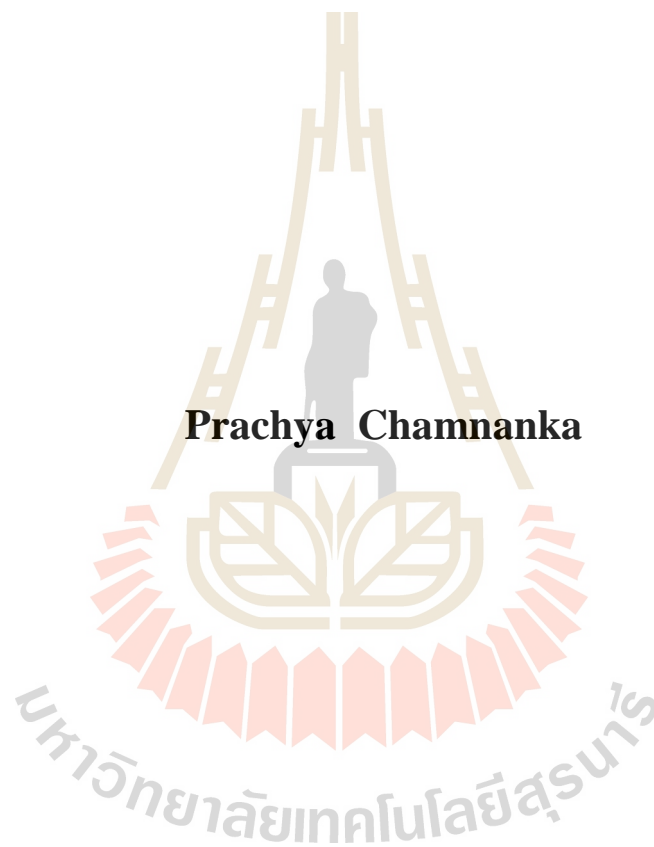


การวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่มีประสิทธิภาพ  
สำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2559

**EFFICIENT PLACEMENT OF FEMTOCELL  
BASE STATIONS FOR 4G-LTE NETWORKS  
IN MULTI-FLOOR BUILDINGS**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2016**

การวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่มีประสิทธิภาพ  
สำหรับเครือข่ายสี่เซลล์ที่อยู่ในอาคารหลายชั้น

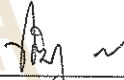
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.มนต์ทิพย์ภา อุچارสกุล)

ประธานกรรมการ



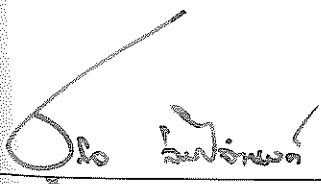
(ผศ. ดร.ชุตีมา พรหมมาก)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)

กรรมการ



(ศ. ดร.ชุกิจ ลิ้มปิงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร.กนัตถ์ร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปรัชญา ชำนาญคำ : การวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับ  
เครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น (EFFICIENT PLACEMENT OF  
FEMTOCELL BASE STATIONS FOR 4G-LTE NETWORKS IN MULTI-FLOOR  
BUILDINGS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก, 166 หน้า.

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ (Femtocell Technology) ร่วมกับเทคโนโลยี  
สี่จีแอลทีอี (4G-Long Term Evolution : 4G-LTE) ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากเมื่อนำ  
เทคโนโลยีเฟมโตเซลล์มาประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายสี่จีแอลทีอีจะทำให้อัตราการส่งข้อมูลมีความ  
รวดเร็วมากยิ่งขึ้น อีกทั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ (Femtocell Base Stations) ใช้พลังงานที่ต่ำ สามารถ  
ติดตั้งได้ง่าย ไม่มีอุปกรณ์ในการติดตั้งที่ซับซ้อน เมื่อเทียบกับการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณ  
ภายในอาคารแบบอื่นๆ ซึ่งการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานภายในอาคารหลายชั้นที่เหมาะสม  
จะส่งผลต่อคุณภาพความแรงสัญญาณและคุณภาพอัตราเร็วในการให้บริการของผู้ใช้งานภายใน  
พื้นที่ให้บริการ ดังนั้นตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องมีการ  
พิจารณาเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสม

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการหาจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่มี  
ประสิทธิภาพสำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารแบบหลายชั้น ด้วยการพัฒนาสมการ  
คณิตศาสตร์จากระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ไบนารี (Binary Integer Linear  
Programming : BILP) ที่พิจารณาถึงเงื่อนไขเกี่ยวกับคุณภาพความแรงของสัญญาณให้ครอบคลุม  
พื้นที่ให้บริการ คุณภาพอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้งาน และความสามารถในการรองรับ  
ผู้ใช้งานของสถานีฐาน โดยใช้วิธีในการหาคำตอบจากโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization  
Studio

ผลจากการใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในการวางแผนติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์  
ทำให้เครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้นที่ได้มีประสิทธิภาพในการรองรับผู้ใช้งานในพื้นที่  
บริการสูงสุดถึง 100% นอกจากนี้เทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นให้ค่าเฉลี่ยของคุณภาพความแรงสัญญาณ  
ภายในพื้นที่ให้บริการที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับวางแผนติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยวิธีอื่น

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม  
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา ปวีณา อธิภาณัติ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ชุตินา พรหมมาก

PRACHYA CHAMNANKA : EFFICIENT PLACEMENT OF FEMTOCELL  
BASE STATIONS FOR 4G-LTE NETWORKS IN MULTI-FLOOR  
BUILDINGS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHUTIMA PROMMAK,  
Ph.D., 166 PP.

FEMTOCELL BASE STATIONS PLACEMENT/ NETWORK OPTIMIZATION/  
MOBILE NETWORK IN MULTI-FLOOR BUILDING

Currently, the application of the femtocell technology with 4G-Long Term Evolution technology is getting more attention because it can increase data rate and it also reduces the operational cost. Femtocell Base Stations (FBS) is a small cellular base station with a low transmitted power, resulting in small coverage area. FBSs can be easily installed. The FBS installed locations in a multi-floor building affect the quality of signal strength in the service area in term of the signal coverage and the user access data rate requirement. Therefore, the location of the FBS is an important point to consider in order to find a suitable network infrastructure.

This thesis proposes a binary integer linear programming (BILP) model to solve optimal placement of FBSs for 4G-LTE networks in multi-floor buildings. The proposed algorithm considers the quality of services in term of the signal coverage guarantees and the user access data rate guarantees in the service area. In addition, we considers the capacity of each FBS in the case of the limited number of users. The proposed mathematical formulations were solved by IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.

The proposed mathematical formulations can design a 4G-LTE network that has high network performance. In particular the resulting network can achieve 100% coverage area and can accommodate 100% of users in the service area. Furthermore,

the proposed technique can provide an average of high signal strength quality within the service area compared to the other femtocell base station planning schemes.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature ปรีชญา ชินาภรณ์

Advisor's Signature วิมล งาม

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ วงศ์สรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ทองทา และอาจารย์เศรษฐวิทย์ ภูญาภา อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ปรัชญา ชำนาญคำ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่	
<b>1 บทนำ</b>	1
1.1 ความสำคัญและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	5
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	5
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย	6
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน	6
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย	6
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย	7
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	7
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล	7
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล	7
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ	7
1.8 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้	8
1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์	8



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>2</b>	
<b>    ปฏิศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b> .....	10
2.1	
กล่าวนำ.....	10
2.2	
ปฏิศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.3	
โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์.....	17
2.4	
แบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคาร.....	19
2.5	
การโปรแกรมเชิงเส้น ไบนารี.....	21
2.5.1	
ข้อสมมุติฐานสำคัญในการ โปรแกรมเชิงเส้น.....	22
2.5.2	
รูปแบบมาตรฐานของการ โปรแกรมเชิงเส้น.....	23
2.5.3	
ส่วนประกอบของการ โปรแกรมเชิงเส้นมาตรฐาน.....	24
2.5.4	
คุณสมบัติของรูปแบบการ โปรแกรมเชิงเส้น.....	24
2.5.5	
การสร้างแบบจำลองการ โปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหา.....	25
2.6	
การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริธึมซิมเพล็กซ์.....	26
2.6.1	
ขั้นตอนของวิธีซิมเพล็กซ์.....	27
2.6.1.1	
ขั้นตอนเริ่มต้น (Initialization Step).....	27
2.6.1.2	
ขั้นตอนที่ต้องกระทำซ้ำๆ (Iteration Step).....	28
<b>3</b>	
<b>    การวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวนและตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์</b> <b>    สำหรับเครือข่ายสี่จีแอลที่อ้าภายในอาคารหลายชั้น</b> .....	33
3.1	
แนวคิดในการออกแบบการทดลองเบื้องต้นสำหรับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์.....	33
3.2	
การทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.2.1	
รูปแบบของการทดลอง.....	34
3.2.2	
ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.3	
การวิเคราะห์และประเมินผลกระทบของจำนวนและตำแหน่ง การวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น.....	42
3.3.1	
กราฟแสดงคุณภาพความแรงของสัญญาณ ที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ.....	42

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2	กราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของ ความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ.....	49
3.3.3	กราฟแสดงจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้.....	53
3.3.4	กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ใช้งาน ที่สถานีฐานสามารถรองรับได้.....	54
3.3.5	กราฟแสดงจำนวนผู้ใช้งานที่แต่ละสถานีฐานสามารถรองรับได้.....	55
3.4	สรุปผลการทดลอง.....	56
4	<b>เทคนิคการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่มีประสิทธิภาพ สำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น</b> .....	57
4.1	แนวคิดสำหรับการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ภายในอาคารหลายชั้น.....	57
4.2	การกำหนดปัญหาการ โปรแกรมเชิงเส้นไบนารี.....	59
4.3	สมการ โปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสำหรับการวางแผนเครือข่าย.....	63
4.3.1	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเฟสที่ 1.....	65
4.3.2	สมการเงื่อนไขของเฟสที่ 1.....	66
4.3.3	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเฟสที่ 2.....	68
4.3.4	สมการเงื่อนไขของเฟสที่ 2.....	68
4.4	การวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริธึม.....	69
4.4.1	จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variables).....	69
4.4.2	พื้นที่การค้นหา (Search Space).....	71
4.4.3	จำนวนเงื่อนไข (Constraints).....	73
4.4.4	สรุปความซับซ้อนอัลกอริธึม.....	74
4.5	โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการ โปรแกรมเชิงเส้นไบนารี.....	77
5	<b>การทดลองและการวิเคราะห์ผล</b> .....	83
5.1	การทดลองเพื่อสาธิตสมการทางคณิตศาสตร์ สำหรับการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์.....	84

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

5.1.1	ออกแบบการทดลอง.....	84
5.1.1.1	การทดลองในพื้นที่ของอาคารจำนวน 2 ชั้น.....	87
5.1.1.2	การทดลองในพื้นที่ของอาคารบรรณสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	88
5.1.1.3	การทดลองในพื้นที่ของอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	90
5.1.2	ผลการทดลอง.....	92
5.1.3	การวิเคราะห์ผล.....	100
5.1.3.1	พื้นที่ของอาคารจำนวน 2 ชั้น.....	100
5.1.3.2	พื้นที่ของอาคารบรรณสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	103
5.1.3.3	พื้นที่ของอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	106
5.2	การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ภายในอาคารแบบหลายชั้นด้วยเทคนิคที่เราได้นำเสนอ กับเทคนิคแบบ Coverage Based Design.....	109
5.2.1	ออกแบบการทดลอง.....	109
5.2.2	ผลการทดลอง.....	110
5.2.3	การเปรียบเทียบและการวิเคราะห์ผล.....	112
5.2.3.1	พื้นที่ของอาคารบรรณสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	112
5.2.3.2	พื้นที่ของอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	117
5.3	การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ภายในอาคารแบบหลายชั้นด้วยเทคนิคที่เราได้นำเสนอ กับเทคนิคแบบ Uniform Distribution Placement.....	122
5.3.1	ออกแบบการทดลอง.....	122
5.3.2	การเปรียบเทียบและการวิเคราะห์ผล.....	125
5.3.2.1	พื้นที่ของอาคารบรรณสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	125
5.3.2.2	พื้นที่ของอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	130

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4	สรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ภายในอาคารแบบหลายชั้นทั้งสามเทคนิค.....	135
5.4.1	สรุปผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคต่างๆ กรณีอาคารบรรณสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	135
5.4.2	สรุปผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคต่างๆ กรณีอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	138
<b>6</b>	<b>สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>142</b>
6.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	142
6.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	143
6.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	144
	รายการอ้างอิง.....	145
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลค่ามาตรฐานคุณภาพความแรงสัญญาณสำหรับเทคโนโลยี 4G-LTE และข้อมูลพื้นฐานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์.....	147
	ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	150
	ประวัติผู้เขียน.....	166

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าความสูญเสียของสัญญาณทะลุผ่านกำแพงประเภทต่างๆ.....20
2.2	ตารางซิมเพล็กซ์ของกำหนดการเชิงเส้น.....27
2.3	ตัวแปรมูลฐานเข้า คือตัวแปร $X_2$ .....28
2.4	ตัวแปรมูลฐานออก คือตัวแปร $S_2$ .....29
2.5	สัมประสิทธิ์ของทุกตัวแปรในแถวหลักใหม่.....29
2.6	ค่าตัวแปรมูลฐานใหม่.....30
2.7	ตัวแปรเข้าคือ $X_1$ ตัวแปรออกคือ $S_3$ .....31
2.8	ตารางซิมเพล็กซ์ที่สมบูรณ์ของปัญหานี้.....32
3.1	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....41
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วทางกายภาพ และระดับสัญญาณขั้นต่ำในการรักษาอัตราเร็วทางกายภาพ.....41
3.3	ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการของ โครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 1.....44
3.4	ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการของ โครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 2.....46
3.5	ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการของ โครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 3.....48
3.6	สรุปผลค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของกราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ใน โครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 1.....49
3.7	สรุปผลค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของกราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ใน โครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 2.....50

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.8	สรุปผลค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของกราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ในโครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 3	51
3.9	สรุปผลค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของกราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของ โครงสร้างเครือข่ายทั้งสาม	52
4.1	สรุปคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปรการตัดสินใจ	72
4.2	จำนวนเงื่อนไข	73
4.3	ขนาดของปัญหา	75
4.4	การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการ โปรแกรมเชิงเส้น ไบนารี สำหรับวัตถุประสงค์ MNFBS เป็นรูปแบบคำสั่ง ในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio	81
4.4	การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการ โปรแกรมเชิงเส้น ไบนารี สำหรับวัตถุประสงค์ MNFBS เป็นรูปแบบคำสั่ง ในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio	81
5.1	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่ทดลองที่ 1	88
5.2	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่ทดลองที่ 2	90
5.3	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่ทดลองที่ 3	92
5.4	สรุปผลของคำตอบที่ได้จากเฟสที่ 1	96
5.5	สรุปผลของคำตอบที่ได้จากเฟสที่ 2	100
5.6	ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณ ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1	101
5.7	สรุปผลประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1	103
5.8	ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2	104
5.9	สรุปผลประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2	103

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.10 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3.....	107
5.11 สรุปผลประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3.....	109
5.12 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ด้วยเทคนิค CBD.....	114
5.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD กรณีพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2.....	117
5.14 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ด้วยเทคนิค CBD.....	119
5.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD กรณีพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3.....	122
5.16 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ด้วยเทคนิค UDP.....	127
5.17 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP กรณีพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2.....	130
5.18 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ด้วยเทคนิค UDP.....	132
5.19 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP กรณีพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3.....	135
5.20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคต่างๆ กรณีอาคารบรรณสาร มทส.....	138
5.21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคต่างๆ กรณีอาคารวิชาการ 1 มทส.....	141
ก.1 มาตรฐานคุณภาพความแรงสัญญาณสำหรับเทคโนโลยี 4G-LTE.....	148
ก.2 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญของสถานีฐาน.....	149

## สารบัญรูป

ตารางที่	หน้า
2.1	โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟม โดเซลล์.....18
3.1	โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1.....35
3.2	โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 2.....35
3.3	โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 3.....36
3.4	โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 4.....36
3.5	โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 5.....37
3.6	โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 6.....37
3.7	โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7.....38
3.8	โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 8.....38
3.9	โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 9.....38
3.10	ตำแหน่งของจุดทดสอบคุณภาพสัญญาณภายในอาคารทั้ง 2 ชั้น.....39
3.11	ตำแหน่งของผู้ใช้งานภายในอาคารทั้ง 2 ชั้น.....40
3.12	คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1.....42
3.13	คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 2.....43
3.14	คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 3.....43
3.15	คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 4.....45
3.16	คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 5.....45
3.17	คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 6.....46



## สารบัญรูป (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.18 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7.....	47
3.19 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 8.....	47
3.20 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 9.....	48
3.21 ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ของโครงสร้างเครือข่ายกลุ่มที่ 1.....	49
3.22 ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ของโครงสร้างเครือข่ายกลุ่มที่ 2.....	50
3.23 ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ของโครงสร้างเครือข่ายกลุ่มที่ 3.....	51
3.24 เปรียบเทียบฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของ โครงสร้างเครือข่ายทั้งสามกลุ่ม.....	52
3.25 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้.....	53
3.26 เปรี่เซนต์ของจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้.....	54
3.27 แสดงจำนวนผู้ใช้งานที่แต่ละสถานีฐานสามารถรองรับได้.....	55
4.1 ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นของเฟสที่ 1.....	61
4.2 ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการ โปรแกรมเชิงเส้นของเฟสที่ 2.....	62
4.3 ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี.....	63
4.4 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เมื่อ $I = 20$ .....	70
4.5 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เมื่อ $I = 40$ .....	71
4.6 ขนาดของพื้นที่การค้นหา.....	72
4.7 จำนวนเงื่อนไข.....	74
4.8 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....	77
4.9 Model File Editing Area.....	79

## สารบัญรูป (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 Data File Editing Area.....	79
4.11 Setting File Editing Area.....	80
5.1 พื้นที่สำหรับการทดลอง.....	86
5.2 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1.....	87
5.3 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2.....	89
5.4 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3.....	91
5.5 จำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ของเฟสที่ 1 ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1.....	93
5.6 จำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ของเฟสที่ 1 ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2.....	94
5.7 จำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ของเฟสที่ 1 ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3.....	95
5.8 จำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ของเฟสที่ 2 ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1.....	97
5.9 จำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ของเฟสที่ 2 ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2.....	98
5.10 จำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ของเฟสที่ 2 ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3.....	99
5.11 กราฟคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1.....	101
5.12 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 ระหว่างเฟส 1 และเฟส 2.....	102
5.13 กราฟคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2.....	104
5.14 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ระหว่างเฟส 1 และเฟส 2.....	105
5.15 กราฟคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3.....	107

## สารบัญรูป (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.16 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ระหว่างเฟส 1 และเฟส 2 .....	108
5.17 ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของเทคนิค CBD ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 .....	111
5.18 ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของเทคนิค CBD ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 .....	112
5.19 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิค CBD .....	113
5.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 สำหรับเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD .....	114
5.21 จำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD .....	115
5.22 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD .....	116
5.23 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิค CBD .....	118
5.24 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 สำหรับเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD .....	120
5.25 จำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD .....	120
5.26 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD .....	121
5.27 ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของเทคนิค UDP ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 .....	123
5.28 ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของเทคนิค UDP ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 .....	124
5.29 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิค UDP .....	126
5.30 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 สำหรับเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP .....	128
5.31 จำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP .....	128

## สารบัญรูป (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.32 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP.....	129
5.33 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิค UDP..	131
5.34 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 สำหรับเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP.....	133
5.35 จำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP.....	133
5.36 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP.....	134
5.37 จำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งสำหรับ 3 เทคนิค กรณีพื้นที่ให้บริการที่ 2.....	136
5.38 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้สำหรับ 3 เทคนิค กรณีพื้นที่ให้บริการที่ 2..	136
5.39 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ สำหรับ 3 เทคนิค กรณีพื้นที่ให้บริการที่ 2.....	137
5.40 จำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งสำหรับ 3 เทคนิค กรณีพื้นที่ให้บริการที่ 3.....	139
5.41 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้สำหรับ 3 เทคนิค กรณีพื้นที่ให้บริการที่ 3..	139
5.42 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ สำหรับ 3 เทคนิค กรณีพื้นที่ให้บริการที่ 3.....	140
ก.1 สถานีฐานเฟมโตเซลล์รุ่น Alcatel-Lucent 9362 Enterprise Cell V2.2 2100 MHz.....	149

# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Femtocell (Femtocell Technology) ร่วมกับเทคโนโลยี 4G-Long Term Evolution (4G-LTE) ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน Kojima, Y., Suga, J., Kawasaki, T., Okuda, M., and Takechi, R. (2014) กล่าวว่าเมื่อนำเทคโนโลยี Femtocell มาประยุกต์ใช้งานในเครือข่าย 4G-LTE จะทำให้อัตราการส่งข้อมูลมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่างๆ Nagashree, N., Rao, V., and Shanavas, I.H. (2013) และ Baseshankar, A., and Khapre, S. (2012) กล่าวถึงสถาปัตยกรรมพื้นฐานและคุณลักษณะของเทคโนโลยี Femtocell โดยเทคโนโลยี Femtocell เป็นสถานีฐานโทรศัพท์มือถือขนาดเล็ก ที่มีกำลังส่งสัญญาณที่ต่ำ ทำงานด้วยย่านความถี่ที่หน่วยงานกำกับดูแลด้านกิจการโทรคมนาคมของประเทศ (คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ: กสทช) เป็นผู้กำหนด โดยสัญญาณจะครอบคลุมพื้นที่ได้ในบริเวณไม่กว้างมาก นิยมใช้ในอาคารสำนักงานหรือบริเวณอับสัญญาณของอาคารที่สถานีฐานภายนอกไม่สามารถส่งสัญญาณไปถึงผู้ใช้บริการได้ ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคเพื่อหาตำแหน่งที่จะติดตั้งสถานีฐาน Femtocell ให้เกิดสมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุด จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะนำมาพิจารณา เพราะจะส่งผลถึงประสิทธิภาพการใช้งานและคุณภาพสัญญาณของผู้ใช้งานภายในอาคาร

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางตำแหน่งสถานีฐานสำหรับระบบเซลลูลาร์ (Cellular Networks) ได้แก่ ในงานวิจัยของ Wechtaisong, C., and Prommak, C. (2010) ได้นำเทคนิคด้านการวางแผนติดตั้งสถานีฐาน (Base Stations) และสถานีถ่ายทอด (Relay Stations) ของเครือข่ายไวแมกซ์ (WiMax) ซึ่งในงานวิจัยได้ใช้หลักการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Integer Linear Programming : BILP) เพื่อลดมูลค่าในการลงทุนสร้างเครือข่ายไวแมกซ์ ซึ่งประกอบไปด้วยผลรวมของมูลค่าการติดตั้งสถานีฐานและผลรวมของ

มูลค่าการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ในงานวิจัยของ Ranaweera, C.S., Iannone, P.P., Oikonomou, K.N., Reichmann, K.C., and Sinha, R.K. (2013) ได้นำเทคนิคด้านการวางแผนติดตั้งเครือข่ายโทรศัพท์มือถือที่มีการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐาน (Mobile Backhaul Network) ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเครือข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (Passive Optical Network: PON) โดยใช้โครงสร้างพื้นฐานของไฟเบอร์ที่มีอยู่แล้วเชื่อมต่อไปยังเซลล์ Backhaul ขนาดเล็ก ซึ่งจะประกอบไปด้วยผลรวมของการติดตั้งไฟเบอร์ (Fiber) อุปกรณ์ (Equipment) และแรงงาน โดยใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ไบนารีในการแก้ไข้ปัญหา

และจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมยังพบว่ามีหลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจในการศึกษาการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มที่ 1 กลุ่มเทคนิคโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม เป็นกลุ่มที่นำระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มมาพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบเครือข่าย เพื่อให้สอดคล้องกับข้อจำกัดหรือเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อใช้ในการแก้ไข้ปัญหา ได้แก่ งานวิจัยของ Sathya, V., Ramamurthy, A., and Tamma, B.R. (2014) ได้ศึกษาการออกแบบการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมภายในอาคาร โดยแบ่งการทำงานออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนหนึ่งต้องการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้งภายในอาคาร และขั้นตอนที่สองทำการปรับกำลังส่งให้เหมาะสมตามจำนวนของผู้ใช้งานรอบๆอาคาร ภายใต้เงื่อนไขของสัญญาณรบกวนจากสถานีฐานมาโครเซลล์ และสัญญาณรบกวนระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้งานความถี่เดียวกัน เพื่อที่จะรับประกันคุณภาพสัญญาณแทรกสอดภายในพื้นที่ให้บริการ งานวิจัยของ Sathya, V., Ramamurthy, A., and Tamma, B.R. (2015) ได้ศึกษาทั้งการออกแบบการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์และการควบคุมการใช้พลังงานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร โดยมีเป้าหมายเพื่อหาจำนวนสถานีฐานที่น้อยสำหรับติดตั้งภายในอาคารและทำการกำหนดกำลังส่งให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของแต่ละพื้นที่ย่อยในอาคาร และบริเวณที่มีผู้ใช้บริการ งานวิจัยของ Tahalani, M., Sathya, V., Ramamurthy, A., Suhas, U.S., Giluka, M.K., and Tamma, B.R. (2014) ได้นำเสนอเทคนิคด้านการวางแผนติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร โดยมีเป้าหมายเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้เงื่อนไขด้านผลของความแรงสัญญาณที่เกิดจากจำนวนสิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับ รวมถึงเงื่อนไขด้านการรับประกันสัญญาณแทรกสอดภายในพื้นที่ของอาคาร โดยนำเสนอสมการสำหรับเทคนิคการนับจำนวนกำแพงและจำนวนชั้นของอาคาร แล้วนำสมการเหล่านั้นมาแปลงเป็นสมการเชิงเส้น เพื่อที่จะใช้หาค่าตอบสมการคณิตศาสตร์สำหรับหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิง

เส้น และงานวิจัยของ Ramamurthy, A., Sathya, V., Venkatesh, V., Ramji, R., and Tamma, B.R. (2015) ได้นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยมีเป้าหมายเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งและกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยการทำงานแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกคือ การหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต้องติดตั้งและตำแหน่งสำหรับติดตั้งภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของแต่ละพื้นที่ย่อยในอาคาร ขั้นตอนที่สองคือ ทำการลดการใช้พลังงานในส่วนของกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ เพื่อที่จะรับประกันคุณภาพของสัญญาณแทรกสอดภายในอาคาร ซึ่งจากงานวิจัยในกลุ่มที่ 1 จะพิจารณาการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารโดยรับประกันคุณภาพของสัญญาณแทรกสอดที่ดีที่สุดภายในอาคาร แต่ยังไม่ได้พิจารณาการรับประกันคุณภาพของอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้งานภายในอาคาร สำหรับงานวิจัยในกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มที่นำระเบียบวิธีการทางฮิวริสติกอัลกอริทึม (Heuristic Algorithm) มาใช้ในการออกแบบเครือข่ายเพื่อหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (Near Optimal) ได้แก่ งานวิจัยของ Tahalani, M., Sathya, V., Subas, U.S., Chaganti, R., and Tamma, B.R. (2013) ได้นำเสนอเทคนิคการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่ต้องติดตั้ง และตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารชั้นเดียว ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนและความจุช่องสัญญาณ (Shannon capacity) และงานวิจัยของ Khan, M.F., and Wang, B. (2014) ได้นำเสนอวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารชั้นเดียวขนาดใหญ่ที่มีสัญญาณรบกวนจากสถานีฐานไมโครเซลล์และสัญญาณรบกวนระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้งานความถี่เดียวกัน ซึ่งกระบวนการทำงานจะทำการแบ่งพื้นที่ในอาคารให้มีขนาดใกล้เคียงกัน และติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่จุดกึ่งกลางของพื้นที่ หลังจากนั้นจึงหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในบริเวณใกล้เคียง โดยมีวัตถุประสงค์คือ การใช้จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้น้อยที่สุดโดยต้องการให้มีพื้นที่สัญญาณครอบคลุมภายในอาคารมากที่สุด ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของจุดทดสอบสัญญาณภายในอาคาร ซึ่งจากงานวิจัยในกลุ่มที่ 2 ยังไม่ได้พิจารณาถึงข้อจำกัดด้านปริมาณของผู้ใช้ที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์สามารถรองรับได้ และงานวิจัยในกลุ่มที่ 3 กลุ่มวิจัยที่มีผลกระทบต่อกรวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร ได้แก่ งานวิจัยของ Vardhan, C.S., Ratnam, D.V., Bhagyasree, N., and Dattu, A.H. (2014) ได้ศึกษาถึงผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลต่อการวางตำแหน่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ เช่น รูปแบบสมการการสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss Model) จำนวนของกำแพง

ถึงกีดขวางระหว่างภาคส่งและภาครับ กำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานและการออกแบบเทคนิคการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร ในงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น มีบางงานวิจัยที่ทำการพิจารณาเกี่ยวกับการเลือกวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมภายในอาคารลักษณะต่างๆ เพื่อรับประกันคุณภาพความแรงสัญญาณให้ครอบคลุม (Coverage) พื้นที่ให้บริการ และเพื่อรับประกันคุณภาพของสัญญาณแทรกสอดภายในพื้นที่ให้บริการ แต่ยังไม่ได้พิจารณาในส่วนของการรับประกันคุณภาพของอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้งานในบริเวณที่มีการใช้งานอย่างหนาแน่นในพื้นที่ให้บริการ และยิ่งไปกว่านั้นงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ได้พิจารณาถึงข้อจำกัดด้านความจุ (Capacity) ของผู้ใช้ในการเข้าใช้งานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ดังนั้นงานวิจัยที่นำเสนอนี้ จึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่พิจารณาเรื่องคุณภาพความแรงสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ อัตราเร็วการรับส่งข้อมูลในการให้บริการของผู้ใช้งาน พิจารณาถึงข้อจำกัดด้านความจุของผู้ใช้ในการเข้าใช้งานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในอาคารแบบหลายชั้น เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการใช้งานสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้มากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานและสถาปัตยกรรมพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาวิธีการออกแบบสำหรับการเลือกตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุดที่สัญญาณสามารถครอบคลุมบริเวณพื้นที่ให้บริการ มีคุณภาพอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ รวมถึงผู้ใช้งานทั้งหมดสามารถเข้าใช้งานสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบและประเมินสมรรถนะของตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่นๆ เช่น การออกแบบสถานีฐานที่คำนึงถึงสัญญาณครอบคลุม (Coverage Based Design) หรือการวางสถานีฐานแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution Placement) เป็นต้น



### 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 สถานีฐานเฟมโตเซลล์สามารถส่งสัญญาณข้ามชั้นได้
- 1.3.2 เครือข่ายเฟมโตเซลล์ที่ดี ควรมีสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการและอัตราเร็วทางกายภาพสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.3.3 จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์และตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร ส่งผลต่อการทำงานของระบบ
- 1.3.4 สถานีฐานเฟมโตเซลล์ใช้งานที่ความถี่ต่างกันจะไม่เกิดสัญญาณรบกวนกัน
- 1.3.5 สภาพแวดล้อมของพื้นที่ที่ทำการทดลอง เช่น สิ่งกีดขวางภายในอาคาร จะส่งผลกระทบต่อความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ

### 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.4.1 การวัดคุณภาพความแรงสัญญาณ ให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมด แทนด้วยตำแหน่งจุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณ (Signal Test Point : STP) ซึ่งกระจายตัวเป็นรูปแบบตารางที่มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform)
- 1.4.2 การรับประกันอัตราเร็วการให้บริการของผู้ใช้งาน แทนด้วยตำแหน่งของผู้ใช้งาน (User) ซึ่งกระจายตัวตามความหนาแน่นของผู้ใช้ภายในอาคาร โดยการกระจายตัวของผู้ใช้บริการพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยการใช้งานในชั่วโมงเร่งด่วน (ช่วงเวลาที่มียกคนใช้มากที่สุด)
- 1.4.3 การวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณในพื้นที่ที่พิจารณา ทำโดยใช้แบบจำลองการสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss Model) ตามมาตรฐานของ 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้ได้กับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่าย 4G-LTE ที่ติดตั้งภายในอาคาร

### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาโครงสร้าง หลักการทำงานและทฤษฎีของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์
- 1.5.2 ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 1.5.3 พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบการเลือกตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุดที่สัญญาณสามารถครอบคลุมบริเวณพื้นที่ให้บริการ มีคุณภาพอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ รวมถึงผู้ใช้งานทั้งหมดสามารถเข้าใช้งานสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้

- 1.5.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิควิธีการเลือกวางตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่นๆ

## 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

### 1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในอาคาร
- 3) ศึกษาและออกแบบจำลองเครือข่ายเฟม โดเซลล์ 4G-LTE โดยวางตำแหน่งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในอาคารในรูปแบบต่างๆ และวิเคราะห์ประเมินคุณภาพความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมด อัตราเร็วการให้บริการของผู้ใช้งาน และปริมาณผู้ใช้งานที่สถานีฐานเฟม โดเซลล์รองรับได้ ของเทคนิควิธีการเลือกตำแหน่งสำหรับวางสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในอาคาร
- 4) ศึกษาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟม โดเซลล์ เป็นสมการสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุด
- 5) ศึกษาโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสมการคณิตศาสตร์ในข้อ 4
- 6) พัฒนาเทคนิคการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น
- 7) พัฒนาโปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสำหรับเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้น
- 8) ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบและประเมินคุณภาพของเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นมา

### 1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) จำลองเครือข่ายเฟม โดเซลล์ 4G-LTE และวิเคราะห์ประเมินคุณภาพตัวชี้วัดประสิทธิภาพของวางตำแหน่งสถานีฐานของแบบจำลอง
- 3) พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟม โดเซลล์เป็นสมการสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุด
- 4) ใช้โปรแกรมสำหรับแก้ปัญหาสมการคณิตศาสตร์ในข้อ 3

- 5) วิเคราะห์เปรียบเทียบและประเมินคุณภาพของตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้จากการออกแบบที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่นๆ

#### 1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารโทรคมนาคม อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

#### 1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer)
- 2) โปรแกรม MATLAB
- 3) โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio
- 4) โปรแกรม Microsoft Excel
- 5) โปรแกรม Microsoft Office

#### 1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) เก็บรวบรวมผลการทดลองจากการหาตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นด้วยเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้น กับวิธีการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์แบบอื่นๆ โดยจะเปรียบเทียบผลว่าในแต่ละวิธี จำนวนของสถานีฐานรวมถึงคุณภาพของสัญญาณจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้บริการอย่างไร

#### 1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของการพัฒนาเทคนิคการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิควิธีการเลือกวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้กับเทคนิควิธีการอื่นๆ สรุปผลออกมาในรูปแบบของรูปภาพและข้อมูลตารางเปรียบเทียบตัวเลข

### 1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.7.1 เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาเทคนิคการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมสำหรับเครือข่าย 4G-LTE

- 1.7.2 สมการทางคณิตศาสตร์จากระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีที่ได้จากการออกแบบและพัฒนาเทคนิคการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสม สามารถนำไปใช้ในการศึกษาเพื่อพัฒนาเทคนิควางตำแหน่งสถานีฐานในเครือข่ายโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์ต่อไป

## 1.8 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่าย 4G-LTE ภายในอาคารหลายชั้น โดยใช้การกำหนดปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี (Binary Integer Linear Programming : BILP) ซึ่งการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุดกับลักษณะรูปแบบอาคารหลายชั้นนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ได้ กระบวนการทำงานสำหรับการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย 2 เฟสการทำงาน คือ ในส่วนเฟสแรกเป็นกระบวนการทำงานที่มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่เพียงพอสำหรับติดตั้งในพื้นที่ของอาคาร และกระบวนการในส่วนเฟสที่สองจะมีวัตถุประสงค์เพื่อหาตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการมากที่สุด โดยใช้จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้คำตอบจากเฟสที่ 1 มาเป็นเงื่อนไขในการกำหนดตำแหน่งการวางสถานีฐานที่ดีที่สุด โดยตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดที่สัญญาณสามารถครอบคลุมทั่วบริเวณพื้นที่ให้บริการ มีคุณภาพอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลสำหรับผู้ใช้งานที่มีประสิทธิภาพ รวมถึงผู้ใช้งานทั้งหมดจะสามารถเข้าใช้งานสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้

## 1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

**บทที่ 1** เป็นบทนำ กล่าวถึงความจำเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัยและบอกถึงข้อตกลงเบื้องต้นสำหรับการวิจัย

**บทที่ 2** กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

**บทที่ 3** กล่าวถึงการทดลองเบื้องต้นเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์รวมถึงประเมินคุณภาพของสัญญาณต่อผู้ให้บริการ เมื่อมีจำนวนและตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารที่แตกต่างกัน

**บทที่ 4** กล่าวถึงแนวคิดในการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโทเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น ใบนารีสำหรับการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโทเซลล์ สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการแก้ปัญหาการกำหนดตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโทเซลล์ภายในอาคาร การวิเคราะห์ความซับซ้อนของปัญหา (Problem Complexity) และ โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้น ใบนารี

**บทที่ 5** กล่าวถึงการทดลองเพื่อสาธิตสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโทเซลล์ การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโทเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นด้วยเทคนิคที่เราได้นำเสนอ กับเทคนิคแบบ Coverage Based Design การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโทเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นด้วยเทคนิคที่เราได้นำเสนอ กับเทคนิคแบบ Uniform Distribution Placement และการสรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโทเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นทั้งสามเทคนิค

**บทที่ 6** กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหา



## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการสร้างเทคนิคการกำหนดตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่ายลิจิแอลที่อิกายในอาคารหลายชั้นให้มีประสิทธิภาพที่คี่นั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาในส่วนองปริทัศน์วรรณกรรม ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างและการทำงานองเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ เพื่อทำให้มีความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำงานองสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร และสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางการออกแบบเทคนิคการกำหนดตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่ายลิจิแอลที่อิกายในอาคารหลายชั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้ ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้ หัวข้อที่ 2.1 กล่าวนำ หัวข้อที่ 2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานองเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ หัวข้อที่ 2.4 แบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคาร และหัวข้อที่ 2.5 การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี

#### 2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ (Femtocell Technology) ได้รับความนิยมและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีต้นทุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณประเภทอื่นๆ (Nagashree et al., 2013) และมีจุดเด่นด้านการขยายคุณภาพสัญญาณภายในพื้นที่ให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วยแก้ปัญหาคุณภาพสัญญาณบริเวณอาคารที่เป็นมุมอับสัญญาณที่สถานีฐานภายนอกไม่สามารถส่งสัญญาณมายังผู้ใช้งานได้ สำหรับโครงสร้างการทำงานองเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก คือส่วนองชุมสาย (Core Network) และส่วนองเครือข่ายเฟมโตเซลล์ (Femtocell Network) ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.3 โดยเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ (Baseshankar et al., 2012) เป็นเสมือนตัวกลางในการเชื่อมต่อแบบไร้สายระหว่างโทรศัพท์มือถือเข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง โดยจะทำการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านตัวรับสัญญาณอินเทอร์เน็ต (DSL Router) เพื่อให้สถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้งานภายในพื้นที่ให้บริการต่อไป ดังนั้นการที่จะพิจารณาคำหนดตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้เกิด

ประสิทธิภาพสูงสุดจึงจำเป็นต้องศึกษาและเข้าใจตั้งแต่กระบวนการทำงานพื้นฐานของเทคโนโลยี เฟมโตเซลล์ รวมถึงคุณสมบัติต่างๆ ของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อ คุณภาพสัญญาณภายในเครือข่าย ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นที่การออกแบบกำหนดตำแหน่งการวาง สถานีฐานที่เหมาะสม เพื่อสามารถทำให้กระบวนการในการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์มี สมรรถนะสูงยิ่งขึ้น

## 2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการพิจารณาการกำหนดตำแหน่งการวางสถานีเฟมโตเซลล์ ภายในอาคารหลายชั้นอย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องศึกษาทิศทางปรัชญ่วรรณกรรม และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาโครงสร้าง หลักการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ เพื่อเป็นความรู้ และใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสำหรับงานวิจัยต่อไปนี้ ซึ่งจากการศึกษามีปรัชญ่วรรณกรรม ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

### 2.2.1 งานวิจัยของ Baseshankar, A., and Khapre, S. (2012) เป็นงานวิจัยที่สำรวจเทคโนโลยี เฟมโตเซลล์สำหรับใช้ภายในอาคาร

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่สำรวจและรวบรวมงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวกับเทคโนโลยี เฟมโตเซลล์ที่ใช้ภายในอาคาร โดยได้อธิบายพื้นฐานและคุณลักษณะของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ เช่น หลักการทำงานของเฟมโตเซลล์ สถาปัตยกรรมพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ การ ประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ร่วมกับเทคโนโลยีอื่นๆ รวมถึงประโยชน์ของเทคโนโลยี เฟมโตเซลล์ทั้งต่อผู้ให้บริการโทรศัพท์มือถือและลูกค้าที่ใช้บริการ เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยนี้นำมา รวบรวมเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับ โครงสร้างและหลักการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ รวมถึงทราบข้อดีของเทคโนโลยี เฟมโตเซลล์ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเครือข่ายเฟมโตเซลล์ต่อไป

### 2.2.2 งานวิจัยของ Ranaweera, C.S., Iannone, P.P., Oikonomou, K.N., Reichmann, K.C., and Sinha, R.K. (2013) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งวางสถานีฐาน

สำหรับระบบเซลลูลาร์ โดยพิจารณาจากโครงสร้างพื้นฐานของไฟเบอร์ที่ถูกติดตั้งไว้แล้ว ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ได้นำเทคนิคด้านการวางแผนติดตั้งเครือข่าย โทรศัพท์มือถือที่มีการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐาน (Mobile Backhaul Network) ซึ่งกำหนดปัญหา

โดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary integer linear programming : BILP) โดยมีเป้าหมายเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเครือข่ายเชิงแสงแบบพาสซีฟ (Passive Optical Network : PON) โดยใช้โครงสร้างพื้นฐานของไฟเบอร์ที่มีอยู่แล้วเชื่อมต่อไปยังเซลล์ Backhaul ขนาดเล็ก ซึ่งจะประกอบไปด้วยผลรวมของการติดตั้งไฟเบอร์ (Fiber) อุปกรณ์ (Equipment) และแรงงาน (Labor) จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้ได้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการวางแผนเครือข่ายเซลล์และสามารถนำแนวคิดจากการออกแบบเครือข่ายเซลล์ที่ใช้หลักการของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งสามารถให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ นำมาประยุกต์ใช้กับการสร้างสมมติศาสตร์สำหรับแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์

### 2.2.3 งานวิจัยของ Wechtaisong , C., and Prommak, C. (2010) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งวางสถานีฐานสำหรับระบบเซลล์ลูตาร์ในเครือข่ายไวแมกซ์ (WiMax)

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ได้นำเทคนิคด้านการวางแผนติดตั้งสถานีฐาน (Base Stations) และสถานีถ่ายทอด (Relay Stations) ของเครือข่ายไวแมกซ์ ซึ่งกำหนดปัญหาโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี โดยมีเป้าหมายเพื่อลดมูลค่าในการลงทุนสร้างเครือข่ายไวแมกซ์ ซึ่งประกอบไปด้วยผลรวมของมูลค่าการติดตั้งสถานีฐานและผลรวมของมูลค่าการติดตั้งสถานีถ่ายทอด

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าการออกแบบระบบสำหรับการแก้ปัญหาการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดด้วยการใช้หลักการของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีมาใช้ในการออกแบบ สามารถให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้นจึงนำแนวคิดจากงานวิจัยนี้มาใช้ในการพัฒนาสมมติศาสตร์สำหรับการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ นอกจากนี้ทำให้ได้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการวางแผนเครือข่ายเซลล์เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนเครือข่ายระบบโทรศัพท์มือถือต่อไป

### 2.2.4 งานวิจัยของ Sathya, V., Ramamurthy, A., and Tamma, B.R. (2014) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารที่รับประกันคุณภาพสัญญาณแทรกสอดภายในพื้นที่ให้บริการ

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ต้องการตำแหน่งการวางสถานีฐานที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งกำหนดปัญหาโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming : ILP) โดย



แบ่งการทำงานออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนหนึ่งต้องการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่สำหรับติดตั้งภายในอาคาร และขั้นตอนที่สองทำการปรับกำลังส่งให้เหมาะสมตามจำนวนของผู้ใช้งานรอบๆอาคาร ภายใต้เงื่อนไขของสัญญาณรบกวนจากสถานีฐานมาโครเซลล์ และสัญญาณรบกวนระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้งานความถี่เดียวกัน เพื่อที่จะรับประกันคุณภาพสัญญาณแทรกสอดภายในพื้นที่ให้บริการ

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาคุณภาพอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้งานภายในอาคาร อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้พิจารณาคุณภาพของสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ รวมถึงพิจารณาคุณภาพสัญญาณแทรกสอดภายในพื้นที่ให้บริการ ดังนั้นสามารถนำแนวคิดจากการออกแบบในเทคนิคนี้มาประยุกต์ใช้กับการสร้างสมการคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีการ โปรแกรมเชิงเส้นที่เราจะนำเสนอ

### 2.2.5 งานวิจัยของ Sathya, V., Ramamurthy, A., and Tamma, B.R. (2015) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาค่าตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร โดยปรับกำลังส่งให้เหมาะสมตามสภาพแวดล้อมของอาคาร

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาค่าตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งกำหนดปัญหาโดยใช้การ โปรแกรมเชิงเส้น โดยมีเป้าหมายเพื่อหาจำนวนสถานีฐานที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้งภายในอาคารและทำการกำหนดกำลังส่งให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของแต่ละพื้นที่ย่อยในอาคาร และบริเวณที่มีผู้ใช้บริการ

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยมีการออกแบบการทดลองให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของในอาคารที่จะทำการติดตั้งสถานีฐานนั้นมากขึ้น ดังนั้นเราจึงได้นำเอาแนวคิดในการใช้สมการคณิตศาสตร์ด้วยการใช้แบบจำลองการ โปรแกรมเชิงเส้นมาใช้ในการออกแบบกับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ เพื่อแก้ปัญหาในการกำหนดตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร

**2.2.6 งานวิจัยของ Tahalani, M., Sathya, V., Ramamurthy, A., Suhas, U.S., Giluka, M.K., and Tamma, B.R. (2014) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการนับจำนวนกำแพงและจำนวนชั้นของอาคาร มาใช้ในการพิจารณาหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร**

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคด้านการวางแผนติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร ซึ่งกำหนดปัญหาโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้น โดยมีเป้าหมายเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้เงื่อนไขด้านผลของความแรงสัญญาณที่เกิดจากจำนวนสิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับ รวมถึงเงื่อนไขด้านการรับประกันสัญญาณแทรกสอดภายในพื้นที่ของอาคาร โดยนำเสนอสมการสำหรับเทคนิคการนับจำนวนกำแพงและจำนวนชั้นของอาคาร แล้วนำสมการเหล่านั้นมาแปลงเป็นสมการเชิงเส้น เพื่อที่จะใช้หาคำตอบสมการคณิตศาสตร์สำหรับหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้จะเห็นว่าเป็นการนำหลักการนับจำนวนกำแพงและจำนวนชั้นภายในอาคารมาใช้เป็นเงื่อนไขในการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งสามารถให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้นจึงสามารถนำแนวคิดจากงานวิจัยนี้มาใช้ในการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในงานวิจัยนี้

**2.2.7 งานวิจัยของ Ramamurthy, A., Sathya, V., Venkatesh, V., Ramji, R., and Tamma, B.R. (2015) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร ที่เน้นคุณภาพด้านการลดใช้พลังงานของกำลังส่งสถานีฐาน**

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งกำหนดปัญหาโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้น โดยมีเป้าหมายเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งและกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยการทำงานแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกคือ การหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต้องติดตั้งและตำแหน่งสำหรับติดตั้งภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของแต่ละพื้นที่ย่อยในอาคาร ขั้นตอนที่สองคือ ทำการลดการใช้พลังงานในส่วน of กำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ เพื่อที่จะรับประกันคุณภาพของสัญญาณแทรกสอดภายในอาคาร

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าให้ความสำคัญด้านคุณภาพการใช้พลังงานในส่วนของกำลังส่งของสถานีฐาน เพื่อที่จะรับประกันคุณภาพของสัญญาณแทรกสอดภายในพื้นที่ให้บริการ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงข้อจำกัดของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ด้านปริมาณของผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้

#### 2.2.8 งานวิจัยของ Han, K. Choi, Y. Kim, D. Na, M. Choi S., and Han, K. (2009) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเลือกวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารขนาดหลายชั้น

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการเลือกตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารขนาดสามชั้นที่มีสัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานมาโครเซลล์ และสัญญาณแทรกสอดระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้งานความถี่เดียวกัน ซึ่งกำหนดปัญหาโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้น โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มผลรวมของกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้ทำการเลือกติดตั้งแล้วให้มากที่สุดภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของจุดทดสอบสัญญาณบริเวณรอบนอกอาคาร และเป้าหมายถัดมาคือ การเพิ่มผลรวมความจุช่องสัญญาณ (Shannon Capacity) ของจุดทดสอบสัญญาณภายในอาคาร

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้จะเห็นว่าได้มีการใช้สมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบปัญหาการเลือกตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารเพื่อเพิ่มกำลังส่งของสถานีฐานที่ได้ทำการเลือกติดตั้งแล้วและเพิ่มผลรวมความจุช่องสัญญาณของจุดทดสอบสัญญาณภายในอาคาร ดังนั้นเราจึงได้นำเอาแนวคิดในการใช้สมการคณิตศาสตร์ด้วยการใช้แบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นมาใช้ประยุกต์ใช้กับการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในงานวิจัยนี้

#### 2.2.9 งานวิจัยของ Tahalani, M., Sathya, V., Suhas, U.S., Chaganti, R., and Tamma, B.R. (2013) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร ภายใต้เงื่อนไขสัญญาณแทรกสอดและช่องสัญญาณภายในเครือข่าย

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่ต้องติดตั้ง และตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารชั้นเดียว ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน และความจุช่องสัญญาณ โดยใช้ระเบียบวิธีการทางฮิวริสติกอัลกอริทึม (Heuristic Algorithm) มาใช้ในการออกแบบเครือข่ายเพื่อหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (Near Optimal)

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้ได้เห็นอีกหนึ่งวิธีการ นอกจากการใช้สมการคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีการ โปรแกรมเชิงเส้นในการหาคำตอบปัญหาการออกแบบตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ยังมีวิธีการทางฮิวริสติกอัลกอริทึมที่สามารถหาคำตอบได้เช่นกัน เพียงแต่จะให้คำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีการที่สามารถหาคำตอบของปัญหาได้ ในกรณีที่ปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความซับซ้อนของอัลกอริทึมที่มากขึ้นซึ่งวิธีการ โปรแกรมเชิงเส้นไม่สามารถหาคำตอบได้ วิธีการทางฮิวริสติกอัลกอริทึมก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถใช้แก้ปัญหาได้

#### 2.2.10 งานวิจัยของ Khan, M.F., and Wang, B. (2014) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารขนาดใหญ่ โดยใช้เทคนิคฮิวริสติกอัลกอริทึม

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการหาคำหนดที่ตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารชั้นเดียวขนาดใหญ่ที่มีสัญญาณรบกวนจากสถานีฐานมาโครเซลล์ และสัญญาณรบกวนระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้งานความถี่เดียวกัน โดยใช้ระเบียบวิธีการทางฮิวริสติกอัลกอริทึมในการหาคำตอบ ซึ่งกระบวนการทำงานจะทำการแบ่งพื้นที่ในอาคารให้มีขนาดใกล้เคียงกัน และติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่จุดกึ่งกลางของพื้นที่ หลังจากนั้นจึงหาคำหนดที่เหมาะสมที่สุดในบริเวณใกล้เคียง โดยมีวัตถุประสงค์คือ การใช้จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้น้อยที่สุด โดยต้องการให้มีพื้นที่สัญญาณครอบคลุมภายในอาคารมากที่สุด ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของจุดทดสอบสัญญาณภายในอาคาร

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เห็นแนวทางการแก้ปัญหาสำหรับขนาดปัญหาที่มีขนาดใหญ่ด้วยวิธีการทางฮิวริสติกอัลกอริทึม ทำให้ได้ความรู้เกี่ยวกับวางแผนเครือข่ายเฟมโตเซลล์อีกเทคนิค เพื่อสามารถนำมาประยุกต์ความรู้ใช้ในการออกแบบวางแผนเครือข่ายเฟมโตเซลล์ในงานวิจัยนี้

#### 2.2.11 งานวิจัยของ Vardhan, C.S., Ratnam, D.V., Bhagyasree, N., and Dattu, A.H. (2014) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น โดยได้พิจารณาถึงผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น รูปแบบสมการการสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss Model) จำนวนของกำแพงที่อยู่ระหว่าง

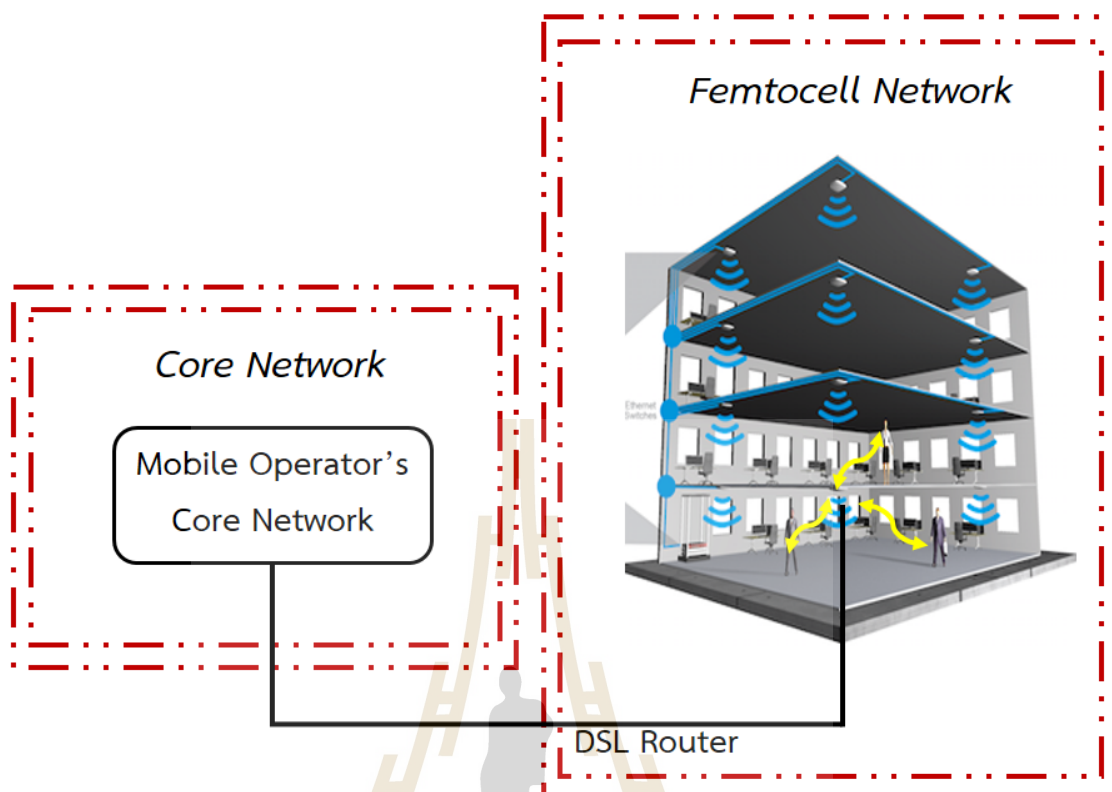
ภาคส่งและภาครับ อัตราการสูญเสียของกำแพง (Wall Loss) กำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ เป็นต้น ซึ่งล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานและการออกแบบเทคนิคการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ นอกจากนี้ในวิจัยยังแสดงรูปแบบของสมการการสูญเสียตามระยะทางสำหรับเทคโนโลยี 4G ที่สามารถนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น สภาพแวดล้อมภายในอาคาร และสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร เป็นต้น

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เห็นถึงปัจจัยอื่นๆ ที่ช่วยในการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ถึงแม้ว่างานวิจัยนี้ได้มีการพิจารณาถึงผลกระทบจากการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ แต่ยังไม่ได้มีการพิจารณาถึงปัญหาการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมภายในอาคาร

## 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์

จากปัญหาด้านคุณภาพสัญญาณของผู้ใช้งานภายในอาคาร ในปัจจุบัน ได้นำเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์เข้ามามีบทบาทในการช่วยแก้ไขปัญหาโดยการติดตั้งสถานีฐานขนาดเล็กลงในพื้นที่ที่ประสบปัญหาด้านคุณภาพสัญญาณนั้นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเทคโนโลยี 4G-LTE ประสิทธิภาพการทำงานของเฟมโตเซลล์ยังมีคุณภาพที่สูงขึ้น จากงานวิจัย (Kojima et al., 2014) ได้สำรวจและรวบรวมงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ที่ใช้งานร่วมกับกับเทคโนโลยีแอลทีอี ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของอัตราการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้งาน (Abhishek et al., 2012) สำหรับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์นั้นเป็นสถานีฐานโทรศัพท์มือถือขนาดเล็ก ที่มีกำลังส่งสัญญาณที่ต่ำ โดยจะทำงานด้วยความถี่ที่หน่วยงานกำกับดูแลด้านกิจการโทรคมนาคมของประเทศเป็นผู้กำหนด โดยสัญญาณจะครอบคลุมพื้นที่ได้ในบริเวณไม่ใหญ่มาก ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของจำนวนกำแพงหรือวัตถุที่อยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับของสัญญาณ นิยมนำไปใช้ในอาคาร สำนักงาน หรือบริเวณอับสัญญาณ เพื่อกระจายสัญญาณให้บริเวณนั้นมีคุณภาพสัญญาณที่ดีขึ้น

คำถามสำคัญที่เกิดขึ้นคือ ทำไมถึงเลือกใช้เทคโนโลยีเฟมโตเซลล์แก้ไขปัญหาคุณภาพสัญญาณภายในอาคารทั้งที่มีเทคโนโลยีแบบอื่นๆ ที่ช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ คำตอบคือ เรื่องต้นทุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณและดำเนินการต่างๆ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณแบบอื่นๆ ที่ให้ประสิทธิภาพด้านคุณภาพสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน เทคโนโลยีเฟมโตเซลล์สามารถตอบโจทย์ตรงนี้ได้เป็นอย่างดี (Nagashree et al., 2013) ดังนั้นผู้ให้บริการโทรศัพท์มือถือ (Mobile Operator) จึงเลือกใช้เทคโนโลยีนี้ในการแก้ไขคุณภาพสัญญาณให้ผู้ใช้งานภายในอาคาร โดยสามารถสรุปโครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์

โครงสร้างและการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์แสดงดังรูปที่ 2.1 (Abhishek et al., 2012) โดยสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือส่วนของชุมสาย (Core Network) และส่วนของเครือข่ายเฟมโตเซลล์ (Femtocell Network) โดยชุมสายเป็นเครือข่ายของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของเครือข่ายทั้งหมด โดยหน้าที่หลักๆของชุมสายก็คือการสร้างเส้นทาง (Route) ของข้อมูลจากอีกเครือข่ายหนึ่งไปยังอีกเครือข่ายหนึ่ง ซึ่งภายในประกอบไปด้วยผู้ให้บริการโทรศัพท์มือถือ (Mobile Operator) ที่จะทำการเชื่อมต่อกับผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต เพื่อที่จะได้ใช้เครือข่ายอินเทอร์เน็ตเชื่อมต่อไปยังส่วนที่สอง คือส่วนของเครือข่ายเฟมโตเซลล์ โดยสถานีฐานเฟมโตเซลล์จะเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านตัวรับสัญญาณอินเทอร์เน็ต (DSL Router) เพื่อที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์จะได้กระจายการส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้งานภายในพื้นที่ให้บริการต่อไป โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะในส่วนที่สอง คือส่วนของเครือข่ายเฟมโตเซลล์ที่จะทำการติดตั้งภายในอาคาร โดยกำหนดให้อาคารนั้นมีการวางเครือข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงหรือบรอดแบนด์ที่ผ่านตามสายภายในอาคาร (Fixed Line) ที่ถูกติดตั้งอยู่แล้ว งานวิจัยของเราจะทำการออกแบบตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสม ให้สามารถถึงสมรรถนะการทำงานของ

เทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ออกมาให้มากที่สุด เพื่อให้ผู้ใช้งานมีประสิทธิภาพในการใช้บริการมากที่สุด

## 2.4 แบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคาร

ภายในอาคารสำนักงาน บริษัท ห้างสรรพสินค้าต่างๆ ล้วนมีความซับซ้อนของการแพร่กระจายความแรงสัญญาณ จึงทำให้ไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายวิธีการสูญเสียในธรรมชาติที่มีความแตกต่างกันได้อย่างแม่นยำ โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองที่ใช้กันจะได้จากการวิเคราะห์ที่ซับซ้อน หรือได้จากการวัดจริง เนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากอุปกรณ์ภาคส่งนั้นจะต้องเคลื่อนที่ผ่านสิ่งแวดล้อมที่มีความหลากหลาย ซึ่งเป็นรูปแบบการแพร่กระจายสัญญาณที่ต้องผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆภายในอาคาร เช่น ผนัง กำแพง ประตู หรือแม้กระทั่งจำนวนชั้นภายในอาคาร ซึ่งอาจทำให้สัญญาณถูกลดทอน หรือเกิดการจางหายไป ดังนั้นในการออกแบบการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองในการคำนวณค่าความแรงสัญญาณที่ภาครับรับได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคารจากงานวิจัยของ (Vardhan et al., 2014) มาคำนวณหาค่าความแรงสัญญาณที่แต่ละจุดทดสอบสัญญาณรวมถึงตำแหน่งของผู้ใช้งานได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยเป็นแบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคารตามมาตรฐานของหน่วยงาน 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) ซึ่งเป็นกลุ่มความร่วมมือระหว่างหน่วยงานมาตรฐานการสื่อสารโทรคมนาคม เพื่อกำหนดมาตรฐานกลางในการผลิตและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับ 3G ซึ่งสามารถใช้ได้กับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่าย 4G-LTE ในสภาพแวดล้อมภายในอาคารหลายชั้นได้ ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.2) ดังนี้

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) - \text{Path Loss} \quad (2.1)$$

โดยที่

- $P_r$  = ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จากสถานีฐาน
- $P_t$  = กำลังส่งสัญญาณของสถานีฐาน (ในงานวิจัยนี้ กำหนด  $P_t = 5 \text{ dBm}$ )
- $\text{Path Loss}$  = แบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคาร

$$Path Loss(dB) = 40.7412 + 20\log_{10}(R) + 0.7d_{2D,indoor} + 18.3n\left(\frac{n+2}{n+1}\right)^{0.46} + qL_{iw} \quad (2.2)$$

โดยที่

- $R$  = ระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ (เมตร)  
 $d_{2D,indoor}$  = ความหนาของกำแพงภายในอาคาร (ในงานวิจัยนี้ กำหนด 0.18 เมตร)  
 $n$  = จำนวนชั้นของอาคารที่สัญญาณทะลุผ่าน  
 $q$  = จำนวนกำแพงภายในอาคารที่สัญญาณทะลุผ่าน  
 $L_{iw}$  = ค่าความสูญเสียของสัญญาณทะลุผ่านกำแพง

ตารางที่ 2.1 ค่าความสูญเสียของสัญญาณทะลุผ่านกำแพงประเภทต่างๆ

พารามิเตอร์	ค่า
คอนกรีต	5.31 dB
พลาสติกบอร์ด	2.94 dB
กระจก	6.27 dB
คอนกรีตเสริมเหล็ก	18.3 dB

จากสมการแบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคารในสมการที่ (2.2) ประกอบไปด้วย การสูญเสียของสัญญาณที่เกิดขึ้นภายในอากาศ (Free Space Path Loss) การสูญเสียของสัญญาณเมื่อทะลุผ่านผนัง โดยจะเกิดการสูญเสียของสัญญาณเมื่อทะลุผ่านผนัง 0.7 dB ต่อ 1 เมตร โดยความหนาของกำแพงกำหนดเป็น 0.18 เมตร (พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร, 2522) การสูญเสียของสัญญาณเมื่อทะลุผ่านจำนวนชั้นของอาคาร โดยค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง (Empirical Parameter) โดยทั่วไปกำหนดเป็น 0.46 (Namgeol et al., 2010) และค่าการสูญเสียของสัญญาณเมื่อทะลุผ่านกำแพง โดยค่าพารามิเตอร์ความสูญเสียของสัญญาณเมื่อทะลุผ่านกำแพงประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 (Zulkefly et al., 2015)



## 2.5 การโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ อย่างกว้างขวางที่สุดอย่างหนึ่ง คือ การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) เพื่อใช้ในการออกแบบปัญหาเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ของฟังก์ชันเป้าหมายเชิงเส้น (linear objective function) ที่สอดคล้องกับข้อจำกัดเชิงเส้นต่าง ๆ (Linear Constraints) จอร์จ บี ดานซิก (George B. Dantzig) นับว่าเป็นบิดาของการโปรแกรมเชิงเส้น เนื่องจากเป็นผู้ริเริ่มในการสร้างรูปแบบทั่วไปของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น และพัฒนาวิธีการอย่างมีระบบในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น ซึ่งมีการเริ่มนำมาใช้งานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2490 เป็นต้นมา จนถึงทุกวันนี้วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดดังกล่าวยังคงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยใช้อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ (Simplex Method) ในการคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งปัจจุบันได้มีการใช้แบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นอย่างกว้างขวาง และโปรแกรมสำเร็จรูปก็มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่นเดียวกันทั้งในทางธุรกิจและอุตสาหกรรม รูปแบบทั่วไปของการโปรแกรมเชิงเส้นนั้น เป็นรูปแบบที่สามารถปรับใช้ได้กับปัญหาต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เนื่องจากฟังก์ชันเป้าหมาย อาจอยู่ในรูปกำไร ค่าใช้จ่าย จำนวนผลผลิตที่มากที่สุด เป็นต้น ส่วนข้อจำกัดอาจอยู่ในรูปของข้อจำกัดของทรัพยากรที่มีอยู่ ข้อจำกัดทางการตลาด ข้อจำกัดด้านคุณภาพ เป็นต้น จากหนังสือการโปรแกรมเชิงเส้น (ประกอบ จิรจิตติ 2535) ได้กล่าวถึง ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงเส้น ดังนี้

1) ปัญหาทางด้านการผลิต (Product Mix Problem) เป็นการพิจารณาปริมาณสินค้าที่จะทำการผลิต เพื่อใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เช่น เครื่องจักร วัตถุดิบ แรงงาน ให้เป็นไปอย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ผลตอบแทนสูงสุด

2) ปัญหาการผสมสาร (Blending Problem) เป็นการพิจารณาหาปริมาณสารหรือวัตถุดิบชนิดต่างๆที่จะนำมาผสมกันหรือนำมาใช้ในการผลิตสินค้าประเภทต่างๆตามคุณสมบัติที่ได้กำหนดไว้ เพื่อที่จะได้มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด

3) ปัญหาการขนส่ง (Transportation Problem) เป็นการพิจารณาหาปริมาณสินค้าที่จะทำการขนส่งจากแหล่งผลิต ไปยังผู้บริโภค หรือปลายทางเพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่ำที่สุด หรือส่งถึงปลายทางได้เร็วที่สุด

4) ปัญหาการมอบหมายงาน (Assignment Problem) เป็นการพิจารณาการมอบหมายงานที่จะต้องทำให้กับบุคลากรหรือเครื่องจักร เพื่อให้งานที่ได้รับการมอบหมายแล้วเสร็จในเวลาเร็วที่สุดหรือเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

5) ปัญหาการลงทุน (Investment Project Selection) เป็นการพิจารณาจัดสรรเงินลงทุนในการลงทุนต่างๆ เพื่อให้ได้รับผลตอบแทนสูงที่สุด

6) ปัญหาการเลือกสื่อโฆษณา (Media Selection) เป็นการพิจารณาเลือกสื่อโฆษณาชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ข้อมูลหรือข่าวสารที่ต้องการเผยแพร่ออกสู่เป้าหมายเป็นจำนวนมากที่สุด หรือเสียค่าใช้จ่ายในการโฆษณาน้อยที่สุด เป็นต้น

7) ปัญหาการตัดกระดาศ (Trim Loss Problem) เป็นการพิจารณารูปแบบหรือวิธีการตัดกระดาศ (หรือสินค้าอื่นๆที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เช่น การตัดผ้า การตัดแผ่นเหล็ก) เพื่อที่จะหารูปแบบการตัดกระดาศขนาดมาตรฐานที่มีอยู่ออกเป็นขนาดและปริมาณต่างๆ ตามความต้องการเพื่อที่จะให้มีเศษ (ส่วนที่ใช้ประโยชน์ต่อไปไม่ได้) น้อยที่สุด

8) ปัญหาทางด้านการทหาร อาจนำมาโปรแกรมเชิงเส้นมาใช้ในการพิจารณาวางแผนการส่งกำลังบำรุง การเลือกกำหนดจำนวนอาวุธยุทโธปกรณ์ การกำหนดยุทธศาสตร์ เป็นต้น

### 2.5.1 ข้อสมมุติฐานสำคัญในการโปรแกรมเชิงเส้น ได้แก่

1) ความเป็นสัดส่วน (Proportionality) คือ ปริมาณทรัพยากรที่ใช้ในการผลิตสินค้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนสินค้าที่ทำการผลิต เช่น ในการผลิตสินค้าชนิดหนึ่ง จะต้องใช้แรงงานในการผลิต 6 ชั่วโมงต่อหน่วย ดังนั้นหากทำการผลิตสินค้าชนิดนี้ 10 ชิ้น ก็จะต้องใช้แรงงานในการผลิตทั้งสิ้น 60 ชั่วโมง

2) การรวมกันได้ (Additivity) หมายความว่า ปริมาณรวมของผลกำไรจะมีค่าเท่ากับผลรวมของกำไรของสินค้าแต่ละชนิด เช่น สินค้าชนิดที่หนึ่งมีกำไรเท่ากับ 10 บาทต่อหน่วย สินค้าชนิดที่สองมีกำไรเท่ากับ 15 บาทต่อหน่วย หากขายสินค้าชนิดที่หนึ่งได้เพียงชนิดเดียวจำนวน 10 ชิ้น จะได้กำไร 100 บาท ( $10 \times 10$ ) เป็นต้น

3) การแบ่งได้ (Divisibility) หมายความว่า ค่าของตัวแปรตัดสินใจที่มีอยู่ในปัญหาเมื่อหาคำตอบออกมาแล้ว จะมีค่าใด ๆ ก็ได้ เช่น อาจเป็นเลขจำนวนเต็ม เศษส่วน หรือทศนิยม ในกรณีที่คำตอบที่ออกมาเป็นเลขไบนารี คือ มีค่าที่เป็นไปได้สองค่า ได้แก่ ศูนย์กับหนึ่งก็จะต้องใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีในการหาคำตอบที่ดีที่สุด

4) การทราบค่า (Deterministic) หมายความว่า เราจะทราบค่าต่าง ๆ ในปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นทุกค่า ยกเว้นค่าของตัวแปรตัดสินใจ เช่น ในการหาปริมาณการผลิตสินค้า เพื่อให้ได้กำไรสูงสุดนั้น จะต้องทราบว่า สินค้าที่ผลิตแต่ละชนิดมีกำไรต่อหน่วยเท่าไร ใช้ทรัพยากรใดบ้างในการผลิต มีการใช้ทรัพยากรแต่ละชนิดในการผลิตสินค้าต่อหน่วยเท่าไร เป็นต้น

## 2.5.2 รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้น

รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้นมีสองลักษณะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่พิจารณานั้นเป็นปัญหาการหาค่าสูงสุด (Maximization) หรือเป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุด (Minimization) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.3) ถึง (2.5) ดังนี้

วัตถุประสงค์ หาค่าสูงสุดของ หรือหาค่าที่ต่ำที่สุด

$$z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (2.3)$$

ภายใต้ข้อจำกัด

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\ &\dots \\ &\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m \end{aligned} \quad (2.4)$$

และ

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \geq 0 \quad (2.5)$$

โดยที่

$x_j$  คือ ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) หรือ จำนวนหน่วยของกิจกรรมที่  $j$  ที่ตัดสินใจทำ เช่น อาจหมายถึงจำนวนหน่วยของสินค้าที่  $j$  ที่จะทำการผลิต  $j = 1, 2, \dots, n$

$c_j$  คือ ผลตอบแทน (Profit) ที่ได้จากการตัดสินใจทำกิจกรรมที่  $j$  ต่อหนึ่งหน่วย เช่น ในกรณีของการผลิตสินค้าจำนวน  $c_j$  จะหมายถึงกำไรที่ได้จากการจำหน่ายสินค้าชนิดที่  $j$  หนึ่งหน่วย  $j = 1, 2, \dots, n$

$a_{ij}$  คือ จำนวนทรัพยากรชนิดที่  $i$  ที่จะใช้ในการทำกิจกรรมที่  $j$  หนึ่งหน่วย (Resource Consumption rate)  $i = 1, 2, \dots, m$  และ  $j = 1, 2, \dots, n$

$b_i$  คือ จำนวนทรัพยากร (Resource) ชนิดที่  $i$  ที่มีอยู่เพื่อใช้ในการทำกิจกรรมต่าง ๆ  $i = 1, 2, \dots, m$

ในแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นมาตรฐานนี้ เราต้องการที่จะหาค่าของตัวแปรตัดสินใจ  $x_j$  ต่าง ๆ ว่ามีค่าเท่ากับเท่าไรจึงจะทำให้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าสูงสุด หรือต่ำที่สุด โดยที่ตัวแปรตัดสินใจเหล่านี้จะต้องสอดคล้องกับข้อจำกัดในการใช้ทรัพยากรทั้ง  $m$  ข้อจำกัด คือใช้ทรัพยากรไม่เกินปริมาณทรัพยากรที่มีอยู่ และต้องมีค่ามากกว่า และไม่เป็นจำนวนลบ (Non-Negative) สำหรับค่า  $a_{ij}, b_i, c_j$  นั้นจะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่าอยู่แล้ว

### 2.5.3 ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นมาตรฐาน

จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ สามส่วน ดังนี้

1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุน กำไร เพื่อต้องการให้ได้มาซึ่งเป้าหมายที่ทำให้เกิดค่าสูงสุด หรือค่าต่ำที่สุด ดังสมการที่ (2.3)

2) สมการข้อจำกัดของปัญหา หรือ เงื่อนไข (Constraints) คือ ข้อจำกัดของปัญหาในด้านทรัพยากร หรือปัจจัยต่าง ๆ โดยแต่ละเงื่อนไขจะมีความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้น (Linear Equation) หรือ อสมการเชิงเส้น (Linear Inequality) ดังสมการที่ (2.4)

3) ตัวแปรตัดสินใจ เป็นตัวแปรที่ใส่เข้าไปในระบบ และต้องการหาคำตอบ ดังสมการที่ (2.5)

### 2.5.4 คุณสมบัติของรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้น

1) สมการของตัวแปรตัดสินใจต้องเป็นสมการเชิงเส้น โดยที่ตัวแปรทุกตัวจะต้องมีกำลังเป็น 1 เท่านั้น นอกจากนี้ต้องเขียนอยู่ในรูปแบบของการบวก การลบกันของตัวแปรต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น  $3x_1 + 5x_2$  เป็นสมการเชิงเส้น เพราะตัวแปรมีเลขชี้กำลังเป็น 1 และ ตัวแปรทุกตัวมีค่าเป็นจำนวนเต็ม

2) สมการวัตถุประสงค์ ต้องเป็นการระบุว่าต้องการหาค่าสูงสุด หรือค่าต่ำสุด โดยจะต้องแสดงถึงจุดประสงค์ในการตัดสินใจ เช่น ลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนให้น้อยที่สุด

3) สมการเงื่อนไข ต้องเป็นสมการหรืออสมการเชิงเส้นที่อยู่ในรูปน้อยกว่าเท่ากับ ( $\leq$ ) มากกว่าเท่ากับ ( $\geq$ ) หรือเท่ากับ ( $=$ ) เท่านั้น โดยที่ค่าของตัวแปรตัดสินใจของทุกเทอมในสมการเงื่อนไข จะต้องมีความเหมือนกัน

4) ข้อจำกัดของสัญลักษณ์ (Sign Restrictions) ถ้าต้องการกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นบวกจะกำหนดข้อจำกัดของสัญลักษณ์ได้ เช่น  $x_1 \geq 0$  แต่หากว่า ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบหรือมีค่าเป็นศูนย์ จะเรียกว่า Unrestricted in Sign (urs)

### 2.5.5 การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหา

ในการสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น จะไม่สามารถกำหนดเป็นกฎเกณฑ์ตายตัวได้ ทั้งนี้เพราะปัญหาแต่ละปัญหานั้นมีลักษณะที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม สามารถสรุปเป็นขั้นตอนทั่วไป ได้ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** การให้นิยามตัวแปรตัดสินใจ ( $x$ ) ในแต่ละปัญหานั้นจะมีการนิยามตัวแปรตัดสินใจที่แตกต่างกันไปตามลักษณะเฉพาะของปัญหาต่าง ๆ เช่น ในการพิจารณาว่าจะเลือกปลูกผักชนิดใดบ้าง จำนวนกี่หน่วย อาจให้  $x_1$  เป็นตัวแปรตัดสินใจ โดยหมายถึง จำนวนหน่วยของผักชนิดที่ 1 ที่จะปลูก ในการพิจารณาว่าต้องใช้เหล็กชนิดใดบ้าง เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามต้องการ อาจให้  $x_i$  แทนค่าตัวแปรตัดสินใจ โดยหมายถึงการเลือกใช้เหล็กชนิดที่  $i$  ที่จะใช้ในการสร้างชิ้นงานตามต้องการ ซึ่งในกรณีนี้ตัวแปรตัดสินใจจะเป็นตัวแปรที่มีมิติเดียว แต่บางครั้งในการออกแบบปัญหานั้นอาจใช้ตัวแปรตัดสินใจที่มากกว่าหนึ่งมิติ เช่น  $x_{ij}$  หมายถึง เหล็กชนิด  $i$  ที่จะเลือกใช้ในปีที่  $j$  เป็นต้น

**ขั้นตอนที่ 2** การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ( $z$ ) หลังจากที่ได้กำหนดนิยามตัวแปรตัดสินใจแล้ว จะต้องทำการเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในเทอมของตัวแปรตัดสินใจตามที่ได้กำหนดไว้ พร้อมทั้งระบุให้ชัดเจนว่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นต้องการหาค่าที่สูงที่สุด หรือค่าที่ต่ำที่สุด

**ขั้นตอนที่ 3** การกำหนดเงื่อนไข หรือข้อจำกัดของปัญหา คือการเขียนข้อจำกัดของปัญหาให้อยู่ในเทอมของตัวแปรตัดสินใจ เช่น ข้อจำกัดเกี่ยวกับทรัพยากรที่มีอยู่ หรือ ข้อจำกัดของสิ่งที่พิจารณา เป็นต้น

**ขั้นตอนที่ 4** การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้น หลังจากที่ได้ออกแบบส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นแล้ว ขั้นตอนนี้จะเป็นการรวบรวมฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัด ต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน

**ขั้นตอนที่ 5** การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เมื่อได้ทำการสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นแล้ว ก็จะต้องทำการตรวจสอบแบบจำลอง ค่าพารามิเตอร์ ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้นั้น ถูกต้องแล้วหรือไม่

## 2.6 การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริธึมซิมเพล็กซ์

วิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex Method) จากหนังสือการวิจัยดำเนินงาน (รองศาสตราจารย์สุทธิมา ชำนาญเวช 2009) กล่าวว่า เป็นวิธีการคำนวณที่สามารถใช้ในแก้ปัญหาการกำหนดการเชิงเส้นได้ กว้างขวางมาก ซึ่งได้พัฒนาขึ้นโดย จอร์จ บี ดานซิก (George B. Dantzig) นักคณิตศาสตร์ชาวอเมริกัน นับว่าเป็นบิดาของการโปรแกรมเชิงเส้น เนื่องจากเป็นผู้ริเริ่มในการสร้างรูปแบบทั่วไปของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น และพัฒนาวิธีการอย่างมีระบบในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นซึ่งมีการเริ่มนำมาใช้งานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2490 เป็นต้นมา จนถึงทุกวันนี้ วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดดังกล่าวยังคงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งวิธีซิมเพล็กซ์ เป็นวิธีการทางพีชคณิตประกอบกับการคำนวณเมทริกซ์ (Matrix) โดยใช้หลักการปรับเปลี่ยนตัวแปรอย่างมีหลักเกณฑ์เพื่อให้มีผลต่อเป้าหมายของปัญหาและบรรลุผลตามเป้าหมายโดยเร็วที่สุด ดังนั้น อัลกอริธึมซิมเพล็กซ์จะเป็นวิธีการคำนวณที่มีลักษณะแบบย้อนทำซ้ำขั้นตอน นั่นคือ จะคำนวณซ้ำๆ กันจนกว่าจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด

จากความคิดมูลฐานของวิธีซิมเพล็กซ์ คือ การแก้ปัญหาหาระบบสมการ โดยการกระทำซ้ำๆ กัน เริ่มจากคำตอบมูลฐานเริ่มต้นที่เป็นไปได้ แล้วเปลี่ยนตัวแปรมูลฐานใหม่ครั้งละ 1 ตัว โดยพิจารณาจากตัวแปรที่ไม่เป็นมูลฐาน เรียกตัวแปรมูลฐานใหม่นี้ว่า ตัวแปรมูลฐานเข้า (Entering Basic Variable) สำหรับตัวแปรมูลฐานเดิมที่ถูกแทนที่ด้วยตัวแปรมูลฐานใหม่จะกำหนดให้เป็นตัวที่ไม่เป็นมูลฐาน เรียกตัวแปรนี้ว่า ตัวแปรมูลฐานออก (Leaving Basic Variable)

การแก้ปัญหาโดยวิธีซิมเพล็กซ์จะต้องมีการสร้างรูปแบบกำหนดการเชิงเส้นให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน คือเปลี่ยนข้อจำกัดที่อยู่ในรูปอสมการให้เป็นสมการที่สมมูลกันตัวอย่างเช่น

$$\text{หาค่าสูงสุด} \quad Z = 3X_1 + 5X_2 \quad (2.6)$$

$$\text{ข้อจำกัด} \quad X_1 \leq 4 \quad (2.7)$$

$$2X_2 \leq 12 \quad (2.8)$$

$$3X_1 + 2X_2 \leq 18 \quad (2.9)$$

$$X_1, X_2 \geq 0 \quad (2.10)$$

เขียนข้อจำกัดให้อยู่ในรูปสมการข้อจำกัดที่สมมูลกัน โดยใช้ตัวแปรขาด (Slack Variable) ดังนี้ให้  $S_1, S_2, S_3 \geq 0$  เป็นตัวแปรขาด สมการข้อจำกัดที่สมมูลกับข้อจำกัดคือ

$$X_1 + S_1 = 4 \quad (2.11)$$

$$2X_2 + S_2 = 12 \quad (2.12)$$

$$3X_1 + 2X_2 + S_3 = 18 \quad (2.13)$$

## 2.6.1 ขั้นตอนของวิธีซิมเพล็กซ์

### 2.6.1.1 ขั้นตอนเริ่มต้น (Initialization Step)

ให้  $(X_1, X_2)$  เป็นตัวแปรไม่เป็นมูลฐานเริ่มต้นและมีค่าเป็น 0 (เพื่อรักษาข้อจำกัด  $X_1 \geq 0$ ) ดังนั้นตัวแปรขาด  $(S_1, S_2, S_3)$  จะเป็นตัวแปรมูลฐานเริ่มต้น เพื่อความสะดวกในการหาคำตอบจึงสร้างรูปแบบของตารางวิธีซิมเพล็กซ์เพื่อบันทึกข้อมูลที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. สัมประสิทธิ์ของตัวแปร
2. ค่าคงที่ทางขวามือของแต่ละสมการ
3. ตัวแปรมูลฐานที่ปรากฏในแต่ละสมการขณะที่ทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปร

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าแต่ละสมการข้อจำกัดจะมีตัวแปรมูลฐาน 1 ตัว และมีสัมประสิทธิ์เป็น +1 ตัวแปรมูลฐานแต่ละตัวมีค่าเท่ากับค่าคงที่ทางขวามือของสมการ ดังนั้นตัวแปรมูลฐานที่เป็นไปได้เริ่มต้น (Initial Basic Feasible Solution) จากตารางคือ  $(X_1, X_2, S_1, S_2, S_3) = (0, 0, 4, 12, 18)$

ตารางที่ 2.2 ตารางซิมเพล็กซ์ของกำหนดการเชิงเส้น

ตัวแปร มูลฐาน	สมการ ที่	สัมประสิทธิ์ของ						ค่าคงที่ ขวามือ
		Z	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	
Z	0	1	-3	-5	0	0	0	0
$S_1$	1	0	1	0	1	0	0	4
$S_2$	2	0	0	2	0	1	0	12
$S_3$	3	0	3	2	0	0	1	18

### 2.6.1.2 ขั้นตอนที่ต้องกระทำซ้ำๆ (Iteration Step)

เมื่อได้คำตอบเริ่มต้นแล้ว ต่อไปต้องมีการปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสม โดยการเพิ่มค่าตัวแปรขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** ตัวแปรมูลฐานเข้า (Entering Basic Variable) ในกรณีปัญหาที่ต้องการหาค่าสูงสุดจะพิจารณาเลือกตัวแปรไม่เป็นมูลฐานที่มีสัมประสิทธิ์ในสมการ (0) ติดลบมากที่สุดเพราะเมื่อตัวแปรเพิ่มค่าจาก 0 เป็นค่าบวกจะทำให้เพิ่มค่า  $Z$  ได้เร็วที่สุด เช่น  $Z - 3X_1 - 5X_2 = 0$  เริ่มต้นให้  $X_1 = X_2 = 0$  จะมีผลทำให้  $Z = 0$  เมื่อเพิ่มของตัวแปร  $X_1, X_2$  จะมีผลทำให้  $Z$  สูงขึ้น เช่น

ถ้าเพิ่มค่า  $X_1$  โดยที่  $X_2 = 0$  จะมีผลทำให้  $Z = 3X_1$

ถ้าเพิ่มค่า  $X_2$  โดยที่  $X_1 = 0$  จะมีผลทำให้  $Z = 5X_2$

การเพิ่มค่าตัวแปรใดจึงต้องดูค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นลบ เพราะเมื่อย้ายข้างจะเป็นบวก และจากสมการ (2.6) จะได้ว่า ต่อ 1 หน่วยที่เพิ่มค่า  $X_2$  จะได้ค่า  $Z$  เพิ่มขึ้นเร็วกว่าเพิ่มค่า  $X_1$  1 หน่วย ดังนั้นเพื่อให้ค่า  $Z$  ถึงจุดเป้าหมายเร็วที่สุดจึงเลือกตัวแปรเข้าที่มีสัมประสิทธิ์ติดลบมากที่สุด

จากตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร  $X_2$  ติดลบมากที่สุดคือ -5 จึงเลือกเป็นตัวแปรมูลฐานเข้า คือเปลี่ยนจากตัวแปรที่ไม่เป็นมูลฐานเป็นตัวแปรมูลฐาน คอลัมน์ (Column) ที่อยู่ภายใต้ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ของในข้อจำกัดเรียกว่า คอลัมน์หลัก (Pivot Column) ดังตารางที่ 2.3 และถ้าสมการ (0) มีสัมประสิทธิ์ของตัวแปรเป็น 0 หรือเป็นบวก แสดงว่าไม่สามารถหาตัวแปรมูลฐานเข้าเพื่อเพิ่มค่า  $Z$  ได้ อีก

**ขั้นตอนที่ 2** หาตัวแปรมูลฐานออก (leaving basic variable)

1) เลือกสัมประสิทธิ์ในคอลัมน์หลักที่มีค่ามากกว่า 0  
2) หาค่าคงที่ทางขวามือด้วยสัมประสิทธิ์ในคอลัมน์หลักที่มีค่ามากกว่า 0 และอยู่ในแถวเดียวกัน

3) เลือกสมการที่ให้ผลหารน้อยที่สุด แถวที่ให้ผลหารน้อยที่สุดเรียกว่าแถวหลัก (Pivot Row) ค่าตัวเลขในแถวนั้นเรียกว่าเลขหลัก (Pivot Number)

ตารางที่ 2.3 ตัวแปรมูลฐานเข้า คือตัวแปร  $X_2$

ตัวแปร มูลฐาน	สมการ ที่	สัมประสิทธิ์ของ						ค่าคงที่ ขวามือ
		Z	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	
Z	0	1	-3	-5	0	0	0	0
$S_1$	1	0	1	0	1	0	0	4
$S_2$	2	0	0	2	0	1	0	12
$S_3$	3	0	3	2	0	0	1	18



4) เลือกตัวแปรมูลฐานออกจากแถวนี้ คือตัวแปร  $S_2$  ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวแปรมูลฐานออก คือตัวแปร  $S_2$

ตัวแปร มูลฐาน	สมการ ที่	สัมประสิทธิ์ของ						ค่าคงที่ ขวามือ
		Z	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	
Z	0	1	-3	-5	0	0	0	0
$S_1$	1	0	1	0	1	0	0	4
$S_2$	2	0	0	2	0	1	0	12
$S_3$	3	0	3	2	0	0	1	18

ขั้นตอนที่ 3 หาคำตอบมูลฐานที่เป็นไปได้ชุดใหม่โดยสร้างตารางใหม่ ดังนี้

- 1) ใน 3 คอลัมน์แรกยังคงเดิม ยกเว้น  $S_2$  ในสมการ ซึ่งเป็นตัวแปรออกจะถูกแทนที่ด้วย  $X_2$
- 2) สัมประสิทธิ์ของตัวแปรมูลฐานใหม่ในแถวหลักทำให้เป็น +1 โดยหารแถวหลักด้วยเลข

หลัก แสดงดังตารางที่ 2.5

สัมประสิทธิ์ของทุกตัวแปรในแถวหลักใหม่ = สัมประสิทธิ์เดิมในแถวหลัก / เลขหลัก

ตารางที่ 2.5 สัมประสิทธิ์ของทุกตัวแปรในแถวหลักใหม่

ตัวแปร มูลฐาน	สมการ ที่	สัมประสิทธิ์ของ						ค่าคงที่ ขวามือ
		Z	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	
Z	0							
$S_1$	1	0						
$X_2$	2	0	0	1	0	1/2	0	6
$S_3$	3	0						

ต่อไปทำให้สัมประสิทธิ์ของ  $X_2$  ในแถวอื่น เป็น 0 ทั้งหมด ซึ่งทำได้โดยใช้สูตรดังนี้

$$\text{แถวใหม่} = \text{แถวเดิม} - (\text{สัมประสิทธิ์ในคอลัมน์หลัก} \times \text{แถวหลักใหม่})$$

พิจารณาแถว (0) สัมประสิทธิ์ที่ตรงกับคอลัมน์หลักหรือสัมประสิทธิ์ที่ตรงกับ  $X_2$  คือ -5

แถว (0) ใหม่ = แถว (0) เดิม - [ (-5) x แถวหลักใหม่ ]

	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	ค่าคงที่ขวามือ
แถว (0) เดิม	-3	-5	0	0	0	0
(-5) x แถวหลักใหม่	0	5	0	-5/2	0	-30
แถว (0) ใหม่	-3	0	0	5/2	0	30

พิจารณาแถว (3) สัมประสิทธิ์ในคอลัมน์หลักคือ 2

เอา 2 คูณเข้ากับแถวหลักใหม่ แล้วลบออกจากแถว (3) จะได้

	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	ค่าคงที่ขวามือ
แถว (3) เดิม	3	2	0	0	1	18
(2) x แถวหลักใหม่	0	2	0	1	0	12
แถว (3) ใหม่	3	0	0	-1	1	6

ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนตัวแปรเข้าและตัวแปรออก 1 ครั้งจะได้ตารางใหม่ ค่าของตัวแปรมูลฐานยังคงเท่ากับค่าคงที่ขวามือ ค่าตอบมูลฐานที่เป็นไปได้ ชุดใหม่ คือ  $(X_1, X_2, S_1, S_2, S_3) = (0, 6, 4, 0, 6)$  ค่า  $Z = 30$  แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าตัวแปรมูลฐานใหม่

ตัวแปร มูลฐาน	สมการ ที่	สัมประสิทธิ์ของ					ค่าคงที่ ขวามือ	
		Z	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$		$S_3$
Z	0	1	-3	0	0	5/2	0	30
$S_1$	1	0	1	0	1	0	0	4
$X_2$	2	0	0	1	0	1/2	0	6
$S_3$	3	0	3	0	0	-1	1	6

จากตารางจะเห็นได้ว่า  $X_2$  เป็นตัวแปรมูลฐานเข้าซึ่งเพิ่มค่าจาก 0 เป็น 6 ขณะที่  $S_2$  เป็นตัวแปรมูลฐานออก ซึ่งลดค่าเป็น 0 การที่เลือกตัวแปรมูลฐานออกคือ  $S_2$  ซึ่งได้ จากแถวที่ให้ผลหารของค่าคงที่ขวามือ ซึ่งหารด้วยค่าสัมประสิทธิ์ในคอลัมน์หลักมีค่าน้อยที่สุดนั้นเพราะว่า ค่า  $X_2$  ที่เพิ่มขึ้นนี้จะต้องสอดคล้องกับทุกๆข้อจำกัด ถ้าเลือกตัวแปรมูลฐานออกจากแถวที่ให้ผลหารมาก

ที่สุด จะได้ว่าตัวแปรที่เพิ่มค่าจะไม่สอดคล้องกับทุกข้อจำกัดเดิม ตัวอย่างเช่น ข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับ  $X_2$  คือ

$$2X_2 \leq 12$$

$$3X_1 + 2X_2 \leq 18$$

ถ้า  $X_2 = 6$  จะได้ว่าเมื่อแทน  $X_2 = 6, X_1 = 0$  ลงในอสมการทั้งสองอสมการยังคงเป็นจริง แต่ถ้าเลือก  $S_3$  ในสมการ (3) เป็นตัวแปรออก เมื่อ  $X_2$  เข้าแทนที่  $S_3$  จะต้องทำให้สัมประสิทธิ์ของ  $X_2$  ในสมการ (3) เป็น +1 ค่าของ  $X_2$  ที่เพิ่มขึ้นคือ ค่าคงที่ขวามือจะได้เท่ากับ 9 เมื่อแทน  $X_2 = 9$  ลงในอสมการ  $2X_2 \leq 12$  จะได้ว่าไม่เป็นจริง ดังนั้นจึงต้องเลือกตัวแปรออกในแถวที่มีผลหารน้อยที่สุด เพื่อให้ค่าที่ได้ยังคงสอดคล้องกับข้อจำกัด

**ขั้นตอนที่ 4** เมื่อได้คำตอบมูลฐานที่เป็นไปได้ชุดใหม่แล้ว ต่อไปตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้เหมาะสมหรือไม่ จากสมการ (0) จะเห็นได้ว่ายังมีสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่เป็นลบคือสัมประสิทธิ์ของ  $X_1$  เท่ากับ -3 แสดงว่ายังสามารถเพิ่มค่า  $Z$  ได้อีกโดยพิจารณาตัวแปรเข้าและตัวแปรออกใหม่ จะได้ว่าให้  $X_1$  เป็นตัวแปรเข้า  $S_3$  เป็นตัวแปรออก ดังตารางที่ 2.7 เลขหลักคือ 3 ทำให้เลขหลักหรือสัมประสิทธิ์ของ  $X_1$  ในแถว (3) หรือแถวหลักเป็น 1 โดยเอา 3 หารตลอด ได้สัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแถวหลักใหม่คือ

	$X_1$	$X_2$		$S_1$	$S_2$	$S_3$		ค่าคงที่ขวามือ
แถวหลักใหม่	1	0		0	-1/3	-1/3		2

ตารางที่ 2.7 ตัวแปรเข้าคือ  $X_1$  ตัวแปรออกคือ  $S_3$

ตัวแปร มูลฐาน	สมการ ที่	สัมประสิทธิ์ของ						ค่าคงที่ ขวามือ
		Z	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	
Z	0	1	-3	0	0	5/2	0	30
$S_1$	1	0	1	0	1	0	0	4
$X_2$	2	0	0	1	0	1/2	0	6
$S_3$	3	0	3	0	0	-1	1	6

ต่อไปทำให้สัมประสิทธิ์ของ  $X_1$  ในแถวอื่นเป็น 0 ทั้งหมดโดยใช้สูตรในสมการดังนี้

	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	ค่าคงที่ขวามือ
แถว (0) เดิม	-3	0	0	5/2	0	30
(-3) x แถวหลักใหม่	-3	0	0	1	-1	-6
แถว (0) ใหม่	0	0	0	3/2	1	36

	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	ค่าคงที่ขวามือ
แถว (1) เดิม	1	0	1	0	0	4
(1) x แถวหลักใหม่	1	0	0	-1/3	1/3	2
แถว (1) ใหม่	0	0	1	1/3	-1/3	2

แถว (2) ใหม่คือแถว (2) เดิม เพราะสัมประสิทธิ์  $X_1$  เป็น 0 อยู่แล้ว ดังนั้นจะได้ตารางใหม่ ค่าตอบ  
 มูลฐานที่เป็นไปได้ชุดใหม่ คือ  $(X_1, X_2, S_1, S_2, S_3) = (2, 6, 2, 0, 0)$  ค่า  $Z = 36$  เมื่อคูณประสิทธิ์  
 ของตัวแปรที่ไม่เป็นมูลฐานในสมการ (0) จะได้ว่ามีสัมประสิทธิ์เป็นบวกทั้งหมด แสดงว่าการ  
 กระทำซ้ำๆ นี้สิ้นสุดลง เพราะไม่สามารถหาตัวแปรเข้าและตัวแปรออกที่จะเพิ่มค่า  $Z$  ได้อีก ดังนั้น  
 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหานี้คือ  $X_1 = 2, X_2 = 6, Z = 36$  สำหรับตารางซิมเพล็กซ์ที่  
 สมบูรณ์ของปัญหานี้แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ตารางซิมเพล็กซ์ที่สมบูรณ์ของปัญหานี้

ตัวแปร มูลฐาน	สมการ ที่	สัมประสิทธิ์ของ						ค่าคงที่ ขวามือ
		Z	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	
Z	0	1	0	0	0	3/2	1	36
$S_1$	1	0	0	0	1	1/3	-1/3	2
$X_2$	2	0	0	1	0	1/2	0	6
$X_1$	3	0	1	0	0	-1/3	1/3	2

## บทที่ 3

### การวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวนและตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ สำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น

ในบทนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวนและตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอี (4G-Long Term Evolution : 4G-LTE) ภายในอาคารหลายชั้น โดยนำความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 มาเป็นแนวคิดออกแบบการทดลองเบื้องต้นเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวนและตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 3.1 แนวคิดในการออกแบบการทดลองเบื้องต้นสำหรับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ หัวข้อ 3.2 การทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง หัวข้อ 3.3 การวิเคราะห์และประเมินผลกระทบของจำนวนและตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น และหัวข้อ 3.4 สรุปผลการทดลอง

#### 3.1 แนวคิดในการออกแบบการทดลองเบื้องต้นสำหรับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์

ในปัจจุบันอาคารสำนักงานหลายแห่งมักประสบปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพสัญญาณโทรศัพท์มือถือที่แย่ โดยมีสาเหตุหลักเกิดจากสถานีฐานภายนอกไม่สามารถส่งสัญญาณมาถึงบริเวณนั้นได้ ทำให้เกิดการอับสัญญาณขึ้นภายในอาคาร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้บริการของผู้ใช้งานที่อยู่ภายในอาคารนั้นแย่ตามไปด้วย ซึ่งในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีที่เข้ามาช่วยขยายคุณภาพสัญญาณภายในอาคารหลายประเภท แต่เทคโนโลยีที่ช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับผู้ให้บริการมากที่สุดคือเทคโนโลยี เฟมโตเซลล์ ซึ่งเป็นสถานีฐานโทรศัพท์มือถือขนาดเล็กที่ติดตั้งได้ง่าย ไม่มีอุปกรณ์ในการติดตั้งที่ซับซ้อน แต่ปัญหาใหญ่คือจะติดตั้งจำนวนและตำแหน่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารลักษณะใดถึงจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของผู้ใช้งานภายในอาคารมากที่สุด และถึงสมรรถนะการทำงานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ออกมาให้มากที่สุด ดังนั้นจำนวนและตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จึงมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากจะส่งผลต่อคุณภาพสัญญาณที่ผู้ใช้งานสามารถรับสัญญาณได้จากสถานีฐานเฟมโตเซลล์

วิทยานิพนธ์ในหัวข้อนี้ จะนำเสนอการทดลองเบื้องต้นเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของจำนวน และตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น โดยแบ่งการทดลองออกเป็น หลายๆ โครงสร้างเครือข่าย ที่ประกอบไปด้วยจำนวนและตำแหน่งการวางสถานีฐานที่แตกต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลการให้บริการของผู้ใช้งานเมื่อมีจำนวนและตำแหน่งการวาง สถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่แตกต่างกัน โดยพิจารณาจากความสามารถในการรองรับผู้ใช้งานของ สถานีฐานเฟมโตเซลล์ และพิจารณาจากคุณภาพความแรงสัญญาณของผู้ใช้งานที่จุดทดสอบ คุณภาพสัญญาณและตำแหน่งของผู้ใช้งานภายในอาคาร เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการวางสถานี ฐานเฟมโตเซลล์ในโครงสร้างแบบต่างๆ เพื่อนำไปพัฒนาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ด้วย ระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นสำหรับการวางแผนการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้เหมาะสม กับโครงสร้างของอาคารทั้งประเภทอาคารชั้นเดียวและในอาคารประเภทหลายชั้นต่อไป

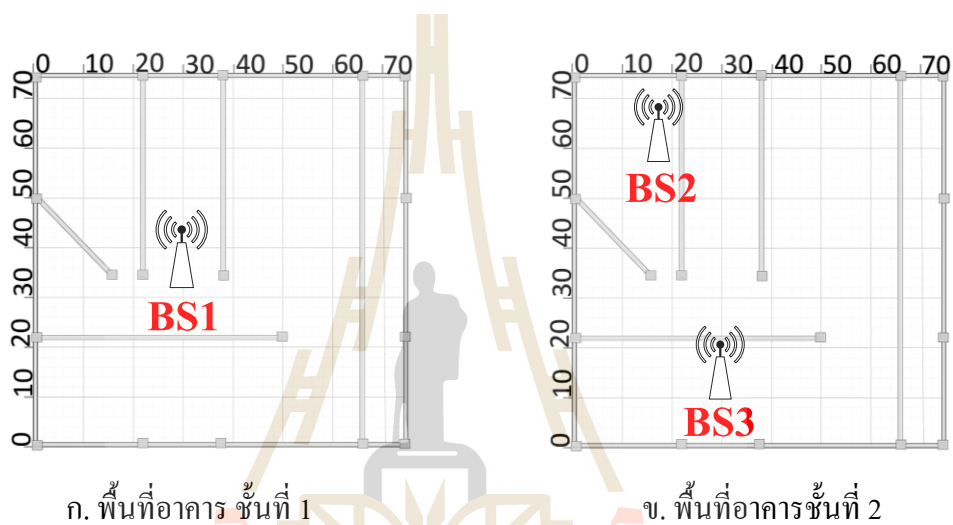
### 3.2 การทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะแสดงรูปแบบของการทดลองรวมถึงค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อต่างๆ ได้แก่ 3.2.1 รูปแบบของการทดลอง และ 3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ ในการทดลอง

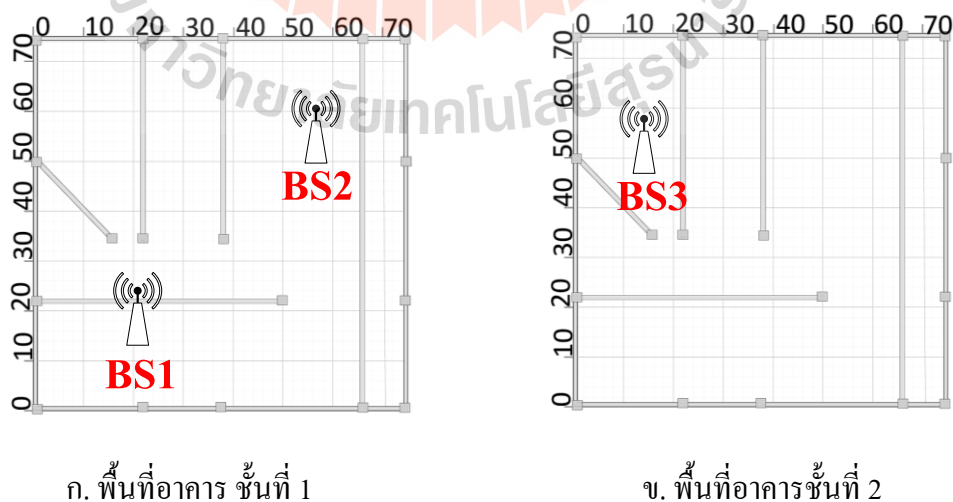
#### 3.2.1 รูปแบบของการทดลอง

การทดลองเบื้องต้นได้ออกแบบรูปแบบโครงสร้างเครือข่ายขึ้นมาจำนวน 9 รูปแบบ ใน พื้นที่ของอาคารที่มีขนาดพื้นที่การทดลองจำนวน 2 ชั้น ( 1<sup>st</sup> floor และ 2<sup>nd</sup> floor ) ในแต่ละชั้นมีความ กว้าง 75 เมตร ความยาว 75 เมตร ความสูง 3 เมตร โดยลักษณะโครงสร้างของกำแพงในแต่ละชั้นจะ เหมือนกัน คือมีจำนวนและโครงสร้างที่ไม่ค่อยซับซ้อนมาก ซึ่งในแต่ละรูปแบบโครงสร้างเครือข่าย จะทำการสุ่มเลือกจำนวนและตำแหน่งที่จะติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ขึ้นมา โดยคำนึงถึงบริเวณที่ มีผู้ใช้งานอยู่อย่างหนาแน่นเป็นแนวคิดหลักในการออกแบบตำแหน่งที่จะติดตั้งสถานีฐาน เพื่อทำการศึกษาว่าจำนวนและตำแหน่งที่ติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่แตกต่างกัน จะส่งผล อย่างไรต่อประสิทธิภาพการทำงานของผู้ใช้งานในพื้นที่ให้บริการ โดยจะพิจารณาจากคุณภาพของ ความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุมหรือจุดทดสอบคุณภาพสัญญาณ (Signal Test Point : STP) และตำแหน่งที่รับประกันอัตราเร็วในการให้บริการ (Demand Point : DP) ซึ่งก็คือตำแหน่งของผู้ใช้งานภายในอาคาร รวมถึงพิจารณาปริมาณผู้ใช้งานที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์ สามารถรองรับได้ โดยรูปแบบของโครงสร้างเครือข่ายทั้ง 9 รูปแบบ สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 3 สถานีฐานภายในอาคาร กลุ่มที่ 2 กรณี

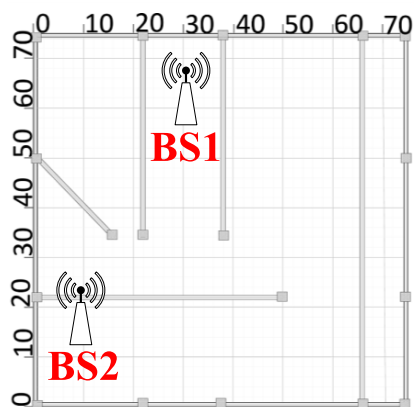
ติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 4 สถานีฐานภายในอาคารและกลุ่มที่ 3 กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 5 สถานีฐานภายในอาคาร โดยกำหนดให้ติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์สูงจากพื้น 2 เมตร สำหรับในกลุ่มที่ 1 ประกอบไปด้วยโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1, 2 และ 3 แสดงดังรูปที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ โดยในโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1 กำหนดให้ติดตั้งจำนวนหนึ่งสถานีฐานภายในชั้นที่ 1 และติดตั้งจำนวนสองสถานีฐานภายในชั้นที่ 2 ส่วนโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 2 และ 3 กำหนดให้ภายในชั้นที่ 1 ติดตั้งจำนวนสองสถานีฐาน และภายในชั้นที่ 2 ติดตั้งจำนวนหนึ่งสถานีฐานเช่นเดียวกัน แต่ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานของทั้งสองโครงสร้างจะแตกต่างกันออกไป



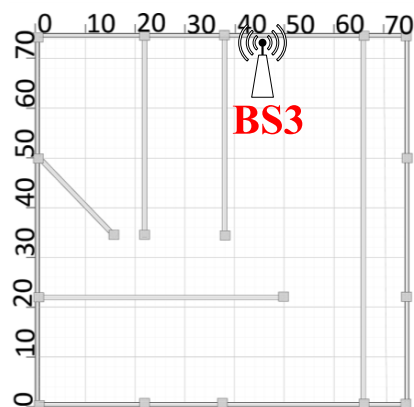
รูปที่ 3.1 โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1



รูปที่ 3.2 โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 2



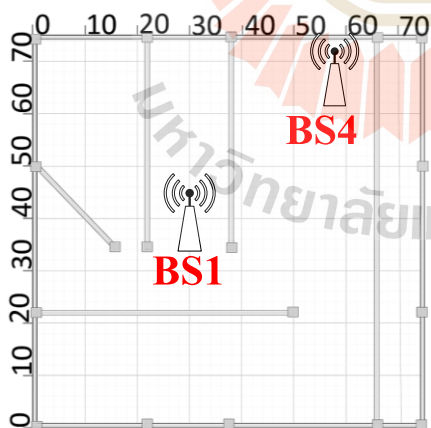
ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1



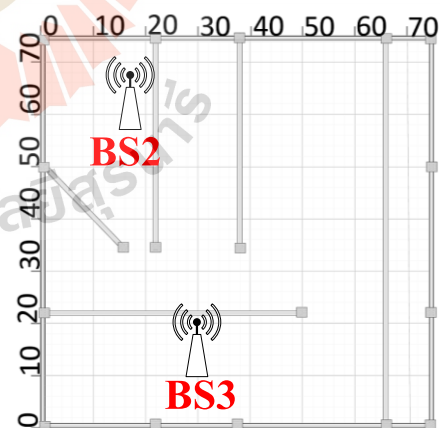
ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 3.3 โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 3

กลุ่มที่ 2 กรณีติดตั้งสถานีฐานเพิ่ม โดเซลจำนวน 4 สถานีฐานภายในอาคาร ประกอบไปด้วย โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 4, 5 และ 6 แสดงดังรูปที่ 3.4, 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ โดยโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 4 กำหนดให้ภายในแต่ละชั้นติดตั้งจำนวนสองสถานีฐาน ส่วนโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 5 และ 6 กำหนดให้ภายในแต่ละชั้นติดตั้งจำนวนสองสถานีฐานเหมือนกัน แต่ตำแหน่งการติดตั้งสถานีฐานของทั้งสองโครงสร้างเครือข่ายจะแตกต่างกันออกไป



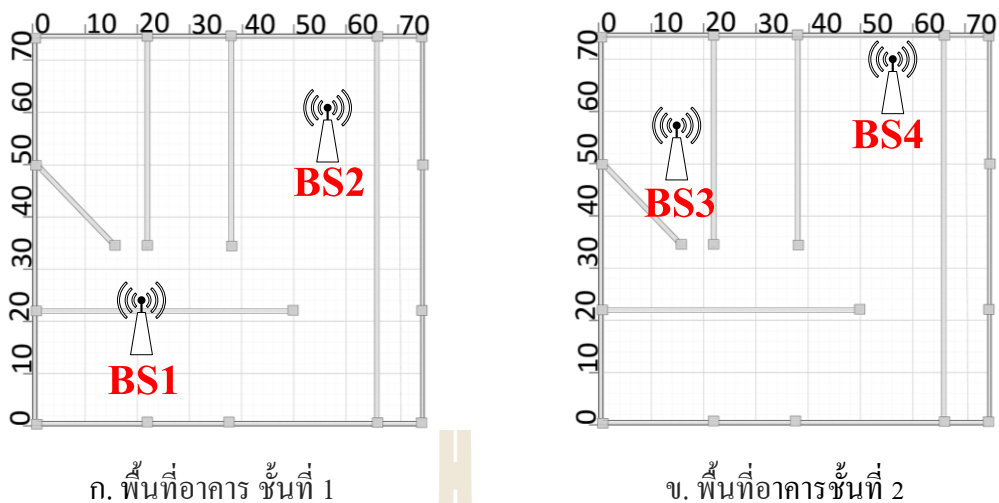
ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1



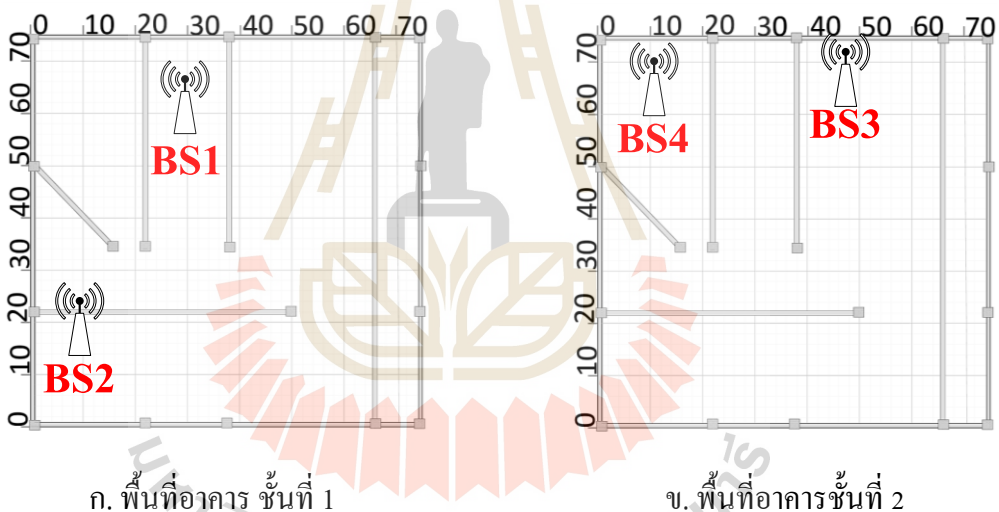
ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 3.4 โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 4



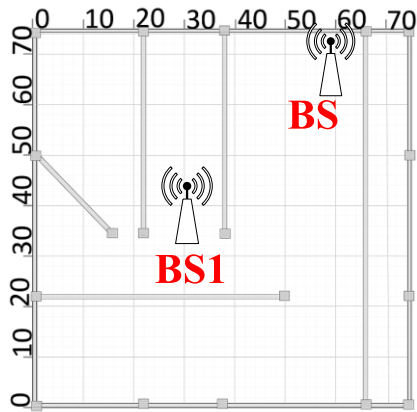


รูปที่ 3.5 โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 5

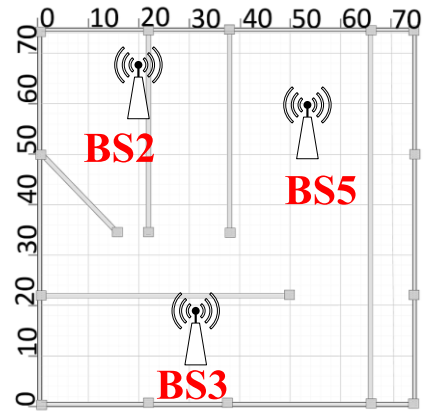


รูปที่ 3.6 โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 6

กลุ่มที่ 3 กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 5 สถานีฐานภายในอาคาร ประกอบไปด้วย โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7, 8 และ 9 แสดงดังรูปที่ 3.7, 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ โดยโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7 กำหนดให้ภายในชั้นที่ 1 ติดตั้งจำนวนสองสถานีฐาน และกำหนดให้ติดตั้งจำนวนสามสถานีฐานภายในชั้นที่ 2 ส่วนโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 8 กำหนดให้ติดตั้งจำนวนสามสถานีฐานภายในชั้นที่ 1 และกำหนดให้ติดตั้งจำนวนสองสถานีฐานภายในชั้นที่ 2 และโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 9 กำหนดให้จำนวนสถานีฐานเหมือนกับโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7 แต่ตำแหน่งการติดตั้งสถานีฐานจะแตกต่างกันออกไป

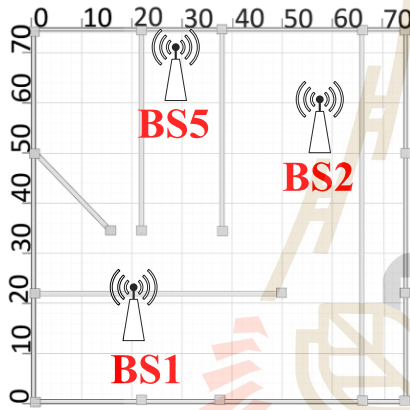


ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

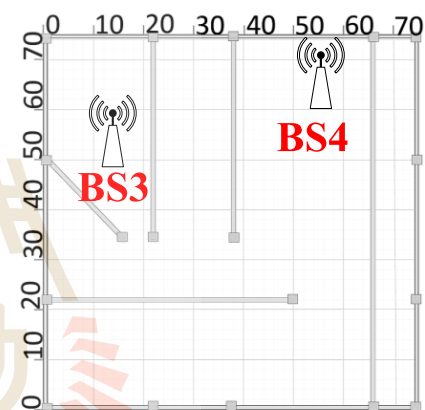


ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 3.7 โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7

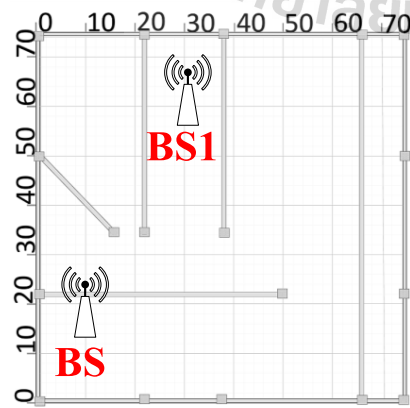


ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

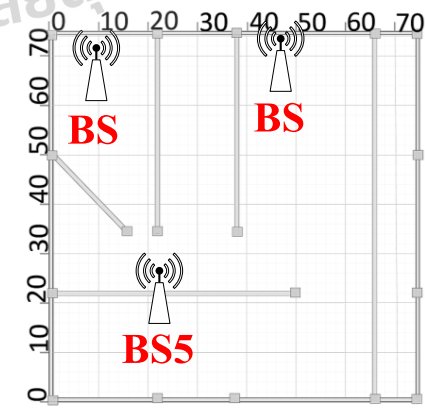


ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 3.8 โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 8



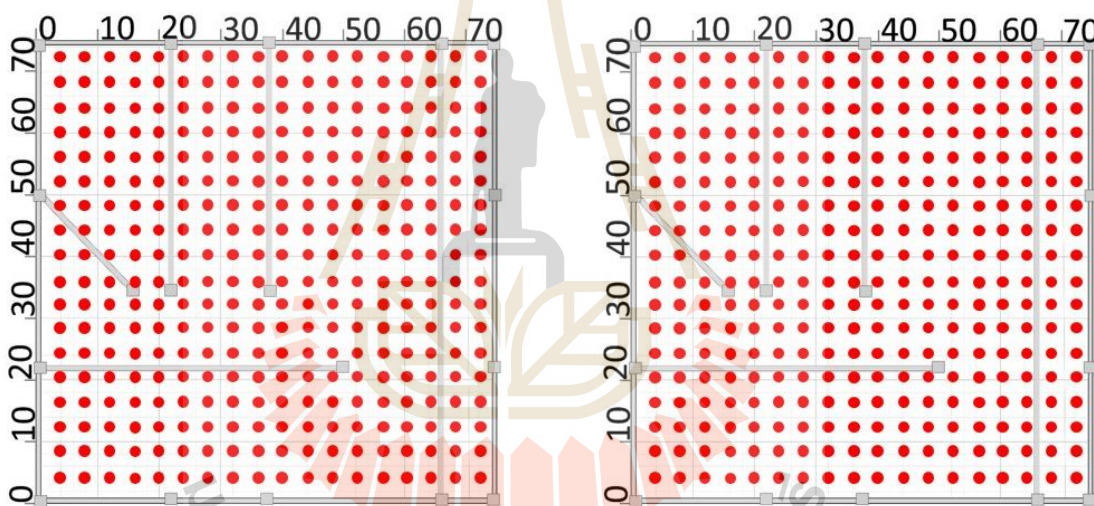
ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1



ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 3.9 โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 9

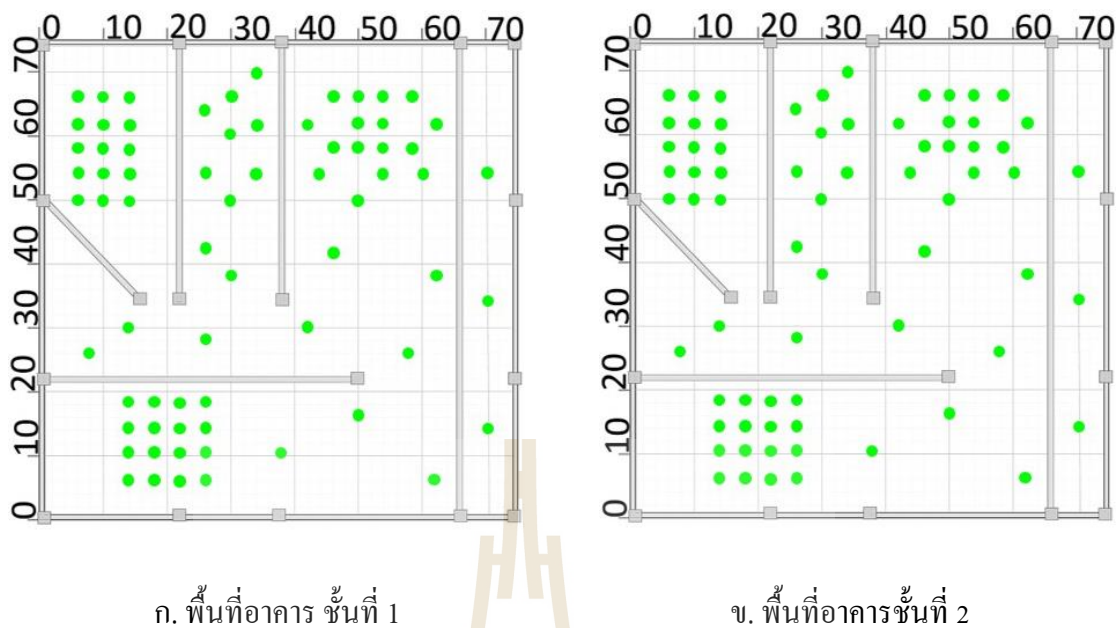
นอกจากได้กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย จุดทดสอบคุณภาพสัญญาณมีจำนวนทั้งหมด 648 จุด ในแต่ละชั้นมีจำนวน 324 จุด กำหนดระยะห่างของจุดทดสอบสัญญาณแต่ละตำแหน่งเท่ากับ 4 เมตร (grid spacing 4x4 m<sup>2</sup>) กระจายตัวเป็นรูปแบบตารางที่มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอทั่วบริเวณพื้นที่ภายในอาคาร โดยเครื่องหมายวงกลมสีแดง ‘●’ แทนตำแหน่งของจุดทดสอบคุณภาพสัญญาณ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.10 และจำนวนผู้ใช้งานมีจำนวนทั้งหมด 140 คน ในแต่ละชั้นมีจำนวน 70 คน กำหนดให้ผู้ใช้งานกระจายตัวทั่วพื้นที่บริการ ซึ่งพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยการใช้งานในชั่วโมงเร่งด่วน (ช่วงเวลาที่มีคนใช้มากที่สุด) โดยผู้ใช้งานจะมีความกระจุกอยู่ในบริเวณห้องทำงานและบริเวณทางเดินจะมีการกระจายตัวของผู้ใช้งาน โดยเครื่องหมายวงกลมสีเขียว ‘●’ แทนตำแหน่งของผู้ใช้งานภายในอาคาร ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งกำหนดให้ทั้งจุดสอบสัญญาณและตำแหน่งผู้ใช้งานมีความสูงจากพื้น 0.8 เมตร



ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 3.10 ตำแหน่งของจุดทดสอบคุณภาพสัญญาณภายในอาคารทั้ง 2 ชั้น



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งของผู้ใช้งานภายในอาคารทั้ง 2 ชั้น

### 3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

หัวข้อนี้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวางแผนเครือข่ายสำหรับการวางตำแหน่งของสถานีฐานเฟม โดเซลล์ โดยได้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นในการพยากรณ์ระดับความแรงสัญญาณที่สถานีฐานเฟม โดเซลล์สามารถส่งสัญญาณมายังจุดทดสอบคุณภาพสัญญาณและตำแหน่งของผู้ใช้งานภายในอาคาร ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยตารางที่ 3.2 แสดงค่ามาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วทางกายภาพและระดับสัญญาณขั้นต่ำในการรักษาอัตราเร็วทางกายภาพของเทคโนโลยี 4G-LTE อ้างอิงจากงานวิจัยของ (Thiagarajah et al., 2013) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของเทคโนโลยี 4G-LTE ใช้งานที่ย่านความถี่ 2.6 GHz และใช้งานที่แบนวิด์ 20 MHz ซึ่งอัตราเร็วทางกายภาพระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับสถานีฐานเฟม โดเซลล์นั้นจะแปรผันตามระดับความแรงสัญญาณที่อุปกรณ์ผู้ใช้งานสามารถรับได้และแปรผันตามวิธีการมอดูเลต ดังนั้นอัตราเร็วทางกายภาพ (Physical data rate) ที่จุดทดสอบคุณภาพสัญญาณและตำแหน่งของผู้ใช้งาน สามารถเทียบได้จากตารางที่ 3.2 ซึ่งกำหนดอัตราเร็ว ทางกายภาพสำหรับจุดทดสอบคุณภาพสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการใช้ที่ค่า 25.20 Mbps เทียบกับระดับสัญญาณขั้นต่ำที่ควรรับได้ที่ค่า -92.9348 dBm และอัตราเร็วทางกายภาพสำหรับของผู้ใช้งานใช้ที่ค่า 75.60 Mbps เทียบกับระดับสัญญาณขั้นต่ำที่ควรรับได้ที่ค่า -80.9348 dBm

ตารางที่ 3.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่า
กำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	5 dBm
ความสูงของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	2 m
ความสูงของจุดทดสอบสัญญาณ	0.8 m
ความถี่ของสัญญาณ	2.6 GHz
ความกว้างของช่องสัญญาณ	20 MHz
จำนวนผู้ใช้งานทั้งหมด	140 User
ปริมาณผู้ใช้ที่สถานีฐานรองรับได้	32 User/FBS
ขนาดของอาคาร (กว้าง x ยาว x สูง)	75m x 75m x 3m
จำนวนชั้นของอาคาร	2 ชั้น
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับรับประกันอัตราเร็วการให้บริการของผู้ใช้งาน	75.60 Mbps
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับรับประกันความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ	25.20 Mbps

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วทางกายภาพและระดับสัญญาณขั้นต่ำในการรักษาอัตราเร็วทางกายภาพ

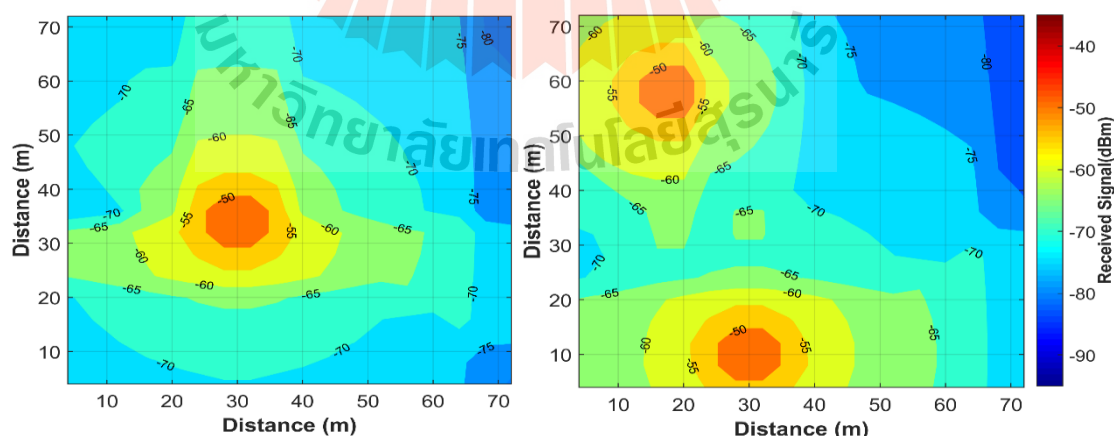
ลำดับที่	วิธีการมอดูเลต	อัตราเร็วทางกายภาพ (Mbps) LTE (20MHz)	ระดับสัญญาณขั้นต่ำ ที่ควรรับได้ (dBm)
1	QPSK 1/8	4.20	-103.535
2	QPSK 1/4	8.40	-100.135
3	QPSK 1/2	16.80	-96.4348
4	QPSK 3/4	25.20	-92.9348
5	16 QAM 1/8	33.60	-90.5348
6	16 QAM 3/4	50.40	-86.2348
7	64 QAM 2/3	67.20	-83.1348
8	64 QAM 3/4	75.60	-80.9348

### 3.3 การวิเคราะห์และประเมินผลกระทบของจำนวนและตำแหน่งการวางสถานีฐาน เวมโทเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น

ในหัวข้อนี้จะทำการประเมินประสิทธิภาพผลของค่าตอบที่ได้จากการนำสมการการสูญเสียตามระยะทางและค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ในส่วนที่ 3.2 มาคำนวณในโปรแกรม Matlab ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของแบบจำลองการทำงานรวมถึงแสดงผลของข้อมูล แสดงภาพกราฟิกต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ตำแหน่งการวางสถานีฐาน เวมโทเซลล์ที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมา ซึ่งผลการทดลองประกอบไปด้วย 3.3.1 กราฟแสดงคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ 3.3.2 กราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ 3.3.3 กราฟแสดงจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้ 3.3.4 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้ และ 3.3.5 กราฟแสดงจำนวนผู้ใช้งานที่แต่ละสถานีฐานสามารถรองรับได้

#### 3.3.1 กราฟแสดงคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ

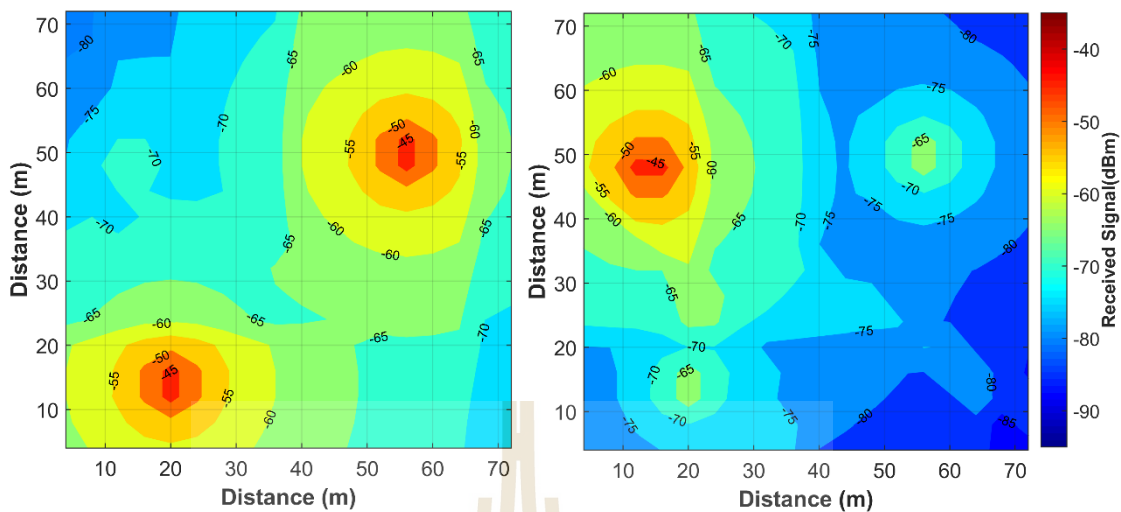
สำหรับกราฟคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการนี้ จะแสดงคุณภาพของความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่แต่ละจุดทดสอบคุณภาพสัญญาณได้รับจากสถานีฐานในแต่ละชั้น โดยทั้ง 9 รูปแบบ โครงสร้างเครือข่ายจะแสดงออกมาในของรูป contour plot ซึ่งผลการทดลองของกลุ่มที่ 1 กรณีติดตั้งสถานีฐาน เวมโทเซลล์ จำนวน 3 สถานีฐานภายในอาคารของทั้ง 3 โครงสร้างเครือข่าย แสดงดังรูปที่ 3.12, 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ



ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

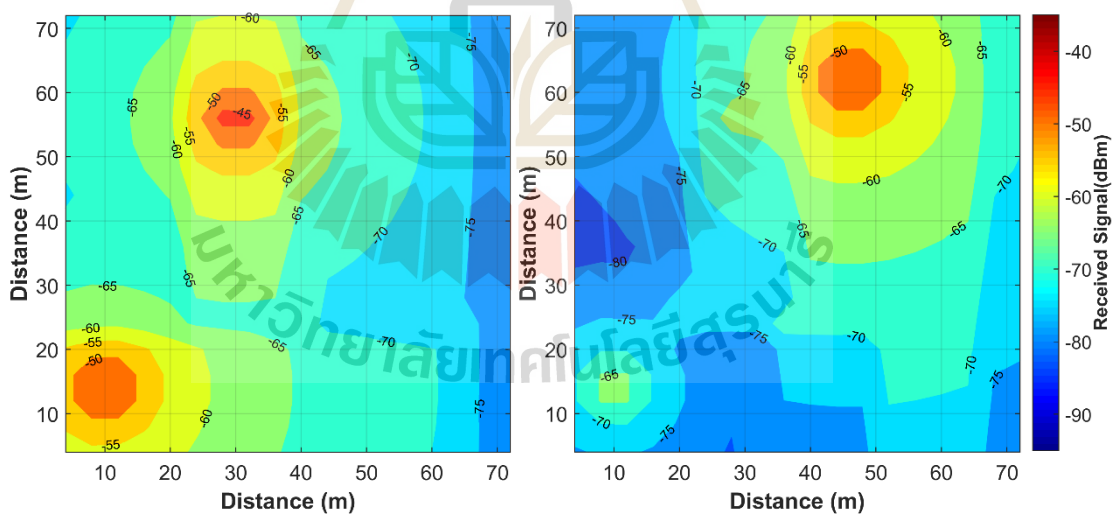
รูปที่ 3.12 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1



ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 3.13 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ  
ของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 2



ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

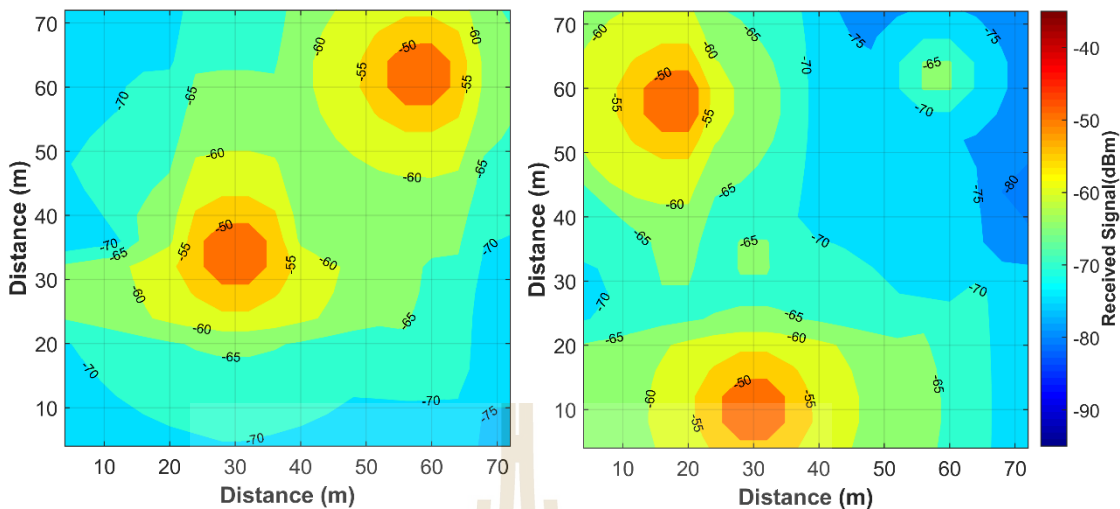
รูปที่ 3.14 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ  
ของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 3

ตารางที่ 3.3 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการของโครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 1

	โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1		โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 2		โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 3	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
ค่าเฉลี่ย	-68.06	-66.39	-64.37	-71.64	-65.97	-69.47
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6.54	8.27	7.04	8.38	7.33	7.47

จากรูปที่ 3.12, 3.13 และ 3.14 แสดงค่าความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีที่สุดของชั้นที่ 1 อยู่ที่โครงสร้างแบบที่ 2 คือมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -64.37 dBm และค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีที่สุดของชั้นที่ 2 อยู่ที่โครงสร้างแบบที่ 1 คือมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -66.39 dBm ส่วนค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณนั้น แสดงถึงการกระจุกตัวของความแรงสัญญาณภายในพื้นที่ให้บริการ ถ้าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อยแสดงว่ามีการกระจุกตัวของความแรงสัญญาณหรือความแรงสัญญาณเบี่ยงเบนน้อย เจอแต่ค่าความแรงสัญญาณเดิมนๆ ใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่าง กรณีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีที่สุดของชั้นที่ 1 อยู่ที่โครงสร้างแบบที่ 2 ซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 7.04 แต่ไม่ใช่ค่าที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1 ในชั้นที่ 1 ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณแล้วโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 2 จะมีค่าที่ดีกว่า โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถนำไปพิจารณาในกรณีที่ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณมีค่าเท่ากัน เพื่อตัดสินว่าส่วนโครงสร้างเครือข่ายแบบไหนมีความแรงสัญญาณที่ดีกว่ากัน ซึ่งได้สรุปผลคุณภาพสัญญาณของพื้นที่ให้บริการของโครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 1 แสดงดังตารางที่ 3.3

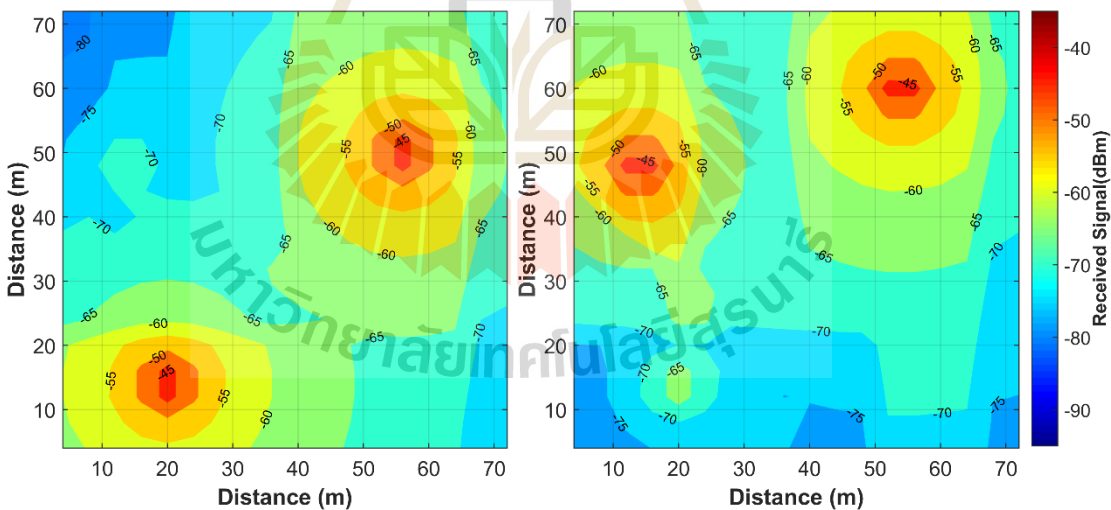




ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

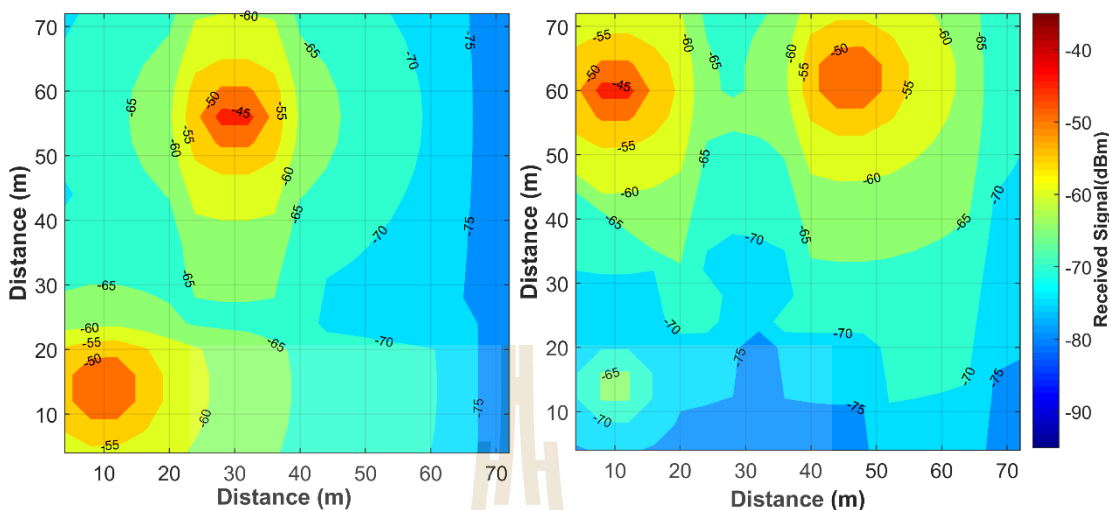
รูปที่ 3.15 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 4



ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 3.16 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 5



ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

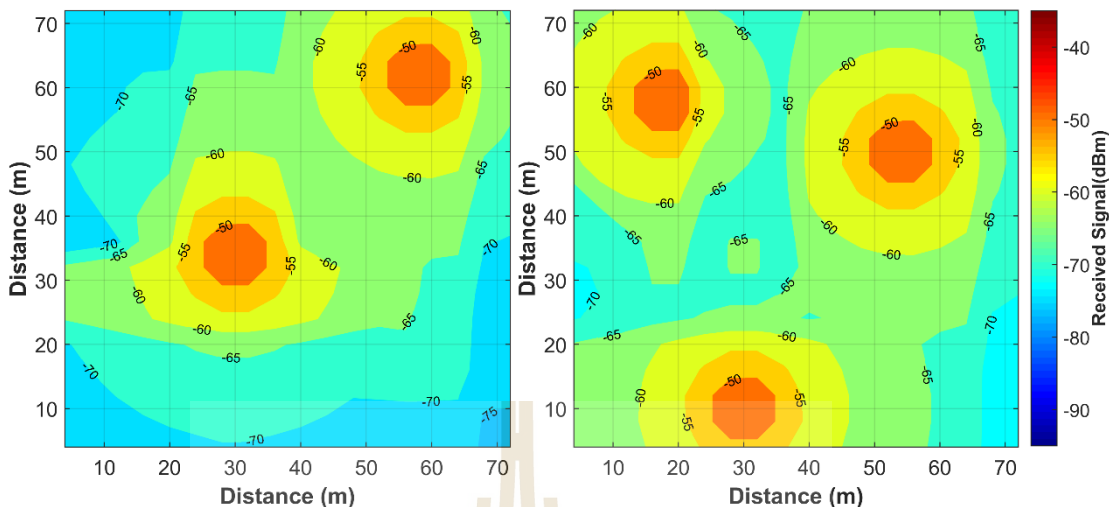
ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 3.17 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 6

ตารางที่ 3.4 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการในโครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 2

	โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 4		โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 5		โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 6	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
ค่าเฉลี่ย	-64.47	-65.82	-64.37	-65.03	-65.97	-65.80
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6.62	7.62	7.04	7.18	7.33	7.47

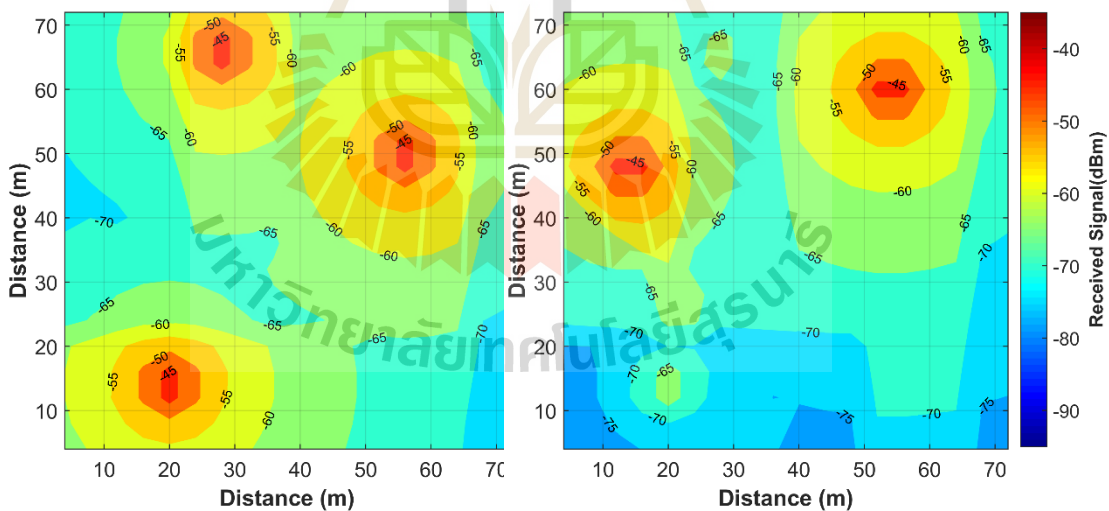
จากรูปที่ 3.15, 3.16 และ 3.17 แสดงค่าความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟม โทเซลล์ของกลุ่มที่ 2 กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟม โทเซลล์จำนวน 4 สถานีฐานภายในอาคาร จำนวนทั้ง 3 โครงสร้าง ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีที่สุดของชั้นที่ 1 อยู่ที่โครงสร้างแบบที่ 5 คือมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -64.37 dBm และค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีที่สุดของชั้นที่ 2 อยู่ที่โครงสร้างแบบที่ 5 คือมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -65.03 dBm ซึ่งได้สรุปผลคุณภาพสัญญาณของพื้นที่ให้บริการของโครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 2 แสดงดังตารางที่ 3.4



ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

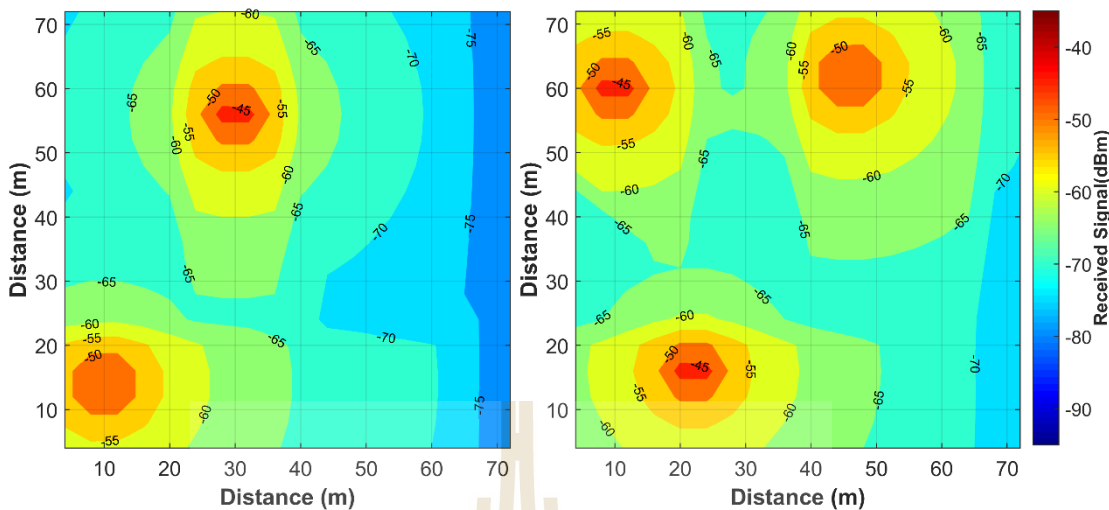
รูปที่ 3.18 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7



ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 3.19 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 8



ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 3.20 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ  
ของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 9

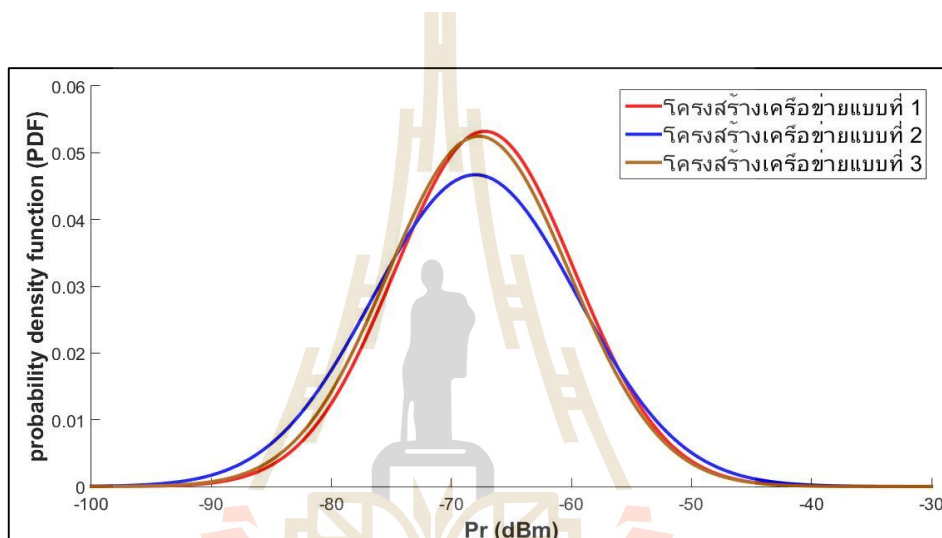
ตารางที่ 3.5 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่  
ให้บริการ ในโครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 3

	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 7		โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 8		โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 9	
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
ค่าเฉลี่ย	-64.47	-61.35	-61.86	-64.99	-65.97	-62.14
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6.62	5.86	6.12	7.18	7.33	6.45

จากรูปที่ 3.18, 3.19 และ 3.20 แสดงค่าความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่จุดทดสอบสัญญาณ  
ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของกลุ่มที่ 3 กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 5 สถานีฐาน  
ภายในอาคารจำนวนทั้ง 3 โครงสร้าง ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีที่สุดของชั้นที่  
1 อยู่ที่โครงสร้างแบบที่ 8 คือมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -61.86 dBm และค่าเฉลี่ยความแรง  
สัญญาณที่ดีที่สุดของชั้นที่ 2 อยู่ที่โครงสร้างแบบที่ 7 คือมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -61.35 dBm  
ซึ่งได้สรุปผลคุณภาพสัญญาณของพื้นที่ให้บริการของโครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 3 แสดงดัง  
ตารางที่ 3.5

### 3.3.2 กราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ

สำหรับกราฟฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ จะแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการกระจุกตัวหรือเกาะกลุ่มกันของระดับความแรงสัญญาณแรงที่สุดของแต่ละจุดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐาน ซึ่งผลการทดลองของกลุ่มที่ 1 กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 3 สถานีฐานภายในอาคารจำนวนทั้ง 3 โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 3.21



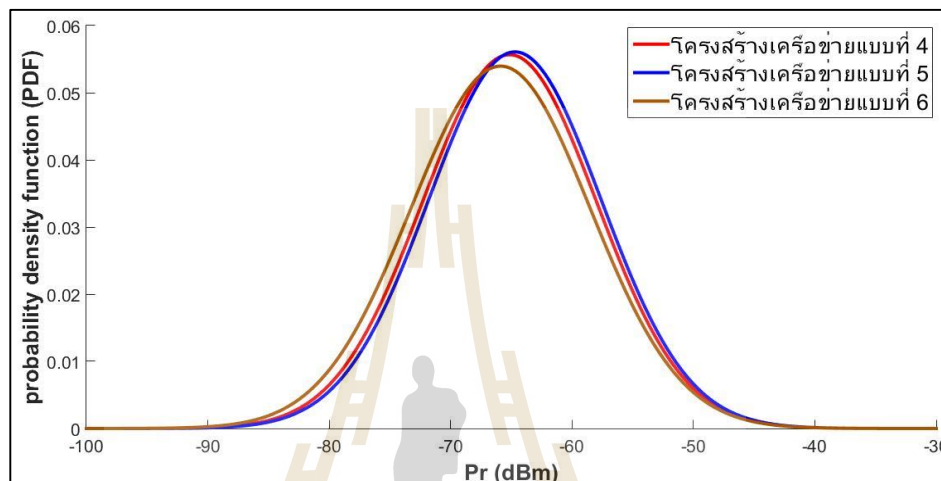
รูปที่ 3.21 ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของโครงสร้างเครือข่ายกลุ่มที่ 1

ตารางที่ 3.6 สรุปผลค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการในโครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 1

	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 1	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 2	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 3
ค่าเฉลี่ย	-67.22	-68.01	-67.71
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.49	8.54	7.60

จากรูปที่ 3.21 แสดงความน่าจะเป็นของการเกาะกลุ่มกันของระดับความแรงสัญญาณแรงที่สุดของแต่ละจุดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยค่าเฉลี่ย

ความแรงสัญญาณที่ดีที่สุดอยู่ที่โครงสร้างแบบที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่  $-67.22$  dBm (เส้นสีแดง) ซึ่งจะสังเกตได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างแบบที่ 3 (เส้นสีส้ม) เนื่องจากทั้งสองแบบมีจำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานที่ใกล้เคียงกัน แต่โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1 มีการเกาะกลุ่มกันของสัญญาณที่ดีกว่า ซึ่งได้สรุปผลคุณภาพสัญญาณของกราฟฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของโครงสร้างเครือข่ายกลุ่มที่ 1 แสดงดังตารางที่ 3.6



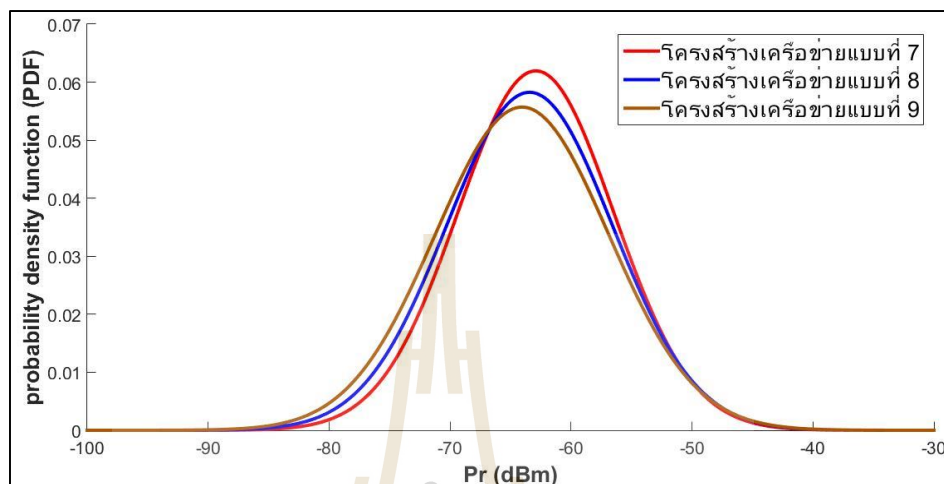
รูปที่ 3.22 ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของโครงสร้างเครือข่ายกลุ่มที่ 2

ตารางที่ 3.7 สรุปผลค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการในโครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 2

	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 4	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 5	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 6
ค่าเฉลี่ย	-65.15	-64.70	-65.89
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.17	7.11	7.39

จากรูปที่ 3.22 กราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของกลุ่มที่ 2 กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 4 สถานีฐานภายในอาคาร โดยค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีที่สุดอยู่ที่โครงสร้างแบบที่ 5 คือมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่  $-64.70$  dBm (เส้นสีน้ำเงิน) ซึ่งจะสังเกตได้ว่าทั้งสามโครงสร้างมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

เนื่องจากมีจำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานที่ใกล้เคียงกัน แต่โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 5 มีการเกาะกลุ่มกันของสัญญาณที่ดีกว่า ซึ่งได้สรุปผลคุณภาพสัญญาณของกราฟฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของโครงสร้างเครือข่ายกลุ่มที่ 2 แสดงดังตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.23 ฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของ โครงสร้างเครือข่ายกลุ่มที่ 3

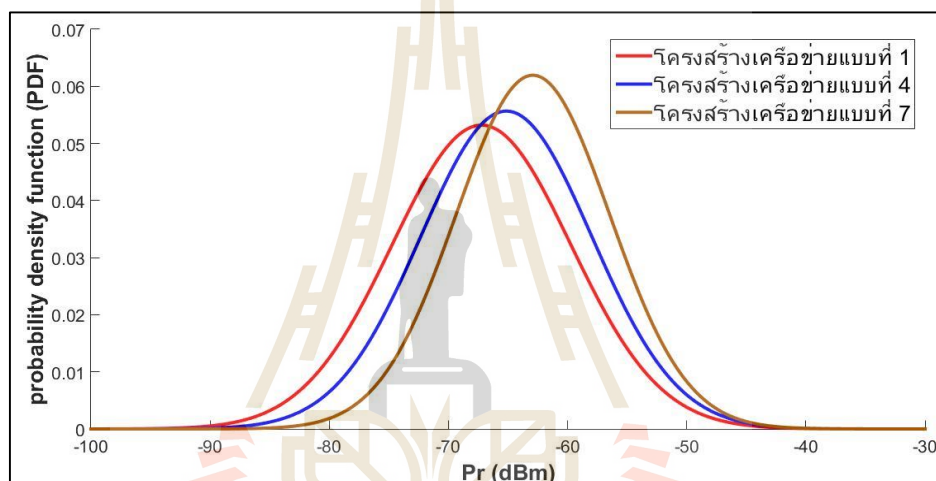
ตารางที่ 3.8 สรุปผลค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการในโครงสร้างเครือข่ายแบบกลุ่มที่ 3

	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 7	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 8	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 9
ค่าเฉลี่ย	-62.91	-63.43	-64.05
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	6.44	6.85	7.16

จากรูปที่ 3.23 กราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของกลุ่มที่ 3 กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 5 สถานีฐานภายในอาคาร ซึ่งจะสังเกตได้ว่าโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7 มีการเกาะกลุ่มกันของความแรงสัญญาณที่ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีที่สุด มีค่า -62.91 dBm (เส้นสีแดง) เนื่องจากมีจำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆ ซึ่งได้สรุปผลคุณภาพ

สัญญาณของกราฟฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของ โครงสร้างเครือข่ายกลุ่มที่ 3 แสดงดังตารางที่ 3.8

เพื่อให้เห็นข้อสังเกตที่ชัดเจนของกราฟแสดงฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของ ความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ได้ทำการเปรียบเทียบกราฟจำนวน 3 กรณีคือ โครงสร้างแบบที่ 1 (เส้นสีแดง) กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์จำนวน 3 สถานีฐานในอาคาร โครงสร้างแบบที่ 4 (เส้นน้ำเงิน) กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์จำนวน 4 สถานีฐานในอาคาร และ โครงสร้างแบบที่ 7 (เส้นสีส้ม) กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์จำนวน 5 สถานีฐานในอาคาร แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 เปรียบเทียบฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณ ที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของ โครงสร้างเครือข่ายทั้งสามกลุ่ม

ตารางที่ 3.9 สรุปผลค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเปรียบเทียบกราฟแสดงฟังก์ชัน หนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการของ โครงสร้างเครือข่ายทั้งสามกลุ่ม

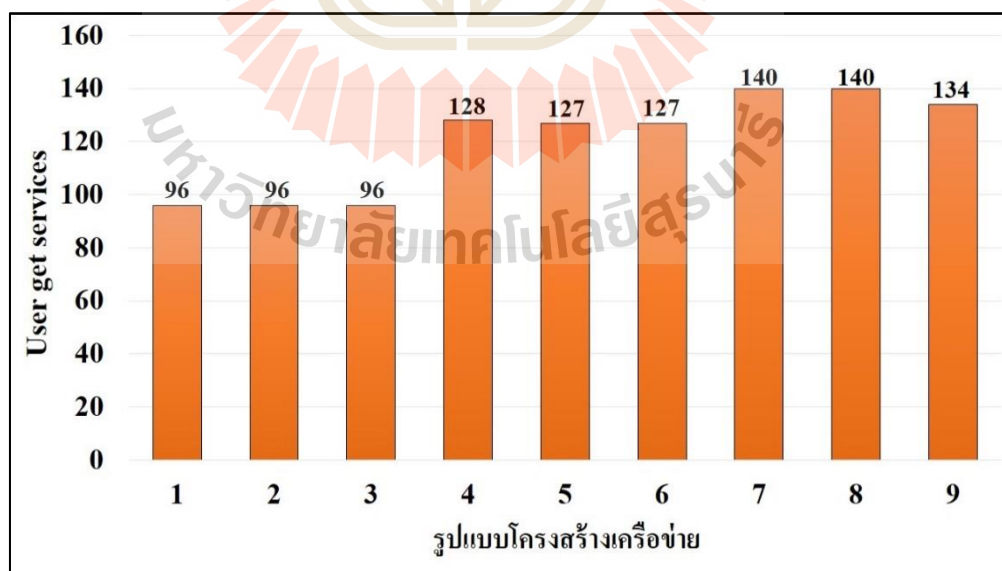
	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 7	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 8	โครงสร้างเครือข่าย แบบที่ 9
ค่าเฉลี่ย	-67.22	-65.15	-62.91
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.50	7.17	6.44



จากรูปที่ 3.24 จะสังเกตได้ว่าโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7 มีการเกาะกลุ่มกันของความแรงสัญญาณที่ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีที่สุด มีค่า -62.91 dBm (เส้นสีแดง) และได้สรุปผลคุณภาพสัญญาณของกราฟฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของโครงสร้างเครือข่ายทั้งสามกลุ่ม แสดงดังตารางที่ 3.9 ซึ่งจากผลการทดลองทั้งสองหัวข้อที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ ได้แก่ กราฟคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการและกราฟฟังก์ชันหนาแน่นความน่าจะเป็นของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ผู้วิจัยต้องการที่จะตรวจสอบว่าความแรงสัญญาณแรงที่สุดของแต่ละจุดทดสอบคุณภาพสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานนั้น สัญญาณจะสามารถครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการหรือไม่ โดยพิจารณาที่ค่าระดับสัญญาณขั้นต่ำที่จุดทดสอบคุณภาพสัญญาณควรรับได้ ที่ค่า -92.9348 dBm เป็นเกณฑ์มาตรฐาน ผลที่ได้พบว่าทุกรูปแบบโครงสร้างเครือข่าย สัญญาณสามารถครอบคลุมได้ทั่วพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100 %

### 3.3.3 กราฟแสดงจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้

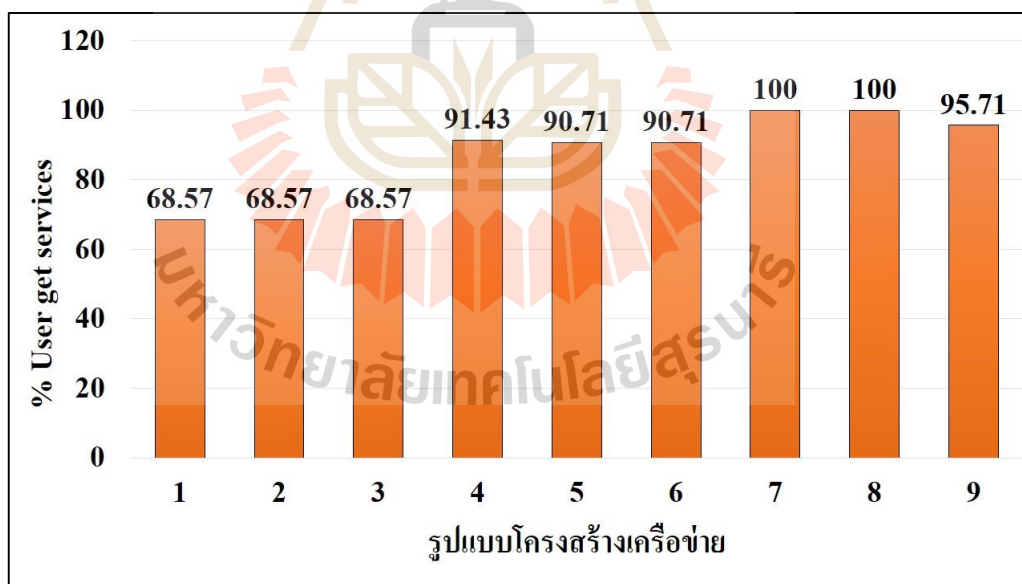
สำหรับกราฟจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้ จะพิจารณาค่าระดับสัญญาณขั้นต่ำที่ผู้ใช้งานควรรับได้ที่ค่า -80.9348 dBm เป็นเกณฑ์มาตรฐาน และพิจารณาข้อจำกัดด้านความจุผู้ใช้งานของสถานีฐานที่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ (32 คนต่อหนึ่งสถานีฐาน) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้

จากรูปที่ 3.25 จะสังเกตเห็นว่าโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7 และ 8 ซึ่งเป็นกรณีติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 5 สถานีฐานภายในอาคาร เป็นสองโครงสร้างที่สามารถรองรับผู้ใช้บริการได้ทั้งหมดคือ 140 คน ส่วนโครงสร้างเครือข่ายอื่นๆไม่สามารถรองรับผู้ใช้บริการได้ทุกคน ซึ่งโครงสร้างเครือข่ายที่ 7 และ 8 นี้ ต้องการชี้ให้เห็นว่าทั้งสองโครงสร้างเครือข่ายนี้เป็นโครงสร้างเครือข่ายที่มีจำนวนสถานีฐานเพียงพอ และวางในตำแหน่งที่เหมาะสม อีกทั้งยังเป็นตำแหน่งที่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด ส่วนโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 9 ถึงแม้จะมีโครงสร้างเครือข่ายที่ติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 5 สถานีฐานภายในอาคารเหมือนกันแบบที่ 7 และ 8 แต่ก็ไม่สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้บริการได้ทั้งหมด เนื่องจากตำแหน่งที่วางยังไม่เหมาะสม ส่วนโครงสร้างแบบที่ 1, 2 และ 3 กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 3 สถานีฐานภายในอาคาร สามารถรองรับได้ 96 คน จากทั้งหมด 140 คน และโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 4, 5 และ 6 กรณีติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 4 สถานีฐานภายในอาคาร สามารถรองรับได้ 127-128 คน จากทั้งหมด 140 คน ซึ่งก็ยังไม่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมดเช่นกัน

### 3.3.4 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้

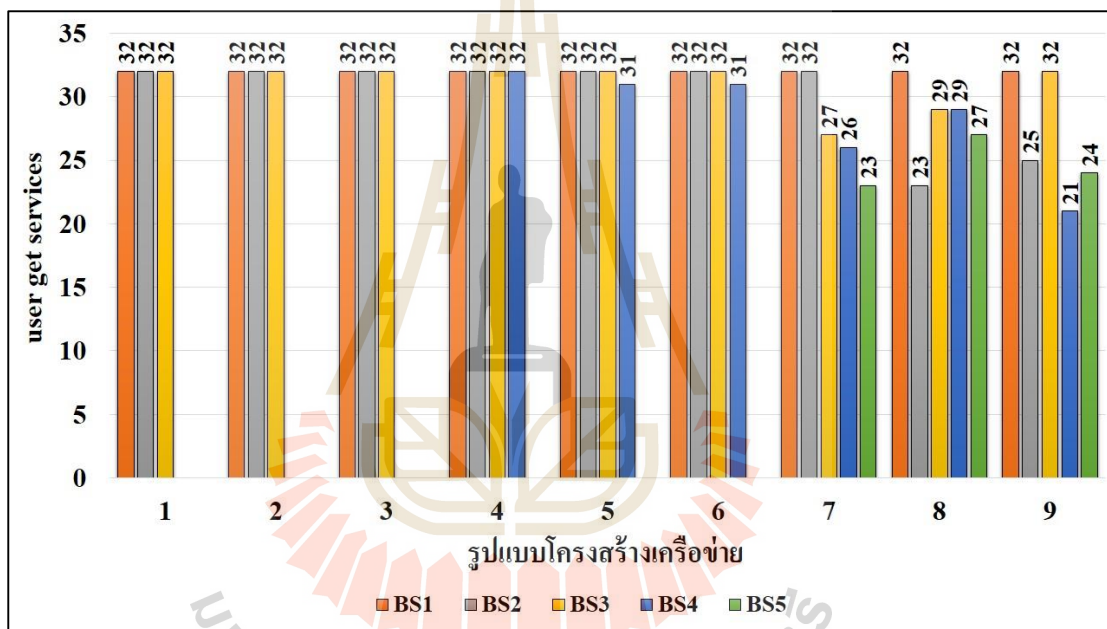


### รูปที่ 3.26 เปอร์เซนต์ของจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้

จากรูปที่ 3.26 จะสังเกตเห็นว่าโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7 และ 8 เป็นสองโครงสร้างที่รองรับผู้ใช้บริการได้เต็มประสิทธิภาพ 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกรณีอื่นๆไม่สามารถรองรับได้เต็ม

ประสิทธิภาพ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 9 สามารถรองรับผู้ใช้บริการได้ 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้งสาม โครงสร้างนี้เป็น โครงสร้างที่ติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 5 สถานีฐาน ภายในอาคาร ส่วนโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1, 2 และ 3 เป็นกรณีที่ติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ จำนวน 3 สถานีฐานภายในอาคารสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้แค่ประมาณ 68 เปอร์เซ็นต์เท่าๆ กัน ทั้งสามโครงสร้าง และ โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 4, 5 และ 6 เป็นกรณีที่ติดตั้งสถานีฐานเฟมโต เซลล์จำนวน 4 สถานีฐานภายในอาคารสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้ประมาณ 90-91 เปอร์เซ็นต์

### 3.3.5 กราฟแสดงจำนวนผู้ใช้งานที่แต่ละสถานีฐานสามารถรองรับได้



รูปที่ 3.27 แสดงจำนวนผู้ใช้งานที่แต่ละสถานีฐานสามารถรองรับได้

จากรูปที่ 3.27 จะสังเกตเห็นว่าโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1, 2 และ 3 ทุกสถานีฐาน สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้เต็มความจุ คือที่ 32 คน และไม่สามารถรับเพิ่มได้อีกเพราะว่า ความจุของสถานีฐานจำกัดอยู่แค่นี้ ส่วนโครงสร้างที่ 4, 5 และ 6 จะสังเกตเห็นว่าบางสถานีฐานไม่ สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้เต็มความจุ เพราะว่าสถานีฐานไม่สามารถรับได้เนื่องจากว่า คุณภาพสัญญาณยังไม่ดีพอที่จะรับผู้ใช้งานนั้นได้ ส่วน โครงสร้างแบบที่ 9 ซึ่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โตเซลล์จำนวน 5 สถานีฐานภายในอาคาร แต่จำนวนผู้ใช้งานโดยรวมที่สถานีฐานสามารถรองรับ ได้ไม่ถึง 140 คน ในขณะที่บางสถานีฐานยังมีความจุเหลือ แต่สถานีฐานก็ยังไม่สามารถรองรับ

ผู้ใช้งานบางคนได้ เนื่องจากจากคุณภาพสัญญาณมันไม่ดีพอ และ โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7 และ 8 จะสังเกตเห็นว่าบางสถานีฐานสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งาน ได้เต็มความจุของสถานีฐาน ส่วน สถานีฐานที่เหลือ จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานยอมรับได้ก็ไม่เต็มความจุที่สถานีฐานสามารถรองรับ ได้ แต่โดยภาพรวมแล้วสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งาน ได้ทั้งหมดในพื้นที่ได้

### 3.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ โครงสร้างเครือข่ายที่มีการใช้จำนวนและตำแหน่งการวาง สถานีฐานที่ต่างกัน จะส่งผลต่อความสามารถในการรองรับจำนวนผู้ใช้งาน ได้ต่างกัน ถึงแม้ว่าจะใช้ จำนวนสถานีฐานเท่ากัน แต่ในบางกรณีที่มีโครงสร้างเครือข่ายมีจำนวนสถานีฐานที่เพียงพอ แต่ก็ไม่สามารถรองรับผู้ใช้งานทั้งหมดได้ เนื่องจากตำแหน่งที่วางสถานีฐานยังไม่เหมาะสม ดังนั้นจะเห็น ได้ว่าทั้งจำนวนและตำแหน่งที่วางสถานีฐาน จะส่งผลต่อการรองรับผู้ใช้งานที่จะเข้ามาใช้บริการ และยังส่งผลต่อคุณภาพของสัญญาณในพื้นที่ด้วย ซึ่งจากงานที่ได้ดำเนินการไปในหัวข้อที่ 3 นี้ เป็น เพียงการทดลองเบื้องต้นซึ่งได้ทำการทดลองโดยการสุ่มเลือกรูปแบบ โครงสร้างเครือข่ายขึ้นมา โดยที่ยังไม่ใช้สมการคณิตศาสตร์ช่วยในการเลือกคำตอบ ในหัวข้อต่อไปผู้วิจัยได้พัฒนาสมการ คณิตศาสตร์ที่สามารถกำหนดจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่เหมาะสมกับ ลักษณะพื้นที่ให้บริการและลักษณะการกระจายตัวโดยเฉลี่ยของผู้ใช้งานในบริเวณพื้นที่

## บทที่ 4

### เทคนิคการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่มีประสิทธิภาพ สำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น

จากเนื้อหาก่อนหน้านี้ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 รวมถึงการทดลองเบื้องต้นเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในบทที่ 3 จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์นั้นได้มีการนำไปใช้ในอาคารสำนักงาน ห้างร้านหรือบริเวณอับสัญญาณที่สถานีฐานภายนอกไม่สามารถส่งสัญญาณมาถึงผู้ใช้บริการภายในอาคารได้ เพื่อขยายสัญญาณให้พื้นที่ให้บริการมีคุณภาพของสัญญาณที่ดี ดังนั้นเทคนิคการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารให้เหมาะสมและเกิดสมรรถนะมากที่สุด จึงจำเป็นสำหรับผู้ใช้งานและผู้วิจัยได้นำเสนอเทคนิคสำหรับการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น โดยเนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการกำหนดการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด ได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการใช้รูปแบบของการโปรแกรมเชิงเส้นใบนารีซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อต่างๆ ได้แก่ หัวข้อที่ 4.1 แนวคิดสำหรับการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น หัวข้อที่ 4.2 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นใบนารี หัวข้อที่ 4.3 สมการ โปรแกรมเชิงเส้นใบนารีสำหรับการวางแผนเครือข่าย และหัวข้อที่ 4.4 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นใบนารี

#### 4.1 แนวคิดสำหรับการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น

ในปัจจุบันความนิยมในการใช้งานเฟมโตเซลล์มีแนวโน้มที่สูงขึ้นทุกๆปี โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ร่วมกับเทคโนโลยีสี่จีแอลทีอีเป็นที่ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากจะทำให้อัตราการส่งข้อมูลมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่างๆ สำหรับสถานีฐานเฟมโตเซลล์นั้นเป็นสถานีฐานโทรศัพท์มือถือขนาดเล็ก ที่มีกำลังส่งสัญญาณที่ต่ำ โดยสัญญาณจะครอบคลุมพื้นที่ได้ในบริเวณไม่กว้างมาก การทำงานของเฟมโตเซลล์เป็นเสมือนตัวกลางในการเชื่อมต่อแบบไร้สายระหว่างโทรศัพท์มือถือเข้ากับเครือข่าย

อินเทอร์เน็ตความเร็วสูงหรือบรอดแบนด์ที่ผ่านตามสายภายในอาคาร โดยสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์จะเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านตัวรับสัญญาณอินเทอร์เน็ต (DSL Router) ให้สถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ได้ส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้งานภายในพื้นที่ให้บริการต่อไป ซึ่งสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ติดตั้งได้ง่าย ไม่มีอุปสรรคในการติดตั้งที่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณภายในอาคารแบบอื่นๆ ดังนั้นตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์จึงมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากจะส่งผลต่อคุณภาพสัญญาณที่ผู้ใช้งานสามารถรับสัญญาณได้จากสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มสมรรถนะให้กับสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ภายในอาคาร คือการเลือกกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ที่เหมาะสมให้กับพื้นที่ให้บริการ

ในหลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจในการศึกษาการวางสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไปบนวิวัฒนาการทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบเครือข่าย เพื่อให้สอดคล้องกับข้อจำกัดหรือเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น Sathya, V., Ramamurthy, A., and Tamma, B.R. (2014). ได้ทำการหาตำแหน่งการวางสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ โดยพิจารณาถึงคุณภาพของสัญญาณแทรกสอดในแต่ละจุดทดสอบ รวมถึงได้นำสัญญาณจากสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ภายนอกอาคารมาใช้พิจารณาเพื่อหาตำแหน่งวางสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ที่เหมาะสมที่สุดด้วย และงานวิจัยของ Sathya, V., Ramamurthy, A., and Tamma, B.R. (2015). ได้ให้ความสำคัญในส่วนการควบคุมการใช้พลังงานของสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์มาเป็นแนวคิดในการกำหนดตำแหน่งวางสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ โดยทำการปรับกำลังส่งสัญญาณให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของพื้นที่ให้บริการ เป็นต้น

ถึงแม้ว่างานหลายวิจัยได้มีการพิจารณาการวางสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์โดยพิจารณาที่ปัจจัยต่างๆ ตามที่ได้กล่าวไว้เบื้องต้น แต่พบว่ายังไม่มียานวิจัยใดที่พิจารณาส่วนของอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้บริการและความจุของสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ที่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงสร้างเทคนิคการกำหนดตำแหน่งวางสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาในส่วนที่หลายๆ งานวิจัยยังไม่ได้ศึกษาในแนวทางนี้

ซึ่งจากการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของอาคารในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคืออาคารแบบชั้นเดียวและอาคารแบบหลายชั้น ซึ่งอาคารโดยส่วนใหญ่จะเป็นอาคารแบบหลายชั้น ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าอาคารแบบชั้นเดียว เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของพื้นที่ในแต่ละชั้นมีความซับซ้อนที่แตกต่างกัน โดยอาคารแบบหลายชั้นสามารถที่จะกำหนดพิกัดเป็น 3 มิติ ( $x, y, z$ ) โดยที่  $x$  คือ ความกว้างของอาคาร  $y$  คือ ความยาวของอาคาร  $z$  คือ ความสูงของอาคาร

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวางแผนเครือข่ายสำหรับกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีสถานีพุ่มโทรเซลล์

โตะเซลล์ในอาคารประเภทชั้นเดียวและในอาคารประเภทหลายชั้นได้ อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้กับอาคารที่มีลักษณะโครงสร้างแตกต่างกันได้

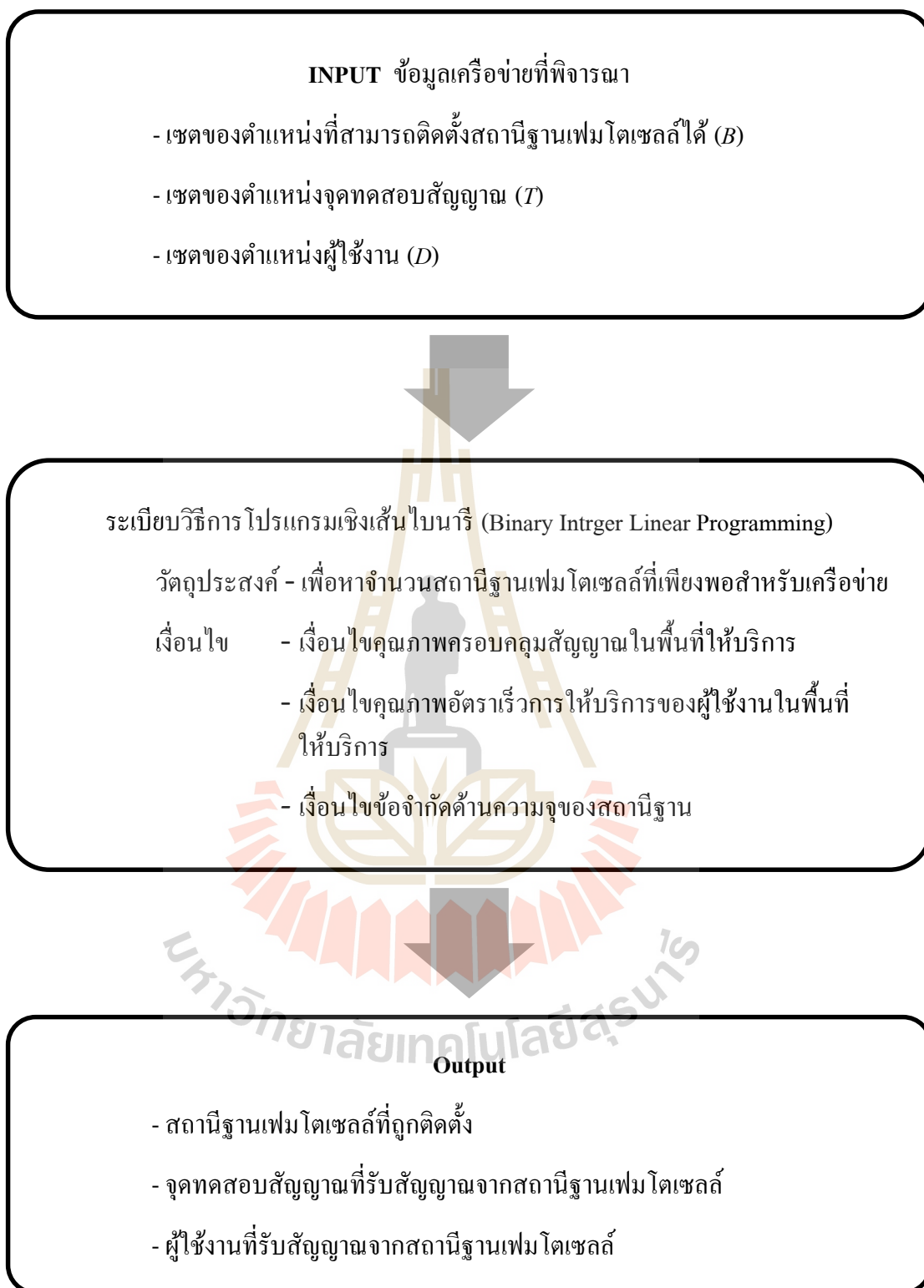
## 4.2 การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี

ในการวางแผนเครือข่ายเฟรมโตะเซลล์ของงานวิจัยในบทนี้ได้เลือกวิธีการกำหนดปัญหาเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี (Binary Integer Linear Programming : BLP) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีที่มีประสิทธิภาพและได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยใช้หลักการปรับเปลี่ยนตัวแปรอย่างมีหลักเกณฑ์เพื่อให้มีผลต่อเป้าหมายของปัญหาและบรรลุผลตามเป้าหมายโดยเร็วที่สุด ดังนั้นอัลกอริทึมซิมเพล็กซ์จะเป็นวิธีการคำนวณที่มีลักษณะแบบทำซ้ำขั้นตอน คือ จะคำนวณซ้ำ ๆ จนกว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนสำคัญ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) และสมการเงื่อนไข (Constraint) งานวิจัยนี้มีเป้าหมายคือ ต้องการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟรมโตะเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นที่เหมาะสมที่สุด โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 2 เฟส โดยเฟสที่ 1 มีเป้าหมายเพื่อหาจำนวนสถานีฐานเฟรมโตะเซลล์น้อยที่สุดที่เพียงพอต่อการติดตั้งภายในอาคาร สำหรับเงื่อนไขนั้นก็เป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญเพื่อให้การดำเนินงานวิจัยได้บรรลุเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งในเฟสที่ 1 ประกอบไปด้วยเงื่อนไขด้านคุณภาพความครอบคลุมสัญญาณในพื้นที่ให้บริการ เงื่อนไขด้านคุณภาพอัตราเร็วการให้บริการของผู้ใช้งานในพื้นที่ให้บริการ และเงื่อนไขข้อจำกัดด้านความจุของสถานีฐาน เมื่อกำหนดปัญหาเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีเรียบร้อยแล้ว กระบวนการหาคำตอบของการโปรแกรมเชิงเส้นก็จะได้ทำการหาจำนวนสถานีฐานน้อยที่สุดที่จะถูกติดตั้งในเครือข่าย โดยการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 แสดงถึงคำตอบของปัญหาที่ตั้งไว้ (เอาต์พุต) นั่นก็คือ สถานีฐานเฟรมโตะเซลล์ที่ถูกติดตั้งในเครือข่าย จุดทดสอบสัญญาณและผู้ใช้งานที่ได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟรมโตะเซลล์ ซึ่งคำตอบเหล่านี้ได้จากการนำข้อมูลอินพุตต่างๆซึ่งประกอบด้วย เซตของข้อมูลตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟรมโตะเซลล์ได้ เซตของข้อมูลตำแหน่งจุดทดสอบสัญญาณ และเซตของข้อมูลตำแหน่งผู้ใช้งาน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำมาผ่านกระบวนการหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี จากนั้นเมื่อได้กำหนดปัญหาเหล่านี้เป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงดำเนินการแปลงปัญหาเหล่านี้ให้กลายเป็นสมการคณิตศาสตร์ หลังจากเสร็จขั้นตอนของกระบวนการหาคำตอบของเฟสที่ 1 พบว่าตำแหน่งสถานีฐานเฟรมโตะเซลล์ที่ถูกติดตั้งมีลักษณะของตำแหน่งการวางสถานีฐานในเครือข่ายที่เกาะกลุ่มกัน ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของการใช้บริการในเครือข่ายไม่เกิดสมรรถนะเต็มที่เท่าที่ควร

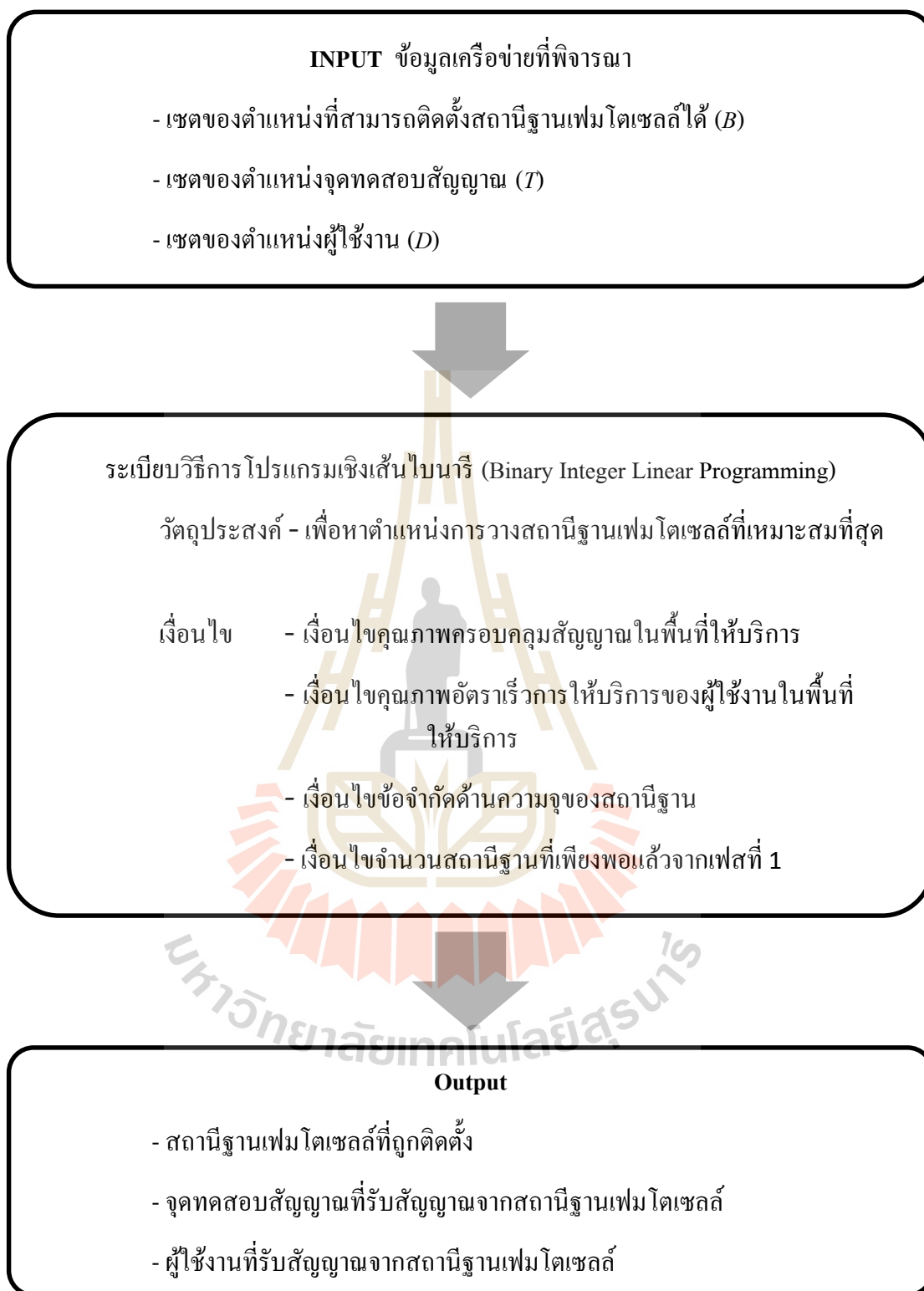
ดังนั้นจึงเกิดกระบวนการทำงานในเฟสที่ 2 ขึ้น โดยมีเป้าหมายเพื่อหาตำแหน่งการวางสถานีฐานที่เหมาะสมที่สุด โดยเงื่อนไขเหมือนกับการทำงานในเฟสที่ 1 ทั้งหมด แต่เพิ่มเงื่อนไขการกำหนดจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้ในการติดตั้งภายในเครือข่ายจะต้องมีจำนวนเท่ากับจำนวนสถานีฐานเฟมเซลล์ที่เพียงพอที่ได้คำตอบในเฟสที่ 1 เมื่อกำหนดปัญหาเป็นการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีเรียบร้อยแล้ว กระบวนการหาคำตอบของการโปรแกรมเชิงเส้นก็จะได้หาคำตอบของตำแหน่งการวางสถานีฐานที่เหมาะสมที่สุด โดยการทำงานของกรปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีของเฟสที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 แสดงถึงคำตอบของปัญหาที่ตั้งไว้ (เอาต์พุต) นั่นก็คือสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งในเครือข่าย จุดทดสอบสัญญาณและผู้ใช้งานที่ได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยคำตอบเหล่านี้ได้จากการนำข้อมูลอินพุตต่างๆ เหมือนกับเฟสที่ 1 ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำมาผ่านกระบวนการหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี จากนั้นเมื่อได้กำหนดปัญหาเหล่านี้เป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงดำเนินการแปลงปัญหาเหล่านี้ให้กลายเป็นสมการคณิตศาสตร์โดยแสดงอยู่ในหัวข้อ 4.3







รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นของเฟสที่ 1



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการทำงานของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นของเฟสที่ 2

### 4.3 สมการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสำหรับวางแผนเครือข่าย

สมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการออกแบบการวางสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น ได้สร้างสมการคณิตศาสตร์ภายใต้วิธีการกำหนดปัญหาแบบการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี ซึ่งประกอบไปด้วยสามส่วนที่สำคัญคือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ สมการเงื่อนไข และตัวแปรตัดสินใจ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ สมการแสดงเป้าหมายเพื่อใช้ในการหาค่าที่ต่ำที่สุดหรือสูงที่สุด ส่วนสมการเงื่อนไข คือ สมการที่แสดงถึงข้อกำหนดหรือข้อจำกัดของปัญหานั้น ๆ และตัวแปรตัดสินใจ คือ ตัวแปรที่ต้องการหาคำตอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ



รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี

การแก้ปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีในงานวิจัยนี้กำหนดด้วยสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการออกแบบการวางสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น งานวิจัยนี้มีเป้าหมาย คือ ต้องการหาคำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นที่เหมาะสมที่สุด โดยในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์สำหรับการวางตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นนั้น ได้แบ่งสมการคณิตศาสตร์ออกเป็นจำนวน 2 เฟส โดยในเฟสที่ 1 ของงานวิจัยนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ต้องการจำนวนสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่ติดตั้งในเครือข่ายน้อยที่สุด และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเฟสที่ 2 คือหาผลรวมของค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่ถูกติดตั้งไว้แล้วมีค่ามากที่สุด โดยในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้วัตถุประสงค์ตามที่ต้องการนั้น ต้องมีเงื่อนไขที่เป็นข้อจำกัดคือ เงื่อนไขการ

รับประกันคุณภาพสัญญาณจะต้องครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ เงื่อนไขการรับประกันคุณภาพ อัตราเร็วการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้ภายในพื้นที่ให้บริการ และเงื่อนไขด้านความสามารถในการรองรับผู้ใช้งานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งการประยุกต์ใช้สมการคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้น ไบนารีทำให้การออกแบบเครือข่ายนั้นทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยการนิยามตัวแปรต่างๆที่จะใช้ในสมการคณิตศาสตร์สำหรับการแก้ปัญหาการวางตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้น ได้แบ่งตัวแปรออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มของตัวเซต กลุ่มของตัวแปรตัดสินใจ และกลุ่มของตัวแปรค่าคงที่ ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

เซตของตัวแปร :

- $B$  คือ เซตของตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้
- $T$  คือ เซตของตำแหน่งจุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณ (Signal Test Point: STP)
- $D$  คือ เซตของตำแหน่งผู้ใช้งาน (User)

ตัวแปรตัดสินใจ :

- $b_a$  คือ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยมีค่าเป็น 1 เมื่อเลือกติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง  $a$  และมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่มีการเลือกติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง  $a$  โดยที่  $\forall a \in B$
- $s_{ja}$  คือ ตัวแปรตัดสินใจ โดยมีค่าเป็น 1 ถ้าจุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณ  $j$  เลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง  $a$  และมีค่าเป็น 0 ถ้าจุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณ  $j$  ไม่เลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง  $a$  โดยที่  $\forall a \in B$  และ  $\forall j \in T$
- $u_{ia}$  คือ ตัวแปรตัดสินใจ โดยมีค่าเป็น 1 ถ้าผู้ใช้งาน  $i$  เลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ที่ตำแหน่ง  $a$  และมีค่าเป็น 0 ถ้าผู้ใช้งาน  $i$  ไม่เลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง  $a$  โดยที่  $\forall a \in B$  และ  $\forall i \in D$

พารามิเตอร์ค่าคงที่ :

$P_{ja}$  คือ ค่าความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณที่ตำแหน่ง  $j$  ได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ตำแหน่ง  $a$  โดยที่  $\forall j \in T$  และ  $\forall a \in B$

$P_{ia}$  คือ ค่าความแรงสัญญาณที่ผู้ใช้งานตำแหน่ง  $i$  ได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ตำแหน่ง  $a$  โดยที่  $\forall i \in D$  และ  $\forall a \in B$

$P_T$  คือ ค่าความแรงสัญญาณน้อยที่สุดที่จุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณที่ได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์

$P_U$  คือ ค่าความแรงของสัญญาณน้อยที่สุดที่ผู้ใช้งานได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์

$C_a$  คือ ค่าความจุมากที่สุดที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์สามารถรองรับผู้ใช้งานได้

$N_{MNFBS}$  คือ จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เพียงพอสำหรับติดตั้งในภายในอาคารหลายชั้นที่ได้จากเฟสที่ 1

สำหรับการกำหนดปัญหาเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ กำหนดด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี เนื่องจากในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนไบนารี นั่นคือตัวแปรตัดสินใจที่จะมีค่าเป็นตัวเลขได้เพียงสองค่าคือ 0 หรือ 1 เท่านั้น ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ตัวแปรตัดสินใจที่จุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณจะเลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ และตัวแปรตัดสินใจที่ผู้ใช้งานจะเลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี ที่มีส่วนประกอบคือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไขที่สามารถแสดงได้ดังนี้

#### 4.3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเฟสที่ 1

จากวัตถุประสงค์สำหรับการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เพียงพอสำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อต้องการจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ติดตั้งในเครือข่ายน้อยที่สุด (Minimum Number of FemtoCell Base Station: MNFBS) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{minimize } \sum_{a \in B} b_a \quad (4.1)$$

#### 4.3.2 สมการเงื่อนไขของเฟสที่ 1

สมการเงื่อนไขที่ใช้ในการออกแบบสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการออกแบบการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นนี้ ประกอบด้วยสมการเงื่อนไขในการรับประกันคุณภาพความแรงสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ สมการเงื่อนไขในการรับประกันอัตราเร็วการให้บริการของผู้ใช้งานในพื้นที่ให้บริการ และสมการเงื่อนไขข้อจำกัดทางด้านความจุของผู้ใช้งานที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์สามารถรองรับได้ ซึ่งสมการเหล่านี้เป็นเงื่อนไขข้อจำกัดของปัญหาในการวิจัย ที่จะทำให้ได้มาซึ่งวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ประกอบด้วย 10 สมการ โดยสามารถแบ่งเงื่อนไขออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เงื่อนไขสำหรับการรับประกันคุณภาพความแรงสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ

1. จุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณตำแหน่ง  $j$  จะต้องได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์อย่างน้อย 1 สถานีฐานเฟมโตเซลล์

$$\sum_{a \in B} s_{ja} \geq 1 \quad \forall j \in T \quad (4.2)$$

2. จุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณตำแหน่ง  $j$  จะเลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกเลือกติดตั้งไปแล้วเท่านั้น

$$s_{ja} \leq b_a \quad \forall j \in T, \forall a \in B \quad (4.3)$$

3. ค่าความแรงสัญญาณจากจุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณตำแหน่ง  $j$  ที่รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์  $a$  จะต้องมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

$$s_{ja}(P_{ja} - P_T) \geq 0 \quad \forall j \in T, \forall a \in B \quad (4.4)$$

กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขสำหรับการรับประกันอัตราเร็วการให้บริการของผู้ใช้งานในพื้นที่ให้บริการ

4. ผู้ใช้งานตำแหน่ง  $i$  จะต้องได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์อย่างน้อย 1 สถานีฐานเฟมโตเซลล์

$$\sum_{a \in B} u_{ia} \geq 1 \quad \forall i \in D \quad (4.5)$$

5. ผู้ใช้งานตำแหน่ง  $i$  จะเลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกเลือกติดตั้งไปแล้วเท่านั้น

$$u_{ia} \leq b_a \quad \forall i \in D, \forall a \in B \quad (4.6)$$

6. ค่าความแรงสัญญาณจากผู้ใช้งานตำแหน่ง  $i$  ที่รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์  $a$  จะต้องมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

$$u_{ia}(P_{ia} - P_U) \geq 0 \quad \forall i \in D, \forall a \in B \quad (4.7)$$

กลุ่มที่ 3 เงื่อนไขสำหรับข้อจำกัดด้านความจุของผู้ใช้งานที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์สามารถรองรับได้

7. จำนวนผู้ใช้ที่สามารถเข้าใช้งานสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนผู้ใช้งานมากที่สุดที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์สามารถรองรับได้

$$\sum_{i \in D} u_{ia} \leq C_a \quad \forall a \in B \quad (4.8)$$

8. เงื่อนไขที่รับประกันว่าการเลือกติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ( $b_a$ ) จุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณเลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ( $s_{ja}$ ) และตำแหน่งของผู้ใช้งานเลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ( $u_{ia}$ ) ต้องเป็นตัวแทนประเภทไบนารี

$$k_a \in \{0,1\} \quad (4.9)$$

$$s_{ja} \in \{0,1\} \quad (4.10)$$

$$u_{ia} \in \{0,1\} \quad (4.11)$$

### 4.3.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเฟสที่ 2

สำหรับวัตถุประสงค์ในเฟสที่ 2 ต้องการหาตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ต้องการผลรวมของค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งไว้แล้วมีค่ามากที่สุด (Maximum Summation of Received Signal Strength: MSR) เพื่อให้ได้คุณภาพความแรงสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ติดตั้งในเครือข่ายครอบคลุมพื้นที่ที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{maximize } \sum_{j \in T} \sum_{a \in B} S_{ja} P_{ja} \quad (4.12)$$

### 4.3.4 สมการเงื่อนไขของเฟสที่ 2

จากการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ค่าวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการนั้น ต้องประกอบไปด้วยเงื่อนไขทั้งหมด 3 กลุ่มเงื่อนไข โดยมีเงื่อนไขเช่นเดียวกับเฟสที่ 1 และเพิ่มเติมเงื่อนไขการกำหนดจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้ในการติดตั้งภายในอาคารแบบหลายชั้นจะต้องมีจำนวนเท่ากับจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เพียงพอที่ได้คำตอบในเฟสที่ 1 ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sum_{a \in B} b_a = N_{MNFBs} \quad (4.13)$$



#### 4.4 การวิเคราะห์ความซับซ้อนของอัลกอริทึม

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหรือความซับซ้อนของอัลกอริทึมสามารถพิจารณาได้จาก 2 การใช้ งานหน่วยความจำ (Memory) ในการประมวลผลหรือพิจารณาจากเวลา (Time) ที่จะต้องใช้ในการ ประมวลผล

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงเส้น ไบนารี ซึ่งสามารถวัดความ ซับซ้อนของอัลกอริทึมได้จากพื้นที่หน่วยความจำที่ใช้ในการประมวลผล (Space Complexity) โดย วัดได้จากจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variables) พื้นที่การค้นหา (Search Space) และ จำนวนเงื่อนไข (Constraints)

การวิเคราะห์หน่วยความจำที่ต้องใช้ในการประมวลผลของอัลกอริทึมเป็นการวิเคราะห์ว่าต้อง ใช้หน่วยความจำทั้งหมดเท่าไรในการประมวลผลอัลกอริทึมนั้น สาเหตุที่ต้องทราบจำนวนของ หน่วยความจำที่ต้องใช้นั้นมีเหตุผลดังนี้

1. ทำให้เราทราบว่าอัลกอริทึมนั้นสามารถรองรับจำนวนข้อมูลที่ส่งเข้ามาประมวลผล (Input Data) ได้มากที่สุดเท่าใด เพื่อให้อัลกอริทึมนั้นยังสามารถประมวลผลได้
2. กรณีที่ต้องประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานร่วมกันหลายคนในเครือข่าย จำเป็นที่ต้องทราบขนาดของหน่วยความจำที่ต้องใช้ในการประมวลผลอัลกอริทึม เพื่อไม่ให้กระทบกับการทำงานของคนอื่น
3. เพื่อเลือกคุณลักษณะของคอมพิวเตอร์ที่จะใช้ติดตั้ง โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้อย่าง เหมาะสม ถ้านำไปติดตั้งที่เครื่องที่มีหน่วยความจำไม่เพียงพอ โปรแกรมก็จะไม่ สามารถทำงานได้

การวิเคราะห์หน่วยความจำที่ต้องใช้ในการประมวลผลของอัลกอริทึม หรือขนาดของปัญหา (Problem size) แสดงดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision variables)

การวิเคราะห์จำนวนตัวแปรการตัดสินใจสำหรับขั้นตอนวิธีนี้ (Algorithm) ประกอบไป ด้วย 3 ตัวแปรการตัดสินใจ คือ  $b_a, s_{ja}, u_{ia}$  ซึ่งแต่ละตัวแปรการตัดสินใจนั้นมีจำนวนดังต่อไปนี้

$$b_a = b_1, b_2, b_3, \dots, b_A$$

ดังนั้น มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ  $b$  เท่ากับ  $|A|$  ตัว

$$s_{ja} = s_{11}, s_{12}, s_{13}, \dots, s_{JA}$$

ดังนั้น มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ  $s$  เท่ากับ  $|J||A|$  ตัว

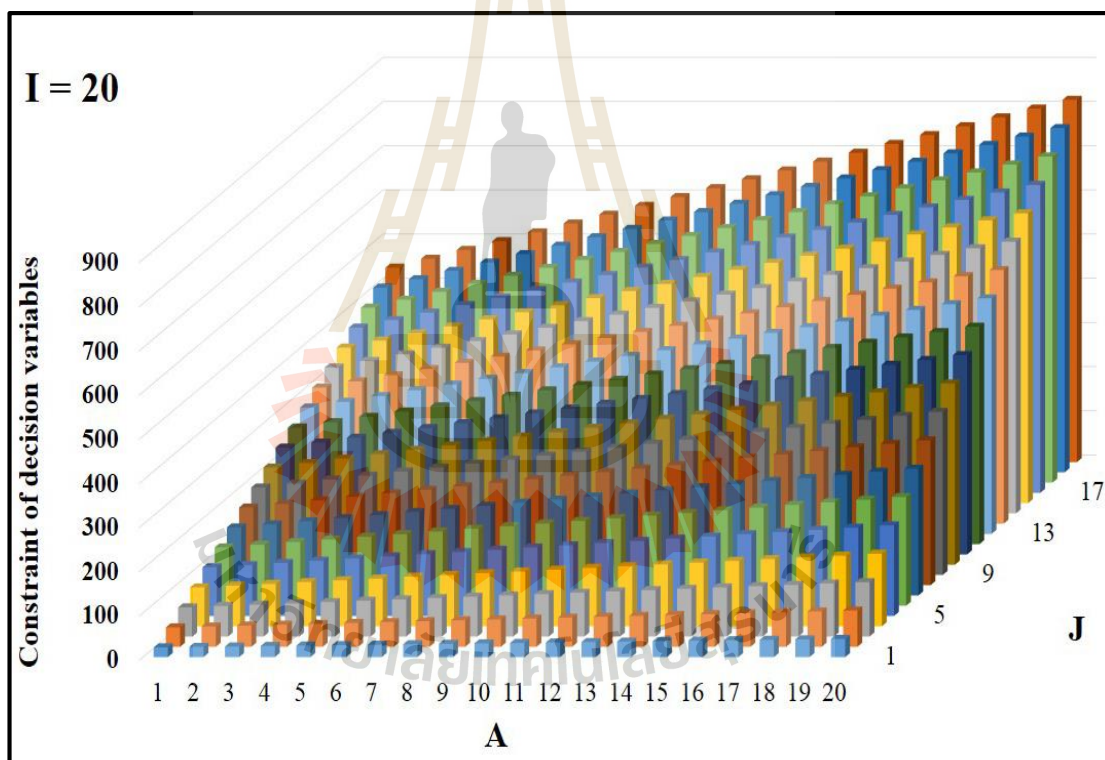
$$u_{ia} = u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{IA}$$

ดังนั้น มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ  $u$  เท่ากับ  $|I||A|$  ตัว

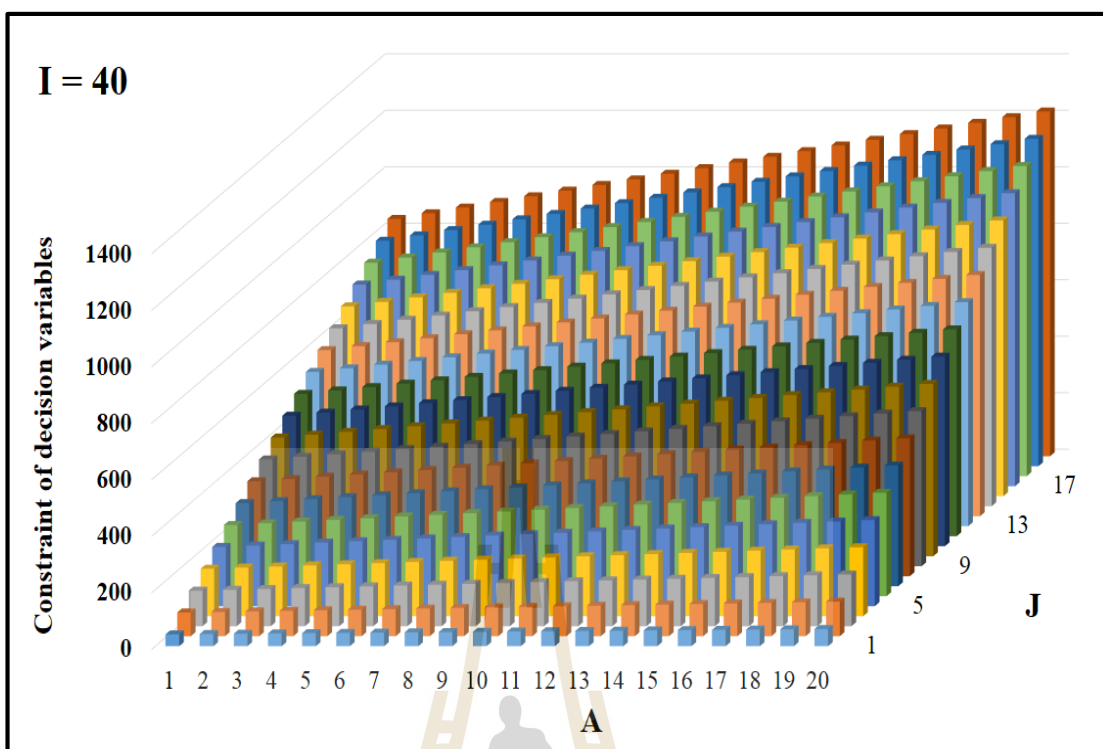
ดังนั้น จำนวนตัวแปรการตัดสินใจทั้งหมดสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\text{จำนวนตัวแปรการตัดสินใจทั้งหมด} = |A| + |J||A| + |I||A| \quad (4.14)$$

สมการที่ (4.14) แสดงให้เห็นว่าเป็นสมการคำนวณจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่มีรูปแบบสมการเป็นแบบพหุนาม (Polynomial) โดยเป็นรูปแบบของสมการพหุนามที่มีดีกรีเท่ากับ 1 ซึ่งตัวอย่างจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.14) แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งได้มีการแทนค่าของตัวแปรเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ ในรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนตัวแปรการตัดสินใจที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามจำนวนอินพุตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นตามรูปแบบของสมการพหุนาม



รูปที่ 4.4 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เมื่อ  $I = 20$



รูปที่ 4.5 จำนวนตัวแปรการตัดสินใจ เมื่อ  $I = 40$

#### 4.4.2 พื้นที่การค้นหา (Search Space)

พื้นที่การค้นหา คือ ชุดของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดสำหรับอัลกอริทึมหรือปัญหานั้น ซึ่งอัลกอริทึมนี้สามารถหาพื้นที่การค้นหาได้จากคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของตัวแปรการตัดสินใจ ซึ่งคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของแต่ละตัวแปรการตัดสินใจแสดงดังตารางที่ 4.1 และมีแนวคิดดังต่อไปนี้

สำหรับตัวแปร  $b$  มีคำตอบที่เป็นไปได้คือ 0 และ 1 และตัวแปรการตัดสินใจ  $b_a$  มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ  $|A|$  ตัว ดังนั้น ตัวแปรการตัดสินใจ  $b_a$  มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ  $2^{|A|}$

สำหรับตัวแปร  $s$  มีคำตอบที่เป็นไปได้คือ 0 และ 1 และตัวแปรการตัดสินใจ  $s_{ja}$  มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ  $|J||A|$  ตัว ดังนั้น ตัวแปรการตัดสินใจ  $s_{ja}$  มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ  $2^{J|A|}$

สำหรับตัวแปร  $u$  มีคำตอบที่เป็นไปได้คือ 0 และ 1 และตัวแปรการตัดสินใจ  $u_{ia}$  มีจำนวนตัวแปรการตัดสินใจเท่ากับ  $|I||A|$  ตัว ดังนั้น ตัวแปรการตัดสินใจ  $u_{ia}$  มีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ  $2^{I|A|}$

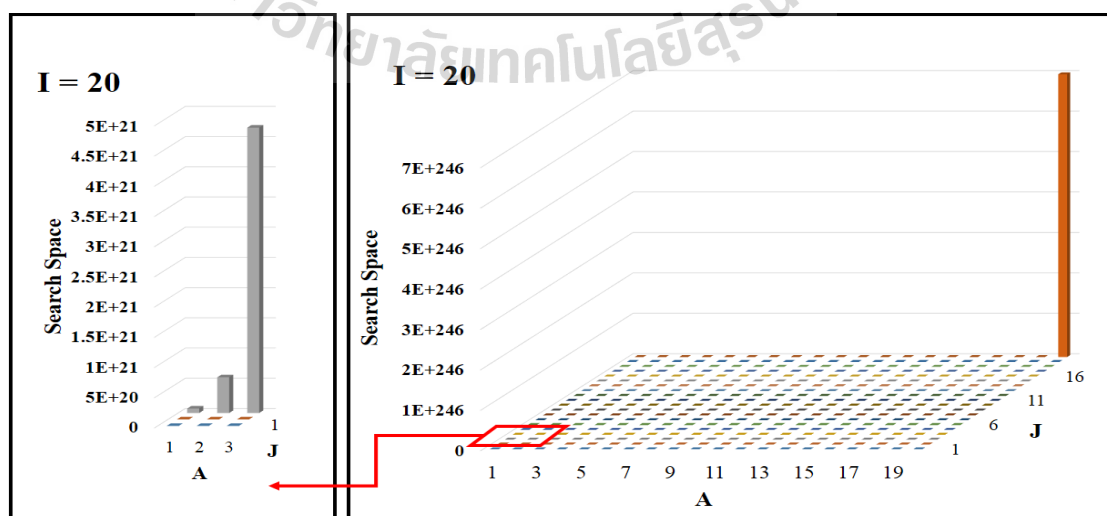
ตารางที่ 4.1 สรุปคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปรการตัดสินใจ

ตัวแปรการตัดสินใจ	คำตอบที่เป็นไปได้
$b_a$	$2^A$
$s_{ja}$	$2^{J \cdot A}$
$u_{ia}$	$2^{I \cdot A}$

จากคำตอบที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปร เมื่อนำคำตอบเหล่านี้มาหาชุดคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหาสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\text{พื้นที่การค้นหา} = 2^A \cdot 2^{J \cdot A} \cdot 2^{I \cdot A} \quad (4.15)$$

ตัวอย่างขนาดของพื้นที่การค้นหาจากสมการที่ (4.15) แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยมีกรปรับขนาดของตัวแปรต่างๆ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของขนาดพื้นที่การค้นหา ซึ่งมีรูปแบบของสมการ เอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) และขนาดของพื้นที่การค้นหา ยังแสดงดังรูปที่ 4.6 เมื่อกำหนดให้  $I$  มีค่าเท่ากับ 20 ซึ่งสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนสำหรับความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลว่าขนาดพื้นที่การค้นหาสูงมาก ๆ เมื่ออินพุตสถานีฐานเพิ่มโตเซลล์  $a$  มีค่าเท่ากับ 20 และจุดทดสอบสัญญาณ  $j$  มีค่าเท่ากับ 20 โดยมีคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ  $6.99 \times 10^{246}$  คำตอบ ซึ่งแตกต่างจากขนาดพื้นที่การค้นหาของอินพุตอื่นๆ ที่ต่ำมาก ๆ เมื่ออินพุตมีค่าเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย ลักษณะแบบนี้แสดงให้เห็นถึงการก้าวกระโดดของขนาดพื้นที่การค้นหา เมื่อมีจำนวนอินพุตเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์ของสมการแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 4.6 ขนาดของพื้นที่การค้นหา

#### 4.4.3 จำนวนเงื่อนไข (Constraints)

การวิเคราะห์จำนวนเงื่อนไขหรือจำนวนข้อจำกัดของปัญหานี้ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการเงื่อนไขของอัลกอริทึมที่มัน ซึ่งงานวิจัยในบทนี้สามารถแสดงจำนวนเงื่อนไขได้ดังตารางที่ 4.2 อย่างเช่น สมการที่ (4.2) เป็นเงื่อนไขที่แสดงถึงว่า จุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณตำแหน่ง  $j$  ต้องได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์อย่างน้อยหนึ่งสถานีฐาน โดยทุก  $j$  ต้องเป็นไปตามสมการเงื่อนไขที่กำหนด โดยที่  $j = 1, 2, 3, \dots, J$  ดังนั้นจึงทำให้สามารถนับจำนวนเงื่อนไขได้ว่ามีจำนวนเท่ากับ  $J$  เงื่อนไข

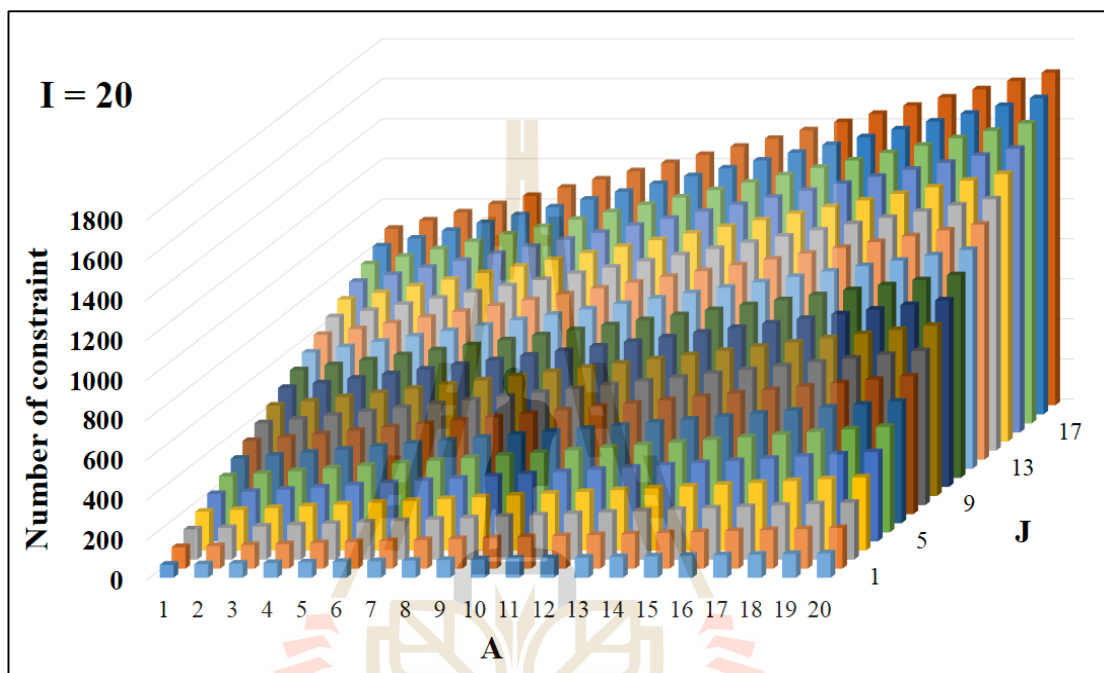
ดังนั้น จำนวนเงื่อนไขทั้งหมดจึงเท่ากับผลรวมของจำนวนเงื่อนไขของแต่ละสมการเงื่อนไข ซึ่งสมการคำนวณจำนวนเงื่อนไขสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนเงื่อนไข} &= |J| + |J||A| + |J||A| + |I| + |I||A| + |I||A| + |A| + I \\ &= |J| + 2 \cdot |J||A| + |I| + 2 \cdot |I||A| + |A| + I \end{aligned} \quad (4.16)$$

ตารางที่ 4.2 จำนวนเงื่อนไข

สมการเงื่อนไข	จำนวนเงื่อนไข
$\sum_{\forall a \in B} s_{ja} \geq 1 \quad \forall j \in T \quad (4.2)$	$J$
$s_{ja} \leq b_a \quad \forall j \in T, \forall a \in B \quad (4.3)$	$J \cdot A$
$s_{ja}(P_{ja} - P_T) \geq 0 \quad \forall j \in T, \forall a \in B \quad (4.4)$	$J \cdot A$
$\sum_{\forall a \in B} u_{ia} \geq 1 \quad \forall i \in D \quad (4.5)$	$I$
$u_{ia} \leq b_a \quad \forall i \in D, \forall a \in B \quad (4.6)$	$I \cdot A$
$u_{ia}(P_{ia} - P_U) \geq 0 \quad \forall i \in D, \forall a \in B \quad (4.7)$	$I \cdot A$
$\sum_{\forall i \in D} u_{ia} \leq C_a \quad \forall a \in B \quad (4.8)$	$A$
$\sum_{\forall a \in B} b_a = N_{MNFBS} \quad (4.13)$	$I$

สมการที่ (4.16) แสดงให้เห็นว่าเป็นสมการคำนวณจำนวนเงื่อนไขที่มีรูปแบบสมการเป็นแบบพหุนาม (Polynomial) โดยแสดงอยู่ในรูปของ  $ax + b$  ซึ่งตัวอย่างการคำนวณจำนวนเงื่อนไข แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งได้มีการแทนค่าของตัวแปรเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเงื่อนไข ในรูปที่ 4.7 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเงื่อนไขที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามจำนวนอินพุตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการแสดงถึงการเพิ่มขึ้นตามรูปแบบของสมการพหุนาม



รูปที่ 4.7 จำนวนเงื่อนไข

#### 4.4.4 สรุปความซับซ้อนของอัลกอริทึม

ขนาดของปัญหาสำหรับอัลกอริทึมที่มีรูปแบบเป็นการโปรแกรมเชิงเส้น ไบนารี ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยจำนวนตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variables) พื้นที่การค้นหา (Search Space) และจำนวนเงื่อนไข (Constraints) ซึ่งสมการการคำนวณเพื่อหาจำนวนหรือขนาดของสิ่งเหล่านี้เป็นสมการที่มีองค์ประกอบของตัวแปร  $A$   $I$  และ  $J$  ดังนั้นขนาดของปัญหาจะมีการเปลี่ยนแปลงตามจำนวน  $A$   $I$  และ  $J$  ที่เปลี่ยนไป ซึ่งจำนวนตัวแปรการตัดสินใจและจำนวนเงื่อนไขมีการขนาดเพิ่มขึ้นในรูปแบบของสมการพหุนาม (Polynomial) ส่วนขนาดของพื้นที่การค้นหามีขนาดเพิ่มขึ้นในรูปแบบของสมการเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) โดยสามารถเห็นความแตกต่างสำหรับขนาดของปัญหาได้ในตารางที่ 4.3 เมื่อมีการแทนค่าอินพุตแต่ละตัว

ตารางที่ 4.3 ขนาดของปัญหา

$A$	$I$	$J$	จำนวนตัวแปรตัดสินใจ	Size search space	จำนวนเงื่อนไข
3	5	5	33	8589934592	74
4	5	5	44	1.75922E+13	95
5	5	5	55	3.60288E+16	116
6	6	5	72	4.72237E+21	150
7	7	5	91	2.47588E+27	188
3	8	10	57	1.44115E+17	130
3	9	10	60	1.15292E+18	137
3	10	10	63	9.22337E+18	144
4	11	10	88	3.09485E+26	194
4	12	10	92	4.95176E+27	203
4	13	10	96	7.92282E+28	212
5	14	10	125	4.25353E+37	270
6	15	10	156	9.13439E+46	332
7	16	10	189	7.84638E+56	398
8	17	10	224	2.69599E+67	468
9	7	15	207	2.05688E+62	428
10	8	15	240	1.76685E+72	494
11	10	15	286	1.24331E+86	587
12	10	15	312	8.3437E+93	638

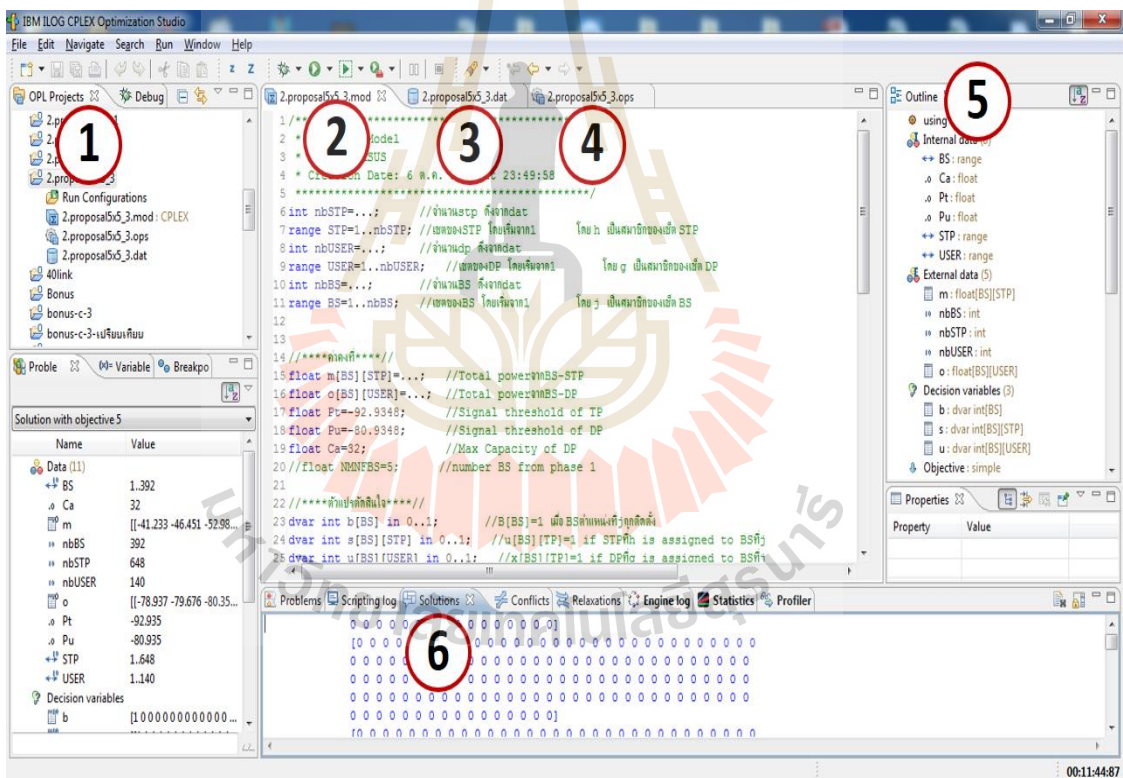
ตารางที่ 4.3 ขนาดของปัญหา (ต่อ)

<i>A</i>	<i>I</i>	<i>J</i>	จำนวนตัวแปรตัดสินใจ	Size search space	จำนวนเงื่อนไข
13	13	15	377	3.0783E+113	770
14	13	15	406	1.6526E+122	827
15	13	15	435	8.8725E+130	884
16	15	15	496	2.0459E+149	1007
17	15	15	527	4.3935E+158	1068
18	20	15	648	1.168E+195	1314
10	10	20	310	2.08592E+93	641
10	20	20	410	2.6442E+123	851
13	20	20	533	2.8118E+160	1094
15	20	20	615	1.3597E+185	1256
13	25	20	598	1.0374E+180	1229
15	25	20	690	5.1369E+207	1411
13	30	20	663	3.8273E+199	1364
15	30	20	765	1.9406E+230	1566
17	30	20	867	9.8403E+260	1768
17	35	20	952	3.8068E+286	1943



#### 4.5 โปรแกรมช่วยหาคำตอบสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารี

สำหรับการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาลักษณะต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องใช้การประมวลผลทางคอมพิวเตอร์เพื่อความสะดวกรวดเร็ว และได้คำตอบที่ถูกต้องแม่นยำ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้แก้ปัญหาคำตอบโปรแกรมเชิงเส้นที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิจัยสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้น โดยผู้วิจัยได้ทำการแปลงสมการคณิตศาสตร์ให้เป็นภาษาของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX โดยโปรแกรมนี้ใช้อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแก้ปัญหาของการโปรแกรมเชิงเส้นในการหาคำตอบที่ต้องการ หน้าต่างของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.8 โดยอธิบายรายละเอียดตามหมายเลข 1-6



รูปที่ 4.8 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

1. หมายเลข 1 (OPL Project) แสดงในส่วนของหน้าต่างไฟล์โครงการ (Project) ที่ผู้ใช้สร้างไว้ในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio สำหรับการแก้ปัญหาต่างๆ โดยแต่ละโครงการ ประกอบไปด้วย 3 ไฟล์ คือ โมเดลไฟล์ (\*.mod) คำสั่งไฟล์ (\*.dat) และเซตตั้งไฟล์ (\*.ops)

2. หมายเลข 2 (Model File Editing Area) แสดงในส่วนของหน้าต่างสำหรับป้อนคำสั่งด้วยภาษาของโปรแกรมที่ผู้ใช้ต้องการคำนวณหาค่าที่ดีที่สุดของปัญหานั้น ๆ โดยคำสั่งเหล่านี้ผู้ใช้ต้องทำการแปลงมาจากสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้น ซึ่งมีโครงสร้างหลักประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข แสดงดังรูป 4.9

3. หมายเลข 3 (Data File Editing Area) แสดงในส่วนของหน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลที่เป็นตัวแปรค่าคงที่ ตัวแปรในรูปของเมทริกซ์ (Matrix) โดยข้อมูลเหล่านี้จะเป็นข้อมูลการนำเข้า (Input) ที่ถูกเรียกใช้ในการคำนวณจากคำสั่งในส่วนของโมเดลไฟล์ แสดงดังรูปที่ 4.10

4. หมายเลข 4 (Setting File Editing Area) แสดงในส่วนของหน้าต่างสำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา เช่น การจำกัดเวลา (Time) ตั้งค่าหน่วยความจำ (Memory) จำนวนการวนซ้ำ (Iteration) และการตั้งค่าอัลกอริทึม (Algorithm) ที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ แสดงดังรูปที่ 4.11

5. หมายเลข 5 (Outline View) แสดงในส่วนของหน้าต่างส่วนสรุปโดยย่อ (Outline) ของโมเดลไฟล์ คำสั่งไฟล์และเซตตั้งไฟล์ เพื่อให้ง่ายต่อการค้นหาและตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ของโครงการ

6. หมายเลข 6 (Solution Log Area) แสดงในส่วนของหน้าต่างคำตอบที่โปรแกรมคำนวณได้ว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ของปัญหารวมไปถึงแสดงปัญหาที่พบในระหว่างการคำนวณหาคำตอบ

```

1 /*****
2 * OPL 12.4 Model
3 * Author: ASUS
4 * Creation Date: 6 ต.ค. 2559 at 23:49:58
5 *****/
6 int nbSTP=...; //จำนวนstp ตั้งจากdat
7 range STP=1..nbSTP; //เขตของSTP โดยเริ่มจาก1 โดย h เป็นสมาชิกของเซต STP
8 int nbUSER=...; //จำนวนdp ตั้งจากdat
9 range USER=1..nbUSER; //เขตของDP โดยเริ่มจาก1 โดย g เป็นสมาชิกของเซต DP
10 int nbBS=...; //จำนวนBS ตั้งจากdat
11 range BS=1..nbBS; //เขตของBS โดยเริ่มจาก1 โดย j เป็นสมาชิกของเซต BS
12
13
14 //****ค่าคงที่****//
15 float m[BS][STP]=...; //Total powerจากBS-STP
16 float o[BS][USER]=...; //Total powerจากBS-DP
17 float Pt=-92.9348; //Signal threshold of TP
18 float Pu=-80.9348; //Signal threshold of DP
19 float Ca=32; //Max Capacity of DP
20 //float MNFB=5; //number BS from phase 1
21
22 //****ตัวแปรตัดสินใจ****//
23 dvar int b[BS] in 0..1; //B[BS]=1 เมื่อ BSตำแหน่งที่ถูกลดติดตั้ง
24 dvar int s[BS][STP] in 0..1; //u[BS][TP]=1 if STPที่h is assigned to BSที่j
25 dvar int u[BS][USER] in 0..1; //x[BS][TP]=1 if DPที่g is assigned to BSที่j
26
27
28 //****Objective function****//
29 minimize
30 sum(a in BS)b[a]; //minimize number of installed BS
31

```

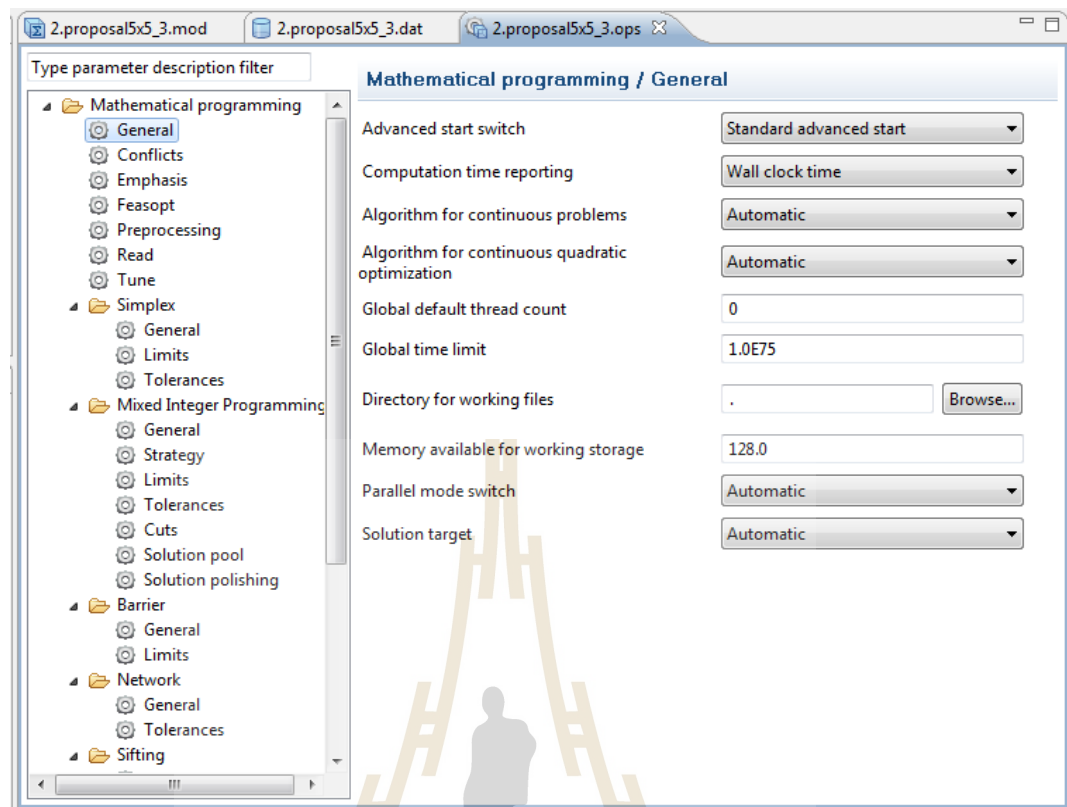
รูปที่ 4.9 Model File Editing Area

```

1 /*****
2 * OPL 12.4 Data
3 * Author: ASUS
4 * Creation Date: 6 ต.ค. 2559 at 23:49:58
5 *****/
6 nbBS=392; // number of candidate BS
7 nbUSER=140; // number of Demand point
8 nbSTP=648; // number of Test point
9
10 //Total Power BS-STP
11 m = [
12 [ -41.23278443 -46.45146024 -52.9802096 -56.78175913 -59.43586847
13 [ -51.71503379 -43.95605867 -43.95605867 -51.71503379 -55.9718957
14 [ -56.78175913 -52.9802096 -46.45146024 -41.23278443 -50.25104107
15 [ -59.99079732 -57.5237972 -54.09149624 -48.52480917 -39.74109826
16 [ -67.33554866 -65.51269158 -63.20832158 -60.08094295 -55.25104107
17 [ -69.18231445 -67.7374928 -66.00523369 -63.84349218 -60.9718957
18 [ -70.70544673 -69.50898707 -68.12174239 -66.47152724 -64.43586847
19 [ -72.00141886 -70.98053568 -69.82385595 -68.48978317 -66.9142114
20 [ -78.12917642 -77.23896812 -76.24719866 -75.12774194 -73.84292202
21 [ -79.12736168 -78.33818891 -77.47020423 -76.50593545 -75.42138337
22 [ -80.02267573 -79.31395161 -78.54229642 -77.69545354 -76.75720272
23 [ -80.8343383 -80.19118404 -79.49662161 -78.74172363 -77.91501777
24 [ -81.5766436 -80.98795744 -80.3564882 -79.67553285 -78.93668011
25 [ -82.26051072 -81.71778962 -81.13890878 -80.51870769 -79.85083673
26 [ -51.71503379 -52.53612211 -55.23434758 -57.86584834 -60.05750029
27 [ -54.52652668 -52.04139747 -52.04139747 -54.52652668 -57.24833146
28 [ -57.86584834 -55.23434758 -52.53612211 -51.71503379 -53.82182894
29 [ -60.54239314 -58.45453037 -55.92929241 -53.14586449 -51.6005584
30 [ -67.66547482 -66.00523369 -64.0151385 -61.60218399 -58.82182894
31 [ -69.40077455 -68.03924343 -66.44756214 -64.54895275 -62.24833146

```

รูปที่ 4.10 Data File Editing Area



รูปที่ 4.11 Setting File Editing Area

คำสั่งของโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ที่แสดงในตารางที่ 4.4 และในตารางที่ 4.5 นั้นเป็นการแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีให้กลายเป็นภาษาของโปรแกรมเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น เพื่อให้มีตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของโครงสร้างอาคารที่จะทำการติดตั้งสถานีฐาน ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบสามส่วน คือ ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข แสดงดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสำหรับวัตถุประสงค์ MNFBS เป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

สมการคณิตศาสตร์	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	Decision Variable
$b_a$	dvar int b[BS] in 0..1;
$s_{ja}$	dvar int s[BS][STP] in 0..1;
$u_{ia}$	dvar int u[BS][USER] in 0..1;
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	Objective function
สมการ(4.1)	Minimize sum(a in BS)b[a];
เงื่อนไข	subject to {
สมการ(4.2)	ct1: forall (j in STP) sum(a in BS)s[a][j] >= 1;
สมการ(4.3)	ct2: forall (j in STP) forall (a in BS) s[a][j]<=b[a];
สมการ(4.4)	ct3: forall (j in STP) forall (a in BS) s[a][j]*(m[a][j]-Pt)>=0;
สมการ(4.5)	ct4: forall (i in USER) sum(a in BS) u[a][i] >= 1;
สมการ(4.6)	ct5: forall (i in USER) forall (a in BS) u[a][i]<=b[a];
สมการ(4.7)	ct6: forall (a in BS) forall (i in USER) u[a][i]*(o[a][i]-Pu)>=0;
สมการ(4.8)	ct7: forall(a in BS) sum(i in USER) u[a][i] <= Ca;

ตารางที่ 4.5 การแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีสำหรับวัตถุประสงค์ MSR เป็นรูปแบบคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

สมการคณิตศาสตร์	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	Decision Variable
$b_a$	dvar int b[BS] in 0..1;
$s_{ja}$	dvar int s[BS][STP] in 0..1;
$u_{ia}$	dvar int u[BS][USER] in 0..1;
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	Objective function
สมการ(4.12)	Maximize sum (j in STP,a in BS) s[a][j]*m[a][j];
เงื่อนไข	subject to {
สมการ(4.2)	ct1: forall (j in STP) sum(a in BS)s[a][j] >= 1;
สมการ(4.3)	ct2: forall (j in STP) forall (a in BS) s[a][j]<=b[a];
สมการ(4.4)	ct3: forall (j in STP) forall (a in BS) s[a][j]*(m[a][j]-Pt)>=0;
สมการ(4.5)	ct4: forall (i in USER) sum(a in BS) u[a][i] >= 1;
สมการ(4.6)	ct5: forall (i in USER) forall (a in BS) u[a][i]<=b[a];
สมการ(4.7)	ct6: forall (a in BS) forall (i in USER) u[a][i]*(o[a][i]-Pu)>=0;
สมการ(4.8)	ct7: forall(a in BS) sum(i in USER) u[a][i] <= Ca;
สมการ(4.13)	ct8: sum(a in BS)b[a] == N <sub>MNFBS</sub> ;

## บทที่ 5

### การทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากเนื้อหาก่อนหน้านี้ได้เสนอแนวคิดของงานวิจัยในการสร้างสมการคณิตศาสตร์สำหรับการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่ายสี่จีแอลที่อยู่ในอาคาร โดยได้เสนอแนวคิดการออกแบบกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งในกระบวนการแรกสำหรับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์นั้น ในงานวิจัยของเราได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญในกระบวนการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่จำเป็นต้องถูกติดตั้งในบริเวณพื้นที่ให้บริการก่อนเป็นขั้นตอนแรก ดังนั้นเราจึงได้มีการเสนอแนวคิดสำหรับการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้สถานีฐานเฟมโตเซลล์เกิดสมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุด โดยศึกษาถึงปัจจัยและข้อจำกัดต่างๆ ในการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ทั้งจากทางปฏิบัติลักษณะการทำงานจริงและจากทางทฤษฎี หลังจากนั้นจะทำการแปลงข้อจำกัดหรือเงื่อนไขต่างๆ ที่จำเป็นต่อการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้การโปรแกรมเชิงเส้นในการหาคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบของตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยสมการคณิตศาสตร์นี้มีข้อดีคือ สามารถประหยัดเวลาในการวางแผนและออกแบบเครือข่าย รวมถึงง่ายต่อการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ ซึ่งตอบโจทย์ความต้องการของผู้ให้บริการในการวางแผนเครือข่ายในทุกลักษณะพื้นที่ ไม่ว่าจะเป็นพื้นที่โครงสร้างอาคารชั้นเดียว อาคารหลายชั้น อาคารที่มีขนาดใหญ่ความซับซ้อนมาก โดยกระบวนการทำงานการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้ จะประกอบไปด้วยการทำงานจำนวน 2 เฟส โดยการทำงานในเฟสที่ 1 จะเป็นกระบวนการในการหาคำตอบที่มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เพียงพอสำหรับติดตั้งภายในอาคาร จากนั้นจึงนำคำตอบที่ได้จากการทำงานในเฟสที่ 1 มาเป็นเงื่อนไขในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในการทำงานเฟสที่ 2 ซึ่งเป็นกระบวนการหาคำตอบของตำแหน่งติดตั้ง สถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด โดยที่สามารถวางในตำแหน่งที่คุณภาพความแรงสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ อัตราเร็วการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้งานมีคุณภาพที่ดีตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ รวมถึงผู้ใช้งานทั้งหมดสามารถที่จะเข้าใช้บริการสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้

สำหรับเนื้อหาในบทที่ 5 นี้จะแสดงผลการทดลองและวิเคราะห์ผล ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ 5.1 การทดลองเพื่อสาธิตสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ 5.2 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นด้วยเทคนิคที่เราได้นำเสนอกับเทคนิคแบบ Coverage Based Design 5.3 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นด้วยเทคนิคที่เราได้นำเสนอกับเทคนิคแบบ Uniform Distribution Placement และ 5.4 สรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นทั้งสามเทคนิค

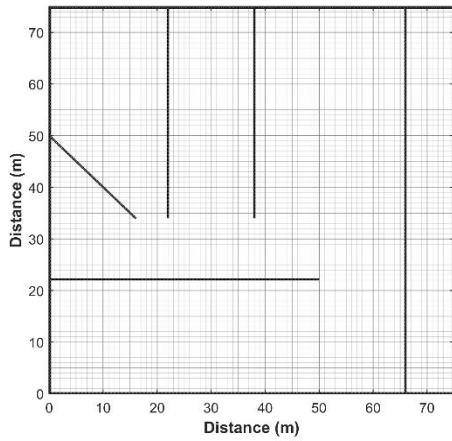
## 5.1 การทดลองเพื่อสาธิตสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์

ในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อสาธิตการใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นใบนารีสำหรับปัญหาการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้อธิบายในบทที่ 4 ไปใช้ในการออกแบบการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในพื้นที่โครงสร้างอาคารรูปแบบต่างๆ เพื่อหาคำตอบของตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด และประเมินประสิทธิภาพของสมรรถนะการทำงานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งในแต่ละพื้นที่ให้บริการที่แตกต่างกัน

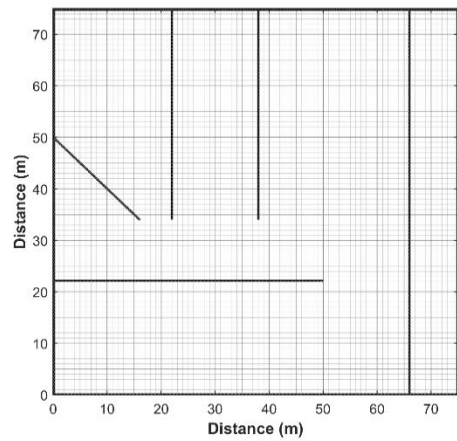
### 5.1.1 ออกแบบการทดลอง

โดยในการทดลองเราได้ทำการออกแบบการทดลองโดยกำหนดพื้นที่สำหรับการทดลองกับพื้นที่อาคารจำนวน 3 รูปแบบด้วยกัน และกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทดลองที่แตกต่างกันตามความเหมาะสมของพื้นที่ของอาคาร ได้แก่ 5.1.1.1 การทดลองในพื้นที่ของอาคารจำนวน 2 ชั้น (ได้กำหนดให้เป็นพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1) 5.1.1.2 การทดลองในพื้นที่ของอาคารบรรณสารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ได้กำหนดให้เป็นพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2) และ 5.1.1.3 การทดลองในพื้นที่ของอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ได้กำหนดให้เป็นพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3) ซึ่งได้แสดงพื้นที่สำหรับการทดลองทั้ง 3 รูปแบบ ดังรูปที่ 5.1





ก. แผนผังอาคาร ชั้นที่ 1



ข. แผนผังอาคาร ชั้นที่ 2

(พื้นที่ให้บริการแบบที่ 1)



ก. แผนผังอาคารบรรณสารชั้นที่ 1 มทส.

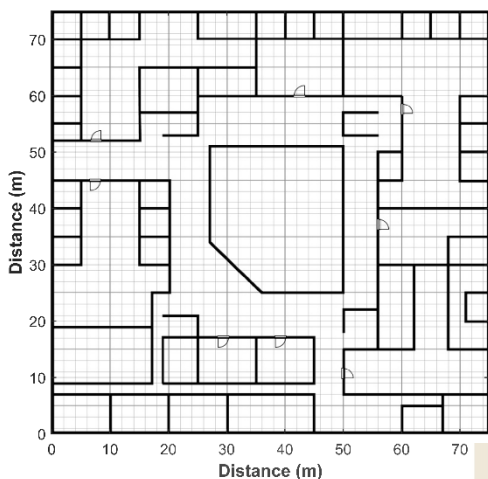


ข. แผนผังอาคารบรรณสารชั้นที่ 2 มทส.

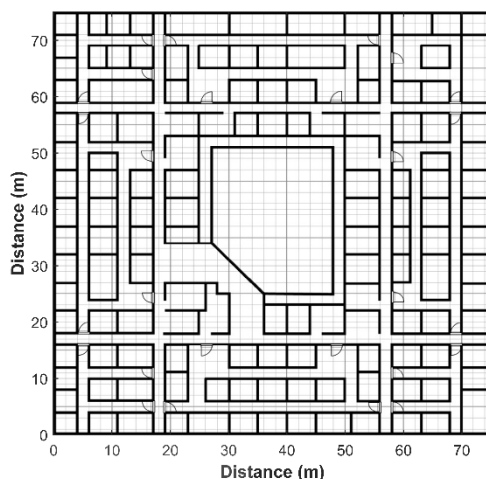


ก. แผนผังอาคารบรรณสารชั้นที่ 3 มทส.

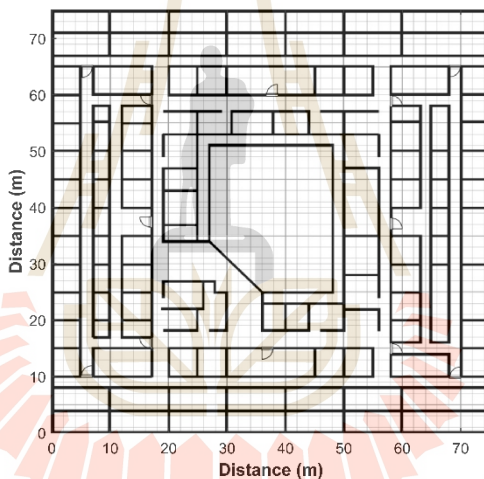
(พื้นที่ให้บริการแบบที่ 2)



ก. แผนผังอาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 1 มทส.



ข. แผนผังอาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 2 มทส.

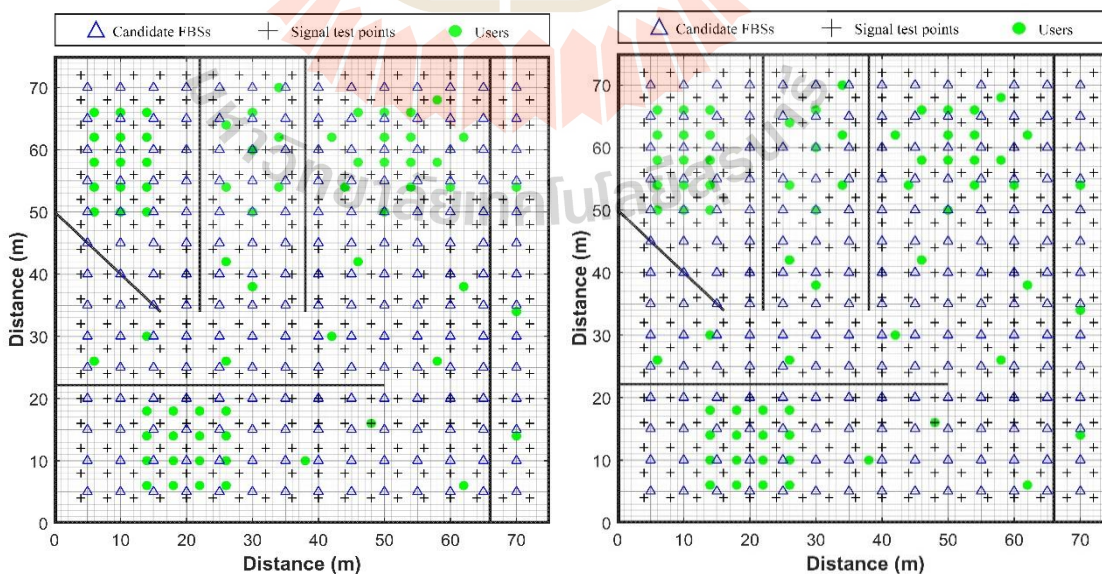


ค. แผนผังอาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 3 มทส.  
(พื้นที่ให้บริการแบบที่ 3)

รูปที่ 5.1 พื้นที่สำหรับการทดลอง

### 5.1.1.1 การทดลองในพื้นที่ของอาคารจำนวน 2 ชั้น

จากสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เราได้นำเสนอ นำมาทดสอบกับพื้นที่ของอาคารที่มีขนาดพื้นที่การทดลองจำนวน 2 ชั้น (1<sup>st</sup> floor และ 2<sup>nd</sup> floor) ในแต่ละชั้นมีความกว้าง 75 เมตร ความยาว 75 เมตร ความสูง 3 เมตร โดยลักษณะโครงสร้างของกำแพงในแต่ละชั้นจะเหมือนกัน คือมีจำนวนและโครงสร้างที่ไม่ค่อยซับซ้อนมาก โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้มีทั้งหมด 392 จุด ในแต่ละชั้นมีจำนวน 196 จุด กำหนดระยะห่างของตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่สามารถติดตั้งได้แต่ละตำแหน่งเท่ากับ 5 เมตร (grid spacing  $5 \times 5 \text{ m}^2$ ) โดยมีความสูงจากพื้น 2 เมตร จุดทดสอบสัญญาณมีจำนวนทั้งหมด 648 จุด ในแต่ละชั้นมีจำนวน 324 จุด กำหนดระยะห่างของจุดทดสอบสัญญาณแต่ละตำแหน่งเท่ากับ 4 เมตร (grid spacing  $4 \times 4 \text{ m}^2$ ) จำนวนผู้ใช้งานมีจำนวนทั้งหมด 140 คน ในแต่ละชั้นมีจำนวน 70 คน กำหนดให้ผู้ใช้งานกระจายตัวทั่วพื้นที่บริการ โดยผู้ใช้งานมีความกระจุกอยู่ในบริเวณห้องทำงาน และบริเวณทางเดินมีการกระจายตัวของผู้ใช้งาน โดยทั้งจุดทดสอบสัญญาณและตำแหน่งผู้ใช้งานมีความสูงจากพื้น 0.8 เมตร รูปที่ 5.2 แสดงพารามิเตอร์สำหรับการทดลองในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 เครื่องหมายสามเหลี่ยมสีน้ำเงินแทนตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ เครื่องหมายบวกสีดำแทนจุดทดสอบสัญญาณ วงกลมสีเขียวแทนตำแหน่งของผู้ใช้งาน และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 แสดงดังตารางที่ 5.1



ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 5.2 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1

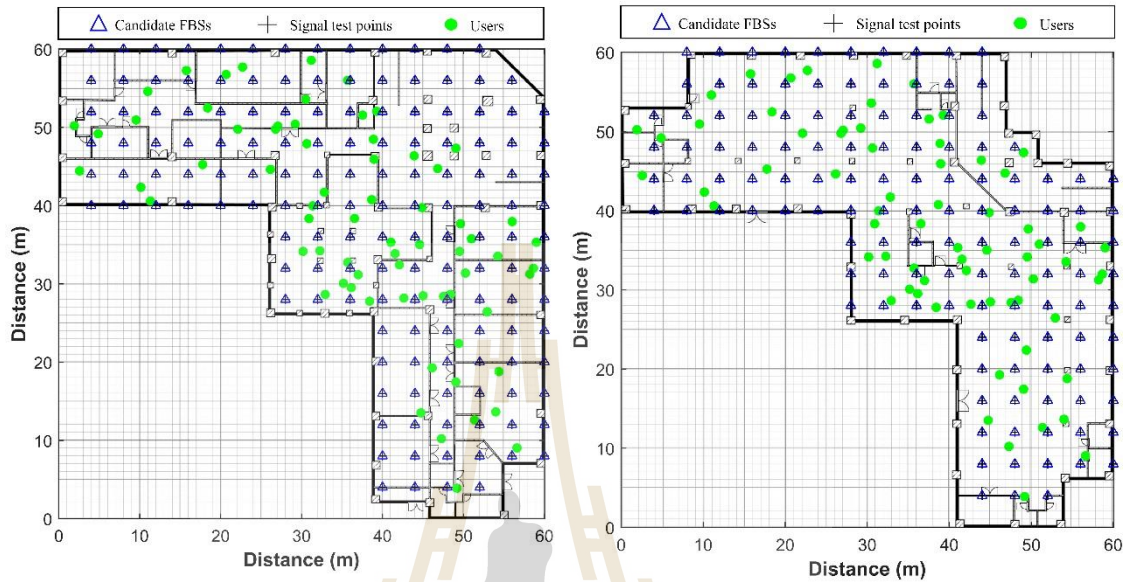
ตารางที่ 5.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่การทดลองที่ 1

พารามิเตอร์	ค่า
กำลังส่งสัญญาณ	5 dBm
ความสูงของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	2 เมตร
ความสูงของจุดทดสอบสัญญาณและผู้ใช้งาน	0.8 เมตร
ความถี่ของสัญญาณ	2.6 GHz
ความกว้างของช่องสัญญาณ	20 MHz
จำนวนจุดทดสอบสัญญาณทั้งหมด	648 จุด
จำนวนผู้ใช้งานทั้งหมด	140 คน
ความจุของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	32 คน ต่อสถานีฐานเฟมโตเซลล์
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับรับประกันอัตราเร็วการให้บริการของผู้ใช้งาน	75.60 Mbps
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับรับประกันความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ	25.20 Mbps

### 5.1.1.2 การทดลองในพื้นที่ของอาคารบรรณสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

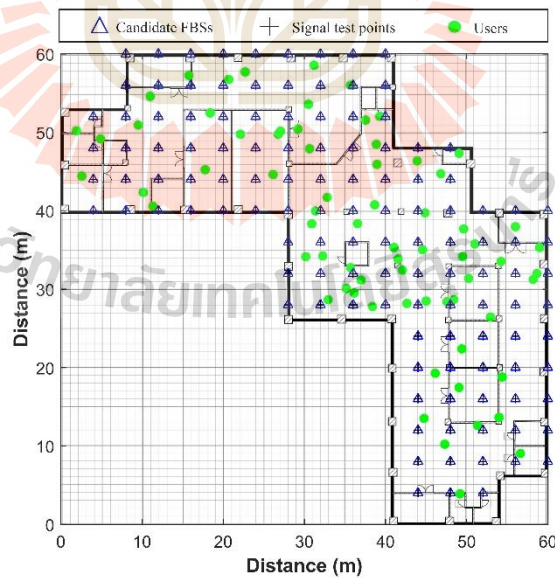
จากสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เราได้นำเสนอ นำมาทดสอบกับพื้นที่ของอาคารบรรณสารเก่าของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่มีขนาดพื้นที่การทดลองจำนวน 3 ชั้น ( 1<sup>st</sup> floor, 2<sup>nd</sup> floor และ 3<sup>rd</sup> floor ) ในแต่ละชั้นมีความกว้าง 60 เมตร ความยาว 60 เมตร ความสูง 3 เมตร โดยลักษณะโครงสร้างของกำแพงมีความแตกต่างกันในแต่ละชั้น โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้และจุดทดสอบสัญญาณ มีจำนวนทั้งหมด 398 จุด เช่นเดียวกัน โดยในชั้นที่ 1 มีจำนวน 148 จุด ชั้นที่ 2 มีจำนวน 128 จุด และในชั้นที่ 3 มีจำนวน 122 จุด กำหนดระยะห่างแต่ละตำแหน่งเท่ากับ 4 เมตร (grid spacing 4x4 m<sup>2</sup>) โดยตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้มีความสูงของจากพื้น 2 เมตร จำนวนผู้ใช้งานมีจำนวนทั้งหมด 210 คน ในแต่ละชั้นมีจำนวน 70 คน กำหนดให้ผู้ใช้งานกระจายตัวทั่วพื้นที่ให้บริการ โดยทั้งจุดสอบสัญญาณและตำแหน่งผู้ใช้งานมีความสูงจากพื้น 0.8 เมตร รูปที่ 5.3 แสดงพารามิเตอร์สำหรับการทดลองในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 เครื่องหมายสามเหลี่ยมสีน้ำเงินแทนตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโต

เซลล์ได้ เครื่องหมายวงสี่เหลี่ยมแทนจุดทดสอบสัญญาณ วงกลมสีเขียวแทนตำแหน่งของผู้ใช้งาน และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 แสดงดังตารางที่ 5.2



ก. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 1 มทส.

ข. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 2 มทส.



ค. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 3 มทส.

รูปที่ 5.3 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

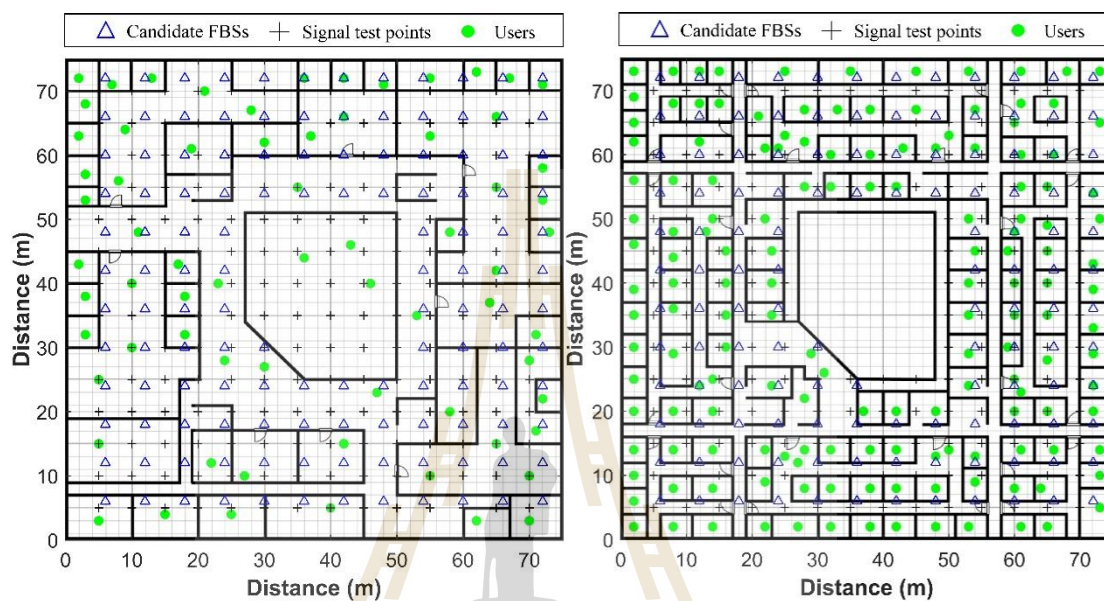
ตารางที่ 5.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่การทดลองที่ 2

พารามิเตอร์	ค่า
กำลังส่งสัญญาณ	5 dBm
ความสูงของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	2 เมตร
ความสูงของจุดทดสอบสัญญาณและผู้ใช้งาน	0.8 เมตร
ความถี่ของสัญญาณ	2.6 GHz
ความกว้างของช่องสัญญาณ	20 MHz
จำนวนจุดทดสอบสัญญาณทั้งหมด	398 จุด
จำนวนผู้ใช้งานทั้งหมด	210 คน
ความจุของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	32 คน ต่อสถานีฐานเฟมโตเซลล์
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับรับประกันอัตราเร็วการให้บริการของผู้ใช้งาน	75.60 Mbps
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับรับประกันความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ	25.20 Mbps

### 5.1.1.3 การทดลองในพื้นที่ของอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

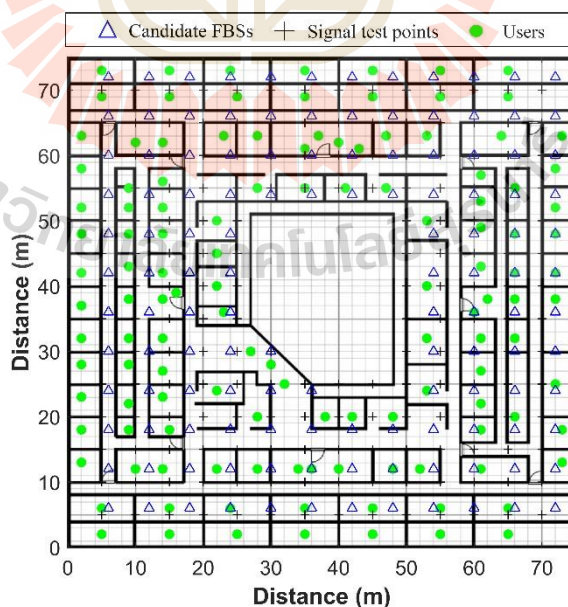
จากสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เราได้นำเสนอ นำมาทดสอบกับพื้นที่ของอาคารวิชาการ 1 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่มีขนาดพื้นที่การทดลองจำนวน 3 ชั้น (1<sup>st</sup> floor, 2<sup>nd</sup> floor และ 3<sup>rd</sup> floor) ในแต่ละชั้นมีความกว้าง 75 เมตร ความยาว 75 เมตร ความสูง 3 เมตร ลักษณะโครงสร้างของกำแพงมีความแตกต่างกันในแต่ละชั้น โดยชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะมีความซับซ้อนของจำนวนกำแพงมากกว่าชั้นที่ 1 ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้มีทั้งหมด 383 จุด กำหนดระยะห่างของตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่สามารถติดตั้งได้แต่ละตำแหน่งเท่ากับ 6 เมตร (grid spacing 6x6 m<sup>2</sup>) โดยมีความสูงจากพื้น 2 เมตร จุดทดสอบสัญญาณมีจำนวนทั้งหมด 550 จุด ในชั้นที่ 1 มีจำนวน 196 จุด ชั้นที่ 2 และชั้น 3 มีจำนวน 177 จุด จุดกำหนดระยะห่างของจุดทดสอบสัญญาณแต่ละตำแหน่งเท่ากับ 5 เมตร (grid spacing 5x5 m<sup>2</sup>) จำนวนผู้ใช้งานมีจำนวนทั้งหมด 346 คน ในชั้นที่ 1 มีจำนวน 68 คน ชั้นที่ 2 มีจำนวน 154 คน และชั้นที่ 3 มีจำนวน 124 กำหนดให้ผู้ใช้งานกระจายตัวทั่วพื้นที่ให้บริการ ผู้ใช้งาน 1 คนต่อ 1 ห้อง และบริเวณห้องใต้ดินมีการกระจายของผู้ใช้งาน โดยทั้งจุดทดสอบสัญญาณและตำแหน่งผู้ใช้งานมีความสูงจากพื้น

0.8 เมตร รูปที่ 5.4 แสดงพารามิเตอร์สำหรับการทดลองในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 เครื่องหมายสามเหลี่ยมสีน้ำเงินแทนตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ เครื่องหมายวงกลมสีดำแทนจุดทดสอบสัญญาณ วงกลมสีเขียวแทนตำแหน่งของผู้ใช้งาน และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 แสดงดังตารางที่ 5.3



ก. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 1 มทส.

ข. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 2 มทส.



ค. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 3 มทส.

รูปที่ 5.4 พารามิเตอร์สำหรับการทดลองในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3

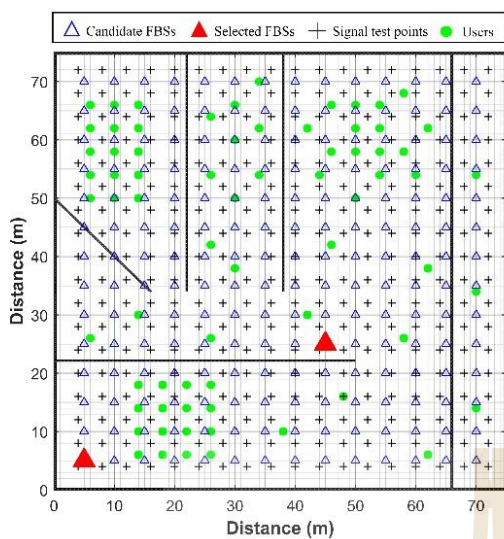
ตารางที่ 5.3 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่การทดลองที่ 3

พารามิเตอร์	ค่า
กำลังส่งสัญญาณ	5 dBm
ความสูงของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	2 เมตร
ความสูงของจุดทดสอบสัญญาณและผู้ใช้งาน	0.8 เมตร
ความถี่ของสัญญาณ	2.6 GHz
ความกว้างของช่องสัญญาณ	20 MHz
จำนวนจุดทดสอบสัญญาณทั้งหมด	550 จุด
จำนวนผู้ใช้งานทั้งหมด	346 คน
ความจุของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	32 คน ต่อสถานีฐานเฟมโตเซลล์
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับรับประกันอัตราเร็วการให้บริการของผู้ใช้งาน	75.60 Mbps
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับรับประกันความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ	25.20 Mbps

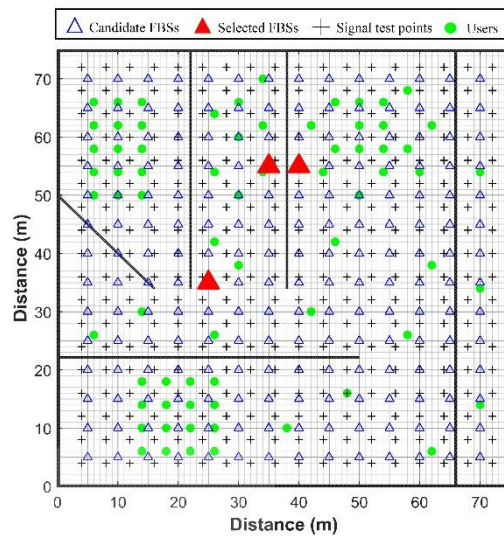
### 5.1.2 ผลการทดลอง

ในการหาคำตอบสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เราได้นำเสนอ เราได้ใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Version 12.4 โดยใช้คอมพิวเตอร์รุ่น Intel® Core™ i5-6600 ความเร็วซีพียู 3.30 GHz หน่วยความจำ 16 GB 64 บิต ในการประมวลผลหาคำตอบของตำแหน่งวางสถานีเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งผลการประมวลผลหาคำตอบได้แสดงดังรูปที่ 5.5 ถึง 5.10 โดยจากสมการคณิตศาสตร์ได้แบ่งการทำงานออกเป็น 2 เฟส ซึ่งสาเหตุที่แบ่งการทำงานออกเป็น 2 เฟส จะได้อธิบายและแสดงผลในหัวข้อนี้ ซึ่งผลการทดลองอย่างแรกเป็นผลของคำตอบในเฟสที่ 1 เป็นการหาคำตอบของจำนวนสถานีฐานที่เพียงพอที่สุดสำหรับพื้นที่ของอาคารที่ได้กำหนดขึ้น โดยได้แสดงจำนวนและตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในเครือข่ายน้อยที่สุด ซึ่งผลการทดลองในพื้นที่ให้บริการทั้ง 3 แบบ แสดงได้ดังรูปที่ 5.5 ถึง 5.7 นี้



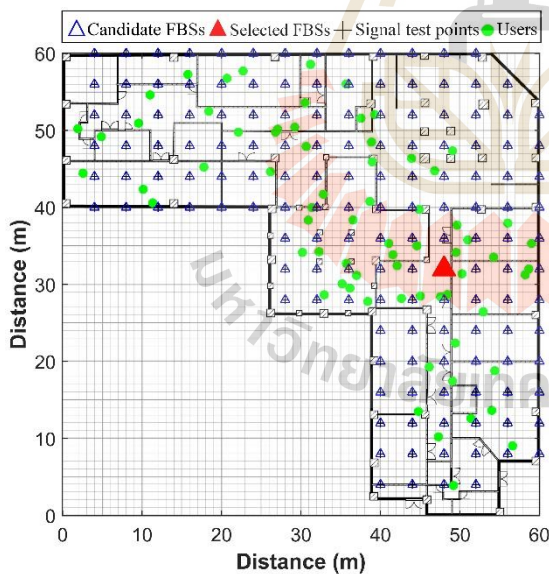


ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

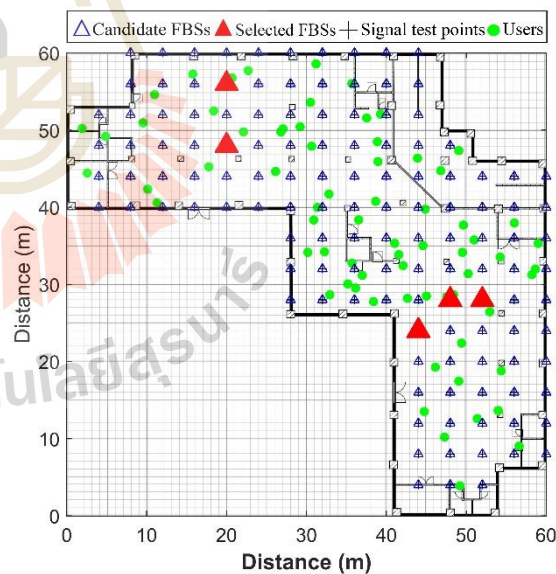


ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

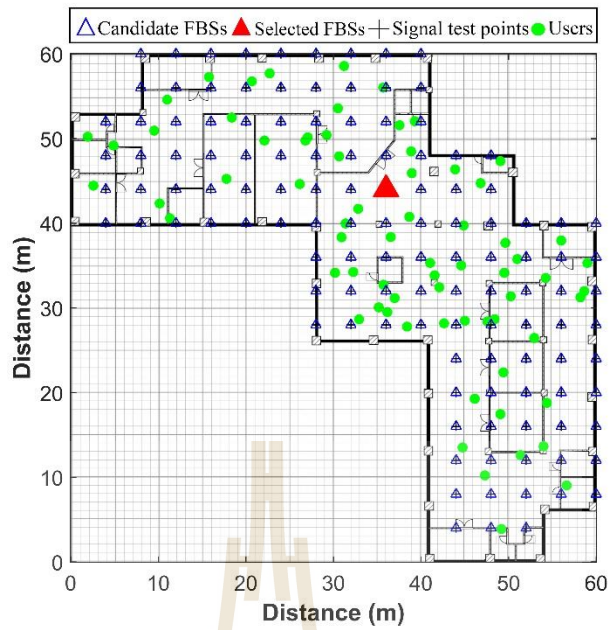
รูปที่ 5.5 จำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน femto เซลล์ของเฟสที่ 1 ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1



ก. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 1 มทส.

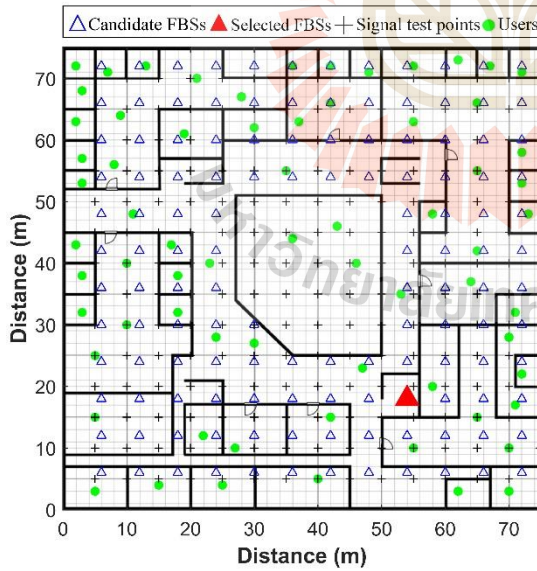


ข. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 2 มทส.

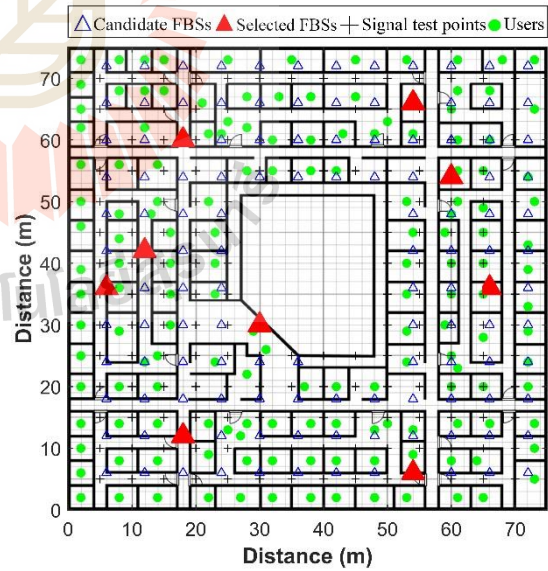


ค. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 3 มทส.

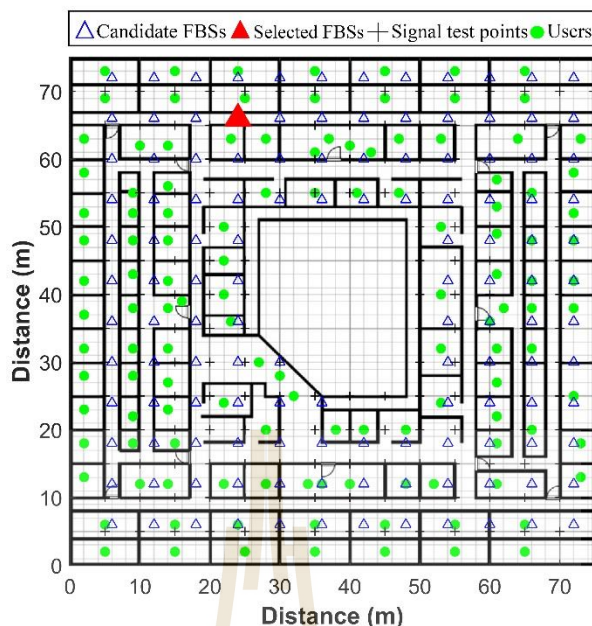
รูปที่ 5.6 จำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของเฟสที่ 1 ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2



ก. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 1 มทส.



ข. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 2 มทส.



ค. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 3 มทส.

รูปที่ 5.7 จำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของเฟสที่ 1 ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3

จากผลการทดลองสำหรับวัตถุประสงค์ในเฟสที่ 1 ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทราบจำนวนของสถานีฐานที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้งภายในเครือข่าย โดยใช้โปรแกรม ILOG CLPEX ในการหาคำตอบ ผลของคำตอบจากสมการคณิตศาสตร์สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 ดังรูปที่ 5.5 ต้องใช้สถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดติดตั้งในเครือข่ายทั้งหมดจำนวน 5 สถานีฐาน โดยอาคารชั้นที่ 1 ต้องใช้ 3 สถานีฐาน และชั้นที่ 2 ต้องใช้ 2 สถานีฐาน

พื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ดังรูปที่ 5.6 ผลของคำตอบที่ได้ต้องใช้สถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดติดตั้งในเครือข่ายทั้งหมดจำนวน 7 สถานีฐาน โดยอาคารชั้นที่ 1 ต้องใช้ 1 สถานีฐาน อาคารชั้นที่ 2 ต้องใช้ 5 สถานีฐาน และอาคารชั้นที่ 3 ต้องใช้ 1 สถานีฐาน

และพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ดังรูปที่ 5.7 ผลของคำตอบที่ได้ต้องใช้สถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดติดตั้งในเครือข่ายทั้งหมดจำนวน 11 สถานีฐาน โดยอาคารชั้นที่ 1 ต้องใช้ 1 สถานีฐาน อาคารชั้นที่ 2 ต้องใช้ 9 สถานีฐาน และอาคารชั้นที่ 3 ต้องใช้ 1 สถานีฐาน โดยสรุปผลของคำตอบที่ได้จากเฟสที่ 1 แสดงดังตารางที่ 5.4

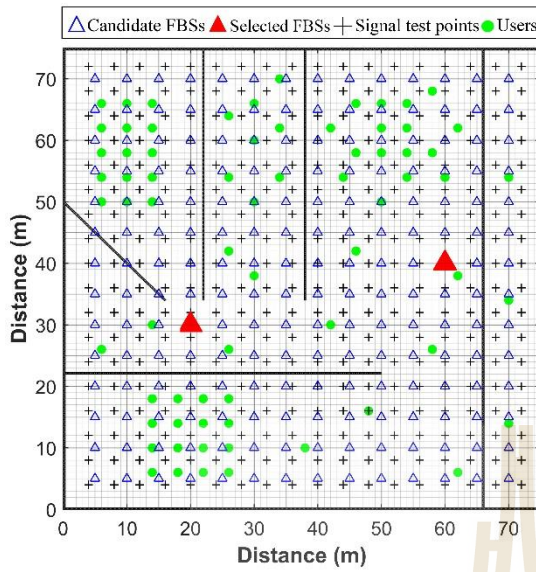
จากผลของคำตอบที่ได้จะสังเกตเห็นได้ว่าตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 ในชั้นที่ 2 ตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ในชั้นที่ 2 และ

ตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ในชั้นที่ 2 มีลักษณะเกาะกลุ่มกัน ซึ่งมีผลทำให้ในบางตำแหน่งของจุดทดสอบสัญญาณที่อยู่ไกลจากกลุ่มของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งนั้น ได้รับสัญญาณที่อ่อนกว่าตำแหน่งของจุดทดสอบสัญญาณที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยที่การได้รับสัญญาณที่อ่อนจะส่งผลให้คุณภาพของสัญญาณในบางตำแหน่งเป็นมุมอับสัญญาณ ทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับสูงกว่า อันเนื่องมาจากระยะทางและสิ่งกีดขวางภายในอาคาร

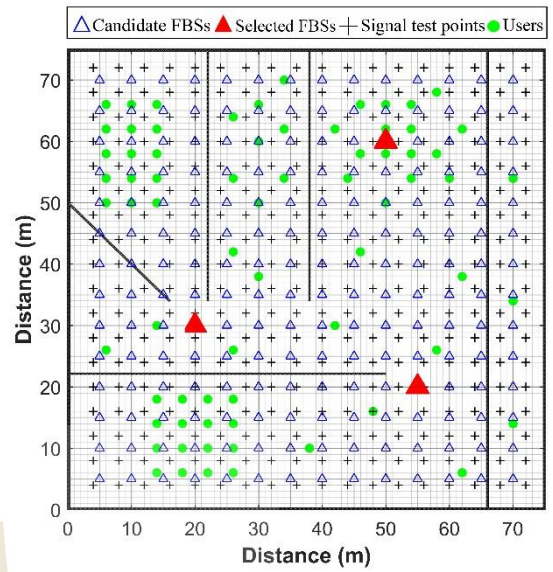
ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ขึ้นในเฟสที่ 2 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการทำตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่มีลักษณะของคุณภาพความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมทั่วทั้งบริเวณพื้นที่ให้บริการ โดยที่สามารถให้คุณภาพของค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับครอบคลุมพื้นที่ให้บริการมากที่สุด ซึ่งผลการทดลองของเฟสที่ 2 ในพื้นที่ให้บริการทั้ง 3 แบบ แสดงได้ดังรูปที่ 5.8 ถึง 5.10

ตารางที่ 5.4 สรุปผลของคำตอบที่ได้จากเฟสที่ 1

พื้นที่ให้บริการ	จำนวนสถานีฐานทั้งหมด	จำนวนสถานีฐานชั้นที่ 1	จำนวนสถานีฐานชั้นที่ 2	จำนวนสถานีฐานชั้นที่ 3
1. อาคาร 2 ชั้น	5	2	3	-
2. อาคารบรรณสาร มทส.	7	1	5	1
3. อาคารวิชาการ 1 มทส.	11	1	9	1

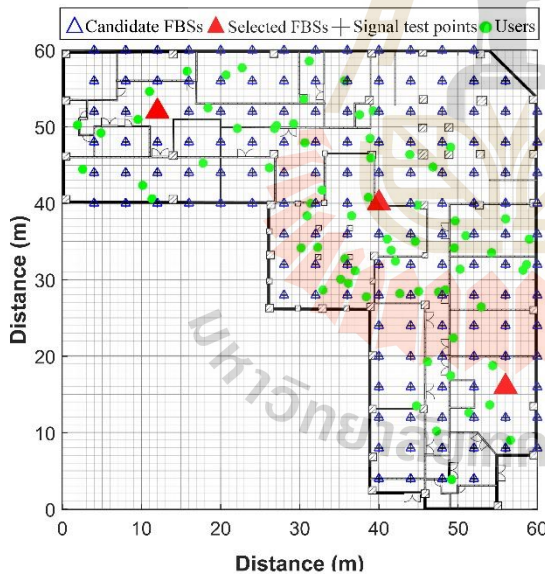


ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

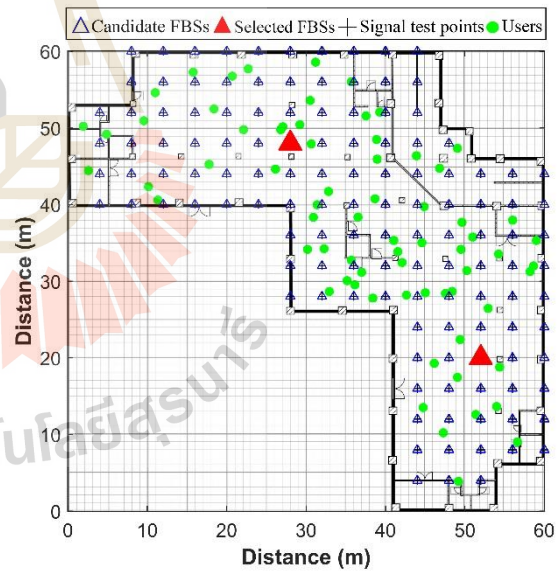


ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

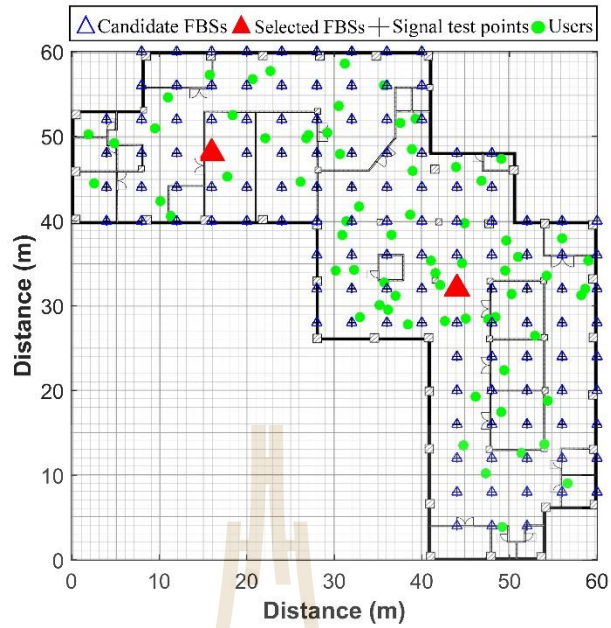
รูปที่ 5.8 จำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเพิ่มโทรศัพท์ของเฟสที่ 2 ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1



ก. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 1 มทส.

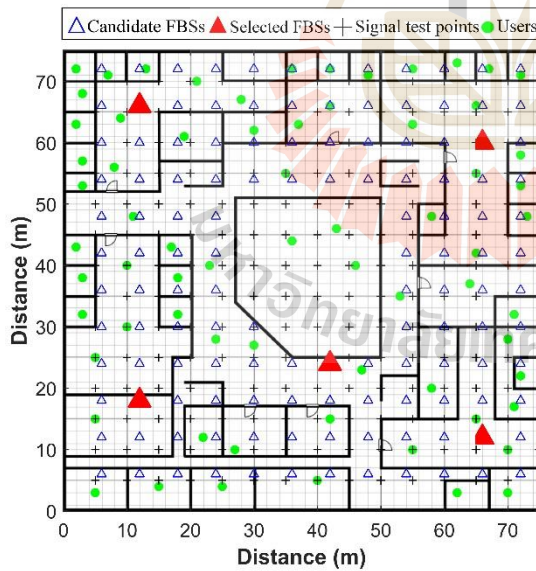


ข. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 2 มทส.

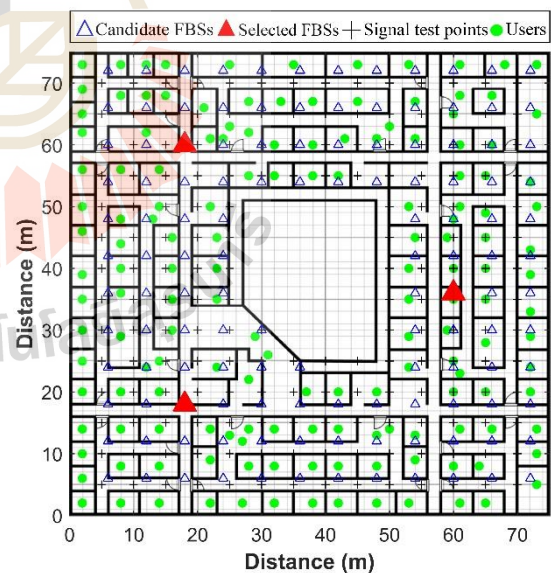


ค. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 3 มทส.

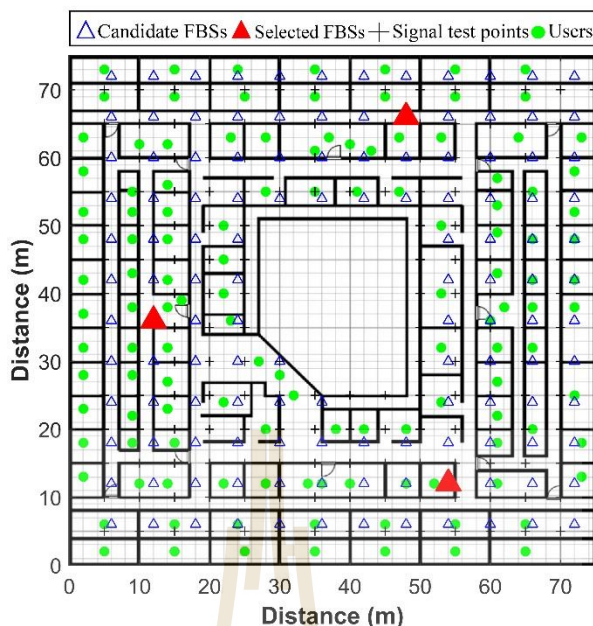
รูปที่ 5.9 จำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโทเซลล์ของเฟสที่ 2 ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2



ก. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 1 มทส.



ข. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 2 มทส.



ก. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 3 มทส.

รูปที่ 5.10 จำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของเฟสที่ 2 ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3

จากผลการทดลองสำหรับวัตถุประสงค์ในเฟสที่ 2 วัตถุประสงค์เพื่อการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่มีลักษณะของคุณภาพความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมทั่วทั้งบริเวณพื้นที่ให้บริการ โดยที่สามารถให้คุณภาพของค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกต้องไว้แล้วมีค่ามากที่สุด ซึ่งใช้โปรแกรม ILOG CLPEX ในการหาคำตอบเช่นเดียวกับเฟสที่ 1 ผลของคำตอบจากสมการคณิตศาสตร์สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 ดังรูปที่ 5.8 ต้องใช้สถานีฐานเฟมโตเซลล์ติดตั้งในเครือข่ายจำนวน 5 สถานีฐาน โดยอาคารชั้นที่ 1 ต้องใช้ 3 สถานีฐาน และชั้นที่ 2 ต้องใช้ 2 สถานีฐาน ซึ่งมีคำตอบเหมือนกับเฟสที่ 1 แต่ตำแหน่งที่วางสถานีฐานแตกต่างกันออกไป

พื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ดังรูปที่ 5.9 ผลของคำตอบที่ได้ต้องใช้สถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ติดตั้งในเครือข่ายทั้งหมดจำนวน 7 สถานีฐาน โดยอาคารชั้นที่ 1 ต้องใช้ 3 สถานีฐาน อาคารชั้นที่ 2 ต้องใช้ 2 สถานีฐาน และอาคารชั้นที่ 3 ต้องใช้ 2 สถานีฐาน

พื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ดังรูปที่ 5.10 ผลของคำตอบที่ได้ต้องใช้สถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ติดตั้งในเครือข่ายทั้งหมดจำนวน 11 สถานีฐาน โดยอาคารชั้นที่ 1 ต้องใช้ 5 สถานีฐาน อาคารชั้นที่ 2 ต้องใช้ 3 สถานีฐาน และอาคารชั้นที่ 3 ต้องใช้ 3 สถานีฐาน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าคำตอบที่ได้ของ

พื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 ถึง 3 ตำแหน่งที่วางสถานีฐานแตกต่างจากเฟสที่ 1 คือมีการกระจายตัวของสถานีฐาน ไม่กระจุกอยู่เพียงชั้นใดชั้นหนึ่งเหมือนเฟสที่ 1

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าคำตอบที่ได้จากเฟสที่ 2 ของพื้นที่ให้บริการทั้ง 3 แบบ ตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้ มีการกระจายตัวของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ดี ส่งผลให้ตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการดีที่สุด ทำให้คุณภาพของสัญญาณภายในพื้นที่ให้บริการมีคุณภาพที่ดี ไม่เกิดการแปรปรวนของค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับ โดยสรุปผลของคำตอบที่ได้จากเฟสที่ 2 แสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 สรุปผลของคำตอบที่ได้จากเฟสที่ 2

พื้นที่ให้บริการ	จำนวนสถานีฐานทั้งหมด	จำนวนสถานีฐานชั้นที่ 1	จำนวนสถานีฐานชั้นที่ 2	จำนวนสถานีฐานชั้นที่ 3
1. อาคาร 2 ชั้น	5	2	3	-
2. อาคารบรรณสาร มทส.	7	3	2	2
3. อาคารวิชาการ 1 มทส.	11	5	3	3

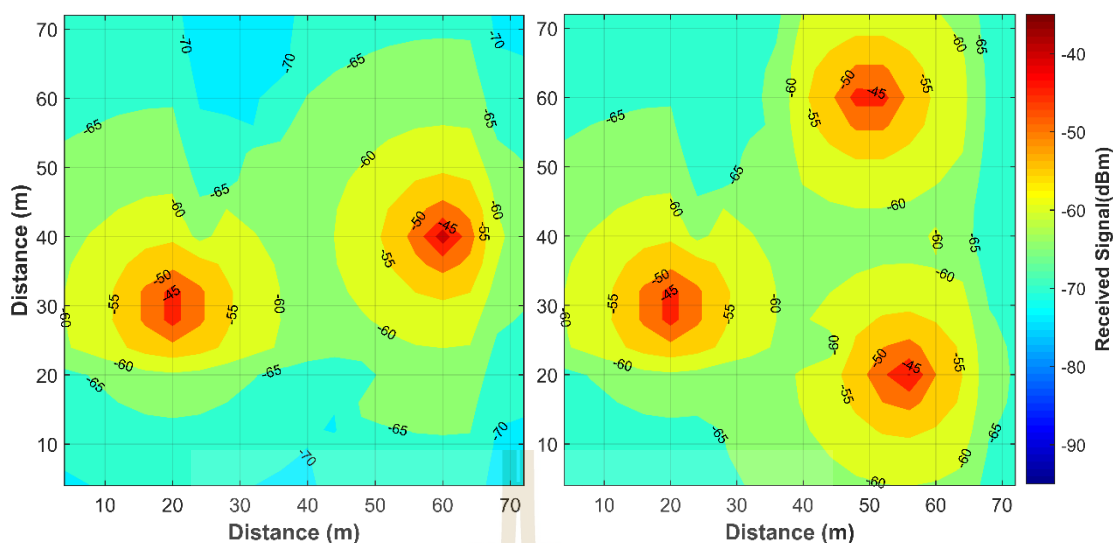
### 5.1.3 การวิเคราะห์ผล

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพผลของคำตอบที่ได้จากการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยสมการคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอของพื้นที่ให้บริการทั้ง 3 แบบ โดยผลการทดลองประกอบไปด้วย 1. กราฟแสดงคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ 2. กราฟแสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ

#### 5.1.3.1 พื้นที่ของอาคารจำนวน 2 ชั้น

ผลการทดลองอย่างแรก คือกราฟแสดงคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ซึ่งจะแสดงคุณภาพของความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่แต่ละจุดทดสอบสัญญาณได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในแต่ละชั้น โดยจะแสดงออกมาเป็นของรูป contour plot โดยผลของตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 แสดงดังรูปที่ 5.11





ก. พื้นที่อาคาร ชั้นที่ 1

ข. พื้นที่อาคารชั้นที่ 2

รูปที่ 5.11 กราฟคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1

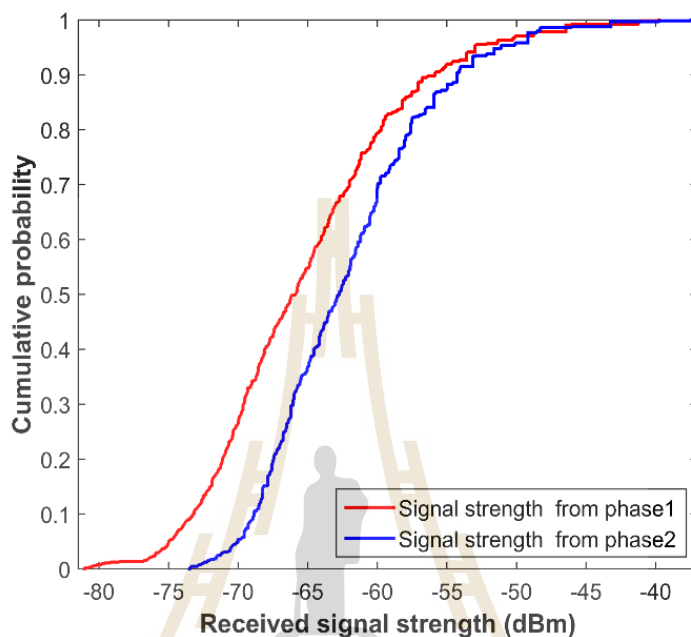
ตารางที่ 5.6 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1

	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2
ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ	-63.27 dBm	-61.03 dBm
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแรงสัญญาณ	5.83	5.80

จากผลของกราฟดังรูปที่ 5.11 แสดงค่าความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าในพื้นที่ให้บริการมีสัญญาณที่ครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ ซึ่งเป็นความแรงสัญญาณที่มีคุณภาพของดี โดยในชั้นที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ -63.27 dBm และชั้นที่ 2 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ -61.03 dBm ซึ่งผ่านเกณฑ์ของความแรงสัญญาณที่ตั้งไว้ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแรงสัญญาณทั้ง 2 ชั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าการกระจายตัวของความแรงสัญญาณมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยคุณภาพสัญญาณสามารถครอบคลุมได้ทั่วพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้สรุปผลคุณภาพสัญญาณของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 แสดงดังตารางที่ 5.6

ผลการทดลองอย่างที่ 2 คือ กราฟเปรียบเทียบแสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ แสดงให้เห็นถึงความน่าจะเป็นของช่วงระดับความแรงสัญญาณแรงที่สุดของแต่ละจุดทดสอบสัญญาณที่มีโอกาสได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟม

โตะเซลล์ ซึ่งในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบความแรงสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตะเซลล์ของคำตอบที่ได้ทั้ง 2 เฟสจากสมการคณิตศาสตร์สำหรับการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตะเซลล์ที่ได้นำเสนอ แสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 ระหว่างเฟส 1 และเฟส 2

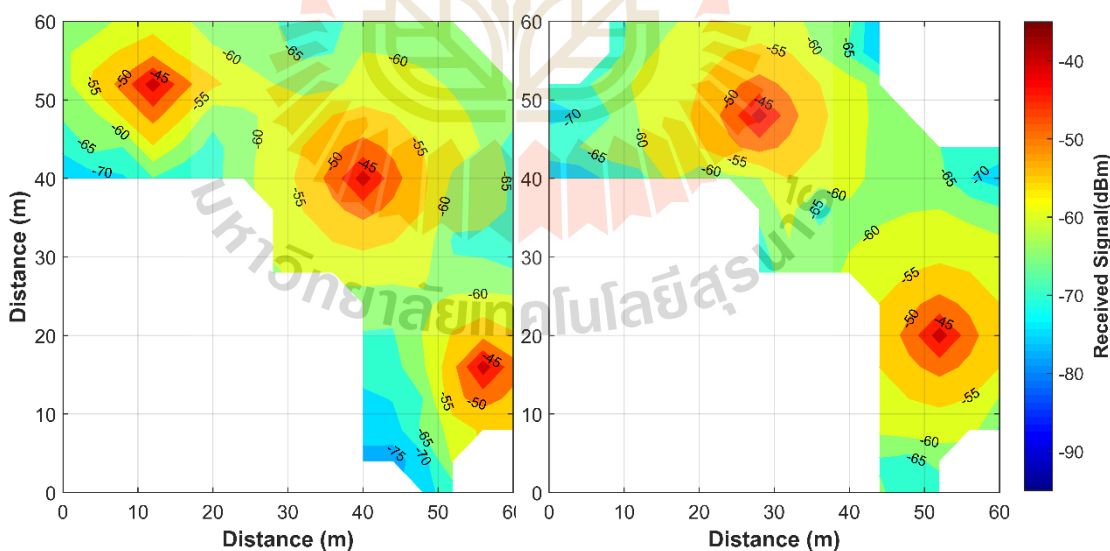
จากผลของกราฟดังรูปที่ 5.12 จะสังเกตเห็นว่าความแรงสัญญาณจากเฟสที่ 2 มีคุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าเฟสที่ 1 โดยค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตะเซลล์ของเฟสที่ 2 มีค่า  $-62.15$  dBm ส่วนเฟสที่ 1 มีค่าเฉลี่ยที่  $-65.22$  dBm ซึ่งถ้าพิจารณาที่โอกาสความน่าจะเป็นที่ 10 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่า 10 เปอร์เซ็นต์ของความแรงสัญญาณในพื้นที่ให้บริการของเฟส 1 จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน  $-73$  dBm และเฟสที่ 2 จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน  $-68$  dBm ซึ่งเฟสที่ 2 มีโอกาสที่จะพบเจอคุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่าเฟสที่ 1 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตะเซลล์ของเฟสที่ 2 เป็นตำแหน่งที่ดีกว่าเฟสที่ 1 และมีคุณภาพสัญญาณสามารถครอบคลุมได้ทั่วพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ โดยสรุปผลประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1 แสดงดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 สรุปผลประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 1

ประสิทธิภาพ	ค่า
จำนวนสถานีฐาน	5 สถานีฐาน
พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ	100 %
ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับ	-62.15 dBm
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับ	5.93

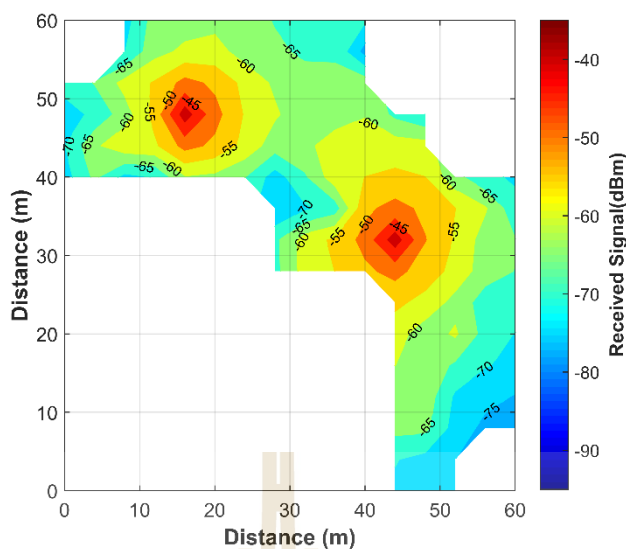
### 5.1.3.2 พื้นที่ของอาคารบรรณสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ผลการประเมินประสิทธิภาพการวางสถานีฐาน เฟมโตเซลล์ประกอบด้วย คือกราฟแสดงคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ซึ่งจะแสดงคุณภาพของความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่แต่ละจุดทดสอบสัญญาณได้รับจาก สถานีฐานเฟมโตเซลล์ในแต่ละชั้น โดยจะแสดงออกมาในเป็นของรูป contour plot โดยผลของ ตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 5.13



ก. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 1 มทส.

ข. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 2 มทส.



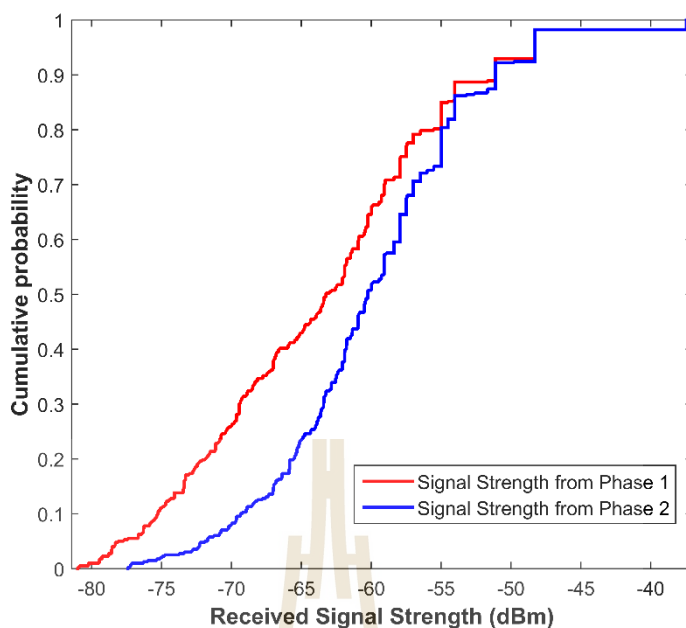
ค. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 3 มทส.

รูปที่ 5.13 กราฟคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

ตารางที่ 5.8 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ	-59.40 dBm	-59.01 dBm	-61.70 dBm
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแรงสัญญาณ	6.86	6.55	7.72

จากผลของกราฟดังรูปที่ 5.13 แสดงค่าความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าในพื้นที่ให้บริการมีสัญญาณที่ครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการที่มีคุณภาพของดี โดยในชั้นที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ -59.40 dBm ชั้นที่ 2 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ -59.01 dBm และชั้นที่ 3 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ -61.70 dBm ซึ่งผ่านเกณฑ์ของความแรงสัญญาณที่ตั้ง โดยคุณภาพสัญญาณสามารถครอบคลุมได้ทั่วพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้สรุปผลคุณภาพสัญญาณของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 แสดงดังตารางที่ 5.8



รูปที่ 5.14 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณ  
ที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ระหว่างเฟส 1 และเฟส 2

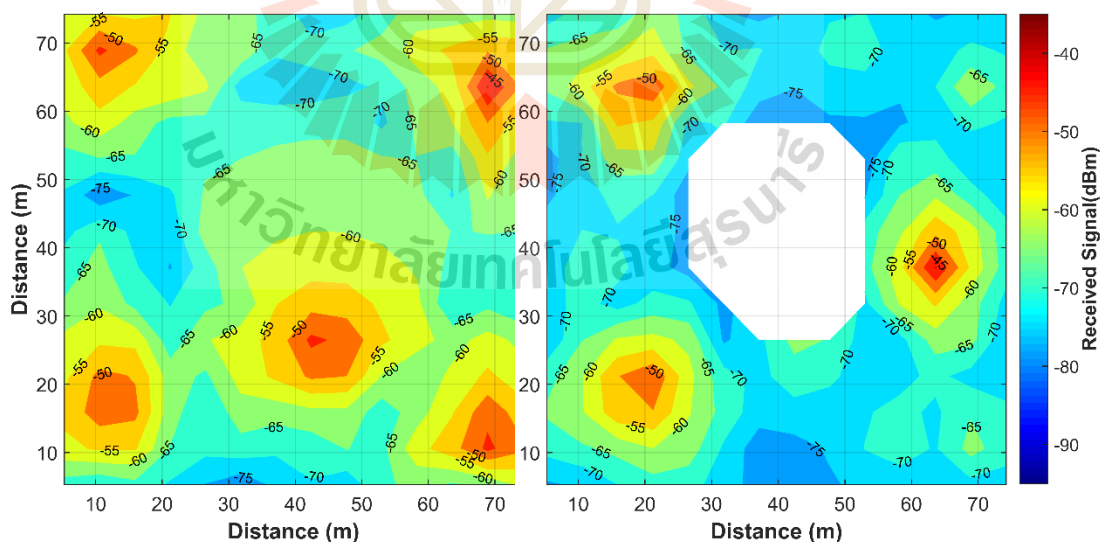
จากกราฟเปรียบเทียบแสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ดังรูปที่ 5.14 จะสังเกตเห็นว่าความแรงสัญญาณจากเฟสที่ 2 มีคุณภาพสัญญาณที่ดีกว่า เฟสที่ 1 โดยค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณแรงที่สุดของแต่ละจุดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟสโตเซลล์ของเฟสที่ 2 มีค่า  $-59.98$  dBm ส่วนเฟสที่ 1 มีค่าเฉลี่ยที่  $-63.47$  dBm ซึ่งถ้าพิจารณาที่โอกาสความน่าจะเป็นที่ 40 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ของความแรงสัญญาณในพื้นที่ให้บริการของเฟส 1 จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน  $-66$  dBm และเฟสที่ 2 จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน  $-62$  dBm ซึ่งเฟสที่ 2 มีโอกาสที่จะพบเจอคุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่าเฟสที่ 1 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของเฟสที่ 2 เป็นตำแหน่งที่ดีกว่าเฟสที่ 1 และมีคุณภาพสัญญาณสามารถครอบคลุมได้ทั่วพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ โดยสรุปผลประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 แสดงดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 สรุปผลประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

ประสิทธิภาพ	ค่า
จำนวนสถานีฐาน	7 สถานีฐาน
พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ	100 %
ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับ	-59.98 dBm
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับ	7.12

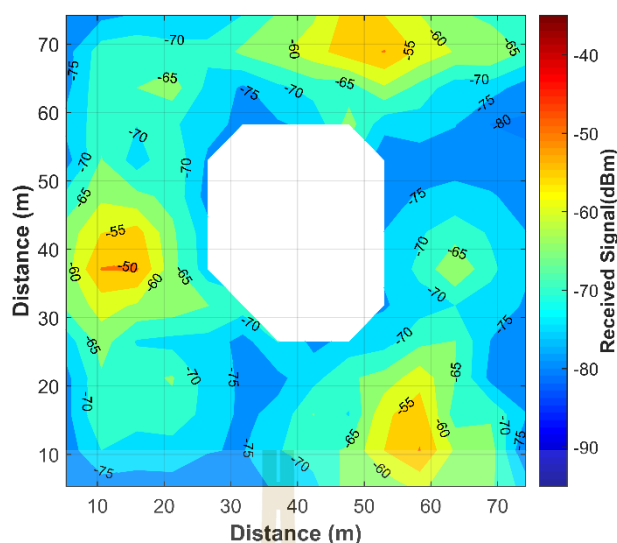
### 5.1.3.3 พื้นที่ของอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ผลการประเมินประสิทธิภาพการวางสถานีฐาน เฟมโตเซลล์ประกอบด้วย คือกราฟแสดงคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ซึ่งจะแสดงคุณภาพของความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่แต่ละจุดทดสอบสัญญาณได้รับจาก สถานีฐานเฟมโตเซลล์ในแต่ละชั้น โดยจะแสดงออกมาในเป็นของรูป contour plot โดยผลของ ตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 แสดงดังรูปที่ 5.15



ก. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 1 มทส.

ข. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 2 มทส.



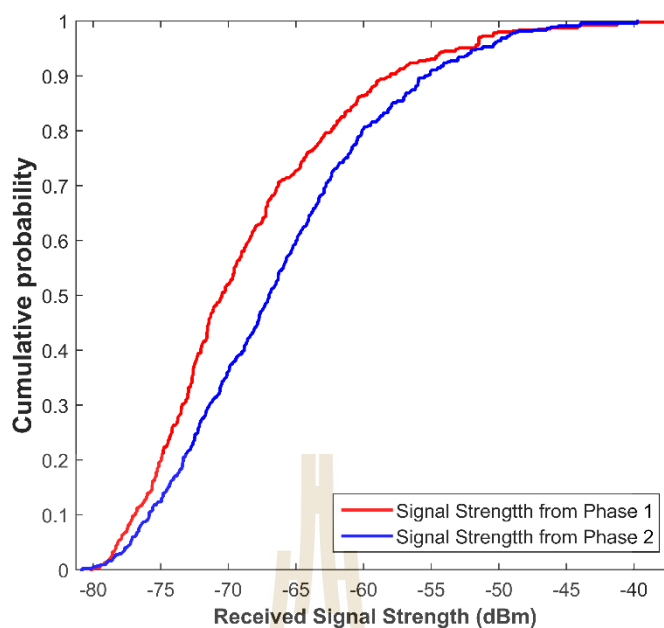
ค. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 3 มทส.

รูปที่ 5.15 กราฟแสดงคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3

จากผลของกราฟดังรูปที่ 5.15 แสดงค่าความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าในพื้นที่ให้บริการมีสัญญาณที่ครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการที่มีคุณภาพของดี โดยในชั้นที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ -61.93 dBm ชั้นที่ 2 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ -68.16 dBm และชั้นที่ 3 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ -68.96 dBm ซึ่งผ่านเกณฑ์ของความแรงสัญญาณที่ตั้ง โดยคุณภาพสัญญาณสามารถครอบคลุมได้ทั่วพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้สรุปผลคุณภาพสัญญาณของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 แสดงดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3

	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ	-61.93 dBm	-68.16 dBm	-68.96 dBm
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแรงสัญญาณ	7.17	7.11	7.27



รูปที่ 5.16 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณ  
ที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ระหว่างเฟส 1 และเฟส 2

จากกราฟเปรียบเทียบแสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ดังรูปที่ 5.16 จะสังเกตเห็นว่าความแรงสัญญาณจากเฟสที่ 2 มีคุณภาพสัญญาณที่ดีกว่า เฟสที่ 1 โดยค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณแรงที่สุดของแต่ละจุดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟส โตเซลล์ของเฟสที่ 2 มีค่า  $-66.12$  dBm ส่วนเฟสที่ 1 มีค่าเฉลี่ยที่  $-68.59$  dBm ซึ่งถ้าพิจารณาที่โอกาสความน่าจะเป็นที่ 50 เปอร์เซนต์ หมายความว่า 50 เปอร์เซนต์ ของความแรงสัญญาณในพื้นที่ให้บริการของเฟส 1 จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน  $-70$  dBm และเฟสที่ 2 จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน  $-67$  dBm ซึ่งเฟสที่ 2 มีโอกาสที่จะพบเจอคุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่าเฟสที่ 1 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งวางสถานีฐานเฟส โตเซลล์ของเฟสที่ 2 เป็นตำแหน่งที่ดีกว่าเฟสที่ 1 และมีคุณภาพสัญญาณสามารถครอบคลุมได้ทั่วพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100 เปอร์เซนต์ โดยสรุปประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 แสดงดังตารางที่ 5.11



ตารางที่ 5.11 สรุปผลประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3

ประสิทธิภาพ	ค่า
จำนวนสถานีฐาน	11 สถานีฐาน
พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ	100 %
ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับ	-66.12 dBm
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับ	7.85

## 5.2 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นด้วยเทคนิคที่เราได้นำเสนอกับเทคนิคแบบ Coverage Based Design

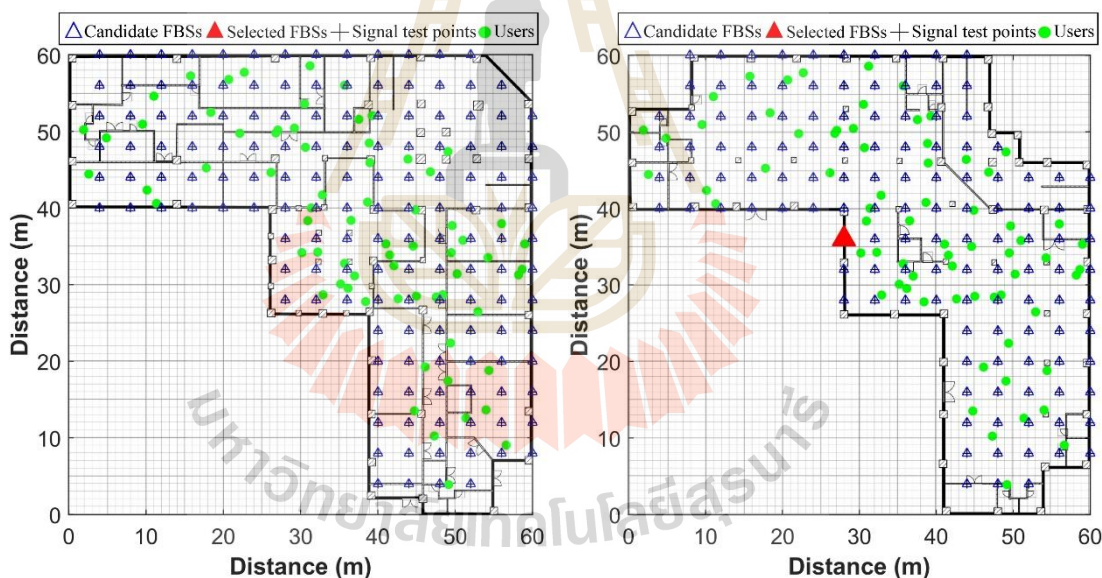
สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นจากเทคนิคที่ได้นำเสนอ ซึ่งได้เปรียบเทียบการวางตำแหน่งสถานีฐานที่เป็นแนวคิดจากงานวิจัย Wechtaisong, C. and Prommak, C. (2010). และ Aomumpai, S. and Prommak, C. (2012) ที่ใช้วิธีการออกแบบการวางตำแหน่งสถานีฐานให้มีสัญญาณครอบคลุมในบริเวณพื้นที่ให้บริการ (Coverage Based Design : CBD) เปรียบเทียบกับการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้นำเสนอขึ้นในงานวิจัยนี้

### 5.2.1 ออกแบบการทดลอง

การทดลองในหัวข้อนี้ เราได้ทำการออกแบบการทดลองในพื้นที่ของอาคารบรรณสารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ได้กำหนดให้เป็นพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2) และในพื้นที่ของอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ได้กำหนดให้เป็นพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3) โดยใช้แนวคิดของวิธีการ Coverage Based Design : CBD ที่ใช้สมมติศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นในการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในพื้นที่บริการ ที่มีเงื่อนไขคุณภาพความแรงสัญญาณต้องครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ โดยคุณภาพความแรงสัญญาณจากจุดทดสอบสัญญาณต้องได้รับสัญญาณจากสถานีฐานมากกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองของพื้นที่ให้บริการทั้งสองแบบ จะเหมือนกับในหัวข้อที่ 5.1.1.2 และ 5.1.1.3 ตามลำดับ

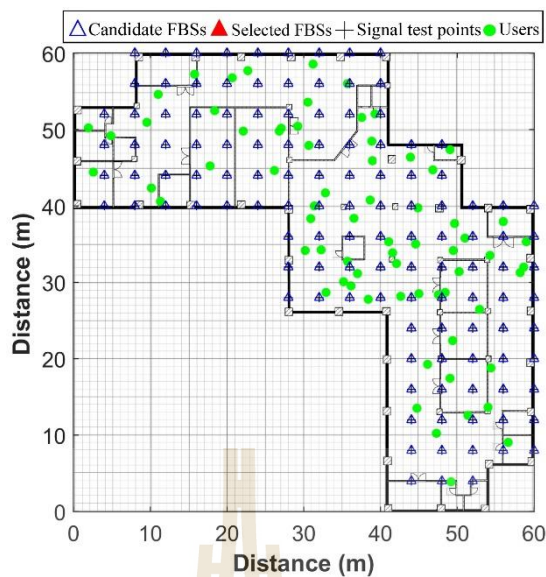
### 5.2.2 ผลการทดลอง

ในการหาคำตอบสมการคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์โดยใช้เทคนิค CBD เราได้ใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Version 12.4 โดยใช้คอมพิวเตอร์รุ่น Intel® Core™ i5-6600 ความเร็วซีพียู 3.30 GHz หน่วยความจำ 16 GB 64 บิต ในการประมวลผลหาคำตอบของตำแหน่งวางสถานีเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด โดยมีสมการวัตถุประสงค์เพื่อหาคำตอบของจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้ติดตั้งภายในพื้นที่ให้บริการให้น้อยที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองคำตอบของพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ต้องใช้สถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 1 สถานีฐาน โดยติดตั้งภายในชั้นที่ 2 ส่วนพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ต้องใช้สถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 2 สถานีฐาน โดยติดตั้งชั้นละหนึ่งสถานีฐานภายในชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ซึ่งผลการทดลองของพื้นที่ให้บริการทั้ง 2 แบบ แสดงได้ดังรูปที่ 5.17 และ 5.18 ตามลำดับ



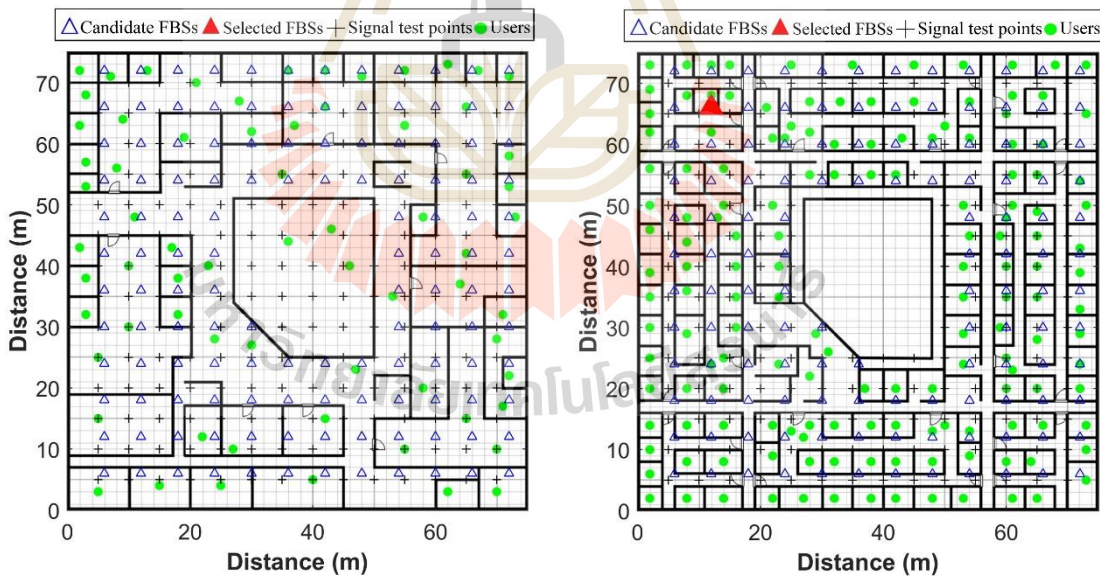
ก. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 1 มทส.

ข. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 2 มทส.



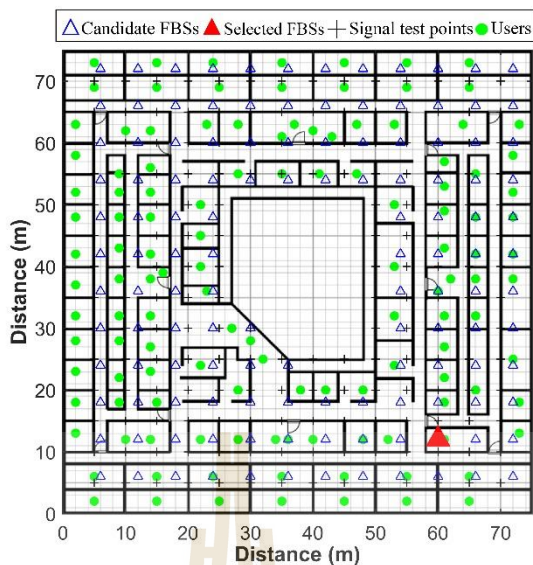
ค. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 3 มทส.

รูปที่ 5.17 ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเพิ่มโดเซลล์ล์ของเทคนิค CBD ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2



ก. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 1 มทส.

ข. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 2 มทส.



ค. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 3 มทส.

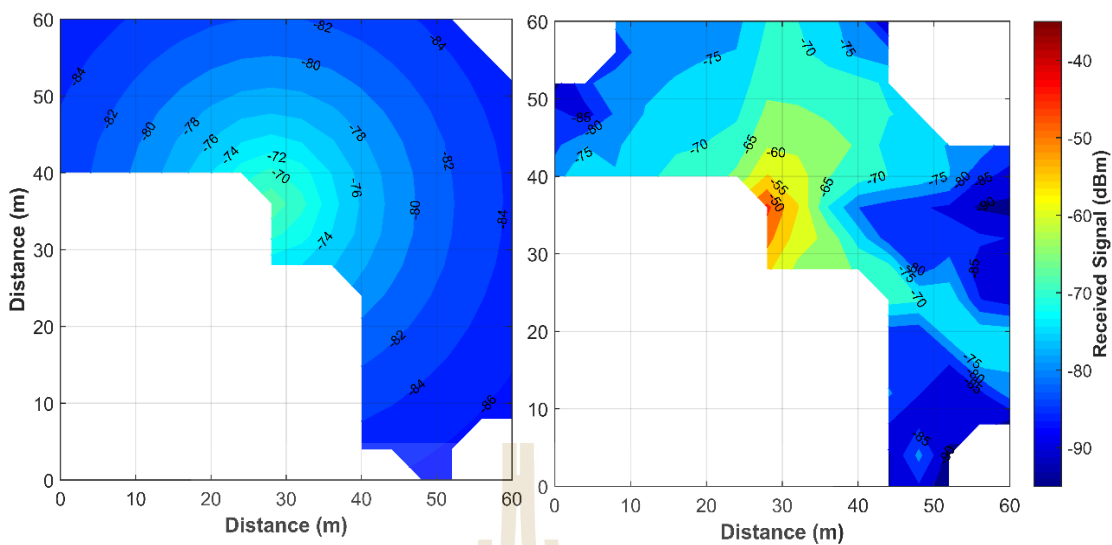
รูปที่ 5.18 ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ของเทคนิค CBD ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3

### 5.2.3 การเปรียบเทียบและการวิเคราะห์ผล

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพผลของคำตอบที่ได้จากการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟม โดเซลล์ใช้เทคนิค CBD และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลของคำตอบที่ได้กับเทคนิคที่ได้นำเสนอขึ้นตามหัวข้อที่ 5.3.1.2 และ 5.3.1.3 ของพื้นที่ให้บริการทั้ง 2 แบบ โดยผลที่ได้นำเสนอประกอบไปด้วย 1. กราฟแสดงคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ 2. กราฟแสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการในแต่ละเทคนิค 3. กราฟแสดงจำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งในแต่ละเทคนิค 4. กราฟแสดงจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้ในแต่ละเทคนิค

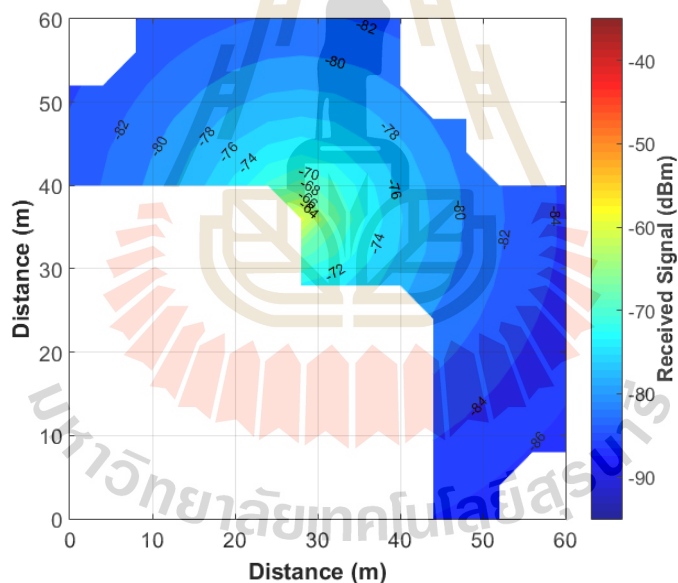
#### 5.2.3.1 พื้นที่ของอาคารบรรณสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จากการหาตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟม โดเซลล์ด้วยเทคนิค CBD ดังรูปที่ 5.19 แสดงกราฟคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ โดยแสดงให้เห็นถึงคุณภาพความแรงของสัญญาณที่สถานีฐานเฟม โดเซลล์ส่งสัญญาณไปยังจุดทดสอบสัญญาณทั่วพื้นที่ให้บริการ



ก. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 1 มทส.

ข. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 2 มทส.



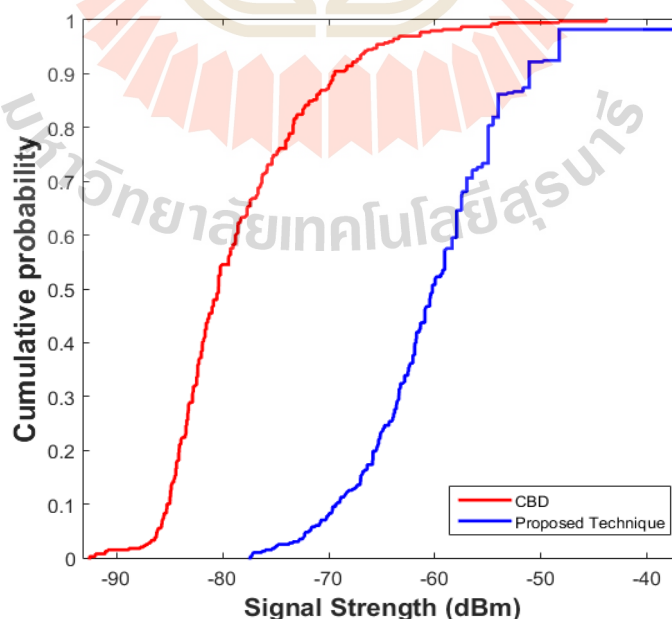
ค. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 3 มทส.

รูปที่ 5.19 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิค CBD

ตารางที่ 5.12 เปรียบเทียบคุณภาพความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิคที่ได้นำเสนอและเทคนิค CBD

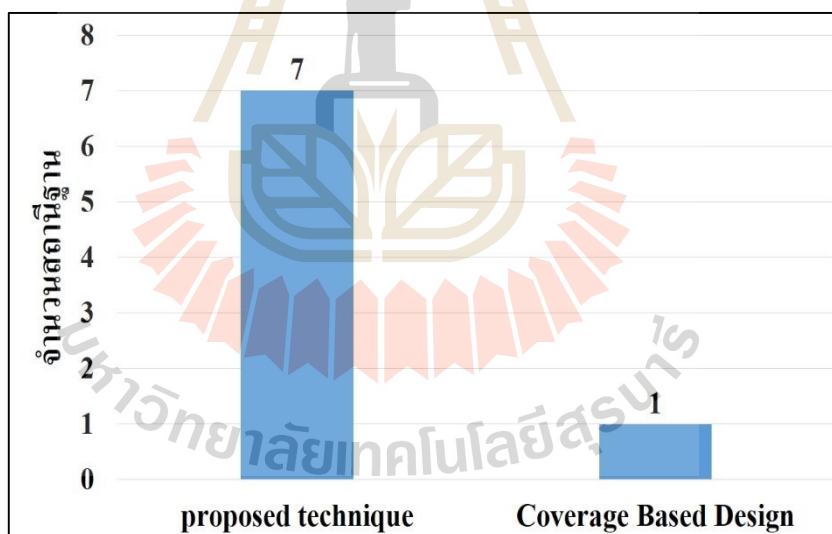
เทคนิค	ประสิทธิภาพ	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
CBD	ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ	-80.81dBm	-74.62 dBm	-79.92 dBm
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแรงสัญญาณ	4.05	9.42	4.77
Proposed Technique	ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ	-59.40 dBm	-59.01 dBm	-61.70 dBm
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแรงสัญญาณ	6.86	6.55	7.72

จากรูปที่ 5.19 แสดงค่าความแรงสัญญาณจุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าในพื้นที่ให้บริการ คุณภาพของสัญญาณดีที่สุดอยู่ในชั้นที่ 2 เพราะเป็นชั้นที่ติดตั้งสถานีฐานอยู่ ทำให้ค่าความแรงสัญญาณ โดยเฉลี่ยมีค่าดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ -74.62 dBm และจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณของเทคนิคที่ได้นำเสนอมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิค CBD ในทุกๆชั้น ซึ่งได้สรุปผลเปรียบเทียบคุณภาพความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิคที่ได้นำเสนอและเทคนิค CBD แสดงดังตารางที่ 5.12



รูปที่ 5.20 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD

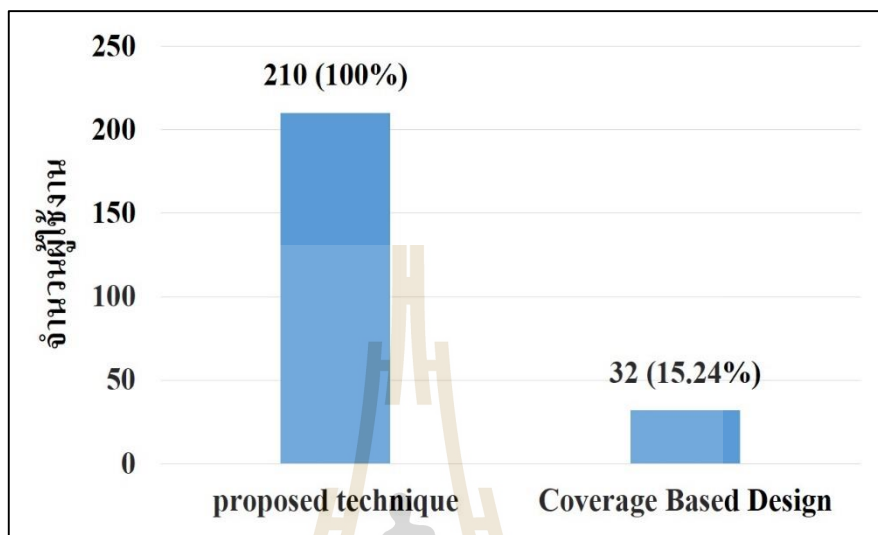
รูปที่ 5.20 แสดงกราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการทั้ง 2 เทคนิค จะสังเกตเห็นว่าความแรงสัญญาณของเทคนิคที่ได้แนะนำเสนอ มีคุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิค CBD โดยค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณแรงที่สุดของแต่ละจุดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟม โดเซลล์ของเทคนิคที่ได้แนะนำเสนอ มีค่า -59.98 dBm ส่วนเทคนิค CBD มีค่าเฉลี่ยที่ -78.55 dBm ซึ่งถ้าพิจารณาที่โอกาสความน่าจะเป็นที่ 10 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ของความแรงสัญญาณในพื้นที่ให้บริการของเทคนิค CBD จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน -85 dBm และเทคนิคที่ได้แนะนำเสนอจะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน -69 dBm ซึ่งเทคนิคที่แนะนำมีโอกาสที่จะพบเจอคุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิค CBD และพบว่าคุณภาพความแรงสัญญาณของทั้งสองเทคนิคนี้ผ่านเกณฑ์ของความแรงสัญญาณที่ตั้งไว้ ซึ่งสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ถึงแม้ว่าทั้งสองเทคนิคคุณภาพสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมด แต่เทคนิคที่แนะนำสามารถให้คุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่าดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตำแหน่งวางสถานีฐานเฟม โดเซลล์ของเทคนิคที่ได้แนะนำเสนอ เป็นตำแหน่งที่ดีกว่าเทคนิค CBD



รูปที่ 5.21 จำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิคที่แนะนำและเทคนิค CBD

รูปที่ 5.21 แสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งในแต่ละเทคนิค โดยเทคนิคที่ได้แนะนำต้องใช้สถานีฐานเฟม โดเซลล์จำนวน 7 สถานีฐาน ส่วนเทคนิค CBD ใช้สถานีฐานเฟม โดเซลล์จำนวน 1 สถานีฐาน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าถึงแม้เทคนิคที่ได้แนะนำจะใช้

จำนวนสถานีฐานเฟมโทเซลล์ติดตั้งในเครือข่ายมากกว่า แต่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด ตรงข้ามกับเทคนิค CBD ถึงแม้จะใช้จำนวนสถานีฐานน้อยกว่าแต่ไม่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด



รูปที่ 5.22 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD

รูปที่ 5.22 แสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้ในแต่ละเทคนิค ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเทคนิคที่ได้นำเสนอสามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมดคิดเป็น 100% ส่วนเทคนิค CBD สามารถรองรับผู้ใช้งานได้เพียง 15.24% โดยที่เป็นเช่นนี้เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านความจุของสถานีฐานที่รองรับผู้ใช้งานได้เพียงเท่านั้น ซึ่งสรุปผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอกับเทคนิค CBD กรณีพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 แสดงดังตารางที่ 5.13

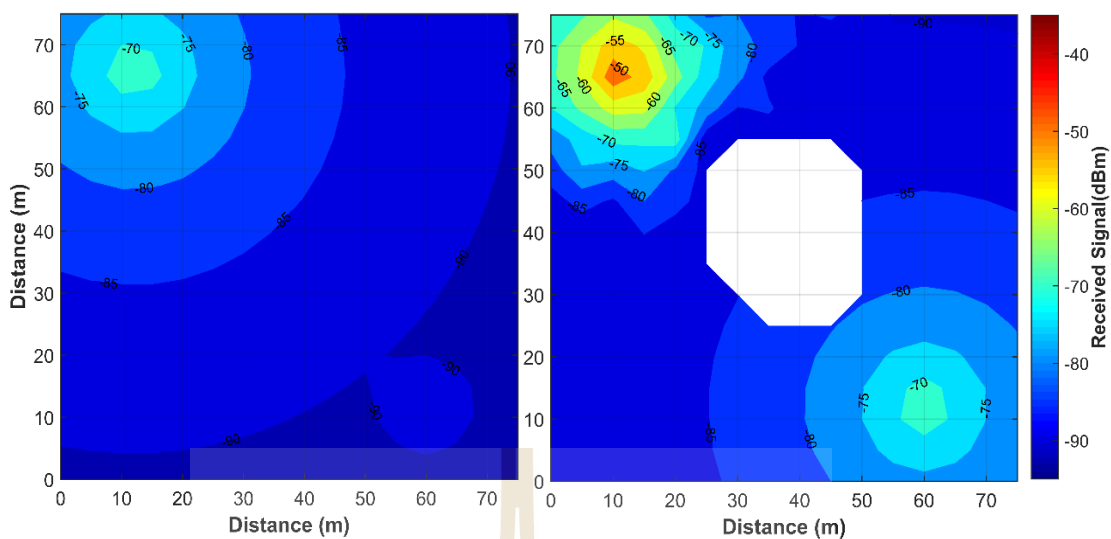


ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD กรณีพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

ประสิทธิภาพ	Proposed Technique	Coverage Based Design (CBD)
จำนวนสถานีฐาน	7	1
พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ	100 %	100 %
จำนวนผู้ใช้งานที่รองรับได้	210 คน (100 %)	32 คน (15.24 %)
ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับ	-59.98 dBm	-78.55 dBm
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับ	7.12	6.99

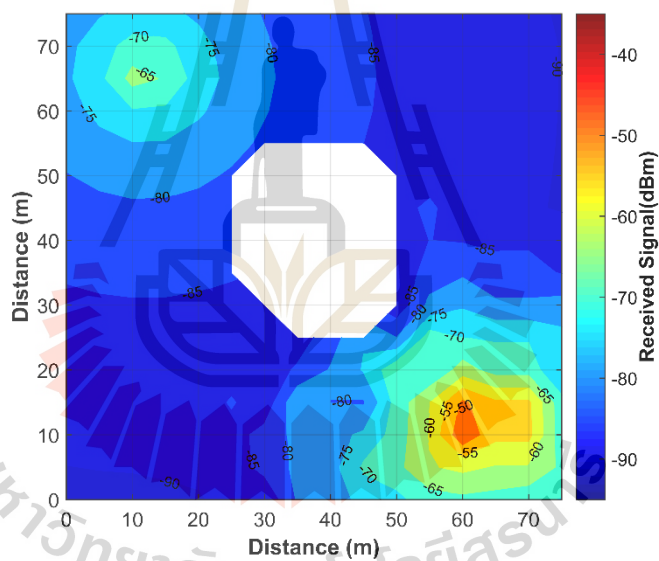
### 5.2.3.2 พื้นที่ของอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากรูปที่ 5.23 แสดงค่าความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าในพื้นที่ให้บริการ คุณภาพของสัญญาณดีที่สุดอยู่ในชั้นที่ 3 โดยมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ -83.81 dBm รองลงมาคือชั้นที่ 2 (-84.68 dBm) และชั้นที่ 1 (-85.86 dBm) ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์ของความแรงสัญญาณที่ตั้งไว้ทั้งหมด และจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณของเทคนิคที่ได้นำเสนอมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิค CBD ในทุกๆชั้น ซึ่งได้สรุปผลเปรียบเทียบคุณภาพความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิคที่ได้นำเสนอและเทคนิค CBD แสดงดังตารางที่ 5.14



ก. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 1 มทส.

ข. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 2 มทส.



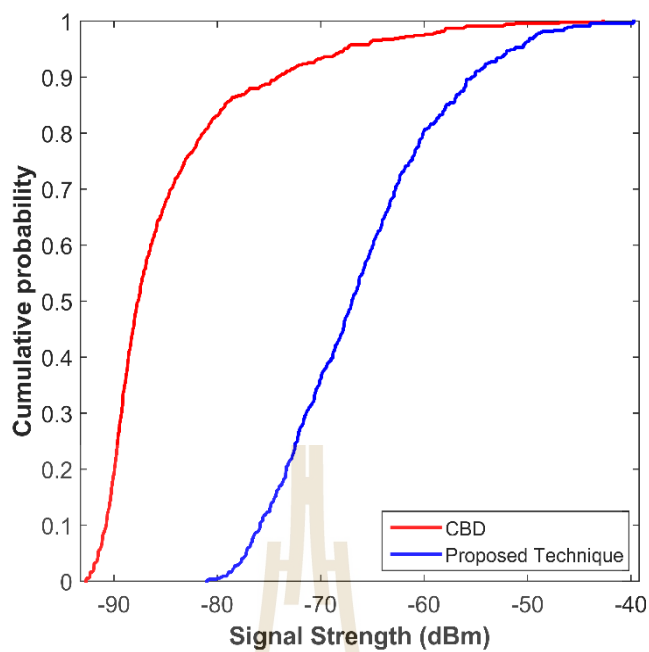
ค. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 3 มทส.

รูปที่ 5.23 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิค CBD

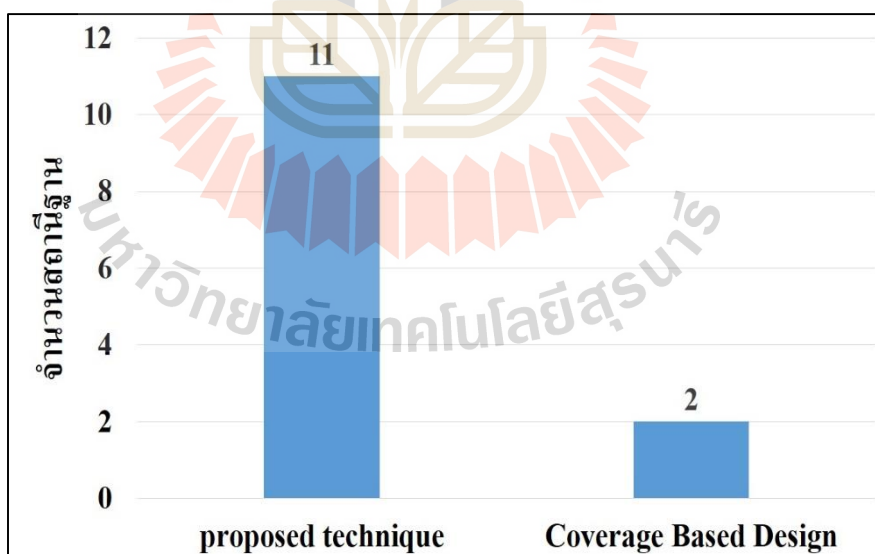
ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบคุณภาพความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิคที่ได้นำเสนอและเทคนิค CBD

เทคนิค	ประสิทธิภาพ	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
CBD	ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ	-85.86 dBm	-84.68 dBm	-83.81 dBm
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแรงสัญญาณ	5.17	8.65	9.20
Proposed Technique	ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ	-61.93 dBm	-68.16 dBm	-68.96 dBm
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแรงสัญญาณ	7.17	7.11	7.27

รูปที่ 5.24 แสดงกราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการสำหรับ 2 เทคนิค จะสังเกตเห็นว่าความแรงสัญญาณของเทคนิคที่ได้นำเสนอ มีคุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิค CBD เนื่องจากมีตำแหน่งวางสถานีฐานที่เหมาะสมกว่า โดยค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณแรงที่สุดของแต่ละจุดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟสโตเซลล์ของเทคนิคที่เราได้นำเสนอ มีค่า -66.12 dBm ส่วนเทคนิค CBD มีค่าเฉลี่ยที่ -82.62 dBm ซึ่งถ้าพิจารณาที่โอกาสความน่าจะเป็นที่ 30 เปอร์เซนต์ หมายความว่า 30 เปอร์เซนต์ ของความแรงสัญญาณในพื้นที่ให้บริการของเทคนิค CBD จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน -89 dBm และเทคนิคที่ได้นำเสนอจะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน -71 dBm ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอมีโอกาสที่จะพบเจอคุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิค CBD และพบว่าคุณภาพความแรงสัญญาณของทั้งสองเทคนิคนี้ผ่านเกณฑ์ของความแรงสัญญาณที่ตั้งไว้ ซึ่งสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100 เปอร์เซนต์ แต่ถึงแม้ว่าทั้งสองเทคนิคคุณภาพสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมด แต่เทคนิคที่นำเสนอสามารถให้คุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตำแหน่งวางสถานีฐานเฟสโตเซลล์ของเทคนิคที่ได้นำเสนอ เป็นตำแหน่งที่ดีกว่าเทคนิค CBD

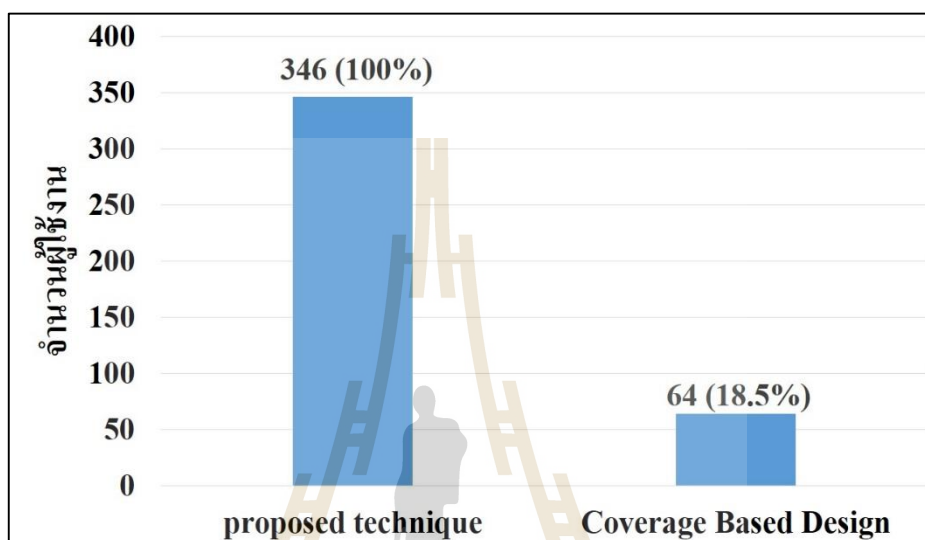


รูปที่ 5.24 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 สำหรับเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD



รูปที่ 5.25 จำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD

รูปที่ 5.25 แสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งในแต่ละเทคนิค โดยเทคนิคที่นำเสนอต้องใช้สถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 11 สถานีฐาน ส่วนเทคนิค CBD ใช้สถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 2 สถานีฐาน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าถึงแม้เทคนิค CBD จะใช้จำนวนสถานีฐานน้อยกว่าเทคนิคที่ได้นำเสนอ แต่ก็ไม่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด



รูปที่ 5.26 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD

รูปที่ 5.26 แสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้ในแต่ละเทคนิค โดยจะสังเกตได้ว่าเทคนิคที่เรานำเสนอสามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด 100 เปอร์เซนต์ ส่วนเทคนิค CBD สามารถรองรับผู้ใช้งานได้เพียง 18.5 เปอร์เซนต์ เนื่องจากข้อจำกัดด้านความจุของสถานีฐานที่รองรับผู้ใช้งานได้เพียงเท่านั้น ซึ่งสรุปผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอเทียบกับเทคนิค CBD กรณีพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 แสดงดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค CBD กรณีพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3

ประสิทธิภาพ	Proposed Technique	Coverage Based Design (CBD)
จำนวนสถานีฐาน	11	2
พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ	100 %	100 %
จำนวนผู้ใช้งานที่รองรับได้	346 คน (100 %)	64 คน (18.50 %)
ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับ	-66.12 dBm	-82.62 dBm
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับ	7.85	7.92

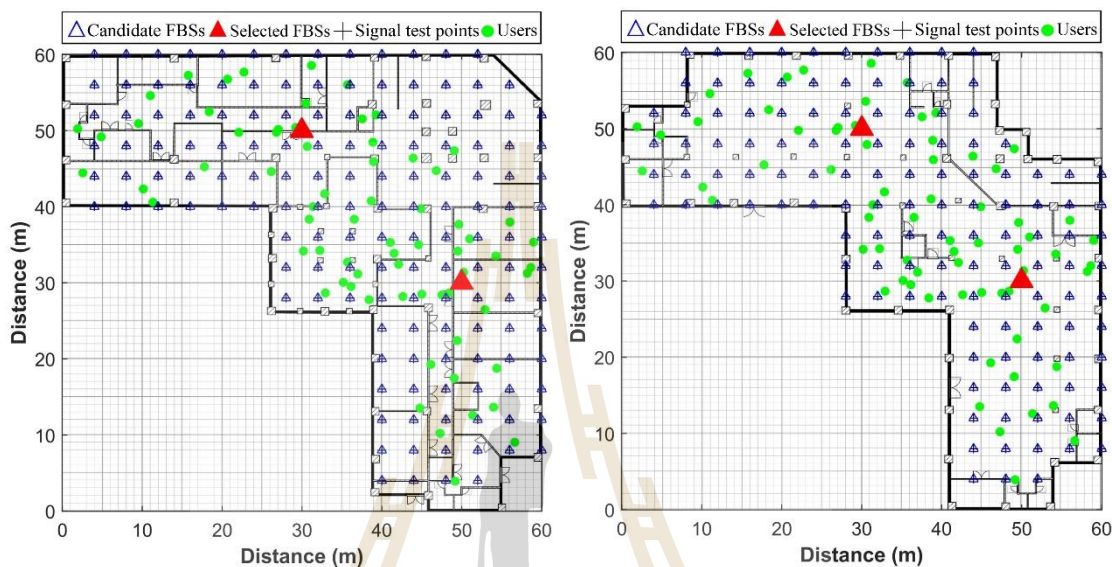
### 5.3 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นด้วยเทคนิคที่เราได้นำเสนอเทียบกับเทคนิคแบบ **Uniform Distribution Placement**

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นจากเทคนิคที่ได้นำเสนอ ซึ่งได้เปรียบเทียบการวางตำแหน่งสถานีฐานที่เป็นแนวคิดจากงานวิจัย Maneerat, K. and Prommak, C. (2016) ที่ใช้วิธีการเลือกวางสถานีฐานแบบสม่ำเสมอในบริเวณของพื้นที่อาคาร (Uniform Distribution Placement : UDP) เปรียบเทียบกับการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้นำเสนอขึ้นในงานวิจัยนี้

#### 5.3.1 ออกแบบการทดลอง

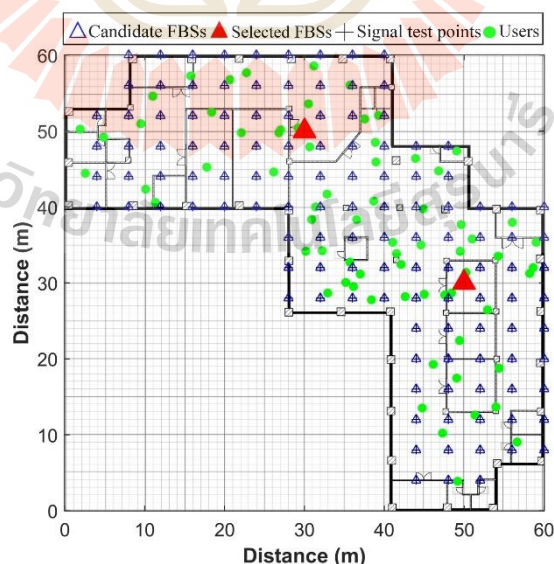
การทดลองในหัวข้อนี้ เราได้ทำการออกแบบการทดลองในพื้นที่ของอาคารบรรณสารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ได้กำหนดให้เป็นพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2) และในพื้นที่ของอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ได้กำหนดให้เป็นพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3) โดยใช้แนวคิดของวิธีการ Uniform Distribution Placement : UDP คือทำการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยระยะห่างที่สม่ำเสมอ กำหนดให้พื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 วางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ทั้งหมด

6 สถานีฐาน โดยแต่ละชั้นวาง 2 สถานีฐาน ด้วยระยะห่างที่สม่ำเสมอ กัน แสดงดังรูป 5.27 และพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 วางสถานีฐานเพิ่มโตเซลล์ทั้งหมด 12 สถานีฐาน โดยแต่ละชั้นวาง 4 สถานีฐาน ด้วยระยะห่างที่สม่ำเสมอ กัน แสดงดังรูป 5.28 โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองของพื้นที่ให้บริการทั้งสองแบบ จะเหมือนกับในหัวข้อที่ 5.1.1.2 และ 5.1.1.3 ตามลำดับ



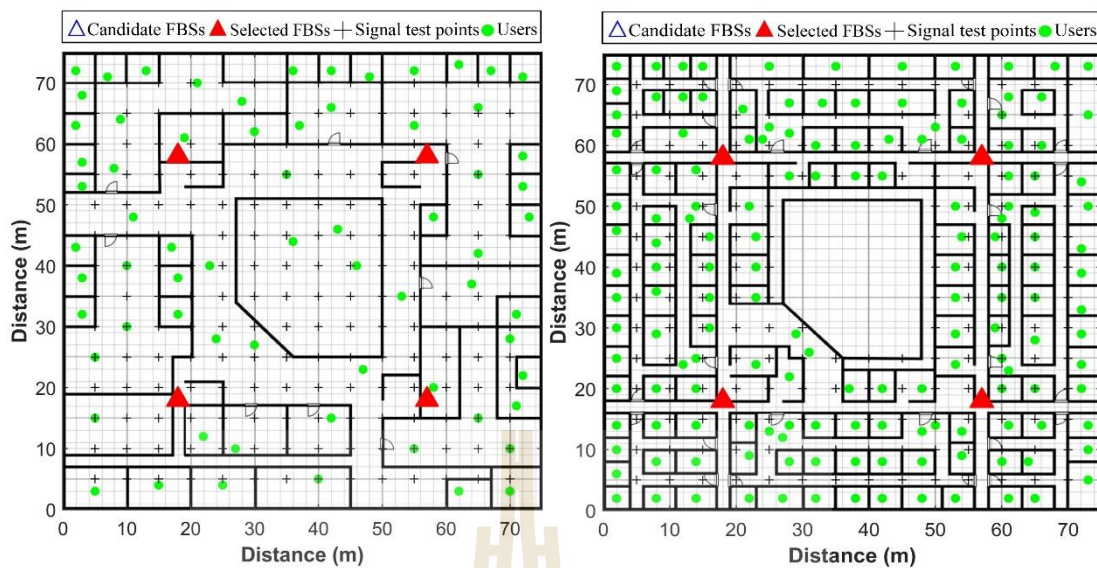
ก. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 1 มทส.

ข. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 2 มทส.



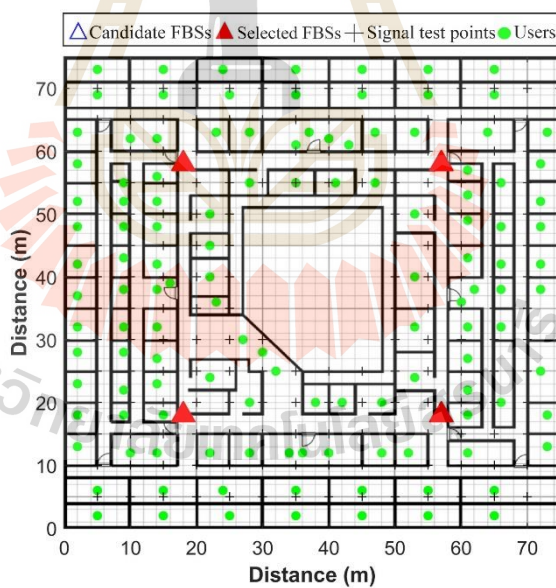
ค. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 3 มทส.

รูปที่ 5.27 ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเพิ่มโตเซลล์ของเทคนิค UDP ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2



ก. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 1 มทส.

ข. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 2 มทส.



ค. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 3 มทส.

รูปที่ 5.28 ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเพิ่มโตเซลล์ของเทคนิค UDP ในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3

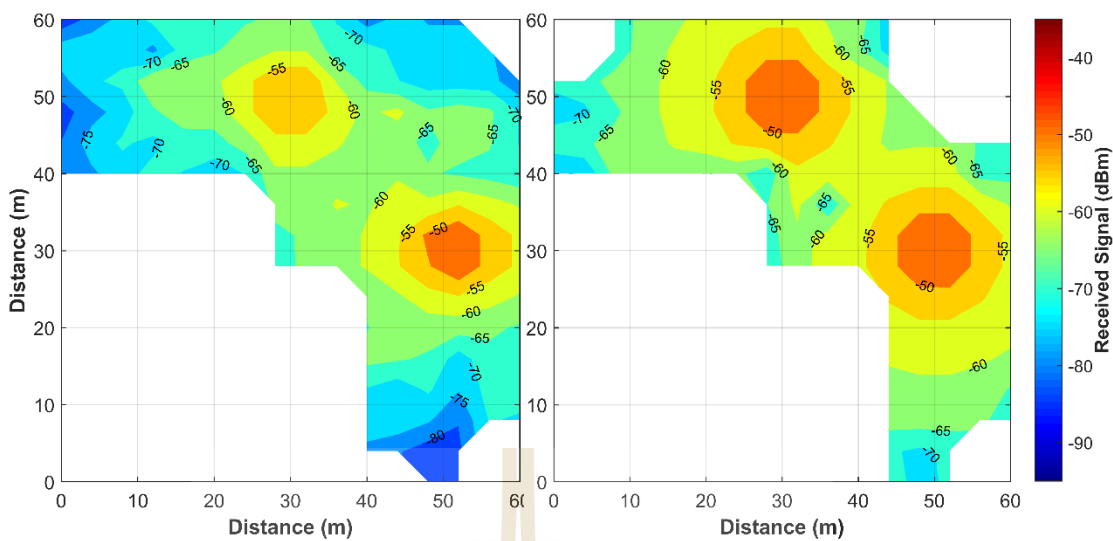


### 5.3.2 การเปรียบเทียบและการวิเคราะห์ผล

ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพผลของการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยใช้เทคนิค Uniform Distribution Placement และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลของคำตอบที่ได้กับเทคนิคที่ได้นำเสนอตามหัวข้อที่ 5.3.1.2 และ 5.3.1.3 ของพื้นที่ให้บริการทั้ง 2 แบบ โดยผลที่ได้นำเสนอประกอบไปด้วย 1. กราฟแสดงคุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ 2. กราฟแสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการในแต่ละเทคนิค 3. กราฟแสดงจำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งในแต่ละเทคนิค 4. กราฟแสดงจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้ในแต่ละเทคนิค

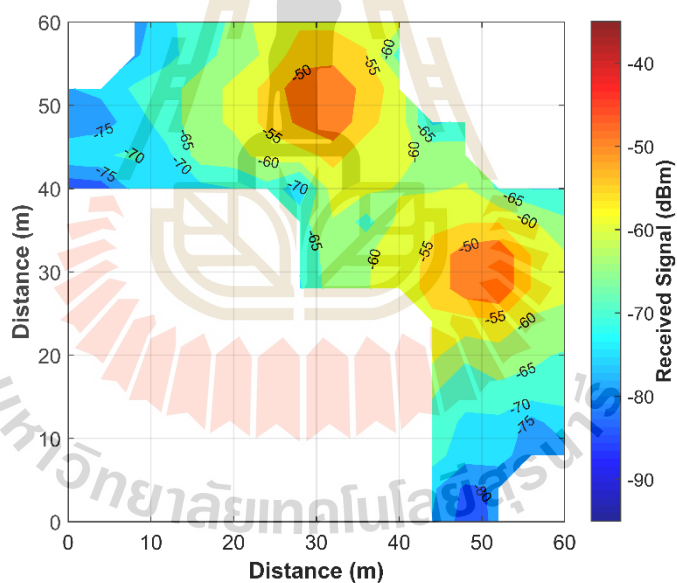
#### 5.3.2.1 พื้นที่ของอาคารบรรณสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 5.29 แสดงค่าความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าในพื้นที่ให้บริการ คุณภาพของสัญญาณดีที่สุดในชั้นที่ 2 โดยมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ  $-59.13$  dBm รองลงมาคือชั้นที่ 3 ( $-62.93$  dBm) และชั้นที่ 1 ( $-65.25$  dBm) ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์ของความแรงสัญญาณที่ตั้งไว้ทั้งหมด และเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณของเทคนิคที่ได้นำเสนอมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิค UDP ในทุกๆ ชั้น แต่ภายในชั้นที่ 2 และ 3 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากทั้งสองเทคนิคติดตั้งจำนวน 2 สถานีฐานภายในชั้นดังกล่าวและมีตำแหน่งติดตั้งที่ใกล้เคียงกัน แต่โดยรวมแล้วตำแหน่งติดตั้งของเทคนิคที่นำเสนอให้ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่ดีกว่า ซึ่งได้สรุปผลเปรียบเทียบคุณภาพความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิคที่ได้นำเสนอและเทคนิค UDP แสดงดังตารางที่ 5.16



ก. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 1 มทส.

ข. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 2 มทส.



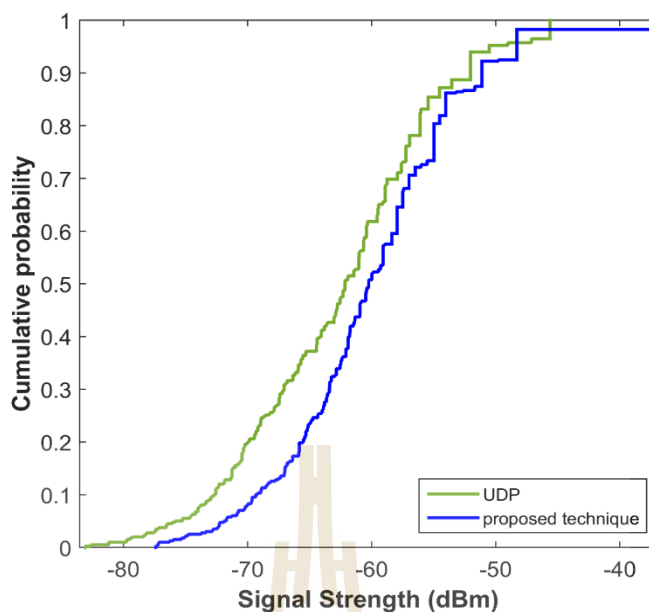
ค. พื้นที่อาคารบรรณสารชั้นที่ 3 มทส.

รูปที่ 5.29 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิค UDP

ตารางที่ 5.16 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ด้วยเทคนิค UDP

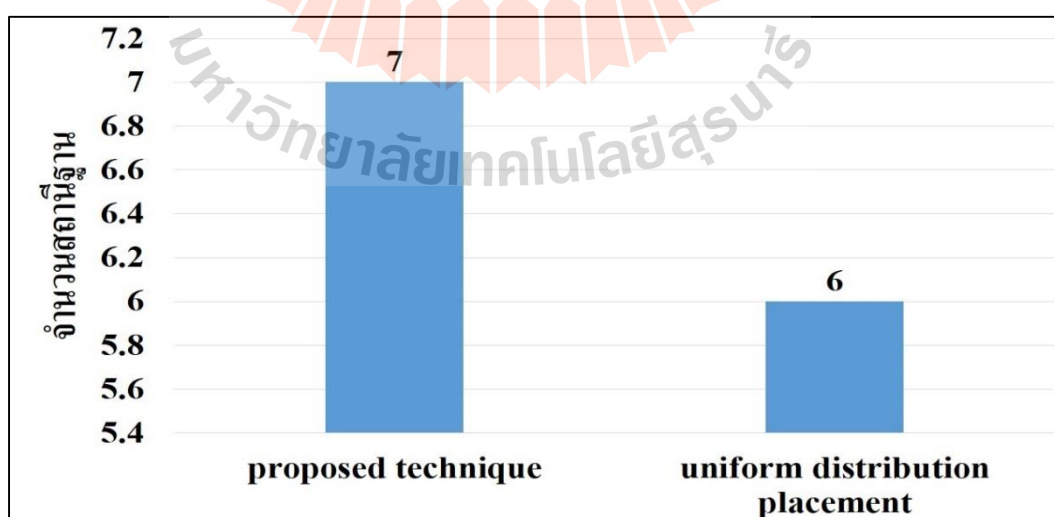
เทคนิค	ประสิทธิภาพ	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
UDP	ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ	-65.25 dBm	-59.13 dBm	-62.93 dBm
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแรงสัญญาณ	7.43	6.38	8.37
Proposed Technique	ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ	-59.40 dBm	-59.01 dBm	-61.70 dBm
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแรงสัญญาณ	6.86	6.55	7.72

รูปที่ 5.30 แสดงกราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการสำหรับ 2 เทคนิค จะสังเกตเห็นว่าความแรงสัญญาณของเทคนิคที่เราได้นำเสนอมีคุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิค UDP เนื่องจากมีตำแหน่งวางสถานีฐานที่เหมาะสมกว่า โดยค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณแรงที่สุดของแต่ละจุดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟสโตะเซลล์ของเทคนิคที่ได้นำเสนอ มีค่า -59.98 dBm ส่วนเทคนิค UDP มีค่าเฉลี่ยที่ -62.57 dBm ซึ่งถ้าพิจารณาที่โอกาสความน่าจะเป็นที่ 20 เปอร์เซนต์ หมายความว่า 20 เปอร์เซนต์ ของความแรงสัญญาณในพื้นที่ให้บริการของเทคนิค UDP จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน -70 dBm และเทคนิคที่ได้นำเสนอ จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน -66 dBm ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอมีโอกาสที่จะพบเจอคุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิค UDP และพบว่าคุณภาพความแรงสัญญาณของทั้งสองเทคนิคนี้ผ่านเกณฑ์ของความแรงสัญญาณที่ตั้งไว้ ซึ่งสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100 เปอร์เซนต์ แต่ถึงแม้ว่าทั้งสองเทคนิคคุณภาพสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมด แต่เทคนิคที่นำเสนอสามารถให้คุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตะเซลล์ของเทคนิคที่ได้นำเสนอ เป็นตำแหน่งที่ดีกว่าเทคนิค UDP



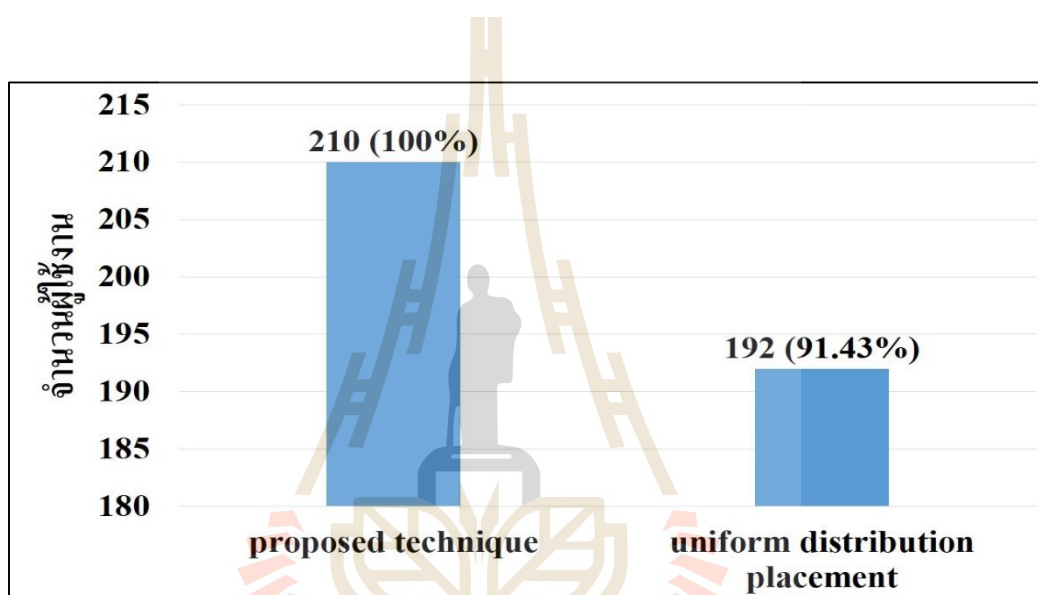
รูปที่ 5.30 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 สำหรับเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP

รูปที่ 5.31 แสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งในแต่ละเทคนิค โดยเทคนิคที่ได้นำเสนอใช้สถานีฐานเพิ่มโหนดจำนวน 7 สถานีฐาน ส่วนเทคนิค UDP ใช้สถานีฐานเพิ่มโหนดจำนวน 6 สถานีฐาน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าถึงแม้เทคนิค UDP จะใช้จำนวนสถานีฐานน้อยกว่าเทคนิคที่ได้นำเสนอ แต่ก็ไม่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด



รูปที่ 5.31 จำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP

จากรูปที่ 5.32 แสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้ในแต่ละเทคนิค โดยจะสังเกตได้ว่าเทคนิคที่นำเสนอสามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเทคนิค UDP สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ 91.43 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากข้อจำกัดด้านความจุของสถานีฐานที่รองรับผู้ใช้งานได้เพียงเท่านั้น และไม่สามารถรับสัญญาณจากสถานีฐานอื่นได้เช่นกัน เพราะสถานีฐานที่เหลือก็รองรับผู้ใช้งานเต็มความจุแล้ว โดยสรุปผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอเทียบกับเทคนิค UDP กรณีพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 แสดงดังตารางที่ 5.17



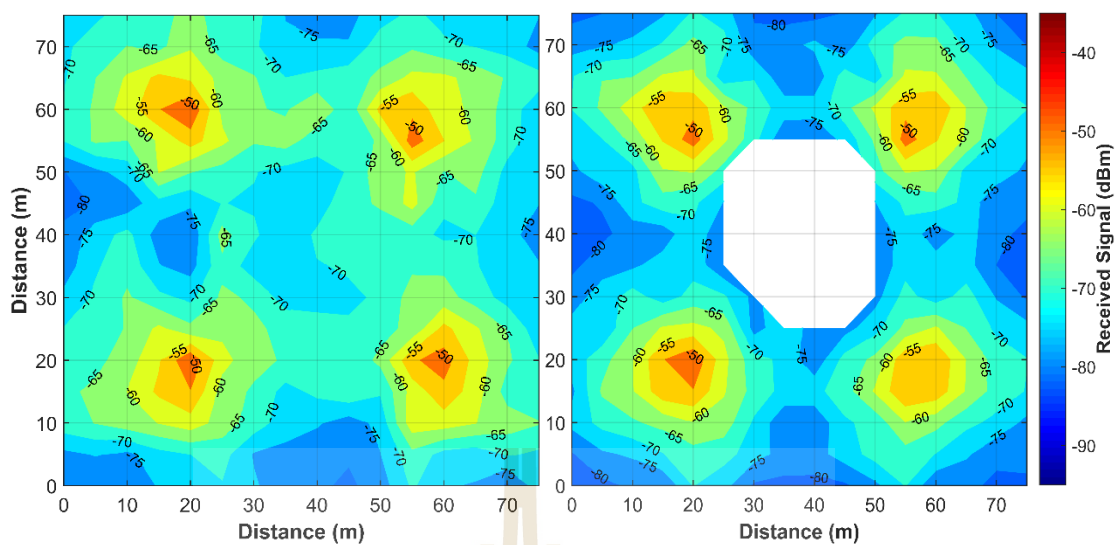
รูปที่ 5.32 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP

ตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP กรณีพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2

ประสิทธิภาพ	Proposed Technique	Uniform Distribution Placement (UDP)
จำนวนสถานีฐาน	7	6
พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ	100 %	100 %
จำนวนผู้ใช้งานที่รองรับได้	210 คน (100 %)	192 คน (91.43 %)
ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับ	-59.98 dBm	-62.57 dBm
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับ	7.12	7.83

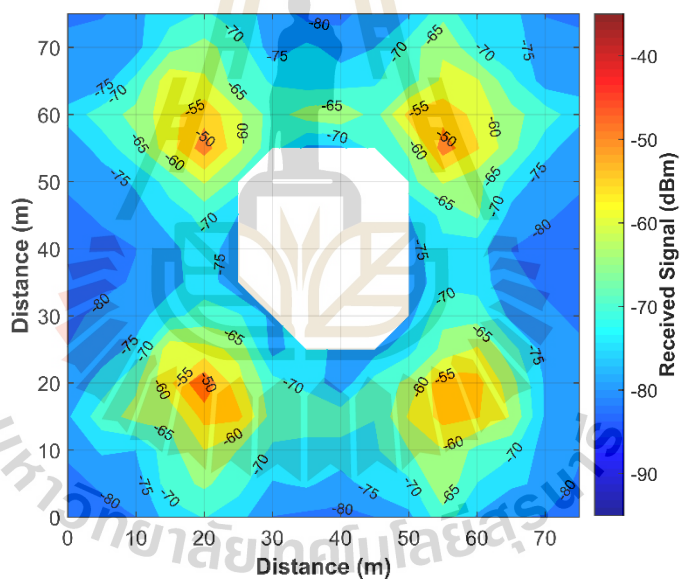
### 5.3.2.2 พื้นที่ของอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 5.33 แสดงค่าความแรงสัญญาณแรงที่สุดที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าในพื้นที่ให้บริการ คุณภาพของสัญญาณดีที่สุดในชั้นที่ 1 โดยมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ -65.92 dBm รองลงมาคือชั้นที่ 2 (-67.89 dBm) และชั้นที่ 3 (-68.85 dBm) ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์ของความแรงสัญญาณที่ตั้งไว้ทั้งหมด และจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณของเทคนิคที่ได้นำเสนอมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณใกล้เคียงกับเทคนิค UDP โดยเฉพาะในชั้นที่ 3 เทคนิค UDP มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิคที่ได้นำเสนอ เนื่องจากมีการติดตั้งจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่มากกว่า แต่ในชั้นที่ 1 เทคนิคที่ได้นำเสนอให้ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิค UDP เนื่องจากติดตั้งจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์มากกว่า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าจำนวนสถานีฐานยิ่งเยอะ ก็ย่อมจะส่งผลดีต่อคุณภาพของสัญญาณ แต่ถ้าติดตั้งมากเกินไปก็จะเกินความจำเป็นและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการวางแผนการติดตั้งจำนวนและตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้เหมาะสมที่สุด โดยได้สรุปผลเปรียบเทียบคุณภาพความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิคที่ได้นำเสนอและเทคนิค UDP แสดงดังตารางที่ 5.18



ก. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 1 มทส.

ข. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 2 มทส.



ค. พื้นที่อาคารวิชาการ 1 ชั้นที่ 3 มทส.

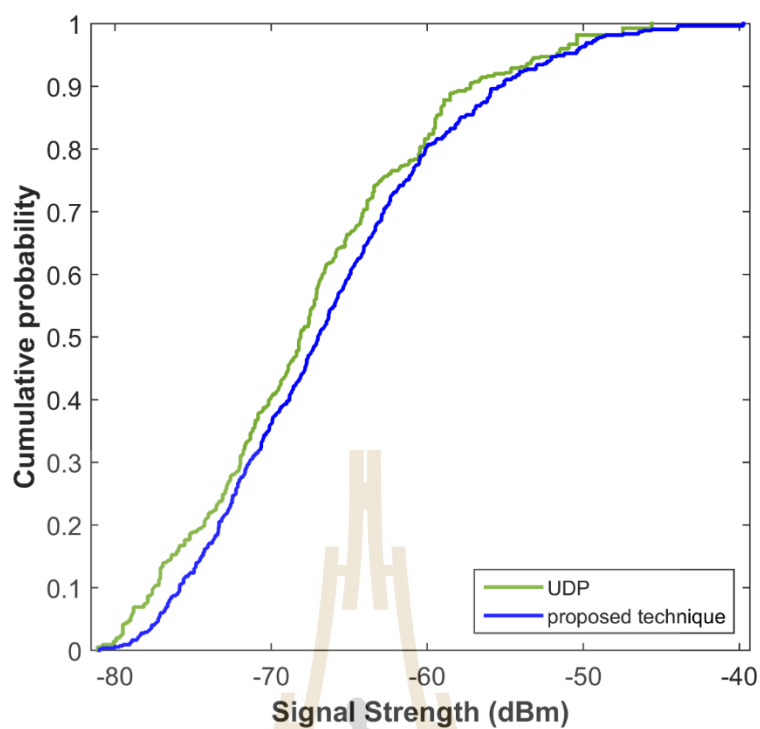
รูปที่ 5.33 คุณภาพความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิค UDP

ตารางที่ 5.18 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ด้วยเทคนิค UDP

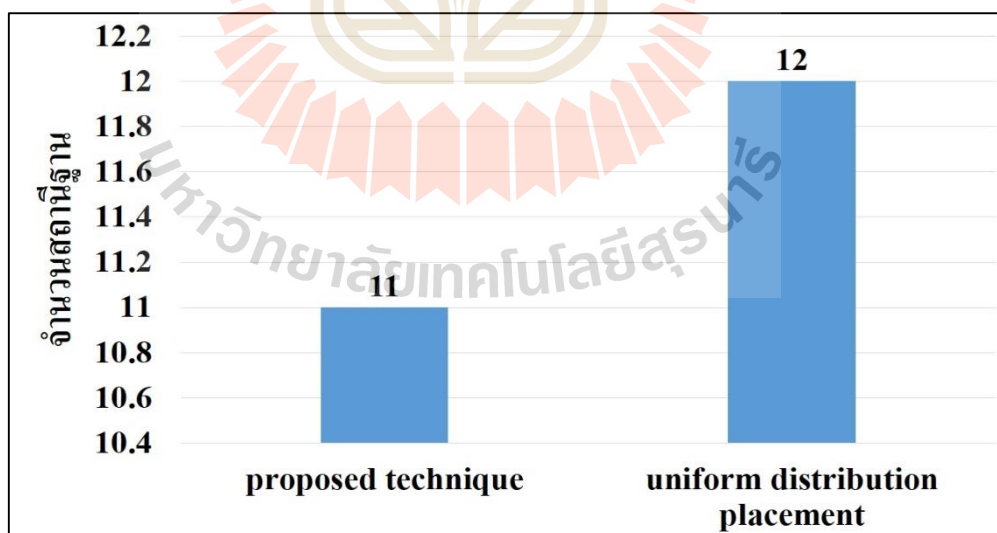
เทคนิค	ประสิทธิภาพ	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
UDP	ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ	-65.92 dBm	-67.89 dBm	-68.85 dBm
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแรงสัญญาณ	6.83	8.18	8.15
Proposed Technique	ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณ	-61.93 dBm	-68.16 dBm	-68.96 dBm
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความแรงสัญญาณ	7.17	7.11	7.27

รูปที่ 5.34 แสดงกราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการสำหรับ 2 เทคนิค จะสังเกตเห็นว่าความแรงสัญญาณของเทคนิคที่ได้นำเสนอ มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากจำนวนสถานีฐานที่ใช้ติดตั้งในเครือข่ายมีจำนวนที่ใกล้เคียงกัน แต่เทคนิคที่ได้นำเสนอจะมีคุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิค UDP เนื่องจากเป็นตำแหน่งวางสถานีฐานที่เหมาะสมกว่า โดยค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณแรงที่สุดของแต่ละจุดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเพิ่ม โดเซลล์ของเทคนิคที่ได้นำเสนอ มีค่า -66.12 dBm ส่วนเทคนิค UDP มีค่าเฉลี่ยที่ -67.50 dBm ซึ่งถ้าพิจารณาที่โอกาสความน่าจะเป็นที่ 60 เปอร์เซนต์ หมายความว่า 60 เปอร์เซนต์ ของความแรงสัญญาณในพื้นที่ให้บริการของเทคนิค UDP จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน -67 dBm และเทคนิคที่ได้นำเสนอจะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน -65 dBm ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอมีโอกาสที่จะพบเจอคุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่าเทคนิค UDP และพบว่าคุณภาพความแรงสัญญาณของทั้งสองเทคนิคนี้ผ่านเกณฑ์ของความแรงสัญญาณที่ตั้งไว้ ซึ่งสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100 เปอร์เซนต์ แต่ถึงแม้ว่าทั้งสองเทคนิคคุณภาพสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมด แต่เทคนิคที่นำเสนอสามารถให้คุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่าดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตำแหน่งวางสถานีฐานเพิ่ม โดเซลล์ของเทคนิคที่ได้นำเสนอ เป็นตำแหน่งที่ดีกว่าเทคนิค UDP



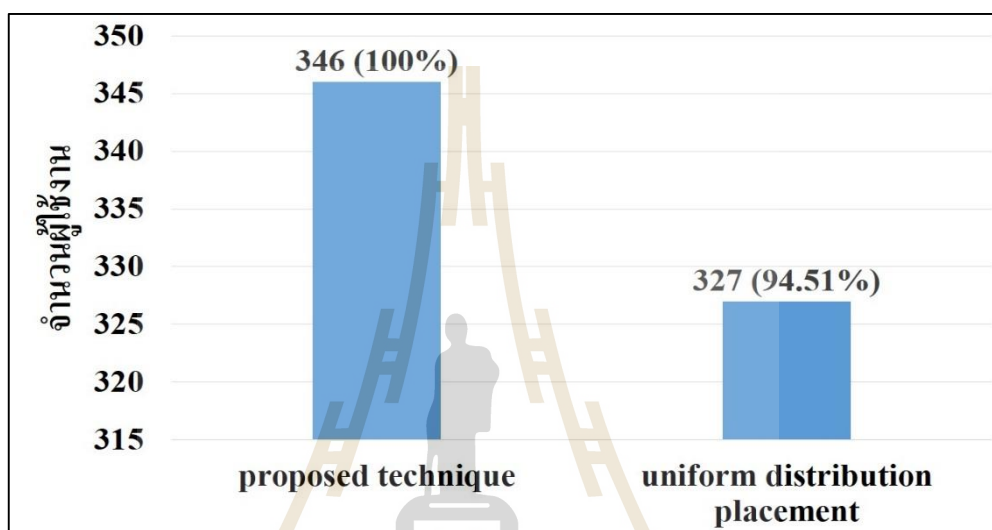


รูปที่ 5.34 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของแรงส่งสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 สำหรับเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP



รูปที่ 5.35 จำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งสำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP

รูปที่ 5.35 แสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งในแต่ละเทคนิค โดยเทคนิคที่ได้นำเสนอใช้สถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 11 สถานีฐาน ส่วนเทคนิค UDP ใช้สถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 12 สถานีฐาน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าถึงแม้เทคนิค UDP จะใช้จำนวนสถานีฐานที่มากกว่าเทคนิคที่ได้นำเสนอแต่ก็ไม่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด เพราะตำแหน่งที่วางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ยังไม่เหมาะสม



รูปที่ 5.36 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 ของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP

รูปที่ 5.36 แสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้ในแต่ละเทคนิค โดยจะสังเกตได้ว่าถึงแม้เทคนิค UDP จะใช้จำนวนสถานีฐานที่มากกว่าเทคนิคที่ได้นำเสนอ แต่ก็ไม่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด ซึ่งตรงข้ามกับเทคนิคที่ได้นำเสนอที่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเทคนิค UDP สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ 94.51 เปอร์เซ็นต์ เนื่องด้วยตำแหน่งที่วางสถานีฐานเฟมโตเซลล์นั้นยังไม่ใช่ตำแหน่งที่เหมาะสม ทำให้ยังมีผู้ใช้งานในบางตำแหน่งเป็นมุมอับสัญญาณ ซึ่งไม่สามารถรับสัญญาณจากสถานีฐานใดได้เลย โดยได้สรุปผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่ได้นำเสนอเทียบกับเทคนิค UDP กรณีพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 แสดงดังตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.19 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิค UDP กรณีพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3

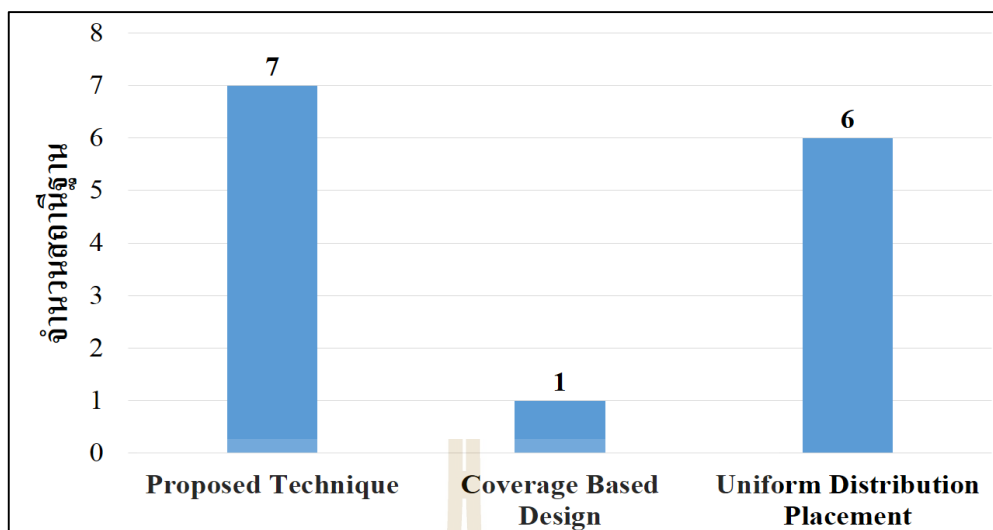
ประสิทธิภาพ	Proposed Technique	Uniform Distribution Placement (UDP)
จำนวนสถานีฐาน	11	12
พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ	100 %	100 %
จำนวนผู้ใช้งานที่รองรับได้	346 คน (100 %)	327 คน (94.51 %)
ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับ	-66.12 dBm	-67.50 dBm
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับ	7.85	7.80

#### 5.4 สรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นทั้งสามเทคนิค

สำหรับในหัวข้อนี้จะทำการสรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารจากทั้งสามเทคนิคที่ได้นำเสนอในหัวข้อก่อนหน้านี้ ในพื้นที่ให้บริการทั้งสองแบบที่ได้ทดลอง เพื่อให้เข้าใจและมองภาพรวมได้ง่ายขึ้น โดยแสดงผลออกเป็นหัวข้อต่างๆดังนี้

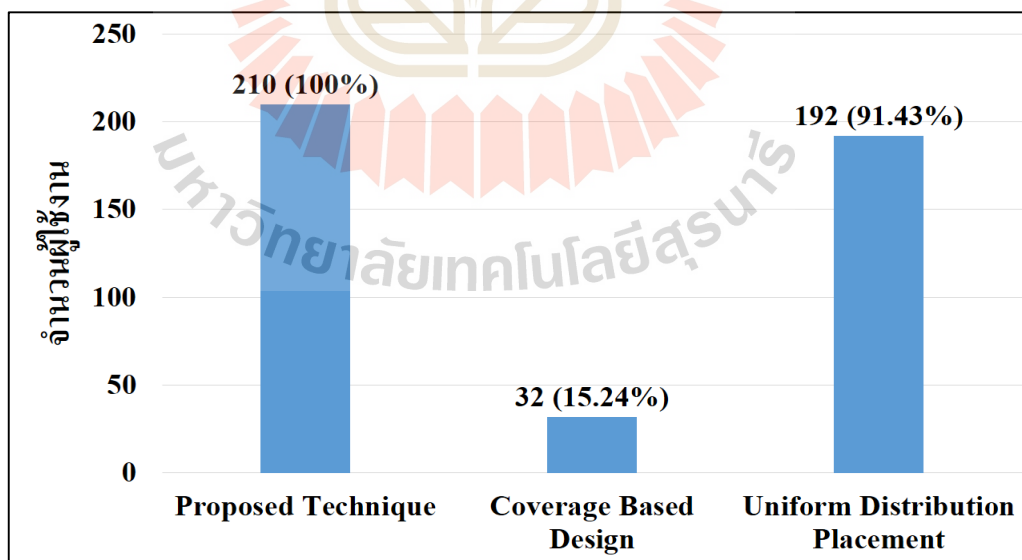
##### 5.4.1 สรุปผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคต่างๆ กรณีอาคารบรรณสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 5.37 แสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งทั้งสามเทคนิค โดยเทคนิคที่ติดตั้งจำนวนสถานีเฟมโตเซลล์น้อยที่สุดคือเทคนิค CBD รองลงมาคือเทคนิค UDP ที่ใช้จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ 1 สถานีฐาน และ 6 สถานีฐานตามลำดับ ส่วนเทคนิคที่ได้นำเสนอใช้จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 7 สถานีฐาน ซึ่งสามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมดในพื้นที่ให้บริการ ส่วนเทคนิคอื่นๆไม่สามารถรองรับผู้ให้บริการได้ทั้งหมด



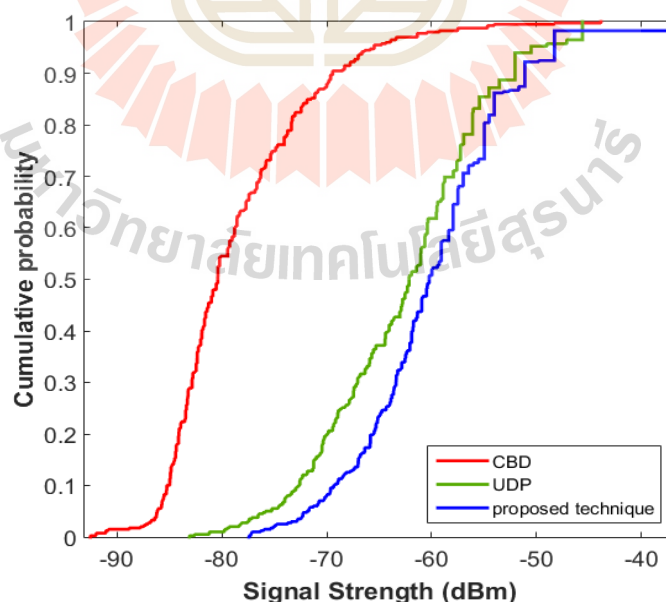
รูปที่ 5.37 จำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งสำหรับ 3 เทคนิค ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการที่ 2

รูปที่ 5.38 แสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้ในแต่ละเทคนิค โดยจะสังเกตได้ว่าเทคนิคที่นำเสนอสามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเทคนิคอื่นๆไม่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด เนื่องจากข้อจำกัดด้านความจุของสถานีฐานที่รองรับผู้ใช้งานได้เพียงเท่านั้น



รูปที่ 5.38 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้สำหรับ 3 เทคนิค ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการที่ 2

รูปที่ 5.39 แสดงกราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการสำหรับ 3 เทคนิคในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 2 จะสังเกตเห็นว่าความแรงสัญญาณของเทคนิคที่เรานำเสนอมีค่าความแรงสัญญาณที่ใกล้เคียงกับเทคนิค UDP เนื่องจากมีจำนวนสถานีฐานที่ติดตั้งในเครือข่ายที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาภาพรวมทั้ง 3 เทคนิคแล้ว ปรากฏว่าเทคนิคที่ได้ นำเสนอมีคุณภาพของสัญญาณที่ดีที่สุด โดยค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณแรงที่สุดของแต่ละจุดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ที่  $-59.98$  dBm ส่วนเทคนิค CBD และ UDP มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่  $-78.55$  dBm และ  $-62.57$  dBm ตามลำดับ ซึ่งถ้าพิจารณาที่โอกาสความน่าจะเป็นที่ 30% หมายความว่า 30% ของความแรงสัญญาณในพื้นที่ให้บริการของเทคนิค CBD และ UDP จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน  $-83$  dBm และ  $-68$  dBm ตามลำดับ ส่วนเทคนิคที่ได้ นำเสนอจะมีความแรงสัญญาณถึง  $-64$  dBm ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอมีโอกาสที่จะพบเจอคุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่าทั้งสองเทคนิคที่กล่าวมา และพบว่าคุณภาพความแรงสัญญาณของทั้งสามเทคนิคนี้ผ่านเกณฑ์ของความแรงสัญญาณที่ตั้งไว้ ซึ่งสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100% แต่ถึงแม้ว่าทั้งสามเทคนิคคุณภาพสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมด แต่เทคนิคที่นำเสนอสสามารถให้คุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของเทคนิคที่ได้ นำเสนอ เป็นตำแหน่งที่ดีกว่าเทคนิค CBD และเทคนิค UDP ซึ่งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคต่างๆ กรณีอาคารบรรณสาร มทส. จำนวน 3 ชั้น แสดงดังตารางที่ 5.20



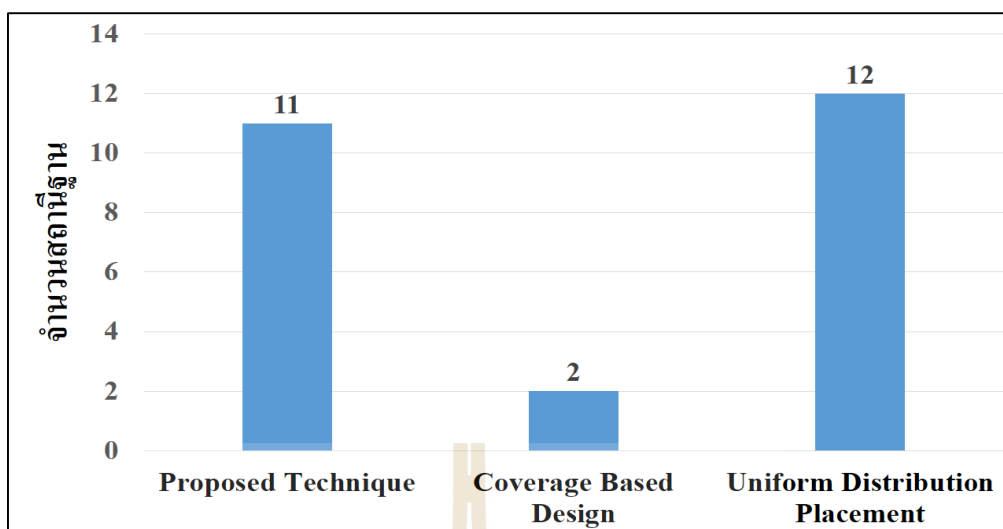
รูปที่ 5.39 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการสำหรับ 3 เทคนิค กรณีพื้นที่ให้บริการที่ 2

ตารางที่ 5.20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคต่างๆ กรณีอาคารบรรณสาร มทส.

ประสิทธิภาพ	Proposed Technique	Coverage Based Design (CBD)	Uniform Distribution Placement (UDP)
จำนวนสถานีฐาน	7	1	6
พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ	100 %	100 %	100 %
จำนวนผู้ใช้งานที่รองรับได้	210 คน (100 %)	32 คน (15.24 %)	192 คน (91.43 %)
ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับ	-59.98 dBm	-78.55 dBm	-62.57 dBm
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณจุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับ	7.12	6.99	7.83

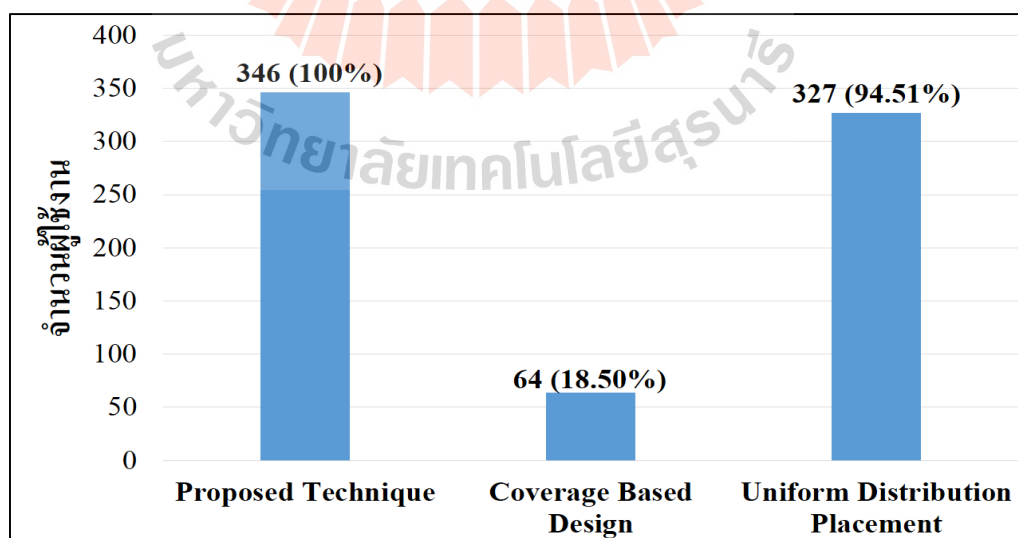
#### 5.4.2 สรุปผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคต่างๆ กรณี อาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 5.40 แสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งทั้งสามเทคนิค โดยเทคนิคที่ติดตั้งจำนวนสถานีเฟมโตเซลล์น้อยที่สุดคือเทคนิค CBD รองลงมาคือเทคนิคที่ได้นำเสนอที่ใช้จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ 2 สถานีฐาน และ 11 สถานีฐาน ตามลำดับ ส่วนเทคนิคที่ใช้จำนวนสถานีฐานมากที่สุดคือเทคนิค UDP ใช้จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์จำนวน 12 สถานีฐาน ซึ่งพบว่าเทคนิคที่เรานำเสนอสามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมดในพื้นที่ให้บริการ ส่วนเทคนิคอื่นๆ ไม่สามารถรองรับผู้ให้บริการได้ทั้งหมด

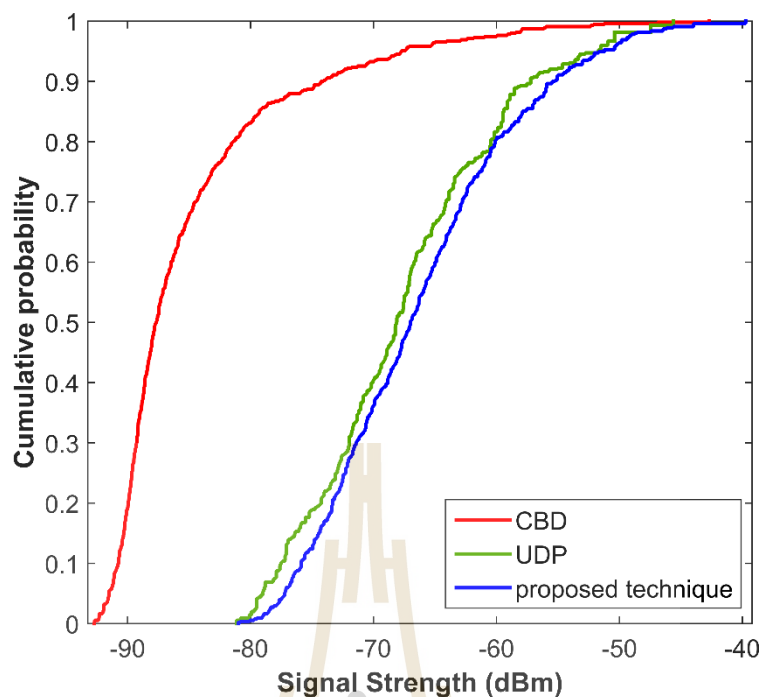


รูปที่ 5.40 จำนวนสถานีฐานที่ถูกติดตั้งสำหรับ 3 เทคนิค ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการที่ 3

รูปที่ 5.41 แสดงกราฟเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้ในแต่ละเทคนิค โดยพบว่าเทคนิคที่นำเสนอสามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเทคนิคอื่นๆไม่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้ทั้งหมด เนื่องจากข้อจำกัดด้านความจุของสถานีฐานที่รองรับผู้ใช้งานได้เพียงเท่านั้น และไม่สามารถรับสัญญาณจากสถานีฐานอื่นได้เพราะสถานีฐานที่เหลือก็รองรับผู้ใช้งานเต็มความจุแล้ว รวมถึงตำแหน่งวางสถานีฐานยังไม่เหมาะสม ทำให้มีผู้ใช้งานบางคนไม่สามารถรับสัญญาณจากสถานีฐานใดๆได้เลย



รูปที่ 5.41 จำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้สำหรับ 3 เทคนิค ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการที่ 3



รูปที่ 5.42 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ สำหรับ 3 เทคนิค ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการที่ 3

จากรูปที่ 5.42 แสดงกราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการสำหรับ 3 เทคนิคในพื้นที่ให้บริการแบบที่ 3 จะสังเกตได้ว่าถ้าพื้นที่ให้บริการมีการใช้จำนวนสถานีฐานที่ใกล้เคียงกัน ค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณก็มีแนวโน้มที่ค่าจะใกล้เคียงกัน เหมือนดังเทคนิคที่ได้นำเสนอและเทคนิค UDP ซึ่งเทคนิคได้นำเสนอให้คุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟส โดเซลล์ที่  $-66.12$  dBm ส่วนเทคนิค CBD และ UDP มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่รับได้ ที่  $-82.62$  dBm และ  $-67.50$  dBm ตามลำดับ ซึ่งถ้าพิจารณาที่โอกาสความน่าจะเป็นที่ 60 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ของความแรงสัญญาณในพื้นที่ให้บริการของเทคนิค CBD และ UDP จะมีความแรงสัญญาณไม่เกิน  $-86$  dBm และ  $-67$  dBm ตามลำดับ ส่วนเทคนิคที่ได้นำเสนอจะมีความแรงสัญญาณถึง  $-64$  dBm ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอมีโอกาสที่จะพบเจอคุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่าทั้งสองเทคนิคที่กล่าวมา และพบว่าคุณภาพความแรงสัญญาณของทั้งสามเทคนิคนี้ผ่านเกณฑ์ของความแรงสัญญาณที่ตั้งไว้ ซึ่งสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ถึงแม้ว่าทั้งสามเทคนิคคุณภาพสัญญาณสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมด แต่เทคนิคที่นำเสนอสามารถให้คุณภาพความแรงสัญญาณที่ดีกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตำแหน่งวางสถานีฐานเพิ่ม โดเซลล์ของเทคนิคที่ได้



นำเสนอ เป็นตำแหน่งที่ดีกว่าเทคนิค CBD และเทคนิค UDB ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคต่างๆ กรณีอาคารวิชาการ 1 มทส. จำนวน 3 ชั้น ดังตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.21 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคต่างๆ กรณีอาคารวิชาการ 1 มทส.

ประสิทธิภาพ	Proposed Technique	Coverage Based Design (CBD)	Uniform Distribution Placement (UDP)
จำนวนสถานีฐาน	11	2	12
พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ	100 %	100 %	100 %
จำนวนผู้ใช้งานที่รองรับได้	346 คน (100 %)	64 คน (18.50 %)	327 คน (94.51 %)
ค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับ	-66.12 dBm	-82.62 dBm	-67.50 dBm
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับ	7.85	7.92	7.80



## บทที่ 6

### สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

เทคโนโลยี Femtocell (Femtocell Technology) ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบันและได้เข้ามามีบทบาทมากในการช่วยแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพสัญญาณภายในอาคาร เนื่องจากเป็นสถานีฐานมือถือที่มีขนาดเล็ก สามารถติดตั้งได้ง่าย มีกำลังส่งสัญญาณที่ต่ำ ทำงานในย่านความถี่ซึ่งหน่วยงานกำกับดูแลด้านกิจการโทรคมนาคมของประเทศกำหนด โดยสัญญาณจะครอบคลุมพื้นที่ได้ในบริเวณที่ไม่กว้างมาก ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของจำนวนกำแพงหรือวัตถุที่อยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับของสัญญาณ หลังจากสถานีฐาน Femtocell ได้รับสัญญาณจากตัวรับสัญญาณอินเทอร์เน็ทแล้วจึงจะทำการส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้งานต่อไป ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมติดตั้งสถานีฐาน Femtocell ภายในอาคาร สำนักงาน หรือบริเวณอับสัญญาณที่สถานีฐานภายนอกไม่สามารถส่งสัญญาณมาถึงผู้ใช้บริการภายในอาคารได้ ดังนั้นการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐาน Femtocell ภายในอาคารจึงเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาอย่างถี่ถ้วน เพราะจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพสัญญาณของผู้ใช้งานบริการภายในพื้นที่ให้บริการ

ในงานวิจัยนี้จึงเห็นความสำคัญของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ให้บริการ ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน Femtocell ที่เหมาะสมภายในอาคาร โดยพิจารณาคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ รวมถึงการรับประกันคุณภาพของสัญญาณแทรกสอดภายในพื้นที่ให้บริการ แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่พิจารณาถึงคุณภาพของอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้งานภายในพื้นที่ให้บริการ รวมถึงข้อจำกัดด้านความจุ (Capacity) ของผู้ใช้งานที่สถานีฐาน Femtocell สามารถรองรับได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน Femtocell ที่เหมาะสมสำหรับเครือข่าย 4G-LTE ภายในอาคารหลายชั้น โดยใช้เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Integer Linear Programming : BILP) เพื่อสร้างสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่าย โดยประกอบไปด้วย 2 เฟสการทำงาน คือ เฟสที่ 1 เป็นกระบวนการทำงานที่มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาจำนวนสถานีฐาน Femtocell ที่น้อยที่สุดที่เพียงพอสำหรับ

ติดตั้งในพื้นที่ของอาคาร และกระบวนในส่วนเฟสที่ 2 จะมีวัตถุประสงค์เพื่อหาตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการมากที่สุด โดยใช้จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้คำตอบจากเฟสที่ 1 มาเป็นเงื่อนไขในการกำหนดตำแหน่งการวางสถานีฐานที่ดีที่สุด นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้ทำการทดลองเพื่อสาธิตสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในพื้นที่ของอาคารรูปแบบต่างๆ ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นด้วยเทคนิคที่เราได้นำเสนอ กับเทคนิคแบบการออกแบบสถานีฐานที่คำนึงถึงสัญญาณครอบคลุม (Coverage Based Design) และเทคนิคการวางสถานีฐานแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution Placement) ซึ่งเทคนิคการกำหนดตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น สามารถสรุปถึงข้อดีได้ดังนี้

- เทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่พัฒนาขึ้นสามารถกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ทั้งอาคารชั้นเดียวและอาคารหลายชั้น รวมทั้งสามารถนำไปออกแบบวางแผนเครือข่ายในอาคารหลายชั้นที่มีโครงสร้างทางกายภาพในแต่ละชั้นที่มีลักษณะแตกต่างกันได้
- จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์และตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมกับพื้นที่ให้บริการจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับผู้ใช้บริการได้ดียิ่งขึ้น
- เทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับผู้ใช้งานสูงถึง 100 % เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการวางสถานีฐานแบบอื่นๆ เช่น เทคนิค Coverage Based Design สามารถรองรับผู้ใช้ได้ 18.50 % และเทคนิค Uniform Distribution Placement สามารถรองรับได้ 94.51 % นอกจากนี้เทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นให้ค่าเฉลี่ยของคุณภาพความแรงสัญญาณภายในพื้นที่ให้บริการที่สูงกว่าเทคนิคอื่นๆ

อย่างไรก็ตามเทคนิคที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อจำกัดในด้านการใช้โปรแกรมเชิงเส้นไบนารี (IBM ILOG CPLEX Optimization Studio) ในการหาคำตอบ ซึ่งหากมีจำนวนตัวแปรที่ส่งเข้ามาประมวลผล (Input Data) มากเกินไป โปรแกรมอาจจะใช้เวลานานในการรันผลเพื่อหาคำตอบ หรืออาจจะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ เนื่องจากความจำกัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้รัน

## 6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่าย 4G-LTE ภายในอาคารหลายชั้น นั้นจะต้องมีความรู้พื้นฐานในงานที่จะต้องศึกษา โดยต้องทราบถึง

ข้อจำกัด และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพความแรงสัญญาณภายในอาคาร จากนั้นจึงกำหนดปัญหาเป็นสมการคณิตศาสตร์ โดยเมื่อกำหนดปัญหาได้แล้วจะต้องทำการทดสอบความเป็นไปได้ของสมการที่กำหนดขึ้นในเครือข่ายที่มีขนาดเล็กก่อน เพื่อให้เห็นแนวโน้มความถูกต้องของสมการที่พัฒนาขึ้น จากนั้นจึงนำไปใช้ในเครือข่ายที่จำลองขึ้น โดยจะต้องทำการทดสอบเปรียบเทียบในหลายกรณี ที่มีเครือข่ายขนาดต่างๆ กัน เพื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในกระบวนการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมกับพื้นที่ของอาคาร โดยใช้รูปแบบการแก้ปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จึงเป็นตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้สำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio นั้น หากเครือข่ายที่พิจารณามีตัวแปรอินพุตจำนวนมากแล้ว ในบางกรณี โปรแกรมอาจไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ หรืออาจใช้เวลานานในการรันผลเพื่อหาคำตอบ ดังนั้นขนาดของเครือข่ายที่ประกอบไปด้วย จำนวนจุดทดสอบคุณภาพสัญญาณ จำนวนผู้ใช้งานภายในอาคาร และตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ จึงเป็นข้อจำกัดในงานวิจัยนี้ ซึ่งหากทดลองในเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ อาจต้องพัฒนาอัลกอริทึมอื่นๆ ในการหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อให้สามารถหาคำตอบได้ภายในระยะเวลาที่จำกัด

### 6.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพื้นที่ของอาคารที่ให้บริการ โดยได้ใช้สมการคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นไบนารีในการออกแบบปัญหาสำหรับการกำหนดตำแหน่งการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งแนวทางในการพัฒนาในอนาคตสามารถพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพความแรงสัญญาณที่รับได้ในแต่ละตำแหน่งของพื้นที่ภายในอาคาร เช่น ค่าสูญเสียของสัญญาณเมื่อผ่านวัตถุ อาจจะพิจารณาประเภทของวัตถุให้หลากหลายประเภทขึ้นนอกเหนือจากพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ในงานวิจัยนี้ใช้ทดสอบ เพื่อให้แบบจำลองนั้นเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้เงื่อนไขการกำหนดเพื่อที่จะให้ได้คำตอบของตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด อาจจะพิจารณาในส่วนอื่นๆ เพิ่มเติม เช่นผลกระทบจากสัญญาณภายในอาคารที่รั่วไหลออกไปรบกวนผู้ใช้งานที่อยู่ภายนอกอาคารหลังจากติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

- ประกอบ จิริกิติ (2535). การโปรแกรมเชิงเส้น (**Linear Programming**). โครงการส่งเสริมเอกสารวิชาการ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- สุทธิมา ชำนาญเวช (2552). การวิจัยดำเนินงาน (**Operation Research**). วิทยพัฒน์. กรุงเทพฯ ๑.
- สมาคมผู้ตรวจสอบและบริหารความปลอดภัยอาคาร (2543). กฎกระทรวง ฉบับที่ 55 (พ.ศ. 2543) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522.
- Kojima, Y., Suga, J., Kawasaki, T., Okuda, M., and Takechi, R. (2014), **LTE-WiFi Link Aggregation at Femtocell Base Station**, World Telecommunications Congress, pp. 1-6., Information Communications and Signal Processing (ICICS) 9<sup>th</sup>, pp. 1-4
- Nagashree, N., Rao, V., and Shanavas, I.H. (2013), **Femto Cells-A New Generation Cellular Stations**, Universal Journal of Communications and Network, pp. 9-15.
- Baseshankar, A., and Khapre, S. (2012), **Femtocells Technology**, National Conference on Innovative Paradigms in Engineering & Technology (NCIPET), pp. 7-11.
- Wechtaisong, C., and Prommak, C. (2010), **WiMAX Network Design and Optimization Using Multi-hop Relay Stations**, WSEAS international conference on Biomedical electronics and biomedical informatics, pp. 75-80.
- Ranaweera, C.S., Iannone, P.P., Oikonomou, K.N., Reichmann, K.C., and Sinha, R.K. (2013), **Design of Cost-Optimal Passive Optical Networks for Small Cell Backhaul Using Installed Fibers [Invited]**, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 5, pp. A230-A239.
- Sathya, V., Ramamurthy, A., and Tamma, B.R. (2014), **On Placement and Dynamic Power Control of Femtocells in LTE HetNets**, Global Communications Conference (GLOBECOM), pp. 4394-4399.
- Sathya, V., Ramamurthy, A., and Tamma, B.R. (2015), **Joint Placement and Power Control of LTE Femto Base Stations in Enterprise Environments**, IEEE International Conference on Computing Networking and Communications (ICNC), pp. 1029-1033.

- Tahalani, M., Sathya, V., Ramamurthy, A., Suhas, U.S., Giluka, M.K., and Tamma, B.R. (2014), **Optimal Placement of Femto Base Stations in Enterprise Femtocell Networks**, IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), pp. 1-6.
- Ramamurthy, A., Sathya, V., Venkatesh, V., Ramji, R., and Tamma, B.R. (2015), **Energy-efficient Femtocell Placement in LTE Networks**, **Electronics**, IEEE International Conference on Computing and Communication Technologies (CONECCT), pp. 1-6.
- Han, K., Choi, Y., Kim, D., Na, M., Choi S. and Han, K. (2009), **Optimization of femtocell network configuration under interference constraints**, 7th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOPT), pp. 1-7.
- Tahalani, M., Sathya, V., Suhas, U.S., Chaganti, R., and Tamma, B.R. (2013), **Optimal Femto Placement in Enterprise Building**, IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), pp. 1-3.
- Khan, M.F., and Wang, B. (2014), **Effective Placement of Femtocell Base Stations in Commercial Buildings**, Sixth International Conf on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), pp. 176-180.
- Vardhan, C.S., Ratnam, D.V., Bhagyasree, N., and Dattu, A.H. (2014), **Analysis of path loss models of 4G femtocells**, Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), pp. 1-6.
- Zulkefly, N. R., Rahman, T. A., Al-Samman, A. M., Mataria, A. M. S. and Leow, C. Y. (2015), **Indoor path loss model for 4G wireless network at 2.6 GHz**, 1st International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN), pp. 117-120.
- Thiagarajah, S.P., Ting, A., Chieng, D., Alias M.Y. and Wei, T.S. (2013), **User data rate enhancement using heterogeneous LTE-802.11n offloading in urban area**, IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA), pp. 11-16.
- 3GPP TR 36.922 V9.1.0 (2010), **Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); TDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis (Release 9)**, 3rd Generation Partnership Project, Tech. Rep.
- Powertec Telecommunications Pty., (2014), **Mobile Network Guide Improving Mobile Signal**, australia : Powertec Telecommunications

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular emblem with a book and a sunburst. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a semi-circle at the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลค่ามาตรฐานคุณภาพความแรงสัญญาณสำหรับเทคโนโลยี 4G-LTE และ  
ข้อมูลพื้นฐานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ข้อมูลค่ามาตรฐานคุณภาพความแรงสัญญาณสำหรับเทคโนโลยี 4G-LTE

สำหรับการกำหนดคุณภาพความแรงสัญญาณให้กับจุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณ และตำแหน่งของผู้ใช้งานในงานวิจัยนี้ สามารถเทียบได้กับตารางที่ ก.2 นี้ อ้างอิงจากบทความของ Powertec Telecommunications Pty., (2014) ซึ่งแสดงข้อมูลค่ามาตรฐานคุณภาพความแรงสัญญาณสำหรับเทคโนโลยี 4G-LTE สำหรับเครือข่ายโทรศัพท์มือถือในประเทศออสเตรเลีย

ตารางที่ ก.2 มาตรฐานคุณภาพความแรงสัญญาณสำหรับเทคโนโลยี 4G-LTE

ระดับความแรงสัญญาณ	คุณภาพ
-75 dBm ถึง -88 dBm	สัญญาณดีเยี่ยม (Strong Signal)
-89 dBm ถึง -96 dBm	สัญญาณดีมาก (Very Good Signal)
-97 dBm ถึง -105 dBm	สัญญาณดี (Good Signal)
-106 dBm ถึง -112 dBm	สัญญาณพอใช้ (Fair Signal)
-113 dBm ถึง -125 dBm	สัญญาณแย่มาก (Poor Signal)



## ข้อมูลพื้นฐานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์

สำหรับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ (Femtocell Base station) ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นสถานีฐานเฟมโตเซลล์รุ่น Alcatel-Lucent 9362 Enterprise Cell V2.2 2100 MHz แสดงดังรูปที่ ก.1 โดยลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญของสถานีฐาน แสดงในตารางที่ ก.2



รูปที่ ก.1 สถานีฐานเฟมโตเซลล์รุ่น Alcatel-Lucent 9362 Enterprise Cell V2.2 2100 MHz

ตารางที่ ก.2 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญของสถานีฐาน

คุณลักษณะ	ค่า
ประสิทธิภาพ	
กำลังส่งสูงสุด (Maximum Transmission Power)	20 dBm (100mW)
ความถี่	2100 MHz, 1800 MHz, 900 MHz
ความจุ (Capacity)	16 – 32 Users
ความต้องการใช้พลังงาน	
การใช้แรงดันไฟฟ้า	110/240 V AC to 12 V DC
ลักษณะทั่วไป	
ขนาด	9.9 x 6.5 x 1.7 นิ้ว
น้ำหนัก	< 1 กิโลกรัม
อุณหภูมิ	-5°C to 45°C
ความชื้นสัมพัทธ์ (Operating relative humidity)	5% to 95%
ตำแหน่งการติดตั้ง	ผนัง หรือ กำแพง และอื่นๆ

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ปรัชญา ชำนาญคำ พิธิษฐ์ พรหมบุตร และ ชุติมา พรหมมาก (2015). **Frequency Allocation Techniques for Femtocell Networks in Building by Using Integer Linear Programming**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) 18 - 20 พฤศจิกายน 2558 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, Volume 2, pp. 593-596

ปรัชญา ชำนาญคำ และ ชุติมา พรหมมาก (2016). **Performance Analysis of Femtocell Base Stations Placement for 4G-LTE Networks in Multi-Floor Buildings**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 39 (EECON-39) 2 – 4 พฤศจิกายน 2559 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Prachya Chamnanka Chitapong Wechtaisong and Chutima Prommak (2017). **Femtocell Base Stations Placement in Multi-Floor Building for 4G-LTE Access Network Planning and optimization**, in 11th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, 13 - 14 March 2017 Vietnam, pp.1-6

## เทคนิคการจัดสรรความถี่สำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์ภายในอาคารโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

### Frequency allocation techniques for femtocell networks in building by using Integer linear programming

ปรัชญา ชำนาญคำ, พิณัฐ พรหมบุตร และชุตินา พรหมมาก

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
M5740796@g.sut.ac.th, M5740819@g.sut.ac.th and cprommak@sut.ac.th

CMI6

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจัดสรรความถี่ให้กับเฟมโตเซลล์ (femtocell) หรือสถานีฐานขนาดเล็ก โดยใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear Programming) ในการแก้ไขปัญหาในการทดลองเราได้ทำการจัดสรรความถี่ให้กับเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งในสำนักงานและอาคารเมื่อเกิดสัญญาณรบกวนกันขึ้นระหว่างเซลล์ จึงได้ทำการวางแผนการใช้ความถี่โดยการนำความถี่เดิมกลับมาใช้ใหม่ (Frequency Reuse) เพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากร ประหยัดค่าใช้จ่าย รวมถึงเป็นการใช้ทรัพยากรความถี่ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด จากผลการทดลองเทคนิคที่นำเสนอสามารถลดจำนวนความถี่ที่จัดสรรให้กับเฟมโตเซลล์ได้น้อยที่สุดอย่างมีประสิทธิภาพ

**คำสำคัญ:** เครือข่ายเฟมโตเซลล์, เทคนิคการจัดสรรความถี่, วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

#### Abstract

In this paper, we propose frequency allocation for femtocell or small base station using integer linear programming to solve this problem. In the experiment, we allocated the frequency for femtocell in office and building, when interference occurs between cells. Hence we have frequency planning with frequency reuse method in order to conserve frequency resources, save cost and maximize bandwidth utilization. As a result, the proposed techniques can minimize the number of frequencies allocated to the femtocell effectively.

**Keywords:** Femtocell Networks, Frequency Allocation Techniques, Integer Linear Programming

#### 1. บทนำ

ในปัจจุบันการใช้งานด้านโทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต สมาร์ทโฟน มีปริมาณการใช้ที่ความเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก จนจะเรียกได้ว่าเป็นยุคของอุปกรณ์สื่อสารจำพวกมือถือที่ทำได้ ซึ่งมีการคาดการณ์ว่าในปี 2014-2020 อัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปีของปริมาณการใช้งานโทรศัพท์ของโทรศัพท์มือถือจะสูงถึง 45% และจำนวนผู้ใช้บริการโทรศัพท์มือถือแท็บเล็ตและเร้าท์เตอร์จะสูงถึง 4,000 ล้านคนทั่วโลก [1] เมื่อมีการใช้

งานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้องการใช้งานข้อมูล ความหนาแน่นในการใช้งานของเครือข่ายก็จะมากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะในอาคารขนาดใหญ่และห้างสรรพสินค้าที่มีปริมาณผู้ใช้บริการอย่างหนาแน่น เฟมโตเซลล์จึงเข้ามามีบทบาทเพื่อเพิ่มปริมาณความจุให้เพียงพอต่อการใช้งาน

เมื่อมีการติดตั้งเฟมโตเซลล์ในพื้นที่ให้บริการเพิ่มมากขึ้น ปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนระหว่างเซลล์ก็จะเกิดขึ้นตามมา ซึ่งปัญหานี้จะไม่เกิดขึ้นถ้าแต่ละเฟมโตเซลล์ใช้ความถี่ที่แตกต่างกัน แต่ด้วยปริมาณแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่จำกัด จึงต้องใช้เทคนิคการจัดสรรความถี่ด้วยการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ (frequency reuse)

หลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจศึกษาเกี่ยวกับจัดสรรความถี่ให้กับเครือข่าย เช่นในงานวิจัยที่ [2] กล่าวถึงการจัดสรรทรัพยากรคลื่นวิทยุ (Radio resource) ให้กับเฟมโตเซลล์ในอาคาร 5 ชั้นด้วยวิธี Heuristic Algorithm งานวิจัยที่ [3] กล่าวถึงการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่ให้กับเครือข่ายเฟมโตเซลล์ด้วยวิธี Graph-Based Dynamic ซึ่งเป็นอัลกอริทึมหนึ่งพัฒนาจากทฤษฎีกราฟ (graph theory)

บทความนี้ได้นำเสนอการจัดสรรความถี่ให้กับเฟมโตเซลล์ โดยการจัดสรรจำนวนความถี่ที่น้อยที่สุดให้เพียงพอต่อการใช้งานในพื้นที่ให้บริการ และได้นำเสนอรูปแบบการแก้ปัญหาด้วยการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming) เพื่อแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนระหว่างเซลล์ ซึ่งองค์ประกอบของบทความมีลำดับการนำเสนอ ดังนี้ หัวข้อที่ 2 นำเสนอปัญหาการจัดสรรความถี่สำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร หัวข้อที่ 3 นำเสนอปัญหาการระบายสีกราฟ (graph coloring problem) สำหรับการรบกวนกันของสัญญาณภายในอาคาร หัวข้อที่ 4 นำเสนอสมการคณิตศาสตร์ที่งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ หัวข้อที่ 5 แสดงผลการทดลองและการอภิปรายผล และหัวข้อที่ 6 สรุปผลการทดลอง

#### 2. ปัญหาการจัดสรรความถี่สำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร

ในส่วนนี้จะนำเสนอปัญหาการจัดสรรความถี่สำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร นั่นคือสัญญาณรบกวนระหว่างเซลล์ ซึ่งปัญหาดังกล่าวส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของผู้ใช้บริการภายในอาคาร

เป็นอย่างมาก โดยนำเสนอเป็น 2 หัวข้อย่อยคือ 2.1 เทคโนโลยีเฟม โดเซลล์ และ 2.2 สัญญาณรบกวนระหว่างเฟม โดเซลล์

**2.1 เทคโนโลยีเฟม โดเซลล์**

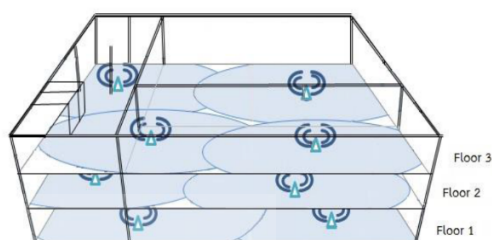
แม้ว่าผู้ให้บริการ (operator) จะมีการออกแบบติดตั้งสถานีฐานขนาดใหญ่ให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการมากที่สุด แต่ก็มักเกิดปัญหาในเขตที่ผู้ใช้งานมาระจุกตัวกันอยู่ เช่น ในเขตชุมชนเมืองใหญ่ๆหรือในอาคารสูงที่มีผู้ใช้งานอย่างหนาแน่นก็มักจะเกิดการแย่งใช้ช่องสัญญาณกันหรือเกิดการรบกวนกันของสัญญาณ แนวคิดเรื่องการเพิ่มความ ต้องการรองรับการใช้งานรับส่งข้อมูลในพื้นที่ดังกล่าว จึงเป็นที่มาของแนวคิดเฟม โดเซลล์ สำหรับเฟม โดเซลล์ [4] นั่นคือ เสาส่งสัญญาณขนาดเล็ก ที่มีกำลังส่งสัญญาณที่ต่ำ ครอบคลุมพื้นที่ได้ไม่มาก (ประมาณ 10-30 เมตร) นิยมใช้ในอาคาร บ้านพักที่อยู่อาศัย หรือบริเวณยับสัญญาณของอาคารที่สถานีฐานภายนอกไม่สามารถส่งสัญญาณไปถึงผู้ให้บริการ โดยเทคโนโลยีสัญญาณวิทยุเฟม โดเซลล์ (femtocell radio) ที่ใช้กันใน ปัจจุบัน สามารถใช้งานร่วมกับมาตรฐาน 3G UMTS ได้ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีวิทยุอื่นๆ ได้เริ่มมีการทดสอบกับเฟม โดเซลล์และอาจจะประสบความสำเร็จในอนาคตอันใกล้ โดยเทคโนโลยีวิทยุที่ใช้กันมากที่สุด เช่น Global System for Mobile Communications(GSM), Universal Mobile Telecommunication System (UMTS), High Speed Packet Access (HSPA), Code Division Multiple Access (CDMA), Long Term Evolution (LTE), WiMAX เป็นต้น

**2.2 สัญญาณรบกวนระหว่างเฟม โดเซลล์**

เมื่อมีการติดตั้งเฟม โดเซลล์ในอาคารเพื่อกระจายสัญญาณ ปัญหาหนึ่งที่จะเกิดตามมาคือสัญญาณรบกวน (interference) ซึ่งเกิดจากเฟม โดเซลล์ที่อยู่บริเวณใกล้กันใช้งานความถี่เดียวกัน ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนกันขึ้น ซึ่งในงานวิจัย [5-7] แสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณรบกวนระหว่างเฟม โดเซลล์ เช่น ตำแหน่งที่ตั้งของเฟม โดเซลล์ เป็นต้น ดังนั้นก่อนที่จะทำการติดตั้งจึงควรที่จะมีการวางแผน วิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ให้บริการ ประเมินผลกระทบการส่งสัญญาณ คำนึงถึงโครงสร้างของอาคารและข้อมูลด้านวัสดุที่ใช้สร้างอาคารว่ามีผลต่อการส่งสัญญาณของเฟม โดเซลล์มากน้อยเพียงใด เพื่อประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดีที่สุด เมื่อเกิดสัญญาณรบกวนระหว่างเฟม โดเซลล์ขึ้น ซึ่งเป็นหนึ่งในความท้าทายที่ควรได้รับการแก้ไขสำหรับเฟม โดเซลล์

ในรูปที่ 1 แสดงตำแหน่งติดตั้งเฟม โดเซลล์ภายในอาคารที่มีสัญญาณรบกวนกัน แบบจำลองของอาคารนี้ ประกอบด้วยจำนวน 3 ชั้น แต่ละชั้นจะมีลักษณะคล้ายๆกันและมีเฟม โดเซลล์ติดตั้งอยู่ ซึ่งแต่ละเฟม โดเซลล์สามารถจะเกิดสัญญาณรบกวนกันได้ถ้าใช้งานความถี่เดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นสัญญาณรบกวนในชั้นเดียวกัน หรือเกิดสัญญาณ

รบกวนระหว่างชั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งติดตั้งของเฟม โดเซลล์และความถี่จัดสรรให้ในแต่ละเฟม โดเซลล์



รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งของที่ตั้งเฟม โดเซลล์ภายในอาคาร 3 ชั้นที่เกิดสัญญาณรบกวนกัน

**3. ปัญหาการระบายสีกราฟ ( graph coloring problem )**

**สำหรับการรบกวนกันของสัญญาณภายในอาคาร**

ปัญหาการระบายสีกราฟ (graph coloring problem) [2] เป็นหนึ่งในปัญหาของทฤษฎีกราฟ (graph theory) โดยปัญหาการระบายสีกราฟ (graph coloring problem) เป็นปัญหาที่ต้องการให้แต่ละจุดของกราฟใช้สีน้อยที่สุด โดยแต่ละจุดที่มีการเชื่อมต่อกันจะต้องใช้สีที่แตกต่างกัน จากทฤษฎีกราฟ  $G(V, E)$  กำหนดให้  $V$  คือเซตของจำนวนเซลล์ และ  $E$  คือเซตของจำนวนลิงก์ที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ โดยเซลล์  $V$  ที่มีลิงก์  $E$  เชื่อมต่อกันจะเลือกใช้สีที่แตกต่างกัน ซึ่งรูปแบบของทฤษฎีปัญหาการระบายสีกราฟนี้สามารถนำไปประยุกต์ร่วมกับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม [8] เป็นการนำวิธีทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะถูกสร้างเป็น สมการคณิตศาสตร์ในรูปของสมการเชิงเส้นจำนวนเต็ม เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของวัตถุประสงค์ที่กำหนดและอยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดของปัญหา ซึ่งการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) เป็นสมการที่แสดงถึงวัตถุประสงค์ของปัญหาเพื่อใช้ในการหาค่าค่าตอบที่สูงสุดหรือต่ำสุดของปัญหา ตัวแปรตัดสินใจ (decision variable) เป็นตัวแปรที่ใช้ในการเก็บค่าตอบของปัญหา และสมการเงื่อนไข (constraint) เป็นสมการที่แสดงข้อจำกัดของปัญหา

**4. สมการคณิตศาสตร์เพื่อการจัดสรรความถี่ให้แต่ละเฟม โดเซลล์**

การติดตั้งเฟม โดเซลล์ในพื้นที่ให้บริการมักจะเกิดปัญหาสัญญาณรบกวนกันระหว่างเซลล์ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้งานของผู้ให้บริการ และด้วยปริมาณความถี่ที่มีจำนวนจำกัด จึงต้องมีการนำความถี่เดิมกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นการวางแผนความถี่ (Frequency Planning) เพื่อกำหนดความถี่ที่เหมาะสมให้แต่ละเฟม โดเซลล์ จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับประสิทธิภาพการให้บริการ

บทความนี้ได้นำเสนอการจัดสรรความถี่สำหรับเครือข่ายเฟรมโตเซลล์ โดยใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ซึ่งเป็นสมการคณิตศาสตร์ในการแก้ไขปัญหา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนความถี่ที่จัดสรรให้แก่แต่ละเฟรมโตเซลล์ให้น้อยที่สุด ซึ่งแสดงสมการวัตถุประสงค์ในสมการที่ (1) และสมการที่ (2-6) เป็นสมการเงื่อนไขและปัจจัยต่างๆ ในการเลือกใช้ความถี่ ซึ่งคำนิยามของตัวแปรที่ใช้ในสมการคณิตศาสตร์จะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงคำนิยามของตัวแปรที่ใช้ในสมการคณิตศาสตร์

เซตของตัวแปร	
$V$	เซตของปริมาณเฟรมโตเซลล์
$N$	เซตของปริมาณความถี่
ตัวแปรตัดสินใจ	
$x_k$	ตัวแปรตัดสินใจที่ระบุการใช้ความถี่ของเฟรมโตเซลล์ มีค่าเป็น 1 เมื่อเฟรมโตเซลล์ที่ $k$ ใช้ความถี่ $k$ และมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่มีการใช้ความถี่ของเฟรมโตเซลล์
$y_k$	ตัวแปรตัดสินใจที่ระบุการใช้ความถี่ มีค่าเป็น 1 เมื่อความถี่ $k$ ถูกนำมาใช้ และมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อความถี่ $k$ ไม่ถูกนำมาใช้
พารามิเตอร์ค่าคงที่	
$e_g$	ตัวแปรระบุเส้นทางจากเฟรมโตเซลล์ $i$ ไปยังเฟรมโตเซลล์ $j$ มีค่าเป็น 1 เมื่อทั้งสองเฟรมโตเซลล์มีสัญญาณรบกวนกัน และมีค่าเป็น 0 เมื่อทั้งสองเฟรมโตเซลล์ไม่มีสัญญาณรบกวนกัน

Objective:

$$\min \sum_{k=1}^N y_k \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{k=1}^N x_k = 1 \quad \forall i \in V, \forall k \in N \quad (2)$$

$$e_g(x_k + x_j) \leq 1 \quad \forall i \in V, \forall j \in V, \forall k \in N \quad (3)$$

$$x_k \leq y_k \quad \forall i \in V, \forall k \in N \quad (4)$$

$$x_k \in \{0,1\} \quad (5)$$

$$y_k \in \{0,1\} \quad (6)$$

สมการเงื่อนไขที่ (2) เงื่อนไขสำหรับการกำหนดว่าเฟรมโตเซลล์ต้องการใช้ความถี่อย่างน้อย 1 ความถี่ โดยเฟรมโตเซลล์จะไม่มีการใช้ความถี่ไม่ได้ สมการเงื่อนไขที่ (3) เงื่อนไขสำหรับการกำหนดว่าเฟรมโตเซลล์ที่มีสัญญาณรบกวนกันจะต้องใช้ความถี่ที่แตกต่างกัน สมการเงื่อนไขที่ (4) เงื่อนไขสำหรับการกำหนดความถี่ที่ถูกจัดสรรให้กับเฟรมโตเซลล์จะต้องเป็นความถี่ที่ถูกเลือกใช้งาน สมการเงื่อนไขที่ (5) และ (6) เงื่อนไขสำหรับการตรวจสอบเพื่อให้แน่ใจว่าการเลือกใช้ความถี่ของเฟรมโตเซลล์ ( $x_k$ ) และการใช้ความถี่ ( $y_k$ ) ต้องเป็นตัวแปรประเภทไบนารี

**5. ผลการทดลองและการอภิปรายผล**

ในส่วนนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลอง ซึ่งดำเนินการด้วยโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.2 เป็น

โปรแกรมที่ใช้สำหรับหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการวางแผนความถี่ให้กับเครือข่ายเฟรมโตเซลล์ ในหัวข้อนี้แบ่งเป็นหัวข้อย่อยคือ 5.1 รูปแบบของการทดลองและ 5.2 ผลการทดลอง

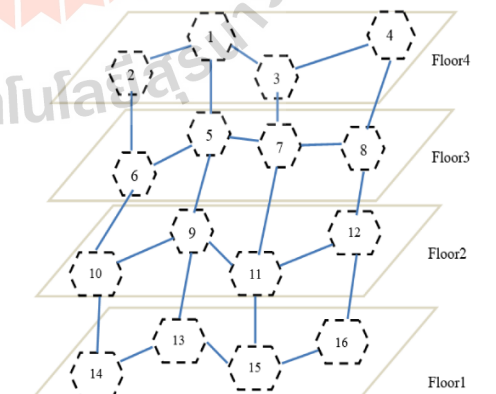
**5.1 รูปแบบของการทดลอง**

สำหรับรูปแบบของการทดลองมีทั้งหมด 4 รูปแบบ คือทำการทดลองเครือข่ายภายในอาคาร 2 ชั้น อาคาร 4 ชั้น อาคาร 6 ชั้นและอาคาร 10 ชั้นตามลำดับ มีส่วนประกอบที่แตกต่างกันในการทดลองคือ จำนวนของเฟรมโตเซลล์ และสัญญาณรบกวนระหว่างเซลล์ รวมถึงจำนวนชั้นของอาคาร ซึ่งแสดงตัวอย่างเครือข่ายของเฟรมโตเซลล์ในรูปแบบที่ 2, 3 และ 4

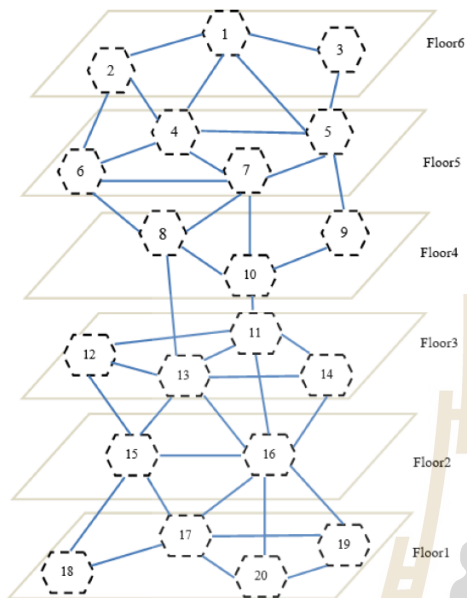
รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองของเฟรมโตเซลล์ที่มีสัญญาณรบกวนกันภายในอาคาร 2 ชั้น ประกอบไปด้วยเฟรมโตเซลล์ทั้งหมด 8 เฟรมโตเซลล์ มีสัญญาณรบกวนกันทั้งหมด 8 สัญญาณรบกวน เส้นประสีฟ้าแสดงถึงตำแหน่งที่ตั้งของเฟรมโตเซลล์ ส่วนเส้นทึบสีฟ้าแสดงถึงสัญญาณรบกวนกัน ระหว่างเฟรมโตเซลล์ ยกตัวอย่างเช่น เฟรมโตเซลล์ที่ 3 มีสัญญาณรบกวนกับเฟรมโตเซลล์ที่ 1, 2 และ 4 เป็นต้น รูปที่ 3 แสดงแบบจำลองของเฟรมโตเซลล์ที่มีสัญญาณรบกวนกันภายในอาคาร 4 ชั้น ประกอบไปด้วยเฟรมโตเซลล์ทั้งหมด 16 เฟรมโตเซลล์ มีสัญญาณรบกวนกันทั้งหมด 24 สัญญาณรบกวน และรูปที่ 4 แสดงแบบจำลองของเฟรมโตเซลล์ที่มีสัญญาณรบกวนกันภายในอาคาร 6 ชั้น ประกอบไปด้วยเฟรมโตเซลล์ทั้งหมด 20 เฟรมโตเซลล์ มีสัญญาณรบกวนกันทั้งหมด 40 สัญญาณรบกวน



รูปที่ 2 แบบจำลองที่ 1 แสดงเฟรมโตเซลล์ที่มีสัญญาณรบกวนกันภายในอาคาร 2 ชั้น



รูปที่ 3 แบบจำลองที่ 2 แสดงเฟรมโตเซลล์ที่มีสัญญาณรบกวนกันภายในอาคาร 4 ชั้น



รูปที่ 4 แบบจำลองที่ 3 แสดงเฟมโตเซลล์ที่มีสัญญาณรบกวนกันภายในอาคาร 6 ชั้น

**5.2 ผลการทดลอง**

ในการทดลองนี้ ได้ทำการทดลองเพื่อลดจำนวนความถี่ที่จัดสรรให้แต่ละเฟมโตเซลล์ให้น้อยที่สุด โดยหาได้จากวัตถุประสงค์ในสมการที่ (1) และต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดตั้งในสมการที่ (2-6) ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลอง

แบบจำลอง	จำนวนของเฟมโตเซลล์	จำนวนของสัญญาณรบกวน	จำนวนของความถี่ที่ใช้
1	8	8	2
2	16	24	2
3	20	40	4
4	50	58	3

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าแบบจำลองที่ 1 2 และ 4 จำนวนของเฟมโตเซลล์กับจำนวนของสัญญาณรบกวนมีจำนวนที่ไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งผลที่ได้แต่ละแบบจำลองจะใช้จำนวนของความถี่ในปริมาณที่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ 3 ที่มีจำนวนเฟมโตเซลล์ 20 เฟมโตเซลล์ มีจำนวนสัญญาณรบกวน 40 สัญญาณรบกวน จะใช้ความถี่ทั้งหมดจำนวน 4 ความถี่ สังเกตว่าสัญญาณรบกวนมีจำนวนมากกว่าเฟมโตเซลล์ถึง 2 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจำนวนของความถี่ที่ใช้จะมีจำนวนมากขึ้นหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับจำนวนของสัญญาณรบกวน ถ้าในเครือข่ายมีจำนวนสัญญาณรบกวนที่มาก จำนวนของความถี่ที่ใช้ก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น

**สรุป**

จากการทดลองเพื่อลดจำนวนความถี่ที่จัดสรรให้แต่ละเฟมโตเซลล์ให้น้อยที่สุด โดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ได้ทำการทดลองทั้งหมด 4 แบบจำลองที่มีจำนวนของเฟมโตเซลล์และจำนวนของสัญญาณรบกวนระหว่างที่แตกต่างกัน เมื่อนำไปทดสอบกับโปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.2 ผลลัพธ์ที่ได้จะให้คำตอบของจำนวนความถี่ที่แต่ละเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุด ซึ่งวิธีการที่นำเสนอในบทความนี้สามารถที่จะแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนกันระหว่างเฟมโตเซลล์ และทำการจัดสรรความถี่ให้กับเฟมโตเซลล์อย่างมีประสิทธิภาพ

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] Ericsson, "Traffic and Market Data Report," June. 2015.
- [2] J. Liu, et al., "Radio resource allocation in buildings with dense femtocell deployment", 21st International Conference on Computer Communications and Networks, July 30 2012- Aug. 2 2012
- [3] S. Uygungelen, et al, "Graph-Based Dynamic Frequency Reuse in Femtocell Networks," IEEE VTC Spring 2011, July 2011.
- [4] Khaled Elleithy and Varun Rao, "Femto Cells: Current Status and Future Directions," International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) Vol.3, No.1, March 2011.
- [5] V. Chandrasekhar, et al., "Femtocell Networks: a Survey," IEEE communications Magazine, vol.49, no. Sep. 2008, pp.59-67.
- [6] Jie Zhang, et al., "Femtocells: Technologies and Deployment," Wiley, Jan. 2010.
- [7] D. López-Pérez, et al, "Enhanced Inter-cell Interference Coordination Challenges in Heterogeneous Networks," IEEE Wireless Commu. Mag., vol. 18, no. 3, June 2011, pp. 22-30.
- [8] W.L. Winston, "Operations Research: Applications and Algorithms," 4th Ed., Thomson Brooks/Cole : USA, 2004, pp.49-55



เครือข่ายเฟมโตเซลล์

นายปรัชญา ชำนาญคำ และนายพิสิษฐ์ พรหมบุตร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ.2555 และ 2556 ตามลำดับ ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโทที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม งานวิจัยที่สนใจเป็นงานที่เกี่ยวกับการจัดสรรความถี่ให้กับ

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน femtocell สำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอี  
ภายในอาคารแบบหลายชั้น

Performance Analysis of Femtocell Base Stations Placement for 4G-LTE Networks

in Multi-Floor Buildings

ปรัชญา ขำอายุแก้ว และศุภิตา พรหมมา

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[M5740796@g.sut.ac.th](mailto:M5740796@g.sut.ac.th) and [sprommak@sut.ac.th](mailto:sprommak@sut.ac.th)

**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน femtocell (Femtocell Base stations, FBS) สำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอี (4G-Long Term Evolution, 4G-LTE) ภายในอาคารแบบหลายชั้น ในการทดลองเราทำการศึกษารูปร่างและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน femtocell และได้ออกแบบโครงสร้างเครือข่าย femtocell โดยได้กำหนดจำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน femtocell ที่แตกต่างกัน เพื่อทำการประเมินคุณภาพความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการและอัตราเร็วในการให้บริการของผู้ใช้งานภายในอาคาร จากผลการทดลองพบว่าจำนวนและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน femtocell ส่งผลอย่างมากต่อคุณภาพความแรงสัญญาณและความสามารถในการรับลูกค้า

**คำสำคัญ:** เครือข่าย femtocell, การติดตั้งสถานีฐาน, สี่จีแอลทีอี

**Abstract**

In this paper, we propose a performance analysis of femtocell base stations (FBS) placement for 4G-Long Term Evolution (4G-LTE) networks in multi-floor buildings. In the experiment, we studied parameters required for placement of femtocell base stations and evaluated different network structures of femtocell base station placement in which the number and the location of base stations were different. We analyzed the quality of signal strength with in the service areas to evaluate the network performance in term of the signal coverage and the user access data rate requirement. The results show that different network structures, i.e. different number of femtocell base stations and their installed locations, affect the quality of the signal coverage and the capacity to accommodate users at the required data rate.

**Keywords:** femtocell networks, base station placement, 4G-LTE

**1. บทนำ**

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี femtocell (Femtocell Technology) ร่วมกับเทคโนโลยีสี่จีแอลทีอี ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน [1] เนื่องจากเมื่อนำเทคโนโลยี femtocell มาประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายสี่จีแอลทีอีจะทำให้เกิดการส่งข้อมูลมีความเร็วมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่างๆ [2] โดยเทคโนโลยี femtocell เป็นสถานีโทรศัพท์มือถือขนาดเล็ก ที่มีกำลังส่งสัญญาณที่ต่ำ ทำงานด้วยอำนาจความถี่ที่หน่วยงานกำกับดูแลด้านกิจการโทรคมนาคมของประเทศเป็นผู้กำหนด โดยสัญญาณจะครอบคลุมพื้นที่ได้ในบริเวณไม่กว้างมาก นิยมใช้ในอาคารสำนักงานหรือบริเวณชั้นสัญญาณของอาคารที่สถานีฐานภายนอกไม่สามารถส่งสัญญาณไปถึงผู้ใช้บริการได้ [3] ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคเพื่อหาตำแหน่งที่จะวางสถานีฐาน femtocell ให้เกิดสมรรถนะการทำงานที่ดีที่สุด จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะนำมาพิจารณา เพราะจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานและคุณภาพสัญญาณของผู้ใช้งานภายในอาคาร

หลายงานวิจัยได้ให้ความสนใจศึกษาเกี่ยวกับวิธีการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน โดยใช้ระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มมาพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบเครือข่าย เพื่อให้สอดคล้องกับข้อจำกัดหรือเงื่อนไขต่างๆที่จะใช้ในการแก้ปัญหา ได้แก่งานวิจัยที่ [4] นำสัญญาณรวมจาก macro cell (Macro cell) ซึ่งเป็นสัญญาณรวมจากภายนอกอาคาร และสัญญาณรวมระหว่างสถานีฐาน femtocell คู่ด้วยกัน มาใช้ในการพิจารณาเพื่อรับประกันค่าสัญญาณรบกวน (SNR) ภายในพื้นที่ให้บริการ งานวิจัยที่ [5] ศึกษาทั้งการออกแบบตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน femtocell และการควบคุมการใช้พลังงานของสถานีฐาน femtocell ภายในอาคารแบบหลายชั้น โดยจะทำการปรับกำลังส่งสัญญาณให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมภายในอาคาร แต่ทั้งสองงานวิจัยยังไม่ได้พิจารณาถึงข้อจำกัดด้านปริมาณของผู้ใช้ที่สถานีฐาน femtocell สามารถรองรับได้ งานวิจัยที่ [6] นำเสนอเทคนิควิธีการนับจำนวนตำแหน่งและจำนวนชั้นภายในอาคาร มาเป็นแนวคิดหลักในการ



ออกแบบ รวมถึงได้วิเคราะห์ผลของความแรงสัญญาณที่เกิดจากจำนวน สิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับ แต่งานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณา ถึงการรับประกันอัตราเร็วการให้บริการของผู้ใช้งานภายในอาคาร

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานี ฐาน ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้ให้ความสำคัญเกี่ยวกับกรรับประกัน คุณภาพความแรงสัญญาณและการรับประกันคุณภาพสัญญาณรบกวน ภายในพื้นที่ให้บริการ แต่ยังไม่ได้พิจารณาในส่วนของอัตราเร็วการให้ บริการของผู้ใช้งาน และปริมาณผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับ ได้ ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตำแหน่ง ติดตั้งสถานีฐานเพิ่มเติมเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นที่พิจารณาเรื่อง คุณภาพความแรงสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ อัตราเร็วการ ให้บริการของผู้ใช้งานและความสามารถในการรองรับปริมาณผู้ใช้งาน ของ สถานีฐาน ซึ่งองค์ประกอบของบทความมีลำดับการนำเสนอ ดังนี้ หัวข้อ ที่ 2 การทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ หัวข้อที่ 3 แสดงผลการทดลองและ การอภิปรายผล และหัวข้อที่ 4 สรุปผลการทดลอง

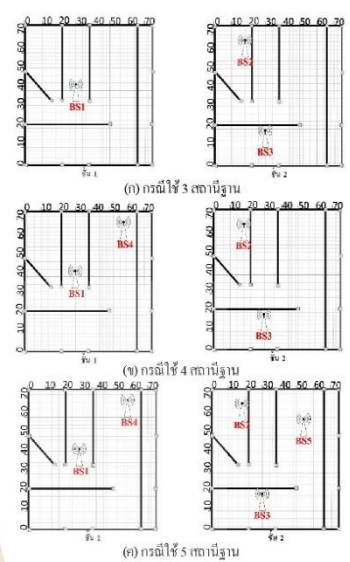
**2. การทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้**

ในส่วนนี้จะนำเสนอรูปแบบการทดลอง รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง โดยนำเสนอเป็นหัวข้อย่อยคือ 2.1 รูปแบบของการ ทดลอง 2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง 2.3 รูปแบบสมการการ สูญเสียตามระยะทาง

**2.1 รูปแบบของการทดลอง**

สำหรับรูปแบบของการทดลองในเบื้องต้นมีทั้งหมด 9 รูปแบบ โครงสร้างเครือข่าย โดยแต่ละแบบได้ที่เลือกจำนวนและ ตำแหน่งที่ตั้งติดตั้งสถานีฐานเพิ่มเติมเซลล์ขึ้นมา เพื่อที่จะทำการศึกษาว่า จำนวนและตำแหน่งที่ตั้งติดตั้งสถานีฐานเพิ่มเติมเซลล์ที่แตกต่างกัน จะส่งผล อย่างไรต่อประสิทธิภาพการทำงานของผู้ใช้งานในพื้นที่ให้บริการ โดย พิจารณาจากคุณภาพของความแรงสัญญาณ ที่ตำแหน่งจุดทดสอบสัญญาณ (Signal Test Point : STP) และตำแหน่งจุดทดสอบอัตราเร็วหรือตำแหน่ง ผู้ใช้งาน (User) รวมถึงพิจารณาปริมาณผู้ใช้งานที่สถานีฐานเพิ่มเติมเซลล์ สามารถรองรับได้

จากรูปที่ 1 แสดงตำแหน่งการวางสถานีฐานเพิ่มเติมเซลล์ภายใน อาคารแบบ 2 ชั้น จากทั้งหมด 9 รูปแบบโครงสร้างเครือข่าย โดยแบ่ง ออกเป็น 3 กรณี แต่ละกรณีจะประกอบไปด้วย 3 รูปแบบโครงสร้าง เครือข่าย คือ (ก) กรณีใช้ 3 สถานีฐาน เป็นตัวอย่างการวางสถานีของ โครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1 (ข) กรณีใช้ 4 สถานีฐาน เป็นตัวอย่างการวาง สถานีฐานของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 4 และ (ค) กรณีใช้ 5 สถานีฐาน เป็นตัวอย่างการวางสถานีของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7 โดยผู้วิจัย ได้ทำการออกแบบจำนวนและตำแหน่งที่วางสถานีฐานที่แตกต่างกันใน พื้นที่ของอาคารที่มีขนาดกว้าง 75 เมตร ยาว 75 เมตร สูง 3 เมตร มีจำนวน ชั้นทั้งหมด 2 ชั้น แต่ละชั้นมีโครงสร้างกำแพงที่เหมือนกัน



รูปที่ 1 ตัวอย่างที่แสดงการวางสถานีฐานเพิ่มเติมเซลล์ ประกอบด้วย (ก) กรณีใช้ 3 สถานีฐาน (ข) กรณีใช้ 4 สถานีฐาน และ (ค) กรณีใช้ 5 สถานีฐาน

**2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง**

หัวข้อนี้ได้ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องทราบตำแหน่งของ สถานีฐานเพิ่มเติมเซลล์ ซึ่งส่วนแต่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานและการ ออกแบบเทคนิคการวางตำแหน่งสถานีฐานเพิ่มเติมเซลล์ภายในอาคาร โดยตารางที่ 1 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูล อัตราเร็วทาง ภายภาพและระดับสัญญาณชั้นต่ำในการรับอัตราเร็วทางภายภาพ [7] ซึ่งอัตราเร็วทางภายภาพระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับสถานีฐานของ เครือข่ายเพิ่มเติมเซลล์นั้นแปรผันตามระดับความแรงสัญญาณที่อุปกรณ์ ผู้ใช้งานสามารถรับได้และวิธีการมอดูล ดังนั้นอัตราเร็วทางภายภาพที่ ตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุมและตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการ ให้บริการ สามารถเทียบได้จากรูปที่ 2

**2.3 รูปแบบสมการการสูญเสียตามระยะทาง**

ในการวางแผนเครือข่ายเพิ่มเติมเซลล์นั้น มีจุดประสงค์เพื่อให้บริการ แก่ผู้ใช้บริการอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งระดับความแรงสัญญาณของผู้ ใช้งานที่ได้รับจากสถานีฐานภาคส่งนั้นเป็นต้นแปรสำคัญอย่างหนึ่ง ใน การบ่งบอกประสิทธิภาพของการใช้บริการในเครือข่าย โดยจุดประสงค์ ของการใช้สมการการสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss Model, PL) คือหา ค่าการลดทอนที่แม่นยำเพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจวางแผนเครือข่าย อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสมการการสูญเสียตามระยะทางที่ใช้ในงานนี้ [8] เป็นสมการตามมาตรฐานของหน่วยงาน 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) โดยสมการการสูญเสียตามระยะทางนี้สามารถ

นำไปใช้ในเทคโนโลยีเฟรมเวิร์ก 4G-LTE ในสภาพแวดล้อมภายในอาคารแบบหลายชั้น ซึ่งแสดงสมการที่ 1

$$PL = 40.7412 + 20\log_{10}(R) + 0.7d_{2D,indoor} + 18.3n \frac{(n-2)}{(n+1)} + qL_{rn} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 ตัวแปร R คือระยะทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ n คือจำนวนชั้นภายในอาคารที่สัญญาณทะลุผ่าน q คือจำนวนกำแพงภายในอาคารที่สัญญาณทะลุผ่าน  $d_{2D,indoor}$  คือความหนาของกำแพงภายในอาคาร กำหนดเป็น 0.18 เมตร และ  $L_{rn}$  คือค่าความสูญเสียของกำแพงภายในอาคาร กำหนดเป็น 5 dB [8]

ตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่า
กำลังส่งของสถานีฐานเฟรมเวิร์ก	5 dBm
ความสูงของสถานีฐานเฟรมเวิร์ก	2 m
ความสูงของจุดทดสอบสัญญาณ	0.8 m
ความถี่ของสัญญาณ	2.6 GHz
ความกว้างของช่องสัญญาณ	20 MHz
จำนวนผู้ใช้ทั้งหมด	140 User
ปริมาณผู้ใช้ที่สถานีฐานรองรับได้	32 User ต่อ PBS
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับระบบอัตราเร็วการให้บริการของผู้ใช้งาน [9]	75.60 Mbps
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับระบบอัตราเร็วสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ [9]	25.20 Mbps

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วทางกายภาพและระดับสัญญาณขั้นต่ำในการรับอัตราเร็วทางกายภาพ [7]

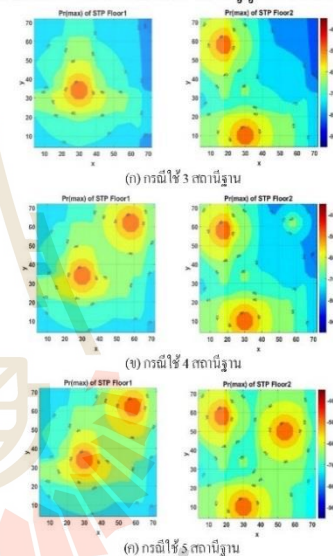
ลำดับที่	วิธีการมอดูเลต	อัตราเร็วทางกายภาพ (Mbps)	ระดับสัญญาณขั้นต่ำที่รองรับได้ (dBm)
		LTE(20MHz)	
1	QPSK 1/8	4.20	-103.535
2	QPSK 1/4	8.40	-100.135
3	QPSK 1/2	16.80	-96.4348
4	QPSK 3/4	25.20	-92.9348
5	16 QAM 1/8	33.60	-90.5348
6	16 QAM 3/4	50.40	-86.2348
7	64 QAM 2/3	67.20	-83.1348
8	64 QAM 3/4	75.60	-80.9348

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ในส่วนนี้เป็นการนำเสนอผลการทดลอง จะนำเสนอการในส่วนที่ 2 รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆตามค่าในโปรแกรม Matlab ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของแบบจำลองการทำงาน รวมถึงแสดงผลของข้อมูล แสดงภาพกราฟที่ต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟรมเวิร์กที่ได้ออกมาเช่นกัน

จากการทดลองผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลประสิทธิภาพของตำแหน่งการติดตั้งสถานีฐานเฟรมเวิร์กภายในอาคารแบบหลายชั้น โดยผลการทดลองประกอบไปด้วยดังนี้ กราฟของกำลังสัญญาณที่

ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ แสดงดังรูปที่ 2 แทนด้วยตำแหน่งจุดทดสอบสัญญาณ ซึ่งกระจายตัวเป็นรูปแบบตารางที่มีระยะกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform) มีทั้งหมด 648 จุดทดสอบสัญญาณ แต่ละชั้นมี 324 จุดทดสอบสัญญาณ โดย (ก) กรณิใช้ 3 สถานีฐาน แสดงตัวอย่างผลของความแรงสัญญาณของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1 ซึ่งชั้นที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -68.06 dBm และชั้นที่ 2 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -66.39 dBm (ข) กรณิใช้ 4 สถานีฐาน แสดงตัวอย่างผลของความแรงสัญญาณของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 4 ซึ่งชั้นที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -64.47 dBm และชั้นที่ 2 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -65.82 dBm (ค) กรณิใช้ 5 สถานีฐาน แสดงตัวอย่างผลของความแรงสัญญาณของโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7 ซึ่งชั้นที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -64.47 dBm และชั้นที่ 2 มีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -61.35 dBm



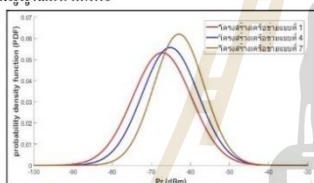
รูปที่ 2 ตัวอย่างกราฟที่แสดงผลของความแรงของสัญญาณที่ครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ ประกอบด้วย (ก) - (ค) กรณิใช้ 3, 4 และ 5 สถานีฐาน ตามลำดับ

จากรูปที่ 3 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นความน่าจะเป็นแบบต่อเนื่องของความแรงสัญญาณมากที่สุดของแต่ละจุดทดสอบที่ได้รับจากสถานีฐาน ได้ทำการเปรียบเทียบที่อาคารทั้ง 3 กรณีคือ โครงสร้างแบบที่ 1 (เส้นสีแดง) กรณิใช้ 3 สถานีฐาน, โครงสร้างแบบที่ 4 (เส้นน้ำเงิน) กรณิใช้ 4 สถานีฐานและโครงสร้างแบบที่ 7 (เส้นสีส้ม) กรณิใช้ 5 สถานีฐาน โดยค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ดีที่สุดอยู่ที่โครงสร้างแบบที่ 7 คือมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ -62.91 dBm (เส้นสีแดง) โดยการวัดคุณภาพความแรงสัญญาณ ผลที่ได้สามารถครอบคลุมได้ทั่วพื้นที่ให้บริการคิดเป็น 100%

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7 และ 8 เป็นแบบโครงสร้างเครือข่ายที่ดีที่สุดเพราะสามารถรองรับปริมาณผู้ใช้งานได้

100% ส่วนโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 9 สามารถรองรับปริมาณผู้ใช้งานได้ 95% ซึ่งทั้ง 3 โครงสร้างเครือข่ายนี้เป็นโครงสร้างเครือข่ายที่ใช้ 5 สถานีฐาน ส่วนโครงสร้างเครือข่ายที่ 1, 2 และ 3 เป็นโครงสร้างเครือข่ายที่ใช้ 3 สถานีฐาน สามารถรองรับปริมาณผู้ใช้งานได้แค่ประมาณ 68% เท่ากัน ส่วนโครงสร้างแบบที่ 4, 5 และ 6 เป็นโครงสร้างเครือข่ายที่ใช้ 4 สถานีฐานสามารถรองรับปริมาณผู้ใช้งานได้ประมาณ 90% - 91%

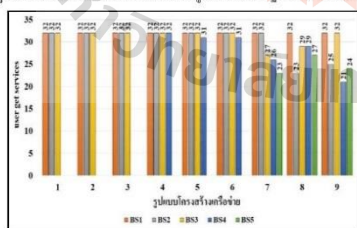
จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 1, 2 และ 3 ทุกสถานีฐานรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้ดีมีความจุและไม่สามารถรับเพิ่มได้อีกเพราะว่าความจุสถานีฐานจำกัดอยู่แล้ว ส่วนโครงสร้างที่ 4, 5 และ 6 บางสถานีฐานไม่สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้ดีมีความจุ เพราะสถานีฐานไม่สามารถรับได้เนื่องจากว่าคุณภาพสัญญาณยังไม่ดีพอ ส่วนโครงสร้างเครือข่ายแบบที่ 7 และ 8 บางสถานีฐานสามารถรับจำนวนผู้ใช้งานได้ดีมีความจุ แต่โดยรวมแล้วสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้ทั้งหมดในพื้นที่ ส่วนในโครงสร้างแบบที่ 9 จำนวนผู้ใช้งานโดยรวมที่สถานีฐานรองรับได้ไม่ถึง 140 คน ในขณะที่บางสถานีฐานยังมีความจุเหลือ แต่สถานีฐานก็ยังไม่สามารถรับผู้ใช้งานบางคนได้ เนื่องจากคุณภาพสัญญาณยังไม่ดีพอ



รูปที่ 3 กราฟแสดงฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของกำลังสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ



รูปที่ 4 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ใช้งานที่สถานีฐานสามารถรองรับได้



รูปที่ 5 กราฟที่แสดงจำนวนผู้ใช้งานที่แต่ละสถานีฐานสามารถรองรับได้

**4. สรุปผลการทดลอง**

จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟรมโพลีเซลล์ที่มีโครงสร้างเครือข่ายที่แตกต่างกัน พบว่าการเลือก

จำนวนและตำแหน่งการติดตั้งสถานีฐานมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานในแง่ของความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ และส่งผลต่ออัตราเร็วในการให้บริการของผู้ใช้งานด้วย ดังนั้นในอนาคตผู้วิจัยจะพัฒนาเทคนิคที่สามารถออกแบบโครงสร้างเครือข่ายเฟรมโพลีเซลล์ที่เหมาะสมกับลักษณะโครงสร้างของอาคารและความหนาแน่นของผู้ใช้งานที่สามารถใช้งานได้อย่างอัตโนมัติและเกิดประสิทธิภาพมากที่สุด

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] Kojima, Y., Suga, J., Kawasaki, T., Okuda, M. and Takechi, R., "LTE-WiFi Link Aggregation at Femtocell Base Station", World Telecommunications Congress, 2014, pp. 1-6.
- [2] Nagashree, N., Rao, V. and Shanavas, L.H., "Femto Cells-A New Generation Cellular Stations", Universal Journal of Communications and Network, 2013, pp. 9-15.
- [3] Baseshankar, A., and Khapre, S., "Femtocells Technology", National Conference on Innovative Paradigms in Engineering & Technology (NCIPET), 2012, pp. 7-11.
- [4] Sathya, V., Ramamurthy, A., and Tamma, B.R., "On Placement and Dynamic Power Control of Femtocells in LTE HetNets", Global Communications Conference (GLOBECOM), 2014, pp. 4394-4399.
- [5] Sathya, V., Ramamurthy, A., and Tamma, B.R., "Joint Placement and Power Control of LTE Femto Base Stations in Enterprise Environments", IEEE International Conference on Computing Networking and Communications (ICNC), 2015, pp. 1029-1033.
- [6] Tahalani, M., Sathya, V., Ramamurthy, A., Suhas, U.S., Giluka, M.K. and Tamma, B.R., "Optimal Placement of Femto Base Stations in Enterprise Femtocell Networks", IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), 2014, pp. 1-6.
- [7] Thiagarajah, S.P., Ting, A., Chieng, D., and Alias, M.Y., "User Data Rate Enhancement Using Heterogeneous LTE-802.11n Offloading in Urban Area", IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA), 2013, pp. 11 – 16
- [8] Vardhan, C.S., Ratnam, D.V., Bhagyasree, N., and Dattu, A.H., "Analysis of path loss models of 4G femtocells", Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), 2014, pp. 1-6.
- [9] Powertec Telecommunications Pty., "Mobile Network Guide Improving Mobile Signal", 2014, australia : Powertec Telecommunications

## FEMTOCELL BASE STATIONS PLACEMENT IN MULTI-FLOOR BUILDINGS FOR 4G-LTE ACCESS NETWORK PLANNING AND OPTIMIZATION

Prachya Chamnanka <sup>(1)</sup>, Chitapong Wechtaisong <sup>(2)</sup>, Chutima Prommak <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Suranaree University of Technology, Thailand

<sup>(2)</sup> Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Thailand

Email: M5740796@g.sut.ac.th

### ABSTRACT

In this paper, we propose an efficient placement of femtocell base stations (FBSs) for 4G-Long Term Evolution (4G-LTE) network in multi-floor building using integer linear programming (ILP). To solve this FBS placement problem, we define a mathematical model considering the quality of services in term of the signal coverage guarantees and the user access data rate guarantees in the service area. In addition, our model considers the capacity of each FBS in the case of user's number limitation. In our experiment, the problem formulation is divided into two phases. The first phase aims to determine the minimum number of FBSs to be installed in the multi-floor building. Then, the distribution of installed FBSs is observed. Using the optimal number of FBSs defined in the first phase, the second phase aims to determine the optimal locations for FBSs placement under the same conditions as the first phase for improving users' received signal strength in the service area. The experimental results show that our proposed technique can effectively minimize the number of installed FBSs and optimize their placement location. Our proposed technique can achieve 100% service coverage throughout the service area.

**KEYWORDS:** *Base Station Placement, 4G-LTE, Femtocell Networks, Integer Linear Programming*

### 1. INTRODUCTION

In recent decades, mobile cellular communication becomes a part of human life. The 4G-Long Term Evolution (4G-LTE) is the modern technology which serves mobile cellular communication to users. Its advantages in terms of high-speed data rate and high-efficiency wireless connection can reduce many limitations of existing mobile technologies and effectively support the modern lifestyle of users. The usage of 4G-LTE is rapidly increasing especially in the indoor area. In the crowded buildings (e.g. enterprise buildings and shopping malls), the usage of mobile phones is very high which require high traffic from the network. The network

operators have to design some solutions to support this enormous requirement. So, femtocell base station (FBS) is one from many options which can increase system capacity and data rates for the indoor 4G-LTE network (Kojima, et al. (2014)).

Currently, FBSs are popularly used and highly increase every year (Nagashree, et al. (2013)). The application of the FBS with 4G-LTE technology is getting more attention because it can increase data rate and it also reduces the operational cost. Femtocell technology is a small cellular base station using low power transmitter whose signal coverage in service areas is not too wide (30-50 meter). Its operating frequency is determined by National Broadcasting and Telecommunication Commission (NBTC). The femtocell connects to the carrier's core network via broadband (such as DSL or cable) and can support up to 32 terminals. FBSs can be easily installed. Their installation is uncomplicated compared to other small cells. They are usually installed in office buildings, indoor location or other service areas which have low signal coverage (Baseshankar & Khapre (2012)).

Many existing works studied on optimal placement of FBS in both single-floor and multi-floor buildings based on integer linear programming (ILP) (Sathya, et al. (2014), Sathya, et al. (2015), Tahalani, et al. (2014), Ramamurthy, et al. (2015)). They considered the quality of signal strength to cover service area and the quality of signal to interference plus noise ratio (SINR) in the service areas. However, these existing research works have not yet considered user access data rate requirement guarantees and its capacity in case of users' number belonged to one FBS.

In this paper, we develop an optimization model for FBS placement in a multi-floor building based on integer linear programming. To cover several perspectives of this FBS placement problem, we consider the quality of signal strength in the service areas in term of the signal coverage and the user access data rate requirement. Moreover, the capacity of users' number belonged to each FBS is also considered.

The rest of the paper is organized as followed. Section 2 presents related works. Section 3 provides the problem definition and describes the problem formulation. Section 4 presents numerical results and discussion which focus on the efficiency in terms of signal strength quality from the proposed network planning models. Finally, Section 5 concludes the paper.

## 2. RELATED WORK

Several research works devoted to the study of FBS placement inside the building. Their design problems based on Integer linear programming. (Sathya, et al. (2014)) The authors considered FBS networks planning in multi-floor building and interested in the quality of signal to interference plus noise ratio (SINR) within the service area. The work in (Sathya, et al. (2015)) interested in the joint placement and power control of FBS. This research work adjusted the optimal transmission power of each FBS within the service area. (Sathya, et al. (2014), Sathya, et al. (2015)) proposed an Integer Programming formulation for the base station placement problem which deployed to the femtocell networks under the quality of SINR guarantee. However, they did not consider the capacity of number users belong to each FBS. In (Tahalani, et al. (2014)), it proposed mathematical models for counting the number of walls and floors in the building which was the main idea in this FBS network design problem. (Ramamurthy, et al. (2015)) Considered SINR between femtocell and macrocell (outdoor base station) and focused on reducing uplink transmit power while guaranteed SINR threshold. Advantages of (Tahalani, et al. (2014), Ramamurthy, et al. (2015)) are the quality of signal coverage guarantee and quality of SINR guarantee within the service area. However, these research works do not consider user access data rate requirement guarantee.

In this paper, we propose a novel femtocell network design approach. The proposed technique aims to solve the FBS placement problem for the 4G-LTE networks that can guarantee the network signal coverage and the physical bit rate to the target users. Furthermore, this technique guarantees a number of users which FBS can support.

## 3. METHODOLOGY

We proposed Integer Linear Programming (ILP) model to solve optimal placement of FBSs for 4G-LTE networks in multi-floor buildings. This work is divided into two phases. The first phase aims to determine the minimum number of FBS to be installed in the target service area.

We considered the quality of signal strength in the service area in term of the signal coverage and the user access data rate requirement. In addition, the capacity of FBS was considered. In the second phase, we aimed to

determine optimal FBS placement in multi-floor building using the minimum number of FBSs from the first phase's solution.

### 3.1 Problem Formulation

#### Phase one: Minimize the number of FBS

In the networks design model, we need to explore the minimum number of FBS to be installed in building. Table 1 defines notation used in our mathematical formulation. The proposed optimization formulation consists of the objective function, see Eq. (1) and constraints, see Eq. (2) - Eq. (11). Therefore, the objective of the first phase is minimizing the total number installed FBSs. This can be written as the objective function, see Eq. (1).

$$\text{minimize } \sum_{a \in B} b_a \quad (1)$$

Table 1 Notation

Sets:	
$B$	A set of candidate sites to install FBSs
$D$	A set of signal test points (STPs)
$T$	A set of User (Users)
Decision variables:	
$b_a$	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the FBS is installed at site $a, a \in B$ ; 0 otherwise
$s_{ja}$	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the STP $j$ is assigned to BS $a, j \in D$ and $a \in B$ ; 0 otherwise
$u_{ia}$	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the User $i$ is assigned to BS $a, i \in T$ and $a \in B$ ; 0 otherwise
Constraint parameters:	
$P_{ja}$	The signal strength that a STP $j$ receives from FBS $a, j \in D$ and $a \in B$
$P_{ia}$	The signal strength that a user $i$ receives from FBS $a, i \in T$ and $a \in B$
$P_T$	The received signal strength threshold for STPs
$P_U$	The received signal strength threshold for users
$C_a$	Maximum capacity of FBS
$N_{one}$	Sufficient number of FBSs

Equational conditions can be divided into three group of constraints, denoted Group 1, Group 2 and Group 3. Group 1 consists of constraints that ensure the signal coverage in the service area, see Eq. (2) - Eq. (4). Group 2 consists of constraints that ensure the user access data rate requirement in the service area, see Eq. (5) - Eq. (7). Moreover, Group 3 consists of constraint that guarantees the capacity of FBS, see Eq. (8).

Constraints:

Group 1: Signal coverage

$$\sum_{\forall a \in B} s_{ja} \geq 1, \forall j \in T \quad (2)$$

$$s_{ja} \leq b_a, \forall j \in T, \forall a \in B \quad (3)$$

$$s_{ja}(P_{ja} - P_T) \geq 0, \forall j \in T, \forall a \in B \quad (4)$$

Equation (2) ensures that each STP connect to at least one FBS. Equation (3) specifies that STPs  $j$  can connect to FBS  $a$  if an FBS  $a$  is installed. Equation (4) ensure that the signal strength received at STP  $j$  from FBS  $a$  must be greater than the threshold  $P_T$ .

Group 2: User access data rate requirement guarantees

$$\sum_{\forall a \in B} u_{ia} \geq 1, \forall i \in D \quad (5)$$

$$u_{ia} \leq b_a, \forall i \in D, \forall a \in B \quad (6)$$

$$u_{ia}(P_{ia} - P_U) \geq 0, \forall i \in D, \forall a \in B \quad (7)$$

Equation (5) ensures that each user connect to at least one FBS. Equation (6) specifies that users  $i$  can connect to FBS  $a$  if an FBS  $a$  is installed. Equation (7) ensure that the signal strength received at user  $i$  from FBS  $a$  must be greater than the threshold  $P_U$ .

Group 3: Capacity of FBS guarantees

$$\sum_{\forall i \in D} u_{ia} \leq C_a, \forall a \in B \quad (8)$$

Equation (8) guarantees that number of users can connected to FBS must lower than or equal to maximum capacity of FBS.

$$k_a \in \{0,1\} \quad (9)$$

$$s_{aj} \in \{0,1\} \quad (10)$$

$$u_{ai} \in \{0,1\} \quad (11)$$

Finally, whereas the bounds on the binary decision variable are given in Equation (9) - (11).

#### Phase two: Maximize the level of the received signal strength

The goal of this phase is to find optimal placement of FBS. So, the objective of the second phase is to maximize the summation of the signal strength received at all STPs from all FBS to be installed. This can be written as the objective function, see Eq. (12).

$$\text{maximize } \sum_{\forall j \in T} \sum_{\forall a \in B} S_{ja} P_{ja} \quad (12)$$

Constraints:

The development of mathematical equations to achieve the desired objectives function consists of three group of constraints same as the phase one (Constraint (2) - (11)). Moreover, the additional condition defined the number of FBS which can be installed in the building must

not over than minimized number of FBS from phase one. This can be written as (13).

$$\sum_{\forall a \in B} b_a \leq N_{one} \quad (13)$$

## 4. EXPERIMENTS SETUP

In this section, we first explain the numerical study and parameters used in a numerical experiment. Path loss model used in this work will be discussed Section 4.2. Section 4.3 show results of experimental results and analysis.

### 4.1 Description

In the experiment of optimal FBS placement, we have simulated in a two-story building of 75 m x 75 m x 3 m dimension. Each floor has the same wall structure as depicted in Figure 1. The number of candidate site to install FBS is 392 (grid size of 5 m x 5 m) as depicted by the blue hollow triangle symbol in Figure 1. There are total 648 STPs, with 324 STPs on each floor (grid size of 4 m x 4 m) as depicted by the plus sign symbol and total users 140 USERS, with 70 USERS distribution density of users on each floor as depicted by the green filled circle symbol in Figure 1. Table 2 shows parameters used in the numerical studies. Table 3 shows the relationship between modulation, physical access rate and received signal strength to define of modulation techniques for achieving a certain physical access rate (Thiagarajah, et al. (2013)). Thus, access data rate and signal coverage can be defined refer to Table 3.

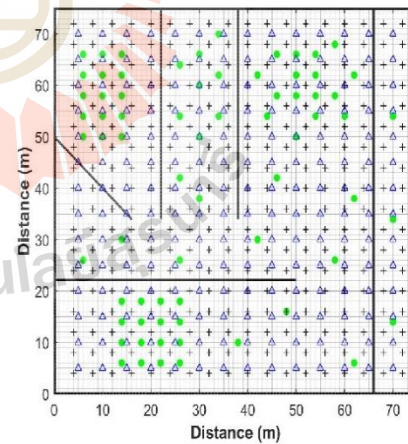


Fig 1. Experimental setup on each floor

Table 2 Parameters Used in Numerical Experiments

Parameters	Value
Transmitted Power	5 dBm
Height of FBSs	2 m
Height of STPs	0.8 m
Height of USERS	0.8 m
Building dimension	75 m x 75 m x 3 m
wall loss	5 dB
Frequency	2.6 GHz
Bandwidth	20 MHz
Total Users	140 User
capacity of FBSs	32 User / FBS
Data rate requirement for STPs (Powertec Telecommunications Pty (2014))	25.20 Mbps
Data rate requirement for USERS (Powertec Telecommunications Pty (2014))	75.60 Mbps

Table 3 Receiver Sensitivity Threshold  
for Physical Bit Rate Requirement

index	Modulation techniques	Physical Data rate (Mbps) LTE (20MHz)	Receiver sensitivity threshold (dBm)
1	QPSK 1/8	4.20	-103.535
2	QPSK 1/4	8.40	-100.135
3	QPSK 1/2	16.80	-96.4348
4	QPSK 3/4	25.20	-92.9348
5	16 QAM 1/8	33.60	-90.5348
6	16 QAM 3/4	50.40	-86.2348
7	64 QAM 2/3	67.20	-83.1348
8	64 QAM 3/4	75.60	-80.9348

#### 4.2 Path loss model

The planned network is intended to provide the service more efficiently. Received signal strength from the FBS is one of the key parameters indicative of the performance of network services. Therefore, the purpose of using the path loss model is calculate attenuation of the signal. This work using path loss model by 3GPP standard (The 3rd Generation Partnership Project) (Vardhan, et al. (2014)), which is expressed by Eq. (14).

$$PL = 40.7412 + 20 \log_{10}(R) + 0.7 d_{2d,indoor} + 18.3^{((n+2)/(n+1)-0.46)} + qL_{iw} \quad (14)$$

Where  $n$  denotes number of building floor.  $R$  is distance between STPs and FBSs.  $d_{2d,indoor}$  is wall thickness (0.18 m).  $n$  is number of floors.  $L_{iw}$  is wall loss and  $q$  is number of wall between FBS and STP.

#### 4.3 Results and Analysis

Our experiment is divided into two phases, as mentioned in Section 3. The objective function of the first phase is defining an optimal number of installed FBSs to sufficiently serve overall study area. Subsequently, this optimal FBSs number is used as the constraint to develop a new objective function in the second phase for finding the optimal placement of FBSs.

We input the set of FBS candidate sites and other parameters to our mathematical model and solved by IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.4 solver. Then, we use MATLAB for analyzing and presenting experimental results, for easier understand.

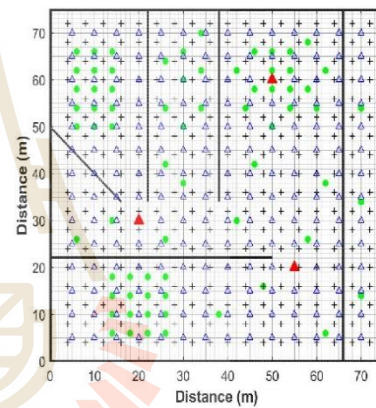
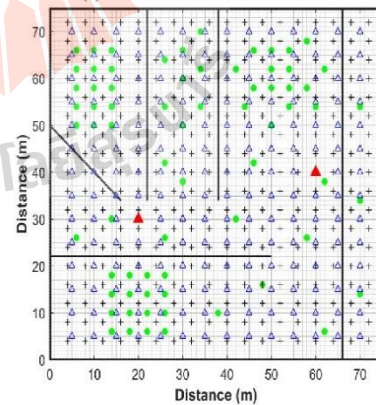
(a) Selected FBS site on 2<sup>nd</sup> floor(b) Selected FBS site on 1<sup>st</sup> floor

Fig 2. Selected FBS sites for installation

The results of phase 1 illustrate that FBSs are placed near each other. As a result, some of STPs are far from a group of FBS. Although the faraway STPs receive enough receive signal strength, the received signal is weaker than STPs placed near FBS. Phase 2 developed the mathematical equation for the optimal placement of FBSs. It can ensure the quality of the received signal strength to cover most of the services area.

Figure 2 shows the selected positions to install FBS site in building as depicted by the red filled triangle symbol. Results of phase 2 are obtained from CPLEX optimization solver. There are two FBS sites installed on the 1<sup>st</sup> floor and three FBS sites installed on the 2<sup>nd</sup> floor.

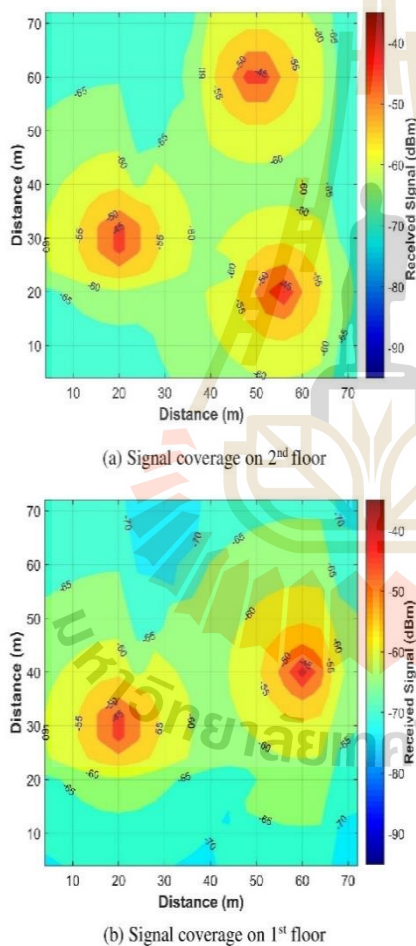


Fig 3. Signal coverage of service areas

Figure 3 shows maximum received signal strength of STPs each floor. It presents an overview of signal cover in the service area. The mean of received signal strength of STPs for 1<sup>st</sup> floor and 2<sup>nd</sup> floor are -63.27 dBm and -61.03 dBm respectively. The signal strength result can achieve 100% service coverage throughout the service area.

Figure 4 illustrates the comparison between phase 1 and phase 2 in terms of the cumulative distribution function (CDF) of maximum received signal strength at STPs. The result shows that received signal strength of STPs from phase 2 (-62.15 dBm) better than phase 1 (-65.22 dBm) because installed FBSs are more distributed. In contrast, installed FBS of phase 1 are placed in cluster form which leads poor signal quality in some area and makes the high variance of the received signal strength.

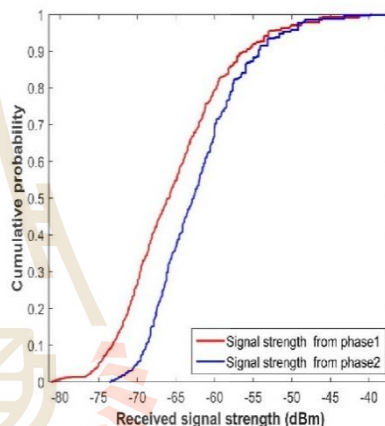


Fig 4. CDF of signal strength of phase 1 and phase 2.

5. CONCLUSION

This paper presented a novel mathematical model for optimal FBSs placement of 4G-LTE network in a multi-floor building. We simulated two-floor building for being our study area. The optimization problem was formulated using Integer Linear Programming and calculated by ILOG CPLEX Program. From numerical results, our proposed mathematical model can minimize the number of FBSs and optimize locations of installed FBSs effectively. The proposed techniques can be effectively applied for placing 4G-LTE FBSs on the real network topology. The 4G-LTE network planner only selects suitable parameters considering structural characteristics of each building and density of users inside the building. Our future works will consider other material wall loss parameters of the indoor environment. We aim to improve FBS placement in multi-floor building by effectively finding more optimal locations of FBSs.



### The 11th SEATUC Symposium

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the research fund from Suranaree University of Technology, Thailand

#### REFERENCES

Kojima, Y., Suga, J., Kawasaki, T., Okuda, M. and Takechi, R., LTE-WiFi Link Aggregation at Femtocell Base Station, *World Telecommunications Congress*, pp. 1-6, 2014.

Nagashree, N., Rao, V. and Shanavas, I.H., Femto Cells-A New Generation Cellular Stations, *Universal Journal of Communications and Network*, vol. 1, no. 1, pp. 9-15, 2013.

Baseshankar, A., and Khapre, S., Femtocells Technology, *National Conference on Innovative Paradigms in Engineering & Technology (NCIPET)*, pp. 7-11, 2012.

Sathya, V., Ramamurthy, A., and Tamma, B.R., On Placement and Dynamic Power Control of Femtocells in LTE HetNets, *Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 4394-4399, 2014.

Sathya, V., Ramamurthy, A., and Tamma, B.R., Joint Placement and Power Control of LTE Femto Base Stations in Enterprise Environments, *IEEE International Conference on Computing Networking and Communications (ICNC)*, pp. 1029-1033, 2015.

Tahalani, M., Sathya, V., Ramamurthy, A., Suhas, U.S., Giluka, M.K. and Tamma, B.R., Optimal Placement of Femto Base Stations in Enterprise Femtocell Networks, *IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, pp. 1-6, 2014.

Ramamurthy, A., Sathya, V., Venkatesh, V., Ramji, R., and Tamma, B.R. (2015). Energy-efficient Femtocell Placement in LTE Networks, *Electronics, IEEE International Conference on Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, pp. 1-6, 2015.

Thiagarajah, S.P., Ting, A., Chieng, D., and Alias, M.Y., User Data Rate Enhancement Using Heterogeneous LTE-802.11n Offloading in Urban Area, *IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA)*, pp. 11-16, 2013.

Powertec Telecommunications Pty., *Mobile Network Guide Improving Mobile Signal*, australia: Powertec, Telecommunications, 2014.

Vardhan, C.S., Ratnam, D.V., Bhagyasree, N., and Dattu, A.H., Analysis of path loss models of 4G femtocells, *Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, pp. 1-6, 2014.

#### PHOTOS AND INFORMATION



**Prachya Chamnanka** received the B.E. (2012) degrees in Telecommunication Engineering from Suranaree University of Technology. He currently is studying master degree of Telecommunication Engineering, faculty of Engineering, Suranaree University of Technology. During 2012 – 2013, he worked as a network engineer at Jasmine International Public Co, Ltd, a leading telecommunication company of Thailand. His Current interests include femtocell network design, 4G-LTE cellular networks and cellular network performance optimization.



**Chitapong Wechtaisong** received B.Eng (2006) and M.Eng (2011) in Telecommunication Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand. He received Ph.D. in Information and Communication Engineering, Functional Control Systems from Shibaura Institute of Technology, Japan in 2016. Currently he is a lecturer at the Faculty of Industrial Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Thailand



**Chutima Prommak** received B.Eng (Hons) in Electrical Engineering from Khon Kaen University, Thailand in 1992. She received M.Sc. and Ph.D. in Telecommunications from University of Colorado at Boulder, CO, USA in 1998 and University of Pittsburgh, PA, USA in 2004, respectively. Currently she is an assistant professor in Suranaree University of Technology, Thailand.

## ประวัติผู้เขียน

นายปรัชญา ชำนาญคำ เกิดเมื่อวันที่ 18 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2533 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1 - 6 จากโรงเรียนบ้านโคกกลาง (วรนาถประชาสรรค์) และระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 6 แผนกวิทยาศาสตร์ - คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนคำเขื่อนแก้วชนูปถัมภ์ จังหวัดยโสธร จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีพุทธศักราช 2552 หลังจากสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในปีพุทธศักราช 2555 ได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรเครือข่าย (Network Engineer) ที่บริษัท จัสมิน อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล จำกัด (มหาชน) มีหน้าที่รับผิดชอบในการดูแลระบบเครือข่ายให้ลูกค้าของบริษัท รวมถึงควบคุมและแก้ปัญหาเครือข่ายของบริษัท เป็นเวลา 1 ปี หลังจากนั้นได้มีความสนใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ด้านการออกแบบและวางแผนเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ภายในอาคาร จึงได้สมัครเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระหว่างศึกษาได้เสนอบทความเข้าร่วมประชุมในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) ณ โรงแรมวรบุรี อโยธยา คอนเวนชัน รีสอร์ท จังหวัดพระนครศรีอยุธยา วันที่ 18 - 20 พฤศจิกายน 2558, งานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 39 (EECON-39) ณ โรงแรมเดอะรีเจนท์ ชะอำบีช รีสอร์ท หัวหิน จังหวัดเพชรบุรี วันที่ 2 - 4 พฤศจิกายน 2559 และงานประชุมวิชาการนานาชาติ 11<sup>th</sup> Southeast ASEAN Technical University Consortium Symposium ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีโฮจิมินห์ซิตี้ ประเทศเวียดนาม วันที่ 13 - 14 มีนาคม 2560 โดยมีรายละเอียดดังภาคผนวก ข