999 และการแปลงผกผันกลับของฟังก์ชันการกระจายสะสมแบบสุ่มของตัวแปร  $x$  ด้วย  $F(x)$  ดังนั้น เราจะได้

$$F(x) = r \quad (4.18)$$

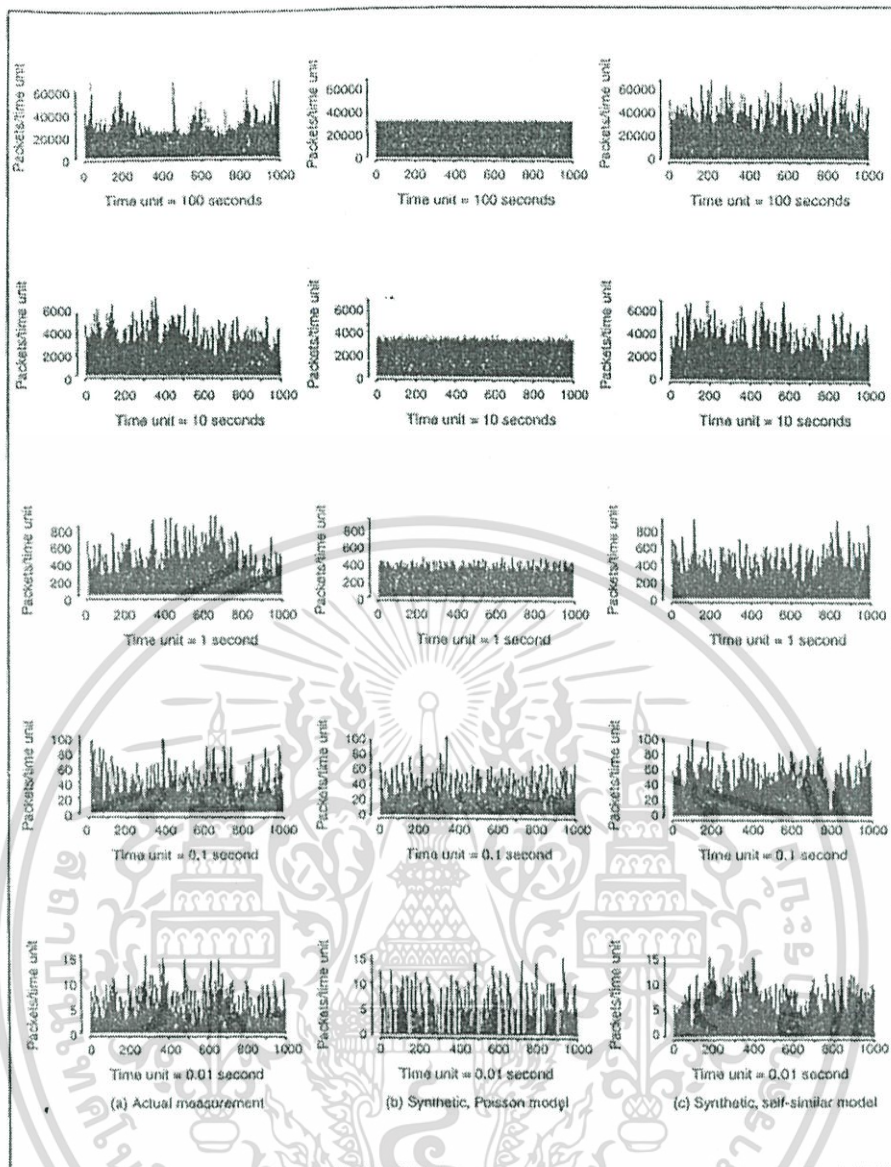
ดังนั้น การแปลงผกผันกลับของฟังก์ชันการกระจายแบบสะสมคือ

$$x = F^{-1}(r) \quad (4.19)$$

เมื่อเทียบสมการที่ (4.14) และ (4.19) จะได้การแปลงผกผันกลับของฟังก์ชันการกระจายแบบสะสม ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบระหว่างกราฟฟีกอินเทอร์เน็ตที่เกิดขึ้นจริงและกราฟฟีกที่สังเคราะห์ขึ้น

- (a) กราฟฟีกที่ได้จากการวัดจริง
- (b) กราฟฟีกที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้กราฟฟีกแบบพัวซอง
- (c) กราฟฟีกที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้กราฟฟีกแบบคล้ายคลึงตัวเอง

## บทที่ 5

# การวิเคราะห์ระบบ

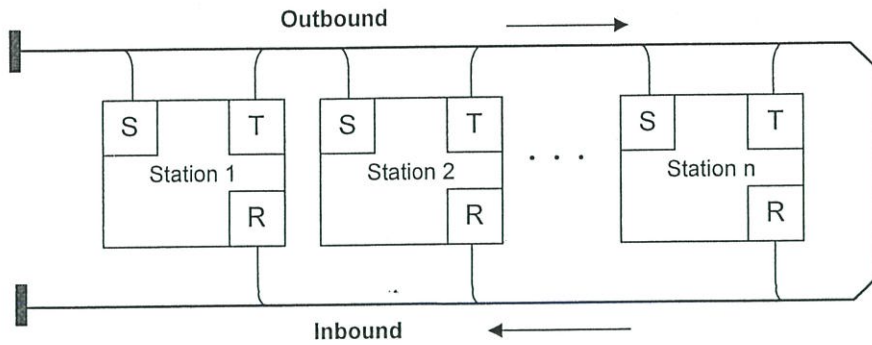
การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในที่นี้ จะกระทำด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (Simulation) การจำลอง คือการเลียนแบบเหตุการณ์ต่างๆที่อาจไม่สามารถทำการทดลองจริงได้ ซึ่งสามารถทำได้หลายแบบ เช่น การใช้สมการคณิตศาสตร์ หรือการใช้คอมพิวเตอร์

การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มักถูกนำมาใช้กับการทดลองที่ยากๆ ที่วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถทำได้ หรืออาจใช้ในการพิสูจน์วิธีคำนวณทางคณิตศาสตร์ก็ได้ โดยลักษณะเด่นของการจำลอง คือ เราสามารถเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อดูผลที่เกิดขึ้น ซึ่งในเหตุการณ์จริงนั้นอาจมีค่าใช้จ่ายมาก หรืออาจเกิดอันตรายได้ หรือแม้กระทั่งเป็นเหตุการณ์ที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริง

### 5.1 รูปแบบในการจำลอง

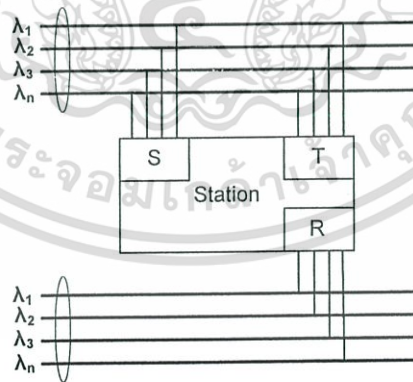
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบที่มีวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ในเครือข่ายท้องถิ่นที่มีลักษณะสถาปัตยกรรมแบบ WDM บัส โดยการวิเคราะห์จะใช้วิธีจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และมีอินพุททราฟฟิกเป็นทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเองที่เป็นรูปแบบทราฟฟิกในระบบอินเทอร์เน็ต ซึ่งได้มีการนำวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA มาใช้กับเครือข่ายท้องถิ่นแบบริงแล้ว[9] และพบว่ามีสมรรถนะของระบบเป็นที่น่าพึงพอใจ[10] และการที่จะนำวิธีการ CSMA/CA นี้มาใช้สำหรับเครือข่ายท้องถิ่นแบบ WDM บัส จำเป็นต้องมีการดัดแปลงสถาปัตยกรรมของการรับและการส่งแพ็กเก็ต เนื่องจากเครือข่ายแบบบัสนั้นด้านส่งจะอยู่คนละส่วนของสายเส้นใยแก้วนำแสงกับด้านรับ

โครงสร้างของระบบที่ทำการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นสถาปัตยกรรมของระบบที่เป็นไปได้รูปแบบหนึ่งของ WDM บัส ส่วนการกำหนดสมมติฐาน อินพุทของระบบ รวมไปถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 5.1 ลักษณะการเชื่อมต่อของเครือข่ายแบบ WDM บัส

ในรูปที่ 5.1 แสดงถึงสถาปัตยกรรมของระบบที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งเมื่อใช้กรรมวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA นั้นสถานีจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสม โดยในที่นี้แต่ละสถานีในเครือข่ายจะถูกกำหนดให้มีคุณลักษณะที่เหมือนกัน คือ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักใหญ่ๆ คือ ส่วนที่ทำการเช็คช่องสัญญาณ (Carrier Sensing : S), ภาคส่งที่สามารถปรับเลือกช่องสัญญาณที่จะทำการส่งได้ (T) และภาครับที่สามารถปรับเลือกช่องสัญญาณที่จะทำการรับได้เช่นเดียวกัน (R) เมื่อสถานีต้องการส่งข้อมูล ส่วนที่ทำการเช็คช่องสัญญาณจะทำการเช็คช่องสัญญาณตามวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA เมื่อช่องสัญญาณว่างจึงทำการส่ง โดยในการสื่อสารเส้นใยแก้วนำแสงนั้น การเดินทางของแสงจะเป็นไปในทางเดียว การส่งข้อมูลออกจากสถานีเรียกว่า Outbound ส่วนภาครับของสถานีจะเชื่อมต่อกับ Inbound ซึ่งภาครับจะทำการตรวจเช็คข้อมูลที่ได้รับมานั้นเป็นของสถานีตนเองหรือไม่ ถ้าใช่ก็จะทำการเก็บข้อมูลไว้ แต่ถ้าไม่ใช่ก็จะปล่อยให้ไป

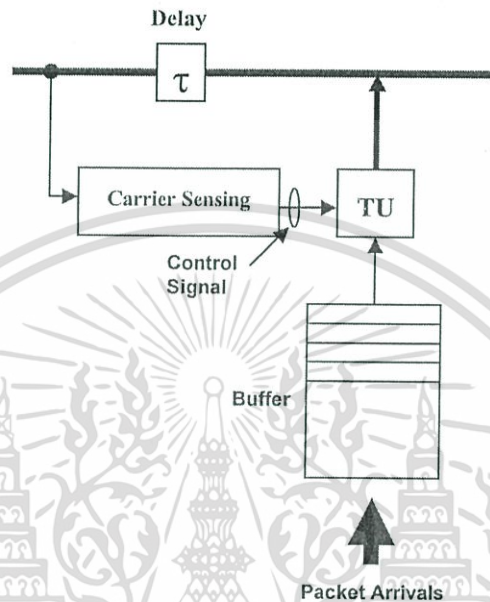


รูปที่ 5.2 โครงสร้างลักษณะของสถานีในเครือข่าย WDM บัส โดยละเอียด

ในรูปที่ 5.2 ค่า  $\lambda$  ต่างๆ จะแสดงถึงจำนวนช่องสัญญาณของระบบ ซึ่งในการเลือกช่องสัญญาณเพื่อใช้ในการรับ-ส่งนั้น ทั้งภาครับและภาคส่งของสถานีจะเป็นลักษณะที่สามารถปรับเลือกช่องสัญญาณที่จะทำการรับ-ส่งได้ (Tunable Transceiver) คือ สถานีจะสามารถใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องสัญญาณหรือ ความยาวคลื่นใดๆก็ได้ที่ว่างอยู่ในการรับ-ส่งข้อมูล โดยการปรับภาคส่งและภาครับของสถานีไปยังช่องสัญญาณนั้นๆ โดยการเข้าใช้ช่องสัญญาณจะเป็นแบบสุ่ม และการส่งข้อมูลจะส่งทีละแพ็กเก็ต (Packet-by-Packet) ด้วยกรรมวิธีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA ซึ่งรูปแบบของคิวหรือบัฟเฟอร์ของภาคส่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งเป็นลักษณะ First-in-First-out[9]



รูปที่ 5.3 การจัดคิวและบัฟเฟอร์ของด้านส่ง

## 5.2 โมเดลการออกแบบระบบ

### 5.2.1 สมมติฐานของการจำลอง

ในการจำลองเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของระบบได้มีการกำหนดสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. การส่งสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณหรือแต่ละความยาวคลื่นนั้นเป็นอิสระต่อกัน
2. การเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตข้อมูลจะเป็นไปตามกระบวนการของทราฟฟิกแบบคล้ายคลึงตัวเอง
3. ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ กำหนดให้เกิดจากการชนกันของข้อมูลเท่านั้น โดยไม่มีปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้อง
4. พารามิเตอร์ที่กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบในรูปแบบของค่าการใช้ประโยชน์ (Utilization), ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย (Average Delay) และค่าอัตราการชนกันของข้อมูล (Collision Rate)
  - ขนาดความยาวของแพ็กเก็ตข้อมูล
  - จำนวนสถานีในเครือข่าย

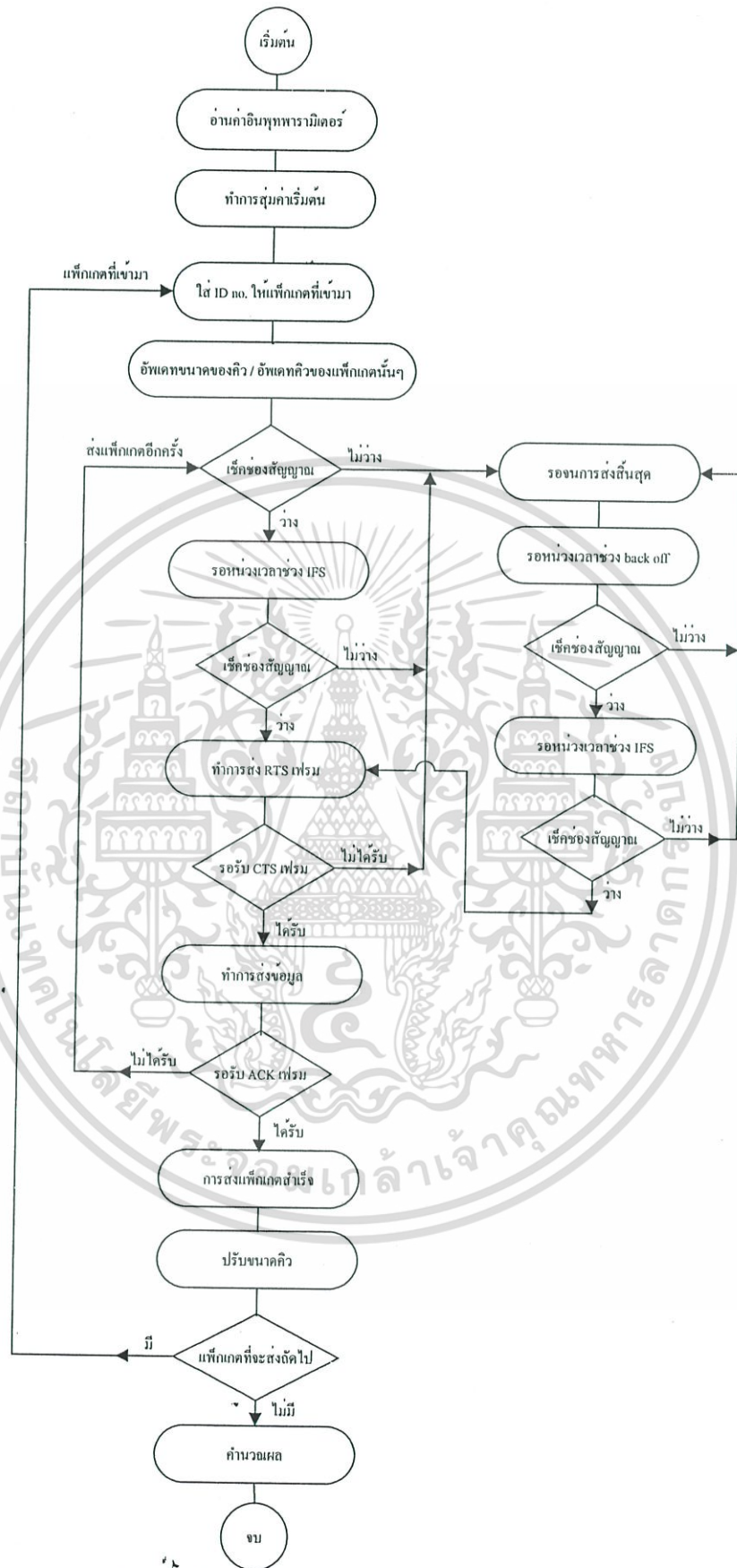
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อัตราการส่ง
- ความยาวของสายสัญญาณ

### 5.2.2 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง

รูปที่ 5.4 จะเป็นโฟลวชาร์ตอธิบายขั้นตอนการทำงานของการทำงานของการจำลองในวิทยานิพนธ์นี้

1. การเข้ามาถึงของแพ็กเก็ต เมื่อมีแพ็กเก็ตข้อมูลเข้ามาในระบบ ระบบจะทำการใส่ ID no. ให้กับแพ็กเก็ตที่เข้ามา ซึ่งจะมีเวลาที่แพ็กเก็ตเข้ามาถึงด้วย จากนั้นจะทำการปรับขนาดของคิว
2. เมื่อคิวว่าง สถานีจะทำการเช็คช่องสัญญาณว่าช่องสัญญาณว่างอยู่หรือไม่ ถ้าว่างแพ็กเก็ตข้อมูลจะถูกหน่วงเป็นช่วงเวลา IFS (Interframe Space) และถ้าช่องสัญญาณยังคงว่างอยู่หลังช่วงเวลา IFS สถานีจะทำการส่งเฟรม RTS เมื่อได้รับเฟรม CTS จากสถานีปลายทาง (สถานีรับ) จึงจะทำการส่งข้อมูล
3. จากนั้นรอรับ Ack จากสถานีปลายทาง เพื่อเป็นการยืนยันการได้รับแพ็กเก็ตข้อมูล แล้วจึงทำการปรับขนาดคิว คำนวณค่าความหน่วงที่จะใช้ในการส่งครั้งต่อไป และสถานีจะกลับไปดำเนินการตามข้อที่ 2 ถ้ามีแพ็กเก็ตที่จะทำการส่งอีก
4. ถ้าไม่ได้รับ Ack จากสถานีปลายทาง หรือช่องสัญญาณไม่ว่างหลังช่วงเวลาหน่วง IFS แพ็กเก็ตข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในบัฟเฟอร์ รอจนกว่าการส่งขณะนั้นสิ้นสุด แล้วจึงพยายามทำการส่งใหม่อีกครั้งตามข้อที่ 2
5. เมื่อไม่มีแพ็กเก็ตข้อมูลที่จะทำการส่งแล้ว ระบบจะคำนวณผล และจบการทำงาน



รูปที่ 5.4 ขั้นตอนการทำงานของระบบที่ใช้ในการจำลอง

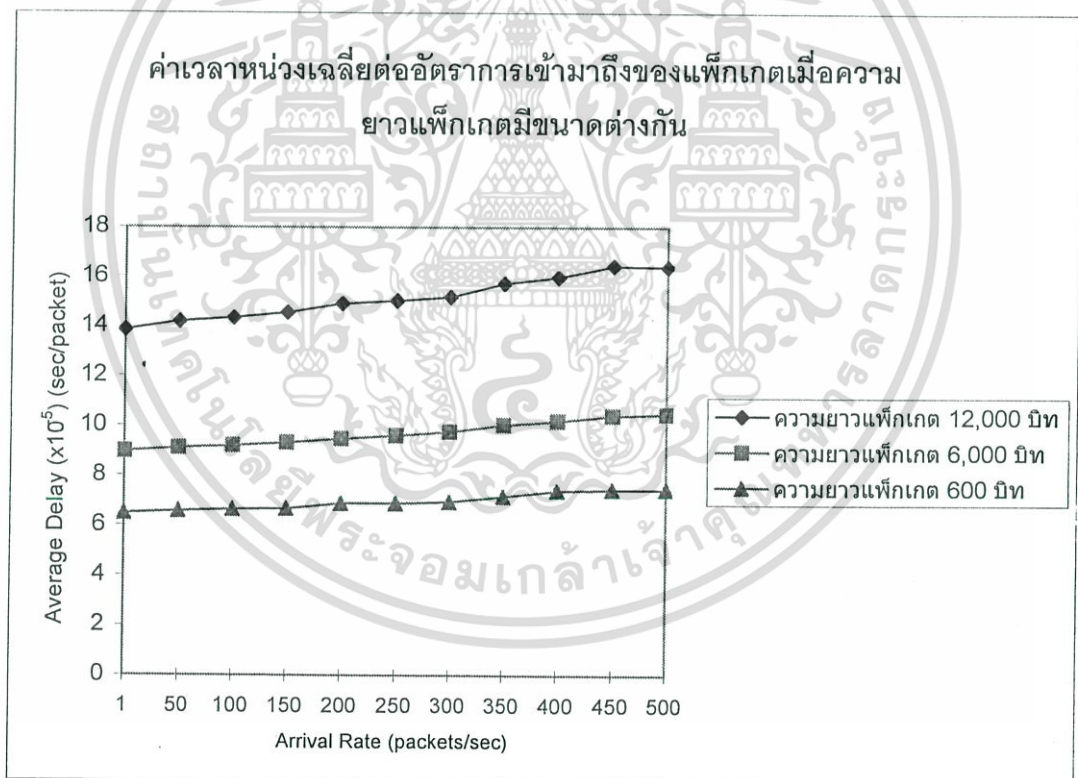
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์สมรรถนะของเครือข่ายในวิทยานิพนธ์นี้กระทำโดยวิธีการจำลองด้วยภาษาที่ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ เช่น ความยาวของแพ็กเก็ต ความยาวของสายสัญญาณ จำนวนสถานี และอัตราการส่งข้อมูล เพื่อที่จะศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของเครือข่ายในรูปของค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย (Average Delay) ค่าการใช้ประโยชน์ (Utilization) ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) และค่าอัตราการชนกันของข้อมูล (Collision Rate) ในระบบ ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้ถือเป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพหลักของระบบการสื่อสาร

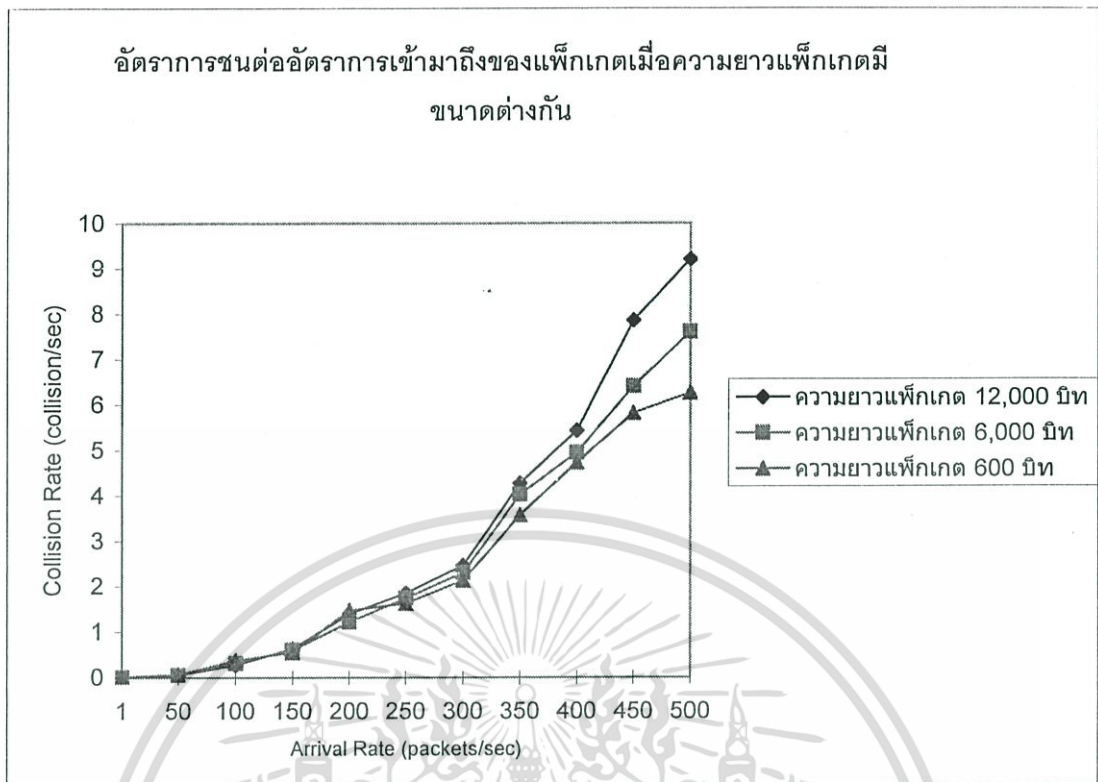
ในรูปที่ 6.1 – 6.4 นั้นจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติของเครือข่ายเมื่อมีขนาดความยาวของแพ็กเก็ตเป็น 600 บิต, 6,000 บิต และ 12,000 บิต โดยพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่



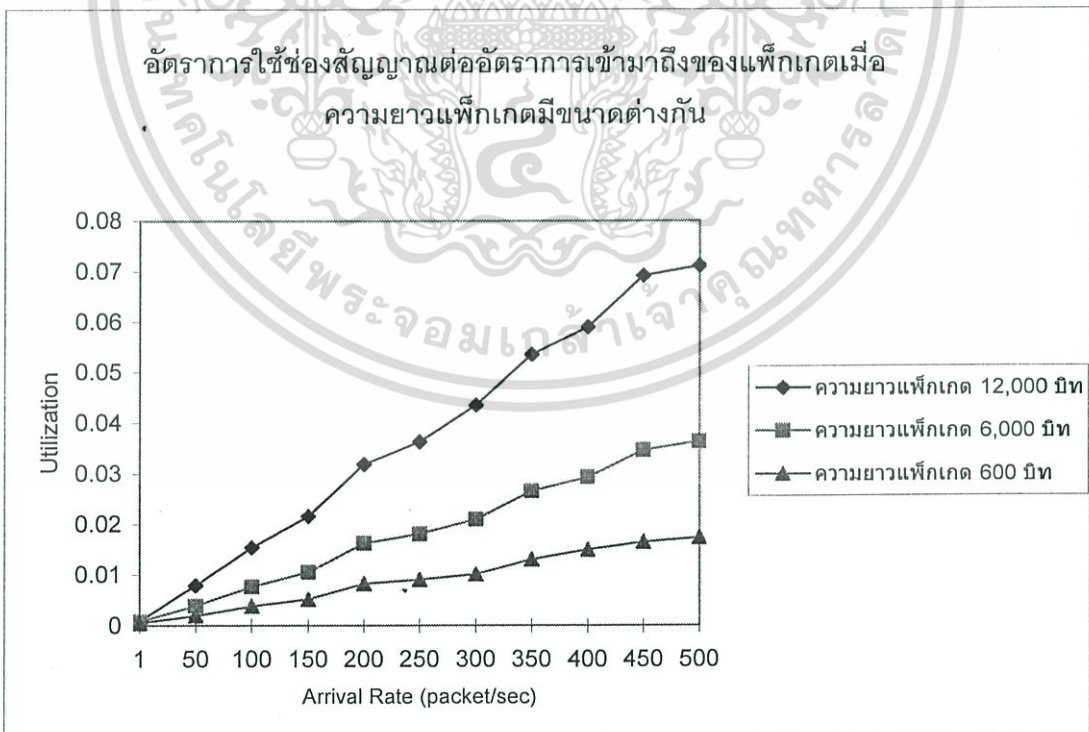
รูปที่ 6.1 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อความยาวแพ็กเก็ตเป็น 600 บิต, 6,000 บิต และ 12,000 บิต ตามลำดับ

จากรูปที่ 6.1 จะพบว่าเมื่อขนาดความยาวของแพ็กเก็ตมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยก็จะมีค่าสูงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

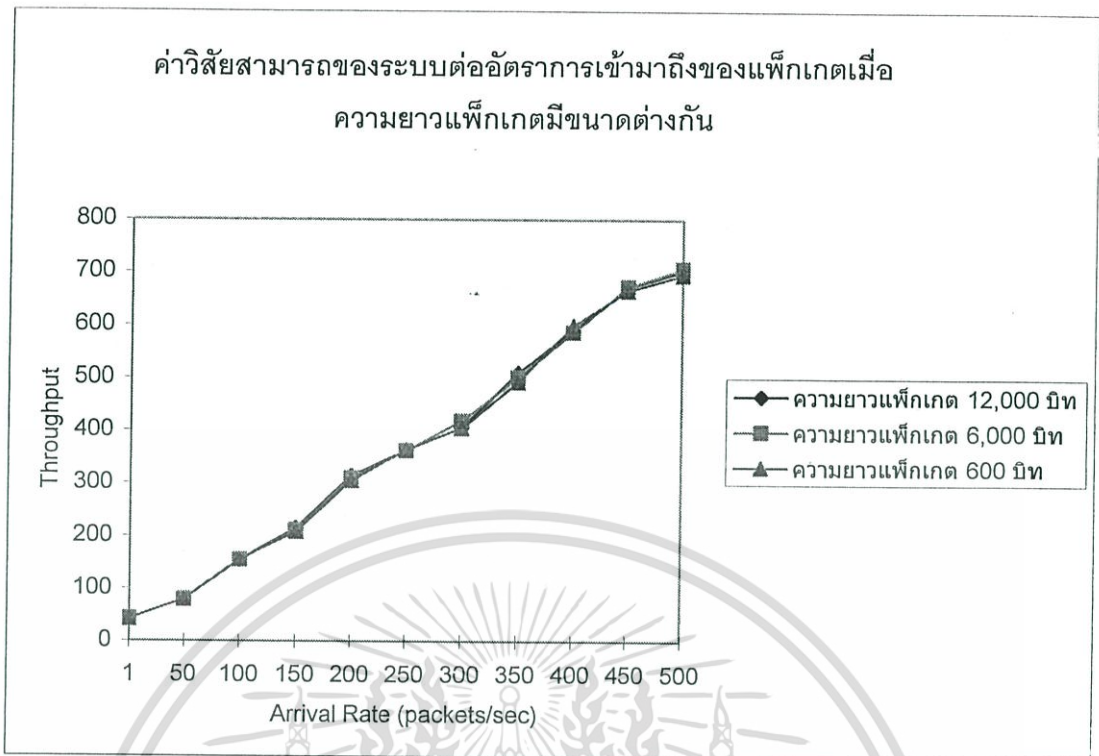


รูปที่ 6.2 อัตราการชนต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อความยาวแพ็กเก็ตเป็น 600 บิต, 6,000 บิต และ 12,000 บิต ตามลำดับ



รูปที่ 6.3 อัตราการใช้ของสัญญาณต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อความยาวแพ็กเก็ตเป็น 600 บิต, 6,000 บิต และ 12,000 บิต ตามลำดับ

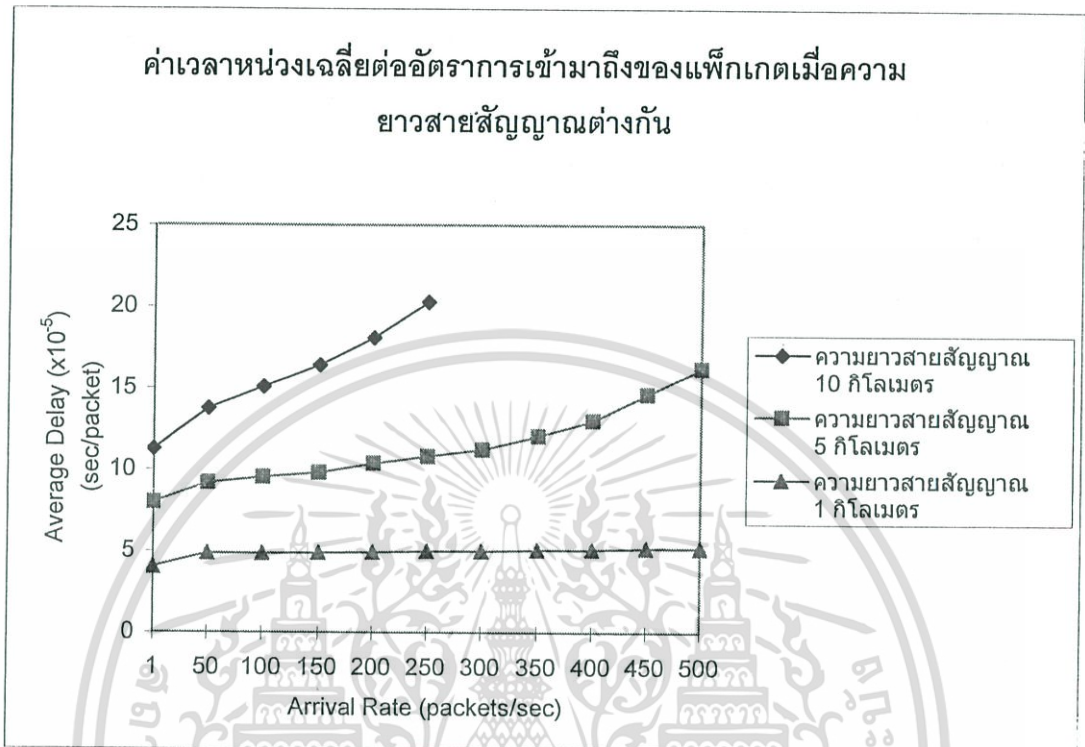
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 ค่าวิสัยสามารถของระบบต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเกตเมื่อความยาวแพ็กเกตเป็น 600 บิต, 6,000 บิต และ 12,000 บิต ตามลำดับ

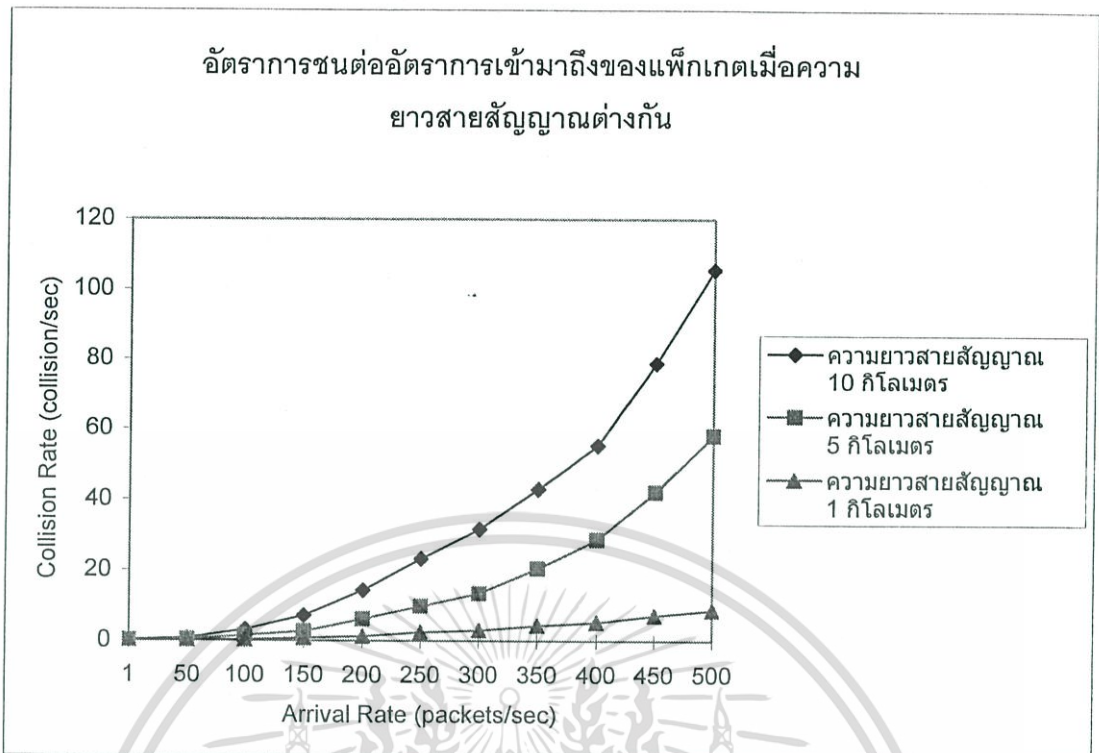
จากรูปที่ 6.2 เป็นค่าอัตราการชนกันของข้อมูลเมื่อขนาดความยาวแพ็กเกตมีค่าต่างๆ พบว่าค่าอัตราการชนกันไม่ต่างกันมากนัก โดยในการจำลองนี้กำหนดให้มีจำนวนสถานี 20 สถานี อัตราการส่งข้อมูลที่ 155 เมกะบิตต่อวินาที และสายสัญญาณมีความยาว 5,000 เมตร ในขณะที่ค่าอัตราการใช้ช่องสัญญาณในรูปที่ 6.3 จะแสดงให้เห็นว่าที่ขนาดความยาวแพ็กเกตที่มีค่ามากกว่าจะมีอัตราการใช้ช่องสัญญาณมากกว่าด้วย ส่วนค่าวิสัยสามารถของระบบจากการจำลองนี้ก็มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังรูปที่ 6.4

ถัดมาเราจะลองเปลี่ยนค่าความยาวของสายสัญญาณเพื่อที่จะลองดูลักษณะคุณสมบัติของระบบว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในทางใด



รูปที่ 6.5 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อความยาวของสายสัญญาณเป็น 1, 5 และ 10 กิโลเมตร ตามลำดับ

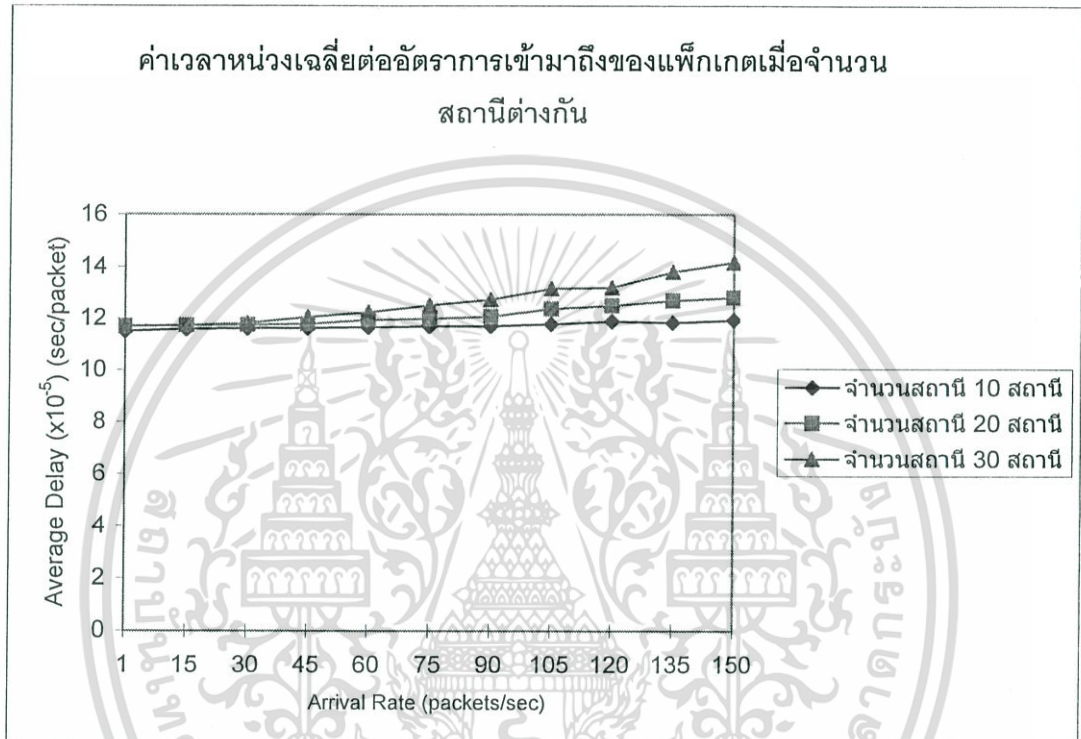
จากรูปที่ 6.5 ในครั้งนี้เราได้ลองเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของสายสัญญาณเมื่อพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่ โดยมีจำนวนสถานี 20 สถานี อัตราการส่งข้อมูล 155 เมกะบิตต่อวินาที และความยาวแพ็กเก็ตข้อมูลเป็น 6,000 บิต จะพบว่าค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยนั้นจะแปรผันตามความยาวของสายสัญญาณเนื่องจากต้องใช้เวลาในการส่งข้อมูลมากขึ้น แต่ในที่นี้ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยที่แตกต่างกันนั้นก็มีค่าค่อนข้างน้อยมากเนื่องจากเป็นระบบการสื่อสารที่มีความเร็วสูง จึงอาจถือได้ว่าค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นตามค่าความยาวของสายสัญญาณในที่นี้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบน้อยมาก



รูปที่ 6.6 อัตราการชนต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อความยาวของสายสัญญาณเป็น 1, 5 และ 10 กิโลเมตร ตามลำดับ

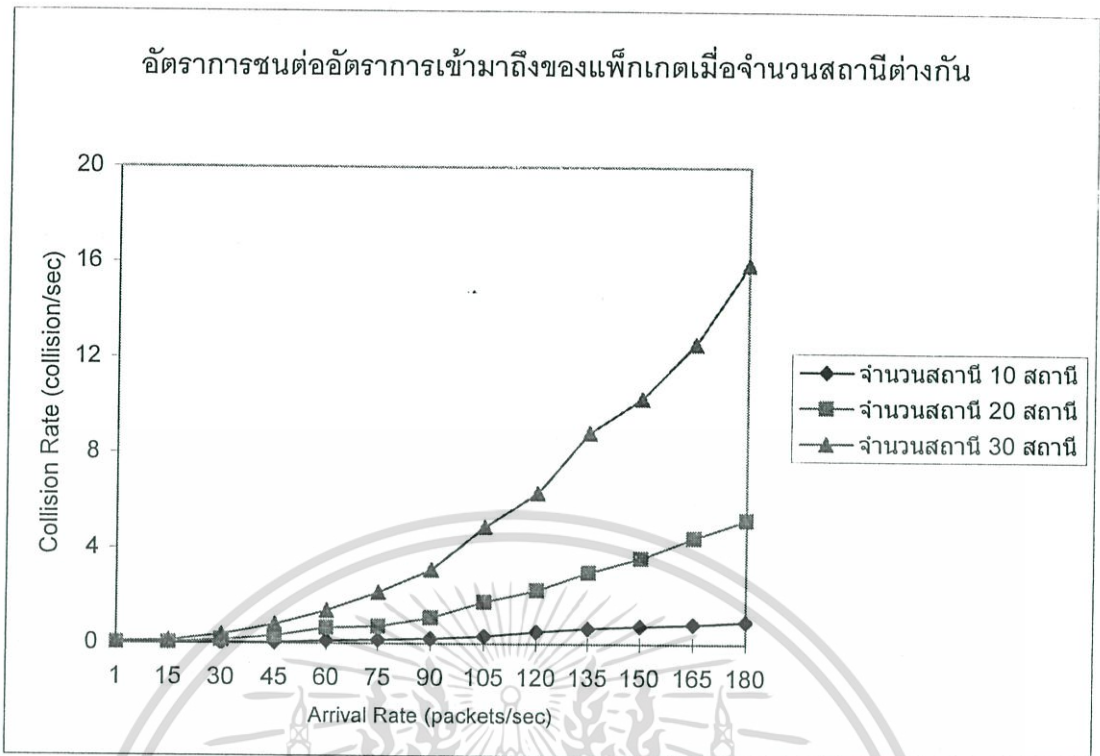
ในรูปที่ 6.6 จะแสดงถึงค่าอัตราการชนกันของข้อมูลต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อความยาวของสายสัญญาณมีค่าต่างๆกัน พบว่าค่าอัตราการชนกันของข้อมูลแปรผันตามค่าความยาวของสายสัญญาณเช่นเดียวกับกับค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย ทั้งนี้เพราะเมื่อระบบมีค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยสูง โอกาสความเป็นไปได้ที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลก็มากขึ้น เช่น กรณีที่สถานี A และสถานี B อยู่ใกล้กัน ขณะที่สถานี A เริ่มทำการส่งข้อมูลนั้น มีโอกาสเป็นไปได้ที่สถานี B จะตรวจสอบช่องสัญญาณแล้วยังคงพบว่าช่องสัญญาณยังว่างอยู่ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของระบบ สถานี B จึงทำการส่งข้อมูลออกไป ซึ่งก่อให้เกิดการชนกันของข้อมูลขึ้น

จำนวนสถานีเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ในการจำลองจึงได้ลองเปลี่ยนแปลงจำนวนสถานีของระบบแล้วศึกษาค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย ค่าอัตราการชนกันของข้อมูล ค่าวิสัยสามารถของระบบและค่าอัตราการใช้ช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 6.7 ถึง รูปที่ 6.10 โดยกำหนดให้มีอัตราการส่งข้อมูลที่ 155 เมกะบิตต่อวินาที, ความยาวแพ็กเก็ตข้อมูลเป็น 6,000 บิต และสายสัญญาณมีความยาว 5,000 เมตร

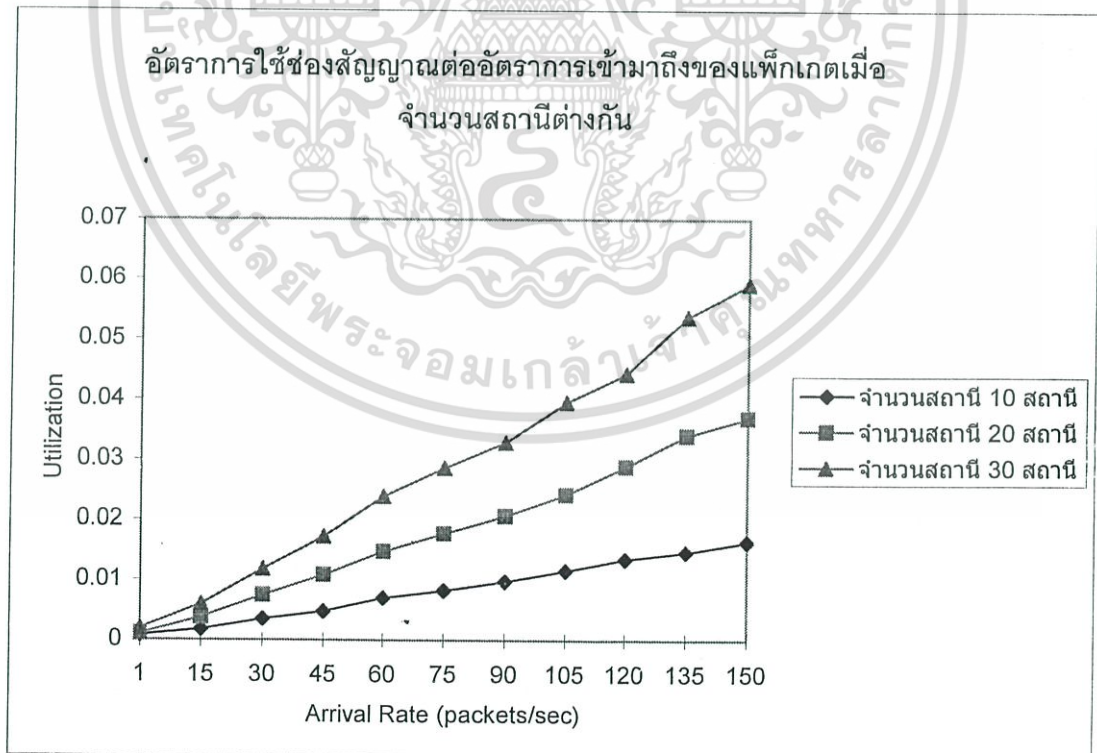


รูปที่ 6.7 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อจำนวนสถานีเป็น 10, 20 และ 30 สถานี ตามลำดับ

จากรูปที่ 6.7 เมื่อจำนวนสถานีเพิ่มมากขึ้นจะมีผลทำให้ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของระบบเพิ่มมากขึ้นด้วย และอัตราการชนกันของข้อมูลก็เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.8 เพราะเมื่อจำนวนสถานีเพิ่มมากขึ้นก็จะเกิดการแย่งกันใช้ช่องสัญญาณมากขึ้นตามไปด้วย ในการออกแบบระบบจึงต้องคำนึงถึงจำนวนสถานีที่เหมาะสม ที่ส่งผลให้ระบบมีค่าอัตราการชนกันของข้อมูลอยู่ในค่าที่รับได้

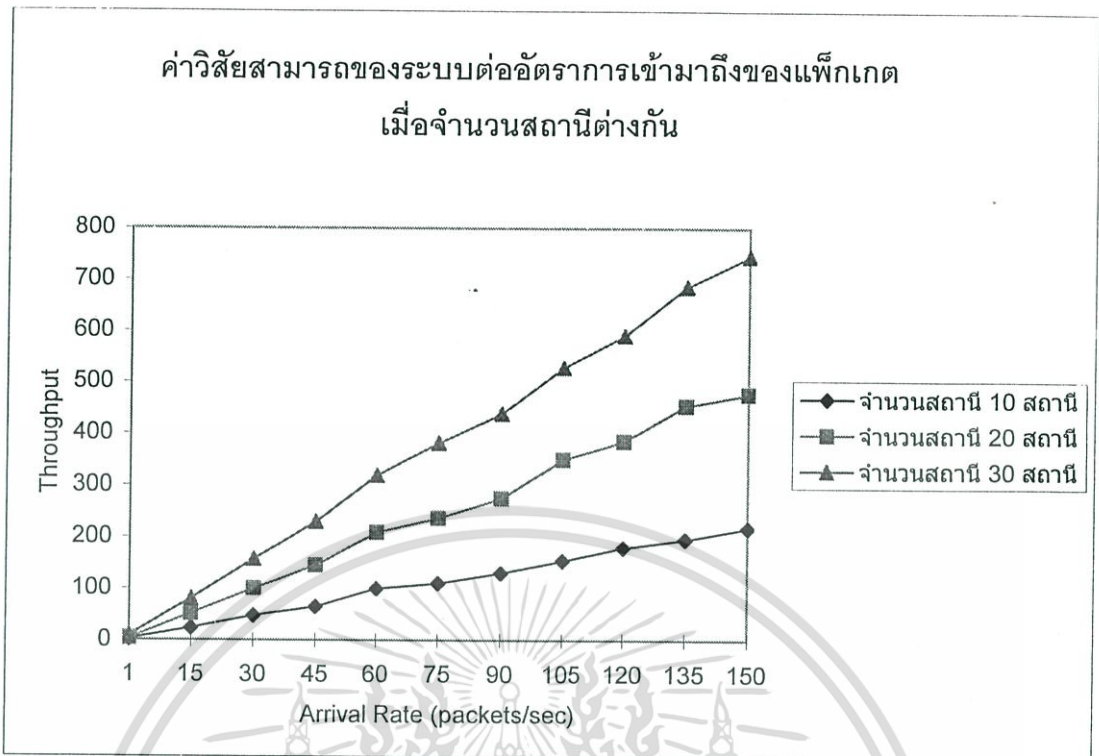


รูปที่ 6.8 อัตราการชนต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อจำนวนสถานีเป็น 10, 20 และ 30 สถานี ตามลำดับ



รูปที่ 6.9 อัตราการใช้ช่องสัญญาณต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อจำนวนสถานีเป็น 10, 20 และ 30 สถานี ตามลำดับ

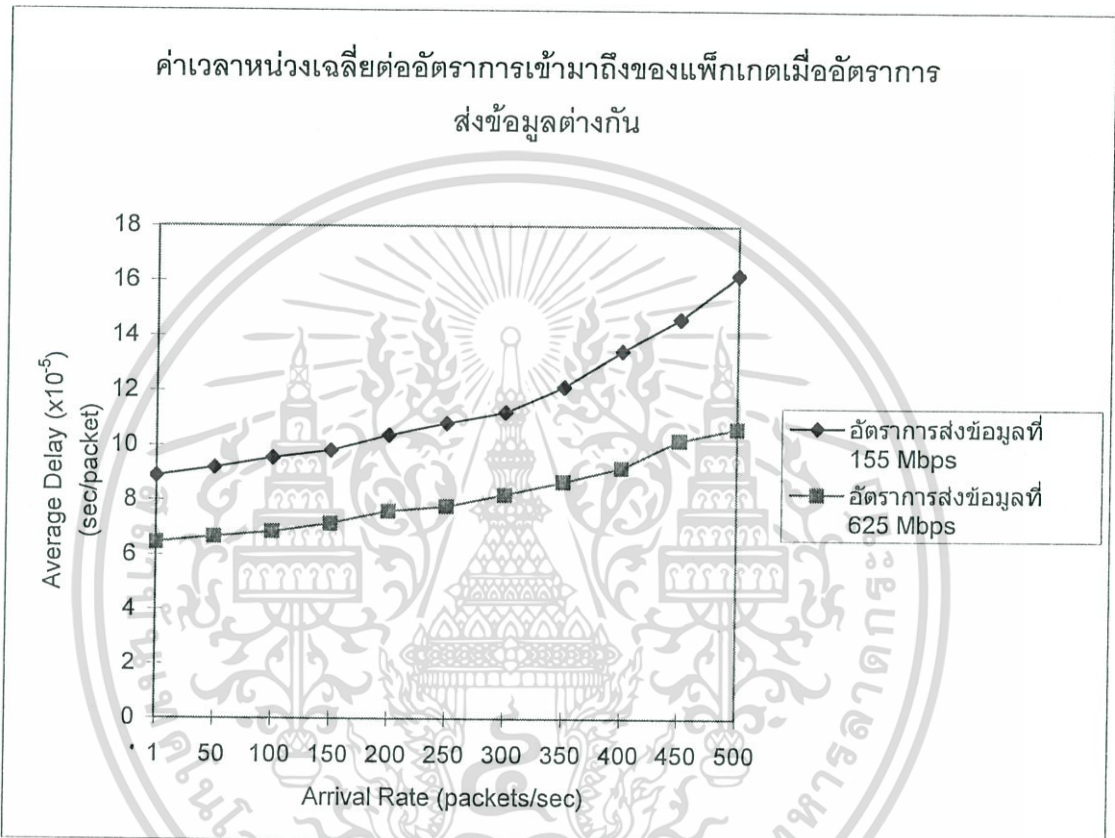
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 ค่าวิสัยสามารถของระบบต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่อจำนวนสถานีเป็น 10, 20 และ 30 สถานี ตามลำดับ

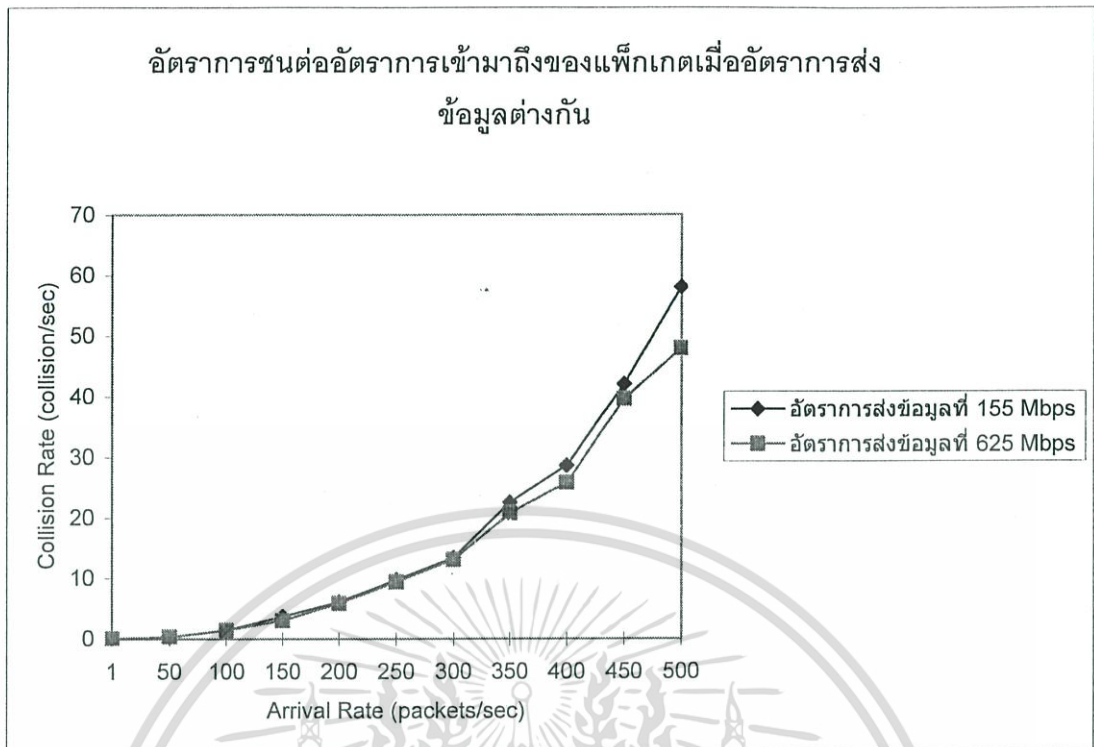
ในรูปที่ 6.9 และ 6.10 จะแสดงค่าอัตราการใช้ช่องสัญญาณและค่าวิสัยสามารถของระบบต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ต ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองค่านี้จะมีค่ามากขึ้นตามจำนวนสถานีในระบบ จำนวนสถานีมากทำให้ปริมาณการใช้ช่องสัญญาณมากและค่าวิสัยสามารถก็มากขึ้นตามไปด้วย

อัตราการส่งข้อมูลก็เป็นที่ต้องพิจารณาเนื่องจากเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ ในการจำลองได้เปลี่ยนค่าอัตราการส่งข้อมูลแล้วทำการบันทึกผลในรูปของค่าเวลาหน่วงเฉลี่ย ค่าอัตราการชนกันของข้อมูล และอัตราการใช้ช่องสัญญาณ โดยในครั้งนี้เรากำหนดให้ระบบมีจำนวนสถานี 20 สถานี ความยาวแพ็กเก็ตข้อมูลเป็น 6,000 บิต และสายสัญญาณมีความยาว 5,000 เมตร ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 6.11 – 6.13

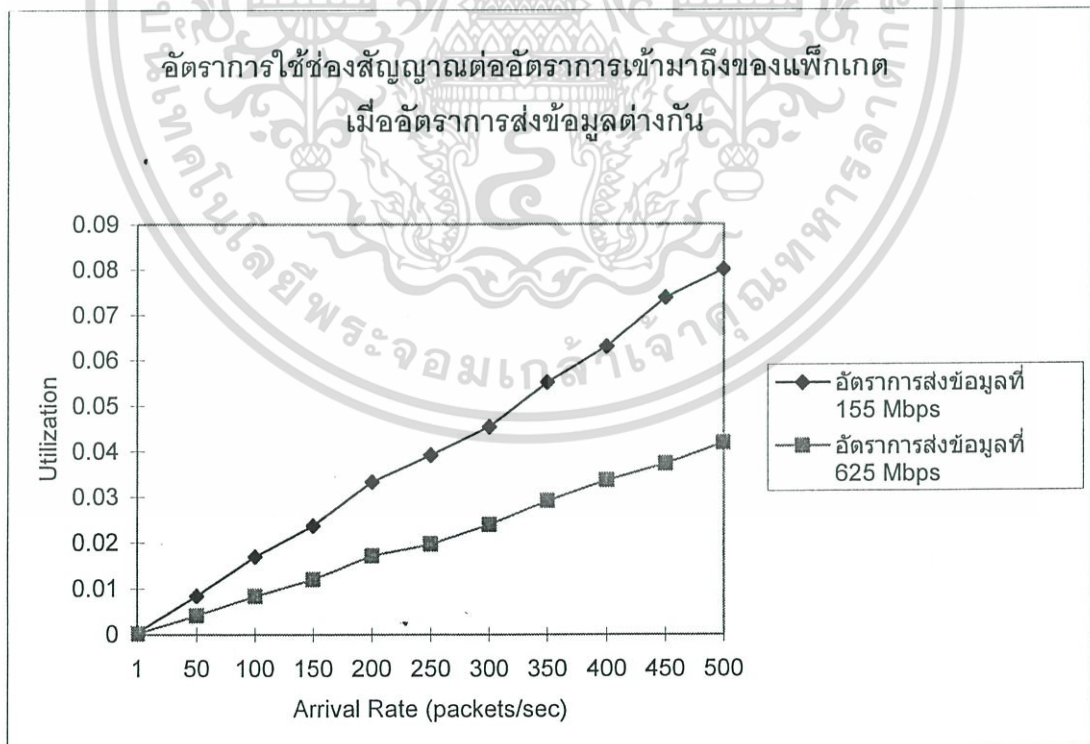


รูปที่ 6.11 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเป็น 155 เมกะบิตต่อวินาที และ 625 เมกะบิตต่อวินาที ตามลำดับ

ในรูปที่ 6.11 แสดงค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเปลี่ยนแปลงไป โดยพารามิเตอร์อื่นๆของระบบมีค่าคงที่ พบว่าที่อัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตค่าเดียวกัน อัตราการส่งข้อมูลที่สูงกว่าจะมีค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยต่ำกว่า แม้จะไม่แตกต่างกันมากนักก็ตาม



รูปที่ 6.12 อัตราการชนต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเป็น 155 เมกะบิตต่อวินาที และ 625 เมกะบิตต่อวินาที ตามลำดับ



รูปที่ 6.13 อัตราการใช้ของสัญญาณต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเมื่ออัตราการส่งข้อมูลเป็น 155 เมกะบิตต่อวินาที และ 625 เมกะบิตต่อวินาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 6.12 ที่อัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตค่าสูงๆ อัตราการส่งข้อมูลที่สูงกว่าจะเริ่มมีอัตราการชนกันของข้อมูลลดลงเมื่อเทียบกับอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำกว่า แต่ก็ไม่ชัดเจนนัก ส่วนอัตราการใช้ช่องสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตค่าเดียวกัน ที่อัตราการส่งข้อมูลมีค่าต่ำกว่าจะมีปริมาณการใช้ช่องสัญญาณมากกว่า ดังรูปที่ 6.13

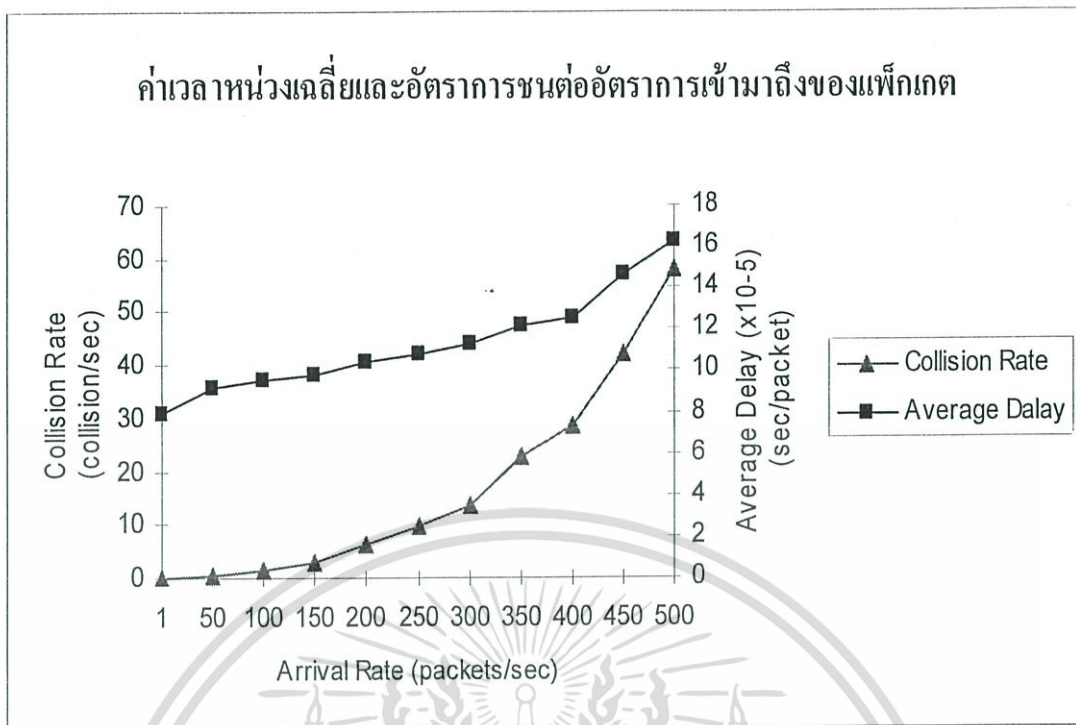


## สรุปผลการวิเคราะห์

จากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 6 พบว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ เช่น ความยาวของแพ็กเก็ต ความยาวของสายสัญญาณ จำนวนสถานี และอัตราการส่งข้อมูลนั้นมีผลโดยตรงต่อสมรรถนะของระบบ อย่างเช่นในรูปที่ 6.1 ที่อัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตค่าเดียวกัน แพ็กเก็ตที่มีความยาวมากกว่าจะมีค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยสูงกว่าตามไปด้วย ขณะที่เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนค่าความยาวของสายสัญญาณ ในรูปที่ 6.5 ที่ความยาวของสายสัญญาณมากกว่าพบว่าค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยนั้นก็จะมีค่ามากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากต้องใช้เวลาในการส่งข้อมูลมากขึ้น เพียงแต่ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยที่แตกต่างกันนั้นมีค่าค่อนข้างน้อยมากเนื่องจากเป็นระบบการสื่อสารที่มีความเร็วสูง

หรือในกรณีที่ระบบมีจำนวนสถานีเพิ่มมากขึ้น ก็มีผลทำให้ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของระบบเพิ่มมากขึ้นด้วย และอัตราการชนกันของข้อมูลก็เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.7 และ 6.8 เพราะเมื่อจำนวนสถานีเพิ่มมากขึ้นโอกาสที่แต่ละสถานีในระบบจะส่งข้อมูลพร้อมกันก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้เกิดการชนกันของแพ็กเก็ต และจะต้องทำการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลนั้นใหม่ในการออกแบบระบบจึงต้องคำนึงถึงจำนวนสถานีที่เหมาะสม เพื่อให้ระบบมีค่าอัตราการชนกันของข้อมูลและค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยอยู่ในวิสัยที่ยอมรับได้ หรืออาจแก้ไขด้วยการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลให้สูงขึ้น อย่างเช่นในรูปที่ 6.11 แสดงให้เห็นว่าค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยจะมีค่าต่ำกว่าเมื่อมีอัตราการส่งข้อมูลที่สูงกว่า นอกจากนั้นความยาวของสายสัญญาณก็มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบเช่นกัน

ดังนั้นในการออกแบบระบบเครือข่ายจำเป็นจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆเหล่านี้เป็นสำคัญ และในระบบที่ทำการทดลองนี้ เมื่อกำหนดจำนวนสถานีอยู่ที่ 20 สถานี จะพบว่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับระบบจะมีขนาดความยาวของแพ็กเก็ตเป็น 6,000 บิต และความยาวของสายสัญญาณอยู่ที่ 5,000 เมตร เนื่องจากเมื่อกำหนดขนาดความยาวของแพ็กเก็ตให้มากกว่านี้ ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยจะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตเพิ่มมากขึ้น ส่วนอัตราการส่งข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้จะอยู่ที่ 155 เมกะบิตต่อวินาที (จากการทดลองที่อัตราการส่งข้อมูล 155 เมกะบิตต่อวินาที และ 625 เมกะบิตต่อวินาที) ทั้งนี้เพราะถึงแม้จะมีความเร็วที่สูงกว่านี้ ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยหรืออัตราการชนกันของข้อมูลก็ไม่ได้มีค่าที่ดีกว่ามากนัก วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเป็นเพียงแนวทางหนึ่งที่จะใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบแต่ละระบบ หรือเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป



รูปที่ 7.1 ค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยและอัตราการชนต่ออัตราการเข้ามาถึงของแพ็กเก็ตของระบบที่เสนอ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Stallings. *Wireless Communications and Networks*. Prentice-Hall International Inc. 1998.
- [2] J. Weinmiller, H. Woesner and A. Wolisz. "Analyzing and Improving the IEEE 802.11-MAC Protocol for Wireless LANs." Electrical Engineering Department. Technical University Berlin. Germany.
- [3] สุวิพล สิริพิชิตวภาค. เทคโนโลยีของโลกอินเทอร์เน็ต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535.
- [4] R. J. Hoss. *Fiber Optic Communications Design Handbook*. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1990.
- [5] J. Powers. *An Introduction to Fiber Optic Systems*. 2nd Ed. McGraw-Hill International Editions. 1999.
- [6] W. Stallings. *High-Speed Network : TCP/IP and ATM Design Principles*. Prentice-Hall International Inc. 1998.
- [7] K. Park and W. Willinger. *Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation*. John Wiley & Sons. 2000.
- [8] Z. Harpantidou and M. Paterakis. "Random Multiple Access of Broadcast Channels with Pareto Distributed Packet Interarrival Times." *IEEE Personal Communications*, April 1998. pp. 48-55.
- [9] E. Wong and M. A. Summerfield. "Simple Access Algorithms for a WDM CSMA/CA Packet Ring Network." *Lasers and Electro-Optics Society*, 2002. pp. 351-352.
- [10] E. Wong and M. A. Summerfield. "Collision Avoidance in All-Optical Wavelength Division Multiplexed Packet Networks," *Journal of Lightwave Technology*, Vol.21, No.11, November 2003. pp 2652 – 2660.

## ภาคผนวก

### ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. อัญชลา ราศรีมินทร์, กฤษณะพงศ์ พันธุ์ศรี, สุวิพล สิริทธิวิภาค และ เกียรติไกร วงศ์โรจน์ภรณ์ "การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบเครือข่ายท้องถิ่น WDM Bus ที่มีการเข้าถึงแบบ CSMA/CA" วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 21 ฉบับที่ 1 เดือนมีนาคม 2547.



## ประวัติผู้เขียน

นางสาวอัญชลา ราศรีมินทร์ เกิดเมื่อวันที่ 16 มกราคม 2517 ที่จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2538

ปี พ.ศ. 2539 เริ่มทำงานที่บริษัทวรจักรอินเตอร์เนชันแนล จำกัด ในตำแหน่งวิศวกร และตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 ถึงปัจจุบัน ทำงานที่บริษัทซีเมนส์ จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรอาวุโส

