

กลไกการปรับราคาตามเวลาสำหรับการให้บริการไฟเบอร์ทูเดอะโฮมบนพื้นฐานของคุณภาพการ  
บริการเชิงเวลาประวิง

นางสาวลภัสสิริ เทียนทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2556  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

TIME-BASED PRICING ADJUSTMENT MECHANISM FOR FIBER-TO-THE-HOME  
SERVICE PROVISION WITH DELAY-BASED QOS

Miss Lapassiri Tiantong

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

กลไกการปรับราคาตามเวลาสำหรับกรให้บริการ  
ไฟเบอร์ออปติกบนพื้นฐานของคุณภาพการบริการ  
เชิงเวลาประวิง

โดย

นางสาวลภัสสิริ เทียนทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.จิต โกมุท ส่งศิริ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาว์นิต อิศกุล)

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

ลภัสสิริ เทียนทอง : กลไกการปรับราคาตามเวลาสำหรับการให้บริการไฟเบอร์ทูเดอะโฮมบนพื้นฐานของคุณภาพการบริการเชิงเวลาประวิง. (TIME-BASED PRICING ADJUSTMENT MECHANISM FOR FIBER-TO-THE-HOME SERVICE PROVISION WITH DELAY-BASED QOS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ชัยเชษฐ สายวิจิตร, 92 หน้า.

ไฟเบอร์ทูเดอะโฮม (fiber to the home: FTTH) ได้รับการจัดว่าเป็นโครงข่ายเข้าถึงที่มีความเร็วสูงที่สุดเมื่อเทียบกับโครงข่ายเข้าถึงประเภทอื่นๆ ในปัจจุบัน แต่ด้วยสาเหตุที่ว่า FTTH เป็นเทคโนโลยีที่มีต้นทุนที่ค่อนข้างสูง ทำให้หัวข้อการวิจัยเชิงประยุกต์ระหว่างโครงข่าย FTTH และเศรษฐศาสตร์ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม ในบรรดางานวิจัยในหัวข้อดังกล่าวกลับยังไม่มียานวิจัยใดที่ให้ความสำคัญเกี่ยวกับวิธีการที่ผู้ให้บริการโครงข่ายเข้าถึง FTTH ควรจะใช้ในการแข่งขันในเชิงธุรกิจกับผู้ให้บริการ FTTH รายอื่นในตลาด ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาปัญหาเกี่ยวกับการปรับอัตราค่าบริการที่เหมาะสมโดยอ้างอิงตามระดับคุณภาพการให้บริการที่ทำให้ผู้ให้บริการได้รับผลกำไรที่สูงที่สุด โดยจัดรูปแบบปัญหาเป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุด ที่รวมเงื่อนไขบังคับจากสมการพลวัตของจำนวนผู้ใช้บริการและราคาค่าบริการ

จากผลการศึกษาพบว่า มีความเป็นไปได้ที่อัตราค่าบริการที่เหมาะสมนั้นจะมีแนวโน้มที่ลดลงตามเวลา โดยที่จะน้อยกว่าอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งเป็นส่วนใหญ่ สำหรับระดับคุณภาพของบริการนั้นจะอยู่ที่ระดับที่ดีที่สุด และจะมีการปรับขึ้นลงหรือคงที่ตามแต่กรณี สำหรับจำนวน OLTs นั้นจะคงที่อยู่ที่ 1 เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากว่ามีจำนวนผู้ใช้บริการน้อย ส่วนผลกำไรและผลกำไรเฉลี่ยสะสมจะมากกว่าผู้ให้บริการคู่แข่งเป็นส่วนใหญ่ในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล แต่จะน้อยกว่าผู้ให้บริการคู่แข่งเป็นส่วนใหญ่ในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ และการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคาเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอในการหลีกเลี่ยงจากภาวะตลาดผูกขาด

ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา..... 2556.....

# # 5470533421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : FIBER-TO-THE-HOME / TECHNO-ECONOMIC / ACCESS NETWORK / NETWORK OPTIMIZATION /

LAPASSIRI TIAN TONG : TIME-BASED PRICING ADJUSTMENT MECHANISM FOR FIBER-TO-THE-HOME SERVICE PROVISION WITH DELAY-BASED QoS. ADVISOR : ASST. PROF. CHAIYACHET SAIWICHIT, Ph.D., 92 pp.

Fiber-to-the-home (FTTH) is currently considered to be the access network technology that can offer the highest speed compared to others. Due to its high costs, the FTTH network-economic topics are rapidly attractive. However, there has not been any research concerned about the approach for FTTH operator to compete with one another in the FTTH market. In this thesis, we study the time-based pricing adjustment mechanism with delay-based QoS that maximizes the operator's profit; by constructing the problem into the most suitable value searching which combines the constraints obtained from the dynamics of number of users and service price.

According to the results, the trends of tariff are possible to be decreased over time while their sizes are smaller than the rival's tariff. The optimum level of QoS should be the best. The numbers of OLTs are equal to one and stationary because of the small number of customers. The profits and cumulative profits are better than the rival's profits and cumulative profit as most of the period of study in residential case only. But they are worse in business cases. However, only price cap regulation may not be sufficient in order to avoid the monopoly.

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

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

Academic Year : ..... 2013 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้เนื่องด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชัยเชษฐ สายวิจิตร ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการทำวิทยานิพนธ์ทั้งทางตรงและทางอ้อม จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ทั้งนี้ ต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.จิต โกมุท สงศิริ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวนดิศ อัสวกุล และรองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาตรวจสอบ และให้คำแนะนำที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พัฒนาไปในทิศทางที่ดียิ่งขึ้น

นอกจากนี้ ยังขอขอบคุณทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก้าวหน้าและสำเร็จได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยเฉพาะนาย Trinh Minh Tri ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือเกี่ยวกับทฤษฎีหาค่าเหมาะสมที่สุด และนายรชฎ มณีชาติ ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือเกี่ยวกับ FTTH ทั้งเชิงทฤษฎีและเชิงเทคนิคเป็นอย่างดีตลอดมา และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณคุณแม่ที่ให้ความสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ฉ    |
| สารบัญ.....   | ช    |
| สารบัญตาราง.....  | ญ    |
| สารบัญภาพ.....  | ฎ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....  | 7    |
| 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....   | 7    |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....  | 10   |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....  | 11   |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....   | 13   |
| 2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการศึกษาเชิงประยุกต์ระหว่าง โครงข่ายเข้าถึงไฟเบอร์ทูลเคอะโฮม<br>และเศรษฐศาสตร์..... | 13   |
| 2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับ โครงข่ายเข้าถึงไฟเบอร์ทูลเคอะโฮม.....  | 15   |
| 2.3 ทฤษฎีความเชื่อถือได้.....   | 22   |
| 2.4 ทฤษฎีการหาค่าเหมาะสมที่สุด.....   | 23   |
| 2.5 ทฤษฎีระบบพลวัต.....   | 24   |
| 2.6 ระเบียบวิธีการทางสถิติที่เกี่ยวข้อง.....  | 25   |
| 2.6.1 การแจกแจงความน่าจะเป็น (probability distribution).....  | 25   |
| 2.6.2 ระบบแถวคอย (Queuing Systems).....   | 29   |
| 2.6.3 การพยากรณ์แบบอนุกรมเวลา (Time Series forecasting).....  | 31   |
| 2.7 การกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา.....   | 32   |

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 ระเบียบวิธีที่นำเสนอ.....   | 33   |
| 3.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์.....   | 33   |
| 3.1.1 ตัวแปรตัดสินใจ.....   | 33   |
| 3.1.2 พารามิเตอร์.....  | 34   |
| 3.2 แบบแผนที่นำเสนอ.....  | 40   |
| บทที่ 4 ผลการทดสอบระเบียบวิธีที่นำเสนอ.....   | 45   |
| 4.1 สมมติฐานและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองทางคณิตศาสตร์.....   | 45   |
| 4.2 กรณีลูกค้านับบุคคล.....   | 48   |
| 4.3 กรณีลูกค้านั่งรถธุรกิจ.....   | 63   |
| 4.3.1 กรณีไม่มีแผนการป้องกัน.....   | 66   |
| 4.3.2 มีแผนการป้องกันแบบ C.....   | 70   |
| บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....  | 72   |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย.....   | 72   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....   | 74   |
| รายการอ้างอิง.....  | 76   |
| ภาคผนวก.....  | 84   |
| ภาคผนวก ก ข้อผิดพลาดของแบบจำลองที่งานวิจัย [3] นำเสนอ.....  | 85   |
| ภาคผนวก ข ข้อจำกัดของการคำนวณจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการแต่ละรายโดย<br>ใช้แบบจำลอง Chromor I ใน ECOSYS: Deliverable 16 [2].....          | 89   |
| ภาคผนวก ค รูปทั่วไปของอัตราค่าบริการที่เหมาะสมที่อ้างอิงจากการแจกแจง<br>ความน่าจะเป็นสะสมแบบล็อกปกติของความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการ..... | 90   |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....   | 92   |



## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |  | หน้า |
|----------|--|------|
| 2.1      | ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแจกแจงแบบปัวซองและการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล.....  | 29   |
| 4.1      | ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ทั่วไปที่ใช้การทดลองคณิตศาสตร์.....   | 47   |
| 4.2      | ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์เฉพาะสำหรับการทดลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกรณีลูกค้ำส่วนบุคคล.....  | 48   |
| 4.3      | ตารางแสดงอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่ง ณ เวลา $t$ ในกรณีลูกค้ำส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่.....    | 54   |
| 4.4      | ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์เฉพาะสำหรับการทดลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกรณีลูกค้ำองค์กรธุรกิจ.....   | 64   |
| 4.5      | ตารางแสดงอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่ง ณ เวลา $t$ ในกรณีลูกค้ำองค์กรธุรกิจกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่..... | 65   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |   | หน้า |
|--------|---|------|
| 2.1    | รูปแสดงโครงสร้างหลักของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง.....   | 16   |
| 2.2    | รูปแสดงโครงสร้างของโครงข่ายเข้าถึง FTTH แบบ PON.....  | 17   |
| 2.3    | รูปแสดงการแยกสายส่งสัญญาณแบบรวมศูนย์กลาง (centralized splitting)....  | 18   |
| 2.4    | รูปแสดงการแยกสายส่งสัญญาณแบบกระจาย (distributed splitting).....   | 18   |
| 3.1    | แผนผังแสดงโครงข่ายงานที่นำเสนอ.....   | 41   |
| 3.2    | แผนผังแสดงความสัมพันธ์ของผู้ให้บริการที่เชื่อมระหว่างโครงข่ายเข้าถึงและ<br>ผู้ใช้บริการ FTTH.....   | 42   |
| 4.1    | ระดับ QoS ของผู้ใช้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา $t$ สำหรับกรณี<br>ลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีไม่มีการ<br>กำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา.....   | 49   |
| 4.2    | การเปรียบเทียบอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา $t$ สำหรับกรณี<br>ลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีไม่มีการ<br>กำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา.....  | 50   |
| 4.3    | (ก) การเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา $t$ (ข)<br>จำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา $t$ สำหรับ<br>กรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีไม่<br>มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา..... | 51   |
| 4.4    | (ก) การเปรียบเทียบผลกำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา $t$ (ข) ผล<br>กำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา $t$ สำหรับกรณี<br>ลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีไม่มีการ<br>กำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา.....          | 52   |
| 4.5    | (ก) การเปรียบเทียบผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา $t$ (ข) ผล<br>กำไรสะสมของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา $t$ สำหรับกรณี<br>ลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีไม่มีการ<br>กำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา.....              | 53   |



| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.14  | 62   |
| ระดับ QoS ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา $t$ สำหรับกรณี<br>ลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่ กรณีมีการ<br>กำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา.....   |      |
| 4.15  | 66   |
| การเปรียบเทียบอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา $t$ สำหรับกรณี<br>ลูกค้าองค์กรธุรกิจ แบบไม่มีแผนการป้องกัน กรณีไม่มีการกำกับอัตรา<br>โทรคมนาคมแบบเพดานราคา.....  |      |
| 4.16  | 67   |
| (ก) การเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา $t$ (ข)<br>จำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา $t$ สำหรับ<br>กรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ แบบไม่มีแผนการป้องกัน กรณีไม่มีการกำกับอัตรา<br>โทรคมนาคมแบบเพดานราคา..... |      |
| 4.17  | 68   |
| (ก) การเปรียบเทียบผลกำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา $t$ (ข) ผล<br>กำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา $t$ สำหรับกรณี<br>ลูกค้าองค์กรธุรกิจ แบบไม่มีแผนการป้องกัน กรณีไม่มีการกำกับอัตรา<br>โทรคมนาคมแบบเพดานราคา.....          |      |
| 4.18  | 69   |
| (ก) การเปรียบเทียบผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา $t$ (ข) ผล<br>กำไรสะสมของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา $t$ สำหรับกรณี<br>ลูกค้าองค์กรธุรกิจ แบบไม่มีแผนการป้องกัน กรณีไม่มีการกำกับอัตรา<br>โทรคมนาคมแบบเพดานราคา.....              |      |
| 4.19  | 70   |
| การเปรียบเทียบอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา $t$ สำหรับกรณี<br>ลูกค้าองค์กรธุรกิจ แบบมีแผนการป้องกันแบบ C กรณีไม่มีการกำกับอัตรา<br>โทรคมนาคมแบบเพดานราคา.....  |      |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารข้อมูลนับว่าเป็นสิ่งที่สำคัญและถือว่าเป็นส่วนหนึ่งในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ในยุคปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นการใช้อินเทอร์เน็ตเพื่อค้นหาข้อมูลข่าวสาร โทรศัพท์ หรือดูสื่อโทรทัศน์ ไปจนถึงการทำกิจกรรมอื่นๆ ซึ่งกิจกรรมต่างๆเหล่านี้จะเป็นไปได้อย่างรวดเร็วด้วยการพึ่งพาอาศัยเทคโนโลยีการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งโครงข่ายไฟเบอร์ทูเดอะโฮม (fiber-to-the-home: FTTH) ได้ถูกจัดว่าเป็นเทคโนโลยีเครือข่ายเข้าถึงที่สามารถให้บริการได้ในระดับความเร็วสูงที่สุดเมื่อเทียบกับโครงข่ายเข้าถึงอื่นๆที่มีในปัจจุบัน โดยนิยมใช้ร่วมกับเทคโนโลยีเครือข่ายสื่อสารทางแสงแบบพาสซีฟ (passive optical network: PON) เนื่องจากราคาที่ถูกลงกว่า และประหยัดพลังงานโดยที่โครงข่าย PON จะสามารถให้บริการได้ในระดับความเร็ว รวมถึงมีลักษณะเฉพาะบางประการที่แตกต่างกันไปตามมาตรฐานต่างๆ อาจกล่าวได้ว่าหนึ่งในมาตรฐานที่สามารถให้บริการที่ความเร็วที่สูงสุดในปัจจุบัน คือ เครือข่ายสื่อสารทางแสงแบบพาสซีฟระดับสิบิกิกะบิต (10 gigabit passive optical network: XG-PON) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน G.987.1 มีอัตราการรับส่งข้อมูลอยู่ที่ 10 กิกะบิตต่อวินาที (Gbps) สำหรับทราฟฟิก (traffic) ของการสื่อสารข้อมูลขาลงหรือดาวน์โหลด (downstream) ส่วนทราฟฟิกของการสื่อสารข้อมูลขาขึ้นหรืออัปสตรีม (upstream) นั้นมีอัตราการรับส่งข้อมูลอยู่ที่ 2.5 Gbps และ 10 Gbps สำหรับแบบ XG-PON1 และ XG-PON2 ตามลำดับ ในมาตรฐานนี้กำหนดอัตราส่วนการแยก (splitting ratio) ต่ำสุดอยู่ที่ 1:64 [1]

ทั้งนี้ การลงทุนในโครงข่าย FTTH นั้นมีต้นทุนที่ค่อนข้างสูง ทำให้การศึกษาเชิงประยุกต์ทางด้านเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์กับโครงข่ายเข้าถึง FTTH ได้รับความนิยมนอย่างมากในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของการวิเคราะห์สถานะตลาดโครงข่ายเข้าถึง FTTH โดยเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองสถานะตลาดของโครงข่าย FTTH [2]-[3] และวิเคราะห์หากกลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับผู้ให้บริการ โครงข่ายเข้าถึง โดยใช้ทฤษฎีเกม (Game Theory)

และพลวัตของระบบ (System Dynamics) ซึ่งแบบจำลองที่นำเสนอขึ้นยังมีข้อผิดพลาดอยู่ จึงทำให้ผลที่ได้รับไม่มีประสิทธิภาพนัก [3] (ภาคผนวก ก) ไปจนถึงการอภิปรายและวิเคราะห์สถานการณ์ปัจจุบันของตลาดโครงข่าย FTTH ซึ่งครอบคลุมรายละเอียดโดยทั่วไปของตลาดในแต่ละภูมิภาคของโลก และกลยุทธ์เบื้องต้นที่ผู้ให้บริการควรเลือกใช้เช่น การกำหนดราคาที่มีสองกลยุทธ์หลักคือ กำหนดราคาที่สูงลิ้นกึ่งกับบริการเทคโนโลยีสายผู้เช่าดิจิทัลแบบอสมมาตรหรือเอดีเอสแอล (asymmetric digital subscriber line: ADSL) หรือกำหนดราคาที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนซึ่งได้รับความนิยมน้อยกว่าแบบแรก ในส่วนของกลยุทธ์เชิงเทคนิค ในรายงานนี้ได้แนะนำโครงข่ายแบบ FTTH หรือ Fiber to the building (FTTB) และกลยุทธ์ในเชิงบริการที่ควรจะให้บริการในเชิงของลักษณะบรอดแบนด์มากกว่าที่จะเน้นบริการโทรศัพท์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ตัวแบบและกลยุทธ์การพัฒนาสำหรับผู้ให้บริการยังไม่ได้ถูกกล่าวถึง [4] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับที่มุ่งเน้นการหาส่วนแบ่งทางการตลาดวิกฤต (critical market share) และความอยู่รอดได้ของระบบโครงข่าย FTTH จากผลวิจัยสรุปว่ากำไรของผู้ให้บริการนั้นจะแปรผันตามรายได้เฉลี่ยของผู้ให้บริการต่อลูกค้าหนึ่งคน (Average Revenue per User: ARPU) ส่วนต้นทุนต่างๆนั้นแปรผันตามส่วนแบ่งทางการตลาด ความหนาแน่นของประชากร และความจำเป็นที่จะต้องเดินสายในบ้านใหม่เป็นหลัก ในด้านของลักษณะตลาดของ FTTH นั้นสนับสนุนเพียงผู้ให้บริการสองรายหลัก โดยที่ผู้ให้บริการรายใหญ่จะอยู่ในตำแหน่งที่ดีกว่า และผู้ที่มีการเริ่มเปิดให้บริการ FTTH ก่อนนั้นสามารถที่จะจำกัดส่วนแบ่งทางการตลาดของผู้ให้บริการที่เข้ามาในตลาดที่หลังได้ ในส่วนของอุปสรรคสำคัญของการวางระบบ FTTH นั้นอยู่ที่ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับงานวิศวกรรมโยธา และค่าใช้จ่ายในการเดินสายภายในบ้าน ทั้งยังมีการพิจารณาถึงการกำกับโทรคมนาคมที่เหมาะสมอีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยกล่าวว่าไม่มีแบบใดแบบหนึ่งที่เหมาะสมเพียงแบบเดียว [5] อย่างไรก็ตาม การกำกับโทรคมนาคมนั้นเป็นประโยชน์ต่อทั้งผู้ให้บริการและผู้ให้บริการ เนื่องจากว่ากฎข้อบังคับต่างๆนั้นได้กระตุ้นให้เกิดการแข่งขันและทำให้ผู้ให้บริการจำเป็นต้องลงทุนและพัฒนาาระบบโครงข่ายและบริการของตน [6] ในงานวิจัย [7] ได้มีการพิจารณาถึงผลของการกำหนดกฎข้อบังคับแบบไม่สมมาตร (asymmetric access price regulation) ในตลาดโทรคมนาคม งานวิจัยดังกล่าวได้เสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์ และศึกษาการกำหนดราคาที่เหมาะสมเพื่อที่จะเพิ่มส่วนแบ่งทางการตลาดและกำไรของทั้งสองผู้ให้บริการในตลาดซึ่งรายหนึ่งเป็นผู้ให้บริการที่แข็งแกร่งในขณะที่อีกรายเป็นผู้

ให้บริการที่อ่อนแอกว่า นอกจากนี้ ยังระบุอีกว่าการกำกับอัตราค่าบริการแบบกำหนดเพดานราคา (price cap regulation) นั้นเป็นวิธีการที่ดีในกรณีที่ต้องการที่จะรักษาผลประโยชน์ของผู้ใช้บริการ แต่จะไปจำกัดการเข้ามาของผู้ให้บริการรายใหม่ในตลาด นอกจากนี้ ระบบเพดานราคายังเป็นระบบที่ได้รับการแนะนำว่าเหมาะสมที่จะใช้กับ FTTH [8]

งานวิจัยเกี่ยวกับการเปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยี FTTH แบบต่างๆ และการออกแบบ และวางระบบโครงข่ายที่ใช้ต้นทุนที่ต่ำที่สุดนั้นจัดว่าเป็นหัวข้อวิจัยที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดในบรรดางานวิจัยที่มีการศึกษาเชิงประยุกต์ทางด้านเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ในโครงข่ายเข้าถึง FTTH ยกตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยของ M. Araujo และ A. Duarte [9] ศึกษาการวางระบบโดยอ้างอิงจากความจุของระบบในรูปแบบของเซลล์โดยใช้ข้อมูลจริงเกี่ยวกับพื้นที่ ลักษณะพื้นที่ จำนวนประชากร จำนวนที่อยู่อาศัย และร้อยละของที่อยู่อาศัยที่สามารถให้บริการได้ที่ทำให้ได้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) ที่ดีที่สุด, ในงานวิจัย [10] มีการศึกษาการวางระบบ PON ที่เหมาะสมที่สุดโดยอ้างอิงจากลักษณะภูมิศาสตร์, งานวิจัย [11] ได้มีการคำนวณค่าใช้จ่ายในการวางระบบโดยพิจารณาเป็นโครงสร้างตามลำดับขั้น, งานวิจัย [12] ศึกษาเกี่ยวกับความเชื่อถือได้ (Reliability) และค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในระบบโครงข่ายเข้าถึง FTTH ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบต้นทุนทั้งหมดที่เกิดขึ้นเมื่อผู้ใช้บริการเลือกใช้แผนการป้องกัน (protection scheme) แบบต่างๆ หรือว่าไม่ใช้แผนการป้องกัน โดยพิจารณาทั้งกรณีที่ลูกค้าส่วนบุคคล (residential users) และลูกค้าองค์กรธุรกิจ (business users) เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีโครงการที่ให้ความสนใจและศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการวิจัยเชิงประยุกต์ดังกล่าวโดยศึกษาครอบคลุมรายละเอียดที่สำคัญเกือบทั้งหมดตั้งแต่ความต้องการของผู้ใช้บริการ ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์ต้นทุน รายได้ ไปจนถึงการพิจารณาทดลองศึกษาในกรณีตัวอย่างต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น ดังเช่นในโครงการของ TITAN [13] และ ECOSYS [14]

ทั้งนี้ ในการวิจัยเชิงประยุกต์ดังกล่าวมักจะเกี่ยวข้องกับความต้องการของผู้ใช้บริการ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่ามีความไม่แน่นอน และค่อนข้างยากในการที่จะประมาณออกมา ทำให้มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ศึกษาถึงความต้องการดังกล่าว ดังเช่น ในงานวิจัยของ Fuzesi และ Vidacs [15] ได้ใช้ตัวแปรคุณภาพบริการ (quality of service: QoS) เพียงตัวเดียวในงานวิจัยซึ่งศึกษาเกี่ยวกับพัฒนา

คุณภาพของระบบให้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการ โดยที่กำหนดให้ระดับแรกแทนบริการที่มีคุณภาพแย่ที่สุด และระดับสุดท้ายแทนบริการที่มีคุณภาพดีที่สุด สำหรับงานวิจัยของ G. Rosston, S.J. Savage และ D. Waldman [16] ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับความต้องการของผู้ใช้บริการในส่วนของบริการบรอดแบนด์โดยมุ่งเน้นเกี่ยวกับความยินดีที่จะจ่าย (willingness to pay: WTP) โดยรายงานดังกล่าวระบุว่าผู้ใช้บริการยินดีที่จะจ่ายค่าบริการในอัตราที่สูงกว่าเพื่อแลกกับคุณภาพบริการที่ดีกว่าทั้งในเรื่องของความเร็วและความเชื่อถือได้ของบริการที่ได้รับในส่วนของการที่จะผลิตความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการนั้นมีการผลิตแบบการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบล็อกปกติ (lognormal distribution) นอกจากนี้ ยังกล่าวได้อีกว่าความยินดีที่จะจ่ายของลูกค้าส่วนบุคคลนั้นจะเพิ่มขึ้นตามการศึกษา รายได้ที่ได้รับ และประสบการณ์ในการใช้บริการ แต่ความยินดีที่จะจ่ายจะลดลงตามอายุของผู้ใช้บริการ [17] ในงานของ Khil และคณะ [18] ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการแจกแจงของอัตราทราฟฟิก (traffic rate distribution) ของผู้ใช้บริการโดยพบว่าการแจกแจงสะสมดังกล่าวมีลักษณะใกล้เคียงกับฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (cumulative distribution function: cdf) ของการแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull distribution) ที่มีค่าตัวแปร  $\lambda = 0.2072$  และ  $k = 0.4140$  อีกทั้งในงานนี้ยังมีการจัดกลุ่มผู้ใช้บริการออกเป็นหลายกลุ่มโดยอ้างอิงจากลักษณะการใช้งานของผู้ใช้บริการ นอกจากนี้ งานวิจัย [19] ยังพบว่าทราฟฟิกที่เกิดจากผู้ใช้บริการมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 6 ต่อปี ทั้งนี้ ในการพิจารณาบริการบรอดแบนด์ในแต่ละกรณีนั้นจะพิจารณาตามโพรไฟล์ของผู้ใช้บริการ (user profile) ซึ่งประเภทของผู้ใช้บริการสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ ลูกค้าส่วนบุคคล และลูกค้าองค์กรธุรกิจ อย่างไรก็ตาม สำหรับลูกค้าองค์กรธุรกิจนั้น โดยทั่วไปจะถูกเรียกเก็บอัตราค่าบริการรายเดือนที่สูงกว่าประมาณสิบเท่า เนื่องด้วยลูกค้าองค์กรธุรกิจนั้นต้องการบริการที่มีคุณภาพสูงและเชื่อถือได้มากกว่า ซึ่งทำให้มีต้นทุนสูงกว่าด้วยอย่างไรก็ตาม รายได้ที่ได้รับจากลูกค้าองค์กรธุรกิจนั้นก็สูงกว่ารายได้จากลูกค้าส่วนบุคคล [20] และลูกค้าองค์กรธุรกิจเหล่านี้ก็มีความยินดีที่จะจ่ายค่าบริการที่แพงกว่าเพื่อบริการคุณภาพสูงด้วยเช่นกัน [21] ในส่วนของจำนวนผู้ใช้บริการก็เป็นที่ได้รับ ความสนใจเช่นเดียวกัน เช่นในโครงการของ ECOSYS [14] ในส่วน Deliverable 16 [2] ได้คำนวณหาจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการแต่ละราย โดยอ้างอิงจากแนวคิดเรื่องความยืดหยุ่น จำนวนผู้ใช้บริการที่เวลาก่อนหน้า ระดับคุณภาพของบริการเฉลี่ยของทุกผู้ให้บริการในตลาด และระดับคุณภาพของผู้ให้บริการแต่ละราย ณ เวลาปัจจุบัน ซึ่งวิธี



ดังกล่าวนี้ใช้ได้ผลดีสำหรับในกรณีที่มีข้อมูลจำนวนผู้ใช้บริการที่เวลาก่อนหน้าหรือเริ่มต้นอยู่แล้ว และจำนวนผู้ใช้บริการทั้งหมดในตลาดไม่เป็นศูนย์ เนื่องจากว่าถ้าหากเป็นศูนย์แล้วจะทำให้ผลที่ได้รับออกมาเป็นศูนย์ที่เวลาถัดไปทั้งหมด ซึ่งไม่สมเหตุสมผล (ภาคผนวก ข) ส่วนงานวิจัย [22] ได้อ้างถึงการนำการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) โดยที่ใช้ข้อมูลจริงที่เกิดขึ้นในเวลาก่อนหน้าเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์หาจำนวนผู้ใช้บริการที่เวลาต่างๆ อีกแบบจำลองหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการใช้ในการประมาณจำนวนผู้ใช้บริการในหลายงานวิจัย ก็คือแบบจำลองของ Norton และ Bass ที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ทฤษฎีการแพร่กระจาย (Diffusion Theory) เข้ามาช่วยในการประมาณความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการจะเลือกรับเทคโนโลยีใหม่ [23] ซึ่งแบบจำลองนี้ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยี FTTH บ้างแล้ว ดังเช่นในงานวิจัย [11][24][25][26] เป็นต้น โดยที่ในงานวิจัย [24] ได้มีการทดลองนำข้อมูลจากการสำรวจ และ [25] ได้มีการทดลองนำข้อมูลจากข้อมูลจริงมาทดลองตรวจสอบหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ทำให้ผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีความถูกต้องสอดคล้องกันกับข้อมูลจริง

และดังเช่นที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่างานวิจัยเชิงประยุกต์ระหว่างเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์นั้นมักจะเกี่ยวข้องกับความต้องการของผู้ใช้บริการซึ่งมีความไม่แน่นอนอยู่ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยหลายงาน โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ได้นำกำหนดการเพ็นสุ่ม (Stochastic Programming) เข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหา โดยคำนวณหาผลกำไรเฉลี่ยที่สูงที่สุดแทนการหาค่าจริง ดังเช่นในงานวิจัย [27][28][29]

นอกเหนือไปจากงานวิจัยดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นแล้ว ยังมีซอฟต์แวร์ที่มีคุณสมบัติและความสามารถที่จะรองรับทั้งในส่วนของการวางระบบ ออกแบบระบบ การดูแลบำรุงรักษาระบบ ไปจนถึงการประมาณรายได้ และต้นทุนออกมา ดังเช่น DrakaXSNet [30] และ FiberPlanIT [31] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ซอฟต์แวร์ดังกล่าวมีราคาค่อนข้างแพง และยังไม่มีความเกี่ยวข้องกับการประมาณราคาที่ชัดเจนอย่างเปิดเผยสำหรับ DrakaXSNet ส่วน FiberPlanIT นั้นก็มีแนวทางเช่นเดียวกันกับงานวิจัยเชิงประยุกต์เกี่ยวกับ FTTH กับเศรษฐศาสตร์ กล่าวคือ มุ่งเน้นการออกแบบระบบที่มีต้นทุนต่ำที่สุดเพื่อที่จะได้รับรายได้ที่มากที่สุด

ทว่า เมื่อพิจารณาถึงในแวดวงของงานวิจัยพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ให้ความสำคัญกับวิธีการที่ผู้ให้บริการโครงข่าย FTTH ควรจะใช้ในการแข่งขันในเชิงธุรกิจกับผู้ให้บริการ FTTH รายอื่นในตลาด ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าในช่วงหลังมานี้ มีหลากหลายงานประชุมวิชาการที่ให้ความสนใจในปัญหาเกี่ยวกับความรู้เกี่ยวกับกลยุทธ์ที่จะทำให้ผู้ให้บริการได้ประโยชน์ในการแข่งขันในตลาดมากขึ้น [32] ทั้งนี้ อาจกล่าวได้ว่า โดยทั่วไปแล้วผู้ให้บริการจะต้องการที่จะทำกำไรให้สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ปัญหาก็คือการขาดความรู้ที่เพียงพอเกี่ยวกับมาตรการที่เหมาะสมที่ควรจะใช้กับโครงข่ายเข้าถึงและบริการที่ผู้ให้บริการให้บริการ เช่น ควรจะกำหนดอัตราค่าบริการเท่าไร ควรจะให้บริการที่ระดับคุณภาพระดับไหน เป็นต้น ในการที่จะหากลยุทธ์ที่ดีที่สุดนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงทิศทางและขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น คุณภาพบริการ จำนวนผู้ให้บริการ และค่าบริการรายเดือน เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่ใกล้เคียงกันกับปัญหาดังกล่าวก็คือ ปัญหาเกี่ยวกับวิธีการที่ผู้ให้บริการโครงข่ายเข้าถึง FTTH ควรจะใช้ในการแข่งขันเชิงธุรกิจกับผู้ให้บริการโครงข่ายเข้าถึงประเภทอื่นๆซึ่งมีอยู่แล้วก่อนหน้านี้ ดังเช่นในงานวิจัย [27] ที่นำทฤษฎีเกมเข้ามาใช้ในการหากลยุทธ์ที่เหมาะสมที่ผู้ให้บริการ FTTH ควรจะใช้ในการแข่งขันกับผู้ให้บริการอกรายในตลาด โดยที่ผู้ให้บริการอกรายนั้นมีการพัฒนาโครงข่ายจากเทคโนโลยีที่เก่ากว่า FTTH เดิมมาเป็นระบบเส้นใยนำแสงเชื่อมกับสายแกนร่วม (Hybrid Fibre-Coaxial: HFC) โดยที่ในงานวิจัยนี้ได้มีการประมาณจำนวนผู้ให้บริการโดยใช้แบบจำลองของ Norton and Bass ด้วย [23] เป็นต้น ส่วนปัญหาเกี่ยวกับการวิเคราะห์หากลยุทธ์ของผู้ให้บริการ FTTH โดยพิจารณาแค่ของผู้ให้บริการที่สนใจเพียงรายเดียวก็จัดว่าเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ใกล้เคียงกับปัญหาที่สนใจ ดังเช่นงานวิจัย [33] และ [34] เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีปัญหาการหาราคาที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้รับกำไรเฉลี่ยที่สูงที่สุดโดยอ้างอิงจากอุปสงค์และเงื่อนไขของผู้ให้บริการที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาสำหรับเครือข่ายการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย (wireless network) ในงานวิจัย [28] ที่จัดได้ว่ามีการศึกษาปัญหาที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวนี้หากำไรเฉลี่ยที่สูงที่สุดเฉพาะในสภาวะคงตัว (steady-state) เท่านั้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์หากกลยุทธ์การให้บริการ FTTH ที่เหมาะสมที่ทำให้ผู้ให้บริการได้รับผลกำไรที่สูงที่สุดในระยะเวลาทุกๆครั้งปี หรือ 6 เดือน โดยที่กลยุทธ์ดังกล่าวได้แก่ อัตราค่าบริการ จำนวนผู้ใช้บริการ ระดับ QoS และจำนวนอุปกรณ์ Optical Line Terminal (OLT) ทั้งนี้ การวิเคราะห์ระดับ QoS ของระบบ FTTH จะอ้างอิงจากเวลาประวิง (delay) เป็นสำคัญ และกำหนดให้ผู้ให้บริการอิกรายซึ่งเป็นคู่แข่งนั้นเป็นผู้นำในตลาด กล่าวคือจะเป็นผู้กำหนดกลยุทธ์ก่อนเสมอ

## 1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. วิทยานิพนธ์นี้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์หากกลยุทธ์การให้บริการ FTTH ที่เหมาะสมเพื่อให้ผู้ให้บริการได้รับผลกำไรที่สูงที่สุดในระยะเวลาทุกๆครั้งปี หรือ 6 เดือน ทั้งนี้ กลยุทธ์ในที่นี้ ได้แก่ อัตราค่าบริการ จำนวนผู้ใช้บริการ ระดับ QoS และจำนวน OLTs เท่านั้น โดยที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ตัวชี้วัดเชิงเวลาประวิงในการวิเคราะห์ระดับคุณภาพบริการเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากว่ากลยุทธ์ดังกล่าวนั้นเกี่ยวข้องกับจำนวนเต็ม จึงทำให้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดนั้นเป็นปัญหาเอ็นพี (NP-problems) ดังนั้น ในที่นี้จะใช้วิธีการ brute force ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวเท่านั้น

2. งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะพื้นที่ในเขตเมือง (urban) เท่านั้น เนื่องจากในกรณีส่วนใหญ่ มักจะมีผู้ให้บริการ FTTH เพียงรายเดียวในตลาด แต่บางกรณีก็จะมีผู้ให้บริการ 2 รายในกรณีที่พื้นที่นั้นๆมีความหนาแน่นของประชากรสูง [5] ดังนั้น จึงกำหนดให้ระบบ FTTH ที่อ้างอิงในงานวิจัยนี้มีลักษณะการแยกสายส่งสัญญาณแบบรวมศูนย์กลาง (centralized splitting) โดยวางตัวแยกสัญญาณอยู่ใกล้ผู้ใช้บริการมากพอสมควร เนื่องด้วยเหตุผลทางด้านค่าใช้จ่าย ความเหมาะสมของความหนาแน่นของประชากร และการบำรุงดูแลรักษาระบบ [35][36] นอกจากนี้ ยังกำหนดให้ตัวแยกสัญญาณที่ใช้ในระบบนั้นมีสัดส่วนการแยกเดียวกันทั้งระบบ ทั้งนี้ ระบบ FTTH ดังกล่าว คือระบบ XG-PON2 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน G987.1 เท่านั้น

3. ในการศึกษานี้สมมติให้ผู้ให้บริการทั้งสองรายสามารถเปลี่ยนกลยุทธ์ที่ใช้ได้ทุกๆ 6 เดือน โดยที่ผู้ให้บริการคู่แข่งเป็นผู้นำในตลาด กล่าวคือมีการกำหนดกลยุทธ์ต่างก่อนเสมอ ทั้งอัตราค่าบริการ ระดับคุณภาพของบริการ และจำนวน OLTs ทั้งนี้ ยังกำหนดให้ผู้ให้บริการคู่แข่งสามารถรองรับกราฟฟิกของผู้ใช้บริการได้อย่างไม่จำกัด

4. งานวิจัยนี้พิจารณาตลาดโครงข่ายเข้าถึง FTTH ที่มีผู้ให้บริการ 2 ราย ณ เวลา  $t$  โดยที่  $t = \{0, \dots, T\}$  ซึ่งแต่ละหน่วยเวลา  $t$  เท่ากับ 6 เดือน โดยที่ 0 เป็นเวลาเริ่มต้นก่อนการศึกษา ทั้งนี้ ผู้ให้บริการทั้งสองรายสามารถที่จะเลือกให้บริการที่ระดับ QoS  $j$  เพียงระดับเดียว โดยที่  $j = \{1, \dots, J\}$  กำหนดให้ระดับแรกเป็นระดับที่มีคุณภาพแย่ที่สุด และระดับสุดท้ายมีคุณภาพดีที่สุด และในตลาดมีผู้ใช้บริการ  $I$  ราย และแต่ละ  $i$  โดยที่  $i = \{1, \dots, I\}$  สามารถเลือกรับบริการจากผู้ให้บริการเพียงรายใดรายหนึ่งเท่านั้น ทั้งนี้ กำหนดให้จำนวนผู้ใช้บริการที่ตัดสินใจจะรับบริการ FTTH ณ เวลา  $t$  นั้นเป็นไปตามแบบจำลองของ Bass [37] โดยที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการรับนวัตกรรม (coefficient of innovation) เท่ากับ 0.01 [11][25] หารออกด้วย 2 และค่าสัมประสิทธิ์ของการเลียนแบบ (coefficient of imitation) เท่ากับ 0.38 [11] ซึ่งตรงกับค่าเฉลี่ยของ coefficient of imitation ที่ใช้โดยทั่วไป [25][38] โดยที่ในที่นี้จะหารออกด้วย 2 เช่นเดียวกันกับค่าสัมประสิทธิ์ของการรับนวัตกรรม เนื่องจากว่าในงานวิจัยนี้มีการพิจารณาหากลยุทธ์ที่เหมาะสมในทุกๆ 6 เดือนนั่นเอง

5. การพิจารณาด้านทุนที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีผู้ใช้บริการรายใหม่จะพิจารณาในส่วนที่เกิดจากอุปกรณ์ OLT, อุปกรณ์ Optical Network Unit (ONU), ส่วนของสายภายในบ้าน (in-house wiring) และสายครอป (drop cable) ของผู้ใช้บริการรายใหม่เท่านั้น สำหรับการพิจารณาค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ (operational costs) ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษา (maintenance cost) ซึ่งจะพิจารณาค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาของอุปกรณ์หลักในโครงข่ายเข้าถึง ได้แก่ OLT, ONU และเส้นใยนำแสงที่ใช้โครงข่ายเข้าถึงทั้งหมด อีกส่วนคือการพิจารณาถึงค่าปรับ (penalty cost) ที่อาจเกิดขึ้นในกรณีที่ลูกค้าองค์กรธุรกิจไม่สามารถใช้งานได้ตามปกติ เนื่องจากมีความขัดข้อง (failure) ของอุปกรณ์ OLT, ONU และเส้นใยนำแสงที่ใช้โครงข่ายเข้าถึงทั้งหมดเกิดขึ้น ทั้งนี้ ตัวแยกสัญญาณ (splitter) ระยะเวลาของการเดินทางไปยังสถานที่ที่มีความเสียหายเกิดขึ้น และระยะเวลาการรอคอยอุปกรณ์สำรองไม่ถูกนำมาเข้ามาพิจารณาในการคำนวณค่าใช้จ่าย

นอกจากนี้ การพิจารณาค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาของส่วนของเส้นใยนำแสงส่วน feeder และ distribution พิจารณาเฉพาะส่วนที่มีการเชื่อมต่อกับ OLT ที่มีการใช้งานอยู่เท่านั้น และไม่มี การพิจารณาค่าใช้จ่ายในการจัดหาเส้นใยนำแสงในส่วนดังกล่าว เนื่องจากว่ากำหนดให้เส้นใยนำแสงดังกล่าวได้ถูกติดตั้งไว้แล้วก่อนเวลาเริ่มต้นการศึกษา โดยที่เส้นใยนำแสงส่วนดังกล่าวนั้นได้ถูกติดตั้งไว้เป็นปริมาณที่มากเพียงพอ อีกทั้งยังสมมติให้มีโครงข่ายพื้นฐานที่เพียงพอต่อการสนับสนุนโครงข่ายเข้าถึง โดยกำหนดให้ผู้ให้บริการทั้งสองรายต่างใช้ OLTs shelves ของ The Alcatel-Lucent 7360 Intelligent Services Access Manager (ISAM) FX ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถที่จะรองรับระบบ XG-PON ได้ โดยที่อุปกรณ์ดังกล่าวหนึ่งชิ้นสามารถรองรับการ์ด OLT ได้ 16 อันหรือรองรับระบบ PON ได้ 16 ระบบนั่นเอง [39] และเนื่องจากว่าพื้นที่ที่สนใจศึกษานั้นมีจำนวนลูกค้าส่วนบุคคลเท่ากับ 14,746 ราย [20] และมีจำนวนลูกค้าองค์กรธุรกิจทั้งหมด 1,638 ราย [20][40] ดังนั้น จึงกำหนดให้ผู้ให้บริการทั้งสองรายต่างมีอุปกรณ์ดังกล่าวจำนวน 11 ชิ้นสำหรับในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล และ 2 ชิ้นสำหรับในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ เพื่อที่จะเพียงพอสำหรับการให้บริการตามจำนวน home passed ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ผู้ให้บริการคู่แข่งวางระบบโครงข่ายเข้าถึง FTTH ผ่านที่อยู่อาศัยจำนวน  $H'$  แห่ง ซึ่งมีจำนวนเท่ากับร้อยละ 75 ของ  $I$  ในขณะที่ผู้ให้บริการที่เราสนใจนั้นวางระบบโครงข่าย FTTH ผ่านที่อยู่อาศัยจำนวน  $H$  แห่ง ซึ่งเป็นจำนวนที่ไม่น้อยกว่าคู่แข่งแต่อย่างน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $I$  แห่ง โดยที่จำนวนดังกล่าวจะต้องเป็นจำนวนที่มากพอที่จะไม่เป็นข้อจำกัดของกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ทั้งยังสมมติว่าไม่มีผู้ใช้บริการรายใดที่ได้รับบริการ ณ เวลาเริ่มต้น ซึ่งสมมติฐานนี้สอดคล้องกันกับสมมติฐานของแบบจำลองของ Bass [23][37] ที่กำหนดให้ไม่มีผู้ใช้บริการในตลาด ณ เวลาเริ่มต้น หรือ  $t = 0$  และเนื่องจากว่ากำหนดให้ที่เวลา  $t = 0$  มีเพียงแก่ผู้ให้บริการคู่แข่งอยู่ในตลาดเพียงรายเดียวเท่านั้น ส่วนผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอจะเข้ามาที่เวลา  $t = 1$  ดังนั้น จึงเริ่มต้นศึกษาที่เวลาที่  $t = 1$  ด้วย

6. ในการพิจารณา delay นั้นจะพิจารณาเฉพาะการประวิงเวลาแถวคอย (queuing delay) เท่านั้น เนื่องจากการประวิงเวลาอื่นๆที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับตัว queuing delay [41] อีกทั้งการประวิงเวลาจริงที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะมีการคำนวณที่แตกต่างกันไปตามมาตรฐานของระบบ และยังไม่เท่ากันในการสื่อสารข้อมูลขาขึ้นและขาลง แต่การประวิงเวลาแถวคอยนั้นเป็นแกนหลักที่มีการคำนวณเหมือนกัน [42]

7. ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณา User profile คือ อัตราทราฟฟิก และความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการ โดยกำหนดให้อัตราทราฟฟิกมีการแจกแจงแบบเอกรูป (uniform distribution) และมีอัตราการเพิ่มขึ้นอยู่ที่ร้อยละ 6 ต่อปี [19] ส่วนความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการแต่ละรายนั้น กำหนดให้มีการแจกแจงแบบล็อกปกติ (lognormal distribution) [17] ที่มีความยินดีที่จะจ่ายค่าที่สูงสุดที่เป็นไปได้ที่อยู่ที่ 0 ดอลลาร์สหรัฐ และความยินดีที่จะจ่ายสูงสุดที่อยู่ที่ 250 ดอลลาร์สหรัฐ สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคล ทั้งนี้ กำหนดให้ความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการสำหรับบริการระดับคุณภาพ  $j$  ที่ต่างกันมีความแตกต่างกัน [16]

8. กำหนดให้อัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งอ้างอิงจากอัตราค่าบริการจริง [43] เป็นหลัก และกำหนดระดับ QoS ของผู้ให้บริการคู่แข่งโดยอิงจากอัตราค่าบริการและระดับ QoS จากงานวิจัย [20] ทั้งนี้ กำหนดให้ระดับ QoS ของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

9. กรณีลูกค้าส่วนบุคคลจะศึกษาเพียงกรณีที่โครงข่ายเข้าถึง FTTH ที่ไม่มีแผนการป้องกัน (unprotected scheme) เพียงแบบเดียว ส่วนกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจจะศึกษาในกรณีที่โครงข่ายเข้าถึง FTTH ไม่มีแผนการป้องกัน และแบบที่มีแผนการป้องกันแบบ C (protection scheme type C) ซึ่งเป็นแผนการป้องกันที่ถูกจัดว่าเหมาะสมกับกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ [12] เท่านั้น

10. การกำกับบริการ โทรคมนาคมที่เลือกนำมาพิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้คือการกำหนดอัตราค่าบริการแบบเพดานราคาเท่านั้น

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาหาความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงข่ายเข้าถึง FTTH ไปจนถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเชิงประยุกต์ทางด้านเทคโนโลยีของโครงข่าย FTTH และเศรษฐศาสตร์

2. เสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการหาคู่ที่เหมาะสมที่ผู้ให้บริการควรนำไปปรับใช้กับเทคโนโลยีและบริการของผู้ให้บริการและนำตัวแบบที่นำเสนอมาแปลงผลให้อยู่ในรูปแบบ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมถึงพิจารณาเลือกใช้ชุดเครื่องมือในการแก้ปัญหา ไปจนถึงแสดงผลลัพธ์ที่เหมาะสม

3. ศึกษา วิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลการศึกษาที่ได้รับจากการใช้ตัวแบบจำลองที่นำเสนอทั้งในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล และลูกค้าองค์กรธุรกิจ รวมถึงพิจารณากรณีของลูกค้าทั้งสองประเภทไม่มีการใช้แผนการป้องกัน และกรณีที่ลูกค้าองค์กรธุรกิจมีการใช้แผนการป้องกันแบบ C อีกทั้งยังศึกษา วิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลการศึกษาที่ได้รับจากการใช้ตัวแบบจำลองที่นำเสนอถึงในกรณีที่มีการพิจารณาและไม่ได้พิจารณาการกำกับอัตราค่าบริการ โทรคมนาคมแบบเพดานราคา

4.สรุปผล เรียบเรียง และจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ รวมถึงเผยแพร่ผลงานวิจัย

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ดังเช่นที่ได้กล่าวไปแล้วว่ากลยุทธ์ของผู้ให้บริการ FTTH อาทิ อัตราค่าบริการ จำนวน OLTs และระดับคุณภาพของบริการนั้นล้วนส่งผลกระทบต่อผลกำไรของผู้ให้บริการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผู้ให้บริการไม่ได้เป็นผู้ให้บริการเพียงรายเดียวในตลาด แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่ให้ความสำคัญเกี่ยวกับกลยุทธ์ที่เหมาะสมของผู้ให้บริการ FTTH ในกรณีที่มีผู้ให้บริการ FTTH อีกรายในตลาดมาก่อน ดังนั้น ผลงานและความรู้ใหม่หลักๆที่ได้รับ จึงเป็นทั้งในส่วนของการศึกษาปัญหาวิจัย การนำเสนอแบบจำลองที่ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งทำให้ได้รับทั้งวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหา และผลที่ได้รับเมื่อนำวิธีดังกล่าวไปใช้แก้ไขปัญหา ไปจนถึงบทสรุปที่ได้รับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบจำลองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้นั้นได้ทดลองที่จะหากกลยุทธ์ที่เหมาะสมเพื่อที่จะทำกำไรสูงสุดในทุกๆช่วง 6 เดือน ซึ่งถือว่าเป็นแนวคิดใหม่อีกด้วย

นอกจากนี้ ในการศึกษาปัญหาดังกล่าวนั้น ผู้วิจัยจำเป็นต้องพิจารณาในส่วนของรายละเอียดเชิงวิศวกรรมของระบบโครงข่ายเข้าถึง FTTH อาทิเช่น จำนวน OLTs, เวลาประวิง, ลักษณะการวาง splitter เป็นต้น ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ล้วนส่งผลกระทบต่ออัตราค่าบริการ และผลกำไรของผู้ให้บริการ แต่บางงานวิจัยเชิงประยุกต์ระหว่างเทคโนโลยี FTTH และเศรษฐศาสตร์ได้ละเลยไป

ทั้งนี้ ผู้ให้บริการยังสามารถนำแบบจำลองที่นำเสนอและผลที่ได้รับจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ประยุกต์ในการประกอบธุรกิจการให้บริการโครงข่ายเข้าถึง FTTH ได้ รวมไปถึงงานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อการพัฒนา และแก้ไขปัญหาไปในทิศทางที่ดีขึ้น

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปใช้ประกอบกับการออกแบบและวางระบบของโครงข่ายเข้าถึง FTTH ได้อีกด้วย



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

บทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยแบ่งเนื้อหาหลักออกเป็นเจ็ดส่วน ส่วนแรกจะอภิปรายเกี่ยวกับทฤษฎีเกี่ยวกับการศึกษาเชิงประยุกต์ระหว่างโครงข่ายเข้าถึงและเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะ โครงข่ายเข้าถึงไฟเบอร์ทูเดอะโฮม สำหรับส่วนที่สองนั้นจะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทั่วไปเกี่ยวกับโครงข่ายเข้าถึงไฟเบอร์ทูเดอะโฮม ตั้งแต่ส่วนความรู้เบื้องต้น ไปจนถึงรายละเอียดของอุปกรณ์และการทำงานของระบบโครงข่ายเข้าถึง ทั้งนี้ ยังสอดแทรกเนื้อหาเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายของโครงข่ายไฟเบอร์ทูเดอะโฮมควบคู่กันไปด้วย ในส่วนที่สามจะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับความเชื่อถือได้ และส่วนที่สี่นั้นเป็นการแนะนำทฤษฎีการหาค่าเหมาะสมที่สุด ในขณะที่ส่วนที่ห้าได้กล่าวถึงทฤษฎีระบบพลวัต ส่วนที่หกเป็นการแนะนำถึงระเบียบวิธีการทางสถิติที่ได้นำเข้ามาใช้ในงานวิจัย ไม่ว่าจะเป็นทฤษฎีแถวคอย ไปจนถึงช่วงความเชื่อมั่น และส่วนสุดท้ายอธิบายถึงหลักการเกี่ยวกับการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

#### 2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการศึกษาเชิงประยุกต์ระหว่างโครงข่ายเข้าถึงไฟเบอร์ทูเดอะโฮม (FTTH) และเศรษฐศาสตร์

สิ่งที่สำคัญที่สุดที่ถูกหยิบยกมาพิจารณาไม่ว่าในการออกแบบระบบหรือปฏิบัติงานทางด้านวิศวกรรมใดๆ ในความเป็นจริงก็คือ เรื่องของค่าใช้จ่ายหรือต้นทุน (costs) การหาจุดที่เหมาะสมระหว่างค่าใช้จ่ายและสมรรถภาพ (performance) ของระบบนั้นเป็นเรื่องที่จำเป็นต้องพิจารณาให้ถี่ถ้วน [44][45] เพราะในการวางระบบใดๆ นั้นปฏิเสธไม่ได้ว่าจำเป็นต้องข้องเกี่ยวกับราคา ดังนั้น จึงทำให้การพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ในเรื่องวิศวกรรมเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ซึ่งคำถามพื้นฐานทางเศรษฐศาสตร์ที่เกี่ยวข้องนั้น ส่วนใหญ่ก็คือประโยชน์ที่ได้รับมานั้นคุ้มค่ากับค่าใช้จ่ายที่เสียไปหรือไม่

การศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม (engineering economy) นั้นจะเกี่ยวข้องกับการประเมินความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์กับกลวิธีการแก้ปัญหาที่เสนอขึ้นมาเพื่อใช้กับปัญหาทางวิศวกรรม ทั้งนี้ กลวิธีการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่ยอมรับได้ในแง่ของเศรษฐศาสตร์นั้น งบดุลที่เป็นบวกในแง่ของผลประโยชน์ระยะยาวจะต้องมากกว่าต้นทุนในระยะยาวที่เกิดขึ้นทั้งหมด อีกทั้งยังควรที่จะสามารถทำกำไรได้อย่างเหมาะสม

การศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมนั้นจะพิจารณาในเชิงผสมผสานกันระหว่างรายละเอียดทางด้านวิศวกรรมทั่วไปในการออกแบบระบบหนึ่งๆ กับการพิจารณาในแง่ของเศรษฐศาสตร์ การตัดสินใจในการศึกษาประเภทนี้ นอกจากจะพิจารณาในเรื่องของเงินและวิศวกรรมแล้ว ยังพิจารณาถึงทรัพยากรที่มีจำกัดต่างๆ เช่น เวลา วัสดุ แรงงาน ทรัพยากรธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งไม่ได้พิจารณาเพียงแคในช่วงของการออกแบบเชิงแนวคิดเท่านั้น แต่ยังพิจารณาถึงสิ่งต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นตลอดช่วงอายุการใช้งานของระบบ ดังนั้น ด้วยปัจจัยดังกล่าว ทำให้คำตอบที่ดีที่สุดที่ได้รับจากการศึกษาเกี่ยวกับเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมนั้นมักจะไม่ใช่คำตอบเดียวกันกับระบบที่ดีที่สุดเชิงของวิศวกรรมที่มักจะเน้นเพียงสมรรถภาพของระบบที่สูงที่สุดที่อาจจะเกินกับความจำเป็น มีต้นทุนที่สูงเกินควร และไม่อาจทำกำไรให้แก่ผู้ประกอบการได้ [45]

ในการพิจารณาด้านทุนนั้นมักจะแบ่งต้นทุนออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ค่าใช้จ่ายด้านการลงทุน (capital expenditures: CAPEX) และรายจ่ายในการดำเนินการ (operational expenditures: OPEX) โดยที่ CAPEX นั้นกล่าวโดยรวมนั้นก็คือค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการลงทุนวางระบบมักจะเกี่ยวข้องกับค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น ส่วน OPEX นั้นคือค่าใช้จ่ายที่ใช้การจัดการและบำรุงรักษาระบบโครงข่าย เช่น การตรวจสอบและซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบโครงข่าย และการดูแลลูกค้า เป็นต้น

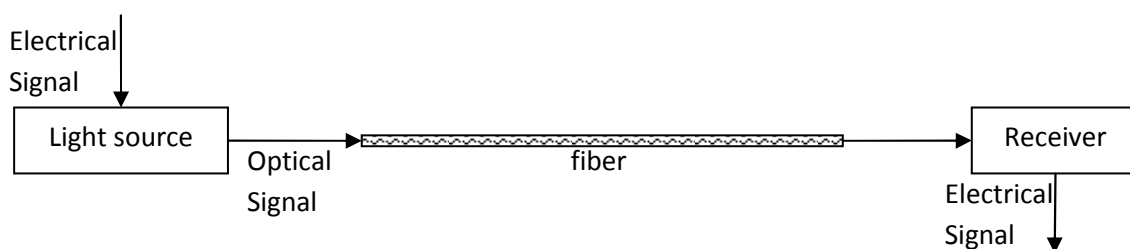
ดังที่ทราบกันดีว่า ในการวางระบบ FTTH นั้นมีค่าใช้จ่ายสูง ทำให้การศึกษาเชิงประยุกต์ระหว่างเทคโนโลยี FTTH และเศรษฐศาสตร์ได้รับความสนใจค่อนข้างมาก เป็นต้นว่าผู้ให้บริการควรจะเลือกตัวแบบเศรษฐศาสตร์เครือข่าย (network economic) ตัวใด และควรจะเลือกใช้เทคโนโลยี FTTH แบบใด จึงจะให้ผลดีที่สุดในเชิงของทั้งรายได้และต้นทุน ซึ่งแตกต่างกันไปตามแต่กรณีและเหตุปัจจัย เช่น ในกรณีลูกค้าส่วนบุคคลหรือลูกค้าองค์กรธุรกิจที่จะมีค่าปรับเกิดขึ้น

เมื่อระบบไม่สามารถใช้งานได้ รูปแบบของการติดตั้งตัวแยกสัญญาณ พื้นที่ที่จะวางระบบ ความหนาแน่นของประชากร เป็นต้น [12][46]

## 2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับโครงข่ายเข้าถึงไฟเบอร์ออปติกเคอะโฮม

เส้นใยนำแสง (fiber-optic) ถูกคิดค้นเพื่อใช้สำหรับการให้บริการ broadband เป็นเวลากว่าสามสิบปีแล้ว โดยโครงข่าย FTTH ได้เริ่มมีการทดลองใช้เป็นครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่นในปี 1977 เพื่อรองรับผู้ใช้บริการ 168 ราย ต่อมาได้เริ่มมีการทดลองวางระบบและใช้งานในอีกหลายประเทศทั้งประเทศในแถบยุโรป ฝรั่งเศส อังกฤษ อเมริกา เป็นต้น ผลการทดลองใช้ในเชิงเทคนิคนั้นถือว่าประสบความสำเร็จด้วยดี แต่มีปัญหาใหญ่ที่สุดกลับเป็นเรื่องค่าใช้จ่ายที่สูง นอกเหนือไปจากเรื่องความต้องการเกี่ยวกับบริการที่ไม่แน่นอนว่าบริการใดที่ผู้ใช้บริการจะต้องการจริงๆ อีกทั้งเทคโนโลยีอื่นๆที่เหมาะสมกว่าในช่วงเวลานั้น ทำให้ FTTH ยังไม่ได้รับความนิยมในช่วงเวลาดังกล่าว ทว่ากลับเพียงมีการนำมาใช้จริงอย่างแพร่หลายในหลายประเทศทั่วโลกเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา ทั้งนี้ อาจกล่าวได้ว่าส่วนหนึ่งที่ทำให้ FTTH ได้รับความนิยมอย่างรวดเร็วในระยะหลังนี้น่าจะเป็นเพราะความต้องการใช้อัตราเร็วรับส่งข้อมูลที่สูงมากขึ้น และ FTTH ก็เป็นเทคโนโลยีที่สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าว [47] ซึ่งในปัจจุบันสามารถให้บริการได้ที่อัตราเร็วถึง 10 กิกะบิตต่อวินาที ทั้งในส่วนของการสื่อสารข้อมูลขาขึ้นและขาลงดังเช่นมาตรฐาน G.987.1 [1] ส่วนอีกสาเหตุหนึ่งคือเรื่องระยะทาง เนื่องจากว่า FTTH ใช้เส้นใยนำแสงมาเป็นตัวกลางส่งสัญญาณ (transmitter medium) ทำให้สามารถส่งสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์สูงไปได้ระยะทางไกลกว่าสายทองแดง (copper wires) หรือสายโคแอกซ์ (coaxial cables) ทั้งนี้ ระยะทางส่งสัญญาณจะไปได้ไกลมากขึ้นเพียงใดนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวกลางส่งสัญญาณ ซึ่งในที่นี้คือเส้นใยนำแสงเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ภาครับ (receiver) และภาคส่ง (transmitter) ด้วย อย่างไรก็ดี เหตุผลหลักที่ FTTH ได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆนั้นเป็นเรื่องของการที่สามารถรองรับแบนด์วิดท์ได้ในปริมาณมาก ซึ่งด้วยเหตุนี้เอง ทำให้ FTTH ถูกจัดให้เป็นเทคโนโลยีที่มีคุณสมบัติเพียงพอและเหมาะสมสำหรับอนาคต

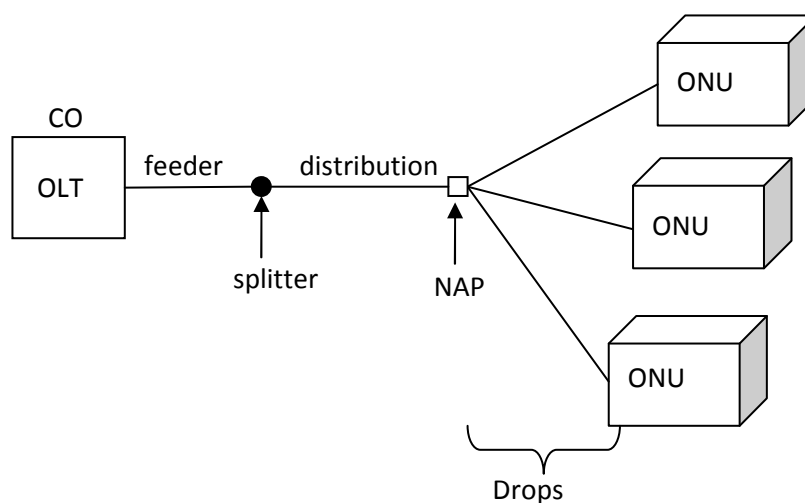
แนวคิดการนำเส้นใยนำแสงมาใช้เพื่อการติดต่อสื่อสารนั้นมีหลักการที่ค่อนข้างเรียบง่าย กล่าวคือ สัญญาณเข้าผสมสัญญาณ (modulate) กับแหล่งกำเนิดแสง (light source) ซึ่งเป็นภาคส่งแบบหนึ่ง เพื่อที่จะผลิตสัญญาณแสง (optical signal) ส่งผ่านเส้นใยนำแสงไปยังภาครับซึ่งทำหน้าที่ในการถอดรหัสได้สัญญาณไฟฟ้า (electrical signal) กลับออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแสดงโครงสร้างหลักของระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสง

ทั้งนี้ ระบบการติดต่อสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงจริงๆนั้นมีความซับซ้อนกว่านี้มาก รูปข้างต้นเพียงแค่แสดงระบบดังกล่าวในรูปแบบที่เรียบง่ายที่สุดเท่านั้น [44] ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าเครือข่ายสื่อสารทางแสงแบบพาสซีฟ (passive optical network: PON) นั้นเป็นสถาปัตยกรรมเครือข่าย (architecture) ของโครงข่ายเข้าถึง FTTH ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากว่าไม่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใดๆอยู่ในระบบ ทำให้ค่าใช้จ่ายด้านการลงทุน (capital expenditures: CAPEX) และรายจ่ายในการดำเนินการ (operational expenditures: OPEX) ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับสถาปัตยกรรมเครือข่ายแบบอื่น ทั้งยังมีความเชื่อถือได้ (reliability) สูงกว่าสถาปัตยกรรมเครือข่ายแบบอื่นด้วย [42] โดยทั่วไปแล้ว โครงข่ายเข้าถึง FTTH ที่มีสถาปัตยกรรมเครือข่ายแบบ PON นั้นจะประกอบด้วยอุปกรณ์ OLT ซึ่งอยู่ที่ชุมสาย (central office: CO) และมีการใช้เส้นใยนำแสงเพียงเส้นเดียวในการส่งทราฟฟิก (traffic) ทั้งหมดจากชุมสายของผู้ให้บริการติดต่อกับตัวแยกสัญญาณ (splitter) ซึ่งก็จะแยกสัญญาณออกไปอีกตามสัดส่วนการแยก (splitting ratio) โดยที่เส้นใยนำแสงที่เชื่อมระหว่างชุมสายและตัวแยกสัญญาณนี้จะถูกเรียกว่า feeder fiber (FF) จากนั้นก็จะส่งสัญญาณผ่านเส้นใยนำแสงไปยัง ONU ที่อยู่ที่บ้านของผู้ใช้บริการซึ่งเส้นใยนำแสงส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น

สองส่วน ส่วนที่เชื่อมระหว่างตัวแยกสัญญาณกับจุดที่ใกล้ๆกลุ่มที่อยู่อาศัยหรือจุดของการเข้าถึงเครือข่าย (network access point: NAP) นั้นจะถูกเรียกว่า distribution fiber (DF) ส่วน drop ก็คือเส้นใยนำแสงที่ส่วนที่เชื่อมต่อจากจุดของการเข้าถึงเครือข่ายไปยัง ONU ที่บ้านของผู้ใช้บริการ [35][48][49] ดังแสดงในรูปที่ 2.2



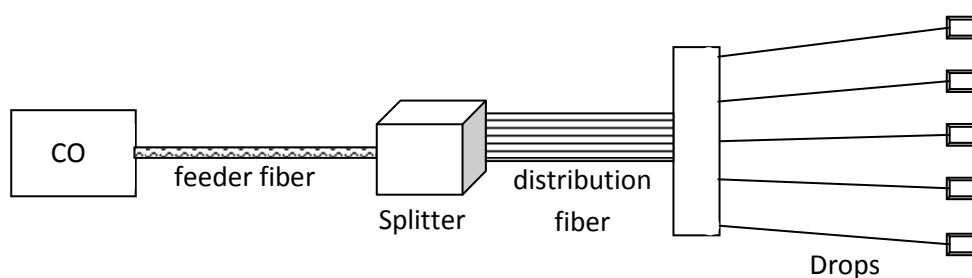
รูปที่ 2.2 รูปแสดงโครงสร้างของโครงข่ายเข้าถึง FTTH แบบ PON

ทั้งนี้ ในการวางระบบ FTTH ตำแหน่งและรูปแบบของการติดตั้งตัวแยกสัญญาณให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมนั้นสำคัญมาก รูปแบบการติดตั้งตัวแยกสัญญาณที่แตกต่างกันนั้นก็จะมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะทำให้เหมาะสมกับบางกรณี แต่ไม่เหมาะสมกับอีกกรณี โดยที่รูปแบบการติดตั้งตัวแยกสัญญาณนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

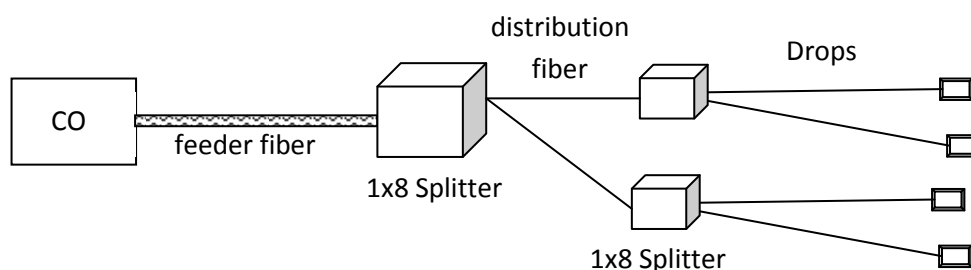
1. การแยกสายส่งสัญญาณแบบรวมศูนย์กลาง (centralized splitting) คือระบบ FTTH ที่มีรูปแบบการใช้ตัวแยกสัญญาณเพียงตัวเดียวในระบบ หรือแยกสัญญาณชั้นเดียว (single-level splitting) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การแยกสายสัญญาณแบบนี้จะมี CAPEX ส่วนของตัวแยกสัญญาณน้อย มีการสูญเสีย (loss) ที่เกิดขึ้นโดยรวมน้อยกว่าอีกแบบ และยังมีความเชื่อถือได้ (reliability)

ของระบบที่สูงกว่า อีกทั้งยังง่ายต่อการแก้ปัญหาและหาข้อผิดพลาด (fault) ที่เกิดขึ้นในระบบอีกด้วย ซึ่งด้วยข้อดีนี้ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของแรงงานลงไปได้

2. การแยกสายส่งสัญญาณแบบกระจาย (distributed splitting) คือระบบ FTTH ที่มีรูปแบบการแยกสัญญาณสองชั้น (two-level splitting) หรือใช้ตัวแยกสัญญาณสองชั้นซ้อนกันในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งการแยกสัญญาณแบบนี้ใช้เส้นใยนำแสงในปริมาณที่น้อยกว่า แต่มีข้อจำกัดในการที่จะแบ่งแบนด์วิดท์ให้กับผู้ใช้บริการ ทำให้รองรับผู้ใช้บริการได้น้อยกว่าอีกแบบ และยังยุ่งยากในส่วนของการหาข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากลักษณะการวางตัวแยกสัญญาณของรูปแบบนี้เอง



รูปที่ 2.3 รูปแสดงการแยกสายส่งสัญญาณแบบรวมศูนย์กลาง (centralized splitting)



รูปที่ 2.4 รูปแสดงการแยกสายส่งสัญญาณแบบกระจาย (distributed splitting)

นอกจากนี้ ในการวางตัวแยกสัญญาณควรมีข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนที่อยู่อาศัยที่ผู้ให้บริการระบบ FTTH ผ่านไปถึง (home passed) หรืออีกนัยหนึ่งคือจำนวนที่อยู่อาศัยที่ผู้ให้บริการสามารถให้บริการได้ที่แน่ชัด เนื่องจากว่าเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่าใช้จ่ายต่อ home passed นั้นมากหรือน้อย นอกจากปัจจัยหลักในเรื่องความหนาแน่นของพื้นที่ (area density) หรือความหนาแน่นของประชากร (population density) ซึ่งถ้ากรณีที่ความหนาแน่นของประชากรมีสูง การวางตัวแยกสัญญาณให้ใกล้กับที่อยู่อาศัยของผู้ใช้บริการก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วน of เส้นใยนำแสงลงไปได้ อย่างไรก็ตาม ในการเลือกใช้ตัวแยกสัญญาณนั้นก็เกี่ยวข้องกับการพิจารณางบประมาณ (power budget) [35][36][49] ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณาในการออกแบบโครงข่ายเข้าถึง FTTH เพราะการพิจารณา power budget นั้นเป็นเสมือนการตรวจสอบให้แน่ใจระบบที่ออกแบบนั้นมีกำลังมากพอที่ส่งสัญญาณไปถึงภาครับได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งควรจะมีค่าขอบ (margin) สักเล็กน้อยสำหรับกรณีที่ระบบใช้งานไปเป็นเวลานาน และการซ่อมแซมต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น [44] นอกจากนี้ ยังต้องพิจารณาถึงระดับการให้บริการลูกค้า (customer service levels) ซึ่งคือ ข้อตกลงของระดับการให้บริการ (Service level agreement: SLA) โดยที่ SLA นี้จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของสภาพพร้อมใช้งานของเครือข่าย (network availability) และ การประวิงเวลาตลอดเส้นทาง (end-to-end delay) [50]

ในส่วน of สภาพพร้อมใช้งานของเครือข่ายจะมีมากหรือน้อยนั้นจะเกี่ยวข้องกับแผนการป้องกัน (protection scheme) ของโครงข่าย FTTH ด้วย เนื่องจากส่วน of feeder เป็นส่วนที่ค่อนข้างมีความเสี่ยงสูงที่สุดในระบบ PON ถ้าหากส่วนนี้มีการชำรุดหรือเสียหายจะทำให้ระบบ PON ทั้งระบบไม่สามารถใช้งานได้ถ้าหากไม่มีแผนการป้องกันใดๆ รองรับอยู่ และแน่นอนว่าสภาพพร้อมใช้งานของเครือข่ายจะน้อยกว่าระบบเครือข่ายที่มีแผนการป้องกัน [51]

แผนการป้องกันของโครงข่ายเข้าถึง FTTH นั้นมีอยู่ 4 แบบด้วยกัน ได้แก่ แบบ A การป้องกัน feeder fiber (Type A: feeder fiber protection) ซึ่งเป็นการป้องกันที่เกี่ยวข้องกับส่วน feeder fiber โดยใช้เส้นใยนำแสงสำรอง (spare fiber) โดยที่ถ้าหากเกิดการเสียหายขึ้น feeder fiber ตัวหลักตัว optical switch ก็จะทำหน้าที่ในการสลับให้เส้นใยนำแสงสำรองทำงานแทน ทำให้ระบบสามารถดำเนินต่อไปได้ ส่วนแบบที่สองนั้นคือแบบ B การป้องกัน feeder fiber และ OLT (Type B:

OLT and feeder fiber protection) แบบนี้จะคล้ายแบบ A โดยเพิ่มเติมในส่วนที่มี OLT สํารองอยู่ด้วย ส่วนแบบ C การควบคุมระบบ PON แบบเต็มรูปแบบ (Type C: full PON duplication) เป็นการป้องกันที่เรียกได้ว่าเป็นการสํารองระบบ PON อีกระบบควบคุมไว้ด้วยกัน ซึ่งเป็นแผนการป้องกันที่สามารถสลับไปใช้อุปกรณ์สํารองได้อย่างรวดเร็ว และแบบสุดท้ายคือแบบ D การควบคุมเส้นใยนำแสงทั้งส่วน feeder fiber และ distribution fiber อย่างอิสระกัน (Type D: independent duplication of feeder and branch fibers) เป็นการป้องกันที่ติดตั้งเส้นใยนำแสงในส่วนของ feeder fiber และ distribution fiber สํารองไว้อย่างเป็นอิสระกันกับระบบหลัก วิธีนี้จะทำให้ระบบกลับมาใช้งานได้ปกติดีกว่าแบบ C ทั้งยังจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มากกว่าแต่กลับไม่ได้ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับแบบ C ดังนั้น แผนการป้องกันแบบ C จึงได้รับความนิยมสูงกว่าเมื่อเทียบกับแบบ D ทั้งนี้ แบบ C และแบบ D เป็นแผนการป้องกันที่ทำให้ระบบ FTTH มีสภาพพร้อมใช้งานของเครือข่ายสูงที่สุดเมื่อเทียบกับแบบอื่น คืออยู่ที่ 99.999% อย่างไรก็ตาม การใช้แผนการป้องกันทั้งสองแบบนี้มีค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับแผนการป้องกันแบบ A และแบบที่ไม่มีแผนการป้องกัน โดยเฉพาะในกรณีลูกค้าส่วนบุคคลที่ผู้ให้บริการไม่ต้องเสียค่าปรับให้ผู้ให้บริการในกรณีที่ระบบไม่สามารถใช้งานได้เหมือนในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ เนื่องจากแผนการป้องกันทั้งสองแบบนี้จะมีค่าใช้จ่ายในส่วนของผู้บริโภคทั้งหมดเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเพิ่มเติมขึ้นมาอีก ทั้งนี้ ในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจนั้น ถ้าหากว่าใช้แผนการป้องกันแบบ C และ D แล้วจะมี OPEX ที่ต่ำกว่าแบบที่ไม่มีแผนการป้องกัน เนื่องจากว่าไม่ต้องเสียค่าปรับให้กับลูกค้าองค์กรธุรกิจในกรณีที่ระบบใช้งานไม่ได้ แต่เมื่อเทียบกับแบบ A แล้วค่าใช้จ่ายโดยรวมไม่ต่างกันมากนัก แต่แบบ A นั้นจะมีสภาพพร้อมใช้งานของเครือข่ายที่ต่ำกว่า ดังนั้นก็จะมีค่าปรับที่ต้องจ่ายให้ลูกค้าองค์กรธุรกิจสูงพอสมควร แต่ในกรณีลูกค้าส่วนบุคคลนั้นการไม่ใช้แผนการป้องกันใดๆจะทำให้มีค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ ถ้าหากว่าพิจารณาในกรณีที่ลูกค้าองค์กรธุรกิจย้ายไปอยู่ในพื้นที่ที่มีระบบ PON ที่ไม่ได้ใช้แผนการป้องกันใด หรือใช้แผนการป้องกันแบบ A อยู่แล้วนั้น การที่จะพัฒนาระบบเพื่อใช้แผนการป้องกันแบบ C หรือ D เพื่อที่จะตอบสนองความต้องการในส่วนของการเชื่อถือได้ของลูกค้าองค์กรธุรกิจนั้นอาจจะไม่คุ้มค่าในแง่ของการลงทุนนัก [12][51]



ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น อีกส่วนหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงในการพิจารณาประสิทธิภาพของโครงข่ายก็คือ การประวิงเวลา (delay) ทั้งนี้ delay ที่เกิดขึ้นตั้งแต่การขั้นตอนการผลิตแพคเกจ (packet) จนแพคเกจถูกส่งไปถึงจุดหมายนั้นมีทั้งการประวิงเวลาแถวคอย (queuing delay), การประวิงเวลาการแพร่กระจายคลื่น (propagation delay) และ การประวิงเวลาส่งสัญญาณ (transmission delay) ซึ่งระบบ PON ที่มีการเข้าถึงหลากหลาย (multiple access) แต่ละแบบ ก็มี delay ที่เกิดขึ้นต่างกัน ทั้งนี้ delay ที่เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดและใช้เป็นหลักในการคำนวณของระบบ PON ทุกแบบก็คือ queuing delay ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$\Phi(\rho) = \frac{\rho \left( \frac{\sigma_L^2}{L} + \bar{L} \right)}{2C(1-\rho)} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\Phi(\rho)$  แทนการประวิงเวลาแถวคอยเฉลี่ย (mean queuing delay) ซึ่งอยู่ในรูปแถวคอยแบบ M/G/1 และมีหน่วยเป็นวินาที,  $\rho$  แทนปริมาณทราฟฟิก (traffic load) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.2) และไม่มีหน่วย,  $\bar{L}$  และ  $\sigma_L^2$  แทนค่าเฉลี่ยของความยาวของกลุ่มข้อมูลหรือแพคเกจ (packet length) ซึ่งมีหน่วยเป็นบิต และความแปรปรวนของความยาวของแพคเกจซึ่งมีหน่วยเป็น (บิต)<sup>2</sup> ตามลำดับ ส่วน  $C$  นั้นแทนความจุ (capacity) ของระบบ PON นั้นๆ มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับมาตรฐานของระบบ PON

$$\rho = \frac{\lambda}{C} \quad (2.2)$$

โดยที่  $\lambda$  แทนอัตราทราฟฟิก มีหน่วยเป็นบิตต่อวินาที ซึ่งมักจะพิจารณาทั้งในกรณีที่ทราฟฟิกมีการแจกแจงแบบเอกรูป และทราฟฟิกมีการแจกแจงแบบอื่นๆ ควบคู่กันไป [42]

อย่างไรก็ตาม การพิจารณาถึงการออกแบบการเข้าถึงหลากหลายนั้นก็เป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะในโครงข่ายเข้าถึงแบบ PON นั้นอาจจะมีการชนกันของกระแสข้อมูล (data stream) เกิดขึ้นได้ ซึ่งการกำหนดรูปแบบในการเข้าถึงนั้นสามารถที่จะกระทำได้หลายรูปแบบ ทั้งนี้ รูปแบบที่ได้รับความนิยมสูงสุดคือ การเข้าถึงหลากหลายแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) เนื่องจากเป็นรูปแบบที่เหมาะสมการส่งข้อมูลความเร็วสูงที่มีความซับซ้อนปานกลาง และยังเป็นรูปแบบที่มีความคุ้มค่าในเรื่องของค่าใช้จ่ายมากที่สุดอีกด้วย [51]

## 2.3 ทฤษฎีความเชื่อถือได้

โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงความเชื่อถือได้ สิ่งที่มีจะต้องถูกนำมาเกี่ยวข้องกับตัวอย่างหลักเล็งไม่ได้เลย คือ ความล้มเหลว (failure) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นโค้งอ่างน้ำ (bath tub curve) กล่าวคือมีโอกาสที่จะเกิดความล้มเหลวสูงในตอนต้นของอายุการใช้งานของอุปกรณ์นั้น จากนั้นเมื่อเข้าสู่ช่วงระยะการใช้งานปกติ (useful life) ของอุปกรณ์นั้นอัตราความล้มเหลว (failure rate) ก็จะค่อนข้างต่ำ และเมื่อพ้นจากช่วงนี้ก็จะเข้าสู่ช่วงที่ใกล้จะหมดอายุการใช้งานก็จะอัตราความล้มเหลวสูงขึ้นมาอีก

ในส่วนของตัวเองแปรเกี่ยวกับความเชื่อถือได้นั้น ในที่นี้ จะกล่าวถึงเพียง 4 ตัวหลัก ได้แก่

### 2.3.1. เวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหาย (Mean Time Between Failures: MTBF)

MTBF คือเวลาเฉลี่ยระหว่างความล้มเหลวของอุปกรณ์แต่ละครั้ง ค่าดังกล่าวนี้มักจะได้อมาจากผู้ขายอุปกรณ์นั่นเอง [52] ทั้งนี้ ในการหา MTBF ของอุปกรณ์หลายอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ด้วยกัน หรืออาจจะหา MTBF ของระบบนั้นสามารถคำนวณได้จากสูตร โดยที่ค่าจะแตกต่างกันตามรูปแบบการต่อกันของอุปกรณ์ ถ้าหากต่อกันแบบอนุกรม (serial) MTBF ก็จะเท่ากับส่วนกลับของผลรวมของอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบ แต่ถ้าหากอุปกรณ์เหล่านั้นต่อกันแบบขนาน (parallel) จะซับซ้อนกว่าแบบอนุกรม โดยจะคำนวณได้จากสมการที่ (2.3) ซึ่งในที่นี้กำหนดให้อัตราความล้มเหลวเท่ากัน

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} + \dots + \frac{1}{n\lambda} \quad (2.3)$$

โดยที่  $n$  แทนจำนวนอุปกรณ์ และ  $\lambda$  แทนอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ [53]

### 2.3.2. FITS

วิธีนี้เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการแทน MTBF โดยค่านี้คือจำนวนความล้มเหลวที่เกิดขึ้นในเวลา 1,000,000,000 ชั่วโมง

### 2.3.3. เวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม (Mean Time To Repair: MTTR)

MTTR คือเวลาที่ใช้การซ่อมแซมอุปกรณ์ที่เสีย ซึ่งบางทีการซ่อมแซมดังกล่าวอาจจะหมายถึงการเปลี่ยนอุปกรณ์ที่เสียเป็นอุปกรณ์ใหม่ก็ได้

### 2.3.4. สภาพพร้อมใช้งาน (Availability: A)

สภาพพร้อมใช้งานคือร้อยละของเวลาที่ระบบนั้นสามารถใช้งานได้ปกติ ซึ่งค่าของสภาพพร้อมใช้งานนั้นมีค่าเท่ากับเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหายหารด้วยผลบวกของเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหายกับเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม [52]

## 2.4 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization theory) เป็นทฤษฎีที่นิยมนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการตัดสินใจ (Decision making) ซึ่งหน้าที่ของการตัดสินใจคือการเลือกทางเลือกที่ทำให้ได้รับผลที่ดีที่สุด โดยที่ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดก็จะถูกนำมาใช้ในการจัดการเพื่ินหาทางเลือกที่ดีที่สุดให้ตรงกับตัวที่ใช้วัดผล ซึ่งอาจจะถูกแสดงอยู่ในรูปฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function) หรือ คำนีชี้ประสิทธิภาพ (performance index)

ทั้งนี้ สายงานวิจัยเกี่ยวกับทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นสายงานวิจัยที่ค่อนข้างมีความเคลื่อนไหวและพัฒนาอยู่เสมอ ทำให้มีวิธีการในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดถูกคิดค้นและพัฒนาออกมาใหม่อย่างต่อเนื่อง [54] ซึ่งอาจจะสืบเนื่องมาจากทฤษฎีการหาค่าที่ดีที่สุดนั้นสามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีกหลายประเภท ได้แก่ convex programming, กำหนดการเชิงจำนวนเต็ม (integer programming: IP), กำหนดการแบบกำลังสอง (quadratic programming), กำหนดการแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear programming) และกำหนดการเพินสุ่ม (Stochastic programming) เป็นต้น โดยการเลือกใช้นั้นก็ควรจะพิจารณาถึงปัญหาที่สนใจเป็นหลักว่ามีคุณสมบัติตรงกับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใด ทั้งนี้ อาจกล่าวได้ว่า nonlinear programming เป็นปัญหาที่อยู่ในรูปทั่วไปมากที่สุด

## 2.5 ทฤษฎีพลวัตของระบบ

พลวัตของระบบ (System Dynamics) เป็นการศึกษาพฤติกรรมที่เป็นพลวัตหรือพฤติกรรมที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของระบบ ซึ่งมักจะมีขั้นตอนหลักดังนี้

1. การพิจารณาถึงคำจำกัดความ ขอบเขต ของระบบนั้นๆ ตัวแปรนำเข้า และตัวแปรนำออกที่ได้รับ
2. การสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบ ซึ่งมักจะอยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์หรือความสัมพันธ์ในเชิงกราฟ โดยที่แบบจำลองดังกล่าวนั้นอาจจะได้มาจากการวิเคราะห์หรือการทดลองก็ได้
3. การพิจารณาและวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมพลวัตของแบบจำลองระบบ และสิ่งที่ตัวแปรนำเข้าส่งผลกับตัวแปรนำออกของระบบ
4. การกำหนด หรือการแนะนำ หรือกลยุทธ์ที่จะช่วยพัฒนาประสิทธิภาพของระบบโดยใช้การปรับปรุงแก้ไขโครงสร้างของระบบหรือค่าตัวแปรต่างๆ

ทั้งนี้ หลักการของ system dynamics นั้น คือปฏิสัมพันธ์ระหว่างระบบ (system) และสิ่งแวดล้อม (environment) ของระบบ ในเชิงบริบทอาจจะกล่าวได้ว่า ระบบนั้นก็คือแนวคิดหลักที่สนใจศึกษาในขอบเขตหนึ่งๆ และสิ่งแวดล้อมก็คือทุกอย่างที่ไม่ได้อยู่ในระบบ โดยที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมนั้นถูกแสดงอยู่ในรูปของตัวแปรระบบ (system variables) ซึ่งถูกแบ่งออกเป็นตัวแปรนำเข้าและตัวแปรนำออก โดยที่ตัวแปรระบบอาจจะเป็นปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา อาทิเช่น แรง ความดัน หรือตัวแปรทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญในการวิเคราะห์พลวัตของทุกระบบก็คือ การกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งจะต้องมีเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพออย่างครบถ้วนสำหรับการพิจารณาพฤติกรรมระบบตลอดระยะเวลาที่ศึกษา ได้แก่ การบรรยายลักษณะของระบบให้อยู่ในรูปของคณิตศาสตร์, การกำหนดคุณลักษณะของตัวแปรระบบที่เวลาเริ่มต้น และการกำหนดตัวแปรนำเข้า ณ เวลาอื่นๆตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนต่างๆของการวิเคราะห์พลวัตนี้มักจะถูกใช้โดยวิศวกรในการออกแบบและพัฒนาระบบที่มีความซับซ้อน (Complex System) อยู่แล้ว ไม่ว่าจะเป็นระบบควบคุม

ระบบคอมพิวเตอร์ กระบวนการผลิตพลังงาน รถยนต์ หรือยานอวกาศ ระบบชลประทาน กระบวนการทางเคมี ระบบอุตสาหกรรมการผลิต เป็นต้น เนื่องจากการทำงานเชิงวิศวกรรมมักจะเกี่ยวเนื่องกับการออกแบบ พัฒนา และผลิติดูปรแกรมและระบบต่างๆ เพื่อตอบสนองกับความต้องการของผู้คนในสังคม ซึ่งระบบเชิงวิศวกรรมต่าง ๆ นั้นมักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งที่เรียกว่าพลวัต (dynamic) หรือสิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งสิ่งเหล่านั้นล้วนมีผลมาจากปัจจัยที่สำคัญ ยกตัวอย่างเช่น ระบบพลังงานที่จะต้องตอบสนองกับรูปแบบเวลาของความต้องการในแต่ละวัน และแต่ละฤดูกาล ไปจนถึงการตอบสนองกับความล้มเหลวที่อาจจะเกิดขึ้นในระบบหรืออุปกรณ์ใดในระบบได้อย่างทันท่วงทีเพื่อไม่ให้เกิดช่วงเวลาที่ไม่สามารถให้บริการได้ เป็นต้น ดังนั้น วิธีการในการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมระบบจึงถูกคิดค้นขึ้นมาตามแต่วิธีการของวิศวกรแต่ละรายให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า วิธีการพลวัตของระบบนี้เป็นวิธีการที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับเทคโนโลยีที่หลากหลาย ทำให้วิธีพลวัตของระบบนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในหลากหลายสายงาน ไม่ว่าจะเป็นระบบเกี่ยวกับ ไฟฟ้า ของไหล เศรษฐศาสตร์ ชีววิทยา นิเวศวิทยา และการแพทย์ [57]

## 2.6 ระเบียบวิธีการทางสถิติที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธีการทางสถิติที่เกี่ยวข้อง และได้หยิบยกเข้ามาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เนื้อหาส่วนนี้ถูกแบ่งออกเป็นสามส่วน ได้แก่ การแจกแจงความน่าจะเป็น ทฤษฎีแถวคอย และช่วงความเชื่อมั่น

### 2.6.1 การแจกแจงความน่าจะเป็น (probability distribution)

เนื่องจากในความเป็นจริงนั้น ข้อมูลต่างๆ เช่น ความต้องการ (demand) ที่เกิดขึ้นนั้นมักจะ เป็นค่าที่ไม่คงที่ และอาจจะ เป็นค่าที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม ในกรณีที่ไม้อาจใช้ข้อมูลจริงได้นั้น จึงมีการใช้ การแจกแจงความน่าจะเป็นเข้ามาช่วยผลิตข้อมูลที่ใช้แทนข้อมูลจริงดังกล่าว โดยข้อมูลหรือผลลัพธ์ ที่ผลิตออกมานั้นจะถูกเรียกว่า ตัวแปรสุ่ม (random variable) ซึ่งตัวแปรสุ่มดังกล่าวอาจจะ เป็น

ประเภทวิฤต (discrete) หรือประเภทต่อเนื่อง (continuous) ก็ได้ โดยที่ตัวแปรสุ่มเหล่านี้จะถูกผลิตแบบสุ่มด้วยความน่าจะเป็นตามฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (probability density function: pdf) ซึ่งแทนด้วย  $f(x)$  และ  $p(x)$  ในกรณีตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง และตัวแปรสุ่มแบบวิฤตตามลำดับ

ทั้งนี้ ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มซึ่งแทนด้วย  $E\{x}$  และ  $\text{var}\{x\}$  ตามลำดับนั้น โดยทั่วไปแล้วจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4) และ (2.5)

$$E\{x\} = \begin{cases} \sum_{x=a}^b x \cdot p(x), & x \text{ is discrete} \\ \int_a^b x \cdot f(x) dx, & x \text{ is continuous} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\text{var}\{x\} = \begin{cases} \sum_{x=a}^b (x - E\{x\})^2 p(x), & x \text{ is discrete} \\ \int_a^b (x - E\{x\})^2 f(x) dx, & x \text{ is continuous} \end{cases} \quad (2.5)$$

**2.6.1.1 การแจกแจงแบบเอกรูป (uniform distribution)** เป็นการแจกแจงที่ทุกค่าของตัวแปรสุ่มมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นเท่าๆกัน โดยมีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังสมการที่ (2.6) [55]

$$f(x) = \frac{1}{b-a}, \quad a \leq x \leq b \quad (2.6)$$

สำหรับฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative distribution function) ของการแจกแจงแบบเอกรูปนี้ เป็นดังสมการที่ (2.7)

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{for } a \leq x < b \\ 1 & \text{for } x \geq b \end{cases} \quad (2.7)$$

ส่วนค่าคาดหวังหรือค่าเฉลี่ยนั้น เป็นไปดังแสดงในสมการที่ (2.8)

$$E(x) = \frac{a+b}{2} \quad (2.8)$$

**2.6.1.2 การแจกแจงแบบล็อกปกติ (lognormal distribution)** เป็นการแจกแจงแบบต่อเนื่องที่ค่าลอการิทึม (logarithm) ของตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) โดยที่ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบนี้จะเป็นไปตามสมการที่ (2.9)

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln(x-\mu))^2/2\sigma^2} \quad (2.9)$$

โดยที่  $\mu$  แทนค่าเฉลี่ย และ  $\sigma$  แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ซึ่งสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าพารามิเตอร์แสดงตำแหน่ง (location parameter) และพารามิเตอร์แสดงรูปร่าง (shape parameter) ตามลำดับ

สำหรับฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative distribution function) ของการแจกแจงแบบล็อกปกตินี้ เป็นดังสมการที่ (2.10)

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right) \quad (2.10)$$

โดยที่  $\Phi$  แทนฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของ standard normal distribution ซึ่งสามารถหาค่าได้จากตารางการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของการแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน (Cumulative Standard Normal Distribution) หรืออาจจะคำนวณโดยใช้คำสั่งในชุดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีที่แพร่หลายเช่นเดียวกัน

ส่วนค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของการแจกแจงแบบล็อกปกตินี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.11)-(2.12) ตามลำดับ [58]

$$E[x] = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \quad (2.11)$$

$$\text{Var}[x] = (e^{\sigma^2} - 1)(E[x])^2 \quad (2.12)$$

**2.6.1.3 การแจกแจงแบบปัวซอง (Poisson distribution)** เป็นการแจกแจงที่ใช้ในการอธิบายจำนวนการเข้ามาหรืออัตราการเกิดของเหตุการณ์ใดๆ ในช่วงเวลาหนึ่งๆ

กำหนดให้  $x$  แทนจำนวนของเหตุการณ์ เช่น จำนวนการเข้ามาในระบบที่เกิดขึ้นในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งอาจจะเป็น 1 นาที หรือ 1 ชั่วโมง จะได้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปัวซอง ดังสมการที่ (2.13)

$$P\{x = n\} = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.13)$$

ส่วนค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนแบบปัวซองนั้นล้วนมีค่าเท่ากับ  $\lambda$

**2.6.1.4 การแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential distribution)** เป็นการแจกแจงที่ใช้ในการอธิบายช่วงเวลาระหว่างแต่ละเหตุการณ์หรือการเข้ามาในระบบ ซึ่งกำหนดให้แทนด้วย  $t$  เนื่องจากว่าค่า  $\lambda$  เป็นอัตราที่เหตุการณ์ที่มีการแจกแจงแบบปัวซองเกิดขึ้น ทำให้เราได้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังแสดงในสมการที่ (2.14)

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (2.14)$$

ในส่วนของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนแบบเอกซ์โพเนนเชียลนั้นเป็นไปตามสมการที่ (2.15) และ (2.16)

$$\text{ค่าเฉลี่ย} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.15)$$

$$\text{ความแปรปรวน} = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.16)$$



จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกันกับค่าจำกัดความของ  $\lambda$  ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปัวซองและเอกซ์โพเนนเชียลนั้นมีความสัมพันธ์บางอย่างที่เกี่ยวข้องกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแจกแจงแบบปัวซองและการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล

|  | ปัวซอง   | เอกซ์โพเนนเชียล                           |
|--|--|---|
| ตัวแปรสุ่ม                             | จำนวนการเข้าใช้, $n$ , ระหว่างช่วงเวลา $T$                             | เวลาระหว่างการเข้าใช้ที่สำเร็จ, $t$       |
| พิสัย (range)                          | $n = 0, 1, 2, \dots$   | $t \geq 0$                                |
| ฟังก์ชันความหนาแน่น (density function) | $p_n(T) = \frac{(\lambda T)^n e^{-\lambda T}}{n!}, n = 0, 1, 2, \dots$ | $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0$ |
| ค่าเฉลี่ย                              | $\lambda T$ ครั้งในเวลา $T$  | $\frac{1}{\lambda}$ หน่วยเวลา             |
| ความน่าจะเป็นสะสม                      | $p_{n \leq N}(T) = p_0(T) + p_1(T) + \dots + p_N(T)$                   | $P\{t \leq A\} = 1 - e^{-\lambda A}$      |
| P(ไม่มีการเข้าใช้ในช่วง A)             | $p_0(A) = e^{-\lambda A}$  | $P\{t > A\} = e^{-\lambda A}$             |

### 2.6.2 ระบบแถวคอย (Queuing Systems)

การรอคอยเพื่อที่จะรับบริการนั้นเรียกได้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวัน เช่น การเข้าคิว (queue up) เพื่อที่จะจ่ายเงินที่เคาน์เตอร์ในซูเปอร์มาร์เก็ต เป็นต้น ทั้งนี้ การรอคิวนี้อาจเกิดขึ้นเพียงในชีวิตประจำวันของมนุษย์เท่านั้น แต่ยังเกิดขึ้นในกระบวนการอื่นๆ อีกด้วย เช่น รถยนต์ที่หยุดรอสัญญาณไฟ สิ้นค้าที่เรียงกันเพื่อที่จะเข้าเครื่องจักร และกราฟฟิกของระบบโทรคมนาคม เป็นต้น ในการศึกษาเกี่ยวกับคิวนั้นจะเกี่ยวข้องกับการหาจำนวนคิวเพื่อที่จะนำไปวัดสมรรถนะของระบบนั้นๆ เช่น ความยาวของแถวคอยเฉลี่ย (average queue length), เวลารอคอยเฉลี่ย (average

waiting time) และจำนวนการใช้บริการเฉลี่ย (average facility utilization) นอกจากนี้ การวิเคราะห์แถวคอย (queuing analysis) ยังสามารถใช้ได้ในกรณีต้องการหาค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมที่มีต้นทุนรวมในการให้บริการและแถวคอยที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด เนื่องจากระดับคุณภาพการบริการที่ดีขึ้นก็มาพร้อมกับต้นทุนที่สูงขึ้น แต่ถ้าหากแถวคอยที่เกิดขึ้นมีมากก็มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน

ทั้งนี้ การวิเคราะห์แถวคอยดังกล่าวนั้นแตกต่างกันไปตามแต่กรณี แต่โดยทั่วไปแล้ว เหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับแถวคอยนั้นมักจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลักคือ ลูกค้า (customers) และผู้ให้บริการ (servers) ซึ่งเมื่อมีลูกค้าเข้ามาในระบบ ลูกค้าอาจจะสามารถใช้บริการได้ทันทีหรืออาจจะต้องรออยู่ในแถวคอยในกรณีที่ servers นั้นไม่ว่าง และเมื่อ servers ให้บริการเสร็จแต่ละครั้งก็จะมีการให้บริการลูกค้ารายถัดไปที่อยู่ในแถวคอยโดยอัตโนมัติ ถ้าหากว่ามีลูกค้ารออยู่ในแถวคอย แต่ถ้าหากไม่มีแถวคอย servers ก็อยู่ในสถานะว่าง (idle)

ในการพิจารณาระบบแถวคอยนั้น กระบวนการเข้ามา (arrival process) นั้นจะถูกแทนด้วยเวลาระหว่างการเข้ามา (interarrival times) ระหว่างลูกค้าที่ได้รับบริการแต่ละราย ส่วนการอธิบายการบริการนั้นจะถูกอธิบายด้วยเวลาที่ใช้ในการให้บริการ (service times) ลูกค้าแต่ละรายโดยทั่วไปแล้วเวลาระหว่างการเข้ามาของลูกค้า และเวลาที่ใช้ในการให้บริการลูกค้าแต่ละรายนั้นส่วนใหญ่มักจะอยู่ในรูปแบบของความน่าจะเป็น อีกส่วนสำคัญของระบบแถวคอยก็คือ ขนาดของแถวคอย (queue size) ซึ่งอาจจะมีจำนวนจำกัด หรือมีไม่จำกัดก็ได้ เช่นเดียวกันกับจำนวนลูกค้าที่เข้าระบบก็จะมีจำนวนจำกัดหรือไม่จำกัดก็ได้เช่นเดียวกัน ในส่วนของระเบียบการให้บริการ (queue discipline) นั้นส่วนใหญ่นิยมแบบมาก่อนรับบริการก่อน (first come, first served: FCFS) แต่บางระบบอาจจะให้บริการตามลำดับความสำคัญ (priority) หรือวิธีอื่นๆก็ได้

ในที่นี้ จะกล่าวถึงระบบแถวคอยที่เป็นที่นิยมและเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้เพียง 2 แบบเท่านั้น ได้แก่

**2.6.2.1 M/M/1** คือ ระบบแถวคอย ที่มี server ตัวเดียว โดยที่ทั้งอัตราการเข้ามาและออกจากระบบของลูกค้านั้นมีการแจกแจงแบบปัวซองทั้งคู่ หรืออีกนัยหนึ่งเวลาระหว่างการเข้ามาของลูกค้า และเวลาที่ใช้ในการให้บริการลูกค้าแต่ละรายมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียลนั่นเอง

**2.6.2.2 M/G/1** คือระบบแถวคอยเหมือน M/M/1 ทุกประการ ต่างกันเพียงแค่ในระบบนี้ เวลาที่ใช้ในการให้บริการจะมีการแจกแจงแบบใดก็ได้ ทั้งนี้ ระบบแถวคอยที่การเข้ามาและออกไปจากระบบไม่เป็นไปตามการแจกแจงแบบปัวซองนั้นจะค่อนข้างซับซ้อนมากกว่า ซึ่งถ้าหากมีการแจกแจงแบบปัวซองก็จะกลายเป็น M/M/1 ทันที [55]

### 2.6.3 การพยากรณ์แบบอนุกรมเวลา (Time Series forecasting)

การพยากรณ์แบบอนุกรมเวลาคือการใช้แบบจำลองในการพยากรณ์ค่าในอนาคตโดยอ้างอิงจากค่าที่ได้ในเวลาก่อนหน้า ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้นั้นก็มีหลากหลาย อาทิเช่น วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average), วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) และวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins) เป็นต้น โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression analysis) เท่านั้น ซึ่งรูปทั่วไปของแบบจำลองของวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นนั้นเป็นไปดังสมการที่ (2.17)

$$y = \alpha + \beta x \quad (2.17)$$

โดยที่  $y$  แทนตัวแปรตาม (dependent variable),  $\alpha$  แทนจุดตัดแกน (intercept) ของแกน Y,  $\beta$  แทนความชัน (slope) และ  $x$  แทนตัวแปรต้น (explanatory variable) ซึ่ง  $\alpha$  และ  $\beta$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.18)-(2.19)

$$\beta = \frac{\sum x_i y_i - (n \cdot \bar{x} \cdot \bar{y})}{\sum (x_i^2) - (n \cdot \bar{x}^2)} \quad (2.18)$$

$$\alpha = \bar{y} - \beta \bar{x} \quad (2.19)$$

โดยที่  $n$  แทนจำนวนตัวอย่าง,  $y_i$  และ  $x_i$  แทนค่าจริงของ  $y$  ตัวอย่างที่  $i$  และค่าจริงของ  $x$  ตัวอย่างที่  $i$  ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน  $\bar{y}$  และ  $\bar{x}$  จึงแทนค่าเฉลี่ยของ  $y$  และ  $x$  ตามลำดับ

สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.20)

$$s_{yx} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{(n-2)}} \quad (2.20)$$

โดยที่  $\hat{y}$  แทนค่าประมาณของ  $y$  [59]

## 2.7 การกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

ในกรณีที่ต้องการจะหลีกเลี่ยงจากภาวะผูกขาด ผู้ควบคุมนิยมนำการกำกับอัตราค่าบริการแบบกำหนดเพดานราคาเข้ามาใช้ในกรณีตลาดมีสถานะแบบผูกขาดโดยธรรมชาติ ทั้งนี้ ระบบเพดานราคาได้ถูกใช้ในกิจการโทรคมนาคมมาเป็นเวลานานแล้ว โดยทั่วไปแล้ว ระบบเพดานราคาจะยอมให้ผู้ให้บริการขึ้นราคาค่าบริการได้ตามร้อยละการเปลี่ยนของอัตราเงินเฟ้อ (inflation index) ลบด้วยอัตราผลิตภาพ (productivity factor) ของอัตราค่าบริการในปีก่อนหน้า หน่วยงานกำกับส่วนใหญ่จะประมาณค่าอัตราผลิตภาพอยู่ที่ประมาณร้อยละ 3.5-4.5 ในขณะที่ค่าของอัตราเงินเฟ้อนั้นจะเปลี่ยนแปลงทุกปีและแตกต่างกันไปตามแต่ละประเทศ [60][61]

## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีที่นำเสนอ

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอแนวคิดและระเบียบแบบแผนที่นำเสนอเพื่อแก้ไขปัญหาที่ได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 1 โดยจะกล่าวถึงตัวแปรและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องก่อนที่จะลงไปในรายละเอียดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา รวมไปถึงรายละเอียดเฉพาะสำหรับกรณีที่ไม่มีแผนการป้องกัน, กรณีแผนการป้องกันแบบ C และกรณีที่มีการพิจารณาการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

#### 3.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์

ในส่วนนี้ จะอธิบายเกี่ยวกับตัวแปรและพารามิเตอร์ที่มีการใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ก็คือ ส่วนของตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) และส่วนของพารามิเตอร์ที่ถูกนำเข้ามาเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆ และแก้ไขปัญหาที่กล่าวถึงไว้ในบทที่ 1

##### 3.1.1 ตัวแปรตัดสินใจ

สำหรับในส่วนของตัวแปรตัดสินใจ มีดังต่อไปนี้

- $Q(t)$  : ระดับ QoS ที่ผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอให้บริการ ณ เวลา  $t$
- $O_j(t)$  : จำนวน OLTs ที่จำเป็นต้องมีในระบบเมื่อผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอให้บริการที่ระดับ QoS  $j$  ณ เวลา  $t$
- $p_j(t)$  : อัตราค่าบริการสูงสุดที่ผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอสามารถเรียกเก็บได้เมื่อให้บริการที่ระดับ QoS ที่  $j$  ณ เวลา  $t$
- $x_j(t)$  : จำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ สำหรับบริการที่ระดับ QoS ที่  $j$  ณ เวลา  $t$

ส่วนในการที่จะพิจารณา คำนวณ หรือนำตัวแปรตัดสินใจเหล่านี้ไปใช้อย่างไรจะกล่าวถึงในส่วนถัดไป

### 3.1.2 พารามิเตอร์

ในส่วนของพารามิเตอร์ที่ถูกนำเข้ามาเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆ และแก้ไขปัญหาที่กล่าวถึงไว้ในบทที่ 1 นั้น มีดังต่อไปนี้

- $S(t)$ : จำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยที่มีความต้องการจะรับบริการ FTTH ณ เวลา  $t$
- $p, q$ : ค่าสัมประสิทธิ์ของการรับนวัตกรรม (coefficient of innovation) และค่าสัมประสิทธิ์ของการเลียนแบบ (coefficient of imitation) ตามลำดับ
- $\mu_j, \sigma_j$ : พารามิเตอร์แสดงตำแหน่งและพารามิเตอร์แสดงรูปร่างของความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการสำหรับบริการระดับ QoS $_j$  ตามลำดับ
- $p(t), p'(t)$ : อัตราค่าบริการ ณ เวลา  $t$  ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ และผู้ให้บริการคู่แข่ง ตามลำดับ
- $Q'(t)$ : ระดับ QoS ที่ผู้ให้บริการคู่แข่งเสนอ ณ เวลา  $t$
- $O(t), O'(t)$ : จำนวน OLTs ณ เวลา  $t$  ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ และผู้ให้บริการคู่แข่ง ตามลำดับ
- $x(t), x'(t)$ : จำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ย ณ เวลา  $t$  ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ และผู้ให้บริการคู่แข่ง ตามลำดับ
- $z_j(t)$ : จำนวนผู้ใช้บริการรายใหม่เฉลี่ย ณ เวลา  $t$  ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอเมื่อให้บริการที่ระดับ QoS $_j$
- $z(t), z'(t)$ : จำนวนผู้ใช้บริการรายใหม่เฉลี่ย ณ เวลา  $t$  ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ และผู้ให้บริการคู่แข่ง ตามลำดับ
- $R(t)$ : จำนวนผู้ใช้บริการที่มีความต้องการจะรับบริการแต่ตัดสินใจไม่รับบริการ ณ เวลา  $t$  ของผู้ให้บริการทั้งสองราย
- $b(t)$ : ค่าเฉลี่ยของกราฟฟิกของผู้ใช้บริการ ณ เวลา  $t$
- $\bar{L}$ : ค่าเฉลี่ยของความยาวของกลุ่มข้อมูลหรือแพกเกต (packet length) มีหน่วยเป็น Mb
- $\sigma_L^2$ : ความแปรปรวนของความยาวของกลุ่มข้อมูลหรือแพกเกต (packet length) มีหน่วยเป็น (Mb)<sup>2</sup>
- $q_j$ : เวลาประวิงสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในกรณีที่รับรองว่าจะให้บริการที่ระดับ QoS ที่ระดับที่  $j$

- $r$  : อัตราส่วนการแยก (splitting ratio) ของตัวแยกสัญญาณของระบบของผู้ให้บริการซึ่งเป็นค่าคงที่
- $C_p(t)$  : ค่าปรับในกรณีที่ลูกค้าองค์กรธุรกิจไม่สามารถใช้งานได้ ณ เวลา  $t$  เฉลี่ยต่อราย
- $c_p$  : ค่าปรับต่อชั่วโมงต่อรายที่ผู้ให้บริการจะต้องเสียให้ลูกค้าองค์กรธุรกิจถ้าหากว่าผู้ให้บริการไม่สามารถให้บริการได้
- $MA_{all}(t), MA'_{all}(t)$  : ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาทั้งหมดของระบบ ณ เวลา  $t$  ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ และผู้ให้บริการคู่แข่ง ตามลำดับ
- $MA_{ONU}(t), MA_{OLT}(t), MA_F(t)$  : ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ONU ณ เวลา  $t$ , ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา OLT ณ เวลา  $t$ , และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเส้นใยนำแสง ณ เวลา  $t$  ตามลำดับ ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ
- $MA'_{ONU}(t), MA'_{OLT}(t), MA'_F(t)$  : ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ONU ณ เวลา  $t$ , ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา OLT ณ เวลา  $t$ , และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเส้นใยนำแสง ณ เวลา  $t$  ตามลำดับ ของผู้ให้บริการคู่แข่ง
- $A_{ONU}(t), A_{OLT}(t), A_F(t), A_E(t)$  : ราคาอุปกรณ์ของ OLT ที่เวลา  $t$ , ราคาของอุปกรณ์ ONU ที่เวลา  $t$ , ราคาของเส้นใยนำแสงต่อกิโลเมตร ณ เวลา  $t$  และค่าใช้จ่ายต่อแรงงานหนึ่งคนต่อชั่วโมง ณ เวลา  $t$  ตามลำดับ มีหน่วยเป็นดอลลาร์สหรัฐ
- $F, D, d$  : ความยาวเส้นใยนำแสงส่วน feeder, ส่วน distribution และส่วนสาย drop รวมถึงสายภายในบ้าน ตามลำดับ มีหน่วยเป็นกิโลเมตร
- $R_{class_{OLT}}, R_{class_{ONU}}, R_{class_F}$  : ร้อยละของค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา (maintenance cost percentage) ซึ่งอยู่ในรูปรายปี ของ OLT, ONU และเส้นใยนำแสงต่อกิโลเมตร ตามลำดับ ไม่มีหน่วย
- $MTTR_{OLT}, MTTR_{ONU}, MTTR_F$  : เวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม (mean time to repair) ของ OLT, ONU และเส้นใยนำแสงต่อกิโลเมตร ตามลำดับ มีหน่วยเป็นชั่วโมง
- $\lambda_{OLT}, \lambda_{ONU}, \lambda_F$  : อัตราความล้มเหลว (failure rate) ของ OLT, ONU ต่อเดือน และของเส้นใยนำแสงต่อกิโลเมตรต่อเดือน ตามลำดับ
- $P_c(t)$  : เพดานราคาของตลาด FTTH ณ เวลา  $t$

- $P(t), P'(t)$ : ผลกำไรของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  และผลกำไรของผู้ให้บริการคู่แข่ง ณ เวลา  $t$  ตามลำดับ
- $P_j(t)$ : ผลกำไรของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ เมื่อให้บริการที่ระดับ QoS  $j$  ณ เวลา  $t$
- $\Omega$ : ทรัพยากรระบบ PON ต่อ OLT 1 ชั้น ซึ่งอยู่ในหน่วย Mbps
- $\omega_{\max}$ : ความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการที่สูงที่สุด

สำหรับการคำนวณ  $S(t), x(t), x'(t), z_j(t), z(t), z'(t), R(t), O(t), p(t), C_p(t), MA_{all}(t), MA_{OLT}(t), MA_{ONU}(t)$  และ  $MA_F(t)$  นั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (3.1)-(3.14) ตามลำดับ ส่วน  $P_j(t)$  นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.15)-(3.17) สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคล, กรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ กรณีไม่มีแผนการป้องกัน และกรณีมีแผนการป้องกันแบบ C ตามลำดับ สำหรับ  $P(t)$  นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.18)

สำหรับการคำนวณค่า  $S(t)$  ซึ่งอ้างอิงจากแบบจำลองของ Bass [23][37] นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) ดังต่อไปนี้

$$S(t) = I \cdot \frac{(1 - e^{-(p+q)t})}{\left(1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t}\right)} \quad (3.1)$$

ส่วนการหา  $x(t)$  ซึ่งมีค่าเท่ากับจำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ สำหรับบริการที่ระดับ QoS ที่เหมาะสม ณ เวลา  $t$  นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2) คือ

$$x(t) = x_{Q(t)}(t) \quad (3.2)$$

ส่วนจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการคู่แข่งโดยประมาณ ณ เวลา  $t$  มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่าง  $S(t)$  ซึ่งแทนจำนวนผู้ใช้บริการที่ต้องการจะรับบริการ FTTH ณ เวลา  $t$  ทั้งหมดกับความน่าจะเป็นที่ความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการสำหรับบริการที่ระดับ QoS ที่ผู้ให้บริการคู่แข่งนำเสนอจะเพียงพอที่จะจ่ายในอัตราค่าบริการที่ผู้ให้บริการคู่แข่งเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับในกรณีที่ในเวลาก่อนหน้าผู้ใช้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอได้เสนอบริการที่ระดับ QoS ที่ดีกว่าผู้



ให้บริการคู่แข่งในอัตราค่าบริการที่ต่ำกว่า จะต้องมีการคูณระดับ QoS ที่ผู้ให้บริการคู่แข่งเสนอหารออกด้วยระดับ QoS ที่ผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลาก่อนหน้าออกด้วย เนื่องจากว่า อาจจะมีผู้ให้บริการที่มองเห็นว่าบริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ นั้นดีกว่าและตัดสินใจเลือกรับบริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอได้ โดยสมมติให้เป็นไปในสัดส่วนดังกล่าวนั่นเอง ดังแสดงในสมการที่ (3.3)

$$x'(t) = \begin{cases} S(t) \cdot \left( 1 - \Phi \left[ \frac{\ln p'(t) - \mu_{Q'}}{\sigma_{Q'}} \right] \right); (t=1) \vee (Q(t-1) \leq Q') \vee (p'(t) \leq p(t-1)) \\ S(t) \cdot \left[ \left( 1 - \Phi \left[ \frac{\ln p'(t) - \mu_{Q'}}{\sigma_{Q'}} \right] \right) \cdot \left( \frac{Q'}{Q(t-1)} \right) \right]; otherwise \end{cases} \quad (3.3)$$

ส่วนจำนวนผู้ใช้บริการรายใหม่เฉลี่ย ณ เวลา  $t$  ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ เมื่อให้บริการที่ระดับ QoS  $j$  นั้นจะเท่ากับจำนวนผู้ใช้บริการที่รับบริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  เมื่อผู้ให้บริการให้บริการที่ระดับ QoS  $j$  คูณกับจำนวนผู้ใช้บริการที่ต้องการจะรับบริการที่เพิ่มขึ้นจากเวลาก่อนหน้าหารออกด้วยจำนวนผู้ใช้บริการที่ต้องการจะรับบริการ ณ เวลา  $t$  ซึ่งแทนสัดส่วนของจำนวนผู้ใช้บริการรายใหม่นั้นเอง ดังแสดงในสมการที่ (3.4) และถ้าหากว่าต้องการหาจำนวนผู้ใช้บริการรายใหม่เฉลี่ย ณ เวลา  $t$  ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอก็จะได้ว่าเท่ากับจำนวนผู้ใช้บริการรายใหม่เฉลี่ย ณ เวลา  $t$  ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอเมื่อให้บริการที่ระดับ QoS ที่เหมาะสมดังแสดงในสมการที่ (3.5) และในการหาจำนวนผู้ใช้บริการรายใหม่เฉลี่ย ณ เวลา  $t$  ของผู้ให้บริการคู่แข่งก็สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่ (3.6)

$$z_j(t) = \left( \frac{S(t) - S(t-1)}{S(t)} \right) x_j(t) \quad (3.4)$$

$$z(t) = z_{Q(t)}(t) \quad (3.5)$$

$$z'(t) = \left( \frac{S(t) - S(t-1)}{S(t)} \right) x'(t) \quad (3.6)$$

สำหรับ  $R(t)$  จะมีค่าเท่ากับจำนวนผู้ใช้บริการที่มีความต้องการจะรับบริการ FTTH ณ เวลา  $t$  ลบออกด้วยจำนวนผู้ใช้บริการที่ตัดสินใจเลือกรับบริการกับผู้ให้บริการทั้งสองราย ดังแสดงในสมการที่ (3.7)

$$R(t) = S(t) - x(t) - x'(t) \quad (3.7)$$

ส่วน  $O(t)$  จะมีค่าเท่ากับจำนวน OLTs ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ เมื่อให้บริการที่ระดับ QoS ที่เหมาะสม ณ เวลา  $t$  นั้นเอง ดังแสดงในสมการที่ (3.8) ในทำนองเดียวกันกับการหา  $p(t)$  ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ เมื่อให้บริการที่ระดับ QoS ที่เหมาะสม ณ เวลา  $t$  จะเป็นไปดังแสดงในสมการที่ (3.9)

$$O(t) = O_{Q(t)}(t) \quad (3.8)$$

$$p(t) = p_{Q(t)}(t) \quad (3.9)$$

สำหรับการคำนวณหาค่าปรับในกรณีที่ลูกค้าองค์กรธุรกิจไม่สามารถใช้งานได้ ณ เวลา  $t$  เฉลี่ยต่อรายนั้นสามารถคำนวณได้จากการนำ  $c_p$  ไปคูณกับระยะเวลาที่ลูกค้าองค์กรธุรกิจทุกรายไม่สามารถใช้งานได้ทั้งหมด ณ เวลา  $t$  ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวดังกล่าวนั้นเท่ากับระยะเวลาที่อุปกรณ์แต่ละตัวเกิดความล้มเหลวและไม่สามารถใช้งานได้คูณกับจำนวนอุปกรณ์นั้นๆ ดังแสดงในสมการที่ (3.10)

$$C_p(t) = 6 \cdot c_p \cdot (MTTR_{OLT} \lambda_{OLT} + MTTR_{ONU} \lambda_{ONU} + MTTR_F \lambda_F (F + D + d)) \quad (3.10)$$

$$MA_{all}(t) = MA_{ONU}(t) + MA_{OLT}(t) + MA_F(t) \quad (3.11)$$

ในส่วนของค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาทั้งหมดของระบบ ณ เวลา  $t$  จะมีค่าเท่ากับผลรวมของ  $MA_{OLT}(t)$ ,  $MA_{ONU}(t)$  และ  $MA_F(t)$  ดังแสดงในสมการที่ (3.11) ซึ่ง  $MA_{OLT}(t)$ ,  $MA_{ONU}(t)$  และ  $MA_F(t)$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.12)-(3.14) ซึ่งอ้างอิงมาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาแบบรายปีของ [62] โดยในที่นี้ค่าใช้จ่ายใน

การบำรุงรักษาของแต่ละอุปกรณ์ในแต่ละหน่วยเวลานั้นมีหน่วยเป็นรายเดือน ดังนั้น ค่า  $R_{class_x}$  จึงถูกหารด้วย 12

$$MA_{OLT}(t) = 6 \cdot \frac{O(t) + O(t-1)}{2} \left( \frac{A_{OLT}(t)R_{class_{OLT}}}{12} + A_E(t)MTTR_{OLT}\lambda_{OLT} \right) \quad (3.12)$$

$$MA_{ONU}(t) = 6 \cdot \frac{x(t) + x(t-1)}{2} \cdot \left( \frac{A_{ONU}(t)R_{class_{ONU}}}{12} + A_E(t)MTTR_{ONU}\lambda_{ONU} \right) \quad (3.13)$$

$$MA_F(t) = 6 \cdot \left( (F + rD) \frac{O(t) + O(t-1)}{2} + (d \cdot x(t)) \right) \cdot \left( \frac{A_F(t)R_{class_F}}{12} + A_E(t)MTTR_F\lambda_F \right) \quad (3.14)$$

ทั้งนี้ สำหรับการคำนวณ  $MA'_{all}(t), MA'_{OLT}(t), MA'_{ONU}(t)$  และ  $MA'_F(t)$  จะสามารถคำนวณได้โดยอ้างอิงจากสมการที่ (3.12)-(3.14) เนื่องจากจะมีการคำนวณที่คล้ายคลึงกันต่างกัน เพียงแค่จะมีการเปลี่ยนพารามิเตอร์จากของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอเป็นผู้ให้บริการคู่แข่งแทนเท่านั้น เช่น เปลี่ยนจาก  $x(t)$  เป็น  $x'(t)$  เป็นต้น

ในส่วนของ  $P_j(t)$  นั้นจะมีพจน์แรกซึ่งก็คือส่วนของรายได้ที่เท่ากับอัตราค่าบริการคูณด้วยจำนวนผู้ใช้บริการ ณ เวลา  $t$  สำหรับบริการที่ระดับ QoS  $j$  เหมือนกันในทุกกรณี สำหรับในส่วนของต้นทุนนั้นจะแตกต่างกันไปตามแต่ละกรณี โดยในกรณีลูกค้าส่วนบุคคลจะมีแค่ส่วนของค่าใช้จ่ายในการจัดหาอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาระบบ ณ เวลานั้นเท่านั้น ต่างกับในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจแบบที่ระบบไม่มีแผนการป้องกันที่จะมีค่าปรับเพิ่มขึ้นมาด้วย ส่วนกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจแบบที่ระบบมีแผนการป้องกันแบบ C นั้นจะไม่มีค่าปรับเกิดขึ้น แต่มีค่าใช้จ่ายในการจัดหาอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาระบบเป็นสองเท่า สืบเนื่องจากว่าในกรณีที่ระบบมีแผนการป้องกันแบบ C นั้นจะมีระบบ FTTH อีกระบบถูกติดตั้งเป็นระบบสำรองคู่ขนานกันไป

ดังนั้น จะได้ว่า  $P_j(t)$  ในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล เป็นไปดังแสดงในสมการที่ (3.15)

$$P_j(t) = 6 \cdot x_j(t)p_j(t) - \left[ \begin{array}{l} A_{OLT}(t)(O_j(t) - O(t-1)) + \\ z_j(t)(A_{ONU}(t) + dA_F(t)) + MA_{all}(t) \end{array} \right] \quad (3.15)$$

ส่วนในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจแบบที่ระบบไม่มีแผนการป้องกัน เป็นไปดังแสดงในสมการที่ (3.16)

$$P_j(t) = 6 \cdot x_j(t) p_j(t) - C_p(t) - \left[ A_{OLT}(t)(O_j(t) - O(t-1)) + z_j(t)(A_{ONU}(t) + dA_F(t)) + MA_{all}(t) \right] \quad (3.16)$$

และในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจแบบที่ระบบมีแผนการป้องกันแบบ C เป็นไปดังแสดงในสมการที่ (3.17)

$$P_j(t) = 6 \cdot x_j(t) p_j(t) - 2 \left[ A_{OLT}(t)(O_j(t) - O(t-1)) + z_j(t)(A_{ONU}(t) + dA_F(t)) + MA_{all}(t) \right] \quad (3.17)$$

ในส่วนของ  $P(t)$  นั้นก็คือจะเท่ากับผลกำไรของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอเมื่อให้บริการที่ระดับ QoS ที่เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ (3.18)

$$P(t) = P_{QoS}(t) \quad (3.18)$$

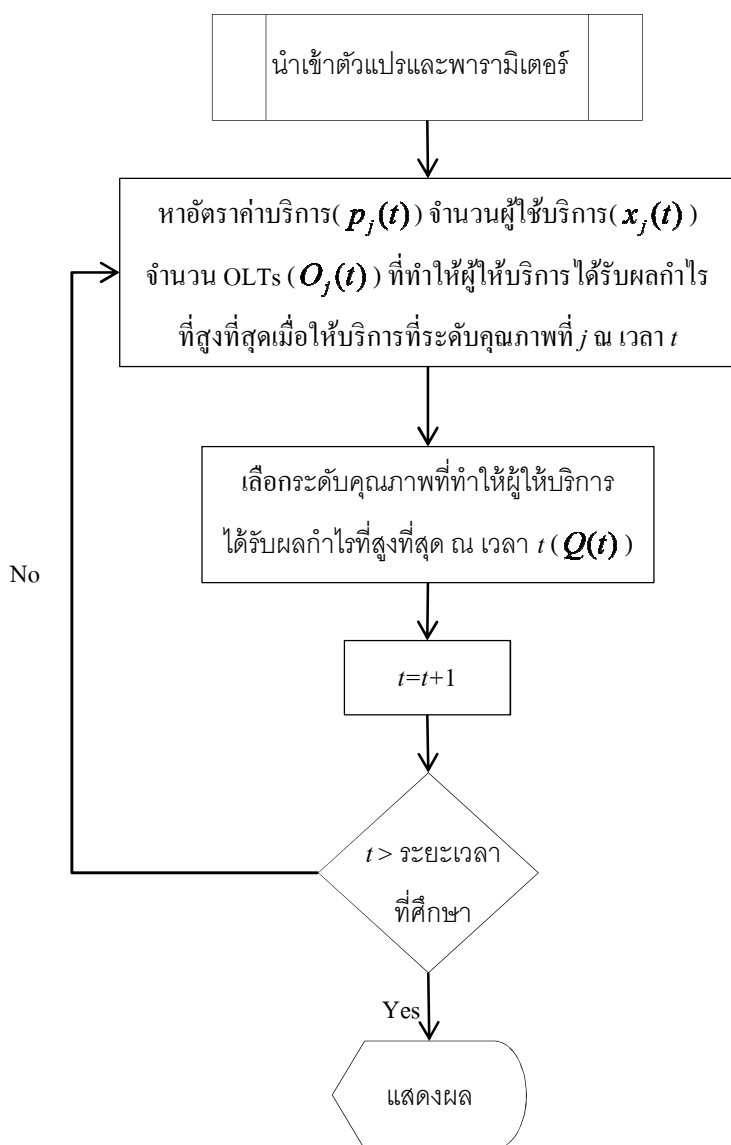
และเช่นเดียวกันกับกรณีของการคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบก็คือ สามารถคำนวณ  $P'(t)$  ได้โดยอ้างอิงจากสมการที่ (3.15)-(3.17) โดยที่มีการเปลี่ยนพารามิเตอร์จากของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอเป็นของผู้ให้บริการคู่แข่งแทนและไม่ขึ้นกับ  $j$  เท่านั้น

นอกเหนือไปจากนี้ ส่วนเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่าโดยการป้อนข้อมูลเข้าไปทั้งสิ้น ทั้งนี้สมมติว่าทราบค่าตัวแปรตัดสินใจและพารามิเตอร์ทุกตัวที่เวลาก่อนหน้า

### 3.2 แบบแผนที่น่าสนใจ

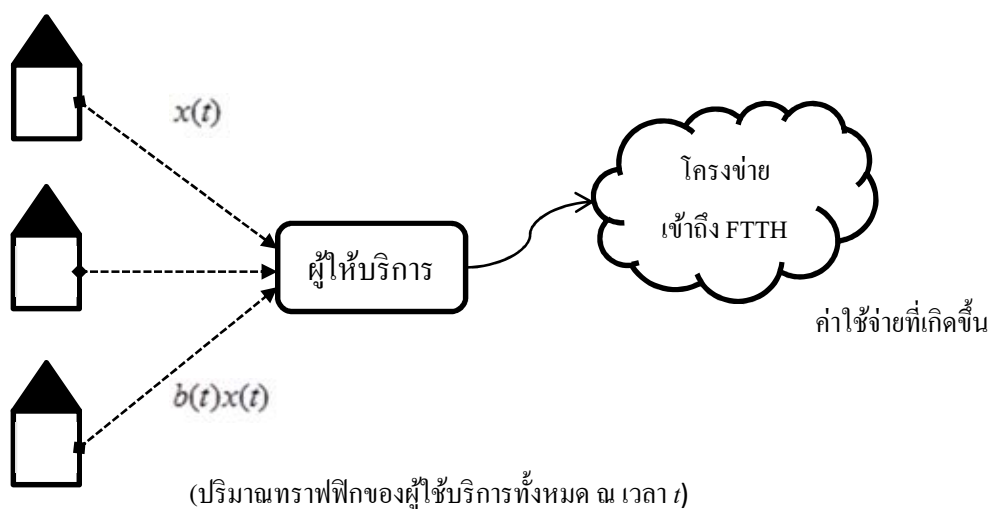
งานวิจัยนี้พิจารณาตลาดโครงข่ายเข้าถึง FTTH ที่มีผู้ให้บริการ 2 ราย ณ เวลา  $t$  โดยที่  $t = \{0, \dots, T\}$  ซึ่งแต่ละหน่วยเวลา  $t$  เท่ากับ 6 เดือน โดยที่ 0 เป็นเวลาเริ่มต้นก่อนการศึกษา ทั้งนี้ ผู้ให้บริการทั้งสองรายสามารถที่จะเลือกให้บริการที่ระดับ QoS  $j$  เพียงระดับเดียว โดยที่  $j = \{1, \dots, J\}$

กำหนดให้ระดับแรกเป็นระดับที่มีคุณภาพแย่ที่สุด และระดับสุดท้ายมีคุณภาพดีที่สุด และในตลาดมีผู้ใช้บริการ  $I$  ราย และแต่ละ  $i$  โดยที่  $i = \{1, \dots, I\}$  สามารถเลือกรับบริการจากผู้ให้บริการเพียงรายใดรายหนึ่งเท่านั้น ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่างานวิจัยนี้ต้องการที่จะหากลยุทธ์ที่เหมาะสม (ได้แก่ อัตราค่าบริการ จำนวนผู้ใช้บริการ ระดับคุณภาพ และจำนวน OLTs) ที่ทำให้ได้รับกำไรที่สูงที่สุดในทุกๆ ช่วง 6 เดือน ในการที่จะแก้ไขปัญหาที่ได้กล่าวไปในตอนต้น ผู้วิจัยจึงได้มีการนำเสนอแบบแผนสำหรับแก้ปัญหาดังกล่าวดังที่อธิบายในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดง โครงข่ายงานที่นำเสนอ

ทั้งนี้ การศึกษาและการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับผลกำไรของผู้ให้บริการเป็นหลัก ซึ่งในการพิจารณานั้นเป็นไปตามที่แสดงรูปที่ 3.2 กล่าวคือ ผู้ให้บริการเสนออัตราค่าบริการและระดับคุณภาพ  $Q(t)$  แก่ผู้ใช้บริการที่ตัดสินใจจะรับบริการ และผู้ให้บริการก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการลงทุนในโครงข่ายเข้าถึง FTTH ในการที่จะให้บริการ FTTH แก่ผู้ใช้บริการเหล่านั้น



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงความสัมพันธ์ของผู้ให้บริการที่เชื่อมระหว่างโครงข่ายเข้าถึงและผู้ให้บริการ FTTH

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาถึงผลกำไรในสมการที่ (3.15)-(3.17) พบว่า เมื่อผู้ให้บริการให้บริการที่ระดับ QoS ต่างๆกันก็จะมีผลกำไรที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งจากสมการดังกล่าวพบว่ามีตัวแปรตัดสินใจทั้งหมดสามตัวด้วยกันคือ  $p_j(t)$ ,  $x_j(t)$  และ  $O_j(t)$  ดังนั้น จึงต้องมีการพิจารณาหาตัวแปรตัดสินใจทั้งสามที่ทำให้ได้รับ  $P_j(t)$  สูงที่สุด

ดังนั้น จะได้ว่าแบบจำลองในการหาทางเลือกที่ดีที่สุด (optimization model) ที่ได้เสนอมานี้ขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จะเป็นไปในลักษณะดังต่อไปนี้

$$\max P_j(t) \quad (3.19)$$

subject to

$$x_j(t) = (S(t) - x'(t)) \cdot \left( 1 - \Phi \left[ \frac{\ln p_j(t) - \mu_j}{\sigma_j} \right] \right) \quad (3.20)$$

$$O_j(t) \geq \frac{(b(t) \cdot x_j(t)) + \sqrt{(b(t) \cdot x_j(t))^2 + 2(b(t) \cdot x_j(t)) \left( \frac{\sigma_L^2 + \bar{L}}{q_j} \right)}}{2\Omega} \quad (3.21)$$

$$O_j(t) \geq \frac{x_j(t)}{r} \quad (3.22)$$

$$O_j(t) \geq O(t-1) \quad (3.23)$$

$$0 \leq p_j(t) \leq \omega_{\max}, \text{int} \quad (3.24)$$

$$p_j(t) \leq P_c(t) \quad (3.25)$$

ในส่วนขอข้อจำกัด (3.20)-(3.25) นั้นต่างถูกกำหนดขึ้นเพื่อทำหน้าที่ต่างๆกัน โดยในข้อจำกัด (3.20) แสดงว่าจำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ สำหรับบริการที่ระดับ QoS ที่  $j$  ณ เวลา  $t$  จะต้องเท่ากับผลต่างระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการที่มีความต้องการจะรับบริการ FTTH ณ เวลา  $t$  กับจำนวนผู้ใช้บริการที่ตัดสินใจรับบริการของผู้ให้บริการคู่แข่ง ณ เวลา  $t$  ไปแล้วคุณกับความน่าจะเป็นที่อัตราค่าบริการที่ผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ สำหรับบริการที่ระดับ QoS ที่  $j$  จะไม่เกินความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการสำหรับบริการที่ระดับ QoS  $j$  ในขณะที่ข้อจำกัด (3.21) แสดงว่าจำนวน OLT จะต้องเป็นไปตามข้อจำกัดของเวลาประวิงซึ่งอ้างอิงมาจาก [42] ซึ่งแสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ค ส่วนข้อจำกัดที่ (3.22) ระบุว่าจำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยที่ระดับคุณภาพที่  $j$  เฉลี่ยต่อ OLT ที่ใช้ในกรณีที่เลือกให้บริการที่ระดับคุณภาพที่  $j$  จะต้องไม่เกินอัตราส่วนการแยกของระบบ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือต้องไม่ขัดกับข้อจำกัดของอัตราส่วนการแยกของระบบนั่นเอง ในขณะที่ข้อจำกัด (3.23) ระบุว่าจำนวน OLT ที่ใช้ในกรณีที่เลือกให้บริการที่ระดับคุณภาพที่  $j$  จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับจำนวน OLT ที่ใช้ในระบบที่หน่วยเวลาก่อนหน้า ส่วนข้อจำกัดที่ (3.24) แสดงว่าอัตราค่าบริการที่เหมาะสมสำหรับบริการที่ระดับ QoS  $j$  ณ

เวลา  $t$  จะต้องไม่ต่ำกว่าศูนย์ และไม่เกินความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการที่สูงที่สุด ส่วนข้อจำกัดสุดท้าย (3.29) กล่าวว่าอัตราค่าบริการที่เหมาะสม ณ เวลา  $t$  จะต้องไม่เกินเพดานราคา ณ เวลานั้น ซึ่งข้อจำกัดนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีการพิจารณาการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคาเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม สังเกตได้ว่าในแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้นจะไม่มี  $Q(t)$  อยู่เลย ทั้งนี้ เมื่อได้  $P_j(t)$  ของทุกระดับ QoS ออกมาแล้ว เราก็สามารถที่จะหาระดับ QoS ที่เหมาะสมที่สุด  $Q(t)$  ที่ผู้ให้บริการควรจะให้บริการเพื่อที่จะได้รับผลกำไรที่สูงที่สุด โดยการกำหนดสมการต่อไปนี้

$$Q(t) = \arg \max_j P_j(t) \quad (3.26)$$

ดังนั้น เมื่อได้ผลเฉลยออกมาแล้ว และ  $Q(t)$  แล้ว จะสามารถหาค่าอื่นๆที่เกี่ยวข้องโดยอ้างอิงจากหัวข้อที่ 3.1 นั้นเอง



## บทที่ 4

### ผลการทดสอบเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการนำแบบแผนที่นำเสนอในบทที่ 3 มาใช้ทดลองแก้ปัญหาที่ได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 1 โดยในบทนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน โดยส่วนแรกจะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับสมมติฐานและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองทางคณิตศาสตร์ ตั้งแต่ระบบของ FTTH ที่ใช้อ้างอิงในการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ ไปจนถึงรายละเอียดเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ถัดมาในส่วนที่สองและสามนั้นจะเป็นผลการทดลองทางคณิตศาสตร์และผลการวิเคราะห์ของการทดลองในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล และลูกค้าองค์กรธุรกิจตามลำดับ โดยที่จะแบ่งแยกย่อยลงไปในการกรณีต่างๆ อาทิเช่น กรณีที่อัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ และไม่คงที่ กรณีที่ไม่มีและมีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา เป็นต้น

ในส่วนของการแปลงแบบแผนที่นำเสนอให้อยู่ในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในที่นี้ได้เลือกใช้ภาษาไพธอน (python) โดยที่ผู้วิจัยได้สร้างชุดคำสั่งเฉพาะโดยอ้างอิงจากวิธี brute force สำหรับการหาผลเฉลยของแบบจำลองในการหาทางเลือกที่ดีที่สุด ส่วนการคำนวณสูตรทางคณิตศาสตร์ และแสดงผลเชิงกราฟนั้นผู้วิจัยได้เลือกใช้ชุดคำสั่ง Scipy [63] และ Matplotlib [64] ตามลำดับ

#### 4.1 สมมติฐาน (assumptions) และ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองทางคณิตศาสตร์

การทดลองทางคณิตศาสตร์ในวิทยานิพนธ์นี้ได้อ้างอิงระบบโครงข่ายเข้าถึง FTTH ตามมาตรฐาน 987.1 ซึ่งก็คือ XG-PON ทั้งนี้ เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้สนใจศึกษาเพียงแคในพื้นที่เขตเมืองหนาแน่น (dense urban) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของประชากรสูง ดังนั้น ระบบ XG-

PON ที่อ้างอิงในวิทยานิพนธ์นี้จึงมีลักษณะการแยกสายส่งสัญญาณแบบรวมศูนย์กลางโดยมีสมมติฐานและเงื่อนไขเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้

- กำหนดให้ความยาวของ feeder fiber และความยาวของ distribution fiber อยู่ที่ 4.7 และ 0.9 กิโลเมตร ตามลำดับ ซึ่งความยาวดังกล่าวอ้างอิงมาจาก [40] ในขณะที่ส่วน drop นั้นจะมีค่าแตกต่างกันสำหรับผู้ให้บริการแต่ละคน โดยในที่นี้สมมติให้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 200 เมตร [20]
- กำหนดให้พื้นที่ที่ศึกษามีจำนวนลูกค้าส่วนบุคคลเท่ากับ 14,746 ราย [20] และมีจำนวนลูกค้าองค์กรธุรกิจทั้งหมด 1,638 ราย [20][40]
- ในการคำนวณหา  $\bar{L}$  และ  $\sigma_L^2$  ในงานวิจัยนี้ได้คำนวณจากสมการที่ (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ โดยอ้างอิงข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของแพคเกจจากงานวิจัย [41]
- กำหนดให้อัตรากราฟฟิกของผู้ให้บริการ  $i$  ณ เวลาเริ่มต้น เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป โดยมีค่าตั้งแต่ 1 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) ถึง 200 Mbps หลังจากนั้นอัตรากราฟฟิกของผู้ให้บริการจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 6 ต่อปี [19]
- กำหนดให้ราคาของอุปกรณ์ OLT, ONU และเส้นใยนำแสงนั้นลดลงร้อยละ 7 ต่อปี ในขณะที่ค่าแรงนั้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 ต่อปี [12]
- ในกรณีที่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา กำหนดให้เริ่มมีเพดานราคาเกิดขึ้นในปีที่ 2 ของการศึกษา ทั้งนี้ อัตราค่าบริการของกลุ่มจะมีค่าเท่ากับจำนวนเต็มที่สุดที่น้อยกว่าหรือเท่ากับเพดานราคาในกรณีที่อัตราค่าบริการที่คู่แข่งเสนอ ณ เวลานั้นสูงกว่าเพดานราคา แต่ถ้าไม่แล้ว อัตราค่าบริการนั้นจะมีค่าเท่ากับอัตราค่าบริการที่คู่แข่งเสนอ ณ เวลานั้นในกรณีที่ไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา โดยการทดลองนี้ได้กำหนดให้อัตรารายได้เพื่อมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 1-3 โดยที่อัตราดังกล่าวเกิดขึ้นแบบสุ่มและมีการแจกแจงแบบเอกรูป
- กำหนดให้ผู้ให้บริการ A เป็นผู้ให้บริการที่ใช้ระเบียบวิธีที่วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ ในขณะที่ผู้ให้บริการ B เป็นผู้ให้บริการคู่แข่งที่ไม่รู้กลยุทธ์การพัฒนาและไม่มี การเปลี่ยนแปลงกลยุทธ์ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

- กำหนดให้ค่าเงินอยู่ในหน่วยดอลลาร์สหรัฐ โดยที่ 1 ยูโรเท่ากับ 1.3390 ดอลลาร์สหรัฐ และ 1 ปอนด์อังกฤษเท่ากับ 1.5529 ดอลลาร์สหรัฐ [65]

นอกจากนี้ ในการทดลองทางคณิตศาสตร์ในวิทยานิพนธ์นี้ด้วยการใช้ระเบียบวิธีที่นำเสนอในบทที่ 3 นั้น จะมีส่วนที่ทับซ้อนกันทั้งในส่วนของตัวแบบและพารามิเตอร์ที่ใช้ ทั้งนี้ เพื่อความสะดวกต่อการวิเคราะห์และเปรียบเทียบ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยทั่วไปที่ใช้ในการทดลองทางคณิตศาสตร์ของทุกกรณีให้เป็นไปตามที่แสดงในตารางที่ 4.1 อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาวิเคราะห์แยกย่อยลงไปในแต่ละกรณีอาจมีความจำเป็นที่จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติม ทั้งนี้ จะกล่าวถึงในหัวข้อปลีกย่อยของกรณีนั้นๆต่อไป

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ทั่วไปที่ใช้การทดลองคณิตศาสตร์

| ตัวแปร   | ค่าของตัวแปร                                   |
|--|--|
| $T$  | 119  |
| $J$  | 4  |
| $\Omega$                                       | 10,000 Mbps                                    |
| $r$  | 64   |
| $q_j$  | {0.006, 0.004, 0.002, 0.0005}                  |
| $MTTR_{OLT}, MTTR_{ONU}$ (ชม.)                 | 2,6  |
| $MTTR_F$ (ชม. ต่อกิโลเมตร)                     | 24 [12]  |
| $\lambda_{OLT}, \lambda_{ONU}$ (ครั้งต่อเดือน) | $1.8342 \times 10^{-4}, 1.8342 \times 10^{-4}$ |
| $\lambda_F$ (ครั้งต่อกิโลเมตรต่อเดือน)         | $4.104 \times 10^{-4}$ [12]                    |
| $A_{OLT}(0), A_{ONU}(0)$ (ดอลลาร์สหรัฐ/ชิ้น)   | 7600, 350                                      |
| $A_F(0)$ (ดอลลาร์สหรัฐ/กิโลเมตร)               | 160  |
| $A_E(0)$ (ดอลลาร์สหรัฐ/คน/ชม.)                 | 190 [12]                                       |
| $p, q$   | 0.01/2, 0.38/2 [11][25]                        |
| $x_p$ (ร้อยละ)                                 | 3.5  |
| $\bar{L}$ (Mb)                                 | 0.00499  |
| $\sigma_L^2$ (Mb <sup>2</sup> )                | $2.5562 \times 10^{-5}$                        |

## 4.2 กรณีลูกค้าส่วนบุคคล

ในกรณีลูกค้าส่วนบุคคลนี้จะศึกษาเพียงในกรณีที่โครงข่ายไม่มีแบบแผนการป้องกันใดๆ เท่านั้น เนื่องจากว่าในกรณีนี้ไม่มีค่าปรับที่ผู้ให้บริการต้องเสียให้กับผู้ใช้บริการในกรณีที่ผู้ใช้บริการไม่สามารถใช้งานได้เกิดขึ้น สำหรับในกรณีนี้ผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนใหญ่ คือ กรณีที่ไม่มีและมีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา อย่างไรก็ตาม ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นว่าในการทดลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแต่ละกรณีอาจจะจำเป็นต้องตั้งค่าพารามิเตอร์บางตัวเพิ่มเติม สำหรับในกรณีลูกค้าส่วนบุคคลนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดพารามิเตอร์เพิ่มเติมดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยที่พารามิเตอร์ของความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการนั้นกำหนดโดยอ้างอิงจากงานวิจัย [16] โดยใช้หลักการของการแจกแจงแบบล็อกปกติ [58] เข้าช่วย

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์เฉพาะสำหรับการทดลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคล

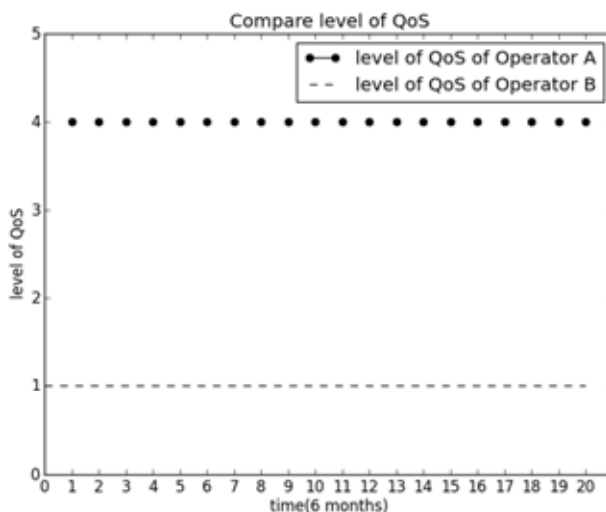
| ตัวแปร                      | ค่าของตัวแปร   |
|-----------------------------|--|
| Lognormal parameter<br>[17] | $\mu_j = 3.5173$ โดยที่ $j=1,2,3,4$ ,<br>และ $\sigma_j = 1.0602, 1.3053, 1.3635$ และ $1.4619$ เมื่อ $j=1,2,3,4$ ตามลำดับ<br>[16] |
| $H'$                        | $0.75 * I = 11,060$  |
| $O'$                        | $\lceil H'/r \rceil = 173$   |
| $\omega_{\max}$             | \$250  |

### 4.2.1 กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

ในกรณีนี้จะแบ่งออกพิจารณาแยกย่อยลงไปอีกสองกรณีคือ กรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ และกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่ ดังนี้

**4.2.1.1 กรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่** ในกรณีนี้จะกำหนดให้อัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งนั้นมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา โดยในที่นี้จะกำหนดให้เท่ากับ 39 ดอลลาร์สหรัฐ [31] ซึ่งใกล้เคียงกับอัตราค่าบริการของกูเกิลไฟเบอร์ (Google fiber) [66] ด้วย และอัตราค่าบริการสำหรับบริการอินเทอร์เน็ตอย่างเดียวนางานวิจัย [16] อีกด้วย ทั้งนี้ อัตราค่าบริการดังกล่าวนั้นใกล้เคียงกับบริการบรอดแบนด์ที่มีระดับ QoS อยู่ที่ระดับที่ 1 [20] ดังนั้น จึงกำหนดให้  $Q'$  เท่ากับ 1 ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

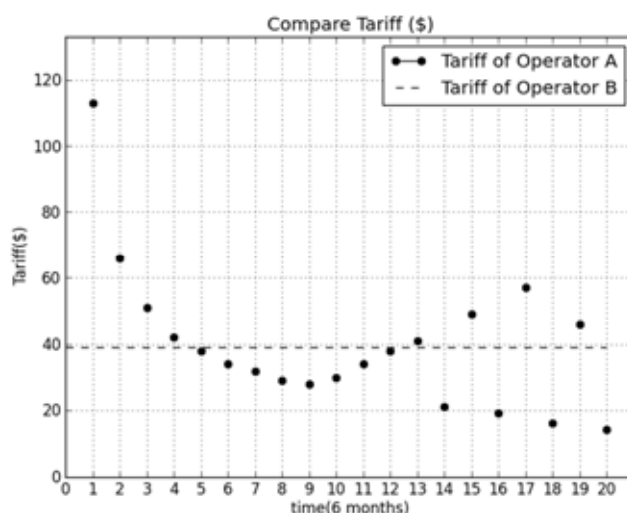
สำหรับผลการศึกษาที่ได้รับในกรณีนี้เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น พบว่าระดับ QoS ที่เหมาะสมของผู้ให้บริการ A จะคงที่อยู่ที่ระดับที่ 4 ซึ่งเป็นระดับคุณภาพสูงที่สุดตลอดระยะเวลาที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นระดับที่มากกว่าผู้ให้บริการคู่แข่งเสนอ สำหรับการที่ระดับ QoS ที่เหมาะสมเป็นไปในลักษณะดังกล่าวนี้เป็นเพราะว่าต้องการที่จะแข่งขันตลาด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือดึงดูดผู้ใช้บริการด้วยระดับคุณภาพที่ดีกว่า ส่วนอีกสาเหตุหนึ่งคือเพื่อที่จะเรียกเก็บอัตราค่าบริการที่สูงกว่านั่นเอง เนื่องจากว่าผู้ใช้บริการจะมีความยินดีที่จะจ่ายมากขึ้นถ้าหากว่าจะทำให้ได้รับบริการที่ระดับ QoS ดีขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.1 ระดับ QoS ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบ

เพดานราคา

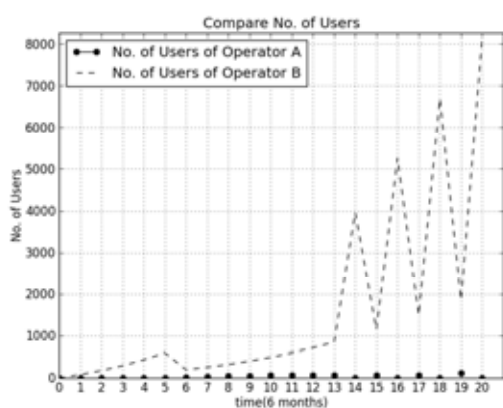
ในขณะที่อัตราค่าบริการที่เหมาะสมนั้นอยู่ที่ประมาณ 113 ดอลลาร์สหรัฐในเริ่มต้น การศึกษาที่มีการกำหนดกลยุทธ์ครั้งแรกหรือหกเดือนแรกของการศึกษา จากนั้นจะลดลงไปอยู่ที่ประมาณ 51 ดอลลาร์สหรัฐในการปรับกลยุทธ์ครั้งถัดมา และเมื่อช่วงเวลาถัดไปก็ปรับลดลงไปเรื่อยๆจนถึงหน่วยเวลาที่ 10 ที่มีการปรับเพิ่มขึ้นมาอีกครั้ง จากนั้นก็มีการปรับขึ้นเรื่อยๆจนเมื่อถึงหน่วยเวลาที่ 14 และมีการปรับขึ้นลงเรื่อยๆสลับกันจนสิ้นสุดระยะเวลาที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นเพราะว่าต้องการที่จะจำกัดไม่ให้จำนวนผู้ใช้บริการเยอะเกินไปเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงที่จะลงทุนในระบบเพิ่ม และการที่ผู้ใช้บริการแต่ละรายจะพิจารณาตัดสินใจรับบริการจากอัตราค่าบริการและระดับ QoS ที่ผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอได้กำหนด ณ เวลาก่อนหน้าด้วยนั่นเอง ทั้งนี้ พบว่า ถึงแม้ว่าอัตราค่าบริการที่เหมาะสมนั้นจะไม่ตรงกับอัตราค่าบริการเฉลี่ยของบริการ FTTH ของทั้งโลก แต่ว่าอัตราค่าบริการดังกล่าวนั้นก็มีความใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของอัตราค่าบริการ FTTH ดังกล่าวเป็นส่วนใหญ่ ทั้งยังอยู่ในช่วงอัตราค่าบริการที่มีการเรียกเก็บจริงสำหรับบริการ FTTH สำหรับลูกค้าส่วนบุคคล ทั้งในประเภทที่ให้บริการบรอดแบนด์เพียงอย่างเดียวหรือที่เรียกว่า Standalone broadband และประเภทที่ให้บริการบรอดแบนด์ควบคู่ไปกับบริการอื่นๆ เช่น โทรศัพท์ และ โทรศัพท หรือที่เรียกว่า bundled broadband [43] อีกด้วย



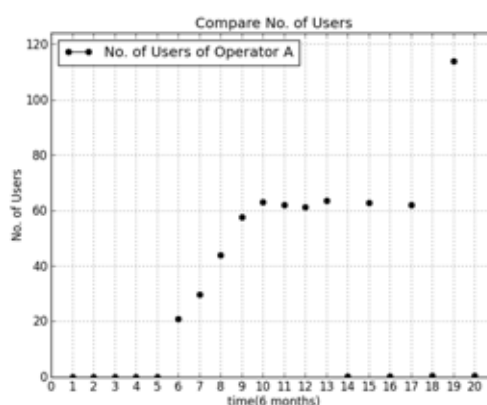
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคม

แบบเพดานราคา

ด้วยเหตุที่ระดับ QoS และอัตราค่าบริการที่เหมาะสมเป็นไปในลักษณะข้างต้น จึงทำให้จำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยที่จะมีการลดลงสลับกับการปรับเพิ่มในช่วงตอนท้ายของการศึกษาที่มีการปรับอัตราค่าบริการขึ้นลงนั่นเอง ทั้งนี้ เนื่องจากการที่ผู้ให้บริการคู่แข่งเป็นผู้นำในตลาดซึ่งทำให้ผู้ใช้บริการจะพิจารณาบริการของผู้ให้บริการของคู่แข่งก่อน ทั้งยังเอนเอียงไปทางคู่แข่งเป็นส่วนใหญ่ด้วย ทำให้จำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการคู่แข่งอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ในช่วงท้ายการศึกษาจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการคู่แข่งก็มีการปรับขึ้นลงเช่นเดียวกัน โดยเป็นในทิศทางตรงกันข้ามกับของจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ อันเป็นผลมาจากอัตราค่าบริการที่เหมาะสมนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 4.3



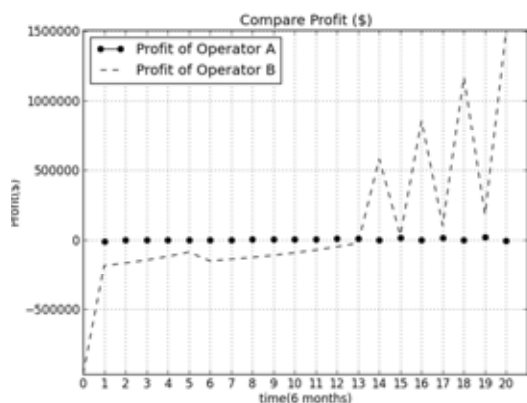
(ก)



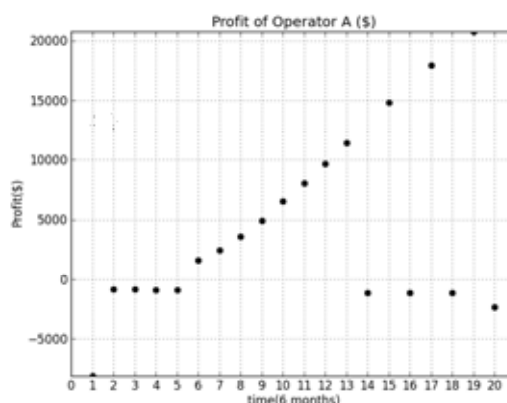
(ข)

รูปที่ 4.3 (ก) การเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  (ข) จำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

สืบเนื่องจากที่จำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอมีน้อย จากนั้นจึงค่อยๆมีการปรับเพิ่มสูงขึ้นในเวลาต่อมา แต่จำนวนผู้ใช้บริการทั้งหมดในระบบก็มีไม่มากนักจนเพียงแค่อุปกรณ์ OLTs เพียง 1 ชั้นก็เพียงพอ จนเมื่อถึงช่วง 2 หน่วยเวลาสุดท้ายของการศึกษา จึงจำเป็นที่จะต้องปรับจำนวน OLTs เพิ่มเป็น 2 ชั้น เพื่อที่จะรองรับผู้ใช้บริการได้อย่างเพียงพอ ซึ่งการที่จำนวน OLTs เป็นไปในลักษณะดังกล่าวนี้ ทำให้จำนวน OLTs ที่มีในระบบ ณ เวลาต่างๆ มีเท่าที่จำเป็น จึงไม่มี OLTs ที่อยู่ในระบบโดยไม่ได้ใช้งาน และไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายทั้งในการจัดซื้อและบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ไม่ได้ใช้งานอีกด้วย ด้วยเหตุผลส่วนนี้ และอัตราค่าบริการที่เหมาะสม จึงส่งผลให้ผลกำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการ A มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.4 และผลกำไรสะสมเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.5 กล่าวคือ ผลกำไรเฉลี่ยมีแนวโน้มตามจำนวนผู้ใช้บริการนั่นเอง



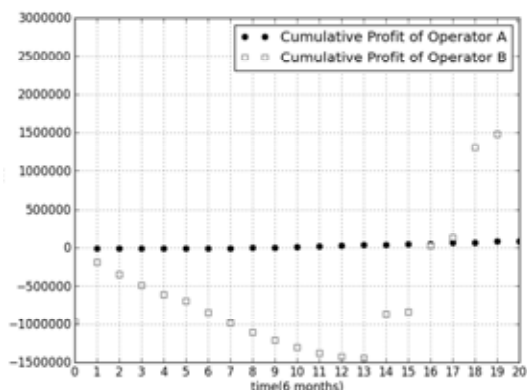
(ก)



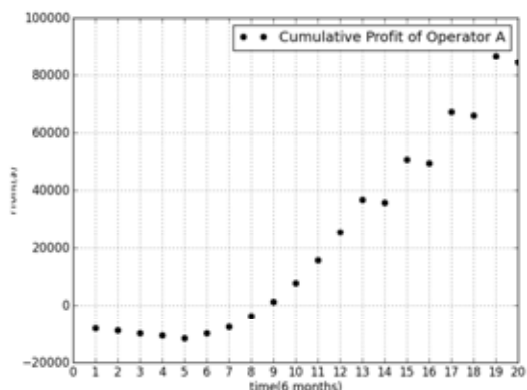
(ข)

รูปที่ 4.4 (ก) การเปรียบเทียบผลกำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  (ข) ผลกำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา





(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) การเปรียบเทียบผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  (ข) ผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

**4.2.1.2 กรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่** ในกรณีนี้ได้ทดลองศึกษาในกรณีที่อัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งนั้นมีค่าไม่คงที่ โดยที่อ้างอิงอัตราค่าบริการจาก [67] ในช่วง 7 หน่วยเวลาแรก หลังจากนั้นใช้หลักการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression analysis) ในการประมาณอัตราค่าบริการที่หน่วยเวลาดังแต่  $t$  เท่ากับ 8 เป็นต้นไป โดยคำนวณ  $\alpha$  ซึ่งแทนจุดตัดแกน (intercept) และ  $\beta$  แทนความชัน (slope) จากข้อมูล [67] ได้ว่าเท่ากับ 81.6817 และ -3.9693 ตามลำดับ จะได้ว่าอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 เป็นไปดังที่แสดงในตารางที่ 4.3 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) เท่ากับ 6.3607

$$p'(t) = 81.6817 - 3.9693t \quad (4.1)$$

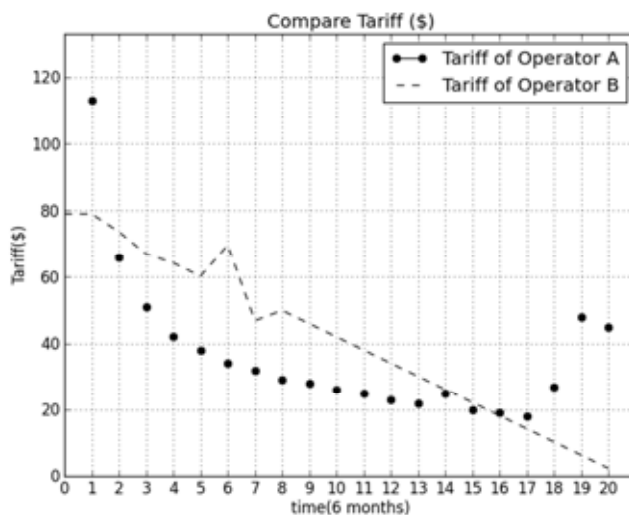
ทั้งนี้ อัตราค่าบริการที่ได้ในหน่วยเวลาแรกนั้นสอดคล้องกับความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการที่ระดับคุณภาพ [16] และอัตราค่าบริการที่ได้จากการประมาณนั้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับแนวโน้มของอัตราค่าบริการในงานวิจัยที่ระดับ QoS ระดับที่ 3 [20] จึงกำหนดให้  $Q'$  มีค่าเท่ากับ 3 ในกรณีนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่ง ณ เวลา  $t$  ในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล กรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่

| $t$ | $p'(t)$ |
|-----|---------|
| 0   | 79.0036 |
| 1   | 79.0036 |
| 2   | 73.6474 |
| 3   | 66.9522 |
| 4   | 64.2741 |
| 5   | 60.2570 |
| 6   | 69.6303 |
| 7   | 46.8666 |
| 8   | 49.9272 |
| 9   | 45.9579 |
| 10  | 41.9886 |
| 11  | 38.0193 |
| 12  | 34.05   |
| 13  | 30.0807 |
| 14  | 26.1114 |
| 15  | 22.1420 |
| 16  | 18.1727 |
| 17  | 14.2034 |
| 18  | 10.2341 |
| 19  | 6.2648  |
| 20  | 2.2955  |

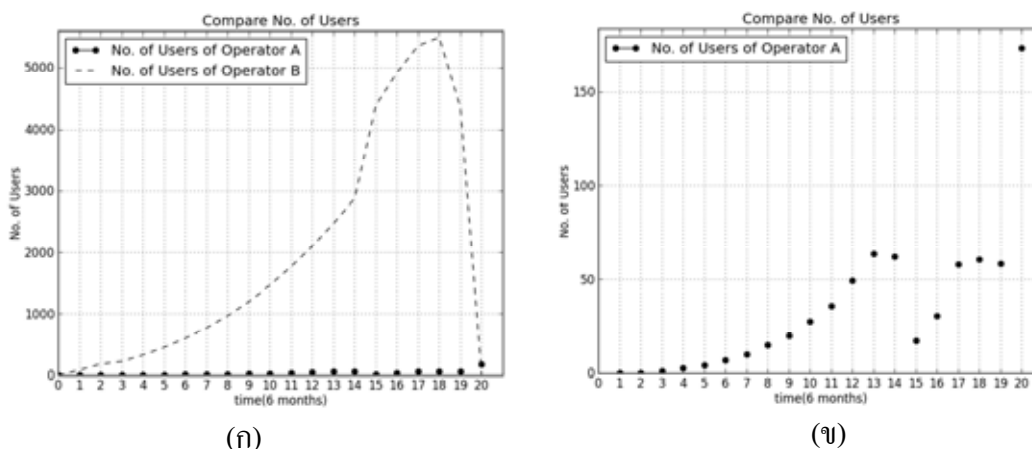
สำหรับผลการศึกษาที่ได้รับในกรณีนี้ พบว่าระดับ QoS ที่เหมาะสมคงที่อยู่ที่ระดับที่ 4 หรือระดับ QoS ที่ดีที่สุดตลอดระยะเวลาที่ศึกษาเช่นเดียวกันกับกรณีก่อนหน้า ส่วนอัตราค่าบริการนั้นในช่วงแรกมีขนาดทิศทางและแนวโน้มคล้ายกับกรณีก่อนหน้า แต่ในกรณีนี้จะมีการลดลงตาม

เวลายาวนานกว่า โดยจะมีการปรับขึ้นลงตั้งแต่หน่วยเวลาที่ 14 จนถึงสิ้นสุดระยะเวลาที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งเหตุผลที่แตกต่างกันกับกรณีที่แล้วก็เป็นผลมาจากการที่ในกรณีนี้อัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งนั้นมีการปรับลดลงตามเวลาทั้งยังให้บริการที่ระดับ QoS ที่ 3 ซึ่งสูงพอสมควรและไม่แตกต่างกันกับระดับ QoS ที่เหมาะสมมากนัก



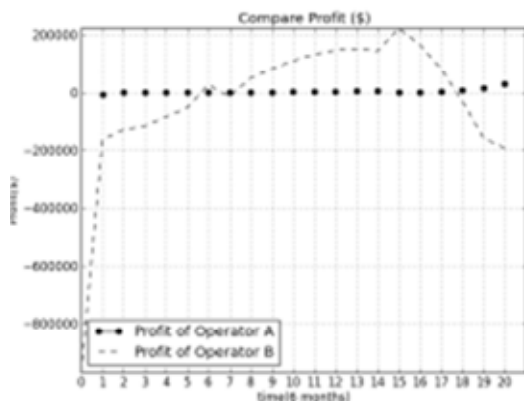
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่ กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

ทั้งนี้ ในส่วนของจำนวนผู้ใช้บริการเป็นไปในลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับกรณีก่อนหน้านี้ โดยที่ในกรณีนี้จะแตกต่างกันเล็กน้อยด้วยเหตุจากลักษณะของอัตราค่าบริการที่เหมาะสมที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 อย่างไรก็ตาม สังเกตได้ว่าขนาดของจำนวนผู้ใช้บริการนั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกันกับกรณีก่อนหน้านี้ ซึ่งส่งผลให้จำนวน OLTs เป็นไปในลักษณะคล้ายคลึงกันด้วย

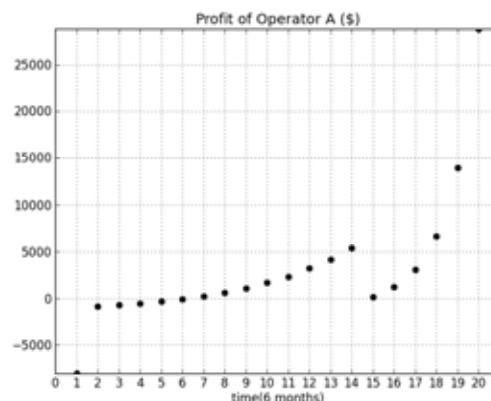


รูปที่ 4.7 (ก) การเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  (ข) จำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่ กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

สำหรับในส่วนของผลกำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ นั้นมีแนวโน้มและทิศทางที่คล้ายคลึงกับกรณีก่อนหน้า โดยส่วนใหญ่มีขนาดที่น้อยกว่ากรณีก่อนหน้า แต่จะสังเกตได้ว่าผลกำไรของผู้ให้บริการคู่แข่งจะมากกว่าผลกำไรของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอและยังดีกว่ากรณีก่อนหน้าด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ส่วนผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ นั้นมีขนาดที่น้อยกว่ากรณีก่อนหน้าเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลา ทั้งนี้ จะสังเกตได้ว่าผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอจะดีกว่าผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการคู่แข่งแค่ถึงหน่วยเวลาที่ 12 เท่านั้น จากนั้นผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการคู่แข่งจะดีกว่า ซึ่งเมื่อเทียบกับกรณีก่อนหน้า พบว่ากรณีนี้ผลกำไรสะสมจากผู้ให้บริการคู่แข่งเป็นเวลาน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.9

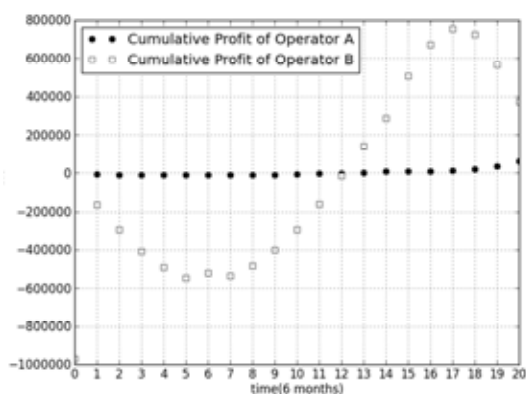


(ก)

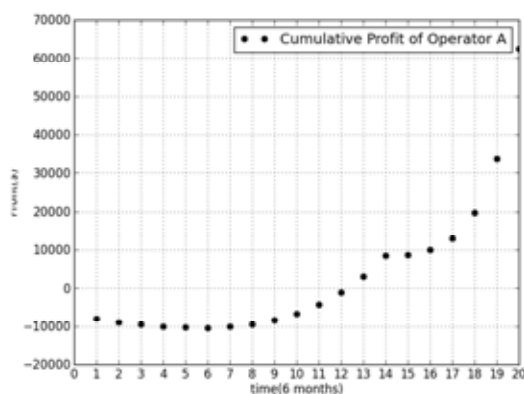


(ข)

รูปที่ 4.8 (ก) การเปรียบเทียบผลกำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  (ข) ผลกำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่ กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา



(ก)



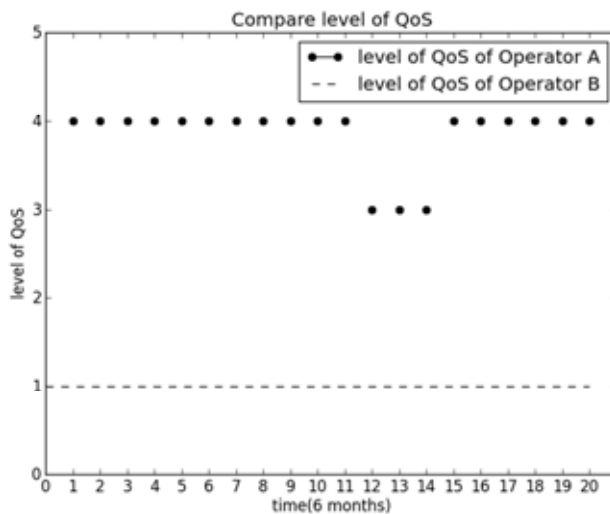
(ข)

รูปที่ 4.9 (ก) การเปรียบเทียบผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  (ข) ผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่ กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

**4.2.2 กรณีมีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา** สืบเนื่องจากตลาด FTTH นั้นเป็นตลาดที่มีลักษณะผูกขาดโดยธรรมชาติ และการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคาเป็นการการกำกับอัตราโทรคมนาคมที่ได้รับการแนะนำว่าควรนำมาใช้กับตลาด FTTH [8] ดังนั้น ในที่นี้ จึงได้มีการนำการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคามาทดลองใช้เป็นอีกข้อจำกัดหนึ่งในการพิจารณา โดยในการพิจารณานี้ก็จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเช่นเดียวกันกับกรณีที่ไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา คือ กรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งที่ และกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่ ดังนี้

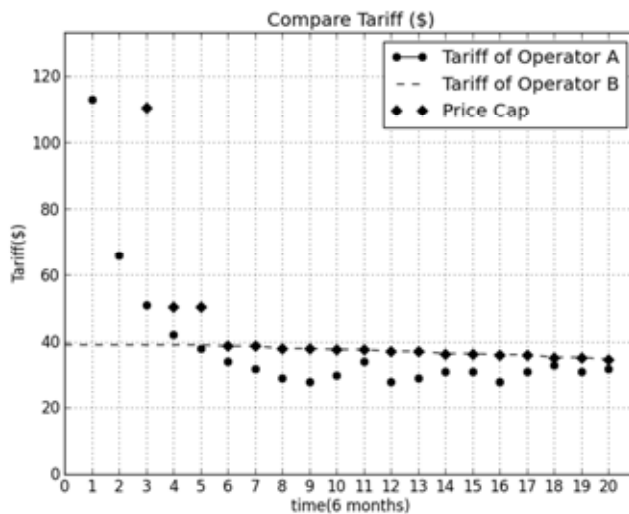
**4.2.2.1 กรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่** ในกรณีนี้จะกำหนดให้อัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งนั้นมีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ที่ 39 ดอลลาร์สหรัฐ [31] และ  $Q'$  เท่ากับ 1 ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาเช่นเดียวกันกับการพิจารณาในหัวข้อ 4.2.1.1

สำหรับผลการศึกษาที่ได้รับในกรณีนี้ พบว่าระดับ QoS ที่เหมาะสมของผู้ให้บริการ A นั้นคงที่อยู่ที่ระดับที่ 4 เป็นส่วนใหญ่ โดยจะมีช่วงที่ระดับ QoS นั้นลดลงไปที่ระดับ QoS ระดับที่ 3 ในช่วงหน่วยเวลาที่ 12-15 ก่อนที่จะปรับขึ้นสู่ระดับเดิมในหน่วยเวลาที่ถัดไปและคงที่จนถึงสิ้นสุดระยะเวลาที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการรักษาระดับ QoS ไว้ที่ระดับเดิม ณ เวลาดังกล่าวนั้นมีความเสี่ยงที่จะได้รับผลกำไรน้อย หรือต้องขาดทุนนั่นเอง



รูปที่ 4.10 ระดับ QoS ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งที่ กรณีมีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบ  
 เพดานราคา

ในขณะที่อัตราค่าบริการที่เหมาะสมนั้นมีความคล้ายคลึงกับกรณีที่อัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งที่แบบไม่มีเพดานราคาพอสมควร ทว่า แตกต่างกันตรงที่จะไม่มีการปรับขึ้นลงมากนัก และการปรับขึ้นลงก็มีความแตกต่างเพียงเล็กน้อย เนื่องจากว่ามีเพดานราคาควบคุมอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ทั้งนี้ สังเกตได้ว่าผู้ให้บริการทั้งสองรายต่างได้รับผลกระทบจากเพดานราคาทั้งคู่

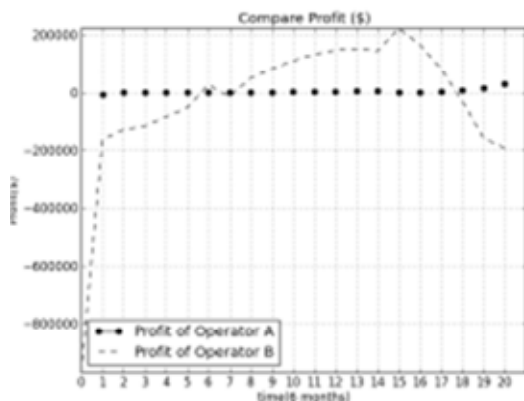


รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีมีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

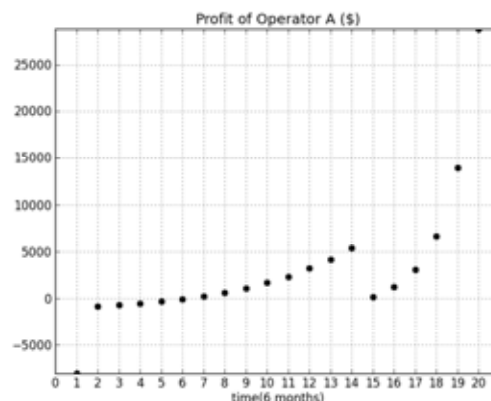
สำหรับในส่วนของจำนวนผู้ใช้บริการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราค่าบริการที่เหมาะสม โดยที่จำนวนผู้ใช้บริการนั้นมีขนาดน้อยกว่าคู่แข่งอย่างชัดเจนอยู่ เช่นเดิม ทว่า ในกรณีนี้มีจำนวนผู้ใช้บริการที่มากกว่าทั้งสองกรณีก่อนหน้านี้ จึงส่งผลให้จำนวน OLTs มากกว่าด้วย โดยที่เริ่มต้นที่ 1 และมีการปรับเป็น 2 ในหน่วยเวลาที่ 15 ปรับอีกครั้งเป็น 3 ในหน่วยเวลาถัดมา และปรับตัวเพิ่มขึ้นเป็น 4 ในหน่วยเวลาที่ 19

สำหรับผลกำไรของผู้ให้บริการทั้งสองรายต่างมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามเวลาในกรณีนี้ โดยที่ผลกำไรของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอจะดีกว่าผลกำไรของผู้ให้บริการคู่แข่งในช่วงก่อนหน่วยเวลาที่ 13 หลังจากนั้นก็จะแยกว่าคู่แข่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ส่วนผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอจะดีกว่าคู่แข่งตลอดระยะเวลาที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.13



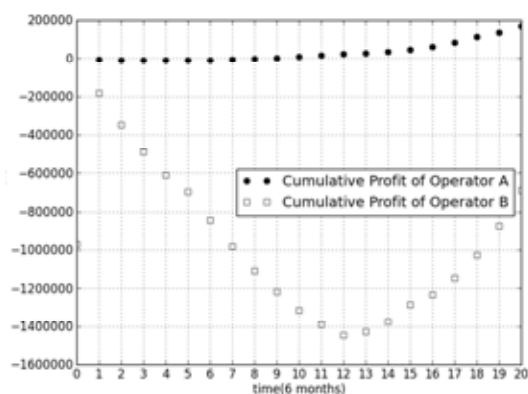


(ก)

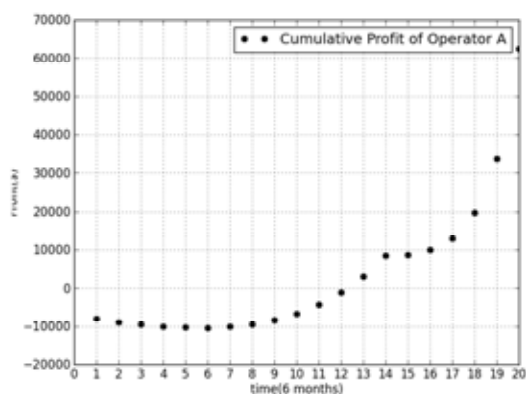


(ข)

รูปที่ 4.12 (ก) การเปรียบเทียบผลกำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  (ข) ผลกำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีมีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา



(ก)

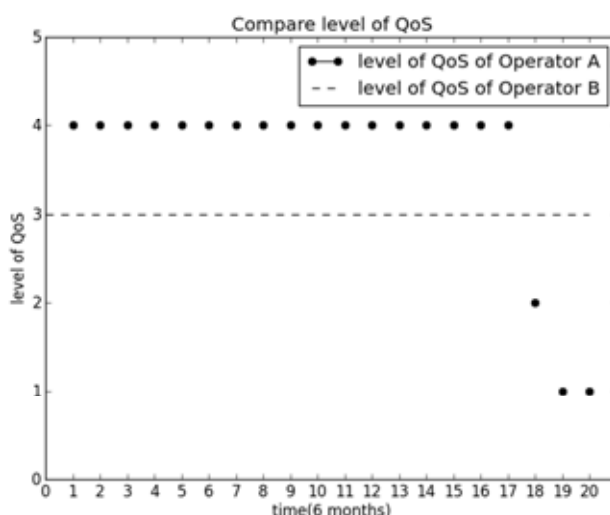


(ข)

รูปที่ 4.13 (ก) การเปรียบเทียบผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  (ข) ผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งคงที่ กรณีมีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

**4.2.2.2** กรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่ ในกรณีนี้ได้ทดลองศึกษาในกรณีที่อัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งนั้นมีค่าไม่คงที่ ซึ่งมีค่าเป็นไปดังที่แสดงในตารางที่ 4.3 และมี  $Q'$  มีค่าเท่ากับ 3 โดยที่มีการนำการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคาเข้ามาพิจารณาด้วย

สำหรับผลการศึกษาที่ได้รับในกรณีนี้ พบว่า ระดับ QoS ที่เหมาะสมจะคงที่อยู่ที่ระดับที่ 4 ตั้งแต่ต้นจนถึงหน่วยเวลาที่ 17 จากนั้นก็จะปรับระดับลงมาที่ระดับที่ 2 ก่อนที่จะลดลงมาที่ระดับที่ 1 และคงที่จนสิ้นสุดระยะเวลาที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งจะทำได้ทำให้สามารถเรียกเก็บอัตราค่าบริการได้ต่ำกว่า ไม่ต้องลงทุนในระบบเพิ่มเพื่อรักษาระดับ QoS และอาจจะทำให้มีจำนวนผู้ใช้บริการที่เยอะกว่าในการให้บริการที่ระดับ QoS ในระดับสูง



รูปที่ 4.14 ระดับ QoS ของผู้ใช้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่ กรณีมีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

สำหรับในส่วนของอัตราค่าบริการที่เหมาะสมนั้นค่อนข้างใกล้เคียงกันกับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการไม่คงที่แบบที่ไม่มีเพดานราคาทุกประการ ต่างกันเพียงแค่นี้อัตรา

ค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งจะได้รับผลกระทบจากเพดานราคาทำให้บางช่วงเวลามีอัตราค่าบริการที่ต่ำกว่าในกรณีดังกล่าวเล็กน้อย

เช่นเดียวกันกับในส่วนของจำนวนผู้ใช้บริการ จำนวน OLTs ผลกำไร และผลกำไรสะสม ในกรณีนี้ค่อนข้างใกล้เคียงกันกับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลกรณีอัตราค่าบริการไม่คงที่แบบที่ไม่มีเพดานราคาทุกประการ ต่างกันเพียงแค่ว่าในกรณีนี้ ผลกำไรและผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการทั้งสองรายน้อยกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีเพดานราคาควบคุมอยู่ทำให้เรียกเก็บอัตราค่าบริการได้น้อยกว่า จึงมีรายได้น้อยกว่า และส่งผลให้ผลกำไรน้อยกว่าด้วยนั่นเอง

#### 4.3 กรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ

ในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจนั้น จำนวนลูกค้าที่มีอยู่ทั้งหมดในพื้นที่ที่สนใจศึกษามีจำนวนค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตาม ลูกค้ากลุ่มนี้ต้องการบริการที่มีคุณภาพ และมีความเชื่อถือได้สูง โดยที่ความยินดีที่จะจ่ายสูงด้วยเช่นกัน ดังนั้น แผนการป้องกันแบบ C จึงถูกเลือกมาพิจารณาเป็นอีกหนึ่งกรณีควบคู่กับการพิจารณาในกรณีที่ไม่มีแผนการป้องกัน ทั้งนี้ ในการทดลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ ผู้วิจัยจำเป็นต้องกำหนดพารามิเตอร์บางค่าใหม่ดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยที่ในการกำหนดพารามิเตอร์เกี่ยวกับความยินดีที่จะจ่ายของลูกค้าองค์กรธุรกิจนั้นจะอ้างอิงจากงานวิจัย [20] และ [21] ได้ระบุว่าลูกค้าองค์กรธุรกิจนั้นจะต้องการบริการที่มีระดับคุณภาพ ความเชื่อถือได้ และความปลอดภัยสูงกว่าลูกค้าส่วนบุคคล และมีความยินดีที่จะจ่ายอัตราค่าบริการในอัตราที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม ในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจนั้นไม่มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาหรือสำรวจความยินดีที่จะจ่ายของผู้ใช้บริการเช่นในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล ดังนั้น ในที่นี้จึงกำหนดให้ค่าคาดหวังหรือค่าเฉลี่ยของความยินดีที่จะจ่ายของลูกค้าองค์กรธุรกิจมีค่าเป็น 10 เท่าของในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล สืบเนื่องจากที่อัตราค่าบริการของลูกค้าองค์กรธุรกิจนั้นมากกว่าอัตราค่าบริการของลูกค้าส่วนบุคคลประมาณ 10 เท่า [20] และคำนวณค่าพารามิเตอร์อื่นๆ โดยใช้หลักการของการแจกแจงแบบสื่อกปกติ [58] เข้าช่วยในการทำงานเดียวกันกับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลนั่นเอง

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์เฉพาะสำหรับการทดลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ

| ตัวแปร              | ค่าของตัวแปร   |
|---------------------|--|
| Lognormal parameter | $\mu_j = 5.9683$ โดยที่ $j=1,2,3,4$<br>และ $\sigma_j = 0.9095, 1.1862, 1.2499$ และ $1.3566$ เมื่อ $j=1,2,3,4$ [16] |
| $H'$                | $=0.75*I = 1229$   |
| $O'$                | $\lceil H'/r \rceil = 20$  |
| $c_p$               | \$100 ต่อชั่วโมง [68]  |
| $\omega_{\max}$     | \$1000   |

นอกจากนี้ ทราบว่าอัตราค่าบริการสำหรับลูกค้าองค์กรธุรกิจนั้น ไม่คงที่และมีแนวโน้มลดลงตามเวลา [20][43] อีกทั้งเมื่อพิจารณาผลที่ได้รับในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล พบว่า ไม่ว่าอัตราค่าบริการของคู่แข่งจะคงที่หรือไม่คงที่นั้น ไม่ได้กระทบกับการหาอัตราค่าบริการที่เหมาะสมของแบบจำลองที่นำเสนอ นัก ดังนั้น ในส่วนของกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจนี้ จึงจะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่อัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่ โดยที่อัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งนั้นจะถูกประมาณโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression analysis) โดยมีการอ้างอิงข้อมูลอนุกรมเวลาจาก [20] สำหรับใช้คำนวณหาค่า  $\alpha$  และ  $\beta$  ซึ่งเท่ากับ 445.1962 และ -8.8913 ตามลำดับ ทั้งนี้ จะได้ว่าอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.2) เป็นไปดังที่แสดงในตารางที่ 4.5 โดยที่ตั้งแต่หน่วยเวลาที่ 0-16 เป็นข้อมูลจริง และหลังจากนั้นจึงเป็นข้อมูลที่ได้จากการประมาณ ซึ่งในที่นี่มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) เท่ากับ 9.1375

$$p'(t) = 445.1962 - 8.8913t \quad (4.2)$$

ทั้งนี้ อัตราค่าบริการที่ได้จากการประมาณนั้นมีขนาดและแนวโน้มสอดคล้องกับอัตราค่าบริการสำหรับลูกค้าองค์กรธุรกิจของบริการ FTTH แบบ Standalone broadband [43] และอัตรา

ค่าบริการที่ได้จากการประมาณนั้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับแนวโน้มของอัตราค่าบริการในงานวิจัย  
ที่ระดับ QoS ระดับที่ 1 [20] จึงกำหนดให้  $Q'$  มีค่าเท่ากับ 2 ในกรณีนี้

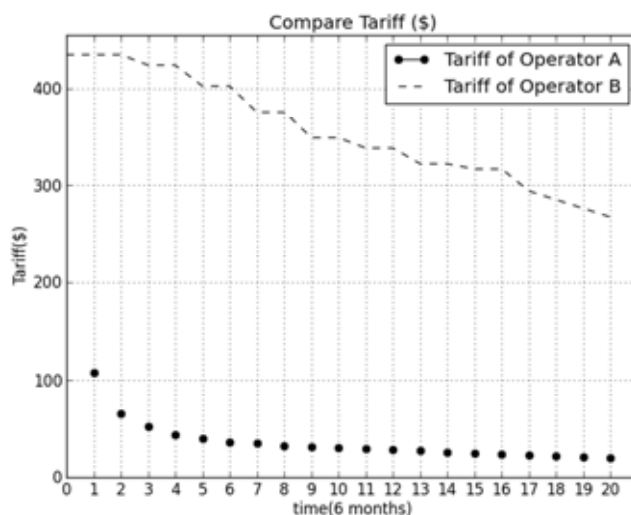
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่ง ณ เวลา  $t$  ในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ  
กรณีอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งไม่คงที่

| $t$ | $p'(t)$  |
|-----|----------|
| 0   | 434.674  |
| 1   | 434.674  |
| 2   | 434.674  |
| 3   | 423.9413 |
| 4   | 423.9413 |
| 5   | 402.4759 |
| 6   | 402.4759 |
| 7   | 375.6442 |
| 8   | 375.6442 |
| 9   | 348.8124 |
| 10  | 348.8124 |
| 11  | 338.0798 |
| 12  | 338.0798 |
| 13  | 321.9807 |
| 14  | 321.9807 |
| 15  | 316.6144 |
| 16  | 316.6144 |
| 17  | 294.0442 |
| 18  | 285.1529 |
| 19  | 276.2616 |
| 20  | 267.3703 |

### 4.3.1 กรณีไม่มีแผนการป้องกัน

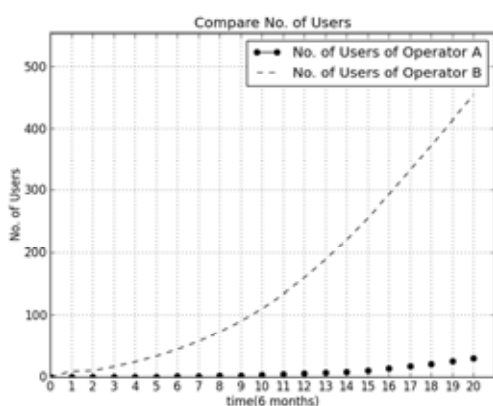
ในกรณีนี้ผู้วิจัยได้แบ่งพิจารณาออกเป็นอีกสองกรณีเช่นเดียวกับในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล คือ กรณีที่ไม่มีและมีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา ดังนี้

**4.3.1.1 กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา** สำหรับผลการศึกษาที่ได้รับในกรณีนี้ พบว่า ระดับ QoS ที่เหมาะสมของผู้ให้บริการ A นั้นจะคงที่อยู่ที่ระดับที่ 4 ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา เหมือนกับในกรณีลูกค้าส่วนบุคคลแบบไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา ส่วนอัตราค่าบริการที่เหมาะสมนั้นมีแนวโน้มลดลงตามเวลา โดยมีขนาดที่น้อยกว่าอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งกว่าสิบเท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.15 อย่างไรก็ตาม พบว่าอัตราค่าบริการที่เหมาะสมในหน่วยเวลาแรกนั้นใกล้เคียงกับอัตราค่าบริการเฉลี่ยของบริการ FTTH แบบ Bundled broadband และอัตราค่าบริการที่เหมาะสมนั้นก็สอดคล้องกับอัตราค่าบริการจริงสำหรับลูกค้าองค์กรธุรกิจ [43]

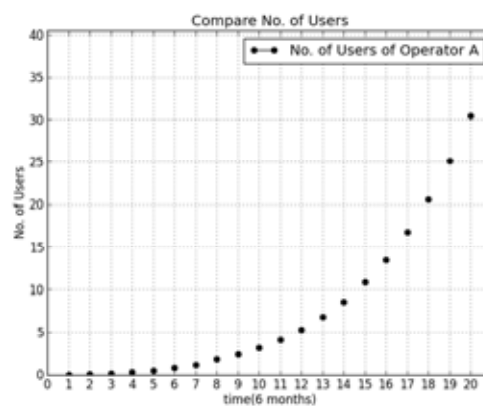


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ แบบไม่มีแผนการป้องกัน กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

สำหรับในส่วนของการเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ นั้น พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราค่าบริการและระดับ QoS ที่เหมาะสมนั่นเอง จึงทำให้ไม่มีการสลับขึ้นลงเช่นในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล ดังแสดงในรูปที่ 4.16 อย่างไรก็ตาม ด้วยเหตุที่ว่าจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอค่อนข้างน้อยทำให้จำนวน OLTs ที่เหมาะสมมีเพียงแค่ 1 ชั้นตลอดระยะเวลาที่ศึกษาที่เพียงพอ ซึ่งคล้ายคลึงกันกับในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล เช่นเดียวกันกับลักษณะที่มีจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวน OLTs ของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่เสนอนั้นมีน้อยกว่าผู้ให้บริการคู่แข่งอย่างชัดเจนเหมือนกับในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล เพราะจะถูกจำกัดด้วยเหตุผลเดียวกันคือ ผู้ให้บริการคู่แข่งเป็นผู้นำในตลาดจึงทำให้มีผู้ใช้บริการตัดสินใจพิจารณาบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งที่ยังอ่อนแอเพียงไปทางที่จะรับบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งมากกว่านั่นเอง



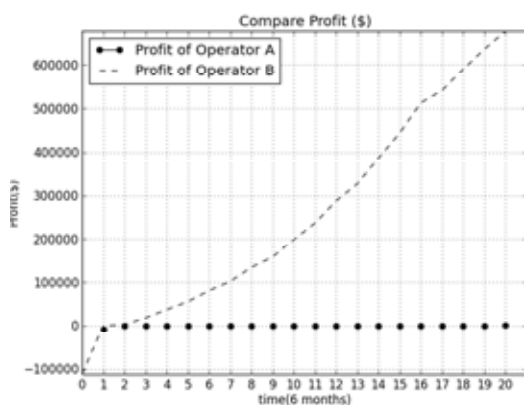
(ก)



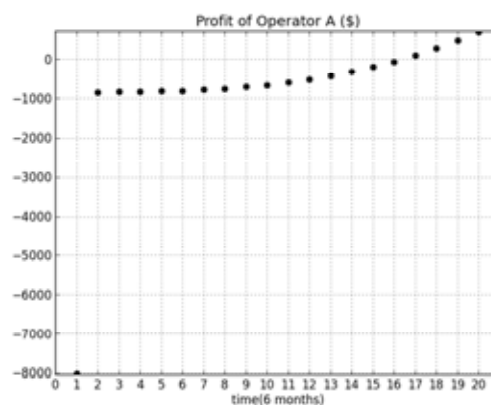
(ข)

รูปที่ 4.16 (ก) การเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  (ข) จำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ แบบไม่มีแผนการป้องกัน กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

สำหรับในส่วนของผลกำไรและกำไรสะสมในกรณีนี้จะน้อยกว่าผู้ให้บริการคู่แข่งตลอดระยะเวลาที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.17-4.18 ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีการเรียกเก็บอัตราค่าบริการที่ต่ำกว่ามากนั่นเอง



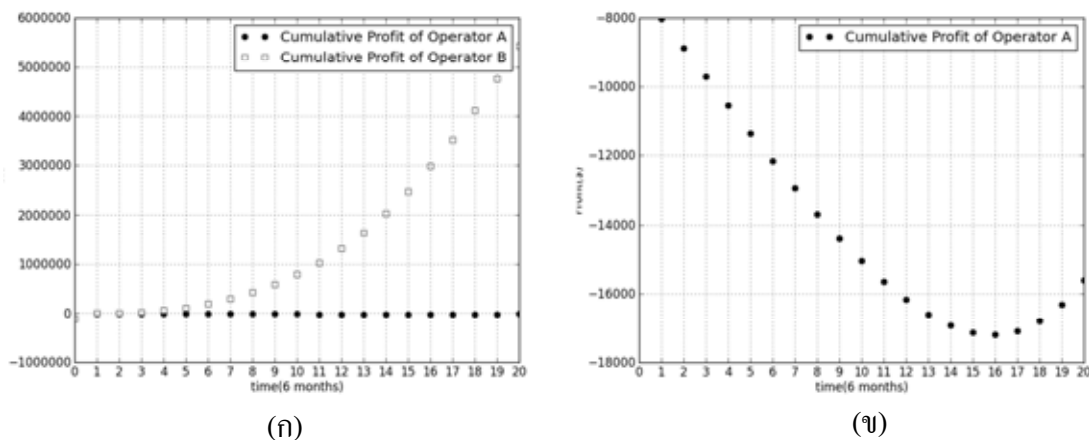
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 (ก) การเปรียบเทียบผลกำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  (ข) ผลกำไรเฉลี่ยของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ แบบไม่มีแผนการป้องกัน กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา





รูปที่ 4.18 (ก) การเปรียบเทียบผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  (ข) ผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ แบบไม่มีแผนการป้องกัน กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

#### 4.3.1.2 กรณีมีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา ในที่นี้จะพิจารณาใน

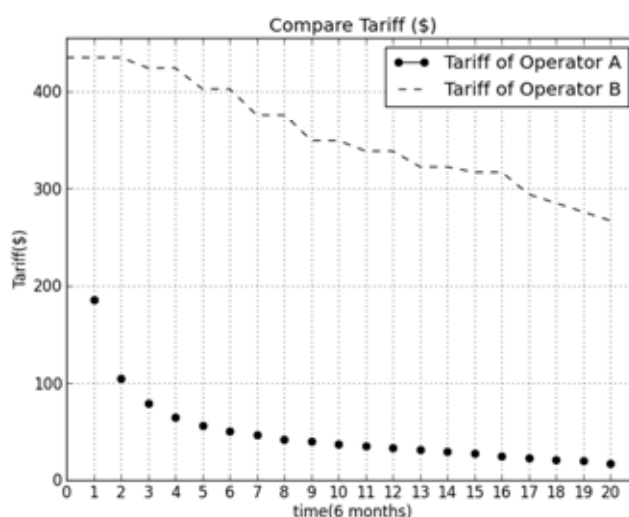
ทำนองเดียวกับกรณีที่ไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา ในหัวข้อ 4.3.1.1 ทุกประการ ต่างกันเพียงแค่เพิ่มข้อจำกัดเกี่ยวกับการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคาเข้าไปเท่านั้น

สำหรับผลการศึกษาที่ได้รับในกรณีนี้ พบว่า ระดับ QoS ที่เหมาะสมของผู้ให้บริการ A นั้นเป็นไปในลักษณะเดิม กล่าวคือ คงที่อยู่ระดับที่ 4 ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา ส่วนอัตราค่าบริการที่เหมาะสมนั้นเป็นไปในลักษณะเช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้าซึ่งก็คือกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจแบบไม่มีแผนการป้องกันกรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคาทั้งขนาดและทิศทาง กล่าวคือมีแนวโน้มลดลงตามเวลาและน้อยกว่าผู้ให้บริการคู่แข่งกว่าสิบเท่า โดยในกรณีนี้อัตราค่าบริการของผู้ให้บริการจะได้รับผลกระทบจากเพดานราคา แต่อัตราค่าบริการที่เหมาะสมไม่ได้รับเนื่องจากว่าต่ำกว่าเพดานราคามากอยู่แล้ว ทั้งนี้ ด้วยเหตุที่ระดับ QoS และอัตราค่าบริการที่เหมาะสมเป็นไปในลักษณะเดียวกัน จึงส่งผลให้จำนวนผู้ใช้บริการ จำนวน OLTs ผลกำไร และผลกำไรสะสมเป็นไปในลักษณะเดียวกันด้วย

### 4.3.2 กรณีมีแผนการป้องกันแบบ C

ในกรณีนี้ ระบบ PON อีกระบบหนึ่งได้ถูกติดตั้งควบคู่กันไป ทำให้มีค่าปรับที่อาจจะเกิดขึ้นในกรณีที่ผู้ใช้บริการไม่สามารถใช้งานได้นั้นเป็นศูนย์ แต่แลกมาด้วยค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์สำรองในระบบ และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบว่าแบบจำลองที่นำเสนอจะให้คำตอบอย่างไร โดยแบ่งแยกย่อยลงไปตามกรณีต่างๆเช่นเดิม

**4.3.2.1 กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา** ในกรณีนี้พบว่าระดับ QoS ที่เหมาะสมที่ได้รับจากแบบจำลองที่นำเสนอขึ้นอยู่กับระดับที่ 4 ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา เช่นเดียวกับกับกรณีลูกค้าส่วนบุคคลแบบไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา และกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจแบบไม่มีแผนการป้องกัน ส่วนอัตราค่าบริการที่เหมาะสมนั้นมีแนวโน้มที่ลดลงตามเวลาเช่นเดียวกับกับกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจแบบไม่มีแผนการป้องกัน โดยที่ในกรณีนี้มีขนาดของอัตราค่าบริการที่เหมาะสมมากกว่าในกรณีที่ไม่มีแผนการป้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการทั้งสองราย ณ เวลา  $t$  สำหรับกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ แบบมีแผนการป้องกันแบบ C กรณีไม่มีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา

สำหรับจำนวนผู้ใช้บริการนั้นมีแนวโน้มและทิศทางคล้ายคลึงกันกับกรณีลูกค้าองค์กร ธุรกิจแบบไม่มีแผนการป้องกันโดยที่ในกรณีนี้มีความชันและขนาดมากกว่าเล็กน้อย แต่ยังคงเป็น ปริมาณที่น้อยมากและน้อยกว่าคู่แข่งอย่างชัดเจนเช่นเดิม จึงส่งผลให้ในกรณีนี้ยังคงมีจำนวน OLTs ที่เหมาะสมอยู่ที่ 1 ชั้นตลอดระยะเวลาที่ศึกษา ส่วนผลกำไรและผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการทั้งสองรายมีแนวโน้มและทิศทางเหมือนกันกับกรณีลูกค้าองค์กร ธุรกิจแบบไม่มีแผนการป้องกัน เช่นเดียวกัน โดยที่ในกรณีนี้จะผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอจะมีผลกำไรและผลกำไร สะสมที่มากกว่ากรณีลูกค้าองค์กร ธุรกิจแบบไม่มีแผนการป้องกัน โดยที่ในกรณีนี้ผลกำไรและผล กำไรสะสมในหน่วยเวลาที่ 1 ถึง 3 จะมากกว่าผู้ให้บริการคู่แข่ง แต่หลังจากนั้นก็จะมีน้อยกว่าไปจน ถึงสิ้นสุดระยะเวลาที่ศึกษา

**4.3.2.2 กรณีมีการกำกับอัตราโทรคมนาคมแบบเพดานราคา สำหรับในกรณีนี้** พบว่า ระดับ QoS ที่เหมาะสมของผู้ให้บริการ A นั้นก็จะคงที่อยู่ระดับที่ 4 ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา เช่นเดิม ในส่วนของอัตราค่าบริการที่เหมาะสมมีแนวโน้ม ทิศทางและขนาดเหมือนกับกรณีก่อน หน้าซึ่งก็คือกรณีลูกค้าองค์กร ธุรกิจแบบมีแผนการป้องกันแบบ C ในกรณีที่ไม่มีการกำกับอัตรา โทรคมนาคมแบบเพดานราคาทุกประการ เนื่องจากว่าไม่ได้รับผลกระทบจากเพดานราคาเลย เนื่องจากว่าอัตราค่าบริการที่เหมาะสมนั้นต่ำกว่าเพดานราคาค่อนข้างมากอยู่แล้ว จึงมีอัตรา ค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งเท่านั้นที่ได้รับผลกระทบจากเพดานราคา

และด้วยเหตุผลที่อัตราค่าบริการและระดับ QoS ที่เหมาะสมเป็นไปในลักษณะเดียวกัน นี้เอง จึงทำให้จำนวนผู้ใช้บริการ จำนวน OLTs ผลกำไร และผลกำไรสะสมเป็นไปในลักษณะ เดียวกันกับกรณีก่อนหน้าทั้งขนาด แนวโน้มและทิศทางด้วย

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ด้วยเหตุที่ว่ายังไม่มียานวิจัยใดที่สามารถให้คำตอบเกี่ยวกับมาตรการที่เหมาะสมที่ผู้ให้บริการควรจะใช้กับโครงข่ายเข้าถึงและบริการ FTTH เป็นต้นว่าอัตราค่าบริการควรจะเป็นเท่าไร ผู้ให้บริการจึงจะได้รับผลกำไรที่ดีที่สุด ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาปัญหาเกี่ยวกับการปรับอัตราค่าบริการที่เหมาะสมโดยอ้างอิงตามระดับคุณภาพการให้บริการ เพื่อที่จะทำให้ผู้ให้บริการได้รับผลกำไรที่สูงที่สุดในทุกๆ 6 เดือน โดยการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผสมผสานระหว่างปัญหาการหาเหมาะสมที่สุดและระบบพลวัตเข้าด้วยกัน ทั้งนี้ ในการนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ในการทดลองทางคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ภาษาไพธอนเข้ามาช่วยในการแปลงแบบจำลองให้อยู่ในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยที่การทดลองทางคณิตศาสตร์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งออกเป็น 2 กรณีใหญ่ คือ กรณีลูกค้าส่วนบุคคล และกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ เนื่องจากว่าลูกค้าทั้งสองกลุ่มมีความต้องการบริการที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลการศึกษาในบทที่ 4 ที่ได้จากการใช้แบบจำลองที่นำเสนอที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 พบว่า ระดับ QoS ที่เหมาะสมจะคงที่อยู่ที่ระดับที่ 4 เป็นส่วนใหญ่ โดยมีความเป็นไปได้ที่อาจจะมีการปรับลดลงไปตามความเหมาะสมในบางกรณี ส่วนอัตราค่าบริการที่เหมาะสมนั้นมีแนวโน้มที่จะลดลงตามเวลา ทั้งยังมีขนาดที่น้อยกว่าอัตราค่าบริการของผู้ให้บริการคู่แข่งเป็นส่วนใหญ่ด้วย ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่ความต้องการจะแข่งขันตลาดนั่นเอง อย่างไรก็ตาม จำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอนั้นก็ยิ่งน้อยกว่าจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการคู่แข่งอย่างเห็นได้ชัดอยู่ดี เนื่องจากการที่ผู้ให้บริการคู่แข่งเป็นผู้นำในตลาดและผู้ให้บริการจะพิจารณาบริการของคู่แข่งก่อนและเอนเอียงไปทางคู่แข่งมากกว่านั่นเอง ทั้งนี้ จำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอจะมีแนวโน้มที่เพิ่มตามเวลา สำหรับจำนวน OLTs ที่เหมาะสมนั้นพบว่าจะเริ่มตั้งแต่ 1 ทั้งกรณีลูกค้าส่วนบุคคล และลูกค้าองค์กรธุรกิจ

โดยในกรณีลูกค้าส่วนบุคคลนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะมีการปรับเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายของการศึกษา ในบางกรณี ส่วนผลกำไรและผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ นั้นมีแนวโน้มเพิ่มตามเวลา โดยที่ผลกำไรและผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ จะมากกว่าผลกำไรและผลกำไรสะสมของผู้ให้บริการคู่แข่งในช่วงครึ่งแรกของการศึกษาในกรณีลูกค้าส่วนบุคคล แต่จะน้อยกว่าคู่แข่งเป็นส่วนใหญ่ในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ จึงอาจกล่าวได้ว่า แบบจำลองที่นำเสนอ ไม่เหมาะสมกับการใช้กับกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ นอกจากนี้ พบว่า ผลที่ได้รับ ไม่ต่างกันมากนักในกรณีที่มีหรือไม่มีการค้ากับโตรคมนาคมแบบเพดานราคา ดังนั้น อาจจะสามารถกล่าวได้ว่า การกำกับอัตราโตรคมนาคมแบบเพดานราคาเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะหลีกเลี่ยงภาวะตลาดผูกขาด ซึ่งสอดคล้องกันกับ [5]

อย่างไรก็ตาม พบว่า การที่ผู้ให้บริการคู่แข่งเป็นผู้นำในตลาดอาจจะสามารถที่จะจำกัดการเคลื่อนไหวของผู้ให้บริการรายอื่นในตลาดได้ [5] นั่นเป็นจริงในวิทยานิพนธ์นี้ คือผู้ให้บริการที่ใช้แบบจำลองที่นำเสนอ นั้นถูกจำกัดให้กำหนดอัตราค่าบริการและระดับ QoS ได้ไม่มากนัก โดยขึ้นอยู่กับกลยุทธ์ที่ผู้ให้บริการคู่แข่งนำเสนอด้วย ทั้งยังสามารถจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการได้อย่างชัดเจน

ทั้งนี้ อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า ข้อดีและผลประโยชน์หลักที่ได้จากงานวิทยานิพนธ์นี้คือถ้าหากว่าเกิดเหตุการณ์และสภาพแวดล้อมดังที่ได้กำหนดในวิทยานิพนธ์นี้ขึ้น และผู้ให้บริการได้ใช้กลยุทธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่นำเสนอไปใช้ก็จะช่วยลดความเสี่ยงที่ผู้ให้บริการจะขาดทุนได้มาก และมีโอกาสที่จะได้รับผลกำไรที่สูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ ถึงแม้ว่าอาจจะไม่ได้สูงกว่าคู่แข่งเสมอไป ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีการลงทุน OLTs น้อย เพื่อให้สอดคล้องกับการที่ผู้ให้บริการอาจจะแข่งขันตลาดได้ไม่มากนัก สำหรับในส่วนของข้อเสียคือ ผลที่ได้จากการทดลองนี้เป็นเพียงแค่ผลที่อาจจะเกิดขึ้นได้เมื่อศึกษาปัญหาดังกล่าวในสภาวะแวดล้อมที่กำหนดขึ้นเท่านั้น ซึ่งตัวแปรนำเข้าที่แตกต่างกันก็จะส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างกันด้วย ดังนั้น การเลือกใช้ตัวแปรนำเข้าต่าง ๆ นั้นจำเป็นต้องมีการพิจารณาและกำหนดอย่างสมเหตุและสมผล อีกทั้งยังไม่เหมาะสมกับกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจอีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

อ้างอิงจากข้อสรุปที่ได้จากผลการศึกษาในข้างต้น ทำให้อาจกล่าวได้ว่า การออกแบบระบบ FTTH ที่สอดคล้องกันกับผลการศึกษาดังกล่าวนั้นควรจะเป็นไปในทิศทางที่มีอุปกรณ์ OLT shelves เพียงชั้นเดียวก็เพียงพอต่อการให้บริการระบบ FTTH สำหรับทั้งกรณีลูกค้าส่วนบุคคล และกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ ทั้งนี้ อาจแยกเป็นอุปกรณ์ OLT shelves หนึ่งชั้นต่อระบบ FTTH สำหรับกรณีลูกค้าส่วนบุคคล และอีกหนึ่งชั้นสำหรับกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจก็ได้ สำหรับส่วนของจำนวน OLT นั้นในตอนต้นควรจะเริ่มตั้งแต่ 1 ชั้นก่อนทั้งสองกรณี หลังจากนั้นก็ควรจะมีการตรวจสอบและติดตามจำนวนผู้ใช้บริการ ระดับคุณภาพ และความต้องการของผู้ใช้บริการเสมอ เพื่อที่จะได้มีการสำรอง ปรับปรุง ซ่อมแซม หรือติดตั้งอุปกรณ์ใหม่หรือเพิ่มเติมได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม สำหรับในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ แบบมีแผนการป้องกันแบบ C ก็จำเป็นที่จะต้องจัดหาและติดตั้งอุปกรณ์สำรองไว้ด้วย ซึ่งถ้าหากว่าการวางระบบ FTTH นั้นเป็นการวางระบบใหม่ สำหรับลูกค้าองค์กรธุรกิจนั้นควรที่จะวางระบบเป็นแบบที่มีแผนการป้องกันแบบ C เนื่องจากจะทำให้ได้รับผลกำไรที่สูงกว่า อีกทั้งยังสอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าองค์กรธุรกิจมากกว่าด้วย ซึ่งสอดคล้องกันกับ [12][51] ทั้งนี้ การจัดหาและติดตั้งอุปกรณ์ OLT และ OLT shelves ในลักษณะข้างต้นหรือเรียกได้ว่าเท่าที่จำเป็นกับการใช้งานจะคุ้มค่ากว่าการที่ลงทุนวางระบบไปในครั้งแรกครั้งละมากๆ แบบผู้ให้บริการคู่แข่ง เพราะมีค่าใช้จ่ายสูง และทำให้มีแนวโน้มที่จะขาดทุนในตอนต้นสูง เนื่องจากว่าจะนอกจากที่จะต้องจัดหาแล้วยังต้องบำรุงรักษาจัดเก็บอุปกรณ์ที่ไม่ได้ใช้งานอีกด้วย

สำหรับระดับ QoS นั้นควรที่จะเริ่มต้นที่ระดับที่ดีที่สุด จากนั้นก็ควรที่จะมีการติดตามตรวจสอบว่าควรที่จะพัฒนาระดับ QoS ขึ้นไปหรือไม่อย่างไรในแต่ละหน่วยเวลา เพราะเมื่อเวลาผ่านไป ทำให้จำนวนผู้ใช้บริการเพิ่มขึ้น อีกทั้งความต้องการทราฟฟิกของผู้ใช้บริการแต่ละรายก็เพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องติดตามและตรวจสอบอยู่เสมอว่าตรงกับเงื่อนไข QoS ที่ให้บริการหรือไม่

และสืบเนื่องจากข้อจำกัดที่ว่าแบบจำลองที่นำเสนอขึ้นนี้อาจจะใช้ได้ผลดีในกรณีที่มีค่าตัวแปรดังเช่นในการทดลองนี้เท่านั้น และใช้ไม่ได้ผลดีในกรณีลูกค้าองค์กรธุรกิจ ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตจึงมุ่งเน้นที่จะปรับปรุงแบบจำลองดังกล่าวให้สามารถจะแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ ดังเช่นเพิ่มข้อจำกัดที่ว่าอัตราค่าบริการจะต้องไม่มากกว่าคู่แข่งในกรณีที่เสนอบริการที่ระดับเดียวกันหรือ

ต่ำกว่า อาจจะมีข้อจำกัดบางอย่างเกี่ยวกับลูกค้าองค์กรธุรกิจลงไป และเพิ่มข้อจำกัดเกี่ยวกับกลยุทธ์ของผู้ให้บริการคู่แข่ง เป็นต้น นอกจากนี้ การพิจารณาเกี่ยวกับอัตราโทรฟิคที่มีการแจกแจงแบบไม่เอกรูปก็เป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาไปในรายละเอียด ยิ่งไปกว่านั้น งานวิจัยนี้ยังสามารถที่จะนำไปประยุกต์เกี่ยวเนื่องกันกับการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบระบบของ FTTH ได้อีกด้วย

นอกจากนี้ สืบเนื่องจากการเลือกใช้ตัวแปรนำเข้าต่าง ๆ นั้นจำเป็นต้องมีการพิจารณาและกำหนดอย่างสมเหตุและสมผล เพราะตัวแปรนำเข้าที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างกันด้วย ดังนั้น ถ้าหากว่ามีการนำข้อมูลจริงของการใช้กลยุทธ์ ผลกำไร และความยินดีที่จะจ่ายที่เกิดขึ้นจริงเข้ามาประกอบกันกับแบบจำลองที่นำเสนอ ก็จะหาแบบจำลองที่นำเสนอเป็นไปในทิศทางที่ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากว่ามีผลกำไรที่เกิดขึ้นจริงแล้ว ก็สามารถที่จะนำมาปรับปรุงแบบจำลองได้อีกด้วย นอกจากนี้ อาจจะต้องพิจารณาข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับความยินดีที่จะจ่ายของผู้ให้บริการในรูปแบบของ Chance constraint ว่าจะสามารถครอบคลุมผู้ให้บริการได้ขั้นต่ำเท่าไร ด้วยความเชื่อมั่นเท่าไร เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีเรื่องการพิจารณาในส่วนของการใช้กำหนดการเฟ้นสุ่มเข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหาที่เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาแก้ไขปัญหา

ทั้งนี้ เนื่องจากว่าในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ผู้ให้บริการคู่แข่งเป็นผู้นำในตลาดเสมอ แต่ไม่ได้สนใจว่าผู้ให้บริการคู่แข่งนั้นจะต้องการที่ได้รับผลกำไรที่สูงที่สุดด้วยหรือไม่ ซึ่งคล้ายคลึงกันกับลักษณะของ Stackelberg game ดังนั้น สำหรับงานวิจัยในอนาคต การศึกษาในเชิงของ Stackelberg game จึงจัดว่าเป็นการศึกษาปัญหาหนึ่งในอีกทิศทางหนึ่งที่น่าสนใจมาก

## รายการอ้างอิง

- [1] ITU-T, Rec. G.987.1.10-Gigabit-capable passive optical networks. [Online]. 2010. Available from: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.1-201001-I/en> [2013, April 25]
- [2] The ECOSYS Project. Deliverable 16: Report on techno-economic methodology. [Online]. 2006. Available from : [http://ecosys.optcomm.di.uoa.gr/deliverables/ECOSYS\\_Del16\\_v1.1.pdf](http://ecosys.optcomm.di.uoa.gr/deliverables/ECOSYS_Del16_v1.1.pdf) [2012, July 21]
- [3] Duarte, A. และคณะ. Market Modelling in Access Networks: an approach combining dynamic systems and Game Theory, Proceedings of 10th Conference of Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics (CTTE 2011), pp. 1-7, 2011.
- [4] IDATE. White Paper FTTx 2012. [Online]. 2012. Available from : [http://www.idate.fr/private/idade/UserFiles/File/telechargements\\_associes/pages/FreeDownload/FTTx2012\\_WhitePaper\\_web.pdf](http://www.idate.fr/private/idade/UserFiles/File/telechargements_associes/pages/FreeDownload/FTTx2012_WhitePaper_web.pdf) [2012, July 5]
- [5] Elixmann, D., Ilic, D., Neumann, K. H., และ Plückebaum, T. The Economics of Next Generation Access - Final Report. WIK-Consult Report for the European Competitive Telecommunication Association (ECTA) [Online]. 2008. Available from : [http://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/sites/ppp.worldbank.org/files/documents/The\\_Economics\\_of\\_Next\\_Generation\\_Access\\_Final\\_Report.pdf](http://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/sites/ppp.worldbank.org/files/documents/The_Economics_of_Next_Generation_Access_Final_Report.pdf) [2013, April 25]
- [6] Beardsley, S., Enriquez, L., Güvendi, M. และ Sandoval, S. Creating a Fiber Future: The Regulatory Challenge, The Global Information Technology Report 2010–2011, pp. 99-108, 2011.



- [7] Peitz, M. Asymmetric regulation of access and price discrimination in telecommunications. Journal of Regulatory Economics 28 (November 2005) : 327-343.
- [8] OPTA. Access pricing: a key element in effective NGN Access regulation - Balancing efficient investment and effective competition. WIK conference, 2009.
- [9] Araujo, M. และ Duarte, A. A Comparative Study on Cost-Benefit Analysis of Fiber-to-the-Home Telecommunications Systems in Europe. 2011 Baltic Congress on Future Internet Communications (BCFIC Riga), pp.65-69, 2011.
- [10] Lakic, B. และ Hajduczenia, M. On Optimized Passive Optical Network (PON) deployment. Second International Conference on Access Networks & Workshops, pp. 1-8, 2007.
- [11] Van Der Wee, M. และคณะ. A modular and hierarchically structured techno-economic model for FTTH deployments Comparison of technology and equipment placement as function of population density and number of flexibility points. 16th International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), pp.1-6, 2012.
- [12] Chen, J., Wosinka, L., Machuca, C.M., และ Jaeger, M. Cost vs. Reliability Performance Study of Fiber Access Network Architectures. IEEE Communications Magazine 48 (February 2010) : pp.56-65.
- [13] Olsen, B. และคณะ. Techno-Economic Evaluation of Narrowband and Broadband Access Network Alternatives and Evolution Scenario Assessment. IEEE Journal on Selected Areas In Communications 14(August 1996) : 1184-1203.
- [14] CELTIC-ECOSYS, 2002–2006, “techno-ECONomics of integrated communication SYStems and services,” CELTIC. [Online]. Available from : <http://www.celtic-ecosys.org/>. [2013, April 25]

- [15] Fuzesi, P. and Vidacs, A. Game Theoretic Analysis of Network Dimensioning Strategies in Differentiated Services Networks. IEEE International Conference on Communications, pp. 1069-1073, 2002.
- [16] Rosston, G., Savage, S.J., and Waldman, D. Household Demand for Broadband Internet Service. Communications of the ACM 54 (February 2011) : 29-31.
- [17] Rappoport, P. and Alleman, J. Modeling Demand for Telecom Services Using Surveys [Online]. 2004. Available from : <http://www.itu.int/ITU-D/finance/work-cost-tariffs/events/expert-dialogues/forecasting/rappoport-broadband.pdf> [2013, April 25]
- [18] Khil, M. and คณษ. Traffic analysis and characterization of Internet user behavior. 2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), pp. 224-231, 2010.
- [19] Li, J. and คณษ. A Five Year Perspective of Traffic Pattern Evolution in a Residential Broadband Access Network. Future Network & Mobile Summit (FutureNetw), pp. 1-9, 2012.
- [20] Monath, T., Kristian, N., Cadro, P., Katsianis, D. and D. Varoutas. Economics of Fixed Broadband Access Network Strategies. IEEE Communications Magazine 41(September 2003) : 132-139.
- [21] Smith, S., Business Class Services over a GPON Network. Optical Fiber Communication Conference, 2006.
- [22] Rokkas, T., Neokosmidis, I., Katsianis, D. and Varoutas, D. Cost Analysis of WDM and TDM Fiber-to-the-Home (FTTH) Networks: A System-of-Systems Approach. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews. 42 (November 2012) : 1842-1853.

- [23] Norton, J., and Bass, F. A Diffusion Theory Model of Adoption and Substitution for Successive Generations of High-Technology Products. Management Science. 33 (September 1987) : 1069-1086
- [24] Stragier, J. and others. A Priori Forecasting of FTTH uptake: Connecting Segmentation Forecasting to Timing Forecasting. 11th Conference of Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics (CTTE - 2012), 2012.
- [25] Lannoo, B. and others. Economic Benefits of a Community Driven Fiber to the Home Rollout. Broadband Communications, Networks and Systems, pp. 436-443, 2008.
- [26] Casier, K., Lannoo, B., Ooteghem, J., Verbrugge, S., Colle, D., Pickavet, M. and Demeester, P. Game-Theoretic Optimization of a Fiber-to-the-Home Municipality Network Rollout. Journal of Optical Communications and Networking. 1 (June 2009) : 30-42.
- [27] Jia, L. and Tong, L. Optimal Pricing for Residential Demand Response: A Stochastic Optimization Approach. 2012 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), pp. 1879-1884, 2012.
- [28] Huang, L. and Neely, M. The Optimality of Two Prices: Maximizing Revenue in a Stochastic Communication System, IEEE/ACM Transactions on Networking 18 (April 2010) : 406-419.
- [29] Turhan, A., Alanyali, M. and Starobinski, D. Dynamic Pricing of Preemptive Service for Elastic Demand. IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2084-2089, 2012.
- [30] Prysmian Group. DrakaXSNet FTTH Software Suite. [Online]. Available from: <http://communications.draka.com/sites/eu/Pages/Software-FTTH-Software-Suite.aspx>. [2013, July 9]

- [31] ComSof. FiberPlanIT - FTTx Network Design Tool, [Online]. Available from: <http://www.comsof.com/fiberplanit>. [2013, July 9]
- [32] Germano, J. Eastern European Operators to Talk Regulatory Challenges, ARPU and CAPEX at Budapest Summit. [Online]. 2012 Available from: <http://www.whatech.com/members-news/network-cabling/10499-eastern-european-operators-to-talk-regulatory-challenges-arpu-and-capex-at-budapest-summit>. [2013, July 9]
- [33] Angelou, G. and Economides A. Broadband business for new entrants A techno-economic analysis for utility based firms. Telecommunications Internet and Media Techno Economics (CTTE), pp. 1-6, 2010.
- [34] Casier, K. and Kuylenstierna. Impact of Sensitivity and Iterative Calculations on Cost-Based Pricing. 6th Conference on Telecommunication Techno-Economics, pp. 1-8, 2007.
- [35] Kunigonis, M. FTTH Explained: Delivering efficient customer bandwidth and enhanced services. [Online]. 2009 Available from: <http://www.corning.com/WorkArea/downloadasset.aspx?id=10889>. [2013, April 16].
- [36] Kani, J., Bourgart, F., Cui, A., Rafel, A., and Rodrigues, S. Next-Generation PON—Part I: Technology Roadmap and General Requirements. IEEE Communications Magazine (November 2009) : 43-49
- [37] Bass, F. A New Product Growth for Model Consumer Durables The Bass Model. Management Science. 15 (January 1969) : 215-227
- [38] Dodson, J. New Product Forecasting: The Bass Model. [Online]. Available from: [faculty.washington.edu/jdods/pdf/MktgTool\\_Bass.pdf](http://faculty.washington.edu/jdods/pdf/MktgTool_Bass.pdf). [2013, July 18].
- [39] Alcatel-Lucent. 7360 ISAM FX. [Online]. Available from: <http://www.alcatel-lucent.com/products/7360-isam-fx-shelf>

- [40] Rokkas, T., Katsianis, D. and Varoutas, D. Techno-economic Evaluation of FTTC/VDSL and FTTH Roll-Out Scenarios: Discounted Cash Flows and Real Option Valuation. Journal of Optical Communications and Networking. 2 (September 2010) : 760-772.
- [41] Bharati, S. and Saengudomlert, P. Analysis of Mean Packet Delay for Dynamic Bandwidth Allocation Algorithms in EPONs. Journal of Lightwave Technology. 28 (December 2010) : 3454-3462.
- [42] F. Aurzuda and K. S. Chong. Capacity and Delay Analysis of Next-Generation Passive Optical Networks (NG-PONs). IEEE Transactions on Communications 59 (May 2011) : 1378-1388.
- [43] Point Topic. Point Topic's Operator Source: Broadband tariff benchmarks: Q2 2012. [Online]. 2012, Available from: <http://point-topic.com/wp-content/uploads/2013/02/Broadband-Tariff-Benchmark-Report-Q2-2012-final.pdf> [2013, July 18]
- [44] Hecht, J. Understanding Fiber Optics. Pearson Education, Inc., 2002.
- [45] Sullivan, W.G., Wicks, E.M. and Koelling, C. P. Engineering economy. 14th ed. New Jersey: Pearson Education, 2009.
- [46] Kulkarni, S., El-Sayed, M., Gagen, P. and Polonsky B. FTTH network economics: Key parameters impacting technology decisions. Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, pp. 1-27, 2008.
- [47] Shumate, P. Fiber-to-the-Home: 1977–2007. Journal of Lightwave Technology 26 (May 2008) : 1093-1103.
- [48] Effenberger, F., and K. S. Chong. An introduction to PON technologies. IEEE Communications Magazine 45 (March 2007) : S17-S25

- [49] Fiber to the home council Europe. FTTH Handbook. [Online]. 2012. Available from: <http://www.ftthcouncilmena.org/documents/Reports/FTTH-Handbook-2012-V5.0-English.pdf>. [2013, April 16].
- [50] Alwayn, V. Optical Network Case Studies, Optical Network Design and Implementation, pp.696-698, Indianapolis: Cisco Press, 2004.
- [51] Koonen, T. Fiber to the Home/Fiber to the Premises: What, Where, and When?. Proceedings of the IEEE 94 (May 2006) : 911-934.
- [52] Eventhelix.com. Reliability and Availability Basics. [Online]. Available from : [http://www.eventhelix.com/RealtimeMantra/FaultHandling/reliability\\_availability\\_basics.htm#.UXTrQ8qn1kl](http://www.eventhelix.com/RealtimeMantra/FaultHandling/reliability_availability_basics.htm#.UXTrQ8qn1kl) [2013, April 23]
- [53] Neubeck, K. Practical Reliability Analysis, New Jersey: Pearson Education, 2004.
- [54] Chong, E.K.P., และ Zak, S.H. An Introduction to Optimization, NY: Wiley, 2001.
- [55] Taha, H.A. Operations Research: An Introduction. NJ: Pearson Education, Inc., 2003.
- [56] Gurobi Optimization, Inc. "Gurobi Optimizer Reference Manual", 2012, [Online]. Available from : <http://www.gurobi.com> [2013, April 25]
- [57] Rowell, D. และ Wormley, D.N. System dynamics : an introduction. Prentice-Hall, Inc., 1997.
- [58] Montgomery, D. และ Runger, G. Applied Statistics and Probability for Engineers. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd., 2007.
- [59] DeLurgio, S. Forecasting Principles and Applications. Irwin/McGraw-Hill, 1998.
- [60] สถาบันการใช้และการเชื่อมต่อโครงข่ายโทรคมนาคม สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ. การกำกับดูแลอัตราค่าบริการโทรคมนาคม. กรุงเทพฯ, 2009.

- [61] ICT regulation toolkit. Module 2. Competition and Price Regulation. [Online]. 2009. Available from : [www.ictregulationtoolkit.org/en/SectionPDF.1560.html](http://www.ictregulationtoolkit.org/en/SectionPDF.1560.html)[2012,September 7]
- [62] The ECOSYS Project, Deliverable 6: OPEX models. [Online]. 2005. Available from : [http://ecosys.optcomm.di.uoa.gr/deliverables/ECOSYS\\_Del06\\_v1.0.pdf](http://ecosys.optcomm.di.uoa.gr/deliverables/ECOSYS_Del06_v1.0.pdf) [2013, April 7]
- [63] Jones, E., Oliphant, T., Peterson, P. และคณะ. SciPy: Open Source Scientific Tools for Python. [Online]. 2001. Available from : <http://www.scipy.org> [2012, December 21]
- [64] Hunter, J.D. Matplotlib: A 2D graphics environment. Computing In Science & Engineering. 9 (2007) : 90-95.
- [65] Rates Table. [Online]. 2013, Available from: <http://www.x-rates.com/table/?from=USD&amount=1> [2013, August 27]
- [66] Google fiber. [Online]. 2013, Available from: <https://fiber.google.com/about/> [2013, August 27]
- [67] Quantum web. Strong price elasticity of FTTx in Europe: One Euro down, 400,000 Customers Up. [Online]. 2013, Available from: <http://www.quantum-web.com/index.php/blog/item/129-strong-price-elasticity-of-fttx-in-europe-one-euro-down-400000-customers-up> [2013, August 28]
- [68] Machuca, C.M., Chen, J. และ Wosinska, L. Cost-Efficient Protection in TDM PONs. IEEE Communications Magazine. 50 (August 2012) : 110-117.

ภาคผนวก



## ภาคผนวก ก

### ข้อผิดพลาดของแบบจำลองที่งานวิจัย [3] นำเสนอ

ดังเช่นที่ได้กล่าวไปในบทที่ 1 ว่าแบบจำลองที่งานวิจัย [3] นำเสนอนั้นมีจุดบกพร่องบางประการ กล่าวคือ ผู้วิจัยซึ่งก็คือ A. Duarte และคณะ ได้สร้างตัวแบบจำลองพฤติกรรมของตลาดและผลของการแข่งขันของผู้ให้บริการตลาดโดยใช้แนวคิดของระบบพลวัต (System Dynamics) และแนวคิดทฤษฎีเกม (Game Theory) เข้ามาใช้ในการพิจารณา โดยเสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์อ้างอิงจากตัวแบบที่นำเสนอในรายงาน ECOSYS: Deliverable 16 [2] ทว่า เมื่อพิจารณาในรายละเอียดของแบบจำลองที่งานวิจัย [3] นำเสนอประกอบกับงานวิจัย [2] พบว่ามีข้อขัดแย้งบางประการ ดังที่จะแจกแจงในรายละเอียดต่อไปนี้

ในรายงาน [2] กำหนดให้ระดับคุณภาพเฉลี่ยของตลาด ณ เวลา  $t$  แทนด้วย  $\bar{Q}(t)$  เท่ากับผลคูณของจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการแต่ละรายคูณกับระดับคุณภาพบริการของผู้ให้บริการรายนั้นและหารด้วยจำนวนผู้ใช้บริการทั้งหมดในตลาด หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ การหาค่าเฉลี่ยของระดับคุณภาพบริการโดยใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักซึ่งมีจำนวนผู้ใช้บริการเป็นตัวถ่วงน้ำหนักนั่นเอง โดยที่ได้ถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n [Q_i \times M_i]}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (1)$$

โดยที่  $M_i$  แทนจำนวนผู้ใช้บริการทั้งหมดของผู้ให้บริการ  $i$  ในตลาด และ  $Q_i$  แทนระดับคุณภาพที่ผู้ใช้บริการ  $i$  ได้ให้บริการ

นอกจากนี้ กำหนดให้  $QR_i$  แทนระดับคุณภาพสัมพัทธ์ (relative quality) ของผู้ใช้บริการ  $i$  กล่าวคือ เป็นระดับคุณภาพของผู้ให้บริการ  $i$  เทียบกับระดับคุณภาพเฉลี่ยของตลาดนั่นเอง

$$QR_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}} \quad (2)$$

อีกทั้งยังกำหนดให้  $E_q$  แทนความยืดหยุ่นของคุณภาพ (quality elasticity) โดยกำหนดให้เท่ากับสัดส่วนของร้อยละของการเติบโตของผู้ใช้บริการกับร้อยละของการเติบโตของคุณภาพซึ่งถูกแทนด้วย  $dM$  และ  $dQ$  ตามลำดับ

$$E_q = \frac{dM}{dQ} \quad (3)$$

ทั้งนี้ ในงานวิจัย [2] นั้น กำหนดให้ค่าความยืดหยุ่นของคุณภาพนั้นเป็นค่าคงที่ใดๆที่กำหนดขึ้นมาจากความเหมาะสม จึงไม่จำเป็นต้องทราบ  $dQ$  ก็ได้ อย่างไรก็ตาม  $dM$  จำเป็นต้องถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อที่จะใช้ในการคำนวณหา  $M_i(t)$  แทนจำนวนผู้ใช้บริการทั้งหมดของผู้ให้บริการ  $i$  ในตลาด ณ เวลา  $t$  ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$dM_i = E_q \times (QR_i - 1) \quad (4)$$

$$M_i(t) = M_i(t-1) + dM_i(t-1) \quad (5)$$

เมื่อพิจารณาในรายละเอียดของแบบจำลองที่งานวิจัย [3] ได้นำเสนอพบว่า งานวิจัย [3] ได้นำสมการที่ (1)-(5) มาใช้ต่อในงานวิจัย โดยได้ปรับปรุงเพิ่มเติมเล็กน้อย ดังนี้

$$\bar{Q}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n [Q_i(t) \times M_i(t)]}{\sum_{i=1}^n M_i(t)} \quad (6)$$

$$QR_i(t) = \frac{Q_i(t)}{Q(t)} \quad (7)$$

$$E_q(t) = \frac{\Delta M(t)}{\Delta Q(t)} \quad (8)$$

$$\Delta M_i(t) = E_q(t) \times (QR_i(t) - 1) \quad (9)$$

$$M_i(t) = M_i(t - \Delta t) + \Delta M_i(t - \Delta t) \quad (10)$$

รวมถึงได้สร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพิ่มเติม ดังต่อไปนี้

$$\Delta Q_i(t) = Q_i(t - \Delta t) - \bar{Q}(t) \quad (11)$$

$$\Delta Q_i(t - \Delta t) = Q_i(t - \Delta t) - \bar{Q}(t - \Delta t) \quad (12)$$

เมื่อรวมสมการที่ (11) และ (12) เข้าด้วยกัน จะได้ว่า

$$\Delta Q_i(t - \Delta t) + \bar{Q}(t - \Delta t) = \Delta Q_i(t) + \bar{Q}(t) \quad (12)$$

โดยที่สมการนี้จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อฟังก์ชันคุณภาพดังกล่าวนี้มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งขัดกันกับสมมติฐานของความยืดหยุ่นของคุณภาพที่ได้กำหนดไว้ใน [2] อีกทั้งยังขัดกับสมมติฐานที่งานวิจัย [3] ได้กำหนดขึ้น ซึ่งได้แก่สมมติฐานของจำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยของผู้ให้บริการ และความยืดหยุ่นของคุณภาพ ณ เวลา  $t$  ที่ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังแสดงในสมการที่ (13) และ (14)

$$\overline{M(t - \Delta t)} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i^2(t)}{\sum_{i=1}^n M_i(t)} \quad (13)$$

$$E_q(t) = \frac{\frac{\Delta M_i(t - \Delta t)}{M(t - \Delta t)}}{\frac{\Delta Q_i(t - \Delta t)}{Q(t - \Delta t)}} = \frac{\Delta M_i(t)}{\Delta Q_i(t)} = E_q \quad (14)$$

และเมื่อนำทั้งสองสมการรวมเข้าด้วยกัน จะได้ว่า

$$E_q(t) = \frac{\frac{\Delta M_i(t - \Delta t)}{\sum_{i=1}^n M_i^2(t - \Delta t) / \sum_{i=1}^n M_i(t - \Delta t)}}{\frac{\Delta Q_i(t - \Delta t)}{\sum_{i=1}^n [Q_i(t - \Delta t) \times M_i(t - \Delta t)] / \sum_{i=1}^n M_i(t - \Delta t)}}$$

คูณด้วย  $\frac{1}{\sum_{i=1}^n M_i(t-\Delta t)}$  ทั้งเศษส่วนจะได้ว่า

$$E_q(t) = \frac{\frac{\Delta M_i(t-\Delta t)}{\sum_{i=1}^n M_i^2(t-\Delta t)}}{\frac{\Delta Q_i(t-\Delta t)}{\sum_{i=1}^n [Q_i(t-\Delta t) \times M_i(t-\Delta t)]}}$$

จัดรูปใหม่ ได้ดังนี้

$$E_q(t) = \frac{\Delta M_i(t-\Delta t)}{\Delta Q_i(t-\Delta t)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n [Q_i(t-\Delta t) \times M_i(t-\Delta t)]}{\sum_{i=1}^n M_i^2(t-\Delta t)}$$

เนื่องจากว่า ความยืดหยุ่นของคุณภาพได้ถูกกำหนดให้ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้น

$$E_q(t) = E_q(t) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n [Q_i(t-\Delta t) \times M_i(t-\Delta t)]}{\sum_{i=1}^n M_i^2(t-\Delta t)}$$

จะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^n [Q_i(t-\Delta t) \times M_i(t-\Delta t)] = \sum_{i=1}^n M_i^2(t-\Delta t) .$$

จากสมการ จะเห็นได้ชัดว่าตัวแบบทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวยังมีข้อบกพร่องอยู่ กล่าวคือ สมการดังกล่าวไม่สามารถที่จะเป็นไปได้

## ภาคผนวก ข

### ข้อจำกัดของการคำนวณจำนวนผู้ใช้บริการของผู้ให้บริการแต่ละรายโดยใช้แบบจำลอง Chromor I ใน ECOSYS: Deliverable 16 [2]

อ้างอิงจากงานวิจัย [2] ที่มีการใช้แบบจำลอง COHOMOR I ในการหาจำนวนผู้ใช้บริการ หรือส่วนแบ่งทางการตลาดของผู้ให้บริการแต่ละราย ซึ่งก็คือสมการที่ (1)-(5) ในภาคผนวก ก นั้นเอง เมื่อนำแบบจำลองดังกล่าวมาทดลองใช้ในกรณีที่จำนวนผู้ใช้บริการทั้งหมดในตลาดนั้นมีค่า เป็นศูนย์ ที่เวลา  $t-1$  จะได้ว่า

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n [Q_i \times M_i]}{\sum_{i=1}^n M_i} = \frac{0}{0}$$

และเมื่อระดับคุณภาพเฉลี่ยเป็นศูนย์หารด้วยศูนย์ซึ่งหาค่าไม่ได้แล้ว ก็จะส่งผลให้ค่าอื่นๆที่ เวลาดังกล่าวไม่สามารถหาค่าได้ด้วย ดังนั้น จึงไม่สามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวหาจำนวน ผู้ใช้บริการหรือส่วนแบ่งทางการตลาดของผู้ให้บริการแต่ละราย ณ เวลาถัดไปได้

นอกจากนี้ การคำนวณดังกล่าวยังจำเป็นต้องป้อนข้อมูลเกี่ยวกับ  $E_q$  เข้าไปในการที่จะ คำนวณความเปลี่ยนแปลงของตลาด ซึ่งอาจจะทำให้ผลที่ได้จากตัวแบบดังกล่าวไม่แม่นยำเท่าที่ควร เนื่องจากไม่ทราบความยืดหยุ่นของคุณภาพที่เกิดขึ้นจริง อีกทั้ง จำนวนผู้ใช้บริการยังแปรผันตาม คุณภาพของเทคโนโลยีที่ผู้ให้บริการเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

## ภาคผนวก ค

### ข้อจำกัดของจำนวน OLTs ที่อ้างอิงจาก queuing delay

จากข้อจำกัดที่ (3.21) จะเห็นว่ามีการคำนวณหาจำนวน OLTs ขั้นต่ำที่สุดที่ทำให้ระบบสามารถให้บริการได้ โดยมี queuing delay น้อยกว่า delay ที่ได้ทำการรับรองไว้ โดย queuing delay ซึ่งอยู่ในรูปของ M/G/1 ของระบบ NG-PON นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) คือ

$$\Phi(\rho) = \frac{\rho \left( \frac{\sigma_L^2}{L} + \bar{L} \right)}{2C(1-\rho)}$$

เนื่องจากว่าปริมาณกราฟฟิคที่แสดงในสมการที่ (2.2) นั้นมีค่าเท่ากับอัตรากราฟฟิคหารด้วยความจุของระบบ ซึ่งเมื่อแทนด้วยสัญลักษณ์เดียวกันกับที่ใช้ในแบบจำลองที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะได้ว่า [42]

$$\rho_j = \frac{b(t)x_j(t)}{O_j(t) \cdot \Omega}$$

ดังนั้น เมื่อนำปริมาณกราฟฟิคดังกล่าว ไปแทนในสมการที่ (2.1) จะได้ว่า

$$\Phi(\rho_j) = \frac{\frac{b(t)x_j(t)}{O_j(t) \cdot \Omega} \left( \frac{\sigma_L^2}{L} + \bar{L} \right)}{2O_j(t) \cdot \Omega \left( 1 - \frac{b(t)x_j(t)}{O_j(t) \cdot \Omega} \right)}$$

ดังเช่นที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า จุดประสงค์ก็คือ การคำนวณหาจำนวน OLTs ขั้นต่ำที่สุดที่ทำให้ระบบสามารถให้บริการได้ โดยมี queuing delay น้อยกว่า delay ที่ได้ทำการรับรองไว้ โดยที่ delay ที่รับรองไว้ในแต่ละระดับ  $j$  นั้นถูกแทนด้วย  $q_j$  ดังนั้น จึงได้ว่า

$$q_j \geq \frac{\frac{b(t)x_j(t)}{O_j(t) \cdot \Omega} \left( \frac{\sigma_L^2}{L} + \bar{L} \right)}{2O_j(t) \cdot \Omega \left( 1 - \frac{b(t)x_j(t)}{O_j(t) \cdot \Omega} \right)}$$

ทั้งนี้ เมื่อกระจายพจน์  $O_j(t) \cdot \Omega$  เข้าไปในวงเล็บของส่วนที่เป็นส่วน และย้ายข้างไปคูณกับ  $q_j$  จะได้ว่า

$$2q_j (O_j(t) \cdot \Omega - b(t)x_j(t)) \geq \frac{b(t)x_j(t)}{O_j(t) \cdot \Omega} \left( \frac{\sigma_L^2}{L} + \bar{L} \right)$$

ต่อมา ทำการคูณพจน์  $\frac{O_j(t)}{2q_j}$  เข้าไปตลอดสมการ:

$$\Omega \cdot (O_j(t))^2 - O_j(t)b(t)x_j(t) - \frac{b(t)x_j(t)}{2q_j \cdot \Omega} \left( \frac{\sigma_L^2}{L} + \bar{L} \right) \geq 0$$

จากสมการดังกล่าว สังเกตได้ว่า อยู่ในรูปของสมการกำลังสองทั่วไปที่สามารถหาผลเฉลยได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 + 4ac}}{2a}$$

โดยที่  $x = O_j(t)$  ,  $a = \Omega$  ,  $b = -b(t)x_j(t)$  และ  $c = -\frac{b(t)x_j(t)}{2q_j \cdot \Omega} \left( \frac{\sigma_L^2}{L} + \bar{L} \right)$  ซึ่ง

อาจจะมีค่าที่เป็นไปได้สองค่า แต่ในกรณีนี้จะคิดเพียงแค่ว่าในกรณีที่  $-b + \sqrt{b^2 + 4ac}$  เท่านั้น ทั้งนี้เมื่อแทนค่าตามสมการจะได้ว่า:

$$O_j(t) \geq \frac{b(t)x_j(t) + \sqrt{\left( b(t)x_j(t) \right)^2 + 2b(t)x_j(t) \left( \frac{\sigma_L^2}{L} + \bar{L} \right)}}{2\Omega}$$

ซึ่งสมการดังกล่าวก็คือข้อจำกัดที่ (3.21) นั่นเอง

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวลภัสสิริ เทียนทอง เกิดเมื่อวันที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2532 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาสถิติ ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2553 โดยในระหว่างการศึกษาปีสุดท้ายได้ทำงานแบบไม่เต็มเวลาที่สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย เป็นพนักงานรายวัน ในตำแหน่งพนักงานเก็บข้อมูลอุตสาหกรรม แผนกข้อมูลและวิเคราะห์อุตสาหกรรม ฝ่ายพัฒนาธุรกิจ ตั้งแต่เดือนมิถุนายน ถึง กันยายน พ.ศ. 2553 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554 สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยโทรคมนาคม

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการตีพิมพ์ และเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ จำนวน 1 ฉบับ ดังนี้

- บทความวิชาการในงานประชุมวิชาการ The 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2013) จัดขึ้น ณ มารีย์ไทม์ ปาร์ค แอนด์ สปาร์ต รีสอร์ท กระบี่ ประเทศไทย ในวันที่ 15-17 พฤษภาคม 2556 ในชื่อบทความเรื่อง A Proposed Network Economic Strategic Model for FTTH Access Network