

การศึกษาการรวมกลุ่มลิงค์ของวายฟาย สำหรับ IEEE 802.11N

**STUDY ON THE AGGREGATION OF WI-FI LINKS  
FOR IEEE 802.11N**

นิสิต ฤครองตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# การศึกษาการรวมกลุ่มลิ่งค์ของวายฟาย สำหรับ IEEE 802.11N

นิสิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการรวมกลุ่มลิงค์ของไวไฟสำหรับ IEEE 802.11n

Study on The Aggregation of Wi-Fi Links for IEEE 802.11n

ชื่อ - นามสกุล

นายนิสิต ภูครองตา

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.

ปีการศึกษา

2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(อาจารย์อำนวยการ เรืองวาริ, Dr.-Ing.)



กรรมการ

(รองศาสตราจารย์กนก เจนจิระพงศ์เวช, D.Eng.)



กรรมการ

(อาจารย์ฉัตรชัย สุขพิทักษ์สกุล, Ph.D.)



กรรมการ

(อาจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ฝิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 10 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการรวมกลุ่มลิงค์ของสายพาย สำหรับ IEEE 802.11n
ชื่อ – นามสกุล	นายนิสิต ภูครองตา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2555

## บทคัดย่อ

IEEE 802.11n เป็นเทคโนโลยีไร้สายที่ใช้งานแพร่หลายในปัจจุบัน แต่ยังคงพบปัญหาในเรื่องของแบนด์วิดท์ในการรับส่งข้อมูล เมื่อมีผู้ใช้จำนวนมาก ส่งผลทำให้ค่าปริมาณงานของการรับส่งข้อมูลลดลง

วิทยานิพนธ์นี้ จึงนำเสนอการนำ IEEE802.11n มาประยุกต์ใช้บน IEEE 802.3ad เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ในการติดต่อสื่อสาร และลดความคับคั่งของการรับส่งข้อมูล รวมถึงการสำรองเส้นทางเมื่อเส้นทางหลักมีปัญหา โดยเปลี่ยนการรวมกลุ่มลิงค์จากเดิมที่เป็นสื่อกลางแบบสาย มาเป็นสื่อกลางแบบไร้สาย ทดสอบที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ช่องสัญญาณ 20 เมกะเฮิรตซ์ ที่ช่อง 1 และ 11 แบบจุดไปจุด โดยมีการส่งข้อมูลแบบสื่อสารสองทางครึ่งอัตรา อัตราถ่ายโอนข้อมูล 65 เมกะบิตต่อวินาที โมดูเลชันแบบ 64-QAM และปรับลดค่าเวลาตามมาตรฐาน 0.8 ไมโครวินาที เพื่อประเมินผลค่าปริมาณงาน ค่า SNR และค่าเวลาของการรับ-ส่งแพ็กเกจ เมื่อใช้โพรโตคอลทีซีพี ส่งข้อมูลของแพ็กเกจที่ขนาดแตกต่างกัน

จากผลการทดสอบเมื่อรวมกลุ่มลิงค์ในระบบไร้สาย สามารถเพิ่มช่องทางการสื่อสารให้เพิ่มขึ้นและลดความคับคั่งของการรับส่งข้อมูล รวมถึงสามารถสำรองเส้นทางเมื่อเส้นทางหลักมีปัญหา เมื่อค่าการรบกวนของช่องสัญญาณมีค่าน้อย จะส่งผลทำให้ค่า SNR เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ค่าปริมาณงานเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ สามารถส่งข้อมูลได้ 40.10 เมกะบิตต่อวินาที เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 5.4 โดยใช้โพรโตคอลทีซีพีที่ขนาดของแพ็กเกจแตกต่างกัน และเมื่อส่งแพ็กเกจขนาด 1480 กิโลไบต์ สามารถส่งข้อมูลได้ 50.47 เมกะบิตต่อวินาที เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 0.84 ในสภาวะไม่มีโหลด และ 60.80 เมกะบิตต่อวินาที เฉลี่ยร้อยละ 0.16 ในสภาวะโหลดเต็มที่

คำสำคัญ : การรวมกลุ่มลิงค์ การรบกวน 802.11n 802.3ad

<b>Thesis Title</b>	Study on the Aggregation of Wi-Fi Links for IEEE 802.11n
<b>Name - Surname</b>	Mr. Nisit Pukrongta
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Mr. Paitoon Rakluea, D.Eng.
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

The standard IEEE 802.11n is wireless technology that extensively used today. The problem of IEEE 802.11n standard is bandwidth for data transmission congestion while there is large number of users. Thus this problem needs to be managed in order to decrease the throughput of transmitting data.

This thesis proposes the application of using IEEE 802.11n on IEEE 802.3ad. The application improves bandwidth in communication and decreasing of the transmitting data congestion. The process is included reserving the redundant path when the main path has problem by changing the link aggregation. For testing frequency at 2.4 GHz with bandwidth 20 MHz on Channel 1 and 11 in mode point to point. Bridging transmission mode uses half duplex data rate at 65 Mbps, 64-QAM modulation type. The standard adjusts time value as 0.8  $\mu$ s. There are applied for evaluating the throughput, SNR and round trip time. Protocol TCP is used for transmitting data at different packet size.

The experimental results show that the link aggregation in wireless system is increase the bandwidth and decreasing the data transmission congestion. It reserves the redundant path from problems of the main path. Nevertheless, results of interference power noise decreases in order to increasing SNR and throughput. Two link aggregations can be transmitted data up to 40.10 Mbps (increasing 5.4 %) by using TCP protocol with different packet size. And then, 1480 Kbytes of packet size can be transmitted data up to 50.47 Mbps (increasing 0.84%). For non-load condition can up to 60.80 Mbps (increasing 0.16%) in full-load condition.

**Keywords:** link aggregation, interference, 802.11n, 802.3ad

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.อำนาจ เรืองวารี ดร.ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล คณะกรรมการสอบ และรองศาสตราจารย์กนก เจนจิระพงศ์เวช ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ชี้แนะแนวทางและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เนื้อหาของปริญญาวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะมีความสมบูรณ์และถูกต้องไม่ได้ หากไม่ได้รับคำแนะนำและช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์อิฐอรัญ ปิติมล อาจารย์วิโรจน์ พิราจเนนชัย ดร.สุรินทร์ แห่งมงาม และภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ที่กรุณาให้ความเอื้อเฟื้อในการใช้เครื่องมือทดสอบผลในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และคำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

นิติต ภูครองตา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 มาตรฐาน IEEE802.3ad.....	4
2.2 ระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network).....	7
2.3 ทฤษฎีคลื่นวิทยุ.....	11
2.4 เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายตามมาตรฐาน 802.11 .....	22
2.5 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal To Noise Ratio).....	25
2.6 แบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ.....	35
2.7 โปรแกรมที่ใช้วัดประสิทธิภาพ.....	40
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	42
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	42
3.3 บันทึกผลการทดลอง.....	56

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย.....	57
4.1 ค่าเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแตกต่างระหว่าง Interference Power Station กับค่า Interference Power Noise ที่การรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์และ 2 ลิงค์.....	58
4.2 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูล เมื่อมีการเพิ่มระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์.....	60
4.3 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Non-Load.....	61
4.4 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load.....	62
4.5 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load.....	64
4.6 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Full-Load.....	65
4.7 ค่าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง (Round Trip Time) จากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Full-Load .....	67
4.8 เปอร์เซ็นต์ความล่าช้าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง (Round Trip Time) จากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Full-Load.....	68
4.9 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Non-Load .....	69
4.10 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load .....	71



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.11 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load.....	72
4.12 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Full-Load.....	74
4.13 ค่าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง (Round Trip Time) จากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Full-Load.....	75
4.14 เปอร์เซนต์ความล่าช้าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง (Round Trip Time) จากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Full-Load .....	76
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	78
5.1 สรุป.....	78
5.2 ปัญหาและอุปสรรค.....	83
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก คอนฟิก สวิตช์รวมกลุ่มลิงค์.....	87
ภาคผนวก ข คอนฟิก แอกเซสพ้อยซ์ แบบ Point-to-Point+WDS และคุณสมบัติเฉพาะของแอกเซสพ้อยซ์ Asus RT-N16.....	90
ภาคผนวก ค การทดสอบค่าปริมาณงานด้วยโปรแกรม jperf-2.0.2 .....	96
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	128

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 จำนวนของอินเทอร์เฟสและจำนวนของค่า Hash ของการรวมกลุ่มลิงค์.....	5
2.2 โหมดการทำงานของการรวมกลุ่มลิงค์.....	7
2.3 ย่นความถี่ต่างๆ.....	13
2.4 ตารางตัวแปรสำหรับแทนค่าเพื่อคำนวณหาระยะทางสูงสุดที่จะใช้งานได้.....	30
2.5 ค่า Path Loss Exponent.....	37
2.6 ค่า Shadowing deviation ที่สภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน.....	37
2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังการสูญเสีย ค่า N ของแบบ ITU Site - General สำหรับการแพร่กระจายภายในอาคาร.....	38
2.8 เฟกเตอร์ของการทะลุผ่านชั้น.....	38
4.1 ค่าความแตกต่างระหว่าง Interference Power ส่งผลต่อ Throughput 1 Link Aggregation & 2 Link Aggregation ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 10 เมตร.....	59
4.2 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่ง เมื่อมีการเพิ่มระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์.....	60
4.3 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load	62
4.4 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load.....	63
4.5 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load.....	64
4.6 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ในสภาวะ Full-Load.....	66
4.7 ค่า Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Full-Load.....	67
4.8 ค่า % Delay Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ในสภาวะ Full-Load.....	69
4.9 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load	70
4.10 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load.....	71
4.11 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load.....	73

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ใน สถานะ Full-Load.....	74
4.13 ค่า Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load .....	76
4.14 ค่า % Delay Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load.....	77



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การเกิดขึ้นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้าสปาร์ก.....	11
2.2 คลื่นและความถี่.....	12
2.3 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุ.....	15
2.4 กราฟความแรงสัญญาณกับระยะทาง.....	15
2.5 ระยะทางมีผลกับความแรงของสัญญาณระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง.....	16
2.6 เขตเงาสัญญาณที่เกิดขึ้นกับสัญญาณ โทรศัพท์มือถือ.....	17
2.7 การสะท้อนและการเดินทางของคลื่นจากหลายทิศทาง.....	18
2.8 ส่วนประกอบหลักในระบบสื่อสารไร้สาย โดยใช้คลื่นวิทยุในการรับส่งสัญญาณ.....	19
2.9 การโมดูเลตสัญญาณเสียงเข้ากับคลื่นพาหะ.....	20
2.10 การรบกวนจากช่องสัญญาณข้างเคียงเมื่อช่องทั้งสองมีความถี่ใกล้เคียงกันมากการ ป้องกันการรบกวนจากช่องสัญญาณข้างเคียง.....	27
2.11 การป้องกันการรบกวนระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียง.....	27
2.12 การรบกวนในช่องสัญญาณเดียวกัน.....	28
2.13 การคำนวณค่า Link Margin จากอุปกรณ์เครื่องรับ เครื่องส่งสายนำสัญญาณและเสาอากาศ	29
2.14 วิธีการทำงานของกลไก CSMA/CA.....	31
2.15 วิธีการทำงานของกลไก CSMA/CA.....	31
2.16 วิธีการทำงานของกลไก CSMA/CA.....	32
2.17 อุปกรณ์ของ MIMO (Multiple Input Multiple Output).....	32
2.18 การเปรียบเทียบระหว่างระยะทางกับอัตราการส่งข้อมูล.....	34
2.19 ข้อมูลต่างๆที่วัดได้จากโปรแกรม Cisco Spectrum Expert Version 4.....	40
3.1 การรวมกลุ่มลิงค์ระบบแลนไร้สาย.....	42
3.2 การเชื่อมต่อการรวมกลุ่มลิงค์ของระบบแลนไร้สาย Server/Client A ใช้รับ-ส่งข้อมูล ไปยังServer/Client B.....	43
3.3 การวางตำแหน่งของแอคเซสพ้อยซ์ ทดสอบจาก 2, 5, 10 เมตรตามลำดับ.....	44
3.4 การเชื่อมต่อการรวมกลุ่มลิงค์ของระบบแลนไร้สายส่งข้อมูลแบบ TCP ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load.....	44

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5 การวางตำแหน่งของแอคเซสพ้อยซ์ ทดสอบจาก 2 เมตรและ 10 เมตรตามลำดับ.....	45
3.6 ภาพรวมของระบบการรวมกลุ่มลิงค์ระบบแลน ไร้สายที่ทดสอบด้วยอุปกรณ์จริงที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ที่ 2 เมตร.....	45
3.7 ภาพรวมของระบบการรวมกลุ่มลิงค์ระบบแลน ไร้สายที่ทดสอบด้วยอุปกรณ์จริงที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ที่ 10 เมตร.....	46
3.8 การ์ดสเปกตรัมรวมถึงโปรแกรมที่ใช้วัดค่าสัญญาณ.....	47
3.9 โปรแกรมสร้างกราฟฟิก รับ-ส่ง ข้อมูล jperf-2.0.2 ของ Server.....	47
3.10 โปรแกรม Brick, Nuttcp เพื่อเปรียบเทียบกับ Jperf-2.0.2 ทดสอบที่ Packet 128 Kbyte...	48
3.11 โปรแกรมมอนิเตอร์กราฟฟิก PRTG Version 12.3.1.2366 ที่ติดตั้งแล้ว.....	48
3.12 การตรวจสอบสถานะของการรวมลิงค์ว่า Up หรือไม่.....	49
3.13 รายละเอียดของพอร์ตว่ามีรายละเอียดอย่างไรด้วยคำสั่ง Show Etherchannel Detail.....	49
3.14 การทดสอบการเชื่อมต่อระหว่างสวิตช์ว่าสามารถติดต่อกันได้หรือไม่ ด้วยคำสั่ง ping...	50
3.15 รายละเอียดต่างๆ ของแอคเซสพอยต์เช่นช่องสัญญาณ ไอพีแอดเดรส.....	50
3.16 การทดสอบการเชื่อมต่อ ระหว่างสวิตช์ว่าสามารถติดต่อกันได้ ด้วยคำสั่ง ping.....	51
3.17 โปรแกรม Cisco Spectrum ซึ่งแสดงรายละเอียดต่างๆของสัญญาณ เช่น SNR, Interference Power, Channel utilization, FFT Duty Cycle.....	52
3.18 โปรแกรมมอนิเตอร์กราฟฟิก PRTG Version 12.3.1.2366 .....	52
3.19 ผลการรับส่งข้อมูลจาก Client มายัง Server 1 session (Non-Load) 100 วินาที.....	53
3.20 ผลการรับส่งข้อมูลจาก Client มายัง Server 100 session (Full-Load) 100 วินาที.....	53
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างระหว่าง A กับ AG.....	59
4.2 ค่า Interference Power ของช่องสัญญาณที่ 1 และ 11.....	60
4.3 เมื่อลิงค์ใดลิงค์หนึ่งมีปัญหายังสามารถรับ-ส่งข้อมูลจากการรวมลิงค์ ลิงค์อื่นได้ มอนิเตอร์จากโปรแกรม PRTG.....	61
4.4 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load	62
4.5 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load.....	63

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Non-Load และ Full-Load.....	65
4.7 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ในสถานะ Full –Load.....	66
4.8 ค่า Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load.....	68
4.9 ค่า % Delay Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load.....	69
4.10 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Non-Load	70
4.11 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ในสถานะ Non-Load และ Full-Load.....	72
4.12 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Non-Load และ Full-Load.....	73
4.13 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load.....	75
4.14 ค่า Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load .....	76
4.15 ค่า % Delay Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load .....	77

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ถึงแม้ว่าการสื่อสารที่มีการรับส่งข้อมูลแบบมีสาย จะมีอัตราค่าปริมาณงานสูง แต่ข้อจำกัดของระบบคือไม่สามารถเดินระบบสายได้สะดวก ในบางพื้นที่ที่สภาพแวดล้อมไม่เอื้ออำนวย เช่น การเดินสายข้ามตึก อาคาร หรือแม้แต่การใช้งานชั่วคราว งานกีฬา งานรับพระราชทานปริญญาบัตร เป็นต้น ซึ่งหากถ้ามองเดินระบบสายอาจต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน พร้อมทั้ง รื้อถอนลำบาก ดังนั้นการสื่อสารแบบไร้สายจึงเข้ามามีบทบาทในการสื่อสารข้อมูล เนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้ง ลดภาระค่าใช้จ่าย และสามารถรื้อถอนได้ง่าย หรืองานด้านกระจายสัญญาณให้กับระบบความปลอดภัยต่างๆ เช่น การกระจายสัญญาณสำหรับกล้อง ไอพีวีจอร์ปิดแบบไร้สาย หรือ ใช้กับระบบตรวจการณ์ระยะไกล แต่ข้อจำกัดของการสื่อสารก็จะมีในเรื่องของการรับส่งข้อมูลที่ให้อัตราการค่าปริมาณงานที่ค่อนข้างต่ำ เพราะมีปัจจัยในสภาพแวดล้อมที่ติดตั้ง รวมถึง ตึก อาคาร ที่จะมาลดทอนประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย จากปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงเสนอแนวคิดในการรวมกลุ่มลิงค์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพช่องทางการสื่อสารแบนด์วิดท์ให้เพิ่มมากขึ้นจากระบบเดิมจะใช้สื่อกลางแบบสายทำการรวมกลุ่มลิงค์ แต่งานวิจัยนี้จะใช้สื่อกลางแบบไร้สายในการรวมกลุ่มลิงค์และประเมินผลของค่าปริมาณงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของค่าปริมาณงาน

ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad การรวมกลุ่มลิงค์ (Link Aggregation) [1] เป็นการรวมช่องสัญญาณอีเทอร์เน็ต เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ในการติดต่อสื่อสาร โดยการนำเอาช่องสัญญาณอีเทอร์เน็ต มากกว่าหนึ่งช่องสัญญาณอีเทอร์เน็ต มารวมกันให้เป็นกลุ่มเดียว โดยใช้สื่อกลางแบบมีสายตามเทคโนโลยี ฟาสต์อีเทอร์เน็ต IEEE 802.3u [2] ที่ส่งข้อมูลสูงสุดได้ 100 Mbps (TX, RX) จากข้อดีของ IEEE 802.3ad การรวมกลุ่มลิงค์ที่มีการเพิ่มแบนด์วิดท์ในการสื่อสารในสื่อกลางแบบสาย (Wire) จึงมีการนำมาใช้กับสื่อกลางแบบไร้สาย (Wireless) แบบต่างๆ เช่น เทคโนโลยีวายไฟาย (Wi-Fi) เทคโนโลยีไวแมกซ์ (Wi-MAX) เพื่อเพิ่ม ค่าปริมาณงาน (Throughput) ในการรับส่งข้อมูลไม่ว่าจะเป็น การปรับค่าดีเลย์ในการส่งแบบเครือข่ายไร้สาย การจัดสรรปริมาณการใช้โดยใช้ วิธี Support Vector Machine ซึ่งเป็นการทำ การรวมกลุ่มลิงค์ เครือข่ายไร้สายแบบต่างๆ (Multi-Radio System) โดยไม่เฉพาะเจาะจงว่าเป็นเครือข่ายไร้สายแบบใด และการใช้เทคนิค Interface Bonding เพื่อรวมกลุ่มลิงค์

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประเมินผลของค่าปริมาณงานของการรวมกลุ่มลิงค์เครือข่ายแลนไร้สาย 802.11n [3] โดยเปลี่ยนการรวมกลุ่มลิงค์จากเดิมที่เป็นสื่อกลางเป็นแบบสาย มาเป็นสื่อกลางที่เป็นแบบไร้สาย ในความถี่ที่ 2.4 GHz ใช้ช่องสัญญาณ 20 MHz ที่ไม่รบกวนกัน 2 ช่องสัญญาณ เพื่อประเมินผลค่าปริมาณงาน โดยจะทดสอบที่ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 และปรับค่า Interference Power ว่าจะส่งผลต่อค่าปริมาณงาน อย่างไรบ้าง เมื่อเทียบกับค่า SNR

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อวัดประสิทธิภาพการรวมกลุ่มลิงค์ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad

1.2.2 เพื่อประยุกต์ใช้การรวมกลุ่มลิงค์ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad กับเครือข่ายสายฟ้า (Wi-Fi) สำหรับ IEEE 802.11n

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณงานข้อมูลที่ได้จาก การรวมกลุ่มลิงค์ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad กับเครือข่ายสายฟ้า (Wi-Fi) โดยใช้โปรโตคอลที่ซีพี (TCP)

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 สร้างระบบเครือข่ายการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ระหว่างสวิตช์ 2 เครื่อง คอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง และ แอคเซสพ้อยซ์ 4 เครื่อง โดยต่อ แอคเซสพ้อยซ์ รวมลิงค์ที่ละ 2 เครื่อง (1 ลิงค์) และต่อเพิ่มอีก 2 เครื่อง (2 ลิงค์)

1.3.2 วัดผลการรวมกลุ่มลิงค์ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad กับเครือข่ายสายฟ้า (Wi-Fi) 802.11n 1 ลิงค์และ 2 ลิงค์ แบบ Point-to-Point ส่งข้อมูลแบบ Full Duplex อัตราถ่ายโอนข้อมูล 130 Mbps โดยใช้ช่องสัญญาณ ISM ที่ความถี่ 2.4 GHz ช่องสัญญาณ 20 MHz ที่ช่องสัญญาณ 1 และ 11 โมดูเลชันแบบ 64-คิวเอเอ็ม ปรับลดค่าเวลาตามมาตรฐาน 0.8 ไมโครวินาที ภายในห้อง 704 อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550 ชั้น 7 เพื่อประเมินผลค่าปริมาณงาน

1.3.3 วัดค่าการรบกวน (Interference) ของแต่ละลิงค์เมื่อมีการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์และ 2 ลิงค์ โดยแยกช่องสัญญาณ 1, 11 ในระยะทาง 2 และ 10 เมตร ตามลำดับ ความสูงของ แอคเซสพ้อยซ์ จากพื้น 0.75 เมตร และระยะห่างจาก แอคเซสพ้อยซ์ 1.8 เมตร พร้อมวัดอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เมื่อประยุกต์ใช้การรวมกลุ่มลิงค์ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad กับเครือข่ายสายฟ้า (Wi-Fi) สำหรับ IEEE 802.11n



1.3.4 วัดผลการรวมกลุ่มลิงก์ที่ 1 ลิงก์และ 2 ลิงก์ กำหนดข้อมูลในการทดลองครั้งนี้แบบ TCP ในการส่ง Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes

1.3.5 วัดผลการรวมกลุ่มลิงก์ 1 ลิงก์และ 2 ลิงก์ โดยกำหนดระยะห่างของ แอคเซสพอยท์ คือ 2 เมตรและ 10 เมตร ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load เพื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณงานและค่าของ เวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง (Round Trip Time)

1.3.6 วัดค่าการรบกวน (Interference) ของแต่ละลิงก์เมื่อมีการรวมลิงก์กันโดยแยกช่องสัญญาณ 1, 11 พร้อมวัดอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เมื่อประยุกต์ใช้การรวมกลุ่มลิงก์ตาม มาตรฐาน IEEE 802.3ad กับเครือข่ายวายฟาย (Wi-Fi) สำหรับ IEEE 802.11n

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงค่าปริมาณข้อมูล เมื่อมีการการรวมกลุ่มลิงก์ 1 ลิงก์ และ 2 ลิงก์ ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad กับเครือข่ายวายฟาย (Wi-Fi) สำหรับ IEEE 802.11n

1.4.2 ได้ทราบประสิทธิภาพความแตกต่างในการส่งข้อมูลแบบ TCP ในสภาวะที่มีโหลดและ ไม่มีโหลด เมื่อมีการการรวมกลุ่มลิงก์ 1 ลิงก์ และ 2 ลิงก์ ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad กับเครือข่าย ยายฟาย (Wi-Fi) สำหรับ IEEE 802.11n

1.4.3 ได้ทราบถึงค่า Interference Power ที่มีผลต่อค่าปริมาณข้อมูล เมื่อเทียบกับอัตราส่วน สัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR)

1.4.4 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับความถี่ย่าน 5 GHz เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล ระยะทางไกลขึ้นและทดสอบประสิทธิภาพเทียบกับโปรโตคอลอื่นเช่น UDP รวมถึงการทดสอบ เปลี่ยนระบบปฏิบัติการของเครื่อง และสามารถนำไปใช้กับ IPv6 ได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐาน IEEE802.3ad การรวมกลุ่มลิงค์ และมาตรฐานของ IEEE802.11n ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

#### 2.1 มาตรฐาน IEEE802.3ad

มาตรฐาน IEEE802.3ad การรวมกลุ่มลิงค์ (Link Aggregation) หรือเรียกอย่างหนึ่งว่า อีเทอร์ แชนแนล (Ether Channel) นั้น เป็นคุณสมบัติที่ทำให้สามารถรวมหลายๆ อินเทอร์เฟซแบบ ฟิสิคอล (Physical) เข้าด้วยกันเป็นอินเทอร์เฟซแบบลอจิคอล (Logical) เพียงอันเดียวได้ ใช้เพื่อแก้ปัญหาความคับคั่ง (Congestion) ในการใช้งานระบบเครือข่าย หรือใช้แก้ปัญหาเมื่อมีปริมาณการใช้งานระบบเครือข่ายมากเกินไปจนทำให้การรับ-ส่งข้อมูลทำได้ช้า เสมือนเป็นการเพิ่มเส้นทางข้อมูลขึ้น จากเส้นทางเดียว เป็นหลายๆ เส้นทาง เพื่อที่จะทำการแชร์ปริมาณการใช้ (Traffic) ไปในหลายๆ เส้นทาง พร้อมทั้งยังเป็นการทำส่วนซ้ำซ้อน (Redundant) ในกรณีที่มีบางลิงค์ที่เป็นสมาชิกของอีเทอร์ แชนแนล เกิดมีปัญหา และใช้เกณฑ์วิธี (Protocol) Link Aggregation Control Protocol (LACP) ในการรับ-ส่ง ข้อมูลกัน การใช้งาน การรวมกลุ่มลิงค์นี้ สามารถใช้งานได้ทั้งบน Switch Router หรือ Server ก็ได้ ที่ว่า การรวมกลุ่มลิงค์ ไม่ได้เป็นการเพิ่ม Bandwidth นั้นก็เนื่องมาจาก ในการส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ฝั่งตรงข้ามของการรวมกลุ่มลิงค์ นั้น จะมีการเลือกเส้นทางที่จะใช้ส่งข้อมูลตามเงื่อนไขเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น เพราะฉะนั้น ถ้าแต่ละเส้นทางมี Bandwidth เท่ากับ 100 Mb เมื่อทำการรวมกลุ่มลิงค์ โดยใช้ 2 Link แล้ว Bandwidth ก็ไม่ได้เพิ่มเป็น 200 Mb แต่อย่างใด (เนื่องจากในแต่ละ Link ก็ยังมี Bandwidth เท่ากับ 100 Mb เช่นเดิม) ในการที่จะใช้งาน การรวมกลุ่มลิงค์ ให้ได้เห็นผลลัพธ์อย่างชัดเจนนั้น จึงจะต้องใช้กับระบบเครือข่ายที่มีความคับคั่งที่ค่อนข้างสูง เพื่อที่จะได้ใช้การรวมกลุ่มลิงค์นี้ไปช่วยในการ Shared Load เพื่อลดค่า Congestion ลง ซึ่งถ้ามีการรวมกลุ่มลิงค์ ไปใช้กับเครือข่ายที่ไม่ได้มีการใช้งานในปริมาณที่มากแล้ว ก็อาจจะไม่เห็นความแตกต่างในการใช้งานเท่าไร แต่ประโยชน์ของการรวมกลุ่มลิงค์ นั้นยังมีมากกว่าการลดค่า Congestion ลง นั่นก็คือเป็นการสำรองเส้นทางระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำการรวมกลุ่มลิงค์ทั้งสองฝั่งนั่นเอง ถ้าเกิดกรณีที่ลิงค์ใดมีปัญหาขึ้นมา ก็ยังมีลิงค์อื่นๆ ที่สามารถใช้ในการส่งข้อมูลต่อไปได้นั่นเอง

สำหรับเงื่อนไขที่นำมาใช้ในการตัดสินใจว่าจะส่ง Packet ไปในเส้นทางใดนั้น สามารถเลือกได้จาก Mac Address, IP Address หรือ Layer 4 Port Number และสามารถกำหนดได้ทั้ง Source, Destination หรือทั้ง Source และ Destination มาใช้ในการคำนวณเพื่อที่จะตัดสินใจว่าจะส่ง Packet ไปในเส้นทางใดได้ โดยเมื่อทำการเลือกเงื่อนไขใดแล้วเงื่อนไขนั้นก็จะเป็นไปใช้กับทุก ๆ การรวมกลุ่มลิงค์ ที่มีการใช้งานอยู่บนสวิตช์ตัวนั้น และการที่จะเลือกว่าจะใช้เงื่อนไขใดก็ควรพิจารณาตามแต่ละสถานการณ์ไป เช่น ถ้าปลายทางที่จะส่งข้อมูลไปมีเพียงแห่งเดียว โดยอาจจะเป็น Server เพียงตัวเดียว ก็จะมี Mac Address เดียว ถ้าใช้เงื่อนไข Destination Mac Address ในการพิจารณา Packet ก็จะถูกส่งไปในเส้นทางเดียวเสมอ ซึ่งถ้าใช้เงื่อนไข Source Mac Address ในการพิจารณาเลือกเส้นทางก็จะให้ผลลัพธ์ในการทำ Load Sharing ที่ดีกว่า (โดย Default สวิตช์จะพิจารณาเลือกเส้นทางจาก Source Mac Address)

เมื่อได้ทำการกำหนดเงื่อนไขแล้ว สวิตช์จะนำข้อมูลตามที่กำหนดในเงื่อนไขมาประมวลผลโดยใช้ Hash Algorithm ที่เป็นแบบเฉพาะของแต่ละโปรโตคอล เพื่อที่จะใช้ในการเลือกว่าจะส่ง Packet นี้ไปในอินเทอร์เฟซใดที่เป็นสมาชิกของการรวมกลุ่มลิงค์ นี้ โดยผลลัพธ์ของการประมวลผล จะออกมาเป็นค่าตั้งแต่ 0 ถึง 7 นี่จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้แต่ละ การรวมกลุ่มลิงค์ สามารถมีอินเทอร์เฟซที่เป็นสมาชิกได้สูงสุดเพียง 8 อินเทอร์เฟซเท่านั้น โดยในแต่ละอินเทอร์เฟซนั้นจะมีหน้าที่รับผิดชอบค่า Hash อย่างน้อย 1 ค่า คือถ้าใช้ การรวมกลุ่มลิงค์ 8 อินเทอร์เฟซ แต่ละอินเทอร์เฟซก็จะรับผิดชอบค่า Hash ที่คำนวณออกมาอินเทอร์เฟซละ 1 ค่า แต่ถ้าใช้ การรวมกลุ่มลิงค์ 4 อินเทอร์เฟซ แต่ละอินเทอร์เฟซก็จะรับผิดชอบค่า Hash อินเทอร์เฟซละ 2 ค่า เป็นต้น

**ตารางที่ 2.1** จำนวนของอินเทอร์เฟซและจำนวนของค่า Hash ของการรวมกลุ่มลิงค์ [4]

Number of Ports in the Ether channel	Load Balancing
8	1:1:1:1:1:1:1:1
7	2:1:1:1:1:1:1
6	2:2:1:1:1:1
5	2:2:2:1:1
4	2:2:2:2
3	3:3:2
2	4:4

จากตารางที่ 2.1 แสดงจำนวนของอินเทอร์เฟซและจำนวนของค่า Hash ที่แต่ละอินเทอร์เฟซต้องรับผิดชอบ ซึ่งจะเห็นว่าในการที่จะทำการรวมกลุ่มลิงค์ ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้นก็ควรที่จะใช้ 2, 4 หรือ 8 อินเทอร์เฟซ ในการทำ การรวมกลุ่มลิงค์ เนื่องจากจะทำให้แต่ละอินเทอร์เฟซมีหน้าที่รับผิดชอบค่า Hash ในจำนวนที่เท่า ๆ กัน

การรวมกลุ่มลิงค์ นั้น สามารถทำงานได้ทั้งในระดับ Layer 2 (Switch Port) และ Layer 3 (Route Port) และจำนวนสูงสุดที่สามารถใช้งานอินเทอร์เฟซ Ether Channel ได้ นั้น ก็ขึ้นอยู่กับสวิตช์ในแต่ละรุ่นไปครับ โดยในการทำงานจะมีโปรโตคอลที่ใช้ในการทำ การรวมกลุ่มลิงค์ ให้เลือกใช้ดังนี้ครับ

PAgP เป็น Cisco Proprietary อุปกรณ์ทั้ง 2 ฟังก์ชันที่ทำการตั้งค่า การรวมกลุ่มลิงค์ จะต้องเป็นอุปกรณ์ Cisco ที่รองรับ PAgP เท่านั้น

LACP เป็นมาตรฐาน IEEE 802.3ad Standard ซึ่งเป็นมาตรฐานของการทำ Link Aggregation โดย LACP จะสามารถสร้าง Standby Port ได้อีก 8 Port เพิ่มเติม

และในการที่จะเลือกโปรโตคอลใดในการทำ การรวมกลุ่มลิงค์ นั้น ก็จะต้องไปทำการเลือกโหมดภายในแต่ละอินเทอร์เฟซเอาครับ โดยจะมีโหมดการทำงานให้เลือกลงนี้ครับ

Active (LACP) อินเทอร์เฟซที่ตั้งค่าในโหมดนี้จะเป็นฝ่ายเริ่มต้นเจรจาในการทำการรวมกลุ่มลิงค์ แบบ LACP โดยอุปกรณ์ฝั่งตรงข้ามจะต้องทำงานในโหมด Active หรือ Passive เท่านั้น

Passive (LACP) อินเทอร์เฟซที่ตั้งค่าในโหมดนี้จะไม่เป็นฝ่ายเริ่มเจรจา แต่จะรอรับ LACP Packet จากอุปกรณ์ฝั่งตรงข้าม เพื่อที่จะสร้าง การรวมกลุ่มลิงค์ ในแบบ LACP โดยอุปกรณ์ฝั่งตรงข้ามจะต้องทำงานในโหมด Active เท่านั้น

Desirable (PAgP) อินเทอร์เฟซที่ตั้งค่าในโหมดนี้จะเป็นฝ่ายเริ่มต้นเจรจาในการทำการรวมกลุ่มลิงค์ แบบ PAgP โดยอุปกรณ์ฝั่งตรงข้ามจะต้องทำงานในโหมด Desirable หรือ Auto เท่านั้น

Auto (PAgP) อินเทอร์เฟซที่ตั้งค่าในโหมดนี้จะไม่เป็นฝ่ายเริ่มเจรจา แต่จะรอรับ PAgP Packet จากอุปกรณ์ฝั่งตรงข้าม เพื่อที่จะสร้างการรวมกลุ่มลิงค์ ในแบบ PAgP โดยอุปกรณ์ฝั่งตรงข้ามจะต้องทำงานในโหมด Desirable เท่านั้น

On เป็นการบังคับให้อินเทอร์เฟซนี้เป็นการรวมกลุ่มลิงค์ โดยไม่ต้องมีการเจรจา แลกเปลี่ยน PAgP และ LACP Packet กัน โดยอุปกรณ์ฝั่งตรงข้ามจะต้องทำงานในโหมด On เท่านั้น ถ้าอยู่ในโหมดอื่นๆ อินเทอร์เฟซของอุปกรณ์ฝั่งตรงข้ามจะอยู่ในสถานะ Errdisable

Off เป็นการป้องกันไม่ให้มีการทำการรวมกลุ่มลิงค์ในอินเทอร์เฟซนี้

ตารางที่ 2.2 โหมดการทำงานของการรวมกลุ่มลิงค์

Switch Mode	Peer Mode	คำอธิบาย
active	active	เป็นค่าที่แนะนำสำหรับการใช้ Ether Channel แบบ LACP
active	passive	เป็น Ether channel แบบ LACP ถ้าการเจรจาสำเร็จ
desirable	desirable	เป็นค่าที่แนะนำสำหรับการใช้ Ether Channel แบบ PAgP
desirable	auto	เป็น Ether Channel แบบ PAgP ถ้าการเจรจาสำเร็จ
on	on	เป็นการทำ Ether Channel โดยไม่ใช้ทั้ง LACP และ PAgP

## 2.2 ระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network)

เป็นระบบการสื่อสารข้อมูลที่มีความคล่องตัวมาก ซึ่งอาจจะนำมาใช้ทดแทน หรือเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายใช้สายแบบดั้งเดิม โดยใช้การส่งคลื่นความถี่วิทยุ ในย่านวิทยุ RF และคลื่นอินฟราเรดในการรับ และส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องผ่านอากาศทะลุกำแพง เพดาน หรือสิ่งก่อสร้างอื่นๆ โดยปราศจากการเดินสาย นอกจากนี้ระบบเครือข่ายไร้สาย ก็ยังมีคุณสมบัติครอบคลุมการใช้งานทุกอย่างเหมือนกับเครือข่ายแบบใช้สาย และที่สำคัญก็คือ การที่ไม่ต้องใช้สาย ทำให้การเคลื่อนย้ายและการทำงานทำได้โดยสะดวก ซึ่งต่างจากเครือข่ายแบบใช้สาย ที่จะต้องใช้เวลาและการลงทุนในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์ในแต่ละครั้ง

ระบบเครือข่ายไร้สายเป็นเทคโนโลยีที่ใช้คลื่นแม่เหล็กในอากาศ เช่น คลื่นวิทยุ (Radio Frequency) หรือคลื่นอินฟราเรด (Infrared) สำหรับการสื่อสารข้อมูลต่างๆ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยไม่ต้องใช้สายนำสัญญาณ (สายเคเบิล) ในการสื่อสารข้อมูล เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายจะมีอุปกรณ์หลักที่เรียกว่า แอ็กเซสพอยท์ (Access Point) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับ รับและส่งสัญญาณ และเชื่อมต่อ เข้ากับโครงสร้างพื้นฐานของ Fixed Line ที่มีอยู่แล้ว โดยปกติ แอ็กเซสพอยท์ สามารถรองรับการทำงานของคอมพิวเตอร์ แบบโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์หรือคอมพิวเตอร์แบบพีซี ซึ่งสามารถใช้งานได้กับระบบเครือข่ายไร้สายได้หลายเครื่อง

### 2.2.1 ข้อดีของการใช้งานระบบเครือข่ายไร้สาย

ปัจจุบันการใช้งานระบบเครือข่ายไร้สายกำลังเป็นที่นิยมอย่างกว้างในองค์กรหรือหน่วยงานต่างๆ ทั้งนี้ เพราะระบบเครือข่ายไร้สาย มีข้อดีหลายประการ ดังนี้

2.2.1.1 ความยืดหยุ่นในการใช้งาน (Installation flexibility) ในปัจจุบันมีผู้ใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา หรือโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์กันเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กลงจนสามารถนำติดตัวไปใช้ในที่ต่างๆ ได้ แต่การนำโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์ ต่อกับเครือข่าย

แบบไร้สายทำได้ไม่สะดวก เช่น การนำโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์เข้าห้องประชุม หรือ การปรึกษาหารือระหว่างกลุ่มย่อย ถ้าใช้เครือข่ายแบบมีสาย จะยุ่งยากในการปรับเปลี่ยน แต่สำหรับเครือข่ายไร้สายนั้นก็ จะเกิดความสะดวกสบายยิ่งขึ้น ซึ่งรวมไปถึงการติดตั้งเครือข่ายไร้สายก็สามารถทำได้ง่ายมากกว่า ดังนั้นหากห้องสมุดมีเครื่องคอมพิวเตอร์ให้บริการจำนวนจำกัด ก็สามารถเพิ่มจุดบริการเครือข่ายคอมพิวเตอร์ได้ โดยอนุญาตให้ผู้ใช้ห้องสมุดนำเครื่องโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์ของตนเอง เข้ามาใช้บริการสืบค้นข้อมูล ผ่านระบบเครือข่ายไร้สายในห้องสมุดได้โดยอิสระภายในบริเวณที่มีสัญญาณครอบคลุม

2.2.1.2 ความคล่องตัว (Mobility Improves Productivity and Service) ในบางครั้งการเคลื่อนย้าย ตำแหน่งของผู้ใช้อาจไม่เฉพาะเจาะจงอยู่ที่ทำงานอย่างเดียว อาจครอบคลุมไปยังที่ต่างๆ เช่น เจ้าหน้าที่ห้องสมุดสามารถสำรวจทรัพยากรสารสนเทศ ภายในห้องสมุดแบบระบบออนไลน์ผ่านเครื่องโน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์กับเครื่องอ่านบาร์โค้ด ส่วนผู้ใช้ห้องสมุดสามารถย้ายจากที่นั่งได้โดยสัญญาณเครือข่ายจะไม่หยุดชะงัก เป็นต้น

2.2.1.3 การขยายเครือข่าย (Scalability) ระบบเครือข่ายแบบไร้สายทำให้เครือข่ายขององค์กรสามารถปรับขนาด และความเหมาะสมได้ง่าย ไม่ยุ่งยากในเรื่องการเดินทางสื่อสาร ซึ่งมีปัญหาในเรื่องการปรับปรุงสถานที่ เพื่อเดินสายสัญญาณเป็นเรื่องไม่พึงปรารถนา

2.2.1.4 การติดตั้งง่ายและรวดเร็ว (Installation Speed and Simplicity) ระบบเครือข่ายไร้สายสามารถครอบคลุมพื้นที่เล็กๆ โดยมีการเชื่อมโยงระหว่างอาคารได้ด้วยระบบแบบจุดไปจุด ทำให้ดำเนินการได้เร็วและสะดวกต่อการติดตั้ง เพราะไม่ต้องเดินสายไฟ สายเคเบิล หรือสายสื่อสารข้อมูล

2.2.1.5 ลดค่าใช้จ่ายโดยรวมในระยะยาว (Reduced Cost of Ownership) ในตอนแรกอาจจะต้องลงทุนค่อนข้างสูง เพราะอุปกรณ์ที่ใช้กับระบบเครือข่ายไร้สายมีราคาสูง แต่เมื่อต้องการขยายเครือข่าย ก็เพียงแค่ซื้ออุปกรณ์อีกเครื่องมาติดตั้ง โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเดินสายสัญญาณ

## 2.2.2 ข้อเสียของการใช้งานระบบเครือข่ายไร้สาย

ถึงแม้ว่า ระบบเครือข่ายไร้สาย มีข้อดีหลายประการ แต่อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะตัดสินใจเลือกใช้งานระบบเครือข่ายไร้สาย ควรคำนึงถึงข้อจำกัด ดังนี้

2.2.2.1 ใช้ค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้งครั้งแรก เพราะปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของระบบเครือข่ายไร้สายไม่ว่าจะเป็น Access Point Wireless Router หรือ Wireless Network Adapter ฯลฯ มีราคาค่อนข้างสูง แต่อย่างไรก็ตามในอนาคต ราคาของอุปกรณ์เหล่านี้มีแนวโน้มว่าจะลดลง เพราะเกิดการแข่งขันกันของบริษัทผู้ผลิตผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ซึ่งเป็นผลดีกับผู้บริโภค ซึ่งสามารถที่จะเลือกอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กับระบบเครือข่ายไร้สายให้เหมาะสมกับการใช้งานและงบประมาณที่มีอยู่

2.2.2.2 ระบบการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล เนื่องมาจากการสื่อสารข้อมูลในระบบเครือข่ายไร้สายใช้สัญญาณวิทยุ ดังนั้นอาจจะมีการหลุดลอกของข้อมูล หรือ การทำลายจากผู้ไม่หวังดี ดังนั้นควรที่จะระมัดระวัง และเห็นความสำคัญของระบบการรักษาความปลอดภัยในการใช้งานด้วย

### 2.2.3 แนวโน้มของระบบเครือข่ายไร้สายในอนาคต

จากอดีตถึงปัจจุบันเทคโนโลยีระบบเครือข่ายไร้สาย มีการพัฒนาที่รวดเร็วและมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ อย่างไม่หยุดยั้ง ทั้งนี้เพราะว่าบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของระบบเครือข่ายไร้สาย ต่างก็พัฒนาผลิตภัณฑ์ของตน ไม่ว่าจะเป็นเรื่องการรักษาความปลอดภัย ความคุ้มค่าในการลงทุน และเทคโนโลยีใหม่ที่อำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้ให้ก้าวหน้ากว่าบริษัทคู่แข่ง ดังนั้นในอนาคตอันใกล้ อาจจะมีผลิตภัณฑ์รุ่นใหม่ที่มีความสามารถและประสิทธิภาพตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ที่บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์แข่งขันกันผลิตและพัฒนาเทคโนโลยีของตน ส่งผลทำให้ราคาของอุปกรณ์แนวโน้มที่จะลดตามไปด้วย สำหรับทิศทางการพัฒนาเทคโนโลยีระบบเครือข่ายไร้สาย ได้แก่ การพัฒนาในเทคนิคการแปลงสัญญาณที่ใช้รับส่งข้อมูลเป็นคลื่นวิทยุ และการพัฒนาเทคโนโลยีฮาร์ดแวร์ในระดับพื้นฐาน เป็นต้น นอกจากนี้ตลาดของระบบเครือข่ายไร้สายได้มุ่งความสนใจไปที่ภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากการทำงานในโรงงานมีความจำเป็นที่พนักงานจะต้องเคลื่อนย้ายการทำงานในโรงงานตามที่ตั้งต่างๆ ไม่เพียงเท่านั้น ตลาดเหล่านี้ยังรวมถึงธุรกิจการค้าปลีก และ โกดังหรือคลังสินค้า ซึ่งพนักงานต้องมีอุปกรณ์ขนาดมือถือสำหรับใช้เก็บข้อมูลและบริหารบัญชีรายการสินค้าคงคลังด้วย อย่างไรก็ตามแนวโน้มเหล่านี้ก็แสดงให้เห็นว่าผู้คนส่วนใหญ่กำลังหันมาให้ความสนใจกับการใช้งานระบบเครือข่ายไร้สายกันมากขึ้นๆ

### 2.2.4 ระบบเครือข่ายไร้สาย สามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

2.2.4.1 PAN (Personal Area Network) Bluetooth เป็นมาตรฐานการเชื่อมต่อในประเภทนี้ โดย Bluetooth นั้นมีข้อจำกัด คือ มีแบนด์วิธที่แคบและระยะทางใกล้ๆ มักจะใช้เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์กับอุปกรณ์ (Peer-to-Peer หรือ Device-to-Device)

2.2.4.2 LAN (Local Area Network) มาตรฐาน 802.11 HiperLAN2 ความเร็ว 11 – 54 Mbps มี รัศมีกว้างกว่า Bluetooth ใช้สำหรับระบบเน็ตเวิร์ค (Enterprise Networks)

2.2.4.3 MAN (Metropolitan Area Network) มาตรฐาน 802.11 MMDS, LMDS ซึ่งมีความเร็ว 11 – 100+ Mbps แทนระบบ T1 รัศมีไกล

2.2.4.4 WAN (Wide Area Network) – มาตรฐาน GSM, GPRS, CDMA, 2.5-3G ซึ่งมีความเร็ว 10 – 384 Kbps รัศมีไกลมาก ใช้ในโทรศัพท์มือถือ และระบบเซลลูลาร์ซึ่งการสื่อสารแบบไร้สายนี้ จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีที่ซับซ้อนมากกว่าแบบปกติ ในการวิเคราะห์หรือออกแบบระบบ

เครือข่ายไร้สาย จึงจำเป็นต้องศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและเทคโนโลยีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบ

## 2.2.5 รูปแบบการเชื่อมต่อของระบบเครือข่ายไร้สาย

### 2.2.5.1 Peer-to-Peer (Ad Hoc Mode)

รูปแบบการเชื่อมต่อระบบเครือข่ายไร้สายแบบ Peer-to-Peer เป็นลักษณะการเชื่อมต่อแบบโครงข่ายโดยตรง ระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ จำนวน 2 เครื่อง หรือมากกว่านั้น เป็นการใช้งานร่วมกันของ Wireless Adapter Cards โดยไม่ได้มีการเชื่อมต่อกับเครือข่ายแบบใช้สายเลย โดยที่เครื่องคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องจะมีความเท่าเทียมกัน สามารถทำงานของตนเองได้และขอใช้บริการเครื่องอื่นได้ เหมาะสำหรับการนำมาใช้งาน เพื่อจุดประสงค์ในด้านความรวดเร็วหรือติดตั้งได้โดยง่าย เมื่อไม่มีโครงสร้างพื้นฐานที่จะรองรับ ยกตัวอย่างเช่น ในศูนย์ประชุม หรือการประชุมที่จัดขึ้นนอกสถานที่

### 2.2.5.2 Client/Server (Infrastructure Mode)

ระบบเครือข่ายไร้สายแบบ Client/Server หรือ Infrastructure Mode เป็นลักษณะการรับส่งข้อมูล โดยอาศัยแอคเซสพอยท์ (Access Point) หรือเรียกว่า “Hot spot” ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมต่อ ระหว่างระบบเครือข่ายแบบใช้สาย กับเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่าย (Client) โดยจะกระจายสัญญาณคลื่นวิทยุเพื่อรับ-ส่งข้อมูลเป็นรัศมีโดยรอบ เครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ในรัศมีของ แอคเซสพอยท์ จะกลายเป็นเครือข่ายกลุ่มเดียวกันทันที โดยเครื่องคอมพิวเตอร์จะสามารถติดต่อกัน หรือติดต่อกับ Server เพื่อแลกเปลี่ยนและค้นหาข้อมูลได้ โดยต้องติดต่อผ่าน แอคเซสพอยท์ เท่านั้น ซึ่งแอคเซสพอยท์ 1 จุด สามารถให้บริการเครื่องลูกข่ายได้ถึง 15-50 อุปกรณ์ของเครื่องลูกข่าย เหมาะสำหรับการนำไปขยายเครือข่าย หรือใช้ร่วมกับระบบเครือข่ายแบบใช้สายเดิมในออฟฟิศ ห้องสมุด หรือในห้องประชุม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้มากขึ้น

## 2.2.6 ขอบเขตพื้นที่ให้บริการเครือข่ายไร้สาย

เป็นกลุ่มของอุปกรณ์เครือข่ายไร้สาย ตั้งแต่สองเครื่องขึ้นไป อยู่ในขอบเขตพื้นที่ให้บริการที่ใช้ ช่องสัญญาณสื่อสารข้อมูลช่องเดียวกัน และอยู่ในรัศมีที่สามารถแพร่กระจายคลื่นถึงกันได้ แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

### 2.2.6.1 Basic Service Set (BSS)

Basic Service Set (BSS) หมายถึง บริเวณของเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN ที่มีสถานีแม่ข่าย 1 สถานี ซึ่งสถานีผู้ใช้งานในขอบเขตของ BSS นี้ ทุกสถานีจะต้องสื่อสารข้อมูลผ่านสถานีแม่ข่ายดังกล่าวเท่านั้น



### 2.2.6.2 Extended Service Set (ESS)

Extended Service Set (ESS) หมายถึง บริเวณของเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN ที่ประกอบด้วย BSS มากกว่า 1 BSS ซึ่งได้รับการเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน สถานีผู้ใช้สามารถเคลื่อนย้ายจาก BSS หนึ่ง ไปอยู่ในอีก BSS หนึ่งได้โดย BSS เหล่านี้ จะทำการ Roaming หรือติดต่อ สื่อสารกัน เพื่อทำการโอนย้ายการให้บริการสำหรับสถานีผู้ใช้อย่างกล่าว

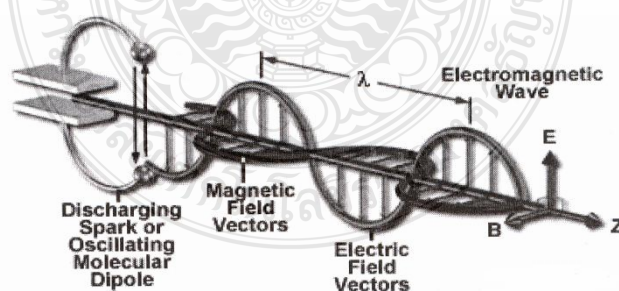
## 2.3 ทฤษฎีคลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุ (Radio Wave) [5] เป็นคลื่นช่วงหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และถูกนำมาใช้ใน ระบบสื่อสาร โดยอาศัยคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเดินทางจากจุดหนึ่ง ไปยังอีกจุด หนึ่ง โดยไม่ต้องใช้ตัวกลางเดินทางด้วยความเร็วเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s

### 2.3.1 ลักษณะของคลื่นวิทยุ คลื่นวิทยุมีลักษณะที่สำคัญ ดังนี้

#### 2.3.1.1 การเกิดคลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุ เป็นเพียงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงหนึ่งในสเปกตรัม สามารถเดินทาง ด้วยความเร็วเท่ากับแสง หรือประมาณ  $3 \times 10^8$  m/s คลื่นวิทยุที่ใช้งานกันอยู่นี้ ไม่ได้เกิดขึ้นเองตาม ธรรมชาติ ต้องอาศัยกระบวนการเหนี่ยวนำซึ่งมีขั้นตอน คือ การปล่อยกระแสไฟฟ้าเป็นความถี่ผ่าน ขดลวดตัวนำ เป็นจังหวะซ้ำๆ กัน จากนั้นสนามไฟฟ้าก็จะแผ่ออกมาจากขดลวด โดยจะมีความเข้ม สูงขึ้นแล้วจะค่อยๆ ลดลง ในทิศทางตรงกันข้ามสลับกันไป ตามไฟฟ้าที่ไหลเข้ามาในขดลวด โดยมี ลักษณะคล้ายสัญญาณรูปไซน์ (Sine Wave)



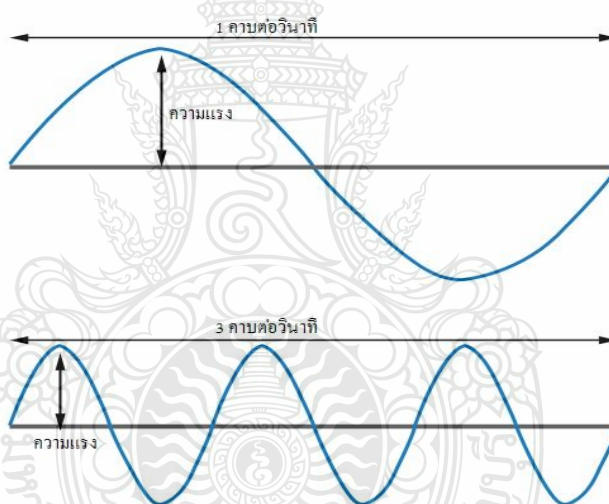
ภาพที่ 2.1 การเกิดขึ้นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้าสปาร์ค

### 2.3.1.2 ความถี่ของคลื่น (Frequency)

ลักษณะคลื่นชนิดอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจะคล้ายกับคลื่นน้ำเช่นกัน วิธีที่จะนับจำนวนลูกคลื่นก็คือการนับจากจุดสูงสุดของคลื่นลูกหนึ่งไปยังจุดสูงสุดของอีกลูกหนึ่ง ก่อนที่รูปคลื่นจะมีรูปร่างซ้ำกัน และตัวแปรที่จะบอกว่าคลื่นนี้เกิดขึ้นกี่ลูกใน 1 วินาที ก็คือความถี่ (Frequency) มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hertz)

### 2.3.1.3 ความแรงของคลื่น (Amplitude)

ตัวแปรที่เราใช้บอกว่าคลื่นนี้มีความแรงเท่าไรก็คือ “แอมพลิจูด (Amplitude)” ซึ่งสามารถวัดแรงนี้ทำได้ด้วยการวัดจากจุดที่สูงที่สุดไปยังกึ่งกลางระหว่างจุดที่สูงที่สุดกับต่ำที่สุด ยิ่งคลื่นมีความแรงมากเท่าไร จะมีพลังงานสูงมากเท่านั้นไปด้วย คล้ายๆ กับคลื่นน้ำที่มีความสูงมาก ๆ เมื่อกระทบกับเรือก็จะทำให้เรือโคลงเคลงได้



ภาพที่ 2.2 คลื่นและความถี่

### 2.3.1.4 ความยาวของคลื่น (Wave Length)

ความยาวคลื่น เป็นตัวที่บอกคุณสมบัติของคลื่นได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างเช่น คลื่นที่มีความยาวมากจะเดินทางได้ไกล ส่วนคลื่นที่มีความยาวสั้น จะเดินทางได้ใกล้ๆ สามารถหาความยาวคลื่นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นวิทยุ จากสมการด้านล่างนี้

$$\lambda = c / f \quad (2.1)$$

โดยที่  $c$  คือความเร็วที่คลื่นเดินทางได้ นั่นก็ คือ ความเร็วของแสง

$\lambda$  คือ ความยาวของคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร

$f$  คือ ความถี่ของคลื่นวิทยุ มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hertz)

### 2.3.1.5 คลื่นความถี่วิทยุย่านต่างๆ

คลื่นวิทยุ (Radio Wave) เป็นคลื่น ที่ถูกใช้ในระบบสื่อสารหลาย ๆ ประเภท ได้แก่ คลื่นวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีช่วงตั้งแต่ 88-108 MHz คลื่นวิทยุสมัครเล่น ที่มีความถี่ 144 MHz วิทยุสื่อสารที่ใช้กันในระบบราชการ และ คลื่นวิทยุที่ใช้ในระบบโทรศัพท์มือถือ ซึ่งมีหลายย่านด้วยกัน เช่น ย่าน 800, 900, 1800 และ 1900 MHz เป็นต้น ผู้ที่มีหน้าที่ จัดสรรความถี่ในประเทศไทย คือ คณะกิจการกระจายเสียงและกิจการโทรทัศน์แห่งชาติ (กสช.) ซึ่งจะมีหน้าที่วางแผน และ จัดสรรความถี่ให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุด และ ยังมีหน้าที่ตรวจสอบและคอยระวังเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันขึ้น ความถี่ที่จัดสรรส่วนใหญ่มักจะเป็นความถี่ที่ใช้เพื่อการติดต่อ สื่อสารทางราชการ หรือความถี่ในงานสัมปทานต่างๆ แต่ก็มีย่านความถี่ย่านหนึ่งที่เรียกว่า ISM Band (Industrial Scientific and Medical Band) ซึ่งเป็นความถี่เสรีที่ใช้กันทั่วโลกโดยไม่ต้องขออนุญาต ซึ่งมีทั้งหมด 3 ย่าน คือ ย่าน 900 MHz ย่าน 2.4 GHz และย่าน 5 GHz แต่เมืองไทยนั้นสามารถใช้งานได้ย่านเดียว คือ 2.4 GHz ในสเปกตรัมของคลื่นความถี่วิทยุ ก็แบ่งออกเป็นหลายช่วง เช่นกัน แต่ละช่วงก็มีลักษณะต่างกันไป ทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับงานต่างๆ ต่อไป ตารางข้างล่างเป็นย่านความถี่ต่างๆ ที่ถูกแบ่งเอาไว้เพื่อใช้งานในรูปแบบต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.3 ย่านความถี่ต่างๆ

ย่านความถี่	ความถี่	ความยาวคลื่น
Very Low Frequency (VLF)	3-30 kHz	ยาวกว่า 10 km
Low Frequency (LF)	30-300 kHz	10-1 km
Medium Frequency (MF)	300-3,000 kHz	1000-100 m
High Frequency (HF)	3-30 MHz	100-10 m
Very High Frequency (VHF)	30-300 MHz	10-1 m
Ultra High Frequency (UHF)	300-3,000 MHz	100-10 cm
Super High Frequency (SHF)	3-30 GHz	10-1 cm
Extreme High Frequency (EHF)	30-300 GHz	10-1 mm

Very Low Frequency (VLF) เป็นความถี่ย่าน 3-30 kHz มักถูกใช้ในวิทยุของเรือเดินสมุทร เนื่องจากเป็นคลื่นสั้น มีคุณสมบัติสามารถเดินทางไปได้ระยะไกลๆ

Low Frequency (LF) And Medium Frequency (MF) เป็นคลื่นความถี่ย่าน 30-3,000 KHz ถูกใช้ในวิทยุ AM มีคุณสมบัติเดินทางได้ไกลมากๆ สามารถข้ามทวีปได้โดยไม่ต้องอาศัยสถานีทวนสัญญาณ

High Frequency (HF) เป็นคลื่นความถี่ระหว่าง 3 – 30 MHz มักถูกเรียกว่าเป็นวิทยุคลื่นสั้น ถูกใช้ในระบบวิทยุกระจายเสียงแบบ AM และระบบวิทยุสมัครเล่น

Very High Frequency (VHF) เป็นคลื่นความถี่ระหว่าง 30-300 MHz ถูกใช้ในระบบวิทยุแบบ FM และการกระจายสัญญาณโทรทัศน์ในช่อง 5, 7, 9 และ 11

Ultra High Frequency (UHF) เป็นคลื่นความถี่ระหว่าง 300-3,000 MHz มักถูกใช้ในโทรศัพท์มือถือ การกระจายสัญญาณโทรทัศน์ของสถานีช่อง 3, ITV และระบบ Wireless LAN

Super High Frequency (SHF) เป็นคลื่นความถี่ระหว่าง 3-30 GHz ถูกใช้ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมและการรับส่งสัญญาณโทรทัศน์ของ UBC จากดาวเทียมไทยคม

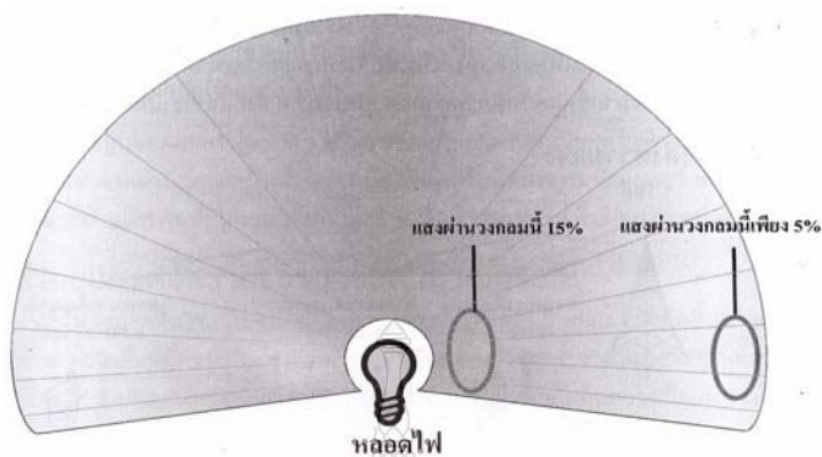
Extreme High Frequency (EHF) เป็นคลื่นความถี่ระหว่าง 30-300 GHz ถูกใช้ในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม และระบบเรดาร์ค้นหาเครื่องบิน

### 2.3.2 คุณสมบัติของคลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติเหมือนกับคลื่นทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติการแทรกสอด การเลี้ยวเบน การสะท้อน หรือการหักเห แต่มีคุณสมบัติของคลื่นบางประการที่ควรทราบเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

#### 2.3.2.1 การลดทอนของคลื่น (Attenuation)

การแพร่กระจายของคลื่นวิทยุ คล้ายกับแสงไฟ เมื่ออยู่ใกล้กับหลอดไฟก็จะเห็นว่าหลอดไฟนั้นสว่างจ้าจนแทบจะมองไม่ได้ และเมื่อเดินห่างจากหลอดไฟไปก็จะสังเกตเห็นว่าหลอดไฟนี้สว่างลดลง เพราะว่าเมื่อลำแสงได้กระจายออกไป เมื่ออยู่ใกล้ ๆ ก็จะมีลำแสง จำนวนมากกระจายผ่านพื้นที่หนึ่งๆ มาก แต่เมื่อออกห่างไป จำนวนแสงที่ผ่านพื้นที่วงกลมก็จะลดลงนั้น จะทำให้ความเข้มของแสงต่อพื้นที่ลดลงด้วย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

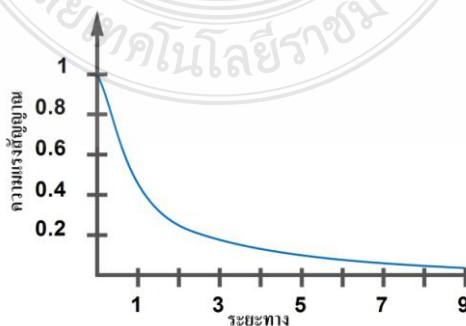


ภาพที่ 2.3 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุ

การแพร่กระจายของคลื่นวิทยุ มีลักษณะคล้ายกับแสงเช่นกัน เพราะคลื่นวิทยุก็เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งเหมือนกัน ความแรงของสัญญาณวิทยุก็จะลดลงตามระยะห่างจากต้นกำเนิดเป็นอัตราส่วนผกผันกำลังสอง นั่นหมายความว่า ยิ่งอยู่ห่างจากต้นกำเนิดแสงมากเท่าไร ความแรงของสัญญาณก็จะยิ่งลดลงมากเป็นทวีคูณ ตามสมการความเข้มของสัญญาณของ Friis

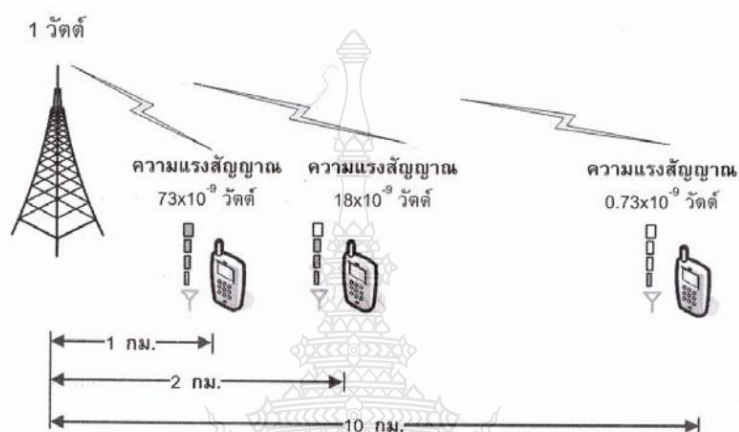
$$P_d = \frac{P_T}{4\pi d^2} \quad (2.2)$$

โดย  $P_T$  คือ ความแรงของสัญญาณจากเครื่องส่ง  
 $P_d$  คือ ความเข้มของสัญญาณที่เครื่องรับซึ่งห่างจากเครื่องส่งเป็นระยะทาง  
 $d$  คือ ระยะระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ



ภาพที่ 2.4 ความแรงสัญญาณกับระยะทาง

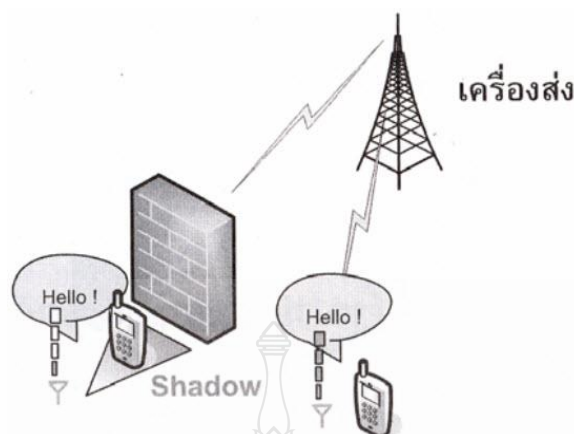
จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า ความเข้มของสัญญาณจะแปรผกผันในอัตราส่วนของระยะทางกำลังสอง ตัวอย่างเช่น เมื่อมีสถานีวิทยุส่งสัญญาณความแรง 1 วัตต์ เมื่ออยู่ห่าง 1 กิโลเมตร ความแรงของสัญญาณที่จอเครื่องรับก็จะเต็มสเกล แต่เมื่อคุณอยู่ห่าง 10 กิโลเมตร ความแรงของสัญญาณก็เกือบจะเป็นศูนย์



ภาพที่ 2.5 ระยะทางมีผลกับความแรงของสัญญาณระหว่างเครื่องรับและเครื่องส่ง

### 2.3.2.2 สิ่งกีดขวางที่มีผลกระทบต่อสัญญาณคลื่นวิทยุ

ในสถานะใช้งานทั่วไป คงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมีสิ่งกีดขวางอยู่ ไม่ว่าจะเป็นอาคาร ต้นไม้เสาไฟฟ้า ผนังห้อง หรือกระจก สิ่งเหล่านี้ อาจจะมีคุณสมบัติในการลดทอนการดูดซับคลื่น ซึ่งวัตถุที่มีผลต่อคลื่นวิทยุที่สำคัญก็คือ โลหะ ซึ่งสามารถสังเกตได้ง่ายๆ ว่าเมื่ออยู่ในลิฟต์ โทรศัพท์มือถือ มักจะรับสัญญาณไม่ได้ หรือสายมักจะหลุดบ่อย ผนังคอนกรีตจะมี อัตราการลดทอนสัญญาณสูง เมื่อคลื่นวิทยุปะทะกับผนังคอนกรีตก็จะผ่านไปไม่ได้ ดังจะสังเกตได้จากการเดินเข้าไปในอาคารจอดรถชั้นใต้ดิน มักจะมีผนังคอนกรีตหนาๆ กั้นอยู่ วัตถุเหล่านี้จะป้องกันไม่ให้คลื่นผ่านได้ ทำให้ไม่สามารถรับสัญญาณได้



ภาพที่ 2.6 เขตเงาสัญญาณที่เกิดขึ้นกับสัญญาณโทรศัพท์มือถือ

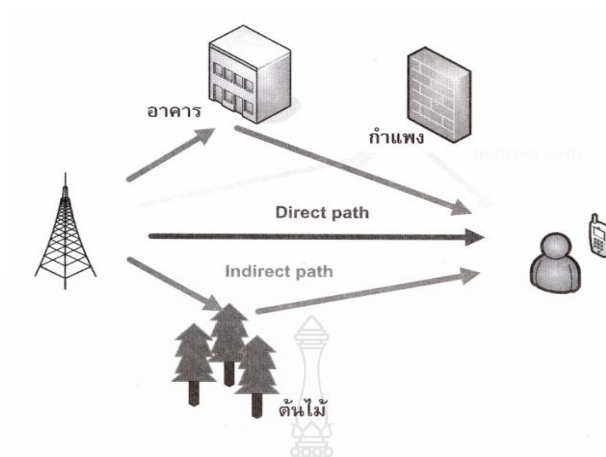
การบังคลื่นของสิ่งกีดขวางขนาดใหญ่ทำให้เกิดเขตเงา (Shadow) อาการนี้มักเกิดขึ้นเมื่ออยู่หลังอาคารสูงๆ หรือภูเขา ซึ่งจะสังเกตง่ายๆ จากการขับรถไปในบริเวณที่มีหุบเขา ภูเขาเหล่านี้จะบังคลื่นให้รับฟังวิทยุขาดๆ หายๆ และเมื่อพ้นบริเวณนั้น สัญญาณวิทยุก็จะกลับมาชัดเจนเหมือนเดิม ยิ่งอยู่ในอาคารสูงมากๆ หรืออาศัยอยู่ในอาคารพาณิชย์หรือ ดึกแถวอาจจะพบกับ ปัญหานี้มากขึ้น

#### 2.3.2.3 ความถี่วิทยุมีผลต่อความแรงของสัญญาณ

ความถี่ของคลื่นวิทยุ มีผลต่ออัตราการลดทอนของคลื่นวิทยุ กล่าวคือ คลื่นความถี่ต่ำๆ จะมีอัตราการลดทอนต่ำกว่าคลื่นที่มีความถี่สูง คลื่นความถี่ที่ใช้ในระบบไวเลสแลนนั้น มีความถี่ที่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งความถี่นี้จัดว่าเป็นความถี่ที่สูงมักจะเดินทางได้ไม่ไกล ซึ่งการเดินทางได้ไม่ไกล ทำให้สามารถควบคุมการแพร่กระจายได้ง่ายขึ้น ทำให้ลดปัญหาคลื่นเดินทางรบกวนกับเครื่องข่ายข้างเคียงได้ง่ายขึ้น

#### 2.3.2.4 การสะท้อนการเดินทางของคลื่นจากหลายทิศทาง

คุณสมบัติการสะท้อนจากวัตถุต่างๆ ได้ เมื่อส่งสัญญาณวิทยุออกอากาศมา คลื่นก็จะเดินทางมาถึงปลายทางจากหลายทิศทาง เพราะเกิดการสะท้อนจากวัตถุหลายๆ อย่างรอบตัวเรา ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ การเดินทางของคลื่นจากหลายทิศทาง (Multipath) ”



ภาพที่ 2.7 การสะท้อนและการเดินทางของคลื่นจากหลายทิศทาง

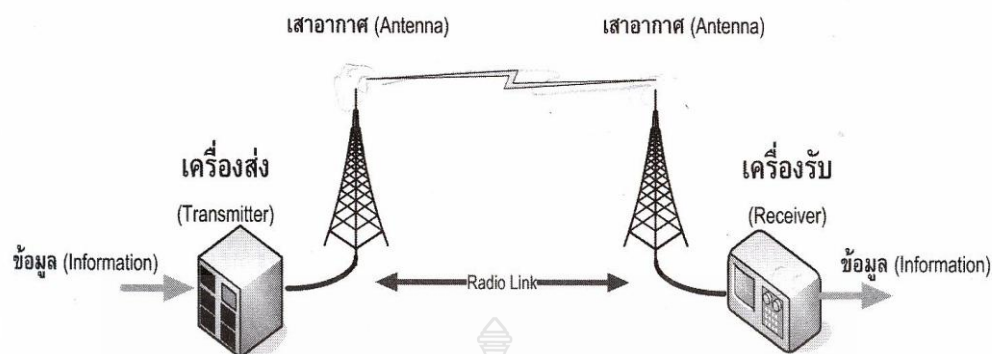
ข้อดี คือ การสะท้อนของคลื่นจากหลายทิศทางทำให้รับสัญญาณได้ แม้ว่าจะอยู่หลังอาคารสูงๆ หรือในหุบเขา คลื่นที่เดินทางมากก็จะสะท้อนกับวัตถุรอบข้าง จนเดินทางมาถึงปลายทางได้โดยจำเป็นว่าปลายทางจะอยู่ในระยะสายตากับเครื่องส่งวิทยุ นั้น

ข้อเสีย คือ การเดินทางของคลื่นมาจากหลายทิศทาง ทำให้คลื่นเดินทางไปยังปลายทางช้าและเร็วไม่เท่ากัน ทำให้รูปร่างสัญญาณที่มาถึงยังเครื่องรับมีรูปร่างผิดเพี้ยนไป เครื่องรับก็จะรับสัญญาณได้ไม่ชัดเจน ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องรับมากที่สุด ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ เมื่อตั้งเครื่องรับวิทยุไว้บางจุด ก็จะรับสัญญาณไม่ชัดเจน แต่เมื่อเปลี่ยนที่ตั้งก็จะรับสัญญาณได้ชัดเจนขึ้น

### 2.3.3 การรับส่งสัญญาณโดยใช้คลื่นวิทยุ

เป้าหมายหลักของการใช้คลื่นวิทยุในการรับ-ส่งข้อมูล ก็คือ การส่งข้อมูลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยใช้คลื่นวิทยุ ซึ่งไม่จำเป็นจะต้องเดินสายเชื่อมต่อระหว่าง 2 จุด นั้น ซึ่งมีอุปกรณ์หลักอยู่ 3 ประเภท คือ เครื่องส่ง เสาอากาศ และเครื่องรับ





ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบหลักในระบบสื่อสารไร้สาย โดยใช้คลื่นวิทยุในการรับส่งสัญญาณ

### 2.3.3.1 เครื่องส่งสัญญาณวิทยุ (Transmitter)

เมื่อต้องการส่งข้อมูล ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณเสียงเพลงหรือ ข้อมูลที่เป็นดิจิทัล ก็ต้องป้อนข้อมูลให้กับเครื่องส่งสัญญาณ หลังจากนั้น ข้อมูลก็จะถูกโมดูเลทเข้ากับคลื่นพาหะซึ่งเป็นคลื่นวิทยุที่ใช้สำหรับนำพาข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง หลังจากโมดูเลทเสร็จแล้ว ก็จะได้สัญญาณวิทยุ ซึ่งก็จะนำไปผ่านวงจรขยาย เพื่อเร่งความแรงของสัญญาณ เพื่อให้ออกสู่อากาศได้ในระยะทางไกลๆ สัญญาณวิทยุก็จะถูกส่งไปยังเสาอากาศ โดยผ่านสายนำสัญญาณเพื่อออกอากาศต่อไป

### 2.3.3.2 เสาอากาศ (Antenna)

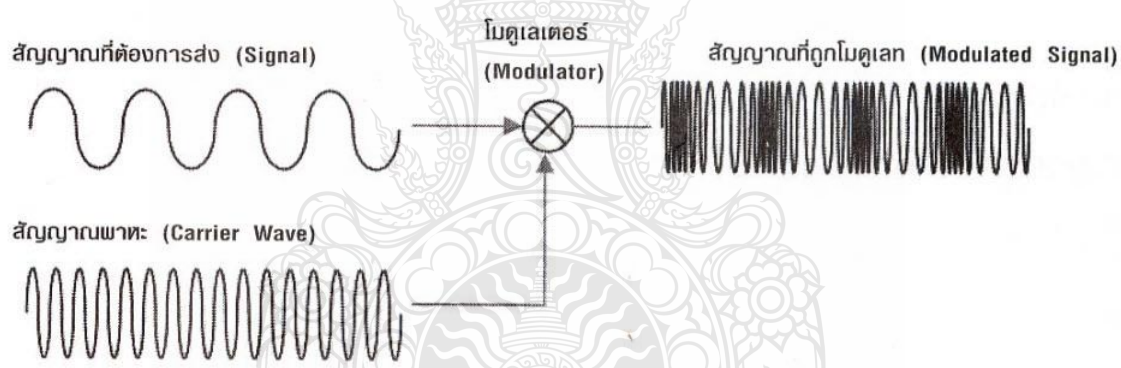
หน้าที่หลักของเสาอากาศ คือ การแปลงสัญญาณวิทยุ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อส่งออกอากาศไปยังภาคส่งคลื่นวิทยุ และทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในอากาศไปเป็นสัญญาณวิทยุ เพื่อส่งให้ภาครับ ทำการดีโมดูเลทข้อมูลจากสัญญาณวิทยุต่อไป เสาอากาศจัดเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญมาก ถ้าเสาอากาศไม่มีคุณภาพ ก็จะส่งสัญญาณไม่ออก หรือไม่สามารถรับสัญญาณ ได้เลยซึ่งมีตัวแปรหลายๆ ค่าที่ใช้บอกคุณสมบัติของเสาอากาศ เช่น เกน (Gain) หรืออัตราขยาย เป็นตัวบอกว่าเสาอากาศนี้ มีคุณสมบัติในการแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มาเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ดีเพียงใด ค่า Beam Width ซึ่งบอกรูปร่างลักษณะของการกระจายคลื่นว่าเป็นรูปแบบใด การเลือกใช้เสาอากาศที่มีทิศทางจะช่วยกำหนดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้ดีกว่า และค่า SWR เป็นตัวเลขที่ บอกถึงคลื่นที่สะท้อนกลับมาเมื่อส่งสัญญาณออกไป หากค่า SWR นี้สูงมาก ก็อาจทำให้เครื่องส่งพังได้

### 2.3.3.3 เครื่องรับสัญญาณวิทยุ (Receiver)

หลังจากมีสัญญาณออกอากาศมาก็จะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กระจายออกไปในระบบเครื่อง ระบบวิทยุก็จะใช้เสาอากาศในการเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาเป็นสัญญาณไฟฟ้า หลังจากนั้นก็จะเป็นการขยายสัญญาณให้มีความแรงขึ้น สัญญาณนี้ก็จะถูกทำการดีโมดูเลทข้อมูลออกจากคลื่นพาหะ ข้อมูลที่ได้ก็จะถูกเอาไปใช้งาน ซึ่งเป็นการสิ้นสุดกระบวนการรับและส่งคลื่นวิทยุ

### 2.3.4 การโมดูเลชัน (Modulation) สัญญาณวิทยุ

การโมดูเลชันนั้น เป็นการผสมผสานสัญญาณความถี่ต่ำเข้ากับสัญญาณความถี่สูงซึ่งเป็นพาหะ (Carrier Wave) การโมดูเลชันนั้นได้ประโยชน์จากคุณสมบัติของคลื่นพาหะ ก็คือ คลื่นพาหะเป็นคลื่นวิทยุที่สามารถเดินทางได้ไกล ทำให้เราสามารถส่งสัญญาณออกไปได้ระยะไกลมากๆ นอกจากนี้ การโมดูเลชันยังเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณอีกด้วย เมื่อสัญญาณถูกส่งออกอากาศก็จะมีคลื่นพาหะที่ต่างกัน จึงไม่มีโอกาสที่สัญญาณนี้จะรบกวนกัน ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การโมดูเลทสัญญาณเสียงเข้ากับคลื่นพาหะ

การทำงานของ การโมดูเลชันนั้นต้องอาศัยอุปกรณ์ที่เรียกว่า “โมดูเลเตอร์” (Modulator) เป็นตัวผสมสัญญาณระหว่างคลื่นพาหะความถี่สูงกับ สัญญาณที่ต้องการส่ง หลังจากผ่านโมดูเลเตอร์แล้วก็จะได้อัตราที่โมดูเลทแล้ว ลักษณะของรูปสัญญาณที่ได้จะขึ้นอยู่กับวิธีการโมดูเลชันซึ่งมีหลายรูปแบบ

### 2.3.5 ประเภทการรับและส่งสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุ

เป้าหมายของการรับ-ส่งสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุ ก็คือ การส่งข้อมูลข่าวสาร ซึ่งสามารถประยุกต์การใช้งานได้หลายๆ ประเภท อาจจะเป็นการส่งสัญญาณทางเดียว หรือการรับ-ส่งสองทาง ทั้งนี้สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

#### 2.3.5.1 การส่งแบบทางเดียว (Simplex Mode)

การส่งสัญญาณทางเดียว จะใช้ช่องสัญญาณเดียวในการส่งสัญญาณวิทยุในระบบนี้จะมีผู้ส่งผู้เดียว โดยสามารถส่งสัญญาณออกไปได้ โดยไม่มีการรบกวนจากผู้รับ ผู้รับก็ทำหน้าที่รับสัญญาณอย่างเดียว ไม่สามารถส่งสัญญาณวิทยุออกไปได้ วิธีนี้จะไม่ซับซ้อน มีเป้าหมายในการส่งข้อมูลออกไปทิศทางเดียว พบกันมากในระบบวิทยุกระจายเสียงที่จะมีสถานีวิทยุส่งสัญญาณออกไป

#### 2.3.5.2 การรับส่งสองทาง แบบสลับกันส่ง (Half Duplex Mode)

หากให้รับสัญญาณอย่างเดียวก็ยังคงเป็นการสื่อสารทางเดียว ซึ่งผู้รับก็ไม่สามารถตอบกลับใดๆ ได้เพียงแต่รับฟัง ดังนั้น จึงมีการปรับปรุงวิธีการติดต่อสื่อสารใหม่ โดยผู้รับสามารถส่งสัญญาณกลับไปหาผู้ส่งได้ วิธีนี้เราเรียกว่า “คูเพล็กซ์โหมด (Duplex Mode)” วิธีนี้ช่วยให้สามารถสื่อสารระหว่างบุคคลทั้งสองได้เข้าใจกันมากขึ้น เพราะต่างก็สามารถส่งและรับข้อความของฝ่ายตรงกันข้ามได้ และเพื่อให้การใช้ช่องความถี่ที่มีจำกัดให้มีประสิทธิภาพ จึงต้องมีการสลับกันส่งสัญญาณ โดยจะพูดได้คนละครั้งสลับกันไป เมื่อผู้ส่งทำการส่ง จะไม่สามารถรับสัญญาณได้ และเมื่อคุณรับก็จะไม่สามารถส่งสัญญาณได้ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเราใช้ช่องสัญญาณเดียวทั้งรับและส่ง หากมีการส่งสัญญาณพร้อมกัน คลื่นก็จะชนกันในอากาศ กลายเป็นสัญญาณที่ไม่สามารถตีความได้

#### 2.3.5.3 การรับ-ส่งสองทางแบบสมบูรณ์ (Full Duplex)

แม้ว่าการรับ-ส่งสัญญาณแบบฮาล์ฟคูเพล็กซ์ จะสามารถทำให้เราส่งข้อมูลกลับไปหาผู้ส่งได้แต่ก็มีปัญหาคือ การพูดคุยด้วยวิธีนี้ไม่เป็นที่นิยม ซึ่งเราก็ต้องคอยจนกว่าผู้หนึ่งพูดจนจบก่อนจะส่งสัญญาณได้ แต่การสื่อสารทั่วไปก็จะมีปัญหาแทรกขึ้น ซึ่งวิธีเดิมไม่สามารถทำได้ จึงมีการปรับปรุงระบบสื่อสารให้สามารถรับและส่งได้พร้อมๆ กัน เราเรียกวิธีนี้ว่า “ฟูลคูเพล็กซ์ (Full Duplex)” วิธีนี้จะต้องใช้คลื่นความถี่สองช่องด้วยกัน โดยแต่ละช่องใช้สำหรับส่งข้อมูลไปยังอีกฝั่งหนึ่ง ข้อดีของวิธีนี้ทำให้การสื่อสารเป็นธรรมชาติมากขึ้น สามารถโต้ตอบได้ทันที แต่ก็มีข้อเสียคือ เปลืองช่องสัญญาณซึ่งต้องใช้ถึง 2 ช่องด้วยกัน

## 2.4 เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายตามมาตรฐาน 802.11

มาตรฐานหลักของระบบเครือข่ายไร้สาย และอุปกรณ์เครือข่ายไร้สาย คือมาตรฐาน IEEE 802.11 เป็นมาตรฐานระบบเครือข่ายไร้สายที่ถูกกำหนดขึ้นโดย The Institute of Electronics And Electrical Engineers : IEEE ซึ่งเป็นองค์กรที่ทำหน้าที่กำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับการสื่อสารของอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2540 มีข้อกำหนดระบุไว้ว่า ผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายในส่วนของ PHY Layer นั้นมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลที่มีความเร็ว 1 เมกะบิตต่อวินาที 2 เมกะบิตต่อวินาที 5.5 เมกะบิตต่อวินาที 11 เมกะบิตต่อวินาทีและ 54 เมกะบิตต่อวินาที โดยมีสื่อนำสัญญาณ 3 ประเภทให้เลือกใช้งานได้แก่ คลื่นวิทยุย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ 5 กิกะเฮิรตซ์และคลื่นอินฟราเรด ส่วนในระดับชั้น MAC Layer นั้นได้กำหนดกลไกของการทำงานแบบ CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ CSMA/CD (Collision Detection) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet ซึ่งนิยมใช้งานบนระบบเครือข่ายแลนไร้สาย โดยมีกลไกในการเข้ารหัสข้อมูลก่อนแพร่กระจายสัญญาณไปในอากาศพร้อมกับการตรวจสอบผู้ใช้งานด้วย

มาตรฐาน IEEE 802.11 ในยุคเริ่มแรกนั้นให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ค่อนข้างต่ำ รวมถึงไม่มีการรับรองคุณภาพของการให้บริการที่เรียกว่า QoS (Quality of Service) ซึ่งมีความสำคัญในสภาพแวดล้อมที่มีแอปพลิเคชันหลากหลายประเภทให้ใช้งาน นอกจากนี้กลไกในการรักษาความปลอดภัยที่นำมาใช้ก็ยังมี ช่องโหว่จำนวนมาก สถาบัน IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาหลายชุดด้วยกันเพื่อทำการพัฒนาและปรับปรุงมาตรฐานให้มีศักยภาพเพิ่มสูงขึ้นซึ่งคณะทำงานย่อยของ IEEE ได้มีการสร้างมาตรฐานต่างๆ ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้แก่

### 2.4.1 มาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรก เมื่อปี พ.ศ. 2540 โดย IEEE (The Institute of Electronics And Electrical Engineers) และเป็นเทคโนโลยีสำหรับ Wireless LAN ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด เป็นข้อกำหนด (Specification) สำหรับอุปกรณ์ Wireless LAN ในส่วนของ Physical (PHY) Layer และ Media Access Control (MAC) Layer นอกจากนี้ในมาตรฐาน IEEE 802.11 ยังกำหนดให้มีทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่าย มาตรฐาน IEEE 802.11 Wireless LAN โดยกลไกการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) และการตรวจสอบผู้ใช้ (Authentication) ที่มีชื่อ เรียกว่า WEP (Wired Equivalent Privacy) ด้วยมาตรฐาน IEEE 802.11 เวอร์ชันแรกมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำและไม่มีการรองรับหลักการ Quality of Service (QoS) ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาด อีกทั้งยังมีกลไกรักษาความปลอดภัยที่ใช้ยังมีช่องโหว่อยู่มาก มาตรฐาน

IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงาน (Task Group) ขึ้นมาหลายชุดด้วยกัน เพื่อทำการปรับปรุงเพิ่มเติมมาตรฐานให้มีศักยภาพสูงขึ้น โดยคณะทำงานกลุ่มที่มีผลงานที่น่าสนใจ และเป็นที่รู้จักกันดี ได้แก่ IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11e, IEEE 802.11g และ IEEE 802.11i

#### 2.4.1.1 มาตรฐาน IEEE 802.11a

มาตรฐาน IEEE 802.11a ได้ตีพิมพ์เป็นมาตรฐาน เมื่อปี พ.ศ. 2542 มาตรฐาน IEEE 802.11a ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับ-ส่งข้อมูล ได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps แต่จะใช้คลื่นวิทยุที่มีความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะสำหรับใช้งาน ในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นน้อยกว่า ในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งในประเทศไทยไม่อนุญาต ให้มีการใช้งานอุปกรณ์ IEEE 802.11a เนื่องจากความถี่ย่าน 5 GHz ได้ถูกจัดสรรสำหรับกิจการอื่นอยู่ก่อนแล้ว ข้อเสียของอุปกรณ์ IEEE 802.11a Wireless LAN ก็คือ รัศมีของสัญญาณมีขนาดค่อนข้างสั้น (ประมาณ 30 เมตร ซึ่งสั้นกว่ารัศมีสัญญาณ ของอุปกรณ์ IEEE 802.11b Wireless LAN ที่มีขนาดประมาณ 100 เมตร สำหรับการใช้งานภายในอาคาร) อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11a Wireless LAN ยังมีราคาสูงกว่า IEEE 802.11b Wireless LAN ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a Wireless LAN จึงได้รับความนิยมน้อยกว่า IEEE 802.11b Wireless LAN มาก

#### 2.4.1.2 มาตรฐาน IEEE 802.11b

มาตรฐาน IEEE 802.11b ได้ตีพิมพ์เป็นมาตรฐาน เมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดี และใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด มาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ผวนกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 Mbps ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่ที่เรียกว่า ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งถูกจัดสรรไว้อย่างสากลสำหรับการใช้งานอย่างสาธารณะด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้ก็เช่น IEEE 802.11, Bluetooth โทรศัพท์ไร้สาย และเตาไมโครเวฟ ส่วนใหญ่แล้วอุปกรณ์ IEEE 802.11 Wireless LAN ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะเป็นอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b นี้ จะใช้เครื่องหมายการค้าที่รู้จักกันดีในนามของ Wi-Fi ซึ่งเครื่องหมายการค้าดังกล่าวถูกกำหนดขึ้น โดยสมาคม WECA (Wireless Ethernet Compatability Alliance) โดยอุปกรณ์ที่ได้รับเครื่องหมายการค้าดังกล่าว ได้ผ่านการตรวจสอบแล้วว่า เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ยี่ห้ออื่นๆ ที่ได้รับเครื่องหมาย Wi-Fi ได้

#### 2.4.1.3 มาตรฐาน IEEE 802.11g

มาตรฐาน IEEE 802.11g ได้ใช้นำเทคโนโลยี OFDM มาประยุกต์ใช้ในช่องสัญญาณวิทยุความถี่ 2.4 GHz ซึ่งอุปกรณ์ IEEE 802.11g Wireless LAN มีความสามารถในการรับ-ส่งข้อมูล ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 Mbps ส่วนรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11g Wireless LAN จะอยู่ระหว่างรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11a และ IEEE 802.11b เนื่องจากความถี่ 2.4 GHz เป็นย่านความถี่สาธารณะสากล อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11g Wireless LAN สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ IEEE 802.11b Wireless LAN ได้ (Backward-Compatible) ดังนั้นจึงมีแนวโน้มสูงว่าอุปกรณ์ IEEE 802.11g Wireless LAN จะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเป็นอย่างมาก

#### 2.4.1.4 มาตรฐาน IEEE 802.11e

ได้มีการปรับปรุง MAC Layer ของมาตรฐาน IEEE 802.11 เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานของหลักการ Quality of Service สำหรับ Application เกี่ยวกับมัลติมีเดีย (Multimedia) เนื่องจากมาตรฐาน IEEE 802.11e เป็นการปรับปรุง MAC Layer ให้มีคุณสมบัติในการรับรองการใช้ให้มีประสิทธิภาพ ดังนั้นมาตรฐานนี้ จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 Wireless LAN ทุกเวอร์ชันได้

#### 2.4.1.5 มาตรฐาน IEEE 802.11f

มาตรฐานนี้ เป็นที่รู้จักกันในชื่อ IAPP (Inter Access Point Protocol) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับจัดการกับผู้ใช้งานที่เคลื่อนที่ข้ามเขตการให้บริการของ Access Point ตัวหนึ่งไปยัง Access Point เพื่อให้บริการในแบบโรมมิ่งสัญญาณระหว่างกัน

#### 2.4.1.6 มาตรฐาน IEEE 802.11i

มาตรฐานนี้ เป็นมาตรฐานในด้านการรักษาความปลอดภัย ของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สาย โดยได้มีการปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 ในด้านความปลอดภัย เนื่องจากเครือข่าย IEEE 802.11 Wireless LAN มีช่องโหว่อยู่มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) ด้วยฟังก์ชันการเข้ารหัสแบบ WEP Key 64/128-bit ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับสภาพการใช้งานที่ต้องการความมั่นใจในการรักษาความปลอดภัยของการสื่อสารระดับสูง มาตรฐาน IEEE 802.11i จะนำเอาเทคนิคขั้นสูงมาใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลด้วย Key ที่มีการเปลี่ยนค่าอยู่เสมอ และการตรวจสอบผู้ใช้ที่มีความปลอดภัยสูง มาตรฐานนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 Wireless LAN ทุกเวอร์ชันได้

#### 2.4.1.7 มาตรฐาน IEEE 802.11h

มาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่ใช้งานย่านความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์ ให้ทำงานถูกต้องตามข้อกำหนดการใช้ความถี่ของประเทศในทวีปยุโรป

#### 2.4.1.8 มาตรฐาน IEEE 802.11k

มาตรฐานนี้ เป็นมาตรฐานที่ใช้จัดการการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย ไม่ว่าจะเป็นการจัดการการใช้งานคลื่นวิทยุให้มีประสิทธิภาพ โดยมีฟังก์ชันการเลือกช่องสัญญาณการโรมมิ่งและการควบคุมกำลังส่ง การร้องขอและปรับแต่งค่าให้เหมาะสมกับการทำงาน การหารัศมีการใช้งานสำหรับเครื่องไคลเอนต์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ระบบจัดการสามารถทำงานจากศูนย์กลางได้

#### 2.4.1.9 มาตรฐาน IEEE 802.11n

มาตรฐาน 802.11n (300 - 600 Mbps) เป็นแลนไร้สายที่มีความเร็วสูงสุดถึง 600 Mbps โดยส่งผ่าน 4 Stream ซึ่งประกอบไปด้วยเสาอากาศ 4 ชุดทั้งภาครับและส่ง แต่ละ Stream จะมีความเร็วที่ 150 Mbps สามารถใช้งานได้ทั้งย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz หากใช้งานช่องสัญญาณขนาด 40 MHz จะส่งข้อมูลได้สูงกว่าการใช้ช่องสัญญาณ ขนาดมาตรฐานคือ 20 MHz ไร้เลส 802.11n นี้ จะเป็นมาตรฐานที่อยู่ในโน้ตบุ๊กใหม่ตั้งแต่ 2009 ขึ้นไป โดยจะสามารถรับส่งข้อมูล 2 – 3 Stream ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนภาครับส่งและเสา หากเป็นรุ่นที่มี 2 เสาจะมีความเร็วสูงสุดที่ 300 Mbps แต่ถ้าเป็นรุ่น 4 เสา จะมีความเร็วสูงสุดที่ 600 Mbps

#### 2.4.1.10 มาตรฐาน IEEE 802.1x

มาตรฐานนี้เป็นมาตรฐาน ที่ใช้งานกับระบบรักษาความปลอดภัย ซึ่งก่อนเข้าใช้งานระบบเครือข่ายไร้สาย จะต้องตรวจสอบสิทธิ์ในการใช้งานก่อน โดยมาตรฐาน IEEE 802.1x จะใช้โพรโตคอล อาทิ LEAP, PEAP, EAP-TLS, EAP-FAST ซึ่งรองรับการตรวจสอบผ่าน เซิร์ฟเวอร์ เช่น Radius Kerberos เป็นต้น

## 2.5 อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio)

2.5.1 อัตราความแรงของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนนั้นเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากเพราะเป็นตัวบอกระดับคุณภาพของสัญญาณในระบบสื่อสารว่าดีเพียงใดหากสัญญาณข้อมูลมีความแรงมากกว่าสัญญาณรบกวนก็จะได้ยินเสียงที่ชัดเจน แต่ถ้าสัญญาณข้อมูลมีความแรงต่ำกว่าสัญญาณรบกวนแล้ว

จะไม่สามารถแยกแยะสัญญาณข้อมูลออกมาได้ หน่วยที่ใช้วัดค่านี้จะมีหน่วยเป็น “เดซิเบล (Decibel)” ซึ่งมีสูตรคือ

$$\text{SNR} = 10 \text{ Log } \frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} \quad (2.3)$$

ในการคำนวณหากมีการคิดค่าความแรงของสัญญาณในหน่วยเดซิเบลแล้ว ก็สามารถนำค่านั้นมาลบกันได้ ซึ่งก็ตรงตามสูตรคณิตศาสตร์ที่ว่า

$$\text{SNRdB} = \text{SignaldB} - \text{NoisedB} \quad (2.4)$$

ค่าของ SNR ที่สามารถใช้ใน 802.11 ถ้าตัวรับสัญญาณ รับสัญญาณและได้ค่ามากกว่า 40 dB แสดงว่าอัตราความแรงของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนนั้นมีมาก แต่ถ้ารับสัญญาณได้ค่าต่ำกว่า 10 dB แสดงว่าอัตราความแรงของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนนั้นต่ำ

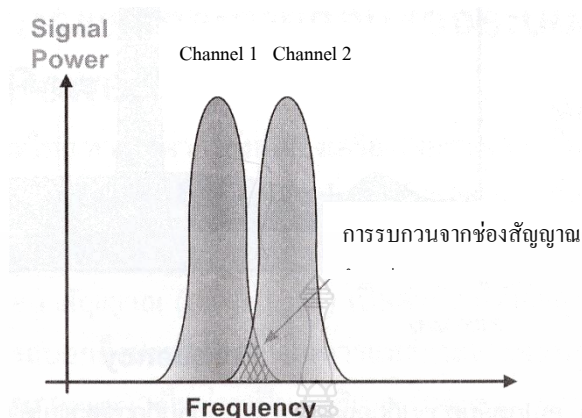
## 2.5.2 การเกิดสัญญาณสัญญาณรบกวนในรูปแบบต่างๆ

2.5.2.1 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากระบบสื่อสารรบกวนกันเอง สัญญาณรบกวนบางประเภทก็เกิดจากระบบสื่อสารรบกวนกันเองโดยคลื่นเหล่านี้แพร่กระจายออกมาทำให้สัญญาณที่รับได้นั้นมีคุณภาพลงไปมีทั้งที่เกิดขึ้นแบบตั้งใจ ส่วนมากจะสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ คือ

### ก) การรบกวนจากช่องสัญญาณข้างเคียง

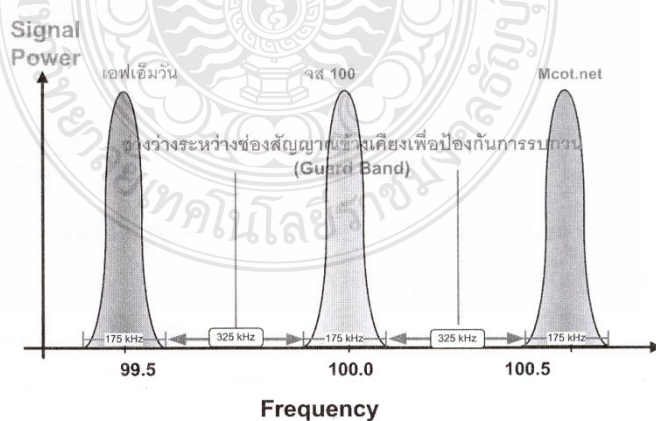
การรบกวนจากช่องสัญญาณข้างเคียง (Adjacent Channel Interference) เกิดขึ้นจากการออกอากาศสัญญาณวิทยุขึ้น จะเกิดจากความถี่อื่นๆ รอบความถี่หลัก แม้ว่าความถี่นี้จะมี ความแรงสัญญาณไม่มาก แต่เมื่อความถี่ของสัญญาณทั้งสองนี้อยู่ใกล้กันมาก ก็จะเกิดการรบกวนกันได้ ข้อมูลที่อยู่ในช่วงสเปกตรัมของสัญญาณช่วงที่จะเกิดการรบกวนกันขึ้นนั้น จะไม่สามารถแยกแยะออกมาได้





ภาพที่ 2.10 การรบกวนจากช่องสัญญาณข้างเคียงเมื่อช่องทั้งสองมีความถี่ใกล้เคียงกันมาก การป้องกันการรบกวนจากช่องสัญญาณข้างเคียง

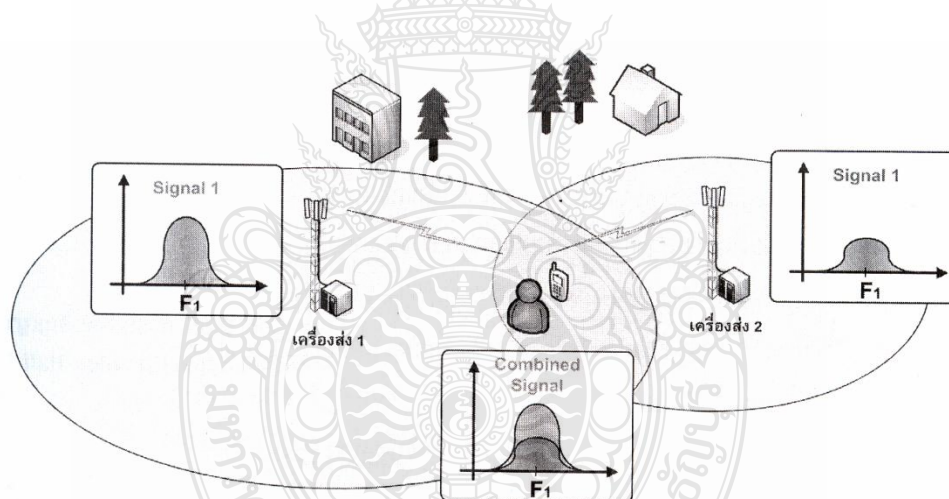
การป้องกันสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณข้างเคียงทำได้โดยการกำหนดช่องว่างระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียงเพื่อป้องกันการรบกวน (Guard Band) ตัวอย่างของการกำหนดช่องว่างของสัญญาณจะเห็นได้ชัดในระบบวิทยุ FM ซึ่งแต่ละช่องสัญญาณจะมีระยะห่างกัน 0.5 เมกะเฮิร์ตซ์ เช่น คลื่นของ จส 100 ที่มีความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ จะห่างจากช่องข้างเคียงคือ คลื่นเอฟเอ็มวัน ที่มีความถี่ 99.5 เมกะเฮิร์ตซ์ และคลื่น Mcot.net ที่มีความถี่ 100.5 เมกะเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 2.11 การป้องกันการรบกวนระหว่างช่องสัญญาณข้างเคียง

### ข) การรบกวนจากช่องสัญญาณเดียวกัน

การรบกวนในช่องสัญญาณเดียวกัน (Co Channel Interference) เกิดขึ้นจากการติดตั้งแอสเซสพอยซ์ 2 ตัว ที่ใช้ช่องความถี่เดียวกันในบริเวณใกล้เคียงกัน จึงทำให้สัญญาณจากแอสเซสพอยซ์ตัวหนึ่ง ไปรบกวนการทำงานของแอสเซสพอยซ์อีกตัวหนึ่ง ปัญหานี้จะรุนแรงมากในพื้นที่ให้บริการ ซึ่งคาบเกี่ยวกันของสัญญาณวิทยุระหว่างแอสเซสพอยซ์ ตัวแรกกับตัวที่สอง หากอยู่ในบริเวณที่แอสเซสพอยซ์ ตัวใด มีกำลังส่งแรงกว่าก็จะรับสัญญาณได้จากตัวนั้น และไม่สามารถรับสัญญาณจากตัวอื่นได้ ในบางตำแหน่งสัญญาณจากแอสเซสพอยซ์ ทั้งสอง มีความแรงใกล้เคียงกันมากจนไม่สามารถรับข้อมูลใดๆ ได้ การป้องกันการรบกวนจากช่องสัญญาณเดียวกันเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาสัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้น ก็ไม่ควรเลือกใช้ช่องความถี่เดียวกันสำหรับแอสเซสพอยซ์ ที่อยู่บริเวณเดียวกัน การเลือกใช้ช่องความถี่ที่ต่างกันนั้นอาจยังไม่พอ เพราะในระบบไร้สายนั้น ช่องสัญญาณแต่ละช่องมี แบนด์วิธ ที่กว้างและมีการซ้อนทับกัน หากเลือกไม่เหมาะสมก็จะเกิดการซ้อนทับกันได้อีก



ภาพที่ 2.12 การรบกวนในช่องสัญญาณเดียวกัน

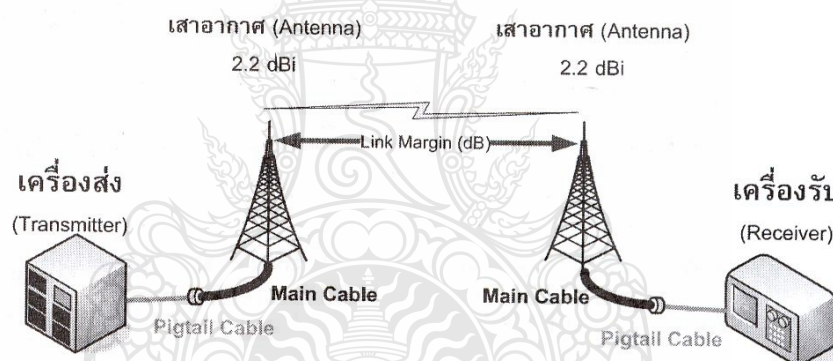
### 2.5.3 การคำนวณค่าความแรงสัญญาณระหว่างภาครับและภาคส่ง (Link Margin)

การคำนวณค่าความแรงของสัญญาณที่เชื่อมต่อกันระหว่างภาครับและภาคส่ง (Link Margin) นั้นให้ประเมินในระหว่างภาครับและภาคส่งมีความแรงของสัญญาณดีเพียงใด หากค่านี้มีน้อยเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบสื่อสารก็จะทำให้การสื่อสารล้มเหลวลงได้ หากค่านี้มีค่า

มากก็แสดงถึงโอกาสที่จะรับสัญญาณได้ชัดเจนมีมากขึ้น และมีโอกาสที่คลื่นเดินทางได้ไกลขึ้น ค่าตัวแปรที่มีผลกระทบดังต่อไปนี้

- กำลังส่งของคลื่นวิทยุ (Transmit Power)
- อัตราขยายของเสาอากาศภาคส่ง (Transmit Antenna Gain)
- อัตราลดทอนของสายนำสัญญาณภาคส่ง (Transmit Cable Loss)
- อัตราการลดทอนของเสาอากาศภาครับ (Receive Antenna Gain)
- ความแรงของสัญญาณต่ำสุดที่ภาครับจะรับได้ (Minimum Receive Signal Level)
- อัตราการลดทอนของสายนำสัญญาณภาครับ (Receive Cable Loss)

รูปแบบการคำนวณค่าความแรงของสัญญาณวิทยุส่วนใหญ่จะใช้หน่วยเป็นเดซิเบล (Decibel) เพราะสะดวกกว่าวิธีอื่น หากต้องคำนวณด้วยตัวเลขธรรมดาจะต้องเป็นจุดทศนิยมปละมีสูตรต่างๆ ตามมาอยู่มากมาย ดังนั้น ก่อนทำการคำนวณจึงต้องแปลงค่าต่างๆ ให้อยู่ในรูปเดซิเบลก่อน



ภาพที่ 2.13 การคำนวณค่า Link Margin จากอุปกรณ์เครื่องรับ เครื่องส่ง สายนำสัญญาณและเสาอากาศ

ในการคำนวณระยะสูงสุดที่จะใช้งานระบบไวร์เลสแลนนั้นจะต้องป้อนค่าตัวแปรอื่นๆ เพิ่มเข้าไปด้วย เพราะการคำนวณอัตราลดทอนในสภาวะสูญญากาศ (Free Space Loss) นั้นไม่เพียงพอ เพราะในสภาวะปกติ คลื่นของระบบไวร์เลสแลนจะมีอัตราการลดทอนค่อนข้างสูงกว่าคลื่นทั่วไป คลื่นนี้มีผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมต่างๆ มาก ดังนั้นในการคำนวณจึงต้องป้อนตัวแปรเกี่ยวกับอัตราการสูญเสียเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อม (Allowed Loss) และค่าการกระจายของ

สัณฐาน (Scattering Exponent) หลังจากนั้นก็นำค่า Link Margin ที่ได้คำนวณไว้ก่อนหน้านี้มา แทนค่าในสมการ

$$\text{Link Margin (dB)} = 40 + 10 \cdot n \cdot \log(r) + L_{\text{allowed loss}} \quad (2.5)$$

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรสำหรับแทนค่าเพื่อคำนวณหาระยะทางสูงสุดที่จะใช้งานได้

ลักษณะการใช้งาน	อัตราสูญเสีย (Allowed Loss)	ค่าการกระจาย ของสัณฐาน (Scattering Exponent)	ตัวอย่าง
ภายในสุญญากาศไม่มี สิ่งกีดขวาง	0	2	อวกาศ
ภายนอก ที่โล่งแจ้ง	0	2.5 ที่ 200 เมตร 3 ที่ 400 เมตร 3.5 > 500 เมตร	พื้นที่โล่งไม่มีต้นไม้ ทะเล
ภายนอกมีต้นไม้	10-20	3-4	สวนสาธารณะ
ภายนอกมีอาคาร	0	4	บริเวณตึกแถว
ในอาคารไม่มีสิ่งกีด ขวาง	0	2.5	ห้องโถง ห้องสัมมนา
ในอาคาร มีพาร์ติชัน มีผนังกัน	0	3.5	ออฟฟิศ
ในอาคารมีผนัง พื้น	10-27 (พื้น) 10-15 (ผนัง)	4-5	คอนโดมิเนียม อพาร์ทเมนท์

#### 2.5.4 ความคุมการใช้งานสื่อกลางด้วยกลไก CSMA/CA

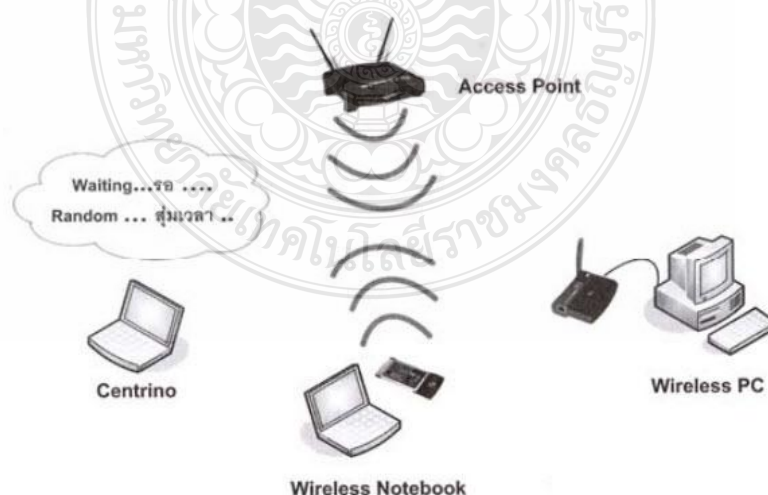
หากเปรียบเทียบง่าย ๆ สื่อกลางก็คือ ถนนสาธารณะที่ใช้เป็นเส้นทางลำเลียงข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางอุปกรณ์ไร้สายแลนต่างๆ เครื่องมีสิทธิ์ใช้ถนนสาธารณะนี้เท่าเทียมกัน ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดกฎกติกาการใช้งานขึ้นมา โดยมาตรฐาน IEEE802.11 ใช้ CSMA/CA (ย่อมาจาก Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance) เป็นกลไกควบคุมการใช้งานสื่อกลางสำหรับการสื่อสารข้อมูลของอุปกรณ์บนเครือข่ายไร้สายแลน ซึ่งหลักการของกลไก CSMA/CA มีดังต่อไปนี้

2.5.4.1 ก่อนที่อุปกรณ์ไร้สายจะส่งข้อมูลออกไปบนสื่อกลาง อุปกรณ์ไร้สายจะทำการตรวจเช็คก่อนว่ามีอุปกรณ์อื่นกำลังส่งข้อมูลบนสื่อกลางหรือไม่ (Listening)



ภาพที่ 2.14 วิธีการทำงานของกลไก CSMA/CA

2.5.4.2 ถ้ามีอุปกรณ์อื่นกำลังส่งข้อมูลอยู่ อุปกรณ์ไร้สายจะหยุดรอและสุ่มเวลา (Random) เพื่อ ตรวจเช็คอีกครั้งว่ามีอุปกรณ์อื่นกำลังส่งข้อมูลบนสื่อกลางอีกหรือไม่ (Listening) (กลับไปขั้นตอนข้อที่ 1)



ภาพที่ 2.15 วิธีการทำงานของกลไก CSMA/CA

2.5.4.3 ถ้าไม่มีอุปกรณ์อื่นส่งข้อมูล อุปกรณ์ไวร์เลสแลนก็เริ่มทยอยส่งข้อมูลออกไปบนสื่อกลางจนกระทั่งส่งข้อมูลเสร็จสิ้น (และเมื่ออุปกรณ์ไวร์เลสแลนต้องการส่งข้อมูลชุดใหม่ก็จะกลับไปเริ่มที่ขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง)



ภาพที่ 2.16 วิธีการทำงานของกลไก CSMA/CA

หลักการทำงานของกลไก CSMA/CA จะคล้ายกับกลไกการเข้าใช้งานสื่อสารของระบบอีเทอร์เน็ตแลน (IEEE802.3) ในบางครั้งก็จะมีคนเรียกกลไก CSMA/CA ว่าเป็น “Listening Before Talking (LBT)”

### 2.5.5 เทคโนโลยี MIMO (Multiple Input Multiple Output)



ภาพที่ 2.17 อุปกรณ์ของ MIMO (Multiple Input Multiple Output)

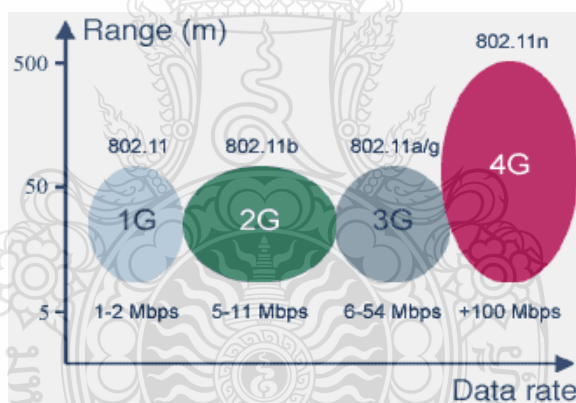
ตามข้อมูลของผู้ผลิต เราเตอร์ไร้สายเครื่องหนึ่งๆ จะสามารถทำงานได้ระยะทางที่ไกลถึง 100 เมตรหรือมากกว่านั้น แต่ถ้าผู้ที่เกี่ยวข้องระบบเน็ตเวิร์กที่ใช้อุปกรณ์เหล่านี้ด้วยตัวเองแล้ว จะทราบดีว่าระยะทางที่ใช้งานได้จริงๆ นั้นจะน้อยกว่าที่ผู้ผลิตบอกไว้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นการใช้งานภายในอาคารที่ส่วนใหญ่จะมีระยะที่จำกัดอยู่เพียงแค่ประมาณ 20 เมตรเท่านั้น

ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวนี้ ปัจจุบันได้ถูกปรับปรุงให้ทำงานได้ดีขึ้นแล้ว นั่นคือการทำงานโดยใช้เทคนิคเสาอากาศแบบใหม่ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบเน็ตเวิร์กไร้สายที่มีชื่อว่า MIMO (Multiple Input Multiple Output) ที่ได้เตรียมไว้สำหรับ มาตรฐาน IEEE 802.11 ในอนาคต แต่ในที่สุดเทคนิคดังกล่าวนี้ ก็ถูกนำออกมาใช้แล้วในตอนนี้ ดังจะเห็นได้ว่าผู้ผลิตรายสำคัญต่างก็มีเราเตอร์ไร้สายที่ใช้เทคนิค MIMO ด้วยกันทั้งนั้น เครื่องจะสามารถช่วยให้ระบบนั้นทำงานได้เร็วขึ้น และทำให้มีระยะทำการที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งก็เป็นความจริงทุกอย่าง แต่ประสิทธิภาพทั้งสองอย่างนี้ จะไม่สามารถเกิดขึ้นพร้อมๆ กันได้ นั่นคือ จะต้องเลือกเองว่าต้องการให้ระบบทำงานได้ช้า แต่ใช้งานได้ทั่วทุกซอกทุกมุม หรือว่าต้องการให้ระบบทำงานได้อย่างรวดเร็วแต่มีขอบเขตที่แคบลง เราเตอร์ที่ใช้เทคนิค MIMO จะทำให้ความเร็วของระบบเพิ่มขึ้นได้ด้วยวิธี Multiplexing ชนิดพิเศษ ใช้เทคนิคที่เรียกว่า Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) โดยเราเตอร์จะแยกบิตที่จะทำการส่งผ่านออกเป็นสองช่องสัญญาณ ซึ่งแต่ละช่องสัญญาณจะแตกต่างกันที่ทิศทางของสัญญาณที่ถูกส่งมายังเสาอากาศ ซึ่งตามทฤษฎีแล้วจะช่วยให้ความเร็วนั้นเพิ่มขึ้นได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นผู้ผลิตบางราย ยังพยายามนำเทคนิคการทำงานนี้ไปใช้กับช่องสัญญาณหลายๆ ช่องด้วย แต่อย่างไรก็ตามมันก็มี ข้อเสียด้วยเช่นกันคือเราเตอร์จะต้องใช้ช่องสัญญาณของระบบไร้สาย ถึงสองช่องและสัญญาณในระบบก็จะถูกรบกวนได้ง่ายขึ้นด้วย

การที่จะใช้วิธี Multiplexing แบบนี้ ไม่เพียงแต่เราเตอร์เพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะต้องใช้เทคนิค MIMO Adapter ของเครื่องไคลเอนท์ ก็จะต้องใช้เทคนิค MIMO ด้วยเช่นกันนั่นคือการมีเสาอากาศจำนวนสองตัวและมีอัลกอริทึม สำหรับแยกสัญญาณเป็นสองช่อง และรวมกลับเข้ามาใหม่ได้ แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่ต่างผู้ผลิตกันจะไม่สามารถทำงานร่วมกันได้ ซึ่งเป็นผลมาจากชิปเซ็ตที่ใช้ แต่โดยมากแล้ว ในขั้นพื้นฐานมาตรฐาน IEEE 802.11g จริงๆ อุปกรณ์จะทำงานด้วยกันได้อย่างไม่มีปัญหา เพียงแต่กรณีนี้จะไม่สามารถใช้ข้อดีของเทคนิค MIMO ได้เท่านั้นเอง ด้วยเทคนิคพิเศษดังที่กล่าวมา ไม่เพียงแต่จะทำให้อุปกรณ์ ที่สนับสนุน MIMO มีระยะทำการที่ไกลกว่าที่เคยมีมาเท่านั้น แต่เทคนิคใหม่นี้ ยังสามารถแก้ไขปัญหาเรื่องจุดอับสัญญาณได้เป็นอย่างดีด้วย

### 2.5.6 กำจัดจุดอับคลื่น

แม้ว่าคลื่นสัญญาณสามารถแพร่กระจายออกไปได้ในหลายๆ ทิศทาง (Multipath Propagation) และสามารถสะท้อนกลับไปได้ เมื่อกระทบกับสิ่งกีดขวางต่างๆ แต่ในบางครั้ง หรือในบางสภาพแวดล้อม โอกาสที่บางตำแหน่งจะไม่ได้รับสัญญาณก็เกิดขึ้นได้เช่นกัน แม้ว่าจะยังอยู่ในระยะทำการของเครื่องเราเตอร์ก็ตาม สาเหตุก็คือ คลื่นสัญญาณแต่ละคลื่นที่สะท้อนไปมาจะมีการเสริมและหักล้างกัน อุปกรณ์เน็ตเวิร์กไร้สายยุคใหม่ จะสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ ด้วยการใส่เสาอากาศหลายๆ อัน ซึ่งเมื่อเสาอากาศใดเสาหนึ่งอยู่ในจุดอับ เสาอากาศอีกเสาหนึ่งก็จะทำการรับส่งสัญญาณแทนทันที และเพื่อให้เสาอากาศสามารถทำงานได้ แต่ละเสาจะต้องอยู่ห่างกัน 1 ช่วงคลื่น หรือจำนวนเท่าที่มากกว่า ซึ่งสำหรับ WLAN แล้วจะคิดเป็นระยะห่างประมาณ 12 เซนติเมตร และการคำนวณหาความยาวคลื่นก็สามารถทำได้โดยนำความเร็วในการแพร่กระจายมาหารด้วยความถี่ของสัญญาณ อย่างเช่นกรณีของ WLAN มาตรฐาน IEEE 802.11g ที่กำหนดไว้ที่ 2.4GHz



ภาพที่ 2.18 การเปรียบเทียบระหว่างระยะทางกับอัตราการส่งข้อมูล

นอกจากการกำจัดจุดอับคลื่นแล้ว เทคนิค MIMO ยังทำให้เราเตอร์มีระยะทำการที่เพิ่มขึ้นได้ด้วยการรับสัญญาณจากเสาอากาศหลายๆ อัน ทำให้สามารถเลือกสลับไปมายังเสาอากาศที่สามารถรับสัญญาณได้ดีกว่าได้ในทุกๆ สถานการณ์



## 2.6 แบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ

แบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ เป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่าความแรงของสัญญาณ (Received Signal Strength) ของโหนดที่รับสัญญาณ มีแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ 3 รูปแบบที่ถูกเตรียมไว้ให้ใช้งาน คือ Free Space Model, Two - Ray Ground Reflection Model และ Shadowing Mode

### 2.6.1 แบบจำลองการแพร่กระจายในอวกาศว่าง

แบบจำลองการแพร่กระจายในอวกาศว่างเป็นการใช้การคาดเดากำลังของสัญญาณที่ระยะทางจากตัวรับเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ ซึ่งหลักการนี้เป็นพื้นฐานของทุกรูปแบบ สามารถเขียนสมการโดยใช้ สมการ Friss's Free Space ดังนี้

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2.6)$$

เมื่อ	$P_r(d)$	คือ	กำลังที่ได้รับที่ระยะทาง $d$ จากเครื่องส่ง
	$P_t$	คือ	กำลังที่ส่ง
	$G_t, G_r$	คือ	กำลังขยายของสายอากาศของเครื่องส่งและเครื่องรับ
	$L$	คือ	System Loss

สำหรับแบบจำลองนี้โหนดจะมีขอบเขตการส่งสัญญาณออกในลักษณะเป็นวงกลม ถ้าโหนดฝ่ายรับอยู่ในขอบเขตวงกลมหรือขอบเขตสัญญาณของโหนดฝ่ายส่ง โหนดจะสามารถรับสัญญาณได้ทุกๆ สัญญาณ แต่ถ้าโหนดฝ่ายรับอยู่นอกขอบเขตวงกลมหรือขอบเขตสัญญาณ โหนดจะไม่สามารถรับสัญญาณได้เลย

### 2.6.2 แบบจำลอง Two - Ray Ground Reflection

แบบจำลอง Two - Ray Ground Reflection เป็นแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุ ในรูปแบบ Large - Scale สำหรับแบบจำลองนี้ค่าความแรงของสัญญาณที่โหนดรับได้ จะขึ้นตรงต่อฟังก์ชันระยะทาง ความแรงของสัญญาณที่รับได้ไม่ได้ถูกพิจารณาจากสัญญาณที่ถูกส่งจากโหนดฝ่ายส่งไปยังโหนดฝ่ายรับได้โดยตรง (Non Line of Sight) แต่เพียงกรณีเดียว แต่ความแรงของสัญญาณที่รับได้เกิดจากผลรวมของสัญญาณที่ส่งตรงมายังตัวรับสัญญาณโดยตรง (Line of Sight) และสัญญาณที่สะท้อนพื้นโลกมายังตัวรับ (Ground Reflection) แสดงการคำนวณดังสมการ

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r H^2}{d^4 L} \quad (2.7)$$

เมื่อ	$P_r(d)$	คือ	กำลังที่ได้รับที่ระยะทาง $d$ จากเครื่องส่ง
	$P_t$	คือ	กำลังที่ส่ง
	$G_t, G_r$	คือ	กำลังขยายของสายอากาศของเครื่องส่งและเครื่องรับ
	$L$	คือ	System Loss
	$H_t, H_r$	คือ	ความสูงของเสาอากาศฝั่งส่ง และฝั่งรับตามลำดับ

### 2.6.3 แบบจำลอง Shadowing

สำหรับแบบจำลอง Two - Ray Ground Reflection นั้นค่าความแรงของสัญญาณที่โหนดรับได้ขึ้นตรงต่อฟังก์ชันระยะทาง ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว ค่าความแรงของสัญญาณที่โหนดรับได้ ไม่ได้ขึ้นตรงต่อฟังก์ชันระยะทางเพียงอย่างเดียว ความแรงของสัญญาณจะมีการแกว่งแบบสุ่มที่มีความแปรปรวนในทุกๆ ระยะทางที่โหนดรับสัญญาณ เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของสัญญาณวิทยุที่เจอสสิ่งกีดขวางในเครือข่าย ดังนั้นสัญญาณที่มาถึงยังตัวรับจึงมาจากหลาย ๆ เส้นทาง (Multipath Propagation Effects) ดังนั้นแบบจำลองที่ได้ถูกพิจารณาประเด็นดังกล่าวก็คือ แบบจำลอง Shadowing นั่นเอง โมเดลนี้ได้เพิ่มส่วนของการแจกแจงความน่าจะเป็นในการคำนวณค่าความแรงของสัญญาณเข้าไปซึ่งเป็นรูปแบบ Gaussian Random Distribution หรือ Log - Normal Distribution ค่าความแรงของสัญญาณ ที่ได้รับ

$$\left[ \frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\beta \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_{dB} \quad (2.8)$$

เมื่อ	$P_r(d)$	คือ	ความแรงของสัญญาณเฉลี่ยที่ได้รับที่ระยะทาง $d$
	$P_r(d_0)$	คือ	ความแรงของสัญญาณที่มีระยะอ้างอิง $d_0$
	$\beta$	คือ	Path loss exponent ซึ่งขึ้นตรงต่อสภาพแวดล้อม
	$X_{dB}$	คือ	Gaussian random distribution ที่มีค่ากลางที่ศูนย์และมีค่าความแปรปรวนเป็น $\sigma_{dB}$ ค่านี้เรียกว่า shadowing deviation สามารถกำหนดค่าของ $\beta$ และ $\sigma_{dB}$ ได้จากตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.5 ค่า Path loss exponent

Environment		$\beta$
Outdoor	Free space	2
	Shadowed urban area	2.7 - 5
In building	Line of sight	1.6 - 1.8
	Obstructed	4 - 6

ตารางที่ 2.6 ค่า Shadowing deviation ที่สภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน

Environment	$\beta$
Outdoor	4 - 16
Office, Hard partition	7
Office, Soft partition	9.6
Factory, line of sight	3 - 6
Factory, obstructed	6.8

#### 2.6.4 การสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายภายในอาคาร

มี 2 ลักษณะทั่วไปของการสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายคือ Site - Specific และ Site - General การสร้างแบบจำลองโดยใช้แบบ Site - Specific ต้องใช้ข้อมูลของแผนผังอาคาร เฟอร์นิเจอร์และตำแหน่งเครื่องรับและเครื่องส่ง สำหรับสเกลที่ใหญ่และภาวะแวดล้อมที่อยู่กับที่วิธีนี้สามารถใช้งานได้ สำหรับสิ่งแวดล้อมในอาคารที่มีจำนวนมากและวัสดุภายในนั้น ตัวแวดล้อมภายในอาคารนั้นก็สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เช่น การเคลื่อนย้ายของเฟอร์นิเจอร์หรือแม้กระทั่งการเปิด - ปิดประตู ดังนั้นวิธี Site - Specific ไม่สามารถนำมาใช้ได้ แบบจำลอง Site - General จึงต้องนำมาใช้ ซึ่งวิธีนี้จะใช้การคาดการณ์ของอัตราการสูญเสียระหว่างทาง สำหรับการออกแบบจุดเชื่อมต่อ นั้นใช้ประโยชน์นี้เพื่อที่จะออกแบบก่อนภายในขั้นต้น สำหรับอัตราการสูญเสียระหว่างทางนี้ โดยทั่วไปจะมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ

#### 2.6.4.1 อัตราการสูญเสียระหว่างทางภายในอาคารแบบ The ITU path loss model

แบบ The ITU Path Loss Model นั้นใช้สำหรับ Site - General ของแบบจำลองการแพร่กระจายภายในอาคาร

$$L_{dB} = 20\log_{10}(f) + N\log_{10}(d) + Lf(n) - 28dB \quad (2.9)$$

เมื่อ	$N$	คือ	สัมประสิทธิ์ระยะทางกำลังการสูญเสีย
	$f$	คือ	ความถี่ในหน่วย MHz
	$d$	คือ	ระยะทางในหน่วยเมตร
	$n$	คือ	จำนวนชั้นระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ

ตารางที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังการสูญเสีย ค่า  $N$  ของแบบ ITU Site - General สำหรับการแพร่กระจายภายในอาคาร

ความถี่	ที่อยู่อาศัย	สำนักงาน	ตึก
900 MHz	-	33	20
1.2 – 1.3 GHz	-	32	22
1.8 – 2 GHz	28	30	22
4 GHz	-	28	22
5.2 GHz	-	31	-
60 GHz	-	22	17

ตารางที่ 2.8 เฟกเตอร์ของการทะลุผ่านชั้น

ความถี่	ที่อยู่อาศัย	สำนักงาน	ตึก
900 MHz	-	9(n = 1)	-
		19(n = 2)	
		24(n = 3)	
1.8 – 2 GHz	4n	15+4(n-1)	6+3(n-1)
5.2 GHz	-	16(n=1 only)	

$N$  คือ จำนวนของชั้นที่ทะลุผ่าน  $n \geq 1$

อัตราการสูญเสียระหว่างทางแบบ ITU Path Loss Model นั้นสามารถคิดได้เช่นเดียวกับการสูญเสียในอวกาศว่าง ซึ่งระยะทางของกำลังมีค่า  $N = 20$  เมื่อไม่มีการทะลุผ่านชั้น ฉะนั้นอัตราการสูญเสียระหว่างทางนี้ จึงเป็นหลักการของการเปลี่ยนแปลงพลังงาน สามารถเขียนอยู่ในรูปการสูญเสียในอวกาศว่างในหน่วย dB

$$L_{dB} = 20 \log_{10}(\lambda) + 20 \log_{10}(4\pi) + N \log_{10}(d) \quad (2.10)$$

ก) แบบจำลองแบบ Log - Distance path loss (The Log - Distance Path Loss Model)

แบบจำลองแบบ Log - Distance Path Loss มีรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ คือ

$$L_{total} = PL(d_0) + N \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_s \quad (2.11)$$

เมื่อ	$PL(d_0)$	คือ	ระยะทางอ้างอิงของ Path Loss มักจะแสดงในเชิงทฤษฎีค่าความสูญเสียในอวกาศว่างที่ 1 m
	$\frac{N}{10}$	คือ	เลขชี้กำลังของระยะทางของ Path loss
	$X_s$	คือ	Gaussian Random Distribution และค่ามาตรฐานของ $\sigma(dB)$

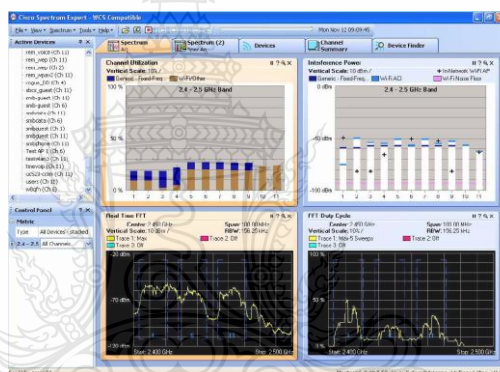
แบบจำลองแบบ Log - Distance Path Loss เป็นการปรับเปลี่ยนด้วยการยกกำลังด้วยฟังก์ชันลอกการิทึมปกติของความแปรปรวน (Log - Normal Variability) ซึ่งเหมือนกับฟังก์ชันลอกการิทึมปกติของ Shadowing (Log - Normal Shadowing)

รูปแบบที่สอง Site - General เป็นที่นิยมใช้มากที่สุดที่ได้กล่าวถึงในบทนี้ คือ รูปแบบการจำลองแบบ The ITU Path Loss Model และรูปแบบการจำลองแบบ Log - Distance โดยแบบจำลองแบบ The ITU Path Loss Model เป็นการเปลี่ยนแปลงการยกกำลังที่ใช้ข้อมูลอย่างชัดเจน ในการประมาณค่าของ Path Loss นอกจากนี้จะมีแบบจำลองแบบ The ITU Path Loss Model แล้วยังมีอีกรูปแบบ คือ แบบจำลองแบบ Log - Distance เป็นการรวมกันของการปรับเปลี่ยนการยกกำลัง และรูปแบบ Log - Normal ที่เป็นข้อมูลที่เห็นได้อย่างชัดเจน เช่นเดียวกับทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้วิธีการที่ดีที่สุดที่เราจะสามารถรู้ถึงประสิทธิภาพของแบบจำลอง คือ การวัด การทดสอบ แบบจำลอง

ที่เราออกแบบหลายๆ ครั้ง เพื่อให้เกิดความแม่นยำ รวมไปถึงสภาพสภาวะแวดล้อมต่างกัน ซึ่งล้วนแล้วแต่มีผลต่อการแพร่กระจายของคลื่นทั้งสิ้น ถ้าแบบจำลองที่เราออกแบบไปแล้วนั้น ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำ เราก็สามารถนำข้อมูลที่เราเก็บได้มานั้นทำการปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้แบบจำลองที่ออกแบบนั้นได้ผลประโยชน์ที่คุ้มค่า

## 2.7 โปรแกรมที่ใช้วัดประสิทธิภาพ

2.7.1 โปรแกรมวัดสเปกตรัม Cisco Spectrum Expert Version 4 [6] เป็นโปรแกรมที่แสดงถึงค่าสัญญาณต่างๆของ เครือข่ายไร้สายเช่น SNR, Devices Vs. Channels, Channel Utilization Interference Power ฯลฯ สามารถวัดสัญญาณได้ทั้งความถี่ 2.4 Ghz และ 5 Ghz



ภาพที่ 2.19 ข้อมูลต่างๆ ที่วัดได้จากโปรแกรม Cisco Spectrum Expert version 4

2.7.2 โปรแกรมสร้างกราฟฟิก รับ-ส่ง ข้อมูล jperf-2.0.2 [7] สามารถสร้างข้อมูลทั้งแบบ TCP และ UDP ได้ สามารถใช้งาน ได้ทั้ง Windows, Linux, Unix

2.7.3 โปรแกรมมอนิเตอร์กราฟฟิก PRTG Version 12.3.1.2366 [8] ใช้ดู Bandwidth การใช้งานของสวิตซ์

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากข้อดีของ IEEE 802.3ad การรวมกลุ่มลิงก์ที่มีการเพิ่มแบนด์วิดท์ในการสื่อสารในสื่อกลางแบบสาย (Wire) จึงมีการนำมาใช้กับสื่อกลางแบบไร้สาย (Wireless) แบบต่างๆ ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

การปรับค่าดีเลย์ในการส่งแบบเครือข่ายไร้สาย [9] เป็นการปรับค่าดีเลย์ก่อนที่จะส่งข้อมูลออกไปยังปลายทางโดยปลายทางเป็น 3 ระบบ LTE, WiMAX, Wi-Fi ซึ่งการรวมลิงค์แบบ WiMAX + Wi-Fi ให้ค่าปริมาณงานสูงสุด 56.8 Mbytes และ การรวมลิงค์ของ Radio Access ที่ต่างชนิดกัน [10, 11] ใน [12] ใช้แบบจำลอง Airtime Cost เพื่อวัดประสิทธิภาพของ Packet Delay WiMAX, Wi-Fi แต่ยังเป็น การเปรียบเทียบในรูปแบบมีผู้ใช้คนเดียว

การทำกรรวมลิงค์ด้วยสายที่ใช้ ADSL Link [13] เพื่อศึกษาการควบคุมให้กราฟฟิคของข้อมูลส่งมีความเท่าเทียมกัน

การจัดสรรปริมาณการใช้โดยใช้ วิธี Support Vector Machine [14] ซึ่งเป็นการทำ การรวมกลุ่มลิงค์ เครือข่ายไร้สายแบบต่างๆ (Multi-Radio System) โดยไม่เฉพาะเจาะจงว่าเป็นเครือข่ายไร้สายแบบใด ก่อนส่งออกจะใช้การจัดสรรกราฟฟิคโดยใช้อัลกอริทึม QoS เพื่อจัดสรรข้อมูลก่อนส่งข้อมูลออกไปช่วยในส่วนของการลด Delay Time ของข้อมูลและการรวมแบนด์วิธ [15, 16] ซึ่ง [17] ได้นำวิธีแบบ Aware Dynamic Qos สำหรับ Video Streaming แบบ Real-Time ใน Wireless Network ซึ่งได้พัฒนาอัลกอริทึม TS-EDPF เพื่อลด Delay Time ในการใช้งาน Video Streaming แบบ Real-Time

การทำ Packet Aggregation ก่อนที่จะส่งข้อมูลออกไป [18] โดยพัฒนา Prototype Packet Packer เพื่อลด Delay Time ของการส่งข้อมูลโดยทดสอบใช้งาน VoIP ส่งข้อมูล 7 Sesion พร้อมกัน 7 User พบว่าสามารถลด Delay Time ได้ 40% เมื่อเทียบกับ Non Packet Aggregation

การเสนอการรวมกลุ่มลิงค์ของ Access Point สำหรับ WLAN [19] เป็นการทำให้ 1 Physical Access Point ให้เสมือนมี Access Point หลายตัว ข้อดีคือลดจำนวน Access Point ข้อเสียคือ Access Point ต้องรองรับการทำ Access Point เสมือนและพื้นที่นั้นต้องสามารถควบคุมการออกแบบได้

และการใช้เทคนิค Interface Bonding เพื่อรวมกลุ่มลิงค์ใน Server Linux โดย [20] ทดสอบโดยสื่อกลางแบบสายทดสอบค่าปริมาณงาน UDP ที่ 1.4 Kb รวมกลุ่ม 3 ลิงค์ซึ่งได้ค่าปริมาณงาน 513 Mbps [21] ใช้การ์ด Wi-Fi 3 การ์ด ทั้ง 2 เครื่องทำการรวมลิงค์กันและทดสอบค่าปริมาณงาน TCP ซึ่งได้ค่าปริมาณงาน 12.7 Mbps ในมาตรฐาน IEEE 802.11b ซึ่งนำมาสู่งานของผู้วิจัยที่จะทดสอบการรวมกลุ่มลิงค์แบบ Wi-Fi แต่แตกต่างจากงานเดิม เนื่องจากทางผู้วิจัยได้นำผลในส่วนของการ Interference และทดสอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำการรวมกลุ่มลิงค์ที่ไม่ใช่เทคนิค Interface Bonding

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

การรวมกลุ่มลิงค์ของสายพาย สำหรับ IEEE 802.11n โดยใช้สวิตช์รวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ เพื่อวัดค่าปริมาณงานข้อมูล (Throughput) ค่าของ Interference Power เทียบกับ SNR และ ค่าเวลาที่เริ่มส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง (RTT) ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตรและ 10 เมตร ใช้ความถี่ 2.4 GHz ช่องสัญญาณ 20 MHz ช่อง 1 และ 11 ในการทดสอบ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

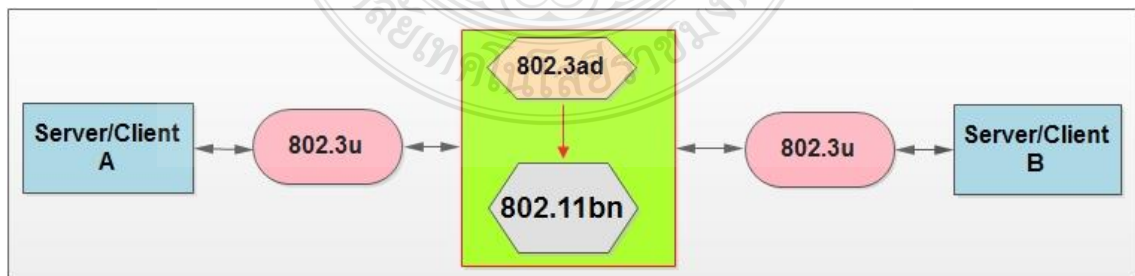
- 3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล
- 3.2 ขั้นตอนการทดลอง
- 3.3 บันทึกผลการทดลอง

#### 3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ศึกษาทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับการทำงานของการรวมกลุ่มลิงค์ IEEE 802.3ad และ เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย 802.11n และการใช้โปรแกรมสเปกตรัมวัดสัญญาณเพื่อมาวิเคราะห์ ผลรวมถึงการใช้โปรแกรมวัดผลค่าปริมาณงานข้อมูล (Throughput) และค่าเวลาที่เริ่มส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง (RTT)

#### 3.2 ขั้นตอนการทดลอง

- 3.2.1 ภาพรวมของระบบการรวมกลุ่มลิงค์ระบบไร้สาย ดังภาพที่ 3.1



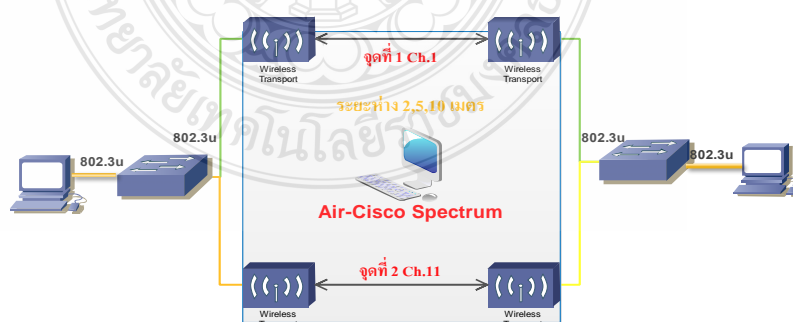
ภาพที่ 3.1 การรวมกลุ่มลิงค์ระบบแลนไร้สาย



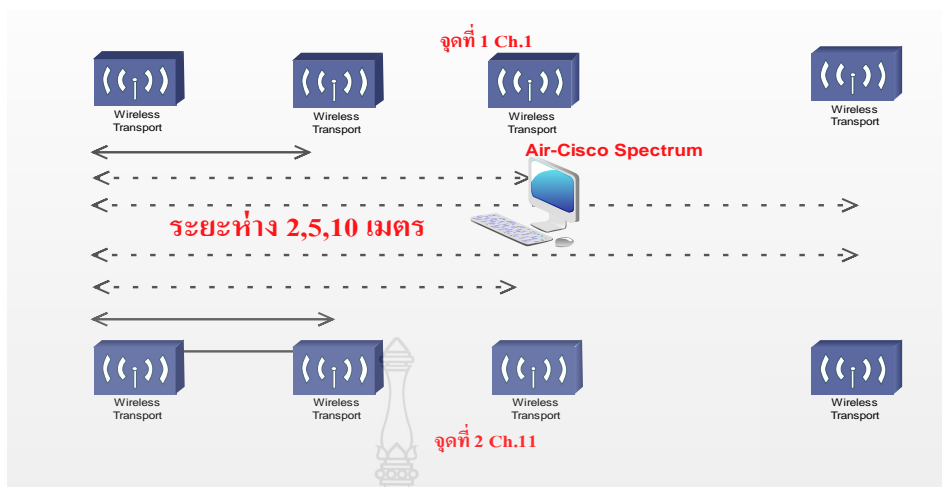
โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

3.2.1.1 ทดสอบการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์และ 2 ลิงค์ โดยใช้ช่องสัญญาณที่ไม่รบกวนกัน 2 สัญญาณ คือ ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ในระยะทาง 2, 5, 10 เมตรตามลำดับ และวัดผลค่า Interference Power และ SNR เพื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณงาน โดยจะมีระบบรับ-ให้บริการ (Server/Client) A ใ้รับ-ส่งข้อมูลไปยังระบบรับ-ให้บริการ B ผ่านสวิตช์ A ที่ทำการรวมกลุ่มลิงค์ต่อด้วยระบบแลนไร้สาย ทำ Point-To-Point ผ่านสวิตช์ B ไปยังระบบรับ-ให้บริการ B ดังภาพที่ 3.2, 4

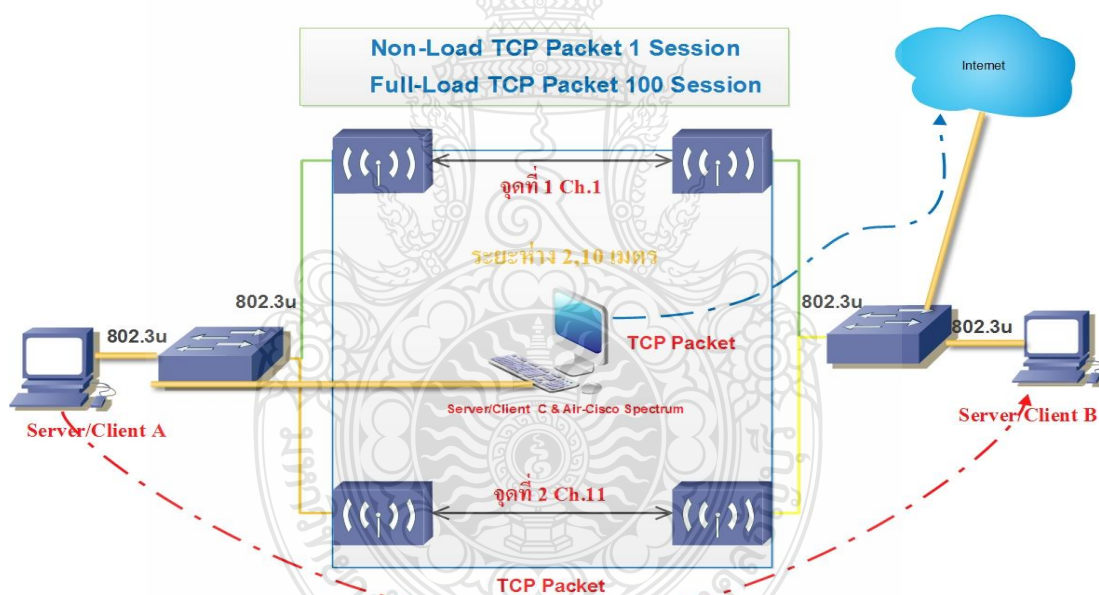
3.2.1.2 ทดสอบการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์และ 2 ลิงค์ โดยใช้ช่องสัญญาณที่ไม่รบกวนกัน 2 สัญญาณคือ ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ในระยะทาง 2 และ 10 เมตร ส่งข้อมูล แบบ TCP จากต้นทางไปยังปลายทาง ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes สร้างสถานการณ์ 2 แบบ ได้แก่ สภาวะไม่มีโหลด (Non-Load) และ สภาวะที่มีโหลดใช้งานเต็มที่ (Full-Load) ในที่นี้สภาวะไม่มีโหลด (Non-Load) หมายถึงมีการใช้งานแค่จากเครื่อง (Server/Client) A ใ้รับ-ส่งข้อมูลไปยัง ระบบรับ-ให้บริการ B ผ่านสวิตช์ A ที่ทำการรวมกลุ่มลิงค์ต่อด้วยระบบแลนไร้สาย ทำ Point-To-Point ผ่านสวิตช์ B ไปยังระบบรับ-ให้บริการ B เท่านั้นไม่มีเครื่องใ้ร่วม และส่งข้อมูลเพียง 1 Session เวลา 100 วินาที สภาวะที่มีโหลดใช้งานเต็มที่ (Full-Load) หมายถึงมีการใช้งานแค่จากเครื่อง (Server/Client) A ใ้รับ-ส่งข้อมูลไปยังระบบรับ-ให้บริการ B ผ่านสวิตช์ A ที่ทำการรวมกลุ่มลิงค์ต่อด้วยระบบแลนไร้สาย ทำ Point-to-Point ผ่านสวิตช์ B ไปยังระบบรับ-ให้บริการ B และมีเครื่อง (Server/Client) C ที่เข้ามาใ้ Load ร่วมด้วยโดยต่อเข้าสวิตช์ตัวเดียวกับ (Server/Client) B ทำการส่งข้อมูลพร้อมกัน 100 Session เวลา 100 วินาที วัดผลค่าปริมาณงานและค่าเวลาที่เริ่มส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง (RTT) ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load ดังภาพที่ 3.4



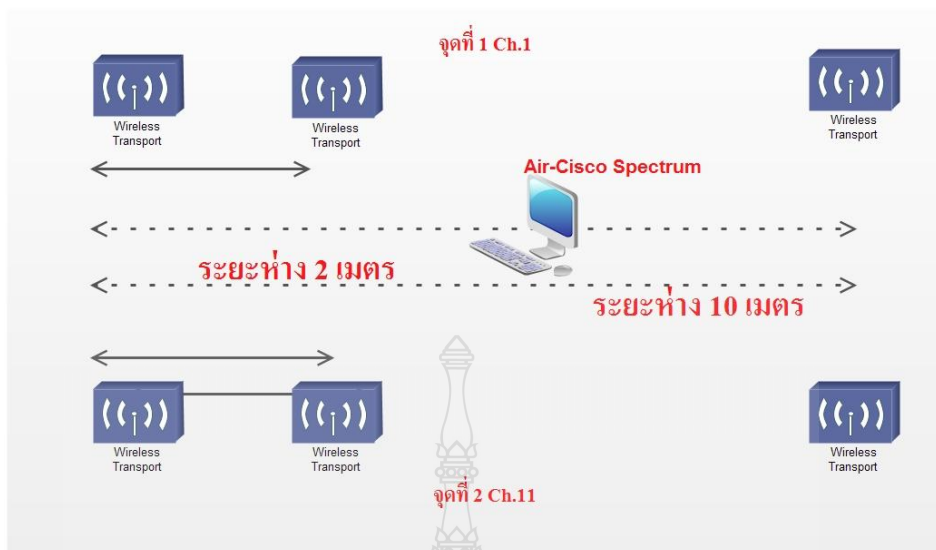
ภาพที่ 3.2 การเชื่อมต่อการรวมกลุ่มลิงค์ของระบบแลนไร้สาย Server/Client A ใ้รับ-ส่งข้อมูลไปยัง Server/Client B



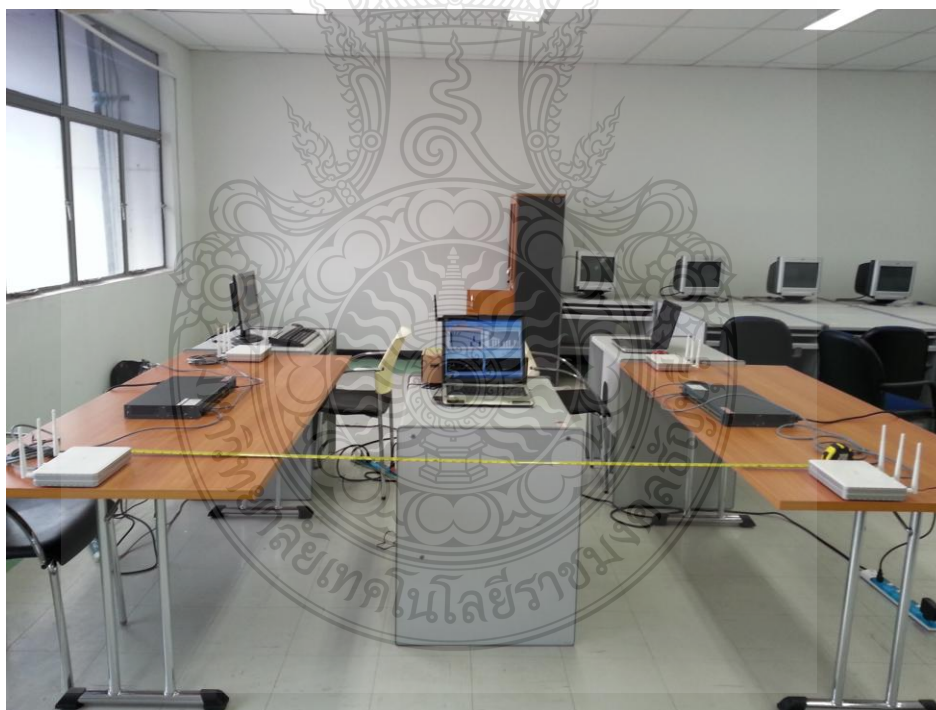
ภาพที่ 3.3 การวางตำแหน่งของ Access Point ทดสอบจาก 2, 5, 10 เมตรตามลำดับ



ภาพที่ 3.4 การเชื่อมต่อการรวมกลุ่มลิงค์ของระบบแลนไร้สายส่งข้อมูลแบบ TCP ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load



ภาพที่ 3.5 การวางตำแหน่งของแอคเซสพอยซ์ ทดสอบจาก 2 เมตรและ 10 เมตรตามลำดับ



ภาพที่ 3.6 ภาพรวมของระบบการรวมกลุ่มเครื่องระบบแลนไร้สายที่ทดสอบด้วยอุปกรณ์จริงที่ระยะห่างของแอคเซสพอยซ์ที่ 2 เมตร



ภาพที่ 3.7 ภาพรวมของระบบการรวมกลุ่มลิงค์ระบบแลนไร้สายที่ทดสอบด้วยอุปกรณ์จริงที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ที่ 10 เมตร

### 3.2.2 การออกแบบและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจะประกอบไปด้วย

3.2.2.1 เครื่องคอมพิวเตอร์จำนวน 3 เครื่อง (CPU: Intel Core i5 2.5 GHz Ram 2 GB Hard Drive 160 GB)

3.2.2.2 สวิตช์ที่รองรับการทำการรวมกลุ่มลิงค์ (Link Aggregation) จำนวน 2 ตัว ในการทดสอบนี้ใช้สวิตช์ Cisco Catalyst 2950 24 พอร์ต

3.2.2.3 สาย UTP Cat5e จำนวน 6 เส้น

3.2.2.4 แอคเซสพ้อยซ์ ASUS RT-N16 จำนวน 4 ชุด ติดตั้งเฟิร์มแวร์ Tomato-K26USB-1.28.9054MIPSR2-Beta-Ext

3.2.2.5 การ์ดวัดสเปกตรัมของ Cisco รุ่น AIR-CSCO-SE-WIFI-C

3.2.2.6 โปรแกรมสร้างปริมาณการใช้งานรับ-ส่ง ข้อมูล Jperf-2.0.2 ติดตั้งลงบนคอมพิวเตอร์ทั้ง 3 เครื่อง และใช้โปรแกรม Brick , Nuttcp เพื่อเปรียบเทียบกับ Jperf-2.0.2 (ทดสอบที่ Packet 128 Kbyte เท่านั้น) ดังภาพที่ 3.10

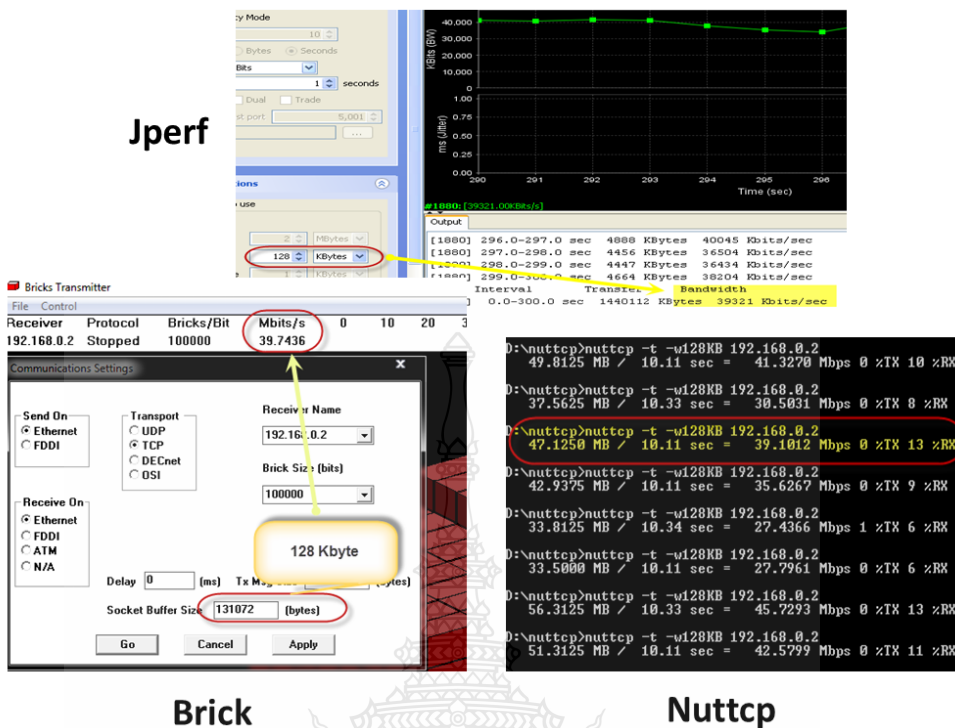
3.2.2.7 โปรแกรมมอนิเตอร์ปริมาณการใช้งาน PRTG Version 12.3.1.2366 ติดตั้งบน  
เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็น Server



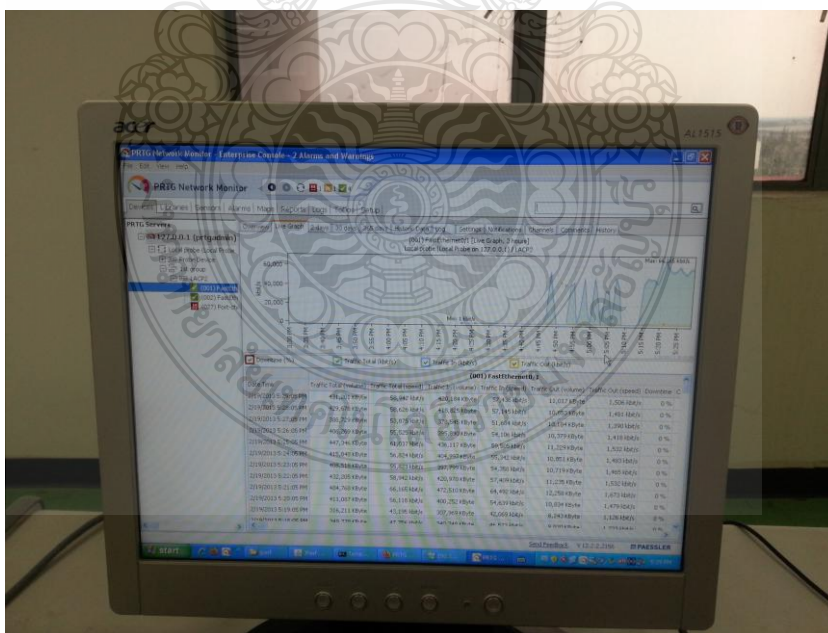
ภาพที่ 3.8 การ์ดสเปคตรัมรวมถึงโปรแกรมที่ใช้วัดค่าสัญญาณ



ภาพที่ 3.9 โปรแกรมสร้างปริมาณการใช้งาน รับ-ส่ง ข้อมูล Jperf-2.0.2 ของ Server



ภาพที่ 3.10 โปรแกรม Brick, Nuttcp เพื่อเปรียบเทียบกับ Jperf-2.0.2 ทดสอบที่ Packet 128 Kbyte



ภาพที่ 3.11 โปรแกรมมอนิเตอร์ปริมาณการใช้งาน PRTG Version 12.3.1.2366 ที่ติดตั้งแล้ว

### 3.2.3 ขั้นตอนการคอนฟิกอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดสอบ

3.2.3.1 คอนฟิกอุปกรณ์สวิตช์ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad เพื่อรองรับการรวมกลุ่มลิงก์ โดยคอนฟิก Cisco Catalyst 2950 พอร์ต 1 และ 2 ชื่อว่า Port Channel Group 1 ใช้โปรโตคอลแบบ LACP และใช้โหมดการทำงาน Active Passive ทำ Load Balancing แบบ Hash 2 เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด จากนั้นเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้าและตรวจสอบสถานะของ Port ว่ามีการรวมกลุ่มลิงก์ หรือยังโดยใช้คำสั่ง และกำหนดไอพีแอดเดรสของทั้ง 2 ตัวคือ 192.168.0.251 และ 192.168.0.252 จากนั้นใช้คำสั่ง Show Etherchannel Summary เพื่อดูสถานะของพอร์ตว่า Up หรือไม่ ดังภาพที่ 3.12

```
LACP1#show etherchannel summary
Flags: D - down          P - in port-channel
       I - stand-alone  s - suspended
       H - Hot-standby (LACP only)
       R - Layer3       S - Layer2
       u - unsuitable for bundling
       U - in use       f - failed to allocate aggregator
       d - default port

Number of channel-groups in use: 1
Number of aggregators:          1

Group  Port-channel  Protocol    Ports
-----+-----+-----+-----
1      Po1(SU)           LACP       Fa0/1(Pd) Fa0/2(P)
```

ภาพที่ 3.12 การตรวจสอบสถานะของการรวมลิงก์ว่า Up หรือไม่

```
LACP1#show etherchannel detail
Channel-group listing:

Group: 1
-----
Group state = L2
Ports: 2 Members - 16
Port-channels: 1 Max Port-channels - 16
Protocol: LACP
Ports in the group:
Port: Fa0/1
-----
Port state = Up Mstr In-Bndl
Channel group = 1 Mode = Active Schange =
Port-channel = Po1 GC = Fa0/1 post-channel = Po1
Port index = 0 Load = 0x00 Protocol = LACP

Flags: S - Device is sending Slow LACPDU. F - Device is sending fast LACPDU.
       A - Device is in active mode. P - Device is in passive mode.

Local information:
Port  Flags  State  Priority  Admin  Oper  Port  Port
Fa0/1 SA   bndl  32768    Oxi     Oxi   Oxi   0x3D

Partner's information:
Port  Flags  State  Priority  Admin  Oper  Port  Port
Fa0/1 SA   bndl  32768    0017.94e5.e6c0  25s  Oxi   Oxi   0x3D

Age of the port in the current state: 04:00h:01m:24s

Port: Fa0/2
-----
```

ภาพที่ 3.13 รายละเอียดของพอร์ตว่ามีรายละเอียดอย่างไรด้วยคำสั่ง Show Etherchannel Detail

```
LACP1#ping 192.168.0.252
Type escape sequence to abort.
Sending 5, 100-byte ICMP Echos to 192.168.0.252, timeout is 2 seconds:
!!!!
Success rate is 100 percent (5/5), round-trip min/avg/max = 4/4/4 ms
LACP1#
```

ภาพที่ 3.14 การทดสอบการเชื่อมต่อระหว่างสวิตช์ว่าสามารถติดต่อกันได้หรือไม่ ด้วยคำสั่ง Ping

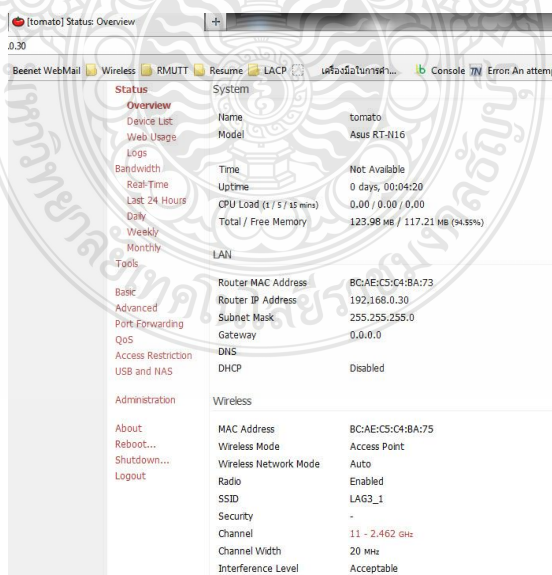
3.2.3.2 คอนฟิกแอคเซสพอยต์ทั้ง 4 ตัว ติดตั้งเฟิร์มแวร์ Tomato-K26USB-1.28.9054MIPSR2-Beta-Ext และคอนฟิกเป็นแบบ Point – to – Point กำหนดไอพีแอดเดรสของอุปกรณ์แล้วถึงช่องสัญญาณดังนี้

แอคเซสพอยต์ ตัวที่ 1 LAG2\_1 Mac Address E0:CB:4E:56:AC:BA IP Address 192.168.0.10 Ch 1 - 2.437 GHz 20 MHz

แอคเซสพอยต์ ตัวที่ 2 LAG2\_2 Mac Address E0:CB:4E:56:9F:BE IP Address 192.168.0.20 Ch 1 - 2.437 GHz 20 MHz

แอคเซสพอยต์ ตัวที่ 3 LAG3\_1 Mac Address BC:AE:C5:C4:BA:75 IP Address 192.168.0.30 Ch 11 - 2.462 GHz 20 MHz

แอคเซสพอยต์ ตัวที่ 4 LAG3\_2 Mac Address E0:CB:4E:56:AC:B5 IP Address 192.168.0.40 Ch 11 - 2.462 GHz 20 MHz



ภาพที่ 3.15 รายละเอียดต่างๆ ของแอคเซสพอยต์ เช่น ช่องสัญญาณ ไอพีแอดเดรส



The screenshot displays the configuration page for a Cisco Spectrum Expert device. The interface is divided into several sections:

- Left Sidebar:** Contains navigation menus for Bandwidth, Tools, Basic Network, Advanced, Administration, and About.
- LAN Section:**
  - Router IP Address:** 192.168.0.30 (highlighted with box 2)
  - Subnet Mask:** 255.255.255.0 (highlighted with box 2)
  - Default Gateway: 0.0.0.0
  - Static DNS: 0.0.0.0 (IP:port)
- Wireless Section:**
  - Enable Wireless:
  - MAC Address: BC:AE:C5:C4:BA:75
  - Wireless Mode: Access Point + WDS (highlighted with box 3)
  - Wireless Network Mode: Auto
  - SSID: LAG3\_1
  - Broadcast:
  - Channel: 11 - 2.462 GHz
  - Channel Width: 20 MHz
  - Security: Disabled
- WDS Section:**
  - Link With...: (dropdown menu)
  - MAC Address table (highlighted with box 4):

E0:CB:4E:56:AC:B5	00:00:00:00:00:00
00:00:00:00:00:00	00:00:00:00:00:00
00:00:00:00:00:00	00:00:00:00:00:00

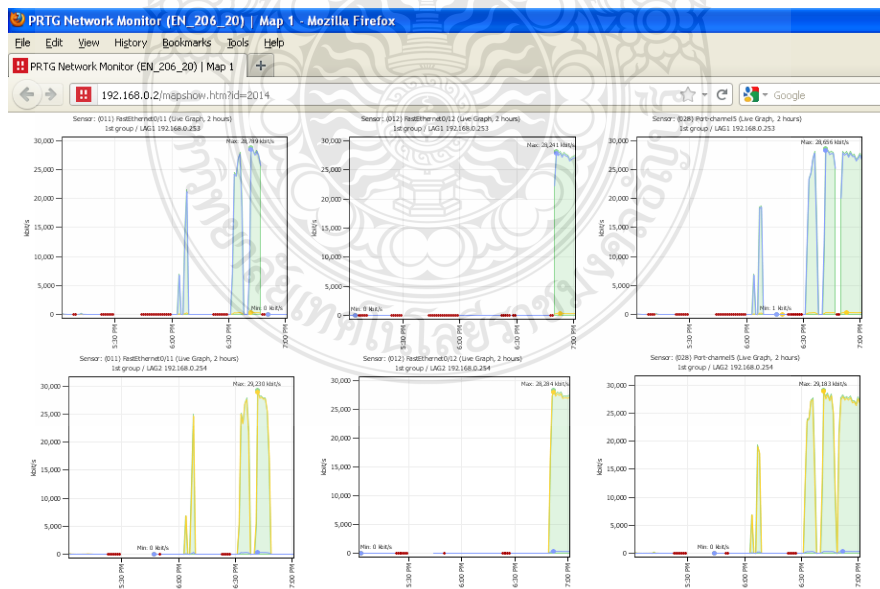
ภาพที่ 3.16 การทดสอบ Connection ระหว่างสวิตช์ว่าสามารถติดต่อกันได้ ด้วยคำสั่ง Ping

3.2.3.4 ติดตั้งโปรแกรม Cisco Spectrum Expert Version 4 ลงบนเครื่องที่ใส่การ์ดวัดสเปกตรัม



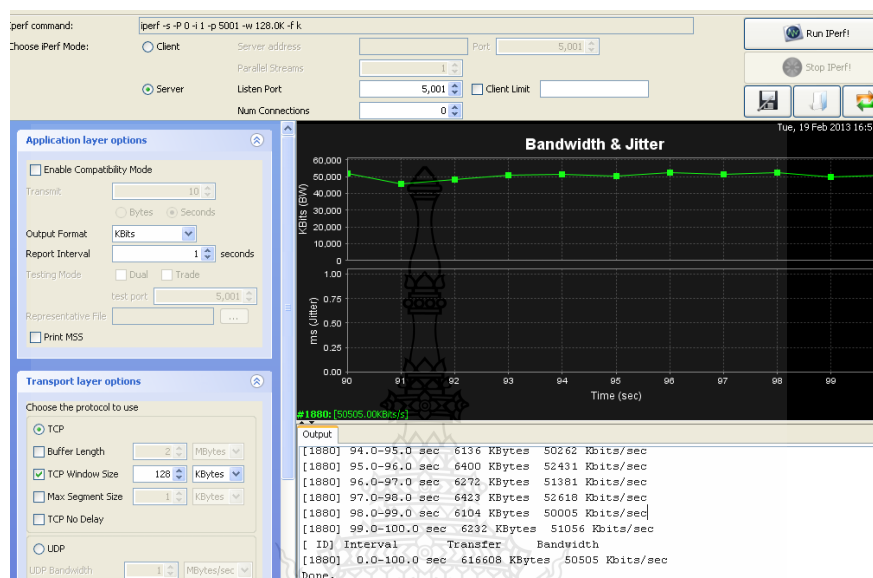
ภาพที่ 3.17 โปรแกรม Cisco Spectrum ซึ่งแสดงรายละเอียดต่างๆของสัญญาณ เช่น SNR, Interference Power, Channel utilization, FFT Duty Cycle

3.2.3.5 ติดตั้งโปรแกรม PRTG Version 12.3.1.2366 ที่ Server มอนิเตอร์ปริมาณการใช้งาน ที่สวิตช์ที่ทำการวมกลุ่มลิงค์ทั้ง 2 ตัว ไอพี 192.168.0.251 และ 192.168.0.252 snmp ของสวิตช์ชื่อ Lacp

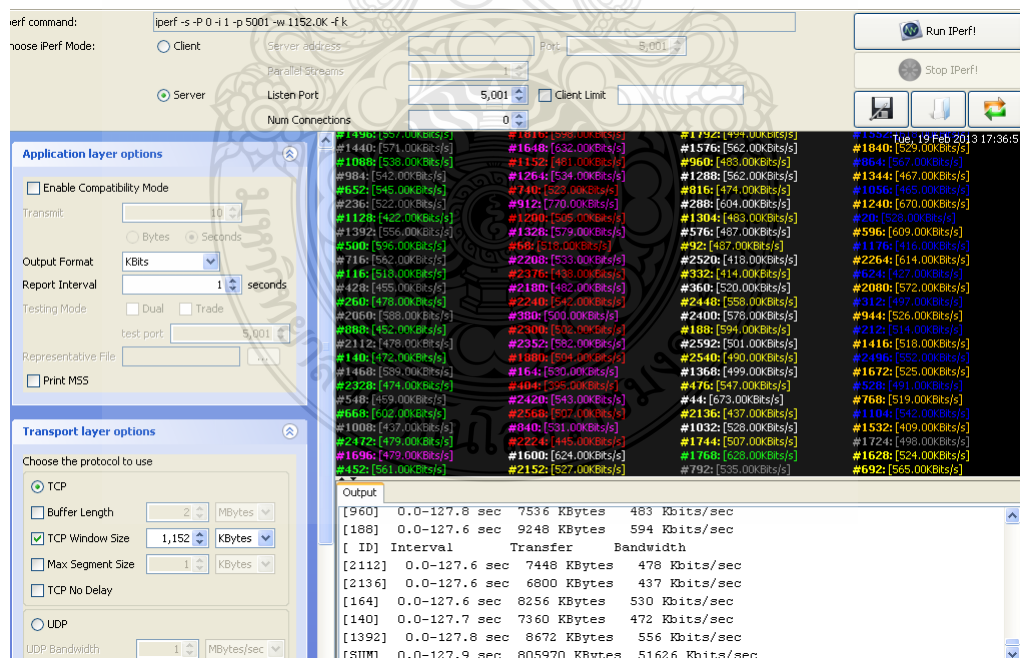


ภาพที่ 3.18 โปรแกรมมอนิเตอร์ปริมาณการใช้งาน PRTG Version 12.3.1.2366

3.2.3.6 ติดตั้งโปรแกรม Jperf-2.0.2 ทั้ง 3 เครื่อง กำหนดไอพีแอดเดรสเครื่อง Server เป็น 192.168.0.2 Client เป็น 192.168.0.1 เครื่องวัดสเปกตรัมเป็น 192.168.0.3



ภาพที่ 3.19 ผลการรับส่งข้อมูลจาก Client มายัง Server 1 Session (Non-Load) 100 วินาที



ภาพที่ 3.20 ผลการรับส่งข้อมูลจาก Client มายัง Server 100 Session (Full-Load) 100 วินาที

### 3.2.4 ขั้นตอนการวัดประสิทธิภาพ

ทดสอบในพื้นที่ 2 ตารางเมตร ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง เนื่องจากเป็นระยะที่ทำให้สัญญาณมีประสิทธิภาพสูงสุด [22] และเพิ่มระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ จาก 2 เมตร 5 เมตร และ 10 เมตร ตามลำดับ ดังภาพที่ 3.2 และใช้ความถี่ 2.4 GHz ในช่องสัญญาณ 20 MHz ที่ช่องสัญญาณ 1 และ 11 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพค่าปริมาณงาน (Throughput) ค่าของ Interference Power เทียบกับ SNR และค่าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง (Round Trip Time) ของการรวมกลุ่มลิงค์ของระบบแลนไร้สายด้วยการส่งข้อมูลแบบ TCP โดยใช้โปรแกรมสร้างปริมาณการใช้งาน รับ-ส่ง ข้อมูล Jperf-2.0.2 และใช้โปรแกรมมอนิเตอร์ปริมาณการใช้งาน PRTG Version 12.3.1.2366 เพื่อดูปริมาณการใช้งานการใช้งานของการรวมกลุ่มลิงค์ดังนี้

3.2.4.1 รวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet ขนาด 8 Kbytes วัดค่าประสิทธิภาพค่าปริมาณงาน ค่าของ Interference Power เทียบกับ SNR

3.2.4.2 รวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 5 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet ขนาด 8 Kbytes วัดค่าประสิทธิภาพค่าปริมาณงาน ค่าของ Interference Power เทียบกับ SNR

3.2.4.3 รวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet ขนาด 8 Kbytes วัดค่าประสิทธิภาพค่าปริมาณงาน ค่าของ Interference Power เทียบกับ SNR

3.2.4.4 รวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet ขนาด 8 Kbytes วัดค่าประสิทธิภาพค่าปริมาณงาน ค่าของ Interference Power เทียบกับ SNR

3.2.4.5 รวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 5 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet ขนาด 8 Kbytes วัดค่าประสิทธิภาพค่าปริมาณงาน ค่าของ Interference Power เทียบกับ SNR

3.2.4.6 รวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet ขนาด 8 Kbytes วัดค่าประสิทธิภาพค่าปริมาณงาน ค่าของ Interference Power เทียบกับ SNR

3.2.4.7 รวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสภาวะ Non-Load

3.2.4.8 รวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสภาวะ Full-Load

3.2.4.9 รวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสภาวะ Non-Load

3.2.4.10 รวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสภาวะ Full-Load

3.2.4.11 รวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสภาวะ Non-Load

3.2.4.12 รวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสภาวะ Full-Load

3.2.4.13 รวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสภาวะ Non-Load

3.2.4.14 รวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสภาวะ Full-Load

### 3.3 บันทึกผลการทดลอง

โดยทดสอบ ส่งข้อมูลที่ 100 วินาที และทดลองซ้ำ 10 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยบันทึกผลการทดลองที่ได้ในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อนำข้อมูลค่าปริมาณงาน (Throughput) ค่าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง (Round Trip Time) ของการรวมกลุ่มลิงค์ของระบบแลนไร้สายด้วยการส่งข้อมูลแบบ TCP เพื่อเปรียบเทียบผลตามวัตถุประสงค์



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

การทดสอบค่าปริมาณงาน ของการรวมกลุ่มลิงค์ โดยใช้เครือข่ายแลนไร้สาย IEEE 802.11n ทดสอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง โดย 2 เครื่องใช้ในการ รับ-ส่ง ข้อมูล อีก 1 เครื่องใช้ในการมอนิเตอร์กราฟฟิก รวมถึงสเปกตรัมของสัญญาณ และใช้ส่งข้อมูลออกไปภายนอกในสถานะ Full-Load โดยกำหนดไอพีแอดเดรสเครื่องแม่ข่าย เครื่องที่ 1 ไอพี 192.168.0.2 เครื่องลูกข่ายเครื่องที่ 2 ไอพี 192.168.0.1 เครื่องที่ 3 มอนิเตอร์ ไอพี 192.168.0.3 ใช้โปรแกรมสร้างกราฟฟิก รับ-ส่ง ข้อมูล Jperf-2.0.2 และ โปรแกรมมอนิเตอร์กราฟฟิก PRTG Version 12.3.1.2366 เพื่อดูกราฟฟิกของแต่ละพอร์ต รวมถึง พอร์ตที่ทำการรวมลิงค์ จากเครื่องลูกข่ายไปยังเครื่องแม่ข่าย ซึ่งมีการทดลองดังต่อไปนี้

1. ค่าเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแตกต่างระหว่าง Interference Power Station กับค่า Interference Power Noise ที่การรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์และ 2 ลิงค์
2. ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่รับ-ส่ง เมื่อมีการเพิ่มระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์
3. ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Non-Load
4. ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Non-Load และ Full-Load
5. ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Non-Load และ Full-Load
6. ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Full-Load
7. ค่าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง (Round Trip Time) จากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Full-Load
8. เปอร์เซนต์ความล่าช้าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง จากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Full-Load

9. ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Non-Load
10. ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load
11. ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load
12. ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Full-Load
13. ค่าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง จากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Full-Load
14. เปอร์เซ็นต์ความล่าช้าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง จากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Full-Load

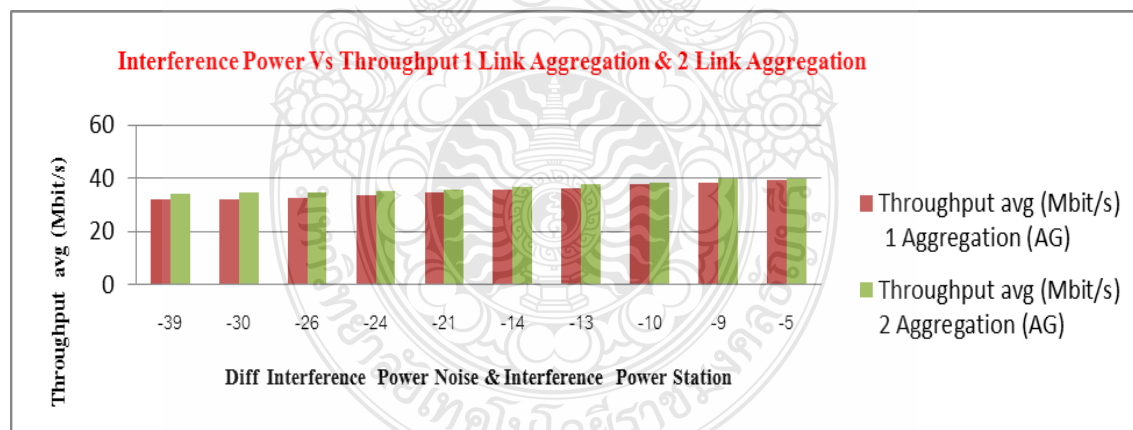
#### 4.1 ค่าเปรียบเทียบประสิทธิภาพความแตกต่างระหว่าง Interference Power Station กับค่า Interference Power Noise ที่การรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์และ 2 ลิงค์

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าถ้าค่า ความแตกต่างระหว่าง Interference Power Station กับค่า Interference Power Noise (แทนด้วยตัวแปร A) มีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่า Throughput มีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อการรวมกลุ่มลิงค์ (แทนด้วยตัวแปร AG) มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อเทียบระหว่างการรวม 1 ลิงค์และการรวมกลุ่ม 2 ลิงค์ ตัวอย่างเช่นเมื่อค่า Interference มีค่า-5dBm สามารถรับ-ส่ง ข้อมูลด้วยการรวมกลุ่ม 1 ลิงค์ได้ 39.53 Mbit/sec 2 ลิงค์ได้ 40.10 Mbit/sec



ตารางที่ 4.1 ค่าความแตกต่างระหว่าง Interference Power ส่งผลต่อ Throughput 1 Link Aggregation & 2 Link Aggregation ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร

Diff Interference Power Noise & Interference Power Station (A)	Throughput avg (Mbit/s) 1 Aggregation (AG)	Throughput avg (Mbit/s) 2 Aggregation (AG)
-39	31.95	34.12
-30	32.12	34.40
-26	32.45	34.60
-24	33.78	35.20
-21	34.45	35.50
-14	35.74	36.80
-13	36.23	37.70
-10	37.74	38.40
-9	38.12	39.80
-5	39.53	40.10



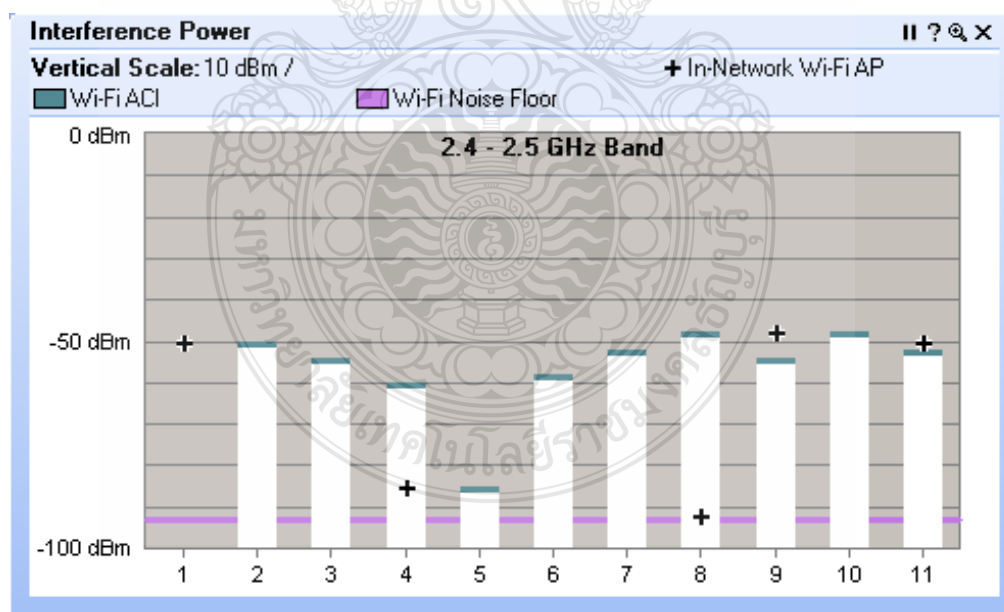
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างระหว่าง A กับ AG

#### 4.2 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูล เมื่อมีการเพิ่มระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์

ตารางที่ 4.2 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูล เมื่อมีการเพิ่มระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์

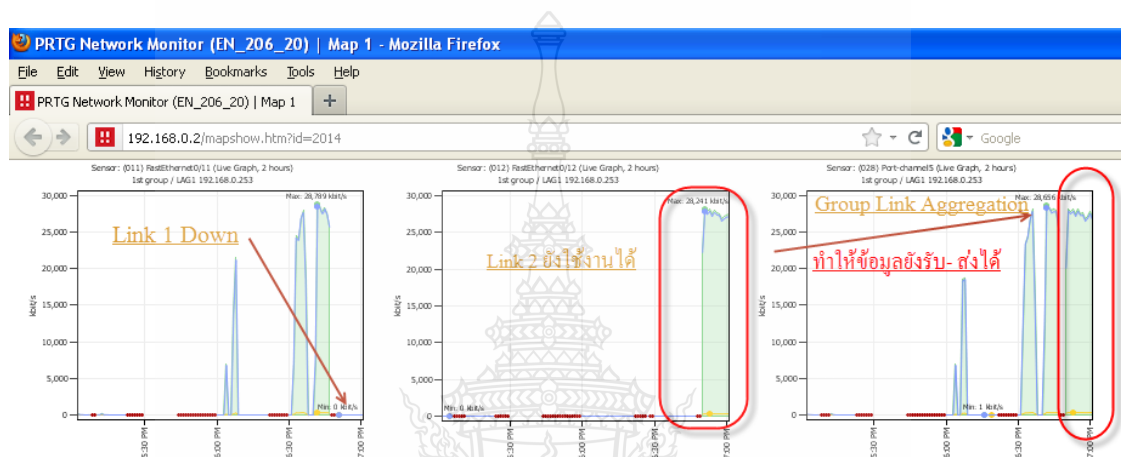
Distance AP(m)	Throughput avg (Mbit/s)	Throughput avg (Mbit/s)
	1 Aggregation (AG)	2 Aggregation (AG)
2 m	39.50	33.50
5 m	38.60	39.00
10 m	39.53	40.10

ตารางที่ 4.2 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูล เมื่อมีการเพิ่ม ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ โดยถ้ามีการรวมลิงค์ 1 ลิงค์ ใช้รับส่งบนระยะห่าง 2 เมตรนั้น ได้ค่าปริมาณงาน 39.5 Mbit/sec แต่เมื่อต่อแอคเซสพ้อยซ์ เข้าเพิ่มเพื่อที่จะทำการรวมลิงค์ 2 ลิงค์นั้นกลับทำให้ค่าปริมาณงานนั้น น้อยลง สืบเนื่องจากมีสัญญาณจากการรบกวนของสัญญาณทำให้ความแตกต่างระหว่าง Interference Power Station กับค่า Interference Power Noise นั้นน้อย ส่งผลต่อค่าปริมาณงาน ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ค่า Interference Power ของช่องสัญญาณที่ 1 และ 11

เมื่อต่อรวมลิงค์กัน 2 ลิงค์จะมีค่าน้อยกว่าที่ต่อรวมลิงค์เดียว แต่หากเพิ่มระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ออกไปนั้นจะทำให้การรวมลิงค์ของสัญญาณดีขึ้น ผลทดสอบค่าปริมาณงานเมื่อรวมกลุ่มลิงค์ เมื่อรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ได้ค่าปริมาณงาน 40.20 Mbit/sec และเมื่อมีลิงค์ใดลิงค์หนึ่งมีปัญหาที่ยังสามารถ รับ- ส่งข้อมูลกันได้ เนื่องจากยังมีเส้นทางสำรองอยู่ ดังภาพที่ 4.3



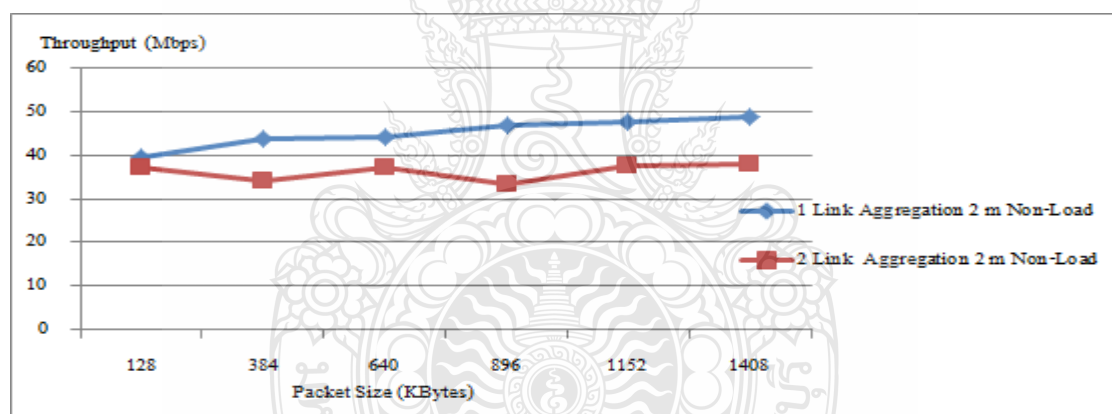
ภาพที่ 4.3 เมื่อลิงค์ใดลิงค์หนึ่งมีปัญหาที่ยังสามารถส่งข้อมูลจากการรวมลิงค์ ลิงค์อื่นได้ มอนิเตอร์จากโปรแกรม PRTG

#### 4.3 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Non-Load

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าถ้ารวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสถานะ Non-Load จะมีค่าน้อยกว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ตัวอย่างเช่นเมื่อรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ส่งข้อมูล Packet ขนาด 1408 Kbytes ได้น้อยกว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ 10.91% สาเหตุเนื่องจากสัญญาณรบกวนกันเองมากทำให้ข้อมูลที่รับ-ส่ง ไม่คงที่

ตารางที่ 4.3 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load

1 Link Vs 2 Links Aggregation 2 m Non-Load			
Packet (Kbyte)	Throughput avg (Mbit/s) 1 Link Aggregation	Throughput avg (Mbit/s) 2 Link Aggregation	% Throughput increase
128	39.52	37.20	-2.33
384	43.91	34.13	-9.77
640	44.08	37.15	-6.93
896	46.94	33.42	-13.52
1152	47.77	37.47	-10.30
1408	49.05	38.14	-10.91



ภาพที่ 4.4 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load

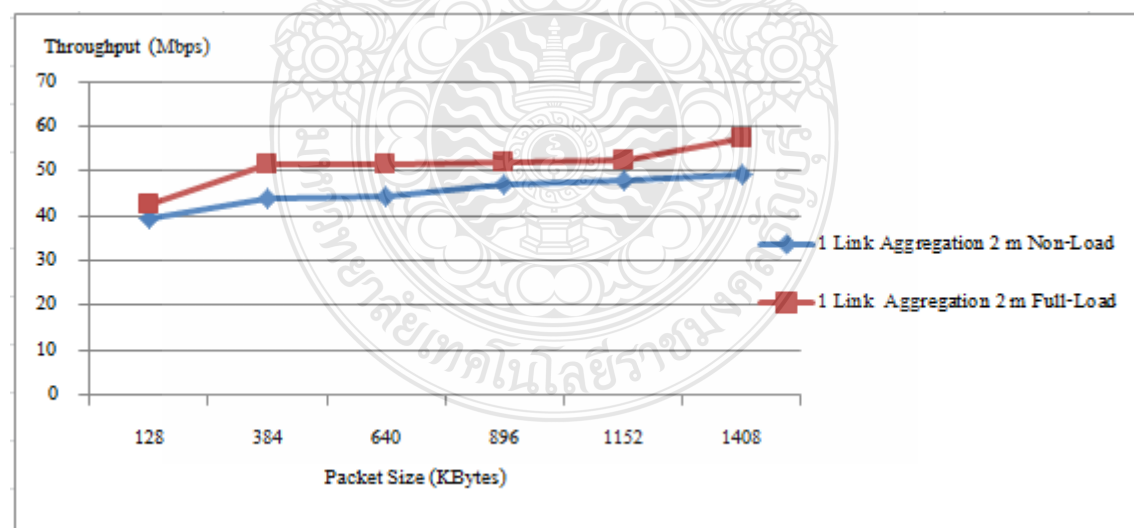
#### 4.4 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4 ถ้ารวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load (100 Sessions) พบว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ในสภาวะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าสภาวะ Non-Load

ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูล Packet ขนาด 1408 Kbytes ในสภาวะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่า สภาวะ Non-Load 8.36%

ตารางที่ 4.4 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load

Non-Load Vs Full-Load 1 Link Aggregation 2 m			
Packet (Kbyte)	Throughput avg (Mbit/s) 1 Link Aggregation Non-Load	Throughput avg (Mbit/s) 1 Link Aggregation Full-Load	% Throughput increase
128	39.52	42.63	3.11
384	43.91	51.45	7.54
640	44.08	51.62	7.54
896	46.94	51.84	4.90
1152	47.77	52.34	4.57
1408	49.05	57.41	8.36



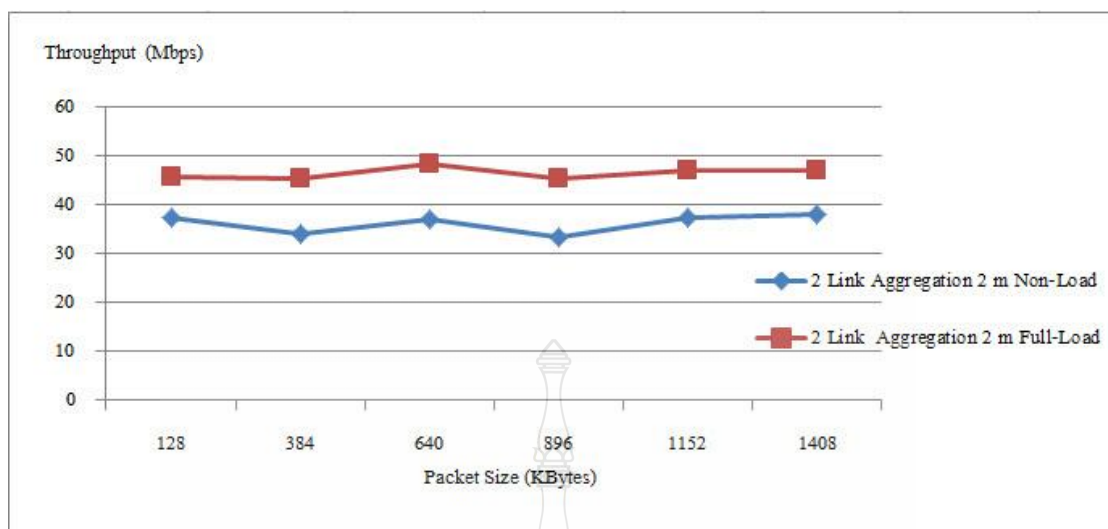
ภาพที่ 4.5 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load

#### 4.5 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Non-Load และ Full-Load

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5 ถ้ารวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสถานะ Non-Load และ Full-Load (100 Sessions) พบว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ในสถานะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าสถานะ Non-Load ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูล Packet ขนาด 1408 Kbytes ในสถานะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าสถานะ Non-Load 8.70%

ตารางที่ 4.5 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Non-Load และ Full-Load

Non-Load Vs Full-Load 2 Link Aggregation 2 m			
Packet (Kbyte)	Throughput avg (Mbit/s) 2 Link Aggregation Non-Load	Throughput avg (Mbit/s) 2 Link Aggregation Full-Load	% Throughput increase
128	37.20	45.67	8.47
384	34.13	45.26	11.13
640	37.15	48.43	11.28
896	33.42	45.42	12.00
1152	37.47	47.03	9.56
1408	38.14	46.84	8.70



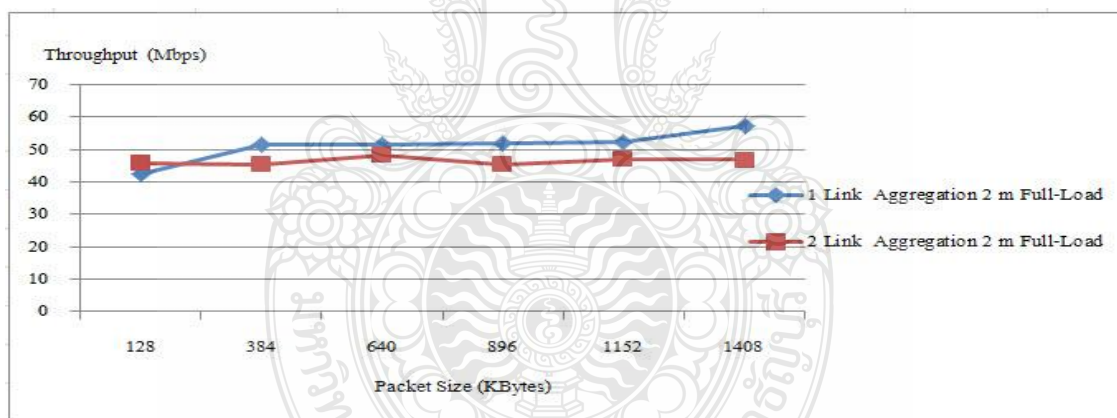
ภาพที่ 4.6 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Non-Load และ Full-Load

#### 4.6 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Full-Load

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6 ถ้ารวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสภาวะ Full-Load และ Full-Load (100 Sessions) พบว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ในสภาวะ Full-Load ส่งข้อมูลได้น้อยกว่าสภาวะ Full-Load 1 ลิงค์ ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูล Packet ขนาด 1408 Kbytes ในสภาวะ Full-Load 2 ลิงค์สามารถส่งข้อมูลได้น้อยกว่าสภาวะ Full-Load 1 ลิงค์ 10.57% สาเหตุเนื่องจากสัญญาณรบกวนกันเองมากทำให้ข้อมูลที่รับ-ส่ง ไม่คงที่

ตารางที่ 4.6 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load

Full-Load Vs Full-Load 1Link & 2 Link Aggregation 2 m			
Packet (Kbyte)	Throughput avg (Mbit/s) 1 Link Aggregation Full-Load	Throughput avg (Mbit/s) 2 Link Aggregation Full-Load	% Throughput increase
128	42.63	45.67	3.04
384	51.45	45.26	-6.19
640	51.62	48.43	-3.19
896	51.84	45.42	-6.42
1152	52.34	47.03	-5.31
1408	57.41	46.84	-10.57



ภาพที่ 4.7 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load

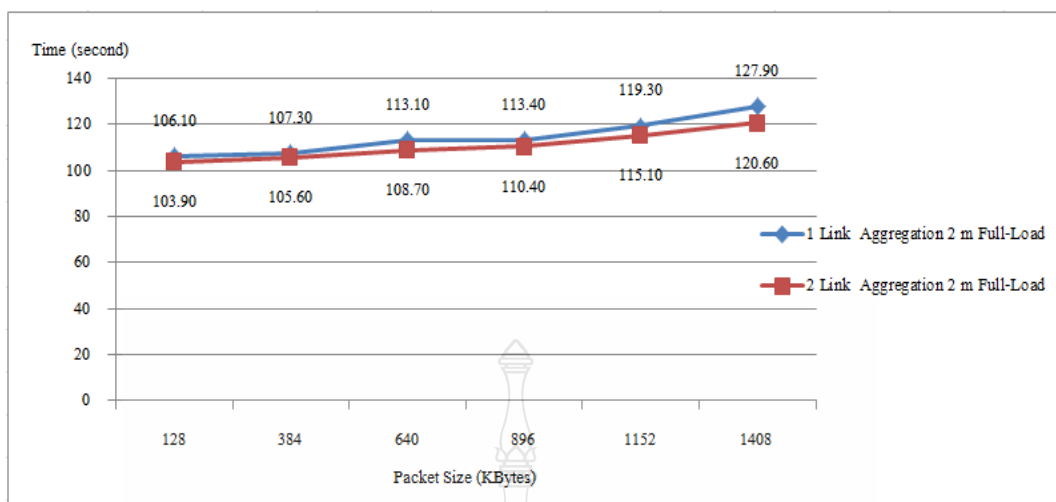


**4.7 ค่าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง (Round Trip Time) จากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Full-Load**

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.7 ถ้ารวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสถานะ Full-Load และ Full-Load (100 Sessions) ที่เวลา 100 วินาที พบว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ในสถานะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางโดยใช้เวลาเร็วกว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูล Packet ขนาด 1408 Kbytes ในสถานะ Full-Load ที่เวลา 100 วินาที สามารถส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางโดยใช้เวลา 120.60 วินาที ซึ่งใช้เวลาส่งข้อมูลน้อยกว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ 7.3 วินาที

**ตารางที่ 4.7** ค่า Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ในสถานะ Full-Load

<b>Round Trip Time Full-Load 1Link &amp; 2 Link Aggregation 2 m</b>		
<b>Packet (Kbyte)</b>	<b>RTT 1 Link Aggregation(second)</b>	<b>RTT 2 Link Aggregation(second)</b>
128	106.10	103.90
384	107.30	105.60
640	113.10	108.70
896	113.40	110.40
1152	119.30	115.10
1408	127.90	120.60



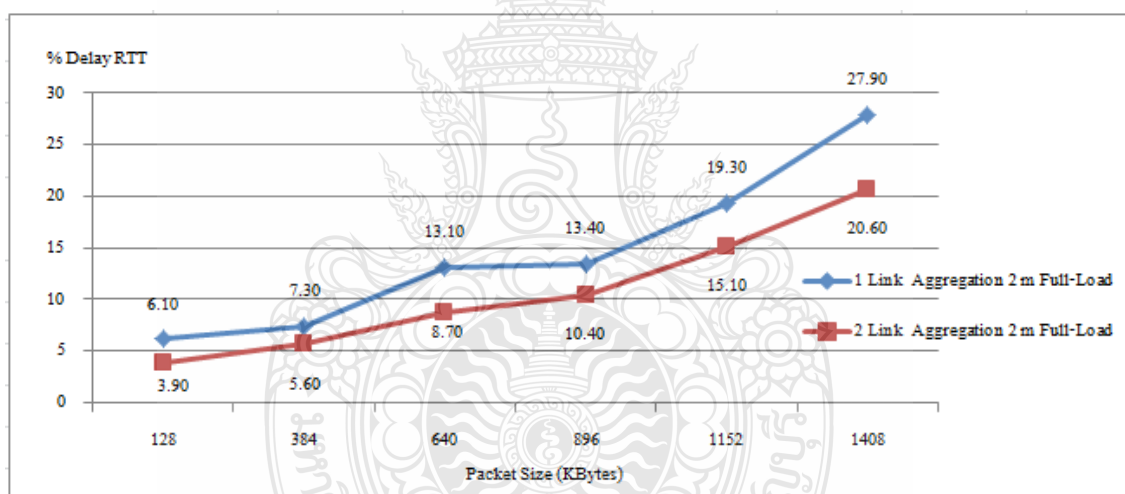
ภาพที่ 4.8 ค่า Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load

#### 4.8 เปรียบเทียบความล่าช้าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง (Round Trip Time) จากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Full-Load

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.8 ถ้ารวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 2 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสถานะ Full-Load และ Full-Load (100 Sessions) ที่เวลา 100 วินาที พบว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ในสถานะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางมีเปอร์เซ็นต์ความล่าช้าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทางน้อยกว่า การรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูล Packet ขนาด 1408 Kbytes ในสถานะ Full-Load ที่เวลา 100 วินาที สามารถส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางมีเปอร์เซ็นต์ความล่าช้าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง 20.60% น้อยกว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ที่มีความผิดพลาด 27.90 %

ตารางที่ 4.8 ค่า % Delay Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load

% Delay Round Trip Time Full-Load 1Link & 2 Link Aggregation 2 m		
Packet (Kbyte)	% Error RTT 1 Link Aggregation	%Error RTT 2 Link Aggregation
128	6.10	3.90
384	7.30	5.60
640	13.10	8.70
896	13.40	10.40
1152	19.30	15.10
1408	27.90	20.60



ภาพที่ 4.9 ค่า % Delay Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load

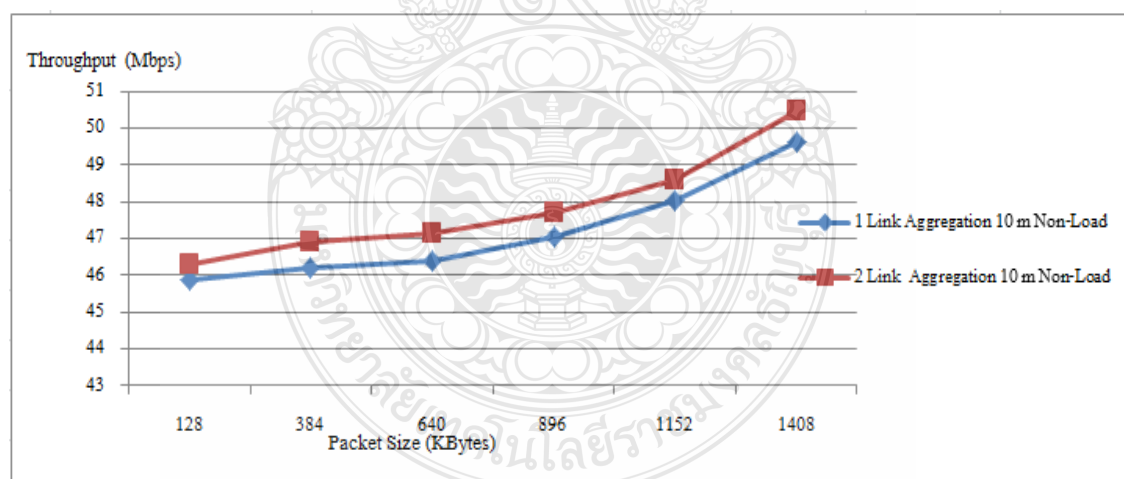
#### 4.9 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอสเซมบลี 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Non-Load

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าถ้ารวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอสเซมบลี 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสถานะ Non-Load จะมีค่า

มากกว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ตัวอย่างเช่นเมื่อรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ส่งข้อมูล Packet ขนาด 1408 Kbytes ได้มากกว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ 0.84%

ตารางที่ 4.9 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Non-Load

1 Link Vs 2 Links Aggregation 10 m Non-Load			
Packet (Kbyte)	Throughput avg (Mbit/s) 1 Link Aggregation	Throughput avg (Mbit/s) 2 Link Aggregation	% Throughput increase
128	45.87	46.30	0.43
384	46.20	46.90	0.70
640	46.40	47.15	0.75
896	47.05	47.70	0.65
1152	48.03	48.60	0.57
1408	49.63	50.47	0.84



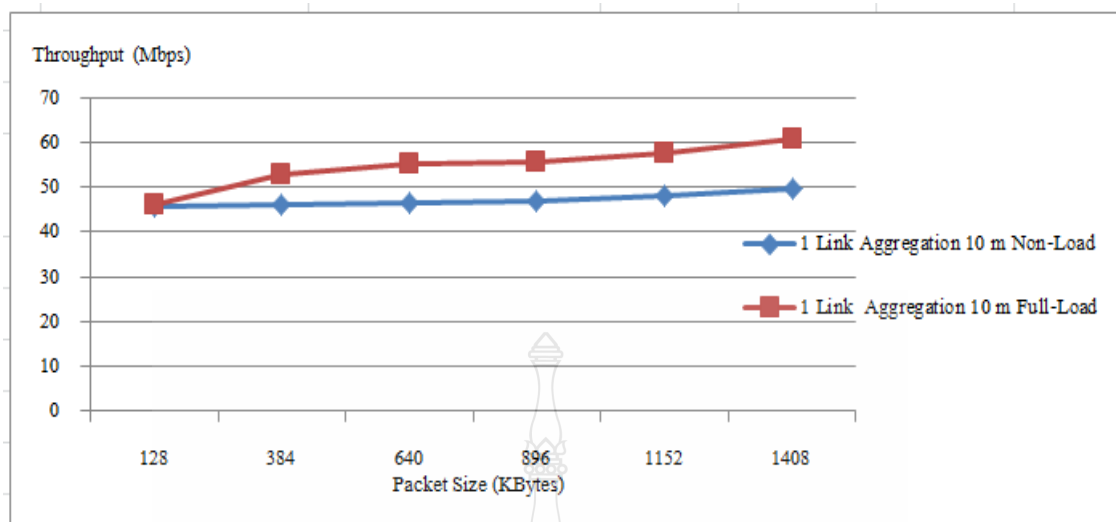
ภาพที่ 4.10 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Non-Load

#### 4.10 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาดในสถานะ Non-Load และ Full-Load

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.10 ถ้ารวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสถานะ Non-Load และ Full-Load (100 Sessions) พบว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ในสถานะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าสถานะ Non-Load ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูล Packet ขนาด 1408 Kbytes ในสถานะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าสถานะ Non-Load 11.01%

ตารางที่ 4.10 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ในสถานะ Non-Load และ Full-Load

Non-Load Vs Full-Load 1 Link Aggregation 10 m			
Packet (Kbyte)	Throughput avg (Mbit/s)	Throughput avg (Mbit/s)	% Throughput increase
	1 Link Aggregation Non-Load	1 Link Aggregation Full-Load	
128	45.87	46.24	0.37
384	46.20	52.71	6.51
640	46.40	55.33	8.93
896	47.05	55.56	8.62
1152	48.03	57.63	9.60
1408	49.63	60.64	11.01



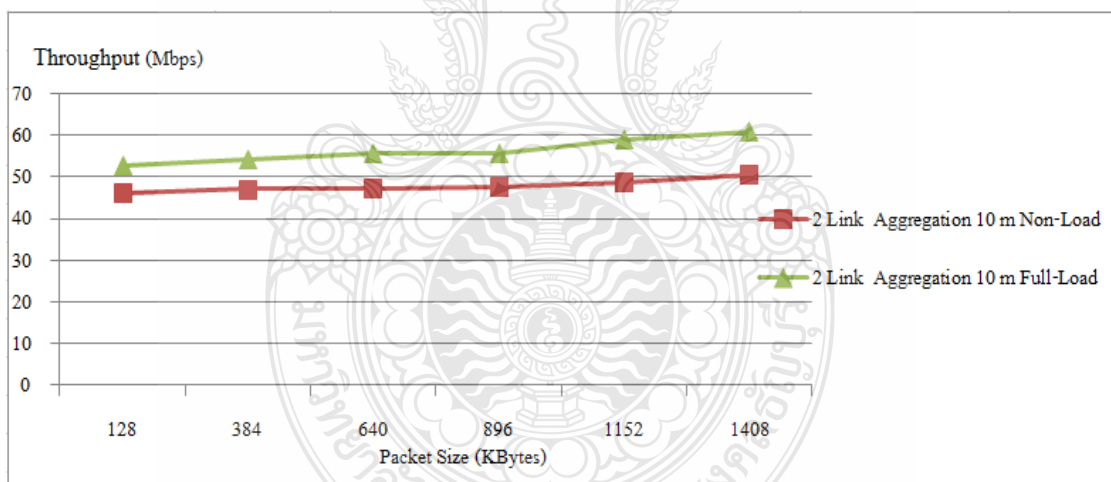
ภาพที่ 4.11 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ในสถานะ Non-Load และ Full-Load

#### 4.11 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Non-Load และ Full-Load

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.11 ถ้ารวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสถานะ Non-Load และ Full-Load (100 Sessions) พบว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ในสถานะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าสถานะ Non-Load ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูล Packet ขนาด 1408 Kbytes ในสถานะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าสถานะ Non-Load 10.33%

ตารางที่ 4.11 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Non-Load และ Full-Load

Non-Load Vs Full-Load 2 Link Aggregation 10 m			
Packet (Kbyte)	Throughput avg (Mbit/s) 2 Link Aggregation Non-Load	Throughput avg (Mbit/s) 2 Link Aggregation Full-Load	% Throughput increase
128	46.30	52.81	6.51
384	47.10	54.21	7.11
640	47.19	55.76	8.57
896	47.68	55.85	8.17
1152	48.60	58.93	10.33
1408	50.47	60.80	10.33



ภาพที่ 4.12 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสถานะ Non-Load และ Full-Load

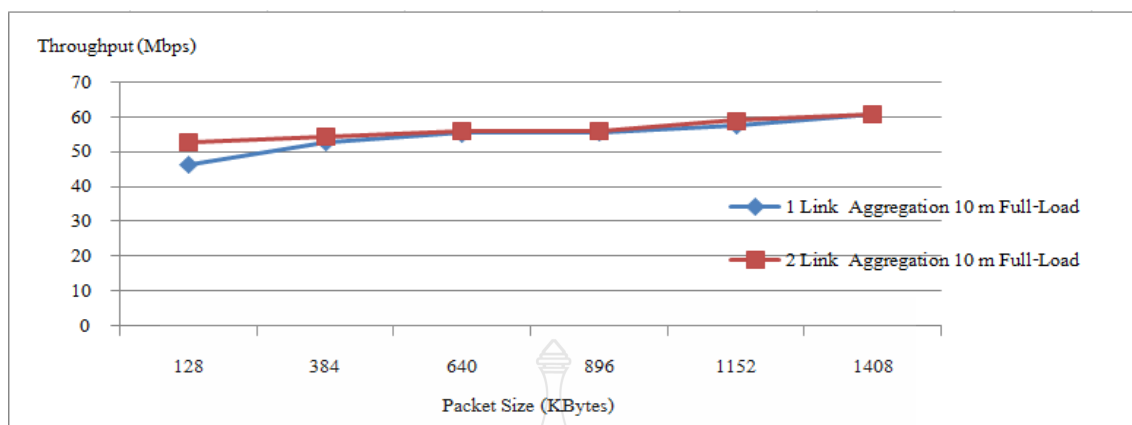
#### 4.12 ค่าปริมาณงานจากการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอสเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Full-Load

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.12 ถ้ารวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอสเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสถานะ Full-Load และ Full-Load (100 Sessions) พบว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ในสถานะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าสถานะ Full-Load 1 ลิงค์ ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูล Packet ขนาด 1408 Kbytes ในสถานะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลได้มากกว่าสถานะ Full-Load 0.16%

ตารางที่ 4.12 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ในสถานะ Full-Load

Full-Load Vs Full-Load 1Link & 2 Link Aggregation 10 m			
Packet (Kbyte)	Throughput avg (Mbit/s)	Throughput avg (Mbit/s)	% Throughput increase
	1 Link Aggregation Full-Load	2 Link Aggregation Full-Load	
128	46.24	52.81	6.57
384	52.71	54.21	1.50
640	55.33	55.76	0.43
896	55.56	55.85	0.29
1152	57.63	58.93	1.30
1408	60.64	60.80	0.16





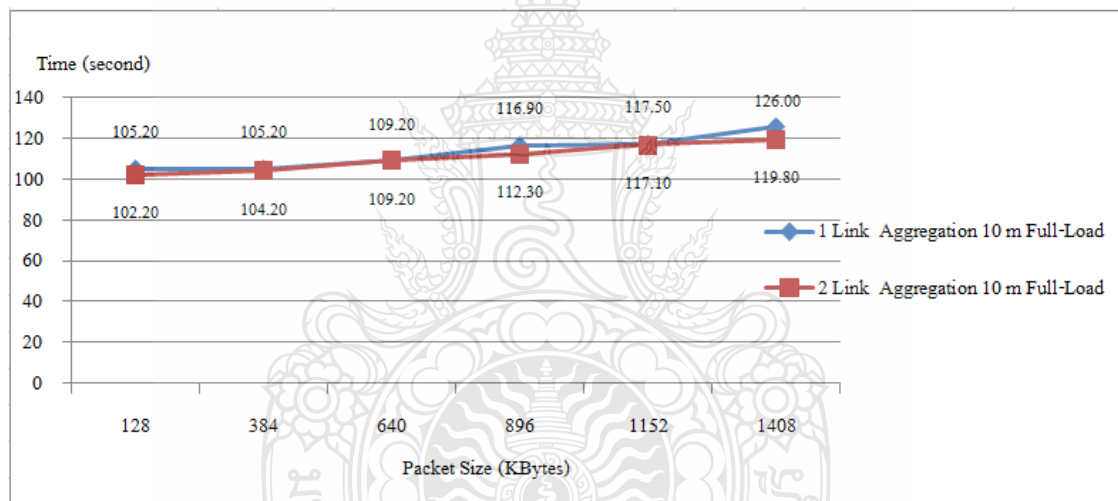
ภาพที่ 4.13 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่ส่งข้อมูลของการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ในสถานะ Full-Load

#### 4.13 ค่าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง (Round Trip Time) จากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสถานะ Full-Load

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.13 ถ้ารวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสถานะ Full-Load (100 Sessions) ที่เวลา 100 วินาที พบว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ในสถานะ Full-Load สามารถส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางโดยใช้เวลาน้อยกว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูล Packet ขนาด 1408 Kbytes ในสถานะ Full-Load ที่เวลา 100 วินาที สามารถส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางโดยใช้เวลา 119.80 วินาที ซึ่งใช้เวลาส่งข้อมูลน้อยกว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ 6.2 วินาที

ตารางที่ 4.13 ค่า Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Full-Load

Round Trip Time Full-Load 1Link & 2 Link Aggregation 10 m		
Packet (Kbyte)	RTT 1 Link Aggregation(second)	RTT 2 Link Aggregation(second)
128	105.20	102.20
384	105.20	104.20
640	109.20	109.20
896	116.90	112.30
1152	117.50	117.10
1408	126.00	119.80



ภาพที่ 4.14 ค่า Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Full-Load

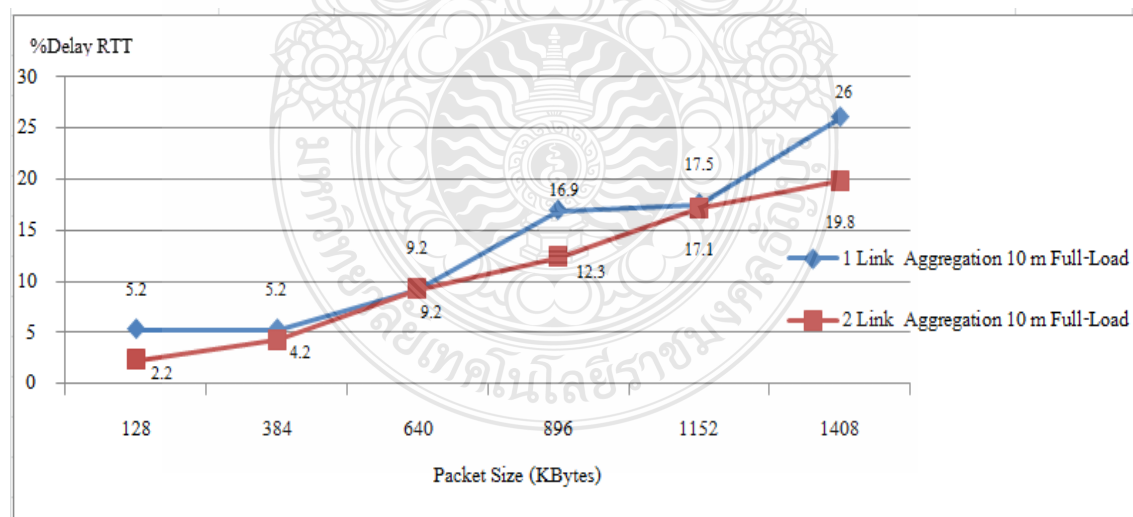
#### 4.14 เปรียบเทียบความล่าช้าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง (Round Trip Time) จากการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพอยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ในสภาวะ Full-Load

ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.14 ถ้ารวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอกเซสพอยซ์ 10 เมตร ช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 Kbytes, 384 Kbytes, 640 Kbytes, 896 Kbytes, 1152 Kbytes และ 1408 Kbytes ในสภาวะ Full-Load และ Full-Load (100 Sessions) ที่เวลา 100 วินาที พบว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ ในสภาวะ Full-Load

สามารถส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางมีเปอร์เซ็นต์ความล่าช้าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทางน้อยกว่า การรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูล Packet ขนาด 1408 Kbytes ในสภาวะ Full-Load ที่เวลา 100 วินาที สามารถส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางมีเปอร์เซ็นต์ความล่าช้าของเวลาที่ข้อมูลจากต้นทางส่งถึงปลายทาง 19.8% น้อยกว่าการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ที่มีความผิดพลาด 26 %

ตารางที่ 4.14 ค่า % Delay Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Full-Load

% Delay Round Trip Time Full-Load 1Link & 2 Link Aggregation 10 m		
Packet (Kbyte)	% Delay RTT 1 Link Aggregation	% Delay RTT 2 Link Aggregation
128	5.2	2.2
384	5.2	4.2
640	9.2	9.2
896	16.9	12.3
1152	17.5	17.1
1408	26	19.8



ภาพที่ 4.15 ค่า % Delay Round Trip Time ของการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ในสภาวะ Full-Load

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การรวมกลุ่มลิงค์ในระบบสายตามาตรฐาน IEEE802.3ad เมื่อนำมาใช้กับระบบแลนไร้สายพบว่าเมื่อรวมกลุ่มลิงค์ในระบบไร้สายสามารถเพิ่มช่องทางการสื่อสารให้เพิ่มขึ้นและสำรองเส้นทางเมื่อลิงค์ใดลิงค์หนึ่งมีปัญหาทำให้ข้อมูลที่รับ-ส่งยังสามารถรับ-ส่งได้ปกติ ซึ่งนอกจากค่า Interference Power และค่า SNR แล้ว ค่า Interference Power Station ยังมีผลต่อค่าปริมาณงานด้วย ซึ่งพบว่าถ้าค่าความแตกต่างระหว่างค่า Interference Power Station กับค่า Interference Power มีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าปริมาณงาน เพิ่มขึ้นเฉลี่ยในภาพรวม 5.4 % และในการรับส่งข้อมูลของ โพรโตคอล TCP ที่ขนาดของ packet sizes ที่ต่างกันก็จะส่งผลต่อค่าปริมาณงาน โดยเมื่อมีการรวมลิงค์ จาก 1 ลิงค์เพิ่มเป็น 2 ลิงค์ ทำให้ค่าปริมาณงานเพิ่มขึ้นเฉลี่ยในภาพรวม 0.84% ในสภาวะ Non-Load และ เพิ่มขึ้นเฉลี่ยในภาพรวม 0.16% ในสภาวะ Full-Load รวมถึงเมื่อมีการรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ส่งผลให้ค่าความล่าช้าของเวลาที่ส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางลดลงเฉลี่ยในภาพรวม 6.2 % โดยสรุป ดังรายละเอียดดังนี้

#### 5.1 สรุป

5.1.1 สามารถวัดประสิทธิภาพการรวมกลุ่มลิงค์ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad กับเครือข่าย วิทยุ (Wi-Fi) สำหรับ IEEE 802.11n มีผลทำให้ค่าปริมาณงาน เพิ่มขึ้นเฉลี่ยในภาพรวม 5.4 % ในการรวมกลุ่มลิงค์จำนวน 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอสเซสพ้อยซ์ 10 เมตร เมื่อเทียบกับการรวมกลุ่ม ลิงค์ 1 ลิงค์

5.1.2 สามารถประยุกต์ใช้การรวมกลุ่มลิงค์ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad กับเครือข่าย วิทยุ (Wi-Fi) สำหรับ IEEE 802.11n เพื่อแก้ปัญหาคับคั่งของข้อมูล และเพิ่มช่องทางการสื่อสาร รวมไปถึงยังสามารถสำรองเส้นทางเมื่อลิงค์ใดลิงค์หนึ่งมีปัญหาได้

5.1.3 ผลการเปรียบเทียบค่าปริมาณงานข้อมูลที่ได้จาก การรวมกลุ่มลิงค์ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad กับเครือข่าย วิทยุ (Wi-Fi) สำหรับ IEEE 802.11n แบบ TCP พบว่าในการรับส่งข้อมูลของ โพรโตคอล TCP ที่ขนาดของ Packet Size ที่ต่างกันก็จะส่งผลต่อค่าปริมาณงาน โดยเมื่อมีการรวมลิงค์ จาก 1 ลิงค์เพิ่มเป็น 2 ลิงค์ ทำให้ค่าปริมาณงานเพิ่มขึ้นเฉลี่ยในภาพรวม 0.84% ในสภาวะ Non-Load และ เพิ่มขึ้นเฉลี่ยในภาพรวม 0.16% ในสภาวะ Full-Load รวมถึงเมื่อมีการรวมกลุ่มลิงค์ 2

ลิงค์ส่งผลให้ค่าความล่าช้าของเวลาที่ส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางลดลงเฉลี่ยในภาพรวม 6.2 % เมื่อเทียบกับการรวมกลุ่มลิงค์ 1 ลิงค์ สามารถสร้างสมการของการรวมกลุ่มลิงค์ที่ส่งข้อมูลแบบ TCP ที่แตกต่างกัน ที่อัตราถ่ายโอนข้อมูล 130 Mbps (Full Duplex) ได้ อ่างอิงสมการ การรวมกลุ่มลิงค์แบบ Interface bounding [12] ดังสมการที่ 5.1 ดังนี้

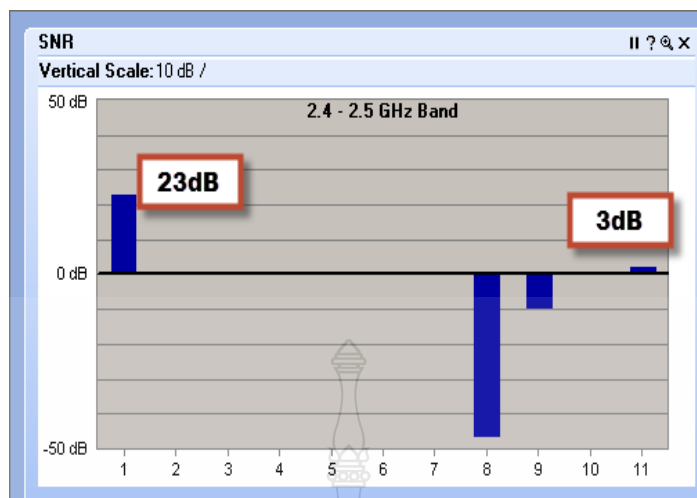
$$\text{Lag}(p, n, t_d, t_o) = \left[ \frac{p \times \frac{n}{t_d + (n-1) \times t_o}}{2} \right] - \text{IPN} - d \quad (5.1)$$

เมื่อ	p	คือ	packet size ที่ใช้ส่งข้อมูล
	n	คือ	จำนวนการรวมกลุ่มลิงค์
	$t_d$	คือ	ค่าเวลาของการส่งเฟรมข้อมูล ในที่นี้กำหนดเป็นค่าคงที่ 40 ไมโครวินาที
	$t_o$	คือ	ค่าช่วงเวลาระยะห่างของการส่งข้อมูล
	IPN	คือ	ค่าสัญญาณรบกวนของสัญญาณ ที่มีผลต่อค่าปริมาณงาน ซึ่งจากสภาพแวดล้อมที่ทำการทดสอบ พบว่ามีผลลดทอนต่อค่าปริมาณงาน 18 Mbps
	d	คือ	ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ ซึ่งจากสภาพแวดล้อมที่ทำการทดสอบในระยะห่าง 10 เมตร พบว่ามีผลลดทอนต่อค่าปริมาณงาน 0.6 Mbps

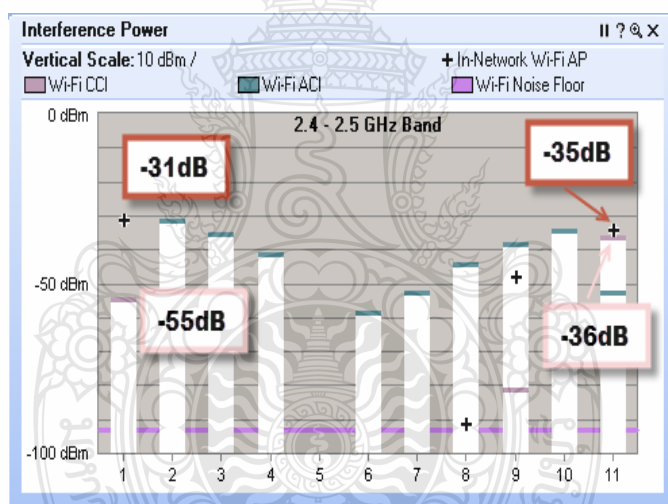
ตัวอย่างการคำนวณจากสมการเปรียบเทียบกับการวัดค่าปริมาณงานข้อมูลเมื่อส่งข้อมูล TCP Packet size 128 Kbyte ตามตารางที่ 4.11 ได้ค่าปริมาณงานเท่ากับ 46.30 Mbps (Half Duplex) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากสมการที่ 5.1

$$\begin{aligned} &= (128\text{Kbyte} * 2 / 1.97 * 10^{-3}) / 2 - 18 \text{ Mbps} - 0.6 \text{ Mbps} \\ &= 46.37 \text{ Mbps} \end{aligned}$$

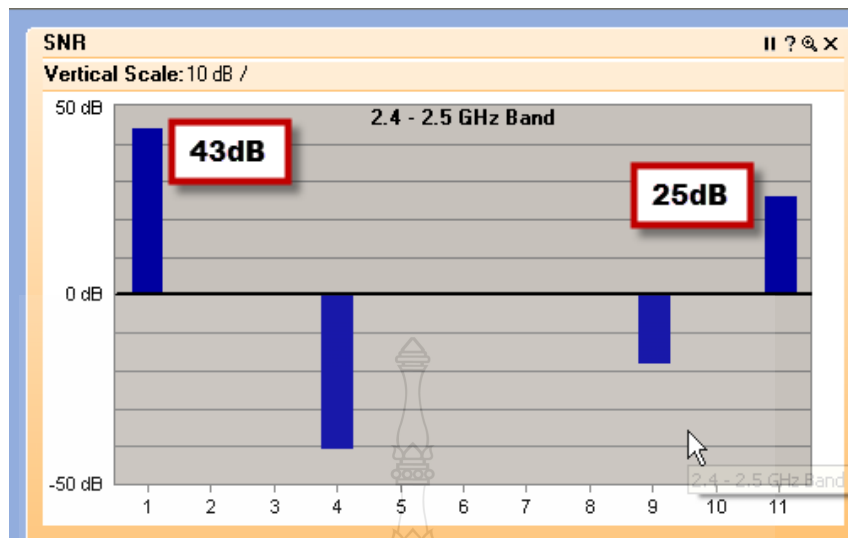
5.1.4 หากรวมลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร นั้นทำให้ค่าปริมาณงานข้อมูลลดลงเนื่องจากส่งผลให้ค่า SNR และ Interference Power ของช่องสัญญาณลดลงดังภาพที่ 5.1 และภาพที่ 5.2 แต่ถ้าวรวมลิงค์ในระยะทางที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลดีต่อค่าของสัญญาณ ดังภาพที่ 5.3 และภาพที่ 5.4



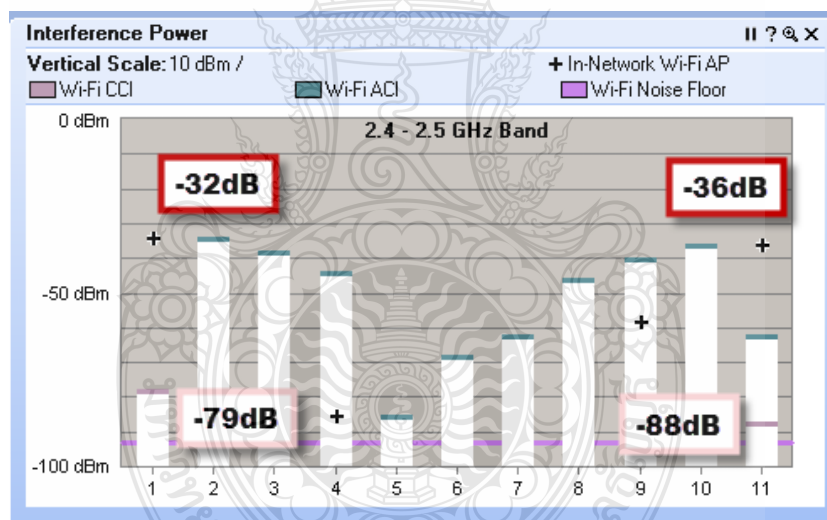
ภาพที่ 5.1 ค่า SNR เมื่อต่อรวมลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร



ภาพที่ 5.2 ค่า Interference Power เมื่อต่อรวมลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 2 เมตร

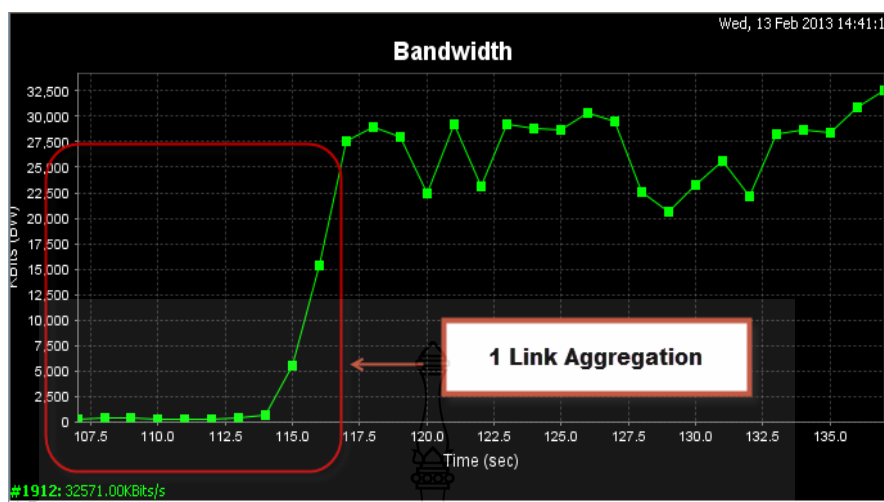


ภาพที่ 5.3 ค่า SNR เมื่อต่อรวมลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 10 เมตร

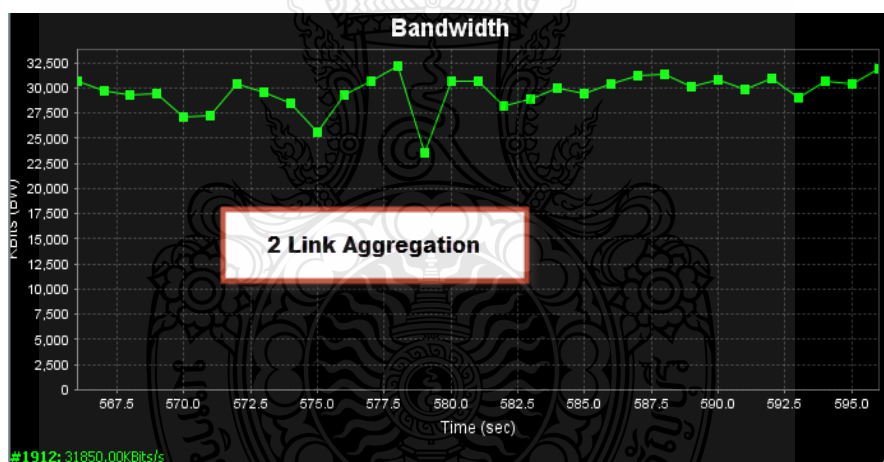


ภาพที่ 5.4 ค่า Interference Power เมื่อต่อรวมลิงค์ 2 ลิงค์ ที่ระยะห่างของแอคเซสพ้อยซ์ 10 เมตร

5.15 หากรวมลิงค์ 2 ลิงค์จะสามารถลดความคับคั่งของข้อมูลได้อย่างชัดเจน จากภาพที่ 5.5 – 5.7 เมื่อรวมกลุ่ม 2 ลิงค์ เมื่อมีการส่งข้อมูลเพิ่มมาอีกเครื่องส่งข้อมูลไปยังภายนอกนั้น จะยังคงส่งข้อมูลได้คงที่แตกต่างจากการรวมกลุ่ม 1 ลิงค์ ซึ่งต้องรอข้อมูล ส่งเสร็จก่อนจึงจะสามารถส่งข้อมูลได้เท่าเดิม

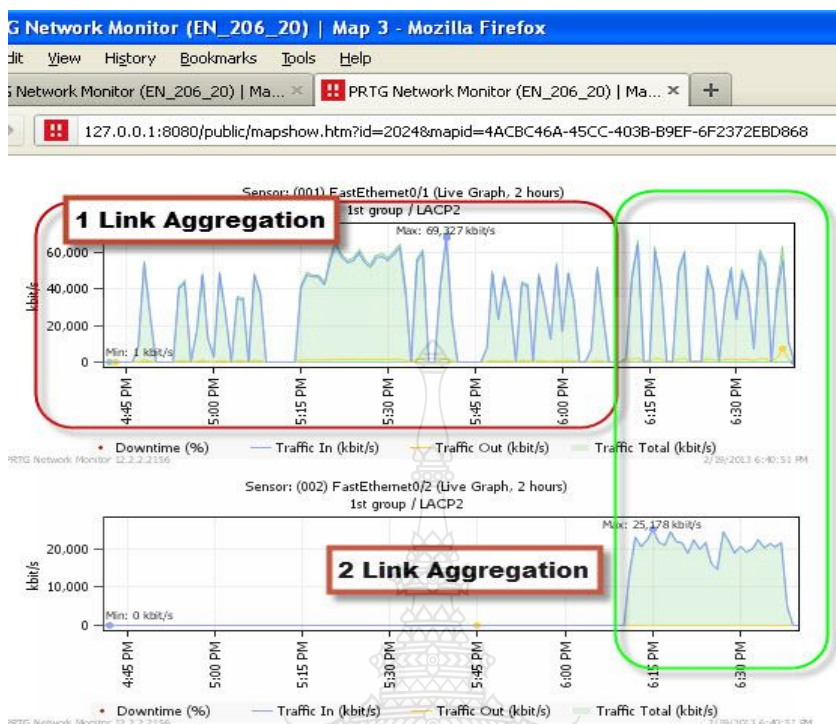


ภาพที่ 5.5 การส่งข้อมูลแบบรวมกลุ่ม 1 ลิงค์ ที่เมื่อมีส่งข้อมูลเพิ่มจากเครื่องอื่นๆ ทราฟฟิกจะเกิดความคับคั่งของข้อมูล



ภาพที่ 5.6 การส่งข้อมูลแบบรวมกลุ่ม 2 ลิงค์ ที่เมื่อมีส่งข้อมูลเพิ่มจากเครื่องอื่นๆ ทราฟฟิกจะแชร์ไปยังกลุ่มลิงค์ที่ทำการรวมกลุ่มลิงค์ ลดปัญหาความคับคั่งของข้อมูล





ภาพที่ 5.7 ทราฟฟิกของการส่งข้อมูลแบบรวมกลุ่ม 1 ลิงค์ และ 2 ลิงค์ เปรียบเทียบกัน

## 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

5.2.1 ประสิทธิภาพของค่าปริมาณงานของการรวมกลุ่มลิงค์แบบไร้สายกับเครือข่ายสายพาย (Wi-Fi) ไม่คงที่เมื่อเทียบกับการทดสอบแบบสาย

5.2.2 อุปกรณ์สวิตซ์ที่ทำการรวมลิงค์ไม่สามารถตัดสินใจได้ว่าสัญญาณที่ลิงค์ใดมีความแรงของสัญญาณที่มากกว่ากัน

5.2.3 การรวมกลุ่มลิงค์แบบไร้สายกับเครือข่ายสายพาย (Wi-Fi) ยังมีตัวแปรของสัญญาณรบกวนอื่นที่มารบกวน ซึ่งยากต่อการจัดการควบคุมสภาพแวดล้อมภายนอกได้

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ทดสอบเพิ่มในย่านความถี่ 5 GHz

5.3.2 พัฒนาอัลกอริทึมในการตัดสินใจเลือกเส้นทางของอุปกรณ์สวิตซ์ที่ทำการรวมลิงค์

5.3.3 ทดสอบกับ IPv6 และ ระบบปฏิบัติการต่างๆ เช่น Window7 32bit/64bit, Linux 32bit/64bit และทดสอบกับโปรโตคอล UDP

5.3.4 ทดสอบในห้องที่มีการควบคุมสัญญาณไร้สาย ไม่ให้มีสัญญาณรบกวนจากภายนอก

## รายการอ้างอิง

- [1] IEEE., "Amendment to Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications-Aggregation of Multiple Link Segments," **IEEE Std 802.3ad-2000**, 2000. pp. i-173.
- [2] IEEE., "IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Networks: Supplement to Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD)," **IEEE Std 802.3u-1995**, 1995. pp. 1-398.
- [3] IEEE., "IEEE Standard for Information technology Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY)," **IEEE 802.11n-2009**, 2012. pp. 1-2910.
- [4] Thananchai,P.,**ทำความเข้าใจจักและตั้งค่า EtherChannel บน Cisco Catalyst Switch** (Online),2011. Available: <http://running-config.blogspot.com/2011/03/etherchannel-cisco-catalyst-switch.html> (20 June 2011).
- [5] อรรถนพ ชันธิกุล, **ออกแบบและติดตั้งระบบ Wireless LAN 2<sup>nd</sup> Edition**. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: ไอทีซีฯ, 2553. หน้า 24-282.
- [6] Cisco., **Cisco Spectrum Expert Users Guide Software Release 4.0** (Online), 2010. Available: [http://www.cisco.com/en/US/docs/wireless/spectrum/expert/users/guide/Cisco\\_Spectrum\\_Expert\\_User\\_Guide\\_Version\\_4.0.pdf](http://www.cisco.com/en/US/docs/wireless/spectrum/expert/users/guide/Cisco_Spectrum_Expert_User_Guide_Version_4.0.pdf) (20 May 2011).
- [7] Iperf., **Use Iperf** (Online), 2010. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Iperf> (5 May 2011).
- [8] Paessler AG., **PRTG Network Monitor** (Online), 2010. Available: <http://www.paessler.com/prtg> (5 May 2011).
- [9] A. Yamaguchi, et al., "Downlink Link Aggregation Performance with Delay Adjustment Capability in Multi-Radio Access System," **Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd**, 2011. pp. 1-5.
- [10] J. Kim, A. Yamaguchi, and S. Obana, "Traffic distribution based on airtime-fairness for multi-radio cognitive networks," **IEICE Technical Re-port**, MoMuC, 2007. pp. 47.52.
- [11] I. Sheriff and E. Belding-Royer, "Multipath selection in multi-radio mesh networks",**Proc. of BroadNets '06**, California, USA., 2006. pp. 1-11.

- [12] K. Jong-Ok, et al., "Airtime-based Link Aggregation at the Co-Existence of WiMAX and WiFi," **IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC**, 2007. pp. 1-5.
- [13] F. Lutz, et al., "Load balancing and aggregation of multiple ADSL links," **Proceedings of the Ninth Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES 2011)**, 2011. pp. 21-26.
- [14] K. Hashiguchi, et al., "Traffic allocation control using support vector machine in heterogeneous wireless link aggregation," in **Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011 IEEE**, 2011. pp. 653-657.
- [15] T. Taleb, T. Nakamura, and K. Hashimoto, "Multi-source streaming in next generation mobile communication systems," in **Proc. IEEE ICC'08**, Beijing China, 2008. pp. 296-300.
- [16] K. Chebrolu and R. Rao, "Bandwidth aggregation for real-time applications in heterogeneous wireless networks," **IEEE Trans. Mobile Comput.**, Vol. 5, No. 4, 2006. pp. 388-403.
- [17] J. C. Fernandez, et al., "Bandwidth Aggregation-Aware Dynamic QoS Negotiation for Real-Time Video Streaming in Next-Generation Wireless Networks," **Multimedia on IEEE Transactions**, Vol. 11, No. 6, 2009. pp. 1082-1093.
- [18] S. Itaya, et al., "Packet aggregation at access points for concurrent real-time interactions over wireless relay networks," in **Globecom Workshops, 2007 IEEE**, 2007. pp. 1-5.
- [19] N. Funabikiy, et al., "A Proposal of Access-Point Aggregation Approach for Multiple Wireless Local Area Networks," **2012 Sixth International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS)**, 2012. pp. 677-682.
- [20] S. Aust, et al., "Evaluation of Linux Bonding Features," **International Conference on Communication Technology, 2006. ICCT '06**, 2006. pp. 1-6.
- [21] A. Jayasuriya, et al., "Aggregation of Wi-Fi Links: When Does it Work?," in **15th IEEE International Conference on Networks 2007 (ICON 2007)**, 2007. pp. 318-323.
- [22] S. S. Kolahi and L. Peng, "Evaluating IPv6 in Peer-to-Peer 802.11n Wireless LANs," **Internet Computing, IEEE**, vol. 15, 2011. pp. 70-74.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

คอนฟิค สวิตช์รวมกลุ่มลิงค์

1. ตั้งค่าการรวมกลุ่มลิงก์(Link Aggregation) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า EtherChannel ซึ่งในภาคผนวกนี้จะใช้คำว่า EtherChannel แทนการรวมกลุ่มลิงก์ในระดับ Layer 2 กำหนดให้อินเทอร์เฟซ FastEthernet 0/1 และ FastEthernet 0/2 ของสวิตช์ทั้งสองตัวนี้เป็นสมาชิกของ EtherChannel ทำการสร้างอินเทอร์เฟซ Port-Channel โดยการใช้คำสั่ง "interface Port-channel <number>"

```
switch-01(config)#interface Port-channel 1
switch-01(config-if)#exit
```

2. เมื่อทำการสร้าง Port-channel แล้ว จากนั้นก็ตั้งค่านอินเทอร์เฟซที่ต้องการที่จะให้เป็นสมาชิกของ Port-Channel นี้ โดยจะต้องทำการเลือกโหมดและโปรโตคอลที่จะใช้ในการทำ EtherChannel ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เป็น LACP ในการที่จะทำการกำหนดให้อินเทอร์เฟซนี้เป็นสมาชิกของ Port-Channel ที่ต้องการก็สามารถทำได้ด้วยการใช้คำสั่ง

```
"channel-group <number> mode <active|auto|desirable|on|passive>"
```

โดยที่หมายเลขที่ทำการระบุไปนี้จะตรงตรงกับหมายเลขของ Port-channel ที่ทำการสร้างขึ้นมา

ตัวอย่าง

```
switch-01(config)#interface range FastEthernet 0/1-2
switch-01(config-if-range)#channel-group 1 mode active
switch-01(config-if-range)#exit
*****Config ที่ใช้ในงานวิจัยนี้*****
LACP1 etherchannel L2 configuration
configure terminal
interface range fastethernet0/1 -2
switchport mode access
switchport access vlan 10
channel-protocol lacp
channel-group 1 mode active
interface port-channel 1
switchport access vlan 10
switchport mode access
```

### LACP2 etherchannel L2 configuration

configure terminal

interface range fastethernet0/1 -2

switchport mode access

switchport access vlan 10

channel-protocol lacp

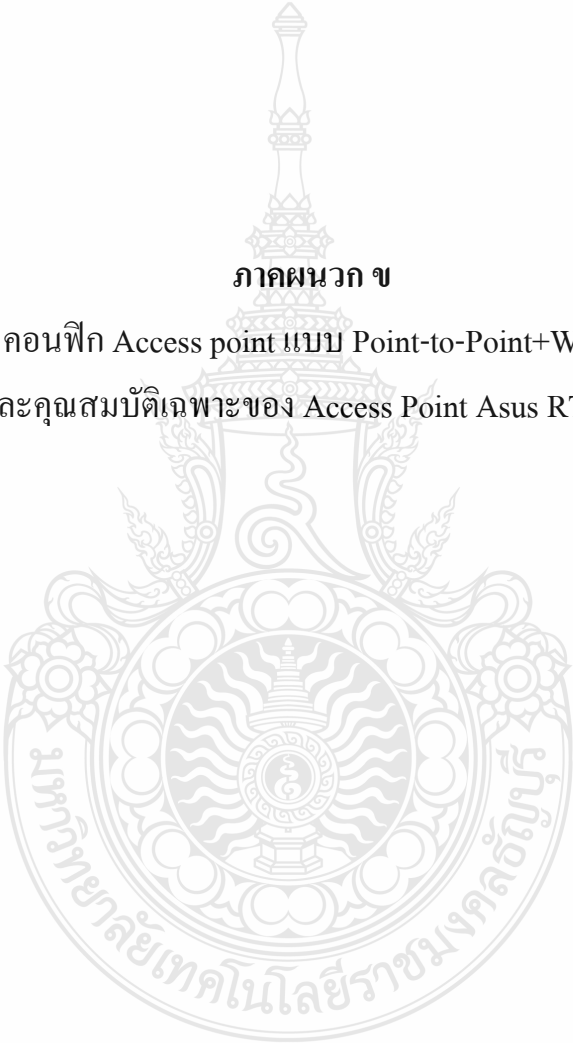
channel-group 1 mode passive

interface port-channel 1

switchport access vlan 10

switchport mode access



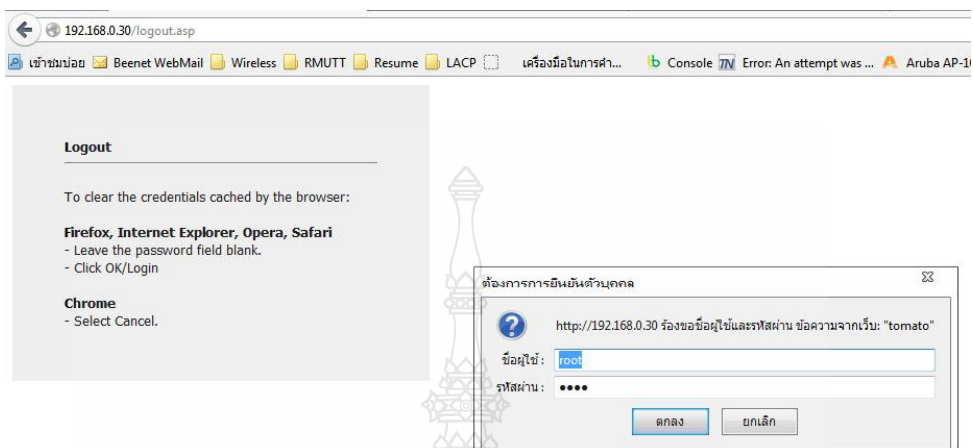


**ภาคผนวก ข**

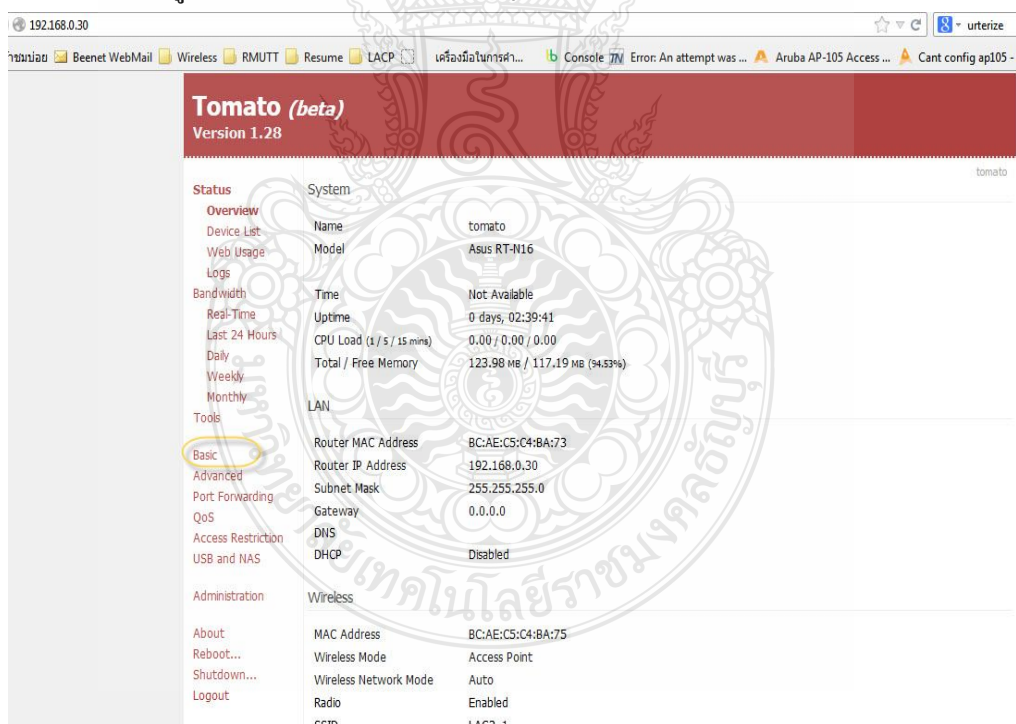
คอนฟิก Access point แบบ Point-to-Point+WDS  
และคุณสมบัติเฉพาะของ Access Point Asus RT-N16



1. เข้าคอนฟิก Access Point ผ่าน Web Browser Ip ของอุปกรณ์เช่น 192.168.0.30 จากนั้นใส่ User&Password ในที่นี้ User = root Password = lacp



2. ไปที่เมนู basic เพื่อเข้าคอนฟิกค่าต่างๆ



3. ทำการกำหนดโหมด Wireless ให้เป็นโหมด Access Point+WDS (เป็นโหมด Point to Point) และสามารถกำหนดได้ 5 โหมด ดังนี้

3.1 Access Point

3.2 Access Point + WDS

3.3 Wireless Client

3.4 Wireless Ethernet Bridge

3.5 WDS

4. ทำการตั้งชื่อ SSID ของ Access Point

5. เลือกช่องสัญญาณซึ่งใน Channel Width 20 MHz สามารถเลือกช่องสัญญาณได้ 11 ช่องสัญญาณ

6. ในช่อง WDS Mac Address นั้นให้ใส่ Mac Address ของ Access Point ที่จะทำ Point to point

7. เมื่อทำการ Config ทุกอย่างแล้วให้ กด Save เพื่อ Save config

The screenshot shows the configuration page for wireless settings. The 'Wireless' section is active, and several options are highlighted with yellow boxes and numbered red boxes:

- 3**: Wireless Mode is set to 'Access Point + WDS'.
- 4**: SSID is set to 'LAG3\_1'.
- 5**: Channel is set to '11 - 2.462 GHz'.
- 6**: The WDS section is expanded, showing a table of MAC addresses. The first row contains the MAC address 'E0:CB:4E:56:AC:B5'.
- 7**: The 'Save' button is highlighted.

Wireless

Enable Wireless

MAC Address BC:AE:C5:C4:BA:75

Wireless Mode Access Point + WDS

Wireless Network Mode Auto

SSID LAG3\_1

Broadcast

Channel 11 - 2.462 GHz Scan

Channel Width Auto

Security

WDS

MAC Address	8 - 2.447 GHz	00:00:00:00:00:00
	9 - 2.452 GHz	00:00:00:00:00:00
	10 - 2.457 GHz	00:00:00:00:00:00
	11 - 2.462 GHz	00:00:00:00:00:00
	00:00:00:00:00:00	00:00:00:00:00:00
	00:00:00:00:00:00	00:00:00:00:00:00



Wireless

Enable Wireless

MAC Address BC:AE:C5:C4:BA:75

Wireless Mode Access Point + WDS

Wireless Network Mode

SSID

Broadcast

Channel 11 - 2.462 GHz Scan

Channel Width 20 MHz

Security Disabled

WDS

Link With...

E0:CB:4E:56:AC:B5	00:00:00:00:00:00
00:00:00:00:00:00	00:00:00:00:00:00
00:00:00:00:00:00	00:00:00:00:00:00
00:00:00:00:00:00	00:00:00:00:00:00
00:00:00:00:00:00	00:00:00:00:00:00

#### 8. คุณสมบัติเฉพาะของ Access Point Asus RT-N16

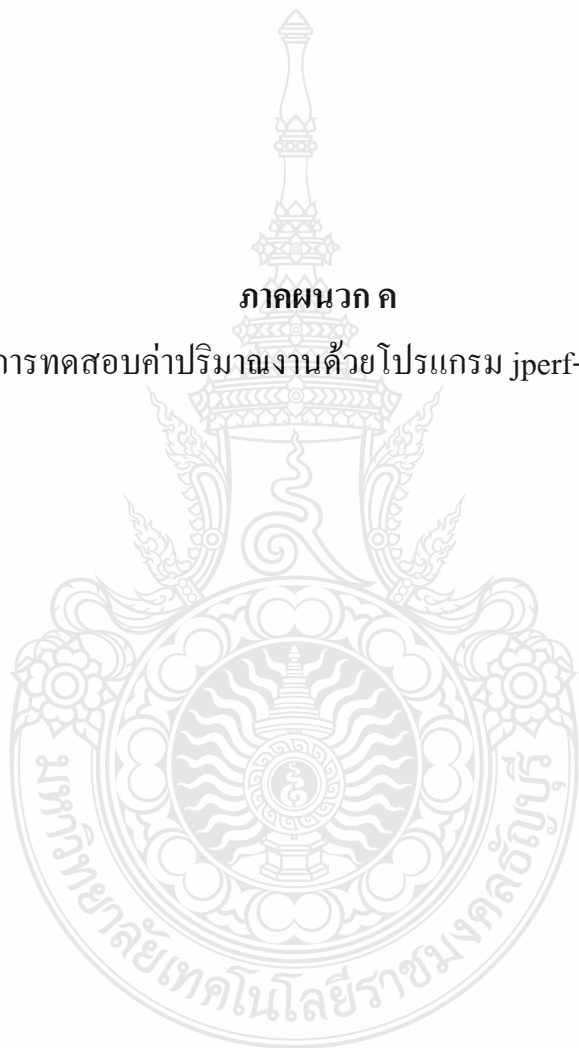
อ้างอิง <http://www.asus.com/Networking/RTN16/#overview>

Network Standard	IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n
Product Segment	N300 complete networking; 300Mbps
Data Rate	802.11b : 1, 2, 5.5, 11Mbps 802.11g : 6,9,12,18,24,36,48,54Mbps 802.11n : up to 300Mbps
Antenna	External antenna x 3
Operating Frequency	2.4GHz
Encryption	64-bit WEP, 128-bit WEP, WPA2-PSK, WPA-PSK, Radius with 802.1x
Firewall & Access Control	Firewall: NAT and SPI (Stateful Packet Inspection), intrusion detection including logging Logging: Dropped packet, security event, Syslog Filtering: Port, IP packet, URL keyword, MAC address
WAN Connection Type	Internet connection type : Automatic IP, Static IP, PPPoE (MPPE supported), PPTP, L2TP
Ports	1 x RJ45 for 10/100/1000 BaseT for WAN, 4 x RJ45 for 10/100/1000 BaseT for LAN, Support Ethernet and 802.3 with max. bit rate 10/100/1000 Mbps and auto cross-over function(MDI-X) USB 2.0 x 2
OS Support	Windows® 8 , 32bit/64bit Windows® 7 , 32bit/64bit Windows® Vista , 32bit/64bit Windows® XP , 32bit/64bit Mac OS X Linux
Dimensions	216 x 161.9 x 40.5 mm (WxDxH)
Weight	470 g
Router Special Features	3G/4G data sharing AiCloud Printer server Download Master AiDisk Multiple SSIDs Parental Control



**ภาคผนวก ค**

การทดสอบค่าปริมาณงานด้วยโปรแกรม jperf-2.0.2



1. Download โปรแกรม jperf โหลดได้ที่ <ftp://ftp.psu.ac.th/pub/jperf/jperf-2.0.2.zip> หรือ <http://code.google.com/p/xjperf/downloads/list>.

2. Download โปรแกรม java runtime เนื่องจาก jperf ต้องใช้ Java run สามารถ download ได้ที่ <ftp://ftp.psu.ac.th/pub/java/jre-6u18-windows-i586.exe> หรือ <http://www.java.com>.

3. ทำการติดตั้ง java runtime ทั้งเครื่อง Server และ client ด้วย

4. ให้แตก zip ไฟล์ jperf-2.0.2.zip ออกมา ทั้งเครื่อง Server และ client

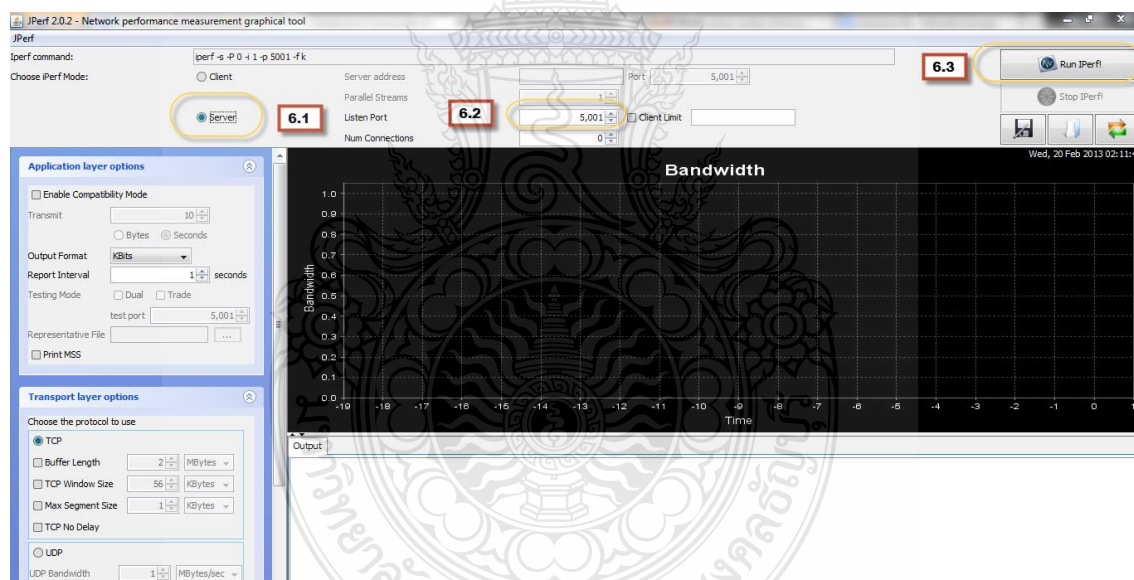
5. ให้ run ไฟล์ jperf.bat ทั้งเครื่อง Server และ client

6. ให้ตั้งค่าที่เครื่อง server ตามนี้

6.1 เลือกที่ Server

6.2 ใส่ Port เป็น 5001

6.3 กด Run Iperf



7. ตั้งค่าที่เครื่อง client โดยให้นำ IP Address ของเครื่อง server มาใส่ในงานวิจัยนี้ ip address ของ server เป็น 192.168.0.2 ส่วนในช่อง Transmit ให้ใส่จำนวนเวลาที่ต้องการส่งข้อมูลเข้าไปโดยหน่วยเป็นวินาที ในงานวิจัยนี้คือ 100 วินาที

7.1 ใส่ IP Address Server

7.2 ใส่จำนวนเวลาที่ต้องการส่งข้อมูลไปยัง Server

7.3 ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบส่งข้อมูลแบบ TCP และปรับค่า TCP Window Size ส่งข้อมูล Packet 6 ขนาด ดังนี้ 128 KBytes, 384 KBytes, 640 KBytes, 896 KBytes, 1152 KBytes และ 1408 Kbytes

7.4 กด Run Iperf รอจนกว่าส่งข้อมูลครบจะขึ้นรายละเอียดการส่งข้อมูลทำซ้ำอีก 10 ครั้ง จากนั้นทำการบันทึกผล

The screenshot shows the Iperf 2.0.2 interface with the following configuration and results:

- Command:** `iperf -c 192.168.0.2 -P 1 -i 1 -p 5001 -w 128.0K -f k -t 100`
- Mode:** Client
- Server address:** 192.168.0.2 (7.1)
- Port:** 5,001 (7.4)
- Parallel Streams:** 1 (7.1)
- Application layer options:**
  - Transmit: 100 (7.2)
  - Output Format: KBits
  - Report Interval: 1 seconds
  - Testing Mode: Dual
  - test port: 5,001
- Transport layer options:**
  - Choose the protocol to use: TCP (7.3)
  - TCP Window Size: 128 KBytes

**Bandwidth Graph:** Shows a fluctuating line graph of bandwidth in Kbits/sec over time (70.0 to 100.0 seconds). The values range from approximately 40,000 to 65,000 Kbits/sec.

**Output:**

```

[156] 97.0-97.0 sec 6230 KBytes 51275 Kbits/sec
[156] 97.0-98.0 sec 6432 KBytes 52691 Kbits/sec
[156] 98.0-99.0 sec 6048 KBytes 49545 Kbits/sec
[156] 99.0-100.0 sec 5912 KBytes 48431 Kbits/sec
[ ID] Interval Transfer Bandwidth
[156] 0.0-100.0 sec 583768 KBytes 47815 Kbits/sec
Done.
  
```



8. ในสภาวะ Full-Load จะกำหนดส่งข้อมูลจาก Client ไปยัง Server จำนวน 100 Session โดยเพิ่มค่าในส่วน Parallel Streams

JPerf 2.0.2 - Network performance measurement graphical tool

Command: `iperf -c 192.168.0.2 -P 100 -i 1 -p 5001 -w 128.0K -f k -t 100`

Use iPerf Mode:  Client  Server

Server address: 192.168.0.2 Port: 5,001

Parallel Streams: 100

Listen Port: 5,001  Client Limit

Num Connections: 0

Application layer options

Enable Compatibility Mode

Transmit: 100

Output Format: KBits

Report Interval: 1 seconds

Testing Mode:  Dual  Trade

test port: 5,001

Representative File: ...

Print MSS

Transport layer options

Choose the protocol to use

TCP  UDP

Buffer Length: 2 MBytes

TCP Window Size: 128 KBytes

Max Segment Size: 1 KBytes

TCP No Delay

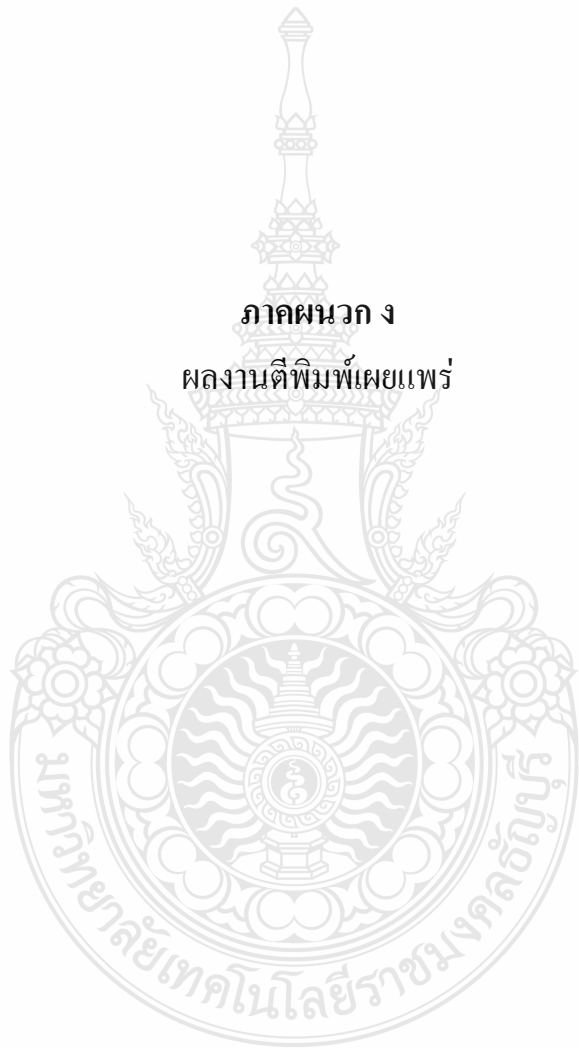
UDP Bandwidth: 1 MBytes/sec

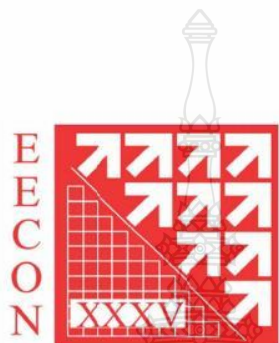
Output

[ ID ]	Interval	Transfer	Bandwidth
[500]	0.0-104.5 sec	7360 KBytes	577 Kbits/sec
[700]	0.0-104.5 sec	7608 KBytes	596 Kbits/sec
[212]	0.0-104.5 sec	7600 KBytes	596 Kbits/sec
[SUM]	0.0-104.5 sec	771968 KBytes	60512 Kbits/sec

Done.

ภาคผนวก ง  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



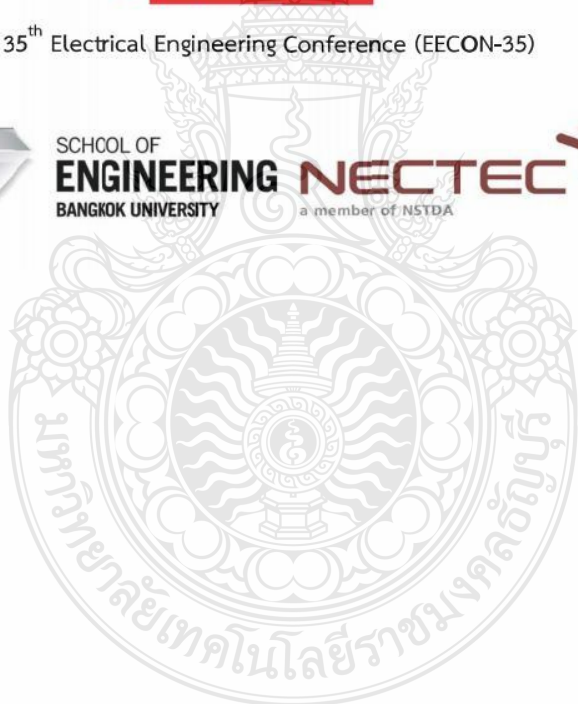


The 35<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (ECON-35)



SCHOOL OF  
**ENGINEERING**  
BANGKOK UNIVERSITY

**NECTEC**  
a member of NSTDA





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Ajalawit Chantaveerod	Walailak University
Akaraphunt Vongkumhae	Naresuan University
Akkarat Boonpoonga	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Alex Pongpech	Dhurakij Pundit University
Amnart Suk Sri	Khon Kaen University
Amnoi Ruengwaree	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Amorn Jiraseree-Amornkun	Mahanakorn University of Technology
Anuchit Charean	Kasem Bundit University
Anupap Meesomboon	Khon Kaen University
Anuwat Jangwanitlert	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Anuwat Prasertsit	Prince of Songkla University
Aphibal Pruksanubal	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Apichai Bhatranand	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Apichan Kanjanavastit	Udon Thani Rajabhat University
Apinunt Thanachayanont	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Apirada Namsang	Civil Aviation Training Center Thailand
Apirat Siritaratiwat	Khon Kaen University
Apiwat Lek-Uthai	Chulalongkorn University
Arkhom Mounghaodaeng	Srinakharinwirot University
Arkom Kaewrawang	Khon Kaen University
Arnuphap Dowrueng	National Electronics and Computer Technology Center
Arporn Teeramongkonasme	Chulalongkorn University
Arthit Sode-Yome	Siam University
Atcha Kopwitthaya	National Electronics and Computer Technology Center
Athikom Sarephattananon	Eastern Asia University
Atthapol Ngaopitakkul	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Banicha Burapattanasiri	Kasem Bundit University
Benjamas Panomruttanarug	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Bongkarn Homnan	Dhurakij Pundit University
Bongkoj Sookananta	Ubon Ratchathani University
Boonchai Techaumnat	Chulalongkorn University
Boonchuay Supmonchai	Chulalongkorn University
Boonlert Suechoey	South-East Asia University
Boonruk Chipipop	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Boonsri Kaewkham-Ai	Chiang Mai University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Boonyang Plangklang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Boonying Knobnob	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Budhapon Sawetsakulanond	Mahanakorn University of Technology
Bundit Thipakorn	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Bunlung Neammanee	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Cattareeya Suwanasri	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Chai Chompoo-Inwai	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chainarin Ekkaravarodome	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Chainarong Klimanee	Srinakharinwirot University
Chainarong Wisassakwichai	Rajamangala University of Technology Krungthep
Chairat Pinthong	Naresuan University
Chaiwut Chat-Uthai	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chaiyachet Saivichit	Chulalongkorn University
Chaiyan Jettanasen	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chaiyaporn Khemapatapan	Dhurakij Pundit University
Chaiyaporn Lothongkam	Mahanakorn University of Technology
Chaiyo Thammarat	South-East Asia University
Chaiyo Thammarat	South-East Asia University
Chalee Vorakulpipat	National Electronics and Computer Technology Center
Chanchai Thaijiam	Srinakharinwirot University
Chanchai Dechthummarong	Rajamangala University of Technology Lanna
Chanin Wissawinthanon	Chulalongkorn University
Channarong Banmongkol	Chulalongkorn University
Chanwit Boonchuay	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Charin Junlawanit	Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Charnchai Pluempitiwiriyawej	Chulalongkorn University
Charturong Tantibundhit	Thammasat University
Chatchai Jantaraprim	Prince of Songkla University
Chatchai Suppitsakul	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Chatchai U-Thaiwasin	South-East Asia University
Chatchawarn Hansakunbuntheung	National Electronics and Computer Technology Center
Chawasak Rakpenthai	University of Phayao
Cherdkul Sopavanit	Chulalongkorn University
Chiranut Sa-Ngajmsak	Khon Kaen University
Chirasak Sinsukudomchai	South-East Asia University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Chirdpong Deelertpaiboon	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Choochart Haruechaiyasak	National Electronics and Computer Technology Center
Chow Chompoonwai	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chukiet Sodsri	Silpakorn University
Chumnam Punyasai	National Electronics and Computer Technology Center
Chutipon Uyaisom	Eastern Asia University
Chuttchaval Jeraputra	Mahidol University
Deacha Puangdownreong	South-East Asia University
Decha Wilairat	Mahidol University
Denchai Worasawate	Kasetsart University
Diew Koolpiruck	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Dr.-Eng. Pakorn Ubolkosold	Bangkok University
Duang-Arthit Srimoon	Rangsit University
Ekachai Leelarasmee	Chulalongkorn University
Ekachai Phaisangittisagul	Kasetsart University
Ekapon Siwapornsathain	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Issarachai Ngamroo	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Jakkree Srinonchat	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Jantana Panyavaraporn	Burapha University
Jasada Kudtonggam	National Electronics and Computer Technology Center
Jeerasuda Koseeyaporn	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Jirasak Chanwutitum	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Jitkomut Songsiri	Chulalongkorn University
Jonglak Pahasa	University of Phayao
Jukkrit Tagapanij	Mahanakorn University of Technology
Jumpol Polvichai	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Kamon Jirasereeamornkul	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Kampol Woradit	Srinakharinwirot University
Kanadit Chetpattananondh	Prince of Songkla University
Kanchana Silawarawet	Siam University
Kanitpong Pengwon	Chiang Mai University
Karel Sterckx	Bangkok University
Kasem Utaikaifa	University of the Thai Chamber of Commerce
Keattisak Sripimanwat	National Electronics and Computer Technology Center
Keerati Chayakulkheeree	Sripatum University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Khanittha Kaewdang	Ubon Ratchathani University
Kiattisin Kanjanawanishkul	Maharakham University
Kitja Luckamnuyporn	Rajamangala University of Technology Phra Nakorn
Kittiphong Meesawat	Khon Kaen University
Kittipong Tonmitr	Khon-Kaen University
Kittisak Tripipatpornchai	Rangsit University
Kitiwann Nimkerdphol	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Kobchai Dejhan	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Kobsak Sriprapha	National Electronics and Computer Technology Center
Komsan Hongesombut	Kasetsart University
Komson Daroj	Ubon Ratchathani University
Komson Petcharaks	Chulalongkorn University
Kongpan Areerak	Suranaree University of Technology
Korporn Panyim	Mahidol University
Kosin Chamnongthai	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Kosol Nithisopa	Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Kosol Oranpiroj	Rajamangala University of Technology Lanna
Krischonme Bhumkittipich	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Krisda Yingkayun	Rajamangala University of Technology Lanna
Krissada Asavaskulkiet	Mahidol University
Krit Angkeaw	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Kritchai Wittheephanich	Srinakharinwirot University
Kulyos Audomvongseree	Chulalongkorn University
Kunnthphong Srisathit	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Kusumal Chalermyanont	Prince of Songkla University
Laor Boongasame	Bangkok University
La-Or Kovavisaruch	National Electronics and Computer Technology Center
Lunchakorn Wuttisittikulki	Chulalongkorn University
Mana Sriyudthsak	Chulalongkorn University
Manop Aorpimai	Mahanakorn University of Technology
Marut Buranarach	National Electronics and Computer Technology Center
Mitchai Chongcheawchamnan	Prince of Songkla University
Monai Krairiks	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Mongkol Konghirun	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Mongkol Pusayatanont	Ubonratchatani University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Monthon Nawong	Dhurakij Pundit University
Montree Siripruchyanun	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Montri Kamjanadecha	Prince of Songkla University
Montri Somdunyanok	Siam University
Naebboon Hoonchareon	Chulalongkorn University
Nalin Sidahao	Mahanakorn University of Technology
Napat Sra-lum	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Nararat Ruangchajitupon	Khon Kaen University
Narong Buabthong	Thammasat University
Narong Yoothanom	Sripatum University
Narongdech Keeratipranon	Dhurakij Pundit University
Natasha Dejdumrong	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Natchpong Hatti	National Electronics and Computer Technology Center
Nathabhat Phankong	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Nathem Koetsam-Ang	Kasem Bundit University
Nattachote Rugthaicharoencheep	Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Nattapong Phanthuna	Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
Nattapong Swangmuang	Chiang Mai University
Nattavut Chayavanich	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Nattawoot Suwannata	Maharakham University
Natth Junkrob	South-East Asia University
Nattha Jindapetch	Prince of Songkla University
Natthaphob Nimpitiwan	Bangkok University
Natthawuth Somakettarin	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Nimit Boonpirom	Sripatum University
Nipapon Siripon	Chiang Mai University
Niphath Jantharamin	Naresuan University
Nipont Tangthong	Rajamangala University of Technology Krungthep
Nisachon Tangsangiumvisai	Chulalongkorn University
Nit Petcharaks	Dhurakij Pundit University
Nitipong Panklang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Nopadol Uchaipichat	Thammasat University
Nopporn Patcharaprakiti	Rajamangala University of Technology Lanna
Nuntiya Chaiyabut	Bangkok University
Nutthaphong Tanthanuch	Thammasat University





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Opas Chutatape	Rangsit University
Paiboon Kiatsookkanatorn	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
Paisarn Sonthikorn	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Paitoon Rakhuea	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pakorn Kaewtrakulpong	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Pakpum Sombon	Bangkok University
Panavy Pookaiyudom	Mahanakorn University of Technology
Panus Nattharith	Naresuan University
Panuthat Boonpramuk	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Parachai Juanuwattanukul	Sripatum University
Parnjit Damrongkulkamjorn	Kasetsart University
Patamaporn Sripadungtham	Kasetsart University
Pathomthat Chiradeja	Srinakharinwirot University
Pawee Chaiyaboon	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Peerapol Yuvapoositanon	Mahanakorn University of Technology
Peerawat Yutthagowith	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Peerayot Sanposh	Udon Thani Rajabhat University
Pennapa Pairedamonchai	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Petch Nantivatana	Sripatum University
Phaiboon Booppha	Udon Thani Rajabhat University
Phairote Wounchoum	Prince of Songkla University
Phaisan Ngamjanyaporn	Rangsit University
Phakkawat Jantree	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
Phichet Moungnoul	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Phongsak Phakamach	North Eastern University
Phumin Kirawanich	Mahidol University
Pichai Aree	Thammasat University
Pinit Thepsatorn	Srinakharinwirot University
Pipat Prommee	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Pished Bunnun	National Electronics and Computer Technology Center
Pisit Liutanakul	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Pisit Vanichchanunt	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Pisit Wisutmetheekorn	Mahanakorn University of Technology
Pisut Raphisak	Kasetsart University
Piya Warabuntaweekorn	Bangkok University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

#### Reviewer

Pongsatorn Sedtheetorn  
Pongsawat Kotchapoom  
Poonlap Lamsrichan  
Pornchai Phukpattaranont  
Pornraepeepat Bhasaputra  
Prajuab Pawarangkoon  
Pramin Artrit  
Pramote Anunvrpong  
Pramuk Unahalekhaka  
Prapapan Khluabwannarat  
Prasit Nakonrat  
Prasit Teekaput  
Prasopchok Hothongkham  
Prayoot Akkaraekthalin  
Preecha Kocharoen  
Preecha Sakarung  
Rachu Punalard  
Rangsipan Marukatat  
Rardchawadee Silapunt  
Rawid Banchuin  
Rungsimant Sitdhikom  
Sakchai Thipchaksurat  
Sakda Somkun  
Sakorn Po-Ngam  
Salitip Sinthusonthisat  
Samphan Phrompichai  
Samroeng Hintamai  
Sanchai Dechanupaprittha  
Sanchai Rattananon  
Sangsuree Vasupongayya  
Santitham Prom-On  
Sanun Srisuk  
Sanya Khunkhao  
Sanya Mitaim  
Saowapak Thongvigitmanee

#### Organization

Mahidol University  
Eastern Asia University  
Kasetsart University  
Prince of Songkla University  
Thammasat University  
Mahanakorn University of Technology  
Khon Kaen University  
Rajamangala University of Technology Krungthep  
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi  
South-East Asia University  
Ubon Ratchathani University  
Chulalongkorn University  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Sripatum University  
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi  
Mahanakorn University of Technology  
Mahidol University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Siam University  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
National Institute of Metrology  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Mahanakorn University of Technology  
Mahanakorn University of Technology  
Sripatum University  
Kasetsart University  
University of the Thai Chamber of Commerce  
Prince of Songkla University  
University College London  
Mahanakorn University of Technology  
Sripatum University  
Thammasat University  
National Electronics and Computer Technology Center



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Sarawan Wongs	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Sarawuth Chaimool	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Sarun Sumriddetchkajorn	National Electronics and Computer Technology Center
Sataporn Pornpromlikit	Khon Kaen University
Sawat Bunnjaweht	Mahanakorn University of Technology
Seangrawee Buakaew	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Sermsak Uatrongjit	Chiang Mai University
Singthong Pattanasethanon	Maharakham University
Sirichai Dangeam	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Siripong Chaysin	Srinakharinwirot University
Siroj Sirisukprasert	Kasetsart University
Sirivit Taechajedcadarungsri	Khon Kaen University
Siriwich Tadsuan	South-East Asia University
Siriya Skolthanasarat	National Electronics and Computer Technology Center
Sisuda CHAITHONGSUK	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
Sitthidet Vachirasricirikul	University of Phayao
Somboon Nuchprayoon	Chiang Mai University
Somboon Sooksatra	Rangsit University
Somchai Biancoongnem	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Somchai Hiranvarodom	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Somchai RATANATHAMMAPHAN	Chulalongkorn University
Somchat Jiriwibhakorn	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Sommart Sangn-Gem	Mahanakorn University of Technology
Somnida Bhatranand	Mahidol University
Sompnop Rodamporn	Srinakharinwirot University
Somporn Seewattanapon	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
Somying Thainimit	Kasetsart University
Somyot Kaitwanidvilai	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Songklod Sriprang	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Songkran Kantawong	Bangkok University
Songphol Kanjanachuchai	Chulalongkorn University
Songrit Maneewongvatana	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Sopon Phumeechanya	Silpakorn University
Sorawat Chivapreecha	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Sorot Auyom	Provincial Electricity Authority



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Srisak Noyraiphoom	Rajamagala University of Technology Phra Nakorn
Suchada Sitjongsataporn	Mahanakorn University of Technology
Suchart Yammen	Naresuan University
Suchin Trirongjitmoah	Ubon Ratchathani University
Sudchai Boonto	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Sumate Naetiladdanon	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Suneat Pranonsatit	Kasetsart University
Supachai Paiboon	Mahidol University
Supachai Vorapojpisut	Thammasat University
Supachate Innet	University of the Thai Chamber of Commerce
Suparerk Manitpomsut	University of the Thai Chamber of Commerce
Supatana Auethavekiat	Chulalongkorn University
Supattana Nirukkanaporn	Rangsit University
Supavadee Aramvith	Chulalongkorn University
Supawan Ponpitakchai	Naresuan University
Supot Sookpotharom	Bangkok University
Surachai Chaitusaney	Chulalongkorn University
Surachet Kanprachar	Naresuan University
Surachoke Thanapitak	Mahidol University
Surapan Airphaiboon	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Surapong Suwankawin	Chulalongkorn University
Suratsavadee Korkua	Walailak University
Suree Pumrin	Chulalongkorn University
Suthathip Maneewongvatana	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Suthee Rukkaphan	Kasem Bundit University
Suwat Pattaramalai	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Suwit Kiravittaya	Naresuan University
Tanasak Phanprasit	Bangkok University
Tanet Wonghong	Bangkok University
Tanin Duangjan	Srinakharinwirot University
Tasanee Chayavanich	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Taweesup Apiwattanapong	National Electronics and Computer Technology Center
Teeravisit Laohapensaeng	Mae Fah Luang University
Thamvarit Singhavilai	Mahidol University
Thanadol Pritranan	Mahidol University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Thanakorn Namhormchan	Eastern Asia University
Thanapat Promwattanapakdee	Sripatum University
Thanapong Suwanasri	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thanathip Sum-Im	Srinakharinwirot University
Thaschagon Onboonuea	Eastern Asia University
Thavatchai Tayjanant	Chulalongkorn University
Theerapol Muankhaw	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Theerayod Wiangtong	Mahanakorn University of Technology
Theerayut Janjaem	Kasem Bundit University
Theerayuth Chatchanayuenyong	Maharakham University
Thidarat Tawsook	Bangkok University
Thipwan Fangsuwannarak	Suranaree University of Technology
Thumrongrat Amornaksa	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Toempong Phetchakul	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Trin Saengsuwan	Kasetsart University
Tuchsanai Ploysuwan	Siam University
Ukrit Mankong	Chiang Mai University
Usana Tuntoolavest	Kasetsart University
Ut Goenchanart	Rangsit University
Uthen Kamnam	Rajamangala University of Technology Lanna
Varathana Arjrith	Srinakharinwirot University
Vech Vivek	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Veerachai Malyavej	Mahanakorn University of Technology
Viboon Chunkag	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Vichai Sae-Li	Eastern Asia University
Vichakorn Hengsrirawat	Sripatum University
Vijit Kinnares	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Virasit Imtawil	Khon Kaen University
Vladimir Buntilov	Mahidol University
Vuttiapon Tarateeraseth	Srinakharinwirot University
Vyapote Supabowomsathian	Siam University
Waleed Mohammad	Bangkok University
Walisa Romsaiyud	Siam University
Wanchai Chankaipol	Sripatum University
Wanchai Chimchavee	University of the Thai Chamber of Commerce



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Wanchai Pijitrojana	Thammasat University
Wanchai Subsingha	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Wanchak Lenwari	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Wanchalerm Pora	Chulalongkorn University
Wannarat Suntiamorntut	Prince of Songkla University
Warit Wichakool	Prince of Songkla University
Watis Leelapatra	Khon Kaen University
Weerapun Rungseevijitprapa	Chulalongkorn University
Wekin Piyarat	Srinakharinwirot University
Werachet Khan-Ngern	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Werapon Chiracharit	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Wichit Krueasuk	Sripatum University
Widhyakorn Asdornwised	Chulalongkorn University
Wijitra Petchakit	Walailak University
Wilaiporn Lee	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Winyu Sawaengsinkasikit	Kasem Bundit University
Wipavan Narksarp	Siam University
Wisarn Patchoo	Bangkok University
Wiwat Tippachon	Rajamangala University of Technology Lanna
Wongwit Senavongse	Srinakharinwirot University
Worakarn Wongsachua	Ubon Ratchathani University
Wuthipom Loetwassana	Mahanakorn University of Technology
Wuttipong Kumwilaisak	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Wuttiwat Kongrattanaprasert	Rajamangala University of Technology Krungthep
Yongyut Chonbodeechalermroong	Naresuan University
Yongyuth Naras	Siam University
Yongyuth Permpoontanalarp	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Youthana Kulvitit	Chulalongkorn University
Yutana Chongjarearn	Dhurakij Pundit University
Yutana Jewajinda	National Electronics and Computer Technology Center
Yuttana Kumsuwan	Chiang Mai University
Yuttapong Jiraksopakun	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Yutthana Kanthaphayao	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

## สารบัญ

CP005	<b>Buyer Coalition Scheme with Data Mining</b> <i>Laor Boongasame</i> <i>Bangkok University</i>	957
CP006	<b>Driving Events Detection and Classification using GPS Data from Smartphone</b> กฤษณา แฉ่มเพ็ชร <sup>1</sup> วิไลลักษณ์ แซ่กั้ง <sup>1</sup> ธัญฉิทธิ ผลประสิทธิ์ <sup>2</sup> และเฉลิมพล สายประเสริฐ <sup>2</sup> <sup>1</sup> จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย <sup>2</sup> ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ	961
CP007	<b>Optimized Search Algorithm for Taxi Service Using GPS Module</b> ณัฐพล ศรีสูงเนิน และ เอกชัย ไพศาลศักดิ์สกุล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	965
CP008	<b>Development of a Packet Sniffer for IEEE 802.15.4 Wireless Networks</b> สุทธินันท์ แสงเงิน และ เรวัต ศิริโภคานิรมย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	969
CP009	<b>Scheduling in Computational Grid with Hybrid Algorithms to improve Quality of Service (QoS)</b> <i>Siriluck Lorpunmanee, Weeraphan Chomphudang</i> <i>Suan Dusit Rajabhat University</i>	973
CP010	<b>การสร้างและประเมินการใช้งานอินเทอร์เน็ตโปรโตคอลในระบบออกแบบร่วมกันแบบรีคอนฟิกูเรชัน</b> เศรษฐกาส ไปร่มงูช และ ชีรัช เวียงทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	977
CP011	<b>Voice Traffic Performance Evaluation on Mobile Ad Hoc Network</b> <i>Thirapon Wongsaaadsakul</i> <i>Bangkok University</i>	981
CP012	<b>การประยุกต์ใช้วิธีการรวมกลุ่มลิงก์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของค่าปริมาณงานในระบบแลนไร้สาย</b> นิสิต ภูครองดา วิโรจน์ พิราจนเมษย์ ไพฑูรย์ รีกเหลือ และอิฐอรีย์ ปิตมล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	985

## การประยุกต์ใช้วิธีการรวมกลุ่มลิงก์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของค่าปริมาณงานในระบบแลนไร้สาย

### Application of Link Aggregation to improve the throughput value for WLAN

นิติน ภูครองหา<sup>1</sup> วิโรจน์ ทิวาจนนชัย<sup>2</sup>ไพฑูรย์ วัคเหลือ<sup>3</sup> และอิฐอรวิญญู ปิติมถ<sup>4</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ตำบลคลองหก อําเภอดุสิตบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: 0-2549-3460

E-mail: nisit.p@en.rmutt.ac.th<sup>1</sup>, virote.p@en.rmutt.ac.th<sup>2</sup>, paitoon\_r@rmutt.ac.th<sup>3</sup>, itaron.p@en.rmutt.ac.th<sup>4</sup>

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของค่าปริมาณงานในระบบแลนไร้สาย โดยการประยุกต์ใช้วิธีการรวมกลุ่มลิงก์ ซึ่งโดยปกติมีการใช้อยู่ในระบบสายตามมาตรฐาน IEEE802.3ad จากผลการทดลองพบว่าเมื่อรวมกลุ่มลิงก์ในระบบไร้สายสามารถทำให้ช่องทางการสื่อสารเพิ่มขึ้นตามจำนวนกลุ่มลิงก์ นอกจากนี้ถ้าลิงก์ใดลิงก์หนึ่งไม่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ ลิงก์อื่น ๆ ที่เหลือ จะรับ-ส่งข้อมูลทดแทน ซึ่งนอกจากทำอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(SNR) แล้ว ค่า Interference Power ยังมีผลต่อค่าปริมาณงานด้วย ซึ่งพบว่าถ้าความแตกต่างระหว่างค่า Interference Power Station กับค่า Interference Power Noise มีค่าเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าปริมาณงาน เพิ่มขึ้นเฉลี่ยในภาพรวม 5.4%

คำสำคัญ: Link Aggregation, WLAN, Interference Power, 802.11, 802.3ad

#### Abstract

An application of Link Aggregation, which normally use in wire system in IEEE802.3ad standard, for WLAN, to improve the throughput value is proposed in this paper. The experimental results show that Link Aggregation in wireless system cause to the increasing of bandwidth which depends on number of link aggregation. In addition, if some of link cannot transfer data, another link can transfer data instead of them due to Link Aggregation. However, it is not only the SNR (Signal-to-noise ratio) value affects to the throughput value but interference power value also affects to the throughput value. If the difference value between the interference power station value and the interference power noise value increase, the throughput value is also increased by 5.4% in average.

Keywords: Link Aggregation, WLAN, Interference Power, 802.11, 802.3ad

#### 1. บทนำ

ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad การรวมกลุ่มลิงก์ (Link Aggregation) [1] เป็นการรวมช่องสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ในการติดต่อสื่อสาร โดยการนำเอาลิงก์มากกว่าหนึ่งลิงก์มารวมกันให้เป็นกลุ่มเดียว โดยใช้สื่อกลางแบบมีสายตามเทคโนโลยี ฟาสต์อีเทอร์เน็ท IEEE 802.3u [2] ที่ส่งข้อมูลสูงสุดได้ 100 Mbps (TX, RX) จากข้อดีของ IEEE 802.3ad การรวมกลุ่มลิงก์ที่มีการเพิ่มแบนด์วิดท์ในการสื่อสารในสื่อกลางแบบสาย (wire) จึงมีการนำมาใช้กับสื่อกลางแบบไร้สาย (wireless) แบบต่างๆ เช่น ไวแมกซ์ (Wi-Max), ไวไฟด์ (Wi-Fi) [4] เพื่อเพิ่ม ค่าปริมาณงาน (Throughput) ในการรับส่งข้อมูลไม่ว่าจะเป็น การปรับค่าดีเลย์ในการส่งแบบเครือข่ายไร้สาย [5] การจัดสรรปริมาณการใช้โดยใช้วิธี Support Vector Machine [6] ซึ่งเป็นการทำ การรวมกลุ่มลิงก์ เครือข่ายไร้สายแบบต่างๆ (Multi-Radio System) โดยไม่เฉพาะเจาะจงว่าเป็นเครือข่ายไร้สายแบบใด บทความนี้เป็นเสนอการประเมินผลของค่าปริมาณงานของการรวมกลุ่มลิงก์ เครือข่ายแลนไร้สาย 802.11bg โดยเปลี่ยนการรวมกลุ่มลิงก์จากเดิมที่เป็นสื่อกลางแบบสาย มาเป็นสื่อกลางแบบไร้สาย ในความถี่ที่ 2.4 GHz ใช้ช่องสัญญาณ 20 MHz เพื่อประเมินผลค่าปริมาณงาน โดยทดสอบที่ ช่องสัญญาณที่ 1, 6, 11, 13, 16, 49, 52, 56 และ 60 MHz สำหรับระบบ ทดสอบที่ 3 ระยะทางคือ 2 เมตร 5 เมตร และ 10 เมตร และปรับค่า interference power ว่า จะส่งผลต่อค่าปริมาณงานอย่างไรบ้าง รวมถึงความถี่ของสัญญาณที่ 1 เพื่อทดสอบการส่งลงเส้นทางมีลิงก์ใดลิงก์หนึ่ง มีปัญหา

#### 2. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ถึงแม้ว่าการสื่อสารที่ทำการรับส่งข้อมูลแบบมีสาย จะมีอัตราค่าปริมาณงานสูง แต่ข้อจำกัดของระบบคือไม่สามารถเดินระบบสายได้สะดวก ในบางพื้นที่ที่สภาพแวดล้อมไม่เอื้ออำนวย เช่น การเดินสายข้ามตึก อาคาร หรือแม้แค่การใช้งานชั่วคราว งานก็พบบทบาทของระบบไร้สายได้มากขึ้น ดังนั้นการนำเทคโนโลยีระบบสายมาประยุกต์ใช้กับระบบไร้สายจึงมีความสำคัญมากขึ้น การสื่อสารข้อมูลเนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้งลดภาระค่าใช้จ่าย และสามารถรื้อถอนได้ง่าย หรืองานด้านกระจายสัญญาณให้กับระบบความปลอดภัยต่างๆ เช่น การกระจายสัญญาณสำหรับกล้องไอพีทีวีวงจรปิดแบบไร้สาย หรือ ใช้กับระบบตรวจการระยะไกล แต่ข้อจำกัดของการสื่อสารที่จะมี



ในเรื่องของ การรับส่งข้อมูลที่ให้อัตราการลำปริมาณงาน ที่ค่อนข้างต่ำ เพราะมีปัจจัยในสภาพแวดล้อมที่คิดถึง รวมถึง ลึก อาคาร ที่จะมีผลทอนประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย จากปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงอยากเสนอแนวคิดในการรวมกลุ่มลิงค์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของทางการสื่อสารแบบสวิตช์ให้เพิ่มมากขึ้นและมีการสำรวจเส้นทางจากที่ระบบเดิมจะใช้สื่อกลางแบบสายทำการรวมกลุ่มลิงค์ แต่งานวิจัยนี้จะใช้สื่อกลางแบบไร้สายในการรวมกลุ่มลิงค์

**3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง**

มาตรฐาน IEEE802.3ad การรวมกลุ่มลิงค์ หรือเรียกอย่างหนึ่งว่า อีเทอร์ แชนแนล (Ether Channel) นั้นเป็นคุณสมบัติที่ที่สามารถรวมหลาย ๆ อินเทอร์เฟซแบบฟิซิคอล (Physical) เข้าด้วยกันเป็นอินเทอร์เฟซแบบลอจิคอล (Logical) เพียงอันเดียวได้ ใช้เพื่อแก้ปัญหาความคับคั่ง (Congestion) ในการใช้งานระบบเครือข่าย หรือใช้แก้ปัญหาเมื่อมีปริมาณการใช้ระบบเครือข่ายมากเกินไปจนทำให้การรับ-ส่งข้อมูลที่ได้ช้าเหมือนเป็นการเพิ่มเส้นทางข้อมูลขึ้น จากเส้นทางเดียวเป็นหลาย ๆ เส้นทาง เพื่อที่จะทำการเสริมปริมาณการใช้ไปในหลาย ๆ เส้นทาง พร้อมทั้งเป็นการทำเส้นทางสำรอง (Redundant) ในกรณีที่มีบางลิงค์ที่เป็นสมาชิกของอีเทอร์ แชนแนล เกิดมีปัญหาได้ และใช้เกณฑ์วิธี (Protocol) Link Aggregation Control Protocol (LACP) ในการรับ-ส่ง ข้อมูลกัน

มาตรฐาน 802.11b (11 Mbps) เป็นมาตรฐานเครือข่ายแลนไร้สายที่ใช้ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ทุกประเทศเปิดให้ใช้โดยอิสระ และการที่ถูกประกาศเป็นมาตรฐานตั้งแต่ปี 1999 มีความเร็วในการทำงาน 4 ระดับ คือ 1, 5.5, 2 และ 11 Mbps

มาตรฐาน 802.11g (54 Mbps) มีความเร็วในการทำงานสูงถึง 54 Mbps และมีระยะการทำงานไกลสุดเท่ากับมาตรฐาน 802.11b ใช้ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นช่วงที่ไร้เงาได้เสรี มีความสามารถทำงานร่วมกันกับเครือข่ายแลนไร้สายตามมาตรฐาน 802.11b ได้

**4. วิธีการที่นำเสนอ**

**4.1 ภาพรวมของระบบ**

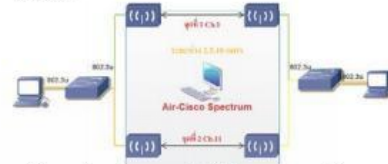
การรวมกลุ่มลิงค์ระบบไร้สาย ซึ่งเดิมจะใช้กับระบบสายดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การรวมกลุ่มลิงค์ระบบแลนไร้สาย

โดยจะมี ระบบรับ-ให้บริการ (Server/Client) A ใช้รับ-ส่งข้อมูลไปยังระบบรับ-ให้บริการ B ผ่านสวิตช์ A ที่ทำการรวมกลุ่มลิงค์ต่อด้วยระบบ

แลนไร้สาย ที่ Point-to-Point ผ่านสวิตช์ไปยังระบบรับ-ให้บริการ B ดังรูปที่ 2

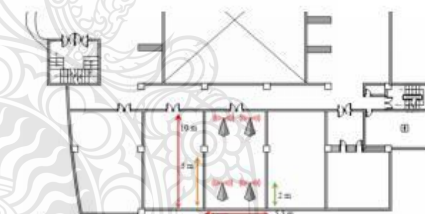


รูปที่ 2 การเชื่อมต่อการรวมกลุ่มลิงค์ของระบบแลนไร้สาย Server/Client A ใช้รับ-ส่งข้อมูลไปยัง Server/Client B

ขั้นตอนแรกจะกำหนดจุดเข้าถึง (Access Point) ที่ใช้ทดสอบแบ่งออกเป็น 2 จุด และเพิ่มความห่างของจุดเข้าถึง จาก 2 เมตร 5 เมตร และ 10 เมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพที่ปริมาณงานของการรวมกลุ่มลิงค์ของระบบแลนไร้สาย

**4.2 การออกแบบและพัฒนาระบบ**

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจะประกอบไปด้วย คอมพิวเตอร์ เครื่อง สวิตช์ที่รองรับการทำงานรวมกลุ่มลิงค์ 2 ตัว ในการทดสอบนี้ใช้ Cisco Catalyst 2960 24 พอร์ต ,สาย UTP Cat5e 6 เส้น, แอคเซสพ้อยท์ ASUS RT-N16 4 ตัว ติดตั้ง tomato-K26(USB-1.28.9054MIPSR2-beta-Ext) , การ์ดสวิตช์สเปคและค่าปริมาณงานของ Cisco รุ่น AIR-CT5505E-WIFI-C, โปรแกรมสร้างกราฟฟิค รับ-ส่ง ข้อมูล jperf-2.0.2 และ โปรแกรมมอนิเตอร์กราฟฟิค PRTG Version 12.3.1.2366



รูปที่ 3 แผนผังการวางตำแหน่งของ Access Point ในห้องทดสอบ



รูปที่ 4 ภาพรวมของระบบการรวมกลุ่มลิงค์ระบบแลนไร้สายที่ทดสอบด้วยอุปกรณ์จริง

**4.3 ข้อจำกัดของระบบ**

ทดสอบในขั้นที่ 2 ตารางเมตร ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง เนื่องจากเป็นระยะที่ทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพสูงสุด [7] และเพิ่มระยะห่างของจุดเข้าถึง จาก 2 เมตร 5 เมตร และ 10 เมตรตามลำดับ โดยทดสอบวัดผลจำนวน 20 ครั้ง ในแต่ละระยะห่างแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยทางสถิติและบันทึกผล และใช้ความถี่ 2.4 GHz ในช่องสัญญาณ 20 MHz ที่ช่องสัญญาณ 1 และ 11

**5. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล**

ทดสอบค่าปริมาณงาน ของการรวมกลุ่มลิงก์ โดยใช้เครือข่ายแลนไร้สาย IEEE 802.11b/g ทดสอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง โดย 2 เครื่องใช้ในการ รับ-ส่ง ข้อมูล อีก 1 เครื่องใช้ในการมอดิเตอร์ภาพที่กรวมถึงสถาปัตยกรรมของสัญญาณ โดยกำหนดไอพีแอดเดรสเครื่องแม่ข่าย เครื่องที่ 1 ไอพี 192.168.0.1 , เครื่องลูกข่าย เครื่องที่ 2 ไอพี 192.168.0.2 เครื่องที่ 3 มอดิเตอร์ ไอพี 192.168.0.5 ใช้โปรแกรมสร้างกราฟที่กรับ-ส่ง ข้อมูล iperf-2.0.2 และ โปรแกรมมอดิเตอร์ภาพที่กร PRIG Version 12.3.1.2366 เพื่อดูกราฟที่กรของแต่ละพอร์ต รวมถึงพอร์ตที่ทำการรวมลิงก์ จากเครื่องลูกข่ายไปยังเครื่องแม่ข่าย

จากผลการทดลองเมื่อแสดงในตารางที่ 1 พบว่าค่าความแตกต่างระหว่าง Interference Power Station กับค่า Interference Power Noise (แทนด้วยตัวแปร A) มีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าปริมาณงาน มีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อการรวมกลุ่มลิงก์(แทนด้วยตัวแปร AG) มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อเทียบระหว่างการรวม 1 ลิงค์และการรวมกลุ่ม 2 ลิงค์ ตัวอย่างเช่นเมื่อค่า Interference มีค่า -5dBm สามารถรับ-ส่ง ข้อมูลด้วยการรวมกลุ่ม 1 ลิงค์ได้ 29.53 Mbit/sec การรวมกลุ่ม 2 ลิงค์ได้ 30.10 Mbit/sec ในการทดสอบที่ระยะห่าง 10 เมตร

ตารางที่ 1 ค่าความแตกต่างระหว่าง Interference Power ส่งผลต่อ Throughput 1 Link Aggregation & 2 Link Aggregation ที่ระยะห่าง 10 เมตร

Diff Interference Power Noise & Interference Power Station (A)	Throughput avg (Mbit/s) 1 Aggregation (AG)	Throughput avg (Mbit/s) 2 Aggregation (AG)
-39	21.95	24.12
-30	22.12	24.40
-26	22.45	24.60
-24	23.78	25.20
-21	24.45	25.50
-14	25.74	26.80
-13	26.23	27.70
-10	27.74	28.40
-9	28.12	29.80
-5	29.53	30.10

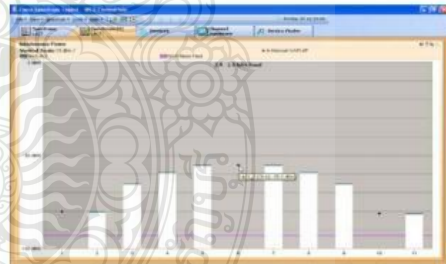


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างระหว่าง A กับ AG

ตารางที่ 2 ค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่รับ-ส่ง เมื่อมีการเพิ่มระยะห่างของจุดเข้าถึง

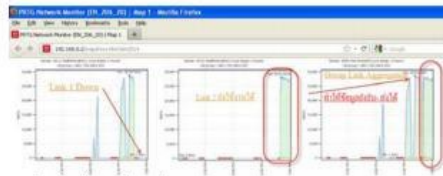
Distance AP(m)	Throughput avg. (Mbit/s) 1 Aggregation	Throughput avg. (Mbit/s) 2 Aggregation
2	29.5	23.5
5	28.6	29.0
10	29	30.2

ตารางที่ 2 แสดงถึงค่าเปรียบเทียบปริมาณงานที่รับ-ส่ง เมื่อมีการเพิ่มระยะห่างของ จุดเข้าถึง โดยถ้ามีการรวมลิงก์ 1 ลิงค์ ใช้รับ-ส่งข้อมูลบนระยะห่าง 2 เมตรนั้น ได้ค่าปริมาณงาน 29.5 Mbit/sec แต่เมื่อจุดเข้าถึงเพิ่มเพื่อที่จะทำการรวมลิงก์ 2 ลิงค์นั้นกลับทำให้ค่าปริมาณงานนั้นน้อยลง ได้ค่าปริมาณงาน 23.5 Mbit/sec สืบเนื่องจากมีสัญญาณจากการรบกวนของสัญญาณทำให้ความแตกต่างระหว่าง Interference Power Station กับค่า Interference Power Noise นั้นน้อย ส่งผลต่อค่าปริมาณงาน ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ค่า Interference Power ของช่องสัญญาณที่ 1 และ 11 เมื่อต่อรวมลิงก์กัน 2 ลิงค์จะมีค่ามากกว่าที่ต่อรวมลิงค์เดียว

แต่หากเพิ่มระยะห่างของจุดเข้าถึงออกไปนั้นจะทำให้การรวมลิงค์ของสัญญาณดีขึ้น โดยผลทดสอบ ค่าปริมาณงานเมื่อรวมกลุ่มลิงค์ 2 ลิงค์ระยะห่างของจุดเข้าถึง 10 เมตร ได้ค่าปริมาณงาน 30.2 Mbit/sec และเมื่อมีลิงค์ใดลิงค์หนึ่งมีปัญหาซึ่งสามารถ รับ- ส่งข้อมูล กันได้ เนื่องจากยังมีเส้นทางสำรองอยู่ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เมื่อลิงก์ใดลิงก์หนึ่งมีปัญหาซึ่งสามารถรับ-ส่ง ข้อมูลจากการรวมลิงค์ ลิงค์อื่นได้ มอนิเตอร์จากโปรแกรม PRTG [8]

**6. สรุป**

การรวมกลุ่มลิงก์ในระบบสายตามาตรฐาน IEEE802.3ad เมื่อนำมาใช้กับระบบแลนไร้สาย พบว่าเมื่อรวมกลุ่มลิงก์ในระบบไร้สายสามารถทำให้ช่องทางการสื่อสารเพิ่มขึ้นตามจำนวนกลุ่มลิงก์ นอกจากนี้ถ้าลิงก์ใดลิงก์หนึ่งไม่สามารถรับ-ส่ง ข้อมูลได้ ลิงค์อื่น ๆ ที่เหลือ จะรับ-ส่ง ข้อมูลทดแทน ซึ่งนอกจากค่า Interference Power และค่า SNR แล้ว ค่า Interference Power Station ยังมีผลต่อค่าปริมาณงานด้วย ซึ่งพบว่าค่า ความแตกต่างระหว่างค่า Interference Power Station กับค่า Interference Power noise มีค่าเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าปริมาณงาน เพิ่มขึ้นเหลือในภาพรวม 5.4 %

**6.1 แนวทางการพัฒนาต่อ**

ทดสอบเรื่องการแพร่กระจายคลื่นเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายคลื่นของการรวมกลุ่มลิงก์ร่วมอิงการที่นายอุปกรณ์ที่จะติดตั้งและเพิ่มระยะทดสอบแบบภายในอาคารโดยใช้ย่านความถี่ 5 GHz และเปรียบเทียบหากมีการรบกวนของสัญญาณที่ทับซ้อนกัน จะมีผลต่อค่า ค่าปริมาณงาน เช่นไร และจากผลกระทบนั้นจะมาสามารถที่จะมีแนวคิดเพื่อแก้ไขหรือไม่

**7. กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทดสอบและเก็บข้อมูล

**8. เอกสารอ้างอิง**

[1] IEEE Std 802.3u-1995 "IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Networks: Supplement to Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) (Clauses 21-30)."21-30."  
 [2] IEEE Std 802.3ad-2000, "Amendment to carrier sens multiple access with collision detection (CSMA/CD access method and

physical layer specification aggregation of multiple link segments"  
 [3] IEEE Std 802.11v-2011 "IEEE Standard for Information Technology-- Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 8: IEEE 802.11 Wireless Network Management."  
 [4] H. Raza, "A brief survey of radio access network backhaul evolution: part I," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, pp. 164-171, 2011.  
 [5] A. Yamaguchi, *et al.*, "Downlink Link Aggregation Performance with Delay Adjustment Capability in Multi-Radio Access System," *Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2011 IEEE 73rd, 2011.  
 [6] K. Hashiguchi, *et al.*, "Traffic allocation control using support vector machine in heterogeneous wireless link aggregation," *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, 2011 IEEE, 2011.  
 [7] S. Samad and Peng Li., "Evaluating IPv6 in Peer-toPeer 802.11n Wireless LANs," *IEEE Internet Computing*, 2011 IEEE, 2011.  
 [8] <http://www.paessler.com>



**นิติต สุครองตา** ปัจจุบันเป็นนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



**วิโรจน์ พิธาจนชัย** อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



**ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ** อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



**ผศ.อิฐอารุย์ ปิติมอล** อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



# ECTI - CARD 2012

## การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 4

เทคโนโลยีชีวภาพ การแพทย์ วิทยาศาสตร์การกีฬา  
 ระบบรักษาความปลอดภัย การควบคุมการเข้าถึง  
 การยืนยันตัวตน ระบบตรวจจับ  
 การสื่อสาร การสนับสนุนผู้ใช้ตามบ้าน เครือข่ายสังคม  
 เครือข่ายไร้สาย  
 การเรียนรู้การสอนทางไกล การศึกษาบัณฑิต  
 คอมพิวเตอร์เอ็นเอ็มซี  
 การประหยัดพลังงาน การจัดการพลังงานบ้านอัตโนมัติ  
 การขนส่ง การควบคุมจราจร การจัดการอุตสาหกรรม  
 ธุรกิจการธนาคาร การท่องเที่ยว และการโรงแรม  
 การกู้ภัย ระบบเตือนภัย และการพยากรณ์  
 เกษตรกรรม อุตสาหกรรมเกษตร




## Committee

Steering Committee

รศ.ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน (KMUTNB)

รศ.ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย (KMUTT)

รศ.ดร.วุฒิพงษ์ อารีกุล (KU)

General Chair

ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ (KMITL)

ศ.ดร.ประกาศ จงสถิตวัฒนา (CU)

General Co-Chairs

รศ.ดร.นำยุทธ สงค์ธนาพิทักษ์ (RMUTT)

ผศ.ดร.สมหมาย หิวสอาด (RMUTT)

Technical Program Chair

รศ.ดร.ชาลี เจริญลาภนพรัตน์ (SIIT)

Technical Program Co-Chair

ผศ.จินตนา นาคะสุวรรณ (RMUTT)

Local Arrangement Chair

ดร.ไพฑูรย์ รักเทสิอ (RMUTT)

Publication Chair

ผศ.ธนะพงศ์ นพวงษ์ ณ อยุธา (RMUTT)

Publicity Chair

มาโนช ประชา (RMUTT)

Finance Chairs

วิโรจน์ พิวราจเนนชัย (RMUTT)

รุจิพรรณ สัมปโนนา (BU)

ไพริน แก้วกวย (ECTI)

Exhibition Chair

สมชาย เมื่อนสูงเนิน (RMUTT)

Workshop Chair

ดร.ฉัตรชัย สุกพิทักษ์สกุล (RMUTT)

General Secretary

ดร.วิสิทธิ์ สือธรรมจักร (RMUTT)

General Assistant Secretary

ผศ.วัฒนา พันธุ์ล้ำเจียก (RMUTT)

Technical Program Committee

ผศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ (NPRU)

ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์ (KKU)

รศ.ดร.อภิรักษ์ ธนชยานนท์ (KMITL)

ดร.กสิน วิเชียรชม (KMITL)

ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ (RMUTI)

ดร.ก้องภพ อยู่เย็น (NASA)

รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช (KMITL)

ดร.วันวิสา ชัชวงษ์ (KMITL)

รศ.ดร.ธีรรัตน์ อมรรักษา (KMUTT)

รศ.ดร.จันทนา จันทราพรชัย (SU)

ดร.ศุภภรณ์ เกียรติสิน (MU)

ดร.กิตติวัฒน์ นิ่มเกิดผล (RMUTT)

รศ.ณรงค์ บวนทอง (TU)

ดร.วินัย วิชัยพาณิชย์ (RMUTT)

ผศ.ดร.พงษ์ศักดิ์ กักรัตินทร (KMUTNB)

ดร.กมล เขมะรังษี (NECTEC)

ดร.มัทธิกา อ่องแดง (DPU)

ดร.คามพ์เมษ บุญยะเวศ (TU)

รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ (KMITL)

ดร.ณัฐพงศ์ ศรีรัตน์ (Skyworks)

ผศ.ดร.ดวงอาทิตย์ ศรีมูล (RSU)

รศ.เวก วิเวก (KMUTNB)

ดร.สมมาตร แสงเงิน (MUT)

ดร.ศราวุธ ชัยมูล (KMUTNB)

ผศ.ดร.เบญจมาศ ทนมนรัตนรักษ์ (KMUTT)

ดร.อิทธิเสก นิลกำแหง (SIIT)

รศ.ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย (CU)

ดร.พีระศ แสนโกชน์ (KU)

ผศ.ดร.จิรวัดน์ กษสาร (RMUTT)

ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ (RMUTT)

ผศ.ดร.ณัฐภ นิ่มปิตินัน (BU)

ผศ.ดร.ชัชชัย เค็ชชอนันต์ (CU)

ผศ.ดร.ปานจิต คำรงกุลกำจร (KU)

ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง (RMUTT)

ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม (RMUTT)

ดร.สุรินทร์ แหงมงาม (RMUTT)

รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นันทิ (KMITL)

ดร.วรรณวิทย์ วงศ์ไครรัตน์ (RMUTI)

ผศ.ดร.สมเกียรติ ฤกษ์วีระวิญญู (KMITL)

ผศ.ดร.ยุพิน สรรพคุณ (KMUTNB)

ดร.สมเกียรติ อุดมหารธรรมากุล (RMUTSB)

ดร.จักรี ศรีนนท์นัฒ (RMUTT)

Mr.Lin M.M. Myint (SIU)

ดร.วิสิทธิ์ สือธรรมจักร (RMUTT)

## สารบัญ

### Networking

1087	การเพิ่มประสิทธิภาพของค่าปริมาณงานในระบบแลนไร้สายโดยการประยุกต์ใช้วิธีการรวมกลุ่มลิงค์	90
1068	แบบจำลองฟังก์ชันมัลติโสมมิงในสเต็มคอนโทรลทรานสมิซชันโพรโทคอลโดยใช้อัลกอริทึม	96
1057	การติดตั้งและตรวจสอบเครือข่ายไร้สายแบบเมช	102
1054	ระบบการจัดการสถานีตรวจวัดและอุปกรณ์เกตเวย์ในเครือข่ายตรวจวัดไร้สาย	108
1013	การเพิ่มประสิทธิภาพเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจด้วยพีซีแอลจิก	114

### Energy Saving and Environment

1009	การประหยัดพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศด้วยการควบคุมการระบายอากาศตามปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	120
1035	ระบบบริหารจัดการข้อมูลเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายสำหรับตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิเพื่อประหยัดพลังงาน	126
1007	เทคนิคการปรับเทียบการทำนายค่าอุณหภูมิสูงสุดจากไฟล์ข้อมูลสภาพภูมิอากาศชนิดแอสกี	132
1042	การพัฒนาแบบตรวจวัดระดับออกซิเจนละลายแบบไร้สายเพื่อใช้ควบคุมเครื่องเติมอากาศในแหล่งน้ำ	138
1018	เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบสองระบบ	144

### Communication II

1040	การออกแบบและพัฒนาเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมแบบพกพาโดยใช้แอร์วีจ และแทปเลทบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์	152
1020	ระบบแสดงสมรรถนะของรถยนต์ผ่านโครงข่ายไร้สาย	158
1008	การระบุตำแหน่งภายในอาคาร โดยการวัดความแรงสัญญาณวิทยุแบบไร้สาย	163
1027	กระบวนการทำคิทเรอร์โดยใช้ชุดพัฒนาการเรียนรู้ดิจิทัลลอจิกไอ	169
1036	การออกแบบและสร้างต้นแบบโครงข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเพื่อการประยุกต์ใช้สำหรับระบบเฝ้าระวังและควบคุม	174

## การเพิ่มประสิทธิภาพของค่าปริมาณงานในระบบแลนไร้สาย โดยการประยุกต์ใช้วิธีการรวมกลุ่มลิงค์

### Improve the throughput value for wireless LAN System (Wi-Fi) with Link Aggregation

นิตติ ภูครองตา	ดร.ไพฑูริย์ รักเหลือ	ผศ.อิฐอรุณ ปิติมด
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
แขนงโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์	และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: nisit.p@en.rmutt.ac.th	E-mail: p_ruglure@hotmail.com	E-mail: itarun.p@en.rmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของค่าปริมาณงานในระบบแลนไร้สาย โดยการประยุกต์ใช้วิธีการรวมกลุ่มลิงค์ ซึ่งโดยปกติมีการใช้ อยู่ในระบบสายตามาตรฐาน IEEE802.3ad จากผลการทดลองพบว่า นอกจากค่า Interference Power และค่า SNR แล้ว ค่า Interference Power Station ยังมีผลต่อค่าปริมาณงานด้วย ซึ่งพบว่าค่าความแตกต่างระหว่างค่า Interference Power Station กับค่า Interference Power มีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าปริมาณงาน เพิ่มขึ้นด้วย

คำสำคัญ: การรวมกลุ่มลิงค์, ระบบแลนไร้สาย, 802.11, 802.3ad

#### Abstract

An application of Link Aggregation, which normally use in wire system in IEEE802.3ad standard, for wireless LAN System (Wi-Fi) to improve the throughput value is proposed in this paper. The experimental results show that not only the Interference Power value and SNR value affect to the throughput value but interference power station value also affect to the throughput value. If the difference value between the interference power value and the interference power station value increase, the throughput value is also increased.

Keywords: Link Aggregation, 802.11, Interference Power, wireless LAN

#### 1. บทนำ

ตามมาตรฐาน IEEE 802.3ad การรวมกลุ่มลิงค์ (Link Aggregation) [1] เป็นการรวมช่องสัญญาณอีเทอร์เน็ต (multiple Ether-channel) เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ในการติดต่อสื่อสาร โดยการนำเอาลิงค์มากกว่าหนึ่งลิงค์มารวมกัน ให้เป็นกลุ่มเดียว โดยใช้สื่อกลางแบบมีสายตามเทคโนโลยี ฟาสต์อีเทอร์เน็ต IEEE 802.3u [2] ที่ส่งข้อมูลสูงสุดได้ 100 Mbps (TX, RX) จากข้อดีของ IEEE 802.3ad การรวมกลุ่มลิงค์ที่มีการเพิ่มแบนด์วิดท์ในการสื่อสารในสื่อกลางแบบสาย (wire) จึงมีการนำมาใช้กับสื่อกลางแบบไร้สาย (wireless) แบบต่างๆ เช่น ไวแมกซ์ (WiMax), วิทยุ (Wi-Fi) [4] เพื่อเพิ่มค่าปริมาณงาน (throughput) ในการรับส่งข้อมูลไม่ว่าจะเป็นการปรับค่าดีเลย์ในการส่งแบบเครือข่ายไร้สาย[5] การจัดการปริมาณการให้โดยวิธี Support Vector Machine [6] ซึ่งเป็นการทำการรวมกลุ่มลิงค์เครือข่ายไร้สายแบบต่างๆ (Multi-Radio System) โดยไม่เฉพาะเจาะจงว่าเป็นเครือข่ายไร้สายแบบใด

บทความนี้นำเสนอการประเมินผลของค่าปริมาณงานของการรวมกลุ่มลิงค์เครือข่ายแลนไร้สาย 802.11bg โดยเปลี่ยนการรวมกลุ่มลิงค์จากเดิมที่สื่อกลางเป็นแบบสาย มาเป็นสื่อกลางที่เป็นแบบไร้สาย ในความถี่ที่ 2.4 GHz ใช้



ช่องสัญญาณ 20 MHz ที่ไม่รบกวนกัน 3 ช่องสัญญาณ เพื่อประเมินค่าปริมาณงาน โดยจะทดสอบที่ละช่องสัญญาณ ตั้งแต่ช่องสัญญาณที่ 1, 6 และ 11 ตามลำดับ และปรับค่า Interference Power ว่าจะส่งผลต่อค่าปริมาณงานอย่างไรบ้าง

## 2. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ถึงแม้ว่าการสื่อสารที่มีการรับส่งข้อมูลแบบมีสาย จะมีอัตราค่าปริมาณงานสูง แต่ข้อจำกัดของระบบคือไม่สามารถเดินระบบสายได้สะดวก ในบางพื้นที่ที่สภาพแวดล้อมไม่เอื้ออำนวย เช่น การเดินสายข้ามตึก อาคาร หรือแม้แต่การใช้งานชั่วคราว งานก็พำ งานรับพระราชทานปริญญาบัตร เป็นต้น ซึ่งหากกำลังทุนเดินระบบสายอาจต้องให้ค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน พร้อมทั้งรื้อถอนลำบาก ดังนั้นการสื่อสารแบบไร้สายจึงเข้ามามีบทบาทในการสื่อสารข้อมูล เนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้ง ลดภาระค่าใช้จ่าย และสามารถรื้อถอนได้ง่าย หรืองานด้านกระจายสัญญาณให้กับระบบความปลอดภัยต่างๆ เช่น การกระจายสัญญาณสำหรับกล้อง ไอพี วงจรปิดแบบไร้สาย หรือ ใช้กับระบบตรวจการณ์ระยะไกล แต่ข้อจำกัดของการสื่อสารก็จะมีในเรื่องของการรับส่งข้อมูลที่ให้อัตราการค่าปริมาณงาน ที่ค่อนข้างต่ำ เพราะมีปัจจัยในสภาพแวดล้อมที่ติดตั้ง รวมถึง ตึก อาคาร ที่จะมาลดทอนประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย จากปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงอยากเสนอแนวคิดในการรวมกลุ่มลิงค์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพช่องทางการสื่อสารแบบไร้สายให้เพิ่มมากขึ้นจากระบบเดิมจะใช้สื่อกลางแบบสายทำการรวมกลุ่มลิงค์ แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้สื่อกลางแบบไร้สายในการรวมกลุ่มลิงค์และประเมินผลของค่าปริมาณงาน

## 3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มาตรฐาน IEEE802.3ad การรวมกลุ่มลิงค์ หรือเรียกอย่างหนึ่งว่า อีเทอร์ แชนแนล (Ether Channel) นั้นเป็นคุณสมบัติที่ทำให้สามารถรวมหลายๆ อินเทอร์เน็ตแบบฟิสิคัล (Physical) เข้าด้วยกันเป็นอินเทอร์เน็ตแบบลอจิคัล

(Logical) เพียงอันเดียวได้ ใช้เพื่อแก้ปัญหาความคับคั่ง (Congestion) ในการใช้งานระบบเครือข่าย หรือใช้แก้ปัญหาเมื่อมีปริมาณการใช้งานระบบเครือข่ายมากเกินไปจนทำให้การรับ-ส่งข้อมูลทำได้ช้า เสมือนเป็นการเพิ่มเส้นทางข้อมูลขึ้น จากเส้นทางเดียวเป็นหลายๆ เส้นทาง เพื่อที่จะทำการกระจายปริมาณการใช้ (Traffic) ไปในหลายๆ เส้นทาง พร้อมทั้งยังเป็นการทำ ส่วนซ้ำซ้อน (Redundant) ในกรณีที่บางลิงค์ที่เป็นสมาชิกของอีเทอร์ แชนแนล เกิดมีปัญหาได้ และใช้โพรโทคอล (Protocol) Link Aggregation Control Protocol (LACP) ในการรับ-ส่ง ข้อมูลกัน

มาตรฐาน 802.11b (11 Mbps) เป็นมาตรฐานเครือข่ายแลนไร้สายที่ใช้ความถี่ย่าน 2.4 GHz ซึ่งเป็นความถี่เสรีที่ทุกประเทศเปิดให้ใช้โดยอิสระ และการที่ถูกระบุว่าเป็นมาตรฐานตั้งแต่ปี 1999 มีความเร็วในการทำงาน 4 ระดับ คือ 11, 5.5, 2 และ 1 Mbps เครือข่ายที่ให้บริการอินเทอร์เน็ตไร้สายแบบจุดพร้อมโยง (Hotspot) ส่วนใหญ่จะใช้มาตรฐานนี้ แต่เครือข่ายเครือข่ายแลนไร้สายมีปัญหาคือ มีความเร็วต่ำที่สุดในมาตรฐานเครือข่ายแลนไร้สาย

มาตรฐาน 802.11g (54 Mbps) มีความเร็วในการทำงานสูงถึง 54 Mbps และมีระยะการทำงานไกลสุดเท่ากับมาตรฐาน 802.11b ใช้ความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้งานได้เสรี มีความสามารถทำงานร่วมกับเครือข่ายแลนไร้สายตามมาตรฐาน 802.11b ได้

มาตรฐาน 802.11n (300 - 600 Mbps) เป็นแลนไร้สายที่มีความเร็วสูงสุดถึง 600 Mbps โดยส่งผ่าน 4 Stream ซึ่งประกอบไปด้วยเสาอากาศ 4 ชุดทั้งภาครับและส่ง แต่ละ Stream จะมีความเร็วที่ 150 Mbps สามารถใช้งานได้ทั้งย่านความถี่ 2.4 GHz และ 5 GHz หากใช้งานช่องสัญญาณขนาด 40 MHz จะส่งข้อมูลได้สูงกว่าการใช้ช่องสัญญาณขนาดมาตรฐานคือ 20 MHz โวลต์ 802.11n นี้จะเป็นมาตรฐานที่อยู่ในไต่บู้คใหม่ตั้งแต่ 2009 ขึ้นไป โดยจะสามารถรับส่งข้อมูล 2 - 3 Stream ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนภาครับส่ง

และเสา หากเป็นรุ่นที่มี 2 เสาจะมีความเร็วสูงสุดที่ 300 Mbps แต่ถ้าเป็นรุ่น 4 เสา จะมีความเร็วสูงสุดที่ 600 Mbps

4. วิธีการที่นำเสนอ

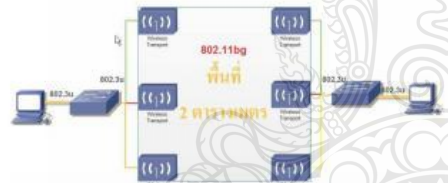
4.1 ภาพรวมของระบบ

การรวมกลุ่มลิงค์ระบบไร้สาย ดังแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การรวมกลุ่มลิงค์ระบบแลนไร้สาย

โดยจะมี ระบบรับ-ให้บริการ (Server/Client) A ใช้รับ-ส่งข้อมูลไปยัง ระบบรับ-ให้บริการ B ผ่านสวิตช์ A ที่ทำการรวมกลุ่มลิงค์ต่อกับระบบแลนไร้สาย ทำ Point-to-Point ผ่านสวิตช์ B ไปยังระบบรับ-ให้บริการ B ดังรูปที่ 2

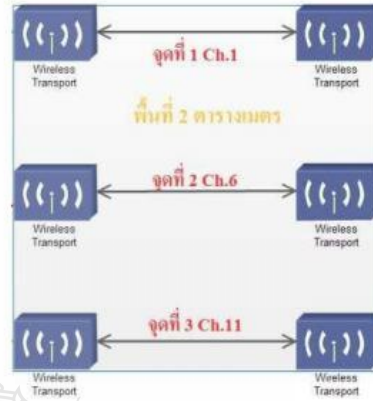


รูปที่ 2 แสดงการเชื่อมต่อการรวมกลุ่มลิงค์ของระบบแลนไร้สาย Server/Client A ใช้รับ-ส่งข้อมูลไปยัง Server/Client B

เริ่มแรกจะวาง Access Point ที่ใช้ทดสอบ แบ่งออกเป็น 3 จุดดังรูปที่ 3 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพค่าปริมาณงาน (throughput) ของการรวมกลุ่มลิงค์ของระบบแลนไร้สายที่แต่ละจุดและ 3จุดรวมกัน โดยใช้ IEEE 802.11bg

4.2 การออกแบบและพัฒนาระบบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบจะประกอบไปด้วย คอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง 1.Toshiba Satellite L100, HP Pavilion T7000 CPU1,6Ghz Ram 512 MB Ethernet Card 10/100



รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งการเชื่อมต่อการรวมกลุ่มลิงค์ของระบบแลนไร้สายทั้ง 3 จุดและ 3 ช่องสัญญาณ



รูปที่ 4 ภาพรวมของระบบการรวมกลุ่มลิงค์ระบบแลนไร้สายที่ทดสอบด้วยอุปกรณ์จริง(1)

Mb Full Duplex, สวิตซ์ที่รองรับการทำการรวมกลุ่มลิงค์ (Link Aggregation) 2 ตัว ในการทดสอบใช้ Cisco Catalyst 2960 24 พอร์ต ,สายUTP Cat5e 8 เส้น, แอคเซสพ้อยซ์ 6 ตัว D-Link 2 ตัว , ASUS RT10 4 ตัว , การ์ดวีดี

สเปกตรัมและค่าปริมาณงานของ Cisco รุ่น AIR-CT5502-K9-SE-WIFI-C

4.3 ข้อจำกัดของระบบ

ทดสอบในพื้นที่ 2 ตารางเมตร ที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง เนื่องจากเป็นระยะที่ทำให้สัญญาณมีประสิทธิภาพสูงสุด [7] ตำแหน่งการวาง 3 จุด 1.มุมพื้นที่ 2.กึ่งกลางพื้นที่ 3.มุมพื้นที่ ดังรูปที่ 3. และใช้ความถี่ 2.4 GHz ในช่องสัญญาณ 20 MHz ที่ช่องสัญญาณ 1, 6 และ 11



รูปที่ 5 ภาพรวมของระบบการรวมกลุ่มลิงค์ระบบแลนไร้สายที่ทดสอบด้วยอุปกรณ์จริง(2)

5. การทดสอบและผลการทดสอบ

5.1 สภาพแวดล้อมในการทดสอบ

การทดสอบจะทดสอบในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวางในระยะ 2 เมตร เนื่องจากเป็นระยะที่ทำให้สัญญาณมีประสิทธิภาพสูงสุด [7] และใช้ความถี่ 2.4 GHz ในช่องสัญญาณ 20 MHz

5.2 ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

ทดสอบค่าปริมาณงาน ของการรวมกลุ่มลิงค์ โดยใช้เครือข่ายแลนไร้สาย IEEE 802.11bg ทดสอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง (Server/Client) กำหนดไอพีแอดเดรส เครื่องแม่ข่าย เครื่องที่ 1 : 192.168.0.1 , เครื่องลูกข่าย เครื่อง

ที่ 2 : 192.168.0.2 และใช้ โปรแกรม nuttcp-5.5.5.win32 [8] เพื่อสร้าง Traffic รับ-ส่งข้อมูลจากเครื่องลูกข่ายไปยังเครื่องแม่ข่าย

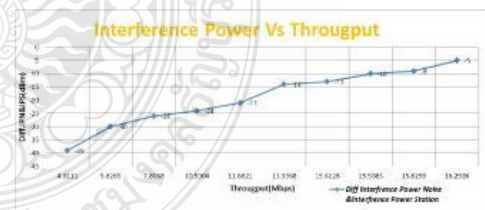


รูปที่ 6 การรวมกลุ่มลิงค์ด้วย IEEE 802.11

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าถ้าค่า ความแตกต่างระหว่าง Interference Power Station กับค่า Interference Power Noise (แทนด้วยตัวแปร A) มีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่า Throughput (แทนด้วยตัวแปร B) เพิ่มขึ้นด้วย ตัวอย่างเช่นเมื่อค่า Interference มีค่า-5dBm สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้ 16.2926 Mbps

ตารางที่ 1 ค่าความแตกต่างระหว่าง Interference Power และ Throughput

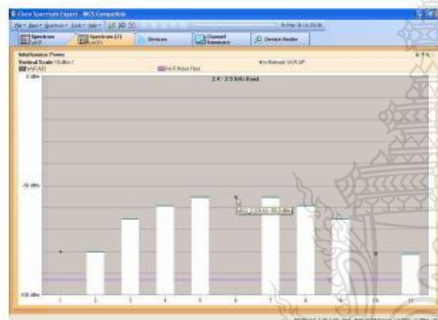
Interference Power Noise	Interference Power Station	Diff Interference Power Noise & Interference Power Station (A)	Throughput avg (B)
-79	-60	-39	6.0111
-78	-59	-30	5.8205
-53	-37	-26	7.8068
-29	-29	-28	10.5304
-29	-38	-21	11.6871
-32	-39	-14	13.3368
-50	-37	-13	15.6128
-53	-41	-10	15.5083
-45	-36	-9	15.8293
-40	-35	-5	16.2926



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแตกต่างระหว่าง A กับ B



รูปที่ 8 ค่า Interference Power ก่อนต่อ Link Aggregation



รูปที่ 9 ค่า Interference Power เมื่อต่อ Link Aggregation



รูปที่ 10 ค่า SNR เมื่อต่อ Link Aggregation

```
C:\nuttcp>nuttcp -i -win -t 192.168.0.1
2.0768 MB / 1.00 sec = 17.4282 Mbps
2.1328 MB / 1.00 sec = 17.8852 Mbps
2.0689 MB / 1.00 sec = 17.3522 Mbps
2.0873 MB / 1.00 sec = 17.5889 Mbps
1.9828 MB / 1.00 sec = 16.6288 Mbps
2.1913 MB / 1.00 sec = 18.3825 Mbps
2.1439 MB / 1.00 sec = 17.9833 Mbps
2.1510 MB / 1.00 sec = 18.0512 Mbps
2.1847 MB / 1.00 sec = 18.3258 Mbps
2.1323 MB / 1.00 sec = 17.9286 Mbps
2.1887 MB / 1.00 sec = 18.2915 Mbps
2.1847 MB / 1.00 sec = 18.3298 Mbps
2.1465 MB / 1.00 sec = 18.0628 Mbps
1.4572 MB / 1.00 sec = 12.2263 Mbps
29.1258 MB / 14.66 sec = 16.6679 Mbps 2 *TX 0 *RX
```

รูปที่ 11 ค่าปริมาณงานที่ทดสอบจากโปรแกรม nuttcp

6.สรุป

การรวมกลุ่มลิงค์ในระบบสายตามาตราฐาน IEEE802.3ad เมื่อนำมาใช้กับระบบแลนไร้สายเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของค่าปริมาณงาน ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อค่าปริมาณงานทั้งในเรื่องของ Interference Power, SNR ซึ่งหากมีค่ามากจะทำให้ค่าปริมาณงานมีค่าเพิ่มขึ้น และแสดงให้เห็นว่านอกจากค่า Interference Power แล้ว ตัวแปร Interference Power Station ก็ส่งผลต่อค่า ค่าปริมาณงานด้วยเช่นกัน

6.1 แนวทางการพัฒนาต่อ

ทดสอบโดยใช้ย่านความถี่ 2.4 GHz และเปรียบเทียบหากมีการ Interference ของช่องสัญญาณทับซ้อนกัน จะมีผลต่อค่า ค่าปริมาณงาน เช่นไร และหากมีผลจะ มาสามารถที่จะมีแนวคิดเพื่อแก้ไขหรือไม่ และสามารถ ทดสอบโดยใช้ย่านความถี่ 5 GHz เพื่อทดสอบในมาตรฐาน 802.11n ที่สามารถส่งได้ระยะทางไกลขึ้นด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการทดสอบ และเก็บข้อมูล

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Std 802.3u-1995 "IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Networks: Supplement to Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications Media Access Control (MAC) Parameters, Physical Layer, Medium Attachment Units, and Repeater for 100 Mb/s Operation, Type 100BASE-T (Clauses 21-30)."
- [2] IEEE Std 802.3ad-2000, "Amendment to carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specification aggregation of multiple link segments"
- [3] IEEE Std 802.11v-2011 "IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and information exchange between systems--Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 8: IEEE 802.11 Wireless Network Management."
- [4] H. Raza, "A brief survey of radio access network backhaul evolution: part 1," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, pp. 164-171, 2011.
- [5] A. Yamaguchi, *et al.*, "Downlink Link Aggregation Performance with Delay Adjustment Capability in Multi-Radio Access System," Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd, 2011.
- [6] K. Hashiguchi, *et al.*, "Traffic allocation control using support vector machine in heterogeneous wireless link aggregation," Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2011 IEEE, 2011.
- [7] S. Samad and Peng Li., "Evaluating IPv6 in Peer-to-Peer 802.11n Wireless LANs," *IEEE Internet Computing*, 2011 IEEE, 2011.
- [8] Nuttcp, <http://nuttcp.org/nuttcp/Welcome%20Page.html>

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายนิสิต ภูครองตา
วัน เดือน ปีเกิด	5 มกราคม 2525
ที่อยู่	207 หมู่ 9 บ้านดงบัง ตำบลหัวนาคำ อำเภอยางตลาด จังหวัดกาฬสินธุ์ 46120
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการทำงาน	ตำแหน่งวิศวกรเครือข่าย บริษัท ยูไนเต็ด อินฟอร์เมชั่น ไฮเวย์ จำกัด (UIH)

