

การออกแบบการส่งไร้สายแบบ Multi-Hop สำหรับโครงข่ายเข้าถึงสื่อสารไร้สาย  
ร่วมกับสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

นางสาวปณยา เพ็งบุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

A DESIGN OF MULTI-HOP WIRELESS TRANSMISSION FOR WIRELESS-OPTICAL  
BROADBAND ACCESS NETWORK (WOBAN)

Miss Panaya Pengboon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบการส่งไร้สายแบบ Multi-Hop สำหรับโครงข่าย  
เข้าถึงสื่อสารไร้สายร่วมกับสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

โดย

นางสาวปณยา เพ็งบุญ

สาขาวิชา


วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พสุ แก้วปลั่ง


---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

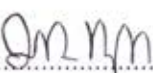
  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง)


  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญจน วุฒิสีทธิกุลกิจ)

  
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

ปณยา เพ็งบุญ : การออกแบบการส่งไร้สายแบบ Multi-Hop สำหรับโครงข่ายเข้าถึงสื่อสารไร้สายร่วมกับสื่อสารผ่านเส้นใยแสง. (A DESIGN OF MULTI-HOP WIRELESS TRANSMISSION FOR WIRELESS-OPTICAL BROADBAND ACCESS NETWORK (WOBAN)) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 87 หน้า

การให้บริการ WOBAN คือการนำข้อดีของทั้งเทคโนโลยี FTTH และ WLAN มารวมกันนั่นคือ ความน่าเชื่อถือของระบบ และอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงจาก FTTH และ ความยืดหยุ่นของ WLAN วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์จะนำเสนออัลกอริทึมสำหรับออกแบบ WOBAN โดยพิจารณาเงื่อนไขต่างๆของการสื่อสารสัญญาณข้อมูลระหว่างกันของผู้ใช้บริการแบบ multi-hop บนทอพอโลยีแบบตาข่าย (mesh topology) นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงการแก้ไขในกรณี ONU เกิดความเสียหายหรืออยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ อัลกอริทึมที่จำลองขึ้นมา นั้นจะพิจารณาในส่วน wireless part ที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างผู้ใช้บริการแบบ multi-hop ซึ่งในแต่ละข่ายเชื่อมโยงระหว่าง 2 access point (AP) ใดๆจะเป็นระยะทางที่สั้นที่สุด และตำแหน่งของ ONU ที่เหมาะสมจะถูก minimize ด้วยแนวความคิดของ Greedy approach มากไปกว่านั้นอัลกอริทึมที่ออกแบบขึ้นมา นั้นยังสามารถเลือกจำนวน hop ที่ต้องการได้ในการเข้าสู่ ONU ได้รวมถึง กำหนดเส้นทางป้องกันเมื่อเกิดเหตุขัดข้องกับ ONU ใดๆ

ผลจากการทดสอบพบว่า ในพื้นที่จำลองขนาด 500 x 500 ตารางเมตร และผู้ให้บริการ 100 ราย จะได้ว่าสำหรับกรณีผู้ใช้บริการเชื่อมต่อสู่อ ONU ภายใน 2, 3 และ 4 hop ใช้จำนวน ONU ทั้งสิ้น 29, 14 และ 9 ตัว ตามลำดับ เมื่อกำหนดเงื่อนไขในการให้บริการของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ โดยใช้ทฤษฎี wireless propagation ร่วมด้วย จะได้ผลว่า ONU มีระยะการให้บริการที่ 100 เมตร โดยมีอัตราการรับส่งข้อมูล 900 Mb/s ส่วน AP ของผู้ใช้บริการมีระยะการให้บริการที่ 70 เมตร และมีอัตราการรับส่งข้อมูล 300 Mb/s ทดสอบอัลกอริทึมที่เพิ่มเงื่อนไขระยะทางในพื้นที่ทดสอบเดิมและผู้บริการเดิม จะได้ว่า กรณีผู้ใช้บริการเชื่อมต่อสู่อ ONU ภายใน 2, 3 และ 4 hop ใช้จำนวน ONU ทั้งสิ้น 30, 15 และ 10 ตัว ตามลำดับ รวมทั้งคำนวณอัตราการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้บริการที่ได้รับน้อยที่สุด จะได้เท่ากับ 150, 30, 12.5 Mb/s ตามลำดับ หลังจากเพิ่มเงื่อนไขเส้นทางป้องกัน จะได้ผลว่า อัตราการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้บริการที่ได้รับน้อยที่สุดในขณะที่เกิดความผิดปกติของระบบ จะลดลงเหลือ 9.375, 2.57, 1.04 Mb/s ในกรณี 2, 3, 4 hop ตามลำดับ สุดท้ายเมื่อทดสอบอัลกอริทึมกับแผนที่จริงขนาดประมาณ 500 x 800 เมตร มีจำนวนผู้ใช้บริการ 214 หลังคาเรือน ใช้จำนวน ONU ทั้งสิ้น 61, 32 และ 26 ตัว ในกรณี 2, 3 และ 4 hop ตามลำดับ ในกรณีปกติ อัตราการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้บริการที่น้อยที่สุดในกรณีปกติที่ 2, 3 และ 4 hop นั้นเป็น 100, 33.33, 18.75 Mb/s ตามลำดับ และอัตราการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้บริการที่ได้รับน้อยที่สุดในขณะที่เกิดความผิดปกติของระบบ จะลดลงเหลือ 8.65, 2.27, 1.04 Mb/s ตามลำดับ

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่อนิสิต ..... *ปณยา เพ็งบุญ*  
 สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....   
 ปีการศึกษา ..... 2554 .....



# # 5370438221: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: WOBAN / MULTI-HOP CONNECTION / WIRELESS MESH TOPOLOGY

PANAYA PENGBOON: A DESIGN OF MULTI-HOP WIRELESS TRANSMISSION FOR WIRELESS-OPTICAL BROADBAND ACCESS NETWORK (WOBAN). ADVISOR: ASST. PROF. PASU KAEWPLUNG, Ph.D., 87 pp.

The hybrid wireless optical broadband access network (WOBAN) is a technology that can utilize both advantages of both FTTH and WLAN, such as, the reliability and high capacity of optical communication, and the flexibility of wireless network. This objective of this thesis is to present an algorithm for the design of WOBAN taking into account various conditions of multi-hop wireless connection, on mesh topology, among subscribers in WOBAN. Moreover, this algorithm also provides the solution for the problems of a failure either when an ONU device is inactive.

The algorithm will assign the wireless parts, which connect among subscribers and ONUs under the condition that guarantees the links between any two APs are all the shortest paths. The suitable placement of ONUs is also minimized by applying the Greedy approach. Moreover, our proposed algorithm can assign the maximum number of hop from subscribers to any ONUs in the network.

For the validation of algorithm, we use a sample area size 500 m. x 500 m. and number of subscribers is 100 randomly distributed over the sample area. The result shows that the amount of ONUs required in the network for 2, 3, 4 hops are 29, 14 and 9, respectively. By applying the principle of wireless propagation, we find that transmission range of ONUs is 100 m, providing the data rate of 900 Mb/, while those of the subscribers' AP is 70 m with the data rate of 100 Mb/s. For this case, the amount of ONUs are 30, 15 and 10 for subscriber can connect the ONU within 2, 3, and 4 hops, respectively. The minimum subscriber's data rates in network are 150, 30 and 12.5 Mb/s for subscribers that connect with ONUs within 2, 3, and 4 hops, respectively. For the network when operates as a protection condition, the minimum subscriber's data rates is 9.375, 2.57, and 1.04 Mb/s, respectively. Lastly, we employ our algorithm in real geographical map of approximately 500 m. x 800 m containing 214 subscribers. The amount of necessary ONUs are 61, 32, and 26, for 2-, 3-, and 4-hop connections, respectively. The minimum subscriber's data rates in normal operation are 100, 33,33, 18.75 Mb/s, on the other hand for the protection operation, the minimum data rates are 8.65, 2.27, 1.04 Mb/s, for 2-, 3-, and 4-hop connections, respectively.

Department :..... Electrical Engineering ..... Student's Signature..... *วชิระ มิ่งบุญ* .....  
Field of Study :... Electrical Engineering ..... Advisor's Signature..... *[Signature]* .....  
Academic Year :... 2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. พลุ แก้วปลั่ง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้พื้นฐานซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัย ทั้งทางตรงและทางอ้อม อีกทั้งยังคอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมไปถึงแนวคิดในการทำงานวิจัย ซึ่งเปรียบได้กับแรงผลักดันอันสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์อุปการะและสถานที่จาก ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณโครงการทุนศิษย์กัณภูมิ ที่ให้เงินสนับสนุนในการทำงานวิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี

กำลังใจและบรรยากาศดี ๆ ในการทำงานวิจัย จากเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัย เป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จ และทำที่สุดขอขอบคุณ คุณพ่อและคุณแม่ รวมถึงญาติสนิทมิตรสหาย ซึ่งเปี่ยมเสมือนเบื้องหลัง ที่ให้การสนับสนุนทั้งร่างกายและแรงใจตลอดมาอย่างหาที่สุดไม่ได้ ดังนั้นจึงมีคำกล่าวใดๆ ที่สามารถทดแทนสิ่งดีๆ เหล่านี้ได้ จึงคงไว้ซึ่งความรู้สึกขอบคุณตลอดไป

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1.1 .....	1
แนวทางของวิทยานิพนธ์ 1.2.....	9
วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 1.3 .....	10
ขั้นตอนการดำเนินงาน 1.4.....	10
ขอบเขตวิทยานิพนธ์ 1.5 .....	11
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 1.6 .....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	13
ทฤษฎีพื้นฐานของ 2.1FTTH .....	13
2.1.1 ความเป็นมาของ FTTH .....	13
2.1.2 ข้อดีของระบบ FTTH.....	16
2.1.2.1 ระบบมีความเร็วสูง (High Capacity) .....	16
2.1.2.2 ระบบมีความน่าเชื่อถือ (System Reliability) .....	17
2.1.2.3 ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า (FTTH Powering).....	18
2.1.3 เทคโนโลยีที่สำคัญที่ใช้ใน FTTH.....	18
2.1.3.1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ .....	18
2.1.3.2 ตัวแยกและส่งผ่านสัญญาณตามความยาวคลื่น (Splitter and WDM coupler).....	20
2.1.3.3 เครื่องขยายเชิงแสงแบบพาสซีฟหรือ PON .....	21
2.1.3.4 การสื่อสารข้อมูลด้วยระบบเอทีเอ็ม (ATM transport) .....	21
2.1.3.5 การบีบอัดข้อมูลภาพ (video compression).....	22

2.1.4 โครงสร้างทางเทคนิคของระบบ FTTH .....	23
2.1.4.1 โครงสร้างพื้นฐาน.....	24
2.1.4.2 รูปแบบการเชื่อมต่อใยสายส่งสัญญาณ .....	26
2.1.4.3 มาตรฐาน PON.....	27
2.1.4.3.1 ข้อกำหนด ITU-TG.983 .....	27
2.1.4.3.2 ข้อกำหนด ITU-T G.984 .....	27
2.1.4.3.3 ข้อกำหนด IEEE802.3ah .....	28
2.1.4.4 ข้อกำหนด IEEE 802.3av .....	28
ทฤษฎีพื้นฐานของเทคโนโลยีไร้สาย 2.2 .....	29
2.2.1 ความเป็นมาของเทคโนโลยีไร้สาย .....	29
2.2.2 องค์ประกอบของเทคโนโลยีไร้สาย.....	30
2.2.3 ข้อดีของระบบไร้สาย .....	31
2.2.4 มาตรฐาน IEEE 802.11 .....	31
2.2.4.1 มาตรฐาน IEEE 802.11a .....	32
2.2.4.2 มาตรฐาน IEEE 802.11b .....	32
2.2.4.3 มาตรฐาน IEEE 802.11g .....	32
2.2.4.4 มาตรฐาน IEEE 802.11n.....	32
2.2.5 ลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN .....	33
2.2.5.1 โหมด infrastructure .....	33
2.2.5.2 โหมด ad-hoc หรือ peer-to-peer .....	34
2.2.6 การลดทอนของสัญญาณ .....	34
2.2.6.1 pathloss .....	34
2.2.6.2 fading .....	35
2.2.6.3 shadowing .....	36
2.2.7 model for wireless signal propagation.....	37
2.2.7.1 Erceg model .....	37
2.2.7.2 Hata-Okamura model .....	39
2.2.7.3 Walfish – Ikekami model.....	40
ทฤษฎีพื้นฐาน 2.3 WOBAN.....	43

2.3.1	ความเป็นมาของ WOBAN .....	43
2.3.2	ความรู้พื้นฐานเทคโนโลยี WOBAN .....	44
2.3.3	โครงสร้างของ WOBAN.....	44
2.3.4	การจัดการโครงข่าย: การกำหนดอัลกอริทึมในWOBAN.....	48
2.3.4.1	Random and deterministic approaches.....	48
2.3.4.2	Greedy approach [27].....	48
2.3.4.3	Combinatorial optimization: simulated annealing (SA) approach [29]	49
2.3.4.4	Joint optimization: mixed-integer-programming (MIP) approach [7] ..	49
บทที่ 3	การออกแบบอัลกอริทึมสำหรับกำหนดตำแหน่งการวางของ ONU โดยใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์.....	51
	การสร้างการเชื่อมต่อไร้สายระหว่างผู้ใช้บริการ 3.1.....	52
	การ 3.2optimization ตำแหน่งการวางของ ONU .....	57
	การทดสอบอัลกอริทึม 3.3 .....	57
บทที่ 4	การทดสอบอัลกอริทึมซึ่งมีเงื่อนไขเรื่องระยะทางในการให้บริการ .....	64
	การหาระยะการให้บริการ 4.1ของ ONU และ access point .....	64
	4.1.1 การออกแบบระยะการให้บริการของ ONU และผู้ใช้บริการ .....	64
	การทดสอบอัลกอริทึม ในกรณีซึ่งมีเงื่อนไขระยะการให้บริการ 4.2 .....	69
บทที่ 5	การทดสอบอัลกอริทึมซึ่งมีเงื่อนไขเรื่องเส้นทางป้องกัน .....	75
	5.1 การออกแบบเส้นทางป้องกัน .....	75
	5.2 การทดสอบอัลกอริทึม .....	75
	5.3 ทดสอบอัลกอริทึมกับแผนที่จริง .....	79
บทที่ 6	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	82
	6.1 สรุปผลการวิจัย .....	82
	6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต .....	83
	รายการอ้างอิง.....	84
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	87

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 จำนวนของ BS และ ONU [7].....	7
ตารางที่ 1.2 ระยะทางเฉลี่ยจนถึงผู้ใช้บริการในแต่ละ ONU [8].....	8
ตารางที่ 1.3 เปรียบเทียบราคา user / Mbps ระหว่าง Wi-Fi WiMAXและ PON [8].....	9
ตารางที่ 2.1 ค่า a,b, c ของแต่ละพื้นผิว.....	38
ตารางที่ 2.2 ค่า $a(h_m)$ ของแต่ละพื้นผิว.....	39
ตารางที่ 2.3 ค่า Kของแต่ละพื้นผิว .....	40
ตารางที่ 2.4 ข้อดีข้อเสียของวิธีการวาง ONU รูปแบบต่างๆของ WOBAN [4].....	50
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่าง subscribers' info table.....	53
ตารางที่ 3.2 ตาราง route table .....	54
ตารางที่ 3.3 จำนวน ONU ที่ใช้ในแต่ละกรณี .....	63
ตารางที่ 4.1 802.11n Association Data Rates (MCS Rate Indices) .....	68
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของจำนวน ONU ของผู้ใช้บริการแบบสุ่มจำนวน 10 แบบ ที่ใช้ ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ .....	73
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของอัตราการรับส่งข้อมูล (Mb/s) ที่น้อยที่สุดของผู้ใช้บริการแบบสุ่ม จำนวน 10 แบบ ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ .....	73
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบจำนวน ONU เฉลี่ยใน 10 พื้นที่จำลอง ที่ใช้ในกรณีไม่มี ข้อจำกัดของระยะรับส่งข้อมูลและกรณีที่มีข้อจำกัดของระยะรับส่งข้อมูล .....	74
ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปผลที่ได้จากการทดสอบอัลกอริทึม .....	77
ตารางที่ 5.2 จำนวน ONU ที่ใช้ในการทดสอบ ณ พื้นที่หมู่บ้านลาดพร้าว.....	81
ตารางที่ 5.3 อัตราข้อมูลที่ได้ในกาทดสอบ ณ พื้นที่หมู่บ้านลาดพร้าว .....	81



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ความต้องการแบนด์วิดท์ (bandwidth) ในแต่ละประเภทของการใช้บริการ และ เปรียบเทียบความสามารถในการรับ – ส่งข้อมูล ระหว่าง xDSL และ FTTH.....	2
รูปที่ 1.2 การพัฒนามาตรฐานของ PON.....	3
รูปที่ 1.3 เปรียบเทียบราคาค่าติดตั้งระหว่าง FTTH และ WLAN[1] [2] .....	4
รูปที่ 1.4 แสดงโครงสร้างของ WOBAN [6] .....	5
รูปที่ 1.5 ตำแหน่งของ ONU ในงานวิจัย [2] เปรียบเทียบระหว่างการใช้ Greedy algorithm และ การใช้วิธี simulated annealing .....	8
รูปที่ 2.1 จำนวนผู้ใช้บริการที่เพิ่มขึ้นของ FTTH และ DSL ในประเทศไทยตั้งแต่ ปี ค.ศ. 2002 ถึงปี ค.ศ. 2009 [17] .....	15
รูปที่ 2.2 ระบบสายเคเบิลเส้นใยแสงในระบบ FTTH ที่มีการเชื่อมโยงเส้นใยแสง ทั้งที่เป็นแบบแขวนอากาศหรือฝังดินไปยังบ้านผู้ใช้โดยตรง [18].....	15
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเทคนิคพื้นฐานของระบบ FTTH .....	23
รูปที่ 2.4 รายละเอียดโครงสร้างของ FTTH [19].....	23
รูปที่ 2.5 รูปแบบการสื่อสารสัญญาณของ FTTH และการกระจายสัญญาณภายในบ้านผู้ใช้ [16]....	25
รูปที่ 2.6 รูปแบบการเชื่อมโยงสายส่งเคเบิลเส้นใยแสงในระบบ FTTH.....	26
รูปที่ 2.7 รูปแบบของ Wireless LAN [21].....	30
รูปที่ 2.8 การเชื่อมต่อแบบ infrastructure [24] .....	33
รูปที่ 2.9 การทำงานในโหมด ad-hoc หรือ peer-to-peer mode [25].....	34
รูปที่ 2.10 แสดง free-space propagation [26] .....	35
รูปที่ 2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ multipath ที่ระยะต่างๆ เนื่องจาก การรวมและหักล้างกัน.....	36
รูปที่ 2.12 แสดงการเกิด shadowing ของสัญญาณ [26].....	37
รูปที่ 2.13 โครงสร้างเทคโนโลยี WOBAN [9] .....	45
รูปที่ 2.14 โครงสร้างการให้บริการ WOBAN [27] .....	46
รูปที่ 2.15 โปรโตคอล upstream และ downstream ของ WOBAN [28].....	46
รูปที่ 3.1 โมเดลการเดินทางของสัญญาณเมื่อผู้ใช้บริการเชื่อมต่อเข้ากับจำนวน hop ที่ต้องการ .....	51

รูปที่ 3.2 การหาระยะห่างระหว่าง (0,0) ถึง ผู้ใช้บริการทุกราย..... 53

รูปที่ 3.3 การหาระยะห่างจาก subscriber#1 ถึง ผู้ใช้บริการที่เหลือทั้งหมด ..... 55

รูปที่ 3.4 การหาระยะห่างจาก subscriber#1 ถึง ผู้ใช้บริการที่เหลือทั้งหมด และ จาก subscriber#1-1 ถึง ผู้ใช้บริการที่เหลือทั้งหมด ..... 56

รูปที่ 3.5 การสร้าง ONU ใหม่..... 57

รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2 hop..... 58

รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบตำแหน่ง ONU ระหว่างการทำการ optimize ตำแหน่งของ ONU และยังไม่ optimize ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 2hop ..... 58

รูปที่ 3.8 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 3 hop..... 59

รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบตำแหน่ง ONU ระหว่างการทำการ optimize ตำแหน่งของ ONU และยังไม่ optimize ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 3hop ..... 60

รูปที่ 3. 10 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 4 hop..... 61

รูปที่ 3. 11 เปรียบเทียบตำแหน่ง ONU ระหว่างการทำการ optimize ตำแหน่งของ ONU และยังไม่ optimize ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 4hop..... 61

รูปที่ 3. 12 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 5 hop..... 62

รูปที่ 4.1 ONU ที่ถูกออกแบบการส่งสัญญาณ 3 ส่วนส่วนละ 120 องศา ..... 64

รูปที่ 4.2 ตัวอย่างของแบบจำลอง COST-231Walfisch-Ikegami ที่ใช้ในการทดสอบ[3] ..... 65

รูปที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่อยู่ระหว่างตัวส่งสัญญาณถึงตัวรับสัญญาณ[3] ..... 65

รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง path loss และระยะทางระหว่าง ONU ถึง ผู้ใช้บริการ และจากผู้ใช้บริการถึงผู้ใช้บริการ ..... 66

รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง received power และระยะทางจาก ONU ถึง ผู้ใช้บริการและระยะทางจากผู้ใช้บริการถึงผู้ใช้บริการ ..... 67

รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2 hop ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ .....	69
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 3 hop ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ .....	70
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 4 hop ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ .....	71
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน ONU ที่ใช้ในแต่ละพื้นที่จำลอง ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2, 3 และ 4 hop ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ .....	72
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรับ-ส่งข้อมูลที่ใช้ในแต่ละพื้นที่จำลอง ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2, 3 และ 4 hop ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ .....	72
รูปที่ 5.1 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2 hop ในกรณีที่มีเส้นทางป้องกัน .....	75
รูปที่ 5.2 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 3 hop ในกรณีที่มีเส้นทางป้องกัน .....	76
รูปที่ 5.3 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 4 hop ในกรณีที่มีเส้นทางป้องกัน .....	76
รูปที่ 5.4 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 3 hop ในกรณีที่มีเส้นทางป้องกันและมีการเพิ่มจำนวน ONU .....	78
รูปที่ 5.5 แผนที่จรีที่หมู่บ้านลาดพร้าว ซอยโพธิ์แก้ว กทม. ....	79
รูปที่ 5.6 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2hop เมื่อนำไปประยุกต์กับแผนที่จริง .....	80

รูปที่ 5.7 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อ เข้าสู่ ONU ภายใน 3 hop เมื่อนำไปประยุกต์กับแผนที่จริง .....	80
รูปที่ 5.8 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อ เข้าสู่ ONU ภายใน 4 hop เมื่อนำไปประยุกต์กับแผนที่จริง .....	81

## บทที่ 1

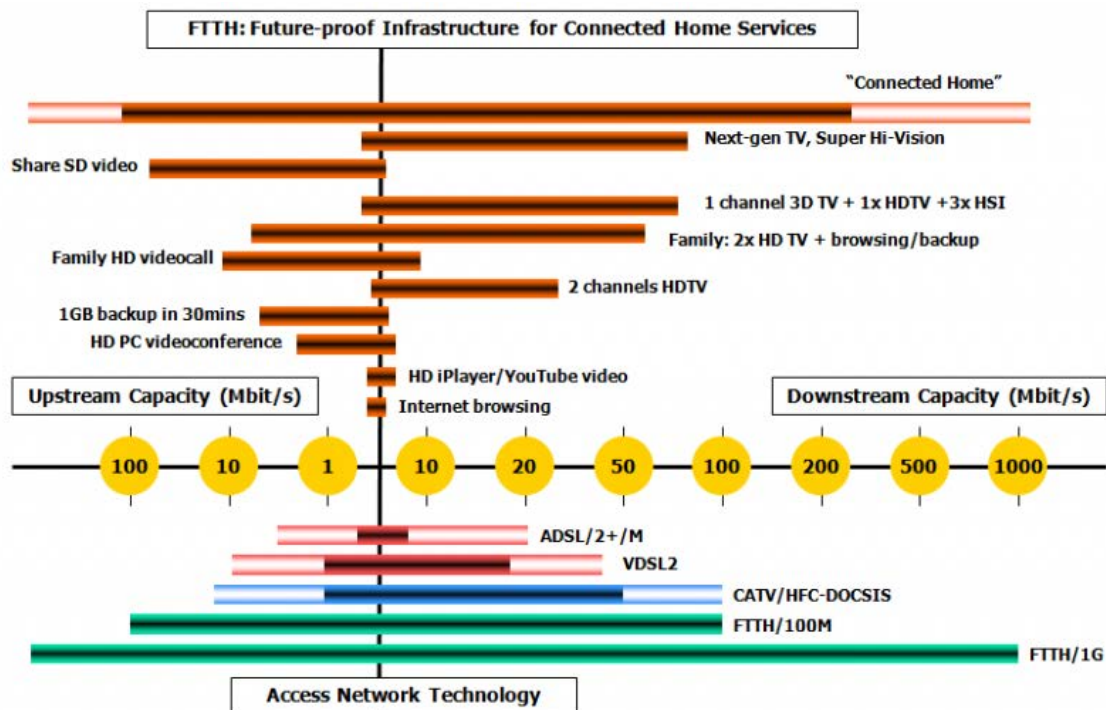
### บทนำ

การสื่อสารเป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญและขาดไม่ได้ในปัจจุบัน การสื่อสารมีการเชื่อมโยงและสื่อสารข้อมูลระหว่างกันไปทั่วโลก ดังนั้นการพัฒนาการสื่อสารโทรคมนาคมเป็นสิ่งสำคัญและสำคัญอย่างยิ่งในการช่วยพัฒนาประเทศทั้งในด้านเศรษฐกิจ การศึกษา รวมทั้งคุณภาพชีวิตของประชาชนในประเทศ รวมถึงการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันกับนานาชาติที่มั่นคงและยั่งยืน การพัฒนาเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ล้วนแล้วแต่เพื่อให้มนุษย์ดำเนินชีวิตได้อย่างสบายขึ้น สะดวกขึ้น รวดเร็วขึ้น เช่นเดียวกับแนวคิดเรื่อง e-society ที่ถูกพัฒนามาเพื่อเพิ่มความสะดวกรวดสบายในการเข้าถึงความบันเทิง ธุรกิจ การศึกษาและการดำเนินชีวิต ภายใต้บริการ เช่น e-health e-government e-education รวมทั้งการให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง บริการ interactive TV video on demand หรือ video streaming online game และ music on demand บริการดังกล่าวเหล่านี้เมื่อถูกผู้ใช้บริการใช้บริการจะกลายเป็นข้อมูลปริมาณมหาศาลกระจายไปในโครงข่าย

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบสื่อสารนั้นสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ ระบบสื่อสารที่ใช้สาย (wire line) และระบบสื่อสารไร้สาย (wireless) ซึ่งทั้ง 2 ระบบนั้นล้วนแต่มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ซึ่งล้วนแล้วแต่จุดประสงค์ของผู้ใช้บริการ การสื่อสารโดยใช้สายที่นิยมใช้กันมากก็คือ สายทองแดง (copper wired) และเทคโนโลยีที่เป็นที่นิยมสำหรับสายทองแดงคือ asynchronous digital subscriber line (ADSL) ซึ่งผู้ใช้บริการได้รับอัตราเฉลี่ยของข้อมูลเพียงไม่เกิน 24 Mb/s ในขณะที่การสื่อสารผ่านเส้นใยแสงนั้น มีความเร็วมากถึง 1000 Mb/s เลยทีเดียว และจากความเร็วที่ผู้ใช้บริการต้องการนั้นมีเกินความสามารถของ xDSL ดังแสดงใน รูปที่ 1.1 [1] โดยเฉพาะเทคโนโลยี next generation network (NGN) ที่คาดว่าจะต้องเป็นการสื่อสารหลักในอนาคต ดังนั้นเส้นใยแสง จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกซึ่งปัจจุบันได้รับความนิยมมากขึ้น เส้นใยแสงมีความสามารถรองรับการส่งสัญญาณในอัตราข้อมูลสูง ผ่านโครงข่ายที่เรียกว่า passive optical network (PON) ซึ่งใช้การส่งในรูปแบบ point-to-multipoint (P2MP) รวมถึงใช้อุปกรณ์ที่เป็น passive ทั้งหมด การบริการที่ได้รับความนิยมที่สุดสำหรับ access network ทางแสงปัจจุบันคือ

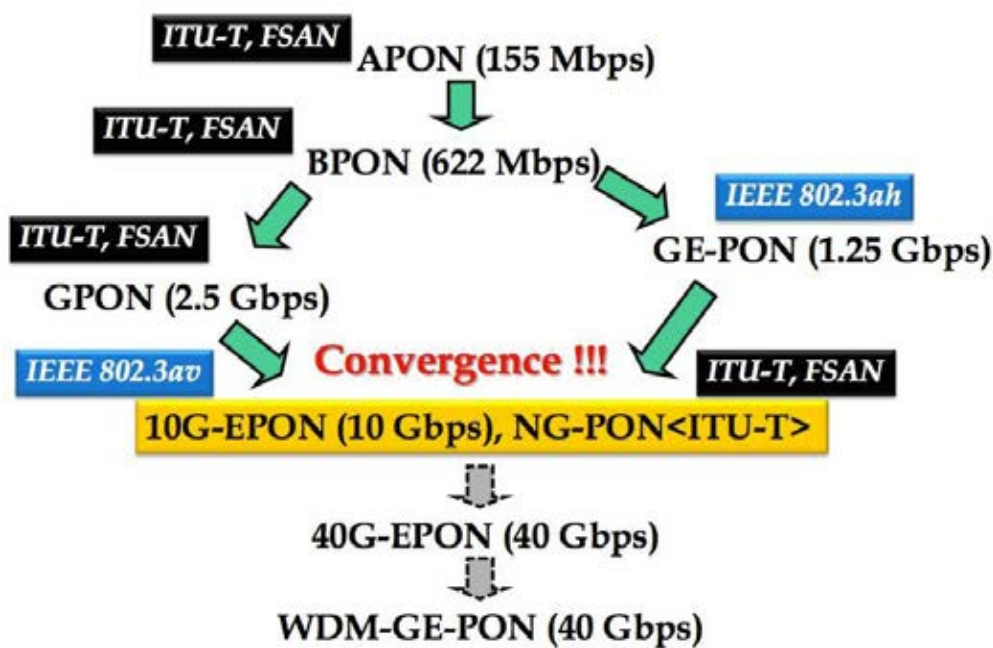
fiber-to-the-home (FTTH) ซึ่งมีความเร็วสูงสุดถึง 10 Gb/s ในปัจจุบัน ทั้งใน uplink และ downlink และสามารถพัฒนาไปได้ถึง 40 Gb/s และ 100 Gb/s ในอนาคตได้อีกด้วย



รูปที่ 1.1 ความต้องการแบนด์วิดท์ (bandwidth) ในแต่ละประเภทของการใช้บริการ และเปรียบเทียบความสามารถในการรับ – ส่งข้อมูล ระหว่าง xDSL และ FTTH

การให้บริการ FTTH ผ่านโครงข่าย PON มีข้อดีคือการลดต้นทุนของอุปกรณ์ในโครงข่าย ทำให้ FTTH สามารถให้บริการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงแก่ผู้ใช้บริการได้ด้วยราคาค่าบริการค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้ ในการใช้เพียงเส้นใยแสงและ splitter ในการสื่อสารสัญญาณ ยังช่วยให้ไม่มีสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นมีการสูญเสียกำลังสัญญาณน้อยและสามารถเพิ่มอัตราข้อมูลและเปลี่ยนแปลงรูปแบบการส่งข้อมูลการมัลติเพล็กซ์ (multiplex) ช่องสัญญาณได้โดยไม่ต้องปรับปรุงในส่วนของการสื่อสารสัญญาณในขณะนี้ FTTH ได้ถูกเปิดให้บริการในหลายประเทศทั้งในแถบยุโรป เอเชีย รวมทั้งประเทศไทยแล้ว





รูปที่ 1.2 การพัฒนามาตรฐานของ PON

มาตรฐานการให้บริการของ FTTH นั้นใช้มาตรฐานเดียวกับ PON แสดงได้ดังรูปที่ 1.2 โดยเริ่มมาจาก APON ซึ่งมีความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูล 155 Mb/s แล้วพัฒนาไป BPON ที่มีความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 622 Mb/s ตามมาตรฐานของ ITU-T แต่เมื่อพัฒนาเป็น GPON ตามมาตรฐานของ ITU-T ซึ่งมีความเร็วถึง 2.5 Gb/s IEEE 802.3ah ก็ได้พัฒนา BPON ไปเป็น GE-PON ที่มีความเร็ว 1.25 Gb/s และในขณะนี้ FTTH ได้ถูกพัฒนาจนสามารถให้บริการตามมาตรฐาน 10GE-PON (IEEE 802.3av) โดยอัตราข้อมูลสูงสุดของระบบ FTTH นั้นมากถึง 10 Gb/s ทั้ง uplink และ downlink ภายใต้รัศมีการให้บริการถึง 20 km และในอนาคตอันใกล้คาดว่าจะสามารถพัฒนาไปได้ถึงความเร็ว 40 Gb/s และ 100 Gb/s เลยทีเดียว

ส่วนระบบเครือข่ายไร้สาย หรือ wireless LAN (WLAN) คือ ระบบการสื่อสารข้อมูลที่มีรูปแบบในการสื่อสารแบบไม่ใช้สาย โดยใช้การส่งคลื่นความถี่วิทยุในย่านวิทยุ RF และ คลื่นอินฟราเรด ในการรับและส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่อง ผ่านอากาศ, ทะลุกำแพง, เพดานหรือสิ่งก่อสร้างอื่นๆ โดยปราศจากความต้องการของการเดินสาย นอกจากนี้ระบบเครือข่ายไร้สาย ก็ยังมีคุณสมบัติครอบคลุมทุกอย่างเหมือนกับระบบ แบบใช้สาย ที่สำคัญก็คือ การที่ไม่ต้องใช้สายทำให้การเคลื่อนย้ายการใช้งานทำได้โดยสะดวก ต่างจากระบบ wire line ที่ต้องใช้เวลาและการลงทุนในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการใช้งานเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งราคาค่าติดตั้งของ WLAN นั้นถือว่าถูกกว่าการให้บริการ FTTH มาก ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งแสดงราคา

ติดตั้ง ค่าอุปกรณ์รวมไปถึงค่าบำรุงรักษารายปี เปรียบเทียบกันระหว่าง FTTH และ WLAN ของ บริษัท Proxim Wireless Crop.

Outdoor (Wireless)			OpEx						
CapEx									
Item	Cost	Item	Cost - Year 1	Cost - Year 2	Cost - Year 3	Cost - Year 4	Cost - Year 5	Total	
Planning	\$900	Management	\$100	\$100	\$200	\$200	\$200	\$800	
Equipment	\$12,899	Troubleshooting	\$200	\$200	\$200	\$200	\$200	\$1,000	
Software	\$0	Support	\$200	\$200	\$100	\$100	\$100	\$700	
Installation	\$500	Training	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	
Configuration	\$0							\$0	
Documentation	\$300							\$0	
Upgrades	\$13,118								
<b>Total Cost</b>	<b>\$27,717</b>		<b>\$500</b>	<b>\$500</b>	<b>\$500</b>	<b>\$500</b>	<b>\$500</b>	<b>\$2,500</b>	
		Cumulative Cost	\$500	\$1,000	\$1,500	\$2,000	\$2,500		
Outdoor (Wired)			OpEx						
CapEx									
Item	Cost	Item	Cost - Year 1	Cost - Year 2	Cost - Year 3	Cost - Year 4	Cost - Year 5	Total	
Planning	\$5,000	Management	\$600	\$600	\$600	\$600	\$600	\$3,000	
Equipment	\$10,000	Troubleshooting	\$300	\$300	\$300	\$300	\$300	\$1,500	
Software	\$0	Support	\$300	\$300	\$300	\$300	\$300	\$1,500	
Installation	\$30,000	Training	\$600	\$600	\$600	\$600	\$600	\$3,000	
Configuration	\$300							\$0	
Documentation	\$300							\$0	
Upgrades	\$0							\$0	
<b>Total Cost</b>	<b>\$45,600</b>		<b>\$1,800</b>	<b>\$1,800</b>	<b>\$1,800</b>	<b>\$1,800</b>	<b>\$1,800</b>	<b>\$9,000</b>	
		Cumulative Cost	\$1,800	\$3,600	\$5,400	\$7,200	\$9,000		
<b>Difference (Wireless less Wire)</b>	<b>-\$17,883</b>		<b>-\$1,300</b>	<b>-\$1,300</b>	<b>-\$1,300</b>	<b>-\$1,300</b>	<b>-\$1,300</b>	<b>-\$6,500</b>	

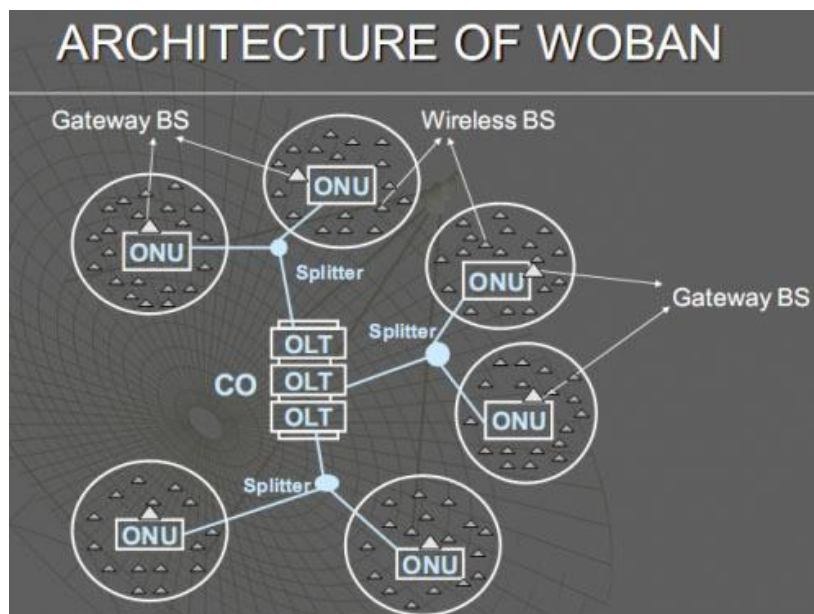
รูปที่ 1.3 เปรียบเทียบราคาติดตั้งระหว่าง FTTH และ WLAN[1] [2]

WLAN นั้นเริ่มต้นในปี ค.ศ. 1970 ครั้งแรกที่มหาวิทยาลัยฮาวาย ซึ่งเป็นโปรเจกต์ว่า "ALOHNET" ในขณะนั้นการส่งข้อมูลเป็นแบบ bi-directional คือการส่งไป-กลับอย่างง่ายผ่านคลื่นวิทยุ สื่อสารกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ 7 เครื่อง ซึ่งตั้งอยู่บนเกาะ 4 เกาะโดยมีศูนย์กลางการเชื่อมต่ออยู่ที่เกาะ ที่มีชื่อว่า "Oahu" ต่อมาในปี ค.ศ. 1997 สถาบัน institute of electrical and electronics engineering (IEEE) ได้มีการกำหนดมาตรฐาน LAN ไร้สายแบบเดียวกับ ethernet และเป็นชุดเดียวกับ 802 โดยให้ชื่อว่า IEEE 802.11 มาตรฐานที่เกิดขึ้นในปีนั้น ยังมีข้อจำกัดทางเทคโนโลยีจึงได้กำหนดระบบการรับส่งสัญญาณด้วยขนาดความเร็ว 2 Mb/s เท่านั้น หลังจากนั้นโครงข่ายไร้สาย IEEE 802.11 จึงเป็นที่รู้จักกันนับตั้งแต่นั้นมา เทคโนโลยีของระบบเครือข่ายไร้สายที่เป็นที่นิยมมากที่สุดในเวลาี้คงหนีไม่พ้น wireless fidelity (Wi-Fi) และ worldwide interoperability for microwave access (WiMAX) [3]

มาตรฐาน IEEE 802.11 เริ่มจาก 802.11a ทำงานบนย่านความถี่ 5 GHz โดยมีความสามารถส่งถ่ายข้อมูล 54 Mb/s มีระยะการรับ-ส่งที่ค่อนข้างใกล้เพียง 35 m. ในโครงสร้างปิดและ 120 m. ในพื้นที่โล่งและยังมีมาตรฐาน 802.11b ซึ่งทำงานบนย่านความถี่ 2.4 GHz โดยมีความสามารถส่งถ่ายข้อมูลเพียง 11 Mb/s มีระยะการรับ-ส่งที่ 38 m. ในโครงสร้างปิดและ 140 m. ในพื้นที่โล่งในมาตรฐานนี้สัญญาณสามารถเดินทางผ่านโครงสร้างตึกได้ดีกว่าอุปกรณ์ที่รองรับกับมาตรฐาน IEEE 802.11a ต่อมามาตรฐาน 802.11g ถูกพัฒนาต่อจาก 802.11a และ 802.11b ซึ่งทำงานบนคลื่นความถี่ 2.4 GHz เหมือนกับ 802.11b แต่เพิ่มอัตรารับ-ส่งข้อมูลสูงถึง 54 Mb/s [4] และมาตรฐานล่าสุดของ WLAN ก็คือ 802.11n สามารถให้อัตรารับ-ส่งข้อมูลสูงถึง 300 Mb/s และสามารถทำงานได้ทั้งในคลื่นความถี่ 2.4 GHz และ 5GHz มีระยะการรับ-ส่งที่ 70 m.ใน

โครงสร้างปิดและ 250 m. ในพื้นที่โล่งโดยมาตรฐานนี้ใช้เทคโนโลยี multiple input and multiple output (MIMO) [5] ซึ่งเป็นการรับ-ส่งข้อมูลจากเสาสัญญาณหลายต้นพร้อมกัน

ทั้งนี้เทคโนโลยีที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ทั้งเทคโนโลยีทั้งประเภทมีสายและไร้สายล้วนแล้วแต่มีทั้งข้อดีและข้อด้อยต่างกันไป การส่งข้อมูลผ่านเส้นใยแสงนั้นข้อดีอยู่ที่อัตราเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลสูง แต่ข้อเสียคือค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์มีราคาสูงเช่นกัน ส่วนการสื่อสารไร้สายนั้นมีข้อดีคือต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์นั้นมีราคาถูกกว่าเส้นใยแสงมาก แต่ข้อเสียก็คืออัตราการรับ-ส่งข้อมูลต่ำเพราะยังต้องแบ่งอัตราการส่งข้อมูลกับผู้อื่นอีก โดยยังมีผู้ใช้บริการมากขึ้นก็ต้องแบ่งข้อมูลออกไปให้ผู้อื่นอีกมากขึ้นเช่นกัน แต่เนื่องด้วยการสื่อสารในอนาคตนั้น ต้องการระบบสื่อสารที่ทั้งให้อัตราข้อมูลที่สูงเพียงพอรวมทั้งความสะดวกสบายในการใช้สอยและราคาค่าบริการและวางระบบต่ำ ทำให้เกิดเทคโนโลยีที่เรียกว่า wireless optical broadband access network (WOBAN) ขึ้นมา WOBAN เป็นการรวมกันระหว่างเทคโนโลยีแบบมีสายและไร้สาย โดยนำข้อดีของ FTTH ในเรื่องอัตราการรับ - ส่งข้อมูลที่สูง รวมกับต้นทุนในการวางระบบต่ำของอุปกรณ์ทางด้าน wireless ซึ่ง WOBAN เป็นเทคโนโลยีที่สามารถแก้ไขจุดบกพร่องของเทคโนโลยี FTTH ในการให้บริการในพื้นที่ที่ต้องการอัตรารับส่งข้อมูลไม่สูงมากนัก เพื่อประหยัดต้นทุนในการวางเส้นใยแสงให้เข้าถึงผู้ใช้บริการ



รูปที่ 1.4 แสดงโครงสร้างของ WOBAN [6]

อย่างที่ทราบกันว่า การให้บริการ WOBAN นั้น เป็นการรวมกันของ ระบบโครงข่ายไร้สาย รวมกับการให้บริการ FTTH ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ backend และ frontend โดย backend นั้นเป็นส่วนของ FTTH (optical part) เริ่มจาก optical line terminal (OLT) ส่งสัญญาณผ่าน เส้น

ใยแสงไปจนถึง optical network unit (ONU) โดยใช้ splitter ในการแยกเข้าสู่แต่ละผู้ใช้บริการ จากนั้นจะเข้าสู่ส่วนของ frontend ซึ่งเป็นส่วนของ WLAN (wireless part) เริ่มจาก ONU นั้นส่งสัญญาณไปให้ผู้ให้บริการแต่ละบ้านผ่านระบบเครือข่ายไร้สายดังรูปที่ 1.4 นอกจากนี้ยังมีการสื่อสารข้อมูลระหว่างกันของผู้ให้บริการแบบ multi-hop โดยไม่ต้องใช้บริการ switching ที่ central office (CO) การสื่อสารสัญญาณระหว่างผู้ใช้บริการกันเองนั้น ใช้ทอพอโลยีแบบตาข่าย (mesh topology) เพื่อติดต่อกับ ONU ของ mesh อื่นได้ จึงช่วยแก้ไขในกรณี ONU เกิดความเสียหายหรืออยู่ในสภาพที่ใช้งานไม่ได้ เนื่องจากการที่ผู้ใช้บริการทำงานในโหมด multi-hop เพื่อที่จะได้เชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้บริการด้วยตัวเอง มีผลทำให้ระบบมีอัตรารับ-ส่งข้อมูลสูงและใช้ต้นทุนในการลงทุนติดตั้งต่ำ จึงคาดว่า WOBAN จะเป็นอีกเทคโนโลยีทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาพัฒนาเพื่อใช้ได้ต่อไปในอนาคตสำหรับข้อได้เปรียบของ WOBAN เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเส้นใยแสง และระบบไร้สาย สามารถสรุปได้ดังนี้

- ❖ WOBAN จะประหยัดกว่าโครงข่ายไร้สาย ดังโครงสร้างดังรูปที่ 1.4 แสดงให้เห็นว่า WOBAN นั้นไม่ต้องใช้การเชื่อมต่อแบบ FTTH ซึ่งมีราคาสูง เพราะการติดตั้ง การซ่อมบำรุงเส้นใยแสงของผู้ใช้จะมีราคาสูง ใน WOBAN ผู้ใช้จะเชื่อมต่อกับ ONU ที่อยู่ใกล้ตน ในลักษณะของระบบไร้สาย และ ONU จะส่งข้อมูลไปยัง OLT โดยใช้โครงสร้างทางเส้นใยแสง
- ❖ WOBAN มีความยืดหยุ่นมากกว่าโครงข่ายเข้าถึงของระบบทางแสง วิธีการ “anytime anywhere” สามารถนำไปใช้ประโยชน์ใน WOBAN ได้ดังนั้น WLAN จึงเป็นเทคโนโลยีที่สะดวกสำหรับช่วง front end ของ WOBAN เพื่อที่จะทำให้เราสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านของความยืดหยุ่น และความสามารถในการเชื่อมต่อได้หลายเส้นทาง
- ❖ ในโครงข่าย PON แบบเดิม ถ้าเส้นใยแสงที่เชื่อมระหว่างตัวแยกสัญญาณ (splitter) กับ ONU ขาดลง ONU จะไม่สามารถใช้งานได้ ยิ่งไปกว่านั้น ถ้าเส้นทางจาก OLT ที่ไปยัง splitter เกิดขาดไป จะทำให้ ONU ทุกตัว (รวมไปถึงผู้ใช้บริการ ONU เหล่านั้นทุกคน) ใช้งานไม่ได้ตามไปด้วย แต่ใน WOBAN ผู้ให้บริการจะมีความสามารถในการสื่อสารสัญญาณแบบ multi-hop ได้ โดยการเชื่อมต่อแบบไร้สาย จะสามารถรับตัวเอง เพื่อให้ผู้ใช้บริการสามารถค้นหา ONU ข้างเคียงที่ยังใช้งานได้ ผู้ให้บริการสามารถที่จะสื่อสารกับ ONU นั้น ซึ่งจะสื่อสารกับ OLT อื่นๆใน CO ได้ต่อไป
- ❖ WOBAN จะมีความเชื่อถือได้มากกว่าโครงข่ายไร้สายซึ่งทำให้ ช่วยลดปัญหาความแออัด และการสูญหายของข้อมูลใน WOBAN เมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายไร้สายในปัจจุบัน ยิ่ง

ไปกว่านั้น ผู้ใช้บริการสามารถเชื่อมต่อกับ ONU ได้ก็ได้ในบริเวณใกล้เคียง ถ้าหากว่า primary ONU เสียหรือมีความหนาแน่นมากเกินไป ซึ่งจะทำให้ WOBAN นั้นมีประสิทธิภาพดีในการทำสมดุลโหลด (load-balancing capability)

- ❖ WOBAN นั้นมีการจัดระบบได้ด้วยตนเอง (self-organizing) เนื่องจากความสามารถในการต้านทานสิ่งผิดพลาด และความทนทานต่อการเชื่อมต่อโครงข่ายและลักษณะของการทำสมดุลโหลด
- ❖ ในบริเวณพื้นที่ที่กำลังพัฒนาทั่วโลก มีการติดตั้งเส้นใยแสงไว้อย่างหนาแน่น (ภายใน 20 km.) แม้กระทั่งพื้นที่ชนบทแต่ค่าใช้จ่ายในการให้บริการเชื่อมต่อสัญญาณความเร็วสูง มีค่าใช้จ่ายสูงจนไม่สามารถทำได้ และใช้เวลามาก รวมทั้งยากต่อการบำรุงรักษา เพราะฉะนั้นรัฐบาลจึงตัดสินใจส่งเสริมและกระตุ้นผู้ประกอบการให้พัฒนาโครงสร้าง WOBAN

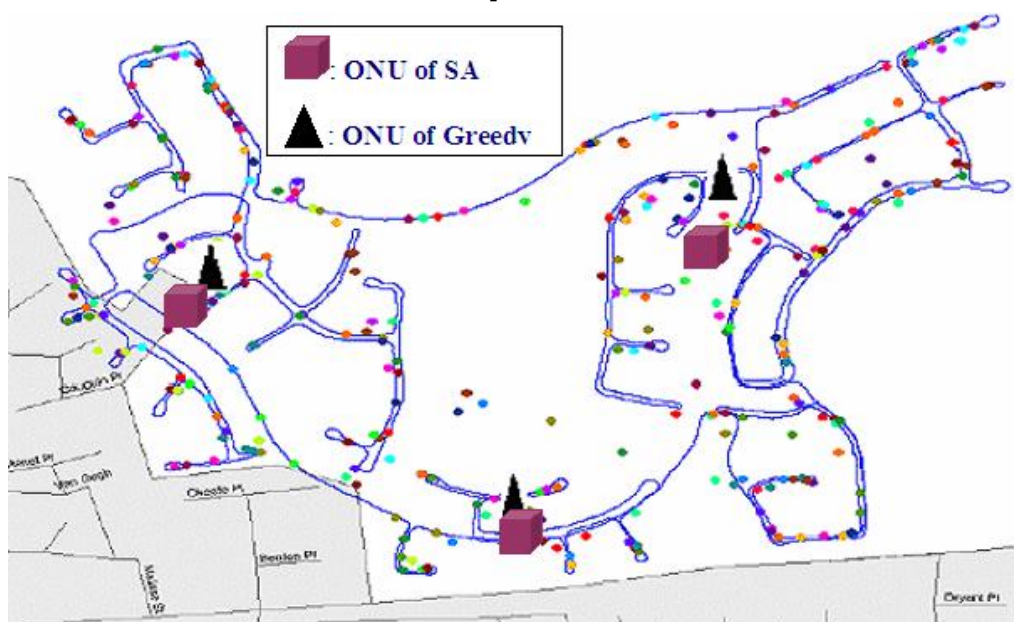
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา ในเรื่องของภาวะวิเคราะหการวางตำแหน่งของ ONU ในการให้บริการ WOBAN งานวิจัย [7] เป็นงานวิจัยที่หาตำแหน่งการวาง ONU เพื่อให้ได้ค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด โดยใช้วิธีที่เรียกว่า mixed integer programming (MIP) ซึ่งทดลองในพื้นที่จำลอง 50 x 50 ตารางไมล์ และสุ่มผู้ให้บริการ 800 หลัง และกำหนด OLT ที่ตำแหน่ง (0,0) และใช้เทคโนโลยีในส่วน frontend ของ WOBAN คือ WiMAX และกำหนดให้อัตราเร็วในการรับ – ส่งข้อมูลเป็น 2, 5, 10, 20, 30, 40, 75 Mb/s สำหรับระยะทาง 5, 4, 3, 2, 1.5, 1 และ 0.5 ตามลำดับ งานวิจัยนี้ใช้การเชื่อมต่อจาก OLT ไปยัง ONU และ base station(BS) ในรูปแบบของ minimum spanning tree และได้ผลของ จำนวน ONU ที่ต้องใช้ในการชดเชยค่า channel interference (IC) threshold ตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 จำนวนของ BS และ ONU [7]

CI threshold	0	3	6	9	12	15	18	20
BSs	22	25	30	36	46	50	56	66
ONUs	3	3	4	4	5	5	6	7

งานวิจัย [8] เป็นอีกหนึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางตำแหน่งของ ONU ในพื้นที่ Wildhorse (มีจำนวนผู้ให้บริการ 310 บ้าน และมีพื้นที่ประมาณ 1150 x 950 ตารางเมตร) โดยใช้วิธี simulated annealing ร่วมกับ Greedy algorithm มีหลักการคิดคือภายในพื้นที่ของ ONU แต่ละตัวจะไม่ขึ้นแก่กันงานวิจัยนี้ได้แนวคิดมาจากงานวิจัย [9] หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า k-

meanproblem [9] หรือ mailbox problem [10] ทำได้โดยการกำหนดก้อนของปัญหาเป็นกลุ่มๆ (clustering problem) แล้วจะลอง center เป็น poisson process [11] เมื่อได้แนวความคิดนี้แล้ว งานวิจัย [8] ก็ได้นำเสนออัลกอริทึม greedy ในการกำหนดการวางตำแหน่ง ONU มีวิธีการคือ แบ่งพื้นที่โดยที่ไม่ซ้อนทับกันจากนั้นวาง ONU พื้นที่ละ 1 ตัวแล้วหา premium subscriber (ผู้ใช้บริการที่อยู่ใกล้ ONU ตัวใดตัวหนึ่งมากที่สุด) ของแต่ละ ONU จากนั้นหาค่าเฉลี่ยเพื่อหา ตำแหน่งที่สมดุลและเหมาะสมที่สุดของ ONU ตัวนั้นและทำวิธีนี้จะทำซ้ำจนได้ผลที่ดีที่สุด ซึ่งการทำซ้ำนี้เรียกว่า simulated annealing ซึ่งวิธีการนี้จะให้ผลที่ละเอียดมากยิ่งขึ้นจากนั้นคิดค่า cost ของการติดตั้งในงานวิจัยนี้ WOBAN ในส่วนของ front end ซึ่งเป็นส่วนของ wireless เปรียบเทียบกันระหว่างการใช้ Wi-Fi และ WiMAX ได้ผลดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 ตำแหน่งของ ONU ในงานวิจัย [2] เปรียบเทียบระหว่างการใช้ Greedy algorithm และ การใช้วิธี simulated annealing

ตารางที่ 1.2 ระยะทางเฉลี่ยจนถึงผู้ใช้บริการในแต่ละ ONU [8]

ONUs	Average costs (distance) (m.)	
	Greedy	Simulated annealing
ONU #1	221.28	209.69
ONU #2	199.65	195.58
ONU #3	179.49	172.14



ตารางที่ 1.3 เปรียบเทียบราคา user / Mbps ระหว่าง Wi-Fi WiMAX และ PON [8]

Model	Cost (present PON solution/user/Mbps)	
	Present	Future
WOBAN (with Wi-Fi)	0.3304	0.1498
WOBAN (with WiMAX)	0.3084	0.0661
PON	1.0000	0.2996

จาก

ตารางที่ 1.2 และ

ตารางที่ 1.3 เป็นผลที่ได้จากงานวิจัย [8] ซึ่งบอกว่าการใช้วิธี simulated annealing นั้นทำให้ระยะทางระหว่าง ONU ถึงผู้ใช้บริการนั้นสั้นลงและการใช้บริการ WOBAN นั้นมีค่าใช้จ่ายที่ถูกต่ำกว่า FTTH ถึงเกือบ 60% งานวิจัยนอกเหนือจากที่กล่าวมานั้นเช่น [11], [12], [13], [14] และ [15] เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเรื่อง WOBAN ในจุดประสงค์ที่แตกต่างกันไปเช่นศึกษาเรื่องการป้องกันการดีเลย์ในการส่งของแต่ละเส้นทางหรือการป้องกันการล่มของระบบใน WOBAN เป็นต้น

จวบจนปัจจุบันยังไม่มียานใดที่ศึกษา WOBAN ในกรณีที่มีเชื่อมต่อกันระหว่างผู้ใช้บริการด้วยกันแบบ multi-hop ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงมีจุดประสงค์จะพัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถเชื่อมต่อกันระหว่างผู้ใช้บริการด้วยกันแบบ multi-hop ได้เป็นครั้งแรกด้วยอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นนี้ผู้ใช้บริการแต่ละหลังจะสามารถเชื่อมต่อไปยัง ONU และ base station ได้ภายในจำนวน hop ตามต้องการพร้อมทั้งมีเส้นทางป้องกันในกรณีที่มีผู้ใช้บริการบางรายปิดบริการไปผู้ใช้บริการที่เชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการนั้นอยู่สามารถใช้บริการทางอื่นได้โดยผู้ใช้บริการรายอื่นได้โดยที่อัตรารับ-ส่งข้อมูลลดลงไม่มากจำนวนเส้นทางป้องกันนั้นสามารถกำหนดจำนวนได้ว่าต้องการกี่เส้นทางและจำนวน hop ไม่เกินที่กำหนดไว้รวมทั้งรับประกันอัตราความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลที่ใช้บริการได้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน

## 1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

การออกแบบและพัฒนาการให้บริการในระบบสื่อสารในปัจจุบันนั้นจะต้องมีความสอดคล้องกับการวิถีการดำเนินชีวิตของมนุษย์ในยุคปัจจุบันด้วย โดยเฉพาะสื่อและข้อมูลข่าวสารทั้ง ภาพ เสียง วีดีโอ และ content ต่างๆ เป็นสิ่งที่จำเป็นและขาดไม่ได้ในยุคนี้ ทำให้ในปัจจุบันนี้ผู้ใช้บริการนั้นต้องการการให้บริการที่มีความรวดเร็ว ความสะดวกสบายในการใช้งาน รวมถึงราคา

ค่าบริการที่ต่ำ และมีโครงข่ายที่แข็งแกร่งมีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นการให้บริการ WOBAN จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการให้บริการ ด้วยการรวมกันของเทคโนโลยีทั้ง FTTH และ WLAN จึงทำให้การให้บริการ WOBAN นี้มีอัตราเร็วในการรับ - ส่งข้อมูลที่สูง รวมทั้งมีความสะดวกสบายในการใช้งานและมีราคาที่ต่ำกว่า FTTH เพียงอย่างเดียว เนื่องจากมีส่วนของ WLAN ประกอบอยู่ด้วยมากไปกว่านั้น การเชื่อมต่อกันระหว่างผู้ใช้บริการด้วยกันเองแบบ multi-hop นั้นทำให้ WOBAN มีข้อดีในเรื่องของความแข็งแรงของโครงข่าย การเชื่อมต่อกันแบบ multi-hop นั้นมีข้อดีคือเมื่อเกิดเหตุขัดข้องใน ผู้ใช้บริการหรือ ONU ตัวใดตัวหนึ่งแล้ว ระบบจะเปลี่ยนไปรับข้อมูลในเส้นทางอื่นหรือจาก ONU ตัวอื่นทันที ทำให้หมดปัญหาในเรื่องการขัดข้องเนื่องจากอุปกรณ์ของผู้ใช้บริการหรือ ONU และคาดว่า การให้บริการ WOBAN นั้นจะเป็นที่นิยมของผู้ใช้บริการในอนาคตต่อไป

### 1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. นำเสนออัลกอริทึมที่สามารถเชื่อมต่อกันระหว่างผู้ใช้บริการด้วยกันแบบ multi-hop เป็นครั้งแรกโดยผู้ใช้บริการแต่ละหลังจะสามารถเชื่อมต่อไปยัง ONU และ BS ได้โดยเลือกจำนวน hop ได้ตามต้องการรวมทั้งระบุเส้นทางที่เชื่อม ONU ของแต่ละผู้ใช้บริการ
2. อัลกอริทึมนี้สามารถกำหนดเส้นทางป้องกันในกรณีที่มี ONU ตัวใดตัวหนึ่งปิดบริการไปโดยผู้ใช้บริการสามารถต่อผ่านไปยังผู้ใช้บริการรายอื่นได้ โดยที่อัตรารับส่งข้อมูลลดลงไม่มาก รวมทั้งรับประกันอัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่ให้บริการได้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน
3. ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวน ONU อัตรารับส่งข้อมูล เมื่อปรับเปลี่ยนจำนวน hop และเส้นทางป้องกัน
4. ใช้ wireless propagation model ประมาณอัตราข้อมูลที่ได้รับของแต่ละผู้ใช้บริการเป็นครั้งแรก
5. นำเสนอและเผยแพร่ผลงานในที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานของระบบสื่อสารทางแสงและการให้บริการ FTTH รวมทั้งการให้บริการ WOBAN และระบบไร้สาย
2. ศึกษาอัลกอริทึมที่ศึกษาเรื่องการวางตำแหน่งของ ONU ในงานวิจัยก่อนหน้า เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ต่อไป

3. พัฒนาอัลกอริทึมและทดลองในพื้นที่ที่จำลองขึ้นเองขนาดเล็ก
4. ตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมรวมทั้ง ปรับปรุงและแก้ไขอัลกอริทึมที่ได้ให้สามารถประยุกต์เข้ากับพื้นที่จริงที่ใหญ่มากขึ้นและหลากหลายขึ้น
5. วิเคราะห์ผลกระทบของจำนวน ONU อัตรารับส่งข้อมูล เมื่อปรับเปลี่ยนจำนวน hop และเส้นทางการป้องกัน รวมทั้งเกี่ยวกับ data rate ซึ่งโยงกับ wireless propagation model ด้วย
6. จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

### 1.5 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. มีการใช้แผนที่ของพื้นที่จริงในการจำลอง แต่ไม่มีการสร้างอุปกรณ์และทดลองในพื้นที่ดังกล่าวจริง หากแต่ใช้วิธีอื่น เช่น การจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทดสอบความถูกต้องจากแผนที่จริงเท่านั้น
2. อัตราข้อมูลในส่วนของ back end เป็นไปตามมาตรฐาน GEAPON คือมากที่สุด 1.25 Gb/s
3. ส่วนของโครงข่ายไร้สายใช้อุปกรณ์ตามมาตรฐาน 802.11n เท่านั้น คือมีระยะการรับ-ส่งที่ 70 m. ในโครงสร้างปิดและ 250 m. ในพื้นที่โล่ง และอัตราข้อมูล 300 Mb/s
4. จำนวนบ้านผู้ใช้บริการบนพื้นที่ที่นำมาทดสอบอัลกอริทึมไม่เกิน 500 ราย

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้เกี่ยวกับการให้บริการ WOBAN ซึ่งถือเป็นการให้บริการใหม่ที่ได้รวมจุดเด่นของการให้บริการ FTTH และระบบไร้สาย
2. อัลกอริทึมที่สามารถเชื่อมต่อกันระหว่างผู้ใช้บริการด้วยกันแบบ multi-hop เป็นครั้งแรก โดยผู้ใช้บริการแต่ละหลังจะสามารถเชื่อมต่อไปยัง ONU และ BS ได้โดยเลือกจำนวน hop ได้ตามต้องการ รวมทั้งระบุเส้นทางที่มุ่งสู่ ONU ของแต่ละผู้ใช้บริการ
3. อัลกอริทึมที่สามารถกำหนดเส้นทางการป้องกันในกรณีที่มีผู้ใช้บริการบางรายปิดบริการไป โดยผู้ใช้บริการสามารถต่อผ่านไปยังผู้ใช้บริการรายอื่นได้ โดยที่อัตรารับ-ส่งข้อมูลลดลงไม่มาก รวมทั้งรับประกันอัตรารับ-ส่งข้อมูลได้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้บริการ
4. ผลวิเคราะห์ของผลกระทบต่อจำนวน ONU อัตรารับ-ส่งข้อมูล เมื่อปรับเปลี่ยนจำนวน hop และเส้นทางการป้องกัน

5. ผลงานตีพิมพ์และนำเสนอในที่ประชุมนานาชาติ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีพื้นฐาน

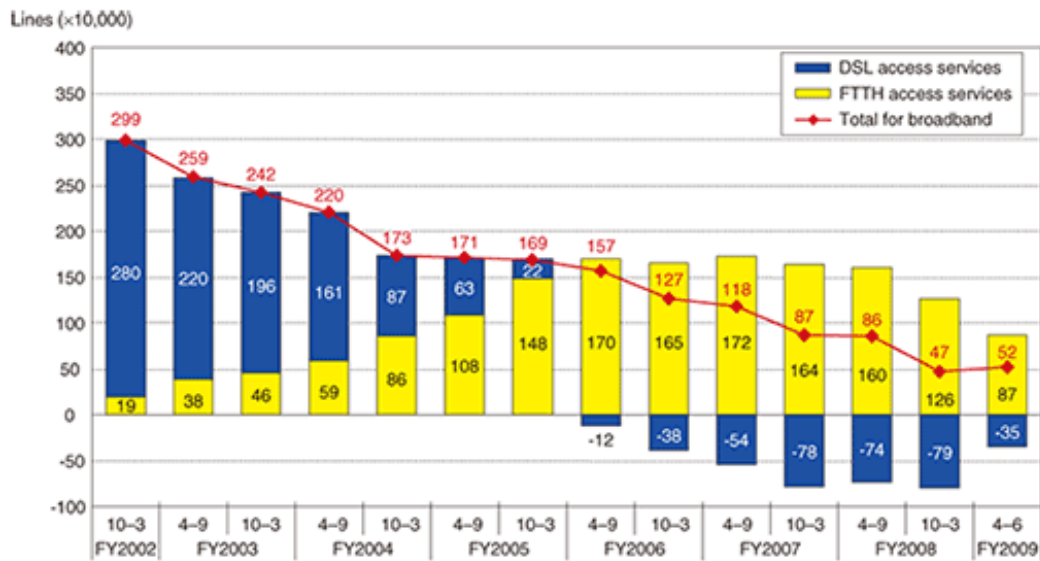
#### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของ FTTH

##### 2.1.1 ความเป็นมาของ FTTH

แนวความคิดในการนำระบบ FTTH เข้ามาใช้เพื่อเชื่อมโยงสายส่งสัญญาณด้วยเส้นใยแสงไปสู่บ้านผู้ให้บริการโดยตรง เริ่มขึ้นในราวกลางทศวรรษที่ 1970's แต่ก็ไม่ประสบความสำเร็จในเชิงพาณิชย์ อุปสรรคสำคัญในขณะนั้นคือ ระบบและเส้นใยแสงมีราคาแพงเมื่อเทียบกับระบบสายทองแดง ทำให้ภาคธุรกิจไม่สนใจลงทุนโดยเฉพาะในส่วนที่ต้องเชื่อมโยงเส้นใยแสงสู่บ้านผู้ให้บริการโดยตรงและเพื่อเป็นการลดต้นทุนในส่วนนี้ระบบ fiber to the curb (FTTC) และระบบ hybrid fiber/coax (HFC) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจะใช้ระบบสายส่งสัญญาณแบบผสมคือมีทั้งเส้นใยแสงและสายส่งทองแดงใช้งานร่วมกันในโครงข่ายโดยระบบ FTTC จะเน้นที่การใช้งานสายส่งเส้นใยแสงตลอดโครงข่ายไปสิ้นสุดยังหัวถนนหรือปากทางเข้าหมู่บ้านเท่านั้นในส่วนของสายส่งที่เข้าถึงบ้านผู้ให้บริการยังคงเป็นสายทองแดงอยู่ทำให้ระบบ FTTC และ HFC มีราคาถูกกว่า FTTH (ในขณะนั้น) มากแต่ในขณะเดียวกันก็สามารถให้บริการข้อมูลความเร็วสูงได้เพราะโครงข่ายส่วนใหญ่ใช้เส้นใยแสงเป็นท่อนำสัญญาณทั้งนี้ระบบ HFC กลับเป็นที่นิยมกว่า FTTC เพราะราคาค่อนข้างถูกกว่าเนื่องจากระบบสายส่งยังคงมีส่วนประกอบของสายส่งทองแดงมากกว่าตัวอย่างของระบบ HFC ที่นำมาใช้ในประเทศไทยได้แก่ระบบเคเบิลทีวี ต่อมาเมื่อถึงยุคสมัยของการสื่อสารข้อมูลยุคโลกาภิวัตน์ด้วยระบบอินเทอร์เน็ตความต้องการในการสื่อสารข้อมูลเริ่มขยายตัวขึ้นมาก เพราะในทุกเดือนจะมีจำนวนผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้องการในการสื่อสารข้อมูลปริมาณมากที่มีความเร็วสูงก็เริ่มเพิ่มมากขึ้นด้วยตามลำดับในขณะที่โลกได้ถูกย่อลงด้วยการเชื่อมโยงด้วยระบบโครงข่ายและอินเทอร์เน็ตทำให้ปริมาณผู้ใช้ที่ต้องการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงเริ่มมีมากขึ้น เช่นกลุ่มผู้ใช้ที่เป็นธนาคารต่างต้องการเชื่อมโยงระบบสื่อสารข้อมูลของตนเองระหว่างสาขาที่อยู่ในพื้นที่ทั่วประเทศเป็นต้นเพื่อตอบสนองความต้องการดังกล่าวผู้ให้บริการจึงได้นำระบบบริการแบบ integrated services digital network (ISDN) เข้ามาใช้โดยตัวระบบทำงานสื่อสารข้อมูลแบบดิจิทัลทำให้ข้อมูลต่างๆที่มีลักษณะพื้นฐานดั้งเดิมไม่เหมือนกันสามารถสื่อสารร่วมกันได้เนื่องจากข้อมูลทุกประเภทจะถูกทำให้เป็นดิจิทัลซึ่งมีสถานะเพียง 2 ระดับคือศูนย์ "0" กับหนึ่ง "1" เท่านั้นดังนั้นข้อมูลทุกชนิดจึง

ฎุกระบบมองเห็นเป็นแบบเดียวกันหมดทำให้สื่อสารร่วมกันได้นอกจากนี้ระบบ ISDN ยังถูก ออกแบบมาให้ใช้สายส่งเส้นใยแสงเชื่อมโยงไปยังบ้านผู้ใช้บริการหรือสำนักงานได้โดยตรงผู้ใช้บริการ เพียงแต่แจ้งความจำนงและเสียค่าบริการเฉพาะก็สามารถใช้งานได้สำหรับผู้ใช้บริการที่ต้องการ สื่อสารข้อมูลส่วนตัวด้วยท่อสัญญาณขนาดใหญ่ก็อาจทำได้ด้วยการเช่าสายส่ง (leased line) ที่เป็นเส้นใยแสงระบบ ISDN เป็นระบบที่เสมือนเป็นก้าวแรกให้มีการใช้เส้นใยแสงเชื่อมโยงไปยัง บ้านผู้ใช้บริการแต่ ISDN เองถูกออกแบบขึ้นโดยเน้นที่ระบบสลับสายหรือสวิตชิง (switching) อีกทั้งการเช่าคู่สายเส้นใยแสงเพื่อขอใช้บริการค่อนข้างจะมีราคาแพงทำให้ระบบ ISDN ไม่เป็นที่นิยม ของผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ตแต่ด้วยปริมาณข้อมูลสื่อสารที่นับวันจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจึงได้มีการพัฒนา ระบบ ADSL ขึ้นเพื่อให้ผู้ใช้บริการยังคงสามารถใช้สายส่งทองแดงเดิมได้แต่ในขณะเดียวกันก็ สามารถสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงได้ด้วยการเพิ่มค่าใช้จ่ายบริการอีกไม่มากนักการเติบโตของของ ระบบอินเทอร์เน็ตในอัตราก้าวหน้าและความต้องการบริโภคข้อมูลในรูปแบบต่างๆทำให้ ADSL เริ่มมีปัญหาในการให้บริการแม้ว่า HDSL จะสามารถให้บริการได้สูงถึง 40 Mb/s [16] ก็ตามความ นิยมของผู้ใช้อินเทอร์เน็ตที่ต้องการสื่อสารข้อมูลขนาดใหญ่เช่นข้อมูลภาพนิ่งที่มีความละเอียดสูง และข้อมูลภาพเคลื่อนไหวล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการแข่งขันในการให้บริการแบบบรอดแบนด์ (broadband) มากยิ่งขึ้นประกอบกับเทคโนโลยีของระบบสื่อสารด้วยเส้นใยแสงมีการพัฒนาไป จากเดิมมากทำให้มีระบบสื่อสารเชิงแสงมีราคาถูกลงจึงได้มีการนำเทคโนโลยี FTTH เข้ามาใช้ใหม่ เพื่อเป็นทางเลือกของการให้บริการแบบบรอดแบนด์ FTTH เริ่มทำให้ตลาดการให้บริการข้อมูล แบบบรอดแบนด์ชนิดเข้าถึงบ้านผู้ใช้โดยตรงเริ่มคึกคักขึ้นก็ในช่วงเริ่มสหัสวรรษใหม่ (ตั้งแต่ปีค.ศ. 2000 เป็นต้นมา) จนกระทั่งในปี ค.ศ. 2002 ระบบ FTTH เริ่มเป็นที่สนใจในประเทศญี่ปุ่นเพราะ ค่าบริการ FTTH ที่สามารถให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง 100 Mb/s ลดลงเหลือประมาณ \$57 ต่อเดือน ซึ่งใกล้เคียงกับอัตราค่าบริการ ADSL ที่ให้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง 47 Mbps ซึ่งมี ราคาประมาณ \$48 ต่อเดือน ทำให้อัตราการขยายตัวของผู้ใช้บริการ FTTH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งในช่วงกลางปีค.ศ. 2009 มีจำนวนผู้ใช้บริการ FTTH เป็น 15,890,000 รายหรือมากกว่า ครึ่งหนึ่งของจำนวนผู้ใช้บริการบรอดแบนด์ทั้งหมดจำนวน 30,930,000 รายดังรูปที่ 2.1

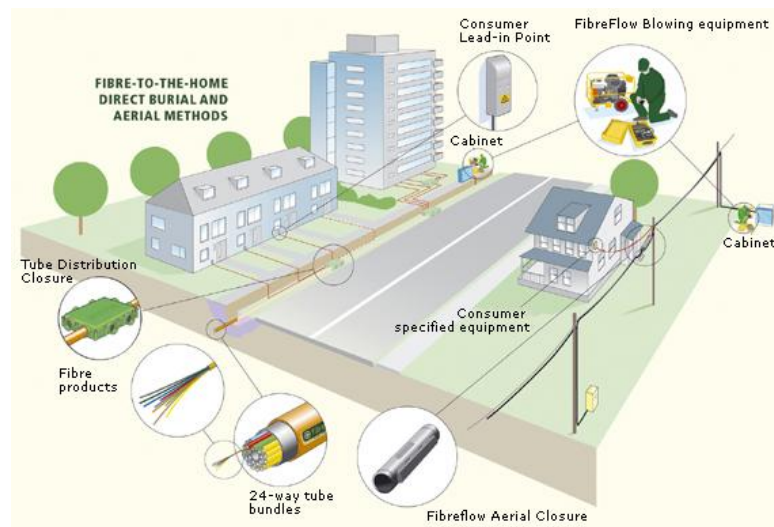




Source: Press release from the Ministry of Internal Affairs and Communications

รูปที่ 2.1 จำนวนผู้ใช้บริการที่เพิ่มขึ้นของ FTTH และ DSL ในประเทศไทยนับตั้งแต่ปี ค.ศ. 2002 ถึง ปีค.ศ. 2009 [17]

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ FTTH เป็นระบบที่น่าสนใจสำหรับผู้ให้บริการ (subscriber หรือ user) โดยเฉพาะผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ตมีอยู่ 2 ประการคือ ความสามารถในการสื่อสารข้อมูลด้วยความเร็วสูง (high capacity) และระบบมีความน่าเชื่อถือ (system reliability)



รูปที่ 2.2 ระบบข่ายสายเคเบิลเส้นใยแสงในระบบ FTTH ที่มีการเชื่อมโยงเส้นใยแสงทั้งที่เป็นแบบ แขนงอากาศหรือฝังดินไปยังบ้านผู้ใช้โดยตรง [18]

โครงสร้างพื้นฐานของสายส่งที่ใช้ในระบบ FTTH ถูกกำหนดให้เป็นเส้นใยแสงตลอดเส้นทางจากผู้ให้บริการไปจนถึงบ้านผู้ให้บริการดังจะเห็นได้ในรูปที่ 2.2 ทำให้ได้พื่อนำสัญญาณที่มีขนาดใหญ่สามารถส่งข้อมูลปริมาณมากได้ในคราวเดียวกันโดยปกติระบบโครงข่ายสื่อสารที่เป็น

เส้นทางหลักขนาดใหญ่หรือแบ็กโบน(backbone) ต่างใช้สายส่งที่เป็นเส้นใยแสงแทบทั้งสิ้น ดังนั้น การนำเส้นใยแสงมาใช้ในการเข้าถึงผู้ใช้บริการโดยตรงย่อมสามารถรองรับความเร็วในการสื่อสาร ข้อมูลได้ทั้งสิ้น ในระบบ FTTH ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลถือว่าเร็วกว่า ADSL ถึงประมาณ 100 เท่า [16] โดยหลักการแล้ว FTTH ได้ถูกออกแบบให้ทำงานร่วมกับระบบ ATM ได้ ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้ความเร็วในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นโครงข่ายเส้นใยแสงมีส่วนประกอบของอุปกรณ์ ชนิด PON ซึ่งเป็นลักษณะของโครงข่ายที่มีส่วนของอุปกรณ์แบบ passive คือสามารถทำงานได้ โดยไม่ต้องป้อนกำลังงานจากภายนอกซึ่งอุปกรณ์ของ PON สามารถรองรับการทำงานในรูปแบบ ต่างๆที่อยู่ในโครงข่ายได้ในเวลาเดียวกันการออกแบบให้ PON มีอัตราการใช้ร่วมกัน (sharing ratio) ลดลงหรือการเพิ่มความยาวคลื่นแสงที่เป็นคลื่นพาหะสามารถทำให้ FTTH สื่อสารข้อมูลที่มีความเร็วขนาด 2.488 Mb/s [16] การใช้เส้นใยแสงเป็นสื่อสัญญาณ (transmission) ของระบบ FTTH ทำให้ข้อมูลที่เดินทางระหว่างสถานีมีลักษณะเป็นแสงซึ่งแตกต่างจากข้อมูลที่เป็น สัญญาณไฟฟ้าในระบบสายส่งทองแดง โดยการส่งทางแสงจะมีความปลอดภัยมากกว่าเพราะการ ดึงข้อมูลออกมาจากสายส่งไม่สามารถทำได้โดยง่ายเหมือนสายไฟฟ้าเพราะแสงจะเดินทางอยู่ ภายในแนวแกนกลางของเส้นใยแสงไม่มีการรั่วไหลออกสู่ภายนอกทางผิวโดยรอบการนำเส้นใย แสงอื่นมาสัมผัสผิวเส้นใยแสง (เหมือนสายไฟฟ้า) ไม่อาจทำให้แสงส่งผ่านระหว่างกันได้จึงทำให้ การลักลอบดึงสัญญาณแสงไม่อาจทำได้โดยสะดวกจึงทำให้การสื่อสารระบบ FTTH มีความ ปลอดภัยและน่าเชื่อถือนอกจากนี้เส้นใยแสงในระบบสื่อสารมักทำมาจาก SiO<sub>2</sub> ไม่เป็นสนิม เหมือนสายไฟทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมสูงอีกทั้งยังมีอายุการใช้ งานสูงกว่าสายทองแดงอีกด้วย

## 2.1.2 ข้อดีของระบบ FTTH

### 2.1.2.1 ระบบมีความเร็วสูง (High Capacity)

- ❖ เส้นใยแสงมีข้อดีเหนือระบบสายส่งอื่นอย่างมากตรงที่สามารถสื่อสารข้อมูลขนาดใหญ่ มากได้เนื่องจากเส้นใยแสงมีคุณสมบัติเสมือนเป็นท่อส่งสัญญาณที่มีขนาดใหญ่มาก นั้นเองในระบบสื่อสารปัจจุบันการส่งข้อมูลแบบดิจิทัลกำลังเป็นที่นิยมเนื่องจากทำให้ ข้อมูลมีคุณภาพสูงอย่างไรก็ตามการสร้างข้อมูลดิจิทัลจากข้อมูลดั้งเดิมที่เป็นสัญญาณ แอนะล็อก (เช่น ภาพและเสียง) ทำให้ข้อมูลมีขนาดใหญ่กว่าเดิมมากดังนั้นหากต้องการ ส่งข้อมูลขนาดใหญ่ให้ถึงปลายทางโดยรวดเร็วต้องส่งผ่านสายส่งด้วยอัตราข้อมูลที่สูงซึ่ง

เส้นใยแสงสามารถรองรับการทำงานในลักษณะเช่นนี้ได้โดยไม่ต้องใช้เทคนิคอื่นเพิ่มเติมก็ได้

- ❖ ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลของ FTTH ที่ให้บริการอาจเริ่มต้นที่ถือว่ายังต่ำกว่ามาตรฐานพื้นฐานของ FTTH แสดงให้เห็นว่าระบบ FTTH สามารถรองรับการใช้ในงานการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงมากในอนาคตได้อย่างไม่ต้องสงสัยหากผู้ใช้บริการต้องการความเร็วที่มากก็สามารถเลือกความเร็วตามที่ผู้ให้บริการ
- ❖ ยิ่งไปกว่านั้นระบบ FTTH ยังมีความยืดหยุ่นสูงหากมีการปรับปรุงระบบ PON ให้มีสมรรถนะสูงขึ้นก็จะทำให้บริการ FTTH นั้นดีขึ้นได้ ความเร็วในการส่งสัญญาณเพิ่มมากขึ้น
- ❖ เมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการสื่อสารข้อมูลกับราคาการให้บริการซึ่งอาจสูงกว่าระบบ xDSL ไม่มากจะพบว่าค่าใช้จ่ายต่อหน่วยข้อมูลจะถูกกว่าระบบที่ใช้ไฟฟ้าเป็นสื่อสัญญาณมาก

#### 2.1.2.2 ระบบมีความน่าเชื่อถือ (System Reliability)

- ❖ จากผลสำรวจพบว่าในกรณีของการพิจารณาเลือกใช้ระบบสื่อสารระยะไกลลูกค้าในปัจจุบันให้ความสนใจต่อระบบสื่อสารที่มีความน่าเชื่อถือสูงเป็นอันดับต้นๆเหนือรายละเอียดที่เกี่ยวกับราคาค่าใช้จ่ายซึ่งสอดคล้องกับระบบ FTTH
- ❖ ความน่าเชื่อถือของระบบ FTTH เกิดจากระบบสายส่งที่เป็นเส้นใยแสงซึ่งวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแสงในระบบสื่อสารโทรคมนาคมมักเป็นแก้วทั้งนี้แก้วจะมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมสูงอีกทั้งแก้วไม่เป็นสนิมทำให้เส้นใยแสงมีอายุการใช้งานนานมาก (เมื่อเทียบกับสายโลหะ) ในการใช้งานจริงวัสดุที่เป็นเปลือกหุ้มเส้นใยในลักษณะของสายเคเบิลอาจสึกกร่อนไปก่อนตัวเส้นใยแสงเองอย่างไรก็ตามเคเบิลเส้นใยแสงมักมีอายุการใช้งานอย่างน้อย 50 ปีขึ้นไป ซึ่งนานพอที่จะทำให้ผู้ใช้เกิดความมั่นใจในการนำสัญญาณของระบบ FTTH
- ❖ วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแสงมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าโดยธรรมชาติทำให้ปราศจากปัญหาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะส่งผลให้ข้อมูลสื่อสารไม่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนสายส่งทองแดงสัญญาณสื่อสารในระบบ FTTH จึงเป็นสัญญาณที่สะอาดและเชื่อถือได้สูง

- ❖ ระบบ FTTH ใช้เส้นใยแสงเป็นสายส่งสัญญาณส่งไปยังบ้านของผู้ใช้ผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่าONU ซึ่งจะติดตั้งอยู่ภายในบ้านของผู้ใช้บริการ ONU นี้ทำหน้าที่กระจายสัญญาณซึ่งส่วนใหญ่เป็นสัญญาณไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ปลายทางที่อยู่ในบ้านเช่น คอมพิวเตอร์โทรศัพท์หรือโทรทัศน์ เป็นต้นเนื่องจากสายส่งสัญญาณที่ต่อเข้ากับ ONU เป็นเส้นใยแสงทำให้ไม่มีส่วนของตัวนำเชื่อมต่อเหมือนระบบโทรศัพท์ทำให้ช่วยลดแรงไฟกระชาก (electrical surge) ที่อาจเกิดจากฟ้าผ่าและการเหนี่ยวนำไฟฟ้า

### 2.1.2.3 ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้า (FTTH Powering)

- ❖ ในระบบโทรศัพท์ที่ใช้สายทองแดงแบบเดิม (plain old telephone - POT) มีข้อดีตรงที่ระบบยังคงใช้งานได้เมื่อไฟดับเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ทำให้ระบบทำงานมาจากชุมสายโทรศัพท์ไม่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าที่ใช้อยู่ภายในบ้านแต่ในระบบ FTTH อุปกรณ์ ONU ติดตั้งอยู่ภายในบ้านของผู้ใช้ถือเป็นอุปกรณ์ประเภท active ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าประกอบกับเส้นใยแสงไม่สามารถนำพลังงานไฟฟ้าได้เหมือนระบบสายโทรศัพท์ทองแดงจึงจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานไฟฟ้าเฉพาะสำหรับ ONU นอกจากนี้ ONU ควรจะมีแบตเตอรี่สำรองเพื่อสามารถทำงานได้แม้ไฟดับทำให้ระบบต้องมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งหรือinstalled first costs (IFC)และค่าใช้จ่ายตลอดการใช้งาน ( life-cycle costs : LCC) เพิ่มขึ้น
- ❖ เทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถออกแบบให้ ONU มีระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก รวมทั้งกินไฟต่ำซึ่งเมื่อคิดคำนวณเปรียบเทียบกับระบบ POT ที่ต้องใช้ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากชุมสาย (ในขณะที่ระบบ FTTH ระบบพลังงานไฟฟ้าจะอยู่ที่บ้านผู้ใช้) กลายเป็นว่าพลังงานรวมที่เกิดขึ้นในระบบ FTTH กลับมีค่าน้อยกว่าซึ่งเป็นผลดีกับสภาพเศรษฐกิจของประเทศในระดับมหภาค

## 2.1.3 เทคโนโลยีที่สำคัญที่ใช้ใน FTTH

### 2.1.3.1 แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

แหล่งกำเนิดแสงชนิดสารกึ่งตัวนำที่มักใช้ในระบบสื่อสารเชิงแสงมี 2 ประเภทคือแอลอีดี (Light Emitting Diode - LED) และเลเซอร์ไดโอด (Laser Diode - LD) ในระบบสื่อสารข้อมูลที่มีความเร็วสูงจำเป็นต้องใช้เลเซอร์ไดโอดทั้งนี้เพื่อลดปัญหาของการเกิดดิสเพอร์ชัน (dispersion) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้สัญญาณพัลส์แสงเกิดการกระจายเชิงเวลาตามระยะทางที่เดินทาง

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติหากจำเป็นต้องติดตั้งเลเซอร์ไดโอดในงานข่ายสายต่อนนอก (outside plant) ซึ่งมีช่วงเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามสภาพแวดล้อมค่อนข้างกว้าง (โดยเฉพาะประเทศไทยจะมีความร้อนสูงมากในตอนกลางวัน) จะทำให้การทำงานของเลเซอร์ไดโอดมีประสิทธิภาพลดลง โดยเฉพาะค่ากระแสเทอร์สโฮลด์ (threshold current) หรือกระแสต่ำสุดที่ใช้เลเซอร์ไดโอดจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของตัวมัน (ตามสภาพแวดล้อม) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มแสงที่เปล่งออกมามีค่าลดลงโดยทั่วไปการแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการเพิ่มส่วนของวงจรถวายวัดความเข้มแสงขาออก และเพิ่มส่วนของวงจรมีป้อนกลับเพื่อทำให้วงจรมีเสถียรภาพตามข้อกำหนดของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปทำให้เลเซอร์ไดโอดมีค่าความเข้มแสงตามต้องการออกมานอกจากนี้ยังอาจต้องเพิ่มส่วนของอุปกรณ์ระบายความร้อนหรือตัวลดอุณหภูมิ (cooler) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนเกินไปเหล่านี้ล้วนทำให้วงจรมีเลเซอร์ไดโอดมีความซับซ้อนและยุ่งยากขึ้น

เทคโนโลยีปัจจุบันสามารถออกแบบเลเซอร์ไดโอดให้มีความไวต่ออุณหภูมิลดลงดังเช่น เลเซอร์ไดโอดชนิดเพบริเพอโรต์ (Fabry-Perot - FP) ชนิดโหมดร่วมตามแนวยาว (multilongitudinalmode) ซึ่งใช้เทคโนโลยีควอนตัมเวล (strained-layer multi-quantum-well - SLMQW) ทำให้สามารถนำมาใช้งานในสภาพกลางแจ้งเช่นงานข่ายสายต่อนอกได้โดยที่วงจรมีกระแสไม่จำเป็นต้องมีความยุ่งยากดังได้กล่าวมาแล้วจึงทำให้ตัวเลเซอร์ไดโอดมีต้นทุนที่ถูกลง ทั้งในส่วนของ การติดตั้ง และการดูแลซ่อมแซม

การส่งผ่านสัญญาณแสงจากแหล่งกำเนิดแสงไปยังเส้นใยแสงในระบบสื่อสารจำเป็นต้องถูกออกแบบให้มีความการส่งผ่านกำลังงาน (coupling) สูงในอดีตปัญหาการส่งผ่านกำลังงานต่ำเกิดจากขนาดของพื้นที่เปล่งแสงซึ่งมักพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลางของโหมดสนาม (mode field diameter - MFD) ระหว่างเลเซอร์ไดโอดกับเส้นใยแสงมักมีค่าแตกต่างกันมากแต่ปัจจุบันสามารถพัฒนาให้มีความใกล้เคียงกันมากประกอบกับการพัฒนาในเรื่องของตัวถังอุปกรณ์ (component packaging) ช่วยให้การต่อเชื่อมระหว่างเลเซอร์ไดโอดกับเส้นใยแสงในแนวเดียวกันมีความแน่นหนาและมีเสถียรภาพ ทำให้ค่าการสูญเสียสัญญาณบริเวณรอยต่อระหว่างเลเซอร์ไดโอดกับเส้นใยแสงมีค่าน้อยมาก

เทคโนโลยีเกี่ยวกับการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม (เช่นพลาสติกบางประเภท) ในการสร้างตัวถังอุปกรณ์มีส่วนทำให้เลเซอร์ไดโอดมีราคาถูกลงแต่ยังคงความแข็งแรงทนทานในการใช้งานอยู่อีกทั้งยังช่วยให้เลเซอร์ไดโอดทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่กว้างโดยมีผลกระทบต่อความขึ้นน้อยมาก อีกด้วยซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญต่อการใช้งานของระบบ FTTH เป็นอย่างยิ่ง

### 2.1.3.2 ตัวแยกและส่งผ่านสัญญาณตามความยาวคลื่น (Splitter and WDM coupler)

โครงสร้างของระบบเครือข่าย FTTH จำเป็นต้องมีอุปกรณ์แยกแสง (splitter) ในงานข่ายสายตอนนอกเพื่อแยกสัญญาณไปยังบ้านผู้ใช้ อุปกรณ์แยกแสงที่นิยมใช้กันมาแต่ครั้งอดีตได้แก่คัปเปิลอร์เส้นใยแก้ว (fiber coupler) ชนิด fused biconical coupler (FBT) ชนิด 2x2 ซึ่งมีคุณสมบัติในการแบ่งแยกสัญญาณขาเข้าไปสู่ขาออกในเส้นทางอื่นโดยมีสัดส่วนความเข้มแสงแต่ละแนวทางเป็นไปตามที่ออกแบบอีกทั้งคัปเปิลอร์เส้นใยแก้วชนิด FBT ยังสามารถออกแบบให้การทำงานขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่นได้อีกด้วย (WDM coupler) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาตัวแยกแสงโดยใช้ท่อนำแสงแบบระนาบที่ใช้ซิลิกอนเป็นวัสดุหลัก (silicon planar waveguide) ซึ่งราคาของตัวแยกแสงทั้งสองค่อนข้างจะมีราคาสูงหากมีการสั่งซื้อเพียงไม่กี่ตัวเช่นในอดีตอย่างไรก็ตามการที่ระบบ FTTH เริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้นทำให้ความต้องการใช้งานตัวแยกแสงมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากทำให้ราคาของอุปกรณ์มีราคาถูกลงอย่างมากเพราะสามารถผลิตเป็น mass product ได้อีกทั้งคุณภาพของอุปกรณ์ยังดีกว่าแต่ก่อนอีกด้วย

เทคโนโลยีปัจจุบันได้พัฒนาให้ตัวแยกแสงที่ใช้ท่อนำแสงแบบระนาบมีขนาดเล็กลง (เช่น 1.5 mm x 2 cm) มีความสามารถในการแยกแสงให้มีแสงขาออกได้หลายทางสามารถทำงานภายใต้อุณหภูมิสูงได้ (เช่น > 100°C) และที่สำคัญมีค่าการสูญเสียสัญญาณ (excess loss) ต่ำ (< 0.5 dB) [13] นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้มากกว่า 50,000 ชั่วโมงอย่างต่อเนื่องโดยคุณภาพสัญญาณยังคงเดิม

เทคโนโลยีการแยกแสงแบบระนาบที่มีฟังก์ชันการทำงานขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสง (WDM coupler) ดังเช่นอุปกรณ์ที่เรียกว่า waveguide grating router (WGR) เป็นอุปกรณ์ที่อาจจะยังไม่มีให้เห็นในเชิงพาณิชย์นักแต่ก็ถือว่าเป็นอุปกรณ์ในอนาคตของ FTTH ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเกี่ยวกับความเร็วในการสื่อสารสัญญาณและการทับซ้อนของระบบสื่อสารสัญญาณต่างชนิดกันโดยไม่รบกวนกันทำให้เชื่อมั่นได้ว่า FTTH เป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นในการใช้งานอีกทั้งยังมีเส้นทางในการพัฒนาไปได้อีกในอนาคต

### 2.1.3.3 เครือข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟหรือ PON

ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ในการติดตั้งระบบสื่อสารมักเกี่ยวข้องกับงานขุดสายต่อนนอกระบบ FTTH เป็นระบบที่อุปกรณ์ขุดสายต่อนนอกระบบเป็นเครือข่ายเส้นใยแสงที่บรรจุข้อมูลได้มากทำให้สามารถสื่อสารข้อมูลสำหรับผู้ใช้จำนวนมากผ่านเส้นใยแสงเพียงเส้นเดียวได้ในเส้นทางหลักของการสื่อสารข้อมูลจากนั้นจึงใช้ตัวแยกแสงทำการแยกข้อมูลไปยังบ้านผู้ใช้อีกทีหนึ่งการที่โครงสร้างของระบบเป็นเช่นนี้จะทำให้ระบบมีราคาถูกลงเพราะเส้นใยแสงสามารถใช้เป็นเส้นทางร่วมของการสื่อสารข้อมูลได้ประกอบกับตัวแยกแสง (เช่นคัปเปิลอร์ชนิด FBT) เป็นอุปกรณ์ประเภท passive ซึ่งลักษณะเครือข่ายเช่นนี้เรียกว่าเครือข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟหรือจึงทำให้ค่าใช้จ่ายในของเครือข่าย FTTH มีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับปริมาณข้อมูลที่ให้บริการ

การให้บริการ FTTH สามารถทำงานร่วมกับเทคโนโลยีมัลติเพล็กซ์เชิงแสงหรือ wavelength division multiplexing (WDM) ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถสื่อสารข้อมูลต่างชนิดกันด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นแสงแตกต่างกันไปในเส้นใยแสงเส้นเดียวกันได้อันจะทำให้ปริมาณข้อมูลหรือความเร็วในการสื่อสารข้อมูลเพิ่มขึ้นอย่างมากตามตัวคูณของจำนวนความยาวคลื่นแสงที่ใช้ตัวอย่างเช่นเครือข่าย FTTH ที่ใช้แสงเพียงความยาวคลื่นเดียวให้บริการที่ความเร็ว 100 Mb/s หากทำการปรับปรุงส่วนของภาคส่งให้มีความยาวคลื่นแสงสำหรับสื่อสารได้พร้อมกันเป็นจำนวน 4 ความยาวคลื่นระบบเดิมจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าหรือ 400 Mb/s ในทันทีจากจุดนี้ก็จะเห็นว่าระบบเครือข่ายของ FTTH สามารถพัฒนาให้เป็นแบบ PON-WDM ได้โดยแทบไม่ต้องไปปรับปรุงแก้ไขงานขุดสายต่อนนอกระบบเลยจากรายงานในปัจจุบันพบว่าระบบ FTTH ในเชิงพาณิชย์สามารถให้บริการเครือข่ายแบบ PON-WDM ที่ใช้ความยาวคลื่นแสงร่วมกันถึง 16 ความยาวคลื่นแสงกันแล้วและมีแนวโน้มที่จะพัฒนาให้มีจำนวนมากขึ้นไปเรื่อยๆ

### 2.1.3.4 การสื่อสารข้อมูลด้วยระบบเอทีเอ็ม (ATM transport)

แม้ว่า FTTH จะมีข้อดีในเรื่องของความน่าเชื่อถือและความเร็วในการสื่อสารข้อมูลแต่การที่จะต้องให้บริการเครือข่ายที่มีผู้ใช้มากมายและหลากหลายทำให้มีข้อมูลหลากหลายชนิดเดินทางอยู่ในระบบปัญหาสำคัญในตอนนี้ก็คือทำอย่างไรที่จะทำให้ข้อมูลที่แตกต่างกันสามารถสื่อสารร่วมกันได้ในระบบเดียวกันซึ่งทางออกของปัญหานี้ก็คือการนำระบบสื่อสารสัญญาณแบบ ATM มาใช้บนเครือข่ายของ FTTH

โปรโตคอลของ ATM เป็นโปรโตคอลที่มีความยืดหยุ่นสูงและเป็นที่ยอมรับใช้ในเครือข่ายสื่อสารทั่วไปในระบบ ATM ข้อมูลต่างๆไม่ว่าจะเป็นเสียงภาพข้อมูลคอมพิวเตอร์หรืออื่นๆที่มี

ลักษณะแตกต่างกันจะถูกทำให้เป็นข้อมูลดิจิทัลเหมือนกันจากนั้นข้อมูลนี้จะถูกจัดกลุ่มเรียกว่า เซลล์ (cell) ก่อนถูกส่งออกไปยังปลายทางในลักษณะของการสื่อสารสัญญาณแบบแพ็กเก็ต (packet switching) ซึ่งจะช่วยให้ระบบสามารถสื่อสารข้อมูลที่มีรูปแบบหลากหลายได้ในเครือข่ายเดียวกัน มาตรฐานทางเทคนิคของระบบ ATM ที่ใช้งานบนเครือข่าย PON (เรียกว่า ATM-PON หรือAPON) ถือเป็นมาตรฐานสากลรายละเอียดทางเทคนิคสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จาก ITU-TG.983

### 2.1.3.5 การบีบอัดข้อมูลภาพ (video compression)

ในบรรดาข้อมูลชนิดต่างๆที่ใช้สื่อสารกันข้อมูลภาพจัดว่าเป็นข้อมูลที่มีขนาดใหญ่แถบความกว้างความถี่หรือแบนด์วิดท์ (bandwidth) ของสัญญาณภาพเคลื่อนไหวยิ่งมีค่าประมาณ 6 MHz และเมื่อผ่านกระบวนการแปลงสัญญาณให้เป็นข้อมูลดิจิทัลตามปกติจะต้องใช้อัตราเร็วในการสื่อสารข้อมูลถึง 96 Mb/s ซึ่งจะเห็นว่าการสื่อสารข้อมูลภาพเคลื่อนไหวผ่านเครือข่ายที่เป็นสายไฟทองแดงไม่สามารถทำได้เลยอย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนาเทคนิคการบีบอัดภาพให้มีขนาดเล็กลงทำให้สามารถสื่อสารผ่านสายส่งที่มีแบนด์วิดท์แคบอย่างสายทองแดงได้ แต่จะพบว่ารายละเอียดหลายอย่างขาดหายไปภาพที่ได้อาจจะไม่ใช่ตามเวลาจริงหรืออาจมีลักษณะการเคลื่อนไหวแบบไม่ต่อเนื่องจริง

แม้ว่าระบบ FTTH จะใช้เส้นใยแสงเป็นสายส่งซึ่งโดยปกติเส้นใยแสงมีแบนด์วิดท์สูงกว่าสายส่งทองแดงมากแต่การออกแบบระบบสวิตชิงและหาเส้นทางที่ชุมสาย (ระบบ FTTH อาจเรียกส่วนชุมสายนี้เป็น Central Office - CO) ก็ยังคงเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานด้วยความเร็วต่ำกว่าความสามารถของเส้นใยแสงมากทั้งนี้ด้วยเหตุผลเกี่ยวกับการควบคุมค่าใช้จ่ายของต้นทุนเพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถจ่ายค่าบริการในอัตราที่สามารถจ่ายได้ตามสภาพเศรษฐกิจดังนั้นการสื่อสารสัญญาณภาพเคลื่อนไหวที่ต้องอาศัยความเร็วสูงจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการบีบอัดสัญญาณเช่นเดียวกับสายส่งทองแดงอย่างไรก็ตามการที่มีเส้นใยแสงเป็นสายส่งทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงปัญหาในการสื่อสารสัญญาณเลยโดยสิ่งที่สนใจมากกว่าก็คือคุณภาพของสัญญาณ

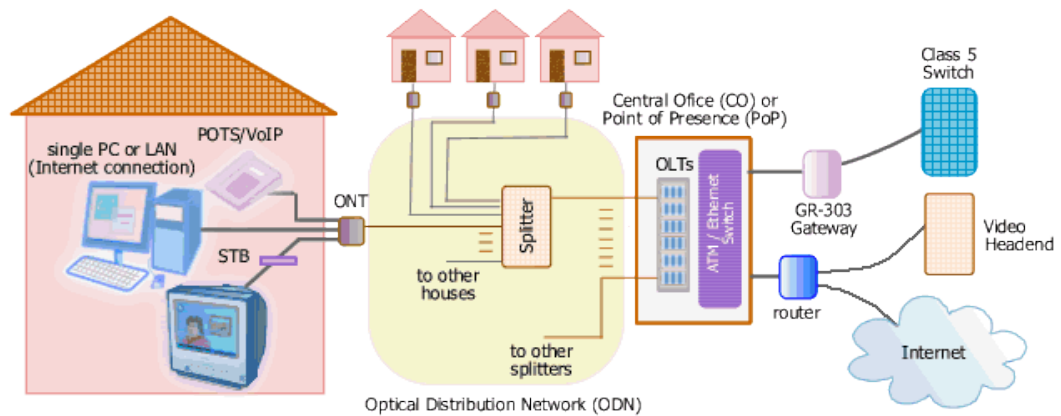
เทคโนโลยีการบีบอัดสัญญาณภาพในปัจจุบันได้พัฒนาไปมากตัวอย่างเช่นการบีบอัดภาพตามมาตรฐานของเทคนิค MPEG ทำให้สัญญาณภาพที่ถูกบีบอัดมีขนาดเล็กลงในขณะเดียวกันคุณภาพของสัญญาณที่ได้ก็เพิ่มขึ้นในกรณีของมาตรฐาน MPEG-2 สามารถบีบอัดสัญญาณภาพลงมาได้เหลือเพียง 1.5 – 6 Mb/s โดยที่คุณภาพของภาพเคลื่อนไหวตามเวลาจริง (real time) อยู่ในเกณฑ์ที่ดีทีเดียวยิ่งไปกว่านั้นในระบบของสัญญาณภาพความละเอียดสูงหรือ (HDTV – high definition television) ซึ่งมีขนาดของข้อมูลดิจิทัลอยู่ที่ 1 Gb/s สามารถใช้เทคโนโลยี



ยี่ห้อของ MPEG บีบอัดลงได้เหลือเพียง 20 Mb/s เท่านั้นและที่สำคัญอุปกรณ์ที่เป็นชิพ (chip) ในการประมวลผลสัญญาณภาพมีราคาถูกลงและเมื่อต้องซื้อเป็นปริมาณมากเพื่อมาใช้ในระบบ FTTH ก็ยิ่งทำให้ต้นทุนรวมต่อปริมาณข้อมูลมีราคาไม่แพง

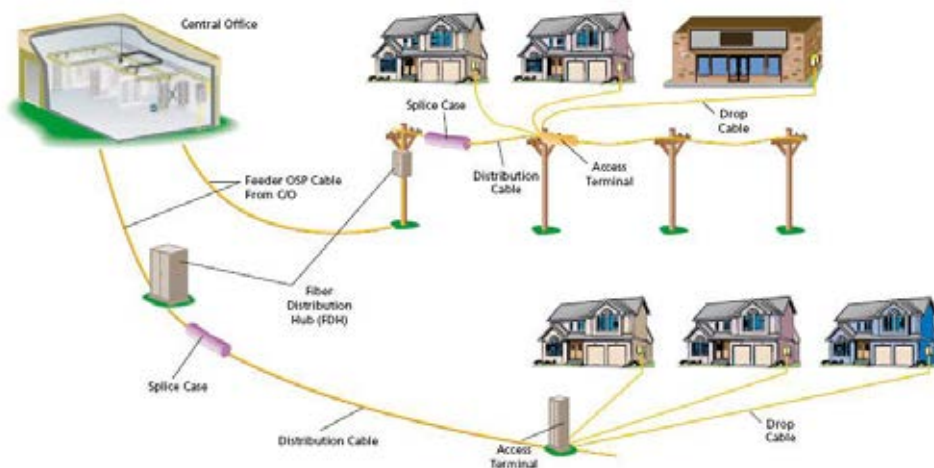
ระบบ FTTH เป็นระบบที่สามารถสื่อสารสัญญาณภาพที่ผ่านกระบวนการบีบอัดภาพแบบดิจิทัลลดดังกล่าวได้ซึ่งเมื่อพิจารณาความเร็วพื้นฐานของ FTTH ที่ประมาณ 100-150 Mb/s แล้วจะพบว่าช่องสัญญาณมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะสื่อสารสัญญาณภาพที่มีคุณภาพสูงได้อย่างสบายหลายช่องพร้อมกันอันจะทำให้การบริการข้อมูลเป็นไปอย่างไร้ขีดจำกัด

### 2.1.4 โครงสร้างทางเทคนิคของระบบ FTTH



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเทคนิคพื้นฐานของระบบ FTTH

### FTTX Fiber Architecture

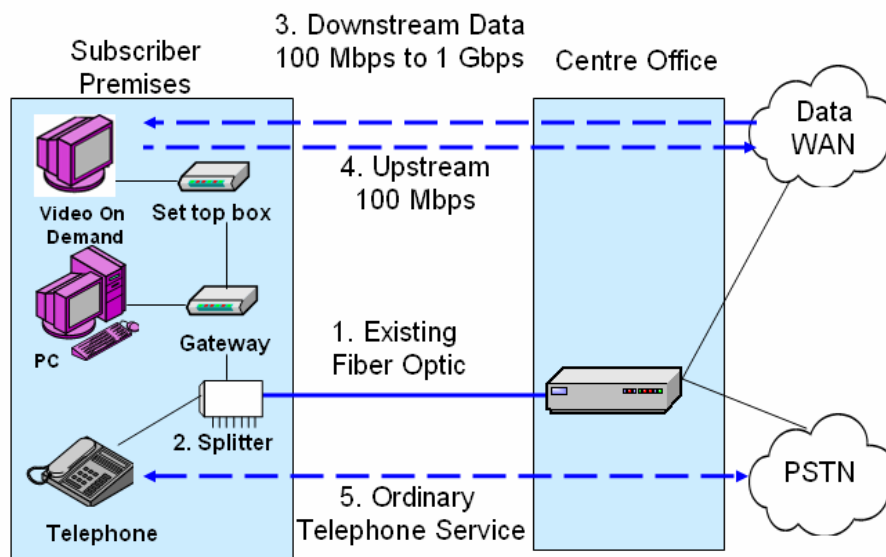


รูปที่ 2.4 รายละเอียดโครงสร้างของ FTTH [19]

### 2.1.4.1 โครงสร้างพื้นฐาน

โครงสร้างทางเทคนิคพื้นฐานของระบบ FTTH (ดังรูปที่ 2.3 และ รูปที่ 2.4) จะมีชุมสายที่เป็นสำนักงานกลางเรียกว่า central office (CO) หรือ host digital terminal (HDT) ทำหน้าที่จัดการเกี่ยวกับสัญญาการให้บริการไปยังผู้ใช้ที่อยู่ในเขตควบคุมของ CO อีกทั้งยังต้องทำหน้าที่เชื่อมโยงข้อมูลเข้ากับระบบสื่อสารโทรคมนาคมเพื่อรับส่งข้อมูลไปยังที่อื่นตามความต้องการของผู้ใช้

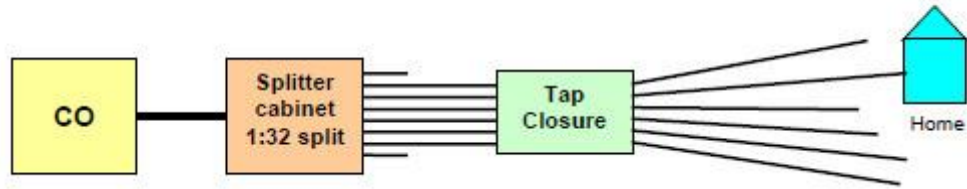
ภายใน CO จะประกอบด้วยอุปกรณ์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ประมวลสัญญาณเช่นตัดต่อหรือสลับสาย (switching) จัดหาเส้นทางการเดินทางของข้อมูล (routing) และอื่นๆตามที่จำเป็นระหว่าง CO กับบ้านผู้ใช้เป็นงานข่ายสายตอนนอกประกอบด้วยเส้นใยแสงเชื่อมโยงไปยังกลุ่มบ้านผู้ใช้ในลักษณะของการกระจาย (distribution) ไปยังชุมชนเข้าสู่บ้านผู้ใช้ตามลำดับเส้นใยแสงที่ออกจาก CO ต้องมีความสามารถในการสื่อสารสัญญาณที่มีปริมาณมากข้อมูลมากๆได้ส่วนของเคเบิลเส้นใยแสงส่วนนี้เรียกว่าฟีดเดอร์ (feeder) เส้นทางการเดินทางของสายส่งเส้นใยแสงจากฟีดเดอร์จะถูกแยกออกเป็นเส้นทางย่อยเพื่อส่งข้อมูลไปยังชุมชนต่างๆส่วนของเคเบิลเส้นใยแสงส่วนนี้เรียกว่าข่ายสายกระจายดิสทริบิวชัน (distribution) ในแต่ละชุมชนหรือกลุ่มผู้ใช้ปลายทาง จะมีตัวแยกข้อมูลส่งผ่านสายส่งเส้นใยแสงไปในแต่ละบ้านโดยเฉพาะ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าการเข้าถึงหรือ access และสายเคเบิลเส้นใยแสงในส่วนของ access นี้จะถูกเรียกว่า drop cable ด้านปลายของเส้นใยแสงที่เข้าไปยังบ้านผู้ใช้บริการ จะต่อเข้ากับ ONU หรืออาจเรียกว่า ONT เพื่อทำหน้าที่กระจายสัญญาณทั้งในรูปแบบของสัญญาณแสงและไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ใช้งานซึ่งอาจเป็นโทรศัพท์โทรศัพท์เคลื่อนที่หรือคอมพิวเตอร์เป็นต้น ทั้งนี้จำนวนอุปกรณ์ใช้งานในบ้านของผู้ใช้อาจมีได้มากกว่าหนึ่งอุปกรณ์ขึ้นกับปริมาณข้อมูล(ความเร็ว)ที่ใช้บริการและรูปแบบการให้บริการของผู้ให้บริการ (operator)



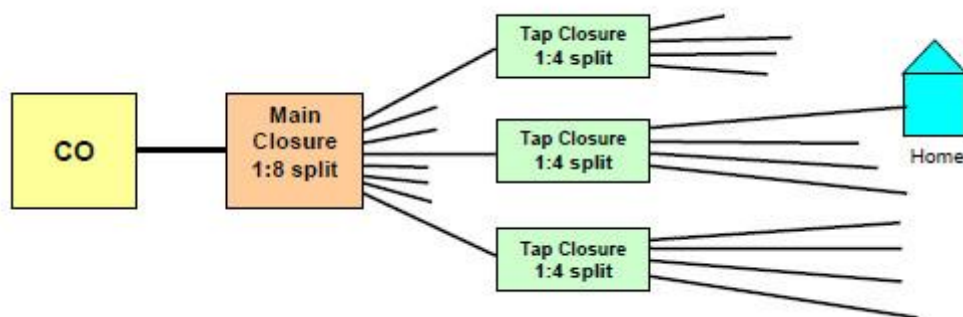
รูปที่ 2.5 รูปแบบการสื่อสารสัญญาณของ FTTH และการกระจายสัญญาณภายในบ้านผู้ใช้ [16]

รูปแบบการส่งสัญญาณระหว่าง CO ไปยัง ONU ในบ้านผู้ใช้และการกระจายสัญญาณ ข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องยกเลิกสายโทรศัพท์เดิมก็ได้เพราะระบบ โทรศัพท์เดิมที่ข้อมูลวิ่งอยู่บนเครือข่ายพื้นฐาน ยังคงทำงานตามปกติแม้ว่า CO ของ FTTH จะมีการให้บริการโทรศัพท์ก็ตามอุปกรณ์ ONU ภายในบ้านอาจประกอบด้วยส่วนของตัวแยกสัญญาณ และอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมกับการต่อเชื่อมเครื่องใช้ไฟฟ้าปลายทาง (เช่น โทรศัพท์ หรือคอมพิวเตอร์) เพื่อให้เครื่องใช้ไฟฟ้านั้นทำงานได้อย่างถูกต้องโดยปกติการสื่อสารข้อมูลจาก CO ถึงบ้านผู้ใช้ซึ่งถือเป็นการสื่อสารข้อมูลขาลง (downstream) และจากบ้านผู้ใช้ไปยัง CO ซึ่งถือ เป็นการสื่อสารข้อมูลขาขึ้น (upstream) มักมีค่าความเร็วแตกต่างกัน ที่แสดงถึงระบบที่มีความเร็ว ข้อมูลขาลง (downstream) เปลี่ยนแปลงได้ระหว่าง 100 Mb/s – 1 Gb/s ในขณะที่ความเร็วข้อมูล ขาขึ้นมีค่าไม่เกิน 100 Mb/s นอกจากนี้ระบบ FTTH ยังสามารถกำหนดให้ความยาวคลื่นแสงที่เป็นคลื่นพาห้ (carrier) ระหว่างการส่งข้อมูลขาลงและขาขึ้นมีค่าแตกต่างกันหรือใช้ความยาวคลื่น เดียวกันก็ได้

### 2.1.4.2 รูปแบบการเชื่อมโยงสายส่งสัญญาณ



(ก) การแยกสายส่งสัญญาณแบบรวมศูนย์กลาง (Centralized Splitting)



(ข) การแยกสายส่งสัญญาณแบบกระจาย (Distributed Splitting)

รูปที่ 2.6 รูปแบบการเชื่อมโยงสายส่งเคเบิลใยแสงในระบบ FTTH

โครงสร้างพื้นฐานสำคัญของระบบ FTTH เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงใยแสงจาก CO ไปยังบ้านผู้ใช้งานระบบ FTTH มีจำนวนบ้านผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นเท่าไรก็จำเป็นต้องเชื่อมโยงใยแสงมากขึ้นเท่านั้นรูปแบบการเดินสายส่งสัญญาณจาก CO ไปยังบ้านผู้ใช้งานมีลักษณะเป็นแบบ point-to-multipoint network (PTMPN) ซึ่งในระบบ FTTH สามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะได้แก่แบบรวมศูนย์กลางและแบบกระจายดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในลักษณะของการเดินสายส่งแบบรวมศูนย์กลางระบบการแยกสายไปยังชุมชนต่างๆจะถูกแยกไปในลักษณะ 1 สายต่อ 1 ชุมชนและเมื่อไปถึงชุมชนต่างๆเส้นใยแสงจะถูกแบ่งแยกเข้าไปยังบ้านผู้ใช้งานบริการอีกทีหนึ่งเครือข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟที่ใช้ในระบบ FTTH อาจแบ่งแยกเป็นกลุ่มย่อยได้อีกตามลักษณะของ splitter ที่ใช้เช่นระบบ PON ทั่วไปอาจใช้ตัวแยกแสงชนิด 1:4 หรือ 1:8 ระบบ EPON ใช้ตัวแยกชนิด 1:16 ในขณะที่ระบบ BPON ใช้ตัวแยกชนิด 1:32 โดยที่ระบบสามารถทำงานได้กับความยาวคลื่นแสงสูงสุดถึง 3 ความยาวคลื่น (1490 nm และ 1310 nm สำหรับข้อมูลเสียงและข้อมูลดิจิทัลที่เป็น data และ 1550 nm สำหรับข้อมูลภาพ) ที่ความเร็วสูงสุดประมาณ 622 Mb/s ปัจจุบันเริ่มมีผู้ผลิตหลายรายพัฒนาระบบ GPON ขึ้นมาสำหรับทำงานกับ splitter ชนิด 1:64 ทั้งนี้ระบบ GPON ถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการสื่อสารสัญญาณสูงซึ่งมีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงถึง 2.4 Gb/s อีกทั้งยังสามารถให้บริการไปยังบ้านผู้ใช้งานที่อยู่ห่างไกลจาก CO มากกว่า 30 km ได้อีกด้วย

### 2.1.4.3 มาตรฐาน PON

APON, BPON, GPON, EPON และ GE-PON เป็นตัวแทนเทคโนโลยี PON โดย APON และ BPON มีข้อกำหนดที่เหมือนกันซึ่งโดยทั่วไปจะอ้างถึง BPON อันเป็นมาตรฐานที่เก่าที่สุดและในขณะที่ได้มีการติดตั้งโดยยี่ห้อ BPON ตลาดใหม่ส่วนใหญ่จะเน้นการใช้งานไปที่ EPON/GE-PON โดย EPON และ GE-PON เป็นชื่อที่ต่างกันสำหรับข้อกำหนดที่เหมือนกัน นั่นคือถูกกำหนดโดยมาตรฐาน ethernet in the first mile หรือ IEEE 802.3ah ซึ่งได้รับการอนุมัติในเดือนมิถุนายน 2004 มาตรฐานดังกล่าวนี้เป็นทางออกที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันสำหรับเทคโนโลยี gigabit PON โดย GPON ในปัจจุบันนี้ได้ทำให้เป็นมาตรฐาน ITU-TG.984 recommendation และได้รับการสนใจในอเมริกาเหนือและอื่น ๆ แต่ไม่มีมาตรฐานที่สิ้นสุดสามารถจำแนกได้ดังนี้

#### 2.1.4.3.1 ข้อกำหนด ITU-TG.983

มาตรฐาน ATM passive optical network (APON) นับเป็นมาตรฐาน PON แรกของโลก ได้รับการออกแบบขึ้นเพื่อรองรับการใช้งานของภาคธุรกิจ โดยมีรูปแบบรองรับการใช้งานของภาคธุรกิจ โดยมีรูปแบบการจัดโครงสร้างข้อมูลที่ถูกส่งผ่านวงจรส่งผ่านวงจรใยแก้วนำแสงตามมาตรฐานสื่อสารแบบ ATM

มาตรฐาน broadband PON (BPON) เป็นมาตรฐานที่ได้รับการพัฒนาต่อยอดจาก APON โดยเพิ่มความสามารถในการรับส่งข้อมูลแบบ wavelenght division multiplex (WDM) ช่วยเพิ่มแบนด์วิดท์ในการรับส่งข้อมูลด้านขาขึ้น(จากผู้ให้บริการกลับไปยังโครงข่าย) นอกจากนั้นในมาตรฐาน BPON นี้ยังมีการกำหนดจุดเชื่อมต่อมาตรฐานมีชื่อว่า ONT management and control interface (OMCI) ขึ้นระหว่างอุปกรณ์ OLT กับ ONU เพื่อใช้ในการบริหารจัดการจุดเชื่อมต่อโดยเป็นมาตรฐานกลาง ทำให้ผู้ให้บริการโครงข่ายสามารถเลือกใช้อุปกรณ์ของผู้ผลิตรายใดก็ได้ ทั้งนี้ ผู้เขียนจะได้กล่าวถึงรายละเอียดทางด้านสถาปัตยกรรมของโครงข่าย PON ในภายหลัง [20]

#### 2.1.4.3.2 ข้อกำหนด ITU-T G.984

มาตรฐาน gigabit PON (GPON) เป็นพัฒนาอีกขั้นหนึ่งที่สูงกว่า BPON รองรับการสื่อสารข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้น มีกลไกรักษาความปลอดภัยให้กับข้อมูลที่ดีกว่า อีกทั้งมีการกำหนดตัวเลือกในการรับส่งข้อมูล ในระดับชั้นโปรโตคอลชั้นที่ 2 (OSI Layer 2 protocol) ได้ทั้ง

แบบ ATM, GPON encapsulate method (GEM) และ ethernet ถือเป็นมาตรฐาน PON ที่โดดเด่น และมีแนวโน้มในการนำไปใช้งานในเชิงธุรกิจมากที่สุด โดยในช่วงต้น พ.ศ. 2551 ที่ผ่านมามีบริษัท Verizon ผู้ให้บริการโครงข่ายโทรคมนาคมรายใหญ่ในประเทศสหรัฐอเมริกา มีการลงทุนสร้างโครงข่าย GPON โดยมีเป้าหมายวางคู่สายใยแก้วนำแสงไปยังผู้ใช้บริการกว่า 800,000 คู่ครัวเรือน [20]

#### 2.1.4.3.3 ข้อกำหนด IEEE 802.3ah

มาตรฐาน ethernet PON (EPON) หรือ GEPON เป็นข้อกำหนดมาตรฐานจากค่าย IEEE ของสหรัฐอเมริกา โดยใช้ปรัชญาการรับส่งข้อมูลในรูปแบบของเฟรมข้อมูล ethernet ซึ่งปัจจุบันข้อกำหนด IEEE 802.3ah ได้รับการบรรจุเป็นส่วนหนึ่งของอนุกรมกำหนด IEEE 802.3 ถือเป็น PON อีกมาตรฐานหนึ่งที่เป็นคู่แข่งกับมาตรฐาน GPON ของค่ายยุโรปข้อมูลเมื่อปลาย พ.ศ. 2550 พบว่าทั่วโลกมีผู้ใช้บริการโครงข่าย EPON แล้วถึง 12 ล้านรายและเมื่อพิจารณาถึงแผนการลงทุนวางโครงข่าย EPON ในประเทศจีนซึ่งปัจจุบันกำลังรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว ก็น่าจะประมาณการได้ว่าภายในสิ้นปี พ.ศ. 2551 ทั่วโลกจะมีผู้ใช้บริการเคเบิลใย EPON มากถึงเกือบ 20 ล้านราย [20]

#### 2.1.4.4.4 ข้อกำหนด IEEE 802.3av

มาตรฐาน 10 Gigabit Ethernet PON (10GEPON) เป็นมาตรฐานที่กำลังได้รับการพัฒนาต่อจาก EPON โดยหลักการคือมุ่งออกแบบให้มีการแยกลำแสงที่ส่งภายในคู่สายใยแก้วนำแสง เพื่อให้ผู้ใช้บริการสามารถแยกการรับข้อมูลด้วยอัตราเร็ว 10 Gb/s และ 1 Gb/s ออกจากกัน ขณะนี้อยู่ในระหว่างการวางข้อกำหนด

การแข่งขันของมาตรฐาน PON ระหว่างมาตรฐานยุโรป (GPON) และสหรัฐอเมริกา (GEPON) ถือเป็นฉากหนึ่งของการชิงเป็นผู้นำโลกโทรคมนาคม ในปัจจุบันเทคโนโลยี GPON ได้รับความนิยมในการใช้งานในภาคพื้นตะวันตกเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ภูมิภาคเอเชียนิยมใช้เทคโนโลยี GEPON อย่างไรก็ตาม ทั้ง 2 เทคโนโลยีนี้ยังถือเป็นเพียงจุดเริ่มต้นของการพัฒนาข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับเทคโนโลยี PON ซึ่งกล่าวได้ว่าทั้งคู่ล้วนเป็นเทคโนโลยีที่มีการทำงานแบบ time division multiplex (TDM) หรืออาจเรียกได้ว่าทั้ง GPON และ GEPON เป็นเทคโนโลยีที่มีการทำงานแบบ TDM-PON ในขณะที่โลกของการพัฒนาเทคโนโลยี PON นั้นยังมีการพัฒนาเทคนิคการรวมส่วนข้อมูลในรูปแบบอื่นๆ อีกเช่น data over cable service interface specification-PON (WDM-PON, DOCSIS-PON) หรือ radio frequency over glass (R-OFDM-PON) เป็นต้น

PON/DPON,RF-PON) รวมถึง hybrid-fiber-coax PON (HFC-PON) ซึ่งเป็น ทางเลือกใหม่ในการเพิ่มขยายขีดความสามารถในการให้บริการแบบ FTTH ต่อไปในอนาคต [20]

## 2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของเทคโนโลยีไร้สาย

### 2.2.1 ความเป็นมาของเทคโนโลยีไร้สาย

ระบบเครือข่ายแบบไร้สาย หรือ WLAN นั้นกำลังได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากเทคโนโลยี WLAN นั้นเป็นเทคโนโลยีที่ง่ายและสะดวกรวดเร็วในการติดตั้งทั้งยังสามารถทำให้การเข้าถึงทรัพยากรขององค์กรนั้นทั่วถึงทุกหนทุกแห่งเพราะเทคโนโลยี WLAN ไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งสายเคเบิลภายในตัวอาคาร ดังนั้น Wireless LAN จึงเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่และได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน

ในปี ค.ศ. 1970 ระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless LAN) เกิดขึ้นครั้งแรกที่มหาวิทยาลัยฮาวาย ซึ่งเป็นโปรเจกต์ว่า "ALOHNET" ในขณะนั้นการส่งข้อมูลเป็นแบบ bi-directional คือการส่งไป-กลับง่ายๆ ผ่านคลื่นวิทยุ สื่อสารกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ 7 เครื่อง ซึ่งตั้งอยู่บนเกาะ 4 เกาะโดยมีศูนย์กลางการเชื่อมต่ออยู่ที่เกาะ ที่มีชื่อว่า "Oahu"ต่อมาในปี ค.ศ. 1997 สถาบัน IEEE ได้มีการกำหนดมาตรฐาน LAN ไร้สายแบบเดียวกับอีเทอร์เน็ต และเป็นชุดเดียวกับ 802 โดยให้ชื่อว่า IEEE 802.11 มาตรฐานที่เกิดขึ้นในปีนั้น ยังมีข้อจำกัดทางเทคโนโลยีจึงได้กำหนดระบบการรับส่งสัญญาณด้วยขนาดความเร็ว 2Mbps เท่านั้น หลังจากนั้นระบบ LAN ไร้สาย IEEE 802.11 จึงเป็นที่รู้จักกันนับตั้งแต่นั้นมา

ในปี ค.ศ. 1999 IEEE ได้มีการพัฒนามาตรฐานใหม่ของระบบ LAN ไร้สาย และใช้ชื่อมาตรฐานที่ IEEE 802.11b โดยมีการพัฒนาให้มีความเร็วในการรับส่งได้ถึง 11 Mb/s และเป็นการส่งข้อมูลแบบฟูลดูเพล็กซ์ (Full Duplex) คือการรับและส่งแยกกันด้วยความเร็ว 11 Mb/s จากมาตรฐาน 802.11b ที่ประกาศออกไปนี้ บริษัทผู้ผลิตต่างๆ จึงได้ผลิตอุปกรณ์เครือข่ายไร้สายออกมามากมาย โดยเฉพาะบริษัทที่เป็นผู้ผลิตอุปกรณ์เครือข่ายขนาดใหญ่ ได้ให้ความสำคัญในการผลิตและพัฒนาเทคโนโลยีระบบเครือข่ายไร้สายเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเมื่อระบบเครือข่ายมีขนาดใหญ่ และขยายออกไปมากขึ้น ทำให้มีการพัฒนาระบบโรมมิ่ง (Roaming) ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้สามารถเคลื่อนย้ายจากเครือข่ายหนึ่งไปยังอีกเครือข่ายหนึ่ง และเนื่องจากการส่งข้อมูลของระบบเครือข่ายไร้สายนั้น มีจุดอ่อนในเรื่องความปลอดภัย เพราะมีการส่งโดยใช้คลื่นวิทยุในอากาศ ทำให้ผู้ผลิตหันมาให้ความสนใจในการปรับปรุงในเรื่องระบบการดูแลรักษาความ

ปลอดภัยของสัญญาณข้อมูลที่แพร่กระจายในอากาศ โดยมีการวางมาตรฐานทางด้านการเข้ารหัส (Encryption) ข้อมูล และระบบดูแลรักษาความปลอดภัยในการเข้าถึงมากขึ้น

## 2.2.2 องค์ประกอบของเทคโนโลยีไร้สาย

การใช้งานเทคโนโลยี WLAN นั้น จะต้องประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างน้อย 2 อุปกรณ์ด้วยกัน คือ อุปกรณ์ส่งสัญญาณ (access point) และอุปกรณ์รับสัญญาณ (wireless card) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปแบบของ Wireless LAN [21]

สำหรับการติดตั้งใช้งานระบบ wireless LAN นั้น เราจำเป็นที่จะต้องติดตั้งอุปกรณ์ access point (AP) เข้ากับระบบเครือข่ายหลักของเราที่มีอยู่ และติดตั้งอุปกรณ์ Wireless card เข้ากับเครื่อง notebook/laptop, palm / PDA ทางช่อง PCMCIA slot หรืออาจจะติดตั้งเข้ากับเครื่อง PC ก็ได้ ในกรณีที่เรามีอุปกรณ์ในการแปลง interface ของ wireless card จาก PCMCIA เป็น interface แบบ PCI จะสามารถใช้งานระบบเครือข่ายโดยผ่านเทคโนโลยี WLAN ได้



### 2.2.3 ข้อดีของระบบไร้สาย

ข้อดีของเทคโนโลยี WLAN เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเครือข่ายแบบใช้สายธรรมดานั้นพอจะสรุปได้ ดังนี้

- ❖ mobility: ผู้ใช้งาน WLAN นั้นสามารถที่จะเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบเครือข่ายขององค์กรได้ในทุกที่ทุกเวลา ภายในพื้นที่ที่สัญญาณของระบบ WLAN ครอบคลุมถึง
- ❖ simple & quick installation: การใช้งานระบบ WLAN ค่อนข้างง่ายและสะดวกรวดเร็ว เพราะว่าเทคโนโลยี WLAN นั้นเป็นเทคโนโลยีที่สามารถใช้งานได้ในลักษณะ plug & play โดยไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งสายเคเบิลให้เกิดความยุ่งยากและวุ่นวาย
- ❖ reach difficult area: เทคโนโลยี WLAN นั้นสามารถส่งสัญญาณเพื่อให้บริการในการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบเครือข่ายได้ในบริเวณที่ยากแก่การติดตั้ง
- ❖ reduce future cost : สำหรับค่าใช้จ่ายในการติดตั้งใช้งานเทคโนโลยี WLAN นั้นจะค่อนข้างสูงในขั้นแรก แต่ถ้านับรวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งใช้งานทั้งระบบ, ค่าบำรุงรักษา, อายุการใช้งานของอุปกรณ์ รวมถึงค่าใช้จ่ายในกรณีต้องการขยายจำนวนของผู้ใช้งานในอนาคตแล้วนั้นจะถือว่า WLAN เป็นเทคโนโลยีที่ไม่แพงเลย
- ❖ scalability : WLAN เป็นเทคโนโลยีที่สามารถกำหนดและปรับเปลี่ยนรูปแบบในการใช้งานได้หลากหลายรูปแบบตามแต่ที่เราจะนำไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับ application ของเรา

### 2.2.4 มาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกในปีค.ศ. 1997 ซึ่งอุปกรณ์ตามมาตรฐานดังกล่าวจะมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1 และ 2 Mb/s ด้วยสื่ออินฟราเรด (infrared) หรือคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2.4 GHz และมีกลไก WEP ซึ่งเป็นทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่าย WLAN ได้ในระดับหนึ่งเนื่องจากมาตรฐาน IEEE 802.11 เวอร์ชันแรกเริ่มมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำและไม่มีการรองรับหลักการ quality of service (QoS) ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาดอีกทั้งกลไกรักษาความปลอดภัยที่ใช้ยังมีช่องโหว่อยู่มาก IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาหลายชุดด้วยกันเพื่อทำการปรับปรุงเพิ่มเติมมาตรฐานให้มีศักยภาพสูงขึ้น โดยคณะทำงานกลุ่มที่มีผลงานที่น่าสนใจและเป็นที่ยอมรับกันดีได้แก่ IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11e และ IEEE 802.11g

#### 2.2.4.1 มาตรฐาน IEEE 802.11a

มาตรฐาน IEEE 802.11a เป็นมาตรฐานแรกที่ได้รับการประกาศออกมาโดยอาศัยการส่งข้อมูลในช่วงคลื่น 5 GHz ซึ่งเป็นคลื่นความถี่ที่สูงทำให้ความเร็วในการส่งข้อมูลสูงตามไปด้วยโดยมีความสามารถในการรับ - ส่งข้อมูลได้สูงสุดที่ 54 Mb/s แต่ในช่วงแรกบางประเทศไม่อนุญาตให้ใช้งานเนื่องจากคลื่นความถี่ 5 GHz นั้นไม่ใช่ความถี่สาธารณะจำเป็นต้องได้รับอนุญาตเสียก่อน

#### 2.2.4.2 มาตรฐาน IEEE 802.11b

มาตรฐาน IEEE 802.11b เป็นมาตรฐานที่ออกมาพร้อมกับ 802.11a เพียงแต่ใช้คลื่นความถี่ที่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่า 802.11a จึงทำให้มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลช้ากว่าโดยมีความสามารถในการรับส่งสูงสุดที่ 11 Mb/s เท่านั้นแต่เนื่องจากคลื่นความถี่ 2.4 GHz เป็นคลื่นความถี่สาธารณะจึงสามารถนำไปใช้งานได้ในทุกๆประเทศโดยไม่จำเป็นต้องขออนุมัติก่อนแต่เนื่องจากเป็นคลื่นความถี่สาธารณะดังนั้นอุปกรณ์ไร้สายอื่นๆจึงใช้คลื่นความถี่นี้เช่นเดียวกันเลยทำให้เกิดสัญญาณรบกวนกันได้ง่ายมากทำให้ประสิทธิภาพของมาตรฐานนี้จึงถูกลดทอนด้วยปัจจัยจากสภาพแวดล้อม

#### 2.2.4.3 มาตรฐาน IEEE 802.11g

มาตรฐาน IEEE 802.11g เป็นมาตรฐานที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจาก 802.11b โดยยังคงใช้คลื่นความถี่ 2.4 GHz แต่มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นอยู่ที่ระดับ 54 Mb/s หรือเท่ากับมาตรฐาน 802.11a เพียงแต่ว่าความถี่ 2.4 GHz ยังคงเป็นคลื่นความถี่สาธารณะอยู่เหมือนเดิมดังนั้นจึงยังมีปัญหาเรื่องของการรบกวนจากอุปกรณ์ที่ใช้คลื่นความถี่เดียวกันอยู่ดี

#### 2.2.4.4 มาตรฐาน IEEE 802.11n

มาตรฐาน IEEE 802.11n อาจจะไม่ถือว่าเป็นมาตรฐานจริงเนื่องจากยังไม่ได้ประกาศออกมาอย่างเป็นทางการเพราะยังคงอยู่ในช่วงระหว่างการพัฒนาอยู่และใกล้เสร็จสมบูรณ์แล้วซึ่งมาตรฐาน 802.11n จะเป็นการพัฒนาแบบก้าวกระโดดด้วยการใช้เทคโนโลยีมากมายเข้ามาช่วยเพื่อเพิ่มความเร็วในการรับส่งข้อมูลให้สูงขึ้นโดยจะมีความเร็วอยู่ที่ 300 Mb/s หรือเร็วกว่า LAN แบบมีสายที่มาตรฐาน 100 BASE-TX นอกจากนี้ยังมีระยะพื้นที่ให้บริการกว้างขึ้นโดยเทคโนโลยีที่ 802.11n นำมาใช้ก็คือเทคโนโลยี MIMO ซึ่งเป็นการรับส่งข้อมูลจากเสาสัญญาณหลายๆต้นพร้อมๆกันทำให้ได้ความเร็วสูงมากขึ้นและยังใช้คลื่นความถี่แบบ Dual Band คือทั้ง 2.4 GHz และ

5 GHz ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ว่าออกแบบมาให้ทำงานกับคลื่นใดหรือทำงานกับทั้งสองคลื่นพร้อมๆกัน ได้ซึ่งทำให้บางประเทศที่ยังไม่ได้อนุมัติให้ใช้เครือข่ายไร้สายมาตรฐาน 802.11a อาจจะมีปัญหา กับการใช้งานเครือข่ายไร้สายตามมาตรฐาน 802.11n [22] [23]

## 2.2.5 ลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN

มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ภายในเครือข่าย WLAN ไว้ 2 ลักษณะคือโหมด Infrastructure และโหมด ad-hoc หรือ peer-to-peer

### 2.2.5.1 โหมด infrastructure

โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ในเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN จะเชื่อมต่อกันในลักษณะของ โหมด infrastructure ซึ่งเป็นโหมดที่อนุญาตให้อุปกรณ์ภายใน WLAN สามารถเชื่อมต่อกับ เครือข่ายอื่นได้ ในโหมด infrastructure นี้เครือข่าย IEEE 802.11 WLAN จะประกอบไปด้วย อุปกรณ์ 2 ประเภทได้แก่ สถานีผู้ใช้ (client station) คืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ (desktop, laptop, หรือ PDA ต่างๆ) ที่มีอุปกรณ์ client adapter เพื่อใช้รับส่งข้อมูลผ่าน IEEE 802.11 WLAN และ สถานีแม่ข่าย (access point) ซึ่งทำหน้าที่ต่อเชื่อมสถานีผู้ใช้เข้ากับเครือข่ายอื่น (ซึ่งโดยปกติจะเป็นเครือข่าย IEEE 802.3 ethernet LAN) การทำงานในโหมด infrastructure มีพื้นฐานมาจาก ระบบเครือข่ายโทรศัพท์มือถืออีกกล่าวคือสถานีผู้ใช้จะสามารถรับส่งข้อมูลโดยตรงกับสถานีแม่ข่ายที่ ให้บริการแก่สถานีผู้ใช้นั้นๆเท่านั้น ส่วนสถานีแม่ข่ายจะทำหน้าที่ส่งต่อ (forward) ข้อมูลที่ได้รับ จากสถานีผู้ใช้ไปยังจุดหมายปลายทางหรือส่งต่อข้อมูลที่รับจากเครือข่ายอื่นมายังสถานีผู้ใช้ ดัง แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเชื่อมต่อแบบ infrastructure [24]

### 2.2.5.2 โหมด ad-hoc หรือ peer-to-peer

เครือข่าย IEEE 802.11 WLAN ในโหมด ad-hoc หรือ peer-to-peer เป็นเครือข่ายที่ปิด คือไม่มีสถานีแม่ข่ายและไม่มี การเชื่อมต่อกับเครือข่ายอื่น บริเวณของเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN ในโหมด ad-hoc จะถูกเรียกว่า independent basic service set (IBSS) ซึ่งสถานีผู้ใช้หนึ่งสามารถติดต่อสื่อสารข้อมูลกับสถานีผู้ใช้อื่นๆในเขต IBSS เดียวกันได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านสถานีแม่ข่ายแต่สถานีผู้ใช้จะไม่สามารถรับส่งข้อมูลกับเครือข่ายอื่นๆได้ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การทำงานในโหมด ad-hoc หรือ peer-to-peer mode [25]

### 2.2.6 การลดทอนของสัญญาณ

ในระบบ wireless ทุกๆระบบจะมีผลกระทบจะมีผลกระทบเมื่อเส้นทางการส่งสัญญาณ ถูกบดบังด้วยอาคารต่างๆโดยการลดทอนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากปัจจัยดังต่อไปนี้

#### 2.2.6.1 pathloss

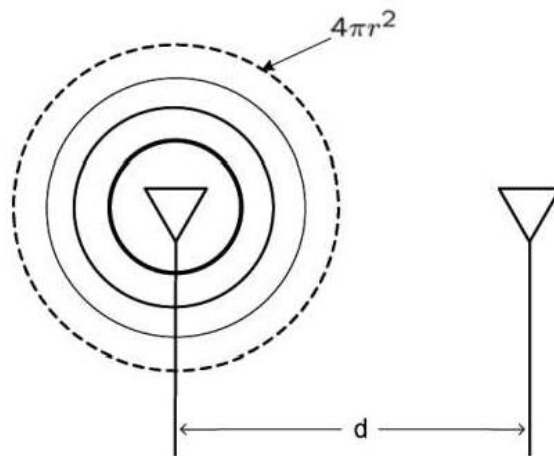
path loss เป็นสิ่งที่เห็นได้ชัดที่สุดในเรื่องความแตกต่างของมีสายกับไร้สาย ซึ่งจะเกิดขึ้นจากการส่งกำลังจากภาคส่งไปสู่ภาครับ สำหรับการส่งสัญญาณในการใช้ isotropic antenna ดังรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าสัญญาณที่ส่งออกไปจะแผ่ออกไปในรูปแบบทรงกลม (spherical wave front) ดังนั้นพลังงานที่ภาครับจะได้รับ ณ ระยะทางห่างเป็นระยะทาง  $d$  เมตร โดยที่พื้นที่ของพื้นผิวคือ  $4\pi d^2$  ใช้ จากสูตร free space pathloss หรือสมการ Friis จะประมาณกำลังที่ภาครับได้รับคือ

$$P_{RX} = P_{TX} \frac{G_{TX} G_{RX} \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (2.1)$$

โดย  $P_r$  = received power,  $P_t$  = transmitted power,  $\lambda$  = wavelength  
ส่วนสมการ path loss อย่างง่ายที่เรียกว่า empirical path loss formula คือ

$$P_{RX} = P_{TX} P_0 \left(\frac{d_0}{d}\right)^\alpha \quad (2.2)$$

โดย  $P_0$  = receive power ที่ระยะ  $d_0$  (หาได้จากการวัด โดยระยะ มักใช้ที่ระยะ 1 เมตร),  $\alpha$  = ค่าความคลาดเคลื่อนของการส่งสัญญาณที่สูญเสียไปในตัวนำ (path loss exponent)



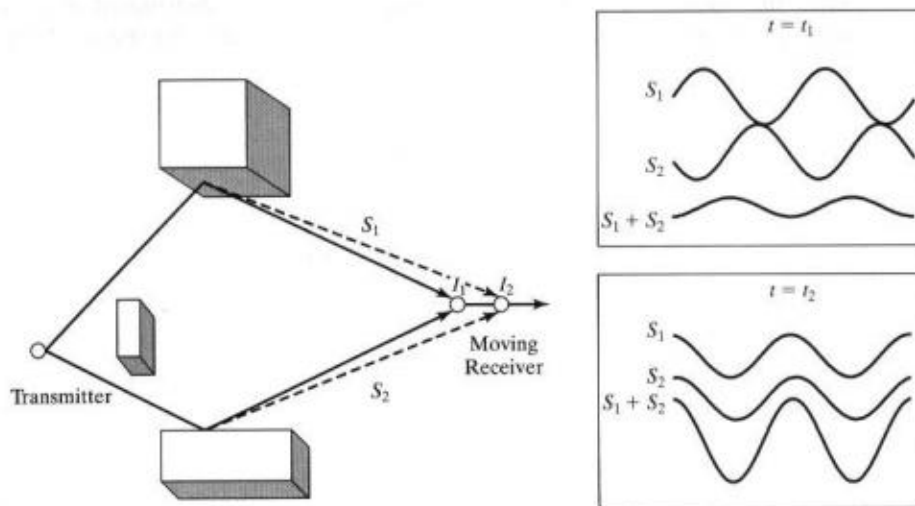
รูปที่ 2.10 แสดง free-space propagation [26]

### 2.2.6.2 fading

การเฟด (fade) ของสัญญาณหมายถึง การที่สัญญาณถูกลดทอนลงไปทำให้มีความแรงของสัญญาณอ่อนลง หรือจะเรียกอีกอย่างได้ว่า small scale fading (frequency select fading) หรือปัญหา multipath ซึ่งปัญหา multipath ที่เราสนใจนั้นคือ ground reflection multipath fading เป็นผลเนื่องมาจากการรับสัญญาณที่สะท้อนมาจากพื้นดินหลายแห่งซึ่งทำให้สัญญาณที่ได้รับมีเฟสที่ตรงข้ามหรือตรงกันก็ได้ ทำให้สัญญาณที่ได้รับมานั้นไม่เสถียรเพราะสัญญาณที่ได้รับมาอาจจะลดทอนกันหรือเสริมกันก็ได้ multipath fading เกิดขึ้นเฉพาะความถี่เท่านั้น เพราะว่าการเกิดการหักล้างกันของสัญญาณที่เฟสตรงข้ามกันจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อคลื่นที่ต่างกันเกินทางมาถึงเครื่องรับโดยมีความแตกต่างของระยะทางเป็นจำนวนครึ่งคลื่น และเพราะว่าขนาดของความยาวครึ่งคลื่นเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากในช่วงความถี่ระหว่าง 1 ถึง 12 กิกะเฮิรตซ์ การ

เกิด fading ที่ความถี่หนึ่งก็อาจไม่เกิดที่อีกความถี่หนึ่งก็ได้ ซึ่งตัวอย่างการเกิด multipath fading จะแสดงในรูปที่ 2.11 และสามารถประมาณกำลังที่ภาครับได้ดัง

$$P_{RX}(d) \approx P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left( \frac{h_{TX} h_{RX}}{d^2} \right) \tag{2.3}$$



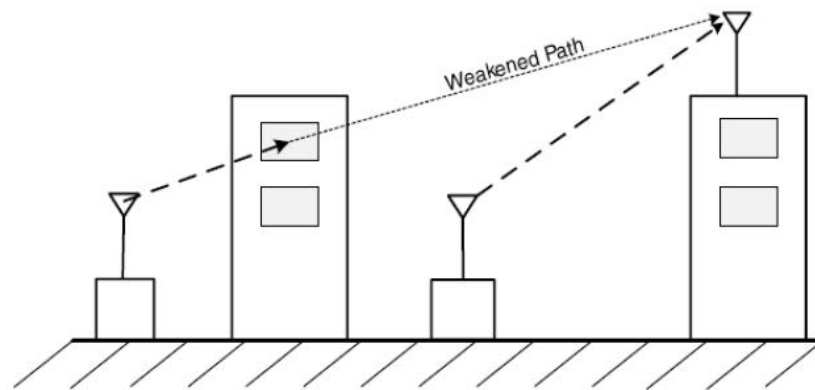
รูปที่ 2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณmultipath ที่ระยะต่างๆ เนื่องจากการรวมและหักล้างกัน

### 2.2.6.3 shadowing

เป็นการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังของสัญญาณแบบ long-term ซึ่งต่างจาก multipath fading ที่เป็นการ fading แบบ short-term หมายถึงเกิดขึ้นค่อนข้างรวดเร็วในระยะทางสั้นๆ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.12 ปัจจัยที่ทำให้กำลังส่งถูกลดทอนลง เช่น อาคาร หรือต้นไม้ บดบังสัญญาณ สิ่งนี้เราเรียกว่า shadowing โดยกำลังส่งที่ได้รับจะมีผลที่เกิดขึ้นจาก shadowing ดังนี้

$$P_r = P_t P_0 \chi \left( \frac{d_0}{d} \right)^\alpha \tag{2.4}$$

โดยที่  $\chi$  = a sample of the shadowing random process



รูปที่ 2.12 แสดงการเกิด shadowing ของสัญญาณ [26]

## 2.2.7 model for wireless signal propagation

เนื่องจาก Erceg model และ Hata-Okamura model ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็น model ที่มีการรวมผลของทั้ง path loss, shadowing และ fading ดังนั้น model ทั้งสองแบบนี้จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เพื่อใช้ในการศึกษาถึงผลกระทบต่ออัตราการทำงานเมื่อทำการที่ NLOS

### 2.2.7.1 Erceg model

เป็นการแบ่งพื้นที่ออกเป็น 3 พื้นที่ในบริเวณที่มีลักษณะเป็นเนินเขา จาก IEEE802.16 ซึ่งแนะนำ Model ที่ทำการแบ่งพื้นที่ตามลักษณะของพื้นผิวได้ 3 แบบ คือ

terrain type A พื้นผิวที่มีต้นไม้อยู่อย่างหนาแน่น

terrain type B พื้นผิวที่มีความหนาแน่นปานกลางของต้นไม้

terrain type C พื้นผิวที่โล่ง (LOS)

สมการพื้นฐานของ path loss equation สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$L = A + 10\gamma \log_{10} \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + s \quad (2.5)$$

โดย  $d$  = ระยะห่างระหว่าง BS ไปสู่ผู้ใช้บริการ

$d_0 = 100$  m.

$S$  = ส่วนของค่ากำลังสูญเสียเพื่อไว้สำหรับการเกิด shadowing และ fading (the shadowing fading component) มีค่าอยู่ระหว่าง 8.2 ถึง 10.6 dB. และ  $A$  คือ free-space path loss โดยกำหนดให้

$$A = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (2.6)$$

$\gamma$  = ค่าความคลาดเคลื่อนของการส่งสัญญาณที่สูญเสียไปในตัวนำ (path loss exponent)

สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (2.7)$$

โดย  $h_b$  = ความสูงของเสาอากาศภาคส่งของ base station (ในหน่วย m.) และค่า  $a, b$  และ  $c$  นั้นขึ้นอยู่กับว่าเป็นพื้นผิวแบบไหน (terrain type A, B or C) ซึ่งสามารถหาค่าได้จากตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ค่า  $a, b, c$  ของแต่ละพื้นผิว

	Terrain Type A	Terrain Type B	Terrain Type C
a	4.6	4	3.6
b	0.0075	0.0065	0.005
c	12.6	17.1	20

เนื่องจาก (2.5) เหมาะสำหรับเสาอากาศที่มีความสูงไม่เกิน 2 m. ความสูงของ BS อยู่ระหว่าง 10-80 m. และมีความถี่ประมาณ 2 GHz ดังนั้นเมื่อต้องการใช้โมเดลนี้สำหรับความถี่และความสูงของ Wtenna ที่แตกต่างจากค่านี้อาจต้องเพิ่ม correction factor ดังนี้

ค่าแก้ไข (correction factor) สำหรับความถี่ทำงาน (operating frequency) ( $L_f$ )

$$L_f = 6 \log_{10} \log_{10} \left( \frac{f_{GHz}}{2} \right) \quad (2.8)$$

ค่าแก้ไข (Correction factor) สำหรับความสูงของเสาสัญญาณภาครับ (receiver antenna height) ( $L_h$ )

$$\text{for terrain type A and B : } L_h = -10.6 \log_{10} \log_{10} \left( \frac{h_r}{2} \right) \quad (2.9)$$

$$\text{for terrain type C : } L_h = -20 \log_{10} \log_{10} \left( \frac{h_r}{2} \right) \quad (2.10)$$



ดังนั้นจะได้ path loss equation ดังนี้

$$L = A + 10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + L_f + L_h + S \quad (2.11)$$

### 2.2.7.2 Hata-Okamura model

นำมาใช้กับบริเวณพื้นที่ที่มีลักษณะพื้นผิว 4 แบบดังนี้

เปิดโล่ง (open)

ชนบท (suburban)

เมืองเล็ก (small city)

เมืองใหญ่ (large city)

โดย Hata-Okamura model นี้สามารถนำมาใช้ได้กับบริเวณในเมืองที่มีตึกหนาแน่นได้ แต่ใน Erceg model จะไม่สามารถทำได้ โดยสมการทั่วไป คือ

$$L = 69.55 + 26.16 \log_{10} \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10} \log_{10}(h_b) + (44.9 - 6.55h_b) \log_{10} \log_{10} d - a(h_m) - K \quad (2.12)$$

โดยค่าต่างๆได้จากตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ค่า  $a(h_m)$  ของแต่ละพื้นผิว

type of area	$a(h_m)$
open	$[1.1 \log_{10} \log_{10}(f_{MHz}) - 0.7] h_m - [1.56 \log_{10} \log_{10}(f_{MHz}) - 0.8]$
suburban	
small city	
large city	$3.2[\log_{10} \log_{10}(11.75h_m)]^2 - 4.97$

ซึ่งค่า  $a(h_m)$  คือ the MS antenna-correction factor,  $L$  (dB),  $h_m$  คือความสูงของเสาสัญญาณภาครับ (mobile station antenna, ในหน่วย m.),  $h_b$  คือความสูงของตึกรวมหลังคาด้วย (ในหน่วย m.),  $d$  คือระยะทางระหว่างเสาสัญญาณภาคส่ง (base antenna) กับเสาสัญญาณภาครับ (Mobile Station Antenna) และค่า  $K$  สามารถหาได้จาก

ตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ค่า  $K$  ของแต่ละพื้นผิว

type of area	$K$
open	$4.78[\log_{10} \log_{10}(f_{MHz})]^2 - 18.33 \log_{10} \log_{10}(f_{MHz}) + 40.94$
suburban	$2[\log_{10} \log_{10}(\frac{f_{MHz}}{20})]^2 + 5.4$
small city	0
large city	0

ข้อจำกัดของ Hata-Okamura model มีดังนี้

- ❖ สามารถใช้ในช่วงความถี่ ( $f$ ) ระหว่าง 1500 MHz ถึง 2000 MHz
- ❖ ความสูงของเสาสัญญาณภาคส่งวัดจากระดับพื้นถนน ( $h_m$ ) อยู่ระหว่าง 30 ถึง 200 m.
- ❖ ความสูงของเสาสัญญาณภาครับ ( $h_b$ ) อยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 m.
- ❖ ระยะห่างระหว่างเสาสัญญาณภาคส่งกับเสาสัญญาณภาครับ ( $d$ ) อยู่ระหว่าง 1 ถึง 20 km.
- ❖ เมื่อมีการนำมาประยุกต์ใช้ใน WiMAX จึงต้องมีการเพิ่มค่ากำลังสูญเสียเพื่อไว้ 10 dB ลงในสมการ path loss เพื่อใช้ในการพิจารณาผลของ shadowing

### 2.2.7.3 Walfish – Ikekami model

เนื่องจาก Hata-Okamura model นั้นเหมาะสมสำหรับการใช้ในบริเวณพื้นที่ขนาดใหญ่ ไม่เหมาะกับการใช้ในบริเวณพื้นที่ขนาดเล็กที่มีขนาดรัศมีน้อยกว่า 1 km. ดังนั้นจึงได้นำ Walfish-Ikekami model มาใช้ในบริเวณพื้นที่ขนาดเล็ก ที่มีขนาดของรัศมีไม่เกิน 1 km. โดยสมการมีดังนี้

$$L_{NLOS} = \begin{cases} L_{fs} + L_{rts} + L_{mds} & | L_{rts} + L_{mds} \geq 0 \\ L_{fs} & | L_{rts} + L_{mds} \leq 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

โดย

$$\begin{aligned} L_{fs} &= \text{กำลังสูญเสียในอากาศ (freespace loss)} \\ &= 32.45 + 20 \log_{10} d_{km} + 20 \log_{10} f \end{aligned} \quad (2.14)$$

$L_{rts}$  = กำลังสูญเสียที่เกิดจากการกระจายของสัญญาณจากถนนสู่หลังคา (roof-to-street diffraction and scatter loss)

$L_{mds}$  = กำลังสูญเสียที่เกิดจากการกระจายของสัญญาณหลายทิศทาง (multi-screen diffraction loss)

ค่า  $L_{rts}$  จะมีความเกี่ยวข้องกับ กำลังสูญเสียที่เกิดจากสัญญาณที่มีทิศทาง (orientation loss),  $L_{ori}$  และสามารถหาได้จาก

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log_{10} w + 10 \log_{10} f_{MHz} + 20 \log_{10} \Delta h_m + L_{ori} \quad (2.15)$$

โดยค่า  $L_{ori}$  คือ

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\phi & | 0 \leq \phi \leq 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35^\circ) & | 35^\circ \leq \phi \leq 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\phi - 55^\circ) & | 55^\circ \leq \phi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (2.16)$$

และค่า  $L_{mds}$  หาได้จาก

$$L_{mds} = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10} \log_{10} d_{km} + k_f \log_{10} \log_{10} f_{MHz} - 9 \log_{10} \log_{10} b \quad (2.17)$$

$L_{bsh}$  คือ shadowing gain (negative loss) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเสาอากาศภาคส่ง (base station Antenna) สูงกว่าหลังคาตึก (rooftop) โดยหาได้จาก

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10} \log_{10} (1 + \Delta h_b) & | \Delta h_b > 0 \\ 0 & | \Delta h_b \leq 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

และค่า  $k_a, k_d, k_f$  สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$k_a = \begin{cases} 54 & | \Delta h_b > 0 \\ 54 + 0.8|\Delta h_b| & | \Delta h_b \leq 0 \cap d_{km} \geq 0.5 \\ 54 + 0.8|\Delta h_b|(d_{km} / 0.5) & | \Delta h_b \leq 0 \cap d_{km} < 0.5 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & | \Delta h_b > 0 \\ 18 + 15(\Delta h_b / h_b) & | \Delta h_b \leq 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \left( \frac{f_{MHz}}{925} - 1 \right), & \text{medium city and suburban} \\ 1.5 \left( \frac{f_{MHz}}{925} - 1 \right), & \text{metropolitan area} \end{cases} \quad (2.21)$$

ข้อจำกัดของ Walfish-Ikegami model

- ❖ สามารถใช้ในช่วงความถี่ ( $f$ ) ระหว่าง 800 MHz ถึง 2000 MHz
- ❖ ความสูงของเสาสัญญาณภาคส่งวัดจากระดับพื้นถนน ( $h_m$ ) อยู่ระหว่าง 4 ถึง 50 m.
- ❖ ความสูงของเสาสัญญาณภาครับ ( $h_b$ ) ระหว่าง 1 ถึง 3 m.
- ❖ ระยะห่างระหว่างตึก ( $b$ ) อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 5 km.

ในการคำนวณ link budget และ cell size นั้น สิ่งที่จะต้องนำมาใช้ก็คือ

$P_T$ [dBm]	- transmit power
$L_T$ [dB]	- transmit feeder loss
$G_T$ [dBi]	- transmit antenna gain
$L$ [dB]	- path loss of transmission medium
$G_R$ [dBi]	- receiver antenna gain
$L_R$ [dB]	- received feeder power
$P_R$ [dBm]	- received power
$S_R$ [dBm]	- sensitivity of receiver transmit power

โดย  $P_R \geq S_R$  ซึ่ง receive power  $P_R$  [dB] สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$P_R = P_T - L_T + G_T - L + G_R - L_R \quad (2.22)$$

## 2.3 ทฤษฎีพื้นฐาน WOBAN

### 2.3.1 ความเป็นมาของ WOBAN

สำหรับ WOBAN ในปัจจุบันสื่อสัญญาณผ่านโครงข่ายที่เรียกว่า PON ซึ่งใช้การส่งในรูปแบบ P2MP โดยมีหลักการที่สำคัญ คือ ไม่มีส่วนประกอบของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า (active element) ในเส้นทางที่สัญญาณส่งผ่านจากต้นทางไปยังปลายทางจึงทำให้มีความมั่นคงสูง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้จะเป็นพวกที่ไม่ใช้ไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบ นั่นคือ combiners couplers และ splitters ระบบ PON จะมี แบนด์วิดท์ที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับ digital subscriber line (DSL) และ cable modem (CM) สำหรับค่ามาตรฐาน ระบบ PON จะสามารถครอบคลุมระยะทางได้มากที่สุดถึง 20 km จาก OLT ไปยัง ONU ซึ่งต่างจาก fiber-to-the-building (FTTB) fiber-to-the-home (FTTH) ที่มีเป้าหมายในการเข้าถึงแต่ละผู้ใช้บริการโดยไม่มีขอบเขตหรือมาตรฐานทางระยะทาง

PON ในแบบดั้งเดิมที่ประกอบไปด้วย 1 ความยาวคลื่น หรือที่รู้จักกันในนามว่า time-division-multiplexed PON (TDM-PON) นั้นมีคุณสมบัติคือ มีค่าความจุสูง และค่าติดตั้ง ค่าซ่อมบำรุงขององค์ประกอบ passive ต่ำ optical carrier (OC) จะถูกแบ่งด้วยค่าเฉลี่ยของจำนวน passive splitter ตลอดทั่วถึงผู้ใช้บริการทุกคน ดังนั้น PON จึงเป็น ทอพอโลยีแบบต้นไม้ (tree topology) จากเหตุผลนี้ทำให้จำนวนของ ONU ถูกจำกัดด้วย splitting loss และอัตราการรับ/ส่งข้อมูล (bit rate) ของตัวรับสัญญาณใน OLT และ ONU โดยปกติปัจจุบันอนุญาตให้วาง ONU สูงสุดได้ 16 ตัวสำหรับระยะทาง 20 km จาก OLT และวางได้ 32 ตัวสำหรับระยะทาง 10 km. จาก OLT

เนื่องจากความต้องการใช้งานแบนด์วิดท์ของผู้ใช้บริการได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนา PON เป็น wavelength-division-multiplexed PON (WDM-PON) ซึ่งสามารถพัฒนาได้อย่างดีเยี่ยมเพราะระบบนี้สามารถรองรับความยาวคลื่นได้หลายค่าในเส้นใยแสงเส้นเดียวกัน ข้อสำคัญในการสร้าง WDM-PON คือสามารถแยกช่องสัญญาณความยาวคลื่นจาก OLT ไปยังแต่ละ ONU รวมไปถึง upstream และ downstream ซึ่งจุดมุ่งหมายคือสร้าง point-to-point (P2P) เชื่อมระหว่าง OLT และ ONU แต่ละตัว ซึ่งต่างจาก ทอพอโลยี P2MP ของ PON แบบเก่า สำหรับระบบ WDM-PON นั้น ONU แต่ละตัวสามารถทำให้อัตรารับ/ส่งข้อมูลสูงมากขึ้นได้ จนถึงค่าพิกัดของช่องสัญญาณความยาวคลื่น นอกจากนี้ความยาวคลื่นที่ต่างกันสามารถทำให้เกิดอัตราการรับ/ส่งข้อมูลต่างๆกันก็ได้ เพราะฉะนั้นจึงทำให้ชนิดการบริการที่แตกต่างกันสามารถรองรับได้ในเครือข่ายเดียวกัน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของ WDM-PON สำหรับอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ คือ

เทคโนโลยีไร้สายซึ่งจะเห็นได้ว่าการเติบโตในการวิจัยและพัฒนาใน เทคโนโลยี ไร้สายที่ หลากหลาย ซึ่งประกอบไปด้วย 3 เทคนิคใหญ่ๆด้วยกัน คือ wireless fidelity(WiFi), worldwide interoperability for microwave access (WiMax) และ cellular network ซึ่งในแต่ละเทคโนโลยีก็ มีข้อได้เปรียบเสียเปรียบในตัวเอง

### 2.3.2 ความรู้พื้นฐานเทคโนโลยี WOBAN

เทคโนโลยีในปัจจุบัน ต่างล้วนคำนึงถึงผู้ใช้บริการเป็นสำคัญ เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิต ดังนั้นการที่จะเข้าถึงผู้ใช้บริการได้มากที่สุด ราคาของการใช้บริการต้องต่ำ ดังนั้นระบบไร้สายจึง เป็นระบบที่ได้รับการพิจารณา แต่เนื่องจากการเชื่อมต่อด้วยระบบไร้สายจาก CO ไปยังผู้ใช้บริการ ทั้งหมดนั้น ไม่มีทางเป็นไปได้ เพราะว่า มีการจำกัดสเปกตรัม เพราะฉะนั้นระบบ WOBAN จึงได้ เกิดขึ้น คือมีการเชื่อมต่อด้วยเทคโนโลยีระบบเส้นใยแสงจาก CO ไปยัง ONU และจากนั้นจึง เชื่อมต่อด้วยระบบไร้สายไปยังผู้บริการ ดังนั้นปัญหาที่น่าสนใจของวิศวกรคือ การออกแบบในการ วางเส้นใยแสงให้ยาวที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ก่อนที่จะเชื่อมต่อด้วยระบบไร้สายต่อไป และ optimization เพื่อให้ตำแหน่งของตัวกระจายสัญญาณไร้สายอยู่ใกล้กับผู้ใช้บริการทั้งหมดให้ได้มากที่สุด

โครงสร้างของ WOBAN เป็นเทคโนโลยีที่มีความครอบคลุมในการใช้งาน 2 ด้าน คือ

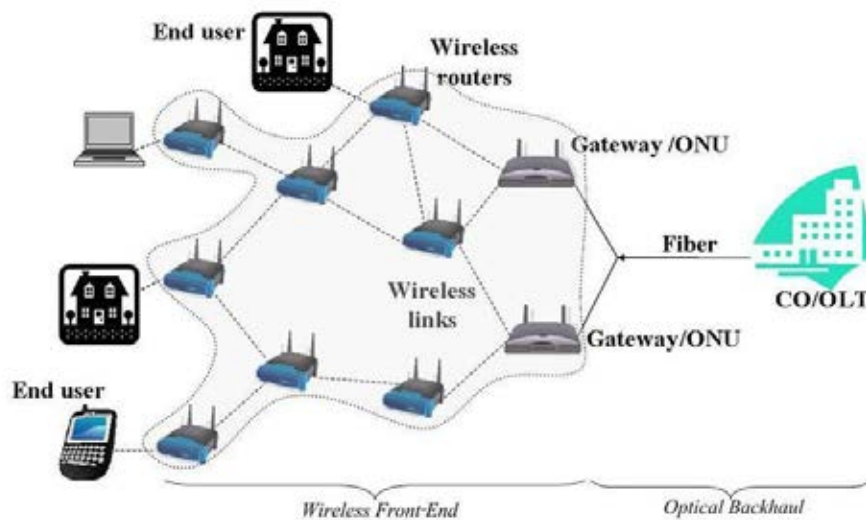
1. มีความมั่นคง น่าเชื่อถือ และมีความจุในการส่งสัญญาณสูง สำหรับระบบเส้นใยแสง
2. ความยืดหยุ่น (หลักการ anytime anywhere) และราคาที่ถูกสำหรับระบบไร้สาย

### 2.3.3 โครงสร้างของ WOBAN

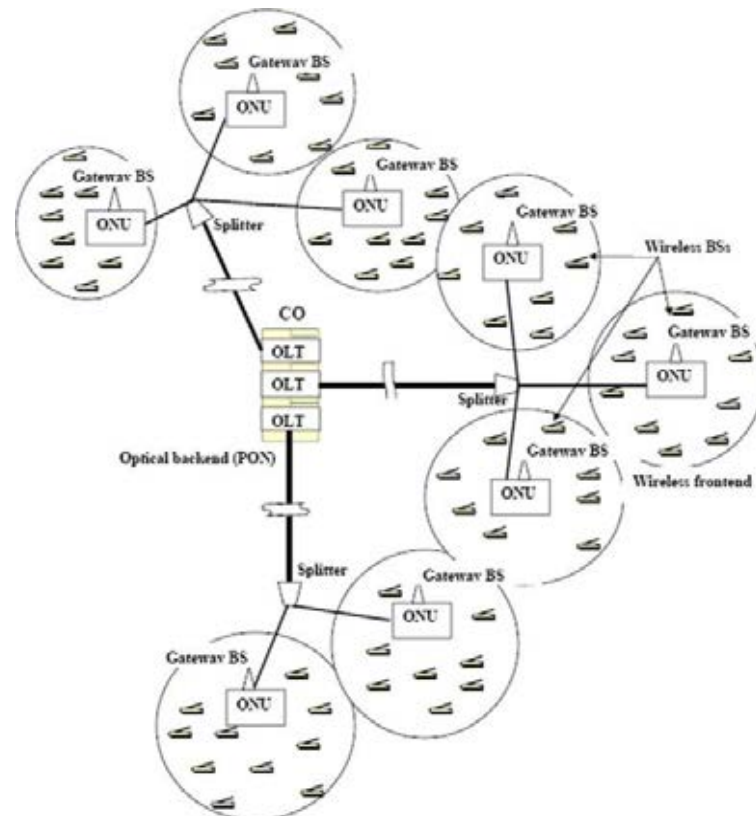
ในระบบ WOBAN ประกอบไปด้วยระบบไร้สายทางด้านต้นทาง (front end) และระบบ เส้นใยแสงทางด้านปลายทาง (back end) สำหรับเทคโนโลยีของระบบเส้นใยแสงในปัจจุบันคือ P2MP ซึ่งแต่ละ PON ที่แตกต่างกันจะกระจายออกไปรอบๆ CO โดยในระบบ PON 1 ระบบจะ ประกอบไปด้วย ช่วงต้น(head end) และช่วงปลาย(tail end) โดยในช่วงต้นจะมี optical line terminal (OLT) เป็นตัวขับสัญญาณซึ่งอยู่ติดกับผู้ใช้บริการนั่นก็คือ CO ส่วนช่วงปลายจะเป็น optical network units (ONUs) ซึ่งเป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้บริการ(end users) โดยจำนวนของ ONU ต้องตรงตามมาตรฐานของระบบ PON

อย่างไรก็ตามสำหรับทางด้าน front end ของระบบ WOBAN ที่เป็นส่วนของระบบไร้สาย นั้นจะมีการเชื่อมต่อกจาก ONU ไปยัง Wireless BS โดยตัว Wireless BS จะรู้จักกันในนามของ “gateway routers” เพราะว่าพวกมันเป็นทางเข้า/ออกของทั้งระบบเส้นใยแสงและระบบไร้สาย

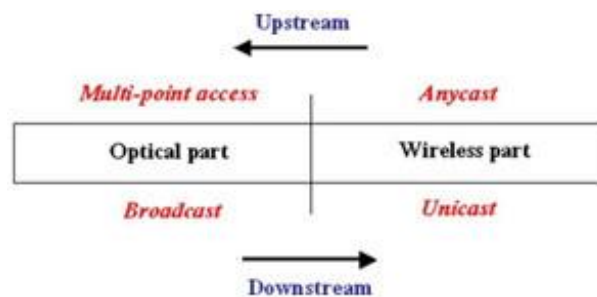
สำหรับการจัดการระบบให้มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีการใช้การ multi-hop ใน mesh ของระบบไร้สายเพราะฉะนั้นจึงต้องมี wireless routers/BS ตัวอื่นๆด้วยโดยจะต้องมีความหลากหลายและจะต้องมีจำนวนของ gateway ที่ต้องเชื่อมต่อกับ ONU ให้พอเหมาะสำหรับตัวสัญญาณ wireless ที่เป็นส่วนของ WOBAN อาจจะใช้เทคโนโลยีพื้นฐานเช่น Wi-Fi หรือ WIMAX แต่สำหรับโครงการนี้จะใช้เทคโนโลยี Wi-Fi ในการให้บริการ WOBAN ผู้ใช้บริการ หรือผู้ที่มีอุปกรณ์ไร้สายส่วนตัว ที่อยู่ตามพื้นที่ต่างๆกระจายกันออกไป เมื่อต้องการส่งข้อมูลจะส่งออกไปเป็น ชุดข้อมูล (packet) ไปยัง wireless routers ที่อยู่ข้างเคียงและ router นี้จะทำการส่ง ชุดข้อมูลต่อไปยัง wireless mesh ของ WOBAN ซึ่งชุดข้อมูลจะส่งไปตลอดทั้ง mesh โดยการใช้การส่งต่อเป็นทอดๆ (multi hops) ไปยัง gateway ตัวที่เป็น primary คือตัวที่อยู่ใกล้เคียงกับผู้ใช้บริการมากที่สุด และสุดท้ายจะส่งไปยังส่วนที่เป็นระบบเส้นใยแสงไปยัง OLT/CO โดยตัวอย่างโครงข่าย WOBAN แสดงดังรูปที่ 2.13 และ รูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 โครงสร้างเทคโนโลยี WOBAN [9]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างการให้บริการWOBAN [27]



รูปที่ 2.15 โพรโตคอล upstream และ downstream ของ WOBAN [28]

ในทาง upstream ทางด้าน front end (มองจากด้านผู้ใช้บริการไปยัง ONU/gateway) WOBAN จะเป็นระบบ anycast คือผู้ใช้บริการจะพยายามส่งข้อมูลที่เป็น packet ของตนไปยังใครก็ตามที่อยู่ในระบบ โดยในแต่ละชุดข้อมูลจะสามารถหาเส้นทางได้ด้วยตัวเอง โดยดูจาก address ที่บรรจุอยู่ในชุดข้อมูลนั้น ส่วนทางด้าน back end (มองจาก ONU/gateway ไปยัง OLT) จะเป็นระบบ multipoint media access ซึ่ง ONU ที่ขึ้นอยู่กับ OLT จะมีลักษณะเป็นทอพอโลยีแบบต้นไม้ (tree topology) เพราะฉะนั้น ใน upstream ข้อมูลจาก ONU แต่ละตัวจะแบ่งแบนด์วิดท์กัน

ในทาง downstream ทางด้าน front end (มองจากด้าน ONU/gateway ไปยังผู้ใช้บริการ) จะเป็นระบบ unicast คือตัว gateway จะส่งชุดข้อมูลไปยังผู้ใช้บริการโดยเจาะจง ส่วนทางด้าน



back end (มองจาก OLT ไปยัง ONU/gateway) OLT จะส่ง packet ไปยัง ONU ทุกตัวใน tree topology แต่จะเลือกเพียงจุดหมายปลายทางเดียว โดย ONU ตัวอื่นๆจะทำการปฏิเสธข้อมูลนั้น ซึ่งลักษณะของโปรโตคอลในระบบ WOBAN ได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.15 สำหรับข้อได้เปรียบของ WOBAN เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเส้นใยแสง และระบบไร้สาย สามารถสรุปได้ดังนี้

WOBAN จะประหยัดกว่าโครงข่ายไร้สาย ดังโครงสร้างรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นว่า WOBAN นั้นไม่ต้องใช้การเชื่อมต่อแบบ FTTH ซึ่งมีราคาแพง เพราะว่าการติดตั้ง การซ่อมบำรุงเส้นใยแสงของผู้ใช้จะมีราคาสูง ใน WOBAN ผู้ใช้จะเชื่อมต่อกับ ONU ที่อยู่ใกล้ตนในลักษณะของระบบไร้สาย และ ONU จะส่งข้อมูลไปยัง OLT โดยใช้โครงสร้างทางเส้นใยแสง

- ❖ WOBAN มีความยืดหยุ่นมากกว่าโครงข่ายเข้าถึงของระบบทางแสง วิธีการ “anytime anywhere” สามารถนำไปใช้ประโยชน์ใน WOBAN ได้ดังนั้น Wi-Fi จึงเป็นเทคโนโลยีที่สะดวกสำหรับช่วงต้นทาง (front end) ของ WOBAN เพื่อที่จะทำให้เราสามารถนำมาใช้ประโยชน์ ในด้านของความยืดหยุ่น และความสามารถในการเชื่อมต่อได้หลายเส้นทาง
- ❖ ในระบบ PON แบบเดิม ถ้าเส้นใยแสงที่เชื่อมระหว่างตัวแยกสัญญาณ (splitter) กับ ONU ขาดลง ONU ก็จะใช้ไม่ได้ ยิ่งไปกว่านั้น ถ้าเส้นทางจาก OLT ที่ไปยัง splitter เกิดขาดไป จะทำให้ ONU ทุกตัว (รวมไปถึงผู้ใช้บริการ ONU เหล่านั้นทุกคน) ใช้การไม่ได้ตามไปด้วย แต่ใน WOBAN ผู้ใช้บริการจะมีความสามารถในการสื่อสารสัญญาณข้าม mesh topology ได้ โดยการเชื่อมต่อ แบบไร้สาย จะสามารถปรับตัวเอง เพื่อให้ผู้ใช้บริการสามารถค้นหา ONU ข้างเคียงที่ยังใช้งานได้ ผู้ใช้บริการสามารถที่จะสื่อสารกับ ONU นั้น ซึ่งจะสื่อสารกับ OLT อื่นๆใน CO ได้ต่อไป
- ❖ WOBAN จะมีความเชื่อถือได้มากกว่าโครงข่ายไร้สายซึ่งทำให้ ช่วยลดปัญหาความแออัด และข้อมูลสูญหายใน WOBAN เมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายไร้สายในปัจจุบัน ยิ่งไปกว่านั้น ผู้ใช้บริการสามารถเชื่อมต่อกับ ONU ได้ก็ได้ในบริเวณใกล้เคียง ถ้าหากว่า primary ONU เสียหรือมีความหนาแน่นมากเกินไป ซึ่งจะทำให้ WOBAN นั้นมีประสิทธิภาพดีในการทำสมดุลโหลด (load-balancing capability)
- ❖ WOBAN นั้นมีการจัดระบบได้ด้วยตนเอง (self-organizing) เนื่องจากความสามารถในการต้านทานสิ่งผิดพลาด และความทนทานต่อการเชื่อมต่อโครงข่ายและลักษณะของการทำสมดุลโหลด
- ❖ ในบริเวณพื้นที่ที่กำลังพัฒนาทั่วโลก มีการติดตั้งเส้นใยแสงไว้อย่างหนาแน่น (ภายใน 20 km.) แม้กระทั่งพื้นที่ชนบท แต่ค่าใช้จ่ายในการให้บริการเชื่อมต่อสัญญาณความเร็วสูง มี

ค่าสูงจนไม่สามารถทำได้ ใช้เวลามากและยากต่อการบำรุงรักษา เพราะฉะนั้นรัฐบาลจึงตัดสินใจส่งเสริมการสร้าง กระตุ้นผู้ประกอบการ

### 2.3.4 การจัดการโครงข่าย: การกำหนดอัลกอริทึมในWOBAN

สมรรถนะของโครงข่ายโดยส่วนมากขึ้นกับการวางตำแหน่งของ ONU กล่าวคือ ตัวกำหนดเส้นทางที่บริเวณจุดเชื่อมต่อส่วนเส้นใยแสงกับส่วนไร้สาย ในการทำ optimum ต้นทุนของ WOBAN จะต้องมีการวางตำแหน่ง ONU ที่เหมาะสม ในการแก้ปัญหา เราจะพบทวนถึงอัลกอริทึมการวางตำแหน่งสำหรับหลายๆ ONU ใน WOBAN เมื่อกำหนดตำแหน่งของผู้ให้บริการไร้สาย จุดสนใจของอัลกอริทึมนี้ คือ ทำอย่างไรจึงจะหาตำแหน่งที่ “ดี” ของหลายๆ ONU ด้วยวิธีการที่มีประสิทธิภาพ หลังจากที่กล่าวถึงความหลากหลายของอัลกอริทึมในการวาง ONU ในลำดับถัดมา เราจะเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของอัลกอริทึมเหล่านั้น

#### 2.3.4.1 Random and deterministic approaches

การวางตำแหน่ง ONU แบบสุ่มเป็นวิธีการง่ายที่สุดสำหรับการวางโครงข่าย เป็นการลองผิดลองถูกโดยทำการแบ่งโครงข่ายเป็นพื้นที่หลายๆส่วนที่ไม่ซ้อนทับกัน จากนั้นจึงทำการวาง ONU แบบสุ่มในแต่ละพื้นที่ วิธีนี้ไม่ใช่วิธีที่ลดต้นทุนได้ดีที่สุด และอาจจะไม่รับประกันในเรื่องของการเชื่อมต่อ (เพราะว่าในการวางแบบสุ่มอาจเกิดบริเวณที่หนาแน่น หรือบริเวณที่เบาบางเกินไปได้)

ในทางตรงกันข้าม การวางตำแหน่งแบบคงที่เป็นการวางแผนล่วงหน้า หลังจากที่เราแบ่งพื้นที่ไม่ให้ซ้อนทับกันแล้ว เราจะวาง ONU ที่ศูนย์กลางของแต่ละพื้นที่ วิธีการนี้จะทำงานได้ดีในโครงข่ายที่สมมาตร และต้องการสัญญาณน้อย โดยจะไม่เกี่ยวกับลำดับการ optimum นอกจากนี้ระบบนี้ยังไม่เหมาะสมกับโครงข่ายที่ผู้ใช้มีการใช้งานแบบไม่สม่ำเสมอ

#### 2.3.4.2 Greedy approach [27]

อัลกอริทึม greedy เป็นวิธีการแบ่งโครงข่าย โดยเป้าหมายของ Greedy คือ การวาง ONU ใน WOBAN เพื่อให้ cost เฉลี่ยของผู้ใช้ทุกคนต่อ ONU บริเวณใกล้เคียงถูก optimize อัลกอริทึมนี้เริ่มต้นจากการกำหนดการเข้ามาของผู้ใช้ ผู้ใช้เหล่านี้จะเป็นประเภทบ้านพักอาศัยและสำนักงาน ซึ่งจะมีความยืดหยุ่นน้อย ทำการวาง ONU จากนั้นวัดระยะระหว่าง ONU ทุกตัวจนถึงผู้ใช้ (จะต้องรู้ตำแหน่งก่อนล่วงหน้า) แล้วนำค่าที่วัดได้ไปเก็บในเซตเรียงลำดับแยกเป็นผู้ใช้แต่ละคน ทำการหา primary ONU ซึ่งอยู่ใกล้ที่สุด สุดท้ายวิธีนี้จะได้เซตของผู้ใช้สำหรับ primary

ONU (เรียกผู้ใช้นั้นว่า “premium users” สำหรับ ONU นั้นๆ) และ ทำการ optimize ตำแหน่งของแต่ละ primary ONU เทียบกับ premium user ของ ONU นั้นๆ

#### 2.3.4.3 Combinatorial optimization: simulated annealing (SA) approach [29]

อัลกอริทึม greedy เป็นการ optimize ภายในพื้นที่ของ ONU แต่ละตัวเอง โดยไม่ขึ้นแก่กัน ซึ่งวิธีนี้ยังไม่ใช้การ optimization โดยรวม ดังนั้น วิธีการที่ดีกว่าจึงถูกคิดขึ้น ต่อไปเราจะสรุปถึงวิธีการปรับปรุงการวางตำแหน่ง ONU โดยใช้วิธีการ optimize แบบรวม

สำหรับวิธี SA นี้ ตำแหน่งเริ่มต้นของ ONU จะถูกเลือกโดยอัลกอริทึม Greedy จุดประสงค์ของการ optimization โดยรวมนี้ เพื่อหา cost เฉลี่ยต่ำที่สุดสำหรับผู้ใช้ทุกคน (ไม่ใช่แค่ premium user) โดยขึ้นกับหลายๆ ONU ดังนั้นวิธี SA จะทำการย้ายตำแหน่ง ONU เล็กน้อยด้วยการสุ่ม แล้วทำการคำนวณ cost ใหม่จากนั้นตรวจสอบถึงการเปลี่ยนแปลงของ cost โดยอ้างอิงข้อมูลเดิม ถ้าตำแหน่งใหม่มี cost ต่ำกว่าตำแหน่งเดิม วิธี SA จะย้ายตำแหน่ง ONU นั้น ในอีกทางหนึ่ง จะย้ายตำแหน่ง ONU ด้วยความน่าจะเป็นค่าหนึ่ง วิธี SA จะดำเนินการไปเรื่อยๆกระทั่งไม่มีการลด cost ได้อีก จากนั้นอัลกอริทึมจะเข้าสู่สภาพสมดุลซึ่งจะไม่มีการขยับ ONU จากนี้อีก [6]

#### 2.3.4.4 Joint optimization: mixed-integer-programming (MIP) approach [7]

การ optimization นี้คล้ายกับการพิจารณาการออกแบบระหว่างทาง optical กับทาง wireless จุดประสงค์เพื่อ optimize ตำแหน่งการวาง ONU ให้ประหยัดทรัพยากรที่สุด โดย MIP จะสนใจทั้งตำแหน่งของ BS และ ONU ในส่วน front end และแผนผังของเส้นใยแสงจาก BS ไป ONU, จาก ONU ไป OLT/CO ในส่วน back end จะวิเคราะห์และจำลอง cost ของ ONU และ BS และ cost ในการวางเส้นใยแสง วิธีการนี้เป็นวิธีการ optimum โคร่งขำย ซึ่ง cost จะถูกทำให้น้อยที่สุดโดยลดจำนวนของ BS และ ONU และวางแผนในการวางเส้นใยแสงอย่างมีประสิทธิภาพ ในลำดับที่มีการดำเนินการอย่างเหมาะสมของ WOBAN การจำลองแบบ MIP จะต้องพิจารณาหลายข้อจำกัด ได้แก่ ข้อจำกัดในการติดตั้ง BS และ ONU การกำหนดจากผู้ใช้ การกำหนดจากช่องสัญญาณ ความจุ และข้อจำกัดเรื่องคุณภาพของสัญญาณกับการแทรกสอดรบกวน

สมรรถนะของอัลกอริทึมใน WOBAN รูปแบบต่างๆสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.4 ซึ่งกล่าวถึง วัตถุประสงค์ คุณภาพของสัญญาณ เวลาที่ใช้ในการประมวลสัญญาณ ของวิธีการวางตำแหน่ง ONU รูปแบบต่างๆ

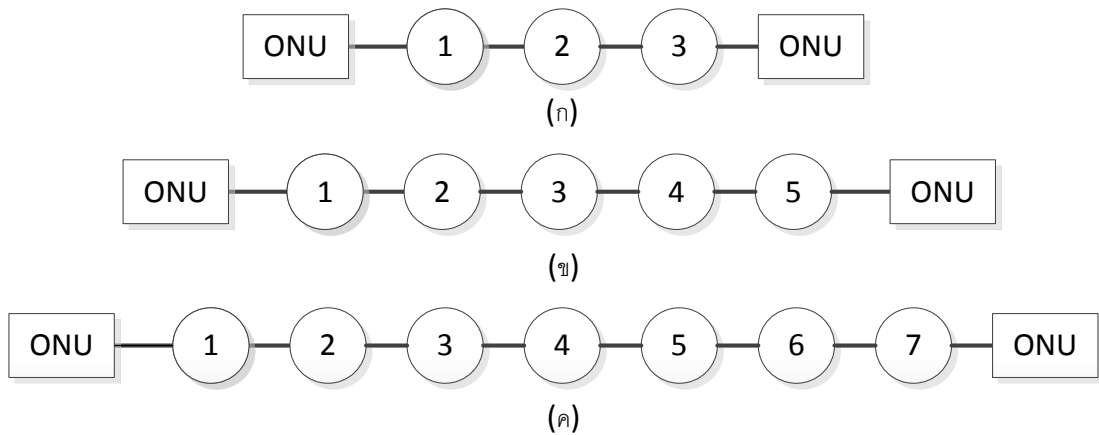
ตารางที่ 2.4 ข้อดีข้อเสียของวิธีการวาง ONU รูปแบบต่างๆของ WOBAN [4]

Placement Scheme	Objective	Solution Quality	Processing time	Comments (in brief)
Random	Placements of Optical Network Units(ONU) in WOBAN	Worse	Constant	Simple. Trial-and-error methods may be used
Deterministic		Better	Constant	Works well for symmetric topology. Pre-determined placement. No prior optimization.
Greedy		Good	Linear (in practical cases)	Low complexity. Divide-and-conquer heuristic. Good solution for uniform distribution of users.
Simulated Annealing		Improved over Greedy	Depends on convergence criteria	Combinatorial optimizer. Improved solution over Greedy. May not converge for discontinuous cost model.
MIP	Optimum setup of ONUs and BSs.	Optimal	Very high	Complex analytical solution. Considers several constraints. Model predicts setup costs in dollars.

### บทที่ 3

## การออกแบบอัลกอริทึมสำหรับกำหนดตำแหน่งการวางของ ONU โดยใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์

อัลกอริทึมที่ออกแบบขึ้นมาจะพิจารณาเฉพาะส่วน frontend ของการให้บริการ WOBAN ซึ่งเป็นส่วนของระบบไร้สาย และมีการเชื่อมต่อกันระหว่างผู้ใช้บริการแบบ multi-hop ซึ่งในแต่ละสายเชื่อมโยงระหว่าง 2 access point (AP) ใดๆจะเป็นระยะทางที่สั้นที่สุด ระยะทางระหว่าง ONU ถึง premium subscribers (กลุ่มของผู้ใช้บริการที่เชื่อมต่อกับ ONU โดยตรง) ของ ONU ตัวนั้น ยังถูก minimize ด้วยแนวความคิดของ Greedy approach มากไปกว่านั้นอัลกอริทึมที่ออกแบบขึ้นมาจะสามารถเลือกจำนวน hop ที่ต้องการได้ในการเข้าสู่ ONU ได้ อัลกอริทึมนี้พัฒนาการมาจากแนวคิดของ 2 อัลกอริทึมนั่นคือ shortest path และ distance vector



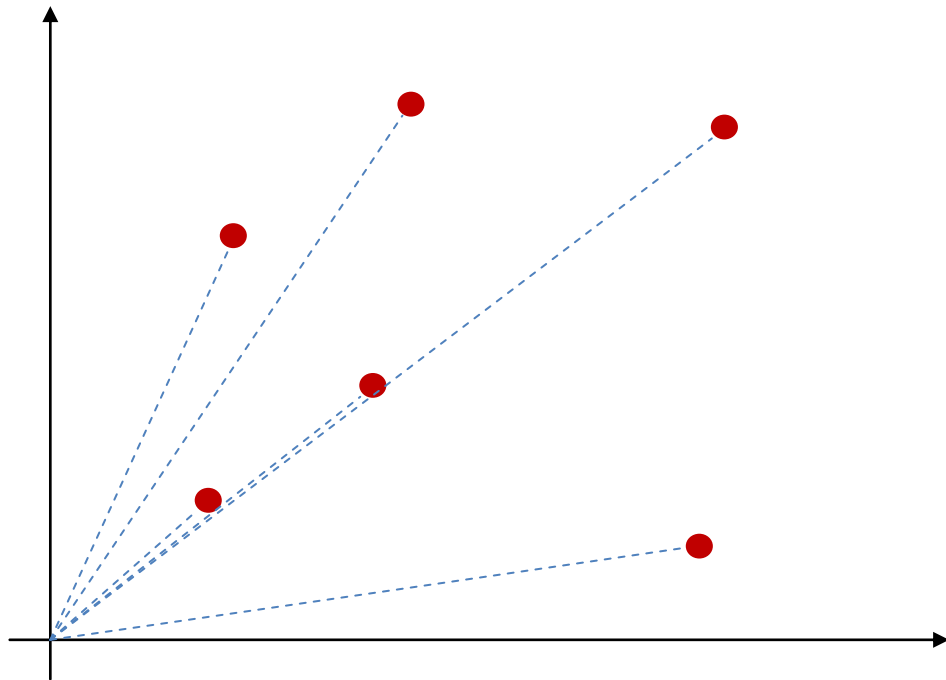
รูปที่ 3.1 โมเดลการเดินทางของสัญญาณเมื่อผู้ใช้บริการเชื่อมต่อเข้ากับจำนวน hop ที่ต้องการ

จากรูปที่ 3.1 แสดงข่ายเชื่อมโยงระหว่าง ONU และ ONU อีกตัวหนึ่ง ในรูปที่ 3.1 ผู้ใช้บริการ (แสดงในสัญลักษณ์วงกลม) สามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU โดยตรง (จะถูกเรียกว่า premium subscribers) หรือเชื่อมต่อกันระหว่างผู้ให้บริการด้วยตนเอง โดยการเชื่อมต่อทั้งหมดนั้นเป็นการเชื่อมต่อของระบบไร้สายทั้งสิ้น จะเห็นได้ว่า ผู้ใช้บริการสามารถเชื่อมต่อสู่อ ONU ได้ภายใน 2 hop ดังรูปที่ 3.1(ก), 3 hop ดังรูปที่ 3.1(ข) และ 4 hop ดังรูปที่ 3.1(ค) ฉะนั้นการ ผู้ให้บริการแต่ละรายจะต้องมีหมายเลขประจำตัวของผู้ใช้บริการเพื่อระบุว่าผู้ใช้นั้นเป็น hop ที่เท่าไร และอีกเท่าไรจะเกินจำนวน hop ที่ตั้งเอาไว้ เมื่อกำหนดให้  $h$  คือจำนวน hop (ที่จะเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU) ที่ต้องการแล้ว จำนวนหมายเลขประจำตัวผู้ให้บริการที่มากที่สุดก็คือ  $(h \times 2) - 1$

### 3.1 การสร้างการเชื่อมต่อไร้สายระหว่างผู้ให้บริการ

อัลกอริทึมนี้ เป็นอัลกอริทึมที่ใช้บอกตำแหน่งการวาง ONU ที่เหมาะสมโดยที่มีการเชื่อมต่อกันด้วยเครือข่ายไร้สายแบบ multi-hop โดยการกำหนดพื้นที่ให้บริการให้อยู่ในจุดภาคที่ 1 ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน เริ่มจากจุด  $(0,0)$  และผู้ให้บริการทุกคนจะถูกกำหนดให้มีพิกัดเป็น  $(X_j, Y_j)$  จากนั้นเราจะหาระยะระหว่างผู้ให้บริการทุกรายถึงจุดเริ่มต้น นั่นคือ  $(0,0)$  จากสูตรระยะทางแบบยูคลิด (“Euclidean” distances) ดังใน (3.1) โดย  $d_k$  เป็นระยะห่างจากจุด  $(0,0)$  ถึงผู้ให้บริการจำนวน  $k$  หลัง ดังรูปที่ 3.2

$$d_k = \sqrt{(X_j - 0)^2 + (Y_j - 0)^2} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 การหาระยะห่างระหว่าง  $(0,0)$  ถึง ผู้ใช้บริการทุกราย

หลังจากนั้น เราจะเปรียบเทียบค่า  $d_k$  เพื่อหาค่าที่น้อยที่สุด เมื่อได้ค่าที่น้อยที่สุดแล้ว จากนั้นเราจะกำหนดหมายเลขให้ผู้ให้บริการรายนั้น และเก็บค่านั้นไว้ใน subscribers' info table ซึ่งตารางนี้จะประกอบด้วยข้อมูลของผู้ใช้บริการแต่ละราย เช่น พิกัดในแกน  $X$  และแกน  $Y$  รวมทั้งเก็บข้อมูลว่าผู้ให้บริการรายนี้เชื่อมต่อกับผู้ให้บริการหรือ ONU รายใดอีกบ้าง ซึ่งหมายเลขประจำตัวนั้นคือหมายเลขเดียวกับหมายใน รูปที่ 3.1 หมายเลขประจำตัวนี้จะบอกว่าเป็นตัวที่เท่าไรใน line ที่อยู่ระหว่าง ONU 2 ตัวใดๆ หรือ สามารถทำให้ทราบได้ว่า จำนวน hop ที่ใช้ในการเข้าถึง ONU นั้นสมควรแก่การสร้าง ONU ตัวใหม่แล้ว ซึ่งล้วนสอดคล้องกับรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่าง subscribers' info table

No. subscriber	X axis	Y axis	from	identification No.
1	11.81623	47.97471	8	2
2	46.49446	71.95416	3	2
3	63.63302	94.04604	11	1
4	63.51847	109.6418	10	1
5	90.99023	77.41439	8	2
6	99.1109	96.71688	1	3

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของ subscribers' info table ซึ่งประกอบไปด้วย หมายเลขของผู้ใช้บริการ พิกัดในแกน X และแกน Y และหมายเลขประจำตัวของผู้ใช้บริการ นอกจากนี้ยังมีตารางที่แสดงถึงเส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้บริการและ ONU โดยจะเรียกว่า route table ดังแสดงใน

ตารางที่ 3.2 ซึ่งตารางนี้ได้มาจากตารางที่ 3.1 ยกตัวอย่างเช่น ผู้ใช้บริการหมายเลข 1 มาจากผู้ใช้บริการหมายเลข 8 ดังนั้นแปลว่าผู้ใช้บริการทั้งสองนั้นเชื่อมต่อกัน ดังนั้น

ตารางที่ 3.2 จึงแสดงผลว่า ผู้ใช้บริการหมายเลข 8 ต่อกับผู้ใช้บริการหมายเลข 1 และผู้ใช้บริการหมายเลข 1 เชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการหมายเลข 8

ตารางที่ 3.2 ตาราง route table

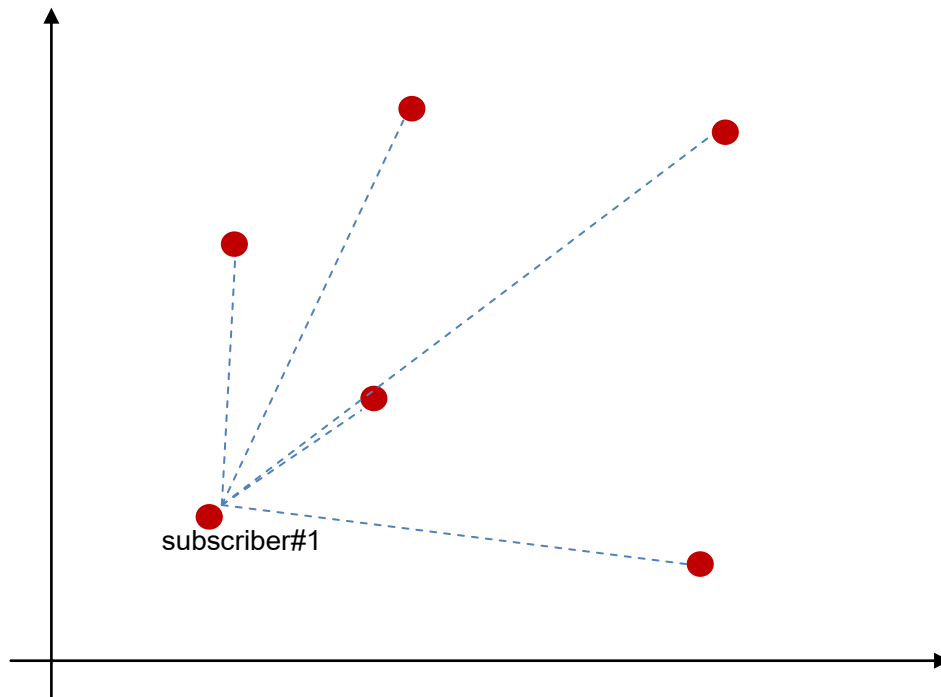
No. subscribers	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
8	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

จาก

ตารางที่ 3.2 route table แสดงการเชื่อมต่อของผู้ใช้การด้วยตนเอง รวมทั้งระหว่างผู้ใช้บริการและ ONU ด้วย จากตารางจะอ่านได้ว่าผู้ใช้บริการหลังที่ 1 จะเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการหลังที่ 6 และ 8 ,ผู้ใช้บริการหลังที่ 2 จะเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการหลังที่ 3 เป็นต้น โดยถ้าเป็น ONU เราจะกำหนดให้ ONU ตัวที่ 1 เริ่มต้นตัวที่ 1 ที่ จำนวนของผู้ใช้บริการทั้งหมด +1 ยกตัวอย่างเช่น ผู้ใช้บริการทั้งหมดมี 100 รายฉะนั้นหมายเลขของ ONU ตัวที่ 1 นั้นก็คือ 101 นั่นเอง



หลังจากที่เราเปรียบเทียบค่าต่ำสุดของ  $d_k$  และนำมาเก็บไว้ในตาราง subscribers' info table แล้ว (สมมติให้ผู้ให้บริการรายนั้นชื่อว่า subscriber#1 ) จากนั้นเราจะหาระยะทางระหว่าง subscriber#1 และ ผู้ให้บริการรายที่เหลือ โดยใช้สูตรระยะทางแบบยูคลิดเช่นเดิม ดังรูปที่ 3.3

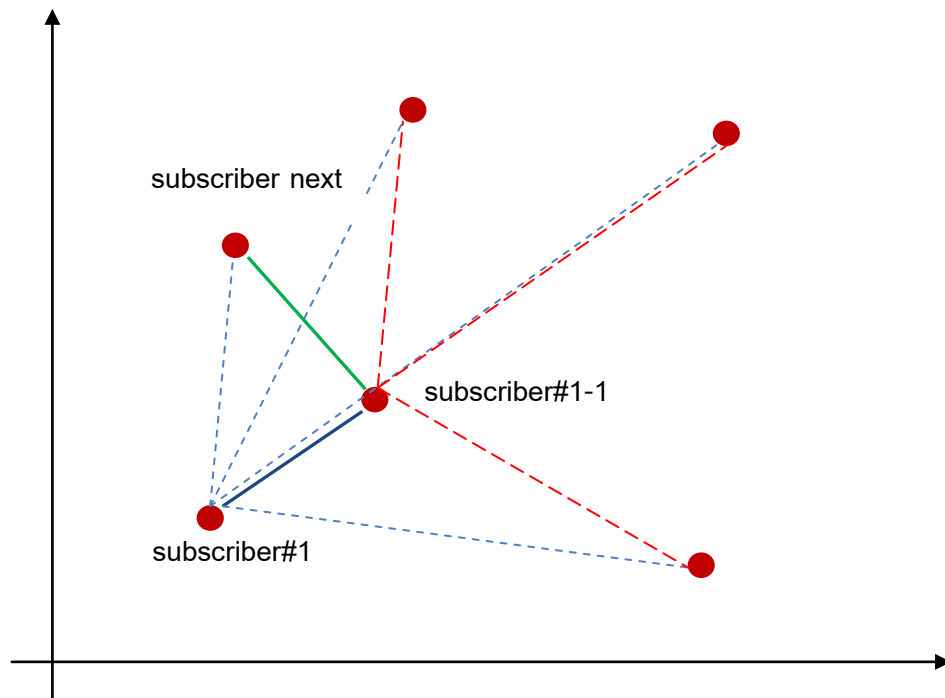


รูปที่ 3.3 การหาระยะห่างจาก subscriber#1 ถึง ผู้ให้บริการที่เหลือทั้งหมด

หลังจากหาระยะห่างจาก subscriber#1 ถึงผู้ให้บริการที่เหลือทุกตัวแล้ว ทำค่าระยะทางทั้งหมดที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าที่น้อยที่สุด และนำค่านั้นมาเก็บไว้ในตาราง subscribers' info table เช่นเดิม จะสมมติให้ผู้ให้บริการรายนี้ชื่อว่า subscriber#1-1 ฉะนั้นในตาราง route table นั้นในช่องแถวที่ subscriber#1 คอลัมน์ที่ subscriber#1-1 จะเท่ากับ 1 เช่นเดียวกับกับช่องแถวที่ subscriber#1-1 คอลัมน์ที่ subscriber#1 จะมีค่าเท่ากับ 1 เช่นกัน

เมื่อเก็บค่า subscriber#1-1 แล้ว เราจะหาผู้ให้บริการรายถัดไปที่อยู่ใกล้กับ subscriber#1-1 มากที่สุด ในขณะเดียวกัน เราก็จะหาผู้ให้บริการที่อยู่ใกล้กับ subscriber#1 มากที่สุด เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 หลังจากนั้นนำค่าที่น้อยที่สุดจาก subscriber#1-1 ถึงผู้ให้บริการรายที่เหลือ และจาก subscriber#1 ถึงผู้ให้บริการรายที่เหลือ จากนั้นนำค่าที่น้อยที่สุดมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งจากในรูปที่ 3.4 ผู้ให้บริการที่อยู่ใกล้กับ subscriber#1 มากที่สุดนั่นคือ subscriber next และผู้ให้บริการที่อยู่ใกล้กับ subscriber#1-1 มากที่สุดคือ subscriber next ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่าผู้ให้บริการรายถัดไปที่จะถูกนำไปเก็บค่าในตาราง subscribers' info table และ route table คือ subscriber next แต่เหตุที่เราต้องนำค่าระยะห่างระหว่าง subscriber#1 ถึง subscriber next และ subscriber#1-1 ถึง subscriber next มาเปรียบเทียบกันเพราะเราต้องการทราบว่า

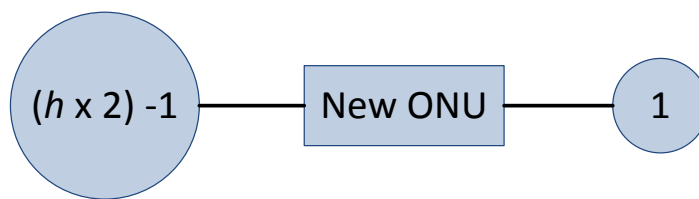
subscriber next นั้น จะต้องเชื่อมต่อเข้ากับผู้ใช้บริการรายใด ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่านั้นคือ ระยะห่างระหว่าง subscriber#1 ถึง subscriber next มีค่าน้อยกว่าระยะห่างระหว่าง subscriber#1-1 ถึง subscriber next ดังนั้นการเชื่อมต่อจึงเป็นดังเส้นสีเขียวในรูปที่ 3.4 จากนั้น นำค่าที่ได้ไปเก็บไว้ในตาราง subscribers' info table และ route table คือ subscriber next โดยให้ตาราง subscribers' info table จะเก็บค่าได้ว่า subscriber next นั้นมาจาก subscriber#1-1 และมีหมายเลขประจำตัวเป็น เลขถัดจาก subscriber#1-1 เช่นว่า subscriber#1-1 มีหมายเลขประจำตัวเป็นค่าที่ต่อจาก subscriber#1-1 จากนั้นทำวิธีการเดิม นั่นคือการหาผู้ใช้บริการที่ใกล้กับ subscriber#1 subscriber#1-1 และ subscriber next มากที่สุด แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เช่นเดิม จนกระทั่งผู้ใช้บริการทุกรายถูกเก็บบันทึกไว้ในตาราง subscribers' info table ครบทุกราย



รูปที่ 3.4 การหาระยะห่างจาก subscriber#1 ถึง ผู้ใช้บริการที่เหลือทั้งหมด และ จาก subscriber#1-1 ถึง ผู้ใช้บริการที่เหลือทั้งหมด

ในขณะเดียวกัน เมื่อหมายเลขประจำตัวของผู้ใช้บริการ ซึ่งบ่งบอกถึงจำนวน hop ที่นับมาจาก ONU ที่ใกล้ที่สุด (อ้างอิงได้จากรูปที่ 3.1) และเมื่อหมายเลขประจำตัวนั้นถึงค่า  $h$  แล้ว เราจะต้องสร้าง ONU ขึ้นมาใหม่ และ ONU ตัวนี้จะถูกวางไว้ที่ระยะทางเฉลี่ยระหว่าง ผู้ใช้บริการ 2 รายที่ใกล้ที่สุด นั่นก็คือคือผู้ใช้บริการที่มีหมายเลขประจำตัวเท่ากับ  $h$  และผู้ใช้บริการรายถัดไป (ถ้ามองจากรูปที่ 3.4 ถ้าสมมติว่า subscriber#1-1 มีหมายเลขประจำตัวเป็น  $(hop \times 2) - 1$

แล้ว ดังนั้น subscriber next จะเปรียบได้กับ ผู้ใช้บริการที่ 1 ดังรูปที่ 3.5 ONU ที่สร้างขึ้นใหม่จะอยู่ระหว่าง subscriber#1-1 และ subscriber next ) ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.5 ซึ่งค่า  $h$  นั้นมีค่าเท่ากับ  $(hop \times 2) - 1$  ซึ่งจะสอดคล้องกับรูปที่ 3.1 โดยในแต่ละกรณี (จำนวน hop ที่ใช้ในการเชื่อมต่อสู่ ONU) นั้นจะมีค่าแตกต่างกันไป ตำแหน่งของ ONU ที่กำหนดขึ้นมานี้ยังเป็นเพียงค่าเฉลี่ยเท่านั้น หลังจากผู้ใช้บริการและ ONU ทุกตัวถูกจัดเก็บลงในตาราง subscribers' info table และ route table เรียบร้อย เราจะ minimize ตำแหน่งของ ONU นั้นด้วยแนวความคิดของ greedy approach อีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 3.5 การสร้าง ONU ใหม่

### 3.2 การ optimization ตำแหน่งการวางของ ONU

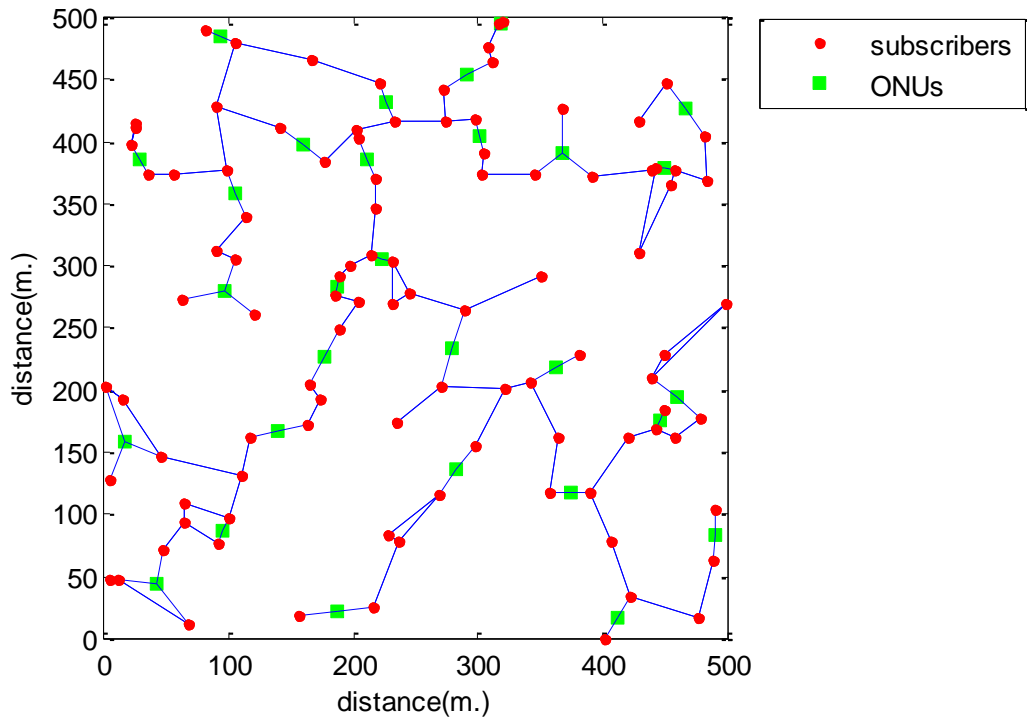
เมื่อผู้ใช้บริการทุกรายถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายทั้งหมดแล้ว ต่อไปเราจะหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ ONU โดยอาศัยแนวคิดจาก Greedy approach โดยเริ่มจากกำหนดเซตของ premium subscribers (เซตของผู้ใช้บริการที่ต่อกับ ONU โดยตรง) ของ ONU แต่ละตัว และหาตำแหน่งใหม่ของ ONU ได้ดัง(3.2)

$$ONU_i = \left( \frac{\sum_{j=1}^{i_k} X_j}{i_k}, \frac{\sum_{j=1}^{i_k} Y_j}{i_k} \right) \quad (3.2)$$

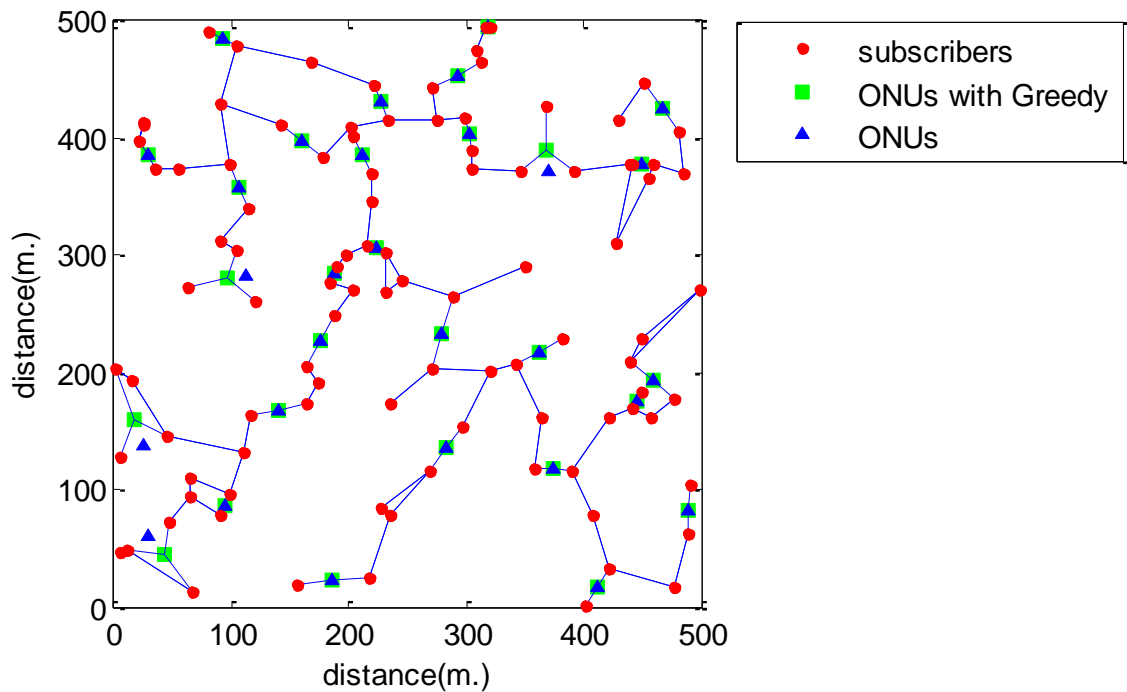
โดย  $i$  = จำนวนของ ONU และเซตของ premium subscriber คือ  $(X_j, Y_j), \forall j \in (1, 2, \dots, i_k)$

### 3.3 การทดสอบอัลกอริทึม

การทดสอบอัลกอริทึมนี้ จะกำหนดพื้นที่ขนาด  $500 \times 500$  ตารางเมตร และสุ่มผู้ใช้บริการจำนวน 100 หลัง และในสมมติฐานขั้นแรกคือ "ผู้ใช้บริการทุกหลังจะสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายในจำนวน 2, 3 และ 4 hop" ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7



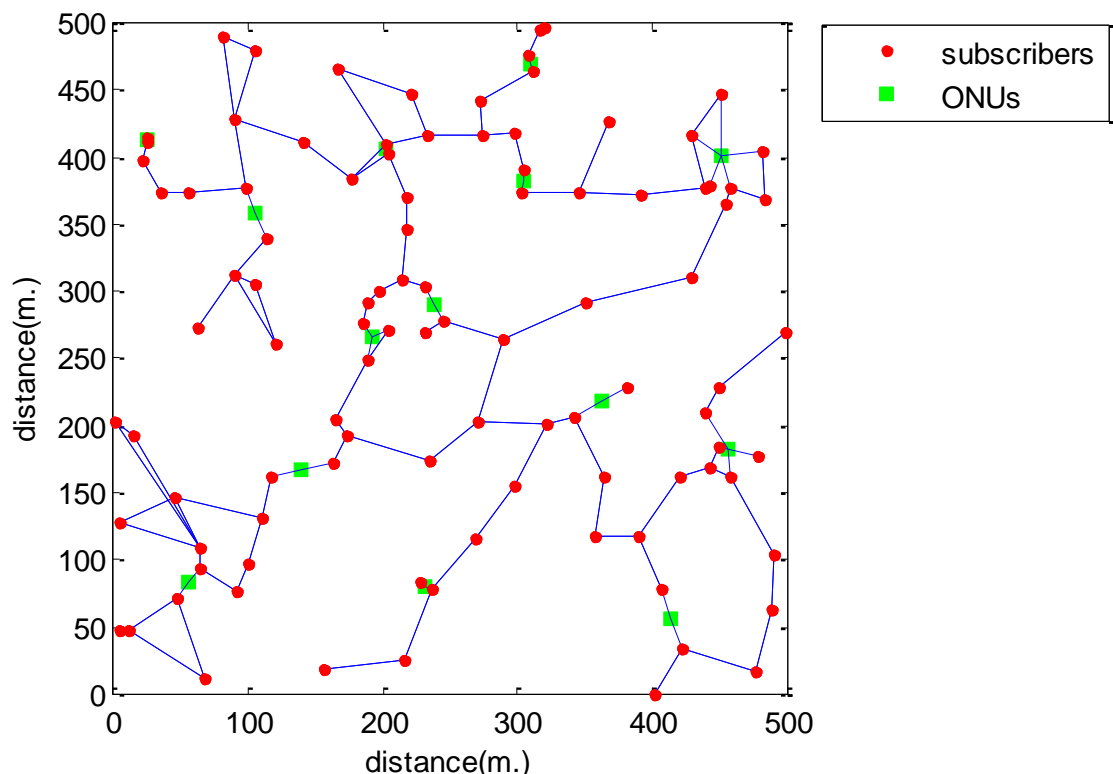
รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2 hop



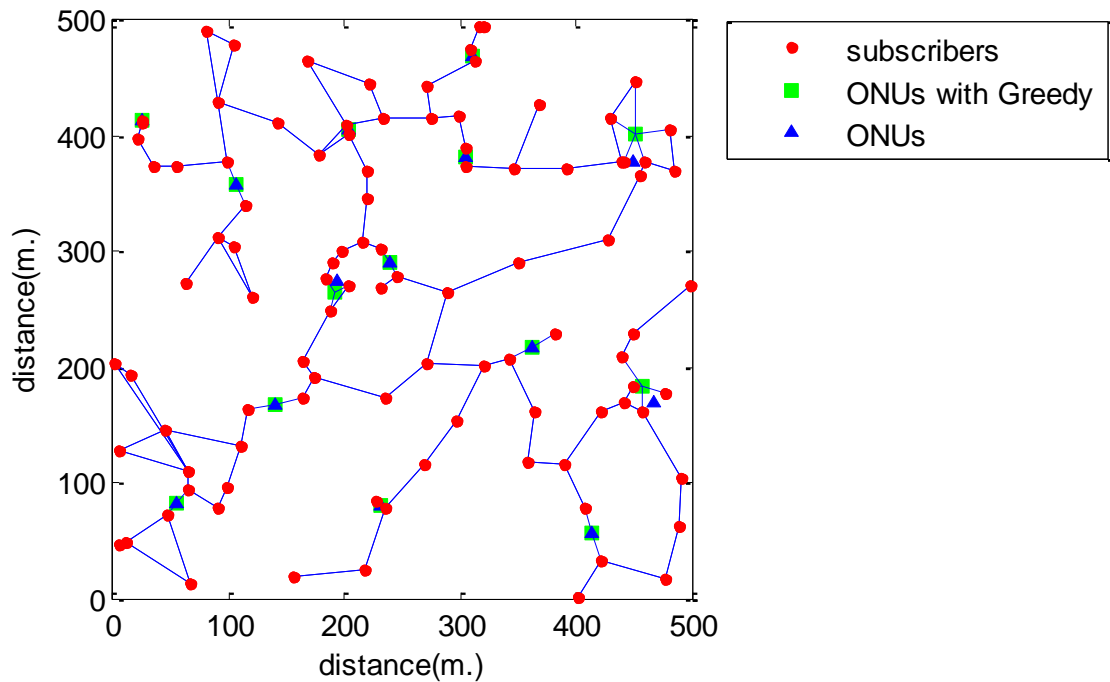
รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบตำแหน่ง ONU ระหว่างการทำการ optimize ตำแหน่งของ ONU และยังไม่ optimize ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 2 hop

จากรูปที่ 3.6 จะแสดงตำแหน่งการวางของ ONU (แสดงโดยรูปสี่เหลี่ยมสีเขียว) ผู้ใช้บริการ (แสดงโดยรูปวงกลมสีแดง) และเส้นสีน้ำเงินนั้นแสดงถึง wireless mesh ที่เชื่อมต่อระหว่างกันของผู้ใช้บริการ ในกรณีนี้ผู้ให้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 2 hop ซึ่งใช้จำนวน ONU ทั้งหมด 29 ตัว ซึ่งตำแหน่ง ONU ทั้งหมดนั้นได้ผ่านการ optimize ดังในหัวข้อที่ 3.2 มีผลให้ตำแหน่งของ ONU เปลี่ยนไปสังเกตได้จากรูปที่ 3.7 โดยตำแหน่งของ ONU ก่อนการ optimize (แสดงโดยรูปสามเหลี่ยมสีน้ำเงิน) จะเห็นได้ว่า ตำแหน่งของ ONU นั้นเปลี่ยนไปจากเดิมเล็กน้อย ในกรณีที่ ONU ตัวนั้นมีผู้ให้บริการเชื่อมต่อโดยตรงมากกว่า 2 ราย ส่วน ONU ที่มีผู้ให้บริการเชื่อมต่อโดยตรง 2 รายนั้น ตำแหน่งของ ONU จะไม่ถูก optimize เพราะการ optimize นั้นคือการทำให้ระยะห่างระหว่าง ONU ถึงแต่ละ premium subscriber ของตัวมันเองนั้นมีระยะห่างที่เท่าๆกัน

หลังจากที่ทดสอบอัลกอริทึม ในกรณีนี้ผู้ให้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 2 hop แล้ว จึงทดสอบเพิ่มในกรณีนี้ผู้ให้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 3 hop และ 4 hop ตามลำดับ

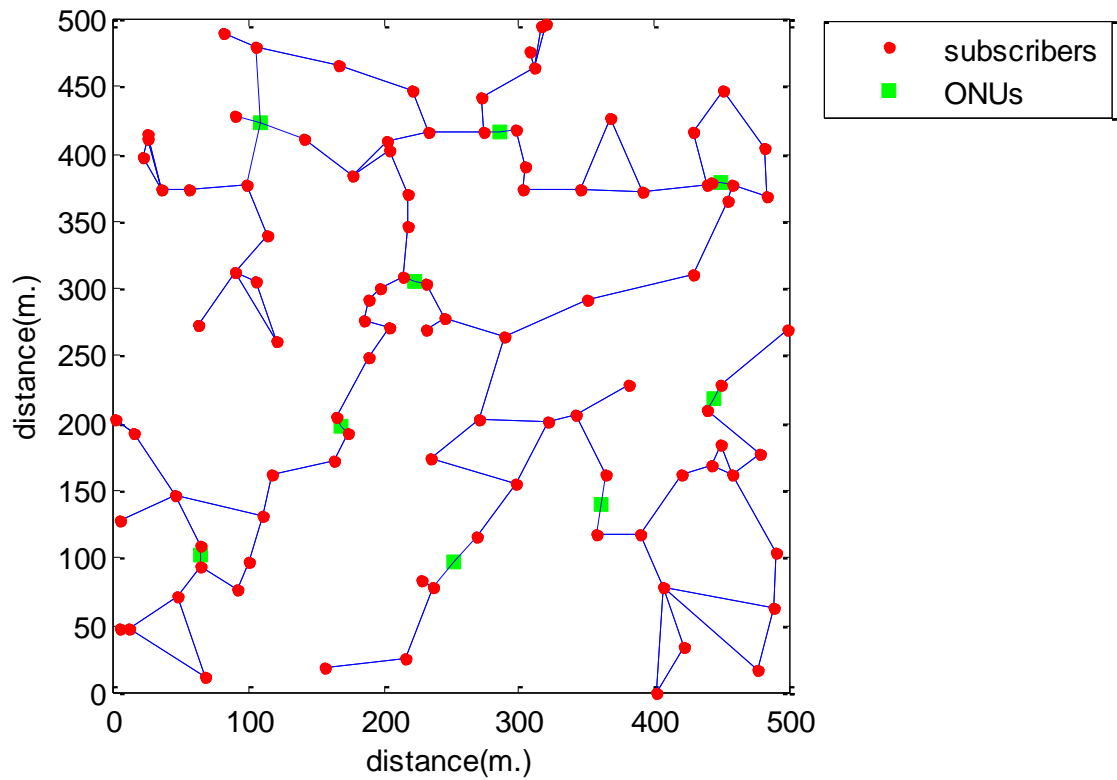


รูปที่ 3.8 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ให้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 3 hop

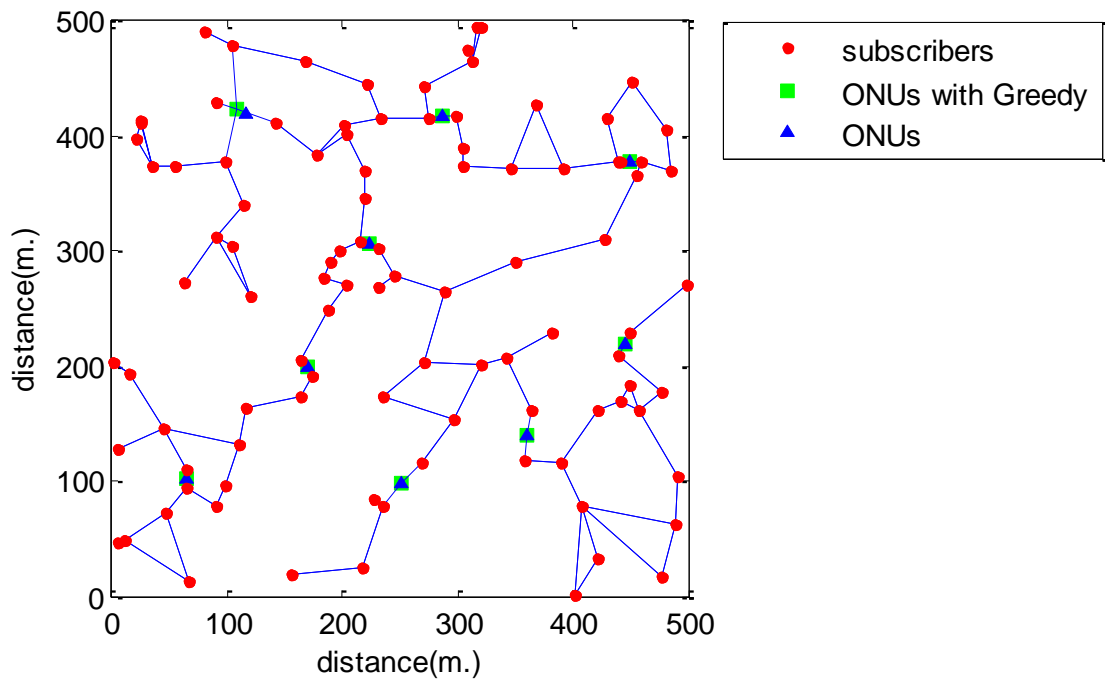


รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบตำแหน่ง ONU ระหว่างการทำการ optimize ตำแหน่งของ ONU และยังไม่ optimize ในกรณีผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 3 hop จากรูปที่ 3.8 จะแสดงตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการ ทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 3 hop ซึ่งใช้จำนวน ONU ทั้งหมด 14 ตัว ซึ่งจะใช้จำนวน ONU น้อยลงกว่าในกรณีผู้ใช้บริการ ทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 2 hop ถึง 15 ตัว และในรูปที่ 3.9 เป็นการเปรียบเทียบตำแหน่งของ ONU ในกรณีก่อนและหลังการ optimize ในหัวข้อ 3.2

หลังจากทดสอบอัลกอริทึมเพื่อตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการ ทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 3 hop เมื่อพบว่า จำนวนของ ONU ที่ใช้ ลดลงมากถึง 15 ตัว หรือ 51.72% ดังนั้นเราจึงทดสอบอัลกอริทึมเพื่อตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการ ทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 4 hop ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.10 และเปรียบเทียบตำแหน่งของ ONU ในกรณีก่อนและหลังการ optimize ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 3.11

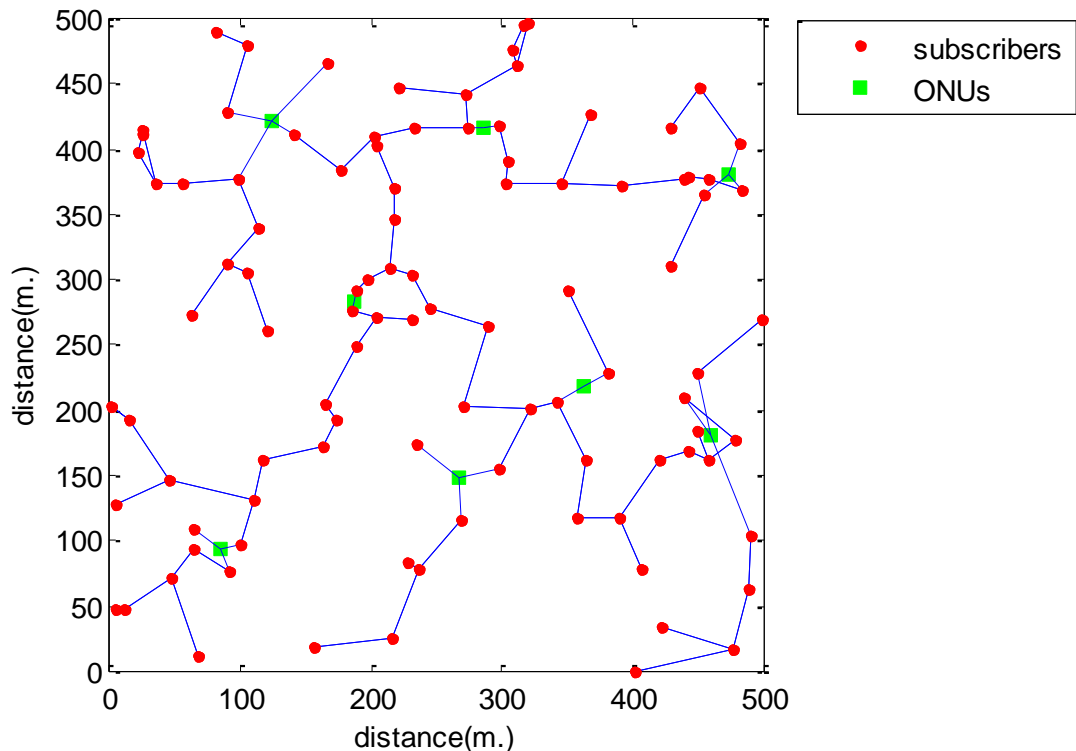


รูปที่ 3.10 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีนี้ที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 4 hop



รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบตำแหน่ง ONU ระหว่างการทำการ optimize ตำแหน่งของ ONU และยังไม่ optimize ในกรณีนี้ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 4 hop

จากรูปที่ 3.10 แสดงตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการ ทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 4 hop ซึ่งใช้จำนวน ONU ทั้งหมด 9 ตัว ซึ่งลดลงจากในกรณีที่ผู้ใช้บริการ ทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 3 hop ถึง 5 ตัวหรือ 35.71% ดังนั้นเราจึงสอบอัลกอริทึมโดยเพิ่มจำนวน hop ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU เป็น 5 hop ซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 5 hop

จากรูปที่ 3.12 แสดงตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 5 hop ซึ่งใช้จำนวน ONU 8 ตัว ลดลงจากกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 4 hop เพียง 1 ตัวหรือ 11.11% เท่านั้น และเนื่องด้วยยิ่งเมื่อจำนวน hop ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ยิ่งมากขึ้นเท่าใด ค่าอัตรารับ-ส่งข้อมูลจะยิ่งลดลงมากเท่านั้น ดังนั้นเราจึงได้ขอขอบเขตที่ว่า จำนวน hop ที่เหมาะสมในการเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU นั้นคือไม่เกิน 4 hop นั้นเอง ซึ่งจำนวน ONU ที่ใช้ในแต่ละกรณีจะสรุปได้ใน

ตารางที่ 3.3



ตารางที่ 3.3 จำนวน ONU ที่ใช้ในแต่ละกรณี

จำนวน hop ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU	2 hop	3 hop	4 hop	5 hop
จำนวน ONU ที่ใช้	29	14	9	8

## บทที่ 4

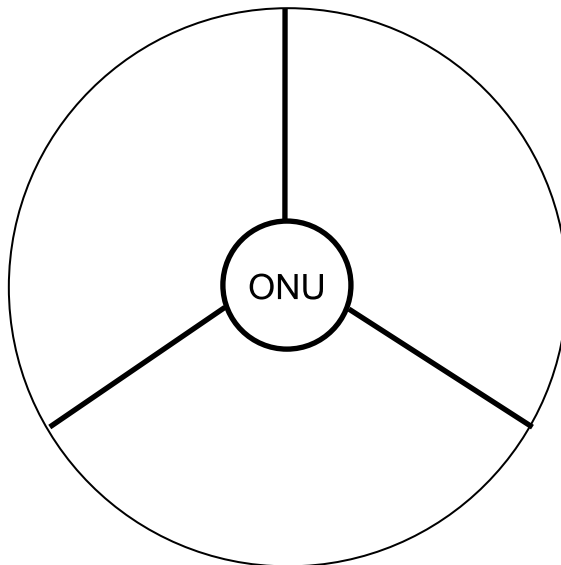
### การทดสอบอัลกอริทึมซึ่งมีเงื่อนไขเรื่องระยะทางในการให้บริการ

#### 4.1 การหาระยะการให้บริการของ ONU และ access point

ในความเป็นจริงนั้น ระยะการให้บริการของ access point นั้นเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพทั้งในเรื่องความแข็งแรงของสัญญาณและอัตรารับ-ส่งข้อมูล เราจำเป็นต้องกำหนดระยะขอบเขตการให้บริการในอุปกรณ์ทั้ง ONU และ AP ของผู้ใช้บริการโดยจะคำนวณจาก wireless propagation model รวมทั้งอุปกรณ์ที่รองรับมาตรฐาน 802.11n

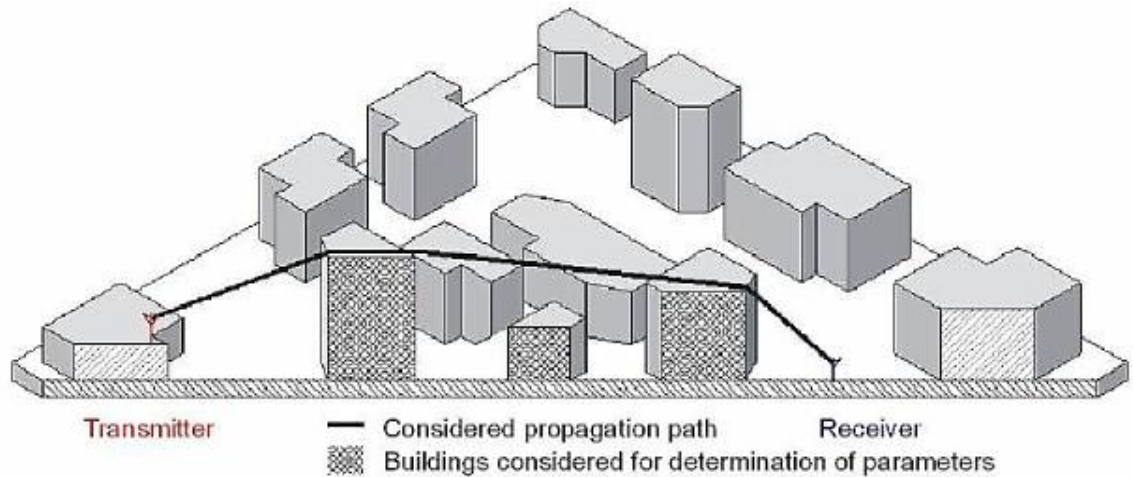
##### 4.1.1 การออกแบบระยะการให้บริการของ ONU และผู้ใช้บริการ

เนื่องจากการให้บริการ WOBAN นั้นในส่วนของ back end ซึ่งเป็นส่วนของเส้นใยแสง ส่งข้อมูลมาจาก CO ส่งผ่านเส้นใยแสง ทำให้มีอัตราการรับ-ส่งข้อมูลที่สูง แต่เนื่องด้วยระบบเครือข่ายไร้สายนั้นในมาตรฐานล่าสุด (802.11n) มีอัตราการรับ-ส่งข้อมูลสูงสุดเพียง 300 Mb/s เท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นผลให้การให้บริการ WOBAN ยังถือว่ายังมีปัญหาขจัดอยู่ที่ตำแหน่งของ ONU ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมระหว่าง ส่วนของ เส้นใยแสงและระบบไร้สาย ดังนั้นเราจึงออกแบบในตำแหน่งของ ONU ใหม่ โดย ONU นั้นซึ่งรองรับอัตราข้อมูลเท่ากับ 1.25 Gb/s นำมาแบ่งการส่งเป็น 3 ส่วน ส่วนละ 300 Mb/s และแบ่งsector การส่งเป็น 120 องศา ซึ่งจะอธิบายได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ONU ที่ถูกออกแบบการส่งสัญญาณ 3 ส่วนส่วนละ 120 องศา

เมื่อออกแบบ ONU แล้ว เราจึงคำนวณรัศมีของการส่งข้อมูลของ ONU โดยใช้ wireless propagation model ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในที่นี้คือ COST-231Walfisch-Ikegami [30] และเลือกเทคโนโลยี Wi-Fi มาตรฐาน 802.11n ส่งสัญญาณที่ความถี่ 2.4 GHz

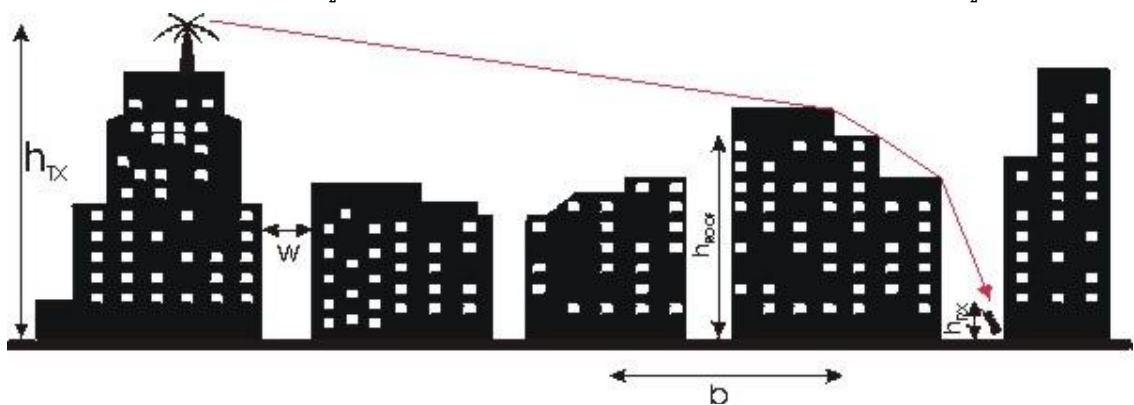


รูปที่ 4.2 ตัวอย่างของแบบจำลอง COST-231Walfisch-Ikegami ที่ใช้ในการทดสอบ[3]

จากแบบจำลอง COST-231Walfisch-Ikegami มีขอบเขตของพารามิเตอร์ที่ต้องใช้คือ

- ❖ ความถี่  $f$  ใช้ความถี่ช่วง 800-2400 MHz
- ❖ ความสูงของตัวส่งสัญญาณ  $h_{TX}$  มีค่าระหว่าง 4-50 เมตร
- ❖ ความสูงของตัวรับสัญญาณ  $h_{RX}$  มีค่าระหว่าง 1-3 เมตร
- ❖ ระยะห่างระหว่างตัวส่งสัญญาณถึงตัวรับสัญญาณ ต้องอยู่ในช่วง 20-5000 เมตร

ส่วนพารามิเตอร์ที่อยู่ระหว่างตัวส่งสัญญาณถึงตัวรับสัญญาณ จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่อยู่ระหว่างตัวส่งสัญญาณถึงตัวรับสัญญาณ[3]

รูปที่ 4.3 แสดงพารามิเตอร์จากตัวส่งสัญญาณถึงตัวรับสัญญาณ ที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณ โดย

$h_{TX}$  คือ ความสูงของตัวส่งสัญญาณ

$h_{RX}$  คือ ความสูงของตัวรับสัญญาณ

$h_{roof}$  คือ ความสูงของหลังคา

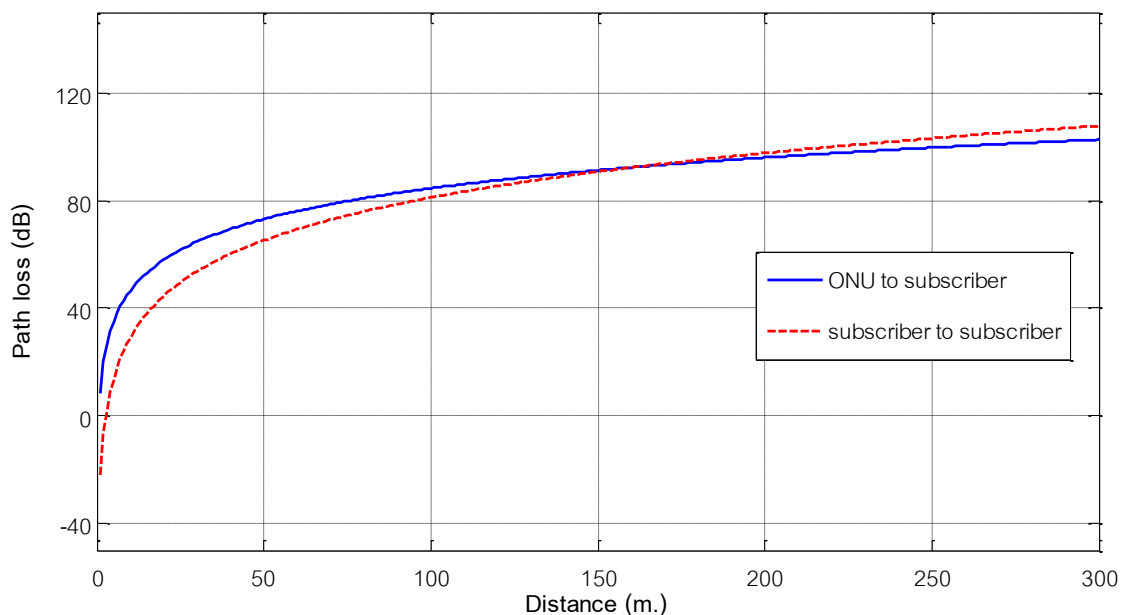
$w$  คือ ความกว้างของถนน

$b$  คือ ระยะเวลาห่างระหว่างสิ่งก่อสร้าง

กำหนดให้ ส่งสัญญาณที่ความถี่ 2.4 GHz

- 1 ความสูงของบ้านของผู้ใช้บริการทุกหลังเป็น 8 เมตร
- 2 วางอุปกรณ์รับสัญญาณที่ความสูงจากพื้นดิน 1 เมตร
- 3 ความกว้างของถนนคือ 10 เมตร
- 4 ระยะห่างของจุดศูนย์กลางบ้านของผู้ใช้บริการที่อยู่ติดกันเป็น 20 เมตร
- 5 กำหนดให้ ONU ที่ติดตั้งนั้นสูงจากพื้นดิน 10 เมตร

ในการคำนวณ สูตรที่ใช้คำนวณมาจากในทฤษฎีพื้นฐานในหัวข้อที่ 2.2.7.3 และใช้สมการ (2.13) ถึง (2.21) ซึ่งจะได้ผลดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง path loss และระยะทางระหว่าง ONU ถึงผู้ให้บริการ และจากผู้ให้บริการถึงผู้ให้บริการ

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของ path loss และระยะทางระหว่าง ONU ถึงผู้ให้บริการ (เส้นทึบ) และความสัมพันธ์ของ path loss และระยะทางระหว่างผู้ให้บริการถึงผู้ให้บริการด้วยตัวเอง

(เส้นประ) จากนั้นนำผลที่ได้นี้มาเพื่อหาค่า received power ณ ตำแหน่งของผู้ใช้บริการแต่ละราย ดังสมการ(3.3)

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{tot} - L \quad (3.3)$$

โดย  $P_{RX}$  คือ received power [dBm]

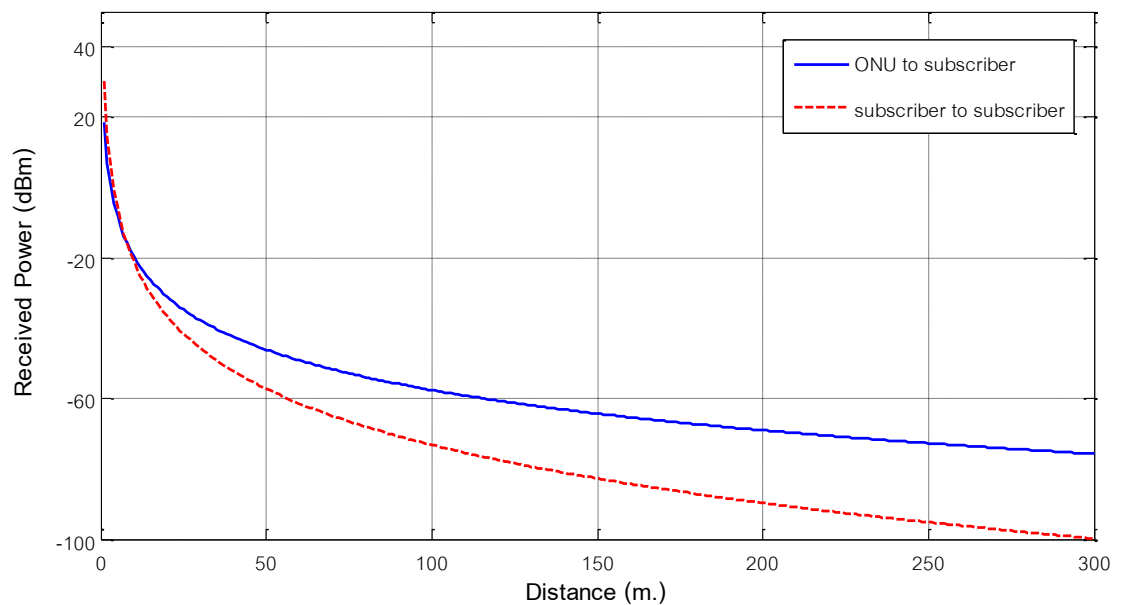
$P_{TX}$  คือ transmitter power [dBm]

$G_{tot}$  คือ total gain [dBm]

$L$  คือ transmission path loss [dB]

กำหนดให้ gain ของ antenna ที่ใช้ส่งสัญญาณใน ONU ไปสู่ผู้ใช้บริการ และจากผู้ใช้บริการไปถึงผู้ใช้บริการด้วยกันเองคือ 21 dBm และ 8 dBm ตามลำดับ ซึ่งค่าเหล่านี้มาจากพารามิเตอร์ของ antenna ที่มีการจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดผลที่ได้จากการคำนวณจะได้ดังรูปที่

4.5



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง received power และระยะทางจาก ONU ถึงผู้ใช้บริการและระยะทางจากผู้ใช้บริการถึงผู้ใช้บริการ

เมื่อได้ค่า received power แล้วในรูปที่ 4.5 จึงนำไปหาอัตราการรับ-ส่งข้อมูลจากตาราง MCS rateดังใน

ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 802.11n Association Data Rates (MCS Rate Indices)

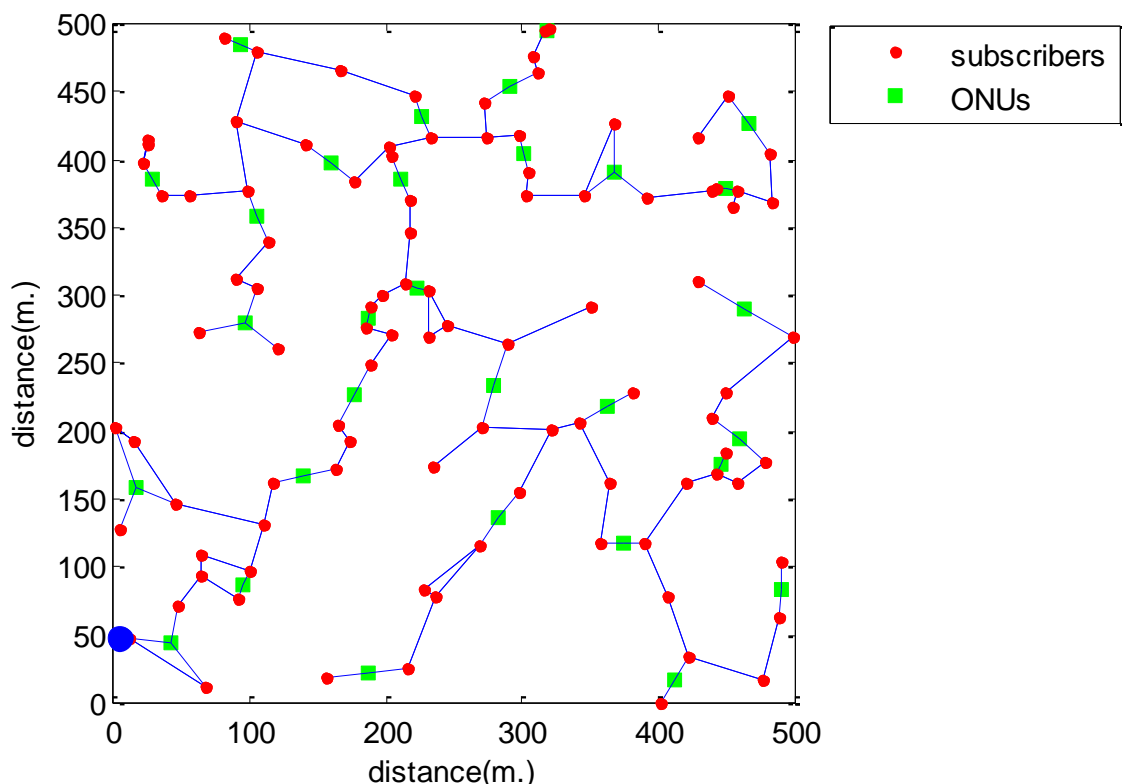
MCS rate index	data streams	modulation/ECC	Data Rate (Mbps )				Receive Sensitivity	
			800 NS GI		400 NS GI		(dBm )	
			20 MHz	40 MHz	20 MHz	40 MHz	20 MHz	40 MHz
0	1	BPSK / 1:2	6.5	13.5	7.2	15	-82	-79
1	1	QPSK / 1:2	13	27	14.4	30	-79	-76
2	1	QPSK / 3:4	19.5	40.5	21.7	45	-77	-74
3	1	16-QAM / 1:2	26	54	28.9	60	-74	-71
4	1	16-QAM / 3:4	39	81	43.3	90	-70	-67
5	1	64-QAM / 2:3	52	108	57.8	120	-66	-63
6	1	64-QAM / 3:4	58.5	121.5	65	135	-65	-62
7	1	64-QAM / 5:6	65	135	72.2	150	-64	-61
8	2	BPSK / 1:2	13	27	14.4	30	-82	-79
9	2	QPSK / 1:2	26	54	28.9	60	-79	-76
10	2	QPSK / 3:4	39	81	43.3	90	-77	-74
11	2	16-QAM / 1:2	52	108	57.8	120	-74	-71
12	2	16-QAM / 3:4	78	162	86.7	180	-70	-67
13	2	64-QAM / 2:3	104	216	115.6	240	-66	-63
14	2	64-QAM / 3:4	117	243	130	270	-65	-62
15	2	64-QAM / 5:6	130	270	144.4	300	-64	-61
16	3	BPSK / 1:2	19.5	40.5	21.7	45	-82	-79
17	3	QPSK / 1:2	39	81	43.3	90	-79	-76
18	3	QPSK / 3:4	58.5	121.5	65	135	-77	-74
19	3	16-QAM / 1:2	78	162	86.7	180	-74	-71
20	3	16-QAM / 3:4	117	243	130.7	270	-70	-67
21	3	64-QAM / 2:3	156	324	173.3	360	-66	-63
22	3	64-QAM / 3:4	175.5	364.5	195	405	-65	-62
23	3	64-QAM / 5:6	195	405	216.7	450	-64	-61

จาก

ตารางที่ 4.1 เพื่อให้ได้อัตรารับส่งข้อมูลที่ประมาณ 300 Mb/s จะต้องมี received power ที่มากกว่า -61 dBm เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกราฟในรูปที่ 4.5 จะได้ว่า ถ้าเราต้องการรับ-ส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 300 Mb/s จะต้องกำหนดระยะทางจาก ONU ถึง ผู้ใช้บริการน้อยกว่า 100 เมตร และ ระยะทางจาก ผู้ใช้บริการถึงผู้ให้บริการน้อยกว่า 70 เมตร ดังนั้นสำหรับ ONU ที่ได้ออกแบบไว้จึงสามารถส่งสัญญาณได้ในความเร็ว 900 Mb/s และมีระยะการรับ-ส่งสัญญาณที่ 100 เมตร

#### 4.2 การทดสอบอัลกอริทึม ในกรณีที่มีเงื่อนไขระยะการให้บริการ

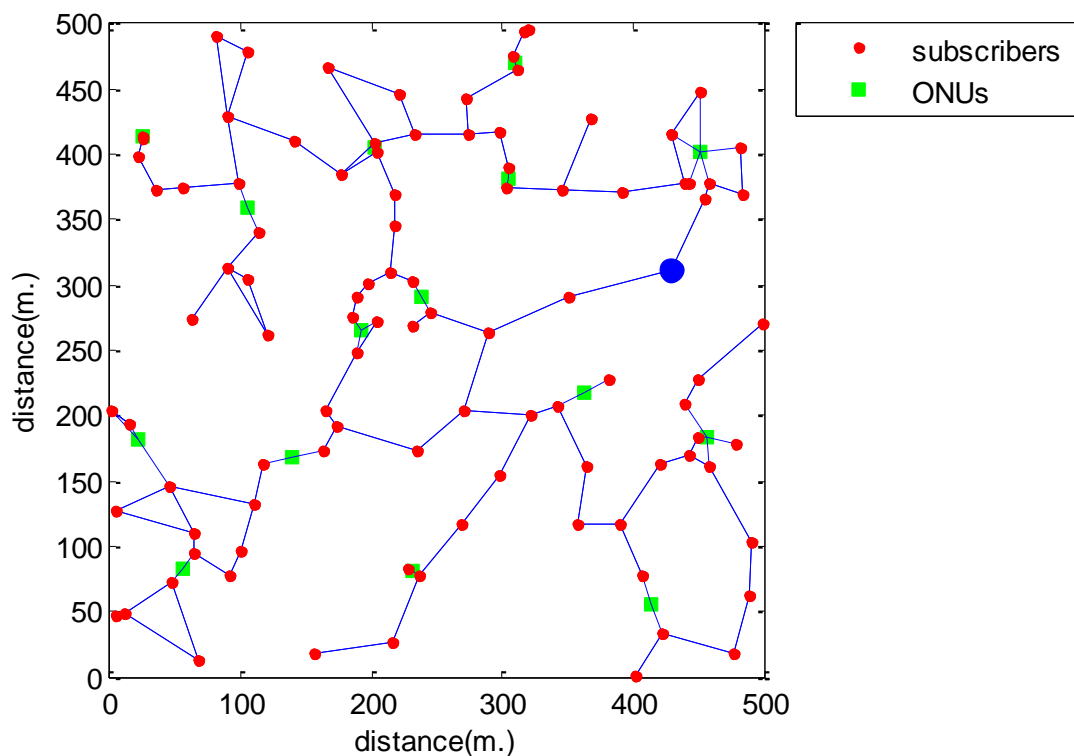
หลังจากที่ได้ออกแบบและคำนวณระยะในการรับ-ส่งข้อมูลของทั้ง ONU และ access point ของผู้ให้บริการแล้ว จึงนำผลที่ได้มาเป็นข้อจำกัดอีกหนึ่งของอัลกอริทึมนี้ โดยข้อจำกัดนี้จะเพิ่มเข้าไปในส่วนของการเปรียบเทียบค่าเพื่อนำมาซึ่งจะกำหนดไว้ว่า ถ้าเป็นการเชื่อมต่อระหว่าง ผู้ใช้บริการถึงผู้ให้บริการจะต้องมีระยะห่างไม่เกิน 70 เมตร และระหว่างผู้ให้บริการถึง ONU จะต้องมีความห่างไม่เกิน 100 เมตร ซึ่งเมื่อทดสอบอัลกอริทึมอีกครั้งจึงได้ผลดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ให้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2 hop ในกรณีที่จำกัดระยะการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ให้บริการ

รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2 hop และมีระยะการให้บริการจาก ONU คือ 100 เมตร และจากผู้ใช้บริการคือ 70 เมตร ซึ่งใช้จำนวน ONU ทั้งหมด 30 ตัวซึ่งมากกว่าในกรณีที่จำกัดระยะการให้บริการทั้ง ONU และ ผู้ใช้บริการ (รูปที่ 3.6) เป็นจำนวน 1 ตัวและมีอัตราการรับ-ส่งข้อมูลที่ต่ำที่สุดเท่ากับประมาณ 150 Mb/s ที่ตำแหน่งจุดสีน้ำเงินใหญ่ หมายถึง ผู้ใช้บริการที่ได้รับอัตรารับ - ส่งข้อมูลที่ต่ำที่สุด วิธีคำนวณนั้น เนื่องจากว่าเรากำหนดระยะการให้บริการที่ทำให้ทุกผู้ใช้บริการสามารถรับส่งข้อมูลในอัตรา 300 mb/s สำหรับผู้ใช้บริการ และ 900 mb/s สำหรับ ONU และเมื่อนำตาราง route table จาก

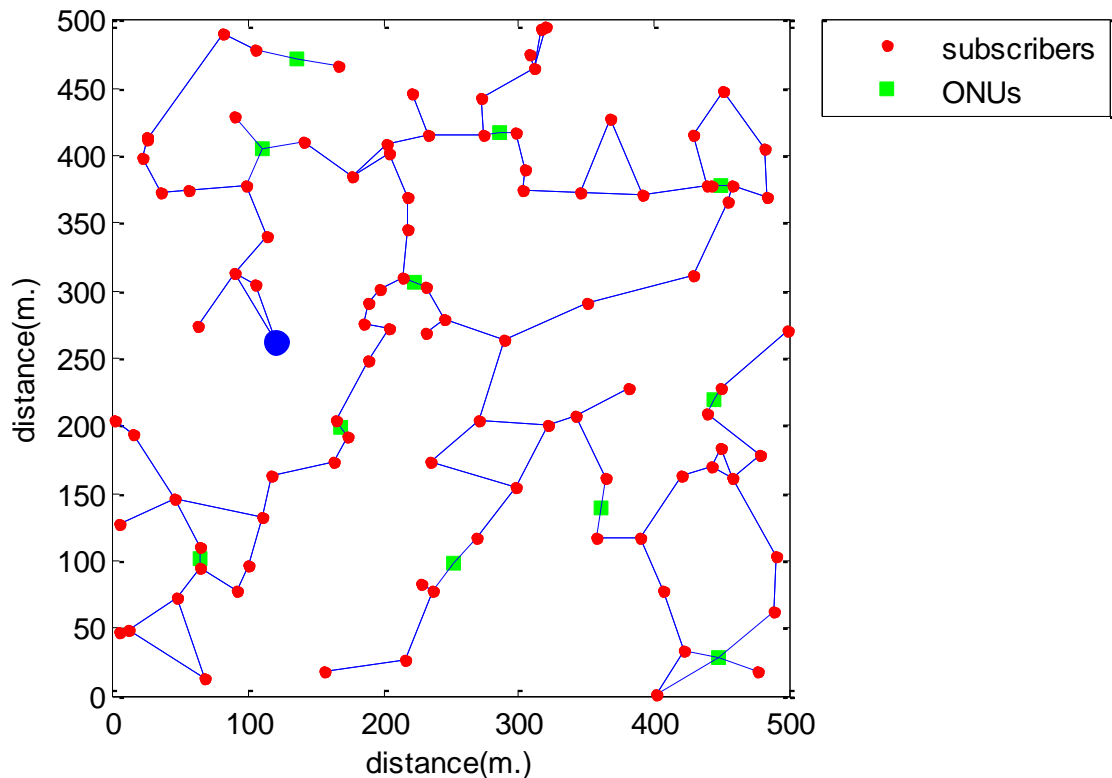
ตารางที่ 3.2 เราจะทราบว่าผู้ใช้บริการใดเชื่อมต่อกันบ้าง โดยเริ่มจากดูว่า ONU ต่อไปยังผู้ใช้บริการใดบ้าง และนำอัตรารับส่งข้อมูลมาหารแบ่งตามจำนวนผู้ใช้บริการที่เชื่อมต่อกับ ONU ตัวนั้น หลังจากนั้น เช็ตต่อไปที่ผู้ใช้บริการใดเชื่อมต่อ ต่อจากผู้ใช้บริการรายแรกเป็นจำนวนเท่าไร แล้วจึงนำค่าอัตรารับส่งข้อมูล ของรายแรกมาหารต่อให้เป็นของรายถัดมา ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนสามารถหาอัตรารับส่งข้อมูลอย่างคร่าวๆได้ทั้งหมดทุกราย



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 3 hop ในกรณีที่จำกัดระยะการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ



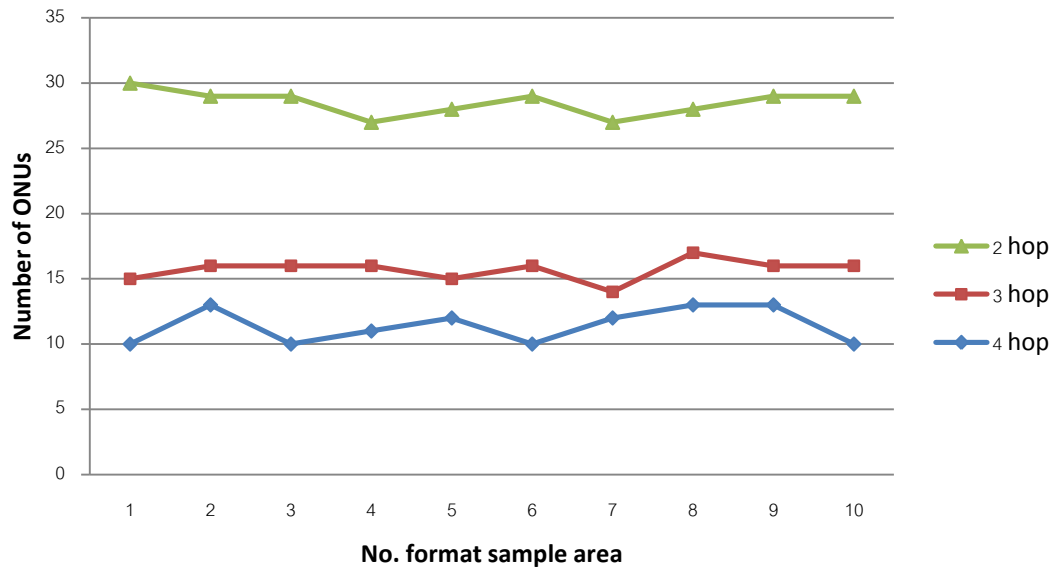
จากรูปที่ 4.7 แสดงตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 3 hop ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ ซึ่งใช้จำนวน ONU เพิ่มจากเดิม 1 ตัว และมีอัตรารับ-ส่งสัญญาณที่น้อยที่สุดเท่ากับ 30 Mb/s ที่ตำแหน่งดังรูปที่ 4.7 (จุดวงกลมสีน้ำเงินใหญ่) ซึ่งเมื่อเทียบกับกรณี 2 hop นั้นต่างกันถึง 5 เท่า ถือว่าลดลงมากอย่างเห็นได้ชัด



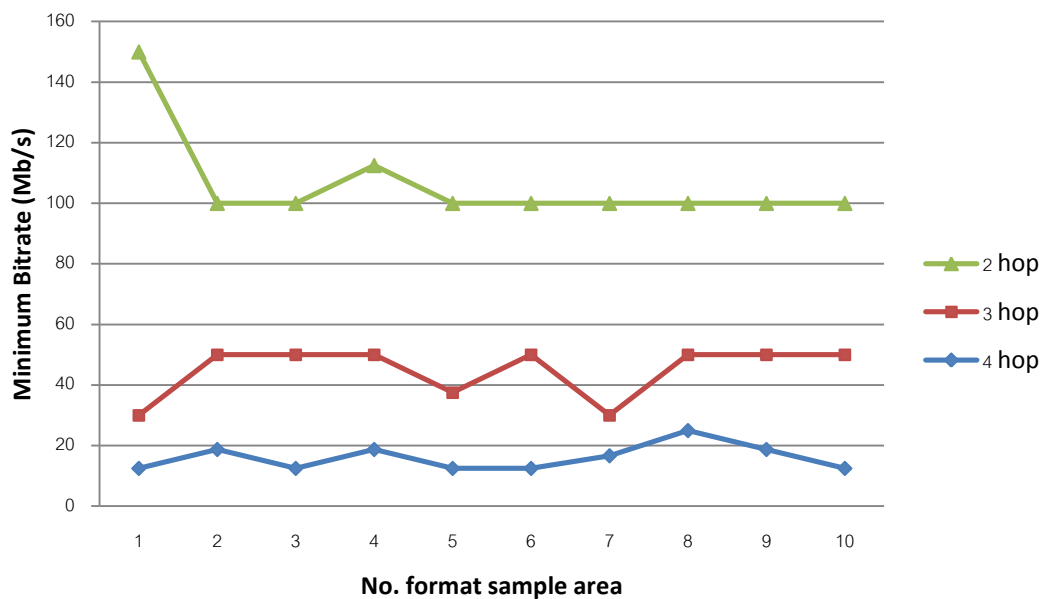
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU

ภายใน 4 hop ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ

ในรูปที่ 4.8 นั้นแสดงตำแหน่งการวางของ ONU และแสดงการเชื่อมต่อระหว่างกันของผู้ใช้บริการ ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาการรับ-ส่งข้อมูลของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ ซึ่งผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 4 hop พื้นที่จำลองนี้ใช้จำนวน ONU ไปทั้งหมด 11 ตัว ซึ่งเพิ่มขึ้น 2 ตัวเช่นเดียวกันและมีอัตราการรับ-ส่งสัญญาณที่น้อยที่สุดเท่ากับ 12.5 Mb/s ที่ตำแหน่งดังรูปที่ 4.8 (จุดวงกลมสีน้ำเงินใหญ่)ซึ่งมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ทั้งนั้นอัตราข้อมูลที่ต่ำที่สุดนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของผู้ใช้บริการรายอื่นด้วย ถ้า ONU ตัวใดมีผู้ใช้บริการเชื่อมต่อด้วยเยอะก็จะทำให้อัตราการรับ-ส่งข้อมูลนั้นน้อยลงไปด้วย ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำยิ่งขึ้น เราจึงสุ่มพื้นที่จำลองเพิ่มขึ้นและวิเคราะห์ผลของการจำลองอัลกอริทึม รวมทั้งสิ้น 10 พื้นที่ จะได้ผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน ONU ที่ใช้ในแต่ละพื้นที่จำลอง ในกรณีผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2, 3 และ 4 hop ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรับ-ส่งข้อมูลที่ใช้ในแต่ละพื้นที่จำลอง ในกรณีผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2, 3 และ 4 hop ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาการส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ

จากรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างจำนวน ONU และอัตราการรับ - ส่งข้อมูลระหว่าง 2 hop 3hop และ 4 hop โดยแกน X คืออัตรารับส่งข้อมูลของ

ผู้ใช้บริการในพื้นที่ต่างๆกัน และแกน Y คือหมายเลขของพื้นที่ที่ส่งขึ้นมา ในขณะที่ 2hop นั้นใช้จำนวน ONU สูงมากเมื่อเทียบกับ 3 hop และ 4hop ที่ใช้จำนวน ONU ในระดับไม่ต่างกันมากนัก มากไปกว่านั้นการออกแบบตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2 hop นั้นมีอัตราการรับ-ส่งข้อมูลที่น้อยที่สุด มากกว่าใน 3hop ถึงประมาณ 2เท่า และ 3-4เท่าใน 4 hop มาก ซึ่งค่าเฉลี่ยนั้นจะสรุปได้ดังตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของจำนวน ONU ของผู้ใช้บริการแบบสุ่มจำนวน 10 แบบ ที่ใช้ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ

จำนวน hop ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU	2 hop	3 hop	4 hop
ค่าเฉลี่ยของจำนวน ONU ที่ใช้	28.5	15.7	11.4

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของของอัตราการรับส่งข้อมูล (Mb/s) ที่น้อยที่สุดของผู้ใช้บริการแบบสุ่มจำนวน 10 แบบ ในกรณีที่จำกัดระยะเวลาส่งสัญญาณของ ONU และ AP ของผู้ใช้บริการ

จำนวน hop ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU	2 hop	3 hop	4 hop
ค่าเฉลี่ยของอัตราการรับส่งข้อมูลที่น้อยที่สุดใน 10 รูปแบบพื้นที่จำลอง (Mb/s)	106.25	44.75	16.04

จากตารางที่ 4.2 แสดงจำนวน ONU ที่ใช้ในการออกแบบตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2 hop นั้นมากกว่า 3 hop และ 4 hop ถึง 44.91% และ 60% ตามลำดับ ในตารางที่ 4.3 แสดงอัตราข้อมูลต่ำที่สุดเฉลี่ยของทั้ง 10 พื้นที่ในกรณีที่ผู้ใช้บริการเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 2 3 และ 4 hop ซึ่งอัตรารับ-ส่งข้อมูลต่ำที่สุดใน กรณี 2hop นั้นจะมีอัตราข้อมูลที่สูงกว่า 3 hop และ 4 hop อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ในเรื่องของตำแหน่งของผู้ใช้บริการนั้นมีผลต่อค่าบิตเรตด้วยเช่นกัน ถ้าในสถานที่ใดที่มีผู้ใช้บริการกระจุกตัวอยู่มากนั้น อัตราการรับ-ส่งข้อมูล จะมีค่าน้อยลง เมื่อนำผลจากการทดสอบอัลกอริทึมมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้ใน บทที่ 3 นั้นได้จะผลดังนี้

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบจำนวน ONU เฉลี่ยใน 10 พื้นที่จำลอง ที่ใช้ในกรณีไม่มีข้อจำกัดของ  
ระยะรับส่งข้อมูลและกรณีที่มีข้อจำกัดของระยะรับส่งข้อมูล

จำนวน hop ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU	2 hop	3 hop	4 hop
จำนวน ONU ที่ใช้ในกรณีไม่มีข้อจำกัดของระยะรับส่งข้อมูล	27	15.1	11.3
จำนวน ONU ที่ใช้ในกรณีที่มีข้อจำกัดของระยะรับส่งข้อมูล	28.5	15.7	11.4

## บทที่ 5

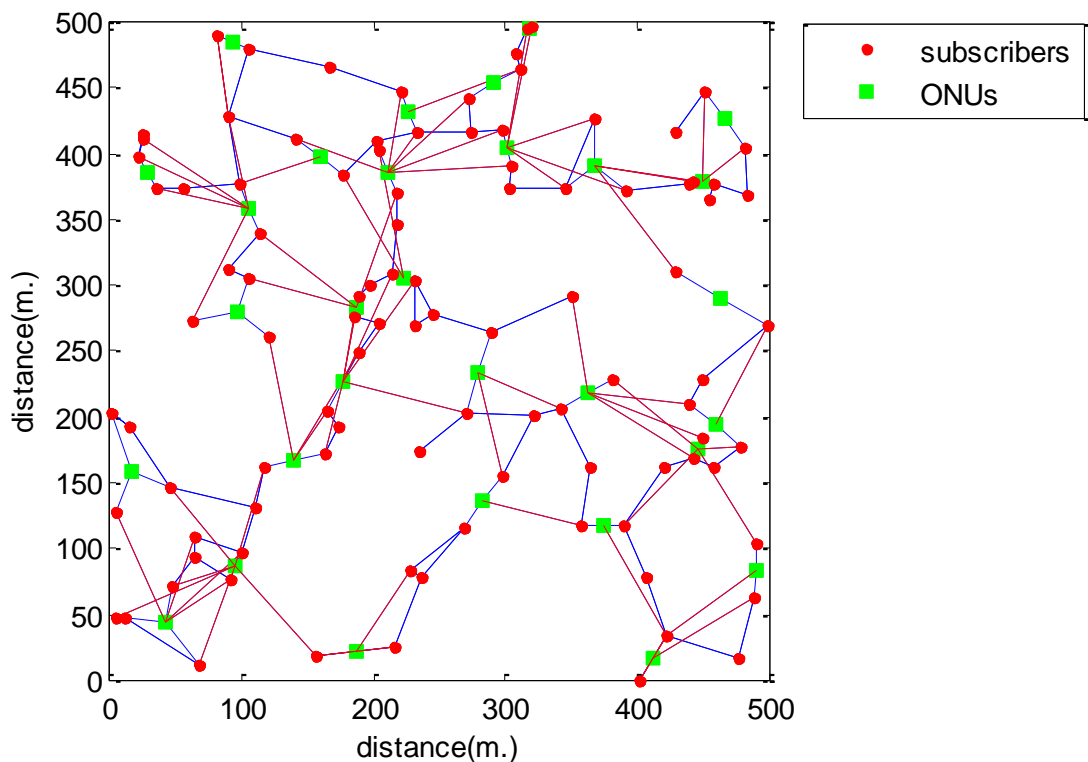
### การทดสอบอัลกอริทึมซึ่งมีเงื่อนไขเรื่องเส้นทางป้องกัน

#### 5.1 การออกแบบเส้นทางการป้องกัน

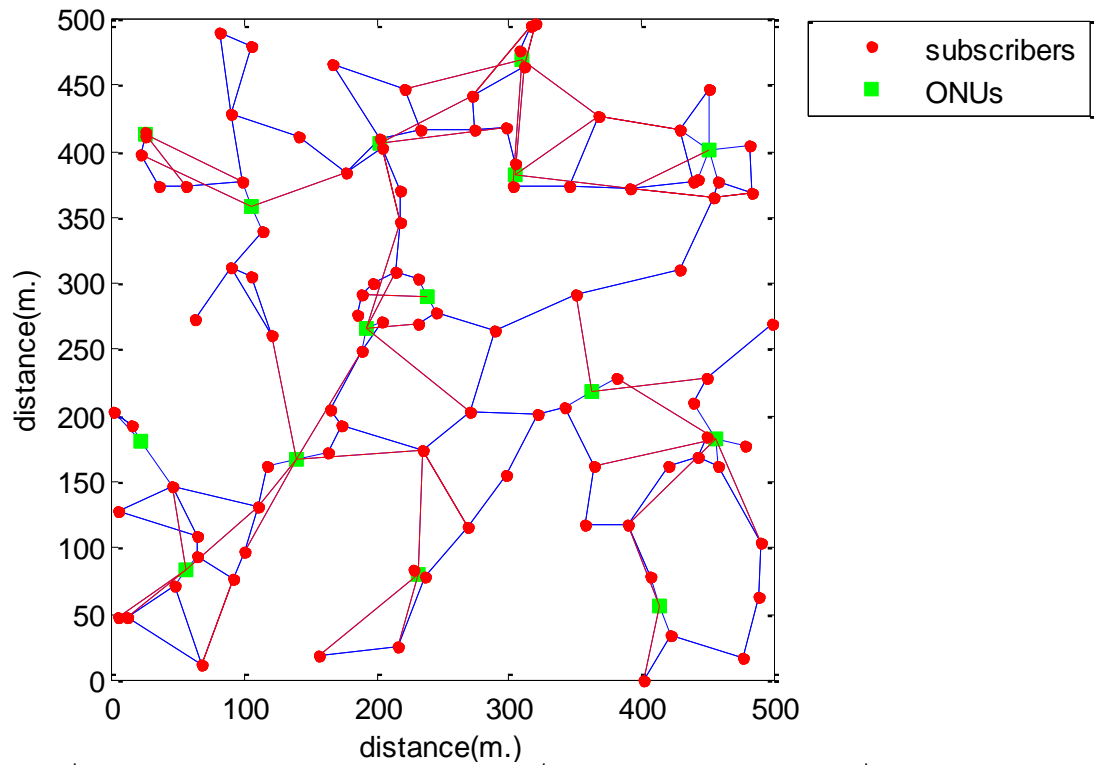
เส้นทางป้องกันคือ เส้นทางสำรองที่จะใช้เมื่อ ONU หรือ ผู้ใช้บริการบางรายปิดบริการไป หรือไม่สามารถใช้งานได้ชั่วคราว ผู้ใช้บริการท่านอื่นที่ใช้เส้นทางซึ่งเกี่ยวข้องกับผู้ใช้บริการหรือ ONU ตัวนั้นที่ปิดบริการไปสามารถใช้บริการต่อไปได้ โดยใช้เส้นทางอื่นในการรับ-ส่งข้อมูลแทน

#### 5.2 การทดสอบอัลกอริทึม

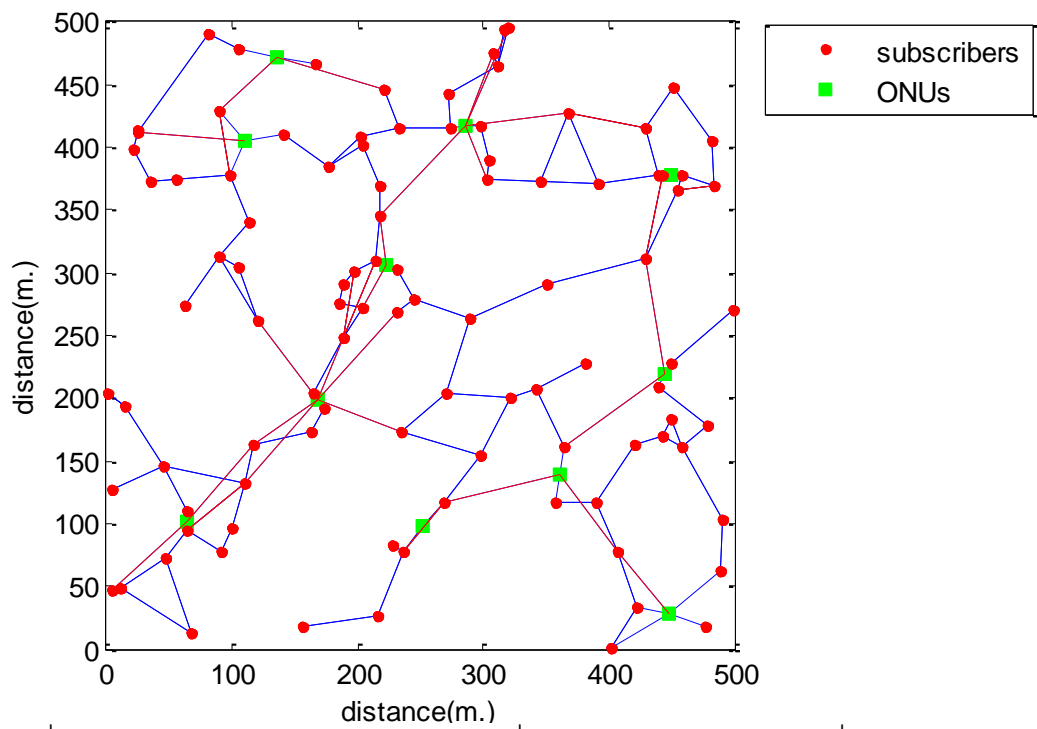
โดยวิธีการที่ใช้นั้นคือ สมมติให้ผู้ใช้บริการหรือ ONU ตัวนั้น หายไปจากระบบ และหาเส้นทางที่จะใช้ในการรับ-ส่งข้อมูลใหม่ ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ 5.1 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีนี้ที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2 hop ในกรณีที่มีเส้นทางป้องกัน



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 3 hop ในกรณีที่มีเส้นทางป้องกัน



รูปที่ 5.3 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 4 hop ในกรณีที่มีเส้นทางป้องกัน

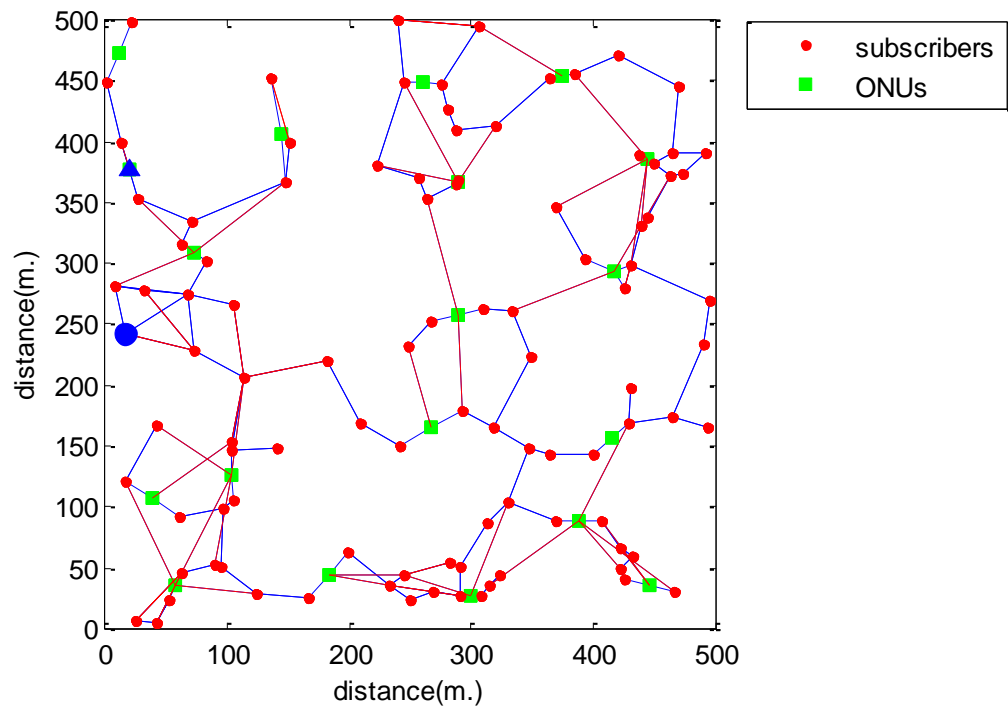
โดยจากรูปที่ 5.1 รูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 เส้นสีแดงที่เพิ่มมานั้นคือเส้นที่เพิ่มขึ้นมาจากกรณีปกติเพื่อใช้เป็นเส้นทางป้องกัน เมื่อเกิดปัญหาขัดข้องที่ ONU หรือ ผู้ใช้บริการ เส้นทางสำรองที่เกิดขึ้นเมื่อมีเหตุขัดข้องที่ ONU หรือผู้ให้บริการรายใดรายหนึ่งขึ้น จะมีจำนวน hop ไม่เกินจำนวน hop ที่กำหนดไว้แต่แรกเช่น ผู้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ภายใน 4hop เส้นทางป้องกันนั้นก็เช่นเดียวกันคือสามารถเชื่อมต่อสู่ ONU ได้ภายใน 4hop จากผลการทดลองเมื่อเราเพิ่มจำนวน hop ของของเส้นทางป้องกันมากขึ้นเท่าไรนั้น จำนวนเส้นสีแดงหรือเส้นทางที่เพิ่มเติมจากเดิมจะน้อยลง จนมีลักษณะการเชื่อมต่อเท่ากับแบบเดิม ซึ่งหมายความว่าลักษณะการต่อแบบเดิมนั้นมีเส้นทางป้องกันอยู่แล้วเพียงแต่ใช้จำนวน hop เยอะทำให้บิตเรทต่ำลงอย่างมากและยิ่งในกรณีที่ ONU หายไปเพียงหนึ่งตัว นั้นเท่ากับว่าระบบสูญเสียตัวจ่ายอัตราข้อมูลไปถึง 900 mb/s ซึ่งอัตราข้อมูลหลังจากที่เกิดเหตุขัดข้องกับระบบนั้นจะสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปผลที่ได้จากการทดสอบอัลกอริทึม

จำนวน hop ที่ใช้ในการเข้าถึง ONU	2 hop	3 hop	4 hop
อุปกรณ์ที่ขัดข้อง	ONU # 21-28	ONU # 13	ONU # 4
อัตรารับส่งข้อมูลของผู้ใช้บริการที่น้อยที่สุด (mb/s)	9.375	2.57	1.04
จำนวนผู้ใช้บริการที่ได้รับอัตราข้อมูลน้อยที่สุด (หลังคาเรือน)	23	4	3

จากผลที่ได้นั้นจะเห็นได้ว่าอัตราการรับส่งข้อมูลลดลงอย่างเห็นได้ชัด ถึงสิบกว่าเท่าด้วยกัน ล้วนเป็นผลมาจากการขัดข้องที่ ONU ทั้งสิ้น เพราะการขัดข้องที่ ONU เปรียบได้กับการที่ตัวส่งอัตรารับส่งข้อมูลหายไป ทำให้ผู้ใช้บริการที่อยู่รอบๆ ONU ตัวนั้นจำเป็นต้องอาศัยการรับส่งข้อมูลจาก ONU ตัวอื่น ที่ให้บริเวณนั้นมีอัตรารับส่งข้อมูลที่ต่ำมาก แต่ในส่วนของบริเวณที่ไม่เกี่ยวข้องกันนั้น อัตรารับส่งข้อมูลจะยังมีค่าสูงเหมือนเดิม

จากในตัวอย่างแผนที่จำลองนั้น ในกรณีเพิ่มเส้นทาง protection นั้น ไม่ได้มีการเพิ่มจำนวน ONU ดังจะเห็นว่าจำนวน ONU นั้นมีจำนวนเท่าเดิม เพื่อให้ได้ผลที่ครอบคลุมมากขึ้นนั้น เราจะสุ่มตัวอย่างแผนที่จำลองขึ้นมาเพื่อให้เกิดกรณีที่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวน ONU ขึ้นมา จะได้ผลดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU

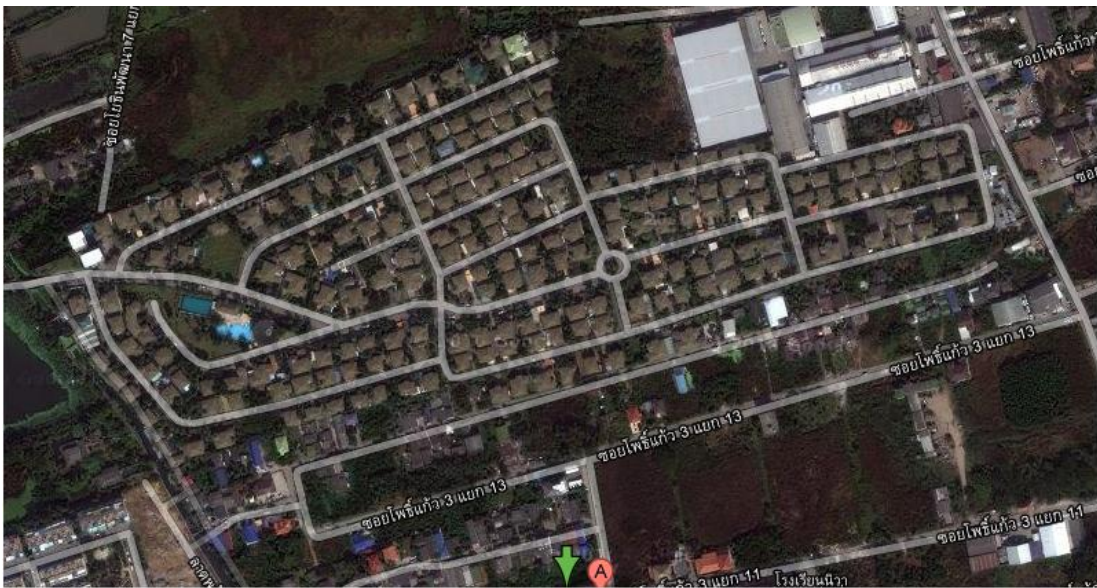
ภายใน 3 hop ในกรณีที่มีเส้นทางป้องกันและมีการเพิ่มจำนวน ONU

จากรูปที่ 5.4 นั้นจะเป็นกรณีผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 3 hop ซึ่งมีจำนวน ONU เพิ่มขึ้นมา 1 ตัว ในตำแหน่งสามเหลี่ยมในมุมซ้ายบน ผลจากการเพิ่มขึ้นของ ONU ทำให้มีอัตราการรับส่งข้อมูลในตำแหน่งที่น้อยที่สุดในกรณีปกติเพิ่มขึ้นจาก 45 Mb/s เป็น 56.25 Mb/s ในตำแหน่งวงกลมใหญ่ ในบริเวณใกล้เคียงกับ ONU ตัวใหม่ที่เพิ่มเข้ามา และมีอัตราการรับส่งข้อมูลในกรณี protection นั้นเท่ากับ 3.947 Mb/s ซึ่งถ้าเทียบกับในผลของรูปที่ 5.2 นั้น จะมีอัตราการรับส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นจาก 2.57 Mb/s เป็น 3.947 Mb/s ทั้งหมดนั้นเป็นผลมาจากการที่เพิ่มจำนวน ONU เข้าไปอีก 1 ตัวจึงทำให้อัตราการรับส่งข้อมูลโดยรวมนั้นเพิ่มขึ้น



### 5.3 ทดสอบอัลกอริทึมกับแผนที่จริง

พื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบอัลกอริทึมนั้นคือ พื้นที่บริเวณ หมู่บ้านลาดพร้าว ซอยโพธิ์แก้ว จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยลักษณะพื้นที่แสดงดังรูปที่ 5.5 มีขนาดพื้นที่ประมาณ 500 x 800 เมตร มีจำนวนผู้ใช้บริการ 214 หลังคาเรือน กำหนดระยะให้บริการของ ONU เท่ากับ 100 เมตร และระยะให้บริการของผู้ใช้บริการเท่ากับ 70 เมตร



รูปที่ 5.5 แผนที่จริงที่หมู่บ้านลาดพร้าว ซอยโพธิ์แก้ว กทม.

จากรูปที่ 5.5 นำมาจาก google map ซึ่งมีพิกัดเป็นค่า ละติจูดและลองจิจูด ดังนั้นก่อนจะนำตำแหน่งของผู้ใช้บริการมาใช้ในการทดสอบนั้น เราจะต้องมีสูตรในการแปลงจากค่าพิกัด ละติจูดและลองจิจูดมาเป็นพิกัด X Y ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน เราจะใช้สูตรการคำนวณ Haversine formula [31] ซึ่งเป็นสมการในการหาระยะห่างระหว่าง GPS สองตัว โดยใช้ละติจูดและลองจิจูดมาคำนวณหาระยะห่าง จากจุดที่เราได้กำหนดไว้ว่าต้องการให้เป็นแกน X และแกน Y จากสมการ(3.4)

$$d = \arccos(\sin(lat_1) \cdot \sin(lat_2) + \cos(lat_1) \cdot \cos(lat_2) \cdot \cos(long_2 - long_1)) \times R \quad (3.4)$$

โดย  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างพิกัด 2 ตำแหน่ง

$(lat_1, long_1)$  คือ ตำแหน่งพิกัดของจุดแรกในพิกัด ละติจูดและลองจิจูด

$(lat_2, long_2)$  คือ ตำแหน่งพิกัดของจุดที่สองในพิกัด ละติจูดและลองจิจูด

$R$  คือรัศมีเฉลี่ยของโลก ซึ่งมีค่าประมาณ 6371 กิโลเมตร

และค่า  $(lat_1, long_1)$   $(lat_2, long_2)$  ต้องนำมาแปลงให้เป็นหน่วยของ radian ก่อนจะนำมาใช้ใน สมการ(3.4)



รูปที่ 5.6 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 2hop เมื่อนำไปประยุกต์กับแผนที่จริง



รูปที่ 5.7 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ภายใน 3 hop เมื่อนำไปประยุกต์กับแผนที่จริง



รูปที่ 5.8 ตำแหน่งการวางของ ONU ในกรณีที่ใช้บริการทุกรายสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU

ภายใน 4 hop เมื่อนำไปประยุกต์กับแผนที่จริง

ผลการทดสอบอัลกอริทึมกับแผนที่พื้นที่จริงนั้นทำได้จำนวนของ ONU ดัง

ตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 จำนวน ONU ที่ใช้ในการทดสอบ ณ พื้นที่หมู่บ้านลาดพร้าว

จำนวน hop ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU	2 hop	3 hop	4 hop
ค่าเฉลี่ยของจำนวน ONU ที่ใช้	61	32	26

ตารางที่ 5.3 อัตราข้อมูลที่ได้ในการทดสอบ ณ พื้นที่หมู่บ้านลาดพร้าว

จำนวน hop ที่ใช้ในการเข้าถึง ONU	2 hop	3 hop	4 hop
อัตรารับส่งข้อมูลของผู้ใช้บริการที่น้อยที่สุดในกรณีปกติ (mb/s)	100	33.33	18.75
อุปกรณ์ที่ขัดข้อง	ONU # 41- 61	ONU # 21- 32	ONU # 24- 26
อัตรารับส่งข้อมูลของผู้ใช้บริการที่น้อยที่สุด (mb/s)	8.65	2.27	1.04
จำนวนผู้ใช้บริการที่ได้รับอัตราข้อมูลน้อยที่สุด	21	12	5



## บทที่ 6

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเรื่องการออกแบบการวางตำแหน่งของ ONU ในระบบการให้บริการ WOBAN โดยมีการเชื่อมต่อระหว่างกันแบบ multi hop ในอัลกอริทึมนี้เราสามารถเลือกจำนวน hop ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเข้าสู่ ONU ได้ และประมาณอัตรารับส่งข้อมูลด้วย wireless propagation รวมทั้งทดสอบอัลกอริทึมด้วยแผนที่จริงในบริเวณพื้นที่หมู่บ้านลาดพร้าว ซอยโพธิ์แก้ว จังหวัดกรุงเทพมหานคร

เราจะออกแบบอัลกอริทึมขึ้นมาเพื่อหาตำแหน่งของการวาง ONU ที่เหมาะสมที่สุดใน การให้บริการ WOBAN โดยผู้ใช้บริการจะเชื่อมต่อกันด้วย wireless และเส้นทางทุกเส้นทางจะเป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด ผลจากการศึกษาพบว่าการเชื่อมต่อกันระหว่างผู้ใช้บริการ ภายใน 2hop นั้นใช้จำนวน ONU ไปทั้งหมด 29 ตัว 3 hop ใช้ 14 ตัว 4 hop ใช้ 9 ตัว และ 5hop ใช้ 8 ตัว ทำให้เราทราบได้ว่าเมื่อจำนวน hop นั้นมากขึ้นจำนวน ONU ที่ใช้จะลดน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ผลต่างของจำนวน ONU ระหว่างกรณี 4 hop และ 5 hop นั้นมีน้อยมาก ทำให้เราตัดสินใจคำนวณเพียง 2 3 และ 4hop เท่านั้น หลังจากนั้นเราจะเพิ่มข้อกำหนดลงในอัลกอริทึมเพิ่มขึ้นนั่นคือเรื่องของระยะทางในการรับ-ส่งข้อมูล โดยเราประมาณอัตรารับ - ส่งข้อมูลโดยใช้ wireless propagation แบบจำลองที่ใช้มีชื่อว่า COST-231 Walfisch-Ikegami เพื่อหาระยะรับส่งข้อมูลของทั้ง ONU และผู้ใช้บริการ ซึ่งได้ผลว่า ONU นั้นมีระยะรับส่งข้อมูลที่ 100 m. และ ผู้ใช้บริการนั้นมีระยะรับส่งข้อมูลที่ 70 m. เมื่อนำข้อกำหนดนี้มาทดสอบอัลกอริทึมอีกครั้งโดยใช้แบบจำลองเดิม จะได้ผลว่าจำนวน ONU ที่ใช้นั้นเพิ่มขึ้นจากการทดสอบครั้งแรก โดยกรณีเชื่อมต่อภายใน 2 hop นั้นใช้จำนวน ONU ไปทั้งหมด 30 ตัว กรณี 3 hop นั้นใช้จำนวน ONU ทั้งหมด 15 ตัว และกรณี 4 hop ใช้จำนวน ONU ทั้งหมด 10 ตัว แต่เพื่อผลการทดลองที่แม่นยำมากขึ้น เราจะสุ่มพื้นที่บริการขึ้นมาอีก 9 พื้นที่รวมกันเป็น 10 พื้นที่เพื่อคำนวณจำนวนของ ONU ให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยได้ผลมาว่า ในกรณี 2 hop ใช้ ONU เฉลี่ยเป็นจำนวน 28.5 ตัว กรณี 3hop ใช้จำนวน ONU เฉลี่ยเท่ากับ 15.7 ตัวและกรณี 4 hop ใช้จำนวน ONU เฉลี่ย 11.4 ตัว การประมาณอัตรารับส่งข้อมูลของผู้ใช้บริการนั้น เราจะประมาณข้อมูลในผู้ใช้บริการที่มีอัตราข้อมูลที่ต่ำที่สุดในพื้นที่พร้อมแสดงตำแหน่ง จะได้ผลว่า ในกรณี 2 hop ผู้ใช้บริการที่ได้รับอัตรารับส่งข้อมูลน้อยที่สุด มีค่าเฉลี่ยในทั้ง 10 พื้นที่เป็น 106.25 mb/s ในกรณี 3 hop เป็น 44.75mb/s และสุดท้ายกรณี 4hop

เป็น 16.04 mb/s หลังจากนั้น เราจึงเพิ่มข้อกำหนดในอัลกอริทึมเพิ่มในเรื่องของเส้นทางป้องกันในกรณีที่มีเหตุขัดข้องใน ONU หรือผู้ใช้บริการรายใดรายหนึ่งระบบก็ยังสามารถใช้งานได้ต่อไป ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงเส้นทางที่เพิ่มขึ้นมาจากเดิม แต่จะมีอัตราการรับส่งข้อมูลที่ลดลงจากเดิมถึงสิบเท่า ซึ่งล้วนแล้วเป็นผลมาจากการขัดข้องที่ตัว ONU ซึ่งอัตรารับส่งข้อมูลน้อยที่สุด มีค่าเฉลี่ยในทั้ง 10 พื้นที่เป็น 1.04 mb/s , 2.57 mb/s และ 9.37 mb/s ในกรณี 4 hop, 3 hop และ 2 hop ตามลำดับ

เมื่อออกแบบอัลกอริทึมครบตามจุดประสงค์ที่ได้วางไว้แล้ว จากนั้นเรานำอัลกอริทึมที่ได้มาทดสอบกับแผนที่จริง ซึ่งบริเวณที่นำมาทดสอบนั้นคือ หมู่บ้านลาดพร้าว ในซอยโพธิ์แก้ว จังหวัดกรุงเทพมหานคร ใช้การทดสอบ 3 แบบด้วยกันคือในกรณี 2 hop , 3 hop และ 4hop และใช้จำนวน ONU ไปทั้งหมด 61, 32 และ 26 ตัวตามลำดับ

## 6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ศึกษาเรื่องเส้นทางป้องกันเพิ่มมากกว่า 1 เส้นทาง หรือเมื่อเกิดกรณีขัดข้องของ ONU มากกว่า 1 ราย รวมถึงทดลองใช้เทคโนโลยี WiMax แทน WiFi เพื่อให้อัตรารับส่งข้อมูลรวมถึงระยะเวลาให้บริการนั้นมากขึ้นด้วย และจากการศึกษาจะพบว่าถ้าพื้นที่ในบริเวณที่เป็นหมู่บ้านที่มีผู้ใช้บริการอยู่ติดกันนั้น ระยะเวลาให้บริการจะไม่ค่อยมีผลเท่าไรนัก ดังนั้นเรื่องการออกแบบลักษณะของ ONU ที่ใช้ในการส่งให้มีการส่งที่ดีขึ้นเพราะการรับข้อมูลทางด้าน optical part นั้นมีมากอยู่แล้ว และถ้าเราจะสามารถนำอัตรารับ-ส่งข้อมูลในทางด้าน optical part มาใช้ให้ได้มากที่สุด ระบบ WOBAN จะเป็นอีกทางเลือกให้บริการหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

## รายการอ้างอิง

- [1] FTTH Business Guide/Why Fibre? [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [http://wiki.ftthcouncil.eu/index.php/FTTH\\_Business\\_Guide/Why\\_Fibre%3F](http://wiki.ftthcouncil.eu/index.php/FTTH_Business_Guide/Why_Fibre%3F)
- [2] A Farpoint Group. (2009, june) Wireline vs. Wireless: Exploring Total Cost of Ownership in Outdoor Applications. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.scribd.com/doc/18625764/Wireline-vs-Wireless>
- [3] Datatel. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.datatel.co.th/solutions/wireless.php>
- [4] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://th.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11](http://th.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11)
- [5] The free encyclopedia Wikipedia. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>
- [6] Worldpress. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://engineeringseminartopics.wordpress.com/2011/08/31/hybrid-woban-hybrid-wireless-optical-broadband-access-network/>
- [7] Hong-Hsu, Y. Sudhir, D. Suman, S. and Biswanath, M. A Mixed Integer Programming Model for Optimum Placement of Base Stations and Optical Network Units in a Hybrid Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN) IEEE Communications Society subject matter experts for publication in the WCNC, (2007) : 3910-3914
- [8] Hong-Hsu, Y. Sudhir, D. Suman, S. Hybrid Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN): Network Planning and Setup IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, 26 (12-21 August 2008)
- [9] Hartigan, J. A. Clustering Algorithms Journal of the Royal Statistical Society (1975)
- [10] Boots, B. Sugihara, K. Okabe, Chiu A. Spatial Tessellations–Concept and Applications of Voronoi Diagrams (2000)
- [11] Zuyev, S. A. Molchanov, I. S. Variational Analysis of Functionals of Poisson Processes," Mathematics of Operations Research 25 (2000) : 485–508
- [12] Lu Ruan, T. F. Design of Survivable Hybrid Wireless-Optical Broadband-Access Network IEEE Communications Society subject matter experts for publication in the IEEE ICC (2009)

- [13] Pulak, C. Building a Green Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN) JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY 28 (16 August 15 2010)
- [14] Abu, R. CaDAR: An Efficient Routing Algorithm for a Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN) J. OPT. COMMUN. NETW. 1 (5 October 2009)
- [15] Vishwanath, R. Suman, S. Abu, R. Hybrid Wireless-Optical Broadband Access Network (WOBAN): Capacity Enhancement for Wireless Access. Advanced Networks and Telecommunication Systems 2007 First International Symposium (2007)
- [16] อธิคม ฤกษ์บุศกร FTTH – Fiber To The Home [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [www.photonicsthai.org/document/FTTH.pdf](http://www.photonicsthai.org/document/FTTH.pdf)
- [17] Masahio. A.Trends in Optical Access Network Technology Supporting FTTH. [ออนไลน์].แหล่งที่มา: <https://www.nttreview.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201005sf5.html>
- [18] ธลายุทธ สิงห์พันธุ์ และคร.รศ. เศรษฐพงษ์ มะลิสุวรรณ ElectronicS SKT. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://en.skt.ac.th/en/index.php?option=com\\_kunena&Itemid=2&func=view&catid=7&id=146](http://en.skt.ac.th/en/index.php?option=com_kunena&Itemid=2&func=view&catid=7&id=146)
- [19] Broadbandgirl. adslthailand. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.adslthailand.com/board/showthread.php?t=31012&page=1>
- [20] CAT บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.west.cat.net.th/westcat/index.php?option=com\\_content&task=view&id=131](http://www.west.cat.net.th/westcat/index.php?option=com_content&task=view&id=131)
- [21] Chaiyapong, K. ระบบเครือข่าย Wireless LAN คืออะไร? [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.kmitl.ac.th/~s9010184/wireless1.htm>
- [22] สีหนาท ศิวเสน ความรู้ตอนที่ 12 - มาตรฐาน IEEE 802.11 คืออะไร [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.esanpt1.go.th/download/KL/KL-12.pdf>
- [23] มารู้จัก IEEE 802.11 Wireless LAN (WLAN). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://tsumis.tsu.ac.th/tsukm/UploadFolder%5C%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%A1%E0%B8%B2>

%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B9%89%E0%B8%88%E0%B8%B1%E0%B8  
%81%20%20IEEE%20802.11%20%20Wireless%20LAN.pdf

- [24] Tycom [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.tycom.co.uk/professional-services/infrastructure-solutions/>
- [25] Knowledge Zone. By Sysnet Center [Online] <http://www.sysnetcenter.com/board/index.php?topic=26.0>
- [26] สำนักงานกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติและศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ รายงานการศึกษาแนวทางการจัดสรรคลื่นความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย WiMAX ในประเทศไทย (2549, September)
- [27] Suman, S. Dixit, S. Mukherjee, B. Optimum placement of multiple optical network units (ONUs) in optical-wireless hybrid access networks Optical Fiber Commun. Conf. (OFC) (2006) CA
- [28] Dixit, S. Mukherjee, B. Suman, S. Hybrid wireless-optical broadband access network (WOBAN): a review of relevant challenges IEEE/OSA J. Lightwave Technol. (JLT), special issue on convergence of optical wireless access networks 25 (November 2007) no. 11 :3329-3340
- [29] Gelatt, C. Vecchi, M. Kirkpatrick, S. Optimization by simulated annealing Science (May 1983) vol. 220 no. 4598 : 671-680,
- [30] Walfisch-Ikegami Propagation Model. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.cse.hcmut.edu.vn/~ltquan/Documents\\_Softwares/CDMA/Walfisch-Ikegami.htm](http://www.cse.hcmut.edu.vn/~ltquan/Documents_Softwares/CDMA/Walfisch-Ikegami.htm)
- [31] [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.ig.utexas.edu/outreach/googleearth/latlong.html>



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ปณยา เพ็งบุญ เกิดเมื่อวันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ 2531 ณ โรงพยาบาลราชวิถี จังหวัด กรุงเทพมหานคร การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการทั้งหมด 2 ฉบับ

- บทความวิชาการในงานประชุม The seventh Nation Conference on Optics and Application (NCOA-7) จัดขึ้น ณ หอประชุม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในวันที่ 16 มีนาคม 2555 ในชื่อบทความเรื่อง การออกแบบการส่งไร้สายแบบ Multi-hop สำหรับโครงข่ายเข้าถึงสื่อสารไร้สายร่วมกับสื่อสารผ่านเส้นใยแสง
- บทความวิชาการในงานประชุม 2012 21st Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC) จัดขึ้น ณ โรงแรม The Ambassador Hotel Kaohsiung เมือง Kaohsiung ประเทศ ไต้หวัน ในวันที่ 19-21 เมษายน 2555 ในชื่อบทความเรื่อง An Efficient Algorithm for Designing Multi-hop Wireless Connections for Wireless-Optical Broadband Access Network