

อัลกอริทึมเพื่อสร้างสมดุโลหลดของกราฟิกของหน่วยโครงข่ายแสง  
ในโครงข่ายเข้าถึงสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายร่วมกับสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

นางสาวธัญชา วิริยะนิธิกรณ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ALGORITHM FOR BALANCING THE TRAFFIC LOAD OF OPTICAL NETWORK UNIT  
IN WIRELESS-OPTICAL BROADBAND ACCESS NETWORK

Miss Thanutcha Wiriyanitikorn



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 2015  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อัลกอริทึมเพื่อสร้างสมดุลโหนดของกราฟฟิคของหน่วย  
โครงข่ายแสงในโครงข่ายเข้าถึงสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สาย  
ร่วมกับสื่อสารผ่านเส้นใยแสง

โดย

นางสาวธันชชา วิริยะนิธิกรณ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสีหิทธิกุลกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

ธัญชา วิริยะนิธิกรณ : อัลกอริทึมเพื่อสร้างสมดุลโหลดของทราฟฟิกของหน่วยโครงข่ายแสงในโครงข่ายเข้าถึงสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายร่วมกับสื่อสารผ่านเส้นใยแสง (ALGORITHM FOR BALANCING THE TRAFFIC LOAD OF OPTICAL NETWORK UNIT IN WIRELESS-OPTICAL BROADBAND ACCESS NETWORK) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
 หลัก: ผศ. ดร.พสุ แก้วปลั่ง, 83 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนออัลกอริทึมเพื่อสร้างสมดุลโหลดของทราฟฟิกของหน่วยโครงข่ายแสงในโครงข่ายเข้าถึงสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายร่วมกับสื่อสารผ่านเส้นใยแสง ซึ่งมีวัตถุประสงค์ คือนำเสนออัลกอริทึมที่สามารถหาเส้นทางการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ access point ของบ้านของผู้ใช้บริการแต่ละหลังไปยัง gateway/ONU ในส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการบนโครงข่ายออร์แกน หลังจากนั้นก็วิเคราะห์ผลจากการทดสอบอัลกอริทึมบนพื้นที่จำลอง พบว่าอัลกอริทึมสามารถเพิ่มความเร็วในการส่งข้อมูลต่อผู้ใช้งานของผู้ใช้บริการที่ได้รับความเร็วในการส่งข้อมูลที่น้อยที่สุดบนโครงข่ายได้ถึง 36.3%

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ คือ มีจำลองอัลกอริทึมลงบนพื้นที่จำลองเพื่อทดสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมโดยใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์เท่านั้น แต่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์และทดสอบลงในพื้นที่ดังกล่าวจริง กำหนดอัตราการรับส่งข้อมูลในส่วนของเส้นใยแสงโดยใช้อุปกรณ์ตามมาตรฐาน 10GEPON คือ อัตราการรับส่งข้อมูลสูงถึง 10 Gbps ภายใต้รัศมีการให้บริการ 20 km กำหนดอัตราการรับส่งข้อมูลส่วนของโครงข่ายไร้สายใช้อุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11n คือ อัตราการรับส่งข้อมูลสูงถึง 600 Mbps ภายใต้รัศมีการให้บริการ 70 m ในโครงสร้างปิด และ 250 m ในพื้นที่โล่ง และจำนวนบ้านผู้ใช้บริการบนพื้นที่ที่นำมาทดสอบอัลกอริทึมไม่เกิน 300 หลัง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

# # 5570221721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: WOBAN / WMN / FTTH / WLAN / TRAFFIC LOAD BALANCING

THANUTCHA WIRIYANITIKORN: ALGORITHM FOR BALANCING THE TRAFFIC LOAD OF OPTICAL NETWORK UNIT IN WIRELESS-OPTICAL BROADBAND ACCESS NETWORK. ADVISOR: ASST. PROF. PASU KAEWPLUNG, 83 pp.

This thesis proposed an algorithm for balancing the traffic load of ONU in WOBAN. The objectives are to present an algorithm for balancing the traffic load of ONU in the frontend part of WOBAN which is considered only in the upstream direction; from AP in subscriber's house to gateway/ONU. After that we analyze the result from validated algorithm on simulation area, we find that the algorithm can increase the data rate of minimum bit rate up of networks up to 36.3 %.

The scopes of this thesis are that the validation of the proposed algorithm will be performed on a simulation area but not be implemented in a real equipment. The data rates in WOBAN are based on the 10GEPON standard for the optical part, and based on IEEE 802.11n for equipment in the wireless part. The number of subscribers in WOBAN network is limited to be less than 300.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Electrical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Electrical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พสุ แก้วปลั่ง อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้พื้นฐาน ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่การทำงานวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม

ขอขอบพระคุณความกรุณาอย่างสูงจาก ดร.พิสิฐ วณิชชานันท์ อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้คำปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

นอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณวรัญญา ปลอดภัยจินดา ที่ช่วยเป็นที่ปรึกษา และให้ความรู้ทางด้านการอ่านทำความเข้าใจ และการเขียนภาษาอังกฤษให้ถูกต้องตามหลักไวยากรณ์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งซึ่งช่วยให้การทำวิทยานิพนธ์นี้ราบรื่นขึ้น

ผลงานวิจัยทั้งหมดสำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ โปรแกรม Matlab และซอฟต์แวร์ Optisys8.0 และสถานที่ที่ใช้ในการทำงานวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคมภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถานที่ที่ใช้ในการทำงานวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ นอกจากนี้ขอขอบคุณโครงการทุนศึกษากันกุฎิที่ให้เงินสนับสนุนในการทำงานวิจัยตลอดระยะเวลา 2 ปี

สุดท้ายขอขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนทั้งทุนทรัพย์ แรงกายและแรงใจตลอดมาอย่างหาที่สุดมิได้ ดังนั้นจึงมีคำกล่าวใด ๆ ที่สามารถทดแทนสิ่งดี ๆ เหล่านี้ได้ จึงคงไว้ซึ่งความรู้สึกซาบซึ้งและขอบคุณตลอดไป

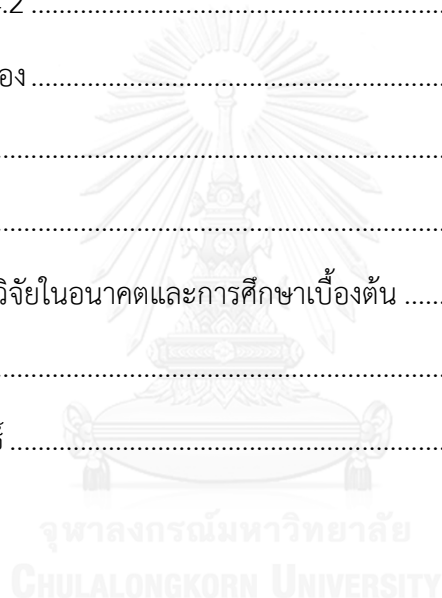
## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ    |
| สารบัญ.....  | ช    |
| สารบัญรูป .....  | 1    |
| สารบัญตาราง.....   | 4    |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 5    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ.....   | 6    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....   | 13   |
| 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ .....  | 13   |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....   | 13   |
| 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....   | 14   |
| บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....  | 15   |
| 2.1 เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม.....   | 15   |
| 2.1.1 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ .....           | 17   |
| 2.1.2 มาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ .....   | 21   |
| 2.1.2.1 มาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟตามข้อกำหนดของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU)..... | 21   |
| 2.1.2.2 มาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟตามข้อกำหนดของ IEEE-SA.....                          | 23   |
| 2.1.3 ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีแบบมีสายประเภทอื่น .....   | 25   |
| 2.2 เทคโนโลยีไวร์เลสแลนด်.....   | 27   |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 2.2.1   | โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีวีร์เลสแลนด์ .....   | 27 |
| 2.2.2   | โครงข่ายไร้สายชนิดตาข่าย .....   | 28 |
| 2.2.3   | มาตรฐานของเทคโนโลยีวีร์เลสแลนด์ .....  | 30 |
| 2.2.4   | ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีวีร์เลสแลนด์เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีใช้สายทั่วไป..                     | 31 |
| 2.3     | เทคโนโลยีวีร์แบน .....   | 32 |
| 2.3.1   | โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีวีร์แบน .....  | 32 |
| 2.3.2   | รูปแบบการรับและส่งข้อมูลภายในโครงข่ายของเทคโนโลยีวีร์แบน.....                                      | 35 |
| 2.3.3   | แรงจูงใจที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบเทคโนโลยีวีร์แบน .....   | 37 |
| 2.4     | เทคนิคและการคำนวณพื้นฐาน .....   | 38 |
| 2.4.1   | การคำนวณระยะการให้บริการของเทคโนโลยีวีร์เลสแลนด์ .....   | 38 |
| 2.4.1.1 | Stanford university interim (SUI) model.....   | 38 |
| 2.4.1.2 | Cost 231 walfish - ikekami model.....  | 39 |
| 2.4.1.3 | Wireless neighborhood area network path loss characterization .                                    | 40 |
| 2.4.1.4 | Path loss and multipath power decay of the wideband car-to-car channel.....                        | 42 |
| 2.4.2   | การคำนวณกำลังของสัญญาณที่วัดได้ที่เครื่องรับสัญญาณ .....   | 48 |
| 2.4.2.1 | ตารางบ่งชี้ค่าตัวเลขที่ใช้บอกวิธีการมอดูเลตและการเข้ารหัส (Modulation and coding scheme: MCS)..... | 49 |
| บทที่ 3 | งานที่นำเสนอของวิทยานิพนธ์.....  | 52 |
| 3.1     | สมมติฐาน .....   | 52 |
| 3.1.1   | คุณสมบัติของอุปกรณ์ในส่วนเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลักของเทคโนโลยีวีร์แบน .....                         | 52 |
| 3.1.2   | คุณสมบัติของอุปกรณ์ในส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการของเทคโนโลยีวีร์แบน .....                         | 52 |
| 3.1.3   | เสนอโครงสร้างของเทคโนโลยีวีร์แบนเพื่อสร้างสมดุลโหลดของหน่วยกราฟฟิกของหน่วยโครงข่ายแสง .....        | 54 |



|  |    |
|--|----|
| 3.2 อัลกอริทึม .....                                   | 56 |
| 3.2.1 การกำหนดตัวแปร.....                              | 58 |
| 3.2.2 ขั้นตอนที่ 1.....                                | 60 |
| 3.2.3 ขั้นตอนที่ 2.....                                | 61 |
| 3.2.4 ขั้นตอนที่ 3.....                                | 62 |
| 3.2.5 ขั้นตอนที่ 4.1 .....                             | 64 |
| 3.2.6 ขั้นตอนที่ 4.2 .....                             | 66 |
| บทที่ 4     ผลการจำลอง .....                           | 68 |
| บทที่ 5     สรุป.....                                  | 80 |
| ภาคผนวก.....   | 82 |
| ภาคผนวก ก แนวทางวิจัยในอนาคตและการศึกษาเบื้องต้น ..... | 83 |
| รายการอ้างอิง .....                                    | 2  |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....                       | 6  |



## สารบัญรูป

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 1-1 การประมาณการณ์ของปริมาณข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ. 2016 ถึงปี ค.ศ. 2019 .....         | 5  |
| รูปที่ 1-2 เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ .....                    | 7  |
| รูปที่ 1-3 เทคโนโลยีไวร์เลสแลนค์ มาตรฐาน IEEE 802.11n .....                               | 9  |
| รูปที่ 1-4 โครงสร้างของเทคโนโลยีอีวอร์แบน .....   | 10 |
| รูปที่ 2-1 รูปแบบสายส่งที่ใช้ในการวางระบบเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม.....                   | 15 |
| รูปที่ 2-2 บล็อกไดอะแกรมสายส่งที่ใช้ในการวางระบบเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม.....            | 16 |
| รูปที่ 2-3 รูปแบบการเชื่อมโยงสายส่งเส้นใยแสง .....  | 17 |
| รูปที่ 2-4 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ ..... | 18 |
| รูปที่ 2-5 การแยกสายส่งสัญญาณแบบรวมศูนย์กลาง .....  | 18 |
| รูปที่ 2-6 การแยกสายส่งสัญญาณแบบกระจาย .....  | 19 |
| รูปที่ 2-7 รูปแบบการส่งสัญญาณขาลงของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ .....                        | 20 |
| รูปที่ 2-8 รูปแบบการส่งสัญญาณขาขึ้นของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ .....                      | 20 |
| รูปที่ 2-9 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีไวร์เลสแลนค์ที่เชื่อมต่อกับเทคโนโลยีแบบมีสาย ..... | 27 |
| รูปที่ 2-10 โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายไร้สายชนิดตาข่าย .....                             | 29 |
| รูปที่ 2-11 โครงข่ายไร้สายชนิดตาข่าย .....  | 30 |
| รูปที่ 2-12 การรับส่งข้อมูลผ่านเสาอากาศ 4 ชุดตามมาตรฐาน IEEE 802.11n .....                | 31 |
| รูปที่ 2-13 รูปแบบการวางโครงข่ายของเทคโนโลยีอีวอร์แบน.....                                | 33 |
| รูปที่ 2-14 โครงสร้างการให้บริการอีวอร์แบน.....   | 34 |
| รูปที่ 2-15 รูปแบบการหาเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง .....                   | 35 |
| รูปที่ 2-16 รูปแบบการส่งข้อมูลด้านขาขึ้นและขาลงของโครงข่ายอีวอร์แบน .....                 | 36 |
| รูปที่ 2-17 ตัวอย่างการนำเทคโนโลยีอีวอร์แบนไปใช้งาน .....                                 | 37 |
| รูปที่ 2-18 การคำนวณกำลังของสัญญาณที่วัดได้ที่เครื่องรับสัญญาณ.....                       | 48 |

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 3-1 โครงสร้างของเทคโนโลยีอีเธอร์แบน เพื่อสร้างสมดุคโหลตของหน่วยทราฟฟิคของหน่วย<br>โครงข่ายแสง .....   | 54 |
| รูปที่ 3-2 พื้นที่ให้บริการของแต่ละกลุ่มย่อย ของเทคโนโลยีอีเธอร์แบนที่นำเสนอ .....   | 55 |
| รูปที่ 3-3 รูปแบบโปรโตคอลที่ ONU ส่งข้อมูลไปให้ OLT เพื่อขออนุญาตส่งข้อมูล .....   | 56 |
| รูปที่ 3-4 รูปแบบโปรโตคอลที่ OLT อนุญาตให้ ONU ส่งข้อมูลได้ หรือสั่งให้ผู้ใช้บริการบางราย<br>หาเส้นทางการส่งข้อมูลใหม่ .....   | 56 |
| รูปที่ 4-1 บ้านของผู้ใช้บริการบนพื้นที่จำลอง .....   | 69 |
| รูปที่ 4-2 ตำแหน่งการวาง ONU ด้วยวิธี deterministic .....  | 70 |
| รูปที่ 4-3 อัตราการลดทอนของคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz .....   | 71 |
| รูปที่ 4-4 กำลังของสัญญาณที่เครื่องรับสามารถรับได้ของคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz.....  | 71 |
| รูปที่ 4-5 อัตราการลดทอนสำหรับคลื่นวิทยุความถี่ 5.7 GHz จาก ONU/gateway ไปสู่ AP<br>ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการที่ระยะทางต่าง ๆ.....                                   | 72 |
| รูปที่ 4-6 กำลังของสัญญาณคลื่นวิทยุความถี่ 5.7 GHz ที่ AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการ<br>รับได้ จาก ONU/gateway ที่ระยะทางต่าง ๆ .....                                 | 72 |
| รูปที่ 4-7 อัตราการลดทอนสำหรับคลื่นวิทยุความถี่ 5.7 GHz จาก AP ของบ้านแต่ละหลังของ<br>ผู้ใช้บริการ ไปสู่ AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการข้างเคียงที่ระยะทางต่าง ๆ ..... | 73 |
| รูปที่ 4-8 กำลังของสัญญาณคลื่นวิทยุความถี่ 5.7 GHz ที่ AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการ<br>ได้รับ จาก AP ของบ้านของผู้ใช้บริการข้างเคียงที่ระยะทางต่าง ๆ .....           | 74 |
| รูปที่ 4-9 เส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างบ้านผู้ใช้บริการหลังแต่ละหลังกับ primary ONU<br>ที่ผู้ใช้บริการสามารถการันตีอัตราการรับส่งข้อมูลให้แก่ผู้ใช้บริการได้ .....           | 76 |
| รูปที่ 4-10 เส้นทางเชื่อมโยงข้อมูลทุกเส้นทางที่เป็นไปได้ ที่ถูกเก็บสะสมเป็นข้อมูล ในอุปกรณ์<br>AP ของบ้านผู้ใช้บริการแต่ละหลัง.....  | 77 |
| รูปที่ 4-11 Primary path ของบ้านของผู้ใช้บริการที่เข้าใช้งานโครงข่าย.....  | 77 |
| รูปที่ 4-12 เส้นทางการปรับสมดุคภาระงานของ ONU แต่ละตัวให้เท่ากันเรียบร้อยแล้ว .....  | 79 |
| รูปที่ 0-1 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีส่วต่อขยายช่วงของโครงข่ายแสงแบบพาสซีฟ .....   | 83 |

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 0-2 บล็อกไดอะแกรมแสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายใน OLT และ ONU .....   | 84 |
| รูปที่ 0-3 การจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม Optisystem .....   | 85 |
| รูปที่ 0-4 ค่าอัตราความผิดพลาดที่สามารถวัดได้ที่ระยะทางต่าง ๆ.....  | 86 |
| รูปที่ 0-5 กำลังของสัญญาณที่ ONU แต่ละตัวสามารถรับได้ที่ระยะทางต่าง ๆ.....  | 86 |
| รูปที่ 0-6 แผนภาพดวงตาสัญญาณต้นกำเนิดจาก CW Laser มีค่าเป็น 3 dBm ที่ระยะทาง<br>45 km (ก) 65 km (ข) 80 km (ค) และ 90 km (ง).....  | 87 |
| รูปที่ 0-7 แผนภาพดวงตาสัญญาณต้นกำเนิดจาก CW Laser มีค่าเป็น 6 dBm ที่ระยะทาง<br>45 km (ก) 65 km (ข) 85 km (ค) และ 95 km (ง).....  | 88 |
| รูปที่ 0-8 แผนภาพดวงตาสัญญาณต้นกำเนิดจาก CW Laser มีค่าเป็น 9 dBm ที่ระยะทาง<br>45 km (ก) 65 km (ข) 85 km (ค) และ 100 km (ง)..... | 89 |



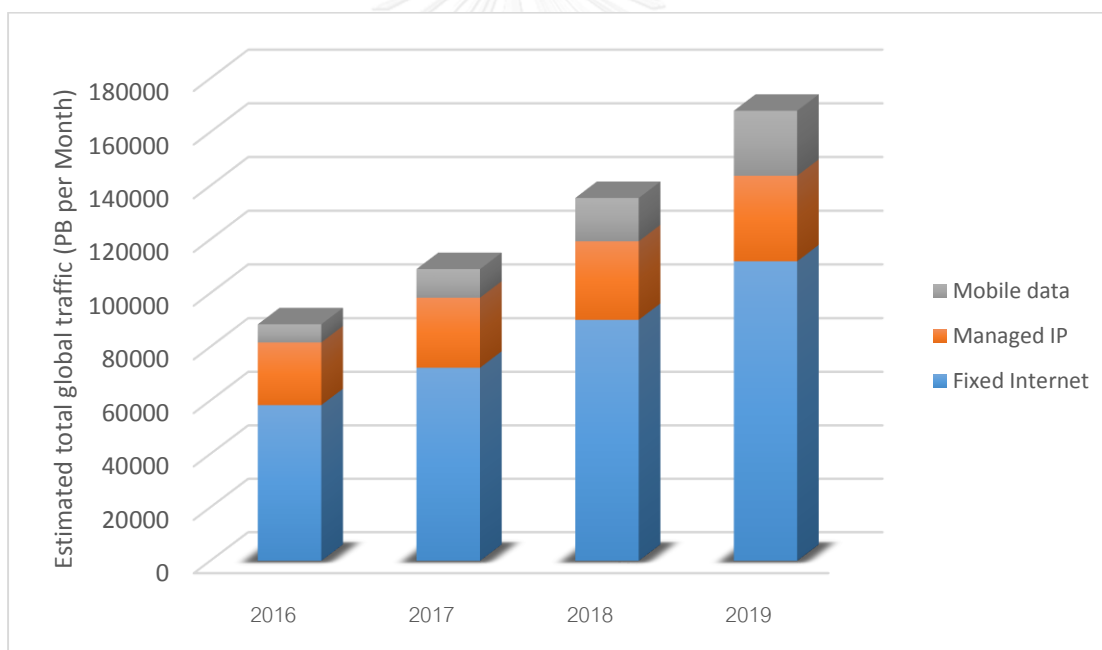
## สารบัญตาราง

|   |    |
|---|----|
| ตารางที่ 1-1 การประมาณการณ์ใช้บริการทางด้านต่าง ๆ ของปี ค.ศ. 2016 ถึงปี ค.ศ. 2019.....              | 5  |
| ตารางที่ 2-1 สรุปมาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันตามมาตรฐาน<br>ITU-T .....  | 22 |
| ตารางที่ 2-2 สรุปมาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟตามมาตรฐาน IEEE .....                            | 23 |
| ตารางที่ 2-3 สรุปมาตรฐาน next generation PON technology.....  | 25 |
| ตารางที่ 2-4 วิธีการโมดูลิต อัตราเร็ว ระยะให้บริการ และความถี่ ตามมาตรฐานไวร์เลสแบบ<br>ต่าง ๆ ..... | 30 |
| ตารางที่ 2-5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับ SUI โมเดล สำหรับพื้นที่แบบต่าง ๆ .....                            | 39 |
| ตารางที่ 2-6 พารามิเตอร์สำหรับใช้ในกรณีหมู่บ้านที่เป็นที่ราบและมีต้นไม้ .....                       | 42 |
| ตารางที่ 2-7 พารามิเตอร์สำหรับใช้ในกรณีหมู่บ้านที่เป็นที่เป็นภูเขาเล็ก ๆ และมีต้นไม้ .....          | 42 |
| ตารางที่ 2-8 พารามิเตอร์สำหรับอัตราการลดทอนของกำลังการส่งสัญญาณทั้งหมด .....                        | 44 |
| ตารางที่ 2-9 พารามิเตอร์สำหรับอัตราการลดทอนของ LOS path.....  | 45 |
| ตารางที่ 2-10 พารามิเตอร์สำหรับอัตราการลดทอนของ NLOS path .....                                     | 47 |
| ตารางที่ 2-11 ตารางบ่งชี้ค่าตัวเลขที่ใช้บอกวิธีการโมดูลิตและการเข้ารหัส .....                       | 49 |
| ตารางที่ 4-1 พารามิเตอร์ที่กำหนดให้เพื่อใช้คำนวณอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 1 .....                      | 69 |
| ตารางที่ 4-2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณ .....   | 70 |
| ตารางที่ 4-3 MSC rate ของอุปกรณ์ AP มาตรฐาน 802.11n.....  | 74 |
| ตารางที่ 4-4 จำนวนผู้เข้าใช้บริการโครงข่ายวอร์เรนของ ONU แต่ละตัว .....                             | 76 |
| ตารางที่ 4-5 จำนวนผู้เข้าใช้บริการโครงข่ายวอร์เรนของ ONU แต่ละตัวก่อนปรับภาระงาน .....              | 78 |
| ตารางที่ 4-6 จำนวนผู้เข้าใช้บริการโครงข่ายวอร์เรนของ ONU แต่ละตัวหลังจากปรับภาระงาน<br>แล้ว.....    | 79 |
| ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน 10 GPON.....  | 85 |

## บทที่ 1

### บทนำ

เป็นที่คาดการณ์ว่าในอนาคต ปริมาณความต้องการใช้แบนด์วิธสำหรับการสื่อสารข้อมูล เช่น การเลือกซื้อสินค้าออนไลน์ (online shopping) เครือข่ายสังคมออนไลน์ (online social network) และการใช้บริการมัลติมีเดีย (multimedia service) เพื่อการเข้าชมวิดีโอและเล่นเกมส์จะมีการเติบโตมากขึ้นอย่างรวดเร็ว เห็นได้จากการประมาณการของปริมาณข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ. 2016 ถึงปี ค.ศ. 2019 ของบริษัท CISCO [1] ซึ่งคาดการณ์ว่าจะมีปริมาณข้อมูลเพิ่มขึ้นถึง 23% ต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 1-1 โดยปริมาณความต้องการใช้แบนด์วิธที่เพิ่มขึ้นนั้นมาจาก วิดีโอออนไลน์ แบนด์วิธ (internet video) 33% บริการข้อมูล (web email and data) 22% และการเล่นเกมส์ออนไลน์ (online gaming) 40% ดังแสดงในตารางที่ 1-1 [1]



รูปที่ 1-1 การประมาณการของปริมาณข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ. 2016 ถึงปี ค.ศ. 2019

ตารางที่ 1-1 การประมาณการณ้ใช้บริการทางด้านต่าง ๆ ของปี ค.ศ. 2016 ถึงปี ค.ศ. 2019

| (PB per Month)      | 2016   | 2017   | 2018   | 2019   | %   |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|-----|
| Internet video      | 36,456 | 49,068 | 66,179 | 89,319 | 33% |
| Web, email and data | 9,476  | 11,707 | 14,002 | 16,092 | 22% |
| File sharing        | 6,130  | 6,168  | 6,231  | 6,038  | 0%  |

| (PB per Month) | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | %   |
|----------------|------|------|------|------|-----|
| Online gaming  | 48   | 78   | 109  | 143  | 40% |

ในการออกแบบโครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณแบนด์วิดท์ที่เพิ่มขึ้นในอนาคตนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงเทคโนโลยีที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน ความสามารถและข้อจำกัดของอุปกรณ์และสายส่ง รวมทั้งต้นทุนในการวางระบบ เพื่อให้ได้โครงข่ายที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้บริการได้ในราคาที่เป็นที่ยอมรับ โดยระบบต้องมีเสถียรภาพน่าเชื่อถือและมีความปลอดภัย ในส่วนต่อไปของบทนี้จะกล่าวถึง เทคโนโลยีที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน ข้อดี ข้อเสีย รวมทั้งเทคโนโลยีวีรแบน (wireless optical broadband access network: WOBAN) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารในอนาคตสำหรับโครงข่ายเข้าถึงที่เชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้บริการและผู้ให้บริการ (last mile access network) ที่ได้ผนวกเอาข้อดีของการสื่อสารด้วยแสงซึ่งสามารถรองรับปริมาณการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูง และข้อดีของการสื่อสารไร้สายซึ่งสะดวกในการที่ผู้ใช้บริการจะเชื่อมต่อกับโครงข่าย เข้าด้วยกันทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารที่สามารถตอบโจทย์ของผู้ใช้บริการในด้าน ราคา ความสะดวก และความเร็วในการรับและส่งข้อมูล

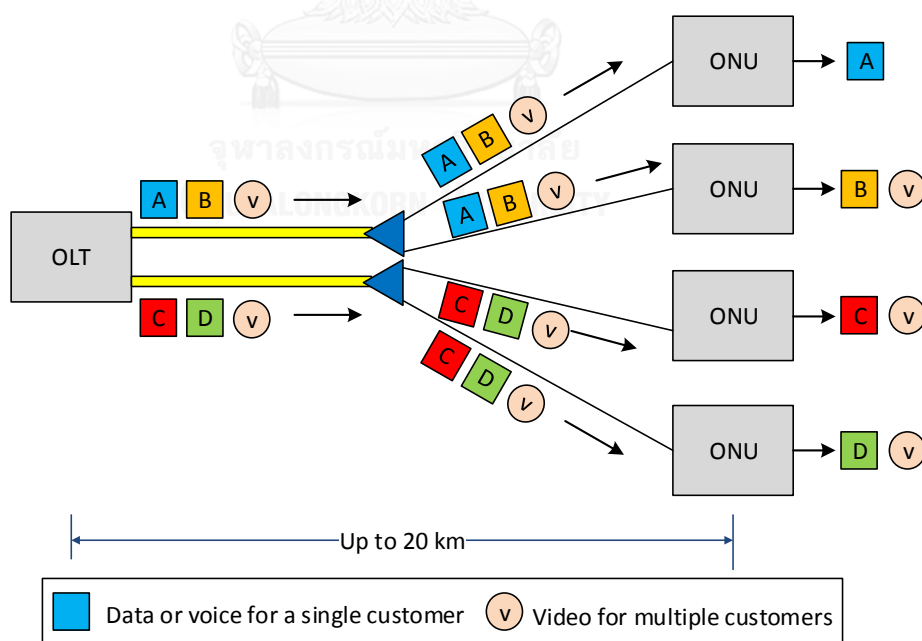
### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันโครงข่ายเข้าถึงที่เชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้บริการและผู้ให้บริการแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ โครงข่ายสื่อสารแบบใช้สาย (wire line network) และโครงข่ายสื่อสารแบบไร้สาย (wireless network) ในอดีตเทคโนโลยีโครงข่ายสื่อสารแบบใช้สายที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายคือ เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลบนสายทองแดง (asynchronous digital subscriber line: ADSL) ที่มีอัตราในการรับส่งข้อมูลสูงสุดเพียง 24 Mbps เพื่อพัฒนาโครงข่ายให้สามารถรองรับความต้องการของผู้ใช้บริการได้ จึงเกิดการพัฒนารูปแบบใหม่หลากหลายรูปแบบ ซึ่งรูปแบบพื้นฐานของสายส่งสัญญาณชนิดโลหะตัวนำ แบ่งออกเป็นแบบสายคู่ (two wire) แบบโคแอกเซียล (coaxial) แบบไมโครสตริป (micro strip) และแบบเส้นหรือสตริปไลน์ (strip line) นอกจากนี้ยังมีสายส่งที่ไม่ได้ทำจากโลหะ เช่น เส้นใยแสง (optical fiber) เป็นต้น [2]

สายโคแอกเซียลเป็นสายส่งที่ถูกนำมาใช้ในการวางระบบโดยเทคโนโลยี data over cable service interface specification (DOCSIS) ที่มีอัตราการรับ ส่งข้อมูลสูงสุดที่สามารถให้บริการได้คือ 30.72 Mbps สายส่งชนิดต่อมา คือ สายคู่ตีเกลียวไม่หุ้มฉนวน (unshielded twisted pair: UTP) สามารถรับ ส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดในการส่งข้อมูล 250 Mbps แต่สามารถใช้งานได้ในระยะทางที่จำกัดเพียง 100 m จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการวางระบบโครงข่าย และสายส่งชนิดต่อมา คือ

เส้นใยแสง ซึ่งเป็นสายส่งที่มีอัตราในการรับ ส่งข้อมูลสูงและรัศมีการให้บริการไกลกว่าสายส่งชนิดอื่นที่ถูกกล่าวมาแล้ว โดยในปัจจุบันเส้นใยแสงสามารถให้บริการด้วยอัตราการรับ ส่งข้อมูลสูงถึง 10 Gbps และมีรัศมีการให้บริการถึง 20 km ตามมาตรฐาน 10GE-PON (IEEE 802.3av) ถึงแม้ว่าต้นทุนในการวางโครงข่ายโดยใช้เส้นใยแสงจะมีราคาสูง เนื่องจากจากราคาของอุปกรณ์ในการวางระบบและสายส่ง แต่เมื่อเปรียบเทียบอัตราการรับและส่งข้อมูลกับราคาการให้บริการ จะพบว่าค่าใช้จ่ายต่อหน่วยข้อมูลของระบบโครงข่ายเชิงแสงจะถูกกว่าระบบที่ใช้ไฟฟ้าเป็นสื่อสัญญาณมาก ดังนั้นค่าใช้จ่ายต่อหน่วยแบนด์วิดท์ต่อการลงทุนของเส้นใยแสงจึงคุ้มทุนมากกว่า ส่งผลให้ในปัจจุบันเริ่มมีการนำเส้นใยแสงมาใช้งานมากขึ้น

เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม (fiber to the home: FTTH) เป็นเทคโนโลยีสำหรับโครงข่ายเข้าถึงแบบใช้สายที่ใช้เส้นใยแสง ผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (passive optical network: PON) ที่มีโครงสร้างการเชื่อมต่อจากหนึ่งจุดสู่หลายจุด (point-to-multipoint: P2MP) ดังแสดงในรูปที่ 1-2 โดยเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมสามารถให้บริการด้วยอัตราการรับ ส่งข้อมูลสูงสุดถึง 10 Gbps ตามมาตรฐาน 10GE-PON (IEEE 802.3av) ทั้งในด้านการส่งข้อมูลขาขึ้น (uplink) และการส่งข้อมูลขาลง (downlink) ภายใต้รัศมีการให้บริการถึง 20 km และสามารถพัฒนาไปได้ถึง 40 และ 100 Gbps ในอนาคต



รูปที่ 1-2 เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ



รูปที่ 1-2 แสดงโครงสร้างของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ optical line terminal (OLT) ซึ่งตั้งอยู่ในชุมสายของผู้ให้บริการ (central office: CO) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณแสง และยังทำหน้าที่ประสานงานในการ multiplex สัญญาณร่วมกับ optical network unit (ONU) ที่ตั้งอยู่ในบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการ นอกจากนี้เพื่อทำให้เส้นใยแสงแต่ละเส้นจาก OLT สามารถเชื่อมต่อกับ ONU ได้มากขึ้นจะมีการนำเอาตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสง (optical splitter) มาใช้ในการแยกสัญญาณจาก OLT ไปยัง ONU ตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสงสามารถแยกสัญญาณได้ด้วยอัตราส่วน (optical splitter ratio) สูงสุด 1:64 นั้นหมายความว่า เส้นใยแสง 1 เส้นจาก OLT สามารถไปเชื่อมต่อกับ ONU ได้มากที่สุดถึง 64 ONU [3, 4]

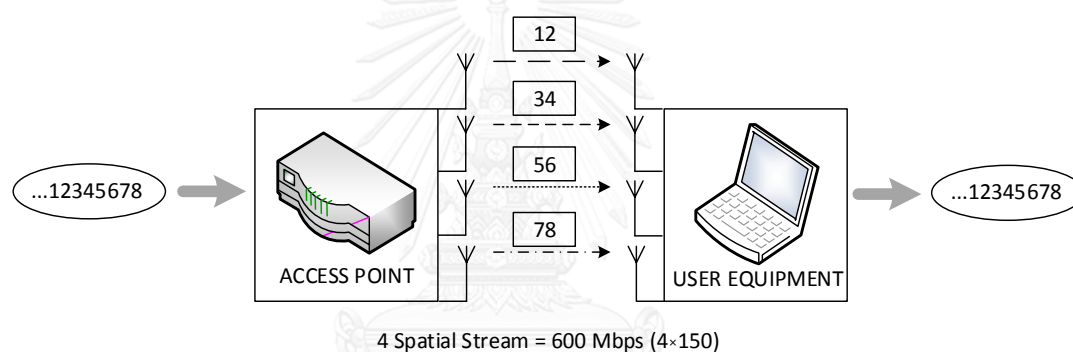
เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมมีข้อดี คือ ระบบมีความเร็วสูง (high capacity) สามารถสื่อสารข้อมูลขนาดใหญ่มากได้ ระบบมีความน่าเชื่อถือ (system reliability) เนื่องจากระบบสายส่งที่เป็นเส้นใยแสงทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมสูง มีอายุการใช้งานนาน และวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแสงเป็นฉนวนไฟฟ้าโดยธรรมชาติ ทำให้ปราศจากปัญหาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลให้ข้อมูลสื่อสารไม่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนั้นเทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถออกแบบให้ ONU มีระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก รวมทั้งกินไฟต่ำซึ่งเมื่อคิดคำนวณเปรียบเทียบกับระบบ plain old telephone (POT) ที่ต้องใช้ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากชุมสาย ในขณะที่เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมระบบพลังงานไฟฟ้าจะอยู่ที่บ้านผู้ใช้ ทำให้พลังงานรวมที่เกิดขึ้นในเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมมีค่าน้อยกว่าซึ่งเป็นผลดีกับสภาพเศรษฐกิจของประเทศในระดับมหภาค

ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมจะมีด้านดีมากมายดังที่ได้กล่าวมานั้น แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมกลับยังไม่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเท่าที่ควรเนื่องมาจาก ต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์และวางระบบมีราคาสูงเพราะต้องลากสายส่งเส้นใยแสงไปถึงแต่ละบ้านของผู้ใช้บริการโดยตรง การติดตั้งอุปกรณ์ ONU ในบ้านทุกหลังที่ใช้บริการยุ่งยากและต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ความสามารถในการวางระบบและติดตั้งอุปกรณ์เชิงแสงซึ่งมีความละเอียดอ่อนและข้อปลีกย่อยที่ต้องคำนึงถึงมากกว่าเทคโนโลยีสายส่งสัญญาณประเภทอื่น [5] เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีแนวความคิดที่จะเอานำเทคโนโลยีอื่นเข้ามาผสมผสาน เพื่อให้ผู้ใช้บริการตามบ้านสามารถใช้ความสามารถที่มีอยู่ของโครงข่ายเส้นใยแสงได้โดยง่ายและใกล้เคียงกับเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม

เทคโนโลยีที่ผู้ใช้บริการสามารถเข้าถึงบริการได้ง่าย คือ เทคโนโลยีโครงข่ายเข้าถึงแบบไร้สาย โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีเข้าถึงแบบไร้สายที่เป็นที่นิยม คือ เทคโนโลยีไวร์เลสแลนด (wireless LAN:

WLAN) หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Wi-Fi ซึ่งสื่อสารสัญญาณโดยใช้คลื่นวิทยุ (radio frequency: RF) โดย ใช้ความถี่ในย่าน industrial scientific and medical (ISM) คือ ความถี่ในย่าน 2.4 กิกะเฮิรตซ์และ 5.7 GHz เป็นตัวกลางในการสื่อสารสัญญาณระหว่างอุปกรณ์เครื่องส่ง (access point: AP) และเครื่องรับ (user equipment: UE) ซึ่งสามารถให้บริการด้วยอัตราความเร็วรับ ส่งข้อมูลสูงสุดถึง 600 Mbps ตาม มาตรฐาน IEEE 802.11n ที่มีรัศมีการให้บริการ 70 m ในโครงสร้างปิด และ 250 m ในพื้นที่โล่ง [6] นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์เครื่องรับและเครื่องส่งโดยใช้เทคโนโลยี multiple input and multiple output (MIMO) ที่ใช้เสาอากาศที่หลายต้นในการรับและส่ง ข้อมูลดังแสดงใน

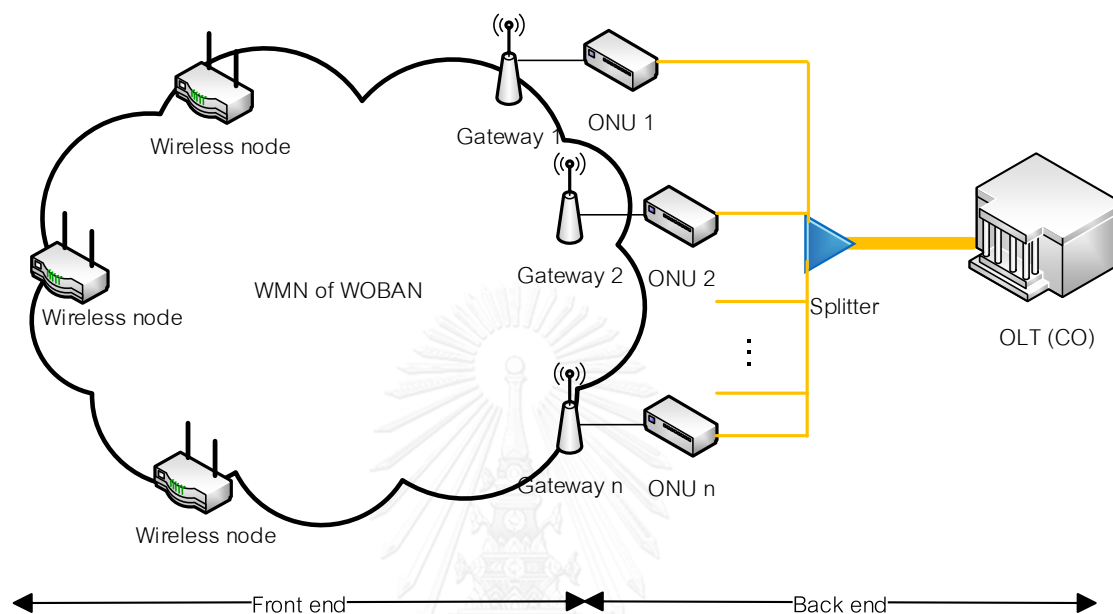
รูปที่ 1-3 ส่งผลให้อุปกรณ์ในโครงข่ายสามารถรับ ส่งข้อมูลได้บนระยะทางที่ไกลขึ้น และมีความ แม่นยำของข้อมูลมากขึ้น



รูปที่ 1-3 เทคโนโลยีไร้สายแลนด มาตรฐาน IEEE 802.11n

เทคโนโลยีไร้สายแลนดมีข้อดี คือ ผู้ใช้บริการที่มีอุปกรณ์ที่สามารถเชื่อมต่อกับสัญญาณ ไร้สายแลนดสามารถเชื่อมต่อกับโครงข่ายได้สะดวกทุกที่ทุกเวลา (anytime-anywhere) ภายใน พื้นที่ที่สัญญาณของระบบไร้สายแลนดครอบคลุมถึง โดยไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งสายส่งหรืออุปกรณ์ พวงอื่นและผู้ให้บริการสามารถเชื่อมต่อบริการได้พร้อมกันที่หลายอุปกรณ์ ถึงแม้ว่าค่าใช้จ่ายใน การติดตั้งใช้งานเทคโนโลยีไร้สายแลนดนั้นจะค่อนข้างสูงในขั้นแรก แต่ถ้านับรวมค่าใช้จ่ายในการ ติดตั้งใช้งานทั้งระบบ ค่าบำรุงรักษา อายุการใช้งานของอุปกรณ์ รวมถึงค่าใช้จ่ายในกรณีที่ต้องการ ขยายจำนวนของผู้ใช้งานในอนาคตแล้วนั้นจะถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่คุ้มค้ำคุ้มราคา เทคโนโลยีไร้ เลสแลนดจึงเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสม ในการนำไปผสานกับเทคโนโลยีไฟเบอร์ทุเดอะโฮม เพื่อให้ ผู้ใช้บริการตามบ้านสามารถใช้ความสามารถที่มีอยู่ของโครงข่ายเส้นใยแสงได้โดยง่าย และใกล้เคียง กับเทคโนโลยีไฟเบอร์ทุเดอะโฮม

เทคโนโลยีวอร์แบน คือ เทคโนโลยีสำหรับโครงข่ายแบบเข้าถึงในอนาคต ที่นำข้อดีของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมในแง่ของความเร็ว ความมีเสถียรภาพ และปริมาณแบนด์วิดท์ที่สูง มารวมกับข้อดีของเทคโนโลยีไวร์เลสแลนดในแง่ของความยืดหยุ่น คือ ผู้ใช้บริการสามารถเข้าถึงบริการได้ทุกที่ทุกเวลา และต้นทุนในการวางระบบที่คุ้มค้ำคุ้มราคามารวมกัน [7]



รูปที่ 1-4 โครงสร้างของเทคโนโลยีวอร์แบน

โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีวอร์แบนแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายหลัก (back end) ที่ใช้การวางระบบด้วยเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม และส่วนที่เชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการ (front end) ที่ใช้การวางระบบด้วยเทคโนโลยีไวร์เลสแลนด โดยที่จุดเชื่อมต่อระหว่างทั้ง 2 ส่วนจะมี gateway ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณวิทยุและสัญญาณไฟฟ้า เพื่อส่งต่อข้อมูลระหว่างส่วนที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายหลักและส่วนที่เชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการ [8] ดังแสดงในรูปที่ 1-4

จากการศึกษางานวิจัยของเทคโนโลยีวอร์แบนที่ผ่านมาพบว่า หัวข้องานวิจัยของเทคโนโลยีวอร์แบนแบ่งเป็น 3 หัวข้อหลัก คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางระบบ (set up and network planning) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาเส้นทาง การรับและส่งข้อมูลในโครงข่าย (routing) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาวิธีป้องกันในกรณีที่เกิดความผิดพลาดของอุปกรณ์ในระบบ (fault tolerance) ซึ่งแต่ละหัวข้อก็มีรายละเอียดดังนี้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางระบบ เช่น งานวิจัย [9] เสนออัลกอริทึม ที่ใช้ในการวางระบบ วอร์เรนบนพื้นที่หมู่บ้านชานเมือง ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อหาตำแหน่งของ primary ONU ที่ผู้ใช้บริการ ทุกหลังจะสามารถเข้าเชื่อมต่อได้ ภายในจำนวน hop ที่กำหนดที่มีเงื่อนไข คือ ผู้ใช้บริการสามารถ เชื่อมต่อกันระหว่างผู้ใช้บริการด้วยกันแบบ multi-hop โดยนำอัลกอริทึมการหาตำแหน่งเพื่อติดตั้ง ONU ที่เหมาะสม คือ สามารถลดต้นทุนการวางระบบให้ได้มากที่สุดด้วยวิธี greedy จากงานวิจัย [10] มาประยุกต์ใช้ งานวิจัย [11] เสนออัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบระบบวอร์เรน ที่มี วัตถุประสงค์เพื่อหาตำแหน่งของ routing device ที่สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานในระบบให้ได้ มากที่สุดได้ ในขณะเดียวกันก็สามารถลดต้นทุนในการวางระบบได้อีกด้วย ซึ่งเสนอโมเดล 3 โมเดล คือ re-configuration approach peak-design approach และ time-aware approach โดยนำ อัลกอริทึมในการหาตำแหน่งเพื่อติดตั้ง ONU ของเทคโนโลยีวอร์เรนโดยใช้วิธี mixed integer linear programming (MILP) จากงานวิจัย [12] มาประยุกต์ใช้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาเส้นทางการรับ ส่งข้อมูลในโครงข่าย เช่น งานวิจัย [7] เสนอ อัลกอริทึมเพื่อหาเส้นทางการรับ ส่งข้อมูลระหว่างบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการ และ gateway ที่มี วัตถุประสงค์ คือ เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งข้อมูลต้องน้อยที่สุด (minimize the average packet delay) โดยสมมติให้ wireless router เป็น queues และหา predict wireless link ด้วยวิธี link state assignment (LSA) ซึ่งมีเงื่อนไข คือ ผู้ใช้บริการแต่ละหลังสามารถเชื่อมต่อกันเป็นโครงตาข่าย และ packet delay ที่นำมาพิจารณาประกอบไปด้วย propagation delay transmission delay slot synchronization delay และ queuing delay งานวิจัย [13] มีแนวคิดว่าในอนาคตการ ออกแบบและวางระบบจำเป็นต้องติดตั้ง ONU หลายตัว ซึ่งทำให้ปริมาณการใช้งานไฟฟ้ารวมใน ระบบมากขึ้น นอกจากนั้นในบางช่วงเวลาอาจมี ONU บางตัวที่ไม่ได้ถูกใช้งานหรือถูกใช้งานน้อย งานวิจัยนี้จึงเสนออัลกอริทึม coordinated ONU shut-down algorithm เพื่อตรวจสอบสถานะ ONU จำนวนผู้ใช้งานและปริมาณทราฟฟิก เพื่อตรวจสอบหา ONU ที่ไม่มีผู้ใช้หรือมีผู้ใช้งานน้อย เพื่อ สั่งการให้ shutdown หรือ recover และเสนออัลกอริทึม energy-aware routing algorithm เพื่อ หาเส้นทางใหม่ให้แก่ผู้ใช้งานในระบบ เป็นต้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาวิธีป้องกันในกรณีที่เกิดความผิดพลาด เช่น งานวิจัย [14] เสนอ วิธีการป้องกันในกรณีที่ ONU ตัวใดตัวหนึ่งหรือเส้นใยแสงเส้นใดเส้นหนึ่งในระบบเกิดความผิดพลาด เนื่องจาก ONU เพียง 1 ตัวหรือเส้นใยแสงเพียง 1 เส้นเกิดความเสียหาย จะทำให้เกิดผลกระทบต่อ ปริมาณทราฟฟิกและจำนวนผู้ใช้บริการจำนวนหลายรายที่ต้องเชื่อมต่อหรือส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์ที่ ชำรุด วิธีการพื้นฐานในการสร้างการหาแนวทางป้องกันคือ วิธี MRC problem ที่ใช้การเลือกตำแหน่ง

เพื่อวาง backup ONU ของทั้งระบบ และ วิธี MPMC-RBS ที่ใช้การเลือกตำแหน่งการเชื่อมต่อ backup fiber แก่ระบบ ซึ่งทั้งสองวิธีพื้นฐานนี้ใช้จำนวนของ backup ONU และ backup fiber มากเกินจำเป็น งานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีใหม่คือวิธี OBOF ซึ่งเป็นการรวมวิธี MRC problem และ MPMC-RBS มารวมกันโดยหาตำแหน่งที่เหมาะสมกับการวาง backup ONU และหาจุดเชื่อมต่อ backup fiber ที่เหมาะสม โดยใช้วิธี integer linear programming (ILP) มาใช้ในการคำนวณ โดยพบว่าวิธีนี้สามารถลดจำนวนการใช้ backup ONU และ backup fiber ได้และงานวิจัย [15] เสนอวิธีการป้องกันในกรณีที่ distribution fiber เกิดความเสียหายหลายเส้นในเวลาเดียวกัน โดยเสนอให้ ONU ที่เชื่อมต่อกับ distribution fiber ที่ชำรุดส่งข้อมูลกราฟฟิกของตัวเองไปยัง backup ONU ที่ distribution fiber ยังคงใช้งานได้ปกติ โดยเสนอให้ส่งข้อมูลกราฟฟิกผ่านระบบไร้สายในส่วน ผู้ใช้บริการ เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีอีเธอร์แบนที่ผ่านมา ยังไม่พบบางงานวิจัยที่ปรับสมดุล ทราฟฟิกโหลดของหน่วยโครงข่ายแสงบนเทคโนโลยีอีเธอร์แบนให้ใกล้เคียงกัน และยังไม่พบบางงานวิจัยที่ นำคุณสมบัติของเทคโนโลยีไร้สายแลนดตามมาตรฐาน IEEE 802.11n มาใช้งานในส่วนเชื่อมต่อกับ ผู้ใช้บริการ วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนออัลกอริทึมเพื่อปรับเส้นทางการรับและส่งข้อมูลของผู้ใช้บริการใน ส่วนเชื่อมต่อกับผู้ให้บริการ ในกรณีที่ผู้ให้บริการในระบบจำนวนหนึ่งอาจไม่ได้มีการใช้บริการ ทำให้ ONU บางตัวในระบบรองรับปริมาณทราฟฟิกมาก และบางเวลา ONU บางตัวถูกใช้งานน้อยหรือไม่ ถูกใช้งาน เพื่อให้โครงข่ายสามารถให้บริการแก่ผู้ให้บริการได้อย่างเต็มที่

โดยการปรับสมดุลทราฟฟิกโหลดของหน่วยโครงข่ายแสงมีข้อดี คือ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ การใช้งานโครงข่าย ด้วยการเคลื่อนย้ายหน่วยทราฟฟิกจากหน่วยของโครงข่ายที่มีหน่วยทราฟฟิก หนาแน่นไปยังหน่วยของโครงข่ายที่มีหน่วยทราฟฟิคน้อย นอกจากนี้การนำคุณสมบัติของอุปกรณ์ ไร้สายแลนดตามมาตรฐาน IEEE 802.11n มาประยุกต์ใช้งาน จะช่วยแก้ปัญหาความแออัดของ ทราฟฟิก (bottle neck) บริเวณรอยต่อระหว่างส่วนเชื่อมต่อกับผู้ให้บริการและส่วนเชื่อมต่อโครงข่าย หลักได้ นอกจากนั้นคุณสมบัติ MIMO-OFDM ของเทคโนโลยีไร้สายแลนดตามมาตรฐาน IEEE 802.11n ยังช่วยให้การให้บริการบนโครงข่ายไร้สายมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ในหัวข้อถัดไป จะกล่าวถึงวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตวิทยานิพนธ์และประโยชน์ที่ได้รับ รวมไปถึงขั้นตอน การดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. นำเสนออัลกอริทึมที่สามารถหาเส้นทางการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ AP ของบ้านของผู้ใช้บริการแต่ ละหลังไปยัง gateway/ONU ในส่วนเชื่อมต่อกับผู้ให้บริการบนโครงข่ายวอร์แบนเพื่อปรับภาระงาน ของ ONU ทุกตัวในโครงข่ายวอร์แบนให้ใกล้เคียงกัน
2. ศึกษาและวิเคราะห์ความเร็วในการส่งข้อมูลต่อผู้ใช้งาน หลังจากได้มีการปรับภาระงานของ ONU ภายใต้อัลกอริทึมที่ได้นำเสนอแล้ว

## 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. มีการจำลองอัลกอริทึมลงบนพื้นที่จำลองเพื่อทดสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมโดยใช้การจำลอง ทางคณิตศาสตร์เท่านั้น แต่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์และทดสอบลงในพื้นที่ดังกล่าวจริง
2. กำหนดอัตราการรับส่งข้อมูลในส่วนของเส้นใยแสงโดยใช้อุปกรณ์ตามมาตรฐาน 10GEPON คือ อัตราการรับส่งข้อมูลสูงถึง 10 Gbps ภายใต้รัศมีการให้บริการ 20 km
3. กำหนดอัตราการรับส่งข้อมูลส่วนของโครงข่ายไร้สายใช้อุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11n คือ อัตราการรับส่งข้อมูลสูงถึง 600 Mbps ภายใต้รัศมีการให้บริการ 70 m ในโครงสร้างปิด และ 250 m ในพื้นที่โล่ง
4. จำนวนบ้านผู้ให้บริการบนพื้นที่ที่นำมาทดสอบอัลกอริทึมไม่เกิน 300 หลัง

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้พื้นฐานของเทคโนโลยีเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม และเทคโนโลยีไวร์เลสแลนด
2. สามารถคำนวณอัตราการรับส่งข้อมูลของเทคโนโลยีไวร์เลสแลนด โดยใช้แบบจำลองอัตราการ ลดทอน (wireless propagation model) ของ cost-231walfisch-ikegami
3. ความรู้เกี่ยวกับการทำงานและทฤษฎีหลักการที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีวอร์แบน รวมถึงข้อดีข้อเสีย เมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายเข้าถึงแบบอื่น
4. อัลกอริทึมที่สามารถปรับเส้นทางการส่งข้อมูลของโครงข่ายไร้สายที่เหมาะสมเพื่อปรับภาระงาน ของ ONU ทุกตัวในโครงข่ายวอร์แบนให้ใกล้เคียงกัน
5. ผลในการวิเคราะห์ความเร็วในการส่งข้อมูลต่อผู้ใช้งาน หลังจากได้มีการปรับภาระงานของ ONU ภายใต้อัลกอริทึมที่ได้นำเสนอแล้ว
6. ผลงานตีพิมพ์และนำเสนอในที่ประชุมนานาชาติ

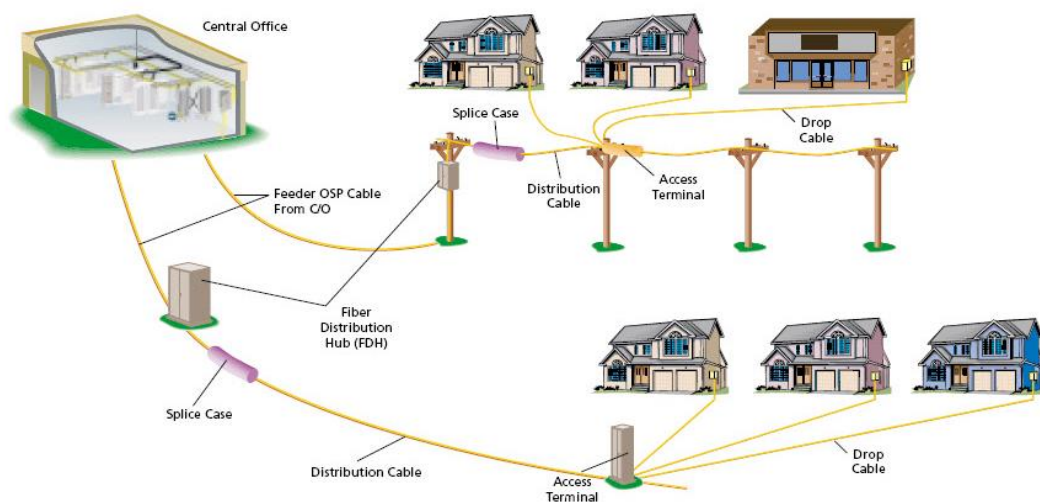
### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานของเทคโนโลยีเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม และเทคโนโลยีไวร์เลสแลนด
2. ศึกษาวิธีการคำนวณความเร็วในการส่งข้อมูลของเทคโนโลยีไวร์เลสแลนด โดยใช้แบบจำลองอัตราการลดทอนของ cost-231walfisch-ikegami
3. คำนวณความเร็วในการส่งข้อมูลของระบบไร้สายโดยใช้แบบจำลอง cost-231walfisch-ikegami
4. ศึกษาการทำงานและทฤษฎีหลักการที่เกี่ยวข้องกับวอร์เรน รวมถึงข้อดีข้อเสีย เมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายเข้าถึงแบบอื่น
5. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาตำแหน่งการวาง ONU และการกำหนดเส้นทางการรับส่งข้อมูลที่เหมาะสมในระบบวอร์เรน
6. ออกแบบอัลกอริทึมและทดสอบในพื้นที่ที่จำลองขึ้นเองขนาดเล็ก
7. ตรวจสอบความถูกต้องของอัลกอริทึม
8. วิเคราะห์ความเร็วในการส่งข้อมูลต่อผู้ใช้งาน หลังจากได้มีการปรับภาระงานของ ONU ภายใต้ อัลกอริทึมที่ได้นำเสนอแล้ว
9. จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

## บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของเทคโนโลยีออร์แกน ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีทางเลือกของเทคโนโลยีโครงข่ายเข้าถึงในอนาคต เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจเทคโนโลยีออร์แกนให้มากขึ้น เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมบนโครงข่ายเข้าถึงเชิงแสงแบบพาสซีฟ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในส่วนเชื่อมต่อโครงข่ายหลักของเทคโนโลยีออร์แกน มาตรฐานของเทคโนโลยีโครงข่ายเข้าถึงเชิงแสงแบบพาสซีฟที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันและกำลังจะมีให้ใช้ในอนาคตรวมไปถึงข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมเมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายเข้าถึงแบบมีสายประเภทอื่น โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีไวร์เลสแลนด ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการของเทคโนโลยีออร์แกน มาตรฐานและคุณสมบัติของอุปกรณ์ของเทคโนโลยีไวร์เลสแลนดที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน รวมถึงข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีไวร์เลสแลนดเมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายเชิงไฟฟ้าประเภทอื่น และสุดท้ายจะกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีออร์แกน รวมถึงข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีออร์แกน เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม และเทคโนโลยีไวร์เลสแลนด ซึ่งเนื้อหาจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม เทคโนโลยีไวร์เลสแลนด และเทคโนโลยีออร์แกน

### 2.1 เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม



รูปที่ 2-1 รูปแบบสายส่งที่ใช้ในการวางระบบเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม

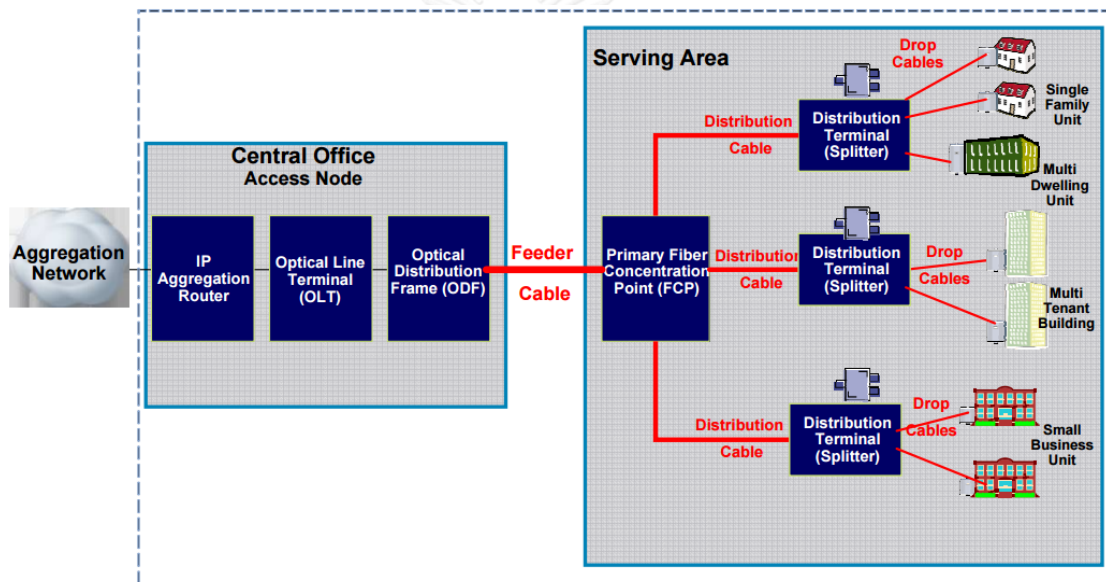


เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม คือ เทคโนโลยีโครงข่ายเข้าถึงแบบมีสาย ที่นำสายส่งเส้นใยแสงมาใช้ในการเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างโครงข่ายหลักและบ้านทุกหลังของผู้ใช้บริการโดยตรง ซึ่งสายส่งเส้นใยแสงที่นำมาใช้ในการวางระบบเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมมี 3 แบบ คือ

สายส่งฟีดเดอร์ (feeder cable) คือ สายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างชุมสายหลัก และ fiber distribution hub (FDB)

สายส่งข่ายกระจายดิสทริบิวชัน (distribution cable) คือ สายส่งที่เชื่อมต่อระหว่าง FDB และ access terminal

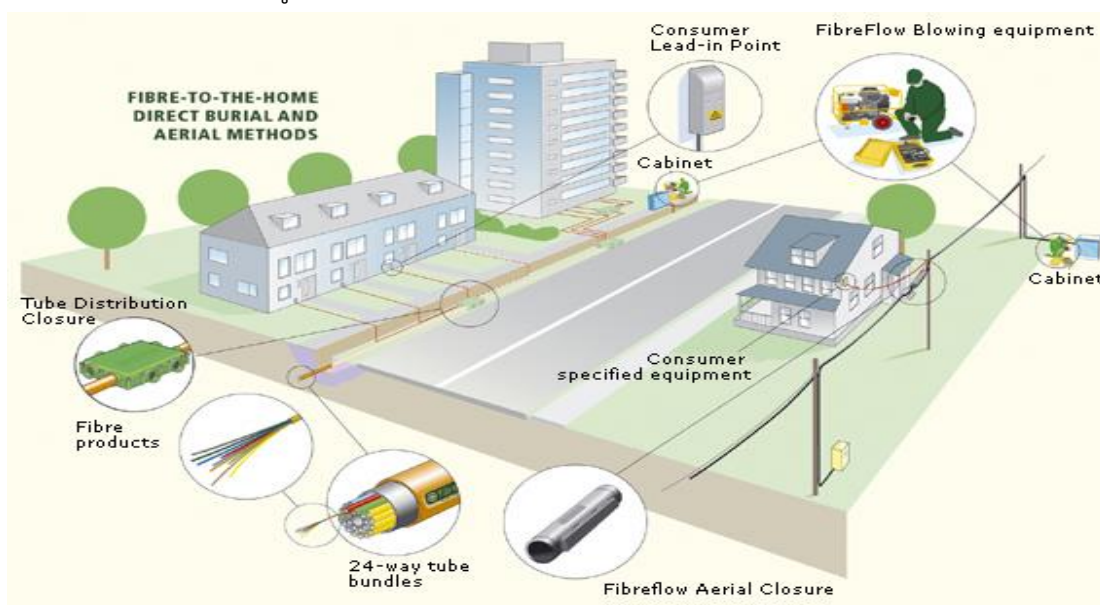
Drop Cable คือ สายส่งที่เชื่อมต่อระหว่าง access terminal และบ้านของผู้ใช้บริการ โดยรูปแบบ และตำแหน่งของสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2-1 [16] และรูปที่ 2-2 [17] ซึ่งเป็นโครงสร้างการวางระบบไฟเบอร์ทูเดอะโฮมของบริษัท BroadbandSoHo และบริษัท CISCO ตามลำดับ



รูปที่ 2-2 บล็อกไดอะแกรมสายส่งที่ใช้ในการวางระบบเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม

จากรูปที่ 2-2 จะเห็นได้ว่าชุมสายหลัก เป็นที่ตั้งของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการจัดการสัญญาณข้อมูลระหว่างโครงข่ายภายนอก (aggregation network) และโครงข่ายบริเวณที่ให้บริการ (serving area) ภายในชุมสายหลักจะมีอุปกรณ์ IP aggregation router OLT และ optical distribution frame (ODF) ซึ่งมีหน้าที่ในการจัดหาเส้นทางการรับและส่งข้อมูลประมวลสัญญาณ ตัดต่อหรือสลับสาย (switching) และอื่น ๆ ตามที่จำเป็น โดยชุมสายหลักจะให้บริการกับผู้บริการในลักษณะของการกระจายสัญญาณไปยังแต่ละชุมชนและจากชุมชนก็กระจายสัญญาณเข้าสู่บ้านผู้ใช้โดยตรงตามลำดับ ดังนั้นสายส่งฟีดเดอร์จึงต้องสามารถส่งสัญญาณปริมาณมากได้ โดยสายส่งฟีดเดอร์จะถูกแยกออกเป็นเส้นทางย่อยเพื่อส่งข้อมูลไปยังชุมชนผ่านข่าย

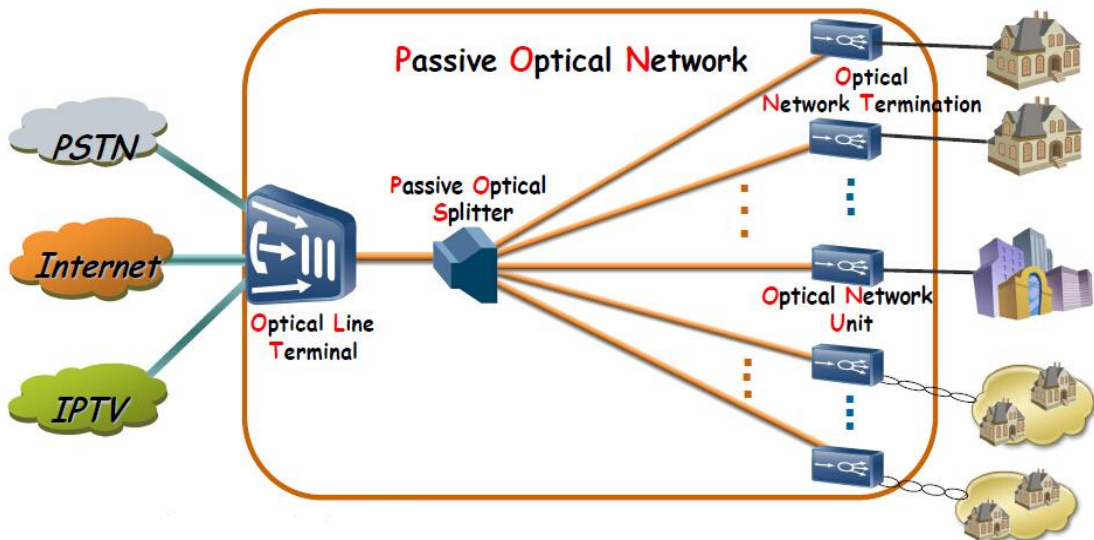
สายส่งข่ายกระจายดิสทริบิวชัน จากนั้นในแต่ละชุมชนหรือกลุ่มผู้ใช้ปลายทาง จะมีตัวแยกข้อมูลส่งผ่านสายส่งเส้นใยแสงไปในแต่ละบ้านโดยเฉพาะ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าการเข้าถึง และสายเคเบิลเส้นใยแสงในส่วนนี้จะถูกเรียกว่า drop cable ซึ่งด้านปลายของเส้นใยแสงที่เข้าไปยังบ้านผู้ใช้บริการจะต่อเข้ากับ ONU หรืออาจเรียกว่า optical network transmission (ONT) มีหน้าที่กระจายสัญญาณทั้งในรูปแบบของสัญญาณแสงและไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ใช้งานซึ่งอาจเป็นโทรศัพท์ โทรทัศน์ โทรสาร หรือเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ทั้งนี้จำนวนอุปกรณ์ใช้งานในบ้านของผู้ใช้ อาจมีได้มากกว่าหนึ่งอุปกรณ์ขึ้นกับปริมาณข้อมูล อัตราการรับส่งข้อมูลที่ใช้บริการ และรูปแบบการให้บริการของผู้ให้บริการ ซึ่งสายส่งเส้นใยแสงอาจใช้รูปแบบการส่งได้ทั้งแบบฝังดินและแบบบนดินที่ร้อยมากับสายโทรศัพท์ ดังแสดงในรูปที่ 2-3 [18]



รูปที่ 2-3 รูปแบบการเชื่อมโยงสายส่งเส้นใยแสง

### 2.1.1 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

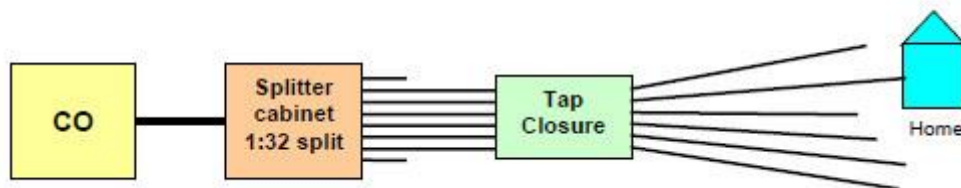
โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ แสดงดังรูปที่ 2-4 [19] OLT ซึ่งตั้งอยู่ในชุมสายของผู้ให้บริการ ทำหน้าที่แปลงสัญญาณระหว่างสัญญาณไฟฟ้าและสัญญาณแสง และยังทำหน้าที่ประสานงานในการ multiplex สัญญาณร่วมกับ ONU ที่ตั้งอยู่ในบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการ นอกจากนี้เพื่อทำให้เส้นใยแสงแต่ละเส้นจาก OLT สามารถเชื่อมต่อกับ ONU ได้มากขึ้นจะมีการนำเอาตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสงมาใช้ในการแยกสัญญาณจาก OLT ไปยังONU โดยตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสงสามารถแยกสัญญาณได้ด้วยอัตราส่วนสูงสุด 1:64 นั่นหมายความว่าเส้นใยแสง 1 เส้นจาก OLT สามารถไปเชื่อมต่อกับ ONU ได้มากที่สุดถึง 64 ONU [3, 4]



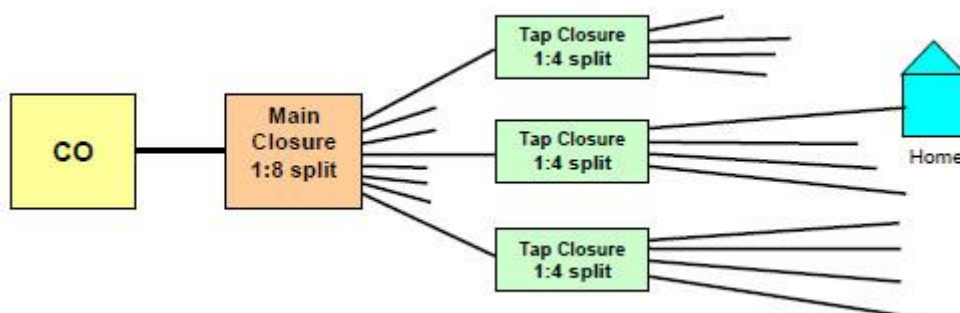
รูปที่ 2-4 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

โครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ เป็นเทคโนโลยีการรับ ส่งข้อมูลปลายทางความเร็วสูง โดยใช้เส้นใยแสงเพียง 1 ชุด เหตุผลสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ คือ เพื่อใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่มีอยู่ให้ได้มากที่สุด ส่งผลให้ค่าบริการถูกลง เนื่องจากทรัพยากรที่สำคัญในการให้บริการรับ ส่งข้อมูลคือ เส้นใยแสง ถึงแม้ราคาของเส้นใยแสงถูกลงมาก แต่การที่จะติดตั้งเพิ่มเติมทำได้ยาก เพราะท่อร้อยสายและเสาไฟฟ้าที่มีอยู่มีพื้นที่จำกัด [20]

โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงเส้นใยแสงจากชุมสายไปยังบ้านผู้ใช้บริการแต่ละหลังโดยตรง ยังมีจำนวนบ้านผู้ใช้เพิ่มขึ้นเท่าไรก็จำเป็นต้องเชื่อมโยงเส้นใยแสงมากขึ้นเท่านั้น รูปแบบการเชื่อมโยงเส้นใยแสงจากชุมสายไปยังบ้านผู้ใช้บริการมีลักษณะเป็นแบบหนึ่งจุดไปสู่หลายจุด ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การเดินสายส่งแบบรวมศูนย์กลาง (centralized splitting) ดังแสดงในรูปที่ 2-5 และการเดินสายส่งแบบกระจาย (distributed splitting) คือ การแยกสายส่งไปยังแต่ละชุมชน ซึ่งแยกไปในลักษณะ 1 สายต่อ 1 ชุมชน และเมื่อไปถึงแต่ละชุมชนเส้นใยแสงจะถูกแบ่งแยกเข้าไปยังบ้านผู้ใช้บริการอีกทีหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2-6



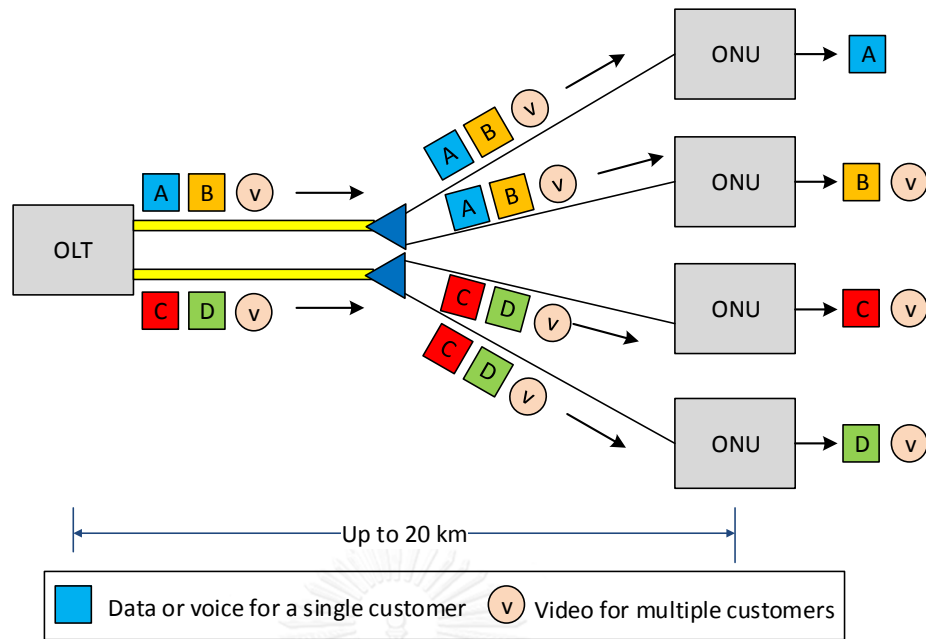
รูปที่ 2-5 การแยกสายส่งสัญญาณแบบรวมศูนย์กลาง



รูปที่ 2-6 การแยกสายส่งสัญญาณแบบกระจาย

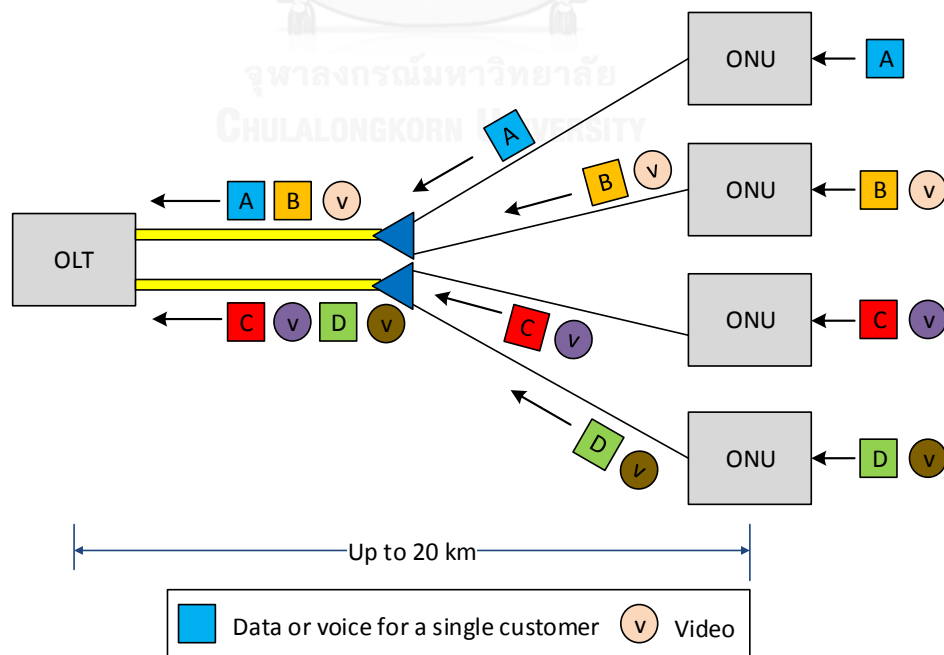
นอกจากนี้โครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟที่ใช้ในเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม สามารถแบ่งประเภทเป็นกลุ่มย่อยได้อีกตามลักษณะของตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสงที่ใช้ในการวางระบบ คือ ตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสงชนิด 1:4 และตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสงชนิด 1:8 ซึ่งนำไปใช้ในการวางระบบทั่วไป ตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสงชนิด 1:16 ซึ่งนำไปใช้ในการวางระบบตามมาตรฐาน EPON และตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสงชนิด 1:32 ซึ่งใช้ในการวางระบบ BPON โดยที่โครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ 1 ชุดจะสามารถรองรับความยาวคลื่นแสงได้สูงสุด 3 ความยาวคลื่นเพื่อใช้ในการรับ ส่งข้อมูลชนิดต่าง ๆ ตัวอย่างการใช้ความยาวคลื่น 3 ความยาวคลื่น คือ ใช้คลื่นแสงที่ยาวคลื่น 1490 nm และ 1310 nm สำหรับสื่อสารข้อมูลเสียง และข้อมูลดิจิทัลที่เป็น data และใช้คลื่นแสงที่ยาวคลื่น 1550 nm สำหรับข้อมูลวิดีโอ สำหรับโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟตามมาตรฐาน GPON

กระบวนการในการสื่อสารข้อมูลในโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ เริ่มต้นจาก OLT รวบรวมข้อมูลในโครงข่ายทั้งหมดว่ามี ONU กี่ตัว ลงทะเบียน กำหนดเลขหมายประจำตัว และจัดสรรช่วงเวลาต่าง ๆ ให้เรียบร้อย จากนั้นจึงเริ่มขบวนการส่งข้อมูลขาลง (downstream) โดย OLT จะส่งข้อมูลไปให้ ONU แบบ broadcast คือทุก ONU จะเห็นข้อมูลเหมือนกันหมด แต่ข้อมูลนั้นมีเลขหมายประจำตัวอยู่ ถ้า ONU เห็นเลขหมายของตัวเอง ก็รับข้อมูลนั้น ถ้าไม่เห็น ก็ไม่รับดังแสดงในรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 รูปแบบการส่งสัญญาณขาของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

ในขณะที่เดียวกันการส่งข้อมูลขาขึ้น (upstream) OLT จะทำงานแบบ TDMA (time division multiple access) คือ OLT จะจัดสรรช่วงเวลาให้แต่ละ ONU เมื่อถึงเวลาที่ถูกกำหนดให้ของ ONU ตัวไหน ONU ตัวนั้นก็ส่งข้อมูล โดยข้อมูลของแต่ละ ONU ก็จะทยอยกันเข้ามาที่ OLT ดังแสดงในรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 รูปแบบการส่งสัญญาณขาขึ้นของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟมีข้อดี คือ ระบบมีความเร็วสูง สามารถสื่อสารข้อมูลขนาดใหญ่มากได้ ระบบนำเชื่อถือ เนื่องจากระบบสายส่งที่เป็นเส้นใยแสง ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมสูง มีอายุการใช้งานนาน และวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแสง เป็นฉนวนไฟฟ้าโดยธรรมชาติ ทำให้ปราศจากปัญหาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลให้ข้อมูลสื่อสารไม่มีสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้ เทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถออกแบบให้ ONU มีระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กรวมทั้งกินไฟต่ำซึ่งเมื่อคิดคำนวณเปรียบเทียบกับระบบ POT ที่ต้องใช้ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากชุมสาย ในขณะที่เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมระบบพลังงานไฟฟ้าจะอยู่ที่บ้านผู้ใช้ ทำให้พลังงานรวมที่เกิดขึ้นในเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมมีค่าน้อยกว่าซึ่งเป็นผลดีกับสภาพเศรษฐกิจของประเทศในระดับมหภาค

### 2.1.2 มาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

หน่วยงานที่แบ่งมาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟมี 2 หน่วยงาน คือ สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (international telecommunication union: ITU) และ institute of electrical and electronics engineers standards association (IEEE-SA) ซึ่งแต่ละหน่วยงาน กำหนดมาตรฐานดังต่อไปนี้

#### 2.1.2.1 มาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟตามข้อกำหนดของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU)

มาตรฐาน ATM passive optical network: APON เป็นข้อกำหนดของมาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟแรกที่ได้รับการออกแบบขึ้นมา เพื่อรองรับการใช้งานในภาคธุรกิจ ที่นำการวางระบบเส้นใยแสงมาใช้บนโปรโตคอล ATM

มาตรฐาน broadband PON: BPON (ITU-T G.983) เป็นมาตรฐานที่ได้รับการพัฒนาต่อยอดจาก APON โดยเพิ่มความสามารถในการรับส่งข้อมูลแบบ WDM เพื่อช่วยเพิ่มแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลจากผู้ให้บริการกลับไปยังโครงข่าย นอกจากนี้ในมาตรฐาน BPON ยังมีการกำหนดจุดเชื่อมต่อมาตรฐานที่มีชื่อว่า ONT management and control interface: OMCI ขึ้นระหว่างอุปกรณ์ OLT กับ ONU เพื่อใช้ในการบริหารจัดการจุดเชื่อมต่อโดยเป็นมาตรฐานกลาง ทำให้ผู้ใช้บริการโครงข่ายสามารถเลือกใช้อุปกรณ์ของผู้ผลิตรายใดก็ได้

มาตรฐาน gigabit PON: GPON (ITU-T G.984) เป็นการพัฒนาอีกขั้นหนึ่งที่สูงกว่า BPON เพื่อรองรับการสื่อสารข้อมูลด้วยอัตราการรับ ส่งข้อมูลที่สูงขึ้นและมีกลไกรักษาความปลอดภัยให้กับข้อมูลที่ดีกว่า อีกทั้งยังมีการกำหนดตัวเลือกในการรับส่งข้อมูล ในระดับชั้นโปรโตคอลชั้นที่ 2 (OSI layer 2 protocol) ได้ทั้งแบบ ATM, GPON encapsulate method: GEM และ ethernet

มาตรฐาน GPON จึงถือเป็นมาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟที่โดดเด่นและมีแนวโน้มในการนำไปใช้งานในเชิงธุรกิจมากที่สุด โดยในช่วงต้น พ.ศ. 2551 ที่ผ่านมามีบริษัท Verizon ผู้ให้บริการโครงข่ายโทรคมนาคมรายใหญ่ในประเทศสหรัฐอเมริกา มีการลงทุนสร้างโครงข่าย GPON โดยมีเป้าหมายวางคู่สายใยแก้วนำแสงไปยังผู้ใช้บริการกว่า 800,000 ครัวเรือน โดยตั้งตารางที่ 2-1 [21] สรุปมาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันตามมาตรฐาน ITU-T

ตารางที่ 2-1 สรุปมาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันตามมาตรฐาน ITU-T

| Type  | Broadband PON<br>(BPON)                                 | GPON (Gigabit-Capable PON)   |   |
|---|---|--|---|
|   |   | GPON   | GPON-ERG  |
| Standard  | ITU-T G 983   | ITU-T G 984  | ITU-T G984.6  |
| Protocol  | ATM   | Ethernet, TDM, TDMA  |   |
| Services  | Voice<br>data, video                                    | Voice data, triple-play<br>file exchange, remote leaning<br>tele-medicine, IPTV, video-on-demand |   |
| Maximum<br>physical<br>distance<br>(OLT to ONU) | 20 km   | 20 km  | Up to 60 km<br>(ODN distance)   |
| Split ratio                                     | up to 32  | up to 64   | 16, 32, 64<br>(restricted by path loss)   |
| Bit rate<br>(Gbps)                              | Downstream<br>0.15/0.6/ Mb/1.25<br>Upstream<br>0.15/0.6 | Downstream<br>1.25/2.5<br>Upstream<br>0.15/0.6/1.25  | Downstream: 2.5<br>Upstream: 1.25   |
| Operating<br>wavelength                         | Downstream<br>1480-1580 nm<br>Upstream<br>1260-1360 nm  | Downstream<br>1480-1500 nm<br>1550-1560 nm<br>(Enhancement<br>band for video)                    | Downstream<br>1480-1500 nm<br>(basic band)<br>1550-1560 nm<br>(Enhancement<br>band for video) |

|  |  |                          |                          |
|--|--|--------------------------|--------------------------|
|  |  | Upstream<br>1260-1360 nm | Upstream<br>1260-1360 nm |
|--|--|--------------------------|--------------------------|

### 2.1.2.2 มาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟตามข้อกำหนดของ IEEE-SA

มาตรฐาน ethernet PON: EPON หรือ GEAPON (IEEE802.3ah) เป็นข้อกำหนดมาตรฐานจากค่าย IEEE ของสหรัฐอเมริกา โดยใช้โปรโตคอลในการรับส่งข้อมูลในรูปแบบการแบ่งเฟรมข้อมูล ซึ่งปัจจุบันข้อกำหนด IEEE 802.3ah ได้รับการบรรจุเป็นส่วนหนึ่งของอนุกรมกำหนด IEEE 802.3 ถือเป็นมาตรฐานที่เป็นคู่แข่งกับมาตรฐาน GPON ของค่ายยุโรปข้อมูลเมื่อปลาย พ.ศ. 2550 พบว่าทั่วโลกมีผู้ใช้บริการโครงข่ายตามมาตรฐาน EPON แล้วถึง 12 ล้านรายและเมื่อพิจารณาถึงแผนการลงทุนวางโครงข่าย EPON ในประเทศจีนซึ่งปัจจุบันกำลังรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว ก็น่าจะประมาณการได้ว่าภายในสิ้นปี พ.ศ.2551 ทั่วโลกจะมีผู้ใช้บริการเทคโนโลยี EPON มากถึงเกือบ 20 ล้านราย

มาตรฐาน 10 gigabit ethernet PON: 10GEAPON (IEEE 802.3av) เป็นมาตรฐานที่กำลังได้รับการพัฒนาต่อยอดจาก EPON โดยมีหลักการ คือ มุ่งออกแบบให้มีการแยกลำแสงที่ส่งภายในเส้นใยแสง เพื่อให้ผู้ใช้บริการสามารถแยกการรับข้อมูลด้วยอัตราเร็ว 10 Gbps และ 1 Gbps ออกจากกันขณะนี้อยู่ในระหว่างการวางข้อกำหนดโดยตารางที่ 2-2 [22] สรุปมาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟที่ตามมาตรฐาน IEEE

ตารางที่ 2-2 สรุปมาตรฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟตามมาตรฐาน IEEE

| Type   | Ethernet PON<br>(EPON)                       | Ethernet PON (EPON)<br>10G-EPON   |
|--|--|---|
| Standard                                     | IEEE 802.3ah                                 | IEEE 802.3av  |
| Protocol                                     | Ethernet                                     | Ethernet  |
| Services                                     | Triple-play                                  | Voice, data, triple-play<br>file exchange<br>distance learning<br>tele- medicine, IPTV<br>video-on-demand |
| Maximum physical<br>distance<br>(OLT to ONU) | 1000BASE-PX10: 10 km<br>1000BASE-PX20: 20 km | PRX10-PR10: 10 km<br>PRX20-PR20: 20 km<br>PRX30-PR20: 20 km   |



| Type                   | Ethernet PON<br>(EPON)                                    | Ethernet PON (EPON)<br>10G-EPON                          |
|------------------------|---|--|
| Split ratio            | up to 1:16  | up to 1:32   |
| Asymmetric<br>bit rate | Downstream: 1 Gbps<br>Upstream: 1 Gbps                    | Downstream: 10 Gbps<br>Upstream: 1.25 Gbps               |
| Symmetric<br>bit rate  |   | Downstream: 10 Gbps<br>Upstream: 10 Gbps                 |
| Operating wavelength   | 1000BASE-PX10<br>Downstream: 1490 nm<br>Upstream: 1300 nm | Downstream: 1577 -2, +3 nm<br>Upstream: 1270 -10, +10 nm |

การแข่งขันระหว่างมาตรฐานยุโรป (GPON) และมาตรฐานสหรัฐอเมริกา (GEAPON) ของมาตรฐานโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ ถือเป็นฉากหนึ่งของการชิงการเป็นผู้นำโลกโทรคมนาคม ในปัจจุบันเทคโนโลยี GPON ได้รับความนิยมในการใช้งานในภาคพื้นตะวันตกเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ภูมิภาคเอเชียนิยมใช้เทคโนโลยี GEAPON อย่างไรก็ตาม ทั้ง 2 เทคโนโลยีนี้ยังถือเป็นเพียงจุดเริ่มต้นของการพัฒนาข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับเทคโนโลยี PON ซึ่งกล่าวได้ว่าทั้งคู่ล้วนเป็นเทคโนโลยีที่มีการทำงานแบบ time division multiplex: TDM หรืออาจเรียกได้ว่าทั้ง GPON และ GEAPON เป็นเทคโนโลยีที่มีการทำงานแบบ TDM-PON ในขณะที่โลกของการพัฒนาเทคโนโลยีโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟนั้น ยังมีการพัฒนาเทคนิคการรวมส่วนข้อมูลในรูปแบบอื่นๆ อีกเช่น data over cable service interface specification-PON: WDM-PON, DOCSIS-PON หรือ radio frequency over glass: D-PON/DPON, RF-PON รวมถึง hybrid-fiber-coax PON: HFC-PON ซึ่งเป็นทางเลือกใหม่ในการเพิ่มขยายขีดความสามารถในการให้บริการไฟเบอร์ทูเดอะโฮมต่อไปในอนาคต ที่แสดงถึงระบบที่มีความเร็วข้อมูลจากโครงข่ายสู่ผู้ใช้บริการเปลี่ยนแปลงได้ระหว่าง 100 Mbps – 1 Gbps ในขณะที่ความเร็วข้อมูลขาขึ้นมีค่าไม่เกิน 100 Mbps นอกจากนี้เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม ยังสามารถกำหนดให้ความยาวคลื่นแสงที่เป็นคลื่นพาห้ (carrier) ระหว่างการส่งข้อมูลขาลงและขาขึ้นมีค่าแตกต่างกันหรือใช้ความยาวคลื่นเดียวกันก็ได้ โดยตารางที่ 2-3 [21] สรุปมาตรฐาน next generation PON technology

ตารางที่ 2-3 สรุปมาตรฐาน next generation PON technology

| Type   | Gigabit-Capable PON<br>(GPON) 10G-PON   | WDM PON   |
|--|---|---|
| Standard                                     | ITU-T G.987   | Non at the moment   |
| Protocol                                     | Ethernet, TDM, TDMA   | TBC   |
| Services                                     | Voice, data, triple-play<br>file exchange<br>distance learning<br>tele- medicine, IPTV<br>video-on-demand | Voice, data, triple-play<br>file exchange<br>distance learning<br>tele- medicine, IPTV<br>video-on-demand |
| Maximum physical<br>distance<br>(OLT to ONU) | 20 km   | TBC   |
| Split ratio                                  | up to 1:64  | TBC up to 1:32  |
| Asymmetric<br>bit rate                       | Downstream: 10 Gbps<br>Upstream: 2.5 Gbps   | Downstream<br>virtually no limits   |
| Symmetric<br>bit rate                        | Downstream: 10 Gbps<br>Upstream: 10 Gbps  | Upstream<br>virtually no limits   |
| Operating wavelength                         | Downstream: 1577 -2, +3 nm<br>Upstream: 1270 -10, +10 nm  | TBC<br>eg.,DWDM in C band   |

### 2.1.3 ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีแบบมีสายประเภทอื่น

เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม เป็นเทคโนโลยีที่สามารถให้บริการด้วยอัตราการรับและส่งข้อมูลความเร็วสูง เนื่องจากสายส่งเส้นใยแสงมีคุณสมบัติเสมือนเป็นท่อส่งสัญญาณที่มีขนาดใหญ่มาก ดังนั้นสายส่งเส้นใยแสงจึงสามารถสื่อสารสัญญาณข้อมูลปริมาณมากได้ดีกว่าสายส่งแบบอื่น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความเร็วในการสื่อสารข้อมูลกับรายการให้บริการซึ่งอาจสูงกว่าระบบ xDSL ไม่มาก จะพบว่าค่าใช้จ่ายต่อหน่วยข้อมูลจะถูกกว่าระบบที่ใช้ไฟฟ้าเป็นสื่อสัญญาณมาก

เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมเป็นเทคโนโลยีที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากสายส่งเส้นใยแสงที่ทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าโดยธรรมชาติทำให้ไม่เกิดปัญหาการเหนี่ยวนำจาก

สนามแม่เหล็กไฟฟ้า จึงไม่เกิดการรบกวนสัญญาณหรือลบลบสัญญาณเหมือนระบบเชิงไฟฟ้าทั่วไป นอกจากนี้เส้นใยแสงยังทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมสูงและไม่เป็นสนิม ทำให้เส้นใยแสงมีอายุการใช้งานนานกว่าเมื่อเทียบกับสายโลหะ ซึ่งในการใช้งานจริงวัสดุที่เป็นเปลือกหุ้มเส้นใยในลักษณะของสายเคเบิลอาจสึกกร่อนไปก่อนตัวเส้นใยแสงเอง แต่อย่างไรก็ตามเคเบิลเส้นใยแสงมักมีอายุการใช้งานอย่างน้อย 50 ปีขึ้นไป ซึ่งนานพอที่จะทำให้ผู้ใช้เกิดความมั่นใจในการใช้งาน

ในปัจจุบันสามารถออกแบบให้ ONU มีระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กรวมทั้งกินไฟต่ำ ซึ่งเมื่อคิดคำนวณเปรียบเทียบกับระบบ POT ที่ต้องใช้ระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากชุมสาย ในขณะที่เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม ระบบพลังงานไฟฟ้าจะอยู่ที่บ้านผู้ใช้ กลายเป็นว่าพลังงานรวมที่เกิดขึ้นในเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม กลับมีค่าน้อยกว่าซึ่งเป็นผลดีกับสภาพเศรษฐกิจของประเทศในระดับมหภาค

นอกจากนี้เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม ใช้เส้นใยแสงเป็นสายส่งสัญญาณส่งไปยังบ้านของผู้ใช้ผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่าONU ซึ่งจะติดตั้งอยู่ภายในบ้านของผู้ใช้บริการ ONU นี้ทำหน้าที่กระจายสัญญาณซึ่งส่วนใหญ่เป็นสัญญาณไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ปลายทางที่อยู่ในบ้านเช่น คอมพิวเตอร์โทรศัพท์หรือโทรทัศน์เป็นต้นเนื่องจากสายส่งสัญญาณที่ต่อเข้ากับ ONU เป็นเส้นใยแสงทำให้ไม่มีส่วนของตัวนำเชื่อมต่อเหมือนระบบโทรศัพท์ทำให้ช่วยลดแรงไฟกระชาก (electrical surge) ที่อาจเกิดจากฟ้าผ่าและการเหนี่ยวนำไฟฟ้า

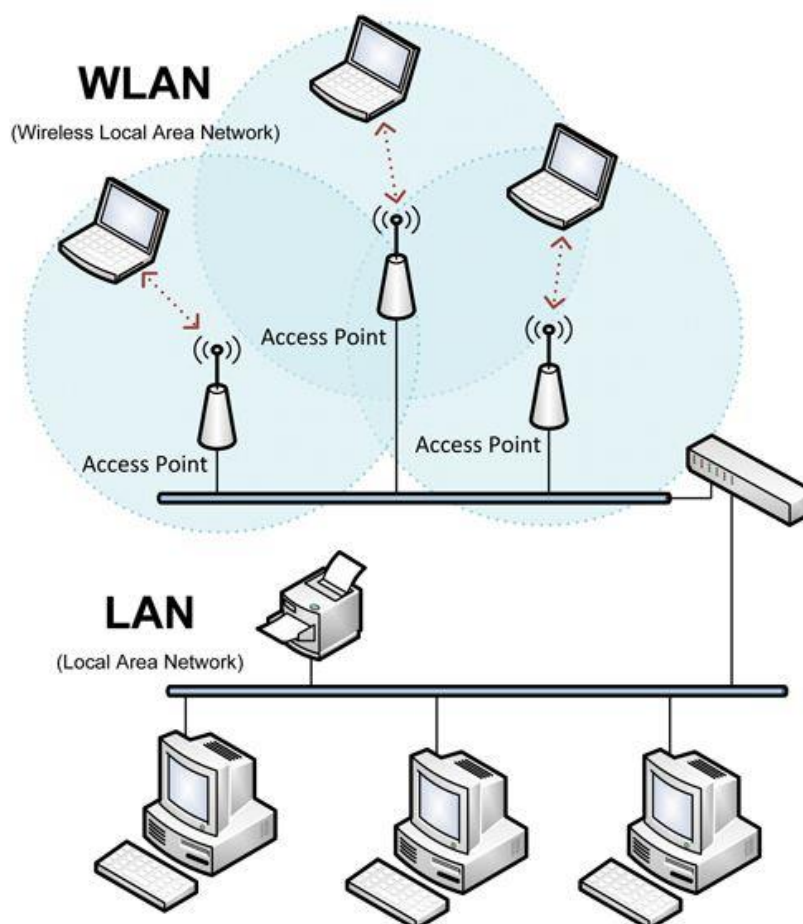
ในระบบโทรศัพท์ที่ใช้สายทองแดงแบบเดิม มีข้อดีตรงที่ระบบยังคงใช้งานได้เมื่อไฟดับเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ทำให้ระบบทำงานมาจากชุมสายโทรศัพท์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าที่ใช้ภายในบ้านแต่ในเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม อุปกรณ์ ONU ติดตั้งอยู่ภายในบ้านของผู้ใช้ถือเป็นอุปกรณ์ประเภท active ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าประกอบกับเส้นใยแสงไม่สามารถนำพลังงานไฟฟ้าได้เหมือนระบบสายโทรศัพท์ทองแดงจึงจำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานไฟฟ้าเฉพาะสำหรับ ONU นอกจากนี้ ONU ควรมีแบตเตอรี่สำรองเพื่อสามารถทำงานได้แม้ไฟดับทำให้ระบบต้องมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งหรือ installed first costs: IFC และค่าใช้จ่ายตลอดการใช้งาน life-cycle costs: LCC เพิ่มขึ้น

## 2.2 เทคโนโลยีไร้สายแลน

เทคโนโลยีไร้สายแลน คือ เทคโนโลยีโครงข่ายเข้าถึงแบบไร้สาย ที่เชื่อมโยงอุปกรณ์ตั้งแต่สองตัวขึ้นไปเข้าด้วยกัน โดยใช้คลื่นวิทยุแบบกระจายความถี่ (orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) เป็นตัวกลางในการสื่อสารสัญญาณ ซึ่งอุปกรณ์แต่ละตัวจะต้องมี AP เพื่อเชื่อมต่อเข้าไปยังโลกอินเทอร์เน็ต ซึ่งผู้ใช้บริการเทคโนโลยีไร้สายแลนจะสามารถนำพาหรือเคลื่อนย้ายอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ UE ไปยังพื้นที่ใดก็ได้ที่สัญญาณของเทคโนโลยีไร้สายแลนครอบคลุมถึงอุปกรณ์ของเทคโนโลยีไร้สายแลน ที่ทันสมัยส่วนใหญ่จะมีพื้นฐานมาจากมาตรฐาน IEEE 802.11 ที่ถูกวางตลาดภายใต้ชื่อแบรนด์ Wi-Fi [21]

### 2.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีไร้สายแลน

เทคโนโลยีไร้สายแลนประกอบด้วยองค์ประกอบพื้นฐาน 4 ส่วน คือ



รูปที่ 2-9 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีไร้สายแลนที่เชื่อมต่อกับเทคโนโลยีแบบมีสาย

สถานี (station: STA) คือ อุปกรณ์ทุกตัวที่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับตัวกลางไร้สายในเครือข่ายได้ ซึ่งทุกสถานีจะมีตัวควบคุมระบบติดต่อประสานเครือข่ายไร้สาย (wireless network interface controller: WNIC) สถานีแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ [23]

- AP ทำหน้าที่เป็นสถานีฐานของโครงข่าย (base station: BS) ซึ่งจะทำหน้าที่รับและส่งคลื่นความถี่วิทยุเพื่อสื่อสารกับเครื่องลูกข่ายแบบไร้สาย

- เครื่องลูกข่ายแบบไร้สาย เช่น แล็ปท็อป สมาร์ทโฟน แท็บเล็ต เป็นต้น

เซตบริการพื้นฐาน (basic service set: BSS) คือเซตของสถานีทุกสถานีที่สามารถสื่อสารกันได้ ทุกเซตบริการพื้นฐานจะมีหมายเลขกำกับ (BSSID) ซึ่งก็คือ MAC Address ของ AP ที่ให้บริการในเซตบริการพื้นฐาน โดยเซตบริการพื้นฐาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

- เซตบริการพื้นฐานอิสระ (independent BSS) คือ เครือข่ายเฉพาะกิจ (ad-hoc network) กล่าวคือลูกข่ายทุกเครื่องจะสามารถติดต่อกันเองได้โดยไม่ต้องสื่อสารผ่าน AP

- เซตบริการพื้นฐานโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure BSS) ลูกข่ายทุกเครื่องจะต้องสื่อสารกันผ่าน AP เท่านั้น

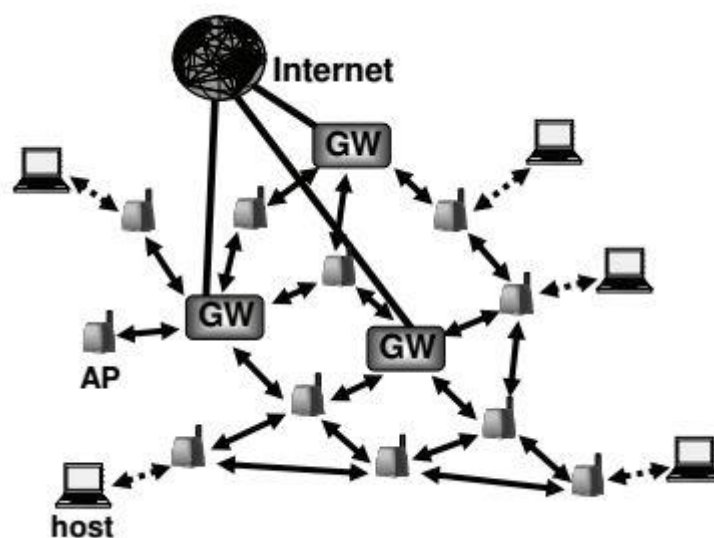
เซตบริการขยาย (extended service set: ESS) คือ ชุดของ BSS ที่เชื่อมต่อกัน โดยที่ AP ในชุดหนึ่งของ ESS จะมีการเชื่อมต่อกันแบบแจกแจง (distribution system) โดยแต่ละ ESS จะมีรหัสเรียกว่า SSID หรือชื่อเครือข่ายซึ่งมีความยาวสูงสุด 32 ไบต์

ระบบการแจกแจงแบบกระจาย คือ การเชื่อมต่อ AP หลายตัวในชุดของ ESS เข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มระยะครอบคลุมเครือข่ายผ่านบริการโรมมิ่งระหว่างหลายเซลล์ โดย DS อาจเป็นแบบใช้สายหรือไร้สายก็ได้ ในปัจจุบันระบบการกระจายไร้สายส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับโปรโตคอล wireless distribution system (WDS) หรือ โปรโตคอลแบบโครงข่ายไร้สายชนิดตาข่าย (wireless mesh network: WMN) โดยโครงสร้างการนำเทคโนโลยีไวร์เลสแลนด์แสดงดังรูปที่ 2-9 [23]

## 2.2.2 โครงข่ายไร้สายชนิดตาข่าย

โครงข่ายไร้สายชนิดตาข่าย เป็นโครงข่ายที่มีพื้นฐานมาจากเทคโนโลยีไวร์เลสแลนด์ที่เชื่อมโยงกันแบบ ad hoc ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักคือ อุปกรณ์ของผู้ให้บริการ mesh node และ gateway แสดงดังรูปที่ 2-10 [24] โดยส่วนของอุปกรณ์ของผู้ให้บริการ เช่น คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก สมาร์ทโฟน แท็บเล็ตและอุปกรณ์ที่สามารถเชื่อมต่อกับสัญญาณไร้สายแบบอื่น ๆ เป็นต้น mesh node เชื่อมโยงกันแบบ multi-point to multi-point หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า mesh ซึ่งมีรูปแบบเป็นเป็นตาข่ายแบบแมงมุม ทำหน้าที่ในการรับหรือส่งผ่านข้อมูลจากผู้ให้บริการไปสู่ผู้ใช้บริการ และรับหรือส่งผ่านข้อมูลจากผู้ให้บริการไปสู่ผู้ใช้บริการ และส่วน gateway ซึ่งมีหรือไม่มีก็ได้ทำหน้าที่ในการ

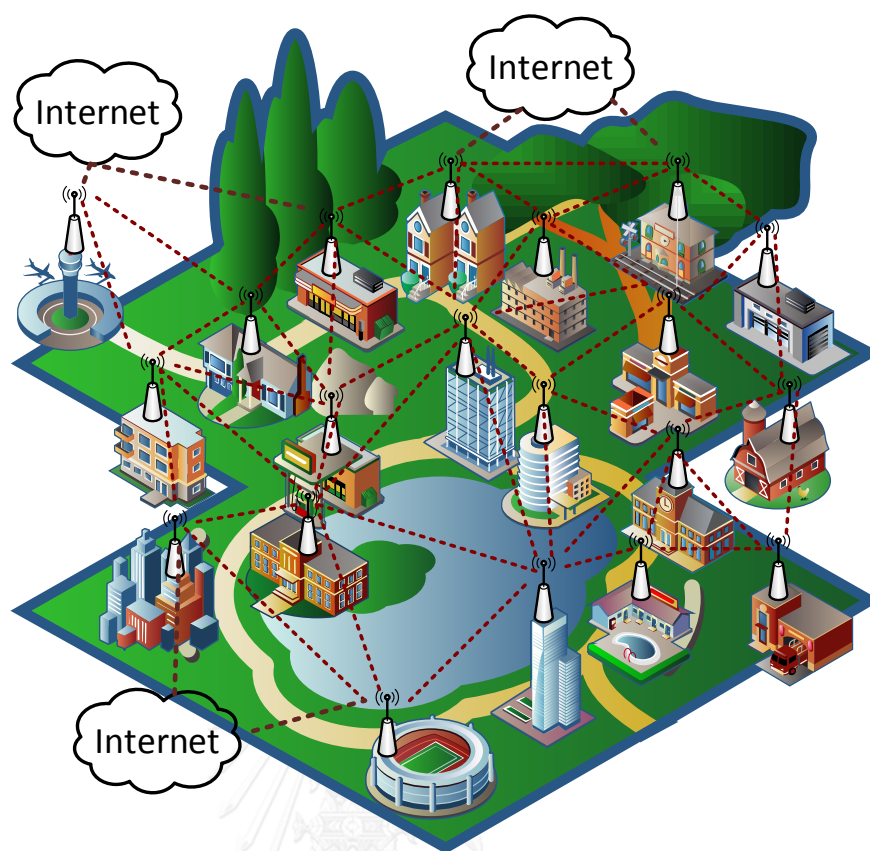
แปลงสัญญาณไร้สายเป็นสัญญาณไฟฟ้าในกรณีที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายมีสายเพื่อเชื่อมโยงกับโครงข่ายภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 2-11 เพื่อสร้างโครงข่ายไร้สายชนิดตาข่าย mesh node จะเชื่อมต่อกับ mesh node ข้างเคียง นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมต่อกันได้ในรูปแบบของ multi-hop wireless mesh network ได้อีกด้วยเนื่องจากแต่ละ mesh node สามารถเชื่อมโยงถึงกันได้ นอกจากนี้ mesh node ยังทำหน้าที่เป็น repeater ส่งข้อมูลผ่านตัว mesh node ไปยังจุดหมายที่ต้องการได้อีกด้วย [25]



รูปที่ 2-10 โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายไร้สายชนิดตาข่าย

ซึ่งโครงข่ายไร้สายชนิดตาข่ายมีข้อดีคือ

1. ใช้ระบบสายน้อยลง นั่นหมายถึงต้นทุนน้อยลงโดยเฉพาะเมื่อต้องการวางระบบเน็ตเวิร์กที่ครอบคลุมเนื้อที่กว้าง
2. การใช้จำนวน mesh node ที่เพิ่มขึ้นหมายถึงความเร็วในการส่งข้อมูลภายในมากขึ้น
3. สะดวก โดยเฉพาะในกรณีที่การวางสายบางครั้งเป็นเรื่องลำบาก เช่น ในสนามกีฬาขนาดใหญ่ โรงงาน การคมนาคม
4. เหมาะอย่างยิ่งสำหรับในบางสถานที่ ที่ในบางครั้งสัญญาณจะถูกบล็อก
5. โครงข่ายนี้สามารถ “ปรับตัวเองได้” คือรู้จัก mesh node ตัวใหม่ได้เองอัตโนมัติ
6. สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ ในกรณีที่ mesh node บางตัวชำรุดเสียหาย โดยการค้นหาเส้นทางใหม่ผ่าน mesh node ข้างเคียง
7. สามารถติดตั้งและขยายได้ง่าย



รูปที่ 2-11 โครงข่ายไร้สายชนิดตาข่าย

### 2.2.3 มาตรฐานของเทคโนโลยีไร้สายแลนด

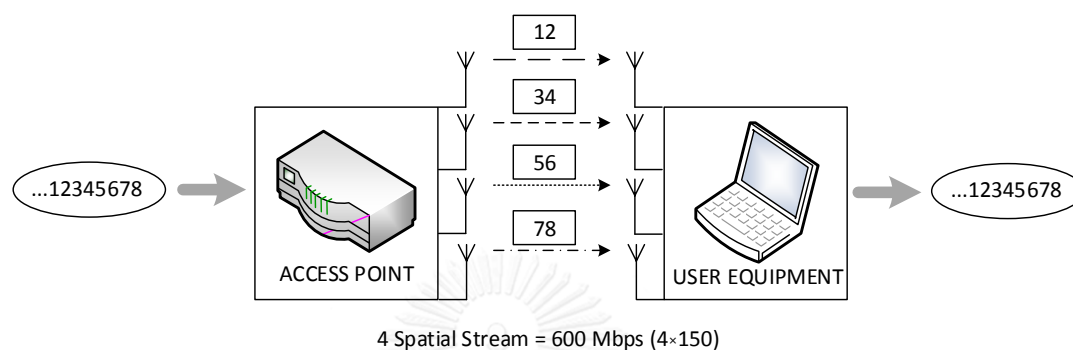
ตารางที่ 2-4 วิธีการโมดูเลต อัตราเร็ว ระยะให้บริการ และความถี่ ตามมาตรฐานไวร์เลสแบบต่างๆ

| มาตรฐาน      | วิธีการโมดูเลต | อัตราเร็ว | ระยะให้บริการ | ความถี่   |
|--------------|----------------|-----------|---------------|-----------|
| IEEE 802.11n | MIMO-OFDM      | 600 Mbps  | 100 m         | 2.4/5 GHz |
| IEEE 802.11a | OFDM           | 54 Mbps   | 30 m          | 5 GHz     |
| IEEE 802.11b | DSSS           | 11 Mbps   | 100 m         | 2.4 GHz   |
| IEEE 802.11g | OFDM           | 54 Mbps   | 100 m         | 2.4 GHz   |

มาตรฐาน IEEE 802.11n มีความเร็วสูงสุด 600 Mbps ซึ่งมีการพัฒนาจากมาตรฐานเดิมที่ใช้การรับและส่งสัญญาณจากเสาอากาศเพียงต้นเดียวหรือเรียกว่าวิธี ฮาล์ฟดูเพลกซ์ (Half-Duplex) เป็นการใส่เสาอากาศหลายต้นในการรับและส่งข้อมูลโดยส่งผ่าน 4 Stream ซึ่งประกอบไปด้วยเสาอากาศ 4 ชุด ทั้งภาครับและภาคส่ง แต่ละ Stream จะมีความเร็วสูงสุด 150 Mbps สามารถใช้งานได้

ทั้งย่านความถี่ 2.4 และ 5 GHz และสามารถเลือกใช้ช่องสัญญาณได้ทั้งขนาด 40 และ 20 MHz แสดงดัง

รูปที่ 2-12 ซึ่งสามารถให้บริการด้วยอัตราเร็วที่เร็วกว่า LAN แบบมีสายที่มาตรฐาน 100 BASE-TX นอกจากนี้ยังมีระยะพื้นที่ให้บริการกว้างขึ้นโดยเทคโนโลยีที่ 802.11n นำมาใช้ก็คือ เทคโนโลยี MIMO-OFDM [26]



รูปที่ 2-12 การรับส่งข้อมูลผ่านเสาอากาศ 4 ชุดตามมาตรฐาน IEEE 802.11n

#### 2.2.4 ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีไร้สายแลนเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีใช้สายทั่วไป

ผู้ให้บริการเทคโนโลยีไร้สายแลนสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายได้ทุกที่ทุกเวลาภายในพื้นที่ที่สัญญาณของระบบครอบคลุมถึง

ผู้ให้บริการเทคโนโลยีไร้สายแลนสามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้เอง (simple & quick installation) เพราะเทคโนโลยีไร้สายแลนเป็นเทคโนโลยีที่ใช้งานในลักษณะ plug & play กล่าวคือผู้ให้บริการไม่จำเป็นต้องติดตั้งสายเคเบิลให้เกิดความยุ่งยากและวุ่นวาย

เทคโนโลยีไร้สายแลนสามารถแพร่กระจายสัญญาณ เพื่อให้บริการในบริเวณที่ยากต่อการวางระบบได้ (reach difficult area)

แม้ว่าค่าใช้จ่ายในการลงทุนเพื่อวางระบบของเทคโนโลยีไร้สายแลนจะค่อนข้างสูงในขั้นแรก แต่ถ้านับรวมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งใช้งานทั้งระบบ ค่าบำรุงรักษา อายุการใช้งานของอุปกรณ์ รวมถึงค่าใช้จ่ายในกรณีต้องการขยายจำนวนของผู้ใช้งานในอนาคตแล้วนั้นจะถือว่า เทคโนโลยีไร้สายแลนนั้นเป็นเทคโนโลยีที่ไม่แพงเลย (reduce future cost)

เทคโนโลยีไร้สายแลน เป็นเทคโนโลยีที่สามารถกำหนดและปรับเปลี่ยนรูปแบบในการใช้งานได้หลากหลายรูปแบบตามแต่ที่เราจะนำไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับแอปพลิเคชันได้ตามต้องการ (scalability)



## 2.3 เทคโนโลยีอีวอร์แบน

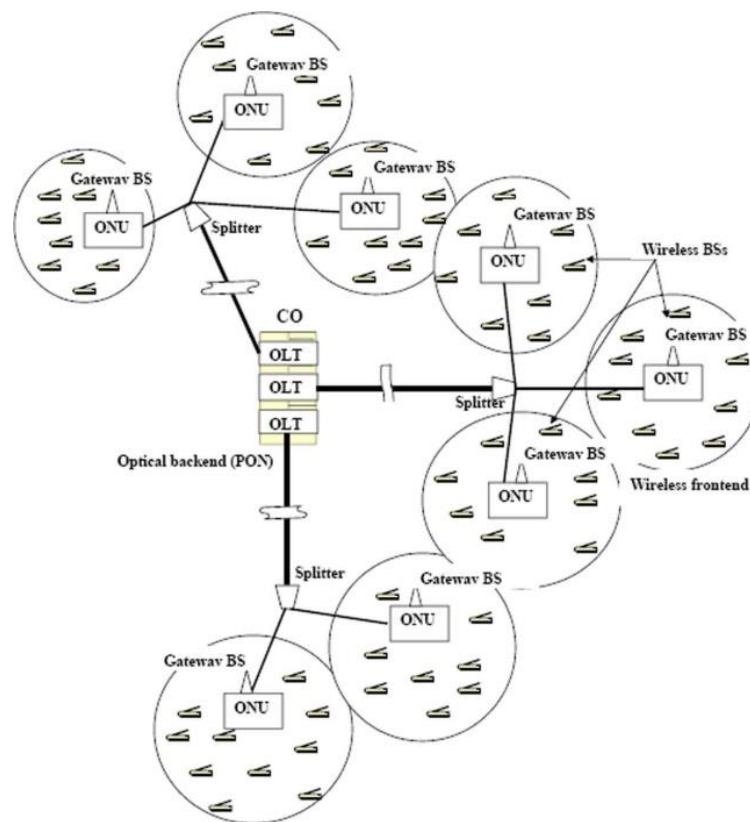
เทคโนโลยีอีวอร์แบน คือ หนึ่งในเทคโนโลยีสำหรับโครงข่ายแบบเข้าถึงในอนาคตที่น่าสนใจ ในที่นี้เป็นเพราะการเชื่อมโยงสายส่งเส้นใยแสงจากชุมสายหลักไปถึงแต่ละบ้านของผู้ใช้บริการโดยตรง จะต้องใช้ต้นทุนในการวางระบบที่สูงมาก ในขณะที่เดียวกันก็ไม่สามารถวางระบบด้วยเทคโนโลยีไวร์เลสแลนดจากชุมสายหลักไปสู่บ้านผู้ใช้บริการแต่ละหลังโดยตรงได้เนื่องจากปริมาณแบนด์วิดท์และจำนวนช่องสัญญาณมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นเทคโนโลยีอีวอร์แบนจึงเกิดจากแนวความคิดที่จะเชื่อมโยงเส้นใยแสงจากชุมสายหลักไปให้ถึงผู้ใช้บริการมากที่สุดและหลังจากนั้นจะแพร่กระจายสัญญาณด้วยเทคโนโลยีไร้สาย ซึ่งเป็นวิธีการผสมผสานที่น่าสนใจ เนื้อหาต่อไปจะกล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีอีวอร์แบน รูปแบบที่ใช้ในการรับ ส่งข้อมูล รวมไปถึงข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีอีวอร์แบนเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมและเทคโนโลยีไวร์เลสแลนด

### 2.3.1 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีอีวอร์แบน

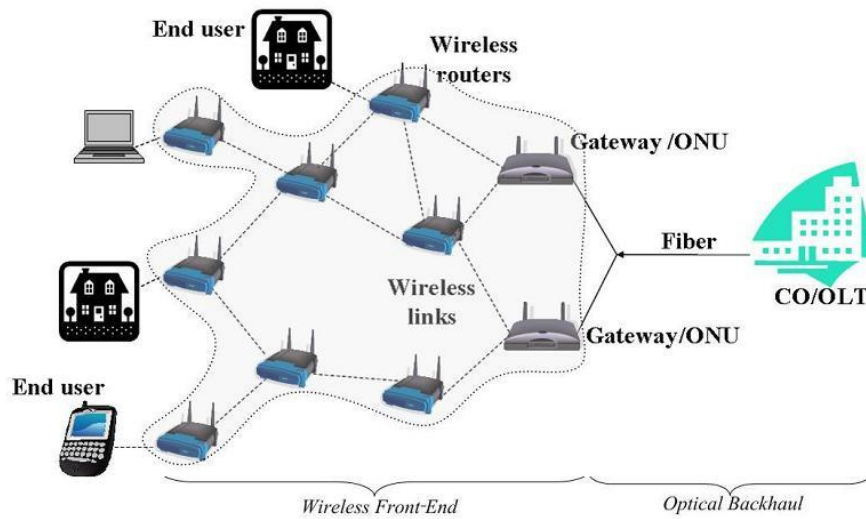
โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีอีวอร์แบนที่น่าข้อดีของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมในแง่ของความน่าเชื่อถือ ความมีเสถียรภาพ และปริมาณแบนด์วิดท์ที่สูง มารวมกับข้อดีของเทคโนโลยีไวร์เลสแลนดในแง่ของความยืดหยุ่น คือ ผู้ใช้บริการสามารถเข้าถึงบริการได้ทุกที่ทุกเวลา และต้นทุนในการวางระบบที่คุ้มค้ำคุ้มราคามารวมกัน

โครงสร้างของเทคโนโลยีอีวอร์แบนแสดงดังรูปที่ 2-13 และรูปที่ 2-14 ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลัก (back end) และส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการ (front end) ในส่วนโครงข่ายหลักจะให้บริการด้วยเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ แต่ละชุดของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟจะถูกควบคุมดูแลจัดการที่ชุมสายหลัก (CO) ที่ OLT แต่ละตัวของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟชุดนั้นตั้งอยู่เรียกว่าส่วน head end ในขณะที่เดียวกันอีกฝากหนึ่งของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ คือ ส่วน tail end จะเชื่อมต่อกับแต่ละ ONU ที่จะให้บริการกับผู้ใช้บริการ (end-user) ตามรูปแบบโครงสร้างของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ แต่สำหรับเทคโนโลยีอีวอร์แบน ONU จะเชื่อมต่อกับ wireless BS เพื่อกระจายสัญญาณไร้สายให้กับส่วนผู้ใช้บริการในเทคโนโลยีอีวอร์แบน โดย wireless BS ที่เชื่อมต่อกับ ONU โดยตรงจะถูกเรียกว่า “gateway router” ซึ่งทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมโยงระหว่างเทคโนโลยีเชิงแสงและเทคโนโลยีไร้สาย โดยข้าง ๆ กับ gateway router ที่ส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการจะประกอบไปด้วย wireless router/BS ตัวอื่นเพื่อที่จะจัดการกับโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเป็นแบบ multihop wireless mesh network with several wireless routers and a few gateways (to connect to the ONUs and, consequently, to the rest of

the Internet through OLTs/CO) โดยส่วนที่เป็นสัญญาณไร้สายของเทคโนโลยีวีรแบนสามารถนำเอาเทคโนโลยีพื้นฐาน เช่น WiFi WiMax หรือ LTE มาใช้งานก็ได้ เนื่องจาก ONU จะถูกนำมาวางในตำแหน่งที่ไกลจากชุมสายหลัก ดังนั้น efficient spectrum reuse can be expected across the BS (จึงสามารถถูกคาดหวังผ่าน BS) with much smaller range but with much higher bandwidth; thus, this WOBBAN can potentially support a much larger user base with high bandwidth needs



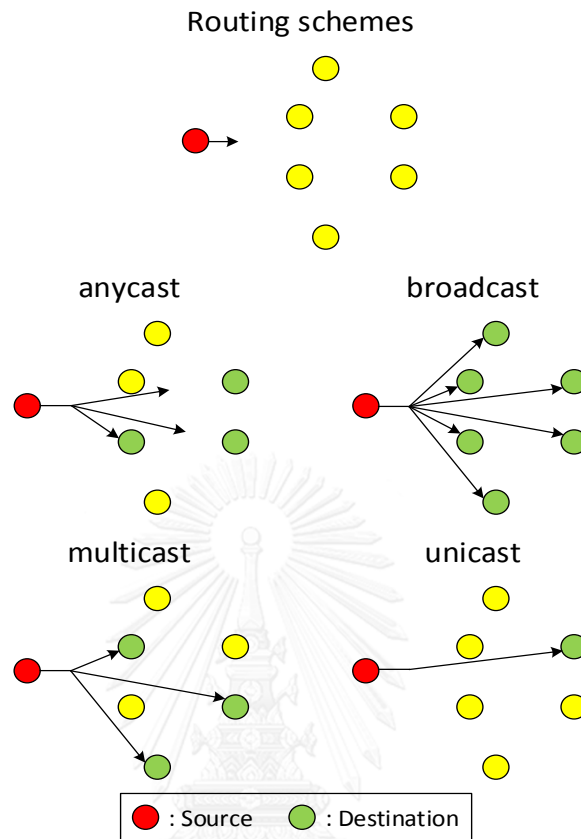
รูปที่ 2-13 รูปแบบการวางโครงข่ายของเทคโนโลยีวีรแบน



รูปที่ 2-14 โครงสร้างการให้บริการวอร์แบน

ในโครงสร้างเทคโนโลยีวอร์แบนต้นฉบับ ผู้ใช้บริการ (end-users) เช่น ผู้ใช้บริการด้วยอุปกรณ์ไร้เลสที่บ้านแต่ละหลัง จะถูกทำให้กระจายกระจายตามพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ ซึ่งผู้บริการแต่ละคนจะส่งข้อมูลแพ็คเกจ (data packet) ไปสู่หนึ่งในจำนวนไวร์เลสเร้าเตอร์ที่อยู่ข้างเคียง (neighborhood wireless router) โดยไวร์เลสเร้าเตอร์ตัวที่รับข้อมูลมาจะเพิ่มข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายไวร์เลสแลนดของเทคโนโลยีวอร์แบน (inject the packet into the wireless mesh) ข้อมูลแพ็คเกจจะเข้าไปเดินทางใน (travel through) โครงข่ายสื่อสาร และเป็นไปได้ว่าจะเดินทางผ่านหลาย ๆ hop (possibly over multiple hops) เพื่อเดินทางไปถึง gateway ตัวใดตัวหนึ่งในโครงข่ายเพื่อเชื่อมโยงข้อมูลเข้าสู่ ONU และสุดท้ายจะส่งข้อมูลผ่านส่วนเส้นใยแสง (optical path) ของโครงข่ายวอร์แบนเพื่อเข้าสู่ OLT/CO ต่อไป

### 2.3.2 รูปแบบการรับและส่งข้อมูลภายในโครงข่ายของเทคโนโลยีวีอาร์แบน



รูปที่ 2-15 รูปแบบการหาเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทาง

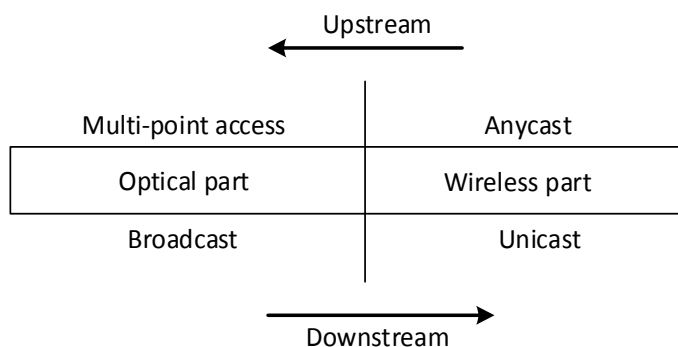
รูปแบบการหาเส้นทางเพื่อส่งข้อมูล (routing scheme) จากต้นทาง (source) แสดงด้วยสัญลักษณ์วงกลมสีแดงไปยังปลายทาง (destination) แสดงด้วยสัญลักษณ์วงกลมสีเขียวดังแสดงในรูปที่ 2-15 มี 4 รูปแบบพื้นฐานดังนี้

Anycast คือ การส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังกลุ่มของโหนดปลายทางที่อยู่ข้างเคียง โดยส่วนมากจะเลือกเส้นทางที่โหนดปลายทางที่อยู่ใกล้โหนดต้นทางมากที่สุด

Broadcast คือ การส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดทุกโหนดในโครงข่าย

Multicast คือ การส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางทุกโหนดที่ต้องการข้อมูล

Unicast คือ การส่งข้อมูลจากโหนดต้นทางไปยังโหนดปลายทางที่ถูกกำหนดไว้เพียงโหนดเดียว



รูปที่ 2-16 รูปแบบการส่งข้อมูลด้านขาขึ้นและขาลงของโครงข่ายออร์แกน

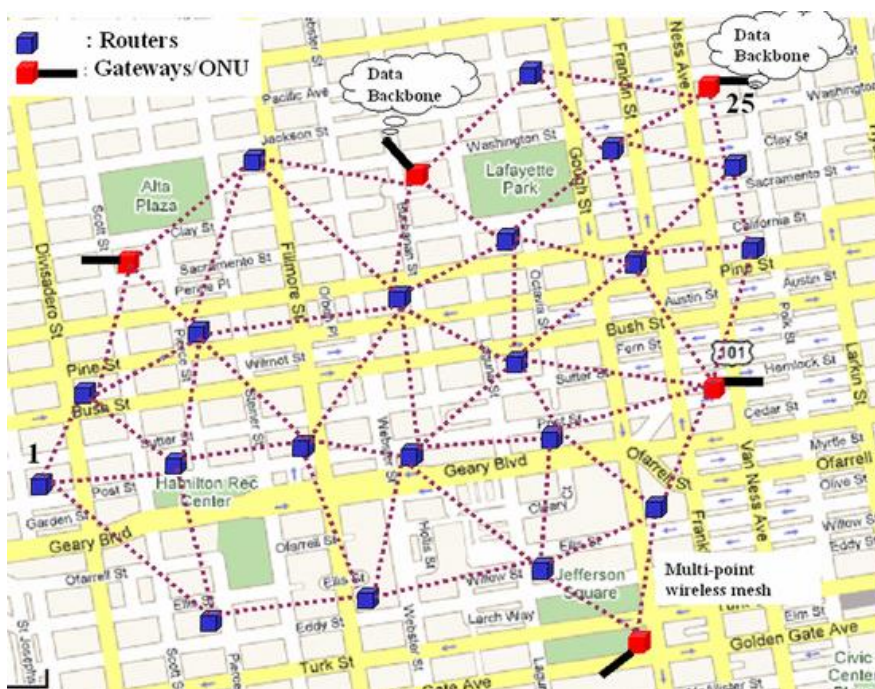
ในการส่งข้อมูลทางด้านขาขึ้นของส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการ (upstream direction of wireless frontend) คือ จากผู้ใช้บริการ (wireless user) ไปสู่ gateway/ONU ของโครงข่ายออร์แกนเป็นแบบ anycast คือ ผู้ใช้บริการจะส่งแพ็คเกจข้อมูลของตัวเองไปสู่ gateway ตัวใดตัวหนึ่งในโครงข่ายที่อยู่ใกล้ที่สุด จากนั้นแต่ละแพ็คเกจข้อมูลจะสามารถหาเส้นทางได้ด้วยตัวเองเพื่อเข้าสู่ส่วนเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลัก

ในการส่งข้อมูลทางด้านขาขึ้นของส่วนเชื่อมโยงกับโครงข่ายหลัก (upstream direction of optical backend) คือ จาก ONU ไปสู่ OLT/CO ของโครงข่ายออร์แกนเป็นแบบ multi-point media-access network หรือ multicast ซึ่ง ONU ที่ขึ้นอยู่กับ OLT จะมีลักษณะเป็นทอพอโลยีแบบต้นไม้ (tree topology) จะต้องแบ่งแบนด์วิดท์ (upstream resource) ร่วมกัน

ในการส่งข้อมูลทางด้านขาลงของส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการ (downstream direction of wireless frontend) คือ จาก gateway/ONU ไปสู่ผู้ใช้บริการของโครงข่ายออร์แกนเป็นแบบ unicast คือ gateway/ONU จะส่งแพ็คเกจข้อมูลไปยังผู้ใช้บริการโดยเจาะจง

ในการส่งข้อมูลทางด้านขาลงของส่วนเชื่อมโยงกับโครงข่ายหลัก (downstream direction of optical backend) คือ จาก OLT/CO ไปสู่ ONU ของโครงข่ายออร์แกนเป็นแบบ broadcast คือ OLT จะส่งแพ็คเกจข้อมูลไปยัง ONU ทุกตัวใน tree topology แต่จะเลือกเพียงจุดหมายปลายทางเดียว โดย ONU ตัวอื่นจะปฏิเสธข้อมูล [26] ดังแสดงในรูปที่ 2-16 [27]

ตัวอย่างการนำเทคโนโลยีออร์แกนไปใช้ในการวางระบบแสดงดังรูปที่ 2-17 [28] San Francisco WOBAN (SFNet) จะเห็นได้ว่า OLT ซึ่งวางไว้ที่ชุมสายหลัก สามารถให้บริการกับ ONU ได้หลายตัว ดังนั้นจาก ONU ไปที่ชุมสายหลักเป็นเสมือนโครงข่ายเส้นใยแสง และจาก ONU ไปสู่ผู้ใช้บริการจะเชื่อมต่อกันแบบโครงข่ายไร้สาย ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกันแบบ multihop ได้



รูปที่ 2-17 ตัวอย่างการนำเทคโนโลยีออร์แบนไปใช้งาน

### 2.3.3 แรงจูงใจที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบเทคโนโลยีออร์แบน

ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีออร์แบนเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมและเทคโนโลยีไวร์เลสแลนด สามารถสรุปได้ดังนี้ [7]

เทคโนโลยีออร์แบน เป็นเทคโนโลยีที่คุ้มค่ากับการลงทุนเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม จากรูปที่ 2-13 และรูปที่ 2-14 แสดงให้เห็นว่าการวางระบบเทคโนโลยีออร์แบนไม่จำเป็นต้องเชื่อมโยงสายส่งเส้นใยแสงถึงบ้านผู้ใช้บริการโดยตรง แต่เป็นการวางเชื่อมโยงเส้นใยแสงไปยังชุมชนหรือหมู่บ้านและให้บริการในส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการด้วยเทคโนโลยีไร้สายแทน

เทคโนโลยีออร์แบน เป็นเทคโนโลยีที่มีความยืดหยุ่น มากกว่าเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม เนื่องจากส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการที่ให้บริการด้วยเทคโนโลยีไร้สาย ทำให้ผู้บริโภครสามารถเข้าใช้งานโครงข่ายได้แบบไร้รอยต่อ (seamless) ทุกที่ทุกเวลา นอกจากนั้นเทคโนโลยีออร์แบนยังให้บริการด้วยอัตราการรับ ส่งข้อมูลที่สูงกว่าเทคโนโลยีไวร์เลสแลนดแบบดั้งเดิมอีกด้วย

เทคโนโลยีออร์แบน เป็นเทคโนโลยีที่มีเสถียรภาพ มากกว่าเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม เนื่องจากบนโครงสร้างของระบบโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟแบบดั้งเดิม ถ้าสายส่งเส้นใยแสงที่เชื่อมโยงระหว่างตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสง และ ONU ชำรุด ONU ตัวนั้นก็จะไม่สามารถสื่อสารสัญญาณได้ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าสายส่งเส้นใยแสงที่เชื่อมโยงระหว่าง OLT/CO และตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสงเกิดชำรุด จะทำให้ ONU ทุกตัวรวมไปถึงผู้ใช้บริการในโครงข่ายใช้การไม่ได้ตามไปด้วย แต่สำหรับเทคโนโลยี

เวอร์แบนผู้ใช้บริการสามารถใช้ประโยชน์จากการเชื่อมโยงสัญญาณผ่านโครงข่าย ของเทคโนโลยีแบบไร้สายได้ โดยกระบวนการ self-recovering/self-organizing เพื่อให้แพ็กเกจข้อมูลที่ส่งจากผู้ให้บริการที่ ONU ใช้การไม่ได้ สามารถค้นหาเส้นทางไปยัง ONU ช่างเคียงที่ยังใช้งานได้ โดยผู้ให้บริการต้องมีโปรโตคอลเพื่อสื่อสารกับ ONU ตัวใหม่และ OLT ต่อไป

เทคโนโลยีเวอร์แบน เป็นเทคโนโลยีที่น่าเชื่อถือ มากกว่าเทคโนโลยีไร้สาย ทำให้ช่วยลดปัญหาความแออัดและข้อมูลสูญหายในโครงข่าย เมื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายไร้สายในปัจจุบัน ยิ่งไปกว่านั้น ผู้ให้บริการสามารถเชื่อมต่อกับ ONU ใดก็ได้ในบริเวณใกล้เคียง ถ้าหากว่า primary ONU เสียหรือมีปริมาณทราฟฟิกหนาแน่นมากเกินไป ซึ่งจะทำให้เทคโนโลยีเวอร์แบนนั้นมีประสิทธิภาพดีในการทำสมดุลโหลด (load-balancing capability)

## 2.4 เทคนิคและการคำนวณพื้นฐาน

### 2.4.1 การคำนวณระยะเวลาการให้บริการของเทคโนโลยีวีร์เลสแลนด

#### 2.4.1.1 Stanford university interim (SUI) model

ใช้สำหรับคลื่นวิทยุความถี่ 2.5 - 2.7 GHz แบ่งการใช้งานเป็น 3 พื้นที่ คือ

- พื้นที่ A สำหรับการหา maximum path loss สำหรับพื้นที่หุบเขาที่มีต้นไม้หนาแน่น
- พื้นที่ B สำหรับพื้นที่ราบที่มีต้นไม้หนาแน่น หรือ ที่ภูเขาที่มีต้นไม้ต่ำ
- พื้นที่ C สำหรับการหา maximum path loss สำหรับพื้นที่ราบที่มีต้นไม้ต่ำ

$$PL = A + 10 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + S ; d > d_0 \quad (2-1)$$

- โดยที่
- $d$  คือ ระยะทางระหว่าง BS และ receiving antenna [m]
  - $d_0$  คือ ระยะทางอ้างอิง กำหนดให้เป็น 100 m
  - $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น [m]
  - $X_f$  คือ Correction for frequency above 2 GHz [MHz]
  - $X_h$  คือ Correction for receiving antenna high [m]
  - $S$  คือ Correction for shadowing [dB]
  - $\gamma$  คือ path loss exponent ซึ่งมีค่าเป็น 2 สำหรับ free space propagation in an urban area มีค่าเป็น 3 ถึง 5 สำหรับ urban environment และมีค่ามากกว่า 5 สำหรับ indoor propagation

พารามิเตอร์  $A$  หาได้จาก

$$A = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (2-2)$$

และ  $\gamma$  ถูกกำหนดให้เป็น

$$\gamma = a - bk_b + \left( \frac{c}{h_b} \right) \quad (2-3)$$

โดยที่  $h_b$  คือ ความสูงของเสาส่งสัญญาณ [m] ซึ่งจำกัดความสูงอยู่ที่ 10 ถึง 80 m พารามิเตอร์  $X_f$  สำหรับพื้นที่ A และ พื้นที่ B หาได้จาก

$$X_f = 6.0 \log_{10} \left( \frac{f}{1000} \right) \quad (2-4)$$

พารามิเตอร์  $X_f$  และ  $X_h$  สำหรับพื้นที่ C หาได้จาก

$$X_h = -10.3 \log_{10} \left( \frac{h_r}{2000} \right) \quad (2-5)$$

$$X_f = -20.0 \log_{10} \left( \frac{h_r}{2000} \right) \quad (2-6)$$

นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์  $a$   $b$  และ  $c$  แสดงดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับ SU1 โมเดล สำหรับพื้นที่แบบต่าง ๆ

| พารามิเตอร์            | พื้นที่ A | พื้นที่ B | พื้นที่ C |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| $a$                    | 4.6       | 4.0       | 3.6       |
| $b$ [m <sup>-1</sup> ] | 0.0075    | 0.0065    | 0.005     |
| $c$ [m]                | 12.6      | 17.1      | 20        |

#### 2.4.1.2 Cost 231 walfish - ikekami model

ใช้สำหรับคลื่นวิทยุความถี่ 2.5 - 2.7 GHz ความสูงของเสาสัญญาณภาคส่งวัดจากระดับพื้นถนน  $h_m$  อยู่ระหว่าง 4 ถึง 50 m ความสูงของเสาสัญญาณภาครับ  $h_b$  ระหว่าง 1 ถึง 3 m ระยะห่างระหว่างตึก  $b$  อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 5 km

สามารถหาอัตราการลดทอนสำหรับกรณี non line of side (NLOS) ได้ดังนี้

$$L_{NLOS} = \begin{cases} L_{fs} + L_{rts} + L_{mds} ; L_{rts} + L_{mds} \geq 0 \\ L_{fs} ; L_{rts} + L_{mds} < 0 \end{cases} \quad (2-7)$$

โดยที่  $L_{fs}$  คือ กำลังสูญเสียในอากาศ (free space loss) หาได้จาก

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \log_{10} d_{km} + 20 \log_{10} f_{MHz} \quad (2-8)$$

$L_{rts}$  คือ กำลังสูญเสียที่เกิดจากการกระจายของสัญญาณจากถนนสู่หลังคา (roof-to



street diffraction and scatter loss)

การคำนวณค่า  $L_{rts}$  จะเกี่ยวข้องกับ กำลังสูญเสียที่เกิดจากสัญญาณที่มีทิศทาง  $L_{ori}$  (orientation loss) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log_{10} w + 10 \log_{10} f_{MHz} + 20 \log_{10}(h - h_m) + L_{ori} \quad (2-9)$$

และ  $L_{ori}$  หาได้จาก

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 354\phi & ; 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\phi - 35^\circ) & ; 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\phi - 55^\circ) & ; 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \end{cases} \quad (2-10)$$

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

$$L_{mds} = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10} d_{km} + k_f \log_{10} f_{MHz} - 9 \log_{10} b \quad (2-11)$$

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

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}[1 + (h_b - h)] & ; h_b > h \\ 0 & ; h_b \leq h \end{cases} \quad (2-12)$$

ค่า  $k_a$   $k_d$   $k_f$  สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$k_a = \begin{cases} 54 & ; \Delta h_b > 0 \\ 54 + 0.8|\Delta h_b| & ; \Delta h_b \leq 0 \cap d_{km} \geq 0.5 \\ 54 + 0.8|\Delta h_b|(d_{km}/0.5) & ; \Delta h_b \leq 0 \cap d_{km} < 0.5 \end{cases} \quad (2-13)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & ; h_b > h \\ 18 - \frac{15(h_b - h)}{h} & ; h_b \leq h \end{cases} \quad (2-14)$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \left( \frac{f_{MHz}}{925} - 1 \right) & ; \text{for mediumsize city} \\ 1.5 \left( \frac{f_{MHz}}{925} - 1 \right) & ; \text{for suburban area} \end{cases} \quad (2-15)$$

#### 2.4.1.3 Wireless neighborhood area network path loss characterization

อัตราการลดทอนสัญญาณของคลื่นวิทยุ 5.7 GHz สำหรับ small outdoor cell ที่มีรัศมีการให้บริการประมาณ 400 m ซึ่งจำลองบนสมมติฐานว่าแอคเซสพอยต์มีเสาอากาศแบบ 2x2 MIMO ซึ่งจำลองบนพื้นที่ 2 รูปแบบ คือ หมู่บ้านที่มีพื้นที่โล่งและปลูกต้นไม้บ้าง และ หมู่บ้านที่อยู่ท่ามกลางภูเขาเล็ก ๆ รายล้อมด้วยต้นไม้ โดยกำหนดให้บ้านทุกบ้านในแบบจำลองทั้ง 2 มีเงื่อนไขเดียวกัน และ

มีระยะห่างจากกันเฉลี่ย คือ 25 ถึง 50 ฟุต โดยที่เสาอากาศด้านตัวส่งกำหนดให้สูง 6.1 m และเสาอากาศด้านตัวรับสูง 1.9 m

สมการการหาอัตราการลดทอนของ Large Scale Fading เป็นดังนี้

$$pl = \frac{P_t g_t g_r}{P_r} \quad (2-16)$$

โดยที่  $pl$  คือ อัตราการลดทอนจากผลกระทบของ Large scale fading  
 $P_t$  คือ กำลังสัญญาณที่ส่งออกจากเครื่องส่ง  
 $g_t$  คือ อัตราการขยายของเสาอากาศ (antenna gain) ที่อุปกรณ์ฝั่งตัวส่ง  
 $g_r$  คือ อัตราการขยายของเสาอากาศ (antenna gain) ที่อุปกรณ์ฝั่งตัวรับ  
 $P_r$  คือ กำลังสัญญาณที่เครื่องรับสามารถรับได้

และสามารถหา local path loss ได้จากสมการ ดังนี้

$$PL(d) = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N |h(f_i : d)|^2 \right) \quad (2-17)$$

โดยที่  $|h(f_i : d)|^2$  คือ the measured complex frequency response data  
 $PL(d)$  คือ local mean path loss  
 $d$  คือ transmit-receive (T-R) separations  
 $N$  คือ จำนวน observe frequency  
 $M$  คือ จำนวน response frequency

และสามารถหา local path loss ในหน่วย dB ได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$PL(d) = \left[ PL_0 + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \right] + S(d) ; d \geq d_0 \quad (2-18)$$

โดยที่  $PL_0$  คือ อัตราการลดทอนที่ตำแหน่งอ้างอิง  $d_0$   
 $d_0$  คือ ระยะห่างจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณถึงตำแหน่งอ้างอิง  
 $\gamma$  คือ path loss exponent

จากสมการที่ ( 2-6 ) ดังนั้นสามารถสรุปสมการหาอัตราการลดทอน ดังนี้

$$\gamma = \bar{\gamma} + x_1 \sigma_\gamma \quad (2-19)$$

$$S = y \sigma_s \quad (2-20)$$

$$\sigma_s = \bar{\sigma} + x_2 \sigma_\sigma \quad (2-21)$$

โดยที่  $x_1$  คือ zero-mean Gaussian variate of unit standard deviation  $N[0,1]$   
 $x_2$  คือ zero-mean Gaussian variate of unit standard deviation  $N[0,1]$   
 $y$  คือ zero-mean Gaussian variate of unit standard deviation  $N[0,1]$   
 $\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

แทนค่าสมการ ( 2-22 ) ( 2-23 ) และ ( 2-24 ) ลงในสมการ ( 2-25 ) จะได้

$$\overline{PL(d)} \Big|_{dB} = [PL_0 + 10\bar{\gamma} \log_{10} d / d_0] + [10x_1 \sigma_\gamma \log_{10} d / d_0 + yx_2 \sigma_\sigma] \quad (2-22)$$

ตารางที่ 2-6 และ ตารางที่ 2-7 แสดงค่าตัวแปรต่างที่ใช้ในสมการที่ ( 2-22 )

ตารางที่ 2-6 พารามิเตอร์สำหรับใช้ในกรณีหมู่บ้านที่เป็นที่ราบและมีต้นไม้

| Parameter     | LOS  | NLOS |
|---------------|------|------|
| $PL_0$ [dB]   | 61.1 | 80.8 |
| $\gamma$      | 1.8  | 3.4  |
| $\sigma$ [dB] | 4.9  | 5.3  |

ตารางที่ 2-7 พารามิเตอร์สำหรับใช้ในกรณีหมู่บ้านที่เป็นที่เป็นภูเขาเล็ก ๆ และมีต้นไม้

| Parameter     | LOS  | NLOS |
|---------------|------|------|
| $PL_0$ [dB]   | 60.0 | 79.5 |
| $\gamma$      | 1.9  | 3.6  |
| $\sigma$ [dB] | 5.6  | 8.0  |

#### 2.4.1.4 Path loss and multipath power decay of the wideband car-to-car channel

ซึ่งจำลองบนสมมติฐาน 2x2 MIMO ซึ่งวัดโดยสมมติฐานของแบนวิดธ์ขนาด 1 GHz และ ดีเลย์ คือ 1 ns ช่องสัญญาณที่ใช้ 25 หรือ 50 ช่องสัญญาณโดยมีหลากหลายโมเดลจำลองโดยมีตัวย่อ ดังต่อไปนี้ highway (H) urban (U) suburban (S) rural (R) convoy (C) oncoming (O) 2Infrastructure (2I) โดยสามารถแบ่งเป็นโมเดลรูปแบบต่าง ๆ เช่น HOTD คือ highway oncoming

traffic scenario สำหรับการวัดในโหมด D ใช้เสาอากาศชนิด omnidirectional dipoles ในที่นี้จะใช้โมเดล 4 โมเดล

กำหนดตัวแปร

$P(d)$  คือ อัตราการลดทอน [dB]

$d$  คือ ระยะทาง [m]

$d_0$  คือ critical distance กำหนดให้เป็น 1 m

$X_\sigma$  คือ การแจกแจงแบบปรกติโดยที่มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และค่าความแปรปรวนเป็น  $\sigma^2$

$\gamma_{1,2,3}$  คือ pathloss exponent ของแต่ละแบบจำลอง

แบบจำลองแรก Log-Distance Power Law (LDPL)

$$P(d) = P(d_0) + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (2-23)$$

เป็นแบบจำลองง่าย ๆ โดยใช้ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ในรูปแบบ log scale และเป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุดเพราะใช้พารามิเตอร์เพียง 3 ตัวเท่านั้น

แบบจำลองที่สองคือ sectionwise Log-Distance Power Law (SLDPL) ประกอบด้วย consecutive LDPL 2 โมเดล ดังนี้

$$P(d) = \begin{cases} P(d_0) + 10\gamma_1 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma ; d \leq d_1 \\ P(d_0) + 10\gamma_2 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma ; d > d_1 \end{cases} \quad (2-24)$$

แบบจำลองที่สาม คือ Extended LDPL (ELDPL)

$$P(d) = P'(d_0) + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + C \frac{d}{d_0} + X_\sigma \quad (2-25)$$

และแบบจำลองที่สี่ คือ POL4 เป็นแบบจำลองในรูปแบบพหุนาม โดยมีพารามิเตอร์ 5 ตัว คือ  $a_{1,2,3,4}$  และ  $\sigma$

$$P(d) = \frac{a_1}{\frac{d}{d_0} + a_1 a_2} + a_3 \frac{d}{d_0} + a_4 + X_\sigma \quad (2-26)$$

ตารางที่ 2-8 พารามิเตอร์สำหรับอัตราการลดทอนของกำลังการส่งสัญญาณทั้งหมด ตารางที่ 2-9 พารามิเตอร์สำหรับอัตราการลดทอนของ LOS path ตารางที่ 2-10 พารามิเตอร์สำหรับอัตราการลดทอนของ NLOS path ของแบบจำลองต่าง ๆ

ตารางที่ 2-8 พารามิเตอร์สำหรับอัตราการลดทอนของกำลังการส่งสัญญาณทั้งหมด

| LDPL              |       | SDPL       |       | ELDPL     |          | POL4     |          |
|-------------------|-------|------------|-------|-----------|----------|----------|----------|
| HOTD (16 – 830 m) |       |            |       |           |          |          |          |
| $\gamma$          | 3.59  | $\gamma_1$ | 2.88  | $\gamma$  | 2.3      | $a_1$    | -712.1   |
| $P(d_0)$          | 18.44 | $\gamma_2$ | 6.84  | $C$       | 27.3e-3  | $a_2$    | -11e-3   |
|                   |       | $P(d_0)$   | 32.23 | $P'(d_0)$ | 40.2     | $a_3$    | 49.2e-3  |
|                   |       | $d_1$      | 312   |           |          | $a_4$    | 92       |
| $\sigma$          | 5.28  | $\sigma$   | 4.15  | $\sigma$  | 4.64     | $\sigma$ | 4.37     |
| HCTD (6 – 73 m)   |       |            |       |           |          |          |          |
| $\gamma$          | 2.21  | $\gamma_1$ | 2.21  | $\gamma$  | 2.58     | $a_1$    | -153     |
| $P(d_0)$          | 38.1  | $\gamma_2$ | -     | $C$       | -61.4e-3 | $a_2$    | -10.2e-3 |
|                   |       | $P(d_0)$   | 38.1  | $P'(d_0)$ | 34.9     | $a_3$    | 121e-3   |
|                   |       | $d_1$      | -     |           |          | $a_4$    | 72.4     |
| $\sigma$          | 3.05  | $\sigma$   | 3.05  | $\sigma$  | 3.03     | $\sigma$ | 2.97     |
| U2ID (5 – 45 m)   |       |            |       |           |          |          |          |
| $\gamma$          | 3.02  | $\gamma_1$ | 3.02  | $\gamma$  | 2.72     | $a_1$    | -3.86e8  |
| $P(d_0)$          | 30.6  | $\gamma_2$ | -     | $C$       | 95.7e-3  | $a_2$    | -6.88e-6 |
|                   |       | $P(d_0)$   | 30.6  | $P'(d_0)$ | 32.3     | $a_3$    | -53.1    |
|                   |       | $d_1$      | -     |           |          | $a_4$    | 1.45e5   |
| $\sigma$          | 3.36  | $\sigma$   | 3.36  | $\sigma$  | 3.35     | $\sigma$ | 2.98     |
| SOTD (9 – 53 m)   |       |            |       |           |          |          |          |
| $\gamma$          | 3.5   | $\gamma_1$ | 3.5   | $\gamma$  | 3.86     | $a_1$    | -9.23    |
| $P(d_0)$          | 23.1  | $\gamma_2$ | -     | $C$       | 46.3e-3  | $a_2$    | 846e-3   |
|                   |       | $P(d_0)$   | 23.1  | $P'(d_0)$ | 19.3     | $a_3$    | 482e-3   |
|                   |       | $d_1$      | -     |           |          | $a_4$    | 59.6     |
| $\sigma$          | 2.44  | $\sigma$   | 2.44  | $\sigma$  | 2.51     | $\sigma$ | 1.94     |
| ROTD (8 – 560 m)  |       |            |       |           |          |          |          |

|                  |      |            |       |           |         |          |          |
|------------------|------|------------|-------|-----------|---------|----------|----------|
| $\gamma$         | 3.18 | $\gamma_1$ | 2.29  | $\gamma$  | 2.41    | $a_1$    | -137     |
| $P(d_0)$         | 22.7 | $\gamma_2$ | 7.78  | $C$       | 30e-3   | $a_2$    | 15.7e-3  |
|                  |      | $P(d_0)$   | 38.2  | $P'(d_0)$ | 32.2    | $a_3$    | 75.9e-3  |
|                  |      | $d_1$      | 266.5 |           |         | $a_4$    | 76.9     |
| $\sigma$         | 5.45 | $\sigma$   | 3.59  | $\sigma$  | 4.46    | $\sigma$ | 3.44     |
| UCTD (17 – 40 m) |      |            |       |           |         |          |          |
| $\gamma$         | 1.83 | $\gamma_1$ | 1.83  | $\gamma$  | 4.82    | $a_1$    | -2.88e3  |
| $P(d_0)$         | 45.8 | $\gamma_2$ | -     | $C$       | 483e-3  | $a_2$    | -8.3e-3  |
|                  |      | $P(d_0)$   | 45.2  | $P'(d_0)$ | 16.8    | $a_3$    | -792e-3  |
|                  |      | $d_1$      | -     |           |         | $a_4$    | 151      |
| $\sigma$         | 1.62 | $\sigma$   | 1.62  | $\sigma$  | 1.54    | $\sigma$ | 1.52     |
| UOTD (6 – 102 m) |      |            |       |           |         |          |          |
| $\gamma$         | 2.88 | $\gamma_1$ | 3.36  | $\gamma$  | 3.48    | $a_1$    | -768     |
| $P(d_0)$         | 29.7 | $\gamma_2$ | 2.12  | $C$       | 88.3e-3 | $a_2$    | -17.8e-3 |
|                  |      | $P(d_0)$   | 24.1  | $P'(d_0)$ | 24.1    | $a_3$    | 16e-3    |
|                  |      | $d_1$      | 30.72 |           |         | $a_4$    | 90.1     |
| $\sigma$         | 3.21 | $\sigma$   | 3.04  | $\sigma$  | 3.13    | $\sigma$ | 3.10     |

ตารางที่ 2-9 พารามิเตอร์สำหรับอัตราการลดทอนของ LOS path

| LDPL              | SDPL  | ELDPL      | POL4  |           |         |          |          |
|-------------------|-------|------------|-------|-----------|---------|----------|----------|
| HOTD (16 – 830 m) |       |            |       |           |         |          |          |
| $\gamma$          | 3.77  | $\gamma_1$ | 3.1   | $\gamma$  | 2.74    | $a_1$    | -1139    |
| $P(d_0)$          | 18.02 | $\gamma_2$ | 5.99  | $C$       | 21.6e-3 | $a_2$    | -14.9e-3 |
|                   |       | $P(d_0)$   | 47.38 | $P'(d_0)$ | 35.3    | $a_3$    | 45.8e-3  |
|                   |       | $d_1$      | 209   |           |         | $a_4$    | 98.7     |
| $\sigma$          | 5.94  | $\sigma$   | 5.38  | $\sigma$  | 5.60    | $\sigma$ | 5.48     |
| HCTD (6 – 73 m)   |       |            |       |           |         |          |          |
| $\gamma$          | 2.32  | $\gamma_1$ | 2.32  | $\gamma$  | 3.05    | $a_1$    | -224     |
| $P(d_0)$          | 39.1  | $\gamma_2$ | -     | $C$       | -123e-3 | $a_2$    | -13.7e-3 |
|                   |       | $P(d_0)$   | 39.1  | $P'(d_0)$ | 32.6    | $a_3$    | 77.6e-3  |

|                  |      |            |       |           |         |          |          |
|------------------|------|------------|-------|-----------|---------|----------|----------|
|                  |      | $d_1$      | -     |           |         | $a_4$    | 78.5     |
| $\sigma$         | 3.38 | $\sigma$   | 3.38  | $\sigma$  | 3.32    | $\sigma$ | 3.29     |
| U2ID (5 – 45 m)  |      |            |       |           |         |          |          |
| $\gamma$         | 3.39 | $\gamma_1$ | 3.39  | $\gamma$  | 2.72    | $a_1$    | -6.83e8  |
| $P(d_0)$         | 28.5 | $\gamma_2$ | -     | $C$       | 165e-3  | $a_2$    | -4.75e-6 |
|                  |      | $P(d_0)$   | 28.5  | $P'(d_0)$ | 33.4    | $a_3$    | -63.2    |
|                  |      | $d_1$      | -     |           |         | $a_4$    | 2.11e5   |
| $\sigma$         | 4.59 | $\sigma$   | 4.95  | $\sigma$  | 4.89    | $\sigma$ | 4.59     |
| SOTD (9 – 53 m)  |      |            |       |           |         |          |          |
| $\gamma$         | 3.74 | $\gamma_1$ | 3.74  | $\gamma$  | 3.86    | $a_1$    | -6.64    |
| $P(d_0)$         | 22   | $\gamma_2$ | -     | $C$       | 10.4e-3 | $a_2$    | 1.21     |
|                  |      | $P(d_0)$   | 22    | $P'(d_0)$ | 20.6    | $a_3$    | 544e-3   |
|                  |      | $d_1$      | -     |           |         | $a_4$    | 59.8     |
| $\sigma$         | 3.18 | $\sigma$   | 3.18  | $\sigma$  | 3.19    | $\sigma$ | 2.63     |
| ROTD (8 – 560 m) |      |            |       |           |         |          |          |
| $\gamma$         | 3.23 | $\gamma_1$ | 2.25  | $\gamma$  | 2.54    | $a_1$    | -100     |
| $P(d_0)$         | 23.5 | $\gamma_2$ | 8.42  | $C$       | 28.1e-3 | $a_2$    | 35e-3    |
|                  |      | $P(d_0)$   | 40.8  | $P'(d_0)$ | 32.2    | $a_3$    | 80.1e-3  |
|                  |      | $d_1$      | 247.9 |           |         | $a_4$    | 77.6     |
| $\sigma$         | 6.31 | $\sigma$   | 4.36  | $\sigma$  | 5.36    | $\sigma$ | 4.23     |
| UCTD (17 – 40 m) |      |            |       |           |         |          |          |
| $\gamma$         | 2.44 | $\gamma_1$ | 2.44  | $\gamma$  | 4.82    | $a_1$    | -1.17e3  |
| $P(d_0)$         | 40   | $\gamma_2$ | -     | $C$       | 379e-3  | $a_2$    | -11.1e-3 |
|                  |      | $P(d_0)$   | 40    | $P'(d_0)$ | 16.8    | $a_3$    | -334e-3  |
|                  |      | $d_1$      | -     |           |         | $a_4$    | 114      |
| $\sigma$         | 1.53 | $\sigma$   | 1.53  | $\sigma$  | 1.48    | $\sigma$ | 1.47     |
| UOTD (6 – 102 m) |      |            |       |           |         |          |          |
| $\gamma$         | 3.16 | $\gamma_1$ | 3.8   | $\gamma$  | 3.93    | $a_1$    | -799     |
| $P(d_0)$         | 29   | $\gamma_2$ | 2.25  | $C$       | 113e-3  | $a_2$    | -15.8e-3 |
|                  |      | $P(d_0)$   | 21.6  | $P'(d_0)$ | 21.8    | $a_4$    | 14.6e-3  |

|          |      |          |      |          |      |          |      |
|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
|          |      | $d_1$    | 29.3 |          |      | $a_4$    | 95   |
| $\sigma$ | 3.66 | $\sigma$ | 3.42 | $\sigma$ | 3.55 | $\sigma$ | 3.51 |

ตารางที่ 2-10 พารามิเตอร์สำหรับอัตราการลดทอนของ NLOS path

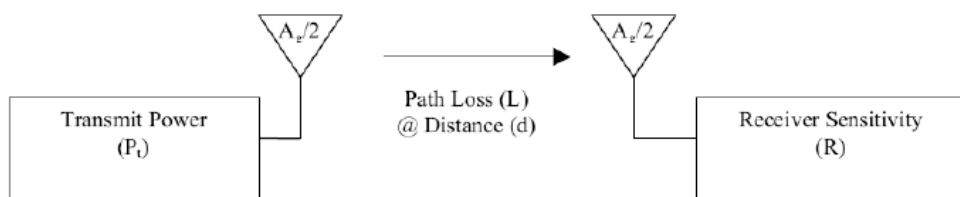
| LDPL               |      | SDPL       |      | ELDPL     |          | POL4     |          |
|--------------------|------|------------|------|-----------|----------|----------|----------|
| HOTD (18 – 1018 m) |      |            |      |           |          |          |          |
| $\gamma$           | 3.44 | $\gamma_1$ | 3.44 | $\gamma$  | 3.56     | $a_1$    | -1.65    |
| $P(d_0)$           | 47.6 | $\gamma_2$ | -    | $C$       | 4.94e-3  | $a_2$    | -17.3-3  |
|                    |      | $P(d_0)$   | 47.6 | $P'(d_0)$ | 45.8     | $a_3$    | 46.8e-3  |
|                    |      | $d_1$      | -    |           |          | $a_4$    | 125      |
| $\sigma$           | 4.02 | $\sigma$   | 4.02 | $\sigma$  | 4.02     | $\sigma$ | 4.02     |
| HCTD (6 – 156 m)   |      |            |      |           |          |          |          |
| $\gamma$           | 2.94 | $\gamma_1$ | 2.5  | $\gamma$  | 2.67     | $a_1$    | -186     |
| $P(d_0)$           | 51   | $\gamma_2$ | 3.75 | $C$       | 30.7e-3  | $a_2$    | -4.8e-3  |
|                    |      | $P(d_0)$   | 57.4 | $P'(d_0)$ | 54       | $a_3$    | 178e-3   |
|                    |      | $d_1$      | 36.8 |           |          | $a_4$    | 95.4     |
| $\sigma$           | 6.37 | $\sigma$   | 6.33 | $\sigma$  | 6.37     | $\sigma$ | 6.36     |
| U2ID (5 – 131 m)   |      |            |      |           |          |          |          |
| $\gamma$           | 2.95 | $\gamma_1$ | 3.41 | $\gamma$  | 3.74     | $a_1$    | -630     |
| $P(d_0)$           | 53.6 | $\gamma_2$ | 1.99 | $C$       | 4.56e-3  | $a_2$    | -6.77e-3 |
|                    |      | $P(d_0)$   | 46.7 | $P'(d_0)$ | 38.7     | $a_3$    | -11.6e-3 |
|                    |      | $d_1$      | 58.9 |           |          | $a_4$    | 116      |
| $\sigma$           | 4.44 | $\sigma$   | 4.35 | $\sigma$  | 4.99     | $\sigma$ | 5.01     |
| SOTD (10 – 334 m)  |      |            |      |           |          |          |          |
| $\gamma$           | 3.56 | $\gamma_1$ | 3.56 | $\gamma$  | 3.62     | $a_1$    | -2.62e3  |
| $P(d_0)$           | 45.2 | $\gamma_2$ | -    | $C$       | -24.5e-3 | $a_2$    | -13.5e-3 |
|                    |      | $P(d_0)$   | 45.2 | $P'(d_0)$ | 45.1     | $a_3$    | -6.55e-3 |
|                    |      | $d_1$      | -    |           |          | $a_4$    | 137      |
| $\sigma$           | 5.26 | $\sigma$   | 5.26 | $\sigma$  | 4.96     | $\sigma$ | 4.67     |
| ROTD (9 – 561 m)   |      |            |      |           |          |          |          |



|                  |      |            |       |           |          |          |          |
|------------------|------|------------|-------|-----------|----------|----------|----------|
| $\gamma$         | 2.68 | $\gamma_1$ | 2.21  | $\gamma$  | 3.74     | $a_1$    | -348     |
| $P(d_0)$         | 56.9 | $\gamma_2$ | 4.25  | $C$       | -1.22e-3 | $a_2$    | -5.07e-3 |
|                  |      | $P(d_0)$   | 65.2  | $P'(d_0)$ | 32.2     | $a_3$    | 53.1e-3  |
|                  |      | $d_1$      | 205.1 |           |          | $a_4$    | 108      |
| $\sigma$         | 4.74 | $\sigma$   | 4.45  | $\sigma$  | 6.78     | $\sigma$ | 4.39     |
| UCTD (18 – 97 m) |      |            |       |           |          |          |          |
| $\gamma$         | 1.64 | $\gamma_1$ | 1.64  | $\gamma$  | 3.66     | $a_1$    | -51.8    |
| $P(d_0)$         | 72.5 | $\gamma_2$ | -     | $C$       | -189e-3  | $a_2$    | 306e-3   |
|                  |      | $P(d_0)$   | 72.5  | $P'(d_0)$ | 48.2     | $a_3$    | 41.3e-3  |
|                  |      | $d_1$      | -     |           |          | $a_4$    | 100      |
| $\sigma$         | 4.98 | $\sigma$   | 4.98  | $\sigma$  | 4.89     | $\sigma$ | 4.76     |
| UOTD (7 – 209 m) |      |            |       |           |          |          |          |
| $\gamma$         | 3.44 | $\gamma_1$ | 1.69  | $\gamma$  | 3.55     | $a_1$    | -2.09e3  |
| $P(d_0)$         | 43.1 | $\gamma_2$ | 3.52  | $C$       | -9.56e-3 | $a_2$    | -16.3e-3 |
|                  |      | $P(d_0)$   | 63    | $P'(d_0)$ | 41.7     | $a_3$    | 18.7e-3  |
|                  |      | $d_1$      | 14.82 |           |          | $a_4$    | 126      |
| $\sigma$         | 5.22 | $\sigma$   | 5.21  | $\sigma$  | 5.22     | $\sigma$ | 5.20     |

#### 2.4.2 การคำนวณกำลังของสัญญาณที่วัดได้ที่เครื่องรับสัญญาณ

ในการคำนวณกำลังของสัญญาณที่วัดได้ที่เครื่องรับสัญญาณ (receive power) แสดงดังรูปที่ 2-18



รูปที่ 2-18 การคำนวณกำลังของสัญญาณที่วัดได้ที่เครื่องรับสัญญาณ

โดยมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- $P_T$  คือ transmit power [dBm]
- $L_T$  คือ transmit feeder loss [dB]
- $G_T$  คือ transmit antenna gain [dBi]
- $L$  คือ path loss of transmission medium [dB]



|    |   |        |     |   |   |    |     |     |      |       |       |       |     |
|----|---|--------|-----|---|---|----|-----|-----|------|-------|-------|-------|-----|
| 0  | 1 | BPSK   | 1/2 | 1 | 1 | 52 | 108 | 52  | 108  | 6.5   | 7.2   | 13.5  | 15  |
| 1  | 1 | QPSK   | 1/2 | 1 | 1 | 52 | 108 | 104 | 216  | 13    | 14.4  | 27    | 30  |
| 2  | 1 | QPSK   | 3/4 | 1 | 1 | 52 | 108 | 104 | 216  | 19.5  | 21.7  | 40.5  | 45  |
| 3  | 1 | 16-QAM | 1/2 | 1 | 1 | 52 | 108 | 208 | 432  | 26    | 28.9  | 54    | 60  |
| 4  | 1 | 16-QAM | 3/4 | 1 | 1 | 52 | 108 | 208 | 432  | 39    | 43.3  | 81    | 90  |
| 5  | 1 | 64-QAM | 2/3 | 1 | 1 | 52 | 108 | 312 | 648  | 52    | 57.8  | 108   | 120 |
| 6  | 1 | 64-QAM | 3/4 | 1 | 1 | 52 | 108 | 312 | 648  | 58.5  | 65    | 121.5 | 135 |
| 7  | 1 | 64-QAM | 5/6 | 1 | 1 | 52 | 108 | 312 | 648  | 65    | 72.2  | 135   | 150 |
| 8  | 2 | BPSK   | 1/2 | 1 | 1 | 52 | 108 | 104 | 216  | 13    | 14.4  | 27    | 30  |
| 9  | 2 | QPSK   | 1/2 | 1 | 1 | 52 | 108 | 208 | 432  | 26    | 28.9  | 54    | 60  |
| 10 | 2 | QPSK   | 3/4 | 1 | 1 | 52 | 108 | 208 | 432  | 39    | 43.3  | 81    | 90  |
| 11 | 2 | 16-QAM | 1/2 | 1 | 1 | 52 | 108 | 416 | 864  | 52    | 57.8  | 108   | 120 |
| 12 | 2 | 16-QAM | 3/4 | 1 | 1 | 52 | 108 | 416 | 864  | 78    | 86.7  | 162   | 180 |
| 13 | 2 | 64-QAM | 2/3 | 1 | 1 | 52 | 108 | 624 | 1296 | 104   | 115.6 | 216   | 240 |
| 14 | 2 | 64-QAM | 3/4 | 1 | 1 | 52 | 108 | 624 | 1296 | 117   | 130   | 243   | 270 |
| 15 | 2 | 64-QAM | 5/6 | 1 | 1 | 52 | 108 | 624 | 1296 | 130   | 144.4 | 270   | 300 |
| 16 | 3 | BPSK   | 1/2 | 2 | 2 | 52 | 108 | 156 | 324  | 19.5  | 21.7  | 40.5  | 45  |
| 17 | 3 | QPSK   | 1/2 | 2 | 2 | 52 | 108 | 312 | 648  | 39    | 43.3  | 81    | 90  |
| 18 | 3 | QPSK   | 3/4 | 2 | 2 | 52 | 108 | 312 | 648  | 58.5  | 65    | 121.5 | 135 |
| 19 | 3 | 16-QAM | 1/2 | 2 | 2 | 52 | 108 | 624 | 1296 | 78    | 86.7  | 162   | 180 |
| 20 | 3 | 16-QAM | 3/4 | 2 | 2 | 52 | 108 | 624 | 1296 | 117   | 130   | 243   | 270 |
| 21 | 3 | 64-QAM | 2/3 | 2 | 2 | 52 | 108 | 936 | 1944 | 156   | 173.3 | 324   | 360 |
| 22 | 3 | 64-QAM | 3/4 | 2 | 2 | 52 | 108 | 936 | 1944 | 175.5 | 195   | 364.5 | 405 |
| 23 | 3 | 64-QAM | 5/6 | 2 | 2 | 52 | 108 | 936 | 1944 | 195   | 216.7 | 405   | 450 |

|    |   |        |     |   |   |    |     |      |      |     |       |     |     |
|----|---|--------|-----|---|---|----|-----|------|------|-----|-------|-----|-----|
| 24 | 4 | BPSK   | 1/2 | 2 | 2 | 52 | 108 | 208  | 432  | 26  | 28.8  | 54  | 60  |
| 25 | 4 | QPSK   | 1/2 | 2 | 2 | 52 | 108 | 416  | 864  | 52  | 57.6  | 108 | 120 |
| 26 | 4 | QPSK   | 3/4 | 2 | 2 | 52 | 108 | 416  | 864  | 78  | 86.8  | 162 | 180 |
| 27 | 4 | 16-QAM | 1/2 | 2 | 2 | 52 | 108 | 832  | 1728 | 104 | 115.6 | 216 | 240 |
| 28 | 4 | 16-QAM | 3/4 | 2 | 2 | 52 | 108 | 832  | 1728 | 156 | 173.2 | 324 | 360 |
| 29 | 4 | 64-QAM | 2/3 | 2 | 2 | 52 | 108 | 1248 | 2592 | 208 | 231.2 | 432 | 480 |
| 30 | 4 | 64-QAM | 3/4 | 2 | 2 | 52 | 108 | 1248 | 2592 | 234 | 260   | 486 | 540 |
| 31 | 4 | 64-QAM | 5/6 | 2 | 2 | 52 | 108 | 1248 | 2592 | 260 | 288.8 | 540 | 600 |



### บทที่ 3

## งานที่นำเสนอของวิทยานิพนธ์

ในบทนี้ผู้เขียนเสนอการวางระบบเพื่อให้บริการเทคโนโลยีวีอาร์แบน ที่ผู้ให้บริการสามารถรับประกันอัตราการรับส่งข้อมูลที่ต่ำที่สุดที่ผู้ใช้บริการทุกหลังจะได้รับ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบจะกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวในระบบไม่มีการชำรุดเสียหาย สภาพแวดล้อมและสภาพอากาศเป็นแบบในอุดมคติ แบบจำลองการลดทอนของสัญญาณวิทยุเป็นแบบสำหรับที่ใช้ในบริเวณชานเมือง

ในบางครั้งผู้ใช้บริการในระบบจำนวนหนึ่งอาจไม่ได้มีการใช้บริการ ทำให้ ONU บางตัวในระบบรองรับปริมาณทราฟฟิกมาก และมี ONU บางตัวในระบบรองรับปริมาณทราฟฟิกน้อย ดังนั้นเพื่อให้โครงข่ายสามารถให้บริการแก่ผู้ใช้บริการได้อย่างเต็มที่ ผู้เขียนจึงได้เสนออัลกอริทึมเพื่อปรับสมดุลของทราฟฟิกสำหรับ ONU แต่ละตัวให้รองรับปริมาณทราฟฟิกให้ใกล้เคียงกัน โดยใช้วิธีการหาเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลจากผู้ใช้บริการไปยัง gateway/ONU ข้างเคียง (neighbor gateway/ONU)

โดยหัวข้อย่อยถัดไปที่จะนำเสนอในบทนี้ ประกอบไปด้วยสมมติฐาน โมเดลจำลองการวางระบบเทคโนโลยีวีอาร์แบน การกำหนดตัวแปรและอัลกอริทึม ตามลำดับ

### 3.1 สมมติฐาน

#### 3.1.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์ในส่วนเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลักของเทคโนโลยีวีอาร์แบน

กำหนดให้อุปกรณ์ในส่วนเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลัก ให้บริการโดยใช้เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ ตามมาตรฐาน 10GEPON แสดงดังตารางที่ 2-3 ซึ่งสามารถให้บริการด้วยอัตราการรับและส่งข้อมูลสูงสุดถึง 10 Gbps ทั้งในด้านการส่งข้อมูลขาขึ้นและขาลง ตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสงสามารถแบ่งเส้นใยแสงหลักไปเป็นเส้นใยแสงย่อยได้ถึง 64 สาย โดยมีรัศมีการให้บริการสูงสุดถึง 20 km ใช้โปรโตคอล ethernet TDM และ TDMA สามารถให้บริการทางด้านข้อมูลเสียง ข้อมูลภาพยนต์ และข้อมูลแพ็คเกจ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า triple play นอกจากนี้ยังสามารถให้บริการแลกเปลี่ยนไฟล์ข้อมูล IPTV และ video-on-demand ระดับความเร็วสูง

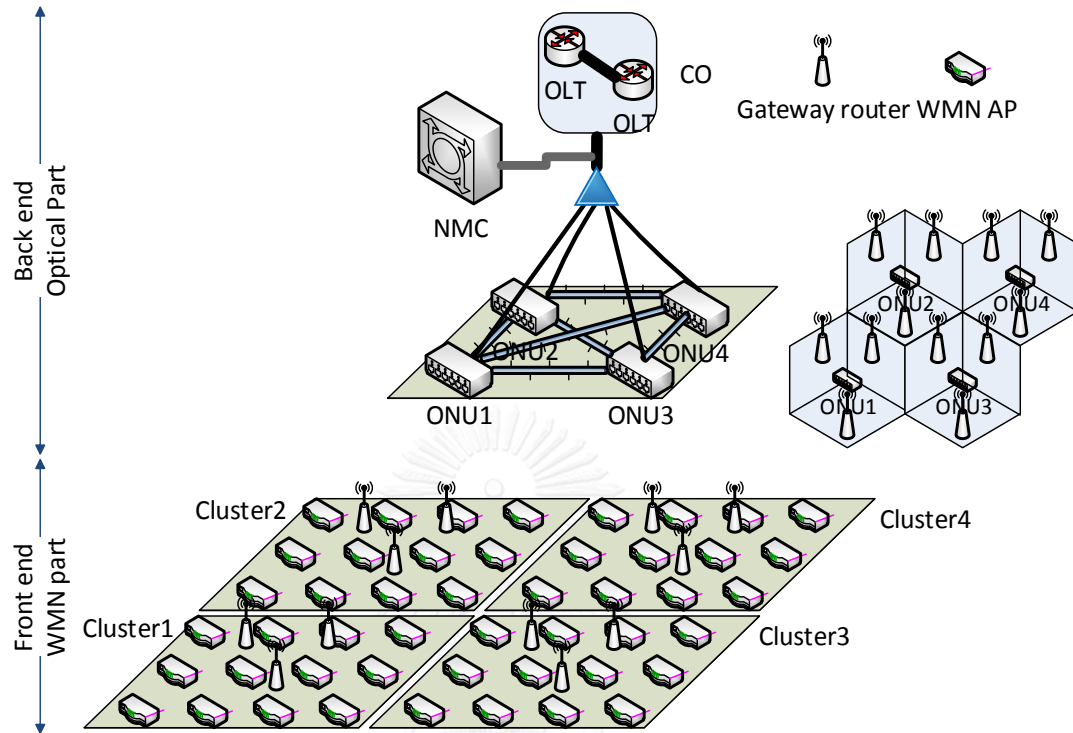
#### 3.1.2 คุณสมบัติของอุปกรณ์ในส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการของเทคโนโลยีวีอาร์แบน

กำหนดให้อุปกรณ์ในส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการให้บริการด้วยเทคโนโลยีวีอาร์แบนตามมาตรฐาน IEEE 802.11n ดังแสดงในตารางที่ 2-4 ซึ่งสามารถให้บริการด้วยอัตราเร็วสูงสุดถึง

600 Mbps บนคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz และ 5.7 GHz ครอบคลุมภายในรัศมี 100 m นอกจากนั้น ยังมีเงื่อนไขเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

- ก. รูปแบบของการสื่อสารเป็นการสื่อสารข้อมูลสองทิศทางสลับกัน
- ข. AP ของโครงข่ายไร้สายของเทคโนโลยีวีอาร์แบนเชื่อมโยงกันเป็นโครงตาข่าย และบ้าน 1 หลังจะติดตั้ง AP เพียง 1 ตัวเท่านั้น
- ค. จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ซ้อนทับสำหรับส่งคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz คือ 3 ช่อง สำหรับสัญญาณที่มีแบนด์วิทซ์ขนาด 20 MHz และ 1 ช่องสำหรับสัญญาณที่มีแบนด์วิทซ์ขนาด 40 MHz
- ง. จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่ซ้อนทับสำหรับส่งคลื่นวิทยุความถี่ 5 GHz คือ 24 ช่อง สำหรับสัญญาณที่มีแบนด์วิทซ์ขนาด 20 MHz และ 12 ช่อง สำหรับสัญญาณที่มีแบนด์วิทซ์ขนาด 40 MHz
- จ. ใช้โปรโตคอล CSMA/CA เพื่อป้องกันการชนกันของข้อมูล
- ฉ. ระยะทางในการรับส่งข้อมูลจริงสามารถคำนวณได้จาก path loss model
- ช. การแบ่งแบนด์วิทซ์ใช้ระบบ dynamic bandwidth allocation และการแบ่งช่องสัญญาณใช้ระบบ dynamic channel allocation

### 3.1.3 เสนอโครงสร้างของเทคโนโลยีอีเธอร์แบนเพื่อสร้างสมดุลดของหน่วยกราฟฟิกของหน่วยโครงข่ายแสง



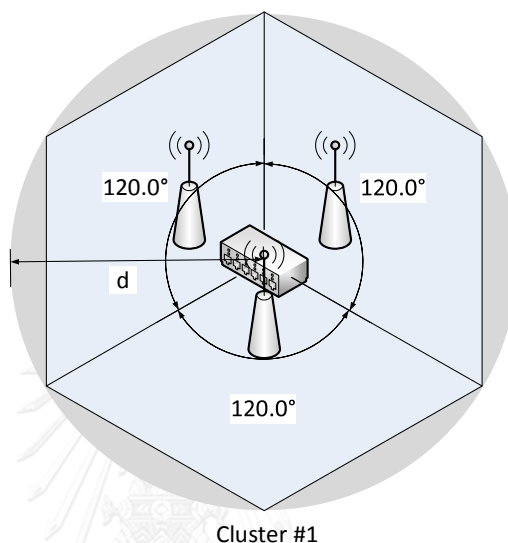
รูปที่ 3-1 โครงสร้างของเทคโนโลยีอีเธอร์แบน

เพื่อสร้างสมดุลดของหน่วยกราฟฟิกของหน่วยโครงข่ายแสง

กำหนดให้โครงสร้างของเทคโนโลยีอีเธอร์แบนที่เรานำมาพิจารณามีโครงสร้างแบบเป็นลำดับชั้น (hierarchical network) ดังแสดงในรูปที่ 3-1 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลัก และส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการ โดยส่วนเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลักเริ่มต้นที่ CO ภายในเป็นที่ตั้งของ OLT จาก OLT เชื่อมโยงด้วยเส้นใยแสงไปยังตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสง เพื่อแบ่งเส้นใยแสงหลักเป็นเส้นใยแสงย่อยเชื่อมโยงไปยัง ONU แต่ละตัวที่อยู่บริเวณส่วนที่เชื่อมต่อกับส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการ ที่ส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการ ONU จะเชื่อมต่ออยู่กับ gateway ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณข้อมูลจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าจากนั้นแปลงสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณวิทยุเพื่อกระจายสัญญาณไปสู่ผู้ใช้บริการสำหรับการส่งข้อมูลทางด้านขาลง และแปลงสัญญาณจากสัญญาณวิทยุเป็นสัญญาณไฟฟ้าจากนั้นแปลงกลับเป็นสัญญาณแสงจากนั้นส่งข้อมูลให้กับ ONU สำหรับการส่งข้อมูลขาขึ้น ซึ่งในส่วนของผู้ใช้บริการบ้านทุกหลังของผู้ใช้บริการจะมีอุปกรณ์ AP ทำหน้าที่รับข้อมูลที่ส่งมาจาก ONU/gateway ในด้านการส่งข้อมูลขาลง และทำหน้าที่หาเส้นทางเพื่อส่งกราฟฟิกที่ถูกสร้างขึ้น

จากอุปกรณ์ของผู้ใช้บริการไปสู่ ONU/gateway ที่อยู่ใกล้ที่สุดต่อไป โดย AP ทุกตัวจะเชื่อมต่อกันแบบโครงตาข่าย

นอกจากนี้บ้านของผู้ใช้บริการจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย (cluster) โดยแบ่งจากการเชื่อมต่อกับ primary ONU เช่น ถ้าบ้านของผู้ใช้บริการเชื่อมต่อกับ primary ONU#1 ผู้ใช้บริการจะอยู่ใน cluster#1 ซึ่งพื้นที่ให้บริการของแต่ละ cluster จะแสดงดังรูปที่ 3-2



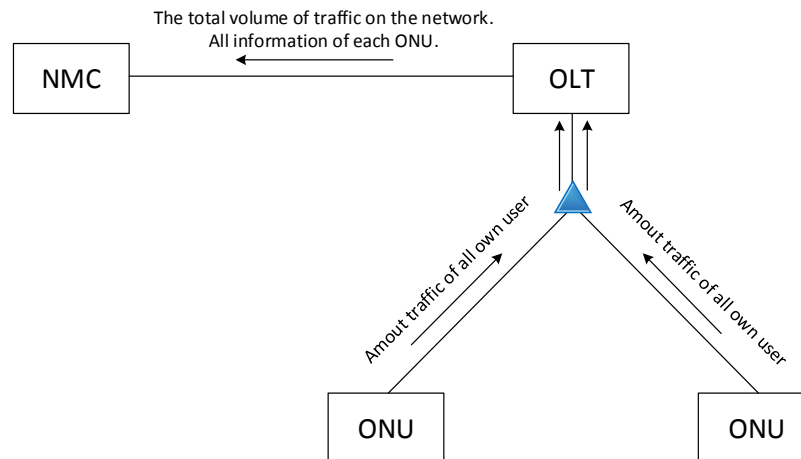
รูปที่ 3-2 พื้นที่ให้บริการของแต่ละกลุ่มย่อย ของเทคโนโลยีอีวอร์แบนที่นำเสนอ

จากรูปที่ 3-2 แสดงพื้นที่การให้บริการของ cluster#1 ซึ่ง บ้านทุกหลังภายในกลุ่มย่อยนี้จะถูกกำหนดให้เชื่อมต่อกับ primary ONU#1 ซึ่งมีพื้นที่ให้บริการให้บริการครอบคลุมพื้นที่วงกลมรัศมี  $d$  หน่วย เพื่อให้ ONU 1 ตัวสามารถให้บริการแก่บ้านทุกหลังครอบคลุมพื้นที่ 360 องศา (degree antenna beam) พื้นที่จะถูกแบ่งเป็น 3 ส่วน แต่ละส่วนจะมี gateway 1 ตัว ที่มีเสาอากาศแบบ omni-directional ครอบคลุมพื้นที่แต่ละ 120 องศา ทำให้สามารถให้บริการเป็นรัศมีวงกลมล้อมรอบ ONU ได้

นอกจากนี้เราต้องการโปรโตคอลใหม่สำหรับ network management controller (NMC) เพื่อทำหน้าที่ปรับสมดุลโหลดของหน่วยทราฟฟิกของ ONU แต่ละตัวให้ใกล้เคียงกัน โดยหน้าที่ของ NMC มีดังต่อไปนี้

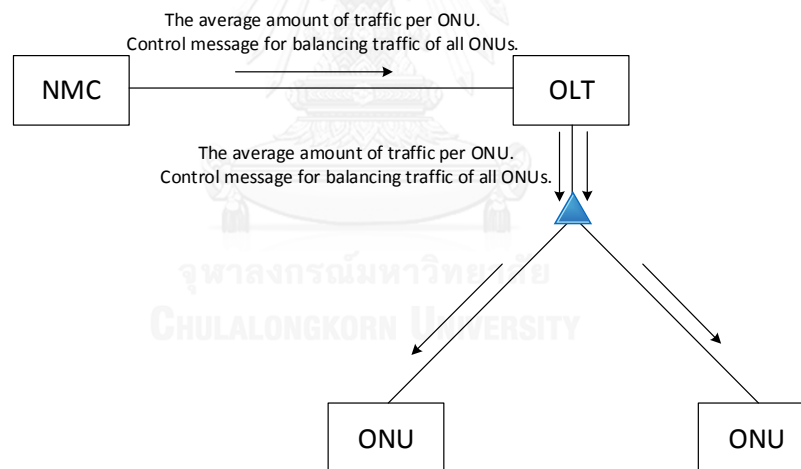
1. NMC จะรับข้อมูลทราฟฟิกรวมของ OLT ตัวที่รับผิดชอบ และข้อมูลทราฟฟิกของ ONU แต่ละตัว ที่เชื่อมโยงกับ OLT ตัวที่รับผิดชอบ เพื่อคำนวณหาปริมาณทราฟฟิกเฉลี่ยของ ONU ทุกตัว ในระบบดังแสดงในรูปที่ 3-3





รูปที่ 3-3 รูปแบบโปรโตคอลที่ ONU ส่งข้อมูลไปให้ OLT เพื่อขออนุญาตส่งข้อมูล

2. หลังจากที่ NMC คำนวณปริมาณกราฟฟิคเฉลี่ยของ ONU ทุกตัวในระบบเรียบร้อยแล้ว NMC จะส่งข้อมูลกลับไปให้ OLT เพื่อให้ OLT ส่ง control message กลับไปยัง ONU เพื่ออนุญาตให้ส่งข้อมูล (ในกรณีกราฟฟิคโหลดของ ONU ทุกตัวใกล้เคียงกัน) หรือ ให้ AP บางตัวหาเส้นทางการส่งข้อมูลใหม่ (ในกรณีกราฟฟิคโหลดของ ONU ทุกตัวยังไม่ใกล้เคียงกัน) ดังแสดงในรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 รูปแบบโปรโตคอลที่ OLT อนุญาตให้ ONU ส่งข้อมูลได้ หรือสั่งให้ผู้ใช้บริการบางรายหาเส้นทางการส่งข้อมูลใหม่

### 3.2 อัลกอริทึม

ในหัวข้อนี้เสนออัลกอริทึมที่สามารถหาเส้นทางการส่งข้อมูลของโครงข่ายไร้สาย เพื่อปรับภาระงานของ ONU ทุกตัวในโครงข่ายเวอร์แบนให้ใกล้เคียงกัน โดยใช้หลักการย้ายการเชื่อมโยงของผู้ใช้บริการตัวที่เหมาะสมจาก ONU ตัวที่มีจำนวนผู้เข้าใช้บริการหนาแน่น (ปริมาณกราฟฟิคสูง: จำนวนผู้ให้บริการมากกว่าจำนวนผู้ให้บริการเฉลี่ยต่อ ONU 1 ตัว) ไปสู่ ONU ใกล้เคียงที่มีจำนวนผู้

เข้าใช้บริการน้อย (ปริมาณทราฟฟิกต่ำ: จำนวนผู้ให้บริการน้อยกว่าจำนวนผู้ให้บริการเฉลี่ยต่อ ONU 1 ตัว) โดยที่ผู้ให้บริการที่จะต้องเปลี่ยนเส้นทางการรับส่งข้อมูลจะต้องหาเส้นทางการรับส่งข้อมูลใหม่ โดยการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดไปสู่ ONU ตัวนั้น ซึ่งจะต้องใช้จำนวน hop ที่น้อยที่สุดและอัตราการรับส่งข้อมูลยังคงใกล้เคียงเดิมที่สุด

หมายเหตุ เพื่อลดความซับซ้อนของอัลกอริทึม จึงกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

1. Gateway 3 ตัว ที่เชื่อมต่อกับ ONU แต่ละตัวจะสมมติให้รวมเป็น gateway เพียง 1 ตัวที่สามารถให้บริการได้ครอบคลุมทั่วพื้นที่ 360 องศา และสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกได้เสมือน gateway 3 ตัวทุกประการ
2. กำหนดให้บ้านของผู้ให้บริการทุกหลัง (woban subscriber: WS) ที่เข้าใช้บริการโครงข่าย สร้างทราฟฟิกด้วยปริมาณเท่ากันทั้งหมด

ดังนั้นการออกแบบอัลกอริทึมในวางระบบเทคโนโลยีอีเธอร์แบนบนพื้นที่จำลอง ที่สามารถปรับสมดุลของทราฟฟิกสำหรับ ONU แต่ละตัวให้รองรับปริมาณทราฟฟิกให้ใกล้เคียงกัน และในขณะเดียวกัน ผู้ให้บริการสามารถรับประกันอัตราการรับส่งข้อมูลที่ต่ำที่สุดที่ผู้ให้บริการทุกหลังสามารถได้รับ จึงแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

|                |   |
|----------------|---|
| ขั้นตอนที่ 1   | หาจำนวน ONU ที่ใช้ในการวางระบบ โดยมีเงื่อนไข คือ ผู้ให้บริการทุกหลังสามารถเข้าถึงบริการได้ด้วยอัตราการรับและส่งข้อมูล ไม่ต่ำกว่าอัตราการรับและส่งข้อมูลที่ผู้ให้บริการรับประกัน ในกรณีที่ไมเกิดความผิดพลาดของระบบ             |
| ขั้นตอนที่ 2   | หาตำแหน่งติดตั้ง ONU บนพื้นที่ที่ต้องการวางระบบ และกำหนด primary ONU ให้แก่ผู้ให้บริการแต่ละหลัง  |
| ขั้นตอนที่ 3   | หาเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลทุกเส้นทางที่เป็นไปได้ เพื่อเก็บสะสมเป็นข้อมูลให้แก่อุปกรณ์ AP ของบ้านผู้ให้บริการแต่ละหลัง  |
| ขั้นตอนที่ 4.1 | คำนวณหาเส้นทางการเชื่อมต่อใหม่เพื่อปรับสมดุลโหลดของหน่วยทราฟฟิกของ ONU แต่ละตัวให้ใกล้เคียงกัน ในกรณีที่ผู้ให้บริการในระบบจำนวนหนึ่งอาจไม่ได้มีการใช้บริการ ภายใต้เงื่อนไขผู้ให้บริการทุกหลังสามารถเข้าถึง ONU ได้ภายใน 1 hop |
| ขั้นตอนที่ 4.2 | คำนวณหาเส้นทางการเชื่อมต่อใหม่เพื่อปรับสมดุลโหลดของหน่วยทราฟฟิกของ ONU แต่ละตัวให้ใกล้เคียงกัน ต่อจากขั้นตอนที่ 4 ในกรณีที่ ONU แต่ละตัวยังทำงานไม่สมดุลกัน   |

## 3.2.1 การกำหนดตัวแปร

|                          |  |
|--------------------------|--|
| $M_{total}$ [หลัง]       | จำนวนบ้านทั้งหมดในโครงข่าย   |
| $M_{ONU}$ [หลัง]         | จำนวนบ้านของผู้ใช้บริการต่อ ONU 1 ตัวในโครงข่าย  |
| $M_{max}^{ONU}$ [หลัง]   | จำนวนบ้านของผู้ใช้บริการสูงสุดต่อ ONU 1 ตัวในโครงข่าย  |
| $C_{min}$ [Mbps]         | อัตราการรับและส่งข้อมูลให้ผู้ให้บริการรับประกันให้แก่ผู้ใช้บริการ  |
| $C_{av}$ [Mbps]          | อัตราการรับและส่งข้อมูลเฉลี่ยในโครงข่าย  |
| $C_{total}$ [Mbps]       | ปริมาณทราฟฟิกสูงสุดที่ OLT 1 ตัวสามารถให้บริการได้   |
| $C_{max}^{ONU}$ [Mbps]   | ปริมาณทราฟฟิกสูงสุดที่ ONU 1 ตัวสามารถให้บริการได้   |
| $N_{opt}$ [ตัว]          | จำนวน ONU ที่ใช้ในการวางระบบ   |
| $N_{max}$ [ตัว]          | จำนวน ONU ที่มากที่สุด ต่อ OLT 1 ตัว   |
| $(x_i^h, y_i^h)$         | ตำแหน่งของบ้านแต่ละของผู้ใช้บริการหลังที่ $i$ ; $i = 1, 2, 3, \dots, M_{total}$  |
| $(x_j^{ONU}, y_j^{ONU})$ | ตำแหน่งติดตั้งของ ONU ตัวที่ $j$ ; $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$   |
| $d_{ij}$ [m]             | ระยะทางระหว่างบ้านหลังที่ $i$ กับ ONU ตัวที่ $j$   |
| $D_i$                    | $\{d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}, \dots, d_{iN_{opt}}\}$ ; $i = 1, 2, 3, \dots, M_{total}$  |
| $s_{ik}$ [m]             | ระยะห่างระหว่างบ้านหลังที่ $i$ ; $i = 1, 2, 3, \dots, M_{total}$ กับบ้านหลังข้างเคียง $k$ ; $k = 1, 2, 3, \dots, M_{total}$ โดยที่ $i \neq k$  |
| $S_i$                    | $\{s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}, \dots, s_{iN_{opt}}\}$ ; $i = 1, 2, 3, \dots, M_{total}$  |
| $O_i$                    | Primary ONU ของบ้านหลังที่ $i$ ; $i = 1, 2, 3, \dots, M_{total}$   |
| $P_{pri}^{OH}$           | เมตริกซ์รวมรวมเส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างบ้านผู้ใช้บริการหลังที่ $i$ และ $O_i$ ของแต่ละตัว  |
| $\hat{d}_i$ [m]          | ระยะทางระหว่างบ้านของผู้ใช้บริการหลังที่ $i$ ; $i = 1, 2, 3, \dots, M_{total}$ กับ primary ONU   |
| $d_{pl}^{OH}$ [m]        | ระยะทางที่มากที่สุดระหว่าง ONU กับบ้านของผู้ใช้บริการที่ไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการรับและส่งข้อมูล และยังคงอัตราการรับและส่งข้อมูลไม่น้อยกว่าอัตราการรับและส่งข้อมูลให้ผู้ให้บริการรับประกัน                      |
| $d_{pl}^{HH}$ [m]        | ระยะทางที่มากที่สุดระหว่างบ้านผู้ใช้บริการ กับบ้านของผู้ใช้บริการข้างเคียงที่ไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการรับและส่งข้อมูล และยังคงอัตราการรับและส่งข้อมูลไม่น้อยกว่าอัตราการรับและส่งข้อมูลให้ผู้ให้บริการรับประกัน |
| $\bar{P}_i^{OH}$         | เวกเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูล ONU ที่ AP ของบ้านหลังที่ $i$ สามารถเข้าเชื่อมโยงได้โดยตรงภายใน 1 hop   |

|                  |   |
|------------------|---|
| $\bar{d}_i^{OH}$ | เวกเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลระยะห่างระหว่างบ้านหลังที่ $i$ และ ONU ที่เก็บใน $\bar{P}_i^{OH}$   |
| $P^{OH}$         | เมตริกซ์ที่เก็บข้อมูล $\bar{P}_i^{OH}$ และ $\bar{d}_i^{OH}$ ของบ้านทุกหลังของผู้ใช้บริการ   |
| $\bar{P}_i^{HH}$ | เวกเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลบ้านหลังข้างเคียงทุกหลัง ที่ AP ของบ้านหลังที่ $i$ สามารถเข้าเชื่อมโยงได้โดยตรงภายใน 1 hop                      |
| $\bar{d}_i^{HH}$ | เวกเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลระยะห่างระหว่างบ้านหลังที่ $i$ และบ้านหลังข้างเคียงทุกหลังที่เก็บใน $\bar{P}_i^{HH}$                            |
| $P^{HH}$         | เมตริกซ์ที่เก็บข้อมูล $\bar{P}_i^{HH}$ และ $\bar{d}_i^{HH}$ ของบ้านทุกหลังของผู้ใช้บริการ   |
| $g_j^{OH}$       | เมตริกซ์เก็บข้อมูล $P^{OH}$ ของบ้านทุกหลังของผู้ใช้บริการที่เชื่อมต่อกับ primary ONU คือ ONU ตัวที่ $j$ ; $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$ |
| $g_j^{HH}$       | เมตริกซ์เก็บข้อมูล $P^{HH}$ ของบ้านทุกหลังของผู้ใช้บริการที่เชื่อมต่อกับ primary ONU คือ ONU ตัวที่ $j$ ; $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$ |
| $W_{total}$      | จำนวน active subscriber ทั้งหมดบนโครงข่าย   |
| $w_j$            | จำนวน active subscriber ที่เข้าใช้งาน primary ONU คือ ONU ตัวที่ $j$ ; $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$                                    |
| $W$              | $(w_1, w_2, w_3, \dots, w_{N_{opt}})$ ; $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$   |
| $n_{av}$         | จำนวน active subscriber เฉลี่ยต่อ ONU 1 ตัวในโครงข่าย   |
| $n_{av}^{ONU}$   | จำนวน ONU ที่มีจำนวน active subscriber เท่ากับ $n_{av}$   |
| $n_H^{ONU}$      | จำนวน ONU ที่มี active subscriber มากกว่า $n_{av}$  |
| $P^{bal}$        | ชุดเส้นทางการเชื่อมโยงข้อมูลของ active subscriber หลังจากปรับภาระทราฟฟิกของ ONU ทุกตัวให้ใกล้เคียงกัน                                   |
| $ONU_H$          | ONU ที่มีจำนวน active subscriber มากกว่า $n_{av}$   |
| $ONU_L$          | ONU ที่มีจำนวน active subscriber น้อยกว่า $n_{av}$  |
| $n_H$            | จำนวน active subscriber ที่เชื่อมโยงอยู่กับ $ONU_H$   |
| $n_L$            | จำนวน active subscriber ที่เชื่อมโยงอยู่กับ $ONU_L$   |
| $n_{move}$       | จำนวน active subscriber $ONU_H$ ที่จะต้องย้ายการเชื่อมโยงไปยัง ONU ข้างเคียงที่ถูกกำหนดโดย NMC  |
| $ap_{move}^H$    | active subscriber ที่สามารถย้ายการเชื่อมโยงไปยัง $ONU_L$ ข้างเคียงได้   |
| $AP_{max}^H$     | active subscriber ของ $ONU_H$   |
| $AP_{min}^H$     | Non-active subscriber ของ $ONU_L$   |

### 3.2.2 ขั้นตอนที่ 1

หาจำนวน ONU ที่ใช้ในการวางระบบ  $N_{opt}$  โดยมีเงื่อนไข คือ ผู้ใช้บริการทุกหลัง สามารถเข้าถึงบริการได้ด้วยอัตราการรับและส่งข้อมูล ไม่ต่ำกว่าอัตราการรับและส่งข้อมูลที่ผู้ให้บริการรับประกันให้แก่ผู้ให้บริการ ในกรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดของระบบ ดังนี้

กำหนดให้เรหาค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ คือ จำนวนบ้านทั้งหมดในโครงข่าย  $M_{total}$  อัตราการรับและส่งข้อมูลที่ผู้ให้บริการรับประกันให้แก่ผู้ให้บริการ  $C_{min}$  ปริมาณทราฟฟิกสูงสุดที่ OLT 1 ตัวสามารถให้บริการได้  $C_{total}$  และปริมาณทราฟฟิกสูงสุดที่ ONU 1 ตัวสามารถให้บริการได้  $C_{max}^{ONU}$

การคำนวณในขั้นตอนนี้เริ่มต้นจากการหาอัตราการรับและส่งข้อมูลเฉลี่ยในโครงข่าย  $C_{av}$  โดยมีสมมติฐานภายใต้การวางระบบโดยใช้โครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟโครงข่ายเดียว กล่าวคือ ถ้าวางระบบโดยใช้ OLT เพียงตัวเดียว จะสามารถให้บริการแก่ผู้ให้บริการทุกหลังโดยอัตราการรับและส่งข้อมูล ไม่ต่ำกว่าอัตราการรับและส่งข้อมูลที่ผู้ให้บริการรับประกันให้แก่ผู้ให้บริการหรือไม่ ดังนี้

$$C_{av} = \frac{C_{total}}{M} \quad (3-1)$$

โดยถ้า  $C_{av} \geq C_{min}$  หมายความว่า การวางระบบด้วยโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟโครงข่ายเดียว สามารถให้บริการแก่ผู้ให้บริการได้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ

จากนั้นคำนวณจำนวนบ้านของผู้ใช้บริการต่อ ONU 1 ตัว  $M_{ONU}$  ได้ดังนี้

$$M_{ONU} = \frac{C_{max}^{ONU}}{C_{min}} \quad (3-2)$$

โดยที่ ONU 1 ตัว จะสามารถให้บริการแก่บ้านของผู้ใช้บริการในโครงข่ายได้สูงสุดไม่เกิน  $M_{max}^{ONU}$  ดังนั้นถ้า  $M_{ONU} \geq M_{max}^{ONU}$  จะกำหนดให้  $M_{ONU} = M_{max}^{ONU}$

จากนั้นหาจำนวน ONU ที่ใช้ในการวางระบบ  $N_{opt}$  โดยที่  $N_{opt} \leq N_{max}$  ดังนี้

$$N_{opt} = \frac{M_{total}}{M_{ONU}} \quad (3-3)$$

---

**Step 1:** Determine the number of required ONUs to be used for deploying network under the condition that all subscribers can get access to ONU with the guarantee of minimum data rate per subscriber.

---

**Input:**  $M_{total}$ ,  $C_{min}$ ,  $C_{total}$  and  $C_{max}^{ONU}$

**Output:**  $N_{opt}$

---

$$C_{av} = \frac{C_{total}}{M_{total}}$$


---

---

If  $C_{av} \geq C_{min}$

$$M_{ONU} = \frac{C_{max}^{ONU}}{C_{min}}$$

If  $M_{ONU} \geq M_{max}^{ONU}$

$$M_{ONU} = M_{max}^{ONU}$$

Else

End

$$N_{opt} = \frac{M_{total}}{M_{ONU}}$$

Else

End

---

### 3.2.3 ขั้นตอนที่ 2

หาดำแหน่งติดตั้ง ONU  $(x_j^{ONU}, y_j^{ONU})$  บนพื้นที่ที่ต้องการวางระบบ และกำหนด primary ONU ให้แก่ผู้ใช้บริการแต่ละหลัง  $O_i$  โดยวิธี deterministic ซึ่งมีเงื่อนไข คือ

1. ผู้ใช้บริการทุกหลังสามารถเข้าถึง ONU ที่ใกล้ที่สุดได้ภายใน 1 hop
2. ผู้ใช้บริการทุกหลังจะต้องได้รับบริการที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลไม่น้อยกว่า  $C_{min}$

ซึ่งสามารถตรวจสอบความเหมาะสมของตำแหน่ง  $(x_j^{ONU}, y_j^{ONU})$  ตามเงื่อนไขที่ถูกระบุ โดยกำหนดให้เราต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ ดังนี้ คือ ตำแหน่งของบ้านทุกหลังของผู้ใช้บริการ  $(x_i^h, y_i^h)$  และตำแหน่งของ ONU ที่ถูกระบุ  $(x_j^{ONU}, y_j^{ONU})$  จากนั้นคำนวณระยะทางระหว่างบ้านหลังที่  $i$  กับ ONU ตัวที่  $j$   $d_{ij}$  โดยใช้สมการหาระยะทางระหว่างจุด (euclidean distance) ดังนี้

$$|d_{ij}| = \sqrt{(x_i^h - x_j^{ONU})^2 + (y_i^h - y_j^{ONU})^2}; i = 1, 2, 3, \dots, M_{total}, j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt} \quad (3-4)$$

จากนั้นนำ  $d_{ij}$  มาใช้ในการกำหนด primary ONU ให้แก่บ้านแต่ละหลัง  $O_i$  โดยการตรวจสอบระยะห่างระหว่างบ้านหลังที่  $i$  กับตำแหน่งติดตั้ง ONU ทุกตัว

เริ่มต้นโดยการนำข้อมูล  $d_{ij}$  มาจัดเรียงใหม่ให้เป็นชุดข้อมูล  $D_i$  โดยชุดข้อมูลนี้จะเก็บระยะทางระหว่างบ้านหลังที่  $i$  กับตำแหน่งติดตั้ง ONU ทุกตัว ดังนี้

$$D_i = \{d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}, \dots, d_{iN_{opt}}\}; i = 1, 2, 3, \dots, M_{total} \quad (3-5)$$

จากนั้นหาค่าที่น้อยที่สุดของแต่ละชุดข้อมูล  $D_i$  จะได้ระยะทางที่น้อยที่สุด  $\hat{d}_i$  ซึ่งเป็นระยะทางระหว่างบ้านหลังที่  $i$  กับ ONU ที่จะถูกกำหนดให้เป็น primary ONU ของบ้านแต่ละหลัง  $O_i$  ต่อไป โดยมีข้อแม้ว่า  $\hat{d}_i \leq d_{pl}^{HO}$

โดยถ้าตำแหน่งติดตั้ง ONU ที่ถูกกำหนดไม่สามารถเป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 2 ข้อดังที่กล่าวมาข้างต้นได้ ให้กำหนดตำแหน่ง ONU ใหม่ และตรวจสอบใหม่ จนกว่าจะได้ตำแหน่งที่สามารถเป็นไปตามเงื่อนไขได้ หากจำเป็นสามารถเพิ่ม หรือ ลด จำนวน ONU ได้ โดยจำนวน ONU ต้องไม่เกินจำนวน  $N_{\max}$  และเก็บเส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างบ้านผู้ให้บริการหลังที่  $i$  และ  $O_i$  ของแต่ละตัวไว้ในเมตริกซ์  $P_{pri}^{OH}$

---

**Step 2:** Determine positions to install ONUs and assign ID of primary ONU for each subscriber.

---

**Input:**  $(x_i^h, y_i^h)$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots, M_{total}$  and  $(x_j^{ONU}, y_j^{ONU})$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$

**Output:**  $O_i$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots, M_{total}$  and  $P_{pri}^{OH}$

---

**For**  $i = 1 : M_{total}$

**For**  $j = 1 : N_{opt}$

$$|d_{ij}| = \sqrt{(x_i^h - x_j^{ONU})^2 + (y_i^h - y_j^{ONU})^2}$$

**End**

$$D_i = \{d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}, \dots, d_{iN_{opt}}\}; i = 1, 2, 3, \dots, M_{total}$$

**End**

**For**  $i = 1 : M_{total}$

$$(\hat{d}_i, O_i) = \min\{D_i\}; \hat{d}_i \leq d_{pl}^{HO}$$

**End**

**Stored**  $P_{pri}^{OH}$

---

### 3.2.4 ขั้นตอนที่ 3

หาเส้นทางเพื่อรับและส่งข้อมูลทุกเส้นทางที่เป็นไปได้ เพื่อเก็บสะสมเป็นข้อมูลให้แก่ อุปกรณ์ AP ของบ้านผู้ให้บริการแต่ละหลัง เพื่อใช้ปรับเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมโยงข้อมูลเพื่อปรับภาระของ ONU ในขั้นตอนถัดไป ดังนี้

กำหนดให้เราต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ ดังนี้ คือ  $(x_i^h, y_i^h)$  ตำแหน่งของบ้านทุกหลังของผู้ให้บริการ ตำแหน่งของ ONU ทุกตัวที่ถูกติดตั้งแล้วในระบบ  $(x_j^{ONU}, y_j^{ONU})$  และชุดข้อมูล  $D_i$

เริ่มต้นด้วยการตรวจสอบว่าบ้านหลังที่  $i$  สามารถเชื่อมโยงเข้ากับ ONU ข้างเคียงตัวใดบ้างภายใน 1 hop ด้วยการตรวจสอบว่าบ้านหลังที่  $i$  ตั้งอยู่ภายในรัศมีให้บริการของ ONU ข้างเคียงหรือไม่ โดยใช้  $d_{pl}^{OH}$  ในการตัดสินใจ โดย  $\bar{P}_i^{OH}$  คือ เวกเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูล ONU ที่ AP ของ

บ้านหลังที่  $i$  สามารถเข้าเชื่อมโยงได้โดยตรงภายใน 1 hop และ  $\bar{d}_i^{OH}$  คือ เวกเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลระยะห่างระหว่างบ้านหลังที่  $i$  และ ONU ที่เก็บใน  $\bar{P}_i^{OH}$  จากนั้นรวบรวมข้อมูล  $\bar{P}_i^{OH}$  และ  $\bar{d}_i^{OH}$  ของบ้านทุกหลังของผู้ใช้บริการไว้ในเมตริกซ์  $P^{OH}$

จากนั้นหาระยะห่างระหว่างบ้านหลังที่  $i$  กับบ้านหลังข้างเคียง  $k$   $s_{ik}$  โดยที่  $i \neq k$  ดังนี้

$$|s_{ik}| = \sqrt{(x_i^h - x_k^h)^2 + (y_i^h - y_k^h)^2} \quad (3-6)$$

และนำข้อมูล  $s_{ik}$  มาจัดเรียงใหม่ให้เป็นชุดข้อมูล  $S_i$  โดยชุดข้อมูลนี้จะเก็บระยะทางระหว่างบ้านหลังที่  $i$  บ้านหลังข้างเคียง ดังนี้

$$S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}, \dots, s_{iN_{opt}}\}; i = 1, 2, 3, \dots, M_{total} \quad (3-7)$$

จากนั้นตรวจสอบว่าบ้านหลังที่  $i$  สามารถเชื่อมโยงกับบ้านหลังที่  $k$  ข้างเคียงโดยตรงภายใน 1 hop ได้หรือไม่ โดยใช้  $d_{pt}^{HH}$  ในการตัดสินใจ โดย  $\bar{P}_i^{HH}$  คือ เวกเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลบ้านหลังข้างเคียงทุกหลัง ที่ AP ของบ้านหลังที่  $i$  สามารถเข้าเชื่อมโยงได้โดยตรงภายใน 1 hop และ  $\bar{d}_i^{HH}$  คือ เวกเตอร์ที่ใช้เก็บข้อมูลระยะห่างระหว่างบ้านหลังที่  $i$  และบ้านหลังข้างเคียงทุกหลังที่เก็บใน  $\bar{P}_i^{HH}$  จากนั้นรวบรวมข้อมูล  $\bar{P}_i^{HH}$  และ  $\bar{d}_i^{HH}$  ของบ้านทุกหลังของผู้ใช้บริการไว้ในเมตริกซ์  $P^{HH}$

จากนั้นนำข้อมูลจากเมตริกซ์  $P^{OH}$  และ  $P^{HH}$  มาจัดเรียงข้อมูลใหม่ โดยจัดเรียงข้อมูลตาม primary ONU โดยบ้านของผู้ใช้บริการที่เชื่อมโยงกับ primary ONU ตัวเดียวกันจะถูกจัดอยู่ในชุดข้อมูลชุดเดียวกัน คือ ชุดข้อมูล  $g_j^{OH}$  ซึ่งเป็นเมตริกซ์เก็บข้อมูล  $P^{OH}$  ของบ้านทุกหลังของผู้ใช้บริการที่เชื่อมต่อกับ primary ONU คือ ONU ตัวที่  $j$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$  และชุดข้อมูล  $g_j^{HH}$  ซึ่งเป็นเมตริกซ์เก็บข้อมูล  $P^{HH}$  ของบ้านทุกหลังของผู้ใช้บริการที่เชื่อมต่อกับ primary ONU คือ ONU ตัวที่  $j$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$

---

**Step 3:** Find and store all possible routes which can connect each AP in subscriber's house to ONUs.

---

**Input:**  $(x_i^h, y_i^h)$ ,  $D_i$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots, M_{total}$  and  $(x_j^{ONU}, y_j^{ONU})$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$

**Output:**  $P^{OH}$ ,  $P^{HH}$ ,  $g_j^{OH}$  and  $g_j^{HH}$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$

---

**For**  $i = 1 : M_{total}$

$$(\bar{P}_i^{OH}, \bar{d}_i^{OH}) = \text{find}(D_i \leq d_{pt}^{OH})$$

**End**

**Stored**  $P^{OH}$ ,  $g_j^{OH}$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$

**For**  $i = 1 : M_{total}$

**For**  $k = 1 : M_{total}$

**if**  $i \neq k$

---



---

```

    |sik| = √((xih - xkh)2 + (xih - xkh)2
Else
    |sik| = NaN
End
End
Si = {si1, si2, si3, ..., siMtotal}; i = 1, 2, 3, ..., Mtotal
End
For i = 1 : Mtotal
    (PiHH, diHH) = find(Di ≤ dplHH)
End
Stored PHH, gjHH; j = 1, 2, 3, ..., Nopt

```

---

### 3.2.5 ขั้นตอนที่ 4.1

คำนวณหาเส้นทางการเชื่อมต่อใหม่เพื่อปรับสมดุลโหลดของหน่วยทราฟฟิกของ ONU แต่ละตัวให้ใกล้เคียงกัน ในกรณีที่ผู้ใช้บริการในระบบจำนวนหนึ่งอาจไม่ได้มีการใช้บริการ ภายใต้เงื่อนไขผู้ใช้บริการทุกหลังสามารถเข้าถึง ONU ได้ภายใน 1 hop

กำหนดให้เราต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ ดังนี้ คือ จำนวน active subscriber ทั้งหมดบนโครงข่าย  $W_{total}$  จำนวน active subscriber ที่เชื่อมต่ออยู่กับ primary ONU ทุกตัว  $W$  เส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างบ้านผู้ใช้บริการหลังที่  $i$  และ  $O_i$  ของแต่ละตัว  $P_{pri}^{OH}$  และเมตริกซ์เก็บข้อมูล  $P^{OH}$  ของบ้านทุกหลังของผู้ใช้บริการที่เชื่อมต่อกับ primary ONU คือ ONU ตัวที่  $j$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$   $g_j^{OH}$

เริ่มต้นด้วยการคำนวณหาจำนวน active subscriber เฉลี่ยต่อ ONU 1 ตัวในโครงข่าย  $n_{av}$  ดังนี้

$$n_{av} = \frac{W_{total}}{N_{opt}} \quad (3-8)$$

จากนั้นหาจำนวน ONU ที่มีจำนวน active subscriber เท่ากับ  $n_{av}$  คือ  $n_{av}^{ONU}$  ซึ่งถ้า  $n_{av}^{ONU} = N_{opt}$  แปลว่า ONU ทุกตัวในระบบทำงานใกล้เคียงกัน โดยไม่ต้องปรับเส้นทางใหม่ ดังนั้นเส้นทางการเชื่อมโยงใหม่ของบ้านทุกหลัง หลังจากปรับภาระงานของ ONU ผ่านอัลกอริทึมที่นำเสนอแล้ว  $P^{bal}$  จะใช้เส้นทาง  $P_{pri}^{OH}$  เดิม

$$P^{bal} = P_{pri}^{OH} \quad (3-9)$$

แต่ถ้า  $n_{av}^{ONU} < N_{opt}$  นั้นหมายความว่า ONU ในระบบมีภาระงานไม่ใกล้เคียงกัน NMC จึงต้องหาเส้นทางเพื่อปรับเส้นทางส่งข้อมูลของ active subscriber ของ ONU ที่มีผู้เข้าใช้บริการมากกว่า  $n_{av}$  ไปยัง ONU ข้างเคียงที่มีผู้เข้าใช้บริการน้อยกว่า  $n_{av}$  คือ  $ONU_L$  ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนแรกคำนวณหาจำนวน ONU ที่มี active subscriber มากกว่า  $n_{av}$  คือ  $n_H^{ONU}$

ขั้นตอนที่สองหา  $ONU_H$  และจำนวน active subscriber ที่เชื่อมโยงอยู่กับ  $ONU_H$  คือ

$n_H$

ขั้นตอนที่สามหาจำนวน active subscriber  $ONU_H$  ที่จะต้องย้ายการเชื่อมโยงไปยัง  $ONU_L$  ข้างเคียง  $n_{move}$  ดังนี้

$$n_{move} = n_H - n_{av} \quad (3-10)$$

ขั้นตอนที่สี่หา active subscriber ที่สามารถย้ายการเชื่อมโยงไปยัง  $ONU_L$  ข้างเคียงได้  $ap_{move}^H$  จากชุดข้อมูล  $g_j^{OH}$  ;  $j = ONU_H$  โดยจะเลือกเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด (shortest path) ระหว่าง  $ap_{move}^H$  กับ  $ONU_H$  ซึ่งจะวนขั้นตอนนี้ซ้ำเป็นจำนวน  $n_{move}$  รอบ

วนซ้ำขั้นตอนที่หนึ่งถึงขั้นตอนนี้เป็นจำนวน  $n_H^{ONU}$  รอบ จากนั้นอัปเดตเส้นทางของการเชื่อมโยงที่ถูกเปลี่ยนแปลงทั้งหมด และเก็บเส้นทางการรับส่งข้อมูลใหม่ในรูปแบบของ  $P^{bal}$  และตรวจสอบว่า ONU ทุกตัวในระบบทำงานใกล้เคียงกันหรือไม่ หาก  $n_{av}^{ONU} = N_{opt}$  ก็ให้จบการทำงานของ NMC ในการคำนวณหาเส้นทางเชื่อมต่อใหม่เพียงอัลกอริทึมนี้ และส่ง control message ไปยัง active subscriber และ ONU ทุกตัวให้โอนย้ายการเชื่อมต่อตามเส้นทางใหม่  $P^{bal}$  แต่ถ้า  $n_{av}^{ONU} \neq N_{opt}$  ให้ NMC คำนวณต่อในขั้นตอนถัดไป

**Step 4.1:** Find out the proper route for balancing the traffic load of all ONUs in case of some subscriber remains unused.

**Input:**  $W_{total}, W, P_{pri}^{OH}$  and  $g_j^{OH}$  ;  $j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$

**Output:**  $P^{bal}$

$$n_{av} = \frac{W_{total}}{N_{opt}}$$

$$n_{av}^{ONU} = \text{find}(W == n_{av})$$

$$\text{If } n_{av}^{ONU} = N_{opt}$$

$$P^{bal} = P_{pri}^{OH}$$

Else

---

```

 $n_H^{ONU} = \text{find}(W > n_{av})$ 
For  $z = 1 : n_H^{ONU}$ 
     $(n_H, ONU_H) = \max(W)$ 
     $n_{move} = n_H - n_{av}$ 
    For  $i = 1 : n_{move}$ 
         $(ap_{move}^H, ONU_L) = \min(g_j^{OH}) ; j = ONU_H$ 
    End
End
Update  $P^{bal}, W$  and  $g_j^{OH}$ 
End

```

---

### 3.2.6 ขั้นตอนที่ 4.2

คำนวณหาเส้นทางการเชื่อมต่อใหม่เพื่อปรับสมดุลโหลดของหน่วยทรานฟิคของ ONU แต่ละตัวให้ใกล้เคียงกัน ต่อจากขั้นตอนที่ 4 ในกรณีที่ ONU แต่ละตัวยังทำงานไม่สมดุลกัน

กำหนดให้เราต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ ดังนี้ คือ  $g_j^{HH}$  จำนวน active subscriber ที่เชื่อมต่ออยู่กับ ONU ทุกตัว และ  $W$  ที่ได้ถูกอัปเดตแล้วจากขั้นตอนที่ 4

เริ่มต้นจากการหาจำนวน ONU ที่มีจำนวน active subscriber เท่ากับ  $n_{av}$  โดยถ้า  $n_{av}^{ONU} < N_{opt}$  แสดงว่า active subscriber ไม่สามารถย้ายการเชื่อมต่อไปยัง ONU ข้างเคียงได้ภายใน 1 hop จึงต้องใช้เส้นทางการเชื่อมโยงจาก active subscriber ของ  $ONU_H$  คือ  $AP_{max}^H$  ไปยัง Non-active subscriber ของ  $ONU_L$  คือ  $AP_{min}^H$  ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนแรกหา  $ONU_H$  และ  $n_H$

ขั้นตอนต่อมาหา  $ONU_L$  และ  $n_L$

ขั้นตอนต่อมาหา  $n_{move}$

$$n_{move} = n_H - n_{av} \quad (3-11)$$

ขั้นตอนต่อมาหา  $(m_H, m_L)$  เส้นทางการเชื่อมโยงที่ใกล้ที่สุดของ active subscriber ของ  $AP_{max}^H$  กับ non-active subscriber ของ  $AP_{min}^H$

ขั้นตอนสุดท้ายใช้เส้นทางที่หาได้ใหม่  $(m_H, m_L)$  เพื่ออัปเดต  $P^{bal}$  และ  $W$  จากนั้น NMC สั่งการให้ ONU และผู้ใช้บริการย้ายปรับเปลี่ยนการเชื่อมโยงเพื่อปรับสมดุลกราฟฟิกของ ONU ในระบบต่อไป

---

**Step 4.2:** Find out the proper route for balancing the traffic load of all ONUs in case of some subscriber remains unused.

---

**Input:**  $g_j^{HH}$  and  $W$

**Output:**  $P^{bal}$

---

$n_{av}^{ONU} = find(W == n_{av})$

If  $n_{av}^{ONU} < N_{opt}$

$(n_H, ONU_H) = max(W)$

$(n_L, ONU_L) = min(W)$

$n_{move} = n_H - n_{av}$

For  $i = 1 : n_{move}$

$(m_H, m_L) = min(P_{AP_{max}, AP_{min}}^{HH})$

End

Update  $P^{bal}$  and  $W$

Else

End

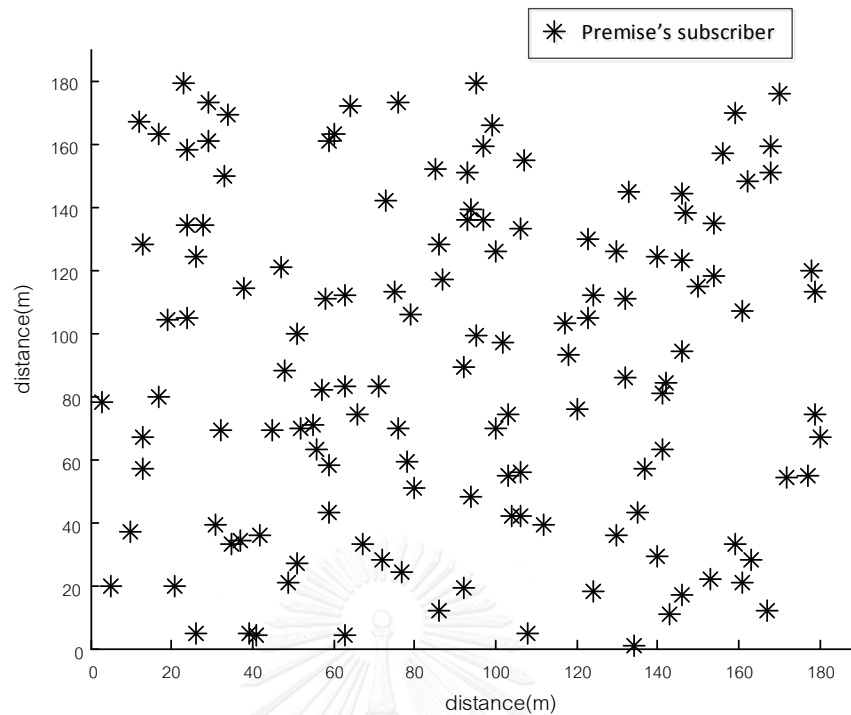
---

## บทที่ 4

### ผลการจำลอง

ในบทนี้จะทดสอบอัลกอริทึมที่ได้เสนอในบทที่ 3 บนพื้นที่จำลองขนาด  $190 \times 190$  ตารางเมตร มีจำนวนบ้านของผู้ใช้บริการทั้งหมด  $M_{total}$  คือ 135 หลัง ผู้ใช้บริการทุกหลังสามารถเข้าถึงบริการได้ด้วยอัตราการรับและส่งข้อมูล ไม่ต่ำกว่าอัตราการรับและส่งข้อมูลที่ผู้ให้บริการรับประกัน  $C_{min}$  คือ 70 Mbps อุปกรณ์ในส่วนเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลัก ให้บริการโดยใช้เทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ ตามมาตรฐาน 10G-PON ให้บริการด้วยอัตราการรับและส่งข้อมูลสูงสุด  $C_{total}$  คือ 10 Gbps ตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสงสามารถแบ่งเส้นใยแสงหลักไปเป็นเส้นใยแสงย่อย  $N_{max}$  คือ 64 สาย โดยมีรัศมีการให้บริการสูงสุดถึง 20 km อุปกรณ์ในส่วนเชื่อมต่อกับผู้ให้บริการ ให้บริการด้วยเทคโนโลยีวีร์เลสแลนดตามมาตรฐาน IEEE 802.11n ซึ่งสามารถให้บริการด้วยอัตราเร็วสูงสุดถึง 600 Mbps โดยที่ ONU 1 ตัวจะมี gateway 3 ตัว โดยเพื่อให้การจำลองเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ กำหนดให้ gateway 1 ตัวสามารถรองรับ AP ของผู้ให้บริการได้ไม่เกิน 5 หลัง ดังนั้น ONU 1 ตัว จะสามารถให้บริการแก่บ้านของผู้ใช้บริการในโครงข่าย  $M_{max}^{ONU}$  คือ 15 หลัง  $C_{max}^{ONU}$  คือ  $3 \times 400$  เป็น 1200 Mbps และจำนวนผู้เข้าใช้บริการสูงสุดต่อ ONU 1 ตัว  $M_{ONU}$  คือ 15 หลัง โดยตำแหน่งของผู้ใช้บริการแต่ละหลัง แสดงด้วยเครื่องหมาย “ดอกจัน” ถูกสุ่มมาด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มของตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete uniform distribution) ดังแสดงในรูปที่ 4-1

จากพารามิเตอร์ในตารางที่ 4-1 จะสามารถหาอัตราการรับและส่งข้อมูลเฉลี่ยในโครงข่าย  $C_{av}$  จากสมการที่ (3-1) จะได้  $C_{av}$  คือ 74 Mbps ดังนั้น  $C_{av} \geq C_{min}$  จริง หมายความว่า การวางระบบด้วยโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟโครงข่ายเดียว สามารถให้บริการแก่ผู้ให้บริการได้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ จากนั้นคำนวณจำนวนบ้านของผู้ใช้บริการต่อ ONU 1 ตัว  $M_{ONU}$  จากสมการที่ (3-2) จะได้  $M_{ONU}$  คือ 18 หลัง แต่เนื่องจาก  $M_{ONU} \geq M_{max}^{ONU}$  ดังนั้นจะกำหนดให้  $M_{ONU} = M_{max}^{ONU}$  คือ 15 หลัง จากนั้นหาจำนวน ONU ที่ใช้ในการวางระบบ  $N_{opt}$  จากสมการที่ (3-3) จะได้  $N_{opt}$  คือ 9 ตัว



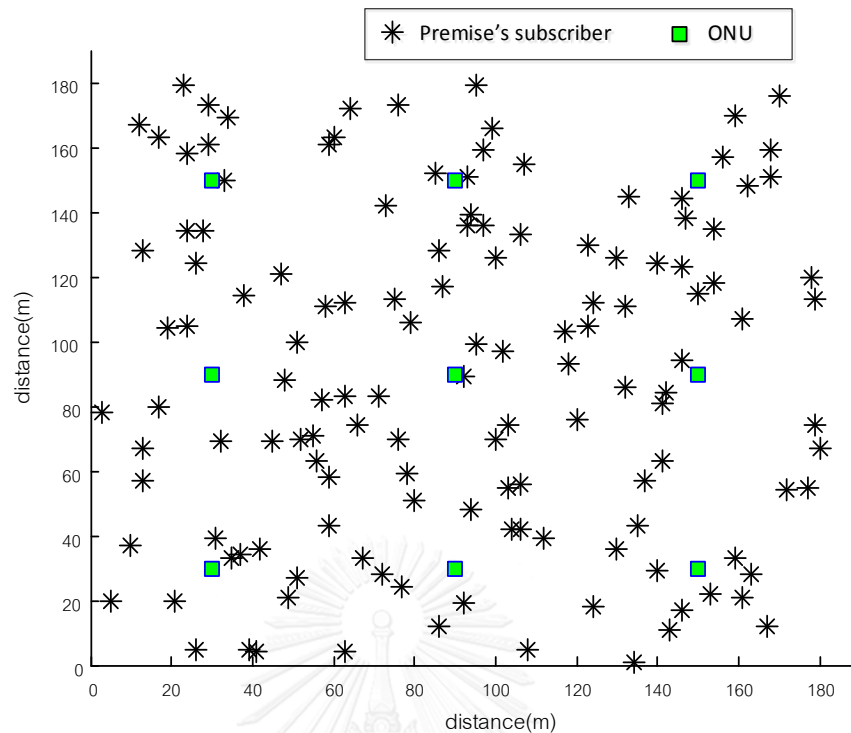
รูปที่ 4-1 บ้านของผู้ใช้บริการบนพื้นที่จำลอง

ตารางที่ 4-1 พารามิเตอร์ที่กำหนดให้เพื่อใช้คำนวณอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 1

| Parameter | $C_{\min}$ | $C_{total}$ | $C_{\max}^{ONU}$ | $N_{\max}$ | $M_{\max}^{ONU}$ | $M_{total}$ |
|-----------|------------|-------------|------------------|------------|------------------|-------------|
| Value     | 70         | 10          | 1200             | 64         | 15               | 135         |
| Unit      | Mbps       | Gbps        | Mbps             | ตัว        | หลัง             | หลัง        |

จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 คือ กำหนดตำแหน่งติดตั้ง ONU ( $x_j^{ONU}, y_j^{ONU}$ );  $j=1,2,3,\dots,9$  ในกรณีนี้กำหนดให้ ONU จำนวน 9 ตัว ถูกจัดวางให้อยู่ในรูปแบบของโทโพโลยีแบบกริดขนาด  $3 \times 3$  และกำหนดให้ gateway และ ONU อยู่บนตำแหน่งเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-2 จากนั้นตรวจสอบตำแหน่งการวาง ONU ว่าสามารถกำหนด primary ONU ให้แก่ผู้บริการแต่ละหลัง  $O_i$  โดยวิธีซึ่งมีเงื่อนไข คือ

1. ผู้บริการทุกหลังสามารถเข้าถึง ONU ที่ใกล้ที่สุดได้ภายใน 1 hop
2. ผู้บริการทุกหลังจะต้องได้รับบริการที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลไม่น้อยกว่า  $C_{\min}$

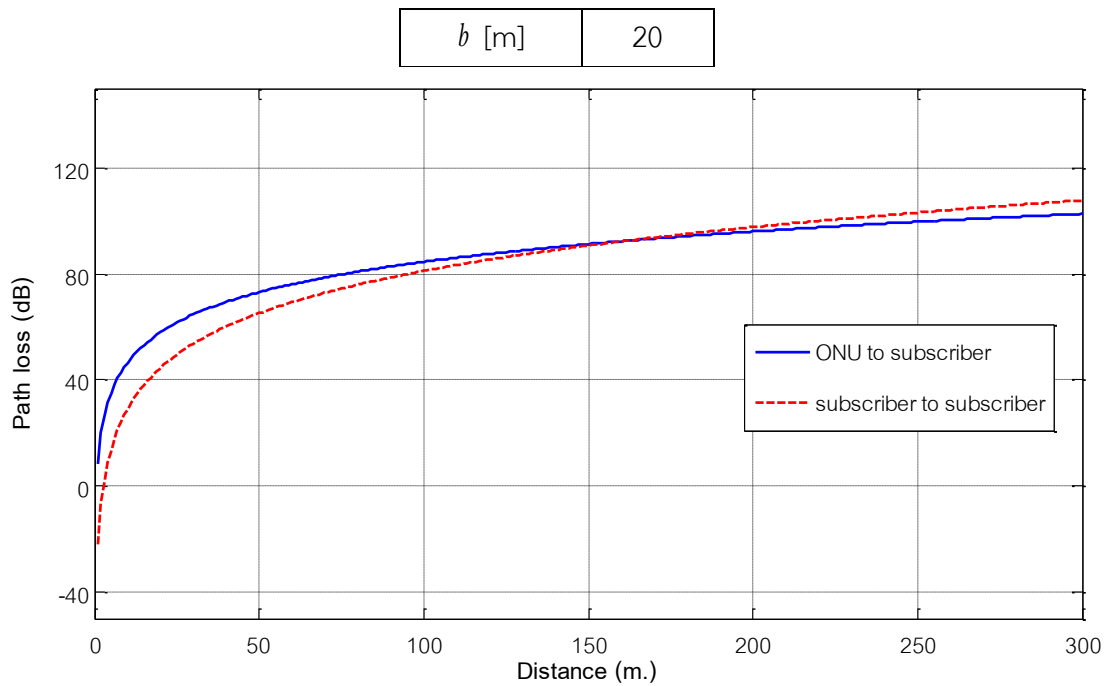


รูปที่ 4-2 ตำแหน่งการวาง ONU ด้วยวิธี deterministic

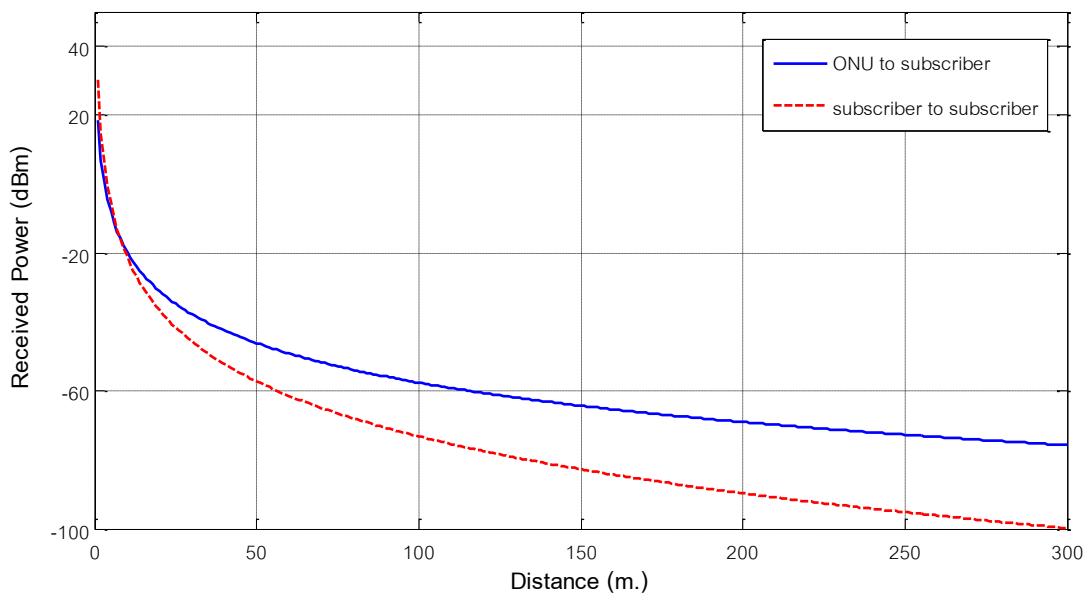
โดยเริ่มต้นจากการคำนวณหาระยะทางที่มากที่สุดระหว่าง ONU/gateway กับบ้านของผู้ใช้บริการที่ไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการรับและส่งข้อมูล  $d_{pl}^{OH}$  และระยะทางที่มากที่สุดระหว่างบ้านผู้ใช้บริการกับบ้านของผู้ใช้บริการข้างเคียง  $d_{pl}^{HH}$  ที่ไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการรับและส่งข้อมูล และยังคงอัตราอัตราการรับและส่งข้อมูลไม่น้อยกว่าอัตราการรับและส่งข้อมูลที่ได้รับบริการรับประกันโดยการคำนวณอัตราการลดทอนของสัญญาณคลื่นวิทยุ 2.4 GHz จะใช้ cost 231 walfish – ikekami model ตามที่แสดงในหัวข้อ 2.4.1.2 กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4-2 ผลจากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4-3 โดยเส้นตรงสีน้ำเงินแสดงอัตราการลดทอนจาก ONU/gateway ไปสู่ AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการ และเส้นประสีแดงแสดงอัตราการลดทอนจาก AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการไปยัง AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการข้างเคียง ณ ตำแหน่งระยะทางต่าง ๆ จากนั้นหาค่ากำลังของสัญญาณที่เครื่องรับรับได้ (receive sensitivity) จากสมการที่ (2-27) ได้ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 4-4

ตารางที่ 4-2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณ

|                |    |
|----------------|----|
| $h_{TX}$ [m]   | 10 |
| $h_{RX}$ [m]   | 1  |
| $h_{roof}$ [m] | 8  |
| $w$ [m]        | 10 |



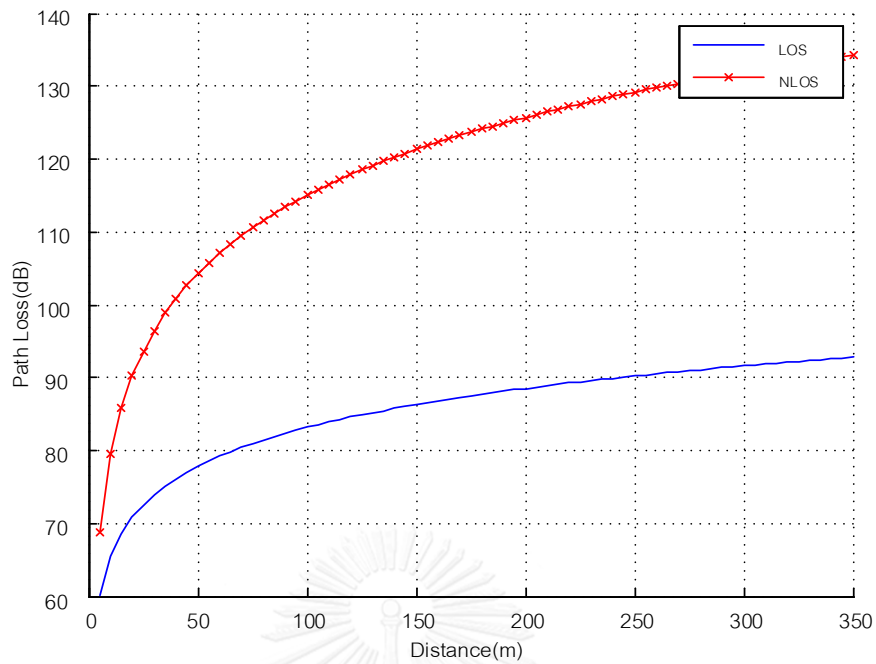
รูปที่ 4-3 อัตราการลดทอนของคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz



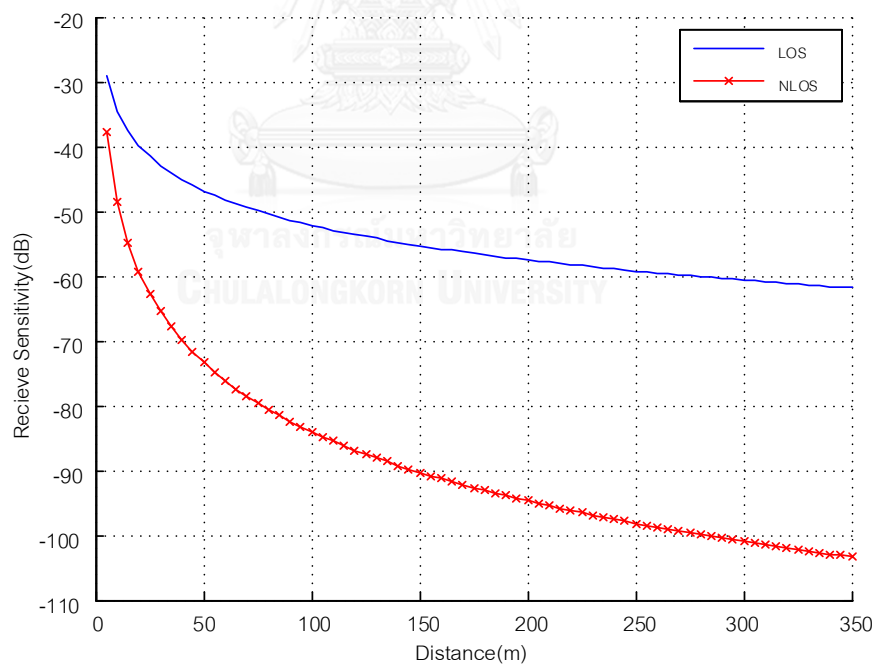
รูปที่ 4-4 กำลังของสัญญาณที่เครื่องรับสามารถรับได้ของคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz

การคำนวณอัตราการลดทอนสำหรับคลื่นวิทยุความถี่ 5.7 GHz จาก ONU/gateway ไปสู่ AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการ จะใช้โมเดล wireless neighborhood area network path loss characterization จากหัวข้อที่ 2.4.1.3 ผลจากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4-5 และผลจากการคำนวณกำลังของสัญญาณที่เครื่องรับรับได้ จากสมการที่ (2-27) ได้แสดงในรูปที่ 4-6



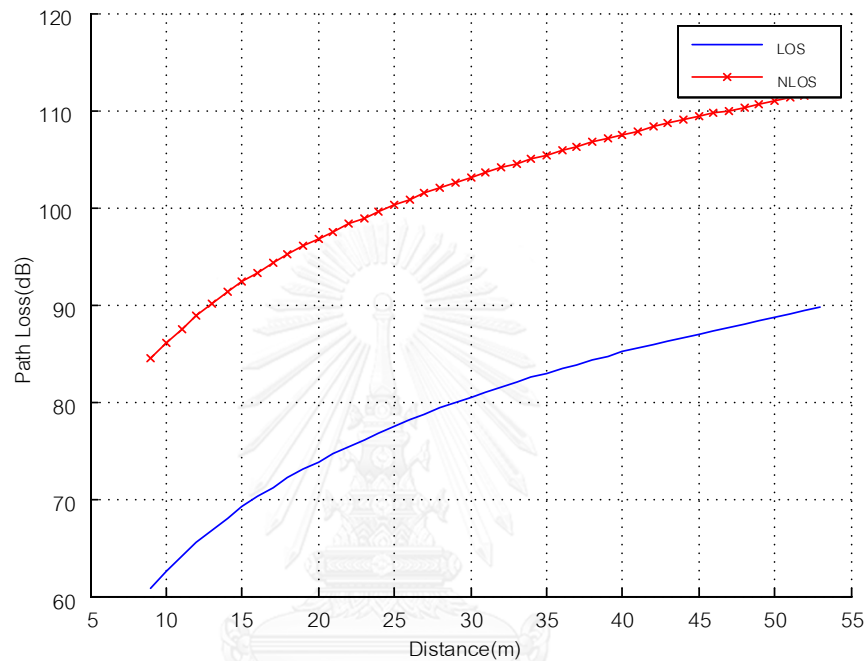


รูปที่ 4-5 อัตราการลดทอนสำหรับคลื่นวิทยุความถี่ 5.7 GHz จาก ONU/gateway ไปสู่ AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการที่ระยะทางต่าง ๆ

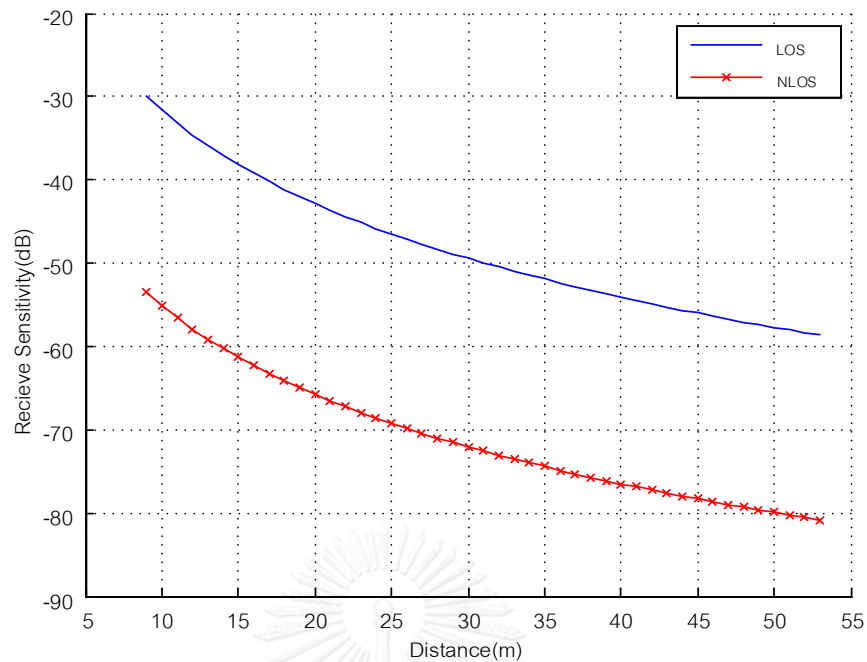


รูปที่ 4-6 กำลังของสัญญาณคลื่นวิทยุความถี่ 5.7 GHz ที่ AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการรับได้จาก ONU/gateway ที่ระยะทางต่าง ๆ

การคำนวณอัตราการลดทอนสำหรับคลื่นวิทยุความถี่ 5.7 GHz จาก AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการ ไปสู่ AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการข้างเคียง จะใช้โมเดล path loss and multipath power decay of the wideband car-to-car channel จากหัวข้อที่ 2.4.1.4 ผลจากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4-7 และผลจากการคำนวณกำลังของสัญญาณที่เครื่องรับรับได้ จากสมการที่ (2-27) ได้แสดงในรูปที่ 4-8



รูปที่ 4-7 อัตราการลดทอนสำหรับคลื่นวิทยุความถี่ 5.7 GHz จาก AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการ ไปสู่ AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการข้างเคียงที่ระยะทางต่าง ๆ



รูปที่ 4-8 กำลังของสัญญาณคลื่นวิทยุความถี่ 5.7 GHz ที่ AP ของบ้านแต่ละหลังของผู้ใช้บริการได้รับ จาก AP ของบ้านของผู้ใช้บริการข้างเคียงที่ระยะทางต่าง ๆ

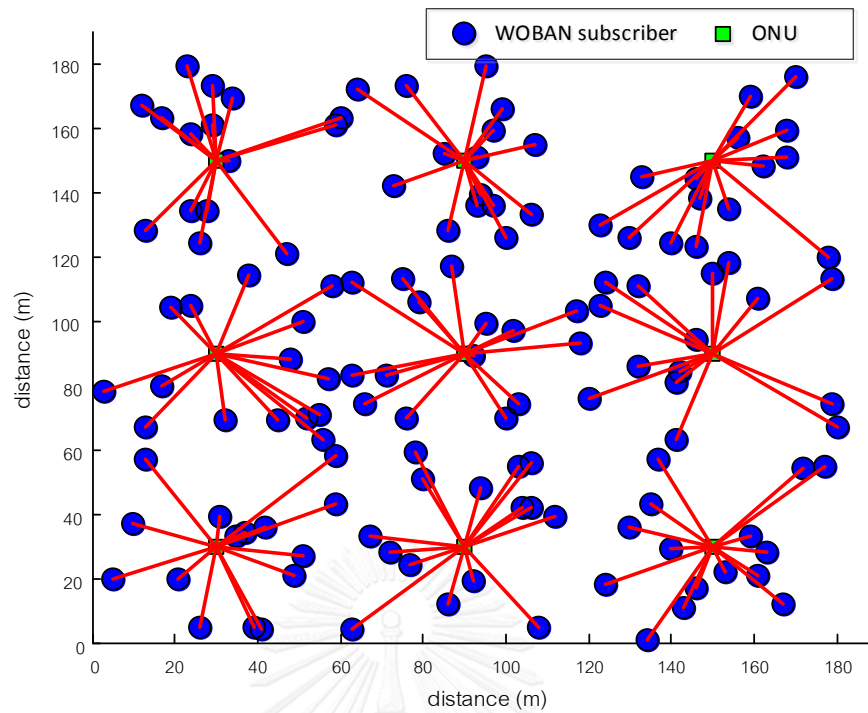
ตารางที่ 4-3 MCS rate ของอุปกรณ์ AP มาตรฐาน 802.11n

| MCS<br>rate<br>index | data<br>streams | modulation/EC<br>C <sub>พลา</sub> | Data Rate (Mbps ) |        |           |        | Receive<br>Sensitivity<br>(dBm ) |        |
|----------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------|--------|-----------|--------|----------------------------------|--------|
|                      |                 |                                   | 800 NS GI         |        | 400 NS GI |        |                                  |        |
|                      |                 |                                   | 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 |

ดังนั้นจะได้ระยะห่างระหว่างผู้ใช้บริการถึง gateway/ONU ตัวที่ใกล้ที่สุดไม่เกิน  $d_{pl}^{HO}$  50 m และระยะห่างระหว่างบ้านแต่ละหลังที่ใกล้กันที่สุดไม่เกิน  $d_{pl}^{HH}$  25 m สำหรับการส่งสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุด้วยความถี่ 5.7 GHz โดยหลังจากผ่านขั้นตอนของอัลกอริทึมในขั้นตอนที่ 2 แล้วจะได้ primary ONU ของบ้านหลังที่  $i; i = 1, 2, 3, \dots, M_{total}$   $O_i$  ตำแหน่งติดตั้งของ ONU ตัวที่  $(x_j^{ONU}, y_j^{ONU})$   $j; j = 1, 2, 3, \dots, N_{opt}$  และเมตริกซ์รวมรวมเส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างบ้านผู้ใช้บริการหลังที่  $i$  และ  $O_i$  ของแต่ละตัว  $P_{pri}^{OH}$  ดังแสดงในรูปที่ 4-9 ซึ่งสามารถการรันดีอัตราการรับส่งข้อมูลให้แก่ผู้ใช้บริการได้

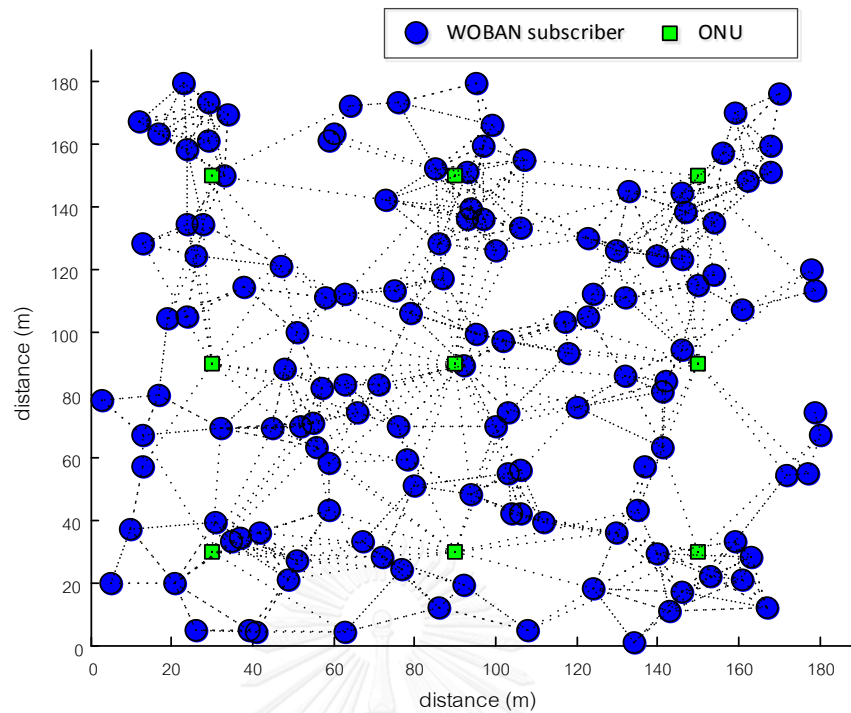
จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนที่ 3 หาเส้นทางเพื่อรับและส่งข้อมูลทุกเส้นทางที่เป็นไปได้ เพื่อเก็บสะสมเป็นข้อมูลให้แก่ อุปกรณ์ AP ของบ้านผู้ใช้บริการแต่ละหลัง เพื่อใช้ปรับเปลี่ยนเส้นทางการเชื่อมโยงข้อมูลเพื่อปรับภาระของ ONU ในขั้นตอนถัดไป ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงด้วยสัญลักษณ์ “เส้นประ” ในรูปที่ 4-10



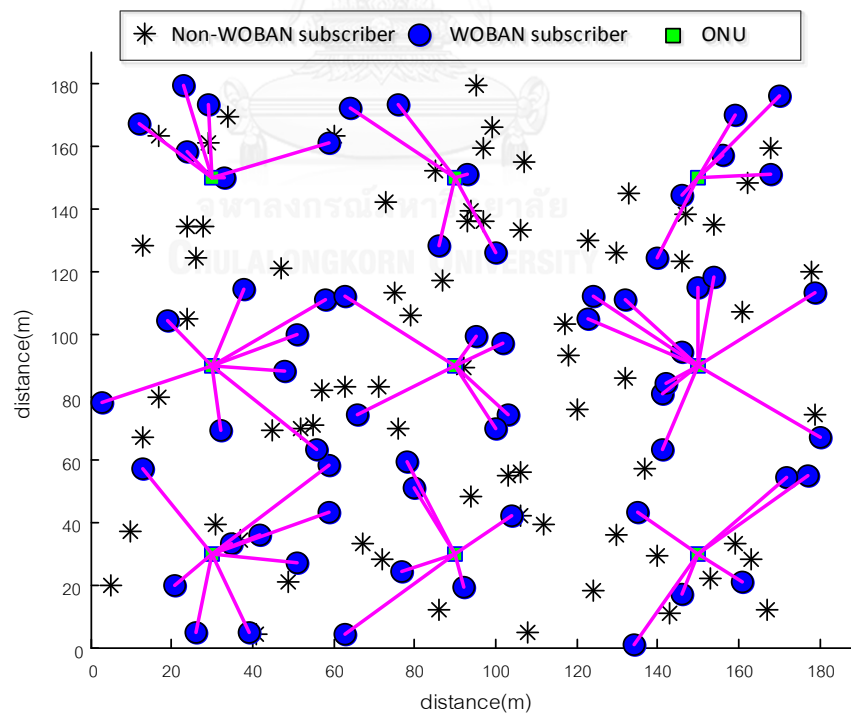
รูปที่ 4-9 เส้นทางการเชื่อมต่อระหว่างบ้านผู้ใช้บริการหลังแต่ละหลังกับ primary ONU ที่ผู้ใช้บริการสามารถรับส่งข้อมูลให้แก่อุปกรณ์รับส่งข้อมูลให้แก่ผู้ใช้บริการได้

ตารางที่ 4-4 จำนวนผู้เข้าใช้บริการโครงข่ายออร์แกนของ ONU แต่ละตัว

| ONU ID | จำนวนผู้เข้าใช้บริการโครงข่ายออร์แกน (WS) | Bit rate/AP | Total bit rate of ONU |
|--------|---|-------------|-----------------------|
| 1      | 15  | 74 Mbps     | 1100 Mbps             |
| 2      | 15  | 74 Mbps     | 1100 Mbps             |
| 3      | 15  | 74 Mbps     | 1100 Mbps             |
| 4      | 15  | 74 Mbps     | 1100 Mbps             |
| 5      | 15  | 74 Mbps     | 1100 Mbps             |
| 6      | 15  | 74 Mbps     | 1100 Mbps             |
| 7      | 15  | 74 Mbps     | 1100 Mbps             |
| 8      | 15  | 74 Mbps     | 1100 Mbps             |
| 9      | 15  | 74 Mbps     | 1100 Mbps             |
|        | Total = 135                               |             | Total = 9.90 Gbps     |



รูปที่ 4-10 เส้นทางเชื่อมโยงข้อมูลทุกเส้นทางที่เป็นไปได้ ที่ถูกเก็บสะสมเป็นข้อมูล  
ในอุปกรณ์ AP ของบ้านผู้ใช้บริการแต่ละหลัง



รูปที่ 4-11 Primary path ของบ้านของผู้ใช้บริการที่เข้าใช้งานโครงข่าย

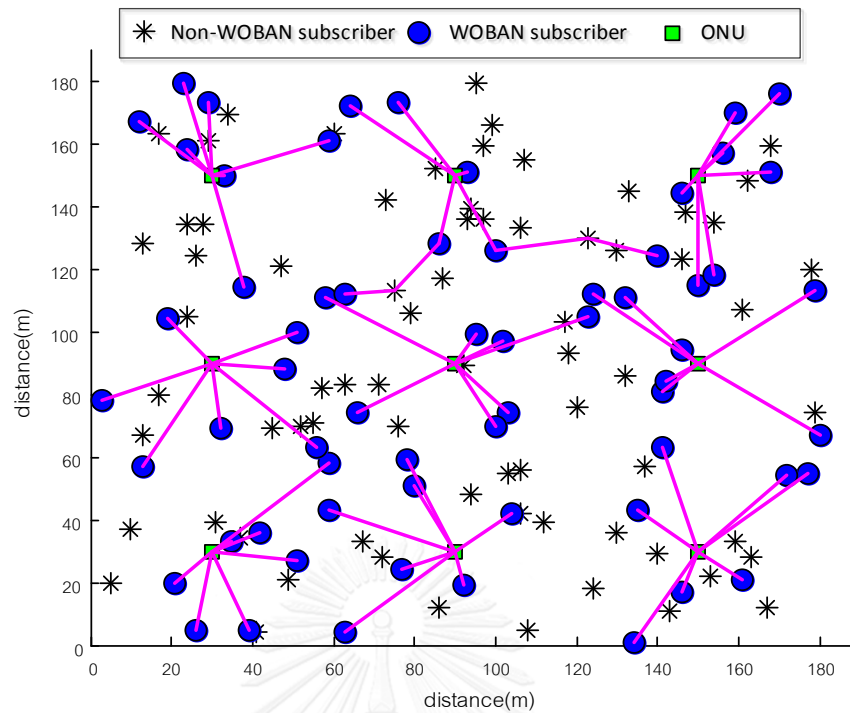
ในกรณีที่มิใช่ผู้ใช้บริการไม่ครบจำนวน เราจึงต้องปรับภาระสมดุลงานของ ONU ในที่นี้เราจะสมมติให้ จำนวนของผู้ใช้บริการโครงข่ายวอร์แบน (WS) มีจำนวนดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4-5 จำนวนผู้เข้าใช้บริการโครงข่ายวอร์แบนของ ONU แต่ละตัวก่อนปรับภาระงาน

| ONU ID | จำนวนผู้เข้าใช้บริการโครงข่ายวอร์แบน (WS) | Bit rate/AP | Total bit rate of ONU |
|--------|---|-------------|-----------------------|
| 1      | 9   | 122 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 2      | 8   | 137 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 3      | 6   | 183 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 4      | 6   | 183 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 5      | 6   | 183 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 6      | 5   | 220 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 7      | 6   | 183 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 8      | 11  | 100 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 9      | 6   | 183 Mbps    | 1100 Mbps             |
|        | Total = 63                                |             | Total = 9.90 Gbps     |

จากตารางที่ 4-5 ONU#1 มีจำนวนผู้เข้าใช้บริการ 9 หลัง ONU#2 มีจำนวนผู้เข้าใช้บริการ 8 หลัง ONU#3 มีจำนวนผู้เข้าใช้บริการ 6 หลัง ONU#4 มีจำนวนผู้เข้าใช้บริการ 6 หลัง ONU#5 มีจำนวนผู้เข้าใช้บริการ 6 หลัง ONU#6 มีจำนวนผู้เข้าใช้บริการ 5 หลัง ONU#7 มีจำนวนผู้เข้าใช้บริการ 6 หลัง ONU#8 มีจำนวนผู้เข้าใช้บริการ 11 หลัง และ ONU#9 มีจำนวนผู้เข้าใช้บริการ 6 หลัง ซึ่งผู้ให้บริการทุกหลังจะเลือกเส้นทางจากเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4-10 โดยจะเลือกเส้นทางที่สามารถเข้าเชื่อมต่อ ONU ที่ใกล้ที่สุดโดยตรงก่อนดังแสดงในรูปที่ 4-11 โดยสัญลักษณ์ดอกจันทน์แสดงตำแหน่งบ้านที่ไม่มีการเข้าใช้ข้อมูลโครงข่าย (Active AP without generating traffic) สัญลักษณ์วงกลมสีน้ำเงินแสดงตำแหน่งบ้านของผู้เข้าใช้ข้อมูลโครงข่ายวอร์แบน (Active AP with generating traffic: WOBAN Subscriber) และเส้นสีชมพูแสดงเส้นทางเชื่อมโยงที่ถูกเลือกในการส่งข้อมูลของแต่ละหลังของผู้ใช้บริการเข้าสู่ ONU

หลังจากอัลกอริทึมที่ NMC คำนวณเพื่อปรับภาระหน่วยทราฟฟิกของแต่ละ ONU แล้วพบว่าจำนวนผู้ให้บริการเฉลี่ยที่แต่ละ ONU คือ 7 หลัง โดยหลังจากปรับสมดุลงานแล้วพบว่า ONU ทุกตัว สามารถให้บริการกับผู้บริการแต่ละ 7 หลังได้จริง โดยความเร็วเฉลี่ยที่ผู้เข้าใช้ข้อมูลโครงข่ายวอร์แบนได้รับ คือ 157 Mbps ซึ่งเส้นทางหลังจากปรับภาระสมดุลงานของทราฟฟิกของหน่วยโครงข่ายแสงแสดงดังรูปที่ 4-12



รูปที่ 4-12 เส้นทางหลังจากปรับสมดุลภาระงานของ ONU แต่ละตัวให้เท่ากันเรียบร้อยแล้ว  
 ตารางที่ 4-6 จำนวนผู้เข้าใช้บริการโครงข่ายออร์แกนของ ONU แต่ละตัวหลังจากปรับภาระงานแล้ว

| ONU ID | จำนวนผู้เข้าใช้บริการโครงข่ายออร์แกน (WS) | Bit rate/AP | Total bit rate of ONU |
|--------|---|-------------|-----------------------|
| 1      | 7   | 157 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 2      | 7   | 157 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 3      | 7   | 157 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 4      | 7   | 157 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 5      | 7   | 157 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 6      | 7   | 157 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 7      | 7   | 157 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 8      | 7   | 157 Mbps    | 1100 Mbps             |
| 9      | 7   | 157 Mbps    | 1100 Mbps             |
|        | Total = 63                                |             | Total = 9.90 Gbps     |



## บทที่ 5

### สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอแนวทางการวางระบบเพื่อให้บริการเทคโนโลยีวีอาร์แบน บนแบบจำลองขนาดเล็ก โดยเงื่อนไขที่ใช้ทดสอบจะกำหนดให้อุปกรณ์ทุกตัวในระบบไม่มีการชำรุดเสียหาย สภาพแวดล้อมและสภาพอากาศเป็นแบบในอุดมคติ และแบบจำลองการลดทอนของสัญญาณวิทยุเป็นแบบสำหรับที่ใช้ในบริเวณชานเมือง

โดยเริ่มต้นจากการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮม เทคโนโลยีวีอาร์แลนแลนด์ เทคโนโลยีวีอาร์แบน และเทคนิคการคำนวณพื้นฐานของพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการออกแบบอัลกอริทึม และนำความรู้พื้นฐานมาใช้เป็นแนวทางในการวางระบบเทคโนโลยีวีอาร์แบนเพื่อให้บริการแก่ผู้ใช้บริการในโครงข่าย

จากนั้นนำความรู้พื้นฐานมาใช้ออกแบบอัลกอริทึมเพื่อปรับสมดุลของทราฟฟิกสำหรับ ONU แต่ละตัวให้รองรับปริมาณทราฟฟิกให้ใกล้เคียงกัน เพื่อให้โครงข่ายสามารถให้บริการแก่ผู้ใช้บริการได้อย่างเต็มที่ ในกรณีที่บางครั้งผู้ใช้บริการในระบบจำนวนหนึ่งอาจไม่ได้มีการใช้บริการ ทำให้ ONU บางตัวในระบบรองรับปริมาณทราฟฟิกมาก และมี ONU บางตัวในระบบรองรับปริมาณทราฟฟิกน้อย โดยใช้วิธีการหาเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูลจากผู้ใช้บริการไปยัง gateway/ONU ข้างเคียง

โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 หาจำนวน ONU ที่ใช้ในการวางระบบ โดยมีเงื่อนไข คือ ผู้ใช้บริการทุกหลัง สามารถเข้าถึงบริการได้ด้วยอัตราการส่งข้อมูล ไม่ต่ำกว่าอัตราการรับและส่งข้อมูลของผู้ให้บริการรับประกัน ในกรณีที่ไมเกิดความผิดพลาดของระบบ ขั้นตอนที่ 2 หาตำแหน่งติดตั้ง ONU บนพื้นที่ที่ต้องการวางระบบ และกำหนด primay ONU .ให้แก่ผู้ใช้บริการแต่ละหลัง ขั้นตอนที่ 3 หาเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลทุกเส้นทางที่เป็นไปได้ เพื่อเก็บสะสมเป็นข้อมูลให้แก่ อุปกรณ์ AP ของบ้านผู้ใช้บริการแต่ละหลัง ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาเส้นทางเชื่อมต่อที่เหมาะสมเพื่อปรับสมดุลโหลดของหน่วยทราฟฟิกของ ONU แต่ละตัวให้ใกล้เคียงกัน

จากการทดสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมบนพื้นที่จำลองขนาดเล็กพบว่า อัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถปรับสมดุลของทราฟฟิกสำหรับ ONU แต่ละตัวให้รองรับปริมาณทราฟฟิกให้ใกล้เคียงกันได้จริง ซึ่งแบ่งการวิเคราะห์ผลการจำลองเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่อุปกรณ์ AP ของบ้าน

ผู้ให้บริการทุกหลังมีการกำหนดอัตราการรับส่งข้อมูล และกรณีที่อยู่อุปกรณ์ AP ของผู้ให้บริการทุกหลัง  
ไม่มีการกำหนดอัตราการรับส่งข้อมูล

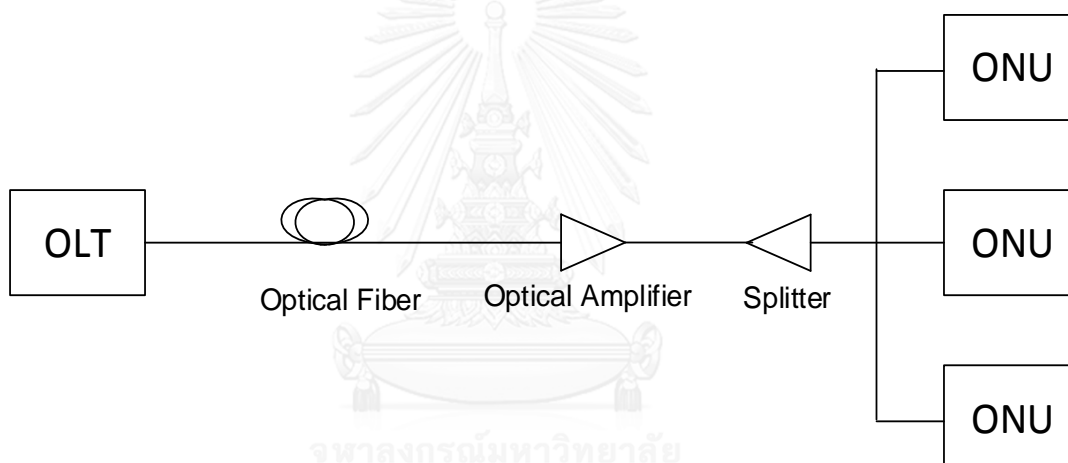




## ภาคผนวก ก

### แนวทางวิจัยในอนาคตและการศึกษาเบื้องต้น

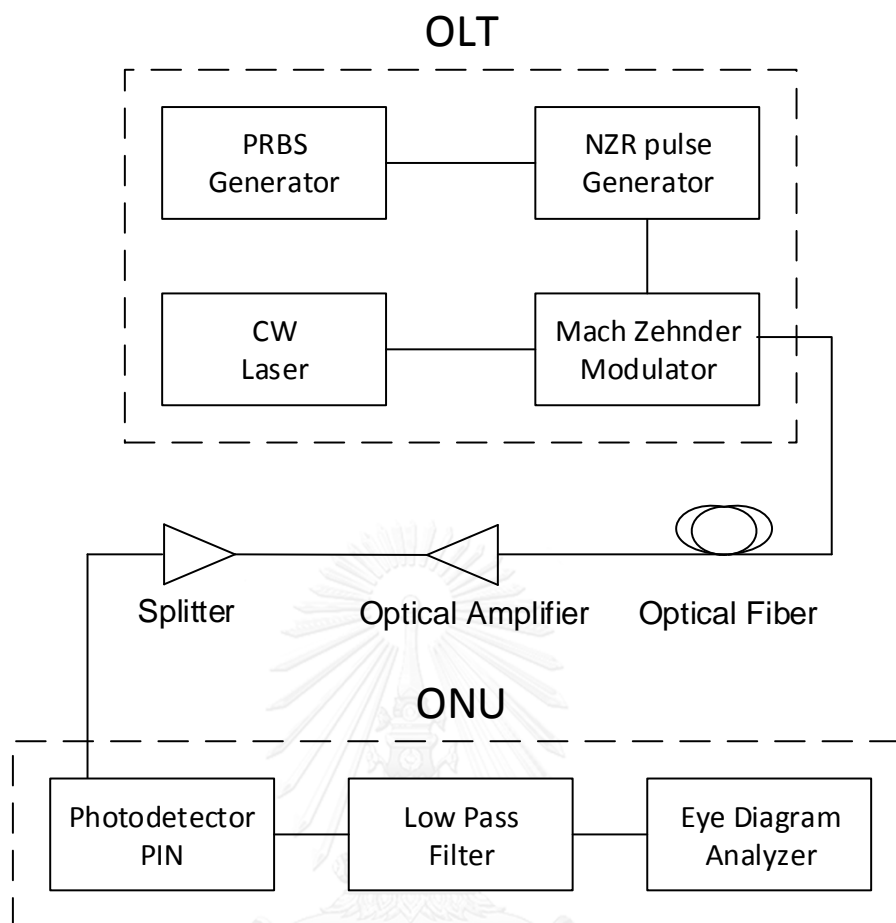
เนื่องจากการให้บริการของเทคโนโลยีไฟเบอร์ทูเดอะโฮมผ่านโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟตามมาตรฐาน 10G-PON ที่มีอยู่มีขีดจำกัดของระยะทางที่สามารถให้บริการเพียง 20 km วัดระยะจากที่ตั้งชุมสาย เพื่อพัฒนาให้ในอนาคตสามารถเพิ่มขีดจำกัดของเส้นใยแสงเพื่อให้บริการไปถึงพื้นที่ห่างไกลโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสร้างชุมสายเพิ่มเติม ผู้เขียนจึงเสนอแนวทางในการพัฒนาสายส่งเส้นใยแสงให้สามารถให้บริการได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น โดยการนำอุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (optical amplifier) ชนิด Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) มาช่วยในการขยายสัญญาณ ส่งผลให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ คือ เทคโนโลยีส่วนต่อขยายช่วงของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (Extension of the Range of Passive Optical Network)



รูปที่ 0-1 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีส่วนต่อขยายช่วงของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ

จากโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ ที่มีอุปกรณ์พื้นฐาน คือ OLT เส้นใยแสง ตัวแบ่งสัญญาณเชิงแสง และ ONU ซึ่งตามมาตรฐาน 10-GPON (ITU-T G.987) ดังแสดงในตารางที่ 2-3 สามารถส่งข้อมูลได้สูงสุด 10 Gbps ในรัศมี 20 km ผู้เขียนจึงเสนอเทคโนโลยีใหม่ คือ เทคโนโลยีส่วนต่อขยายช่วงของโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ โดยโครงสร้างพื้นฐานแสดงดัง

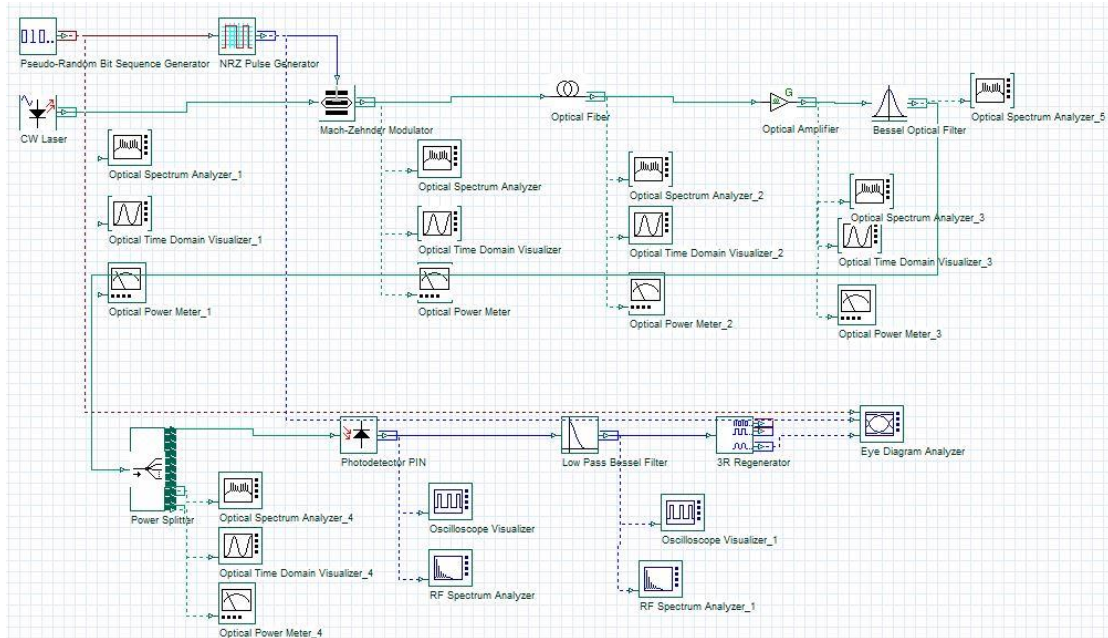
รูปที่ 0-1 และรูปที่ 0-2 แสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายใน OLT และ ONU



รูปที่ 0-2 บล็อกไดอะแกรมแสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายใน OLT และ ONU

จากรูปที่ 0-2 OLT จะสร้างสัญญาณไฟฟ้าแบบ non-return to zero (NRZ) ที่สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็ว 10 Gbps โดยใช้อุปกรณ์ Pseudorandom Bit Sequence (PRBS) Generator ร่วมกับ NRZ Pulse Generator จากนั้น Continuous Wave (CW) Laser จะสร้างสัญญาณแสงที่มีความถี่กลาง 1577 nm ที่มีกำลังส่งขนาด 3, 6 และ 9 dBm ตามลำดับ ในแต่ละการจำลอง โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ถูกสร้างขึ้นจะถูกนำมารวมกับสัญญาณแสงโดยใช้อุปกรณ์ Mach Zehnder Modulator (MZM) จากนั้น ONU จะส่งสัญญาณที่ได้จาก MZM ผ่านไปตามเส้นใยแสงเชิงเดี่ยว (single-mode fiber) ตามมาตรฐาน ITU-T G.625.D ซึ่งสัญญาณจะถูกขยายด้วย อุปกรณ์ขยายสัญญาณแสง (optical amplifier) ชนิด Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) ก่อนที่สัญญาณจะถูกส่งผ่านเข้าสู่อุปกรณ์แยกสัญญาณเชิงแสงขนาด 1:64 เพื่อกระจายสัญญาณไปยัง ONU แต่ละตัวต่อไป โดยที่ ONU แต่ละตัวจะมีอุปกรณ์ PIN photodetector ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า และตัวกรองสัญญาณ Low Pass Filter จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปที่ eye-diagram เพื่อตรวจหาอัตราความผิดพลาดของการส่งสัญญาณต่อไป โดยการจำลองการส่งสัญญาณด้วย

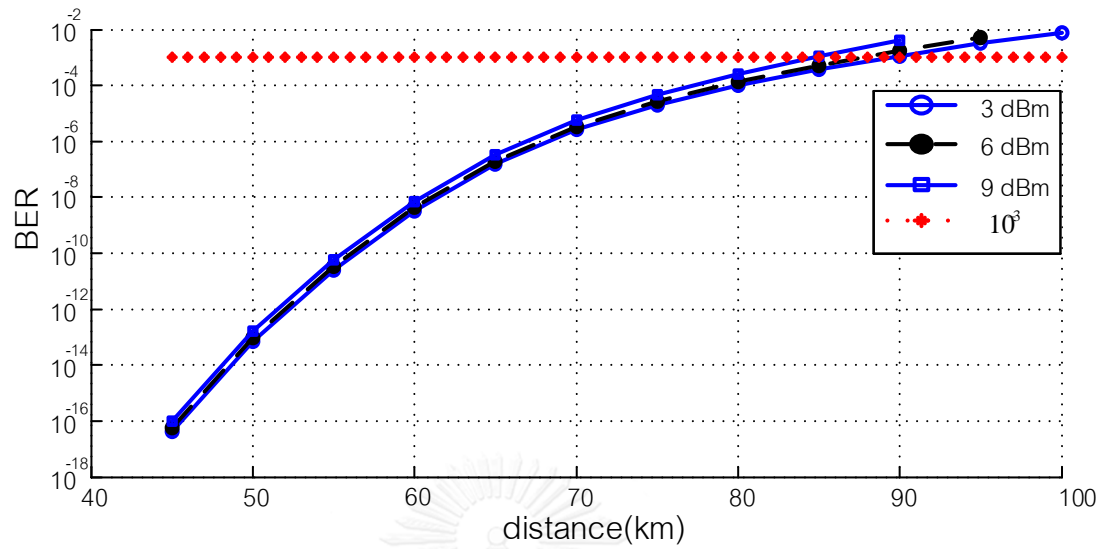
โปรแกรม Optisystem แสดงดังรูปที่ 0-3 และค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลอง แสดงดังตารางที่ 1 [8, 29, 30]



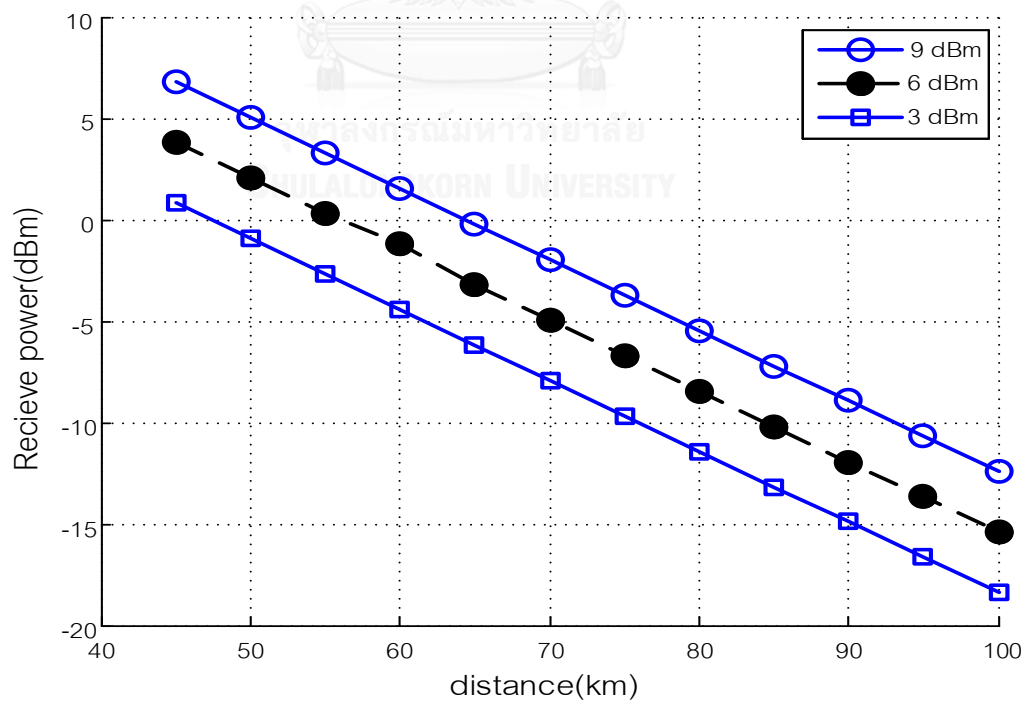
รูปที่ 0-3 การจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม Optisystem  
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ตามมาตรฐาน 10 GPON

| Component                       | Parameter         | Value            |
|---------------------------------|-------------------|------------------|
| PRBS generator                  | Bit rate          | 10 Gbps          |
| El pulse generator              | Line coding       | NRZ              |
| CW laser                        | DS wavelength     | 1577 nm          |
|                                 | Launched Power    | 3, 6, 9 dBm      |
| Mach-Zehnder external modulator | Extinction radio  | 8.19 dB          |
| Fiber cable                     | Dispersion        | 18.512 ps/nm/km  |
|                                 | Attenuation       | 0.35 dB/km       |
|                                 | Noise figure      | 4 dB             |
| Optical splitter                | Split ratio       | 1:64             |
| PIN photodetector               | Responsibility    | 1 A/W            |
|                                 | Dark current      | 10 nA            |
| Low pass filter                 | Cut off frequency | 0.75*bit rate Hz |

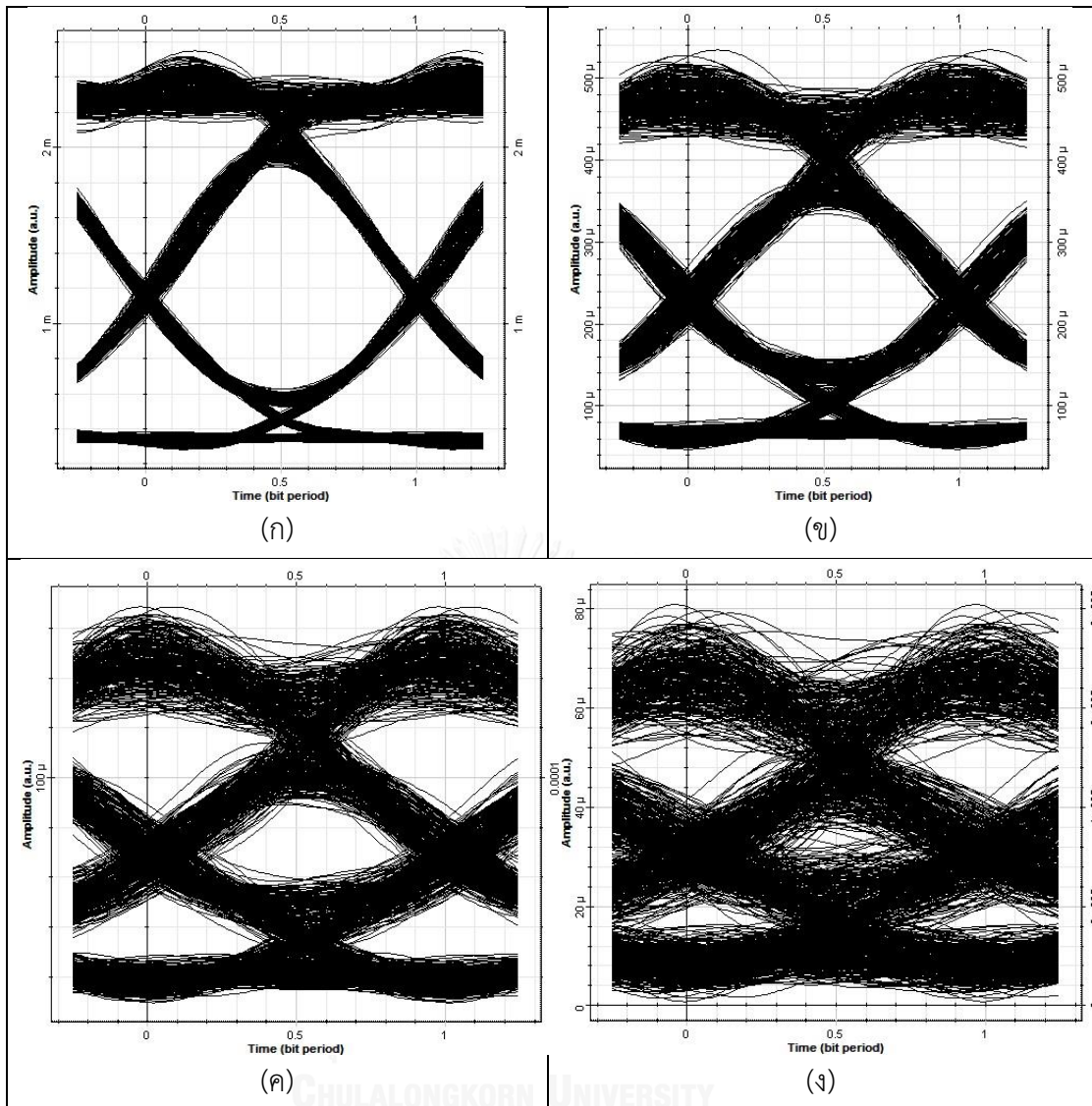
ผลการจำลอง



รูปที่ 0-4 ค่าอัตราความผิดพลาดที่สามารถวัดได้ที่ระยะทางต่าง ๆ

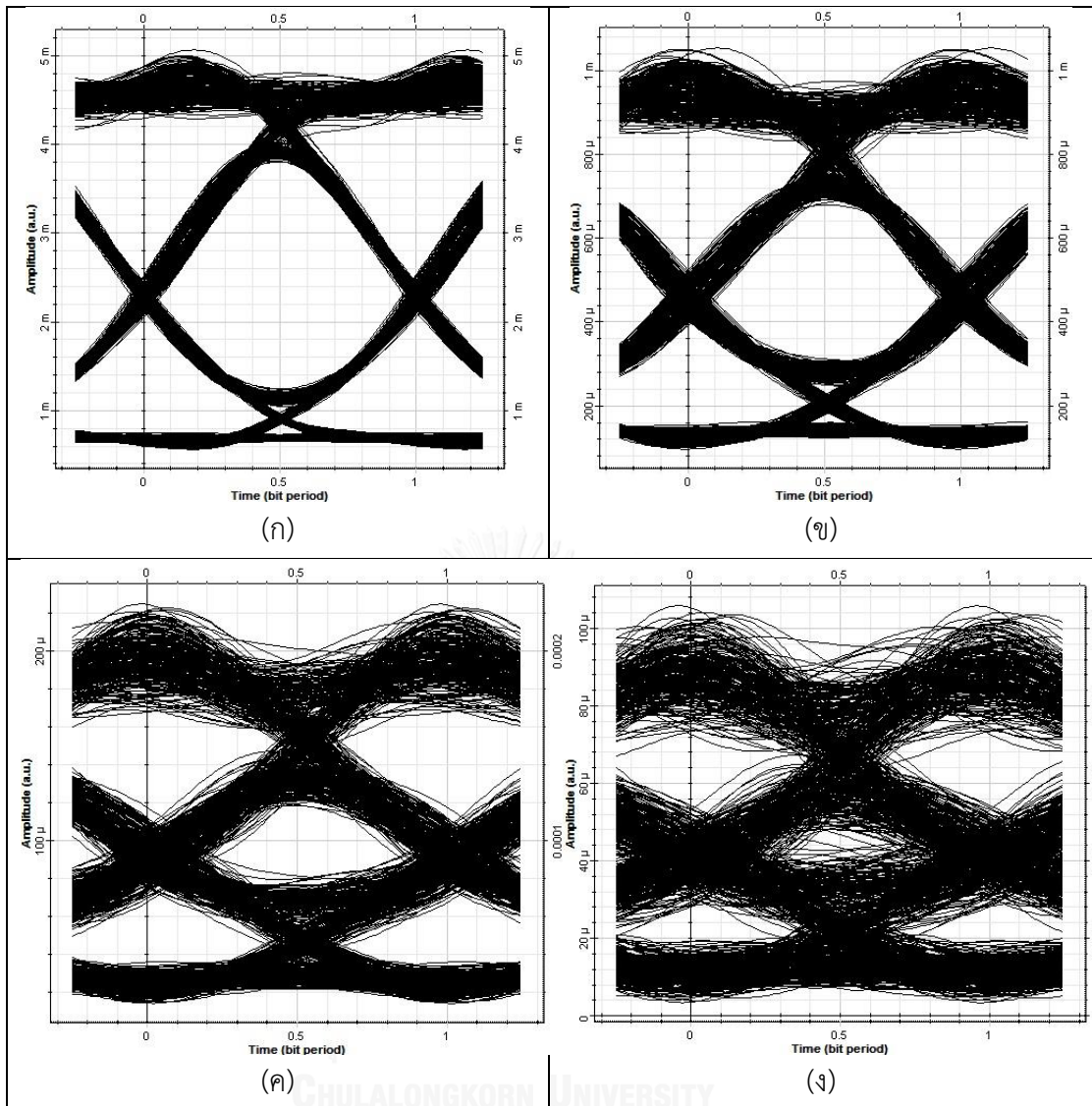


รูปที่ 0-5 กำลังของสัญญาณที่ ONU แต่ละตัวสามารถรับได้ที่ระยะทางต่าง ๆ

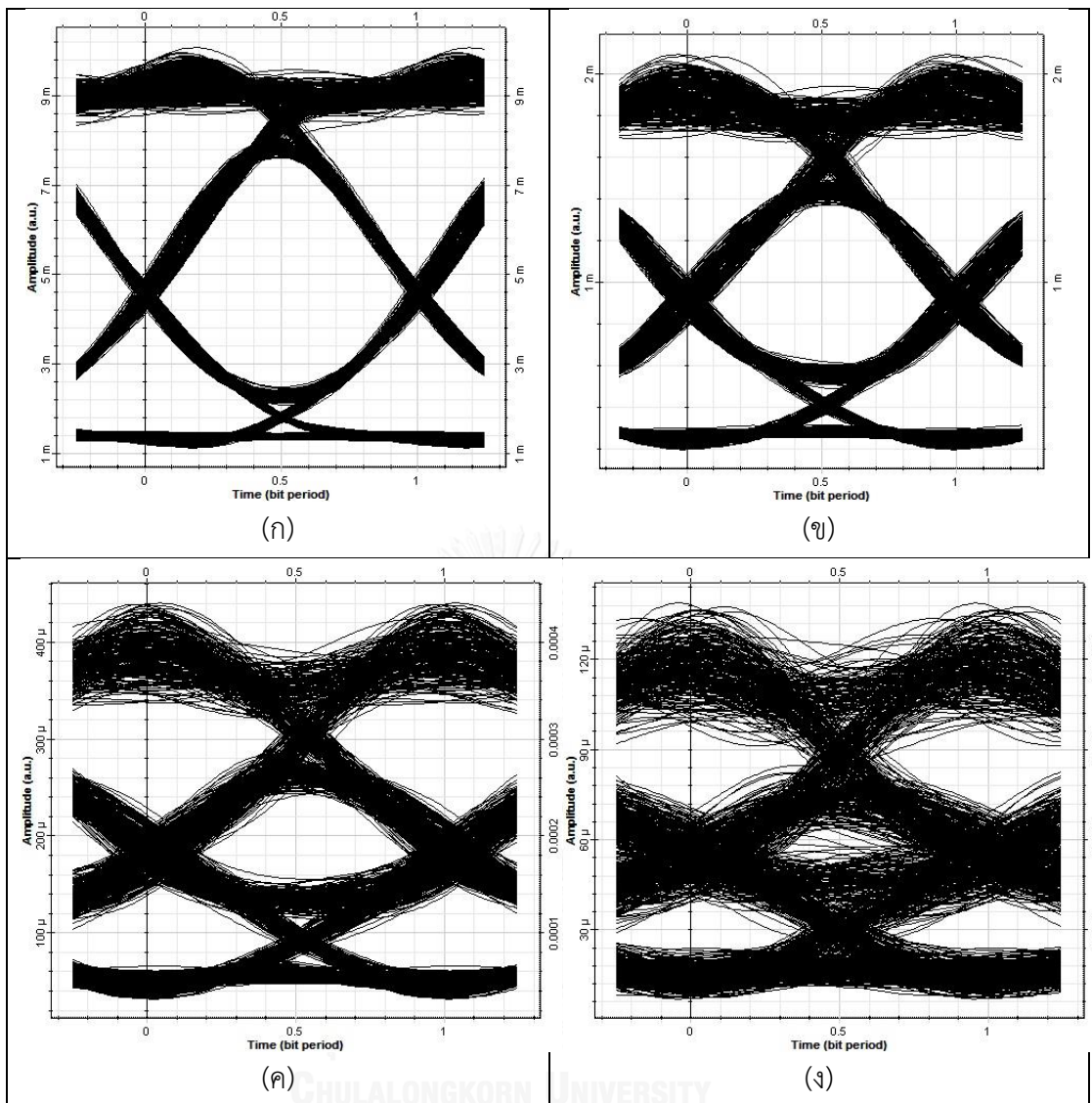


รูปที่ 0-6 แผนภาพดวงตาสัญญาณต้นกำเนิดจาก CW Laser มีค่าเป็น 3 dBm  
ที่ระยะทาง 45 km (ก) 65 km (ข) 80 km (ค) และ 90 km (ง)





รูปที่ 0-7 แผนภาพดวงตาสัญญาณต้นกำเนิดจาก CW Laser มีค่าเป็น 6 dBm  
ที่ระยะทาง 45 km (ก) 65 km (ข) 85 km (ค) และ 95 km (ง)



รูปที่ 0-8 แผนภาพดวงตาสัญญาณต้นกำเนิดจาก CW Laser มีค่าเป็น 9 dBm  
ที่ระยะทาง 45 km (ก) 65 km (ข) 85 km (ค) และ 100 km (ง)

### สรุปผลการจำลอง

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม Optisystem พบว่า เมื่อส่งสัญญาณแสงที่สามารถให้บริการข้อมูลด้วยอัตรา 10 Gbps ด้วยกำลังสัญญาณขนาด 3 dBm 6dBm และ 9 dBm พบว่าสามารถส่งสัญญาณข้อมูลได้ไกลสูงสุด 85 km 87 km และ 90 km ตามลำดับ โดยใช้ค่าอัตราความผิดพลาดสูงสุด (BER) ขนาด  $10^{-3}$  เป็นค่าตัดสิน พบว่าเทคโนโลยีที่น่าเสนอสามารถให้บริการได้ไกลกว่าโครงข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟตามมาตรฐาน 10-GPON (ITU-T G.987) จริง ดังนั้นเทคโนโลยีส่วนต่อ

ขยายช่วงของเครือข่ายแสงแบบพาสซีฟ จึงอาจจะเป็นแนวทางในการพัฒนาสายส่งเส้นใยแสงให้สามารถให้บริการได้ในระยะทางที่ไกลขึ้นได้ในอนาคต





## รายการอ้างอิง

1. Cisco, Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014-2019. 2015.
2. และกองบรรณาธิการ, ศ.จ., พื้นฐานสายส่งสัญญาณสำหรับการสื่อสาร (Principal of Transmission Lines for Communications). 2009, สารานุกรมโทรคมนาคมไทย (Thai Telecommunications Encyclopedia): สารานุกรมโทรคมนาคมไทย (Thai Telecommunications Encyclopedia).
3. Keiser, G., Optical fiber communications. 2003: Wiley Online Library.
4. Agrawal, G.P., Lightwave technology: telecommunication systems. 2005: John Wiley & Sons.
5. Luo, Y., et al., Time-and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2). Journal of Lightwave Technology, 2013. 31(4): p. 587-593.
6. Dorins, J.J.a.T., Analyzing IEEE 802.11n standard: outdoor performanace. 2012.
7. Sarkar, S., et al., A novel delay-aware routing algorithm (DARA) for a hybrid wireless-optical broadband access network (WOBAN). Network, IEEE, 2008. 22(3): p. 20-28.
8. Sarkar, S., S. Dixit, and B. Mukherjee, Hybrid wireless-optical broadband-access network (WOBAN): a review of relevant challenges. Lightwave Technology, Journal of, 2007. 25(11): p. 3329-3340.
9. P.Keawplung, P.P.a., An efficient algorithm for designing multi-hop wireless connections for wireless-optical broadband access network. 2012.
10. Sarkar, S., et al., Hybrid wireless-optical broadband access network (WOBAN): network planning and setup. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2008. 26(6): p. 12-21.
11. Raavi, S., et al. Energy-efficient design and equipment placement for Wireless-Optical Broadband Access Networks. in Online Conference on Green Communications (GreenCom), 2012 IEEE. 2012. IEEE.

12. Sarkar, S., et al. A mixed integer programming model for optimum placement of base stations and optical network units in a hybrid wireless-optical broadband access network (WOBAN). in Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE. 2007. IEEE.
13. Chowdhury, P., et al., Building a green wireless-optical broadband access network (WOBAN). Lightwave Technology, Journal of, 2010. 28(16): p. 2219-2229.
14. Liu, Y., L. Guo, and X. Wei, Optimizing backup optical-network-units selection and backup fibers deployment in survivable hybrid wireless-optical broadband access networks. Journal of Lightwave Technology, 2012. 30(10): p. 1509-1523.
15. Yu, Y., et al. Placement strategy for survivable hybrid WOBAN against multi-fibre failure. in Optical Internet 2014 (COIN), 2014 12th International Conference on. 2014. IEEE.
16. BroadbandSoHo, Broadband SOHO FTTx Tutorial. 2006, [www.broadbandsoho.com](http://www.broadbandsoho.com).
17. Martin, T., Fiber To The Home. 2007: p. 13.
18. DATA, A.T. FTTH - Fiber To The Home-Triple Play Fiber Deployment- FTTH- FTTC- Fiber To The Curb-Fiber To The Home Suppliers. Available from: <http://www.americanteledata.com/fibertothome.htm>.
19. routers, H.N.P.h.s.a., What's GPON and why GPON. HUAWEI: <https://huaweiswitch.wordpress.com/>.
20. ITU, I.-T.T.S.S.P., 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements, in SERIES G TRANSMISSION SYSTEM AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. 2010.
21. EXFO Eetro-Optical Engineering Inc., Q.C., Canada, FTTH PON Guide: Testing Passive Optical Networks, 5th edition. 2012, [http://www.tehencom.com/Technologies/FTTx\\_PON/FTTx\\_PON\\_EXFO\\_Guide\\_v5\\_Eng.pdf](http://www.tehencom.com/Technologies/FTTx_PON/FTTx_PON_EXFO_Guide_v5_Eng.pdf): tehencom.
22. in CAT บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด.
23. Wikipedia, Wireless LAN, in Wireless LAN. Wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_LAN#cite\\_note-1](https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_LAN#cite_note-1).

24. Ross, a.C., Make your tablets and smart phones smarter - Add serial capability for seriously remote data. 2012, ecnmag: <http://www.ecnmag.com/article/2012/02/make-your-tablets-and-smart-phones-smarter-%E2%80%93-add-serial-capability-seriously-remote-data>.
25. Funabiki, N., Wireless Mesh Network. Access-Point Allocation Algorithms for Scalable Wireless Internet-Access Mesh Network. 2011, INTECH: CC BY-NC-SA 3.0.
26. ชันธิกุล, อ.ม., อรรถณพ, ออกแบบและติดตั้งเครือข่าย Wireless LAN. I.P.J. International(1988) Co.,Ltd.
27. Kramer, G., B. Mukherjee, and G. Pesavento, Ethernet PON (ePON): design and analysis of an optical access network. Photonic Network Communications, 2001. 3(3): p. 307-319.
28. Lin, P., et al. Optimal utility-based bandwidth allocation over integrated optical and WiMAX networks. in Optical Fiber Communication Conference. 2006. Optical Society of America.
29. Rochette, M., et al. High-performance optical amplifier for WDM communication systems. in 1998 International Conference on Applications of Photonic Technology. 1998. International Society for Optics and Photonics.
30. Mraković, M.D. and P.S. Matavulj, Analysis of coexisting GPON and NG-PON1 (10G-PON) systems. Telfor Journal, 2011. 3(1): p. 43-48.





## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธันชชา วิริยะนิธิกรณม์ เกิดวันที่ 6 เมษายน พ.ศ. 2533 ที่โรงพยาบาล จุฬาลงกรณ์ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษาจากโรงเรียนเซนต์โยเซฟคอนเวนต์ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554 จากนั้นเข้า ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ในงานประชุม วิชาการ The 29th International Technical Conference on Circuit/Systems Computers and Communications (ITC-CSCC) จัดขึ้น ณ โรงแรม Phuket Graceland Resort & Spa จังหวัดภูเก็ต ในวันที่ 1-4 กรกฎาคม 2557 ในชื่อบทความเรื่อง An Algorithm for Balancing Traffic Load of Optical Network Units in Wireless-Optical Broadband Access Network และในงานประชุมวิชาการ The 30th International Technical Conference on Circuit/Systems Computers and Communications (ITC-CSCC) จัดขึ้น ณ โรงแรม Grand Hilton Seoul ประเทศเกาหลีใต้ ในวันที่ 29 มิถุนายน-2 กรกฎาคม 2558 ในชื่อบทความเรื่อง Extension of the Range of Passive Optical Network for Optical Backhaul Infrastructure of Wireless Optical Broadband Access Network