

การกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการอบอุ่น
จำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์ 4G-LTE ภายในอาคารหลายชั้น



นายพีระสันต์ ทวีภาวิไล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**POWER LEVEL ASSIGNMENT AND BASE STATION
PLACEMENT USING SIMULATED ANNEALING
FOR 4G-LTE FEMTOCELL NETWORK
IN MULTI-FLOOR BUILDING**



**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 2018

การกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการบออ่อนจำลอง
สำหรับเครือข่าย 4G-LTE เฟมโตะเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบบัณฑิตวิทยาลัย



(ผศ. ดร. วิภาวี หัตถกรรม)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาบัณฑิตวิทยาลัย)



(ดร. กมล เขมะรังษี)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

PEERASAN THAWEEPHAWILAI : POWER LEVEL ASSIGNMENT
AND BASE STATION PLACEMENT USING SIMULATED
ANNEALING FOR 4G-LTE FEMTOCELL NETWORK IN MULTI-
FLOOR BUILDING. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. MONTHIPPA
UTHANSAKUL, Ph.D. 150 PP.

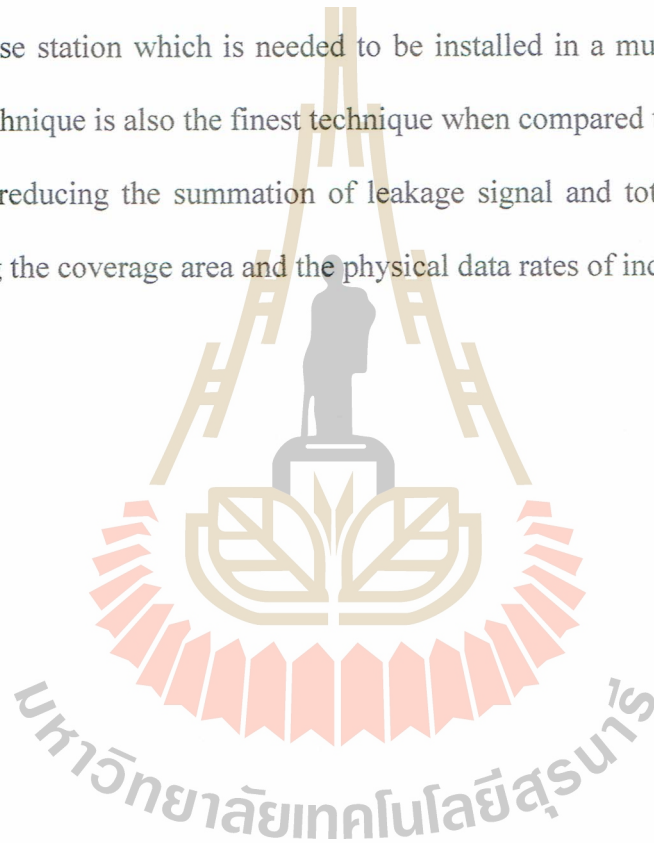
NETWORK PLANNING/POWER LEVEL ASSIGNMENT/BASE STATION
PLACEMENT/LINEAR PROGRAMMING/SIMULATED ANNEALING/4G-LTE
FEMTOCELL NETWORKS

Currently, the application of femtocell technology with 4G-Long Term Evolution technology has an important role in increasing the performance of the communication system according to the various requirements of users. A femtocell is a small, low-power base station used for indoor installation in order to reduce the amount of traffic at the macrocell base station. In additions, the femtocells can help extend the service coverage to the indoor service areas where the radio signal from the outdoor base stations could be limited or unavailable. As suitable power level assignment and base station placement affect the signal strength, the physical data rate of users and the leakage signal that emitted out around the building. It is therefore important to determine the proper number, placement location and power level of femtocells to install.

This research proposes a technique of power level assignment and base station placement using simulated annealing for 4G-LTE femtocell network in a multi-floor building. The proposed technique is an integration between Linear Programming (LP) and Simulated Annealing (SA) heuristic technique called the Minimum Summation of

Leakage Signal-Simulated Annealing (MSLS-SA). The proposed technique aims to minimize the summation of a leakage signal from an installed femtocell to outdoor areas around the building. Besides, we consider the conditions of the warranty service coverage area, the physical data rate of users and the number of femtocells needed to serve the users.

The results show that the proposed technique can minimize the number of femtocell base station which is needed to be installed in a multi-floor building. The proposed technique is also the finest technique when compared to the other techniques in terms of reducing the summation of leakage signal and total power usage while guaranteeing the coverage area and the physical data rates of indoor users.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature 

Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก อดีตอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ล่วงลับ ที่เมตตากรุณาให้โอกาสทางการศึกษา อบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือ สนับสนุนในการทำการศึกษางานวิจัย และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดในขณะที่ยังดำรงตำแหน่งเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ตลอดจนข้อคิดที่ดีและเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้จนเสร็จสมบูรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม อาจารย์ ดร.เศรษฐวิทย์ ภูญาษา และอาจารย์ ดร.จิตพงศ์ เวชไชยสงค์ คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้กำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้โอกาสในการศึกษาและสนับสนุนทุนการศึกษาในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้การสนับสนุนทางการศึกษาและกำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษา

พระสันต์ ทวีภาวิไล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	5
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน.....	5
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	6
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	6
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	6
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	6
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	7
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	7
1.8 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้.....	7
1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	8

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2	ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1	กล่าวนำ	9
2.2	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.3	โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์	17
2.4	เทคโนโลยีแอลทีอี	18
2.4.1	เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ	18
2.4.2	เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์	19
2.5	แบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคาร	20
2.6	การโปรแกรมเชิงเส้น	21
2.6.1	ข้อสมมุติฐานสำคัญในการโปรแกรมเชิงเส้น	22
2.6.2	รูปแบบมาตรฐานของการโปรแกรมเชิงเส้น	23
2.6.3	ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นมาตรฐาน	24
2.6.4	คุณสมบัติของรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้น	24
2.6.5	การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหา	25
2.6.6	ตัวอย่างการกำหนดปัญหา	26
2.7	การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริทึมซิมเพล็กซ์	29
2.7.1	ขั้นตอนของวิธีซิมเพล็กซ์	30
2.8	การค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก	36
2.8.1	การค้นหาคำตอบด้วยกริดอีลกอริทึม	37
2.8.2	การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน	38
2.8.3	การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรม	39
2.8.4	การหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาค	40
2.8.5	การค้นหาคำตอบด้วยการอบอ่อนจำลอง	41
2.9	สรุปท้ายบท	42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	เทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการ	
	บออ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์ 4G-LTE ภายในอาคารหลายชั้น	43
3.1	แนวคิดสำหรับการออกแบบเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการบออ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น	44
3.2	แนวทางการออกแบบเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการบออ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น	44
3.3	โครงสร้างของเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการบออ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น	47
3.3.1	ข้อมูลเริ่มต้น	51
3.3.1.1	จำนวนและตำแหน่งจุดทดสอบสัญญาณ	51
3.3.1.2	จำนวนและตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้	51
3.3.1.3	ค่าความสูญเสียตามระยะทางระหว่างจุดทดสอบและสถานีฐาน	51
3.3.1.4	ขนาดของพื้นที่ให้บริการในแต่ละชั้น	51
3.3.2	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	51
3.3.3	ขั้นตอนการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เริ่มต้น (Phase 1)	53
3.3.3.1	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	55
3.3.3.2	สมการเงื่อนไข	55
3.3.4	ขั้นตอนการหาระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการบออ่อนจำลอง (Phase 2)	57
3.3.4.1	รูปแบบของคำตอบ	57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.4.2	ฟังก์ชันการประเมินผล.....	57
3.3.4.3	การย้ายตำแหน่งใหม่.....	58
3.3.4.4	การตรวจสอบเงื่อนไข.....	60
3.3.4.5	การเปรียบเทียบฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	60
3.3.4.6	ความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่แย่กว่าเดิม.....	60
3.3.4.7	เกณฑ์การหยุด.....	61
3.4	การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอบอุ่นจำลอง.....	62
3.4.1	การกำหนดค่าพารามิเตอร์.....	63
3.4.2	พื้นที่การทดลอง.....	64
3.4.3	ผลการทดลอง.....	67
3.4.3.1	ประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$	72
3.4.3.2	ประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ φ	72
3.4.3.3	ประสิทธิภาพของเกณฑ์การหยุดทำงานของกระบวนการอบอุ่นจำลอง.....	72
3.5	สรุปท้ายบท.....	74
4	การทดลองและวิเคราะห์ผล.....	78
4.1	การทดลองเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นด้วยเทคนิคที่นำเสนอ.....	78
4.1.1	การทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1.....	81
4.1.1.1	ผลการทดลอง.....	83
4.1.2	การทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1.....	90
4.1.2.1	ผลการทดลอง.....	92
4.2	การทดลองเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จากเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นที่นำเสนอเทียบกับเทคนิคอื่น.....	99

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1	การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จากเทคนิคที่นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการ โปรแกรมเชิงเส้น.....	105
4.2.2	การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จากเทคนิคที่นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน.....	107
4.2.3	ผลการทดลอง.....	108
4.2.4	การเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากเทคนิคที่นำเสนอกับการติดตั้งจุดเชื่อมต่อไร้สายสำหรับเครือข่ายไวไฟภายในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1.....	116
4.3	สรุปท้ายบท.....	118
5	สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	119
5.1	สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	119
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	120
5.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	121
	รายการอ้างอิง.....	122
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลค่ามาตรฐานคุณภาพความแรงสัญญาณสำหรับเทคโนโลยี 4G-LTE ข้อมูลพื้นฐานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ และจุดเชื่อมต่อแบบไร้สายสำหรับเครือข่ายไวไฟภายในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1.....	125
	ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	129
	ประวัติผู้เขียน.....	150

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปปรีทัศน์วรรณกรรม..... 15
2.2	ค่าความสูญเสียของสัญญาณทะลุผ่านกำแพงประเภทต่างๆ..... 21
2.3	กำไรที่ได้จากการขายสินค้าจากโรงงานผลิต..... 26
2.4	กำไรที่ได้จากการขายสินค้าของบริษัทไทยพัฒนา..... 28
2.5	ตารางซิมเพล็กซ์ของกำหนดการเชิงเส้น..... 31
2.6	ตัวแปรมูลฐานเข้า คือตัวแปร X_2 32
2.7	ตัวแปรมูลฐานออก คือตัวแปร S_2 32
2.8	สัมประสิทธิ์ของทุกตัวแปรในแถวหลักใหม่..... 32
2.9	ค่าตัวแปรมูลฐานใหม่..... 33
2.10	ตัวแปรเข้าคือ X_1 ตัวแปรออกคือ S_3 34
2.11	ตารางซิมเพล็กซ์ที่สมบูรณ์ของปัญหา..... 35
3.1	Pseudo code ของเทคนิค MSLS-SA..... 49
3.2	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง..... 52
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วทางกายภาพและระดับสัญญาณ ขั้นต่ำในการรักษาอัตราเร็วทางกายภาพ..... 52
3.4	ตัวแปรที่ใช้ในขั้นตอนการหาจำนวนสถานีฐานเฟม โดเซลล์ ระดับกำลังส่งและ ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์เริ่มต้น (Phase 1)..... 53
3.5	การควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 1..... 68
3.6	การควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 2..... 70
3.7	ค่าประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบ โดยมีค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ เท่ากับ 0.8 และ ค่าพารามิเตอร์ φ เท่ากับ 0.9 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1..... 73
3.8	ค่าประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบ โดยมีค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ เท่ากับ 0.8 และ ค่าพารามิเตอร์ φ เท่ากับ 0.9 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2..... 73
4.1	ผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1..... 81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.2 ผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1.....	83
4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ในการทำงานเฟสที่ 2.....	84
4.4 ผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1.....	88
4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ในการทำงานเฟสที่ 1.....	90
4.6 ผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2.....	92
4.7 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ในการทำงานเฟสที่ 2.....	94
4.8 ผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2.....	97
4.9 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแต่ละกรณี.....	100
4.10 การเปรียบเทียบผลการค้นหาคำตอบของทั้งสามเทคนิค.....	109
4.11 ผลการกำหนดตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของ ทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 2.....	113
ก.1 มาตรฐานคุณภาพความแรงสัญญาณสำหรับเทคโนโลยี 4G-LTE.....	126
ก.2 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญของสถานีฐาน.....	127
ก.3 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญของจุดเชื่อมต่อไร้สาย.....	128

สารบัญรูป

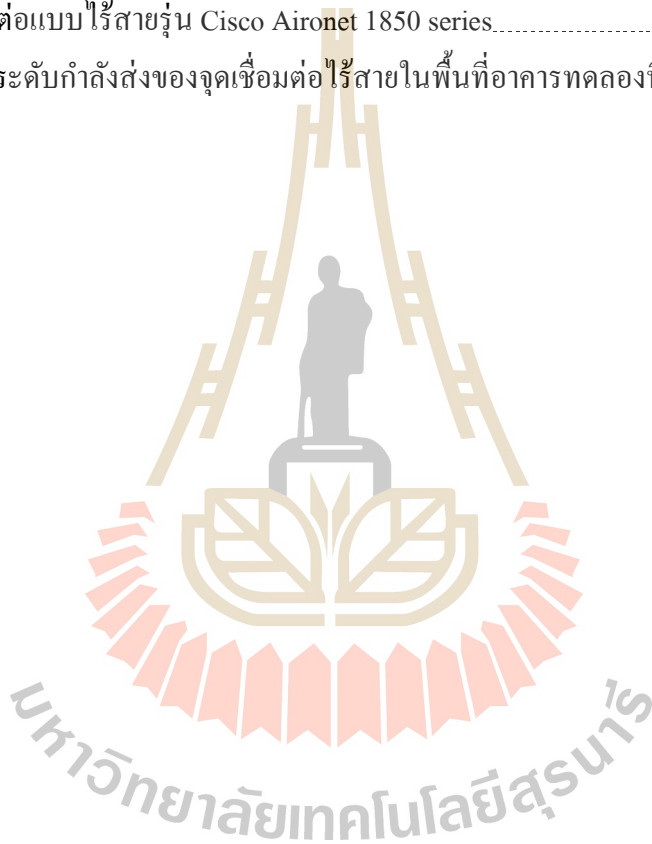
รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์..... 17
2.2	เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ..... 19
2.3	เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำแบบซอฟต์แวร์..... 19
2.4	โครงสร้างแสดงการแลกเปลี่ยนด้วยกริดอีล็กทริกทีม..... 37
2.5	ตัวอย่างการจัดกลุ่มข้อมูลด้วยอีล็กทริกทีมการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน..... 38
3.1	กระบวนการสำหรับการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน เฟมโตเซลล์..... 46
3.2	แผนภาพการทำงานของเทคนิค MSLS-SA..... 48
3.3	วิธีการย้ายตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ใหม่ด้วยโครงสร้างแบบ 3 มิติ..... 59
3.4	วิธีการปรับระดับกำลังส่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ใหม่..... 59
3.5	พื้นที่อาคารทดลองที่ 1..... 65
3.6	พื้นที่อาคารทดลองที่ 2..... 66
3.7	ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับพื้นที่อาคารทดลองที่ 1..... 75
3.8	ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับพื้นที่อาคารทดลองที่ 2..... 76
4.1	แผนผังพื้นที่อาคารทดลองที่ 1..... 79
4.2	แผนผังพื้นที่อาคารทดลองที่ 2..... 80
4.3	ตำแหน่งของพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ในการทำงานเฟสที่ 1..... 82
4.4	ผลการค้นหาคำตอบจากเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1..... 84
4.5	ตำแหน่งของพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ในการทำงานเฟสที่ 2..... 86
4.6	ผลการค้นหาคำตอบจากเฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1..... 87
4.7	กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบความแรง สัญญาณและผู้ใช้งานได้รับในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1..... 88
4.8	ผลรวมความแรงสัญญาณรบกวนรบกวนรบกวนรบกวนรบกวนรบกวนรบกวนรบกวนรบกวน และเฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1..... 89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลรวมระดับกำลังส่งของคำตอบที่ได้จากการทำงานเฟสที่ 1 และ เฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1.....	89
4.10 ตำแหน่งของพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ในการทำงานเฟสที่ 1.....	91
4.11 ผลการค้นหาคำตอบจากเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2.....	93
4.12 ตำแหน่งของพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ในการทำงานเฟสที่ 2.....	95
4.13 ผลการค้นหาคำตอบจากเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2.....	96
4.14 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบความแรงสัญญาณและผู้ใช้งานได้รับในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1.....	97
4.15 ผลรวมความแรงสัญญาณรบกวนรบกวนรั่วไหลของคำตอบที่ได้จากการทำงานเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2.....	98
4.16 ผลรวมระดับกำลังส่งของคำตอบที่ได้จากการทำงานเฟสที่ 1 และ เฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2.....	98
4.17 กรณีสที่ 1.....	100
4.18 กรณีสที่ 2.....	101
4.19 กรณีสที่ 3.....	102
4.20 กรณีสที่ 4.....	103
4.21 กรณีสที่ 5.....	104
4.22 ผลการค้นหาคำตอบด้วยวิธี UB-LP ในกรณีสที่ 2.....	110
4.23 ผลการค้นหาคำตอบด้วยวิธี KM-SA ในกรณีสที่ 2.....	111
4.24 ผลการค้นหาคำตอบด้วยวิธี MSLS-SA ในกรณีสที่ 2.....	112
4.25 กราฟเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบในพื้นที่อาคารทดลอง กรณีสที่ 1 - 5.....	114
4.26 กราฟเปรียบเทียบจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งในพื้นที่อาคารทดลองกรณีสที่ 1 - 5.....	114
4.27 กราฟเปรียบเทียบค่าผลรวมความแรงสัญญาณรบกวนรั่วไหลในพื้นที่อาคารทดลอง กรณีสที่ 1 - 5.....	115

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28	กราฟเปรียบเทียบค่าผลรวมของระดับกำลังส่งในพื้นที่อาคารทดลองกรณีที่ 1 - 5.....116
4.29	ตัวอย่างระดับกำลังส่งของจุดเชื่อมต่อไร้สายในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1.....117
ก.1	สถานีฐานเฟมโตเซลล์รุ่น Cisco Universal Small Cell 8738 (USC 8738).....127
ก.2	จุดเชื่อมต่อแบบไร้สายรุ่น Cisco Aironet 1850 series.....128
ก.3	ตัวอย่างระดับกำลังส่งของจุดเชื่อมต่อไร้สายในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1.....129



บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีสี่จีแอลทีอี (4G-Long Term Evolution, 4G-LTE) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการรับ-ส่งข้อมูล ให้ตอบสนองต่อความต้องการในการใช้งานที่หลากหลายของผู้ใช้งานนอกเหนือจากการโทรเพียงอย่างเดียว เช่น การใช้งานแอปพลิเคชันสำหรับการสนทนา หรือการเข้าถึงสื่อมัลติมีเดียต่างๆ สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้เกิดปริมาณข้อมูลจำนวนมากในระบบสื่อสาร ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ (femtocell) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญสำหรับการเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบสื่อสาร V. Chandrasekhar, J. G. Andrews and A. Gatherer. (2008) โดยเฟมโตเซลล์นั้นเป็นสถานีฐานโทรศัพท์มือถือขนาดเล็ก ที่มีกำลังส่งสัญญาณที่ต่ำ ทำงานด้วยย่านความถี่ที่หน่วยงานกำกับดูแลด้านกิจการ โทรคมนาคมของประเทศ (คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการ โทรทัศน์ และกิจการ โทรคมนาคมแห่งชาติ: กสทช) เป็นผู้กำหนด ใช้สำหรับติดตั้งภายในอาคารเพื่อช่วยลดปริมาณทราฟฟิกให้สถานีฐานมาโครเซลล์ (macrocell) และเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมการให้บริการในบริเวณเล็กๆ หรือจุดอับสัญญาณ เช่น ภายในที่พักอาศัย ห้างสรรพสินค้า หรือสำนักงาน ซึ่งเป็นจุดที่มีจำนวนผู้ใช้งานอาศัยอยู่หนาแน่น และยังเป็นจุดที่สัญญาณจากสถานีฐานมาโครเซลล์ที่ตั้งอยู่ภายนอกอาคารส่งมาไม่ถึง เนื่องจากภายในอาคารมีโครงสร้างที่ซับซ้อน มีจำนวนหลายชั้น และมีสิ่งกีดขวางการเดินทางของสัญญาณ Y. Li, H. Celebi, M. Daneshmand, C. Wang and W. Zhao. (2013) การติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในอาคารจะช่วยให้ผู้ใช้งานได้รับอัตราเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลที่สูงขึ้น และช่วยเพิ่มช่องสัญญาณให้เพียงพอสำหรับรองรับจำนวนผู้ใช้งานภายในอาคาร

ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารเมื่อมีการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง และกำลังส่งของเฟมโตเซลล์ที่ไม่เหมาะสมคือ พื้นที่ครอบคลุม (coverage area) ของสัญญาณภายในอาคารไม่ทั่วถึง ไม่สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และ

เกิดสัญญาณรบกวนต่อผู้ใช้บริการที่อยู่บริเวณรอบนอกอาคารเนื่องจากสัญญาณที่รั่วไหล (leakage signal) จากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ออกไปภายนอกอาคาร ดังนั้นการพัฒนาวิธีสำหรับการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ต้องติดตั้ง ตำแหน่งติดตั้ง และกำลังส่งที่เหมาะสมของสถานีฐานเฟมโตเซลล์จึงเป็นประเด็นที่ควรให้ความสนใจ เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อความแรงสัญญาณ อัตราเร็วข้อมูลของผู้ใช้งานภายในพื้นที่ให้บริการ สัญญาณที่รั่วไหลออกไปภายนอกบริเวณอาคาร อีกทั้งการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมยังช่วยทำให้ค่าใช้จ่ายสำหรับการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เกิดประโยชน์สูงสุด

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า มีหลายงานวิจัยที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร รวมถึงผลกระทบจากการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ได้แก่ ในงานวิจัยของ I. Shgluof, M. Ismail and R. Nordin. (2013) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของเครือข่ายในด้านสัญญาณครอบคลุมและความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลของผู้ใช้งานที่จะได้รับการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยตำแหน่งติดตั้งที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยของ F. Cao and Z. Fan. (2010) ได้กล่าวถึงข้อดีข้อเสีย รวมถึงวิเคราะห์ผลกระทบจากการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ว่าในการที่จะได้มาซึ่งพื้นที่สัญญาณครอบคลุมและความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลของผู้ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นนั้น ต้องแลกมาด้วยสัญญาณรบกวนจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน อีกทั้งผู้วิจัยยังได้กล่าวถึงแนวทางในการลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนดังกล่าว ด้วยการหาตำแหน่งติดตั้งและปรับระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสม

และจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมยังพบว่า มีหลายงานวิจัยที่ให้ความสนใจในการพัฒนาวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร โดยสามารถแบ่งกลุ่มงานวิจัยออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ งานวิจัยกลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มที่ใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นในการออกแบบเครือข่ายภายใต้วัตถุประสงค์และเงื่อนไขข้อจำกัดด้านต่างๆ งานวิจัยของ V. Sathya, A. Ramamurthy and B. R. Tamma. (2015) ได้ศึกษาการออกแบบการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์และการควบคุมการใช้พลังงานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร โดยมีเป้าหมายเพื่อหาจำนวนสถานีฐานที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้งภายในอาคารและทำการกำหนดกำลังส่งที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของแต่ละพื้นที่ย่อยในอาคาร และบริเวณที่มีผู้ใช้บริการ งานวิจัยของ M. Tahalani, V. Sathya, A. Ramamurthy, U. S. Suhas, M. K. Giluka and B. R. Tamma. (2014) ได้นำเสนอเทคนิคด้านการวางแผนติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร โดยมีเป้าหมายเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้เงื่อนไขด้านผลของความแรงสัญญาณที่เกิดจากจำนวนสิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับ รวมถึงเงื่อนไขด้านการรับประกันสัญญาณแทรกสอดภายในพื้นที่ของอาคาร โดยนำเสนอสมการสำหรับเทคนิคการนับจำนวนกำแพงและจำนวน

ชั้นของอาคาร แล้วนำสมการเหล่านั้นมาแปลงเป็นสมการเชิงเส้น เพื่อที่จะใช้หาคำตอบสำหรับการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยระเบียบวิธีการ โปรแกรมเชิงเส้น งานวิจัยของ A. Ramamurthy, V. Sathya, V. Venkatesh, R. Ramji and B. R. Tamma. (2015) ได้นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยมีเป้าหมายเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งและกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยการทำงานแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ การหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต้องติดตั้งภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของแต่ละพื้นที่ย่อยในอาคาร ขั้นตอนที่สองคือ ลดการใช้พลังงานในส่วนที่กำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ เพื่อรับประกันคุณภาพของสัญญาณภายในอาคาร สำหรับงานวิจัยกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มที่ใช้วิธีการฮิวริสติกอัลกอริทึม (heuristic algorithm) ในการออกแบบเครือข่ายเพื่อหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (near optimal) ได้แก่ งานวิจัยของ M. Tahalani, V. Sathya, U. S. Suhas, R. Chaganti and B. R. Tamma. (2013) ได้นำเสนอเทคนิคการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่ต้องติดตั้ง และตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารชั้นเดียว ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน และความจุช่องสัญญาณ (Shannon capacity) งานวิจัยของ M. F. Khan and B. Wang. (2014) ได้นำเสนอวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารชั้นเดียวขนาดใหญ่ที่มีสัญญาณรบกวนจากสถานีฐานไมโครเซลล์และสัญญาณรบกวนระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้งานความถี่เดียวกัน ซึ่งกระบวนการทำงานจะทำการแบ่งพื้นที่ในอาคารให้มีขนาดใกล้เคียงกัน และติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่จุดกึ่งกลางของพื้นที่ หลังจากนั้นจึงหาคำตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในบริเวณใกล้เคียง โดยมีวัตถุประสงค์คือ การใช้จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้น้อยที่สุด โดยต้องการให้มีพื้นที่สัญญาณครอบคลุมภายในอาคารมากที่สุด ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของจุดทดสอบสัญญาณภายในอาคาร และงานวิจัยของ E. Yaacoub and Z. Dawy. (2014) ได้นำเสนอวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานไมโครเซลล์ และสถานีฐานไมโครเซลล์ในเครือข่ายที่มีสถานีฐานเฟมโตเซลล์ เพื่อลดจำนวนผู้ใช้บริการที่ไม่ได้รับสัญญาณภายในเครือข่าย HetNet LTE โดยใช้วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) สำหรับงานวิจัยในกลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มที่มีการพิจารณาถึงสัญญาณรั่วไหลที่เกิดขึ้นจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ไปยังบริเวณรอบอาคาร งานวิจัยของ K. Han, Y. Choi, D. Kim, M. Na, S. Choi and K. Han. (2009) ได้นำเสนอเทคนิคการเลือกตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารขนาดสามชั้น โดยมีสองวัตถุประสงค์หลักคือ การเพิ่มผลรวมของกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้มากที่สุดภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของจุดทดสอบสัญญาณบริเวณรอบนอกอาคาร วัตถุประสงค์ถัดมาคือ การเพิ่ม

ผลรวมความจุช่องสัญญาณ (Shannon capacity) ของจุดทดสอบสัญญาณภายในอาคารให้มากที่สุด และงานวิจัยของ V. Sathya, A. Ramamurthy and B. R. Tamma. (2014), ได้เสนอเทคนิคการหาตำแหน่งติดตั้งและการกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารชั้นเดียว โดยมีการรับประกันค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของผู้ใช้บริการในอาคารและนอกอาคาร

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีหลายงานวิจัยที่พิจารณาเกี่ยวกับการเลือกวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมภายในอาคารลักษณะต่างๆ เพื่อรับประกันคุณภาพความแรงและค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนภายในพื้นที่ให้บริการ แต่ยังไม่ได้พิจารณาในส่วนของการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้งานในบริเวณที่มีการใช้งานอย่างหนาแน่นในพื้นที่ให้บริการ และข้อจำกัดด้านปริมาณของผู้ใช้ที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์สามารถรองรับได้ ยิ่งไปกว่านั้น มีงานวิจัยเพียงเล็กน้อยที่พิจารณาถึงผลกระทบจากสัญญาณที่รั่วไหลออกไปรบกวนผู้ใช้ภายนอกอาคารหลังจากติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ อีกทั้งงานวิจัยดังกล่าวยังขาดการศึกษาถึงจำนวน ตำแหน่งติดตั้ง และกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสม และยังไม่ได้พิจารณาถึงโครงสร้างที่ซับซ้อนของอาคารหลายชั้น ดังนั้นงานวิจัยที่น่าเสนอนี้ จึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่พิจารณาถึงเรื่องความแรงสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ อัตราเร็วการรับส่งข้อมูลในการให้บริการของผู้ใช้งาน ข้อจำกัดด้านความจุของผู้ใช้ในการใช้งานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในอาคารแบบหลายชั้น และสัญญาณรั่วไหลจากเฟมโตเซลล์ที่ออกไปรบกวนผู้ใช้บริการภายนอกอาคาร เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการใช้งานสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้มากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีการหาตำแหน่งสำหรับติดตั้งและกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมสำหรับเครือข่าย 4G-LTE

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1) วิธีการที่พัฒนาขึ้นสามารถลดสัญญาณรั่วไหลที่ออกไปรบกวนผู้ใช้งานภายนอกอาคารได้
- 2) วิธีการที่พัฒนาขึ้นสามารถลดจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ต้องติดตั้งให้มีน้อยที่สุดภายใต้การรับประกันค่าความแรงสัญญาณ และการรองรับผู้ใช้งานภายในอาคาร

- 3) สภาพแวดล้อมของพื้นที่ที่ทำการทดลอง เช่น สิ่งกีดขวางภายในอาคาร จะส่งผลกระทบต่อค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับ

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) สถานีฐานเฟมโตเซลล์ใช้งานที่ช่องสัญญาณต่างกันจะไม่เกิดการรบกวนกัน
- 2) ค่าความแรงสัญญาณที่ผู้ใช้งานได้รับเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการเข้าใช้บริการสถานีฐานเฟมโตเซลล์
- 3) ค่าความแรงสัญญาณที่ผู้ใช้งานได้รับเป็นตัวบ่งบอกถึงอัตราเร็วทางกายภาพของการรับ-ส่งข้อมูลของผู้ใช้งาน
- 4) สัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณนอกอาคารได้รับจากสถานีฐานถือเป็นสัญญาณรั่วไหล
- 5) สายอากาศของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในงานวิจัยนี้เป็นสายอากาศแบบรอบทิศทาง
- 6) ความถี่ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่ายสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของงานวิจัยนี้คือ 2.6 GHz (LTE Band 7)
- 7) การวิเคราะห์ค่าความแรงสัญญาณในพื้นที่ที่พิจารณา ทำโดยใช้แบบจำลองการสูญเสียตามระยะทางตามมาตรฐานของ 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) ซึ่งใช้ได้กับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่าย 4G-LTE ที่ติดตั้งภายในอาคาร

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาหลักการและทฤษฎีของวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งและกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์
- 2) ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 3) พัฒนาวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งและกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น โดยใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นและวิธีการอบอุ่นจำลอง
- 4) วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งและกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นที่พัฒนาขึ้นกับวิธีอื่นๆ

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

- 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

- 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหาตำแหน่งติดตั้งและกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์
- 3) ศึกษาการสร้างฟังก์ชันเป้าหมาย และเงื่อนไขของปัญหาให้อยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเป็นแบบเชิงเส้น เพื่อใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นและวิธีการอบอ่อนจำลองในการแก้ปัญหา
- 4) จำลองเครือข่ายสถานีฐานเฟมโตเซลล์ 4G-LTE โดยวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารในรูปแบบต่างๆ และวิเคราะห์ผล
- 5) พัฒนาวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งและกำหนดกำลังส่งที่เหมาะสมของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น โดยใช้วิธีการ โปรแกรมเชิงเส้น และวิธีการอบอ่อนจำลองในการแก้ปัญหา
- 6) วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการที่พัฒนาขึ้นกับวิธีอื่นๆ

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลจากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาเทคนิควิธีการหาตำแหน่งติดตั้งและกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์รูปแบบต่างๆ
- 3) จำลองเครือข่ายเฟมโตเซลล์ 4G-LTE และวิเคราะห์ประเมินคุณภาพตัวชี้วัดประสิทธิภาพของวางตำแหน่งสถานีฐานของแบบจำลอง
- 4) พัฒนาวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งและกำหนดกำลังส่งที่เหมาะสมของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น โดยใช้วิธีการ โปรแกรมเชิงเส้น และวิธีการอบอ่อนจำลองในการแก้ปัญหา
- 5) วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการที่พัฒนาขึ้นกับวิธีอื่นๆ

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารโทรคมนาคม อาคารเครื่องมือ 11 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย 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

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) เก็บรวบรวมค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ สร้างแบบจำลอง และใช้สร้างเป็นฐานข้อมูล
- 3) เก็บรวบรวมผลการทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะของวิธีการที่พัฒนาขึ้นและวิธีอื่นๆ โดยจะเปรียบเทียบผลว่าในแต่ละวิธี จำนวนของสถานีฐาน รวมถึงคุณภาพของสัญญาณจะส่งผลต่อผู้ใช้บริการอย่างไร

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้กับวิธีการอื่นๆ และสรุปผลออกมา ในรูปของรูปภาพและข้อมูลตารางเปรียบเทียบตัวเลข

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ ปรับปรุง และพัฒนาวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งและกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้เหมาะสมสำหรับเครือข่าย 4G-LTE

1.8 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งติดตั้งและกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่าย 4G-LTE ภายในอาคารหลายชั้น โดยใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming : LP) ร่วมกับวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) ในการแก้ปัญหา ซึ่งการกำหนดตำแหน่งติดตั้งและกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ได้ กระบวนการทำงานสำหรับการกำหนดตำแหน่งและกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย 2 ส่วนการทำงาน คือ ในส่วนแรกเป็นกระบวนการทำงานที่มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่เพียงพอสำหรับติดตั้งในพื้นที่ของอาคาร รวมถึงตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งเริ่มต้นของแต่ละสถานี ฐาน ในส่วนที่สองเป็นกระบวนการทำงานที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลรวมของสัญญาณรบกวนที่ออกไปนอกบริเวณอาคารให้มีค่าน้อยที่สุด รวมถึงการปรับตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งของแต่ละสถานีฐานอย่างละเอียด โดยใช้จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งของแต่ละสถานีฐานที่ได้คำตอบมาจากส่วนการทำงานแรกมาเป็นข้อมูลตั้งต้น โดยตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้จาก

งานวิจัยนี้จะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดผลรวมของสัญญาณรบกวนที่ออกไปนอกบริเวณอาคารมีค่าน้อยที่สุด มีสัญญาณครอบคลุมทั่วบริเวณพื้นที่ให้บริการ มีอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลสำหรับผู้ใช้งานที่มีประสิทธิภาพ รวมถึงผู้ใช้งานทั้งหมดจะสามารถเข้าใช้งานสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้

1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และนวัตกรรมของงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย การโปรแกรมเชิงเส้น การค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก

บทที่ 3 กล่าวถึงแนวคิดในการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น การกำหนดปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นสำหรับการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการแก้ปัญหาการกำหนดตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารและการอบอ่อนจำลอง

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองเพื่อการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยเทคนิคที่นำเสนอ การทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นด้วยเทคนิคที่ผู้วิจัยได้นำเสนอกับวิธีการ โปรแกรมเชิงเส้นและเทคนิคการจัดแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน และการสรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแบบหลายชั้นทั้งสามเทคนิค

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนาต่อในอนาคต

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการสร้างเทคนิคการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้นให้มีประสิทธิภาพที่ดีนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาในส่วนของปริทัศน์วรรณกรรม ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างและการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ เพื่อที่จะสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเทคนิคการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่ายสี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้ ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้ หัวข้อ 2.1 กล่าวนำ หัวข้อ 2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ หัวข้อ 2.4 แบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคาร หัวข้อ 2.5 การโปรแกรมเชิงเส้น หัวข้อ 2.6 การหาค่าตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ หัวข้อ 2.7 การค้นหาค่าตอบด้วยวิธีฮิวริสติก และหัวข้อ 2.8 สรุปท้ายบท

2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ (femtocell technology) ได้รับความนิยมและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีต้นทุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณประเภทอื่นๆ (Nagashree et al., 2013) และมีจุดเด่นด้านการขยายคุณภาพสัญญาณภายในพื้นที่ให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วยแก้ปัญหาคุณภาพสัญญาณบริเวณอาคารที่เป็นมุมอับสัญญาณที่สถานีฐานภายนอกไม่สามารถส่งสัญญาณมายังผู้ใช้งานได้

สำหรับโครงสร้างการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วนของชุมสาย (core network) และส่วนของเครือข่ายเฟมโตเซลล์ (femtocell network) ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.3 โดยเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์เป็นเสมือนตัวกลางในการเชื่อมต่อแบบไร้สายระหว่างโทรศัพท์มือถือเข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง โดยจะทำการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านตัวรับสัญญาณอินเทอร์เน็ต (DSL router) เพื่อให้สถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้งานภายในพื้นที่ให้บริการต่อไป ดังนั้นการที่จะพิจารณาตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจึงจำเป็นต้องศึกษาและเข้าใจตั้งแต่กระบวนการทำงานพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ รวมถึงคุณสมบัติต่างๆ ของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ ซึ่งเป็น

ปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อคุณภาพสัญญาณภายในเครือข่าย ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นที่การออกแบบ กำหนดตำแหน่งการวางสถานีฐานที่เหมาะสม เพื่อสามารถทำให้กระบวนการในการทำงานของ เทคโนโลยีเฟมโตเซลล์มีสมรรถนะสูงยิ่งขึ้น

2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการพิจารณาการกำหนดตำแหน่งการวางสถานีเฟมโตเซลล์ ภายในอาคารหลายชั้นอย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องศึกษาทิศทางปรัศนัศวรรณกรรม และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาโครงสร้าง หลักการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ เพื่อเป็นความรู้ และใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสำหรับงานวิจัยต่อไป ซึ่งจากการศึกษามีปรัศนัศวรรณกรรม ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.2.1 งานวิจัยของ F. Cao and Z. Fan. (2010) เป็นงานวิจัยที่อธิบายพื้นฐานและ คุณลักษณะของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่อธิบายพื้นฐานและคุณลักษณะของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ เช่น ประเภทและหลักการการทำงานของเฟมโตเซลล์ การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ร่วมกับเทคโนโลยีอื่นๆ รวมถึงประโยชน์ของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ทั้งต่อผู้ให้บริการ โทรศัพท์มือถือและลูกค้าที่ใช้บริการ เป็นต้น งานวิจัยนี้ทำให้เกิดความเข้าใจที่ดียิ่งขึ้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ และยังวิเคราะห์เปรียบเทียบถึงข้อดี ข้อเสีย และผลกระทบจากการติดตั้ง สถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับประเภทและหลักการการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ รวมถึงทราบข้อดี ข้อเสีย และผลกระทบจากการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบเครือข่ายเฟมโตเซลล์ต่อไป

2.2.2 งานวิจัยของ V. Sathya, A. Ramamurthy and B. R. Tamma. (2015) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร โดยปรับกำลังส่งให้เหมาะสมตามสภาพแวดล้อมของอาคาร

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งกำหนดปัญหาโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้น โดยมีเป้าหมายเพื่อหาจำนวนสถานีฐานที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้งภายในอาคารและทำการกำหนดกำลังส่งให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมภายในอาคาร ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนของแต่ละพื้นที่ย่อยในอาคาร และบริเวณที่มีผู้ใช้บริการ

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ จะเห็นได้ว่าการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยมีการออกแบบการทดลองให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของในอาคารที่จะทำการติดตั้งสถานีฐานนั้นมากขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเอาแนวคิดในการใช้สมการคณิตศาสตร์ด้วยการใช้แบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นมาใช้ในการออกแบบกับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ เพื่อแก้ปัญหาในการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร

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

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคด้านการวางแผนติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร ซึ่งกำหนดปัญหาโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้น โดยมีเป้าหมายเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้เงื่อนไขด้านผลของความแรงสัญญาณที่เกิดจากจำนวนสิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับ รวมถึงเงื่อนไขด้านการรับประกันค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดภายในพื้นที่ของอาคาร โดยนำเสนอสมการสำหรับเทคนิคการนับจำนวนกำแพงและจำนวนชั้นของอาคาร แล้วนำสมการเหล่านั้นมาแปลงเป็นสมการเชิงเส้น เพื่อที่จะใช้หาค่าตอบสมการคณิตศาสตร์สำหรับหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยระเบียบวิธีการ โปรแกรมเชิงเส้น

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ จะเห็นว่าเป็นการนำหลักการนับจำนวนกำแพงและจำนวนชั้นภายในอาคารมาใช้เป็นเงื่อนไขในการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งสามารถหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้นจึงสามารถนำแนวคิดจากงานวิจัยนี้มาใช้ในการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์

2.2.4 งานวิจัยของ A. Ramamurthy, V. Sathya, V. Venkatesh, R. Ramji and B. R. Tamma. (2015) เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร ที่เน้นการลดใช้พลังงานของกำลังส่งสถานีฐาน

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งกำหนดปัญหาโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้น โดยมีเป้าหมายเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งและกำหนดกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยการทำงานแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกคือ การหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต้องติดตั้งและตำแหน่งสำหรับติดตั้งภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวก

สัญญาณรรบวงของแต่ละพื้นที่ย่อยในอาคาร ขั้นตอนที่สองคือ ทำการลดการใช้พลังงานในส่วน
ของกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด
บวกสัญญาณรรบวงของผู้ใช้ เพื่อที่จะรับประกันคุณภาพของสัญญาณแทรกสอดภายในอาคาร

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าให้ความสำคัญด้านการ
ปรับกำลังส่งของสถานีฐาน เพื่อที่จะรับประกันคุณภาพของสัญญาณภายในพื้นที่ให้บริการ

2.2.5 งานวิจัยของ M. Tahalani, V. Sathya, U. S. Suhas, R. Chaganti and B. R. Tamma. (2013) เป็นงานวิจัยที่เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโต
เซลล์ภายในอาคาร ภายใต้เงื่อนไขสัญญาณแทรกสอดและช่องสัญญาณภายในเครือข่าย

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอเทคนิคการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโต
เซลล์ที่น้อยที่สุดที่ต้องติดตั้ง และตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารชั้นเดียว ภายใต้
เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรรบวง และความจุช่องสัญญาณ
โดยใช้ระเบียบวิธีการทางฮิวริสติกอัลกอริทึม (heuristic algorithm) มาใช้ในการออกแบบเครือข่าย
เพื่อหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (near optimal)

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้ได้เห็นอีกหนึ่งวิธีการ
นอกจากการใช้สมการคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นในการหาคำตอบปัญหาการ
ออกแบบตำแหน่งการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ยังมีวิธีการทางฮิวริสติกอัลกอริทึมที่สามารถหา
คำตอบได้เช่นกัน เพียงแต่จะให้คำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีการที่จะ
สามารถหาคำตอบของปัญหาได้ ในกรณีที่ปัญหาขนาดที่ใหญ่ขึ้นและมีความซับซ้อนของ
อัลกอริทึมที่มากขึ้นซึ่งวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นไม่สามารถหาคำตอบได้

2.2.6 งานวิจัยของ M. F. Khan and B. Wang. (2014) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการ
วาง ตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารขนาดใหญ่ โดยใช้เทคนิคฮิวริสติกอัลกอริทึม

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโต
เซลล์ภายในอาคารชั้นเดียวขนาดใหญ่ที่มีสัญญาณรรบวงจากสถานีฐานมาโครเซลล์ และสัญญาณ
รรบวงระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้งานความถี่เดียวกัน โดยใช้ระเบียบวิธีการทางฮิวริสติก
อัลกอริทึมในการหาคำตอบ ซึ่งกระบวนการทำงานจะทำการแบ่งพื้นที่ในอาคารให้มีขนาดใกล้เคียง
กัน และติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่จุดกึ่งกลางของพื้นที่ หลังจากนั้นจึงหาตำแหน่งที่เหมาะสม
ที่สุดในบริเวณใกล้เคียง โดยมีวัตถุประสงค์คือ การใช้จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้น้อยที่สุด
โดยต้องการให้มีพื้นที่สัญญาณครอบคลุมภายในอาคารมากที่สุด ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วน
สัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรรบวงของจุดทดสอบสัญญาณภายในอาคาร

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เห็นแนวทางการแก้ปัญหา สำหรับขนาดปัญหาที่มีขนาดใหญ่ด้วยวิธีการทางฮิวริสติกอัลกอริทึม ทำให้ได้ความรู้ที่สามารถ นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบวางแผนเครือข่ายเฟม โดเซลล์

2.2.7 งานวิจัยของ E. Yaacoub and Z. Dawy. (2014) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการ วางตำแหน่งสถานีฐานประเภทต่างๆในการทำงานร่วมกัน โดยใช้อัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการหาคำแหน่งติดตั้งสถานีฐานมาโคร เซลล์และสถานีฐานขนาดเล็กในสภาพแวดล้อมที่มีการติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในอาคาร แล้ว โดยใช้อัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองซึ่งเป็นระเบียบวิธีการทางฮิวริสติกอัลกอริทึมในการหา คำตอบ ซึ่งกระบวนการทำงานจะทำการแบ่งพื้นที่ที่ทำการทดลองให้มีขนาดเท่ากัน และกำหนด คำแหน่งเริ่มต้นของสถานีฐานมาโครเซลล์และสถานีฐานขนาดเล็กแบบยูนิฟอร์ม หลังจากนั้นจึงหา คำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการอบอุ่นจำลอง โดยมีวัตถุประสงค์คือ ลดจำนวนผู้ใช้บริการที่ ไม่ได้รับสัญญาณให้น้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลของผู้ใช้บริการ

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการ แก้ปัญหาการติดตั้งสถานีฐานด้วยอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง ทำให้ทราบถึงแนวทางในการ ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองสำหรับการออกแบบวางแผนเครือข่ายเฟม โดเซลล์

2.2.8 งานวิจัยของ K. Han, Y. Choi, D. Kim, M. Na, S. Choi and K. Han. (2009) เป็น งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเลือกวางตำแหน่งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในอาคารขนาดหลายชั้น

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการเลือกตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในอาคารขนาดสามชั้นที่มีสัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานมาโครเซลล์ และสัญญาณ แทรกสอดระหว่างสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่ใช้งานความถี่เดียวกัน ซึ่งกำหนดปัญหาโดยใช้การ โปรแกรมเชิงเส้น โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มผลรวมของกำลังส่งของสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่ได้ทำการ เลือกติดตั้งแล้วให้มากที่สุดภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวก สัญญาณรบกวนของจุดทดสอบสัญญาณบริเวณรอบนอกอาคาร และเป้าหมายถัดมาคือ การเพิ่ม ผลรวมความจุของสัญญาณ (Shannon capacity) ของจุดทดสอบสัญญาณภายในอาคาร

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ งานวิจัยนี้มีการใช้สมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบ การเลือกตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในอาคารเพื่อเพิ่มกำลังส่งของสถานีฐานที่ได้ทำ การเลือกติดตั้งแล้วและเพิ่มผลรวมความจุของช่องสัญญาณของจุดทดสอบสัญญาณภายในอาคาร ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเอาแนวคิดในการใช้สมการคณิตศาสตร์และการใช้แบบจำลองการ โปรแกรม เชิงเส้นมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบการวางสถานีฐานเฟม โดเซลล์

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

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ต้องการตำแหน่งการวางสถานีฐานที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งกำหนดปัญหาโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม โดยแบ่งการทำงานออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนที่หนึ่งต้องการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้งภายในอาคาร และขั้นตอนที่สองทำการปรับระดับกำลังส่งให้เหมาะสมตามจำนวนของผู้ใช้งานรอบๆอาคาร ภายใต้เงื่อนไขของสัญญาณรบกวนจากสถานีฐานมาโครเซลล์ และสัญญาณรบกวนระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้งานความถี่เดียวกัน เพื่อที่จะรับประกันค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนภายในพื้นที่ให้บริการ

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้งานภายในอาคาร แต่ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ต่อผู้ใช้บริเวณรอบนอกของอาคาร ดังนั้นสามารถนำแนวคิดนี้มาประยุกต์ใช้กับการสร้างสมการคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นที่เราจะนำเสนอ

2.2.10 งานวิจัยของ C. S. Vardhan, D. V. Ratnam, N. Bhagyasree and A. H. Dattu. (2014) เป็นงานวิจัยที่เป็นงานวิจัยที่ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น

ลักษณะงานวิจัย เป็นงานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น โดยได้พิจารณาถึงผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น รูปแบบสมการการสูญเสียตามระยะทาง (path loss model) จำนวนของกำแพงที่อยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับ อัตราการสูญเสียของกำแพง (wall loss) กำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ เป็นต้น ซึ่งล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานและการออกแบบเทคนิคการวางตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ นอกจากนี้ในวิจัยยังแสดงรูปแบบของสมการการสูญเสียตามระยะทางสำหรับเทคโนโลยี 4G ที่สามารถนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น สภาพแวดล้อมภายในอาคาร และสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร เป็นต้น

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ จากการศึกษางานวิจัยนี้ทำให้เห็นถึงปัจจัยอื่นๆ ที่ช่วยในการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

ตารางที่ 2.1 สรุปปรัทัศน์วรรณกรรม

กลุ่มงานวิจัย	งานวิจัย	วัตถุประสงค์	เงื่อนไข	พื้นที่การทดลอง
พื้นฐานเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์	2.2.1	อธิบายพื้นฐานและคุณลักษณะของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ประเภทหลัก การ และการประยุกต์ใช้	-	-
วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (ไม่พิจารณาสัญญาณรบกวน)	2.2.2	1) หาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง 2) ปรับระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้เหมาะสม	1) ค่า Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) ของผู้ใช้งาน ต้องมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด	1) อาคารชั้นเดียว ขนาด 48 เมตร x 48 เมตร 2) ไม่พิจารณาจำนวนผู้ใช้งาน
	2.2.3	1) หาค่าแห่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสม	1) ค่า SINR ของผู้ใช้งานต้องมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด	1) อาคาร 3 ชั้น ขนาด 120 เมตร x 80 เมตร 2) ไม่พิจารณาจำนวนผู้ใช้งาน
	2.2.4	1) หาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง 2) ลดผลรวมระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้มีค่าน้อยที่สุด	1) ค่า SINR ของพื้นที่ในอาคารและ ผู้ใช้งานต้องมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด	1) อาคารชั้นเดียว ขนาด 48 เมตร x 48 เมตร 2) ไม่พิจารณาจำนวนผู้ใช้งาน
วิธีการฮิวริสติก อัลกอริทึม (ไม่พิจารณาสัญญาณรบกวน)	2.2.5	1) หาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง	1) ค่า SINR ของผู้ใช้งานต้องมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด	1) อาคารชั้นเดียว ขนาด 300 เมตร x 200 เมตร 2) ไม่พิจารณาจำนวนผู้ใช้งาน 3) ไม่มีกำแพงภายในอาคาร
	2.2.6	1) หาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง 2) เพิ่มพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณให้ได้มากที่สุด	1) ค่า SINR ของพื้นที่ในอาคารต้อง มีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด	1) อาคารชั้นเดียว ขนาด 75 เมตร x 60 เมตร 2) ไม่พิจารณาจำนวนผู้ใช้งาน 3) ไม่มีกำแพงภายในอาคาร

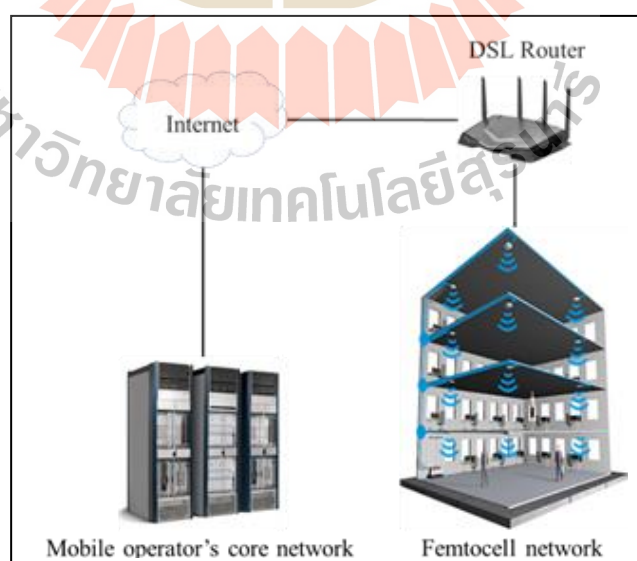
ตารางที่ 2.1 สรุปปริทัศน์วรรณกรรม (ต่อ)

กลุ่มงานวิจัย	งานวิจัย	วัตถุประสงค์	เงื่อนไข	พื้นที่การทดลอง
วิธีการฮิวริสติก อัลกอริทึม (ไม่พิจารณาสัญญาณ รั่วไหล)	2.2.7	1) หาค่าแห่งติดตั้งสถานีฐานมาโครเซลล์และสถานีฐานขนาดเล็กที่เหมาะสม 2) ลดจำนวนผู้ใช้บริการที่ไม่ได้รับสัญญาณให้น้อยที่สุด	1) อัตราเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลของผู้ใช้งานต้องมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด	1) พื้นที่เปิด ขนาด 5 กิโลเมตร x 5 กิโลเมตร 2) ไม่ได้พิจารณาเรื่องการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคาร
วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (พิจารณาสัญญาณ รั่วไหล)	2.2.8	1) เพิ่มผลรวมของระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้ได้มากที่สุด 2) เพิ่มผลรวมของความจุช่องสัญญาณของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้ได้มากที่สุด	1) ค่า SINR ของผู้ใช้งานบริเวณรอบนอกอาคารต้องมีค่าลดลงไม่เกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด	1) อาคาร 3 ชั้นเดี่ยว ขนาด 80 เมตร x 80 เมตร 2) ไม่พิจารณาจำนวนผู้ใช้งาน 3) ไม่มีกำแพง
	2.2.9	1) หาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดสำหรับติดตั้ง 2) ปรับระดับกำลังส่งให้เหมาะสม	1) ค่า SINR ของผู้ใช้งานในอาคารต้องมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด 2) ค่า SINR ของผู้ใช้งานบริเวณรอบนอกอาคารต้องมีค่าลดลงไม่เกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด	1) อาคารชั้นเดี่ยว ขนาด 48 เมตร x 48 เมตร 2) ไม่พิจารณาจำนวนผู้ใช้งาน
Path loss model	2.2.10	ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการออกแบบการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น เช่น สมการการสูญเสียตามระยะทาง จำนวนของกำแพงระหว่างภาคส่งและภาครับ อัตราการสูญเสียของกำแพง และกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	-	-

2.3 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์

จากปัญหาด้านความต้องการในการใช้งานที่หลากหลายของผู้ใช้งานภายในอาคารในปัจจุบัน เทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ได้เข้ามามีบทบาทในการช่วยแก้ไขปัญหาในด้านความแรงของสัญญาณ คุณภาพสัญญาณ พื้นที่สัญญาณครอบคลุม และอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล เพื่อเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบสื่อสาร (Chandrasekhar et al., 2008) โดยเฟมโตเซลล์นั้นเป็นสถานีฐานโทรศัพท์มือถือขนาดเล็ก ที่มีกำลังส่งสัญญาณที่ต่ำ ทำงานด้วยย่านความถี่ที่หน่วยงานกำกับดูแลด้านกิจการโทรคมนาคมของประเทศ (คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ: กสทช) เป็นผู้กำหนด โดยสัญญาณจะครอบคลุมพื้นที่ได้ในบริเวณไม่ใหญ่มาก นิยมนำไปใช้สำหรับติดตั้งภายในอาคารเพื่อเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมการให้บริการในบริเวณเล็กๆ หรือจุดอับสัญญาณ เช่น ภายในที่พักอาศัย ห้างสรรพสินค้า หรือสำนักงาน

ซึ่งข้อดีของการเลือกใช้เทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ในการแก้ไขปัญหาของสัญญาณภายในอาคารนั้นคือ เฟมโตเซลล์มีการสิ้นเปลืองของพลังงานน้อย ผู้ใช้บริการสามารถเข้าถึงเครือข่ายและใช้งานด้วยสัญญาณที่มีคุณภาพสูงได้ ในขณะที่ต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและการดำเนินการต่างๆต่ำ อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณทราฟฟิกให้สถานีฐานมาโครเซลล์ (macrocell) (Nagashree et al., 2013) ดังนั้นผู้ให้บริการโทรศัพท์มือถือ (mobile operator) จึงเลือกใช้เทคโนโลยีนี้ในการแก้ไขคุณภาพสัญญาณให้ผู้ใช้งานภายในอาคาร โดยสามารถสรุปโครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์

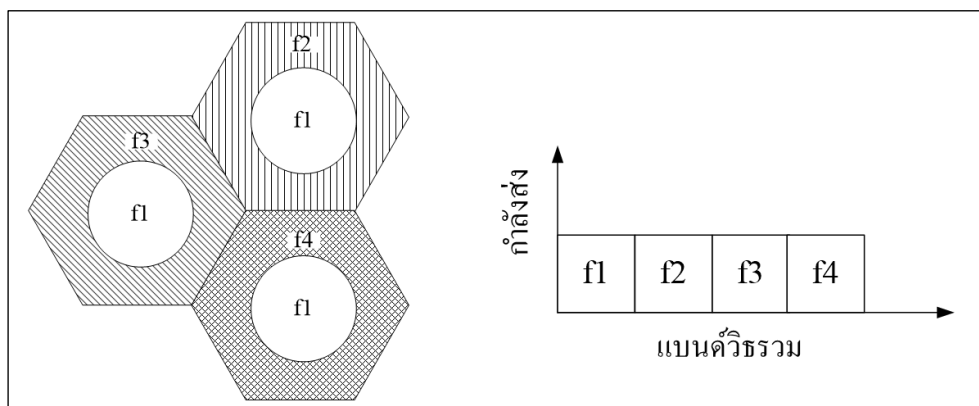
โครงสร้างและการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือส่วนของชุมสาย (core network) และส่วนของเครือข่ายเฟมโตเซลล์ โดยชุมสายเป็นเครือข่ายของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของเครือข่ายทั้งหมด โดยหน้าที่หลักของชุมสายก็คือการสร้างเส้นทางของข้อมูลจากเครือข่ายหนึ่งไปยังอีกเครือข่ายหนึ่ง ซึ่งภายในประกอบไปด้วยผู้ให้บริการโทรศัพท์มือถือ ที่จะทำการเชื่อมต่อกับผู้ให้บริการอินเทอร์เน็ต เพื่อที่จะได้ใช้เครือข่ายอินเทอร์เน็ตเชื่อมต่อไปยังส่วนที่สอง คือส่วนของเครือข่ายเฟมโตเซลล์ โดยสถานีฐานเฟมโตเซลล์จะเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านตัวรับสัญญาณอินเทอร์เน็ต (DSL router) เพื่อที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์จะได้กระจายการส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้งานภายในพื้นที่ให้บริการต่อไป โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะในส่วนที่สอง คือส่วนของเครือข่ายเฟมโตเซลล์ที่จะทำการติดตั้งภายในอาคาร โดยกำหนดให้อาคารนั้นมีการวางเครือข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงหรือบรอดแบนด์ที่ผ่านตามสายภายในอาคาร ที่ถูกติดตั้งอยู่แล้ว งานวิจัยของเราจะทำการออกแบบการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสม ให้สามารถดึงสมรรถนะการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ออกมาให้มากที่สุด เพื่อให้ผู้ใช้งานมีประสิทธิภาพในการใช้บริการมากที่สุด

2.4 เทคโนโลยีแอลทีอี

เทคโนโลยีแอลทีอี (Long Term Evolution : LTE) เป็นส่วนหนึ่งในมาตรฐานสากล จากกลุ่ม Third Generation Partner Ship Project (3GPP) เป็นระบบที่พัฒนาต่อจากระบบ 3G เป้าหมายหลักของ LTE คือ มีอัตราการส่งข้อมูลสูง สามารถลดค่าความหน่วงเวลาซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถใช้บริการภาพเคลื่อนไหวที่สมจริง ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้ความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งยังสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในยุคก่อนหน้า ซึ่งได้แก่ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการแทรกสอดสัญญาณระหว่างเซลล์ โดยในระบบแอลทีอีมีเทคนิคการแก้ปัญหาที่สามารถแยกได้เป็น 3 แบบ คือ ICI randomization, ICI cancellation และ ICI co-ordination or avoidance โดยในที่นี้จะกล่าวถึง ICI co-ordination or avoidance ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการใช้ทรัพยากรความถี่ที่ใช้ในเซลล์แตกต่างกันเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในบริเวณขอบเซลล์ของสถานีฐานให้ดีขึ้น (ปาลิรัตน์ วงจำปา 2554) โดยมีการพัฒนาเทคนิคการใช้ทรัพยากรความถี่เพื่อนำมาใช้งานเป็น 2 แบบ ดังนี้

2.4.1 เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ

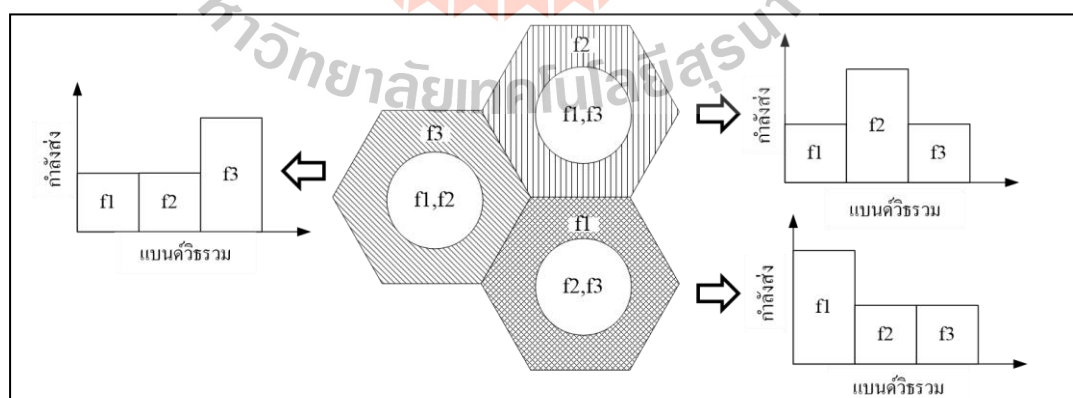
เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ (Fractional Frequency Reuse : FFR) เป็นเทคนิคหนึ่งในการบรรเทาปัญหาการแทรกสอดสัญญาณระหว่างเซลล์ เป็นวิธีการแบ่งทรัพยากรความถี่ออกเป็นส่วนและนำทรัพยากรความถี่เหล่านั้นมาใช้ใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำ

2.4.2 เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์

เทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำแบบซอฟต์ (Soft Fractional Frequency Reuse : Soft FFR) เป็นเทคนิคที่ถูกพัฒนามาจากเทคนิคการนำความถี่บางส่วนมาใช้ซ้ำ โดยมีการกำหนดกำลังงานของสัญญาณที่ส่งจากสถานีฐานไปยังผู้ใช้บริการในระดับที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสถานีฐานและผู้ใช้บริการ กล่าวคือหากผู้ใช้บริการอยู่ที่บริเวณขอบเขต สถานีฐานจะส่งสัญญาณที่มีกำลังสูง ไปยังผู้ใช้บริการ และในทางกลับกัน เมื่อผู้ใช้บริการอยู่ที่บริการกลางเขต สถานีฐานจะส่งสัญญาณที่มีกำลังงานที่ต่ำกว่า ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็น วิธีที่ช่วยลดปัญหาของสัญญาณแทรกสอดจากสถานีฐานข้างเคียงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เทคนิคการนำความถี่มาใช้ซ้ำแบบซอฟต์

2.5 แบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคาร

ภายในอาคารสำนักงาน ห้างสรรพสินค้าต่างๆ ล้วนมีความซับซ้อนของการแพร่กระจายความแรงสัญญาณ ทำให้ไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายการสูญเสียในธรรมชาติที่แตกต่างกันได้อย่างแม่นยำ โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองที่ใช้นั้นจะได้จากการวิเคราะห์ที่ซับซ้อน หรือได้จากการวัดจริง เนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากอุปกรณ์ภาคส่งนั้นจะต้องเคลื่อนที่ผ่านสิ่งแวดล้อมที่มีความหลากหลาย ซึ่งการแพร่กระจายสัญญาณต้องผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆภายในอาคาร เช่น ผนัง กำแพง หรือแม้กระทั่งจำนวนชั้นภายในอาคาร ซึ่งทำให้สัญญาณถูกลดทอนหรือจางหาย ดังนั้นในการออกแบบการกำหนดตำแหน่งวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น จึงใช้แบบจำลองในการคำนวณค่าความแรงสัญญาณที่ภาครับรับได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคารจากงานวิจัยของ Vardhan et al., 2014 มาคำนวณหาค่าความแรงสัญญาณที่แต่ละจุดทดสอบสัญญาณรวมถึงตำแหน่งของผู้ใช้งานได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยเป็นแบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคารตามมาตรฐานของหน่วยงาน 3GPP ซึ่งเป็นกลุ่มความร่วมมือระหว่างหน่วยงานมาตรฐานการสื่อสารโทรคมนาคม เพื่อกำหนดมาตรฐานกลางในการผลิตและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับ 3G ซึ่งสามารถใช้ได้กับเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์สำหรับเครือข่าย 4G-LTE ที่ความถี่ 2.6 GHz (LTE Band 7) ในสภาพแวดล้อมภายในอาคารหลายชั้นได้ ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.2) ดังนี้

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

โดยที่ P_r = ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จากสถานีฐาน

P_t = กำลังส่งสัญญาณของสถานีฐาน

Path Loss = แบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคาร

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

โดยที่ R = ระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ (เมตร)

$d_{2D, \text{indoor}}$ = ความหนาของกำแพงภายในอาคาร (ในงานวิจัยนี้ กำหนด 0.18 เมตร)

n = จำนวนชั้นของอาคารที่สัญญาณทะลุผ่าน

q = จำนวนกำแพงภายในอาคารที่สัญญาณทะลุผ่าน

L_{iw} = ค่าความสูญเสียของสัญญาณทะลุผ่านกำแพง

ตารางที่ 2.2 ค่าความสูญเสียของสัญญาณทะลุผ่านกำแพงประเภทต่างๆ

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

จากสมการแบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคารในสมการที่ (2.2) ประกอบไปด้วยการสูญเสียของสัญญาณที่เกิดขึ้นภายในอากาศ (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 และค่าการสูญเสียของสัญญาณเมื่อทะลุผ่านกำแพง โดยค่าพารามิเตอร์ความสูญเสียของสัญญาณเมื่อทะลุผ่านกำแพงประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2 (Zulkefly, N. R., Rahman, T. A., Al-Samman, A. M., Mataria, A. M. S. and Leow, C. Y., 2015)

2.6 การโปรแกรมเชิงเส้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ อย่างกว้างขวางที่สุดอย่างหนึ่ง คือ การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP) เพื่อใช้ในการออกแบบปัญหาเพื่อให้ได้ผลลัพธ์การแก้ปัญหาที่ดีที่สุด (optimal solution) ของฟังก์ชันเป้าหมายเชิงเส้น (linear objective function) ที่สอดคล้องกับข้อจำกัดเชิงเส้นต่าง ๆ (linear constraints) จอร์จ บี ดานซิก (George B. Dantzig) นับว่าเป็นบิดาของการโปรแกรมเชิงเส้น เนื่องจากเป็นผู้ริเริ่มในการสร้างรูปแบบทั่วไปของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น และพัฒนาวิธีการอย่างมีระบบในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นซึ่งมีการเริ่มนำมาใช้งานตั้งแต่ปี พ.ศ. 2490 เป็นต้นมา จนถึงทุกวันนี้วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดดังกล่าวยังคงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยใช้อัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ (simplex method) ในการคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งปัจจุบันได้มีการใช้แบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นอย่างกว้างขวาง และโปรแกรมสำเร็จรูปก็มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเช่นเดียวกันทั้งในทางธุรกิจและอุตสาหกรรม รูปแบบทั่วไปของการโปรแกรมเชิงเส้นนั้น เป็นรูปแบบที่สามารถปรับใช้ได้กับปัญหาต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เนื่องจากฟังก์ชันเป้าหมาย อาจอยู่ในรูปกำไร ค่าใช้จ่าย จำนวนผลผลิตที่มากที่สุด เป็นต้น ส่วนข้อจำกัดอาจอยู่ในรูปของข้อจำกัดของทรัพยากรที่มีอยู่ ข้อจำกัดทางการตลาด ข้อจำกัดด้านคุณภาพ เป็นต้น จาก

หนังสือการโปรแกรมเชิงเส้น (ประกอบ จิริกิติ, 2535) ได้กล่าวถึง ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงเส้นดังนี้

1) ปัญหาทางด้านการผลิต (product mix problem) เป็นการพิจารณาปริมาณสินค้าที่จะทำการผลิต เพื่อให้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เช่น เครื่องจักร วัตถุดิบ แรงงาน ให้เป็นไปอย่างเหมาะสม เพื่อทำให้ได้ผลตอบแทนสูงสุด

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 เพื่อให้ได้รับผลตอบแทนสูงสุด

6) ปัญหาการเลือกสื่อโฆษณา (media selection) เป็นการพิจารณาเลือกสื่อโฆษณาชนิดต่างๆ เพื่อให้ข้อมูลหรือข่าวสารที่ต้องการเผยแพร่ออกสู่เป้าหมายเป็นจำนวนมากที่สุด หรือเสียค่าใช้จ่ายในการโฆษณาน้อยที่สุด เป็นต้น

7) ปัญหาการตัดกระดาษ (trim loss problem) เป็นการพิจารณารูปแบบหรือวิธีการตัดกระดาษ (หรือสินค้าอื่นๆที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เช่น การตัดผ้า การตัดแผ่นเหล็ก) เพื่อที่จะหารูปแบบการตัดกระดาษขนาดมาตรฐานที่มีอยู่ออกเป็นขนาดและปริมาณต่างๆ ตามความต้องการ เพื่อที่จะให้มีเศษ (ส่วนที่ใช้ประโยชน์ต่อไปไม่ได้) น้อยที่สุด

8) ปัญหาทางด้านการทหาร อาจนำเอาโปรแกรมเชิงเส้นมาใช้ในการพิจารณาวางแผนการส่งกำลังบำรุง การเลือกกำหนดจำนวนอาวุธยุทธโปกรณ์ การกำหนดยุทธศาสตร์ เป็นต้น

2.6.1 ข้อสมมุติฐานสำคัญในการโปรแกรมเชิงเส้น

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 (10×10) 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

2.6.2 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

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \quad (2.4)$$

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

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 ว่ามีค่าเท่ากับเท่าไรจึงจะทำให้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าสูงที่สุด หรือต่ำที่สุด โดยที่ตัวแปรตัดสินใจเหล่านี้จะต้องสอดคล้องกับข้อจำกัดในการใช้ทรัพยากรทั้ง m ข้อจำกัด คือ ใช้ทรัพยากรไม่เกินปริมาณทรัพยากรที่มีอยู่ และต้องมีค่ามากกว่า และไม่เป็นจำนวนลบ (non-negative) สำหรับค่า a_{ij}, b_i, c_j นั้นจะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่าอยู่แล้ว

2.6.3 ส่วนประกอบของการโปรแกรมเชิงเส้นมาตรฐาน

1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุน กำไร เพื่อต้องการให้ได้มาซึ่งเป้าหมายที่ทำให้เกิดค่าสูงที่สุด 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)

2.6.4 คุณสมบัติของรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้น

1) สมการของตัวแปรตัดสินใจต้องเป็นสมการเชิงเส้นโดยที่ทุกตัวแปรต้องมีกำลังเป็น 1 เท่านั้น นอกจากนี้ต้องเขียนอยู่ในรูปแบบของการบวก การลบกันของตัวแปรต่าง ๆ เช่น $3x_1 + 5x_2$ เป็นสมการเชิงเส้น เพราะตัวแปรมีเลขชี้กำลังเป็น 1 และทุกตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็ม

2) สมการวัตถุประสงค์ ต้องเป็นการระบุที่ต้องการหาค่าสูงสุด หรือค่าต่ำสุด โดยจะต้องแสดงถึงจุดประสงค์ในการตัดสินใจ เช่น ลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนให้น้อยที่สุด

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

4) ข้อจำกัดของสัญลักษณ์ (sign restrictions) ถ้าต้องการกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นบวกจะกำหนดข้อจำกัดของสัญลักษณ์ได้ เช่น $x_1 \geq 0$ แต่หากว่า ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นได้ทั้งค่าบวกและค่าลบหรือมีค่าเป็นศูนย์ จะเรียกว่า unrestricted in sign (urs)

2.6.5 การสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหา

ในการสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น จะไม่สามารถกำหนดเป็นกฎเกณฑ์ตายตัวได้ ทั้งนี้เพราะปัญหาแต่ละปัญหานั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันอย่างไรก็ตาม สามารถสรุปเป็นขั้นตอนทั่วไป ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การให้นิยามตัวแปรตัดสินใจ (X) ในแต่ละปัญหานั้นจะมีการนิยามตัวแปรตัดสินใจที่แตกต่างกันไปตามลักษณะเฉพาะของปัญหาต่าง ๆ เช่น ในการพิจารณาว่าจะเลือกปลูกผักชนิดใดบ้าง จำนวนกี่หน่วย อาจให้ X_i เป็นตัวแปรตัดสินใจ โดยหมายถึง จำนวนหน่วยของผักชนิดที่ i 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 ขั้นตอนนี้จะเป็นการรวบรวมฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และข้อจำกัด ต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน

ขั้นตอนที่ 5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เมื่อได้ทำการสร้างแบบจำลองการโปรแกรมเชิงเส้นแล้ว ก็จะต้องทำการตรวจสอบแบบจำลอง ค่าพารามิเตอร์ ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้นั้น ถูกต้องแล้วหรือไม่

2.6.6 ตัวอย่างการกำหนดปัญหา

ในการสร้างรูปแบบแทนระบบทางคณิตศาสตร์ของโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหาที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันของเรานั้น ไม่สามารถกำหนดกฎเกณฑ์คงที่ได้ ทั้งนี้เพราะปัญหาแต่ละปัญหาที่เกิดขึ้นมีลักษณะรูปแบบของปัญหาไม่เหมือนกัน แต่สามารถสร้างรูปแบบแทนระบบสมการคณิตศาสตร์ของโปรแกรมเชิงเส้นได้ ดังนั้นเราจึงยกตัวอย่างการกำหนดปัญหาของโปรแกรมเชิงเส้นดังต่อไปนี้

2.6.6.1 ปัญหาการขนส่ง

บริษัทไทยพัฒนาอุตสาหกรรมมีโรงงานผลิตสินค้า 3 แห่ง โรงงานแต่ละแห่งมีกำลังผลิตสูงสุดเท่ากับ 4,000 6,000 และ 5,000 หน่วย ตามลำดับ สินค้าที่ผลิตจากโรงงานทั้งสามแห่งนี้ จะถูกจัดส่งต่อไปให้กับลูกค้าของบริษัทซึ่งมีอยู่ 4 รายด้วยกัน โรงงานใดที่ตกลงที่จะขายสินค้า 5,000 ชิ้น ให้กับลูกค้ารายที่หนึ่ง 4,000 ชิ้น ให้กับลูกค้ารายที่สอง อย่างน้อย 2,000 ชิ้น ให้กับลูกค้ารายที่สาม ลูกค้ารายที่สามและลูกค้ารายที่สี่ต้องการซื้อสินค้าที่เหลือให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ หากกำไรที่บริษัทได้จากการขายสินค้าจากโรงงานผลิตแต่ละแห่งให้กับลูกค้าแต่ละรายเป็นไปตามตารางที่ 2.3 บริษัทควรจะขายสินค้าจากโรงงานใดให้กับลูกค้ารายใด ในจำนวนเท่าใด

ตารางที่ 2.3 กำไรที่ได้จากการขายสินค้าจากโรงงานผลิต

	ลูกค้ารายที่ 1	ลูกค้ารายที่ 2	ลูกค้ารายที่ 3	ลูกค้ารายที่ 4
โรงงานที่ 1	165	263	362	464
โรงงานที่ 2	168	267	365	462
โรงงานที่ 3	163	260	359	460

การสร้างปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้น จากปัญหาข้างต้นนี้ ทำได้ดังนี้ คือ การกำหนดนิยามของตัวแปรตัดสินใจ ปัญหาการขนส่งที่กำหนดให้นี้ เราต้องการที่จะทราบว่า ควรจะส่งสินค้าจากโรงงานใดไปให้กับลูกค้าคนไหน ในปริมาณเท่าไร จึงจะทำให้บริษัทได้รับกำไรสูงสุด ดังนั้นเราจะกำหนดให้

ตัวแปรตัดสินใจ x_{ij} ปริมาณสินค้าที่จะทำการขนส่งจากโรงงานที่ i ไปจำหน่ายให้กับลูกค้าคนที่ j โดยที่ $i = 1, 2, 3$ และ $j = 1, 2, 3, 4$

ตัวแปรค่าคงที่ c_{ij} กำไรการขายสินค้าจากโรงงานที่ i ไปจำหน่ายให้กับลูกค้าคนที่ j โดยที่ $i = 1, 2, 3$ และ $j = 1, 2, 3, 4$

กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ปัญหาการขนส่งนี้ บริษัทควรจะส่งสินค้าจากโรงงานใดไปให้กับลูกค้าคนไหน ในปริมาณเท่าไร จึงจะทำให้บริษัทได้รับกำไรสูงสุด สามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์} \quad \text{Maximize } z = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 c_{ij} x_{ij}$$

กำหนดข้อจำกัดของปัญหา

สมการเงื่อนไขที่ 1 กำไรการผลิตของโรงงานที่ 1 สูงสุดเท่ากับ 4,000 หน่วย

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} \leq 4000$$

สมการเงื่อนไขที่ 2 กำไรการผลิตของโรงงานที่ 2 สูงสุดเท่ากับ 6,000 หน่วย

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} \leq 6000$$

สมการเงื่อนไขที่ 3 กำไรการผลิตของโรงงานที่ 3 สูงสุดเท่ากับ 5,000 หน่วย

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} \leq 5000$$

สมการเงื่อนไขที่ 4 โรงงานได้ตกลงขายสินค้า 5,000 ชิ้นให้กับลูกค้ารายที่ 1

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} = 5000$$

สมการเงื่อนไขที่ 5 โรงงานได้ตกลงขายสินค้า 4,000 ชิ้นให้กับลูกค้ารายที่ 2

$$x_{12} + x_{22} + x_{32} = 4000$$

สมการเงื่อนไขที่ 4 โรงงานได้ตกลงขายสินค้า 2,000 ชิ้นให้กับลูกค้ารายที่ 3

$$x_{13} + x_{23} + x_{33} \geq 2000$$

ข้อจำกัดของตัวแปรตัดสินใจ สินค้าที่จะทำการขนส่งจะต้องมีค่าไม่ติดลบ

$$x_{ij} \geq 0$$

2.6.6.2 ปัญหาวางแผนการผลิต

บริษัทอุตสาหกรรมผลิตสินค้าออกจำหน่าย 3 ประเภทคือ ชุดทานอาหารชนิด 4 ที่นั่ง ชนิด 6 ที่นั่ง และชนิด 10 ที่นั่ง ในการผลิตชุดทานอาหารแต่ละชุดจะใช้เวลาในการขัดกลึงตบแต่งไม้ เวลาในการประกอบชุดทานอาหารเข้าด้วยกันและปริมาณวัตถุดิบ (ไม้) ต่างกันตามชนิดของชุดทานอาหาร ถ้าไรที่บริษัทจะได้รับจากการจำหน่ายชุดทานอาหารแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ต้องการทราบว่าควรผลิตชุดอาหารชนิดใดบ้าง เป็นจำนวนเท่าไร จึงจะได้กำไรสูงสุด อนึ่ง จากการสำรวจตลาดคาดว่าปริมาณชุดทานอาหารชนิด 4 ที่นั่ง และ 6 ที่นั่ง คงจะจำหน่ายได้ไม่เกิน 40 ชุด และ 100 ชุด ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 กำไรที่ได้จากการขายสินค้าของบริษัทไทยพัฒนา

	ชุดทานอาหาร			
	4 ที่นั่ง	6 ที่นั่ง	10 ที่นั่ง	ปริมาณที่มี
เวลาในการขัดกลิ้งตบแต่งไม้ (ชม./ชุด)	4	5	10	2,000 ชม.
เวลาในการประกอบเข้าด้วยกัน (ชม./ชุด)	1	1	3	400 ชม.
ปริมาณไม้ที่ใช้ (ลบ.ฟ./ชุด)	1	1.5	3	500 ลบ.ฟ.
กำไรต่อหน่วย (บาท/ชุด)	2,000	2,800	6,000	

การสร้างปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นจากปัญหาข้างต้นนี้คือ การนิยามตัวแปรตัดสินใจ สิ่งที่เราต้องการทราบคือ จำนวนของชุดทานอาหารแต่ละชนิดที่บริษัทควรจะผลิต

ตัวแปรตัดสินใจ

x_1 = จำนวนชุดทานอาหารชนิด 4 ที่นั่ง ที่จะทำการผลิต

x_2 = จำนวนชุดทานอาหารชนิด 6 ที่นั่ง ที่จะทำการผลิต

x_3 = จำนวนชุดทานอาหารชนิด 10 ที่นั่ง ที่จะทำการผลิต

กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในปัญหานี้ เราต้องการจะหาคำไรสูงสุดจากการจำหน่ายชุดทานอาหารแต่ละชนิดที่ผลิต

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ Maximize $z = 2000x_1 + 2800x_2 + 6000x_3$

กำหนดข้อจำกัดของปัญหา ในปัญหานี้มีข้อจำกัดอยู่สองประเภท คือ ข้อจำกัดเนื่องจากปริมาณทรัพยากรที่จำกัดและข้อจำกัดเนื่องมาจากการตลาด

สมการเงื่อนไขที่ 1 ข้อจำกัดจากเวลาที่ใช้ในการขัดกลิ้ง ตบแต่ง

$$4x_1 + 5x_2 + 10x_3 \leq 2000$$

สมการเงื่อนไขที่ 2 ข้อจำกัดจากเวลาในการประกอบชุดทานอาหาร

$$1x_1 + 1x_2 + 3x_3 \leq 400$$

สมการเงื่อนไขที่ 3 ข้อจำกัดจากปริมาณ ไม้ที่ใช้ในการผลิต

$$1x_1 + 1.5x_2 + 3x_3 \leq 500$$

สมการเงื่อนไขที่ 4 ข้อจำกัดจากการตลาดของชุดทานอาหารชนิด 4 ที่นั่ง

$$x_1 \leq 40$$

สมการเงื่อนไขที่ 5 ข้อจำกัดจากการตลาดของชุดทานอาหารชนิด 6 ที่นั่ง

$$x_2 \leq 100$$

ข้อจำกัดของตัวแปรตัดสินใจ ชุดทานอาหารที่ จะต้องมียังไม่ติดลบ

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0$$

2.6.6.3 ปัญหาการลงทุน

ชายคนหนึ่งมีเงินอยู่ 100,000 บาท กำลังพิจารณาว่าควรจะนำเงินจำนวนนี้ไปลงทุนในโครงการลงทุนสองโครงการอย่างไร ในช่วงเวลา 3 ปีนับจากนี้ไป เพื่อที่จะได้รับผลตอบแทนสูงสุด เงินทุกบาทที่ลงทุนในโครงการหนึ่งจะให้ผลตอบแทน 70 % โดยมีระยะเวลาการลงทุนครั้งละ 1 ปี ส่วนโครงการที่สอง ให้ผลตอบแทน 150 % แต่มีระยะเวลาการลงทุน 2 ปี ดังนั้นชายผู้นี้ควรจะลงทุนอย่างไร

ปัญหาการลงทุนนี้ เราต้องการหาว่า ชายผู้นี้ควรจะลงทุนอย่างไรจึงจะได้รับผลตอบแทนจากการลงทุนสูงที่สุด กำหนดให้

ตัวแปรตัดสินใจ x_{ij} จำนวนเงินที่ตัดสินใจลงทุนในโครงการที่ i ที่เวลา j ปี โดยที่ $i = 1, 2$ และ $j = 1, 2, 3$

กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ปัญหาการลงทุน สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ Maximize } z = 1.7x_{13} + 2.50x_{22}$$

กำหนดข้อจำกัดของปัญหา

สมการเงื่อนไขที่ 1 ข้อจำกัดการลงทุนในปีที่ 1

$$x_{11} + x_{21} \leq 100000$$

สมการเงื่อนไขที่ 2 ข้อจำกัดการลงทุนในปีที่ 2

$$-1.7x_{11} + x_{12} + x_{22} \leq 0$$

สมการเงื่อนไขที่ 3 ข้อจำกัดการลงทุนในปีที่ 3

$$-1.7x_{12} - 2.5x_{21} + x_{13} \leq 0$$

ข้อจำกัดของตัวแปรตัดสินใจ จำนวนเงินที่ลงทุนจะต้องไม่ติดลบ

$$x_{ij} \geq 0$$

2.7 การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยอัลกอริธึมซิมเพล็กซ์

วิธีซิมเพล็กซ์ (simplex method) จากหนังสือการวิจัยดำเนินงาน (รองศาสตราจารย์สุทธิมา ชำนาญเวช 2009) กล่าวว่า เป็นวิธีการคำนวณที่สามารถใช้ในแก้ปัญหาการกำหนดการเชิงเส้นได้ กว้างขวางมาก ซึ่งได้พัฒนาขึ้นโดย จอร์จ บี ดานซิก ซึ่งวิธีซิมเพล็กซ์ เป็นวิธีการทางพีชคณิต ประกอบกับการคำนวณเมทริกซ์ (matrix) โดยใช้หลักการปรับเปลี่ยนตัวแปรอย่างมีหลักเกณฑ์ เพื่อให้มีผลต่อเป้าหมายของปัญหาและบรรลุผลตามเป้าหมายโดยเร็วที่สุด ดังนั้นอัลกอริธึมซิมเพล็กซ์จะเป็นวิธีการคำนวณที่มีลักษณะแบบย้อนทำซ้ำขั้นตอน นั่นคือ จะคำนวณซ้ำๆ กันจนกว่าจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด

จากความคิดมูลฐานของวิธีซิมเพล็กซ์ คือ การแก้ปัญหาระบบสมการโดยการกระทำซ้ำๆ กันเริ่มจากคำตอบมูลฐานเริ่มต้นที่เป็นไปได้ แล้วเปลี่ยนตัวแปรมูลฐานใหม่ครั้งละ 1 ตัว โดยพิจารณาจากตัวแปรที่ไม่เป็นมูลฐาน เรียกตัวแปรมูลฐานใหม่นี้ว่า ตัวแปรมูลฐานเข้า (entering basic variable) สำหรับตัวแปรมูลฐานเดิมที่ถูกแทนที่ด้วยตัวแปรมูลฐานใหม่จะกำหนดให้เป็นตัวที่ไม่เป็นมูลฐาน เรียกตัวแปรนี้ว่า ตัวแปรมูลฐานออก (leaving basic variable)

การแก้ปัญหาโดยวิธีซิมเพล็กซ์จะต้องมีการสร้างรูปแบบกำหนดการเชิงเส้นให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน คือเปลี่ยนข้อจำกัดที่อยู่ในรูปสมการให้เป็นสมการที่สมมูลกันตัวอย่างเช่น

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

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

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

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

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

เขียนข้อจำกัดให้อยู่ในรูปสมการข้อจำกัดที่สมมูลกัน โดยใช้ตัวแปรขาด (slack variable)

ดังนั้นให้ $S_1, S_2, S_3 \geq 0$ เป็นตัวแปรขาด สมการข้อจำกัดที่สมมูลกับข้อจำกัดคือ

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

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

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

2.7.1 ขั้นตอนของวิธีซิมเพล็กซ์

2.7.1.1 ขั้นตอนเริ่มต้น (initialization step)

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

จากตารางที่ 2.5 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 2.5 ตารางซิมเพล็กซ์ของกำหนดการเชิงเส้น

ตัวแปร มูลฐาน	สมการที่	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

2.7.1.2 ขั้นตอนที่ต้องกระทำซ้ำๆ (iteration step)

เมื่อได้คำตอบเริ่มต้นแล้ว ต่อไปต้องมีการปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสม โดยการเพิ่มค่าตัวแปรขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ตัวแปรมูลฐานเข้า (entering basic variable) ในกรณีปัญหาที่ต้องการหาค่าสูงสุดจะพิจารณาเลือกตัวแปรไม่เป็นมูลฐานที่มีสัมประสิทธิ์ในสมการ (0) ติดลบมากที่สุด เพราะเมื่อตัวแปรเพิ่มค่าจาก 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

$$\text{ถ้าเพิ่มค่า } X_1 \text{ โดยที่ } X_2 = 0 \text{ จะมีผลทำให้ } Z = 3X_1$$

$$\text{ถ้าเพิ่มค่า } X_2 \text{ โดยที่ } X_1 = 0 \text{ จะมีผลทำให้ } Z = 5X_2$$

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

จากตารางที่ 2.4 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร X_2 ติดลบมากที่สุดคือ -5 จึงเลือกเป็นตัวแปรมูลฐานเข้า คือเปลี่ยนจากตัวแปรที่ไม่เป็นมูลฐานเป็นตัวแปรมูลฐาน คอลัมน์ (column) ที่อยู่ภายใต้ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ของในข้อจำกัดเรียกว่า คอลัมน์หลัก (pivot column) ดังตารางที่ 2.6 และถ้าสมการ (0) มีสัมประสิทธิ์ของตัวแปรเป็น 0 หรือเป็นบวก แสดงว่าไม่สามารถหาตัวแปรมูลฐานเข้าเพื่อเพิ่มค่า Z ได้ อีก

ขั้นตอนที่ 2 หาตัวแปรมูลฐานออก (leaving basic variable)

- 1) เลือกสัมประสิทธิ์ในคอลัมน์หลักที่มีค่ามากกว่า 0
- 2) หาค่าคงที่ทางขวามือด้วยสัมประสิทธิ์ในคอลัมน์หลักที่มีค่ามากกว่า 0 และอยู่ในแถวเดียวกัน
- 3) เลือกสมการที่ให้ผลหารน้อยที่สุด แถวที่ให้ผลหารน้อยที่สุดเรียกว่า แถวหลัก ค่าตัวเลขในแถวนั้นเรียกว่าเลขหลัก

ตารางที่ 2.6 ตัวแปรมูลฐานเข้า คือตัวแปร X_2

ตัวแปร มูลฐาน	สมการที่	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 2.7

ตารางที่ 2.7 ตัวแปรมูลฐานออก คือตัวแปร S_2

ตัวแปร มูลฐาน	สมการที่	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 หาคำตอบมูลฐานที่เป็นไปได้ใหม่ โดยสร้างตารางใหม่ดังนี้

1) ใน 3 คอลัมน์แรกยังคงเดิม ยกเว้น S_2 ในสมการ ซึ่งเป็นตัวแปรออกจะถูกแทนที่ด้วย X_2

2) สัมประสิทธิ์ของตัวแปรมูลฐานใหม่ในแถวหลักทำให้เป็น +1 โดยหารแถวหลักด้วยเลขหลัก แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สัมประสิทธิ์ของทุกตัวแปรในแถวหลักใหม่

ตัวแปร มูลฐาน	สมการที่	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						

ดังนี้

ต่อไปทำให้สัมประสิทธิ์ของ X_2 ในแถวอื่นเป็น 0 ทั้งหมด โดยใช้สูตร

แถวใหม่ = แถวเดิม - (สัมประสิทธิ์ในคอลัมน์หลัก \times แถวหลักใหม่)

พิจารณาแถว (0) สัมประสิทธิ์ที่ตรงกับ X_2 คือ -5

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

	X_1	X_2	S_1	S_2	S_3	ค่าคงที่ขวามือ
แถว (0) เดิม	-3	-5	0	0	0	0
(-5) \times 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) \times 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 2.9

ตารางที่ 2.9 ค่าตัวแปรมูลฐานใหม่

ตัวแปร มูลฐาน	สมการที่	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 ซึ่งได้จากแถวที่ให้ผลหารของค่าคงที่ขวามือ ซึ่งหารด้วยค่าสัมประสิทธิ์ในคอลัมน์หลักมีค่าน้อยที่สุดนั้น เพราะว่า ค่า X_2 ที่เพิ่มขึ้นนี้จะต้องสอดคล้องกับทุกๆข้อจำกัด ถ้าเลือกตัวแปรมูลฐานออกจากแถวที่ให้ผลหารมากที่สุด จะได้ว่าตัวแปรที่เพิ่มค่าจะไม่สอดคล้องกับทุกข้อจำกัดเดิม ตัวอย่างเช่น ข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับ X_2 คือ

$$2X_2 \leq 12 \text{ และ } 3X_1 + 2X_2 \leq 18$$

ถ้า $X_2 = 6$ จะได้ว่าเมื่อแทน $X_2 = 6, X_1 = 0$ ลงในสมการทั้งสองสมการยังคงเป็นจริง 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 $X_2 = 9$ ลงในสมการ $2X_2 \leq 12$ จะได้ว่าไม่เป็นจริง ดังนั้นจึงต้องเลือกตัวแปรออกในแถวที่มีผลหารน้อยที่สุด เพื่อให้ค่าที่ได้ยังคงสอดคล้องกับข้อจำกัด

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อได้คำตอบมูลฐานที่เป็นไปได้ชุดใหม่แล้ว ต่อไปตรวจสอบดูว่าคำตอบที่ได้เหมาะสมหรือไม่ จากสมการ (0) จะเห็นได้ว่ายังมีสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่เป็นลบคือสัมประสิทธิ์ของ X_1 เท่ากับ -3 แสดงว่ายังสามารถเพิ่มค่า Z ได้อีกโดยพิจารณาตัวแปรเข้าและตัวแปรออกใหม่ จะได้ว่าให้ X_1 เป็นตัวแปรเข้า S_3 เป็นตัวแปรออก ดังตารางที่ 2.10 เลขหลักคือ 3 ทำให้เลขหลักหรือสัมประสิทธิ์ของ X_1 ในแถว (3) หรือแถวหลักเป็น 1 โดยเอา 3 หารตลอด ได้สัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแถวหลักใหม่คือ

$$\begin{array}{c} \text{แถวหลักใหม่} \\ \hline \begin{array}{ccc|ccc|c} X_1 & X_2 & & S_1 & S_2 & S_3 & \text{ค่าคงที่ขวามือ} \\ \hline 1 & 0 & & 0 & -1/3 & -1/3 & 2 \end{array} \end{array}$$

ตารางที่ 2.10 ตัวแปรเข้าคือ X_1 ตัวแปรออกคือ S_3

ตัวแปร มูลฐาน	สมการที่	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 ทั้งหมด

	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 $Z = 36$ เมื่อคูณสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่ไม่เป็นมูลฐานในสมการ (0) จะได้เห็นว่าไม่มีสัมประสิทธิ์เป็นบวกทั้งหมด แสดงว่าการกระทำซ้ำๆ นี้สิ้นสุดลง เพราะไม่สามารถหาตัวแปรเข้าและตัวแปรออกที่จะเพิ่มค่า Z ได้อีก ดังนั้นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหานี้คือ $X_1 = 2, X_2 = 6, Z = 36$ สำหรับตารางซิมเพล็กซ์ที่สมบูรณ์ของปัญหานี้แสดงดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ตารางซิมเพล็กซ์ที่สมบูรณ์ของปัญหา

ตัวแปร มูลฐาน	สมการที่	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

2.8 การค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก

จากหนังสือปัญหาประดิษฐ์ (บุญเจริญ สิริเนาวกุล 2551) กล่าวว่าวิธีฮิวริสติกเป็นวิธีการแก้ไขปัญหาที่ใช้หลักเกณฑ์ของกระบวนการต่าง ๆ นำมาใช้ในการค้นหาคำตอบ และลดปริมาณ

การคำนวณให้น้อยลง มีการใช้กฎการตัดสินใจมาพิจารณาตัดสินใจหาอย่างเป็นขั้นเป็นตอน ซึ่งวิธีการจะถูกทำซ้ำ ๆ จนกระทั่งบรรลุเป้าหมายของปัญหานั้น ๆ ซึ่งคำตอบของการแก้ปัญหาด้วยวิธีฮิวริสติกนี้จะเป็นคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (near optimum) การค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก (heuristic search) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยในการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ความซับซ้อนสูง ใช้เวลานานในการแก้ปัญหา ต่างจากการค้นหาคำตอบธรรมดา ซึ่งเหมาะกับข้อมูลมีขนาดไม่ใหญ่มาก โดยจะทำการตรวจสอบข้อมูลที่ตัวจนครบ การค้นหาคำตอบธรรมดานี้จะให้คำตอบที่ถูกต้อง และเป็นคำตอบที่ดีที่สุดเสมอ (optimal solution) แต่ในบางครั้งข้อมูลมีขนาดใหญ่มากการตรวจสอบข้อมูลที่ตัวจนครบเพื่อหาคำตอบที่ถูกต้องที่สุดคงเป็นไปได้ยาก ลักษณะของปัญหาเหล่านี้ เช่น การทางเดินที่สั้นที่สุดของ 77 จังหวัด ที่แต่ละจังหวัดมีทางเดินที่เชื่อมต่อกัน ถ้าจะหาเส้นทางที่สั้นที่สุดเราจะต้องเปรียบเทียบเส้นทางของแต่ละจังหวัด ซึ่งเป็นจำนวนมหาศาลและอาจไม่สามารถเปรียบเทียบให้เสร็จได้ในเวลาที่มีอย่างจำกัด ดังนั้นการแก้ไขปัญหแบบนี้จึงต้องอาศัยวิธีฮิวริสติก วิธีการนี้จะเลือกคำตอบที่เหมาะสมให้กับปัญหาเท่านั้น ซึ่งอาจใช่หรือไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด เรียกคำตอบลักษณะนี้ว่า คำตอบใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (near optimal solution) ดังนั้นวิธีฮิวริสติกจึงได้รับความนิยมนำมาใช้แก้ปัญหาเหล่านี้ ระบบที่มีการประยุกต์ใช้วิธีฮิวริสติก ได้แก่ ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System : ES) และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent :AI) เป็นต้น

ในปัจจุบันการแก้ปัญหาด้วยฮิวริสติกได้รับความสนใจมาก จึงได้มีการพัฒนาการค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติกมากมาย โดยได้เลียนแบบวิถีชีวิตของสิ่งมีชีวิตตามธรรมชาติ กระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมหรือแม้กระทั่งกระบวนการเรียนรู้ของมนุษย์ เป็นต้น การค้นหาด้วยวิธีฮิวริสติกมีเครื่องมือที่สำคัญช่วยการค้นหาแบบนี้คือ ฮิวริสติกฟังก์ชัน (heuristic function) ซึ่งมีหน้าที่หาความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหา เพื่อกำหนดทิศทางของการค้นหาคำตอบ ดังนั้นจุดประสงค์ที่แท้จริงของฮิวริสติกฟังก์ชันก็คือ การกำกับทิศทางของกระบวนการค้นหา เพื่อให้อยู่ในทิศทางที่ได้ประโยชน์สูงสุด โดยจะมีการประเมินค่าฟังก์ชันเหมาะสม (fitness function) เพื่อตรวจสอบการบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ในหัวข้อนี้ได้ยกตัวอย่างการค้นหาคำตอบด้วยฮิวริสติกในหัวข้อย่อต่อไปนี้

2.8.1 การค้นหาคำตอบด้วยกรีดี้แอลกอริทึม

กรีดี้แอลกอริทึม (greedy algorithm) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดก่อน (best first search) ที่ง่ายที่สุด (บุญเจริญ ศิริเนาวกุล 2551) โดยหลักการของการค้นหาแบบนี้คือ การเลือกคำตอบที่ดีที่สุดตลอดเวลาหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นวิธีตะกละตะกลาม (greedy) ซึ่งในการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดนี้จะพิจารณาค่าที่วัดได้จากสถานะปัจจุบันที่ดีที่สุดเพื่อไปยังสถานะถัดไปและจะดำเนินการเลือกสถานะปัจจุบันที่ดีที่สุดจนกระทั่งบรรลุเป้าหมาย ยกตัวอย่าง ถ้า A คือค่าที่วัดได้จากสถานะปัจจุบัน ดังนั้นในการเลือกการเคลื่อนที่ไปยังสถานะถัดไปจะเลือกจากตำแหน่งที่มีค่า A ดีที่สุด โดยสามารถสรุปกระบวนการค้นหาคำตอบด้วยกรีดี้แอลกอริทึมได้ดังนี้

1) เลือกสถานะเริ่มต้นกำหนดให้เป็นสถานะปัจจุบัน

2) หาค่า A ที่ได้จากสถานะปัจจุบัน

2.1) ถ้า $A=0$ แสดงว่าสถานะปัจจุบันคือสถานะเป้าหมาย ให้แสดงคำตอบและจบกระบวนการ

2.2) ถ้า $A \neq 0$ ให้สร้างสถานะถัดไปให้กับสถานะปัจจุบัน จากนั้นหาค่า A ให้กับสถานะถัดไป เลือกสถานะถัดไปที่มีค่า A ต่ำที่สุด

ตัวอย่าง การใช้กริดี้แอลกอริทึมแลกเหรียญให้ได้จำนวนเหรียญน้อยที่สุดจากจำนวนเงินที่กำหนด เช่น มีเงินเหรียญใซ้อยู่ 3 ขนาด 1 บาท 5 บาท และ 10 บาท ถ้าต้องการแลกเงินจำนวน 16 บาท จะได้เหรียญน้อยที่สุดจำนวนกี่เหรียญ

สถานะที่ 1 เหรียญ 10 บาท ค่าของ $A = 6 (16-10)$

เหรียญ 5 บาท ค่าของ $A = 11 (16-5)$

เหรียญ 1 บาท ค่าของ $A = 15 (16-1)$

เลือกเหรียญ 10 บาท เงินที่เหลือ $16 - 10 = 6$ บาท ต่อไปหาเหรียญจากเงินที่เหลือ

สถานะที่ 2 เหรียญ 10 บาท ใช้ไม่ได้เพราะ ค่าเหรียญมากกว่าค่าของเงินที่เหลือ

เหรียญ 5 บาท ค่าของ $A = 1 (6-5)$

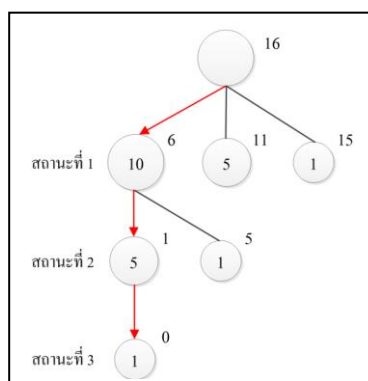
เหรียญ 1 บาท ค่าของ $A = 5 (6-1)$

เลือกเหรียญ 5 บาท เงินที่เหลือ $6 - 5 = 1$ บาท ต่อไปหาเหรียญจากเงินที่เหลือ

สถานะที่ 3 เหรียญ 10, 5 บาท ใช้ไม่ได้เพราะค่าเหรียญมากกว่าค่าของเงินที่เหลือ

เหรียญ 1 บาท ค่าของ $A = 0 (1-1)$

ดังนั้น ถ้าต้องการแลกเงินจำนวน 16 บาท เราจะได้เหรียญ 10 บาท 1 เหรียญ เหรียญ 5 บาท 1 เหรียญ และเหรียญ 1 บาท 1 เหรียญ แสดงกระบวนการดังรูป 2.4

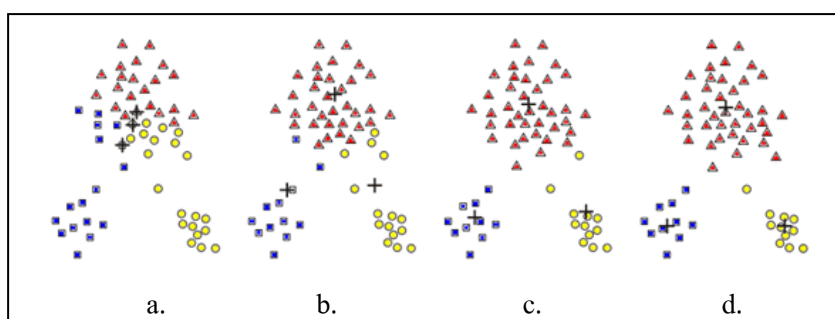


รูปที่ 2.4 โครงสร้างแสดงการแลกเหรียญด้วยกริดี้แอลกอริทึม

2.8.2 การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน

การแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน (k-means clustering) คือ หนึ่งในอัลกอริทึมเทคนิคการเรียนรู้โดยไม่มีผู้สอนที่ง่ายที่สุด เนื่องจากการแก้ปัญหาการจัดกลุ่มที่รู้จักกันทั่วไป โดยอัลกอริทึมการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน จะตัดแบ่ง (partition) วัตถุออกเป็น k กลุ่ม โดยแทนแต่ละกลุ่มด้วยค่าเฉลี่ยของกลุ่ม ซึ่งใช้เป็นจุดศูนย์กลาง (centroid) ของกลุ่มในการวัดระยะห่างของข้อมูลในกลุ่มเดียวกัน (T. Kanungo et al., 2002) ในขั้นตอนแรกต้องกำหนดจำนวนกลุ่ม (k) ที่ต้องการ และกำหนดจุดศูนย์กลางเริ่มต้นจำนวน k จุด สิ่งสำคัญในการกำหนดจุดศูนย์กลางเริ่มต้นของแต่ละกลุ่มนี้ ควรจะถูกกำหนดด้วยวิธีที่เหมาะสม เพราะตำแหน่งจุดศูนย์กลางเริ่มต้นที่แตกต่างกันทำให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายแตกต่างกัน ดังนั้นในทางที่ดีควรจะกำหนดจุดศูนย์กลางนี้ให้ห่างจากจุดศูนย์กลางอื่นๆ ขั้นตอนต่อไปคือสร้างกลุ่มข้อมูลและความสัมพันธ์กับจุดศูนย์กลางที่ใกล้มากที่สุด โดยแต่ละจุดจะถูกกำหนดไปยังจุดศูนย์กลางที่ใกล้เคียงที่สุดจนครบหมดทุกจุด และคำนวณจุดศูนย์กลางใหม่ โดยการหาค่าเฉลี่ยทุกวัตถุที่อยู่ในกลุ่ม หากจุดศูนย์กลางในแต่ละกลุ่มถูกเปลี่ยนตำแหน่ง จะได้จุดมีความสัมพันธ์กับกลุ่มใหม่และใกล้กับจุดศูนย์กลางใหม่ ทำซ้ำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จะสังเกตเห็นว่าผลลัพธ์จากการทำซ้ำแบบนี้ทำให้จุดศูนย์กลางเปลี่ยนตำแหน่งถูกรอบ จนกระทั่งจุดศูนย์กลางจำนวน k จุด ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจึงจะสิ้นสุดกระบวนการ โดยสามารถสรุปกระบวนการค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีนได้ดังนี้

- 1) กำหนดจำนวนกลุ่ม k กลุ่ม และกำหนดจุดศูนย์กลางเริ่มต้นจำนวน k จุด
- 2) นำวัตถุทั้งหมดจัดเข้ากลุ่มที่มีจุดศูนย์กลางที่อยู่ใกล้วัตถุนั้นมากที่สุด โดยคำนวณจากการวัดระยะห่างระหว่างจุดที่น้อยที่สุด
- 3) คำนวณจุดศูนย์กลาง k จุดใหม่ โดยหาจากค่าเฉลี่ยทุกวัตถุที่อยู่ในกลุ่ม
- 4) ทำซ้ำในข้อ 2) จนกระทั่งจุดศูนย์กลางไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการจัดกลุ่มข้อมูลด้วยอัลกอริทึมการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน

รูปที่ 2.5a เป็นการจัดกลุ่มในขั้นตอนแรกโดยที่กำหนดจำนวนกลุ่ม 3 กลุ่ม และกำหนดจุดศูนย์กลางเริ่มต้น ซึ่งใช้สัญลักษณ์ + แทนจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มทั้ง 3 กลุ่ม จากนั้นวัตถุจะถูกกำหนดให้เข้ากลุ่มที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ใกล้วัตถุนั้นมากที่สุดแสดงได้ดังรูปที่ 2.5b จุดศูนย์กลางมีการเปลี่ยนแปลงและเกิดความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุกับจุดศูนย์กลางใหม่ และจัดวัตถุให้เข้ากลุ่มที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ใกล้กับวัตถุนั้นมากที่สุดดังรูปที่ 2.5c ทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งจุดศูนย์กลางไม่เปลี่ยนแปลงจึงจะได้ผลลัพธ์สุดท้ายดังรูปที่ 2.5d

2.8.3 การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรม

การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) เป็นอัลกอริทึมที่จำลองกระบวนการวิวัฒนาการของธรรมชาติ โดยมีหลักการคัดเลือกสายพันธุ์ของธรรมชาติเพื่อนำไปสู่สายพันธุ์ใหม่ที่ดีขึ้น (บุญเจริญ ศิริเนาวกุล, 2551) โดยผู้ที่จำลองกลไกการวิวัฒนาการทางธรรมชาติที่ว่าด้วย “ความอยู่รอดของผู้ที่แข็งแรงที่สุด” (survival of the fittest) คือชาร์ลส ดาร์วิน (Charles Darwin) เนื่องจากในทางธรรมชาติ การดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิตที่มีทรัพยากรในธรรมชาติอย่างจำกัด สิ่งมีชีวิตที่แข็งแรงที่สุดเท่านั้นที่จะอยู่รอดและปกครองผู้ที่อ่อนแอกว่าได้ การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรมนี้จะหาผู้ที่แข็งแรงที่สุดในระหว่างการวิวัฒนาการของประชากรรุ่นต่าง ๆ เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาในแต่ละรุ่น (generation) จะประกอบไปด้วยประชากรของสตริง (string) สตริงจะแสดงคุณสมบัติของสมาชิกแต่ละตัวในประชากรนั้น ซึ่งเป็นการเลียนแบบวิธีการของโครโมโซม (chromosome) โดยสมาชิกหรือสตริงแต่ละตัวในประชากรนี้จะแสดงถึงคำตอบที่เป็นไปได้ในปริภูมิปัญหา (problem space) และสตริงเหล่านี้จะต้องผ่านกระบวนการของการวิวัฒนาการเพื่อความอยู่รอด สตริงที่มีค่าเหมาะสม (fitness) สูงจะถูกเลือกสรรให้อยู่หรือสืบพันธุ์ต่อไป โดยกระบวนการเลือกสรร (selection) จะเลือกประชากรที่ดีที่สุดคือ มีค่าความเหมาะสมสูงเป็นสายพันธุ์พ่อและแม่ (parent) แล้วจะเลือกถ่ายทอดคุณสมบัติที่ดีของพ่อและแม่มาสู่ลูก เป็นเหตุให้ลูกมีแนวโน้มที่ดีกว่าสายพันธุ์พ่อและแม่ วิธีการนี้เรียกว่า การตัดข้าม (crossover) ซึ่งจำนวนประชากรบางส่วนจะถูกตัดออกไป เพื่อเว้นที่ว่างไว้สำหรับลูกที่เกิดใหม่ ในที่สุดก็จะทำให้เกิดรุ่นใหม่ และวิวัฒนาการจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนเมื่อความแตกต่างของคุณสมบัติที่ดีในรุ่นใหม่กับรุ่นเดิมไม่แตกต่างกันมากนั้นก็หมายความว่า การวิวัฒนาการถึงจุดสิ้นสุด การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรมก็จะจบการทำงานลง โดยสามารถสรุปกระบวนการค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรมได้ดังนี้

- 1) สุ่มประชากรเริ่มต้น
- 2) ประเมินค่าความเหมาะสมของประชากร
- 3) สร้างประชากรใหม่ด้วยกระบวนการทางพันธุกรรมดังนี้

3.1) การเลือกสรร (selection) เป็นการสำเนาประชากรที่ดีที่สุดเพื่อการทำ
กระบวนการทางพันธุกรรม

3.2) ตัดข้าม (crossover) เป็นการตัดข้ามประชากรที่ได้รับการเลือกสรร

3.3) การกลายพันธุ์ (mutation) เป็นการปรับปรุงประชากรด้วยการสุ่ม

4) กลับไปที่ขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งความแตกต่างของรุ่นใหม่กับรุ่นเดิมไม่แตกต่างกัน ประชากรที่ดีที่สุดหลังจากการทำงานของหลายรุ่นจะเป็นคำตอบของปัญหา

2.8.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาค

การหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เป็นอัลกอริทึมที่ได้สังเกตลักษณะการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตจากธรรมชาติ โดยเฉพาะการเคลื่อนที่ของกลุ่มสิ่งมีชีวิต เช่น ผีเสื้อกลางคืนและฝูงปลา เป็นต้น (บุญเจริญ ศิริเนาวกุล, 2551) การเคลื่อนที่ของกลุ่มสิ่งมีชีวิตเหล่านี้เป็นการเคลื่อนที่ของสิ่งมีชีวิตองค์ประกอบย่อย ๆ ที่มีเคลื่อนที่ไปด้วยกันอย่างเข้าจังหวะกัน (synchronous) โดยปลาหรือนกสามารถเคลื่อนที่ไปด้วยกันเป็นฝูง สามารถแยกตัวออกจากฝูงแล้วรวมตัวกลับเข้ามาในฝูงอีกครั้งอย่างประสานกลมเกลียว ซึ่งเป็นพฤติกรรมทางสังคมของสิ่งมีชีวิต การหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคเป็นอัลกอริทึมเชิงประชากร โดยมีคุณลักษณะหลาย ๆ อย่างที่เหมือนกับการค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรม (GA) โดยการหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคมีการสุ่มสร้างประชากรเริ่มต้น มีการประเมินค่าความเหมาะสม (fitness) ของแต่ละประชากรด้วยคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในรอบการคำนวณหรือทุกรุ่น (generation) ซึ่งการหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคมีความแตกต่างไปจากอัลกอริทึมพันธุกรรม ตรงที่ไม่มีกระบวนการทางพันธุกรรมเช่น การทำครอสโอเวอร์หรือมิวเทชัน ฯลฯ โดยคำตอบของการหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคถูกแทนด้วยอนุภาค (particle) ที่ซึ่งเคลื่อนที่ไปในปริภูมิค้นหา (search space) โดยมีทิศทางไปตามอนุภาคที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในขณะนั้น ๆ สิ่งที่น่าสนใจของการหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคคือ ความเรียบง่ายของอัลกอริทึม จึงได้รับความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ งานที่สามารถใช้ GA ได้ รายละเอียดของการหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคถูกนำเสนอ James, K. and Eberhart, R. (1995) โดยสามารถสรุปกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคได้ดังนี้

- 1) สุ่มค่าตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคเริ่มต้น
- 2) ประเมินค่าความเหมาะสมของอนุภาค
- 3) ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคดีกว่าค่าความเหมาะสมที่สุดของกลุ่มให้ปรับค่าความเหมาะสมของกลุ่ม

3.1) ถ้าค่าความเหมาะสมของกลุ่มบรรลุวัตถุประสงค์ของการค้นหา
คำตอบให้สิ้นสุดการทำงาน

- 4) ถ้าค่าความเหมาะสมของอนุภาคดีกว่าค่าความเหมาะสมที่สุดของอนุภาคให้ปรับค่าความเหมาะสมของอนุภาค
- 5) ปรับค่าตำแหน่งและความเร็วของอนุภาค
- 6) กลับไปที่ขั้นตอนที่ 2

2.8.5 การค้นหาคำตอบด้วยการอบอ่อนจำลอง

การค้นหาคำตอบด้วยการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) เป็นอัลกอริทึมที่จำลองกระบวนการหลอมโลหะ (บุญเจริญ ศิริเนาวกุล, 2551; Du et al., 2016) โดยอาศัยหลักการลดอุณหภูมิของการหลอมโลหะที่มีความร้อนที่จุดหลอมเหลวสูงมากให้ลดลงมาอยู่ที่อุณหภูมิปกติ โดยที่การลดอุณหภูมินี้ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่ดีของโลหะคือ ความแข็งและเหนียว เมื่อโลหะหลอมตัว (annealing) อยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว การทำให้โลหะนั้นเย็นตัวอย่างช้า ๆ จนถึงที่อุณหภูมิลดลงโลหะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ซึ่งก็คือกระบวนการลดพลังงานที่สะสมในโลหะ จากการที่โลหะมีพลังงานความร้อนสะสมอยู่สูงมากให้สถานะสุดท้ายมีพลังงานคงที่ ถ้าอุณหภูมิลดลงเร็วเกินไปก็จะทำให้โลหะเกิดความเสียหายหรือมีคุณสมบัติที่ไม่ดีคือ เปราะแตกหักง่าย แต่ถ้าอุณหภูมิลดลงช้าเกินไปก็จะเป็นการเสียเวลาในการดำเนินงาน ดังนั้นการลดลงของอุณหภูมิจึงสำคัญ เพื่อที่จะทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ของการหลอมโลหะ จึงต้องมีฟังก์ชันการลดลงของอุณหภูมิที่เหมาะสม เนื่องจากวิธีการนี้ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้งานแก้ปัญหามากมาย และเป็นวิธีการที่เข้าใจง่าย ผู้วิจัยจึงเลือกวิธีการนี้ในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งรายละเอียดวิธีนี้จะอธิบายในบทที่ 3 โดยสามารถสรุปกระบวนการค้นหาคำตอบด้วยการอบอ่อนจำลองได้ดังนี้

- 1) สุ่มประชากรเริ่มต้นกำหนดให้เป็นสถานะปัจจุบัน
- 2) ประเมินค่าความเหมาะสมของสถานะปัจจุบัน
- 3) สร้างสถานะใหม่จากสถานะปัจจุบัน
- 4) ประเมินค่าความเหมาะสมของสถานะใหม่
- 5) เปรียบเทียบสถานะใหม่กับสถานะปัจจุบัน
 - 5.1) ถ้าสถานะใหม่ดีกว่าสถานะปัจจุบัน กำหนดสถานะใหม่ให้เป็นสถานะปัจจุบัน
 - 5.2) ถ้าสถานะใหม่แย่กว่าสถานะปัจจุบัน ตัดสินใจด้วยความน่าจะเป็นว่าจะยอมรับสถานะใหม่หรือไม่
- 6) ปรับค่าอุณหภูมิ
- 7) กลับไปที่ขั้นตอนที่ 3 จนกระทั่งถึงเกณฑ์การหยุดทำงาน โดยสถานะสุดท้ายจะเป็นคำตอบของปัญหา

2.9 สรุปท้ายบท

เนื้อหาในบทที่สองนี้ได้กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้ทำการสำรวจมา รวมถึงโครงสร้างพื้นฐานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์และแบบจำลองการสูญเสียจากสิ่งกีดขวางในอาคาร เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานของเทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ และเป็นแนวทางในการออกแบบการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นอย่างมีประสิทธิภาพ ในบทนี้ยังได้กล่าวถึงการกำหนดปัญหาให้อยู่ในรูปแบบของการโปรแกรมเชิงเส้นรวมถึงอัลกอริทึมซิมเพล็กซ์ ที่จะทำการคำนวณซ้ำๆจนกว่าจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวเป็นวิธีการหาคำตอบของการโปรแกรมเชิงเส้น ในส่วนสุดท้ายเป็นการกล่าวถึงวิธีฮิวริสติกวิธีต่างๆ ซึ่งเป็นวิธีที่นำมาใช้ในการค้นหาคำตอบ โดยการค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติกมีการใช้กฎการตัดสินใจมาพิจารณาตัดสินใจอย่างเป็นขั้นเป็นตอน และถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยในการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ความซับซ้อนสูง ใช้เวลานานในการแก้ปัญหา จากทฤษฎีและการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ ผู้วิจัยจะนำไปใช้เพื่อออกแบบวิธีการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น โดยใช้การทำงานร่วมกันระหว่างการโปรแกรมเชิงเส้นและวิธีการรอบอ่อนจำลอง เนื่องจากการโปรแกรมเชิงเส้นเป็นวิธีที่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ และวิธีการรอบอ่อนจำลองซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการค้นหาคำตอบของเทคนิคฮิวริสติกนั้น เป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบแบบสุ่มที่ใช้งานง่าย ได้รับความนิยมน และมีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับการใช้ในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นเพียงวิธีเดียวเพื่อหาคำตอบได้

บทที่ 3

เทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการอบ อ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์ 4G-LTE ภายในอาคารหลายชั้น

ในบทนี้นำเสนอเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการอบอ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอี (4G-Long Term Evolution : 4G-LTE) ภายในอาคารหลายชั้น โดยนำความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 มาเป็นแนวคิดในการออกแบบ โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 3.1 แนวคิดสำหรับการออกแบบเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการอบอ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น หัวข้อ 3.2 แนวทางการออกแบบเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการอบอ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น หัวข้อ 3.3 โครงสร้างของเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการอบอ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น หัวข้อ 3.4 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอบอ่อนจำลอง และหัวข้อ 3.5 สรุปท้ายบท

3.1 แนวคิดสำหรับการออกแบบเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้ง สถานีฐานโดยใช้วิธีการอบอ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอีภายใน อาคารหลายชั้น

ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเฟมโตเซลล์ร่วมกับเทคโนโลยีสี่จีแอลทีอีเป็นที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากจะทำให้อัตราการรับ-ส่งข้อมูลมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่างๆ (Chandrasekhar et al., 2008) สถานีฐานเฟมโตเซลล์นั้นเป็นสถานีฐานโทรศัพท์มือถือขนาดเล็กที่มีกำลังส่งสัญญาณที่ต่ำ โดยสัญญาณจะครอบคลุมพื้นที่ได้ในบริเวณไม่กว้างมาก การทำงานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์เป็นเสมือนตัวกลางในการเชื่อมต่อแบบไร้สายระหว่างโทรศัพท์มือถือเข้ากับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงหรือบรอดแบนด์ที่ผ่านตามสายภายในอาคาร โดยสถานีฐานเฟมโตเซลล์จะเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านตัวรับสัญญาณอินเทอร์เน็ต (DSL router) เพื่อส่งสัญญาณไปยังผู้ใช้งานภายในพื้นที่ให้บริการต่อไป ซึ่งข้อดีของสถานีฐานเฟมโตเซลล์คือติดตั้งได้ง่าย ไม่มีอุปกรณ์ในการติดตั้งที่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับ

กับการติดตั้งอุปกรณ์ขยายสัญญาณภายในอาคารแบบอื่นๆ สำหรับประเด็นที่ควรให้ความสำคัญในการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์นั้นคือจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ต้องติดตั้ง ตำแหน่งติดตั้ง และระดับกำลังส่งที่เหมาะสมของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อความแรงสัญญาณ อัตราเร็วการรับ-ส่งข้อมูลของผู้ใช้งานภายในพื้นที่ให้บริการ สัญญาณที่รั่วไหลออกไปภายนอกบริเวณอาคาร และค่าใช้จ่ายสำหรับการติดตั้ง

จากการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของอาคารในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คืออาคารแบบชั้นเดียวและอาคารแบบหลายชั้น ซึ่งอาคารโดยส่วนใหญ่จะเป็นอาคารแบบหลายชั้น ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าอาคารแบบชั้นเดียว เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของพื้นที่ในแต่ละชั้นมีความซับซ้อนที่แตกต่างกัน โดยอาคารแบบหลายชั้นสามารถที่จะกำหนดพิกัดเป็น 3 มิติ (x, y, z) โดยที่ x คือ ความกว้างของอาคาร y คือ ความยาวของอาคาร z คือ ความสูงของอาคาร

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการอบอุ่นจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลที่อู่ภายในอาคารหลายชั้น ที่พิจารณาถึงปัจจัยด้านความแรงสัญญาณสำหรับครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ อัตราเร็วการรับ-ส่งข้อมูลในการให้บริการของผู้ใช้งาน ข้อจำกัดด้านความจุของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานภายในอาคารได้ และสัญญาณรั่วไหลจากสถานีเฟมโตเซลล์ที่ออกไปรบกวนผู้ใช้งานภายนอกอาคาร ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการวางแผนเครือข่ายสำหรับการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานภายในอาคารประเภทชั้นเดียวและประเภทหลายชั้นได้ อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้กับอาคารที่มีลักษณะโครงสร้างแตกต่างกันได้

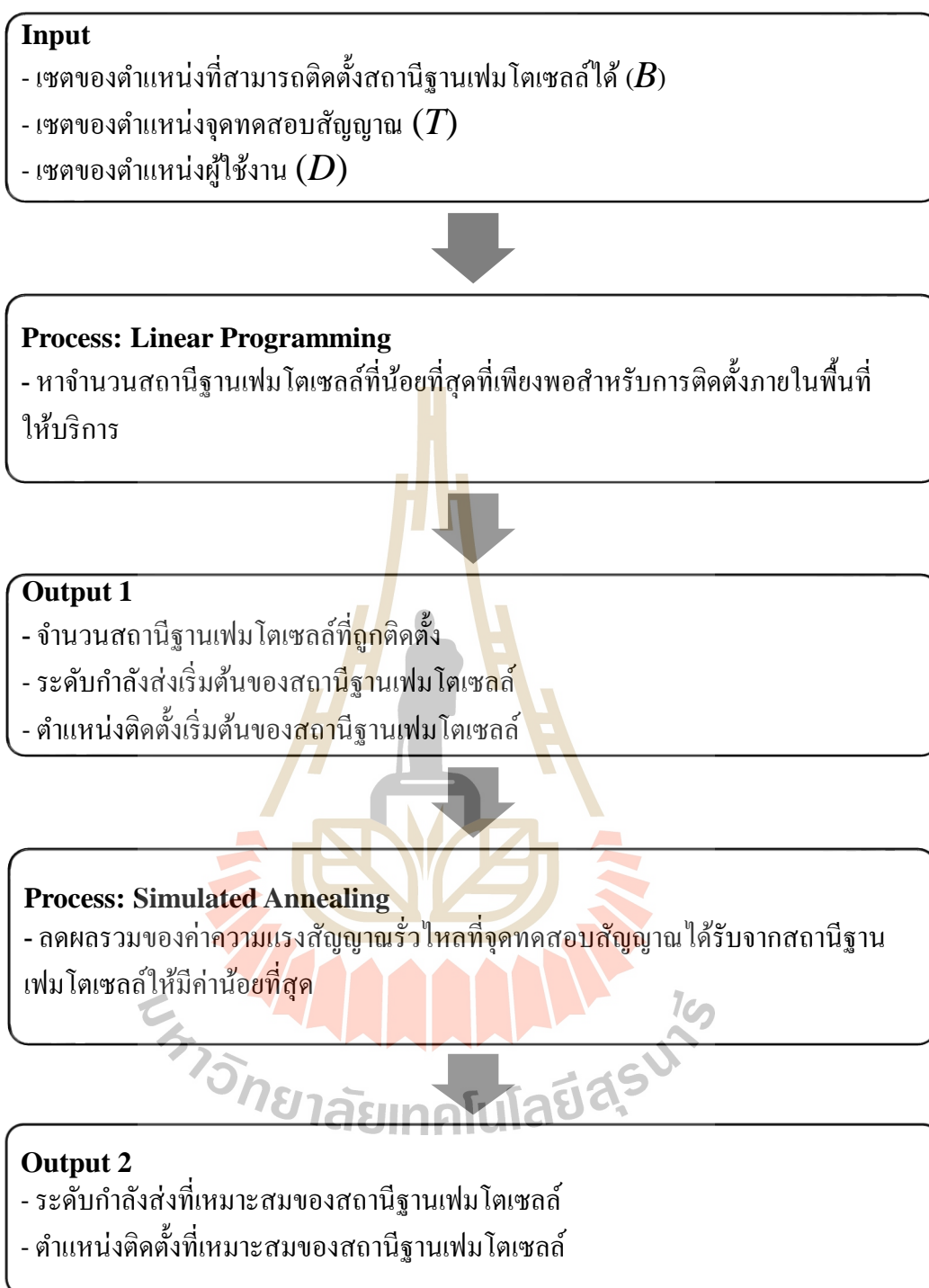
3.2 แนวทางการออกแบบเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการอบอุ่นจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลที่อู่ภายในอาคารหลายชั้น

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำแนวทางการกำหนดปัญหาให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้กับเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการอบอุ่นจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลที่อู่ภายในอาคารหลายชั้น โดยผู้วิจัยได้พิจารณาถึงวิธีการแก้ปัญหาที่มีการหาค่าตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (near optimal) ด้วยวิธีฮิวริสติกส์ร่วมกับโปรแกรมเชิงเส้น (linear programming) เนื่องจากการใช้การโปรแกรมเชิงเส้นที่ใช้แก้ปัญหาเพื่อหาค่าตอบที่ดีที่สุด (optimal) เพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถที่จะแก้ปัญหาภายในอาคารหลายชั้นที่มีขนาดใหญ่ มีความซับซ้อนสูง มีจำนวนตัวแปรจำนวนมากหรือแม้กระทั่งถูกจำกัดด้วยเวลาในการค้นหาค่าตอบ เป็นต้น

เทคนิคที่นำเสนอมีการแบ่งการทำงานเป็น 2 เฟส โดยขั้นตอนการทำงานแสดงไว้ดังรูปที่ 3.1 การทำงานในเฟสที่ 1 คือ การหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์น้อยที่สุดที่เพียงพอต่อการติดตั้งภายในอาคาร รวมถึงระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งเริ่มต้นของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น ถัดไปในเฟสที่ 2 เป็นการหาระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยวิธีการอบอุ่นจำลอง

การดำเนินการทั้ง 2 เฟส มีวัตถุประสงค์ต่างกัน แต่มีเงื่อนไขเดียวกันซึ่งประกอบด้วยเงื่อนไขด้านความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณภายในอาคารที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์จะต้องมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (threshold) เงื่อนไขด้านอัตราเร็วการรับ-ส่งข้อมูลของผู้ใช้งานในพื้นที่ให้บริการจะต้องมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด และเงื่อนไขข้อจำกัดด้านความจุของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในการรองรับจำนวนผู้ใช้งาน สุดท้ายคำตอบที่ได้หลังจากการดำเนินการทั้ง 2 เฟส จะเป็นระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสม มีจำนวนสถานีฐานที่เพียงพอกับลักษณะรูปแบบพื้นที่ที่ให้บริการและอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด





รูปที่ 3.1 กระบวนการสำหรับการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์

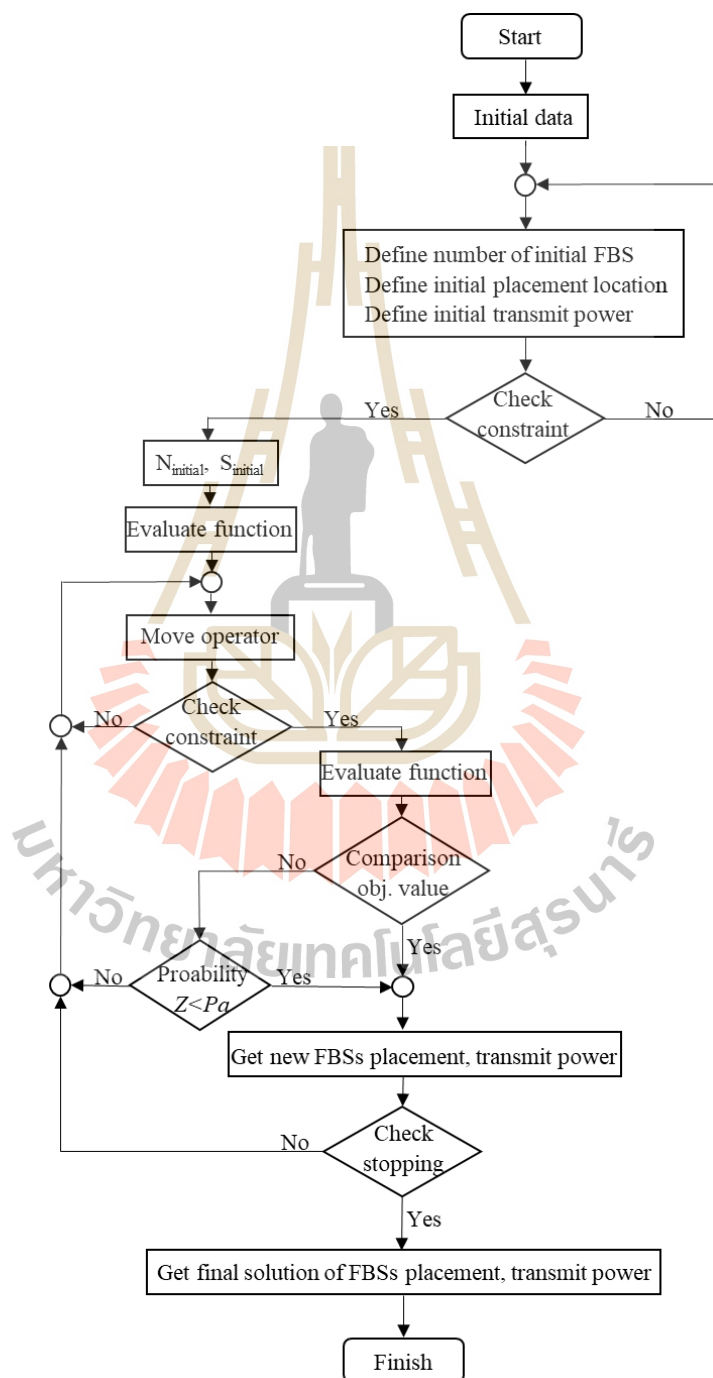
3.3 โครงสร้างของเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน โดยใช้วิธีการอบอ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น

จากหัวข้อที่ 3.2 เทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน โดยใช้วิธีการอบอ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น เป็นการเลือกระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่มีความเหมาะสมกับลักษณะรูปแบบอาคารขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อน ใช้จำนวนสถานีฐานที่เหมาะสมกับจำนวนผู้ใช้งานภายในอาคาร ภายใต้ปัจจัยด้านความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ และอัตราเร็วการรับ-ส่งข้อมูลของผู้ใช้งานที่ได้รับต้องมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน บนพื้นฐานของการทำงานร่วมกันระหว่างการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP) และอัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) เพื่อให้ได้โครงสร้างของเครือข่ายสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ที่ให้ค่าผลรวมของความแรงสัญญาณรั่วไหลที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์มีค่าน้อยที่สุด (Minimum Summation of Leakage Signal: MSLS) ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เราตั้งชื่อเทคนิคที่พัฒนาขึ้นนี้ว่า MSLS-SA

เทคนิค MSLS-SA นี้ได้นำวิธีการค้นหาคำตอบของวิธีการอบอ่อนจำลองมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น โดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX และ โปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการออกแบบการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งวิธีการอบอ่อนจำลองเป็นหนึ่งในวิธีการค้นหาคำตอบของเทคนิคฮิวริสติกที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพ โดยวิธีการอบอ่อนจำลองเป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบแบบสุ่มที่ใช้งานง่ายเลียนแบบกรรมวิธีการควบคุมอุณหภูมิของการอบโลหะให้ร้อนแล้วปล่อยให้เย็นลงช้าๆ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึกที่มีพลังงานภายในน้อยที่สุด และช่วยให้โลหะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แข็งแกร่งและทนทาน โดยโลหะในสถานะของเหลวซึ่งมีอุณหภูมิสูงจะมีโครงสร้างระดับโมเลกุลที่มีพลังงานสูง และมีปริมาณการเคลื่อนที่สูง เปรียบได้กับการค้นหาคำตอบที่มีพลังงานมากพอที่จะหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบ (local optimum) และเมื่อทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ โมเลกุลโครงสร้างของโลหะจะมีการจัดตัวเป็นผลึก เสมือนการค้นหาคำตอบถูกจำกัดให้อยู่ในช่วงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบ (Du et al., 2016)

กระบวนการค้นหาคำตอบของเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐาน โดยใช้วิธีการอบอ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้นสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอนตามหัวข้อย่อๆดังนี้ หัวข้อ 3.3.1 ข้อมูลเริ่มต้น

หัวข้อ 3.3.2 การหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เริ่มต้น และหัวข้อ 3.3.3 การกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการอบอ่อนจำลอง แผนภาพการทำงานของเทคนิค MSLS-SA แสดงดังรูปที่ 3.2 และ Pseudo code ของเทคนิค MSLS-SA แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 แผนภาพการทำงานของเทคนิค MSLS-SA

ตารางที่ 3.1 Pseudo code ของเทคนิค MSLs-SA

Input:	$\varphi, \tau_{stop}, n_{worse_max}, \Delta E, STPs, Candidate\ of\ FBSs, Users, path\ loss\ data$
Output:	Solution of FBSs placement for multi-floor building (S_{final})
1	Repeat
2	Install i FBSs
3	Define location of installed FBSs (FBS_1, \dots, FBS_i)
4	Define power level of installed FBSs ($Level_1, \dots, Level_L$)
5	Check constraint Eq. (3.2) – (3.10)
6	If pass
7	If $i < N_{initial}$
8	$N_{initial} = i$
9	$S_{initial} = FBS_i, Level_L$
10	Until $i = \text{number of Candidate of FBSs}$
11	$N_{initial}, S_{initial}$
----- SA process -----	

----- SA process -----		
12	Initialize $Iter = 0, n_{worse} = 0$	
13	Set $Iter_{max} = N_{initial}$	3.3.3
14	Calculate $\tau = \tau_{initial}$	
15	Calculate evaluation function $E(S)$	3.3.3.2
16	Repeat	
17	Repeat	
18	Repeat	
19	Generate new assignment S_{new} from S (move operator)	3.3.3.3
20	Check constraints Eq. (3.2) – (3.10)	3.3.3.4
21	Until all constraints pass	
22	Calculate evaluation function $E(S_{new})$	
23	Calculate $\Delta E = E(S) - E(S_{new})$	3.3.3.5
24	Set $Iter ++$	
25	If $\Delta E > 0$	
26	$n_{worse} = 0$	
27	$S = S_{new}, E(S) = E(S_{new})$	
28	Else $\Delta E < 0$	
29	Set $n_{worse} ++$	
30	Repeat	
31	If random $[0,1] < e^{-(\Delta E/\tau)}$	3.3.3.6
32	$S = S_{new}$	
33	$E(S) = E(S_{new})$	
34	Until $n_{worse} = n_{worse_{max}}$	
35	End SA Process	
36	Until $Iter = Iter_{max}$	
37	Reset $Iter = 0$	
38	Calculate $\tau = \varphi\tau$	
39	Calculate $Iter_{max} = Iter_{max}/\varphi$	
40	Until $\tau = \tau_{stop}$	
41	End SA Process	3.3.3.7
42	$S_{final} = S$	

3.3.1 ข้อมูลเริ่มต้น (Initial data)

ขั้นตอนการทำงานแรกของเทคนิค MSLS-SA เริ่มจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อกำหนดและ ข้อจำกัดของการค้นหาคำตอบ ซึ่งข้อมูลเริ่มต้นเหล่านี้จะถูกใช้ร่วมกับการค้นหาจำนวน ตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยข้อมูลเริ่มต้นของเทคนิคการออกแบบ MSLS-SA ประกอบไปด้วย

3.3.1.1 จำนวนและตำแหน่งจุดทดสอบสัญญาณ

จำนวนและตำแหน่งจุดทดสอบสัญญาณ (Signal Test Point: STP) คือตำแหน่งที่ใช้วัดค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จากสถานีฐานเฟม โดเซลล์ซึ่งกระจายอยู่ทั่วพื้นที่ให้บริการ โดยผู้ออกแบบจะมีการกำหนด จำนวน ตำแหน่ง และระยะห่างระหว่างตำแหน่งของจุดทดสอบให้ครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ

3.3.1.2 จำนวนและตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ได้

จำนวนและตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ได้ (candidate of FBSs) คือตำแหน่งที่เป็นไปได้ที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ภายในพื้นที่ให้บริการ โดยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ได้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) เพื่อลดระยะเวลาในการค้นหาของสมการคณิตศาสตร์

3.3.1.3 ค่าความสูญเสียตามระยะทางระหว่างจุดทดสอบและสถานีฐาน

ค่าความสูญเสียตามระยะทางระหว่างจุดทดสอบและสถานีฐาน คือค่าความสูญเสียตามระยะทางระหว่างทุกจุดทดสอบสัญญาณในพื้นที่ให้บริการซึ่งได้รับจากสถานีฐานเฟม โดเซลล์ทุกตำแหน่งที่สามารถติดตั้งได้ มีหน่วยเป็น dBm

3.3.1.4 ขนาดของพื้นที่ให้บริการในแต่ละชั้น

ขนาดของพื้นที่ให้บริการในแต่ละชั้น คือขนาดของพื้นที่อาคารในแต่ละชั้น คำนวณได้จากพื้นที่โดยประมาณของแต่ละชั้นในแบบระนาบเดียว (กว้าง x ยาว)

3.3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

หัวข้อนี้แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นในการพยากรณ์ระดับความแรงสัญญาณที่สถานีฐานเฟม โดเซลล์สามารถส่งสัญญาณมายังจุดทดสอบความแรงสัญญาณและตำแหน่งของผู้ใช้งานภายในอาคาร ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยตารางที่ 3.3 แสดงค่ามาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วทางกายภาพ และระดับความแรงสัญญาณขั้นต่ำในการรักษาอัตราเร็วทางกายภาพของเทคโนโลยี 4G-LTE อ้างอิงจากงานวิจัยของ (Thiagarajah et al., 2013) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของเทคโนโลยี 4G-LTE ใช้งานที่ย่านความถี่ 2.6 GHz (LTE Band 7) และใช้งานที่แบนวิดท์ 20 MHz ซึ่งอัตราเร็วทางกายภาพระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับสถานีฐานเฟม โดเซลล์นั้นจะแปรผันตามระดับความแรงสัญญาณที่

อุปกรณ์ผู้ใช้งานสามารถรับได้และแปรผันตามวิธีการมอดูเลต ดังนั้นอัตราเร็วทางกายภาพ (Physical data rate) ที่จุดทดสอบคุณภาพสัญญาณและตำแหน่งของผู้ใช้งาน สามารถเทียบได้จาก ตารางที่ 3.2 ซึ่งกำหนดอัตราเร็วทางกายภาพสำหรับจุดทดสอบคุณภาพสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ ให้บริการใช้ที่ค่า 4.20 Mbps เทียบกับระดับสัญญาณขั้นต่ำที่ควรรับได้ที่ค่า -105.535 dBm และ อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับของผู้ใช้งานใช้ที่ค่า 75.60 Mbps เทียบกับระดับสัญญาณขั้นต่ำที่ควรรับได้ที่ค่า -80.9348 dBm

ตารางที่ 3.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่า
ระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 dBm
ความสูงของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	2 m
ความสูงของจุดทดสอบสัญญาณ	0.8 m
ความสูงของผู้ใช้งาน	0.8 m
ความถี่ของสัญญาณ	2.6 GHz (LTE Band 7)
ความกว้างของช่องสัญญาณ	20 MHz
ปริมาณผู้ใช้ที่สถานีฐานรองรับได้	32 Users/FBS
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับรับประกันอัตราเร็วการให้บริการของผู้ใช้งาน	75.60 Mbps (-80.9348 dBm)
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับรับประกันความแรงสัญญาณที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ	4.20 Mbps (-103.535 dBm)

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วทางกายภาพและระดับสัญญาณขั้นต่ำในการรักษาอัตราเร็วทางกายภาพ

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

3.3.3 ขั้นตอนการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เริ่มต้น (Phase 1)

การทำงานในขั้นตอนนี้รับข้อมูลต้นที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.1 แล้วนำข้อมูลเหล่านั้นมาทำการคำนวณเพื่อหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เริ่มต้นโดยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น คำตอบที่ได้จากขั้นตอนนี้จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์ 4G-LTE ภายในอาคารหลายชั้นในขั้นตอนต่อไป

โดยในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ในรูปแบบโปรแกรมเชิงเส้นเพื่อใช้ในการหาคำตอบ ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนสำคัญคือ สมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข (ประกอบ จิริกิติ, 2535) โดยความหมายของสมการวัตถุประสงค์คือ สมการที่อยู่ในรูปของค่าต่ำสุด (minimization) หรือค่าสูงสุด (maximization) ขณะที่สมการเงื่อนไขคือ สมการที่แสดงข้อจำกัดของปัจจัยต่าง ๆ โดยตัวแปรที่ใช้ในสมการคณิตศาสตร์สำหรับโปรแกรมเชิงเส้นที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย ตัวแปรเซต (set) ตัวแปรตัดสินใจ (decision variable) ที่มีค่าเป็น 0 หรือ 1 และตัวแปรคงที่ (constant parameter) ดังแสดงได้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในขั้นตอนการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เริ่มต้น (Phase 1)

เซตของตัวแปร	
B	เซตของตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ (FBSs)
L	เซตของระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์
S	เซตของตำแหน่งจุดทดสอบความแรงสัญญาณ (STPs)
T	เซตของตำแหน่งจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล (LTPs)
U	เซตของตำแหน่งผู้ใช้งาน (User)
ตัวแปรตัดสินใจ	
r_i	ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ โดยมีค่าเป็น 1 เมื่อเลือกติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i และมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่มีการเลือกติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i โดยที่ $i \in B$
a_{il}	ตัวแปรตัดสินใจ ที่มีค่าเป็น 1 ถ้าระดับกำลังส่ง l ถูกกำหนดให้กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i และมีค่าเป็น 0 ถ้าระดับกำลังส่ง l ไม่ถูกกำหนดให้กับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i โดยที่ $i \in B$ และ $l \in L$

s_{ii}^h	ตัวแปรตัดสินใจ ที่มีค่าเป็น 1 ถ้าจุดทดสอบความแรงสัญญาณ h เลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i ที่มีระดับกำลังส่ง l และมีค่าเป็น 0 เมื่อจุดทดสอบความแรงสัญญาณ h ไม่เลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i ที่มีระดับกำลังส่ง l โดยที่ $h \in S, i \in B$ และ $l \in L$
t_{ii}^o	ตัวแปรตัดสินใจ ที่มีค่าเป็น 1 ถ้าจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล o เลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i ที่มีระดับกำลังส่ง l และมีค่าเป็น 0 เมื่อจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล o ไม่เลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i ที่มีระดับกำลังส่ง l โดยที่ $o \in T, i \in B$ และ $l \in L$
u_{ii}^g	ตัวแปรตัดสินใจ ที่มีค่าเป็น 1 ถ้าผู้ใช้งานที่ตำแหน่ง g เลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i ที่มีระดับกำลังส่ง l และมีค่าเป็น 0 เมื่อผู้ใช้งานที่ตำแหน่ง g ไม่เลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i ที่มีระดับกำลังส่ง l โดยที่ $g \in U, i \in B$ และ $l \in L$
ตัวแปรค่าคงที่	
pls_{hi}	การสูญเสียตามระยะทาง (dB) ระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i และจุดทดสอบความแรงสัญญาณ h
pls_{oi}	การสูญเสียตามระยะทาง (dB) ระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i และจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล o
plu_{gi}	การสูญเสียตามระยะทาง (dB) ระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ตำแหน่ง i และผู้ใช้งานที่ตำแหน่ง g
Pt_{il}	ระดับกำลังส่ง l ของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ (dBm) ที่ตำแหน่ง i
P_{ths}	ค่าเกณฑ์ขั้นต่ำของความแรงสัญญาณสำหรับจุดทดสอบความแรงสัญญาณ (dBm)
P_{thu}	ค่าเกณฑ์ขั้นต่ำของความแรงสัญญาณสำหรับผู้ใช้งาน (dBm)
Gt	ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (dBi)
Gr	ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาครับ (dBi)

สำหรับสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขสำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นในการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เริ่มต้น มีรายละเอียดอธิบายในสองหัวข้อต่อไปนี้เป็นหัวข้อที่ 3.3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และหัวข้อที่ 3.3.2 สมการเงื่อนไข

3.3.3.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์สำหรับการหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เพียงพอสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ต้องติดตั้งภายในอาคารให้น้อยที่สุด โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^B r_i \quad (3.1)$$

3.3.3.2 สมการเงื่อนไข

เงื่อนไขสำหรับการกำหนดจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ต้องติดตั้งตำแหน่งและระดับกำลังส่งเริ่มต้นของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ประกอบด้วย 9 เงื่อนไขดังนี้

1) สถานีฐานเฟมโตเซลล์ตำแหน่งที่ i จะต้องถูกกำหนดระดับกำลังส่งให้เพียง 1 ระดับเท่านั้น โดยเซตของระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์มีจำนวน 8 ระดับ คือ $L = \{2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20\}$

$$\sum_{l=1}^L a_{il} = 1 \quad \forall i \in B \quad (3.2)$$

2) สถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่จะถูกกำหนดระดับกำลังส่งได้ ต้องเป็นสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกเลือกติดตั้งแล้วเท่านั้น

$$a_{il} \leq r_i \quad \forall i \in B, l \in L \quad (3.3)$$

3) จุดทดสอบความแรงสัญญาณที่ตำแหน่ง h จะต้องได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่มีระดับกำลังส่ง l อย่างน้อย 1 สถานีฐาน

$$\sum_{i=1}^B \sum_{l=1}^L s_{il}^h \geq 1 \quad \forall h \in S \quad (3.4)$$

4) จุดทดสอบความแรงสัญญาณตำแหน่ง h จะเลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกเลือกติดตั้งแล้วเท่านั้น

$$s_{il}^h \leq a_{il} \quad \forall h \in S, i \in B, l \in L \quad (3.5)$$

5) ค่าความแรงสัญญาณจากจุดทดสอบความแรงสัญญาณตำแหน่ง h ที่รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ i ที่มีระดับกำลังส่ง l จะต้องมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

$$s_{il}^h * (Pt_{il} + Gt + Gr - pls_{hi}) - Pths \geq 0 \quad \forall h \in S, i \in B, l \in L \quad (3.6)$$

6) ผู้ใช้งานที่ตำแหน่ง g จะต้องได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่มีระดับกำลังส่ง l อย่างน้อย 1 สถานีฐาน

$$\sum_{i=1}^B \sum_{l=1}^L u_{il}^g \geq 1 \quad \forall g \in B \quad (3.7)$$

7) ผู้ใช้งานที่ตำแหน่ง g จะเลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกเลือกติดตั้งแล้วเท่านั้น

$$u_{il}^g \leq a_{il} \quad \forall g \in U, i \in B, l \in L \quad (3.8)$$

8) ค่าความแรงสัญญาณจากผู้ใช้งาน g ที่รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ i ที่มีระดับกำลังส่ง l จะต้องมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

$$u_{il}^g * (Pt_{il} + Gt + Gr - pls_{gi}) - Pthu \geq 0 \quad \forall g \in U, i \in B, l \in L \quad (3.9)$$

9) จำนวนผู้ใช้งานที่สามารถเข้าใช้งานสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนผู้ใช้งานมากที่สุดที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์สามารถรองรับได้ (32 ผู้ใช้งาน)

$$\sum_{g=1}^U u_{il}^g \leq 32 \quad \forall i \in B, l \in L \quad (3.10)$$

เมื่อเสร็จสิ้นการหาคำตอบภายใต้วัตถุประสงค์และเงื่อนไขในขั้นตอนนี้จะได้อาณาเขตของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่จำเป็นต้องติดตั้งภายในอาคาร รวมถึงระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เริ่มต้น ซึ่งคำตอบที่ได้จากขั้นตอนนี้จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้นในขั้นตอนต่อไป

3.3.4 ขั้นตอนการหาระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่เหมาะสมด้วยวิธีการอบอุ่นจำลอง (Phase 2)

เมื่อได้จำนวนสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่เพียงพอสำหรับติดตั้งภายในพื้นที่ให้บริการ ($N_{initial}$) รวมถึงตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งเริ่มต้นของสถานีฐานเฟมโทเซลล์ ($S_{initial}$) จากขั้นตอนก่อนหน้าแล้ว ในขั้นตอนถัดมาระบบจะทำการค้นหาตำแหน่งและระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่เหมาะสมจากจำนวนสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่เพียงพอด้วยวิธีการอบอุ่นจำลอง

สำหรับขั้นตอนเริ่มต้นของกระบวนการอบอุ่นจำลอง ระบบจะรับพารามิเตอร์เริ่มต้นที่จำเป็นต่อกระบวนการทำงาน จากนั้นในการค้นหาตำแหน่งกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโทเซลล์แต่ละครั้ง จะมีระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งใหม่ (S_{new}) เกิดขึ้น ซึ่งเป็นระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งข้างเคียงของระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งปัจจุบัน (S) ขั้นตอนต่อมาคือการประเมินค่าคำตอบของโครงสร้างใหม่ (S_{new}) และนำมาเปรียบเทียบกับค่าคำตอบของโครงสร้างปัจจุบัน (S) ถ้าค่าคำตอบของโครงสร้างใหม่ (S_{new}) มีค่ามากกว่าค่าคำตอบของโครงสร้างปัจจุบัน (S) โครงสร้างคำตอบใหม่นั้นจะถูกยอมรับและกลายเป็นโครงสร้างคำตอบปัจจุบัน หรือถ้าหากค่าคำตอบของโครงสร้างคำตอบใหม่ (S_{new}) ถูกยอมรับด้วยความน่าจะเป็น (P_d) ที่ได้กล่าวไว้ในสมการที่ (3.12) โครงสร้างคำตอบใหม่นั้นก็จะกลายเป็นโครงสร้างคำตอบปัจจุบันเช่นกัน

3.3.4.1 รูปแบบของคำตอบ

ในงานวิจัยนี้ใช้เมตริกซ์แถว C ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด $1 \times J$ ในการเก็บค่าคำตอบของการเลือกตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานเฟมโทเซลล์ โดยที่ $C = [c_1 c_2 c_3 \dots c_j \dots c_J]$ เมื่อ c_j คือตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกติดตั้งสถานีฐานเฟมโทเซลล์ ถ้ามีค่าเป็น 1 หมายถึง เลือกติดตั้งสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่ตำแหน่ง j และถ้ามีค่าเป็น 0 จะหมายถึง ไม่เลือกติดตั้งสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่ตำแหน่ง j ตัวอย่างเช่น $C = [00011001]$ โดย C เป็นเมตริกซ์แถวขนาด 8 อีลิเมนต์ ซึ่งแสดงการเลือกติดตั้งโนดอ้างอิง 3 ตำแหน่ง คือ ติดตั้งโนดอ้างอิงที่ C_4 C_5 และ C_8 เช่นเดียวกันกับตัวแปรสำหรับการเก็บค่าของการเลือกระดับกำลังส่งว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยที่ $D = [d_1 d_2]$ ถ้า d_1 มีค่าเป็น 1 หมายถึง เลือกลดระดับกำลังส่ง และถ้า d_2 มีค่าเป็น 1 หมายถึง เลือกเพิ่มระดับกำลังส่ง ตัวอย่างเช่น $D = [0 1]$ ซึ่งแสดงว่า เลือกการเพิ่มระดับกำลังส่ง

3.3.4.2 ฟังก์ชันการประเมินผล

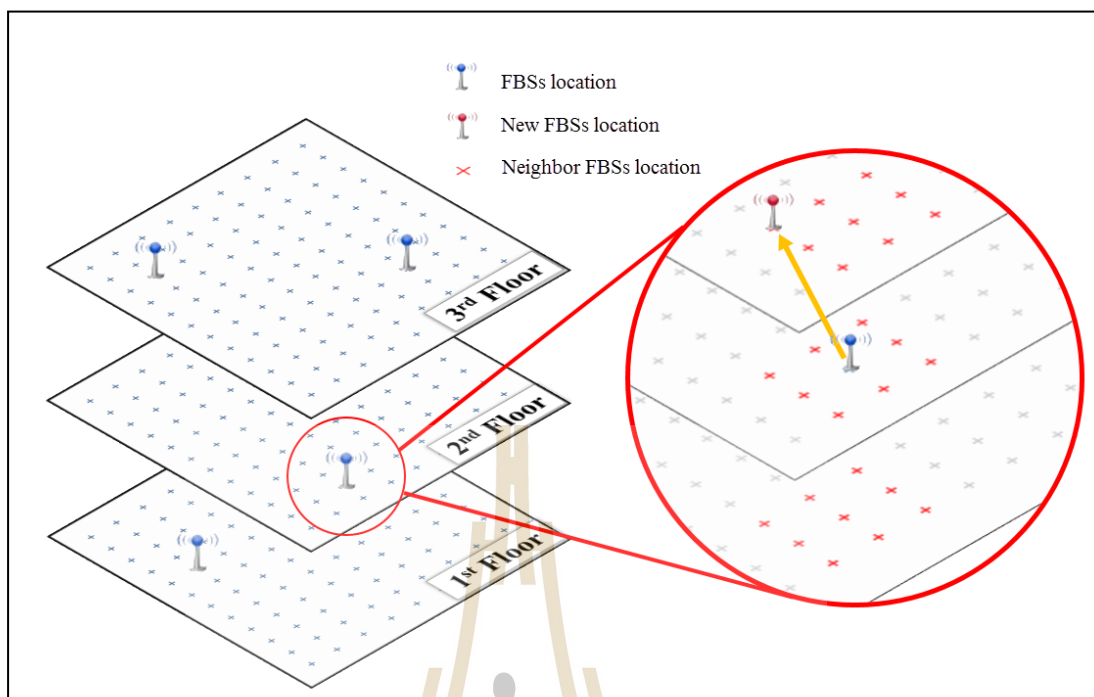
ฟังก์ชันการประเมินผล (evaluation function) เป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับประเมินค่าคำตอบของปัญหา เป็นสมการคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปของค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุด ประเมินผล เพื่อบอกวัตถุประสงค์ของปัญหาว่าต้องการค่าที่มากที่สุด (maximize) หรือ ค่าที่น้อยที่สุด (minimize) โดยค่าที่ได้จากการคำนวณฟังก์ชันการประเมินผลเรียกว่าค่าวัตถุประสงค์

(objective value: E) ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของคำตอบ โดยในขั้นตอนนี้ใช้สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันการประเมินผล ซึ่งมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อเลือกระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ทำให้ได้ค่าที่น้อยที่สุดของผลรวมความแรงสัญญาณรั่วไหลที่จุดทดสอบสัญญาณ ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งในอาคาร (Minimum Summation of Leakage Signal: MSLS-SA) ดังแสดงในสมการที่ 3.11

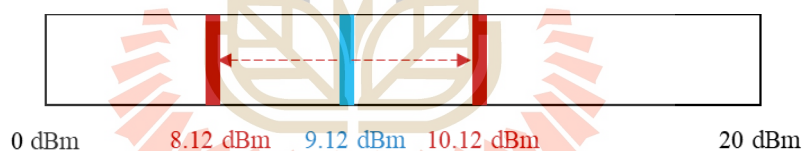
$$E(S) = \text{Minimize} \sum_{i=1}^B \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T t_{il}^o * 10^{[(Pt_{il} + Gt + Gr - pls_{oi}) - Pths]/10} \quad (3.11)$$

3.3.4.3 การย้ายตำแหน่งใหม่

การย้ายตำแหน่งใหม่หรือศัพท์เทคนิคเรียกว่า move operator เป็นวิธีการคำนวณหาคำตอบใหม่จากจุดของคำตอบปัจจุบันใด ๆ ซึ่งจะทำการคำตอบหรือสถานะปัจจุบันของคำตอบเปลี่ยนแปลงไปตามการย้าย (move) โดยกระบวนการดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาตำแหน่งใหม่สำหรับติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนผลลัพธ์ของตำแหน่งเดิมจากคำตอบที่มีอยู่รอบๆ หรือจากตำแหน่งข้างเคียง (neighborhood) เพื่อช่วยให้กระบวนการค้นหาคำตอบได้ผลคำตอบที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการย้ายตำแหน่งใหม่ด้วยโครงสร้างแบบ 3 มิติ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โดยขั้นตอนการทำงานของกรย้ายตำแหน่งใหม่สำหรับติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เริ่มจาก ทำการสุ่มเลือกตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งอยู่แล้ว (i.e. โครงสร้างคำตอบเริ่มต้น) จำนวน 1 ตำแหน่ง (ตำแหน่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์สีน้ำเงินในรูปวงกลม) ซึ่งตำแหน่งที่สุ่มได้คือตำแหน่งปัจจุบันที่จะถูกปรับเปลี่ยนให้เป็นตำแหน่งใหม่จากตำแหน่งข้างเคียงแบบ 3 มิติ (เครื่องหมายกากบาทสีแดง) จากนั้นตำแหน่งที่สามารถติดตั้งได้ของตำแหน่งข้างเคียงแบบ 3 มิติจะถูกสุ่มเพื่อใช้เป็นตำแหน่งใหม่ โดยมีเงื่อนไขคือตำแหน่งใหม่ที่สุ่มได้จะต้องไม่อยู่ในโครงสร้างคำตอบเริ่มต้น ซึ่งในกรณีนี้ ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งได้มีจำนวน 26 ตำแหน่ง สุดท้ายตำแหน่งใหม่ที่ได้นี้จะเป็นตำแหน่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งแทนที่ตำแหน่งปัจจุบัน (ตำแหน่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์สีแดงในรูปวงกลม)



รูปที่ 3.3 วิธีการย้ายตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ใหม่ด้วยโครงสร้างแบบ 3 มิติ



รูปที่ 3.4 วิธีการปรับระดับกำลังส่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ใหม่

ในส่วนของการปรับระดับกำลังส่งใหม่สำหรับสถานีฐานเฟมโตเซลล์นั้น สถานีฐานเฟมโตเซลล์ดังกล่าวจะถูกปรับเปลี่ยนระดับกำลังส่งจากระดับปัจจุบันให้เป็นระดับใหม่ โดยทำการสุ่มว่าจะเลือกเพิ่มหรือลดระดับกำลังส่ง ซึ่งในกรณีนี้ ระดับกำลังส่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ในช่วง ± 1.00 dB ต่อการย้ายตำแหน่งหนึ่งครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สุดท้ายระดับกำลังส่งใหม่ที่ได้นี้จะป็นระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์แทนที่ระดับกำลังส่งปัจจุบัน

ซึ่งระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ใหม่จะถูกส่งต่อไปตรวจสอบเงื่อนไขข้อกำหนดของปัญหา (3.3.3.4) ถ้าไม่ผ่านเงื่อนไขก็จะทำการค้นหา ระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ใหม่

3.3.4.4 การตรวจสอบเงื่อนไข

การตรวจสอบเงื่อนไข เป็นการตรวจสอบข้อกำหนดหรือข้อจำกัดของปัญหา ซึ่งเป็นกลไกการควบคุมและตัดสินใจของวิธีการค้นหาคำตอบที่จะเลือกหรือไม่เลือกดำเนินการ โดยในขั้นตอนนี้ใช้สมการเงื่อนไขที่แสดงถึงข้อจำกัดของการออกแบบภายใต้ปัจจัยต่างๆ จำนวน 9 สมการเงื่อนไข ได้แก่ สมการที่ 3.2 ถึงสมการที่ 3.10 เช่นเดียวกับการทำงานในขั้นตอนที่ผ่านมา เงื่อนไขดังกล่าวมีไว้เพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างของระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์นั้น อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ทุกข้อหรือไม่ หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขระบบจะทำการซ้ำ ในขั้นตอนการค้นหาตำแหน่งใหม่ ตรงกันข้าม ถ้าหากเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดทุกข้อ นั่นหมายถึงระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ดังกล่าวสามารถใช้เป็นโครงสร้างของเครือข่ายเฟมโตเซลล์ที่มีวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการได้

3.3.4.5 การเปรียบเทียบฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในขั้นตอนการทำงานนี้ ค่าวัตถุประสงค์ของระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งปัจจุบัน (E) และค่าวัตถุประสงค์ของระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งใหม่ (E_{new}) จะถูกเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบว่าค่าวัตถุประสงค์ของโครงสร้างคำตอบใหม่มีค่าดีกว่าค่าวัตถุประสงค์ของโครงสร้างคำตอบปัจจุบันหรือไม่ โดยในขั้นตอนนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือเพื่อต้องการหาค่าที่น้อยที่สุด (minimize) ดังนั้นถ้าหากโครงสร้างคำตอบใหม่มีค่าวัตถุประสงค์น้อยกว่าโครงสร้างคำตอบปัจจุบัน (มีค่าวัตถุประสงค์ดีกว่าเดิม) ระบบจะทำการแทนที่โครงสร้างคำตอบปัจจุบันด้วยโครงสร้างคำตอบใหม่ และใช้ระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ใหม่นี้เป็นผลลัพธ์ของคำตอบ แต่ถ้าหากโครงสร้างคำตอบใหม่มีค่าวัตถุประสงค์มากกว่าโครงสร้างคำตอบปัจจุบัน (มีค่าวัตถุประสงค์แย่กว่าเดิม) ระบบจะเข้าสู่กระบวนการตัดสินใจว่าควรยอมรับโครงสร้างคำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่แย่กว่านี้หรือไม่ด้วยวิธีการความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่แย่กว่าเดิม

3.3.4.6 ความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่แย่กว่าเดิม

เมื่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งใหม่มีค่าแย่กว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งปัจจุบัน จะต้องใช้ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจเลือกว่าจะยอมรับโครงสร้างคำตอบใหม่หรือไม่ โดยค่าความน่าจะเป็นคำนวณได้จากสมการที่ (3.12) ซึ่งการตัดสินใจจะยอมรับโครงสร้างคำตอบใหม่ก็ต่อเมื่อสมการที่ (3.13) เป็นจริง ถ้าเป็นจริงก็จะยอมรับโครงสร้างคำตอบใหม่เป็นระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ปัจจุบันเพื่อค้นหาหาระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งที่ดีขึ้นต่อไป

$$z < P_a \quad (3.12)$$

$$P_a = e^{-\left(\frac{\Delta E}{\tau}\right)} \quad (3.13)$$

เมื่อ z คือสุ่มที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (uniform distribution) ซึ่งจะถูกเลือกในช่วง $[0, 1]$ ค่า $\Delta E = E - E_{new}$ หรือค่าผลต่างของฟังก์ชันการประเมินผลระหว่างโครงสร้างคำตอบปัจจุบัน (E) กับโครงสร้างคำตอบใหม่ (E_{new}) และ τ คือค่าอุณหภูมิปัจจุบันของการอบอ่อน

เมื่อใดก็ตามที่ค่าวัตถุประสงค์ของโครงสร้างคำตอบใหม่ต่ำกว่าโครงสร้างคำตอบปัจจุบัน จำนวนครั้งของการไม่มีปรับปรุงค่าคำตอบที่ดีขึ้น (n_{worse}) จะถูกนับ และถ้าหากสมการที่ 3.12 เป็นจริง ($z < P_a$) หมายถึงระบบจะยอมรับโครงสร้างคำตอบใหม่ที่แย่กว่าเดิมนี้ ตรงกันข้าม ถ้าหากสมการที่ 3.12 เป็นเท็จ ($z \geq P_a$) หมายถึงระบบจะไม่ยอมรับโครงสร้างคำตอบใหม่ที่แย่กว่าเดิม และจะดำเนินการซ้ำในขั้นตอนการค้นหาระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งใหม่

พิจารณาสมการที่ 3.13 จะสังเกตได้ว่าที่รอบการทำงานที่มีอุณหภูมิของการอบอ่อนสูง ระบบจะมีความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่แย่กว่าเดิมมากกว่ารอบการทำงานที่มีค่าอุณหภูมิการอบอ่อนต่ำ ซึ่งลักษณะการทำงานดังกล่าวของวิธีการอบอ่อนจำลองเปรียบได้กับการหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบในช่วงเริ่มต้น (การค้นหาคำตอบแบบหยาบ) โดยผลลัพธ์นี้อาจนำไปสู่การลู่เข้าหากลุ่มคำตอบที่ดีขึ้นกว่าเดิม ในทางตรงกันข้าม ที่รอบการทำงานที่มีค่าอุณหภูมิการอบอ่อนต่ำ ระบบจะไม่ยอมรับคำตอบที่แย่กว่าเดิม และยอมรับคำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันเท่านั้น เพื่อที่จะสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบได้อย่างละเอียด

3.3.4.7 เกณฑ์การหยุด (stopping criteria)

เกณฑ์การหยุด คือกลไกที่ทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมที่ทำให้ระบบการออกแบบหยุดการค้นหาคำตอบ จะถูกดำเนินการในช่วงที่กระบวนการค้นหาคำตอบลู่เข้าใกล้จุดสมดุล ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของสถานะคำตอบที่ไม่มีนัยสำคัญเพียงพอ โดยสภาวะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อระบบมีคำตอบที่เข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้เกณฑ์การหยุดที่พิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ 2 ค่าคือ เมื่อค่าอุณหภูมิปัจจุบันของการอบอ่อน (τ) ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ (หรือมีค่าเท่ากับ τ_{stop}) หรือเมื่อไม่มีการปรับปรุงค่าคำตอบที่ดีขึ้นจำนวน n_{worse_max} ครั้ง

ติดต่อกัน ดังนั้นการทำงานของเทคนิคการออกแบบจะถูกหยุดการค้นหาคำตอบเมื่อระบบมีค่าพารามิเตอร์ตรงกับเกณฑ์การหยุดที่กำหนดไว้ได้อย่างใดอย่างหนึ่ง

สมการที่ 3.14 คือสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิการอบอุ่นเริ่มต้น ($\tau_{initial}$) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปค่าอุณหภูมิการอบอุ่นจะมีค่าลดลง ค่า $\bar{\Delta E}$ คือค่าเฉลี่ยของผลต่างฟังก์ชันการประเมินใน 20 รอบการทำงานของการทดสอบเบื้องต้น (preliminary test) โดยสมการที่ 3.15 คือสมการที่ใช้สำหรับปรับลดอุณหภูมิการอบอุ่นในแต่ละรอบการค้นหาคำตอบ ซึ่งค่าอุณหภูมิการอบอุ่นใด ๆ ระบบจะพิจารณาจำนวนครั้งของการค้นหาคำตอบ ($Iter$) ซึ่งถูกกำหนดด้วยจำนวนครั้งสูงสุดของการค้นหาคำตอบ ($Iter_{max}$) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.16 ซึ่งค่าดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มขึ้นในทุก ๆ รอบของการปรับค่าอุณหภูมิการอบอุ่น

จะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิ (τ) จะมีค่าลดลงแต่จำนวนครั้งสูงสุดของการค้นหาคำตอบ ($Iter_{max}$) จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิ (τ) ลดลงระบบก็จะมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้นและจะยอมรับคำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันเท่านั้น โดยการเคลื่อนที่ค้นหาคำตอบก็จะเข้าสู่หาคำตอบที่ดีที่สุดมากขึ้น โดยขั้นตอนนี้กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนครั้งสูงสุดของการค้นหาคำตอบ ($Iter_{max}$) ให้มีค่าเท่ากับจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เพียงพอ (N_{final})

$$\tau_{initial} = -\frac{\bar{\Delta E}}{\ln(P_{a_initial})} \quad (3.14)$$

$$\tau = \varphi\tau \quad (3.15)$$

$$Iter_{max} = \frac{Iter_{max}}{\varphi} \quad (3.16)$$

3.4 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการอบอุ่นจำลอง

วิธีการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นด้วยกระบวนการอบอุ่นจำลอง (Simulated Annealing: SA) มีค่าพารามิเตอร์ค่าคงที่เริ่มต้นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบอุ่นจำลองประกอบไปด้วย อุณหภูมิเริ่มต้น ($\tau_{initial}$) พารามิเตอร์ φ ที่เป็นตัวกำหนดการลดลงของอุณหภูมิและการเพิ่มขึ้นของจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบในแต่ละอุณหภูมิ อีกทั้ง เกณฑ์การหยุดที่เป็นตัวกำหนดการหยุดค้นหาคำตอบของกระบวนการอบอุ่นจำลองนั่นคือ อุณหภูมิต่ำสุด (τ_{stop}) และจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบที่ไม่มีการปรับปรุงค่าคำตอบ

ให้ดีขึ้น (n_{worse_max}) ซึ่งในหัวข้อนี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เพื่อใช้ในการทดลองหัวข้อต่าง ๆ ต่อไป

3.4.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{initial}$) พารามิเตอร์ ϕ อุณหภูมิต่ำสุด (T_{stop}) และจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบที่ไม่มีปรับปรุงค่าคำตอบให้ดีขึ้น (n_{worse_max})

1) อุณหภูมิเริ่มต้นการอบอุ่น ($T_{initial}$) เป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่เป็นตัวกำหนดความน่าจะเป็นของการยอมรับค่าคำตอบที่ได้จากการเริ่มแก้ไขปัญหาด้วยกระบวนการอบอุ่นจำลอง โดยสมการความน่าจะเป็น (P_a) ของการยอมรับการแก้ปัญหาแสดงได้ดังสมการที่ (3.13)

กำหนดให้ ΔE เป็นผลต่างระหว่างค่าคำตอบของระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ปัจจุบัน (S) กับค่าคำตอบของระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ใหม่ (S_{new}) เริ่มแรกอุณหภูมิปัจจุบันจะมีค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ($\tau = T_{initial}$) โดยที่ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{initial}$) เป็นค่าที่คำนวณจากช่วงระยะการค้นหาคำตอบที่ระดับอุณหภูมินั้นและมีความน่าจะเป็นของการยอมรับการแก้ปัญหาที่แย่ที่สุดประมาณเท่ากับค่าเริ่มต้นของความน่าจะเป็นที่จะยอมรับการแก้ปัญหา ($P_{a_initial}$) ดังนั้น ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{initial}$) สามารถหาได้ดังสมการที่ (3.14)

Kirkpatrick S. (1984) ได้เสนอไว้ว่า ค่าเริ่มต้นความน่าจะเป็นที่จะยอมรับการแก้ปัญหา ($P_{a_initial}$) ยิ่งมีค่าสูง ก็จะมีโอกาสสูงที่จะยอมรับการแก้ปัญหาที่มีค่าแย่กว่าในการค้นหาคำตอบช่วงต้น และแนะนำให้ใช้ค่า $P_{a_initial}$ เท่ากับ 0.8 ในงานวิจัยนี้เราได้ทดลองกำหนดค่า $P_{a_initial}$ ให้มีค่าเท่ากับ 0.3 0.5 และ 0.8 ซึ่งแต่ละค่าจะส่งผลกระทบต่อการค้นหาคำตอบของการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น

โดยค่า $\bar{\Delta E}$ ที่ใช้ในสมการที่ (3.14) คือค่าเฉลี่ยของผลต่างฟังก์ชันการประเมินใน 20 รอบการทำงานของการทดสอบเบื้องต้น (preliminary test)

2) ค่าพารามิเตอร์ ϕ เป็นตัวกำหนดการลดลงของอุณหภูมิและการเพิ่มขึ้นของจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบในแต่ละอุณหภูมิ โดยเราได้ทำการทดลอง 4 กรณีคือ ค่าพารามิเตอร์ ϕ เท่ากับ 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 ซึ่งแต่ละค่าจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการอบอุ่นจำลองของการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น

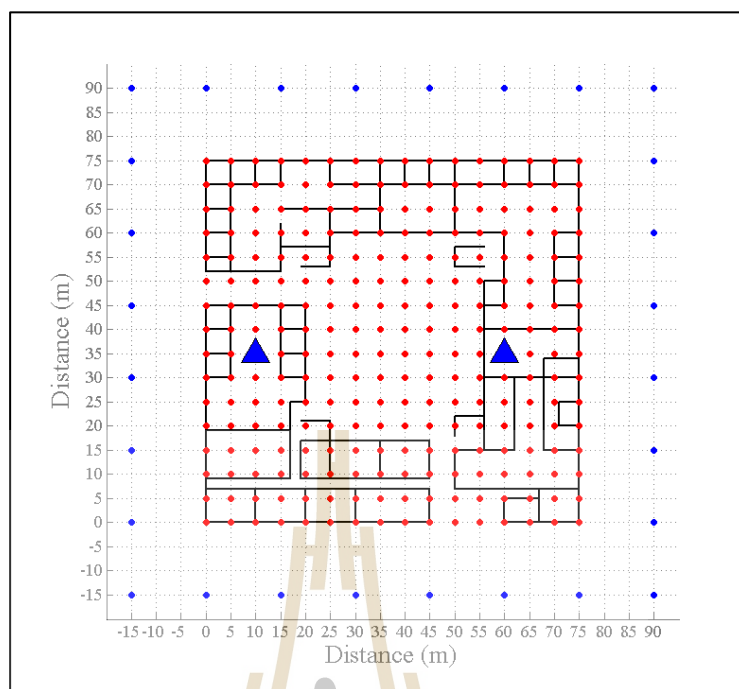
3) เกณฑ์การหยุดสำหรับการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นกำหนดใช้อุณหภูมิต่ำสุด (T_{stop}) และจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบที่ไม่มีปรับปรุงค่าคำตอบให้ดีขึ้น (n_{worse_max}) ซึ่งในการทดลองนี้เราได้กำหนดค่าอุณหภูมิต่ำสุด T_{stop} เท่ากับ 0.01 และกำหนดใช้ค่า n_{worse_max} ที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละค่าพารามิเตอร์ ϕ และ $P_{a_initial}$

3.4.2 พื้นที่การทดลอง

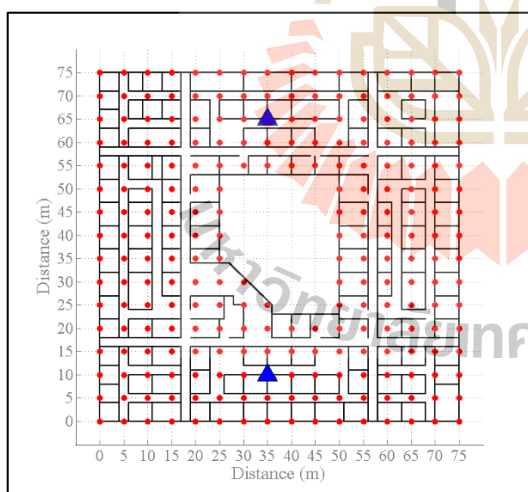
ในการศึกษาประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองในพื้นที่การทดลอง 2 พื้นที่ พื้นที่อาคารทดลองที่ 1 อาคารขนาด 3 ชั้น มีขนาดของพื้นที่แต่ละชั้นโดยประมาณเท่ากับ 75x75 ตารางเมตร มีระยะห่างของกริดเท่ากับ 5 เมตร (grid spacing 5x5 m²) มีจำนวนตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ (●) 726 ตำแหน่ง จุดทดสอบความแรงสัญญาณ (●) 726 ตำแหน่ง และจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล (●) 28 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 3.5 พื้นที่อาคารทดลองที่ 2 อาคารขนาด 5 ชั้น มีขนาดของพื้นที่แต่ละชั้นโดยประมาณเท่ากับ 70x30 ตารางเมตร มีระยะห่างของกริดเท่ากับ 5 เมตร (grid spacing 5x5 m²) มีจำนวนตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ (●) 412 ตำแหน่ง จุดทดสอบความแรงสัญญาณ (●) 412 ตำแหน่ง และจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล (●) 28 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 3.6

เนื่องจากการทดลองในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอบอุ่นจำลอง จึงจำเป็นต้องมีข้อมูลเริ่มต้นในการทำงาน นั่นคือระดับกำลังส่งและตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เริ่มต้น ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เริ่มต้น (▲) สำหรับทั้ง 2 พื้นที่การทดลองเป็นแบบยูนิฟอร์ม (uniform placement) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 และกำหนดระดับกำลังส่งเริ่มต้นของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ให้เป็นระดับสูงสุด (20 dBm) นอกจากนี้ ในการทดลองนี้จะไม่พิจารณาถึงประเด็นจำนวนและตำแหน่งของผู้ใช้งานภายในอาคาร ดังนั้นเงื่อนไขที่ (3.7) - (3.10) ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำหรับการรับประกันคุณภาพค่าความแรงสัญญาณของผู้ใช้บริการ จึงยังไม่ถูกพิจารณาด้วยเช่นกัน

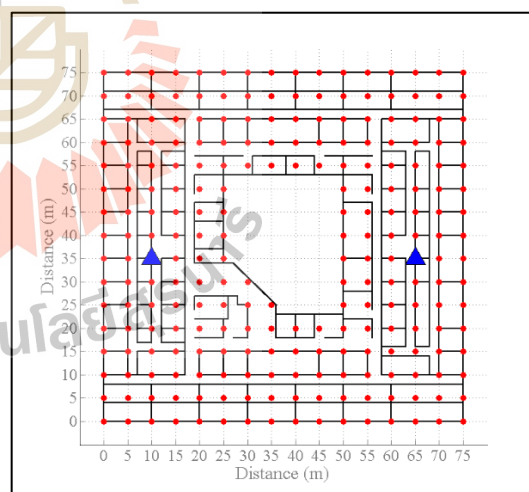
การวิเคราะห์ในส่วนนี้ ผู้วิจัยจะมุ่งเน้นถึงประสิทธิภาพของการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นด้วยอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง ซึ่งการประเมินประสิทธิภาพที่เราศึกษานี้ประกอบไปด้วย เวลาในการทำงาน (run time) ของกระบวนการอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง และค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ตามสมการที่ (3.11) เป็นตัวชี้วัดผลกระทบของค่าพารามิเตอร์อย่างเหมาะสม



ก) พื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ชั้น 1

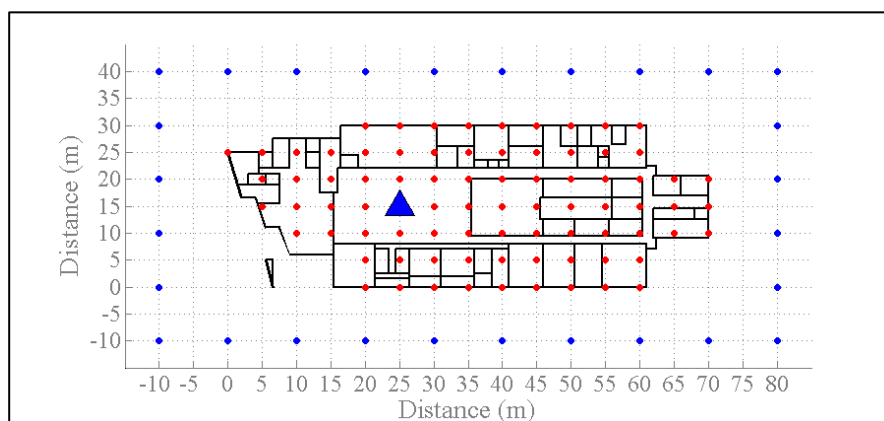


ข) พื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ชั้น 2

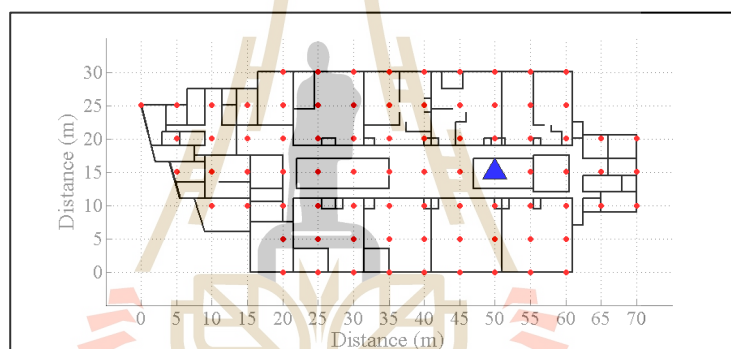


ค) พื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ชั้น 3

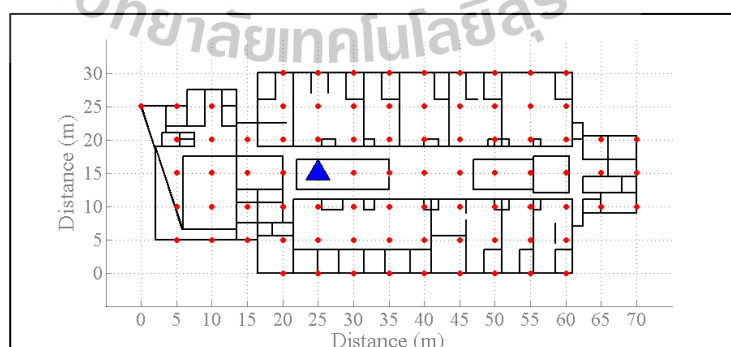
รูปที่ 3.5 พื้นที่อาคารทดลองที่ 1



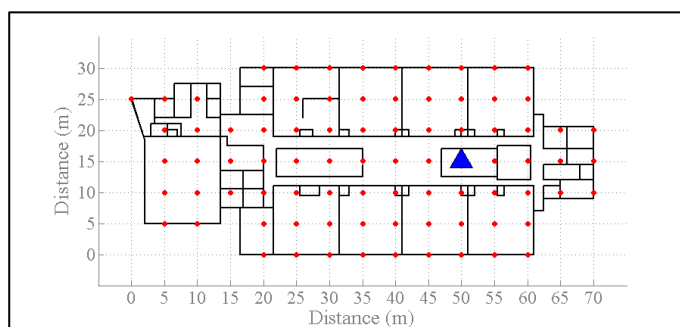
ก) พื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ชั้น 1



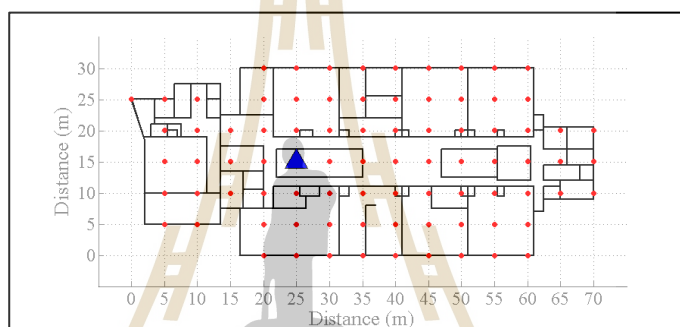
ข) พื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ชั้น 2



ค) พื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ชั้น 3



ง) แสดงพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ชั้น 4



จ) แสดงพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ชั้น 5

รูปที่ 3.6 พื้นที่อาคารทดลองที่ 2

3.4.3 ผลการทดลอง

ผลการทดลองการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ ภายในอาคารหลายชั้นด้วยกระบวนการรอบอ่อนจำลอง แสดงในตารางที่ 3.5 และ 3.6 ซึ่งค่าที่แสดงในตาราง ผู้วิจัยได้ทำการทดลองจำนวน 10 ครั้งพร้อมกับคำนวณหาค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีหน่วยเป็นนาโนวัตต์ (nWatt) และเวลาในการทำงานเฉลี่ย (average run time) มีหน่วยเป็นวินาที (second) จากผลการทดลองสังเกตเห็นได้ว่าค่าในตารางที่มีการไฮไลต์ (highlight) แสดงให้เห็นว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉลี่ยนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในแต่ละพื้นที่การทดลอง และได้ระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่ผ่านทุกเงื่อนไขที่กำหนด ตลอดจนยังใช้เวลาอันสั้นในการค้นหาคำตอบเหล่านั้น

ตารางที่ 3.5 การควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 1

 $\varphi = 0.3$

Pa_init	Max noimprove	statistic	Cost (nWatt)	Avg. run time (sec)
0.3	50	avg	0.0639	15.91
		stdv	0.0385	4.55
	100	avg	0.0428	18.21
		stdv	0.0089	0.12
	150	avg	0.4532	18.01
		stdv	1.2741	0.26
	200	avg	0.0781	18.01
		stdv	0.0413	0.13
	250	avg	0.0729	18.18
		stdv	0.0662	0.12
0.5	50	avg	0.0562	18.08
		stdv	0.0269	0.08
	100	avg	0.0842	18.01
		stdv	0.0366	0.08
	150	avg	0.0603	18.1
		stdv	0.0319	0.15
	200	avg	0.0634	17.86
		stdv	0.0321	0.11
	250	avg	0.0548	17.94
		stdv	0.0328	0.09
0.8	100	avg	0.0407	61.81
		stdv	0.0047	0.35
	200	avg	0.0392	61.96
		stdv	0.0049	0.38
	300	avg	0.0412	61.85
		stdv	0.0037	0.27
	400	avg	0.0447	61.57
		stdv	0.0121	0.22
	500	avg	0.0405	62.36
		stdv	0.005	1.39
	1000	avg	0.0412	61.82
		stdv	0.0098	0.38
	1500	avg	0.0421	61.97
		stdv	0.0041	0.37
	2000	avg	0.038	62.03
		stdv	0.0034	0.31

 $\varphi = 0.5$

Pa_init	Max noimprove	statistic	Cost (nWatt)	Avg. run time (sec)
0.3	50	avg	0.0724	12.63
		stdv	0.0417	0.81
	100	avg	0.0728	13.20
		stdv	0.0460	0.32
	150	avg	0.0620	13.05
		stdv	0.0339	0.15
	200	avg	0.0562	13.07
		stdv	0.0247	0.08
	250	avg	0.0610	13.08
		stdv	0.0414	0.07
0.5	50	avg	0.0543	26.37
		stdv	0.0297	0.20
	100	avg	0.0602	26.35
		stdv	0.0415	0.18
	150	avg	0.0557	26.35
		stdv	0.0300	0.21
	200	avg	0.0584	26.45
		stdv	0.0341	0.19
	250	avg	0.0655	26.40
		stdv	0.0389	0.19
0.8	100	avg	0.0377	117.00
		stdv	0.0071	0.56
	200	avg	0.0338	117.08
		stdv	0.0024	0.44
	300	avg	0.0344	116.61
		stdv	0.0018	0.20
	400	avg	0.0353	116.50
		stdv	0.0029	0.45
	500	avg	0.0365	117.20
		stdv	0.0024	1.51
	1000	avg	0.0358	116.92
		stdv	0.0027	0.34
	1500	avg	0.0339	116.50
		stdv	0.0032	0.43
	2000	avg	0.0324	116.28
		stdv	0.0016	0.66

ตารางที่ 3.5 การควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 1(ต่อ)

$\varphi = 0.7$

Pa_init	Max noimprove	statistic	Objective fn. (nWatt)	Avg. run time (sec)
0.3	50	avg	0.0729	16.18
		stdv	0.0923	0.13
100	100	avg	0.0514	15.99
		stdv	0.0218	0.10
150	150	avg	0.0697	16.17
		stdv	0.0470	0.15
200	200	avg	0.0556	16.45
		stdv	0.0246	1.02
250	250	avg	0.0606	16.04
		stdv	0.0370	0.10
0.5	50	avg	0.0508	32.38
		stdv	0.0284	1.91
100	100	avg	0.0411	33.15
		stdv	0.0125	0.21
150	150	avg	0.0551	34.05
		stdv	0.0296	0.86
200	200	avg	0.0547	33.25
		stdv	0.0312	0.22
250	250	avg	0.0510	33.22
		stdv	0.0303	0.31
0.8	100	avg	0.0398	104.88
		stdv	0.0054	0.34
200	200	avg	0.0367	105.26
		stdv	0.0029	0.30
300	300	avg	0.0389	105.24
		stdv	0.0033	0.39
400	400	avg	0.0371	105.07
		stdv	0.0020	0.25
500	500	avg	0.0396	105.00
		stdv	0.0109	0.21
1000	1000	avg	0.0378	105.32
		stdv	0.0062	0.42
1500	1500	avg	0.0363	105.23
		stdv	0.0027	0.35
2000	2000	avg	0.0378	105.68
		stdv	0.0018	0.77

$\varphi = 0.9$

Pa_init	Max noimprove	statistic	Objective fn. (nWatt)	Avg. run time (sec)
0.3	50	avg	0.0492	19.61
		stdv	0.0228	3.24
100	100	avg	0.0496	20.73
		stdv	0.0289	0.15
150	150	avg	0.0484	22.43
		stdv	0.0203	0.99
200	200	avg	0.0642	20.64
		stdv	0.0399	0.12
250	250	avg	0.0631	20.65
		stdv	0.0412	0.14
0.5	50	avg	0.0483	35.09
		stdv	0.0296	1.56
100	100	avg	0.1683	35.32
		stdv	0.3840	0.32
150	150	avg	0.0475	35.52
		stdv	0.0196	0.20
200	200	avg	0.0481	37.80
		stdv	0.0321	0.84
250	250	avg	0.0392	35.49
		stdv	0.0037	0.09
0.8	100	avg	0.0353	122.82
		stdv	0.0020	0.72
200	200	avg	0.0365	123.39
		stdv	0.0028	0.25
300	300	avg	0.0364	123.85
		stdv	0.0020	0.33
400	400	avg	0.0339	123.49
		stdv	0.0020	0.37
500	500	avg	0.0357	124.02
		stdv	0.0024	0.30
1000	1000	avg	0.0322	123.12
		stdv	0.0017	0.30
1500	1500	avg	0.0324	123.40
		stdv	0.0016	0.60
2000	2000	avg	0.0316	122.85
		stdv	0.0016	0.28

ตารางที่ 3.6 การควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 2

$\varphi = 0.3$

Pa_init	Max noimprove	statistic	Objective fn. (nWatt)	Avg. run time (sec)
0.3	50	avg	0.0237	9.60
		stdv	0.0130	0.72
100	100	avg	0.0197	9.32
		stdv	0.0135	0.25
150	150	avg	0.0210	9.52
		stdv	0.0116	0.32
200	200	avg	0.0223	9.39
		stdv	0.0138	0.17
250	250	avg	0.0214	10.15
		stdv	0.0131	0.52
0.5	50	avg	0.0145	9.26
		stdv	0.0013	0.10
100	100	avg	0.0139	9.29
		stdv	0.0009	0.09
150	150	avg	0.0172	9.25
		stdv	0.0087	0.07
200	200	avg	0.0144	9.18
		stdv	0.0015	0.04
250	250	avg	0.0142	9.21
		stdv	0.0013	0.02
0.8	100	avg	0.0132	33.50
		stdv	0.0005	0.54
200	200	avg	0.0130	36.23
		stdv	0.0008	2.86
300	300	avg	0.0132	36.70
		stdv	0.0007	3.79
400	400	avg	0.0134	31.03
		stdv	0.0007	0.83
500	500	avg	0.0132	34.52
		stdv	0.0006	5.04
1000	1000	avg	0.0132	31.99
		stdv	0.0007	0.23
1500	1500	avg	0.0134	30.20
		stdv	0.0006	0.39
2000	2000	avg	0.0135	30.08
		stdv	0.0010	0.09

$\varphi = 0.5$

Pa_init	Max noimprove	statistic	Objective fn. (nWatt)	Avg. run time (sec)
0.3	50	avg	0.0202	7.01
		stdv	0.0127	0.13
100	100	avg	0.0203	6.88
		stdv	0.0132	0.03
150	150	avg	0.0203	6.89
		stdv	0.0120	0.13
200	200	avg	0.0252	6.85
		stdv	0.0177	0.06
250	250	avg	0.0199	6.85
		stdv	0.0185	0.06
0.5	50	avg	0.0138	14.36
		stdv	0.0009	0.48
100	100	avg	0.0138	14.16
		stdv	0.0009	0.33
150	150	avg	0.0145	14.33
		stdv	0.0029	1.08
200	200	avg	0.0131	14.76
		stdv	0.0011	0.31
250	250	avg	0.0138	15.33
		stdv	0.0006	0.59
0.8	100	avg	0.0124	57.01
		stdv	0.0006	0.11
200	200	avg	0.0128	57.11
		stdv	0.0006	0.11
300	300	avg	0.0128	57.02
		stdv	0.0005	0.09
400	400	avg	0.0124	57.14
		stdv	0.0004	0.11
500	500	avg	0.0126	57.09
		stdv	0.0006	0.13
1000	1000	avg	0.0128	57.51
		stdv	0.0005	0.28
1500	1500	avg	0.0127	57.38
		stdv	0.0007	0.11
2000	2000	avg	0.0127	57.20
		stdv	0.0005	0.11

ตารางที่ 3.6 การควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่การทดลองที่ 2 (ต่อ)

$\varphi = 0.7$

Pa_init	Max noimprove	statistic	Objective fn. (nWatt)	Avg. run time (sec)
0.3	50	avg	0.0171	9.11
		stdv	0.0089	0.16
100	100	avg	0.0174	9.32
		stdv	0.0086	0.33
150	150	avg	0.0171	9.80
		stdv	0.0100	0.90
200	200	avg	0.0201	9.47
		stdv	0.0127	0.71
250	250	avg	0.0206	9.11
		stdv	0.0140	0.51
0.5	50	avg	0.0138	19.46
		stdv	0.0018	1.21
100	100	avg	0.0131	18.63
		stdv	0.0009	0.14
150	150	avg	0.0133	20.00
		stdv	0.0005	0.95
200	200	avg	0.0131	19.17
		stdv	0.0010	0.57
250	250	avg	0.0135	19.31
		stdv	0.0003	0.72
0.8	100	avg	0.0130	51.51
		stdv	0.0004	0.06
200	200	avg	0.0127	51.44
		stdv	0.0005	0.05
300	300	avg	0.0128	51.28
		stdv	0.0006	0.06
400	400	avg	0.0125	51.51
		stdv	0.0008	0.29
500	500	avg	0.0126	51.49
		stdv	0.0008	0.12
1000	1000	avg	0.0129	51.47
		stdv	0.0003	0.10
1500	1500	avg	0.0130	51.68
		stdv	0.0006	0.08
2000	2000	avg	0.0124	51.63
		stdv	0.0007	0.08

$\varphi = 0.9$

Pa_init	Max noimprove	statistic	Objective fn. (nWatt)	Avg. run time (sec)
0.3	50	avg	0.0170	10.40
		stdv	0.0097	0.23
100	100	avg	0.0167	10.94
		stdv	0.0079	0.62
150	150	avg	0.0177	10.86
		stdv	0.0087	0.09
200	200	avg	0.0139	10.79
		stdv	0.0009	0.04
250	250	avg	0.0167	10.84
		stdv	0.0092	0.05
0.5	50	avg	0.0129	18.41
		stdv	0.0010	0.10
100	100	avg	0.0132	18.41
		stdv	0.0006	0.04
150	150	avg	0.0138	18.45
		stdv	0.0004	0.05
200	200	avg	0.0133	18.50
		stdv	0.0019	0.09
250	250	avg	0.0137	18.44
		stdv	0.0007	0.07
0.8	100	avg	0.0125	60.70
		stdv	0.0006	0.07
200	200	avg	0.0129	60.58
		stdv	0.0005	0.06
300	300	avg	0.0127	60.72
		stdv	0.0005	0.11
400	400	avg	0.0125	60.84
		stdv	0.0005	0.07
500	500	avg	0.0120	60.92
		stdv	0.0005	0.11
1000	1000	avg	0.0128	60.92
		stdv	0.0007	0.06
1500	1500	avg	0.0121	61.12
		stdv	0.0004	0.10
2000	2000	avg	0.0118	60.77
		stdv	0.0004	0.15

3.4.3.1 ประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$

สำหรับอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ ส่งผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{initial}$) ตามสมการที่ (3.14) ถ้าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ มีค่ามาก ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ($T_{initial}$) ก็จะมีค่ามากด้วย นั่นหมายความว่าโอกาสที่จะค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดก็จะมากขึ้นด้วย สำหรับแต่ละค่าของพารามิเตอร์ φ ที่ใช้ในการศึกษาทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ มีค่าเพิ่มขึ้นการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองมีจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบที่เพิ่มมากขึ้นก่อนจะเข้าสู่ค่าคำตอบที่ดีที่สุด ในทำนองเดียวกันเมื่อ n_{worse_max} มีค่าเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้มีแนวโน้มการค้นหาคำตอบใกล้ค่าคำตอบที่ดีที่สุดเพิ่มมากขึ้นพร้อมกับเวลาการทำงานที่มากขึ้นด้วย สำหรับทั้ง 2 พื้นที่การทดลองความแตกต่างของค่าเวลาในการทำงานเฉลี่ยของค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ ไม่ได้แตกต่างกันมากนักแต่เมื่อสังเกตจะพบว่าในแต่ละค่าพารามิเตอร์ φ สำหรับทั้ง 2 พื้นที่การทดลองค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ ที่มีค่าสูงก็ยังสามารถค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงค่าคำตอบที่ดีที่สุดมากกว่าค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ ที่มีค่าน้อย ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ เท่ากับ 0.8 จะถูกนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.4.3.2 ประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ φ

สำหรับอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองค่าพารามิเตอร์ φ ส่งผลต่อการปรับลดของอุณหภูมิและจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบ เมื่อค่าพารามิเตอร์ φ มีค่าน้อยการลดลงของอุณหภูมิจะไวมากขึ้นและจำนวนครั้งการค้นหาคำตอบในแต่ละอุณหภูมิก็จะมากขึ้นด้วย นั่นส่งผลให้มีโอกาสน้อยที่จะการยอมรับการแก้ไขปัญหาที่มีคำตอบแยกจากคำตอบปัจจุบัน และในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าพารามิเตอร์ φ มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดมากขึ้นเนื่องจากมีโอกาสมากที่จะการยอมรับการแก้ไขปัญหาที่มีคำตอบแยกจากคำตอบปัจจุบันแต่เวลาการค้นหาคำตอบก็เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยจะเห็นได้ชัดในพื้นที่การทดลองที่มีขนาดใหญ่ เช่นอาคารทดลองที่ 1 แต่เวลาไม่กินาทีไม่เป็นปัญหาสำหรับการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้น ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ φ เท่ากับ 0.9 จะถูกนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.4.3.3 ประสิทธิภาพของเกณฑ์การหยุดทำงานของกระบวนการอบอุ่นจำลอง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทุกกรณีของกระบวนการค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองหยุดการค้นหาคำตอบด้วย n_{worse_max} เป็นเงื่อนไขการหยุดการค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง ซึ่งจบกระบวนการก่อนที่อุณหภูมิจะลดต่ำลงถึงค่าอุณหภูมิต่ำสุด $\tau_{stop} = 0.01$ หมายความว่าอุณหภูมิต่ำสุด เท่ากับ 0.01 เป็นค่าที่เพียงพอแล้วสำหรับอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองที่จะถึงจุดสมดุล ค่าพารามิเตอร์ n_{worse_max} ควรจะกำหนดให้เพียงพอกับค่าจำนวนครั้งการเคลื่อนที่ค้นหาคำตอบและไม่มากเกินไปเนื่องจากถ้าพารามิเตอร์ n_{worse_max} มีค่า

มากก็จะยิ่งใช้เวลาในการทำงานมากขึ้นด้วย แต่ด้วยในการทดลองนี้ เวลาในการค้นหาคำตอบไม่ได้แตกต่างกันมากนักแต่ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดได้และมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของคำตอบมีค่าที่ดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 3.7 สำหรับพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 และตารางที่ 3.8 สำหรับพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่า n_{worse_max} เท่ากับ 2000 ครั้งในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3.7 ค่าประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบ โดยมีค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ เท่ากับ 0.8 และค่าพารามิเตอร์ φ เท่ากับ 0.9 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1

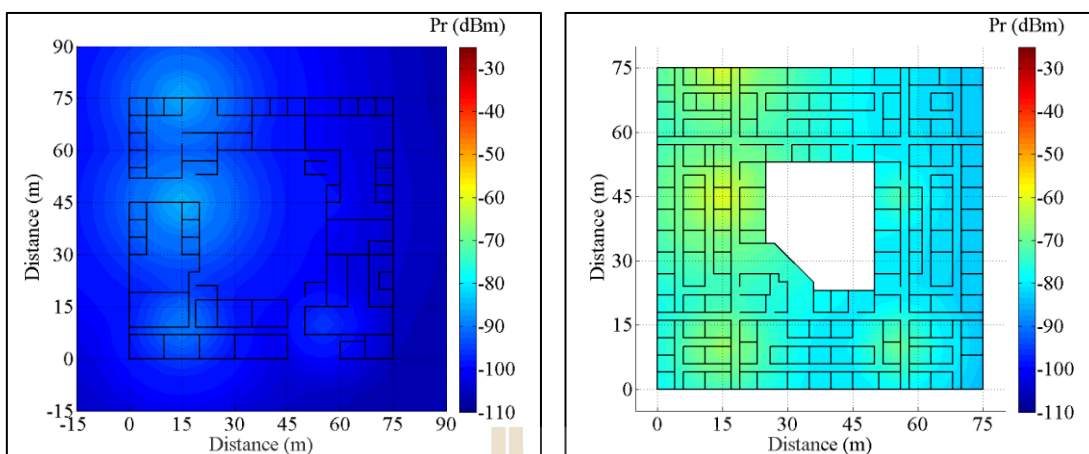
#Max noimprove	Best (nWatt)	Worst (nWatt)	Avg. (nWatt)	Std. (nWatt)	Avg. run time (sec)
100	0.0311	0.0387	0.0353	0.0020	122.82
200	0.0313	0.0397	0.0365	0.0028	123.39
300	0.0322	0.0390	0.0364	0.0020	123.85
400	0.0309	0.0369	0.0339	0.0020	123.49
500	0.0308	0.0379	0.0357	0.0024	124.02
1000	0.0300	0.0348	0.0322	0.0017	123.12
1500	0.0299	0.0344	0.0324	0.0016	123.40
2000	0.0284	0.0339	0.0316	0.0016	122.85

ตารางที่ 3.8 ค่าประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบ โดยมีค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial}$ เท่ากับ 0.8 และค่าพารามิเตอร์ φ เท่ากับ 0.9 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2

#Max noimprove	Best (nWatt)	Worst (nWatt)	Avg. (nWatt)	Std. (nWatt)	Avg. run time (sec)
100	0.0115	0.0135	0.0125	0.0006	60.70
200	0.0119	0.0134	0.0129	0.0005	60.58
300	0.0120	0.0137	0.0127	0.0005	60.72
400	0.0116	0.0130	0.0125	0.0005	60.84
500	0.0112	0.0127	0.0120	0.0005	60.92
1000	0.0111	0.0132	0.0128	0.0007	60.92
1500	0.0115	0.0127	0.0121	0.0004	61.12
2000	0.0105	0.0123	0.0118	0.0004	60.77

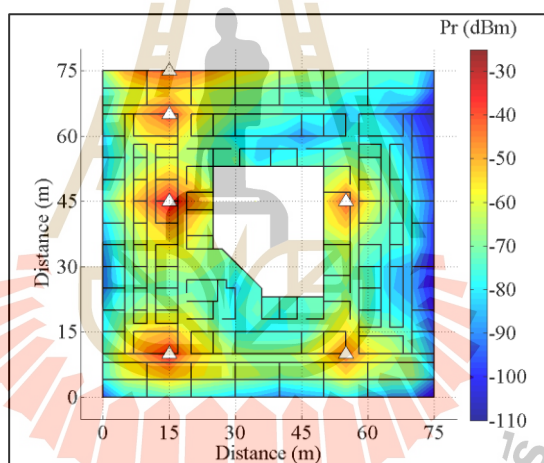
3.5 สรุปท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงแนวคิด โครงสร้าง และกระบวนการทำงานของเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการอบอุ่นจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลที่อวกาศหลายชั้น อีกทั้งยังได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวิธีการอบอุ่นจำลอง เพื่อนำไปใช้ในเทคนิคที่นำเสนอสำหรับหาคำตอบต่อไป โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับวิธีการอบอุ่นจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้ $P_{a_initial}$ เท่ากับ 0.8 ค่าพารามิเตอร์ φ เท่ากับ 0.9 ค่าอุณหภูมิค่าสุด T_{stop} เท่ากับ 0.01 และค่า n_{worse_max} เท่ากับ 2000 ครั้ง โดยตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.7 สำหรับพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 และ รูปที่ 3.8 สำหรับพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าตำแหน่งติดตั้งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ทั้งหมดในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 จะอยู่ที่ชั้นบนสุด (ชั้น 3) เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ทำให้ได้ค่าที่น้อยที่สุดของผลรวมความแรงสัญญาณรั่วไหลที่จุดทดสอบสัญญาณ ซึ่งจุดทดสอบสัญญาณสำหรับประเมินค่าความแรงสัญญาณรั่วไหลนั้นมีอยู่ที่ชั้นล่างสุด (ชั้น 1) เพียงชั้นเดียว อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ทุกสถานีฐานเฟมโตเซลล์นั้นไม่ถูกติดตั้งที่ชั้นอื่นๆ เป็นเพราะในการทดลองนี้ มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอบอุ่นจำลอง จึงยังไม่ได้พิจารณาถึงประเด็นเรื่องจำนวนและตำแหน่งของผู้ใช้งานภายในอาคาร และเช่นเดียวกันกับในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 นั่นคือ ที่ชั้นบนสุด (ชั้น 5) มีสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งจำนวน 3 สถานีฐาน ส่วนอีก 2 สถานีฐานนั้นถูกติดตั้งอยู่ที่ชั้น 3 เพื่อทำให้ความแรงสัญญาณครอบคลุม ณ ชั้นที่ 1 นั้นผ่านเงื่อนไขที่กำหนด



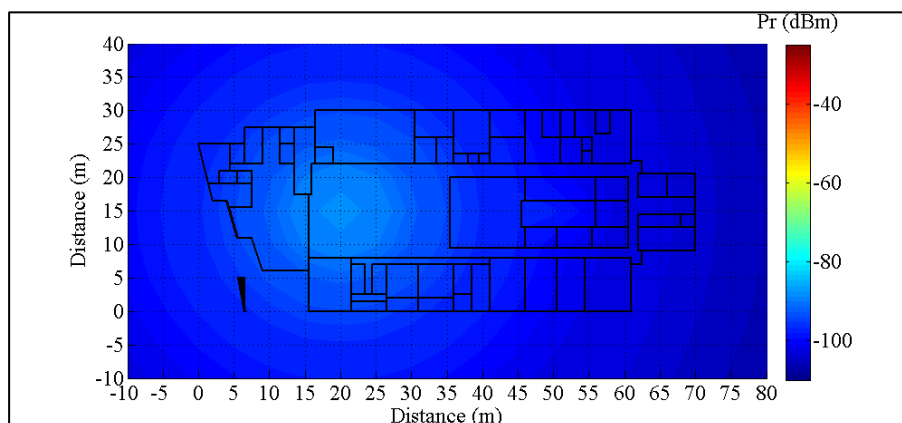
ก) ชั้นที่ 1

ข) ชั้นที่ 2

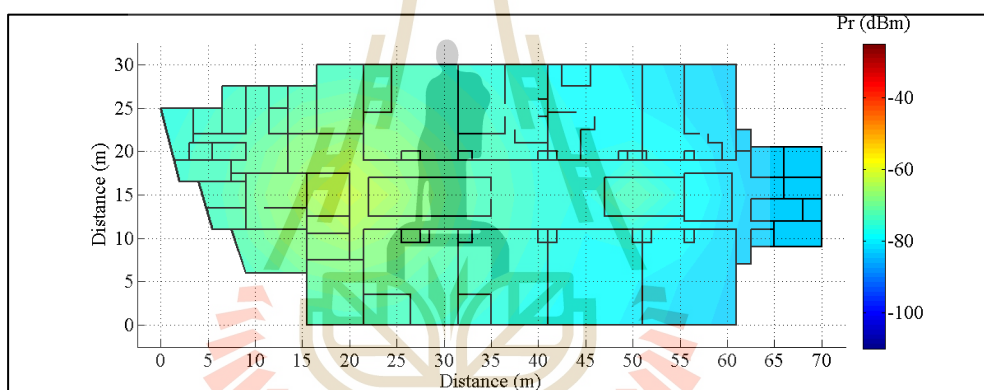


ค) ชั้นที่ 3

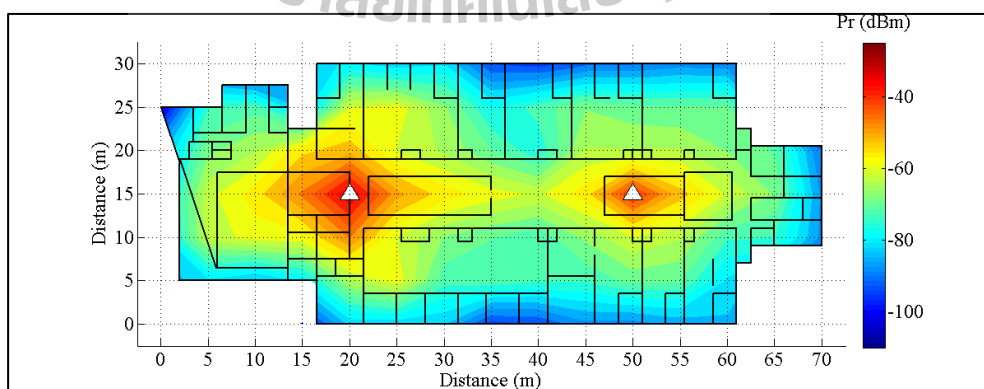
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับพื้นที่อาคารทดลองที่ 1



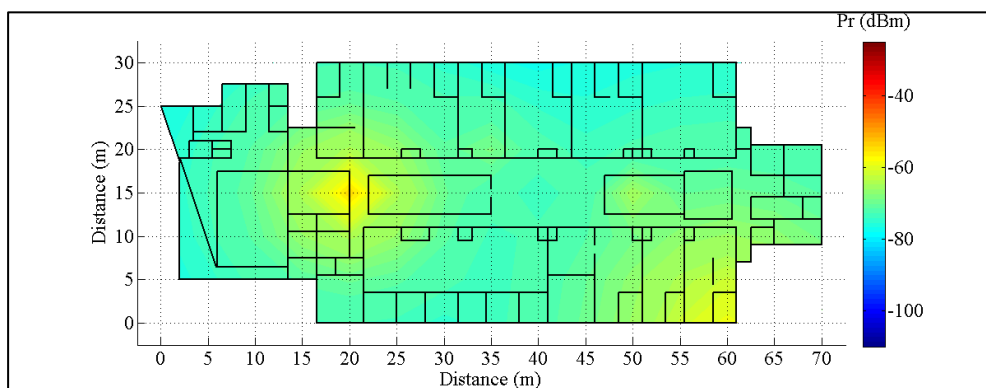
ก) ชั้นที่ 1



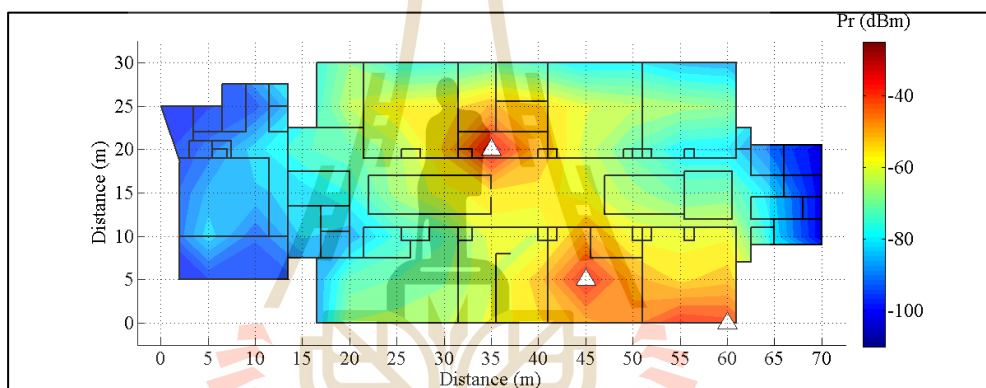
ข) ชั้นที่ 2



ค) ชั้นที่ 3



ง) ชั้นที่ 4



จ) ชั้นที่ 5

รูปที่ 3.8 ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์สำหรับพื้นที่อาคารทดลองที่ 2

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผล

จากเนื้อหาก่อนหน้านี้ ผู้วิจัยได้เสนอแนวคิดสำหรับการออกแบบ และ โครงสร้างของเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานโดยใช้วิธีการรอบอ่อนจำลองสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลที่อยู่ในอาคารหลายชั้น โดยกระบวนการทำงานการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้ จะประกอบไปด้วยการทำงานจำนวน 2 เฟส โดยการทำงานในเฟสที่ 1 จะเป็นกระบวนการในการหาคำตอบที่มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่เพียงพอสำหรับติดตั้งภายในอาคารด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น จากนั้นจึงนำคำตอบที่ได้จากการทำงานในเฟสที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่จำเป็นต้องติดตั้ง รวมถึงระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งเริ่มต้นของแต่ละสถานีฐานมาเป็นข้อมูลเริ่มต้นในการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสมในการทำงานเฟสที่ 2 ด้วยวิธีการรอบอ่อนจำลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าที่น้อยที่สุดของผลรวมความแรงสัญญาณรบกวนที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งในอาคาร นอกจากนั้นคำตอบที่ได้ยังสามารถทำให้มีความแรงสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ อัตราเร็วการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้งานมีคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ รวมถึงผู้ใช้งานทั้งหมดสามารถที่จะเข้าใช้บริการสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้

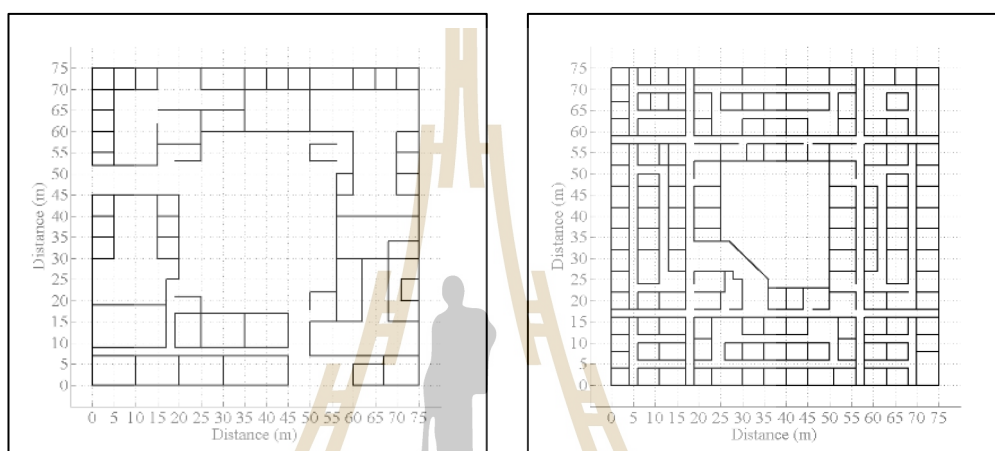
สำหรับเนื้อหาในบทนี้ จะแสดงผลการทดลองและวิเคราะห์ผล ซึ่งประกอบไปด้วย หัวข้อ

4.1 การทดลองเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นด้วยเทคนิคที่นำเสนอ หัวข้อ 4.2 การทดลองเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จากเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นที่นำเสนอ กับเทคนิคอื่น หัวข้อ 4.3 สรุปท้ายบท

4.1 การทดลองเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นด้วยเทคนิคที่นำเสนอ

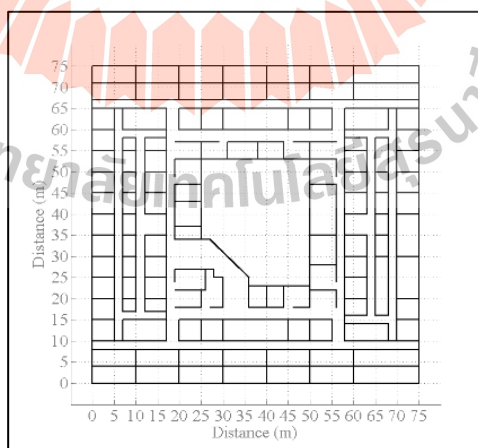
ในหัวข้อนี้จะทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นที่นำเสนอ (Minimum Summation of Leakage Signal-SA: MSLS-SA) เพื่อทำการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่

เหมาะสมภายในพื้นที่อาคารรูปแบบต่างๆ รวมถึงประเมินประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้ในแต่ละพื้นที่ให้บริการ โดยในการทดลองนี้ ได้ทำการการทดลองในพื้นที่อาคารจำนวน 2 อาคาร ซึ่งทั้ง 2 อาคารมีความแตกต่างกันในด้านโครงสร้างภายในของอาคาร จำนวนชั้น รวมถึงค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ซึ่งจะได้อธิบายในลำดับถัดไป โดยแผนผังพื้นที่อาคารทดลองทั้ง 2 อาคารคือ อาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



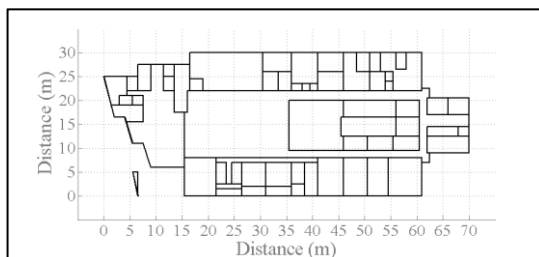
ก) ชั้นที่ 1

ข) ชั้นที่ 2



ค) ชั้นที่ 3

รูปที่ 4.1 แผนผังพื้นที่อาคารทดลองที่ 1



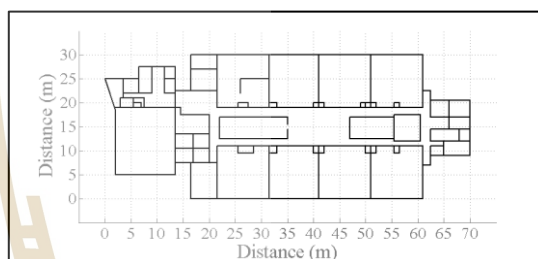
ก) ชั้นที่ 1



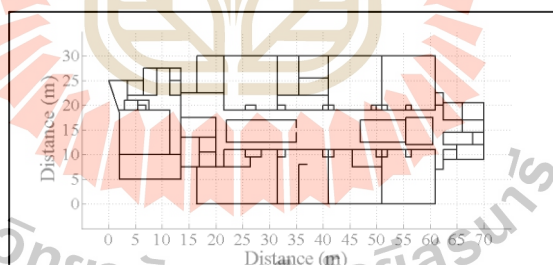
ข) ชั้นที่ 2



ค) ชั้นที่ 3



ง) ชั้นที่ 4



จ) ชั้นที่ 5

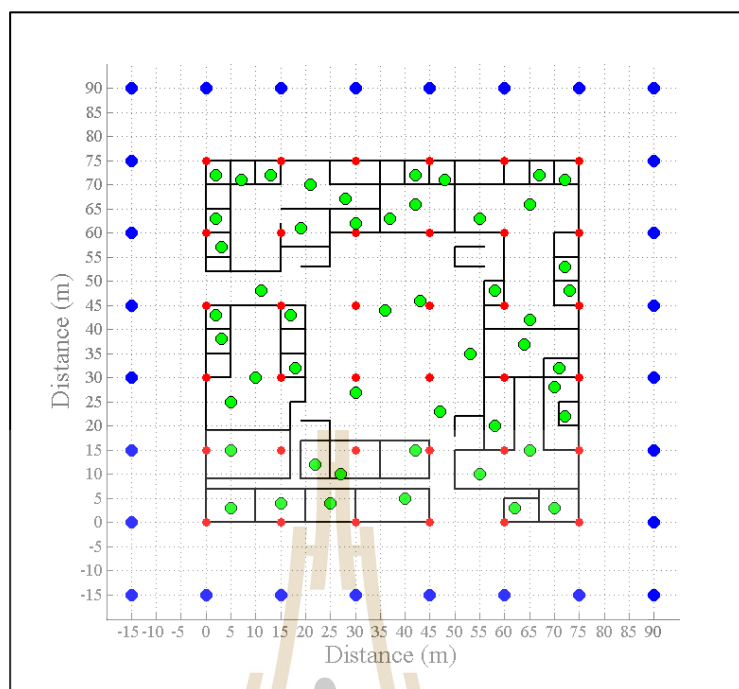
รูปที่ 4.2 แผนผังพื้นที่อาคารทดลองที่ 2

4.1.1 การทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1

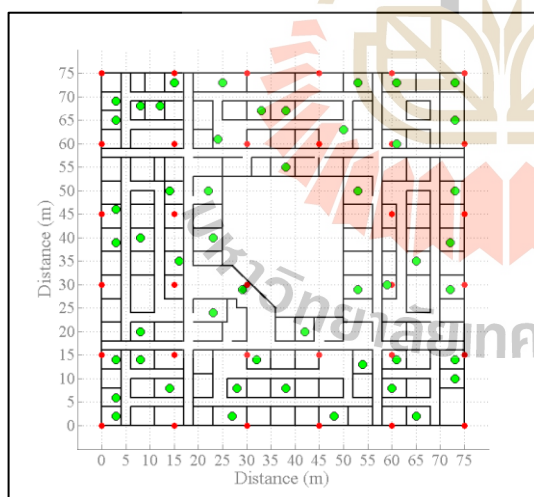
พื้นที่อาคารทดลองที่ 1 เป็นอาคารขนาด 3 ชั้น โดยในแต่ละชั้นมีความสูง 3 เมตร และมีขนาดพื้นที่ 75x75 ตารางเมตร รวมถึงมีลักษณะโครงสร้างของกำแพงที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ในการทำงานเฟสที่ 1 ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้และจุดทดสอบความแรงสัญญาณจำนวน 102 จุด โดยในชั้นที่ 1 มีจำนวน 36 จุด ชั้นที่ 2 มีจำนวน 33 จุด และในชั้นที่ 3 มีจำนวน 33 จุด แต่ละจุดมีระยะห่างเท่ากับ 15 เมตร (grid spacing 15x15 m²) มีผู้ใช้งานภายในอาคารจำนวน 150 คน โดยในแต่ละชั้นมีจำนวน 50 คนกระจายตัวทั่วพื้นที่ให้บริการ และมีจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหลบริเวณรอบนอกอาคาร 28 จุด รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่งของพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ในการทำงานเฟสที่ 1 เครื่องหมายวงกลมสีแดงแทนตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้และจุดทดสอบความแรงสัญญาณ เครื่องหมายวงกลมสีเขียวแทนตำแหน่งของผู้ใช้งาน และเครื่องหมายวงกลมสีน้ำเงินแทนตำแหน่งจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ในการทำงานเฟสที่ 1 สรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ในการทำงานเฟสที่ 1

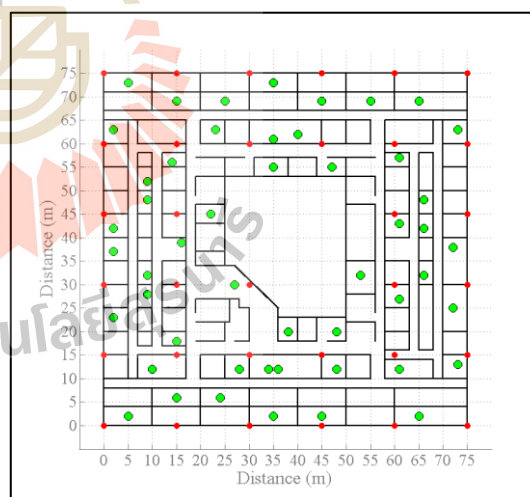
พารามิเตอร์	ค่า
ระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	0, 2.5, 5, ..., 20 dBm
ความถี่ของสัญญาณ	2.6 GHz (LTE Band 7)
ความกว้างของช่องสัญญาณ	20 MHz
ปริมาณผู้ใช้ที่สถานีฐานรองรับได้	32 Users/FBS
ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (dB)	3 dBi
ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาครับ (dB)	1 dBi
จำนวนตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้	102 จุด
จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณ	102 จุด
จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล	28 จุด
จำนวนผู้ใช้งานภายในอาคาร	150 คน



ก) ชั้นที่ 1



ข) ชั้นที่ 2



ค) ชั้นที่ 3

รูปที่ 4.3 ตำแหน่งของพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ในการทำงานเฟสที่ 1

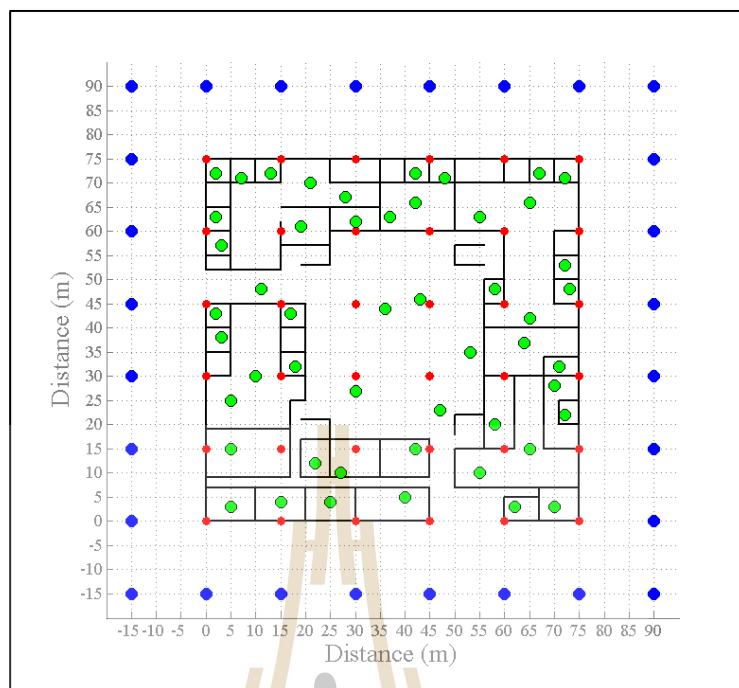
4.1.1.1 ผลการทดลอง

การหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต้องติดตั้งภายในอาคาร รวมถึงระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งเริ่มต้นในการทำงานเฟสที่ 1 ได้ใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Version 12.7 ในการหาคำตอบ โดยใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลรุ่น Intel® Core™ i7-6600 ความเร็วซีพียู 3.30 GHz หน่วยความจำ 16 GB ระบบปฏิบัติการ 64 บิต ซึ่งผลการค้นหาคำตอบจากเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.4 และผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.2

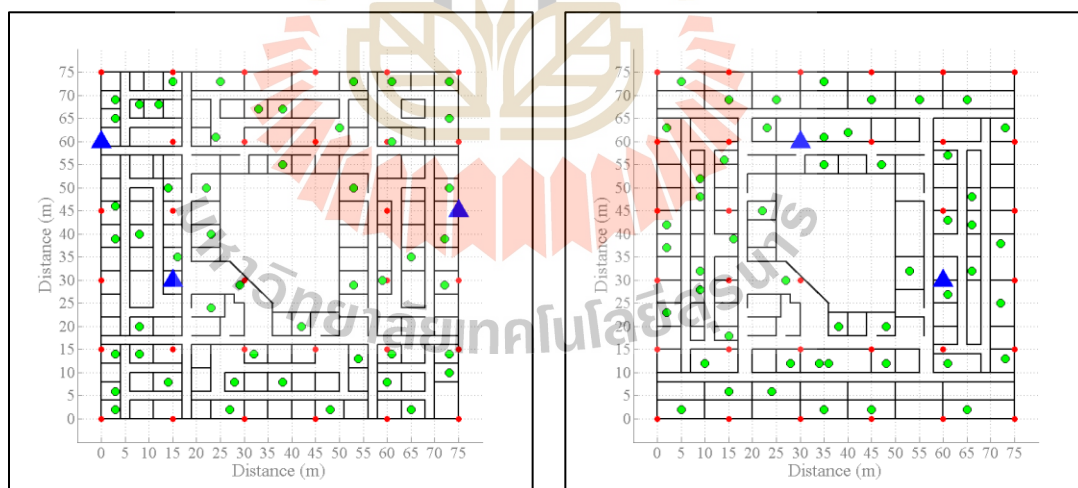
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดจำเป็นต้องติดตั้งภายในอาคารเพื่อรองรับผู้ใช้งานจำนวน 150 คนคือ 5 สถานีฐาน โดย 3 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 2 และอีก 2 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 3 ซึ่งตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เริ่มต้นที่ถูกเลือกติดตั้งคือ C₄₁, C₄₅, C₆₇, C₈₅, C₉₃ แต่ละสถานีฐานมีระดับกำลังส่งเริ่มต้นคือ 20 dBm, 17.5 dBm, 20 dBm, 17.5 dBm และ 20 dBm ตามลำดับ และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบ 12 นาที 33 วินาที นอกจากนี้ การค้นหาคำตอบในเฟสนี้ ยังไม่ได้พิจารณาถึงสัญญาณที่รั่วไหลออกไปบริเวณนอกอาคาร จึงทำให้ผลรวมของความแรงสัญญาณรั่วไหลบริเวณรอบนอกอาคารมีค่าสูง ซึ่งสัญญาณรั่วไหลดังกล่าวนี้ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้งานของสถานีฐานมาโครเซลล์นอกอาคาร อีกทั้งผลรวมของระดับกำลังส่งยังมีค่าสูงเกินความจำเป็น ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน โดยคำตอบจากการทำงานเฟสที่ 1 นี้มีผลรวมของความแรงสัญญาณรั่วไหลเท่ากับ 3.28 nW และมีผลรวมระดับกำลังส่งเท่ากับ 412.47 mW ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงคำตอบที่ได้จากการทำงานในเฟสที่ 1 ด้วยการทำงานในเฟสที่ 2 ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ได้ค่าที่น้อยที่สุดของผลรวมความแรงสัญญาณรั่วไหลที่จุดทดสอบสัญญาณ ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งในอาคาร

ตารางที่ 4.2 ผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1

จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้ง	5 สถานีฐาน
ตำแหน่งสถานีฐานเริ่มต้น	C ₄₁ , C ₄₅ , C ₆₇ , C ₈₅ , C ₉₃
ระดับกำลังส่งเริ่มต้น (dBm)	20, 17.5, 20, 17.5, 20
ผลรวมความแรงสัญญาณรั่วไหล (nW)	3.28 nW
ผลรวมระดับกำลังส่ง (mW)	412.47 mW
เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ (นาที:วินาที)	12:33



ก) ชั้นที่ 1



ข) ชั้นที่ 2

ค) ชั้นที่ 3

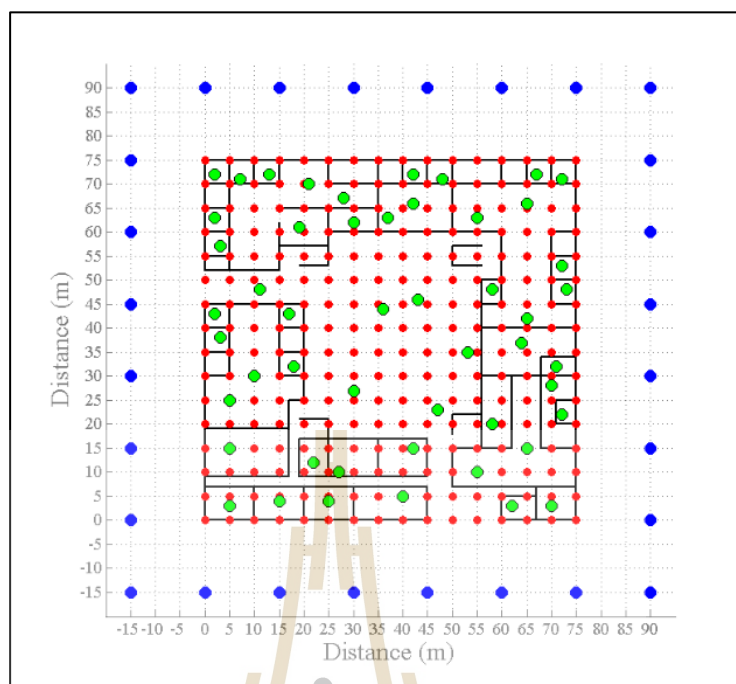
รูปที่ 4.4 ผลการค้นหาคำตอบจากเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1

ในการทำงานเฟสที่ 2 ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ได้ และจุดทดสอบความแรงสัญญาณมีจำนวนและความละเอียดมากขึ้น จาก 102 จุด เป็น 726 จุด โดยในชั้นที่ 1 มีจำนวน 256 จุด ชั้นที่ 2 มีจำนวน 235 จุด และในชั้นที่ 3 มีจำนวน 235 จุด แต่ละจุดมีระยะห่างเท่ากับ 5 เมตร (grid spacing 5x5 m²) มีผู้ใช้งานภายในอาคารจำนวน 150 คน แต่ละชั้นมีจำนวน 50 คนกระจายตัวทั่วพื้นที่ให้บริการ และมีจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหลบริเวณรอบนอกอาคาร 28 จุด เช่นเดียวกับการทำงานในเฟสที่ 1 รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งของพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ในการทำงานเฟสที่ 2 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ในการทำงานเฟสที่ 2 สรุปได้ดังตารางที่ 4.3

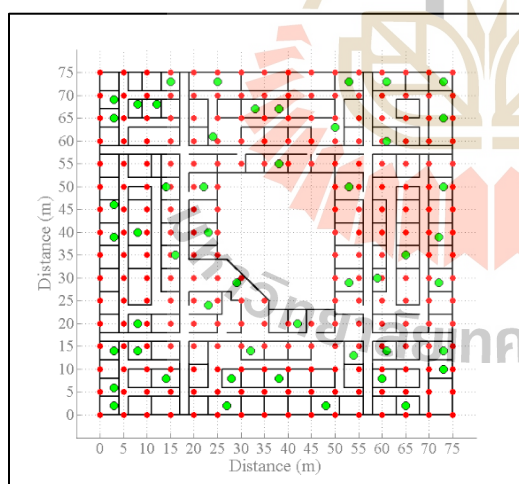
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ในการทำงานเฟสที่ 2

พารามิเตอร์	ค่า
ระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟม โดเซลล์	0 - 20 dBm
ความถี่ของสัญญาณ	2.6 GHz (LTE Band 7)
ความกว้างของช่องสัญญาณ	20 MHz
ปริมาณผู้ใช้ที่สถานีฐานรองรับได้	32 Users/FBS
ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (dB)	3 dBi
ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาครับ (dB)	1 dBi
จำนวนตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ได้	726 จุด
จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณ	726 จุด
จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล	28 จุด
จำนวนผู้ใช้งานภายในอาคาร	150 คน

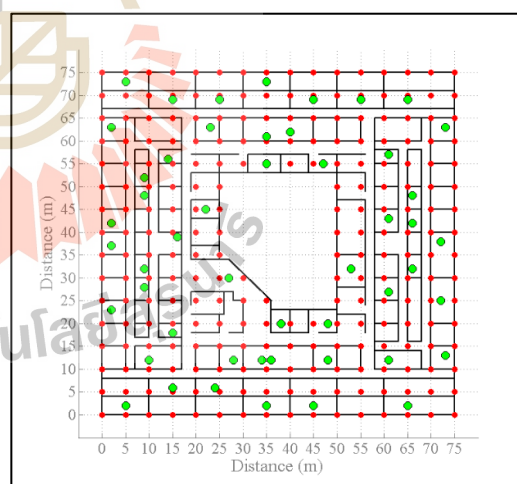
การทำงานในเฟสที่ 2 นี้ จำนวนของสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่ถูกกำหนดมาจากการทำงานเฟสที่ 1 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะทำการปรับปรุงตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งของแต่ละสถานีฐาน โดยตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานได้จะมีมากขึ้น และระดับกำลังส่งสามารถปรับเปลี่ยนได้เป็นค่าแบบต่อเนื่อง โดยตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟม โดเซลล์จะถูกปรับปรุงภายใต้วัตถุประสงค์ที่ต้องการทำให้ได้ค่าที่น้อยที่สุดของผลรวมความแรงสัญญาณรั่วไหลที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่ถูกติดตั้งในอาคาร ซึ่งผลการค้นหาคำตอบจากเฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.6 และผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.4



ก) ชั้นที่ 1

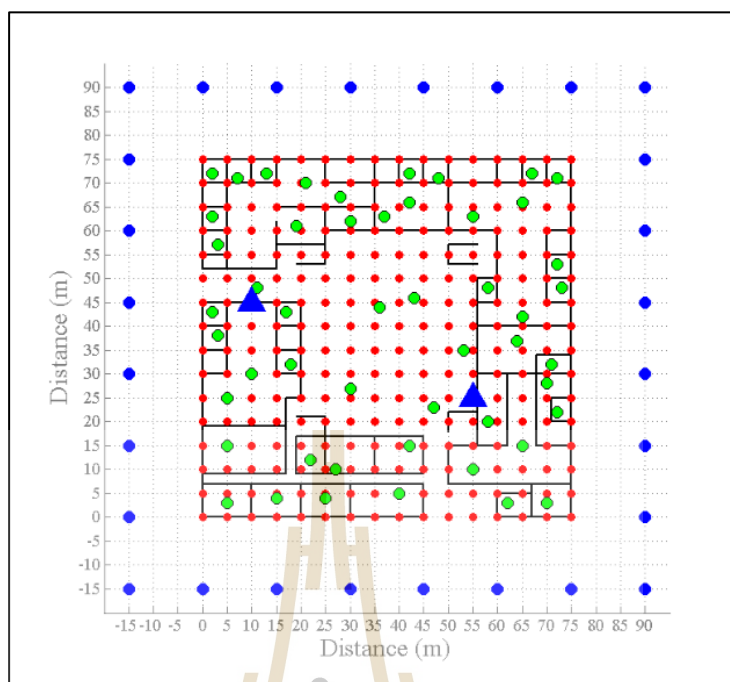


ข) ชั้นที่ 2

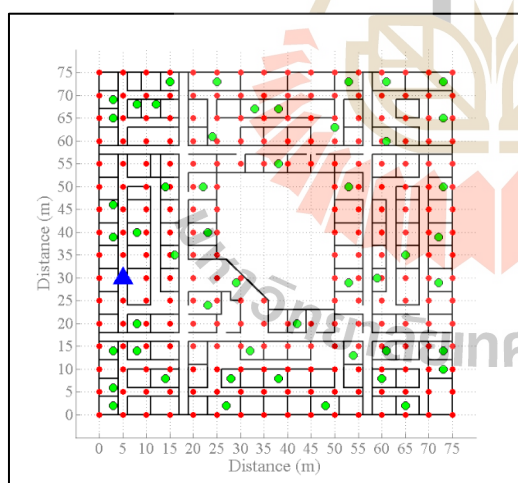


ค) ชั้นที่ 3

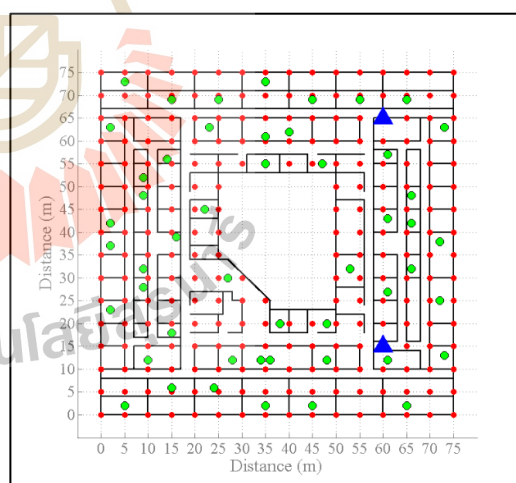
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งของพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ในการทำงานเฟสที่ 2



ก) ชั้นที่ 1



ข) ชั้นที่ 2

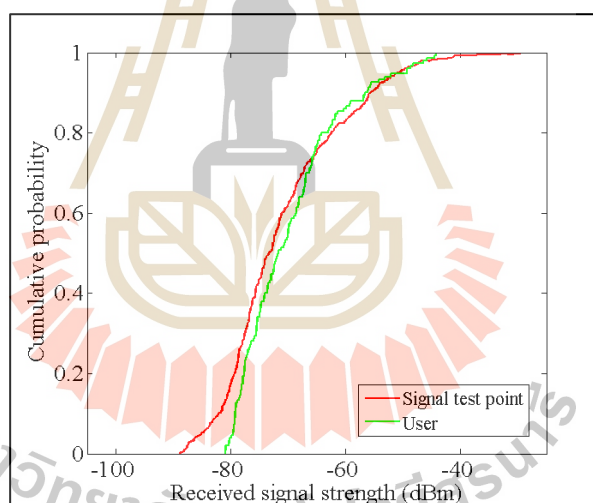


ค) ชั้นที่ 3

รูปที่ 4.6 ผลการค้นหาคำตอบจากเฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1

ตารางที่ 4.4 ผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1

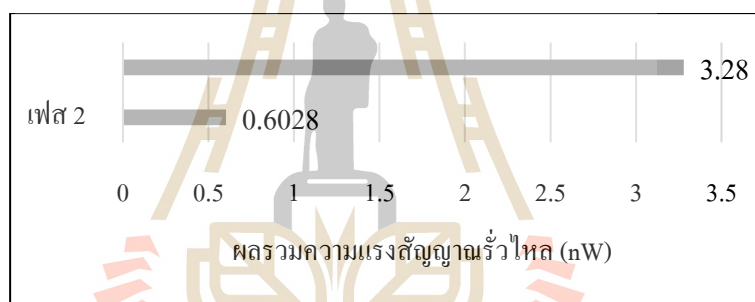
จำนวนสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่ถูกติดตั้ง	5 สถานีฐาน	
ตำแหน่งสถานีฐาน	C ₄₂ , C ₁₈₂ , C ₂₇₉ , C ₆₆₆ , C ₆₇₆	
ระดับกำลังส่ง (dBm)	12.91, 8.85, 10.02, 5.54, 9.63	
ผลรวมความแรงสัญญาณรบกวน (nW)	0.6028 nW	
ผลรวมระดับกำลังส่ง (mW)	50.03 mW	
เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ (นาที่:วินาที)	3:45	
ความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบความแรงสัญญาณ ได้รับ	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	-70.95 dBm	10.58
ความแรงสัญญาณที่ผู้ใช้งาน ได้รับ	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	-69.69 dBm	8.76



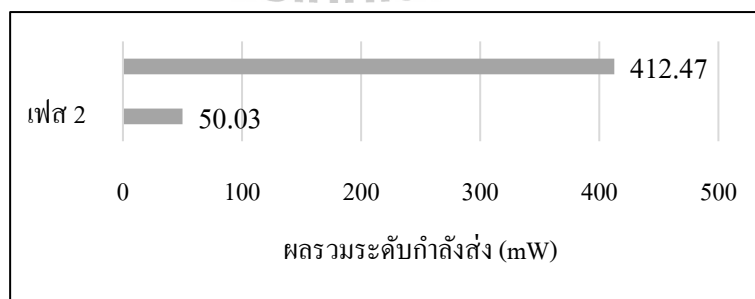
รูปที่ 4.7 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบความแรงสัญญาณ และผู้ใช้งาน ได้รับในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1

จากผลการทดลองจะพบว่า ตำแหน่งของสถานีฐานเฟม โดเซลล์ทั้ง 5 สถานีฐานนั้นถูกปรับเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่ง โดยมี 2 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 1, 1 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 2 และอีก 2 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 3 ซึ่งตำแหน่งสถานีฐานถูกเลือกติดตั้งคือ C₄₁, C₄₅, C₆₇, C₈₅, C₉₃ และแต่ละสถานีฐานมีระดับกำลังส่งเท่ากับ 12.91 dBm, 8.85 dBm, 10.02 dBm, 5.54 dBm และ 9.63 dBm ตามลำดับ ค่าผลรวมของความแรงสัญญาณรบกวนรั่วไหลเท่ากับ

0.6028 mW ค่าผลรวมระดับกำลังส่งเท่ากับ 50.03 mW และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบ 3 นาที 45 วินาที ซึ่งเมื่อรวมกับเวลาที่ใช้ในการทำงานเฟสที่ 1 จะทำให้เวลาที่ใช้ตลอดการค้นหาคำตอบมีค่าเท่ากับ 16 นาที 18 วินาที และสำหรับการรับประกันพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ ความแรงสัญญาณที่ทุกจุดทดสอบความแรงสัญญาณภายในอาคารทดลองที่ 1 มีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ นั่นคือ -103.535 dBm โดยมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณอยู่ที่ -70.95 dBm มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 10.58 และเช่นเดียวกันกับการรับประกันอัตราเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลของผู้ใช้งานภายในอาคาร ความแรงสัญญาณที่ผู้ใช้งานทุกคนในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ได้รับ มีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ นั่นคือ -80.935 dBm โดยมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณอยู่ที่ -70.95 dBm มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 10.58 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าคำตอบที่ได้จากการทำงานในเฟสที่ 2 นั้น ค่าผลรวมของความแรงสัญญาณรั่วไหล และผลรวมระดับกำลังส่งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากการทำงานในเฟสที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 ผลรวมความแรงสัญญาณรั่วไหลของคำตอบที่ได้จากการทำงานเฟสที่ 1 และ เฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1



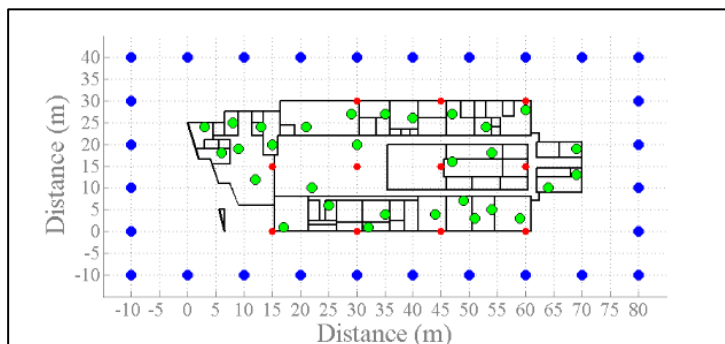
รูปที่ 4.9 ผลรวมระดับกำลังส่งของคำตอบที่ได้จากการทำงานเฟสที่ 1 และ เฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1

4.1.2 การทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2

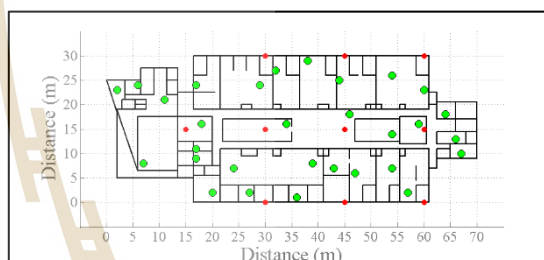
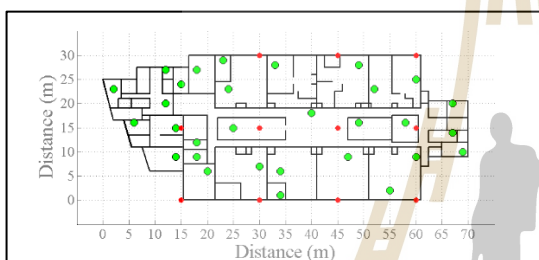
พื้นที่อาคารทดลองที่ 2 เป็นอาคารขนาด 5 ชั้น โดยในแต่ละชั้นมีความสูง 3 เมตร และมีขนาดพื้นที่ 70x30 ตารางเมตร รวมถึงมีลักษณะโครงสร้างของกำแพงที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ในการทำงานเฟสที่ 1 ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้และจุดทดสอบความแรงสัญญาณจำนวน 57 จุด โดยในชั้นที่ 1 มีจำนวน 12 จุด ชั้นที่ 2 มีจำนวน 12 จุด ชั้นที่ 3 มีจำนวน 11 จุด ชั้นที่ 4 มีจำนวน 11 จุด และในชั้นที่ 5 มีจำนวน 11 จุด แต่ละจุดมีระยะห่างเท่ากับ 15 เมตร (grid spacing 15x15 m²) มีผู้ใช้งานภายในอาคารจำนวน 300 คน โดยในแต่ละชั้นมีจำนวน 60 คนกระจายตัวทั่วพื้นที่ให้บริการ และมีจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหลบริเวณรอบนอกอาคาร 28 จุด รูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งของพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ในการทำงานเฟสที่ 1 เครื่องหมายวงกลมสีแดงแทนตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้และจุดทดสอบความแรงสัญญาณ เครื่องหมายวงกลมสีเขียวแทนตำแหน่งของผู้ใช้งาน และเครื่องหมายวงกลมสีน้ำเงินแทนตำแหน่งจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ในการทำงานเฟสที่ 1 สรุปได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ในการทำงานเฟสที่ 1

พารามิเตอร์	ค่า
ระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	2.5, 5, ..., 20 dBm
ความถี่ของสัญญาณ	2.6 GHz (LTE Band 7)
ความกว้างของช่องสัญญาณ	20 MHz
ปริมาณผู้ใช้ที่สถานีฐานรองรับได้	32 Users/FBS
ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (dB)	3 dBi
ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาครับ (dB)	1 dBi
จำนวนตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้	57 จุด
จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณ	57 จุด
จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล	28 จุด
จำนวนผู้ใช้งานภายในอาคาร	300 คน

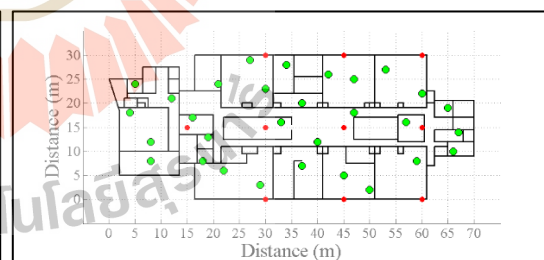
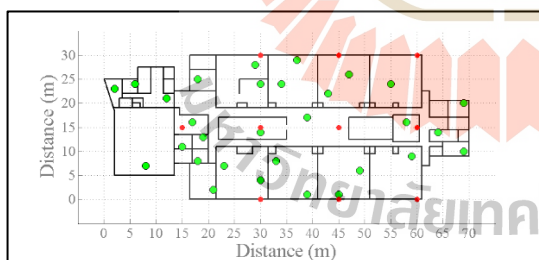


ก) ชั้นที่ 1



ข) ชั้นที่ 2

ค) ชั้นที่ 3



ง) ชั้นที่ 4

จ) ชั้นที่ 5

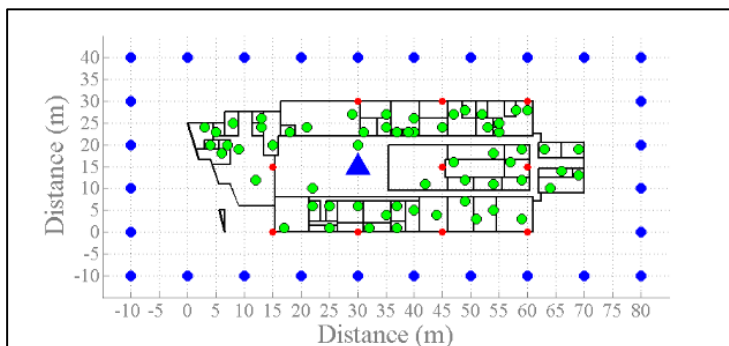
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งของพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ในการทำงานเฟสที่ 1

4.1.2.1 ผลการทดลอง

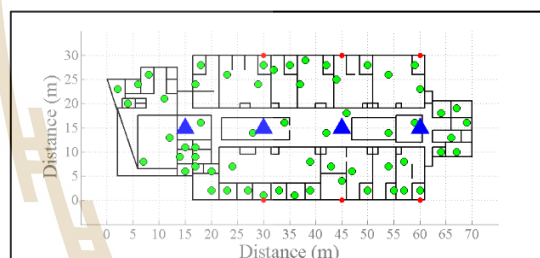
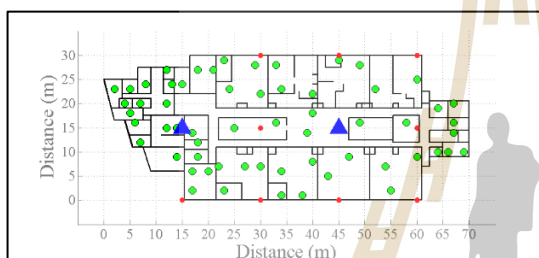
จากผลการทดลอง จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดจำเป็นต้องติดตั้งภายในอาคารเพื่อรองรับผู้ใช้งานจำนวน 300 คนคือ 10 สถานีฐาน โดย 1 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 1, 2 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 2, 4 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 3, 2 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 4 และอีก 1 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 5 ซึ่งตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์เริ่มต้นที่ถูกเลือกติดตั้งคือ C₅, C₁₅, C₂₀, C₂₆, C₂₈, C₃₁, C₃₄, C₃₉, C₄₂, C₅₁ แต่ละสถานีฐานมีระดับกำลังส่งเริ่มต้นคือ 20 dBm, 20 dBm, 15 dBm, 17.5 dBm, 17.5 dBm, 15 dBm, 20 dBm, 20 dBm, 17.5 dBm และ 20 dBm ตามลำดับ และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบ 12 นาที 33 วินาที มีค่าผลรวมของความแรงสัญญาณรบกวนเท่ากับ 3.28 nW ค่าผลรวมระดับกำลังส่งเท่ากับ 412.47 mW โดยผลการค้นหาคำตอบจากเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.11 และผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2

จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้ง	10 สถานีฐาน
ตำแหน่งสถานีฐานเริ่มต้น	C ₅ , C ₁₅ , C ₂₀ , C ₂₆ , C ₂₈ , C ₃₁ , C ₃₄ , C ₃₉ , C ₄₂ , C ₅₁
ระดับกำลังส่งเริ่มต้น (dBm)	20, 20, 15, 17.5, 17.5, 15, 20, 20, 17.5, 20
ผลรวมความแรงสัญญาณรบกวน (nW)	4.091 nW
ผลรวมระดับกำลังส่ง (mW)	731.95 mW
เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ (นาที:วินาที)	20:58

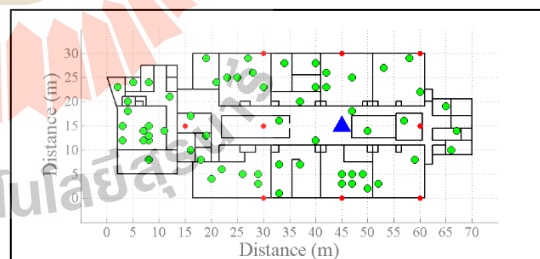
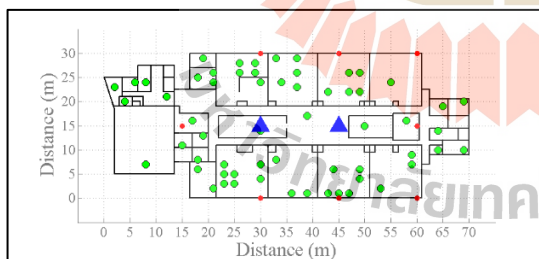


ก) ชั้นที่ 1



ข) ชั้นที่ 2

ค) ชั้นที่ 3



ง) ชั้นที่ 4

จ) ชั้นที่ 5

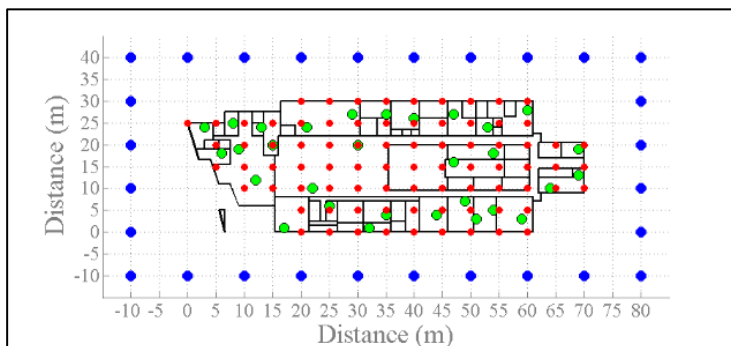
รูปที่ 4.11 ผลการค้นหาคำตอบจากเฟสที่ 1 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2

ในการทำงานเฟสที่ 2 ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ และจุดทดสอบความแรงสัญญาณมีจำนวนและความละเอียดมากขึ้น จาก 57 จุด เป็น 412 จุด โดยในชั้นที่ 1 มีจำนวน 81 จุด ชั้นที่ 2 มี 81 จุด ชั้นที่ 3 มี 84 จุด ชั้นที่ 4 มี 83 จุด และในชั้นที่ 5 มี 83 จุด แต่ละจุดมีระยะห่างเท่ากับ 5 เมตร (grid spacing $5 \times 5 \text{ m}^2$) มีผู้ใช้งานภายในอาคารจำนวน 300 คน แต่ละชั้นมี 60 คนกระจายตัวทั่วพื้นที่ให้บริการ และมีจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหลบริเวณรอบนอกอาคาร 28 จุด เช่นเดียวกับการทำงานในเฟสที่ 1 รูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งของพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ในการทำงานเฟสที่ 2 และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ในการทำงานเฟสที่ 2 สรุปได้ดังตารางที่ 4.7

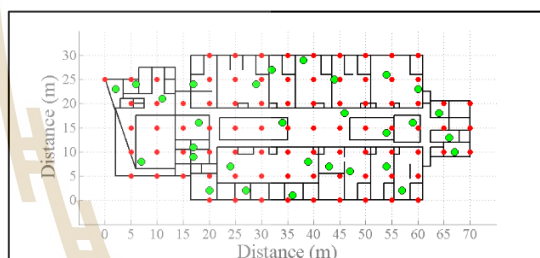
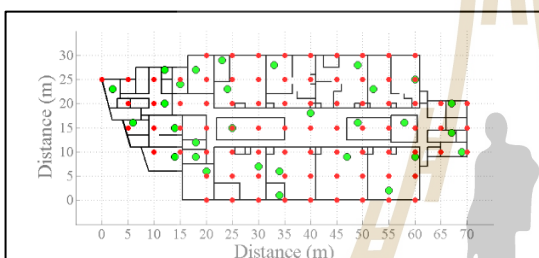
ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ในการทำงานเฟสที่ 2

พารามิเตอร์	ค่า
ระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์	0 - 20 dBm
ความถี่ของสัญญาณ	2.6 GHz (LTE Band 7)
ความกว้างของช่องสัญญาณ	20 MHz
ปริมาณผู้ใช้ที่สถานีฐานรองรับได้	32 Users/FBS
ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (dB)	3 dBi
ค่าอัตราขยายของสายอากาศภาครับ (dB)	1 dBi
จำนวนตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้	412 จุด
จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณ	412 จุด
จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล	28 จุด
จำนวนผู้ใช้งานภายในอาคาร	300 คน

การทำงานในเฟสที่ 2 นี้ จำนวนของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกกำหนดมาจากการทำงานเฟสที่ 1 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะทำการปรับปรุงตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งของแต่ละสถานีฐาน โดยตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานได้จะมีมากขึ้น และระดับกำลังส่งสามารถปรับเปลี่ยนได้เป็นค่าแบบต่อเนื่อง โดยตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์จะถูกปรับปรุงภายใต้วัตถุประสงค์ที่ต้องการ ทำให้ได้ค่าที่น้อยที่สุดของผลรวมความแรงสัญญาณรั่วไหลที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งในอาคาร ซึ่งผลการค้นหาคำตอบจากเฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.13 และผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.8

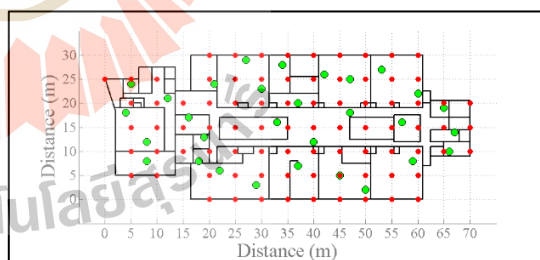
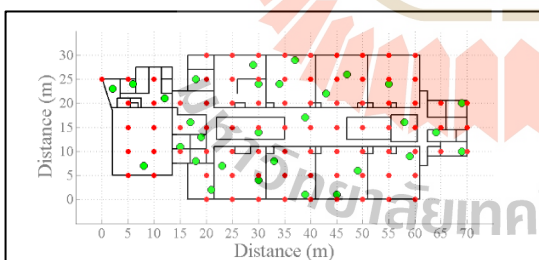


ก) ชั้นที่ 1



ข) ชั้นที่ 2

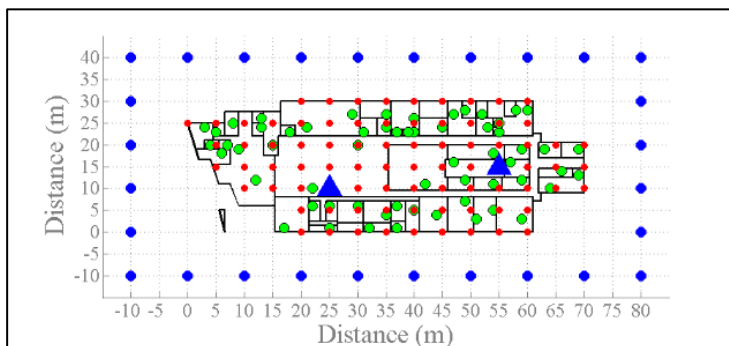
ค) ชั้นที่ 3



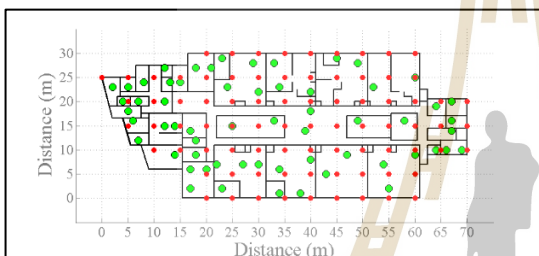
ง) ชั้นที่ 4

จ) ชั้นที่ 5

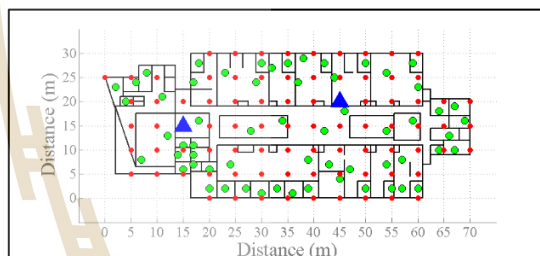
รูปที่ 4.12 ตำแหน่งของพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ในการทำงานเฟสที่ 2



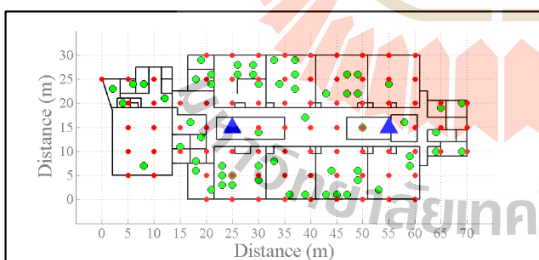
ก) ชั้นที่ 1



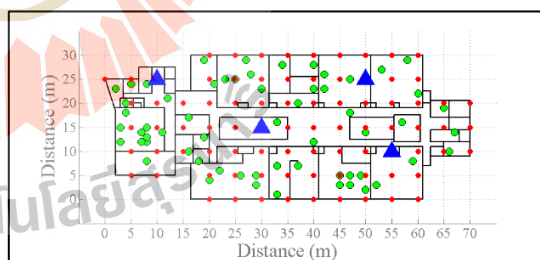
ข) ชั้นที่ 2



ค) ชั้นที่ 3



ง) ชั้นที่ 4

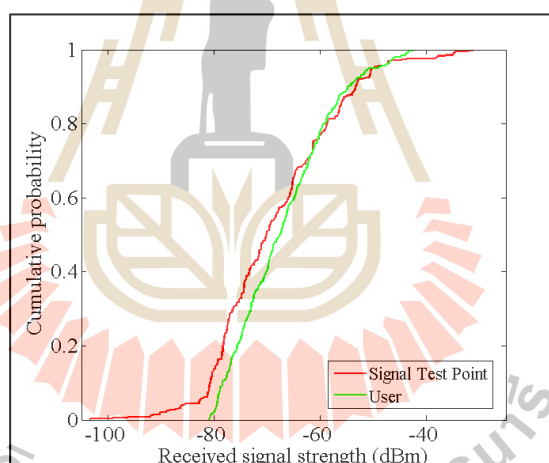


จ) ชั้นที่ 5

รูปที่ 4.13 ผลการค้นหาคำตอบจากเฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2

ตารางที่ 4.8 ผลสรุปจากการค้นหาคำตอบในเฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2

จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้ง	10 สถานีฐาน	
ตำแหน่งสถานีฐาน	C ₂₂ , C ₆₅ , C ₁₇₆ , C ₂₁₇ , C ₂₇₁ , C ₃₁₃ , C ₃₄₀ , C ₃₆₁ , C ₃₉₁ , C ₃₉₅	
ระดับกำลังส่ง (dBm)	0.70, 3.37, 3.52, 7.29, 6.40, 3.85, 0.41, 3.79, 0.13, 3.58	
ผลรวมความแรงสัญญาณรั่วไหล (nW)	0.0208 nW	
ผลรวมระดับกำลังส่ง (mW)	24.55 mW	
เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ (นาที่:วินาที)	10:28	
ความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบความแรงสัญญาณได้รับ	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	- 68.44 dBm	11.55
ความแรงสัญญาณที่ผู้ใช้งานได้รับ	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	- 66.84dBm	9.06



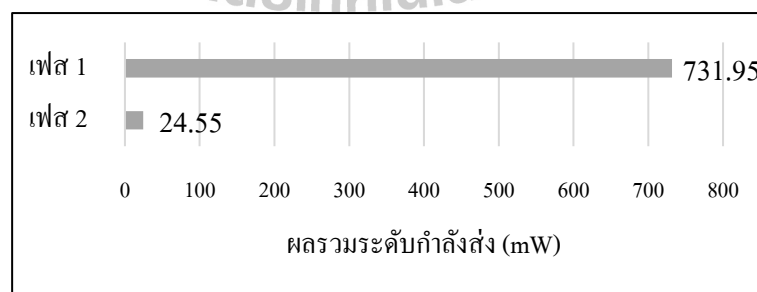
รูปที่ 4.14 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบความแรงสัญญาณและผู้ใช้งานได้รับในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2

จากผลการทดลองพบว่า สถานีฐานเฟมโตเซลล์ทั้ง 10 สถานีฐานนั้นถูกปรับตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่ง โดยมี 2 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 1, 2 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 3, 2 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 4 และ 4 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 5 ซึ่งตำแหน่งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ถูกเลือกติดตั้งคือ C₂₂, C₆₅, C₁₇₆, C₂₁₇, C₂₇₁, C₃₁₃, C₃₄₀, C₃₆₁, C₃₉₁, C₃₉₅ แต่ละสถานีฐานมีระดับกำลังส่งเท่ากับ 0.70 dBm, 3.37 dBm, 3.52 dBm, 7.29 dBm, 6.40 dBm, 3.85 dBm, 0.41 dBm, 3.79

dBm, 0.13 dBm และ 3.58 dBm ตามลำดับ ค่าผลรวมของความแรงสัญญาณรบกวนเท่ากับ 0.6028 nW ค่าผลรวมระดับกำลังส่งเท่ากับ 50.03 mW และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบ 10 นาที 28 วินาที ซึ่งเมื่อรวมกับเวลาที่ใช้ในการทำงานเฟสที่ 1 จะทำให้เวลาตลอดการค้นหาคำตอบมีค่าเท่ากับ 31 นาที 26 วินาที และสำหรับการรับประกันพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ ความแรงสัญญาณที่ทุกจุดทดสอบความแรงสัญญาณที่ได้รับมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้คือ -103.535 dBm โดยมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณอยู่ที่ -68.44 dBm มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 11.55 และเช่นเดียวกันกับการรับประกันอัตราเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลของผู้ใช้งาน ความแรงสัญญาณที่ผู้ใช้งานทุกคนได้รับ มีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ นั่นคือ -80.935 dBm โดยมีค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณอยู่ที่ -66.84 dBm มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 9.06 ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.14 นอกจากนี้คำตอบที่ได้จากการทำงานในเฟสที่ 2 นั้น ค่าผลรวมของความแรงสัญญาณรบกวน และผลรวมระดับกำลังส่ง มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากการทำงานในเฟสที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.15 ผลรวมความแรงสัญญาณรบกวนของคำตอบที่ได้จากการทำงานเฟสที่ 1 และ เฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2



รูปที่ 4.16 ผลรวมระดับกำลังส่งของคำตอบที่ได้จากการทำงานเฟสที่ 1 และ เฟสที่ 2 ในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2

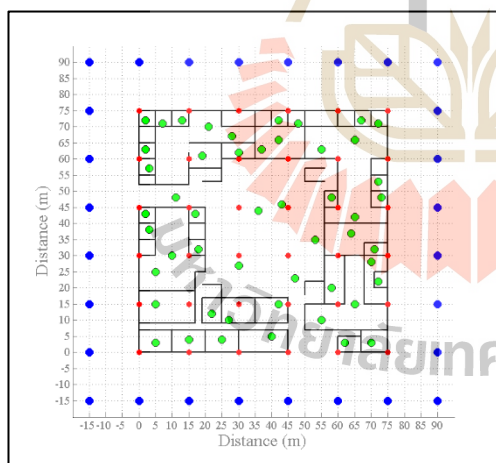
4.2 การทดลองเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จากเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นที่นำเสนอเกี่ยวกับเทคนิคอื่น

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลการค้นหาคำตอบของเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นที่ได้นำเสนอ โดยนำคำตอบที่ได้ไปเปรียบเทียบการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น และการค้นหาคำตอบด้วยการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิค MSLS-SA ซึ่งเป็นเทคนิคที่พัฒนาบนพื้นฐานของวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นและวิธีการอบอุ่นจำลอง ซึ่งเป็นการค้นหาคำตอบเพื่อให้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการค้นหาคำตอบของทั้งสามเทคนิคดังกล่าว ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อ 4.2.1 การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จากเทคนิคที่นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น หัวข้อ 4.2.2 การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จากเทคนิคที่นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน หัวข้อ 4.2.3 ผลการทดลอง โดยในการทดลองมีทั้งหมด 5 กรณี และแต่ละกรณีมีพารามิเตอร์ที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 - 4.21 ในกรณีที่ 1 เป็นการทดลองในชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ของพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 โดยมีระยะห่างของกริดเท่ากับ 15 ตารางเมตร มีจำนวนจุดที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้และจำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณอย่างละ 69 จุด มีจำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล 28 จุด และมีจำนวนผู้ใช้งาน 100 คน กรณีที่ 2 เป็นการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ทั้ง 3 ชั้น โดยมีระยะห่างของกริดเท่ากับ 15 ตารางเมตร มีจำนวนจุดที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้และจำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณอย่างละ 102 จุด มีจำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล 28 จุด และมีจำนวนผู้ใช้งาน 150 คน กรณีที่ 3 เป็นการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ทั้ง 3 ชั้น โดยมีระยะห่างของกริดเท่ากับ 15 ตารางเมตร มีจำนวนจุดที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้และจำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณอย่างละ 102 จุด มีจำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล 28 จุด และมีจำนวนผู้ใช้งาน 300 คน กรณีที่ 4 เป็นการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ทั้ง 5 ชั้น โดยมีระยะห่างของกริดเท่ากับ 5 ตารางเมตร มีจำนวนจุดที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้และจำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณอย่างละ 412 จุด มีจำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล 28 จุด และมีจำนวนผู้ใช้งาน 300 คน และในกรณีที่ 5 เป็นการทดลองในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ทั้ง 5 ชั้น โดยมีระยะห่างของกริดเท่ากับ 5 ตารางเมตร มีจำนวนจุดที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้และจำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณอย่างละ 726 จุด มีจำนวนจุดทดสอบความแรง

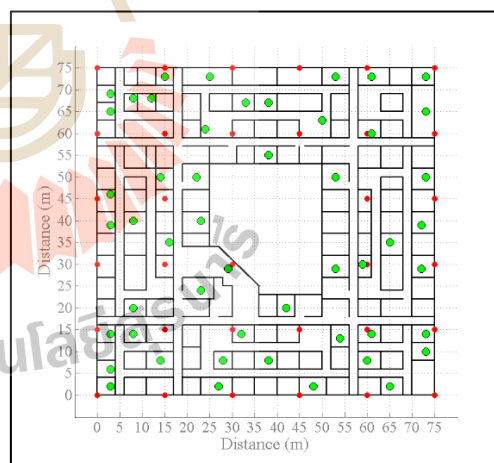
สัญญาณรบกวน 28 จุด และมีจำนวนผู้ใช้งาน 300 คน โดยสามารถสรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละกรณีได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแต่ละกรณี

กรณีสำหรับการทดลอง	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5
ระยะห่างของกริด (เมตรxเมตร)	15x15	15x15	15x15	5x5	5x5
ขนาดพื้นที่อาคารทดลอง (เมตรxเมตร)	75x75 2 ชั้น	75x75 3 ชั้น	75x75 3 ชั้น	70x30 5 ชั้น	75x75 3 ชั้น
จำนวนผู้ใช้งาน	100	150	300	300	300
จำนวนจุดที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟม โดเซลล์ได้	69	102	102	412	726
จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณ	69	102	102	412	726
จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณรบกวน	28	28	28	28	28

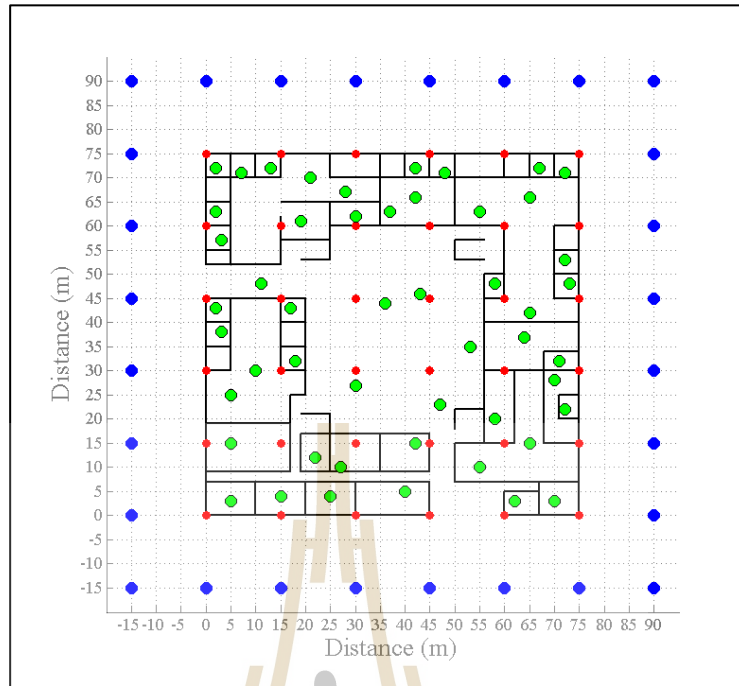


ก) ชั้นที่ 1

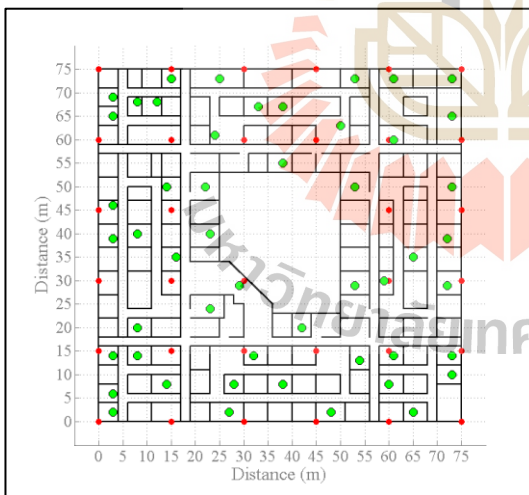


ข) ชั้นที่ 2

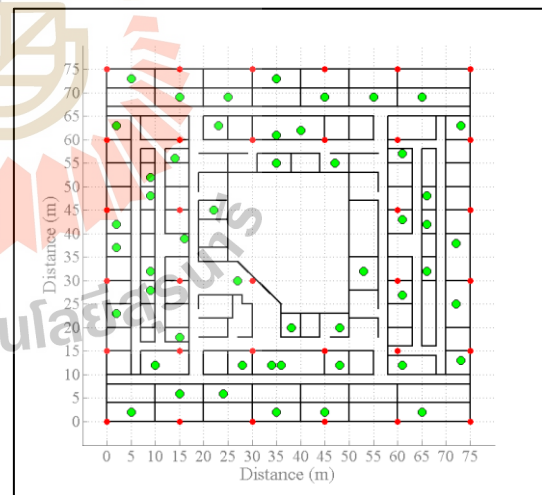
รูปที่ 4.17 กรณีที่ 1



ก) ชั้นที่ 1

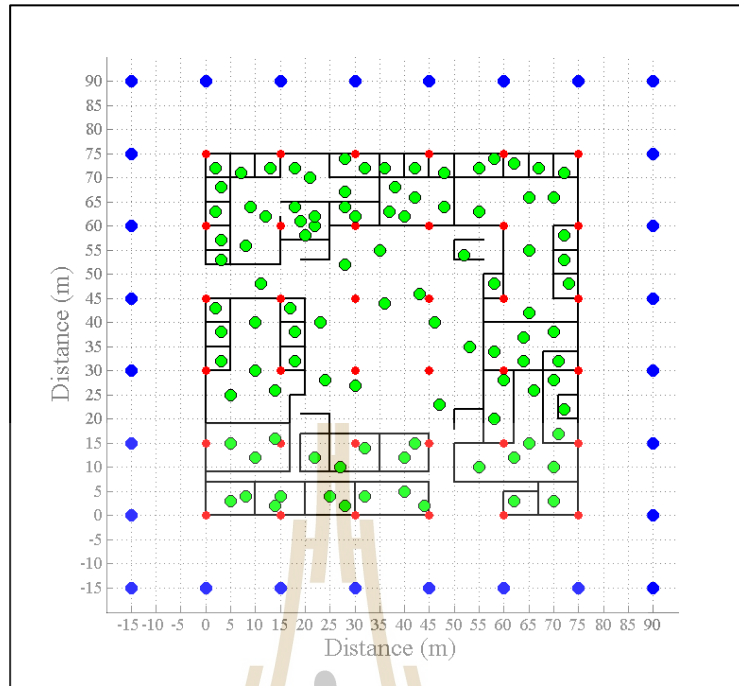


ข) ชั้นที่ 2

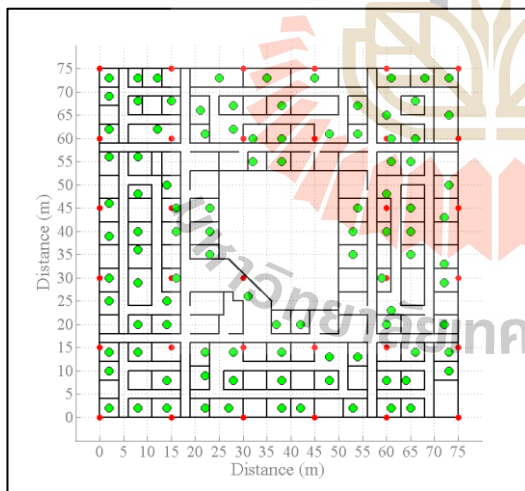


ค) ชั้นที่ 3

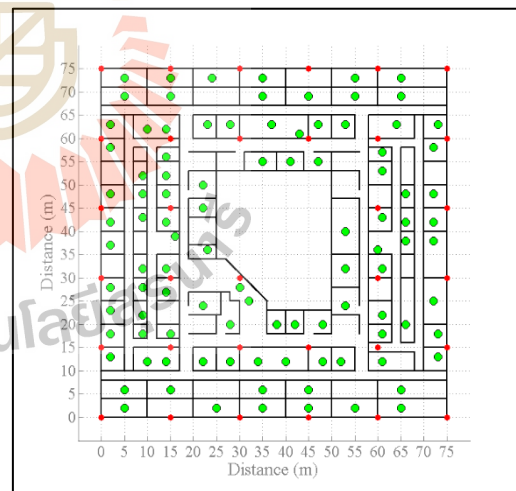
รูปที่ 4.18 กรณีที่ 2



ก) ชั้นที่ 1

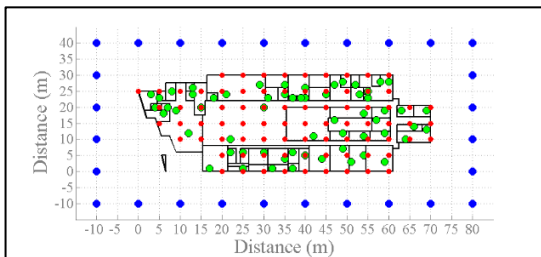


ข) ชั้นที่ 2

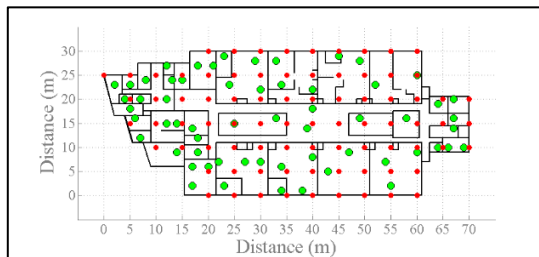


ค) ชั้นที่ 3

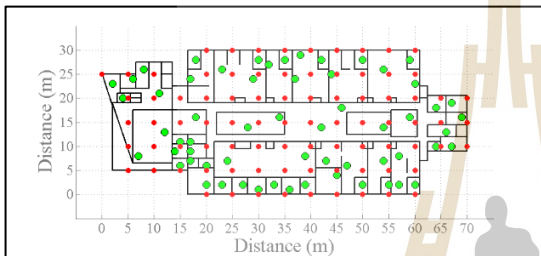
รูปที่ 4.19 กรณีที่ 3



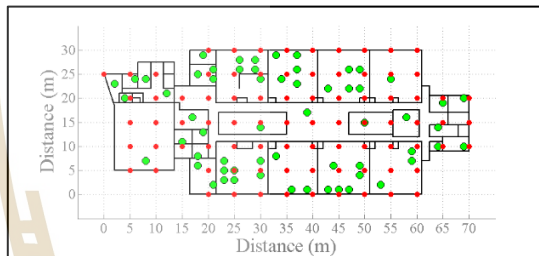
ก) ชั้นที่ 1



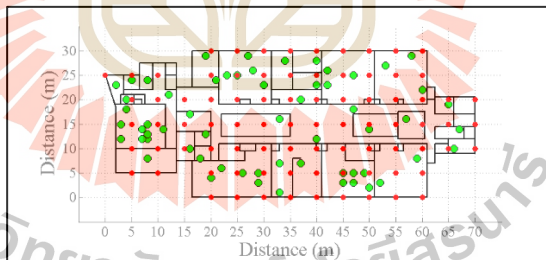
ข) ชั้นที่ 2



ค) ชั้นที่ 3

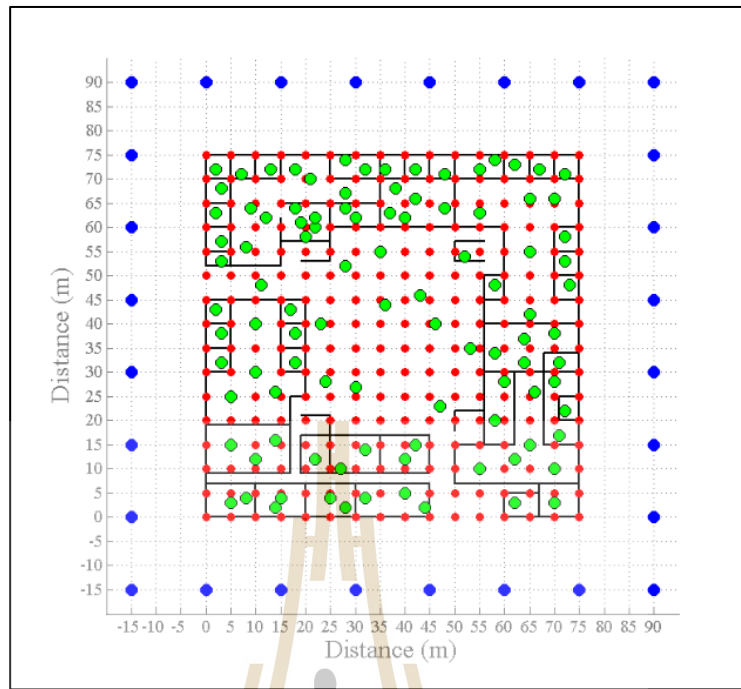


ง) ชั้นที่ 4

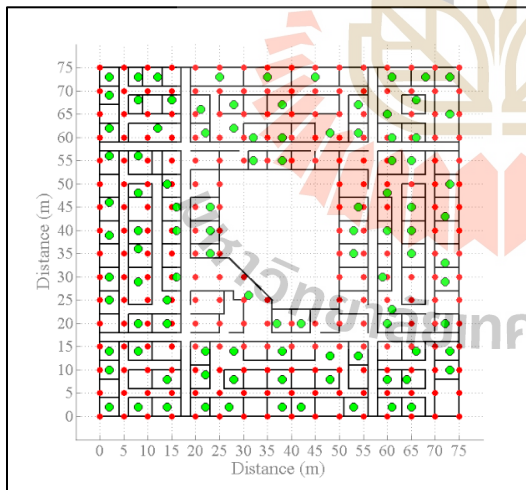


จ) ชั้นที่ 5

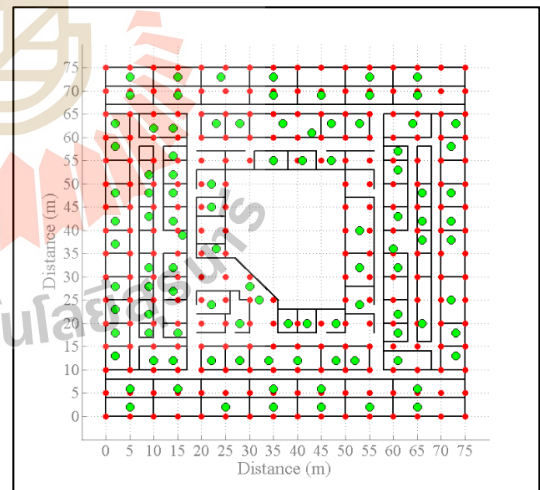
รูปที่ 4.20 กรณีที่ 4



ก) ชั้นที่ 1



ข) ชั้นที่ 2



ค) ชั้นที่ 3

รูปที่ 4.21 กรณีที่ 5

4.2.1 การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จากเทคนิคที่นำเสนอกับวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น

สำหรับในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณภาพของคำตอบที่ได้จากเทคนิค MSLS-SA เนื่องจากคำตอบที่ได้จากวิธีทางฮิวริสติกไม่สามารถรับประกันว่าจะให้คำตอบที่เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดหรือค่าที่ดีที่สุด (optimal) ส่วนวิธีการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น ถึงแม้ว่าจะสามารถรับประกันได้ว่าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ตามวัตถุประสงค์และเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ แต่ถ้าเป็นปัญหาขนาดใหญ่ วิธีการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นอาจใช้เวลาในการหาคำตอบนานจนไม่สามารถรอได้

ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบที่ได้จากเทคนิค MSLS-SA ที่ได้นำเสนอและวิธีการค้นหาคำตอบด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น ผู้วิจัยจึงต้องทำการปรับสมการคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันเงื่อนไขเพื่อให้การค้นหาคำตอบด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นสามารถหาคำตอบได้ เพื่อสะดวกในการอธิบายต่อไป ผู้วิจัยจะเรียกแนวทางการหาคำตอบนี้ว่า Upper Bound - Linear Programming (UB-LP) สมการที่ 4.1 – 4.11 แสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขสำหรับวิธีการ UB-LP โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีเป้าหมายคือทำให้ได้ค่าที่น้อยที่สุดของผลรวมความแรงสัญญาณรบกวนที่จุดทดสอบสัญญาณ ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งในอาคาร

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ UB-LP

$$E(S) = \text{Minimize} \sum_{i=1}^B \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T t_{il}^o * 10^{[(Pt_{il} + Gt + Gr - pls_{oi}) - Pthis]/10} \quad (4.1)$$

สมการเงื่อนไข UB-LP

1) จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้ในการติดตั้งภายในอาคารจะต้องมีจำนวนเท่ากับจำนวนสถานีฐานเริ่มต้นที่ได้จากการทำงานในเฟสที่ 1 ของเทคนิค MSLS-SA ($N_{initial}$)

$$\sum_{i=1}^B r_i = N_{initial} \quad \forall i \in B \quad (4.2)$$

2) สถานีฐานเฟมโตเซลล์ตำแหน่งที่ i จะต้องถูกกำหนดระดับกำลังส่งให้ 1 ระดับ โดยเซตของระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์มีจำนวน 20 ระดับ คือ $L = \{1, 2, \dots, 19, 20\}$

$$\sum_{i=1}^L a_{il} = 1 \quad \forall i \in B, l \in L \quad (4.3)$$

3) สถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่จะถูกกำหนดระดับกำลังส่งได้ ต้องเป็นสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่ถูกเลือกติดตั้งแล้วเท่านั้น

$$a_{il} \leq r_i \quad \forall i \in B, l \in L \quad (4.4)$$

4) จุดทดสอบความแรงสัญญาณที่ตำแหน่ง h จะต้องได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่มีระดับกำลังส่ง l อย่างน้อย 1 สถานีฐาน

$$\sum_{i=1}^B \sum_{l=1}^L s_{il}^h \geq 1 \quad \forall h \in S \quad (4.5)$$

5) จุดทดสอบความแรงสัญญาณตำแหน่ง h จะเลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่ถูกเลือกติดตั้งแล้วเท่านั้น

$$s_{il}^h \leq a_{il} \quad \forall h \in S, i \in B, l \in L \quad (4.6)$$

6) ค่าความแรงสัญญาณจากจุดทดสอบความแรงสัญญาณตำแหน่ง h ที่รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโทเซลล์ i ที่มีระดับกำลังส่ง l จะต้องมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

$$s_{il}^h * (Pt_{il} + Gt + Gr - pls_{hi}) - Pths \geq 0 \quad \forall h \in S, i \in B, l \in L \quad (4.7)$$

7) ผู้ใช้งานที่ตำแหน่ง g จะต้องได้รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่มีระดับกำลังส่ง l อย่างน้อย 1 สถานีฐาน

$$\sum_{i=1}^B \sum_{l=1}^L u_{il}^g \geq 1 \quad \forall g \in B \quad (4.8)$$

8) ผู้ใช้งานที่ตำแหน่ง g จะเลือกรับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโทเซลล์ที่ถูกเลือกติดตั้งแล้วเท่านั้น

$$u_{il}^g \leq a_{il} \quad \forall g \in U, i \in B, l \in L \quad (4.9)$$

9) ค่าความแรงสัญญาณจากผู้ใช้งาน g ที่รับสัญญาณจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ i ที่มีระดับกำลังส่ง l จะต้องมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

$$u_{il}^g * (Pt_{il} + Gt + Gr - pls_{gi}) - Pthu \geq 0 \quad \forall g \in U, i \in B, l \in L \quad (4.10)$$

10) จำนวนผู้ใช้งานที่สามารถเข้าใช้งานสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ จะต้องมีย่านน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนผู้ใช้งานมากที่สุดที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์สามารถรองรับได้ (32 ผู้ใช้งาน)

$$\sum_{g=1}^U u_{il}^g \leq 32 \quad \forall i \in B, l \in L \quad (4.11)$$

สำหรับการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลจากการค้นหาคำตอบที่ได้จากวิธี MSLS-SA กับการค้นหาคำตอบที่ได้จากวิธีการ โปรแกรมเชิงเส้น ที่ได้มีการปรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในลักษณะ UB-LP ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองกับพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 และพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ซึ่งได้ทำการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ค่อยๆเพิ่มจำนวนพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ จำนวนจุดที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณ และจำนวนผู้ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 - 4.19 โดยจะได้อภิปรายและวิเคราะห์ถึงผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.3

4.2.2 การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จากเทคนิคที่นำเสนอกับวิธีการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิค MSLS-SA ที่ได้นำเสนอกับการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยวิธีการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน ซึ่งเป็นแนวคิดจากงานวิจัยของ Ramamurthy et al., 2015 ที่ใช้วิธีดังกล่าวเพื่อเลือกวางสถานีฐานภายในบริเวณพื้นที่อาคาร และใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นสำหรับนำไปใช้เพื่อการเปรียบเทียบผลและแก้ปัญหาในงานวิจัย

ในการประยุกต์ใช้วิธีการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีนเพื่อกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์นั้น ผู้วิจัยกำหนดให้จำนวนและตำแหน่งของผู้ใช้งานภายในอาคารเป็นวัตถุที่จะถูกตัดแบ่ง (partition) ออกเป็น k กลุ่ม โดยจุดศูนย์กลาง (centroid) ของแต่ละกลุ่มที่วิธีการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีนหาได้นั้นจะเป็นตำแหน่งที่สถานีฐานเฟมโตเซลล์ถูกเลือกติดตั้ง ซึ่งจำนวนกลุ่มหรือค่า k นั้นคือจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่จำเป็นต้องติดตั้งภายในอาคารเพื่อให้ผ่านสมการเงื่อนไขที่ (3.2) - (3.10) โดยค่า k จะมีค่าเริ่มต้นที่ 1 และจะเพิ่มขึ้นทีละ 1 จนกว่าจะถึงจำนวนที่สามารถทำให้ผ่านทุกสมการเงื่อนไข และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของ

คำตอบที่ได้จากเทคนิค MSLS-SA ที่ได้นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน ผู้วิจัยจะใช้ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ได้จากวิธีการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีนเป็นตำแหน่งติดตั้งเริ่มต้นเพื่อนำไปปรับระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งให้เหมาะสมด้วยวิธีการอบอ่อนจำลอง เช่นเดียวกันกับการทำงานเฟสที่ 2 ของเทคนิคที่นำเสนอ โดยทุกสถานีฐานที่มีการติดตั้งจะมีระดับกำลังส่งเริ่มต้นเท่ากับ 20 dBm และเพื่อสะดวกในการอธิบายต่อไป ผู้วิจัยจะเรียกแนวทางการหาคำตอบโดยใช้วิธีการแบ่งกลุ่มข้อมูลแบบเคมีนในการทำงานเฟสที่ 1 และวิธีการอบอ่อนจำลองในการทำงานเฟสที่ 2 นี้ว่า k means-Simulated Annealing (KM-SA)

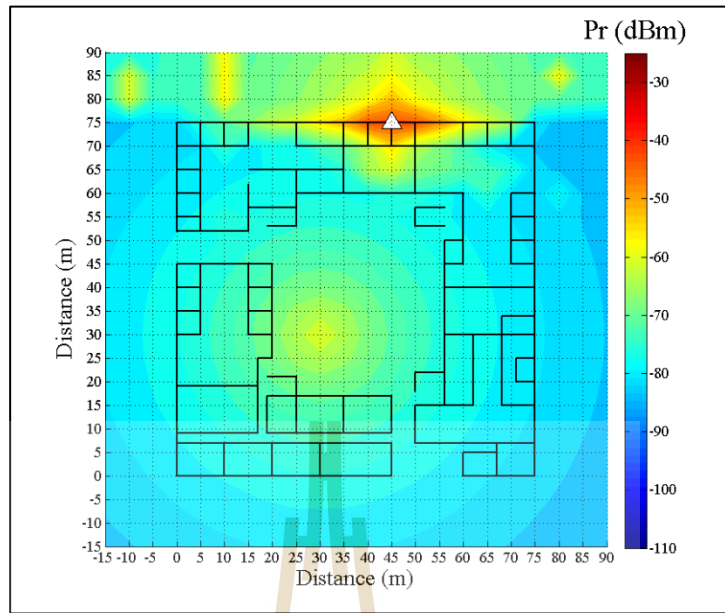
เช่นเดียวกันกับการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลจากการค้นหาคำตอบที่ได้จากวิธี MSLS-SA กับการค้นหาคำตอบที่ได้จากวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (UB-LP) ผู้วิจัยได้ทำการทดลองกับพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 และพื้นที่อาคารทดลองที่ 2 ซึ่งได้ทำการกำหนดลักษณะของปัญหาที่ค่อยๆ เพิ่มจำนวนพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ จำนวนจุดที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณ และจำนวนผู้ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 - 4.19 โดยจะได้อภิปรายและวิเคราะห์ถึงผลการทดลองในหัวข้อต่อไป

4.2.3 ผลการทดลอง

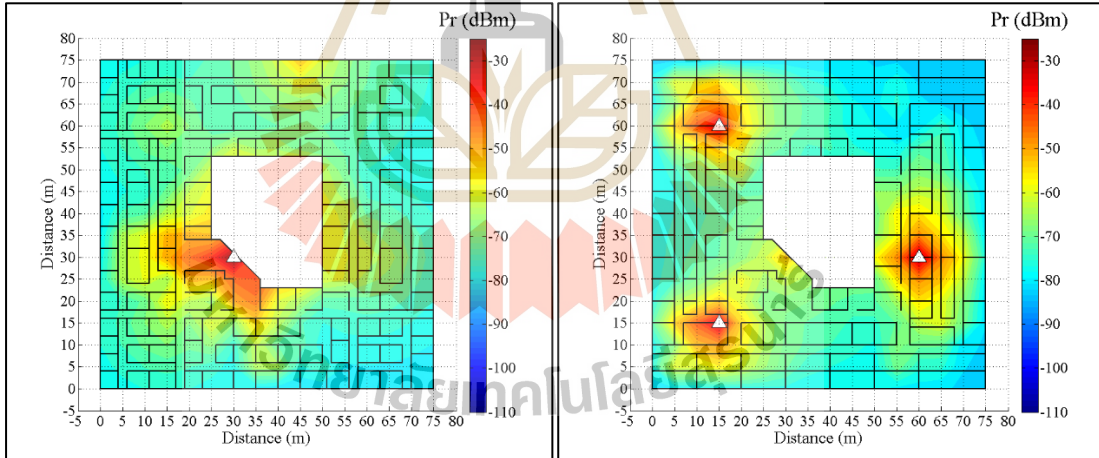
ในการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากการค้นหาคำตอบของเทคนิค MSLS-SA, UB-LP และ KM-SA โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ทำให้ได้ค่าที่น้อยที่สุดของผลรวมความแรงสัญญาณรั่วไหลที่จุดทดสอบสัญญาณได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งในอาคาร นอกจากนั้นยังได้เปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่จำเป็นต้องติดตั้ง และผลรวมของระดับกำลังส่งในแต่ละกรณีทดลอง โดยการเปรียบเทียบผลการค้นหาคำตอบของทั้งสามเทคนิคแสดงดังตารางที่ 4.9 และตัวอย่างผลการค้นหาคำตอบจากทั้ง 3 วิธีในการทดลองกรณีที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.22 - 4.24

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลการค้นหาคำตอบของทั้งสามเทคนิค

กรณีสำหรับการทดลอง		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5
ระยะห่างของกริด (เมตรxเมตร)		15x15	15x15	15x15	5x5	5x5
ขนาดพื้นที่อาคารทดลอง (เมตรxเมตร)		75x75 2 ชั้น	75x75 3 ชั้น	75x75 3 ชั้น	70x30 5 ชั้น	75x75 3 ชั้น
จำนวนผู้ใช้งาน		100	150	300	300	300
จำนวนจุดที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ ได้		69	102	102	412	726
จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณ		69	102	102	412	726
จำนวนจุดทดสอบความแรงสัญญาณรั่วไหล		28	28	28	28	28
เวลาที่ใช้ (นาท:วินาที)	UB-LP	34:51	541:41	>100 ชม.	>100 ชม.	>100 ชม.
	KM-SA	11:32	4:37	15:20	22:33	19:50
	MSLS-SA	03:04	12:39	20:52	31:55	19:58
จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ ติดตั้ง	UB-LP	4	5	10	10	10
	KM-SA	4	5	10	12	10
	MSLS-SA	4	5	10	10	10
ผลรวมระดับกำลังส่ง (mW)	UB-LP	47.06	89.33	-	-	-
	KM-SA	63.61	129.78	150.33	32.74	104.33
	MSLS-SA	58.66	98.81	101.97	24.55	62.92
ผลรวมความแรงสัญญาณรั่วไหล (nW)	UB-LP	1.78	1.87	-	-	-
	KM-SA	1.61	1.40	4.39	0.065	3.96
	MSLS-SA	1.52	1.06	3.54	0.021	1.56



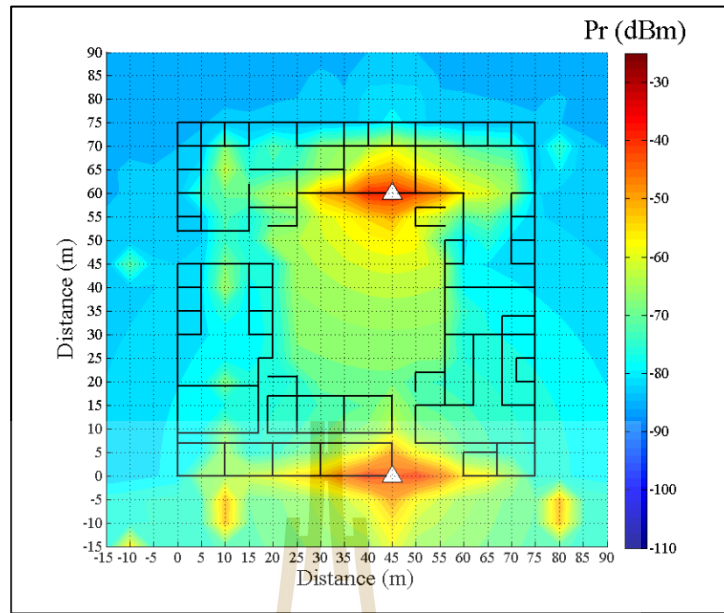
ก) ชั้นที่ 1



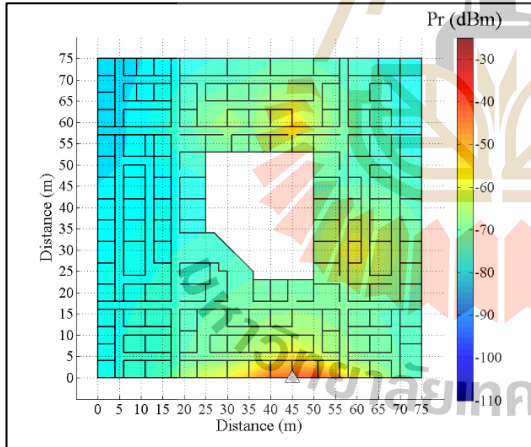
จ) ชั้นที่ 2

ค) ชั้นที่ 3

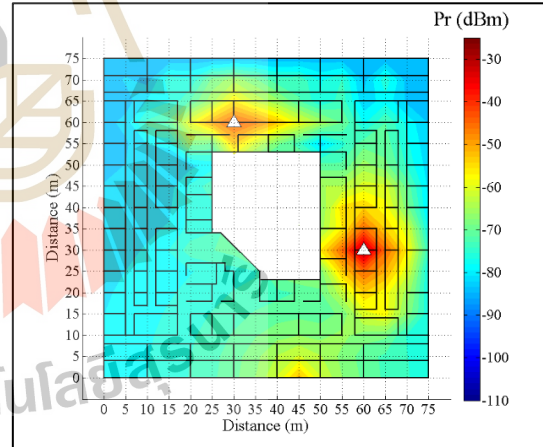
รูปที่ 4.22 ผลการค้นหาคำตอบด้วยวิธี UB-LP ในกรณีนี้ 2



ก) ชั้นที่ 1

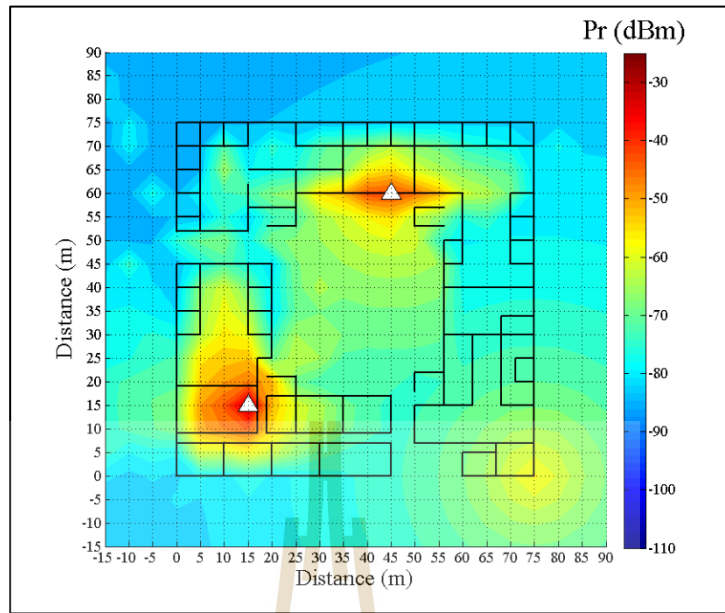


ข) ชั้นที่ 2

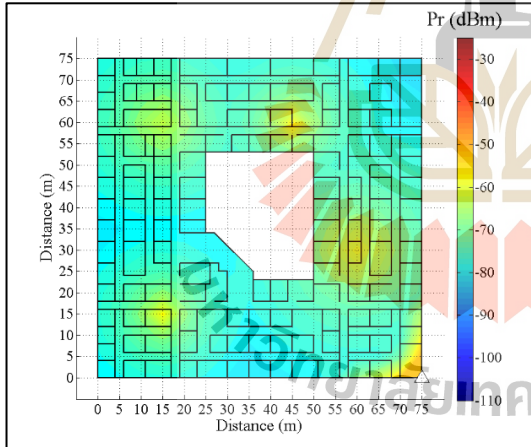


ค) ชั้นที่ 3

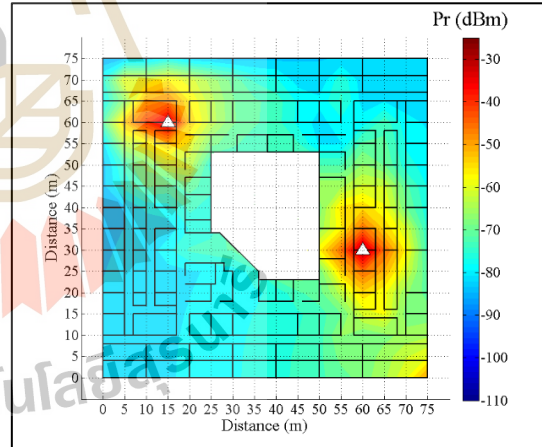
รูปที่ 4.23 ผลการค้นหาคำตอบด้วยวิธี KM-SA ในกรณีที่ 2



ก) ชั้นที่ 1



ข) ชั้นที่ 2



ค) ชั้นที่ 3

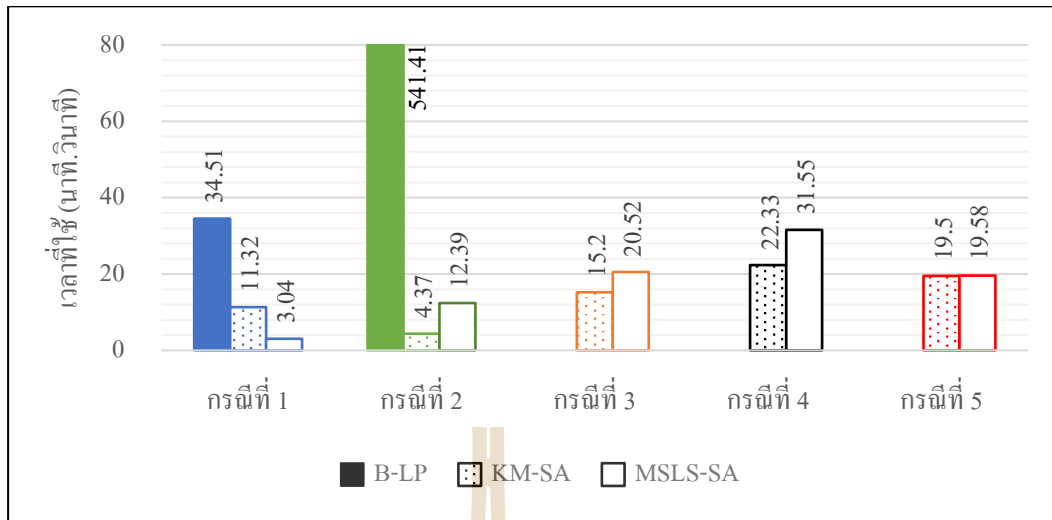
รูปที่ 4.24 ผลการค้นหาคำตอบด้วยวิธี MSLS-SA ในกรณีที่ 2

จากรูปที่ 4.22 – 4.24 จะเห็นได้ว่า ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานที่ได้จากวิธี UB-LP นั้น มี 1 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 1 1 สถานีฐานถูกติดตั้งอยู่ที่ชั้นที่ 2 และ 3 สถานีฐานถูกติดตั้งอยู่ที่ชั้นที่ 3 ในขณะที่ตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานที่ได้จากวิธี KM-SA และ MSLS-SA นั้น มีตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยมี 2 สถานีฐานถูกติดตั้งที่ชั้นที่ 1 1 สถานีฐานถูกติดตั้งอยู่ที่ชั้นที่ 2 และ 2 สถานีฐานถูกติดตั้งอยู่ที่ชั้นที่ 3 ซึ่งผลการกำหนดตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของทั้ง 3 วิธี แสดงดังตารางที่ 4.10

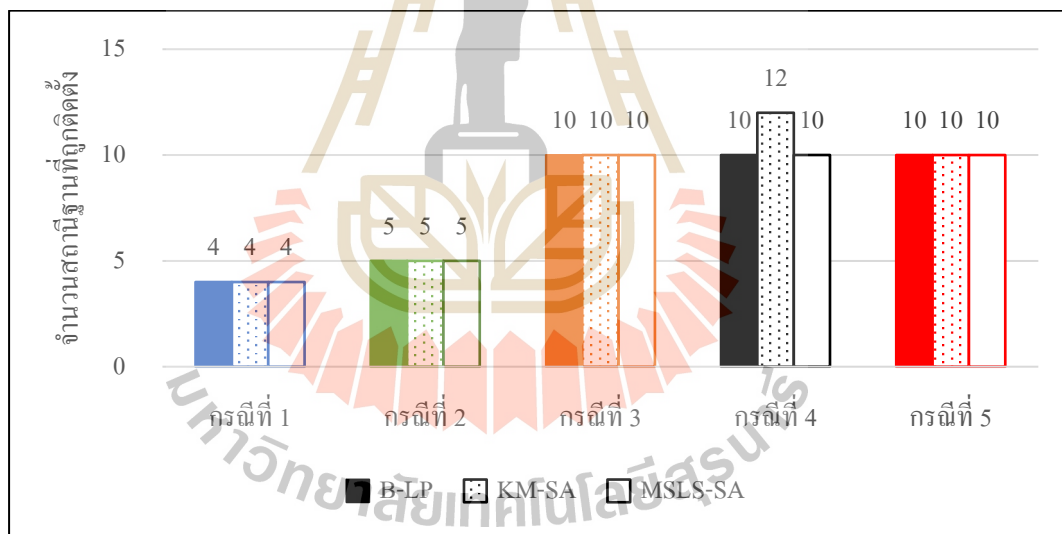
ตารางที่ 4.11 ผลการกำหนดตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ของทั้ง 3 วิธี ในกรณีที่ 2

UB-LP	ตำแหน่งสถานีฐาน	C ₂₄ , C ₅₁ , C ₇₇ , C ₈₀ , C ₉₃
	ระดับกำลังส่ง (dBm)	15, 14, 10, 10, 11
KM-SA	ตำแหน่งสถานีฐาน	C ₉ , C ₂₃ , C ₃₇ , C ₈₀ , C ₉₂
	ระดับกำลังส่ง (dBm)	15.40, 7.26, 18.39, 10.93, 9.23
MSLS-SA	ตำแหน่งสถานีฐาน	C ₈ , C ₂₃ , C ₆₄ , C ₈₀ , C ₉₃
	ระดับกำลังส่ง (dBm)	8.48, 9.30, 17.27, 10.68, 12.61

จากตารางที่ 4.9 สำหรับกรณีที่ 1 - 2 ที่มีขนาดของปัญหาไม่ใหญ่มาก จะเห็นได้ว่าการค้นหาคำตอบที่ได้จากวิธีการ โปรแกรมเชิงเส้นด้วยเทคนิค UB-LP สามารถค้นหาคำตอบได้ โดยในกรณีที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบ 34 นาที 51 วินาที และในกรณีที่ 2 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบ 541 นาที 41 วินาที ในขณะที่กรณีที่ 3 – 5 นั้นใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบที่นานมากเกินกว่า 100 ชั่วโมงก็ยังไม่สามารถหาคำตอบได้ โดยจะเห็นได้ว่าเทคนิค KM-SA และ MSLS-SA ทั้งสองเทคนิคนั้นใช้เวลาในการค้นหาคำตอบใกล้เคียงกัน และสามารถหาคำตอบได้ภายในเวลาน้อยกว่าเทคนิค UB-LP มากในการทดลองทั้ง 5 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าเทคนิค KM-SA ใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบน้อยกว่าเทคนิค MSLS-SA อยู่เล็กน้อยเนื่องจากการทำงานในเฟสที่ 1 ของเทคนิค MSLS-SA นั้นต้องหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่เพียงพอต่อการติดตั้งในอาคาร รวมถึงกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งเริ่มต้นของแต่ละสถานีฐาน ในขณะที่การทำงานในเฟสที่ 1 ของเทคนิค KM-SA นั้นไม่ได้มีการหาระดับกำลังส่งเริ่มต้น



รูปที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบในพื้นที่อาคารทดลองกรณีที่ 1 - 5

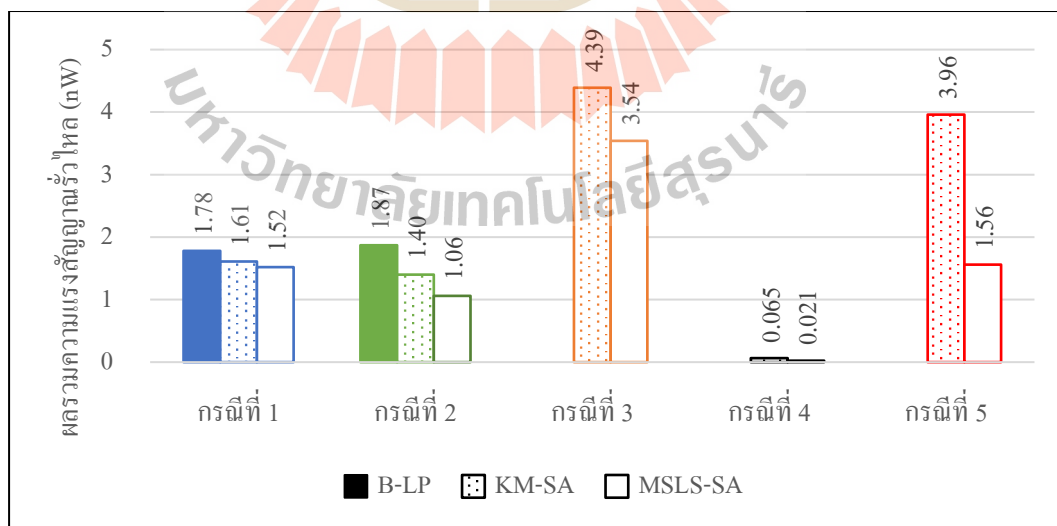


รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบจำนวนสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่ถูกติดตั้งในพื้นที่อาคารทดลองกรณีที่ 1 - 5

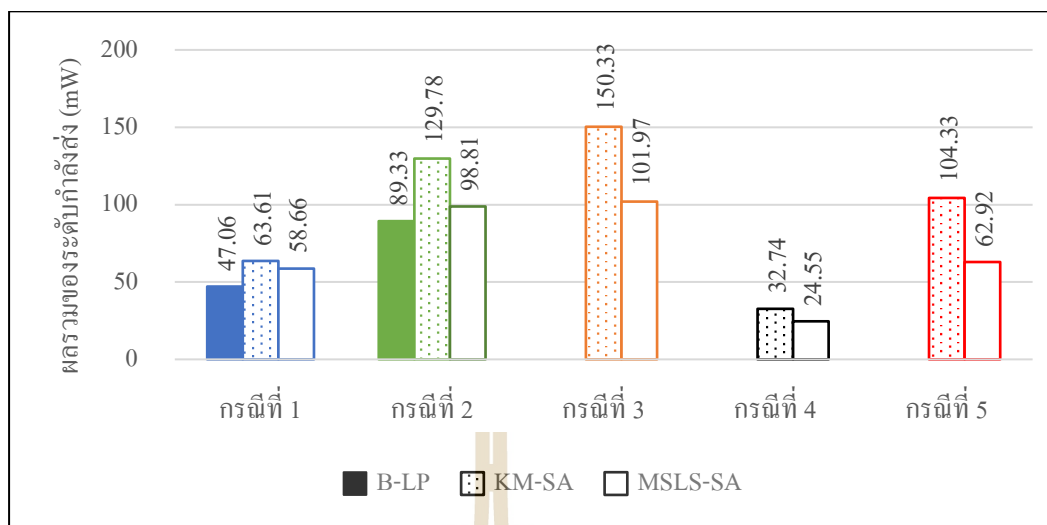
ในส่วนของจำนวนสถานีฐานเฟม โดเซลล์ที่ถูกติดตั้งภายในอาคาร จะเห็นได้ว่าคำตอบที่ได้จากทั้งสามเทคนิคนั้นมีค่าเท่ากันคือ 4 สถานีฐานในกรณีที่ 1 5 สถานีฐานในกรณีที่ 2 10 สถานีฐานในกรณีที่ 3 และกรณีที่ 5 ยกเว้นในกรณีที่ 4 ซึ่งเป็นอาคารขนาด 5 ชั้น โดยคำตอบที่ได้จากเทคนิค KM-SA นั้นคือ 12 สถานีฐาน ในขณะที่คำตอบของเทคนิค UB-LP และ MSLS-SA

คือ 10 สถานีฐาน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 สาเหตุที่เทคนิค KM-SA นั้นมีการติดตั้งจำนวนสถานีฐานเฟรมโพลีเซลล์มากกว่าเป็นเพราะว่าการทำงานในเฟสที่ 1 ของเทคนิคนี้นั้นไม่ได้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีฐานเฟรมโพลีเซลล์ที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต้องติดตั้งภายในอาคาร แต่จะเพิ่มจำนวนสถานีฐานไปจนกว่าจะผ่านทุกสมการเงื่อนไข

สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการทำให้ได้ค่าที่น้อยที่สุดของผลรวมความแรงสัญญาณรบกวนที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟรมโพลีเซลล์ที่ถูกติดตั้งในอาคารนั้น จากรูปที่ 4.27 จะเห็นได้คำตอบที่ได้จากเทคนิค MSLS-SA ที่นำเสนอขึ้นให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากการปรับระดับกำลังส่งให้เหมาะสมของเทคนิค MSLS-SA นั้น สามารถปรับได้ด้วยค่าแบบต่อเนื่องตั้งแต่ 0 dBm – 20 dBm ในขณะที่เปรียบเทียบกับเทคนิค UB-LP การปรับระดับกำลังส่งของเทคนิค UB-LP นั้นเป็นการปรับค่าแบบไม่ต่อเนื่องคือ 1 dBm, 2 dBm, ..., 19dBm, 20dBm จึงมีความละเอียดน้อยกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำตอบที่ได้จากเทคนิค KM-SA แล้ว ค่าคำตอบที่ได้จากเทคนิค MSLS-SA ก็ยังสามารถให้คำตอบที่ดีกว่าได้ เนื่องจากการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งเริ่มต้นในการทำงานเฟสที่ 1 และนอกจากการทำให้ได้ค่าที่น้อยที่สุดของผลรวมความแรงสัญญาณรบกวนที่จุดทดสอบสัญญาณที่ได้รับจากสถานีฐานเฟรมโพลีเซลล์ที่ถูกติดตั้งในอาคารที่เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้แล้ว เทคนิค MSLS-SA ที่นำเสนอยังสามารถให้คำตอบที่มีค่าผลรวมของระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟรมโพลีเซลล์ที่น้อยที่สุดจากทั้งสามเทคนิค ซึ่งทำให้สามารถประหยัดพลังงานมากที่สุดด้วยเช่นกันดังผลเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบค่าผลรวมความแรงสัญญาณรบกวนรบกวนในพื้นที่อาคารทดลองกรณี 1 – 5



รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบค่าผลรวมของระดับกำลังส่งในพื้นที่อาคารทดลองกรณีที่ 1 – 5

4.2.4 การเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากเทคนิคที่นำเสนอกับการติดตั้งจุดเชื่อมต่อไร้สายสำหรับเครือข่ายไวไฟภายในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1

จากการสำรวจพื้นที่จริง ณ อาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 ของงานวิจัยนี้ พบว่ามีการติดตั้งจุดเชื่อมต่อแบบไร้สายสำหรับเครือข่ายไวไฟทั้งสิ้น 32 จุด โดยในชั้นที่ 1 มีจำนวนจุดเชื่อมต่อแบบไร้สาย 9 จุดเชื่อมต่อ ในชั้นที่ 2 มีจำนวน 10 จุดเชื่อมต่อ และในชั้นที่ 3 มีจำนวน 13 จุดเชื่อมต่อ โดยจุดเชื่อมต่อไร้สายสำหรับเครือข่ายไวไฟที่ใช้ในอาคารวิชาการ 1 นั้นทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz มีระดับกำลังส่งสูงสุดเท่ากับ 23 dBm และแต่ละจุดเชื่อมต่อสามารถรองรับผู้ใช้งานได้ 400 ผู้ใช้งาน

จากการสอบถามถึงการออกแบบการติดตั้งจุดเชื่อมต่อแบบไร้สายสำหรับเครือข่ายไวไฟภายในอาคารวิชาการ 1 จากเจ้าหน้าที่ผู้ที่รับผิดชอบ พบว่าออกแบบการติดตั้งจุดเชื่อมต่อไร้สายภายในอาคารวิชาการ 1 นั้นอาจไม่ใช่การติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากผู้ที่รับผิดชอบใช้ความชำนาญในการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โดยหลังจากทำการติดตั้งแล้ว หากมีการร้องขอจากผู้ใช้งาน เนื่องจากไม่สามารถเข้าใช้งานได้ หรือคุณภาพสัญญาณที่ได้รับไม่เป็นที่พอใจ เจ้าหน้าที่ผู้ที่รับผิดชอบจะทำการติดตั้งจุดเชื่อมต่อเพิ่มขึ้นในบริเวณที่ผู้ใช้งานดังกล่าวไม่ได้รับสัญญาณ หรือในพื้นที่อับสัญญาณ จากที่กล่าวมาจึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการติดตั้งจำนวนจุดเชื่อมต่อไร้สายสำหรับเครือข่ายไวไฟมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น โดยมีการติดตั้งจำนวนจุดเชื่อมต่อไร้สายมากถึง 32 จุดเชื่อมต่อ โดยที่แต่ละจุดเชื่อมต่อนั้นสามารถรองรับผู้ใช้งานได้สูงสุดถึง 400 ผู้ใช้ ซึ่งเท่ากับว่าภายในอาคารวิชาการ 1 สามารถมีผู้ใช้งานได้ถึง 12,800 ผู้ใช้ นอกจากนี้ทุกจุดเชื่อมต่อไร้สายภายใน

อาคารนั้น ถูกกำหนดระดับกำลังส่งไว้ที่ระดับกำลังส่งสูงสุด (Power Level “1”: 23 dBm) ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.29 จึงอาจทำให้สิ้นเปลืองพลังงานเกินความจำเป็น ดังนั้นหากในอนาคตมีการประยุกต์ใช้เทคนิค MSLS-SA ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ จะสามารถช่วยลดจำนวนจุดเชื่อมต่อไร้สายที่จำเป็นต้องติดตั้งภายในอาคารได้ รวมถึงสามารถปรับระดับกำลังส่งของแต่ละจุดเชื่อมต่อให้เหมาะสม

AP Name	Radio Slot#	Base Radio MAC	Operational Status	Power Level	Antenna
AP-C1-FL1-Meeting-2-(#0057)	1	c4:b9:cd:f5:00:20	UP	1 *	Internal
AP-C1-FL1-Meeting-4	1	34:bd:c8:da:fa:30	UP	1 *	Internal
AP-C1-FL1-FDA-(#0046)	1	00:38:df:2a:c9:20	UP	1 *	Internal
AP-C1-FL1-Meeting-1-(#0094)	1	a0:f8:49:ed:08:00	UP	1 *	Internal
AP-C1-FL1-Social-Office-(#0337)	1	00:f8:2c:26:b6:60	UP	1 *	Internal
AP-C1-FL1-Engineer-Research	1	34:bd:c8:db:73:70	UP	1 *	Internal
AP-C1-FL1-Nurse	1	34:bd:c8:db:78:a0	UP	1 *	Internal
AP-C1-FL1-Dentist	1	6c:99:89:a6:ef:b0	UP	1 *	External
AP-C1-FL1-Engineer-Office	1	34:bd:c8:da:e6:60	UP	1 *	Internal

รูปที่ 4.29 ตัวอย่างระดับกำลังส่งของจุดเชื่อมต่อไร้สายในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1

โดยเมื่อเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากเทคนิค MSLS-SA ที่เราได้นำเสนอ พบว่าในขณะที่พื้นที่จริงนั้นมีการติดตั้งจุดเชื่อมต่อไร้สายสำหรับเครือข่ายไวไฟอยู่จำนวน 32 จุดเชื่อมต่อ แต่เทคนิคที่เรานำเสนอนั้นใช้สถานีฐาน femto เซลล์เพียง 5 สถานีฐาน ซึ่งมีจำนวนน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยสาเหตุหนึ่งที่เป็นสาเหตุสำคัญคือ การกำหนดจำนวนผู้ใช้งานภายในอาคารสำหรับการทดลอง ซึ่งในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 นั้น ผู้วิจัยได้กำหนดจำนวนผู้ใช้งานภายในอาคารเพียง 150 ผู้ใช้ จึงส่งผลต่อการค้นหาคำตอบของจำนวนสถานีฐาน femto เซลล์ที่น้อยที่สุด หากมีการกำหนดจำนวนผู้ใช้งานภายในอาคารให้มีจำนวนมากขึ้น จำนวนสถานีฐาน femto เซลล์ที่จำเป็นต้องติดตั้งก็จะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นดังผลการทดลองภายในอาคารทดลองที่ 2 ที่มีการกำหนดจำนวนผู้ใช้งานไว้ที่ 300 ผู้ใช้ คือมีการติดตั้งสถานีฐาน femto เซลล์ที่ 10 สถานีฐาน

นอกจากนั้น หากทำการออกแบบการติดตั้งสถานีฐาน femto เซลล์ภายในอาคารหลายชั้นด้วยเทคนิคที่เรานำเสนอแล้ว หลังจากที่ได้ทำการติดตั้ง สามารถตรวจสอบคุณภาพสัญญาณภายในบริเวณพื้นที่ให้บริการ เพื่อหาบริเวณจุดอ่อนสัญญาณและทำการเพิ่มสถานีฐานในบริเวณดังกล่าวได้ เนื่องจากเทคนิคที่เรานำเสนอยังมีข้อจำกัดในด้านการจำลองค่าความแรง

สัญญาณที่ได้รับจากแบบจำลองการสูญเสียตามระยะทางของสัญญาณ ที่อาจไม่สามารถจำลองสัญญาณได้เหมือนในสภาพแวดล้อมจริง

4.3 สรุปท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดลองของเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นที่ได้พัฒนาขึ้น และยังได้แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอกับเทคนิคอื่นในเรื่องของระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ จำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่จำเป็นต้องติดตั้ง ค่าผลรวมของระดับกำลังส่ง และค่าผลรวมของความแรงสัญญาณรบกวนที่จุดทดสอบความแรงสัญญาณรบกวนที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งภายในอาคาร ซึ่งผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่า เทคนิคที่นำเสนอสามารถให้คำตอบที่ดีที่สุดจากทั้งสามเทคนิคภายในเวลาอันสั้น นั่นคือสามารถหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต้องติดตั้งภายในอาคารเพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้งาน สามารถให้ความแรงสัญญาณที่รับประกันพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณภายในอาคาร สามารถรับประกันอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้ในอาคารให้มีคุณภาพดีตามเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ อีกทั้งยังสามารถประหยัดพลังงานได้มากที่สุดเนื่องจากค่าผลรวมของระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งนั้นมีค่าน้อยที่สุด และผลรวมของความแรงสัญญาณรบกวนที่จุดทดสอบความแรงสัญญาณรบกวนที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ถูกติดตั้งภายในอาคารนั้นมีค่าน้อยที่สุด

บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันเทคโนโลยีคลาวด์ที่ได้รับความนิยมได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการรับ-ส่งข้อมูล ให้ตอบสนองต่อความต้องการในการใช้งานที่หลากหลายของผู้ใช้งาน เทคโนโลยีเฟมโตเซลล์จึงเข้ามามีบทบาทสำหรับการเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบสื่อสาร โดยเฟมโตเซลล์นั้นเป็นสถานีฐานโทรศัพท์มือถือขนาดเล็ก ที่มีกำลังส่งสัญญาณที่ต่ำ ใช้สำหรับติดตั้งภายในอาคารเพื่อช่วยลดปริมาณทราฟฟิกให้สถานีฐานมาโครเซลล์ และเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมการให้บริการในบริเวณเล็กๆ หรือจุดอับสัญญาณ การติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในอาคารจะช่วยให้ผู้ใช้งานได้รับอัตราเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลที่สูงขึ้น และช่วยเพิ่มช่องสัญญาณให้เพียงพอสำหรับรองรับจำนวนผู้ใช้งานภายในอาคาร ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญของการติดตั้งสถานีฐานภายในอาคาร รวมถึงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเมื่อมีการกำหนดตำแหน่งติดตั้งและกำลังส่งของเฟมโตเซลล์ที่ไม่เหมาะสม เช่น พื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณภายในอาคารไม่ทั่วถึง หรือสัญญาณรั่วไหลจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ออกไปรบกวนผู้ใช้งานภายนอกอาคาร เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยที่นำเสนอนี้ จึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่พิจารณาถึงเรื่องความแรงสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ อัตราเร็วการรับส่งข้อมูลในการให้บริการของผู้ใช้งาน ข้อจำกัดด้านความจุของสถานีฐานในการรองรับผู้ใช้งาน และสัญญาณรั่วไหลจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ออกไปรบกวนผู้ให้บริการภายนอกอาคาร

โดยเทคนิคที่นำเสนอมีการแบ่งการทำงานเป็น 2 เฟส การทำงานในเฟสที่ 1 คือ การหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์น้อยที่สุดที่เพียงพอต่อการติดตั้งภายในอาคาร รวมถึงระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งเริ่มต้นของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยวิธีการการโปรแกรมเชิงเส้น ถัดไปในเฟสที่ 2 เป็นการหาระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ด้วยวิธีการอบอ่อนจำลอง ซึ่งการดำเนินการทั้ง 2 เฟส มีวัตถุประสงค์ต่างกัน แต่มีเงื่อนไขเดียวกันซึ่งประกอบด้วย เงื่อนไขด้านความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณภายในอาคารที่ได้รับจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์จะต้องมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด เงื่อนไขด้านอัตราเร็วการรับ-ส่งข้อมูลของผู้ใช้งานในพื้นที่ให้บริการจะต้องมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด และเงื่อนไขข้อจำกัดด้านความจุของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ในการรองรับจำนวนผู้ใช้งาน สุดท้ายคำตอบที่ได้หลังจากการดำเนินการทั้ง

2 เฟส จะเป็นระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เหมาะสม มีจำนวนสถานีฐานที่เพียงพอกับลักษณะรูปแบบพื้นที่ที่ให้บริการและอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้ทำการทดลองในพื้นที่ของอาคารรูปแบบต่างๆ และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวางสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารหลายชั้นด้วยเทคนิคที่นำเสนอ กับเทคนิค UB-LP และเทคนิค KM-SA ซึ่งข้อดีของเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่นำเสนอนี้คือ สามารถนำไปออกแบบวางแผนเครือข่ายในอาคารหลายชั้นที่มีโครงสร้างทางกายภาพในแต่ละชั้นที่มีลักษณะแตกต่างกันได้ สามารถลดสัญญาณรบกวนที่ออกไปรบกวนผู้ใช้งานภายนอกอาคารได้ สามารถหาจำนวนสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่น้อยที่สุดที่จำเป็นต้องติดตั้งภายในอาคารเพื่อรองรับจำนวนผู้ใช้งาน สามารถให้ความแรงสัญญาณที่รับประกันพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณภายในอาคาร และอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลของผู้ใช้ในอาคารให้มีคุณภาพดีตามเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น เทคนิคที่นำเสนอยังสามารถลดผลรวมค่าความแรงสัญญาณรบกวนรบกวนได้ดีกว่าเทคนิค UB-LP มากที่สุดถึง 40% โดยที่ใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยกว่าเทคนิค UB-LP ประมาณ 90 % และเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิค KM-SA แม้ว่าจะระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบจะใกล้เคียงกัน แต่เทคนิคที่นำเสนอสามารถลดจำนวนสถานีฐานที่จำเป็นต้องติดตั้งได้มากกว่าสำหรับการทดลองในอาคารขนาด 5 ชั้น และสามารถลดผลรวมค่าความแรงสัญญาณรบกวนรบกวนได้ดีกว่ามากที่สุดถึง 60 %

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การออกแบบเทคนิคการติดตั้งสถานีฐานสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลทีอีภายในอาคารหลายชั้นนั้นจะต้องทราบถึงข้อจำกัด และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแรงสัญญาณภายในอาคาร ตลอดจนต้องมีความรู้พื้นฐานในด้านการวิจัยดำเนินงาน วิธีการโปรแกรมเชิงเส้น และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของปัญหา เช่น จำนวนจุดทดสอบคุณภาพสัญญาณ จำนวนผู้ใช้ภายในอาคาร ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ รวมถึงตัวแปรอินพุต และพารามิเตอร์อื่นๆ ซึ่งปัจจัยที่กล่าวมานั้นถือเป็นข้อจำกัดในงานวิจัยนี้ ดังนั้นหากต้องการทดลองในเครือข่ายที่มีขนาดของปัญหาใหญ่ อาจต้องพัฒนาอัลกอริทึมอื่นๆ ในการหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อให้สามารถหาคำตอบได้ภายในระยะเวลาที่จำกัด นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ ค่าความแรงสัญญาณที่นำมาใช้ในการคำนวณนั้นเป็นค่าที่มาจากการจำลอง ไม่ใช่ค่าที่ได้จากการวัดจริง ดังนั้นหากมีการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์โดยกำหนดตำแหน่งติดตั้งและระดับกำลังส่งด้วยวิธีที่นำเสนอแล้ว ผู้ออกแบบสามารถใช้ค่าความแรงสัญญาณ ณ จุดทดสอบสัญญาณจากการวัดจริงได้ หรือทำการตรวจเช็คคุณภาพสัญญาณภายในอาคาร และการรับฟังความคิดเห็นจากผู้ใช้งานหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในอาคารแล้ว เพื่อนำมาปรับเปลี่ยนการติดตั้ง

ให้เหมาะสมอีกครั้ง อีกทั้งในงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดในด้านการกำหนดตำแหน่งของผู้ใช้งานที่อยู่กับที่ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนผู้ใช้งานตลอดการทดลอง ทำให้ไม่มีการปรับเปลี่ยนระดับกำลังส่งของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ตามจำนวนและตำแหน่งของผู้ใช้งานแบบเรียลไทม์ รวมถึงสายอากาศของสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่ใช้ในการทดลองของวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยกำหนดให้เป็นสายอากาศแบบรอบทิศทาง ทำให้ในกรณีที่มีการติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่บริเวณขอบอาคาร จะเกิดสัญญาณรั่วไหลมาก โดยสามารถแก้ไขได้หากมีการกำหนดให้สถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่บริเวณขอบอาคารใช้สายอากาศแบบมีทิศทาง

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการกำหนดระดับกำลังส่งและตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานสำหรับเครือข่ายเฟมโตเซลล์สี่จีแอลที่อภายในอาคารหลายชั้นที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการวางแผนออกแบบสำหรับติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ได้ โดยใช้การทำงานร่วมกันระหว่างวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นและวิธีการอบอุ่นจำลอง ซึ่งเป็นการหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นสำหรับแนวทางในการพัฒนาในอนาคต สามารถเลือกใช้วิธีการค้นหาคำตอบชนิดอื่นที่มีประสิทธิภาพมากกว่า อาทิเช่น การค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm:GA) การค้นหาคำตอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) หรือการค้นหาคำตอบด้วยอาณานิคมของมด (Ant Colony Optimization: ACO) เป็นต้น หรือสามารถพิจารณาถึงปัจจัยอื่นที่ส่งผลกับคุณภาพของสัญญาณ เช่น สัญญาณรบกวน สัญญาณแทรกสอดระหว่างสถานีฐาน การจัดสรรช่องสัญญาณความถี่ เป็นต้น โดยผู้ออกแบบสามารถเลือกทำการเปลี่ยนฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการหาค่าที่มากที่สุดหรือน้อยที่สุดของค่าอื่นได้ เช่น หาค่าที่มากที่สุดของผลรวมความแรงสัญญาณที่ผู้ใช้ภายในอาคารได้รับ หรือหาค่าที่น้อยที่สุดของผลรวมระดับกำลังส่งของสถานีฐาน

รายการอ้างอิง

- ประกอบ จิริกิติ (2535). **การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming)**. โครงการส่งเสริมเอกสาร
วิชาการ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- ศุทธิมา ชำนาญเวช (2552). **การวิจัยดำเนินงาน (Operation Research)**. วิทยพัฒน์. กรุงเทพฯ ฯ.
- บุญเจริญ ศิริเนาวกุล (2551) **ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence)** กรุงเทพฯ : ท้อป.
- สมาคมผู้ตรวจสอบและบริหารความปลอดภัยอาคาร (2543). กฎกระทรวง ฉบับที่ 55 (พ.ศ. 2543)
ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522.
- ปาลีรัตน์ วงจำปา (2554). **การออกแบบสายอากาศสวิตช์ลําคลื่นสำหรับเครือข่ายเคลื่อนที่ยุคที่สี่**.
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 10 น.
- V. Chandrasekhar, J. G. Andrews and A. Gatherer. (2008), **Femtocell networks: a survey**, in
IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 9, pp. 59-67.
- Y. Li, H. Celebi, M. Daneshmand, C. Wang and W. Zhao. (2013), **Energy-efficient femtocell
networks: challenges and opportunities**, in IEEE Wireless Communications, vol. 20,
no. 6, pp. 99-105.
- I. Shgluof, M. Ismail and R. Nordin. (2013), **Efficient femtocell deployment under macrocell
coverage in LTE-Advanced system**, International Conference on Computing,
Management and Telecommunications (ComManTel), pp. 60-65.
- F. Cao and Z. Fan. (2010), **The tradeoff between energy efficiency and system performance of
femtocell deployment**, 7th International Symposium on Wireless Communication
Systems, pp. 315-319.
- V. Sathya, A. Ramamurthy and B. R. Tamma. (2015), **Joint placement and power control of
LTE Femto Base Stations in enterprise environments**, International Conference on
Computing, Networking and Communications (ICNC), pp. 1029-1033.
- M. Tahalani, V. Sathya, A. Ramamurthy, U. S. Suhas, M. K. Giluka and B. R. Tamma. (2014),
Optimal placement of Femto base stations in enterprise femtocell networks, IEEE
International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems
(ANTS), pp. 1-6.

- A. Ramamurthy, V. Sathya, V. Venkatesh, R. Ramji and B. R. Tamma. (2015), **Energy-efficient femtocell placement in LTE networks**, IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), pp. 1-6.
- M. Tahalani, V. Sathya, U. S. Suhas, R. Chaganti and B. R. Tamma. (2013), **Optimal Femto placement in enterprise building**, IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), pp. 1-3.
- M. F. Khan and B. Wang. (2014), **Effective placement of femtocell base stations in commercial buildings**, Sixth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), pp. 176-180.
- E. Yaacoub and Z. Dawy. (2014), **LTE BS placement optimization using simulated annealing in the presence of femtocells**, European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference, pp. 1-5.
- K. Han, Y. Choi, D. Kim, M. Na, S. Choi and K. Han. (2009), **Optimization of femtocell network configuration under interference constraints**, 7th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks, pp. 1-7.
- V. Sathya, A. Ramamurthy and B. R. Tamma. (2014), **On placement and dynamic power control of femtocells in LTE HetNets**, IEEE Global Communications Conference, Austin, TX, pp. 4394-4399.
- T. Kanungo, D. M. Mount, N. S. Netanyahu, C. D. Piatko, R. Silverman and A. Y. Wu. (2002), **An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation**, in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, no. 7.
- F. S. Hillier. (2012), **Introduction to operations research**. Tata McGraw-Hill Education.
- Cisco. (2015), **Cisco universal small cell 8738 data sheet**.
- Cisco. (2017), **Cisco Aironet 1850 series access points data sheet**.
- Du, Ke-Lin, and M. N. S. Swamy. (2016), **Search and optimization by metaheuristics: techniques and algorithms inspired by nature**. Birkhäuser.
- S. P. Thiagarajah, A. Ting, D. Chieng, M. Y. Alias and T. S. Wei. (2013), **User data rate enhancement using heterogeneous LTE-802.11n offloading in urban area**, 2013 IEEE Symposium on Wireless Technology & Applications (ISWTA), pp. 11-16.

- C. S. Vardhan, D. V. Ratnam, N. Bhagyasree and A. H. Dattu. (2014), **Analysis of path loss models of 4G femtocells**, 2014 Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), pp. 1-6.
- Mingyan Wang, Xinning Zhu, Zhimin Zeng, Shaohua Wan and Wei Li. (2011), **System performance analysis of OFDMA-based femtocell networks**, IET International Conference on Communication Technology and Application (ICCTA 2011), pp. 405-410.
- N. R. Zulkefly, T. A. Rahman, A. M. Al-Samman, A. M. S. Mataria and C. Y. Leow. (2015), **Indoor path loss model for 4G wireless network at 2.6 GHz**, 2015 1st International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN), pp. 117-120.
- Powertec Telecommunications Pty. (2014), **Mobile Network Guide Improving Mobile Signal**, Australia: Powertec Telecommunications
- 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.
- Costa D., (1993). **On the use of some known methods for T-colorings of graphs**, Annals of Operations Research, vol. 41, pp. 343-358.
- Kirkpatrick S., (1984) **Optimization by simulated annealing: Quantitative studies**, Journal of Statistical Physics, vol. 34, pp. 975-986.



ภาคผนวก ก

ข้อมูลค่ามาตรฐานคุณภาพความแรงสัญญาณสำหรับเทคโนโลยี 4G-LTE
ข้อมูลพื้นฐานของสถานีฐานเฟรมโตเซลล์ และจุดเชื่อมต่อแบบไร้สายสำหรับ
เครือข่ายไวไฟภายในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 ข้อมูลค่ามาตรฐานคุณภาพความแรงสัญญาณสำหรับเทคโนโลยี 4G-LTE

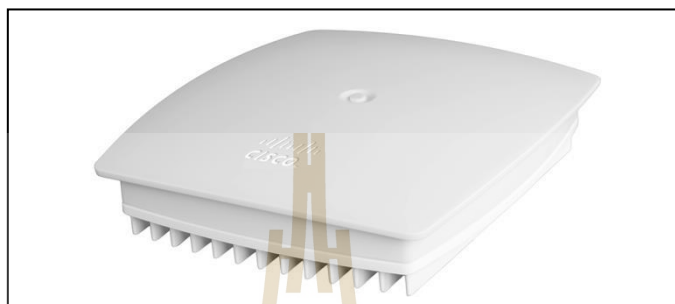
สำหรับการกำหนดคุณภาพความแรงสัญญาณให้กับจุดทดสอบคุณภาพความแรงสัญญาณ และตำแหน่งของผู้ใช้งานในงานวิจัยนี้ สามารถเทียบได้กับตารางที่ ก.2 นี้ อ้างอิงจากบทความของ Powertec Telecommunications Pty., (2014) ซึ่งแสดงข้อมูลค่ามาตรฐานคุณภาพความแรงสัญญาณ สำหรับเทคโนโลยี 4G-LTE สำหรับเครือข่ายโทรศัพท์มือถือในประเทศออสเตรเลีย

ตารางที่ ก.1 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)

ก.2 ข้อมูลพื้นฐานของสถานีฐานเฟมโตเซลล์

สำหรับสถานีฐานเฟมโตเซลล์ (Femtocell Base station) ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นสถานีฐานเฟมโตเซลล์รุ่น Cisco Universal Small Cell 8738 (USC 8738) แสดงดังรูปที่ ก.1 โดยลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญของสถานีฐานแสดงในตารางที่ ก.2



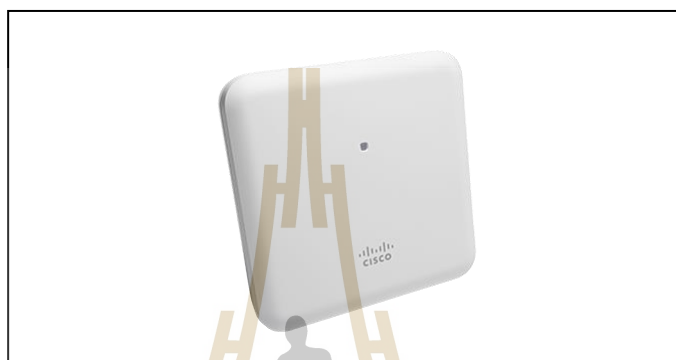
รูปที่ ก.1 สถานีฐานเฟมโตเซลล์รุ่น Cisco Universal Small Cell 8738 (USC 8738)

ตารางที่ ก.2 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญของสถานีฐาน

คุณลักษณะ	ค่า
ประสิทธิภาพ	
กำลังส่งสูงสุด (Maximum Transmission Power)	20 dBm (100mW)
ความถี่	2600 MHz, 1800 MHz, 1700 MHz
ความจุ (Capacity)	32 ผู้ใช้งาน
ความต้องการใช้พลังงาน	
การใช้แรงดันไฟฟ้า	PoE: 802.3at
ลักษณะทั่วไป	
ขนาด	9.4 x 8.1 x 2.1 นิ้ว
น้ำหนัก	1.37 กิโลกรัม
อุณหภูมิ	0°C to 50°C
ความชื้นสัมพัทธ์ (Operating relative humidity)	0% to 90%
ตำแหน่งการติดตั้ง	เพดาน หรือ กำแพง

ก.3 ข้อมูลพื้นฐานของจุดเชื่อมต่อแบบไร้สายสำหรับเครือข่ายไวไฟภายในพื้นที่อาคารทดลองที่ 1 (อาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

จุดเชื่อมต่อไร้สายสำหรับเครือข่ายไวไฟที่ใช้ในการติดตั้งภายในอาคารวิชาการ 1 คือรุ่น Cisco Aironet 1850 series แสดงดังรูปที่ ก.2 โดยลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญของจุดเชื่อมต่อแบบไร้สายแสดงในตารางที่ ก.3



รูปที่ ก.2 จุดเชื่อมต่อแบบไร้สายรุ่น Cisco Aironet 1850 series

ตารางที่ ก.3 ลักษณะเฉพาะและคุณสมบัติทางเทคนิคที่สำคัญของจุดเชื่อมต่อแบบไร้สาย

คุณลักษณะ	ค่า
ประสิทธิภาพ	
กำลังส่งสูงสุด (Maximum Transmission Power)	23 dBm (200mW)
ความถี่	2400 MHz, 5000 MHz
ความจุ (Capacity)	400 ผู้ใช้งาน
ความต้องการใช้พลังงาน	
การใช้แรงดันไฟฟ้า	44 – 57 VDC
ลักษณะทั่วไป	
ขนาด	8.3 x 8.3 x 2 นิ้ว
น้ำหนัก	1.41 กิโลกรัม
อุณหภูมิ	0°C to 50°C
ความชื้นสัมพัทธ์ (Operating relative humidity)	10% to 90%
ตำแหน่งการติดตั้ง	เพดาน หรือ กำแพง

ภาคผนวก ข

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

กชกร พิมพานู, พีระสันต์ ทวีภาวิไล และ ชุตินา พรหมมาก (2016). **Joint Frequency Channel and Transmitted Power Assignment for WiMAX Networks by Using Binary Integer Linear Programming**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 39 (EECON-39) 2-4 พฤศจิกายน 2559 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Peerasan Thaweephawilai, Chitapong Wechtaisong, Monthippa Uthansakul and Chutima Prommak (2017). **Performance Evaluation of Power Level Assignment and Base Station Placement for 4G-LTE Femtocell Networks in Multi-Floor Buildings**, in 11th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, 13 - 14 March 2017 Vietnam

Peerasan Thaweephawilai, Chitapong Wechtaisong, Monthippa Uthansakul and Chutima Prommak (2017). **Power Level Assignment and Base Station Placement Using Simulated Annealing for 4G-LTE Femtocell Networks in Multi-Floor Buildings**, TNI Journal of Engineering and Information Technology, KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology, Volume 13, (2020)

การจัดสรรช่องสัญญาณความถี่และระดับของกำลังส่งสำหรับเครือข่ายไวแมกซ์โดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี

Joint Frequency Channel and Transmitted Power Assignment for WiMAX Networks by Using Binary Integer Linear Programming

กชกร พิมพ์หาญ, พีระสันต์ ทวีภาวิไล และ ชุติมา พรหมมาก

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

M58407462@g.sut.ac.th, M5840755@g.sut.ac.th and cprommak@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีเป้าหมายการวิจัยการจัดสรรความถี่และกำหนดระดับของกำลังส่งให้กับสถานีฐานแต่ละสถานีในเครือข่ายไวแมกซ์โดยใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Integer Linear Programming) ในการแก้ปัญหา เนื่องจากหากสถานีฐานใช้ความถี่เดียวกันและระดับกำลังส่งที่ไม่เหมาะสม จะทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอด (Interference) ซึ่งส่งผลให้สัญญาณมีคุณภาพต่ำ โดยในบทความนี้นักวิจัยได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการกำหนดความถี่และระดับของกำลังส่งที่เหมาะสมที่สุดให้กับแต่ละสถานีฐาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนการใช้งานความถี่ในเครือข่ายให้น้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขการรับประกันคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ โดยพิจารณาคุณภาพดังกล่าวจากอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน (Signal to Interference plus Noise Ratio : SINR) ที่จุดทดสอบสัญญาณ (Signal Test Point : STP) เพื่อให้ผู้ใช้บริการได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพ

คำสำคัญ: เครือข่ายไวแมกซ์, วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม, การจัดสรรความถี่

Abstract

In this paper, we propose a novel technique to jointly assign the frequency channels and the transmitted power levels for the base stations in networks to improve the signal quality in the service areas of the WiMAX networks. The proposed technique is based on the Binary Integer Linear Programming (BILP) optimization model. Particularly, the proposed optimization model aims to minimize the number of frequency channels used in the WiMAX networks and takes into account the quality of signal coverage in the service area by evaluating a Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) at the specified Signal Test Points (STPs).

Keywords: WiMAX networks, Frequency channel assignment, Transmitted power level assignment, Binary Integer Linear programming.

1. บทนำ

WiMAX (Wireless Interoperability for Microwave Access) คือระบบสื่อสารไร้สายที่รองรับการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเคลื่อนที่เร็วในการสื่อสารสูงและพื้นที่ที่สัญญาณครอบคลุมกว้าง โดยมีมาตรฐานที่กำหนดโดย IEEE 802.16

จากการศึกษาวิจัยที่ดำเนินการที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวิธีวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาเกี่ยวกับกรอบแบบเครือข่ายระบบไวแมกซ์โดย งานวิจัย [1] กล่าวถึงการใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีสร้างสมการคณิตศาสตร์เพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานที่เหมาะสมที่สุดโดยมีการรับประกันพื้นที่สัญญาณครอบคลุมและอัตราเร็วในการให้บริการ งานวิจัย [2] กล่าวถึงการผลิตกำลังส่งที่มากที่สุดของผู้ให้บริการในขณะที่มีการรับประกันอัตราเร็วในการให้บริการ

ส่วนวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่นำเสนอคือการใช้งานจำนวนความถี่ให้น้อยที่สุดพร้อมกับกำหนดระดับของกำลังส่งของแต่ละสถานีฐานให้เหมาะสม โดยใช้วิธีการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Integer Linear Programming) [3] ผู้วิจัยได้สร้างสมการคณิตศาสตร์ เพื่อกำหนดความถี่และระดับของกำลังส่งที่เหมาะสมที่สุดให้กับแต่ละสถานีฐานโดยรับประกันอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน (SINR) ที่ทุกจุดทดสอบสัญญาณ

บทความนี้มีผลใช้การนำเสนอตั้งแต่ หัวข้อที่ 2 การจัดสรรความถี่และระดับของกำลังส่งสำหรับสถานีฐานไวแมกซ์ หัวข้อที่ 3 การทดลองและพารามิเตอร์ หัวข้อที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล และหัวข้อที่ 5 สรุปผลการทดลอง

2. การจัดสรรความถี่และกำลังสำหรับสถานีฐานไว้มงคล
 เนื้อหาในหัวข้อนี้เป็นกรอบการออกแบบเครือข่ายไว้มงคล โดยใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Integer Linear Programming) โดยหัวข้อ 2.1 อธิบายนิยามปัญหา หัวข้อ 2.2 อธิบาย สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี

2.1 การนิยามปัญหา

การวางแผนเครือข่ายไว้มงคลที่พิจารณาในบทความนี้ เป็นการจัดสรรความถี่และกำลังส่งให้กับสถานีฐานไว้มงคล เพื่อเพิ่มค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน (Signal to Interference plus Noise Ratio : SINR) ซึ่งใช้สมการทางคณิตศาสตร์แบบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีในการออกแบบ เพื่อคำนวณความถี่และระดับกำลังส่งที่เหมาะสมที่สุดให้กับสถานีฐานไว้มงคล โดยรับ ประกันค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนให้กับผู้ใช้บริการ

บทความนี้ได้รับประกันคุณภาพของสัญญาณ โดยพิจารณาการอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน โดยกำหนดจุดทดสอบสัญญาณ (Signal Test Point : STP) เป็นตำแหน่งที่จะประเมินคุณภาพสัญญาณ เพื่อการรับประกันคุณภาพสัญญาณให้กับผู้ใช้บริการในเครือข่ายไว้มงคล

2.2 โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี

บทความนี้ได้นำเสนอการจัดสรรความถี่และระดับของกำลังส่งสำหรับสถานีฐานไว้มงคล โดยใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี ในการแก้ปัญหา โดยนิยามวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนความถี่จัดสรรให้แก่สถานีฐานไว้มงคลที่สุด ดังแสดงในสมการที่ (1) ส่วนเงื่อนไขนั้นพิจารณาการครอบคลุมของสัญญาณในพื้นที่ให้บริการ ดังแสดงในสมการที่ (2) - (7) ซึ่งเป็นกรประเมินค่า SINR ที่จุดทดสอบ โดยจะต้องมากกว่าค่าขีดแบ่ง (Threshold) ตารางที่ 1 เป็นนิยามของตัวแปรที่ใช้ในสมการคณิตศาสตร์

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \sum_{k=1}^N F_k & (1) \\ \text{Subject to:} & \\ & \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \alpha_{kl} = 1 & , \forall i \in B & (2) \\ & \alpha_{kl} \leq F_k & , \forall i \in B, \forall k \in N & (3) \\ & \sum_{i=1}^B \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^L x_{kl}^{hi} \geq 1 & , \forall h \in S & (4) \\ & x_{kl}^{hi} \leq \alpha_{kl} & , \forall h \in S, \forall i \in B & (5) \\ & & , \forall k \in N, \forall l \in L & \\ & x_{kl}^{hi} (P_t(i, l) + 18 - P_r(h, i, k) - P_{rc}) \geq 0 & , \forall h \in S, \forall i \in B & (6) \\ & & , \forall k \in N, \forall l \in L & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Inf} * (1 - x_{kl}^{hi}) + x_{kl}^{hi} 10^{\frac{(P_t(i, l) + 18 - P_r(h, i, k))}{10}} \\ & \geq \gamma_t N_0 B + \gamma_t \sum_{a=1}^B \sum_{m=1}^L \alpha_{am}^{hi} 10^{\frac{(P_t(a, m) + 18 - P_r(h, a, k))}{10}} & (7) \\ & , \forall h \in S, \forall i \in B, \forall k \in N, \forall l \in L \end{aligned}$$

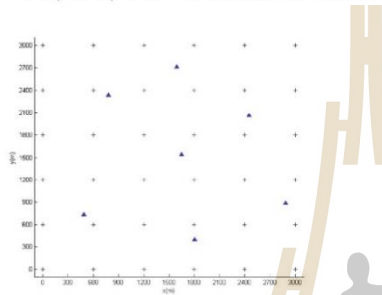
ตารางที่ 1 นิยามของตัวแปรที่ใช้ในสมการคณิตศาสตร์

เขตของตัวแปร	
N	เขตของจำนวนความถี่
B	เขตของจำนวนสถานีฐาน
S	เขตของจำนวนจุดทดสอบสัญญาณ
L	เขตของจำนวนกำลังส่งสำหรับสถานีฐาน
ตัวแปรตัดสินใจ	
F_k	ตัวแปรไบนารี (0,1) ถ้า $F_k = 1$ ความถี่ k ถูกนำมาใช้ แต่ถ้า $F_k = 0$ ความถี่ k ไม่ถูกนำมาใช้
α_{kl}^{hi}	ตัวแปรไบนารี (0,1) ถ้า $\alpha_{kl}^{hi} = 1$ หมายความว่ากำหนดให้ สถานีฐาน i เลือกใช้ความถี่ k และใช้กำลังส่งระดับที่ l แต่ถ้า $\alpha_{kl}^{hi} = 0$ หมายความว่าไม่กำหนดให้สถานีฐาน i เลือกใช้ความถี่ k และใช้กำลังส่งระดับที่ l
x_{kl}^{hi}	ตัวแปรไบนารี (0,1) ถ้า $x_{kl}^{hi} = 1$ หมายความว่ากำหนดให้จุดทดสอบสัญญาณ h ได้รับสัญญาณจากสถานีฐาน i ที่ความถี่ k และใช้กำลังส่งระดับที่ l แต่ถ้า $x_{kl}^{hi} = 0$ หมายความว่าไม่กำหนดให้จุดทดสอบสัญญาณ h ได้รับสัญญาณจากสถานีฐาน i ที่ ความถี่ k และใช้กำลังส่งระดับที่ l
พารามิเตอร์คงที่	
P_{rc}	ระดับสัญญาณขั้นต่ำที่ควรได้รับสำหรับจุดทดสอบสัญญาณ (Received power threshold)
$P_t(i, l)$	กำลังส่งที่ระดับที่ l ที่สถานีฐาน i เลือกใช้
$P_r(h, i, k)$	กำลังสัญญาณระยะทางที่จุดทดสอบสัญญาณ h ที่ได้รับจากสถานีฐาน i ที่ใช้ความถี่ k
γ_t	ระดับอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนขั้นต่ำที่ควรได้รับ (SINR threshold)
N_0	สัญญาณรบกวนความร้อน (Thermal noise)
B	ความกว้างของช่องสัญญาณ
Inf	ค่าอนันต์

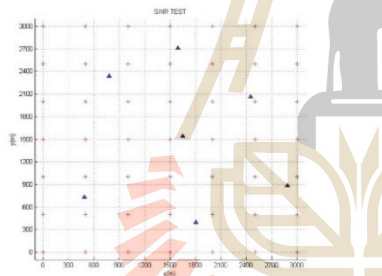
สมการเงื่อนไขที่ (2) เป็นการกำหนดค่าให้แต่ละสถานีฐานต้องใช้จำนวนความถี่ l ความถี่และใช้กำลังส่ง l ระดับเท่านั้น สมการเงื่อนไขที่ (3) เป็นการกำหนดค่าความถี่ที่ถูกจัดสรรให้กับสถานีฐานต้องเป็นความถี่ที่ถูกนำมาใช้เท่านั้น สมการเงื่อนไขที่ (4) เป็นการรับประกันว่าสถานีฐานให้สัญญาณครอบคลุมจุดทดสอบสัญญาณทั้งหมด สมการเงื่อนไขที่ (5) เป็นการกำหนดว่าจุดทดสอบสัญญาณจะต้องได้รับสัญญาณจากสถานีฐานที่ถูกจัดสรรความถี่และกำลังส่งที่ถูกนำมาใช้เท่านั้น สมการเงื่อนไขที่ (6) เป็นการรับประกันว่าจุดทดสอบสัญญาณ จะต้องได้รับสัญญาณที่มีกำลังมากกว่าระดับสัญญาณขั้นต่ำที่กำหนดโดยค่าขีดแบ่ง P_{rc} สมการเงื่อนไขที่ (7) เป็นการตรวจสอบค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนที่จุดทดสอบสัญญาณ โดยจะต้องมีค่ามากกว่าค่าขีดแบ่ง γ_t ที่กำหนดไว้

3. การทดลองและพารามิเตอร์

วัตถุประสงค์ของการทดลอง เพื่อศึกษาว่าจำนวนความถี่และระดับกำลังส่งในแต่ละสถานีฐาน ไวเม็กซ์เลือกใช้จะส่งผลอย่างไรต่อคุณภาพสัญญาณ โดยจะพิจารณาจากค่าส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนที่จุดทดสอบสัญญาณ (Signal Test Point : STP) ซึ่งแบบจำลองในการทดลองมี 2 รูปแบบ ในรูปแบบที่ 1 มีจุดทดสอบสัญญาณจำนวน 36 จุด แต่ละจุดทดสอบห่างกันเป็นระยะ 600 เมตร x 600 เมตรดังแสดงในรูปที่ 1 และในรูปแบบที่ 2 มีจุดทดสอบสัญญาณจำนวน 49 จุด แต่ละจุดทดสอบห่างกันเป็นระยะ 500 เมตร x 500 เมตร



รูปที่ 1 แบบจำลองที่ 1 กรณีมีจุดทดสอบสัญญาณ 36 จุด



รูปที่ 2 แบบจำลองที่ 2 กรณีมีจุดทดสอบสัญญาณ 49 จุด

ดังแสดงในรูปที่ 2 พื้นที่ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดกว้าง 3 กิโลเมตร ยาว 3 กิโลเมตร มีจำนวนสถานีฐาน ไวเม็กซ์ 7 สถานี สายอากาศเป็นชนิดที่มีการแพร่กระจายพลังงานแบบรอบทิศทาง (omnidirectional pattern) และจุดทดสอบสัญญาณมีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) ทั้ง 2 รูปแบบจึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองพิจารณาตามมาตรฐาน WIMAX IEEE 802.16 ดังแสดงในตารางที่ 2 [4]

ในการคำนวณค่าการลดทอนกำลังของสัญญาณระหว่างสถานีฐานภาคส่ง (สถานีฐานไวเม็กซ์) กับสถานีฐานภาครับ (จุดทดสอบสัญญาณ)

เราได้ใช้แบบจำลองการสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss Model) ของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford University Interim model : SUI model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับการแนะนำจาก IEEE 802.16 เพื่อใช้คำนวณค่าการสูญเสียกำลังตามระยะทางในเครือข่ายไวเม็กซ์ [5]

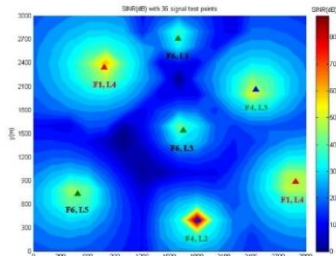
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่า
ความสูงของเสาเป็นฐาน	60 m
ความสูงของจุดทดสอบสัญญาณ	2 m
ความถี่ของสัญญาณพาห้	3.5 GHz
กำลังส่งของสถานีฐาน	31-39 dBm
ความกว้างของสัญญาณ	3.5 MHz
ประเภทลักษณะของภูมิประเทศ	B
อัตราขยายของเสาอากาศภาคส่ง	16 dBi
อัตราขยายของเสาอากาศภาครับ	2 dBi
ระดับสัญญาณพื้นค่าที่ควรวีได้รับสำหรับจุดทดสอบสัญญาณ	-91 dBm
ระดับอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนขั้นต่ำที่ควรวีได้รับ	16.4 dB
สัญญาณรบกวนความร้อน (N_0)	-174 dBm/Hz

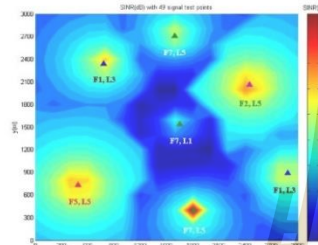
4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

เนื้อหาในส่วนนี้นำเสนอผลการทดลอง ซึ่งดำเนินการด้วยโปรแกรมประยุกต์ IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.4 ในการหาค่าตอบที่ดีที่สุดในการกำหนดความถี่และระดับกำลังส่งที่เหมาะสมที่สุดให้กับสถานีฐานไวเม็กซ์ รวมถึงแสดงผลข้อมูลและแสดงผลกราฟต่างๆที่ได้จากการทดลอง รูปที่ 3 และรูปที่ 4 เป็นกราฟแสดงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนภายใต้พื้นที่ที่มีจุดทดสอบสัญญาณ 36 จุดและ 49 จุดตามลำดับ ซึ่งจากกราฟแสดงแนวโน้มและกำลังส่งที่จัดสรรให้แก่สถานีฐาน ส่วนรูปที่ 5 แสดงกราฟฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวน โดยในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้จำนวนความถี่ให้น้อยที่สุดพร้อมกับปรับระดับของกำลังส่งของแต่ละสถานีฐานให้เหมาะสม ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของรูปแบบที่ 2 มีแนวโน้มค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนที่จุดทดสอบสัญญาณที่มากกว่าเส้นกราฟของรูปแบบที่ 1 เนื่องจากรูปแบบที่ 2 มีการนำความถี่เดิมมาใช้ซ้ำน้อยกว่ารูปแบบที่ 1

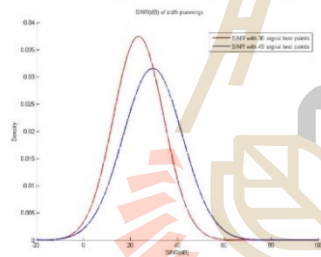
โดยสรุปผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทั้ง 2 รูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยตัวส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดบวกสัญญาณรบกวนที่จุดทดสอบสัญญาณดังแสดงในตารางที่ 6 และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 เท่ากับ 30 นาที และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 3 SINR กรณีมีจุดทดสอบสัญญาณ 36 จุด



รูปที่ 4 SINR กรณีมีจุดทดสอบสัญญาณ 49 จุด



รูปที่ 5 เปรียบเทียบความหนาแน่นของสัญญาณจะเป็นของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกของทุกสัญญาณรวมของทั้ง 2 รูปแบบ

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบการทดลองเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทั้ง 2 รูปแบบ

รูปแบบ	ค่าเฉลี่ย SINR	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนความถี่ที่ใช้
1	23.4490 dB	10.6653	3
2	29.9073 dB	12.6481	4

5. สรุปผลการทดลอง

ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการจัดสรรความถี่และกำลังส่งให้กับสถานีฐานแต่ละสถานีในเครือข่ายโวมกซ์โดยใช้วิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี ผลการทดลองพบว่า ความถี่และระดับกำลังส่งที่ถูกจัดสรรให้กับสถานีฐานแต่ละสถานี และจำนวนจุดทดสอบสัญญาณที่

ใช้ในการวางแผนจัดสรรความถี่ มีผลต่อค่า SINR ของเครือข่าย โดยเมื่อมีจำนวนจุดทดสอบสัญญาณเพิ่มขึ้น คุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นั่นคือค่าเฉลี่ยของกำลังรับของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกของทุกสัญญาณรวมจะเพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการหาค่าตอบเพิ่มขึ้น นั่นคือมีความซับซ้อนของปัญหาเพิ่มขึ้นนั่นเอง ดังนั้นในอนาคตผู้วิจัยจะพัฒนาเทคนิคที่สามารถหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับเครือข่ายขนาดใหญ่ โดยจะได้คำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพสัญญาณของผู้ใช้งาน เช่น ความจุของช่องสัญญาณ และระดับการรบกวนของคลื่นผู้ใช้งาน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Prommak, Chutima, and Chitapong Wechtaison. "WiMAX network design for cost minimization and access data rate guarantee using multi-hop relay stations." International Journal of communications 4.2 (2010): pp. 39-46.
- [2] D. Yang, X. Fang and G. Xue, "Near-Optimal Relay Station Placement for Power Minimization in WiMAX Networks," Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE, Houston, TX, USA, 2011, pp. 1-5.
- [3] Winston, Wayne L., and Jeffrey B. Goldberg. Operations research: applications and algorithms. Vol. 3. Belmont, CA: Duxbury press, 2004.
- [4] Alson, Syed A., and Mohammad Ilyas, eds. WiMAX: technologies, performance analysis, and QoS. CRC press, 2007.
- [5] Erceg, Vinko, et al. "Channel models for fixed wireless applications." In Technical report, IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, January 2001.



นายสาวกชกร พิมพ์พูน และนายพีระสันต์ ทวีภาวิไล สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโทที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม งานวิจัยที่สนใจเป็นงานที่เกี่ยวข้องกับเครือข่ายสี่จีเอสแอลทีอี

ผศ.ดร.ชุตินา พรหมมาก ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

PERFORMANCE EVALUATION OF POWER LEVEL ASSIGNMENT AND BASE STATION PLACEMENT FOR 4G-LTE FEMTOCELL NETWORKS IN MULTI-FLOOR BUILDINGS

Peerasan Thaweephawilai ⁽¹⁾, Chitapong Wechtaisong ⁽²⁾, Monthippa Uthansakul ⁽¹⁾
and Chutima Prommak ⁽¹⁾

⁽¹⁾Suranaree University of Technology, Thailand

⁽²⁾Nakhonratchasima Rajabhat University, Thailand

Email: M5840755@g.sut.ac.th

ABSTRACT

Long Term Evolution networks aim to improve the data rates and the cell coverage to the indoor service areas. To enhance the network performance, the low power nodes like femtocell base stations (FBSs) are installed inside the office buildings and the residential apartments. In this paper, we present the performance evaluation of the power level assignment for FBSs in a multi-floor building that takes into account the obstacles (e.g. floors, walls) and the interference signal between FBSs. Beside the power level, the number and the placement location of the femtocell base stations are also considered. We evaluate the performances of the indoor femtocell networks in term of the received signal strength, the signal to interference plus noise ratio (SINR), the percentage of the signal outage, percentage of the signal leakage from indoor to outdoor area and the user achievable modulation techniques. The experimental results show that the transmitted power, the placement location and the number of FBSs affect to network performance tremendously.

KEYWORDS: *power level assignment, base station placement, 4G-LTE femtocell networks*

1. INTRODUCTION

The growing number of smartphone and tablet users have led to very high mobile data traffic in the cellular networks. Hence, FBSs are installed to enhance the network performance for both voice and data users inside the buildings. A femtocell is a low power wireless base station for the in-building cellular access. In addition, the FBSs can help reducing the load and congestion of the macrocell base stations (Baseshankar & Khapre (2012)). Especially, they can help extending the service coverage to the indoor service areas where the radio signal from the outdoor base stations could be limited or unavailable due

to the complicated structure of the indoor buildings (Vardhan, et al. (2014), 3GPP (2011)).

When installing the indoor base stations, one important problem that could occur is high interference signal between the adjacent base stations. Some existing works in literature have considered this issue. For example, (Apio, et al. (2011)) studied the network performances in terms of throughput and energy efficiency which could be increased after installing FBSs into the traditional macrocell networks. (Han & Kim (2010)) presented the performance evaluation of existing macrocell networks with FBSs in terms of the outage probability and spectral efficiency by considering various environmental factors such as wall structure, number of walls, and distance between FBSs and users. (Awan, et al. (2014)) presented the impact of femtocell underlay deployment sharing same radio frequency resources with urban macrocell in terms of overall network throughput. However, the previous works have not focused on the performance evaluation of the power level assignment for the FBSs in a multi-floor building and the interference effects between the co-channel FBSs. Beside the power level assignment, the number and the placement location of the FBSs are also considered in our paper. Especially, we take into account the penetration loss from the indoor obstacles (e.g. floors, walls) (Zulkefly, et al. (2015)) in the propagation signal calculation (Awan, et al. (2014), Zulkefly, et al. (2015)).

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 presents the detail for the experimental setup and the radio propagation model adopted in our study. Section 3 analyzes and evaluates the system performance. Finally, section 4 concludes the paper and discuss our future works.

2. EXPERIMENTAL SETUP

We conducted extensive experiments to evaluate the performance of the power level assignment and the base station placement for the FBSs in a multi-floor building. Specially, we considered seven cases of the indoor femtocell networks as described in Table 1. Each case deploys different number of FBSs per floor with different levels of the transmit power. FBSs are placed uniformly over the indoor area of each floor. We consider that each FBS operates at the same frequency.

The experiments were setup in the two-story building with each floor dimension 75m x 75m. The service area of the first and the second floor are shown in Fig 1. and Fig 2., respectively. The outdoor area of 50 meters around the building is considered. The Signal Test Point (STPs) granularity of 5 meters is considered in both indoor and outdoor areas (represented by a red dot in Fig 1. and Fig 2.). There are 1,552 STPs and 225 STPs on the first floor and the second floor respectively. Table 2 presents the parameters of the FBSs used in our experiments. Table 3 presents the relation between modulation techniques, SINR and physical data rate (Apio, et al. (2011)).

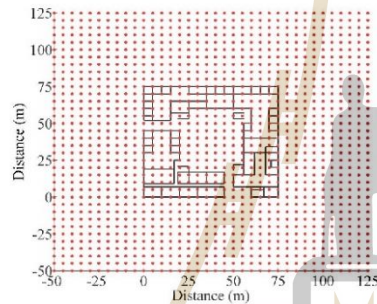


Fig 1. 1st floor area of the building

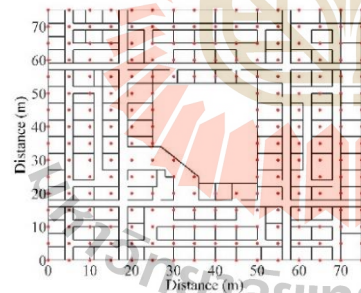


Fig 2. 2nd floor area of the building

Table 1. Indoor femtocell networks considered in our experiments

Case	Number of FBSs per floor	Transmit power of FBSs
1	2	5 dBm
2	2	15 dBm
3	2	20 dBm
4	3	20 dBm
5	4	20 dBm
6	5	20 dBm
7	6	20 dBm

Table 2. Parameters of the FBSs used in our experiments

Parameters	Values
Carrier frequency	2.6 GHz
Femtocell's transmit power	20, 15, 5 dBm
Femtocell's height	2 m
Signal test point's height	0.8 m
Bandwidth	20 MHz
Femtocell's support channel	32 users
Building dimension	75m x 75m x 3m
Number of floors	2
Received signal strength threshold	-73.5 dBm

Table 3. The relation between modulation techniques, SINR and physical data rate

No.	Modulation Techniques	SINR (dB)	Physical data rate (Mbps)
1	QPSK 1/8	-5.1	4.20
2	QPSK 1/2	2	16.80
3	QPSK 3/4	5.5	25.20
4	16 QAM 1/2	7.9	33.60
5	16 QAM 2/3	11.3	44.80
6	16 QAM 3/4	12.2	50.40
7	16 QAM 4/5	12.8	53.76
8	64 QAM 2/3	15.3	67.20
9	64 QAM 3/4	17.5	75.60
10	64 QAM 4/5	18.6	80.64

This work using the path loss model by 3GPP standard (The 3rd Generation Partnership Project) (Vardhan, et al. (2014)), which is expressed by Eq. (1)

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

where R is a distance between STPs and FBSs. $d_{2d,indoor}$ is a wall thickness, n denotes the number of floors crossed by the signal while propagating between FBSs to STPs. q is the number of walls crossed by the signal and L_{iw} is a building's wall penetration loss.

3. RESULTS AND ANALYSIS

The network performance of seven cases of the indoor femtocell networks (Table 1) are compared and evaluated in term of the received signal strength, the signal to interference plus noise ratio (SINR), the percentage of the signal outage, percentage of the signal leakage from indoor to outdoor area and the user achievable modulation techniques.

Fig 3 and Fig 4 show the distribution of the received signal strength in the service area inside and outside the building respectively. It is found that as the number of FBSs and the transmit power level increase from the network case 1 to 7, the received signal strength inside the building increases as shown in Fig 3. However, the distribution of the leakage signal also increases from the network case 1 to 7 as shown in Fig 4. One should note that the number of FBSs and the transmit power level need to be designed carefully, otherwise it could result in high leakage signal and poor SINR level as shown in Fig 7-13.

In Table 4, the percentage of the signal outage is computed for the indoor service area with insufficient signal strength while the percentage of the signal leakage considers the signal leakage from the indoor to the outdoor area of the first floor. It can be seen that in the case 4 to 6 although the number of installed FBSs in the building is different, it turns out that the percentage of signal outage is equal. And in the case 5, although the number of installed FBSs are more than that of the case 4, the percentage of the signal leakage are less. The results show that the quality of the signal coverage in the service area not only depends on the number and the transmit power level of FBSs, but also depends on the placement location of FBSs.

Next we evaluate the signal quality in term of SINR in the service area. Specifically, the effect of deploying different number of FBSs could be observed in Fig 7-12 in which SINR of the network case 3 and 7 are compared. In case 3, there are two FBSs on each floor whereas in case 7 there are six FBSs on each floor. It can be observed that the more number of FBSs deployed in the service area, the lower the value of SINR. The reason is that each FBS operate at the same frequency band and co-channel interference would be higher as the number of FBSs increases. The effects can also be observed in Fig 13.

Last but not least, Fig 14 evaluate the percentage of service area that users can communicate using a particular modulation technique which in turn resulting in different achievable physical data rate. We can see that the case 3 results in the highest percentage of service area with 64QAM modulation technique because SINR of case 3 is better than the other cases.

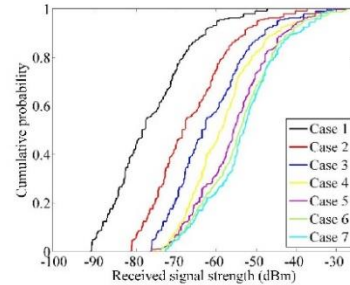


Fig 3. CDF of the received signal strength in the service area on 1st and 2nd floor inside the building

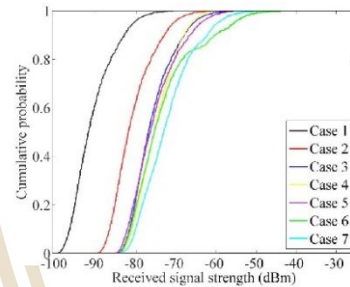


Fig 4. CDF of the leakage received signal strength outside the building

Table 4. Percentage of area in outage and leakage

Case	Percentage of the signal outage	Percentage of the signal leakage
1	10.40 %	28.08 %
2	27.44 %	11.54 %
3	62.58 %	0.48 %
4	1.46 %	36.63 %
5	1.46 %	31.63 %
6	1.46 %	39.13 %
7	0.00 %	52.31 %

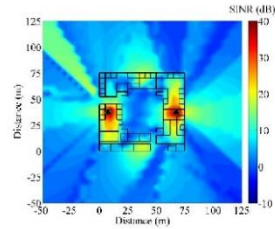


Fig 7. SINR of case 3 (outdoor)

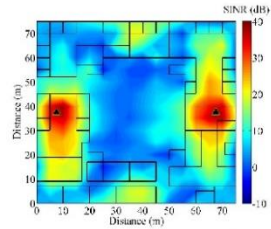


Fig 8. SINR of case 3 (indoor 1st floor)

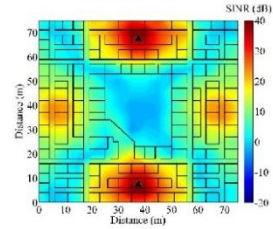


Fig 9. SINR of case 3 (indoor 2nd floor)

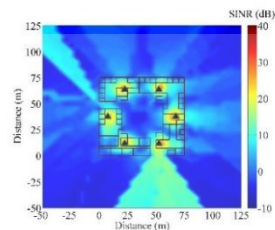


Fig 10. SINR of case 7 (outdoor)

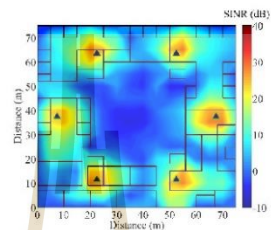


Fig 11. SINR of case 7 (indoor 1st floor)

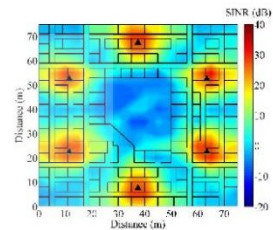


Fig 12. SINR of case 7 (indoor 2nd floor)

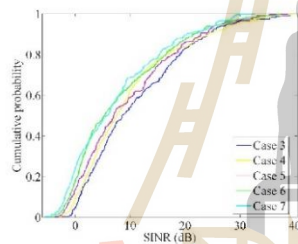


Fig 13. CDF of SINR in the service area on 1st and 2nd floor (only indoor area)

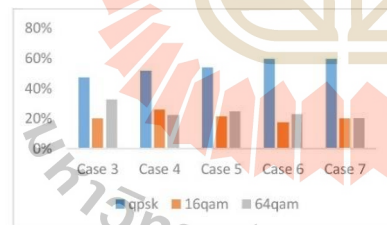


Fig 14. Percentage of service area that can achieve a particular modulation technique

4. CONCLUSIONS

In this paper, we present the performance evaluation of the power level assignment and the base station placement for the 4G-LTE femtocell networks in multi-floor buildings. The results from extensive numerical experiments show that co-channel interference between adjacent FBSs could highly affect the network performance in term of the service outage and the achievable user data rate. Specifically, the suitable network planning could reduce the outage area and increase user data rate. However, the transmit power level, the number and locations of FBSs need to be selected carefully because they could result in signal leakage and high interference level which in turn affect the network service quality. Our future work will investigate the network planning techniques to attain the optimal power level and placement location of femtocell base stations for the 4G-LTE femtocell networks in multi-floor buildings. We will incorporate the user traffic density and the co-channel interference effects in the network planning process.

5. ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by Suranaree University of Technology, the Office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand and the National Research Council of Thailand (NRCT).

REFERENCES

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

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

L. M. del Apio, E. Mino, L. Cucala, O. Moreno, I. Berberana and E. Torrecilla, Energy Efficiency and Performance in mobile networks deployments with femtocells, *2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Toronto, ON, pp. 107-111, 2011

N. O, S. w. Han and H. Kim, System Capacity and Coverage Analysis of Femtocell Networks, *2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, Sydney, NSW, pp. 1-5, 2010

F. G. Awan, N. M. Sheikh and A. Kiran, Performance Evaluation of Beamforming for Macro Base Stations in a Femto-Cell Assisted Macro-Network, *2014 11th International Conference on Information Technology: New Generations*, Las Vegas, NV, pp. 201-206, 2014

Access, Evolved Universal Terrestrial Radio., Base station bs radio transmission and reception (Release 10), *3GPP TS 36.104*, V10 5, 2011.

N. R. Zulkefly, T. A. Rahman, A. M. Al-Samman, A. M. S. Mataria and C. Y. Leow, Indoor path loss model for 4G wireless network at 2.6 GHz, *Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN)*, *2015 1st International Conference on*, Kuala Lumpur, pp. 117-120, 2015.

Jinghai, L., Tangbai, C. and Bo, Y., Long Term Evolution (LTE) Radio Access Network Planning Guide, *China: Huawei Technologies CO*, 2011.

PHOTOS AND INFORMATION



Peerasan Thaweephawilai received the B.Eng in telecommunication engineering from Suranaree University of Technology, Thailand in 2014. He is currently working on his M.Eng at the school of telecommunication engineering, Suranaree University of Technology. His current interests include mobile wireless network design, 4G-LTE networks and network's 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 the field of Information and Communication Engineering from Shibaura Institute of Technology, Japan in 2016. Currently he is a lecturer at the Faculty of Industrial Technology, Nakhonratchasima Rajabhat University, Thailand

**Monthippa Uthansakul**

received the B.Eng in Telecommunication Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand in 1997, the M.Eng in Electrical Engineering from Chulalongkorn University, Thailand in 1999 and the PhD in Information Technology and Electrical Engineering from the University of Queensland, Australia in 2007. She received the Second Prize Young Scientist Award from the 16th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications, Poland, in 2006.

**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.

Power Level Assignment and Base Station Placement Using Simulated Annealing for 4G-LTE Femtocell Networks in Multi-Floor Buildings

Peerasan Thaweephawilai*, Monthippa Uthansakul, Chutima Prommak and Chitapong Wechtaisong
 School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
 Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding author. E-mail: m5840755@g.sut.ac.th DOI:

Received: ; Accepted: ; Published online:

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Femtocell base stations (FBSs) are widely used to improve data rates and cell coverage to the indoor service in Long Term Evolution (LTE) networks. With a proper network's design, a network deployment cost will be worth and a network performance will satisfy the users. Nevertheless, with an improper design, besides all of the foregoing will not achieve, an unpleasant problem such as a leakage signal from an indoor to outdoor area will occur. In this paper, we propose an optimization technique which is a collaboration between a Linear Programming (LP) and a Simulated Annealing heuristic technique (SA). We separate our optimization technique into two steps. In step one, we focus on minimizing the number of FBS to be installed by formulating a linear programming problem. In step two, we optimize the placement location and the transmit power level of installed FBS by using the SA heuristic. Our results show that the proposed technique can achieve a better performance trade-off between computation time and solution quality. Besides, when compared to linear programming technique, the proposed technique can reduce the summation of leakage signal up to 90%, the total power usage up to 45% and reduce a computation time more than 70%.

Keywords: network planning, power level assignment, base station placement, linear programming, simulated annealing, 4G-LTE femtocell networks

1 Introduction

Nowadays, the growing number of smartphone and tablet users has led to very high mobile data traffic in the cellular networks and it has been observed that the most of the mobile data traffic generates from indoor. Hence, FBSs are installed to enhance the network performance inside the buildings to provide an access to indoor users at a low cost of deployment [1]. A femtocell is a low-power wireless base station for the in-building cellular access. In addition, the FBSs can help reduce the load and congestion of the macrocell base stations. Especially, they can help extend the service coverage to the indoor service areas where the radio signal from the outdoor base stations could be limited or unavailable due to the complicated structure of the indoor buildings. When we compare the outdoor base station placement problem and the indoor base station placement problem, the indoor base station placement problem needs to consider more factors such as the limitation of femtocell's capacity to support the indoor users, the leakage signal and the

building structure. Therefore, the indoor base station needs to be deployed carefully and optimally.

Nevertheless, in the enterprise scenario, FBSs could be deployed with a non-optimal number and location. The non-optimal deployment of FBS led to some problems that could occur such as an outage area inside the building and a lack of FBS's capacity to support indoor users [2]. However, the existing works in literature have considered some of these issues.

Most researches in the existing works related to femtocell networks in a building and focus on base station placement and power level assignment. In [3], the authors proposed an energy-saving mechanism in LTE macrocell-femtocell networks while maintaining the required data rate. In [4], the authors presented the technique of a femtocell base station placement in a single-floor building by using several algorithms. The authors aim to place a minimum number of FBSs while maximizing the covered area based on the signal to interference plus noise ratio. In [5], the authors placing the femtocell base station in the optimal positions in a single-floor building and minimizing the total uplink power by using a Linear Programming. In

[6], presented the technique to solve joint placement and power control problem by using Mixed Integer Programming which optimally tunes the power of femtocell base station, minimize the number of femtocell base station needed for the coverage of a single-floor building while guaranteeing a minimum signal to interference plus noise ratio to users. In [7], the authors presented the technique to deploy a base station in the presence of femtocell access points to optimize coverage and capacity of the network by using simulated annealing heuristic technique.

Although existing works have studied the base station placement and power level assignment to improve a performance of networks, there are only a few works considering about the leakage signal from the indoor FBS that could occur after deployed. In [8], the authors proposed a technique to optimize the femtocell network in a three-story building under the coverage and interference constraints by using a mixed integer programming with two objectives to maximizing the sum of femtocell base station's transmit power and maximizing Shannon's capacity in an indoor area while considered the leakage signal that emitted out of the building. In [9], the authors presented a placement and power control algorithm which optimally places and dynamically adjusts the transmission power of a femtocell base station by using mixed integer programming while guaranteed the signal to noise ratio for every indoor user and the degradation of outdoor users' signal to noise ratio.

Despite some existing works have studied the leakage signal from the indoor FBS, the literature has considered only in a single-floor building and not considered in some factor of real network environments such as an optimal number of installed FBS that can support the indoor users which expand around in the service area and the complex indoor structure of a multi-floor building. Therefore, this paper aims to present an optimization technique to optimize the number and the placement location of the FBSs and also the transmit power level of each installed FBS in a multi-floor building base on a received signal strength value, while simultaneous minimize the summation of leakage signal which occurs from the indoor FBSs to an outdoor area around the building. Especially, we take into account the penetration loss from the indoor obstacles (e.g. floors, walls) in the propagation signal calculation. In this paper, we use the LP to find a preliminary solution which includes a number and a placement location of FBSs to install and transmit power level of each FBS. All of the

foregoing will be the initial input parameters for the SA heuristic technique which is effective and easy to use to optimize the placement location of each installed FBS and the transmit power level.

The rest of the paper is organized as follows. The methodology is presented in Section 2. The experimental setup is discussed in Section 3. Simulation results are presented and analysed in Section 4. Finally, conclusions are presented in Section 5.

2 Methodology

This section describes our proposed power level assignment and base station placement technique called Minimum Summation of Leakage Signal-SA (MSLS-SA). We have two steps to optimize the number, the placement location of the FBSs and also the power level of each installed FBS in a multi-floor building. In the first step, we formulate a linear programming problem with an objective to minimize the number of FBS under the network's constraints with an approximate placement location and transmit power level. Then, in the second step, we use a simulated annealing heuristic technique to optimize the placement location and the transmit power level of installed FBS which achieved from the previous step with an objective to minimize the sum of leakage signal from an installed FBS to an outdoor area around the building. For the comparison purposes, we implement two techniques include k-Means (KM) [10] clustering algorithm and Boundary Linear Programming (BLP) [11].

2.1 MSLS-SA technique

2.1.1 Linear programming

Linear Programming is a generalization of linear algebra. It is a mathematical technique designed which widely used to help planning and to make decisions relative to the trade-offs necessary to allocate resources. Linear programming uses a mathematical model to describe the problem of concern, linear programming problem may be defined as the problem of maximizing or minimizing a linear function subject to linear constraints which may be equalities or inequalities [11].

Although the LP method can obtain the optimal solution. But in the case of a large size and more complex problem, LP method is improper to solve the

optimal solution since it takes too much time-consuming due to a brute-force algorithm which finds the best answer from all of the candidates answer in the feasible solutions. Therefore, in an experimental environment of this work which is a complex structure of a multi-floor building, we using LP to solve only a superficial result. In this step, the linear programming model aims to minimize the number of FBS to install in the service area by formulating a problem and network's constraints into a mathematical model.

Table 1: Notations 1

Sets	
B	A set of candidate sites to install femtocell base stations (FBSs)
L	A set of transmit power level of femtocell base station
S	A set of signal test points (STPs)
T	A set of leakage signal test points (LTPs)
U	A set of users
Decision variables	
r_i	A set of binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the FBS is installed at site i , $i \in B$; 0 otherwise
a_{il}	A set of binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the transmit power level l is assigned to FBS i , $i \in B$ and $l \in L$; 0 otherwise
s_{il}^h	A set of binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the STP h is assigned to FBS i with transmit power level l , $h \in S$, $l \in B$ and $l \in L$; 0 otherwise
t_{il}^o	A set of binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the LTP o is assigned to FBS i with transmit power level l , $o \in T$, $l \in B$ and $l \in L$; 0 otherwise
u_{il}^g	A set of binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the user g is assigned to FBS i with transmit power level l , $g \in U$, $l \in B$ and $l \in L$; 0 otherwise
Constant parameters	
pls_{hi}	Path loss (dB) between FBS i and STP h
pls_{oi}	Path loss (dB) between FBS i and LTP o
plu_{gi}	Path loss (dB) between FBS i and user g
P_{ti}	The transmit power level (dBm) of FBS i
P_{ths}	The received signal strength (dBm) threshold for STPs
P_{thu}	The received signal strength (dBm) threshold for users
G_t	The gain of the transmitting antenna
G_r	The gain of the receiving antenna

Besides, the approximate placement location and the transmit power level of installed FBSs will be assigned from this step. In addition, the results from this step will become the initial input parameters for the next step of our optimization technique which is the SA heuristic technique.

Table 1 shows the notation of parameters used in this model. The objective function of LP can be written as an Equation (1). In addition, we incorporate the network design requirements into the mathematical model through nine of constraint equations (2)-(10).

Objective function:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^B r_i \quad (1)$$

Constraints:

$$\sum_{l=1}^L a_{il} = 1, \forall i \in B \quad (2)$$

$$a_{il} \leq r_i, \forall i \in B, l \in L \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^B \sum_{l=1}^L s_{il}^h \geq 1, \forall h \in S \quad (4)$$

$$s_{il}^h \leq a_{il}, \forall h \in S, i \in B, l \in L \quad (5)$$

$$s_{il}^h * [(P_{ti} + G_t + G_r - pls_{hi}) - P_{ths}] \geq 0, \forall h \in S, i \in B, l \in L \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^B \sum_{l=1}^L u_{il}^g \geq 1, \forall g \in U \quad (7)$$

$$u_{il}^g \leq a_{il}, \forall g \in U, i \in B, l \in L \quad (8)$$

$$u_{il}^g * [(P_{ti} + G_t + G_r - pls_{gi}) - P_{thu}] \geq 0, \forall g \in U, i \in B, l \in L \quad (9)$$

$$\sum_{g=1}^U u_{il}^g \leq 32, \forall i \in B, l \in L \quad (10)$$

Constraint Equation (2)-(3) ensure that each of the installed FBS i must have only one transmit power level l . Constraint Equation (4)-(6) ensure that the network can provide signal coverage in the service area by assessing the received signal strength at each STP h and specifying that the received signal strength received at STP h from FBS i must be greater than the threshold P_{ths} . Constraint Equation (7)-(9) ensure that the received signal strength of user u from FBS i must be greater than the threshold P_{thu} to be achieved the highest physical data rate. Constraint Equation (10) ensure that each FBS can support the users only with

its limited capacity [12]. Besides, we define P_{hs} and P_{hu} equal to -103.535 dBm and -80.9348 dBm respectively to ensure that every STPs can reach the minimum modulation (QPSK 1/8) and every users can reach the maximum modulation (64 QAM 3/4) [13].

2.1.2 Simulated annealing

Firstly, annealing is referred to as tempering certain alloys of metal, glass, or crystal by heating above its melting point, holding its temperature, and then cooling it very slowly until it solidifies into a perfect crystalline structure. This physical/chemical process produces high-quality materials. The simulation of this process is known as simulated annealing (SA). SA is one of the heuristic techniques for optimization, which is a popular, effective and simple technique. This technique is used to reach a satisfying near-optimal solution for complex models [14], [15].

Since the large and complex experimental environment of this work, we prefer not to use LP method even if it can provide an optimal solution. In this second step, we use SA heuristic technique to prevent a time consuming. We use SA heuristic

Table 2: Notation 2

SA parameters	
τ	The current temperature
$\tau_{initial}$	The initial temperature
τ_{stop}	The final temperature
$\bar{\Delta E}$	The average of the difference of the evaluation function in a preliminary test
P_a	The probability of a state change
$P_{a_initial}$	The initial probability of a state change
ϕ	the control parameter which determines a decrease in temperature
$Iter_{max}$	The maximum value of iteration
n_{worse_max}	The maximum value of no answer improvement

$$\tau_{initial} = \frac{\bar{\Delta E}}{\ln(P_{a_initial})} \quad (11)$$

$$P_a = e^{-\frac{\Delta E}{\tau}} \quad (12)$$

$$\tau = \phi \tau \quad (13)$$

$$Iter_{max} = \frac{Iter_{max}}{\phi} \quad (14)$$

to solve a near-optimal solution which is still considered the network's constraint equations (2)-(10). From the approximate solution in the previous step, we use it as input parameters include the number (N), the placement location and the transmit power level of installed FBSs ($S_{initial}$) for SA heuristic technique's process. The SA model aims to minimize the summation of the leakage signal that emitted out

Table 3: Pseudo code of SA heuristic technique

Input	$N, S_{initial}, \phi, \tau_{stop}, n_{worse_max}, \Delta E, STPs, Candidate\ FBSs, Users, path\ loss\ data$
Output	Solution of FBSs placement for multi-floor building (S_{final})
1	Initialize $Iter = 0, n_{worse} = 0$
2	Set $Iter_{max} = N$
3	Calculate $\tau = \tau_{initial}$
4	Calculate evaluation function $E(S)$
5	Repeat
6	Repeat
7	Repeat
8	Generate new assignment S_{new} from S (move operator)
9	Check constraint equations (2) – (10)
10	Until all constraints pass
11	Calculate evaluation function $E(S_{new})$
12	Calculate $\Delta E = E(S) - E(S_{new})$
13	Set $Iter ++$
14	If $\Delta E > 0$
15	$n_{worse} = 0$
16	$S = S_{new}$
17	$E(S) = E(S_{new})$
18	Else $\Delta E < 0$
19	Set $n_{worse} ++$
20	Repeat
21	If random $[0,1] < e^{-(\Delta E/\tau)}$
22	$S = S_{new}$
23	$E(S) = E(S_{new})$
24	Until $n_{worse} = n_{worse_max}$
25	End SA Process
26	Until $Iter = Iter_{max}$
27	Reset $Iter = 0$
28	Calculate $\tau = \phi \tau$
29	Calculate
30	Until $\tau = \tau_{stop}$
31	End SA Process
32	$S_{final} = S$

of the building while the number of installed FBS which achieved from the first step will not change. In this step, the placement location will be more carefully optimized, from a thorough candidate location. Besides, the transmit power level of installed FBSs will be more accurately optimized with continuous value. The foregoing is called move operation in the SA process. Table 2 shows the notation of SA parameters. Table 3 shows the pseudo code of the SA heuristic technique in this work. In additions, from our quality evaluation of parameters testing, we define τ_{stop} to 0.01, φ to 0.9, $P_{a_initial}$ to 0.8 and n_{worse_max} to 2000. Equations (11)-(14) show the expression of each parameter.

2.2 K-Means clustering-SA technique (KM-SA)

K-means clustering algorithm is the simple algorithm that solves the clustering problem. This algorithm determines a set of n data points in real dimension into k cluster with a centroid of each cluster and minimizes the mean squared distance from each data point to its nearest centroid [10].

Hence, for performance's comparison purpose with our proposed technique, we use this algorithm to solve the placement location of FBS problem. So, the users in each scenario are a set of data point which will be group into k cluster while k is the number of FBS that needs to be installed to reach the network's constraints. Then we use SA heuristic to optimize the transmit power level and the placement location of each installed FBS which achieved from the k-means clustering algorithm.

2.3 Boundary linear programming technique (BLP)

Since the SA heuristic technique is used to reach a near-optimal solution, not an optimal solution. For performance's comparison purpose, we use the linear programming [11] with an objective to minimize the summation of leakage signal as shows in an Equation (15) with network's constraints and a fixed number of FBS to be installed which is equal to the number of FBS that achieved from step one of MSLS-SA technique.

Objective function:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^L t_{ij}^{\rho} * 10^{[(P_{tit}+G_t+G_r-p_{ls_{(i)}})-P_{ths}]/10} \quad (15)$$

3 Experimental Setup

The experiments were setup in two buildings with different floor structures and different dimension area. The first building is a three-story office building with dimensions 75m x 75m, labeled Building A. The second building is a five-story office building with dimensions of approximately 70m x 30m, labeled Building B. The floor layouts of both buildings are illustrated in Figure 1 and Figure 2, respectively. We consider that the target service area and the outdoor area is represented by a set of discrete grid points which the received signal strength is tested called Signal Test Points (STPs) and Leakage signal Test point (LTPs) respectively. The signal test point granularity of 5 meters in an indoor area and the leakage signal test point granularity of 5 meters in an outdoor area of 25 meters around the building (represented by a gray dot in Figure 1, 2). The candidate sites to install FBS are considered at the same location of STPs. We consider that the indoor user demand is modeled by user points which represent the geographic distribution of the expected user traffic in the service area, the indoor users which are represented by a black triangle. The setup parameters for the experiment are summarized in Table 4.

Besides, we conducted extensive experiments to evaluate the performance of our proposed technique. We considered two scenarios of the indoor femtocell networks in both buildings. In the first scenario, we deploy 150 users inside the service area and especially inside the room. In the second scenario, we increase the number of users from 150 users to 300 users inside the service area. Moreover, we consider that each FBS operates at the different frequency.

Table 4: Parameter uses in the experiments

Parameters	Values
Carrier frequency	2.6 GHz
Femtocell's transmit power	0-20 dBm
Femtocell's height	2 m
Signal test point's height	0.8 m
Femtocell's support channel	32 users
Transmitted antenna gain	3 dBi
Received antenna gain	1 dBi
Number of floors	3 (Building A) 5 (Building B)
Received signal strength threshold for STPs (P_{ths})	-103.535 dBm
Received signal strength threshold for users (P_{thu})	-80.9348 dBm

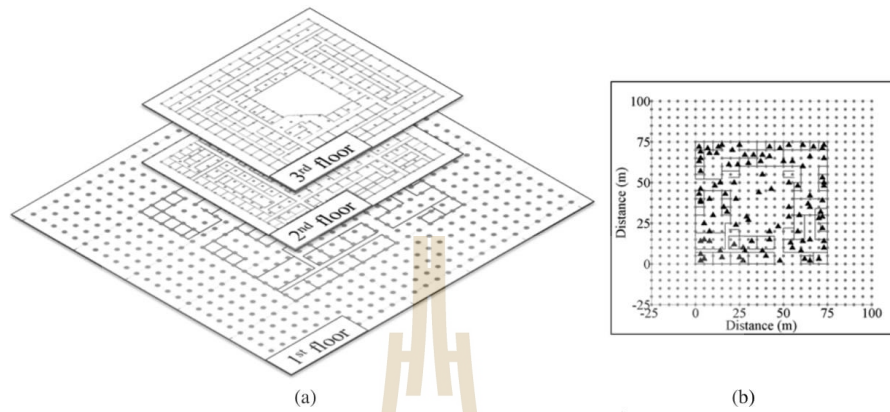


Figure 1: Building A (a) The three-story structure. (b) Floor plan on the 1st floor with signal test point (● in and indoor area), leakage signal test point (● in an outdoor area) and indoor users (▲).

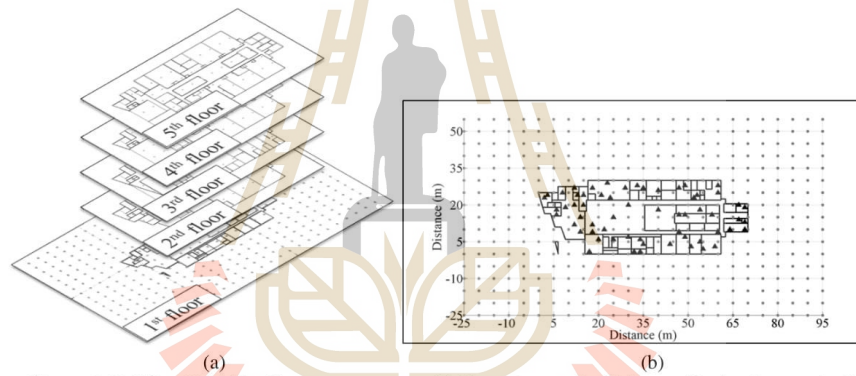


Figure 2: Building B (a) The five-story structure. (b) Floor plan on the 1st floor with signal test point (● in and indoor area), leakage signal test point (● in an outdoor area) and indoor users (▲).

Table 5: Relative permittivity of materials [16]

Description	Value
Concrete	5.31 dB
Plasterboard	2.94 dB
Glass	6.27 dB
Reinforced concrete	18.3 dB

In addition, received signal strength from the femtocell base station is one of the key parameters indicative of the performance of network services. Therefore, the purpose of using the path loss model is

calculating an attenuation of the signal. So, this work using the path loss model by 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) standard [17], [18], which is expressed by an Equation (16).

$$PL = 40.7412 + 20 \log_{10} R + 0.7d_{2d, \text{indoor}} + 18.3^{((n+2)/(n+1)-0.46)} + qL_{iw} \quad (16)$$

Where R is a distance between STPs and FBSs. $d_{2d, \text{indoor}}$ is a wall thickness (0.18 m). n denotes the number

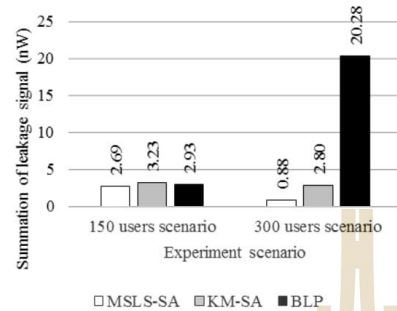


Figure 3: Summation of leakage signal (nW) of three techniques at Building A

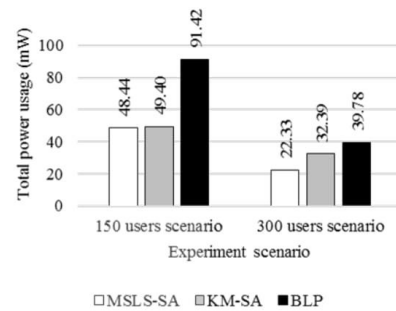


Figure 4: Total power usage (mW) of three techniques at Building A

Table 6: Performance comparison of three techniques in Building A

Performance	150 users scenario			300 users scenario		
	MSLS-SA	KM-SA	BLP	MSLS-SA	KM-SA	BLP
Number of installed FBS	5	5	5	10	10	10
Computation time (minute)	7.6	2.77	83.63	38.45	8.31	6967.37

of floors crossed by the signal while propagating between FBSs to STPs. q is the number of walls crossed by the signal and L_w is a building's wall penetration loss. A typical value of wall loss (L_w) is described in Table 5.

4 Results and Analysis

In this section, the performance of our proposed technique in each experiment scenario will be analysed and compared with others technique in terms of the number of installed FBS needed for the coverage of the building and serves the users, the computation time, the total power usage and the summation of leakage signal which emitted out of the building. Simulation results were conducted using: (1) MATLAB R2014a and (2) IBM ILOG CPLEX 12.7. Computations are performed on an Intel Core i5-6600 3.30 GHz 64-bit Operating System and 16.0 GB of RAM.

For Building A, Table 6 shows a number of installed FBS and computation time of the three techniques at Building A. From the objective function in Equation (1) which expected to minimize the number of FBS to be installed. MSLS-SA technique provides five FBSs to be installed for 150 users scenario.

Therefore, for performance's comparison purpose, the number of installed FBS of BLP technique is restricted to have five FBSs equal to the MSLS-SA. However, the KM-SA technique also provides five FBSs to be installed from

its clustering algorithm. For 300 users scenario, the number of installed FBS of three techniques is all equal but rise from five FBSs to ten FBSs since the increase in the number of users in the building. The computation time of BLP technique is the highest for both scenarios due to the brute-force algorithm which searches all of the possible candidates for the best solution. In the meantime, the KM-SA technique has the lowest computation time since its simplistic algorithm which calculates a mean squared distance between each user and its nearest centroid and chooses it as a location to deploy FBSs. Then, MSLS-SA technique came in second place after the KM-SA technique by cause of the decision process for a proper initial solution in step one.

Figure 3 and Figure 4 shows the summation of leakage signal and total transmit power usage of the three techniques at Building A. For 150 users scenario, The summation of the leakage signal of the MSLS-SA technique and the KM-SA technique is very close to the BLP technique which provides an optimal solution. Then, for 300 users scenario, it can be obviously seen that the summation of leakage signal of the MSLS-SA technique and the KM-SA technique is far better than the BLP technique. Moreover, the MSLS-SA provides the best performance in both scenarios. In terms of total power usage, since the power level and placement location of FBS in BLP technique is selected approximately due to the restriction of

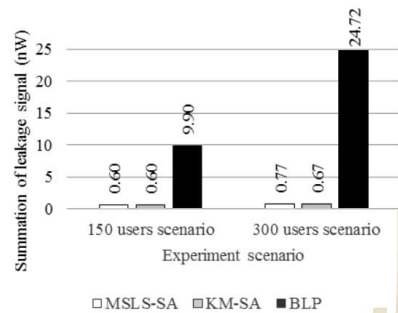


Figure 5: Summation of leakage signal (nW) of three techniques at Building B

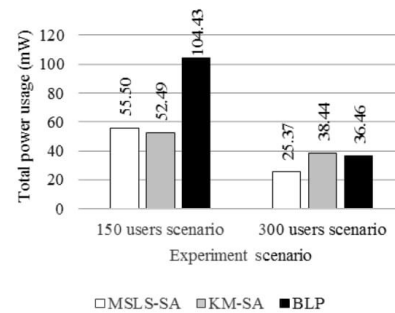


Figure 6: Total power usage (mW) of three techniques at Building B

Table 7: Performance comparison of three techniques in Building B

Performance	150 users scenario			300 users scenario		
	MSLS-SA	KM-SA	BLP	MSLS-SA	KM-SA	BLP
Number of installed FBS	5	19	5	10	22	10
Computation time (minute)	12.64	8.16	49.22	60.91	11.16	442.81

the time-consuming. While the other techniques assign the power level more thorough with a continuous value and select the placement location more careful in SA step. The BLP technique uses more total transmitted power than the other techniques for both scenarios. In addition, it can be seen that although the number of installed FBS for the 300 users scenario is more than the 150 users scenario, the total power usage is less. Because of with the more number of installed FBS, each FBS can share more the burden of work to serves only the nearby users and transmit with a low power level.

When comparing both techniques between the MSLS-SA and the KM-SA which both techniques use the SA heuristic to assign the power level and select the placement location of each installed FBS. The results show that the MSLS-SA technique is better than the KM-SA technique in terms of the summation of leakage signal and total transmit power usage. Because of the initial solution of the MSLS-SA technique which includes the number, the power level and the placement location of each installed FBS was obtained from linear programming. So, the initial solution was optimally selected before beginning the SA process. While the initial solution of the KM-SA technique was obtained by the clustering algorithm. Thus, the FBS with its maximum power level will be deployed with a number that needed to reach the networks constraints at the

centroid of each cluster which is mentioned previously. So, the initial power level of each installed FBS is set to a maximum value. Therefore, even if the computation time of the MSLS-SA technique is slightly longer than the KM-SA technique. It is still far better than the computation time of the BLP technique. Furthermore, the summation of the leakage signal and the total power usage of the MSLS-SA technique is the finest when compared to the other techniques.

For Building B, Table 7 shows a number of installed FBS and computation time of the three techniques at Building B. The results of the experiments at Building B are in the same direction with Building A in terms of a computation time. That is, the computation time of the BLP technique is the highest for both scenarios while the KM-SA technique has the lowest computation time. In addition, since the number of test points at Building B is less than Building A due to its size, it can be seen that the computation time of BLP technique at Building B is lower than Building A. While the computation time of the MSLS-SA technique and the KM-SA technique at Building B is more than Building A. Because of in the SA process, the move operator actually moves from the current solution to the neighbour solution. Building B has five floors which mean the number of neighbor solution to move is more than at Building A which has three floors. Furthermore, in terms of

a number of installed FBS, the KM-SA technique uses significantly more than the other techniques. For 150 users, the KM-SA technique needs 19 FBSs to be installed while the other techniques only need five FBSs. For 300 users the KM-SA technique needs 22 FBSs to be installed while the other techniques only need ten FBSs. It can be seen that the KM-SA technique is unsuitable for a building with a lot number of floors since its clustering algorithm which mentioned previously.

Figure 5 and Figure 6 shows the summation of leakage signal and total transmit power usage of the three techniques at Building B. Also, the results at Building B are in the same direction with Building A in both terms include the summation of leakage signal and total transmit power. The summation of the leakage signal of BLP technique is the highest for both scenarios while the MSLS-SA technique and the KM-SA technique is far better. Then, for the total power usage in 150 users scenario, it can be seen that the KM-SA technique can provide slightly better than the MSLS-SA technique since the number of installed FBS of the KM-SA technique is quite a lot. So, each FBS can share the burden and the power level of each can be reduced to a very low level while it still can reach the network constraints includes the coverage of building and the user's service. For the total power usage in 300 users scenario, the MSLS-SA technique provides the finest performance compared to the others.

As a result of the experiments in two buildings, the MSLS-SA technique can achieve the better performance and solution quality while using much less computation time compared to the BLP technique. Moreover, when compared to the KM-SA technique, the total power usage of the MSLS-SA technique is lower. Furthermore, the number of FBS needed to be installed is much fewer when the number of floors increases.

5 Conclusions

In this paper, we present the power level assignment and base station placement using simulated annealing for 4G-LTE femtocell networks in multi-floor buildings. Extensive experiments were conducted to compare the performance of the proposed technique with the others. Experimental results showed that our proposed technique can efficiently solve the problem with the finest performance compared to the KM-SA technique and the BLP technique. While handling a trade-off between computation time and solution quality. The MSLS-SA technique needed a fewer number of FBS to be installed compared to the KM-SA technique. Moreover, in the case of an equal

number of installed FBS, the MSLS-SA technique significantly reduces the summation of leakage signal and total power usage in all experiment. Furthermore, when compared to the BLP technique which provides an optimal solution, the MSLS-SA technique can reduce the summation of leakage signal up to 90%, the total power usage up to 45% and reduce a computation time more than 70%.

Acknowledgments

This work was supported in part by Suranaree University of Technology, the Office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand and the National Research Council of Thailand (NRCT).

References

- [1] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews and A. Gatherer, "Femtocell networks: a survey," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 9, pp. 59-67, September 2008.
- [2] Y. Li, H. Celebi, M. Daneshmand, C. Wang and W. Zhao, "Energy-efficient femtocell networks: challenges and opportunities," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 99-105, December 2013.
- [3] Y. L. Chung, "An efficient power-saving transmission mechanism in LTE macrocell-femtocell hybrid networks," *The International Conference on Information Networking 2014 (ICOIN2014)*, Phuket, 2014, pp. 176-180.
- [4] M. F. Khan and B. Wang, "Effective placement of femtocell base stations in commercial buildings," *2014 Sixth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Shanghai, 2014, pp. 176-180.
- [5] A. Ramamurthy, V. Sathya, V. Venkatesh, R. Ramji and B. R. Tamma, "Energy-efficient femtocell placement in LTE networks," *2015 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, Bangalore, 2015, pp. 1-6.
- [6] V. Sathya, A. Ramamurthy and B. R. Tamma, "Joint placement and power control of LTE Femto Base Stations in enterprise environments," *2015 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Garden Grove, CA, 2015, pp. 1029-1033.

-
- [7] E. Yaacoub and Z. Dawy, "LTE BS Placement Optimization Using Simulated Annealing in the Presence of Femtocells," *European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference*, Barcelona, Spain, 2014, pp. 1-5.
- [8] K. Han, Y. Choi, D. Kim, M. Na, S. Choi and K. Han, "Optimization of femtocell network configuration under interference constraints," *2009 7th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*, Seoul, 2009, pp. 1-7.
- [9] V. Sathya, A. Ramamurthy and B. R. Tamma, "On placement and dynamic power control of femtocells in LTE HetNets," *2014 IEEE Global Communications Conference*, Austin, TX, 2014, pp. 4394-4399.
- [10] T. Kanungo, D. M. Mount, N. S. Netanyahu, C. D. Piatko, R. Silverman and A. Y. Wu, "An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, no. 7, pp. 881-892, Jul 2002.
- [11] F. S. Hillier, Introduction to operations research. Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- [12] Cisco Universal Small Cell 8738 Data Sheet, Cisco, 2015
- [13] S. P. Thiagarajah, A. Ting, D. Chieng, M. Y. Alias and T. S. Wei, "User data rate enhancement using heterogeneous LTE-802.11n offloading in urban area," *2013 IEEE Symposium on Wireless Technology & Applications (ISWTA)*, Kuching, 2013, pp. 11-16.
- [14] Du, Ke-Lin, and M. N. S. Swamy. *Search and optimization by metaheuristics: techniques and algorithms inspired by nature*. Birkhäuser, 2016.
- [15] A. Srikae, Computational Intelligence, Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand: Suranaree University of Technology, 2009.
- [16] N. R. Zulkefly, T. A. Rahman, A. M. Al-Samman, A. M. S. Mataria and C. Y. Leow, "Indoor path loss model for 4G wireless network at 2.6 GHz," *2015 1st International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN)*, Kuala Lumpur, 2015, pp. 117-120.
- [17] Mingyan Wang, Xinning Zhu, Zhimin Zeng, Shaohua Wan and Wei Li, "System performance analysis of OFDMA-based femtocell networks," *IET International Conference on Communication Technology and Application (ICCTA 2011)*, Beijing, 2011, pp. 405-410.
- [18] C. S. Vardhan, D. V. Ratnam, N. Bhagyasree and A. H. Dattu, "Analysis of path loss models of 4G femtocells," *2014 Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, Vijayawada, 2014, pp. 1-6.
-

ประวัติผู้เขียน

นายพีระสันต์ ทวีภาวิไล เกิดเมื่อวันที่ 22 กุมภาพันธ์ พุทธศักราช 2536 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เป็นบุตรของ นายภาวัต ทวีภาวิไล และนางชนมณี ทวีภาวิไล สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย รังสิต อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี ในปี การศึกษา 2553 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรม โทรคมนาคม) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเมื่อปีการศึกษา 2554 และสำเร็จการศึกษาระดับ ปริญญาตรีในปีการศึกษา 2558 จากนั้นได้มีความสนใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรม ศาสตร์มหาบัณฑิต ด้านการออกแบบและวางแผนเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ภายในอาคารหลายชั้น จึงได้สมัครเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ระหว่างศึกษาผู้วิจัยได้มีการนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 39 (EECON-39) ณ โรงแรมเดอะริเจนท์ อะเมอริกัน รีสอร์ท หัวหิน จังหวัดเพชรบุรี วันที่ 2 - 4 พฤศจิกายน 2559, งานประชุมวิชาการนานาชาติ 11th Southeast ASEAN Technical University Consortium Symposium ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีโฮจิมินห์ซิตี ประเทศเวียดนาม วันที่ 13 - 14 มีนาคม 2560 และได้มีการตีพิมพ์บทความวิจัยในวารสารวิชาการระดับนานาชาติด้านวิทยาศาสตร์ ประยุกต์และเทคโนโลยีของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีพ.ศ.2561 โดยมีรายละเอียดดังภาคผนวก ข