การจัดการพลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณของสภาพแวดล้อมในร่มและกลางแจ้ง

ENERGY MANAGEMENT FOR HANDOVER OF INDOOR AND OUTDOOR ENVIRONMENTS

จิณณ์ชยา ทรัพย์วัชรสกุล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2565

การจัดการพลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณของสภาพแวดล้อมในร่มและกลางแจ้ง

จิณณ์ชยา ทรัพย์วัชรสกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ENERGY MANAGEMENT FOR HANDOVER OF INDOOR AND OUTDOOR ENVIRONMENTS

CHINCHAYA SAPWATCHARASAKUN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of MASTER OF ENGINEERING

(Electrical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2022

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การจัดการพลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณของสภาพแวดล้อมในร่มและกลางแจ้ง

ของ

จิณณ์ชยา ทรัพย์วัชรสกุล

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิศา คุณารักษ์)

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล จิรจริต)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ฑีฆพันธุ์ เจริญพงษ์)

ชื่อเรื่อง	การจัดการพลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณของสภาพแวดล้อมในร่มและกลางแจ้ง
ผู้วิจัย	จิณณ์ชยา ทรัพย์วัชรสกุล
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนิศา คุณารักษ์

งานวิจัยนี้นำเสนอการประหยัดพลังงานด้วยการจัดการการส่งมอบในเครือข่ายแบบไร้รอยต่อ ซึ่งประกอบด้วยมาโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ที่ทำงานร่วมกันในสถาปัตยกรรมของระบบ โดยมีตัวบ่งชี้คือ ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับและค่าความเร็วเคลื่อนที่ ซึ่งจะถูกนำไปพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าเกณฑ์สำหรับกระบวนการตัดสินใจในการจัดการพลังงานทั้งในแง่ของการส่งมอบแบบแนวนอนและแนวตั้ง นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาแอปพลิเคชันที่ผู้ใช้ใช้งานทั้งแบบเวลาจริงและไม่ใช่เวลาจริง โดยประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอถูกคำนวณมาจากสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการประหยัดพลังงานในการส่งของมาโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ ซึ่งแสดงผลในรูปแบบของการใช้พลังงานรวมที่ลดลง ยิ่งไปกว่านั้นเพื่อเป็นการรับประกันคุณภาพของบริการสำหรับระบบที่นำเสนอ จำนวนของการเปลี่ยนช่องสัญญาณ จำนวนการเรียกติดขัด จำนวนการเรียกขาดหาย และค่าเฉลี่ยปริมาณงาน ถูกนำมาวิเคราะห์ในผลการทดลองร่วมด้วย โดยระบบที่เสนอสามารถลดจำนวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณลงได้ร้อยละ 43 ลดจำนวนการเรียกติดขัดลงได้ร้อยละ 34 และลดจำนวนการเรียกขาดหายลงได้ร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับวิธีฮีสเตอรีซีส และวิธีที่เสนอสามารถลดจำนวนของการเปลี่ยนช่องสัญญาณลงได้ร้อยละ 18 ลดจำนวนการเรียกติดขัดลงได้ร้อยละ 14 และลดจำนวนการเรียกขาดหายลงได้ร้อยละ 11 เมื่อเทียบกับวิธีดั้งเดิม โดยมีผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยปริมาณงานเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 และร้อยละ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีฮีสเตอรีซีสและวิธีดั้งเดิม จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นด้วยว่าระบบที่นำเสนอมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีฮีสเตอรีซีสและวิธีดั้งเดิม ในการใช้พลังงานรวมที่ลดลงถึง 45% และ 27% ตามลำดับ

คำสำคัญ : การประหยัดพลังงาน, เฟมโตเซลล์, มาโครเซลล์, การจัดการการเปลี่ยนช่องสัญญาณ, เครือข่ายไร้รอยต่อ

Title	ENERGY MANAGEMENT FOR HANDOVER OF INDOOR AND OUTDOOR ENVIRONMENTS
Author	CHINCHAYA SAPWATCHARASAKUN
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Assistant Professor Sunisa Kunarak , Ph.D.

This research proposes to save energy of handover management in seamless networks which contained macrocells and femtocells and collaborated in system architecture. The received signal strength indicator and mobile speed were compared with the threshold value for the decision-making process in energy management in terms of both horizontal and vertical handover. In addition, the applications employed by users were considered in the real-time and non-real time system. The performance of the proposed system is calculated from a mathematical equation for the transmitted power savings of the macrocells and femtocells which finalized shown in the form of energy consumption. Moreover, to guarantee a quality-of-service indicator for the proposed system, the number of handovers were analyzed, as well as the number of blocked calls, the number of dropped calls and the average throughput. In the simulation results, the proposed algorithm can decrease the number of handovers by 43%, the number of blocked calls by 34% and the number of dropped calls by 30% when compared with the Hysteresis method and the proposed approach can decrease the number of handovers by 18%, the number of blocked calls by 14% and the number of dropped calls by 11% when compared with the conventional method. In terms of the average throughput outcomes increase 5% and 2% when compared with the hysteresis and conventional method. We also illustrate that the proposed system outperforms the hysteresis and conventional method in the energy consumption by 45% and 27%, respectively.

Keyword : Energy saving, Femtocell, Macrocell, Handover management, Seamless networks

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิศา คุณารักษ์ ที่ได้ให้ความเมตตากรุณาเป็นที่ปรึกษาและให้ความช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการทำปริญญานิพนธ์นี้ด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล จิรจริต ที่ให้ความเมตตากรุณาเป็นประธานสอบปริญญานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ฑีฆพันธุ์ เจริญพงษ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญา ชัยปัญญา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชไมพร สุขแจ่มศรี ที่ให้ความเมตตากรุณาเป็นกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะเพิ่มต่างๆ แก่ผู้วิจัย จึงทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และคณะกรรมการบริหารหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน ที่ได้กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆ ให้แก่ผู้วิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอน้อมรำลึกถึงคุณของบิดามารดาและครูอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

จิณณ์ชยา ทรัพย์วัชรสกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูปภาพ ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 3

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ทบทวนวรรณกรรม 4

2.2 วิวัฒนาการของการสื่อสารแต่ละยุค 6

2.3 คุณลักษณะของเซลล์ 11

2.4 การเปลี่ยนช่องสัญญาณ 12

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 18

3.1 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย 18

3.2 สถาปัตยกรรมของระบบ 19

3.3 กระบวนการการจัดการพลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณ 19

3.4 กระบวนการที่ใช้ในการประเมินผลการวิจัย 24

บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย 25
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 30
5.1 สรุปผลการวิจัย 30
5.2 อภิปรายผลการวิจัย 30
5.3 ข้อเสนอแนะ 32
บรรณานุกรม 33
ประวัติผู้เขียน 36

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 การตั้งค่าสภาพแวดล้อมของเครือข่ายจำลอง 25

ตาราง 2 พารามิเตอร์ในการจำลอง..... 26

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ตัวอย่างโทรศัพท์มือถือในยุคแรก 6
ภาพประกอบ 2 ตัวอย่างการสื่อสารในยุคที่ 2 8
ภาพประกอบ 3 ตัวอย่างการสื่อสารในยุคที่ 3 9
ภาพประกอบ 4 ตัวอย่างการสื่อสารในยุคที่ 4 10
ภาพประกอบ 5 ตัวอย่างการสื่อสารในยุคที่ 5 11
ภาพประกอบ 6 ฮาร์ดแฮนด์โอเวอร์ (a) โทรศัพท์เชื่อมต่ออยู่กับสถานีฐานที่ 1 (b) โทรศัพท์ตัดขาดการเชื่อมต่อจากสถานีฐานที่ 1 (c) โทรศัพท์เชื่อมต่อกับสถานีฐานที่ 2 13
ภาพประกอบ 7 ซอฟต์แฮนด์โอเวอร์ (a) โทรศัพท์เชื่อมต่ออยู่กับสถานีฐานที่ 1 (b) โทรศัพท์เชื่อมต่อกับสถานีฐานที่ 2 (c) โทรศัพท์ตัดขาดการเชื่อมต่อจากสถานีฐานที่ 1 13
ภาพประกอบ 8 ตัวอย่างการเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวตั้งเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวนอน 14
ภาพประกอบ 9 วิธีการแบบค่าความแรงของสัญญาณสัมพันธ์ 15
ภาพประกอบ 10 วิธีการแบบค่าความแรงของสัญญาณสัมพันธ์กับค่าเทรชโฮล 16
ภาพประกอบ 11 วิธีการแบบค่าความแรงของสัญญาณสัมพันธ์กับค่าฮีสเตอรีซีส 17
ภาพประกอบ 12 ขั้นตอนการดำเนินงาน 18
ภาพประกอบ 13 สถาปัตยกรรมของระบบ 19
ภาพประกอบ 14 กระบวนการตัดสินใจเพื่อเข้าสู่การจัดการพลังงาน 20
ภาพประกอบ 15 การจัดการพลังงานสำหรับแอปพลิเคชันแบบเวลาจริง (Real-Time) 21
ภาพประกอบ 16 การจัดการพลังงานสำหรับแอปพลิเคชันแบบไม่ใช่เวลาจริง (Non-Real-Time) 22
ภาพประกอบ 17 จำนวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณ 27
ภาพประกอบ 18 จำนวนการเรียกติดขัด 27

ภาพประกอบ 19 จำนวนการเรียกขาดหาย 28

ภาพประกอบ 20 ค่าเฉลี่ยของปริมาณงาน 28

ภาพประกอบ 21 ค่าการใช้พลังงานรวม มีหน่วยเป็นบิตต่อจูล 29

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการนำเอาเทคโนโลยีมาใช้เพื่อพัฒนาอุปกรณ์การสื่อสารให้รองรับต่อความต้องการของผู้ใช้งานมากขึ้น โทรศัพท์เคลื่อนที่หรือที่มักถูกเรียกว่า โทรศัพท์มือถือ ไม่เพียงถูกนำมาใช้ในการสื่อสารด้วยการโทรหรือส่งข้อความอีกต่อไป หากแต่ยังถูกพัฒนาขึ้นให้สามารถรองรับการใช้งานอินเทอร์เน็ตผ่านเครือข่ายผู้ให้บริการ เพื่อให้ผู้ใช้งานเข้าถึงโลกออนไลน์ โซเชียลเน็ตเวิร์คและแอปพลิเคชันต่าง ๆ เราเรียกอุปกรณ์นั้นว่าโทรศัพท์อัจฉริยะหรือสมาร์ตโฟน (Smartphone) นั่นเอง การใช้งานสมาร์ตโฟนที่เชื่อมต่อเข้ากับอินเทอร์เน็ต ยกตัวอย่างเช่น การทำธุรกรรมออนไลน์ เรียนหนังสือออนไลน์ ประชุมทางไกลแบบออนไลน์ ขายสินค้าออนไลน์ สั่งซื้อสินค้าและชำระเงินออนไลน์ รับชมถ่ายทอดสดฟุตบอลโลก รับชมข่าวสาร ผ่านการแพร่ภาพกระจายเสียงสด (Live Broadcast) เป็นต้น ทำให้ผู้ใช้งานได้รับความสะดวกสบายในการเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและในทันที ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าสมาร์ตโฟนเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเราแทบจะทุกกิจกรรมเลยก็ว่าได้ บางสื่อถึงกับให้คำนิยามสมาร์ตโฟนว่าเป็นปัจจัยที่ห้าของมนุษย์เลยทีเดียว เพราะไม่ว่าจะอยู่ส่วนไหนของโลก หากมีสมาร์ตโฟนที่เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตแล้วนั้น การเข้าถึงข้อมูลในทันทีก็เป็นเรื่องง่ายดาย

นอกจากการพัฒนาในส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสื่อสารเช่นสมาร์ตโฟนแล้วนั้น เครือข่ายผู้ให้บริการเองก็มีการพัฒนาด้วยเช่นกัน เพื่อให้ผู้ใช้บริการได้รับการบริการข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ขาดการเชื่อมต่อหรือสะดุด ทั้งกรณีที่ผู้งานอยู่กับที่และกรณีที่ผู้ใช้งานเคลื่อนที่ การส่งต่อบริการสื่อสารจากสถานีฐานหนึ่งไปยังอีกสถานีฐานหนึ่ง เมื่อเกิดการข้ามพื้นที่บริการจะต้องทำได้โดยไม่ขาดการเชื่อมต่อ ทำให้ต้องมีการวางระบบเครือข่ายให้ครอบคลุมทุกพื้นที่ แต่การติดตั้งสถานีฐานที่ซ้อนทับกันทำให้เกิดการส่งต่อบริการสื่อสารหรือเรียกง่ายๆ ว่าการเปลี่ยนช่องสัญญาณ (Handover) ที่ไม่จำเป็นขึ้น และในแต่ละครั้งของการเปลี่ยนช่องสัญญาณมีความเสี่ยงต่อการที่ผู้ใช้งานจะหลุดออกจากการเชื่อมต่อ และยังเป็นการใช้พลังงานสิ้นเปลืองโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งวันหนึ่งพลังงานเหล่านี้สามารถหมดไปได้ จึงจะเห็นว่าเทคโนโลยีสมัยใหม่หรือนวัตกรรมต่างๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นในปัจจุบันนี้ มักให้ความสำคัญในด้านการประหยัดพลังงานเป็นลำดับแรก

ในทางสื่อสารเราพบว่า สถานีฐานขนาดเล็กที่ใช้พลังงานน้อยสามารถทำงานร่วมกันกับสถานีฐานขนาดใหญ่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการให้บริการกับผู้ใช้งานได้ ทั้งในด้านคุณภาพของ

สัญญาณที่ดีขึ้นและในส่วนของการคลอบคลุมพื้นที่ใช้งาน ซึ่งแน่นอนว่าการรวมกันของสถานีฐานขนาดเล็กที่ทำงานร่วมกันกับสถานีฐานขนาดใหญ่ใช้พลังงานน้อยกว่าการรวมกันของสถานีฐานขนาดใหญ่ด้วยกันเอง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ รวมไปถึงกระบวนการตัดสินใจที่จะเปลี่ยนช่องสัญญาณที่เหมาะสม ดังนั้นสิ่งที่นำมาพิจารณาในการออกแบบระบบนอกจากความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับ ควรนำความเร็วของผู้ใช้งานและแอปพลิเคชันที่ผู้ใช้ใช้งานนำมาพิจารณาร่วมด้วย ยกตัวอย่างเช่น หากผู้ใช้งานเดินทางด้วยความเร็วน้อยๆ หรือไม่เคลื่อนที่เลย ไม่ว่าแอปพลิเคชันที่ผู้ใช้ใช้งานอยู่เป็นแบบเวลาจริงหรือไม่ใช่เวลาจริงก็ตาม มีแนวโน้มสูงที่ผู้ใช้งานจะสามารถใช้บริการสถานีฐานขนาดเล็กที่มีขอบเขตการให้บริการได้น้อย แต่มีการรับส่งข้อมูลด้วยกำลังส่งต่ำและสามารถรองรับแบนด์วิดท์ได้สูง ในทางกลับกันหากผู้ใช้งานเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมาก มีแนวโน้มสูงที่ผู้ใช้งานจะสามารถใช้บริการสถานีฐานขนาดใหญ่เมื่อมีการเรียกใช้งานแอปพลิเคชันแบบเวลาจริง หรือมีแนวโน้มที่ผู้ใช้งานจะสามารถใช้บริการสถานีเล็กได้เมื่อมีการใช้งานแอปพลิเคชันแบบไม่ใช่เวลาจริงหากมีค่าความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับและความเร็วของผู้ใช้งานตามเกณฑ์ที่สถานีฐานขนาดเล็กรองรับได้ เป็นต้น

จากเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวความคิดในการออกแบบระบบที่เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างสถานีฐานมาโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ โดยพิจารณาจากกำลังงานที่ส่งของแต่ละเครือข่ายและกำลังงานที่สูญเสียโดยขึ้นอยู่กับระยะทางที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของผู้ใช้ ซึ่งบทที่ 1 จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิจัย ลำดับถัดมาในบทที่ 2 จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัย บทที่ 4 เป็นการแสดงผลการดำเนินการวิจัย และบทที่ 5 ทำการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อทำการออกแบบระบบสื่อสารโดยมีการทำงานร่วมกันของสถานีฐานมาโครเซลล์แทนพื้นที่กลางแจ้งและเฟมโตเซลล์แทนพื้นที่ในร่มด้วยเครือข่ายที่ต่างกัน

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการประหยัดพลังงานในกระบวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณ

1.2.3 เพื่อสร้างกระบวนการที่ใช้ในการตัดสินใจเพื่อเปลี่ยนช่องสัญญาณโดยพิจารณาจากความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับและความเร็วของผู้ใช้งาน

1.2.4 เพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับวิธีฮีสเตอรีซีสโดยจะแสดงผลลัพธ์ในรูปของพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนช่องสัญญาณ จำนวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณและจำนวนการเรียกติดขัด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ออกแบบการทำงานร่วมกันของสถานีฐานมาโครเซลล์ด้วยเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่มาตรฐานแอลทีอีแอดวานซ์ โดยกำหนดให้มีรัศมีเท่ากับ 2 กิโลเมตร และเฟมโตเซลล์ด้วยเครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11ax โดยกำหนดให้มีรัศมีเท่ากับ 20 เมตร

1.3.2 พิจารณาจำนวนผู้ใช้งานในพื้นที่ให้บริการของทั้งสถานีฐานมาโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ที่ 10 ถึง 100 คน ในแต่ละช่วงเวลาการทดลอง

1.3.3 พิจารณาความเร็วของผู้ใช้ ตั้งแต่ 0 ถึง 130 เมตรต่อวินาที

1.3.4 พิจารณาแอปพลิเคชันที่ผู้ใช้ใช้งานทั้งแบบเวลาจริงและไม่ใช่เวลาจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 สามารถประหยัดพลังงานในการเปลี่ยนช่องสัญญาณสำหรับระบบสื่อสารทั้งภายในร่มและกลางแจ้ง

1.4.2 สามารถลดจำนวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณที่ไม่จำเป็นได้

1.4.3 สามารถลดการเรียกติดขัดของผู้ใช้ในระบบสื่อสารทำให้คุณภาพของการบริการสูงขึ้น

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

ได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของสถานีฐานแบบเฟมโตเซลล์และคุณสมบัติของเฟมโตเซลล์ โดยพบว่าเฟมโตเซลล์มีคุณสมบัติในการใช้โหมดประหยัดพลังงาน (Sleep Mode) อยู่ด้วย โดยใช้การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบแบคฮอล (Backhual) เพื่อตรวจจับการเข้าใช้งานในเฟมโตเซลล์เพื่อให้เซลล์อยู่ในสถานะทำงานเมื่อถูกเรียกใช้งานเท่านั้น [1] ได้นำเสนอว่าเฟมโตเซลล์จะใช้พลังงานเพียง 4.2 วัตต์เท่านั้น และสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 40% [2] ได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของสถานีฐานแบบมาโครเซลล์และไมโครเซลล์และการใช้พลังงานของทั้งสองสถานีฐานพบว่ามาโครเซลล์ใช้พลังงานมากกว่าไมโครเซลล์ โดยที่มาโครเซลล์ใช้พลังงานสูงถึง 1673 วัตต์ ซึ่งทั้ง [1] และ [2] จะพิจารณาจากค่าความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถตอบโจทย์ความต้องการของผู้ใช้ได้มากนัก [3] ได้ทำการทดลองการทำงานร่วมกันของสถานีฐานแบบเฟมโตเซลล์และมาโครเซลล์ด้วยวิธีการนำเฟมโตเซลล์ที่จัดว่าเป็นเซลล์ขนาดเล็กครอบคลุมพื้นที่ได้น้อยแต่ใช้พลังงานต่ำติดตั้งลงไปในมาโครเซลล์ที่จัดว่าเป็นเซลล์ขนาดใหญ่ครอบคลุมพื้นที่ได้มากแต่ใช้พลังงานสูง ซึ่งใช้กระบวนการปัวซง (Poisson-Process) ในการสุ่มผู้ใช้งานที่เข้ามาใหม่ในเซลล์ จำลองสถานการณ์โดยผู้ใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่มีการรับส่งข้อมูลทั้งแบบเวลาจริงและไม่ใช่เวลาจริง ซึ่งจะพิจารณาจากความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับและแอปพลิเคชันที่ใช้โดยเมื่อเข้าสู่กระบวนการประหยัดพลังงานแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าสามารถสามารถลดการเปลี่ยนช่องสัญญาณได้ ถือว่าเป็นการประหยัดพลังงานอีกวิธีหนึ่ง [4] นำเสนอเทคนิคกระบวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณจากมาโครเซลล์ไปยังเฟมโตเซลล์ด้วยการผสมสผานกันระหว่างเทคนิคการเปลี่ยนช่องสัญญาณจากการพิจารณาด้วยค่าความแรงของสัญญาณ (RSS) กับการจัดลำดับชั้นในการตัดสินใจที่จะเปลี่ยนช่องสัญญาณโดยเรียกเป็นเทคนิคนี้ว่าเทคนิคความแรงของสัญญาณแอลฟ่า (RSS-α) โดยพบว่าหากทำการเปลี่ยนช่องสัญญาณด้วยเทคนิคนี้จะสามารถลดการเปลี่ยนช่องสัญญาณที่ไม่จำเป็นลงได้ [5] นำเสนอการจำลองติดตั้งสถานีฐานเฟมโตเซลล์ภายในสถานีฐานแบบมาโครเซลล์ด้วยสถาปัตยกรรมระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่แอลทีอี (Long Term Evolution : LTE) และพิจารณาตัดสินใจเพื่อเปลี่ยนช่องสัญญาณโดยประกอบไปด้วยค่าความแรงของสัญญาณ ความเร็วของผู้ใช้งาน ประเภทการส่งข้อมูลและแบนด์วิดท์ ผลสรุปว่าเมื่อมีการนำเอาพารามิเตอร์ดังกล่าวมาใช้ในกระบวนการตัดสินใจเปลี่ยนช่องสัญญาณของระบบสามารถลดการเปลี่ยนช่องสัญญาณที่ไม่จำเป็นลงได้และ

ลดอัตราการส่งข้อมูลขาดหายอีกด้วย ซึ่งใน [6] นำเสนอการจำลองแบบเดียวกันแต่เลือกใช้สถาปัตยกรรมระบบเครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.16e หรือนิยมเรียกกันว่า วายแม็กซ์ (Worldwide Interoperability of Microwave Access : WiMAX) ในการตัดสินใจเปลี่ยนช่องสัญญาณ พบว่าเมื่อนำเฟมโตเซลล์มาใช้ร่วมกับมาโครเซลล์ จะทำให้ค่าเฉลี่ยของปริมาณงาน (Average Throughput) เพิ่มขึ้น และค่าเฉลี่ยอัตราการส่งข้อมูลขาดหายลดลง นอกจากนี้พบว่าตำแหน่งการจัดวางของเฟมโตเซลล์มีผลต่อประสิทธิภาพในการตัดสินใจเปลี่ยนช่องสัญญาณ เนื่องจากเกิดสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น ที่ระยะห่างระหว่างเฟมโตเซลล์ 25 เมตรและ 50 เมตร มีการกวนกันของสัญญาณเกิดขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดปรากฏการณ์เปลี่ยนช่องสัญญาณกลับไปกลับมา (Ping-Pong Effect) ได้ ดังนั้นควรมีการออกแบบตำแหน่งการติดตั้งให้เหมาะสม ใน [7] และ [8] ได้ทำการออกแบบระบบจำลองที่ประกอบไปด้วยเฟมโตเซลล์และมาโครเซลล์ ให้เฟมโตเซลล์ติดตั้งอยู่ภายในอาคารและมาโครเซลล์อยู่ภายนอกอาคาร ทำการปรับค่ากำลังส่งของเฟมโตเซลล์และมาโครเซลล์เพื่อไม่ให้เกิดการกวนกันของทั้งสองเซลล์หรือแม้กระทั่งเฟมโตเซลล์ด้วยกันเอง พบว่าที่สภาพแวดล้อมภายในอาคารมีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นน้อยลงและผู้ใช้งานได้รับเสียงและข้อมูลที่มีคุณภาพมากขึ้น เมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิมที่ไม่ได้ทำการควบคุมกำลังส่ง [9] นำเสนอวิธีการตัดสินใจในการเปลี่ยนช่องสัญญาณจากการกำหนดค่าเทรชโฮลจำนวน 2 ค่า โดยเทรชโฮลค่าแรกมาจากค่าพลังงานที่ต่ำที่สุดที่ยังสามารถทำการเปลี่ยนช่องสัญญาณไปยังสถานีปลายทางเฟมโตเซลล์ได้ และเทรชโฮลค่าที่สองเกิดจากการเปรียบเทียบค่าความต่างของพลังงานสถานีต้นทางและปลายทาง เมื่อใช้ค่าเทรชโฮลดังกล่าว สามารถลดการเปลี่ยนช่องสัญญาณที่ไม่จำเป็นลงได้บางส่วน ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณน้อยลงด้วย

ตามที่ได้ทำการศึกษางานวิจัยดังกล่าวข้างต้นพบว่า การทำงานร่วมกันของเฟมโตเซลล์และมาโครเซลล์สามารถทำให้ผู้ใช้งานได้รับคุณภาพของสัญญาณที่ดีมากขึ้นและยังสามารถลดการใช้พลังงานได้สองรูปแบบคือ ลดการใช้พลังงานจากการเปลี่ยนช่องสัญญาณที่ไม่จำเป็นและลดการใช้พลังงานจากกำลังส่งของสถานีฐาน ทั้งนี้เป็นการรวมกันของสถาปัตยกรรมแบบเดียวกันในระบบเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ทั้งสิ้น ซึ่งมีความต่างกันเพียงขนาดเซลล์เท่านั้น จึงเป็นที่มาของการศึกษาเพื่อออกแบบระบบจำลองการทำงานร่วมกันของสถาปัตยกรรมที่ต่างกัน โดยอาศัยหลักการรวมกันของเซลล์ที่มีขนาดต่างกัน ทำให้รองรับการทำงานทั้งสถาปัตยกรรมเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือที่เรามักเรียกกันว่าระบบเซลลูล่าร์และสถาปัตยกรรมเครือข่ายไร้สาย

2.2 วิวัฒนาการของการสื่อสารแต่ละยุค

2.2.1 การสื่อสารในยุคที่ 1

เป็นยุคแรก (First Generation : 1G) ที่มีการเกิดขึ้นของโทรศัพท์มือถือด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแอนะล็อก ที่ใช้สัญญาณวิทยุในการส่งคลื่นเสียง ใช้ระบบพื้นฐานการส่งสัญญาณแบบการเข้าถึงหลากหลายแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access : FDMA) หลักการทำงานจะเป็นการการแบ่งช่องความถี่ออกเป็นความถี่ย่อย จำนวนหลายช่องด้วยความถี่ที่ 824 - 894 เมกะเฮิรตซ์ และใช้สัญญาณวิทยุในการส่งคลื่นเสียงไปยังสถานีรับส่งสัญญาณ หนึ่งคลื่นความถี่เท่ากับหนึ่งช่องสัญญาณ ผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ในเวลานั้นจะสามารถใช้การบริการโทรศัพท์ได้เฉพาะในช่องความถี่ที่ว่างอยู่ [10] โดยการสื่อสารในยุคนี้ รองรับการสื่อสารด้วยเสียง (Voice) เพียงอย่างเดียว นั่นก็คือ การโทรออก และรับสายเท่านั้น ไม่มีการรองรับการใช้งานด้านข้อมูล (Data) ใดๆ ทั้งสิ้น นอกจากนี้โทรศัพท์มือถือยังมีขนาดที่ใหญ่มาก ใช้กำลังไฟมาก ปริมาณผู้ใช้โทรศัพท์มือถือยังอยู่ในขอบเขตที่จำกัด ยังไม่มีระบบรักษาความปลอดภัยทำให้เกิดการดักฟังได้ง่ายและยังมีราคาที่สูงมาก พบว่าผู้ใช้งานมักจะเป็นนักธุรกิจที่มีรายได้สูงเสียส่วนใหญ่ ทำให้เกิดการพัฒนาเข้าสู่ยุคต่อไป

ภาพประกอบ 1 ตัวอย่างโทรศัพท์มือถือในยุคแรก

ที่มา: 1to4generation.blogspot. วิวัฒนาการของเทคโนโลยีจาก 1G สู่ 4G LTE. 2014. [11]

2.2.2 การสื่อสารในยุคที่ 2

พอมาถึงในยุคที่สอง (Second Generation : 2G) เป็นยุคที่เริ่มมีการพัฒนาจากเทคโนโลยีการสื่อสารแบบแอนะล็อกไปเป็นเทคโนโนยีการสื่อสารแบบดิจิทัล โดยการเข้ารหัส ด้วยการส่งคลื่นเสียงมาทางคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะช่วยในเรื่องของความปลอดภัยในการใช้งานมากยิ่งขึ้น และช่วยในเรื่องของสัญญาณเสียงที่ใช้ติดต่อสื่อสารให้มีความคมชัดมากขึ้นด้วย เทคโนโลยีการเข้าถึงช่องสัญญาณของผู้ใช้เป็นลักษณะเชิงผสมระหว่างการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่(FDMA) และการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access : TDMA) เป็นการเพิ่มช่องทางการสื่อสารสามารถรองรับผู้ใช้งานปริมาณมากขึ้น อีกทั้งยังรองรับการใช้งานด้านข้อมูลด้วยบริการส่งข้อความสั้น (Short Message Service : SMS) ได้อีกด้วย จึงถือว่ายุคนี้เป็นยุคเฟื่องฟูของวงการโทรศัพท์มือถือ ผู้คนหันมาใช้โทรศัพท์มือถือกันมากขึ้น ทำให้เกิดการแข่งขันกันการตลาดที่สูงขึ้นด้วย จึงทำให้โทรศัพท์มือถือมีราคาที่ถูกลง นอกจากการใช้งานด้านข้อมูลด้วย SMS ที่เพิ่มเข้ามาแล้วนั้น เรายังสามารถแบ่งยุค 2G ออกได้อีก 2 ช่วงคือ 2.5G และ 2.75G โดยในช่วงยุค 2.5G ได้ถือกำเนิด บริการส่งข้อมูลสำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จีเอสเอ็ม (Global System for Mobile communications : GSM) โดยเทคนิคแบ่งกลุ่มข้อมูลหรือแพกเกตหรือเรียกสั้นๆ ว่า จีพีอาร์เอส (General Packet Radio Service : GPRS) ซึ่งพัฒนาในเรื่องของการรับส่งข้อมูลที่มากขึ้น ด้วยความเร็วสูงสุดถึง 115 กิโลบิตต่อวินาที (แต่ถูกจำกัดการใช้งานจริงอยู่ที่ 40 กิโลบิตต่อวินาที) สิ่งที่เราจะเห็นได้ชัดถึงการเปลี่ยนแปลงในยุคนี้ก็คือ โทรศัพท์มือถือได้เพิ่มองค์ประกอบการรับส่งข้อมูลในส่วนของสื่อประสมขนาดเล็กหรือที่เรียกกันว่า ข้อความมัลติมีเดีย (Multimedia Messaging Service : MMS) หน้าจอโทรศัพท์เริ่มเข้าสู่ยุคหน้าจอสี และเสียงเรียกเข้าก็ถูกพัฒนาให้เป็นเสียงแบบหลากหลาย (Polyphonic) จากของเดิมที่เป็นแบบเสียงเดียว (Monotone) และในช่วงสุดท้ายคือช่วงยุค 2.75G ซึ่งยุคนี้เป็นยุคของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จีเอสเอ็มชนิดวิวัฒนาการเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลหรือเรียกสั้นๆ ว่า เอจ (Enhanced Data rates for Global Evolution : EDGE) ที่พัฒนาต่อยอดมาจากจีพีอาร์เอส และในปัจจุบันนี้เราก็ยังคงได้ยินและมีการใช้เทคโนโลยีนี้กันอยู่ ซึ่งได้พัฒนาในเรื่องของความเร็วในการรับส่งข้อมูลไร้สายด้วย

ภาพประกอบ 2 ตัวอย่างการสื่อสารในยุคที่ 2

ที่มา: telecom10.blogspot. 2G : Second Generation. 2014. [12]

2.2.3 การสื่อสารในยุคที่ 3

การสื่อสารในยุคที่ 3 (Third Generation : 3G) ถือเป็นอีกหนึ่งการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของการสื่อสาร เรียกได้ว่าโทรศัพท์มือถือเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของเรา สิ่งที่พัฒนาเพิ่มมาจาก 2G นั้นคือความสามารถในการออนไลน์ตลอดเวลา (Always On) ก็จะเท่ากับโทรศัพท์ของคุณจะมีการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตอยู่ตลอดเวลา ซึ่งการเสียค่าบริการแบบนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเรียกใช้ข้อมูลผ่านเครือข่ายเท่านั้น และแน่นอนว่าสามารถรองรับการใช้งานด้านมัลติมีเดียอื่นๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่น โทรศัพท์ทางไกลผ่านอินเทอร์เน็ต (Voice Over IP) การคุยแบบเห็นหน้า (Video Call) การประชุมทางไกล (Video Conference) การดูทีวีและดูวีดีโอออนไลน์ (Streaming) และการเล่นเกมออนไลน์ (Online Gaming) เป็นต้น สำหรับประเทศไทยได้นำเทคโนโลยีระบบสื่อสารโทรคมนาคมไร้สายสากล ยูเอ็มทีเอส (Universal Mobile Telecommunications System : UMTS) มาใช้ ซึ่งเป็นระบบเครือข่ายมาตรฐานใหม่ที่ถูกพัฒนามาจากระบบมาตรฐานคลื่นความถี่จีเอสเอ็มที่มีเทคโนโลยีหลักมาจากการใช้แถบความถี่กว้างการร่วมกับช่องสัญญาณแบบแบ่งรหัสดับเบิลยูซีดีเอ็มเอ (Wideband Code Division Multiple Access : WCDMA) ต่อมาได้ถูกพัฒนาให้เป็นเทคโนโลยีการเข้าถึงแพคเกตความเร็วสูง (Evolved

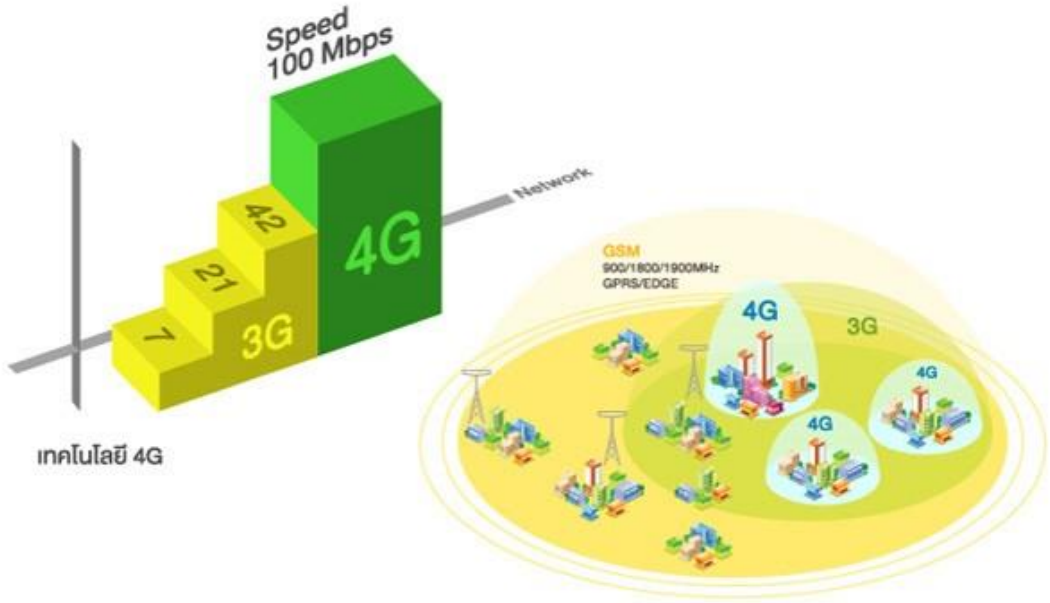
High Speed Packet Access : HSPA+) ที่สามารถรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดถึง 42 เมกะบิตต่อวินาที [12]

ภาพประกอบ 3 ตัวอย่างการสื่อสารในยุคที่ 3

ที่มา : GSMARENA. Apple iPhone 3G. 2008. [13]

2.2.4 การสื่อสารในยุคที่ 4

การเข้ามาสู่ยุคที่ 4 (Fourth Generation : 4G) ของการสื่อสารนั้น เป็นการพัฒนาในด้านความเร็วในการรับส่งข้อมูลและยังพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อลดปัญหาสัญญาณขัดข้องหรือภาพกระตุก เป็นต้น สำหรับเทคโนโลยีที่ใช้ในยุค 4G นี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบด้วยกันคือวายแม็กซ์และแอลทีอี ซึ่งทั้งสองระบบนี้ เป็นเทคโนโลยีไร้สายที่มาช่วยในเรื่องของการรับส่งข้อมูลให้เร็วขึ้นกว่าในยุคก่อนๆ โดยในส่วนของวายแม็กซ์นั้น นิยมใช้แค่ในบางประเทศ เช่น ญี่ปุ่น, ไต้หวัน, บังคลาเทศ ซึ่งแอลทีอีนั้นเป็นที่นิยมใช้มากกว่า รวมถึงในประเทศไทยก็ใช้เทคโนโลยีแอลทีอีเช่นกัน สถาปัตยกรรมแนวคิดการพัฒนาแอลทีอีนั้นถูกสร้างอยู่บนพื้นฐานของเทคโนโลยีก่อนหน้า โดยเพิ่มความเร็วในการรับส่งข้อมูล การดาวน์โหลดและอัพโหลด (Download/Upload) และลดค่าความหน่วงเวลา (Latency) ทำให้ไม่เกิดความล่าช้าหรือหน่วงเวลามากนักทำให้ผู้ใช้บริการจะได้บริการที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ [13]



ภาพประกอบ 4 ตัวอย่างการสื่อสารในยุคที่ 4

ที่มา: Ketwarinravipa. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ 3G และ 4G. 2013. [14]

2.2.5 การสื่อสารในยุคที่ 5

เราได้ก้าวเข้ามาสู่การสื่อสารในยุคที่ 5 (Fifth Generation : 5G) ซึ่งจะเป็นยุคแห่งข้อมูล โดยจะไม่ได้จำกัดแค่การใช้งานกับอุปกรณ์สมาร์ตโฟน แท็บเล็ต หรือคอมพิวเตอร์ แต่จะหมายถึง อุปกรณ์ในยุคนี้ทั้งหมด จะถูกเปลี่ยนแปลงให้รองรับการใช้งานข้อมูล ซึ่งจะช่วยอำนวยความสะดวกสบายในการใช้ชีวิตเพิ่มขึ้นอย่างมาก เรียกได้ว่าเป็นยุคแห่งอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Thing : IOT) และเมื่ออุปกรณ์ต่างๆ สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตได้ จึงเกิดเป็นศูนย์รวมข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) และนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) โดยมีเทคโนโลยีพื้นฐานคือระบบสื่อสารไร้สายแบบหลากหลายสัญญาณส่งและรับ (Multiple Input Multiple Output : MIMO) ซึ่งทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงกว่า 4G มีความแรงและเร็วกว่า ถึง 20 เท่า รองรับผู้ใช้งานได้มากขึ้น 10 เท่า การตอบสนองไวขึ้น ความไวระดับ 1 ใน 1000 วินาที เรียกได้ว่าแทบจะทันทีที่เรามีการสั่งงานลงไป อุปกรณ์ที่รับคำสั่งจะสามารถตอบสนองเราได้โดยไม่รู้สึกถึงความหน่วงเลย [15]

ภาพประกอบ 5 ตัวอย่างการสื่อสารในยุคที่ 5

ที่มา: DIGIBYTE. International workshop on future 5G standards and spectrum. 2015. [16]

2.3 คุณลักษณะของเซลล์

2.3.1 เฟมโตเซลล์ (Femtocell)

เฟมโตเซลล์เป็นสถานีฐานขนาดเล็ก เหมาะแก่การใช้งานสำหรับพื้นที่ในร่ม ยกตัวอย่างเช่น ติดตั้งภายในบ้าน สำนักงานขนาดเล็ก เป็นต้น คุณลักษณะของเฟมโตเซลล์จะเป็นการรับส่งสัญญาณด้วยกำลังส่งต่ำและสามารถรองรับแบนด์วิดท์ได้สูง ครอบคลุมพื้นที่แค่ในบริเวณไม่มาก ใช้ต้นทุนต่ำในการติดตั้ง อีกทั้งยังมีฟังก์ชันการทำงานแบบแบคฮอล์ปัจจุบันเฟมโตเซลล์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นำมาใช้เพื่อแก้เพิ่มประสิทธิภาพการปรับแต่งเพื่อให้ครอบคลุมสัญญาณ รวมไปถึงการป้องกันสัญญาณรบกวนอีกด้วย

2.3.2 ฟิโคเซลล์ (Picocell)

ฟิโคเซลล์จัดเป็นสถานีฐานขนาดเล็กเช่นเดียวกันกับเฟมโตเซลล์ แต่สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่าเฟมโตเซลล์ และเหมาะแก่การใช้งานสำหรับพื้นที่ในร่มที่มีจำนวนผู้ใช้งานอยู่อย่างหนาแน่น เช่น ห้างสรรพสินค้า สนามบิน หรือพื้นที่ปิดที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น ซึ่งฟิโคเซลล์สามารถรองรับผู้ใช้งานสูงสุดได้ถึง 100 คนในเวลาเดียวกันได้เลยทีเดียว

2.3.3 **ไมโครเซลล์** (Microcell)

ไมโครเซลล์ครอบคลุมพื้นที่ใช้งานมากที่สุดในบรรดาเซลล์ขนาดเล็กทั้งหมด เน้นใช้งานกลางแจ้งหรือพื้นที่สาธารณะ มีต้นทุนในการติดตั้งที่สูงกว่าเฟมโตเซลล์และฟิโคเซลล์ มักถูกติดตั้งโดยผู้ให้บริการโทรศัพท์ (Operator) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณ ในขณะเดียวกันยังสามารถรองรับผู้ใช้งานได้มากถึง 1000 คนอีกด้วย

2.3.4 **มาโครเซลล์** (Macrocell)

มาโครเซลล์เป็นสถานีฐานขนาดใหญ่ ครอบคลุมพื้นที่หลายกิโลเมตร ใช้กำลังส่งสูงในการรับส่งสัญญาณและมีความสามารถรองรับแบนด์วิดท์ได้ต่ำ มักพบได้ในพื้นที่ชนบทหรือตามทางหลวง มีต้นทุนในการติดตั้งที่สูงมาก [14]

จากคุณลักษณะของเซลล์แต่ละชนิดที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าเฟมโตเซลล์เป็นสถานีฐานขนาดเล็กที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด อีกทั้งยังสามารถติดตั้งได้ง่ายด้วยตัวเอง เมื่อเปรียบเทียบกันกับสถานีฐานแบบฟิโคเซลล์และไมโครเซลล์ที่เป็นสถานีฐานขนาดเล็กด้วยกัน เราจึงเลือกศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างสถานีฐานเฟมโตเซลล์ที่เป็นสถานีฐานขนาดเล็กแทนพื้นที่ในร่มและสถานีฐานมาโครเซลล์ที่เป็นสถานีฐานขนาดใหญ่ที่มีการติดตั้งและใช้งานเดิมอยู่แล้วในปัจจุบันแทนพื้นที่กลางแจ้ง

2.4 การเปลี่ยนช่องสัญญาณ

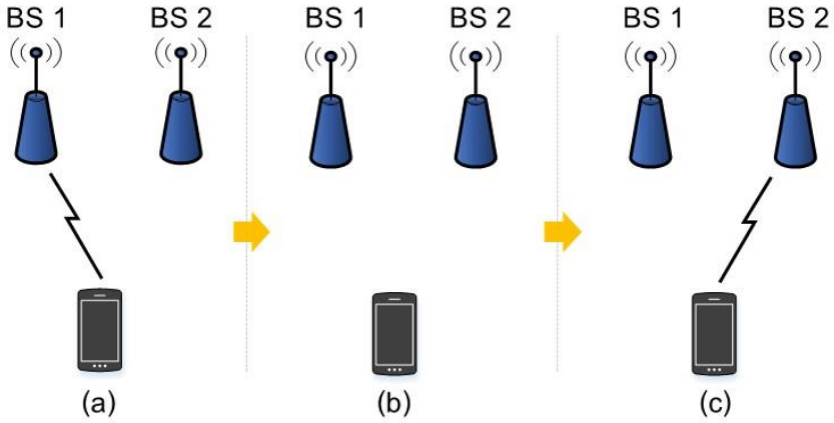
การเปลี่ยนช่องสัญญาณหรือที่เราเรียกกันว่าการแฮนด์โอเวอร์นั้น คือการการส่งต่อบริการสื่อสารจากสถานีฐานหนึ่งไปยังอีกสถานีฐานหนึ่ง ในกรณีที่ผู้ใช้บริการเคลื่อนที่ข้ามพื้นที่บริการหรืออยู่ในพื้นที่รับสัญญาณได้จากหลายสถานี สามารถศึกษาชนิดของการเปลี่ยนช่องสัญญาณและวิธีการเปลี่ยนช่องสัญญาณได้ดังต่อไปนี้

2.4.1 ชนิดของการเปลี่ยนช่องสัญญาณ

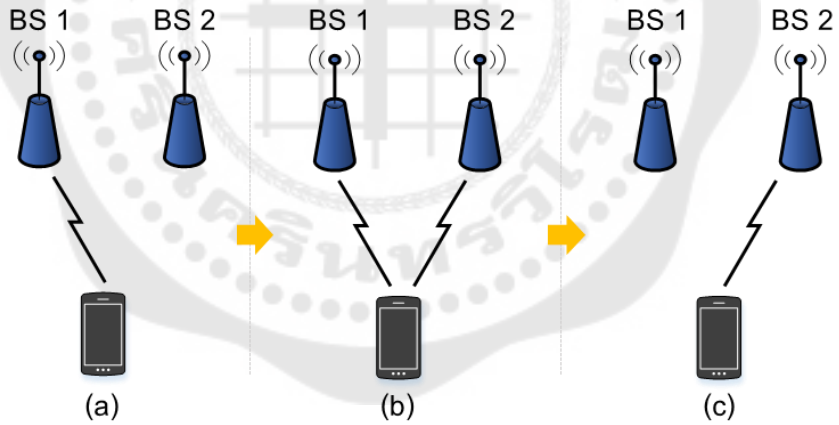
การเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวนอน (Horizontal Handover)

การเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวนอน สามารถอธิบายให้เข้าใจได้ง่ายว่าเป็นการเปลี่ยนช่องสัญญาณจากเซลล์เดิมไปยังเซลล์ปลายทาง โดยที่เซลล์ทั้งสองต้องเป็นเซลล์ชนิดเดียวกันหรือเป็นการเปลี่ยนช่องสัญญาณภายในเครือข่ายเดียวกันนั่นเอง โดยการเปลี่ยนช่องสัญญาณนั้นๆ หากมีการตัดขาดจากช่องสัญญาณเดิมก่อนแล้วจึงเชื่อมต่อเข้ากับช่องสัญญาณปลายทาง เราเรียกว่า ฮาร์ดแฮนด์โอเวอร์ (Hard- Handover : HHO) ซึ่งวิธีนี้อาจทำให้เกิดการที่สายหลุด (Drop Call) ได้ แสดงดังภาพประกอบ 6 ดังนั้นจึงควรมีการเชื่อมต่อกับ

ช่องสัญญาณปลายทางก่อนแล้วจึงตัดขาดจากช่องสัญญาณเดิมเราเรียกว่า ซอฟต์แฮนด์โอเวอร์ (Soft-Handover : SHO) แสดงดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 6 ฮาร์ดแฮนด์โอเวอร์ (a) โทรศัพท์เชื่อมต่ออยู่กับสถานีฐานที่ 1 (b) โทรศัพท์ตัดขาดการเชื่อมต่อจากสถานีฐานที่ 1 (c) โทรศัพท์เชื่อมต่อกับสถานีฐานที่ 2

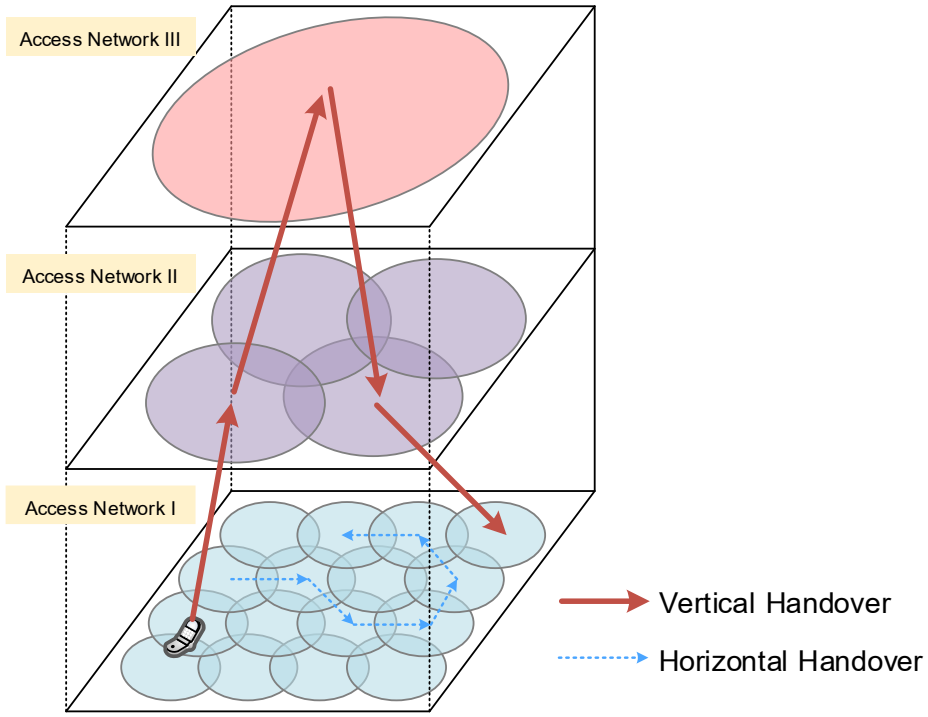


ภาพประกอบ 7 ซอฟต์แฮนด์โอเวอร์ (a) โทรศัพท์เชื่อมต่ออยู่กับสถานีฐานที่ 1 (b) โทรศัพท์เชื่อมต่อกับสถานีฐานที่ 2 (c) โทรศัพท์ตัดขาดการเชื่อมต่อจากสถานีฐานที่ 1

การเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวตั้ง (Vertical Handover)

การเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวตั้ง เป็นการเปลี่ยนช่องสัญญาณจากเซลล์เดิมไปยังเซลล์ปลายทาง โดยที่เซลล์ทั้งสองเป็นเซลล์คนละชนิดกันหรือสามารถอธิบายได้อีกอย่างหนึ่งว่า เป็นการเปลี่ยนช่องสัญญาณระหว่างเครือข่ายที่ต่างชนิดกัน หากเป็นการย้ายจากเซลล์เดิมไป

ยังเซลล์ปลายทางที่มีขนาดใหญ่กว่า เรามักเรียกการเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวตั้งนี้ว่า การเปลี่ยนช่องสัญญาณขึ้นข้างบน (Upward Handover) ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนช่องสัญญาณจากระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) ไปยังเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Cellular Network) เป็นต้น ในทางกลับกัน หากเป็นการย้ายจากเซลล์เดิมไปยังเซลล์ปลายทางที่มีขนาดเล็กกว่า เรามักเรียกการเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวตั้งนี้ว่า การเปลี่ยนช่องสัญญาณลงล่าง (Downward Handover) ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนช่องสัญญาณจากเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังระบบเครือข่ายไร้สาย เป็นต้น แสดงการเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวตั้งเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนช่อง สัญญาณแบบแนวนอนดังภาพประกอบ 8



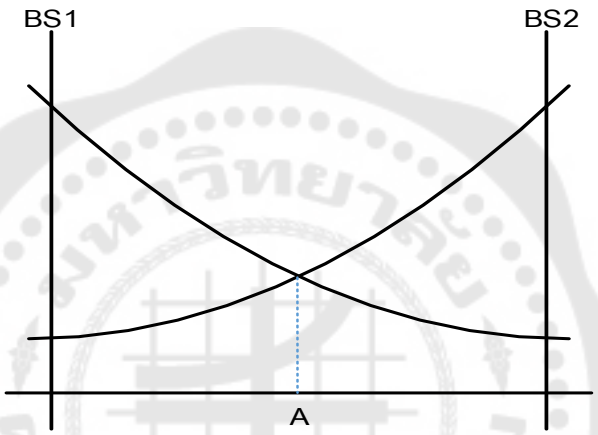
ภาพประกอบ 8 ตัวอย่างการเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวตั้งเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวนอน

ที่มา: Ahmed A, Merghem-Boulahia L, Gaiti D. An intelligent agent-based scheme for vertical handover management across heterogeneous networks. Annales des Télécommunications. 2011;66:583-602. [17]

2.4.2 วิธีการเปลี่ยนช่องสัญญาณ

วิธีการแบบค่าความแรงของสัญญาณสัมพันธ์

วิธีการแบบค่าความแรงของสัญญาณสัมพันธ์ (Relative Signal Strength) คือ การใช้ค่าความแรงของสัญญาณ (Received Signal Strength : RSS) เป็นตัวบ่งชี้สำคัญในการตัดสินใจเปลี่ยนช่องสัญญาณ โดยทำการเปลี่ยนช่องสัญญาณทุกครั้งที่พบว่าสถานีปลายทางมีค่าความแรงของสัญญาณที่มากกว่า ทำให้วิธีการนี้เกิดการเปลี่ยนช่องสัญญาณที่ไม่จำเป็นขึ้นจำนวนมาก

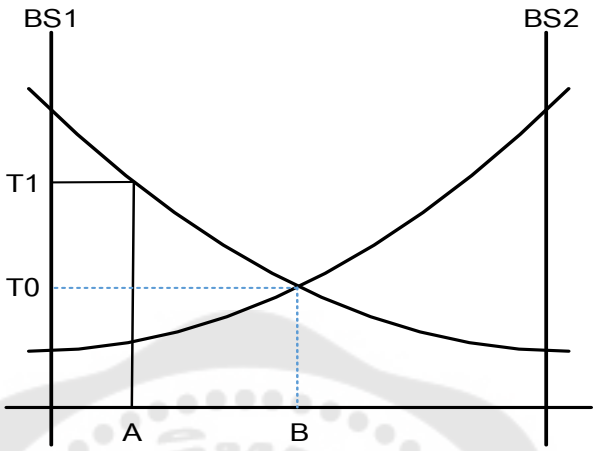


ภาพประกอบ 9 วิธีการแบบค่าความแรงของสัญญาณสัมพันธ์

วิธีการแบบค่าความแรงของสัญญาณสัมพันธ์กับค่าเทรชโฮล

วิธีการแบบค่าความแรงของสัญญาณสัมพันธ์กับค่าเทรชโฮล (Relative Signal Strength with Threshold : RSS+T) เป็นการใช้ค่าความแรงของสัญญาณ (Received Signal Strength : RSS) ร่วมกับค่าเทรชโฮลที่กำหนดในระบบนั้นๆ เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนช่องสัญญาณ ซึ่งหมายความว่า นอกจากค่าความแรงของสัญญาณแล้ว ค่าความแรงของสัญญาณที่สถานีตั้งต้นต้องมีค่าน้อยกว่าค่าเทรชโฮลด้วย ถึงจะอนุญาตให้ทำการเปลี่ยนช่องสัญญาณไปยังสถานีปลายทางได้ จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าเทรชโฮลให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ยกตัวอย่างดังภาพประกอบที่ 10 หากกำหนดค่าเทรชโฮลไว้ที่ T1 เมื่อผู้ใช้งานอยู่ที่ตำแหน่ง A จะต้องไม่มีการเปลี่ยนช่องสัญญาณเกิดขึ้น เนื่องจากว่าค่าความแรงของสัญญาณสถานีต้นทางมีค่ามากกว่าสถานีปลายทางแม้ว่าจะถึงเกณฑ์ของเทรชโฮลที่กำหนดไว้แล้วก็ตาม และหากกำหนดค่าเทรชโฮลไว้ที่ T0 เมื่อผู้ใช้งานอยู่ที่ตำแหน่ง B ระบบจะต้องทำการตรวจสอบค่าความแรงของสัญญาณหาก

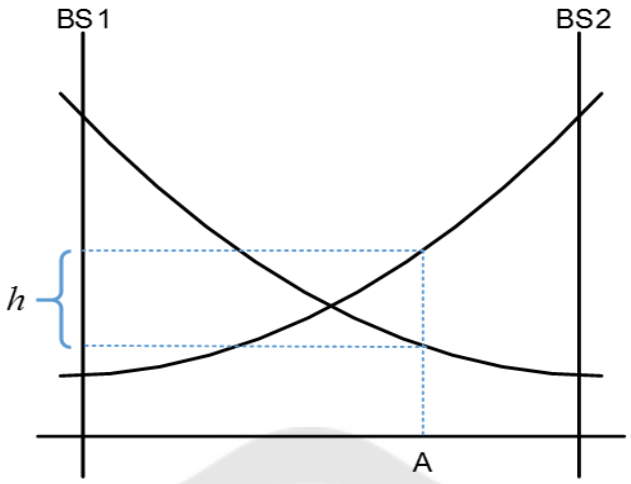
พบว่าสถานีปลายทางมีค่าความแรงของสัญญาณมากกว่าจะอนุญาตให้ทำการเปลี่ยนช่องสัญญาณได้



ภาพประกอบ 10 วิธีการแบบค่าความแรงของสัญญาณสัมพันธ์กับค่าเทรชโฮล

วิธีการแบบค่าความแรงของสัญญาณสัมพันธ์กับค่าฮีสเตอรีซีส

ฮีสเตอรีซีส (Hysteresis) เป็นหนึ่งวิธีการที่เข้ามาช่วยตัดสินใจที่จะเปลี่ยนช่องสัญญาณ โดยการใช้การเปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณของทั้งสถานีต้นทางและปลายทาง เมื่อถึงเกณฑ์ค่าความต่างระหว่างสองสถานีฐาน (Hysteresis Margin) ที่กำหนดไว้แล้วนั้น จึงอนุญาตให้มีการเปลี่ยนช่องสัญญาณไปยังสถานีปลายทางได้ โดยวิธีการฮีสเตอรีซีสนี้สามารถลดปรากฏการณ์การเปลี่ยนช่องสัญญาณกลับไปกลับมา (Ping-Pong Effect) เนื่องจากมีการตรวจสอบให้แน่ใจแล้วว่าสถานีปลายทางมีคุณภาพสัญญาณที่ดีมากพอที่จะสามารถเปลี่ยนช่องสัญญาณได้สำเร็จ



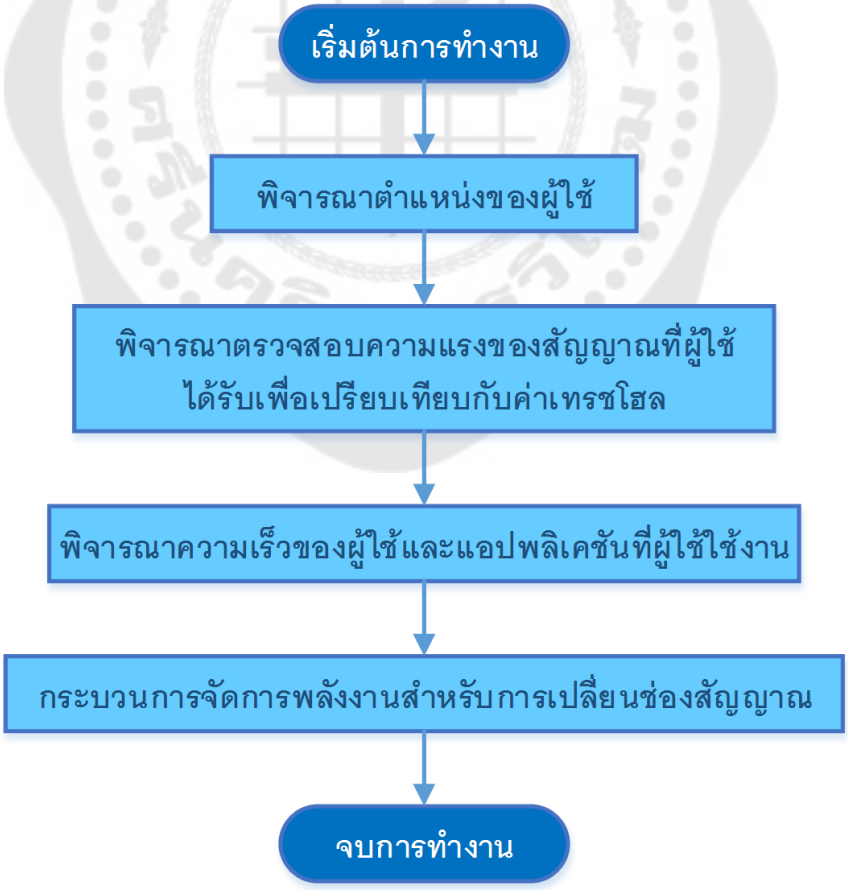
ภาพประกอบ 11 วิธีการแบบค่าความแรงของสัญญาณสัมพันธ์กับค่าฮีสเตอรีซีส

ซึ่งในการออกแบบระบบของวิธีที่นำเสนอ จะประกอบไปด้วยการเปลี่ยนช่องสัญญาณทั้งสองชนิด โดยการเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวนอนจะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนช่องสัญญาณระหว่างสถานีฐานแบบเฟมโตเซลล์ด้วยกันเองที่ใช้เครือข่ายเดียวกัน และการเปลี่ยนช่องสัญญาณแบบแนวตั้งจะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนช่องสัญญาณระหว่างสถานีฐานแบบเฟมโตเซลล์ไปยังมาโครเซลล์ หรือการเปลี่ยนช่องสัญญาณระหว่างสถานีฐานแบบมาโครเซลล์ไปยังเฟมโตเซลล์ที่ใช้เครือข่ายต่างกันนั่นเอง

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

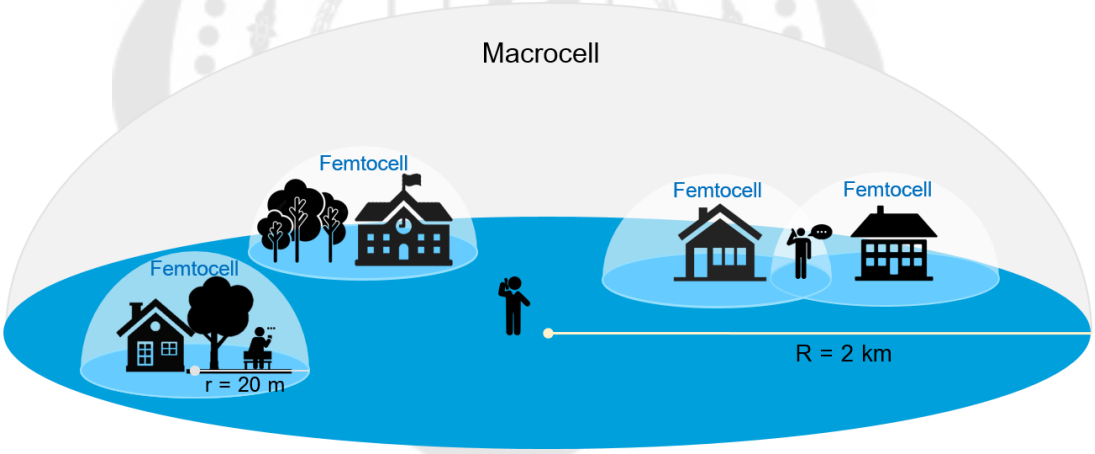
การออกแบบระบบโครงข่ายในงานสื่อสารมักจะคำนึงถึงคุณภาพของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับ (Quality of Services: QoS) เป็นหลัก และเพื่อให้บริการสัญญาณครอบคลุมทั่วทุกพื้นที่ จึงทำให้ผู้ประกอบการมีการออกแบบระบบโครงข่ายสื่อสารโดยไม่คำนึงถึงพลังงานที่ใช้มากนัก อีกทั้งยังมีการซ้อนทับกันเองของเซลล์สัญญาณในบางครั้ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนช่องสัญญาณโดยไม่จำเป็นและสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ จึงต้องมีการออกแบบระบบโครงข่ายสื่อสารให้มีความเหมาะสม ซึ่งเรานำเสนอระบบโครงข่ายสื่อสารที่มีการรวมกันของเฟมโตเซลล์และมาโครเซลล์ โดยพิจารณาตำแหน่งของผู้ใช้งาน ความเร็วของผู้ใช้งาน และความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับ เข้ามาช่วยในกระบวนการจัดการพลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณ



ภาพประกอบ 12 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 สถาปัตยกรรมของระบบ

สถาปัตยกรรมของระบบในงานวิจัยนี้ เสนอการออกแบบจำลองระบบที่เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างสถานีฐานมาโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ พิจารณาจากกำลังงานที่ส่งของแต่ละเครือข่ายและกำลังงานที่สูญเสียที่ขึ้นอยู่กับระยะทางที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของผู้ใช้ โดยกำหนดให้รัศมีของมาโครเซลล์เท่ากับ 2 กิโลเมตรด้วยเทคโนโลยีแอลทีอี และกำหนดให้รัศมีของเฟมโตเซลล์เท่ากับ 20 เมตรด้วยเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11ax หรือ ไว-ไฟ-ซิคส์ จำนวนมากกว่า 2 เซลล์ขึ้นไป และมีบางเซลล์เกิดการซ้อนทับกันบางส่วนร่วมด้วย ผู้ใช้งานอาจอยู่กับที่หรือสามารถเคลื่อนที่อิสระภายใต้ความครอบคลุมของมาโครเซลล์ และอาจมีการใช้งานแอปพลิเคชันที่แตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น การส่งจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Mail : E-mail) การสื่อสารทางเสียงผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (Voice over Internet Protocol : VoIP) วิดีโอตามความต้องการ (Video on Demand : VoD) หรือการถ่ายทอดสด (Live Streaming)



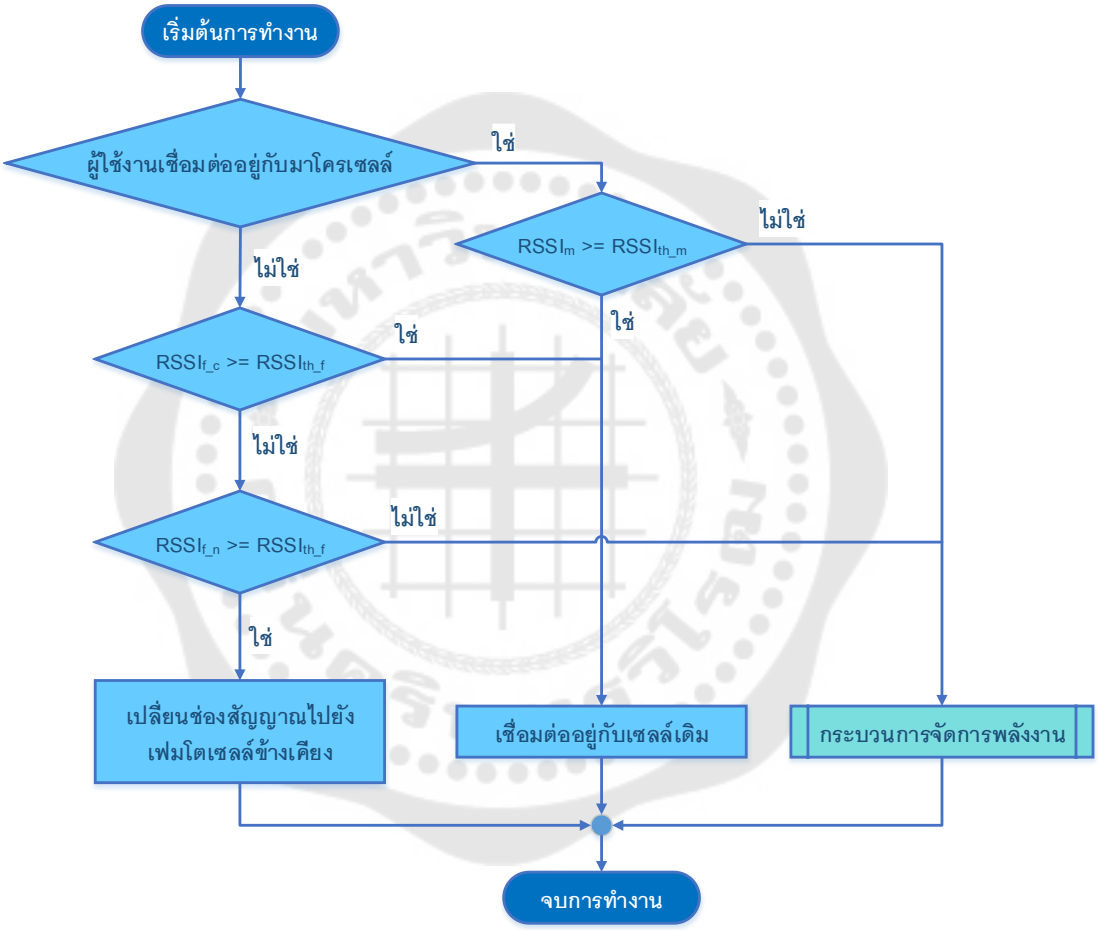
ภาพประกอบ 13 สถาปัตยกรรมของระบบ

3.3 กระบวนการการจัดการพลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณ

3.3.1 กระบวนการตัดสินใจเพื่อเข้าสู่การจัดการพลังงาน

เริ่มต้นจากการตรวจสอบผู้ใช้งานเชื่อมต่ออยู่กับมาโครเซลล์หรือเฟมโตเซลล์ และทำการเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับกับค่าความแรงของสัญญาณเทรชโฮลที่กำหนด หากพบว่าค่าความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าความแรงของสัญญาณเทรชโฮล จะยังคงอนุญาตให้เชื่อมต่อที่เซลล์เดิมได้ หากพบว่าค่าความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับมีค่าน้อยกว่าค่าความแรงของสัญญาณเทรชโฮลให้ทำการเข้าสู่กระบวนการจัด

การพลังงาน ในกรณีที่พบว่าค่าความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับจากเฟมโตเซลล์ปัจจุบัน $RSSI_{f_c}$ มีค่าน้อยกว่าค่าความแรงของสัญญาณเทรชโฮล $RSSI_{th_f}$ ให้ทำการตรวจสอบค่าความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับจากเฟมโตเซลล์ข้างเคียง $RSSI_{f_n}$ หากพบว่ามีค่ามากกว่าให้ทำการเปลี่ยนช่องสัญญาณไปยังเฟมโตเซลล์ข้างเคียงนั้นๆ หรือให้เข้าสู่กระบวนการจัดการพลังงานเมื่อพบว่าค่าความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับมีค่าน้อยกว่าค่าความแรงของสัญญาณเทรชโฮล $RSSI_{th_f}$

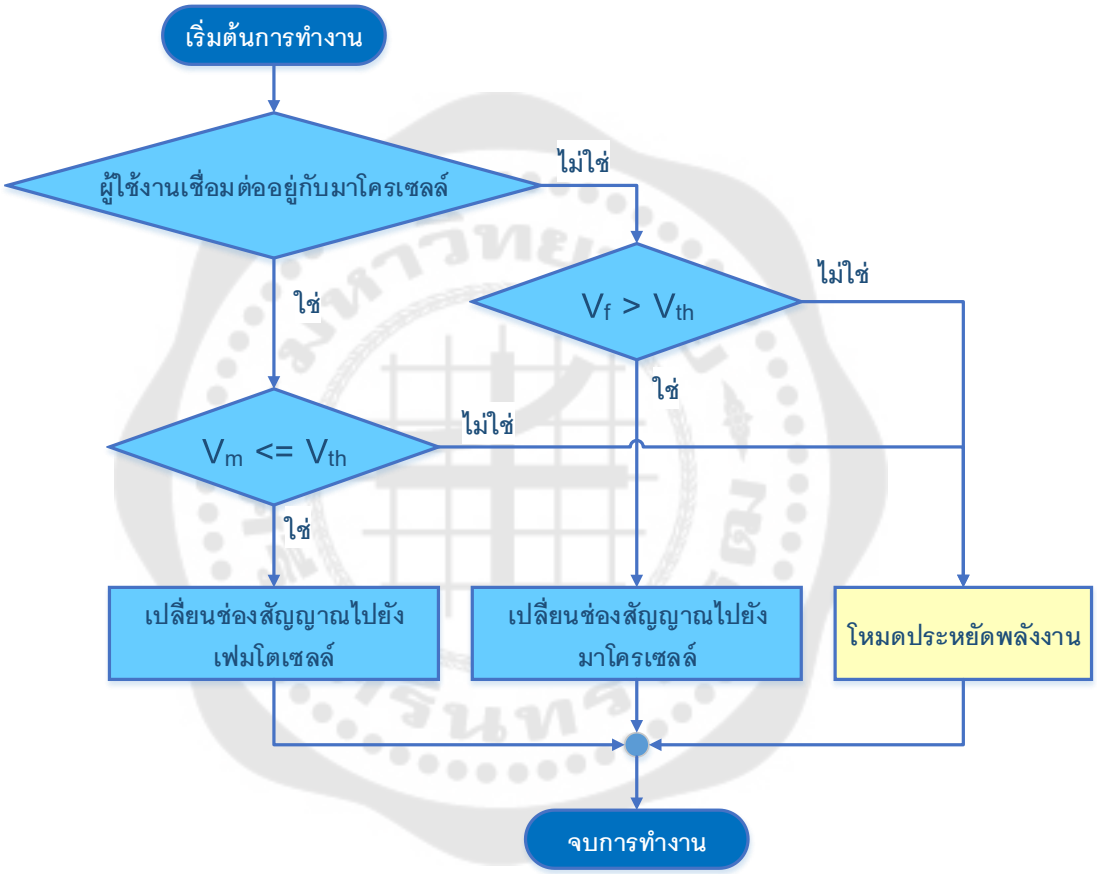


ภาพประกอบ 14 กระบวนการตัดสินใจเพื่อเข้าสู่การจัดการพลังงาน

3.3.2 การจัดการพลังงานสำหรับแอปพลิเคชันแบบเวลาจริง (Real-Time)

เมื่อเข้าสู่กระบวนการจัดการพลังงานแล้วนั้น ที่การใช้งานแอปพลิเคชันแบบเวลาจริงจะตรวจสอบว่าผู้ใช้งานเชื่อมต่ออยู่กับมาโครเซลล์หรือเฟมโตเซลล์ กรณีที่ผู้ใช้งานเชื่อมต่ออยู่กับมาโครเซลล์และพบว่าความเร็วของผู้ใช้งาน V_m น้อยกว่าหรือเท่ากับความเร็วเทรชโฮล V_{th} ให้ทำการเปลี่ยนช่องสัญญาณไปยังเฟมโตเซลล์ได้ ยิ่งมีการเปลี่ยนช่องสัญญาณจากมาโครเซลล์ไป

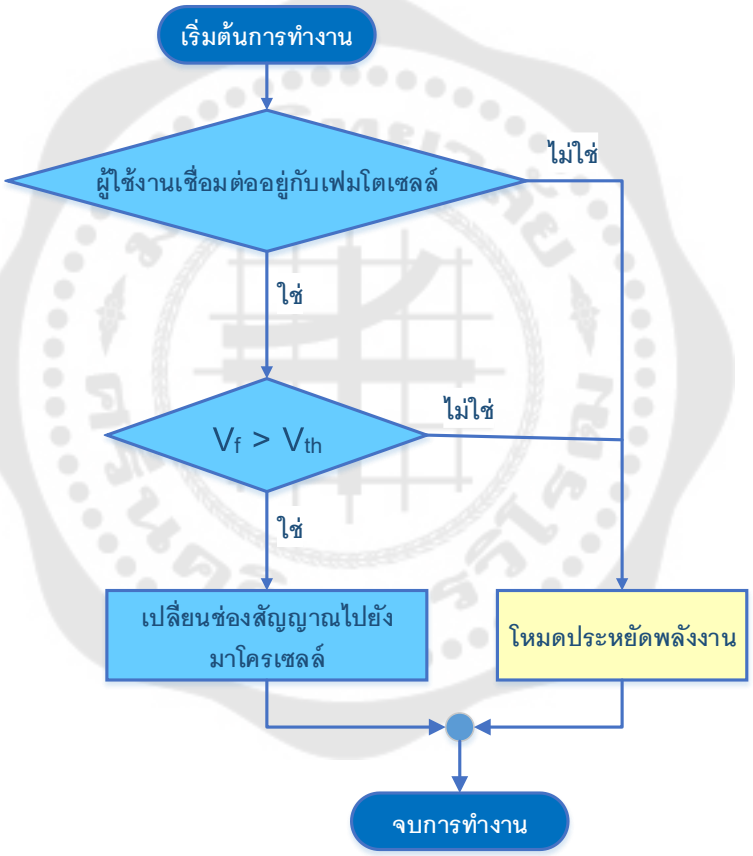
ยังเฟมโตเซลล์มาก ก็จะยิ่งประหยัดพลังงานได้มากขึ้น และหากพบว่าความเร็วของผู้ใช้งานมาโครเซลล์มีค่ามากกว่าความเร็วเทรชโฮลก็ให้ถือว่าเข้าสู่โหมดประหยัดพลังงานด้วย ในกรณีที่ผู้ใช้งานเชื่อมต่ออยู่กับเฟมโตเซลล์แล้วนั้น หากพบว่าค่าความเร็วของผู้ใช้งานมีค่ามากกว่าความเร็วเทรสโฮส ให้ทำการเปลี่ยนช่องสัญญาณจากเฟมโตเซลล์ไปยังมาโครเซลล์ และหากพบว่าค่าความเร็วของผู้ใช้งานมีค่าน้อยกว่าความเร็วเทรสโฮสให้ถือว่าเข้าสู่โหมดประหยัดพลังงานด้วยเช่นกัน



ภาพประกอบ 15 การจัดการพลังงานสำหรับแอปพลิเคชันแบบเวลาจริง (Real-Time)

3.3.3 การจัดการพลังงานสำหรับแอปพลิเคชันแบบไม่ใช่เวลาจริง (Non-Real-Time)

เมื่อเข้าสู่กระบวนการจัดการพลังงานแล้วนั้น ที่การใช้งานแอปพลิเคชันแบบไม่ใช่เวลาจริง จะตรวจสอบว่าผู้ใช้งานเชื่อมต่ออยู่กับมาโครเซลล์หรือเฟมโตเซลล์ กรณีที่ผู้ใช้งานเชื่อมต่ออยู่กับเฟมโตเซลล์และพบว่าความเร็วของผู้ใช้งาน V_f มีค่ามากกว่าค่าความเร็วเทรชโฮล V_{th} ให้ทำการเปลี่ยนช่องสัญญาณไปยังมาโครเซลล์ และหากพบว่าความเร็วของผู้ใช้งาน V_f มีค่าน้อยกว่าค่าความเร็วเทรชโฮลหรือหากผู้ใช้งานเชื่อมต่ออยู่กับมาโครเซลล์อยู่แล้วนั้นให้ถือว่าเข้าสู่โหมดประหยัดพลังงาน



ภาพประกอบ 16 การจัดการพลังงานสำหรับแอปพลิเคชันแบบไม่ใช่เวลาจริง (Non-Real-Time)

สถาปัตยกรรมของระบบและกระบวนการจัดการพลังงานข้างต้น จะถูกนำมาใช้กับสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณการประหยัดพลังงานเปรียบเทียบกับวิธีฮีสเตอรีซีส โดย (P_{f_s}) แทนกำลังงานส่งของเฟมโตเซลล์ที่ประหยัดได้ และ (P_{f_m}) แทนกำลังงานส่งของมาโครเซลล์ที่ประหยัดได้ กำหนดให้ (P_m) แทนกำลังงานที่ส่งของมาโครเซลล์และ $(P_{\max_m})$

แทนกำลังงานส่งสูงสุดของมาโครเซลล์ และให้ (P_f) แทนกำลังงานที่ส่งของเฟมโตเซลล์และ $(P_{\max_f})$ แทนกำลังงานส่งสูงสุดของเฟมโตเซลล์ ให้ $(PL_m(d))$ แทนกำลังงานที่สูญเสียโดยขึ้นอยู่กับระยะทางของมาโครเซลล์ และ $(PL_f(d))$ แทนกำลังงานที่สูญเสียโดยขึ้นอยู่กับระยะทางของเฟมโตเซลล์ โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$P_{f_s} = \min\left(P_m - PL_m(d) + PL_f(d), P_{\max_f}\right) \quad (1)$$

และ

$$P_{m_s} = \min\left(P_f - PL_f(d) + PL_m(d), P_{\max_m}\right) \quad (2)$$

สามารถทำการคำนวณหาค่ากำลังงานที่สูญเสียโดยขึ้นอยู่กับระยะทางของเฟมโตเซลล์ $(PL_f(d))$ จากสมการของ Keenan Motley Model [7] ดังสมการที่ 3

$$PL_f(d) = 38.46 + 20\log_{10}(d) + q \cdot w + (F \cdot K)^{(k+2/k+1)-0.46} \quad (3)$$

โดยที่

w = กำลังงานที่สูญเสียจากผนังกั้นห้อง มีหน่วยเป็นเดซิเบล

q = จำนวนของผนังกั้น

F = กำลังงานที่สูญเสียระหว่างชั้นของอาคาร มีหน่วยเป็นเดซิเบล

K = จำนวนชั้นของอาคาร

d = ระยะทางจากสถานีฐานเฟมโตเซลล์ถึงตำแหน่งผู้ใช้งานมือถือ

k = ค่าการลดทอนที่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมหรือชนิดของวัสดุภายในอาคาร

และสามารถทำการคำนวณหาค่ากำลังงานที่สูญเสียโดยขึ้นอยู่กับระยะทางของมาโครเซลล์ $(PL_m(d))$ จากสมการของ COST 231 [18] ดังสมการที่ 4

$$PL_m(d) = 42.6 + 26\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) \quad (4)$$

โดยที่

d = ระยะทางจากสถานีฐานมาโครเซลล์ถึงตำแหน่งผู้ใช้งานมือถือ

f = ค่าความถี่ใช้งานของสถาปัตยกรรมแอลทีอีแอดวานซ์

3.4 กระบวนการที่ใช้ในการประเมินผลการวิจัย

เพื่อประเมินผลการวิจัยจากวิธีการที่นำเสนอ จำนวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณที่ไม่จำเป็น จำนวนการเรียกติดขัดและจำนวนการเรียกขาดหายหรือสายหลุดจากการเปลี่ยนช่องสัญญาณจะถูกนำมาพิจารณาร่วมด้วยเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ โดยเราใช้สมการวัดประสิทธิภาพในทางสื่อสาร (The communication energy efficiency : CEE) แสดงในรูปแบบอัตราส่วนผลรวมของจำนวนบิตที่ส่งผ่านทั้งหมดต่อพลังงานที่ใช้ในการสื่อสารทั้งหมด โดยมีหน่วยเป็นบิตต่อจูล [19] ดังสมการที่ 5

$$CEE = \frac{\sum_{i=1}^{U} |R_i| \cdot s_{bit}}{E_{com}} \tag{5}$$

โดยที่

R_i = จำนวนคำร้องขอของผู้ใช้งาน i ในช่วงเวลาดำเนินการ

s_{bit} = ขนาดของชุดข้อมูลแพกเกตที่ผู้ใช้งานร้องขอ ในหน่วย บิต

E_{com} = พลังงานที่ใช้ในการสื่อสารทั้งหมด

ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการสื่อสารทั้งหมด (E_{com}) คำนวณมาจากกำลังส่ง (P_{tx}) และระยะเวลาการสื่อสาร (t_{com}) ดังแสดงในสมการที่ 6

$$E_{com} = P_{tx} \cdot t_{com} \tag{6}$$

บทที่ 4
ผลการดำเนินการวิจัย

กระบวนการจัดการพลังงานสำหรับการตัดสินใจเพื่อเปลี่ยนช่องสัญญาณ จะดำเนินการโดยกลยุทธ์การเปลี่ยนช่องสัญญาณที่ควบคุมด้วยมือถือ นอกจากนี้ยังมีการตั้งค่าเครือข่ายจำลองเพื่อให้ครอบคลุมการใช้งานในรูปแบบสถานการณ์ที่แตกต่างกัน โดยมีการตั้งค่าเครือข่ายจำลองแสดงดังตารางที่ 1

ตาราง 1 การตั้งค่าสภาพแวดล้อมของเครือข่ายจำลอง

เครือข่าย	เฟมโตเซลล์	มาโครเซลล์
ความถี่ (หน่วย กิกะเฮิรตซ์)	2.4	3.5
กำลังงานส่ง (หน่วย วัตต์)	0.1	0.5
แบนด์วิดท์/ความกว้างแถบความถี่ (หน่วย เมกะเฮิรตซ์)	40	10
ความเร็วผู้ใช้งานมือถือ (หน่วย เมตรต่อวินาที)	5	30
ความหน่วงของสัญญาณ	1	10

โดยยกตัวอย่างเช่น หากผู้ใช้งานมีการใช้งานแอปพลิเคชันการประชุมทางไกลแบบออนไลน์ (Video Conference) การเปลี่ยนช่องสัญญาณจะต้องเกิดขึ้นเร็วที่สุดเท่าที่ทำได้เพื่อลดความล่าช้า (Delay) หรืออีกนัยหนึ่งหากผู้ใช้งานจะต้องเชื่อมต่อกับเฟมโตเซลล์เนื่องจากมีอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงกว่า เพื่อรับประกันคุณภาพของสัญญาณ เรากำหนดให้ จำนวนของเวลาที่ต้องใช้ไปกับการเริ่มต้นและสิ้นสุดลงของการสื่อสารทางเสียงผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเท่ากับ 30 – 1800 วินาทีด้วยการแจกแจงเอกรูป (Uniform Distribution) และการประชุมทางไกลแบบออนไลน์ถูกตั้งค่าเป็น 30 เฟรมต่อวินาที โดยแต่ละเฟรมมีขนาด 2500 ไบต์ ซึ่งอ้างอิงมาจากการจำลองแอปพลิเคชันแบบเวลาจริงทั่วไป [20] และสำหรับแอปพลิเคชันแบบไม่ใช่เวลาจริง เช่น โพรโตคอลรับส่งไฟล์ข้อความ ที่เว็บไซต์ส่วนใหญ่ใช้เพื่อสื่อสารกับเว็บเบราว์เซอร์ (Hypertext Transfer Protocol : HTTP) จะถูกตั้งค่าให้เรียกดูช่วงเวลาทุกๆ 60 วินาที และโพรโตคอลการส่งผ่านแฟ้มข้อมูล (File Transfer Protocol : FTP) ถูกตั้งค่าให้มีขนาด 50 กิโลไบต์ถึง 1 เมกะไบต์ นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้ในการจำลองระบบที่นำเสนอ ดังตารางที่ 2

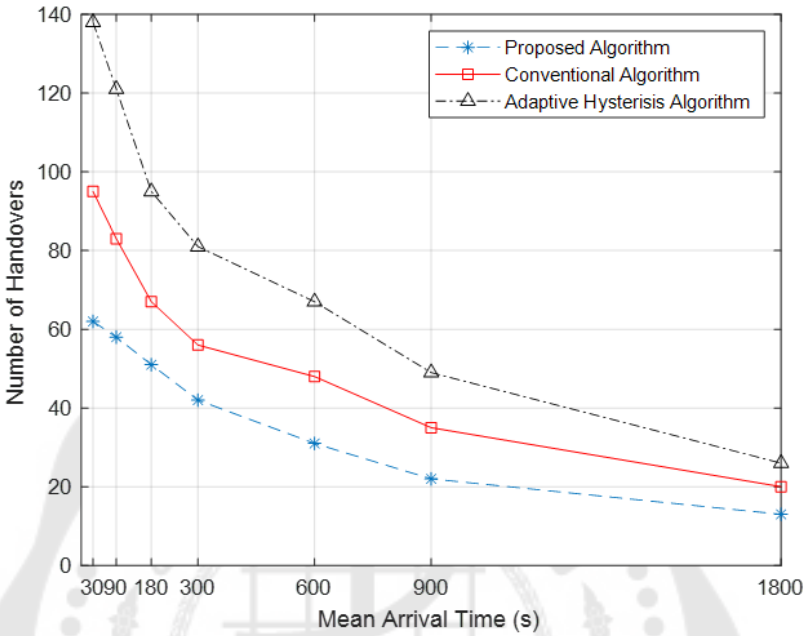
ตาราง 2 พารามิเตอร์ในการจำลอง

พารามิเตอร์	ตั้งค่าเท่ากับ
กำลังส่งสูงสุดของเฟมโตเซลล์ $(P_{\max_f})$ (หน่วย วัตต์)	0.1
กำลังส่งสูงสุดของมาโครเซลล์ $(P_{\max_M})$ (หน่วย วัตต์)	0.5
กำลังงานที่สูญเสียจากผนังกั้นห้อง w (หน่วย เดซิเบล)	10
กำลังงานที่สูญเสียระหว่างชั้นของอาคาร F (หน่วย เดซิเบล)	6
จำนวนของผนังกั้น q	4
จำนวนชั้นของอาคาร K	5
ค่าการลดทอนที่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมหรือชนิดของวัสดุภายในอาคาร k	3

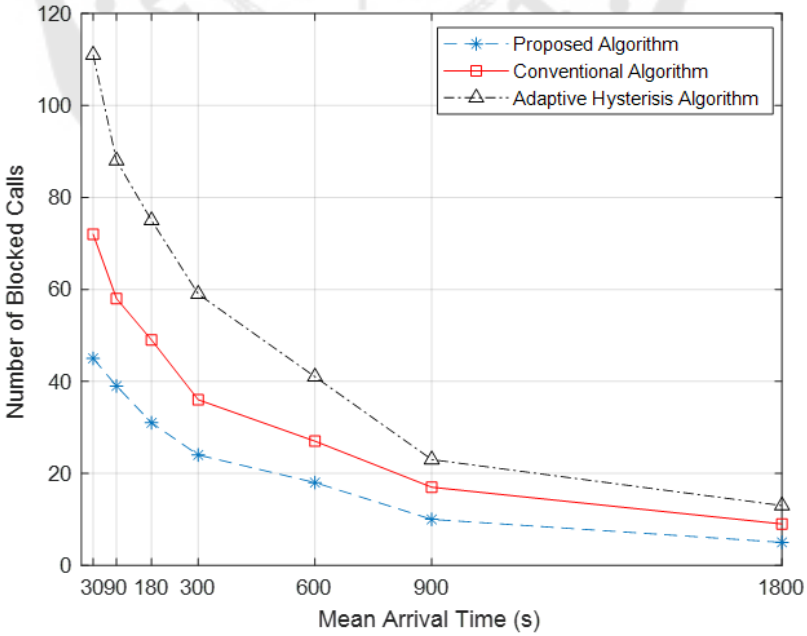
จากสถาปัตยกรรมของระบบสู่กระบวนการจัดการพลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ประกอบกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นถูกนำไปใช้ในการจำลองระบบและได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

ประการแรก เพื่อเป็นการตรวจสอบระบบในแง่ของประสิทธิภาพในการให้บริการ ด้วยการจำนวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณ จำนวนการเรียกติดขัด จำนวนการเรียกขาดหายหรือสายหลุดและค่าเฉลี่ยปริมาณงาน แสดงดังภาพประกอบ 17-20 ตามลำดับ โดยผลลัพธ์ของทุกตัวชี้วัดจะทำการเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการดั้งเดิม (Conventional Algorithm) และวิธีการผสมผสานแบบฮีสเตอรีซีส (Adaptive Hysteresis Margin Algorithm) จากผลการวิจัยพบว่าจำนวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณด้วยวิธีการที่นำเสนอมีค่าต่ำที่สุดและลดลงร้อยละ 18 เมื่อเทียบกับวิธีการดั้งเดิม และร้อยละ 43 เมื่อเทียบกับวิธีฮีสเตอรีซีส ที่ค่าเฉลี่ยของเวลาตั้งแต่ 30-1800 วินาที แสดงดังภาพประกอบ 17 และในภาพประกอบ 18-19 แสดงให้เห็นว่า จำนวนการเรียกติดขัดและจำนวนการเรียกขาดหายของวิธีการที่นำเสนอมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าน้อยกว่าวิธีการดั้งเดิมร้อยละ 14 และร้อยละ 11 และมีค่าน้อยกว่าวิธีการแบบฮีสเตอรีซีสมากถึงร้อยละ 34 และร้อยละ 30 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของปริมาณงานแสดงดังภาพประกอบ 20 ซึ่งบ่งชี้ว่าการส่งข้อมูลส่งได้สำเร็จที่ระยะเวลาจำลอง 100-1600 วินาที วิธีที่นำเสนอมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสองวิธีการข้างต้นอยู่ที่ร้อยละ 2 และร้อยละ 5 ตามลำดับ ซึ่งสามารถรับประกันได้ว่าเมื่อนำระบบ

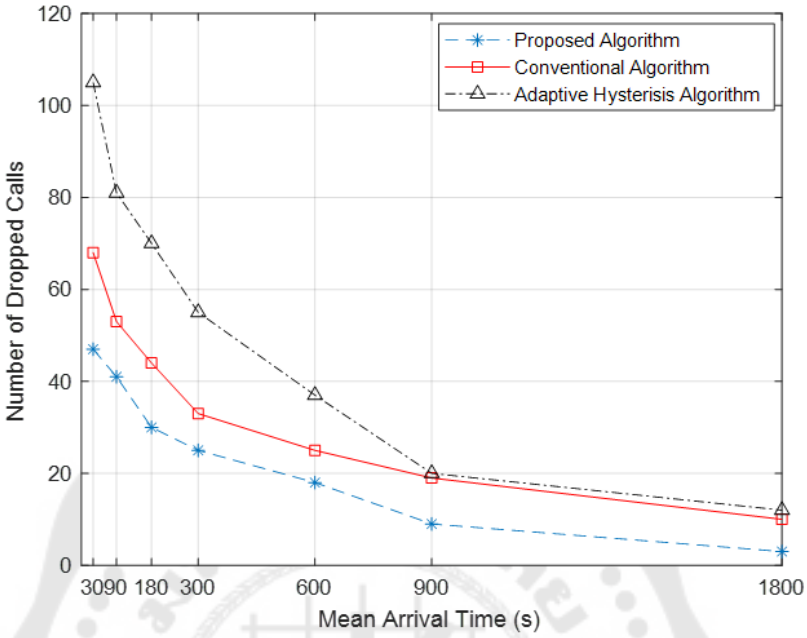
ของวิธีการที่นำเสนอไปใช้แล้วนั้นคุณภาพของการให้บริการยังมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นว่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกันกับวิธีการแบบดั้งเดิมและวิธีการแบบฮีสเตอรีซีส



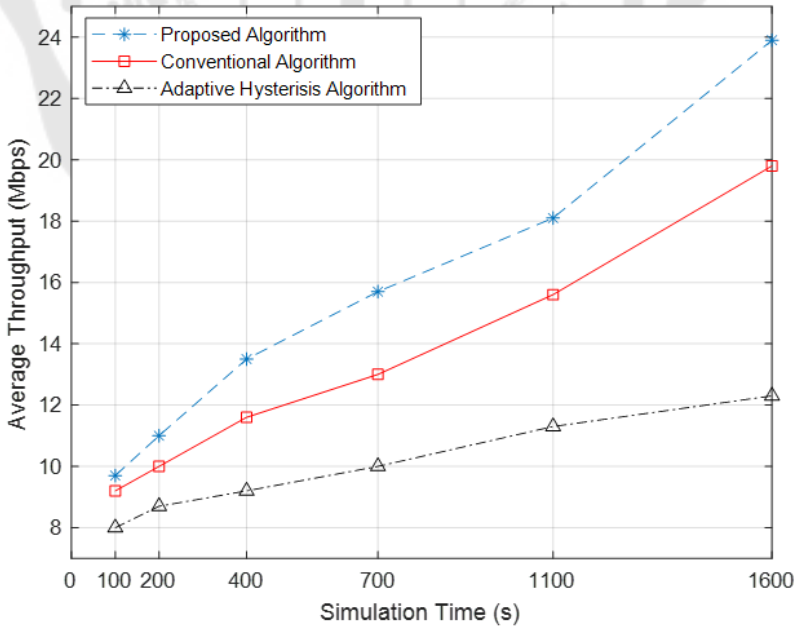
ภาพประกอบ 17 จำนวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณ



ภาพประกอบ 18 จำนวนการเรียกติดขัด

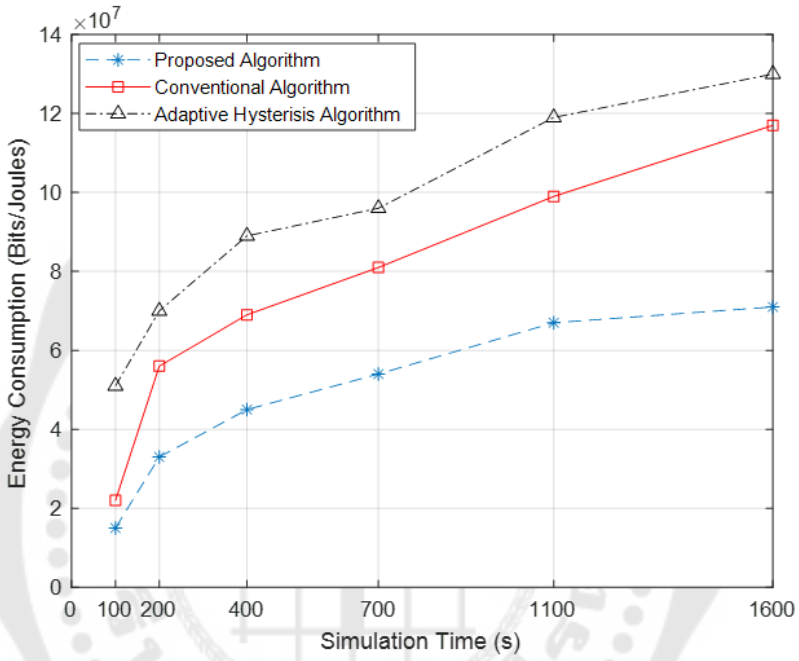


ภาพประกอบ 19 จำนวนการเรียกขาดหาย



ภาพประกอบ 20 ค่าเฉลี่ยของปริมาณงาน

ประการที่สอง เพื่อเป็นการตรวจสอบระบบในแง่ของการประหยัดพลังงานด้วยจำนวนการใช้พลังงานรวมแสดงดังภาพประกอบ 21 จากการวิจัยพบว่าจำนวนการใช้พลังงานรวมของระบบที่นำเสนอมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกันกับสองวิธีการข้างต้น ที่ร้อยละ 27 ของวิธีการดั้งเดิม และที่ร้อยละ 45 ของวิธีการฮีสเตอรีซีส



ภาพประกอบ 21 ค่าการใช้พลังงานรวม มีหน่วยเป็นบิตต่อจูล

บทที่ 5
สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยเรื่องการจัดการพลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณของสภาพแวดล้อมในร่มและกลางแจ้ง ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบ รวมไปถึงกระบวนการการจัดการพลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณ และประเมินประสิทธิภาพของระบบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ สามารถสรุปผลการดำเนินงาน โดยแบ่งหัวข้อในการสรุปผลดังต่อไปนี้

1. สรุปผลการวิจัย
2. อภิปรายผลการวิจัย
3. ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการจำลองที่ได้ วิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพมากกว่า(Conventional Algorithm) และวิธีการผสมผสานแบบฮีสเตอรีซีส (Adaptive Hysteresis Margin Algorithm) โดยประเมินจากค่าของจำนวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณที่ไม่จำเป็น จำนวนการเรียกติดขัดและจำนวนการเรียกขาดหายหรือสายหลุดจากการเปลี่ยนช่องสัญญาณ ประกอบกับค่าเฉลี่ยของปริมาณงานที่ได้และค่าการใช้พลังงานรวมร่วมด้วย ซึ่งวิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในทุกด้าน

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากสมมติฐานที่ว่าการทำงานร่วมกันของสถานีฐานมาโครเซลล์และเฟมโตเซลล์สามารถประหยัดพลังงานในการเปลี่ยนช่องสัญญาณสำหรับระบบสื่อสาร โดยมีมาโครเซลล์เป็นตัวแทนของพื้นที่กลางแจ้งที่ครอบคลุมพื้นที่รัศมีวงกว้าง ซึ่งในระบบที่นำเสนอทำการพิจารณาที่พื้นที่รัศมีเท่ากับ 2 กิโลเมตร และมีเฟมโตเซลล์เป็นตัวแทนของพื้นที่ในร่มที่ครอบคลุมพื้นที่รัศมีวงแคบ ซึ่งในระบบที่นำเสนอทำการพิจารณาที่พื้นที่รัศมีเท่ากับ 20 เมตร ผลการวิจัยพบว่าระบบที่นำเสนอมีจำนวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณที่น้อยกว่าวิธีการดั้งเดิม (Conventional Algorithm) และวิธีการผสมผสานแบบฮีสเตอรีซีส (Adaptive Hysteresis Margin Algorithm) อยู่ที่ร้อยละ 18 และร้อยละ 43 ตามลำดับ เนื่องจากจำนวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณแปรผันตรงกับกำลังส่ง เมื่อมีจำนวนการเปลี่ยนช่องสัญญาณที่ลดลง จึงสามารถอนุมานได้ว่าเกิดการใช้พลังงานที่ลดลงด้วย เราสามารถอ้างอิงได้จากการใช้พลังงานรวมของระบบที่นำเสนอ โดยผลการวิจัยพบว่าระบบ

ที่นำเสนอมีค่าการใช้พลังงานรวมต่ำที่สุดเมื่อเทียบกันกับวิธีการดั้งเดิมและวิธีการผสมผสานแบบฮีสเตอรีซีสอยู่ที่ร้อยละ 27 และร้อยละ 45 ตามลำดับ แสดงว่าสมมติฐานเป็นจริง

นอกจากการทำงานร่วมกันของสถานีฐานมาโครเซลล์และเฟมโตเซลล์ที่สามารถประหยัดพลังงานในการเปลี่ยนช่องสัญญาณสำหรับระบบสื่อสารได้แล้วนั้น ระบบที่นำเสนอยังนำจำนวนการเรียกติดขัด จำนวนการเรียกขาดหาย และค่าเฉลี่ยของปริมาณงาน มาวิเคราะห์ร่วมด้วยเพื่อเป็นการรับประกันว่าผู้ใช้งานจะได้รับสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกันกับวิธีการดั้งเดิมและวิธีการผสมผสานแบบฮีสเตอรีซีส โดยจำนวนการเรียกติดขัดและจำนวนการเรียกขาดหายจะต้องแปรผกผันกันกับค่าเฉลี่ยของปริมาณงานจึงจะมั่นใจได้ว่าระบบที่นำเสนอนั้นมีประสิทธิภาพทั้งในด้านการประหยัดพลังงานและด้านคุณภาพของสัญญาณ จากผลการวิจัยของระบบที่นำเสนอพบว่า จำนวนการเรียกติดขัดลดลงอยู่ที่ร้อยละ 13 และร้อยละ 34 เมื่อเทียบกับวิธีการดั้งเดิมและวิธีการผสมผสานแบบฮีสเตอรีซีส เฉกเช่นเดียวกันกันกับจำนวนการเรียกขาดหายที่มีจำนวนลดลงอยู่ที่ร้อยละ 11 ของวิธีการแบบดั้งเดิม และลดลงร้อยละ 30 ของวิธีการผสมสผานแบบฮีสเตอรีซีส ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของปริมาณของระบบที่นำเสนอมีค่าสูงที่สุด มากกว่าวิธีการดั้งเดิมร้อยละ 2 และมากกว่าวิธีการแบบฮีสเตอรีซีสร้อยละ 5 เนื่องจากระบบที่นำเสนอมีกระบวนการการจัดการพลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณโดยพิจารณาจากค่าความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับร่วมกับค่ากำลังงานที่สูญเสียโดยขึ้นอยู่กับระยะทางและความเร็วของผู้ใช้งาน ซึ่งออกแบบมาให้ครอบคลุมทั้งพื้นที่ในร่มและกลางแจ้ง ทั้งการใช้งานแอปพลิเคชันแบบเวลาจริงและแอปพลิเคชันแบบไม่ใช่เวลาจริง ในขณะที่ระบบของสองวิธีการที่นำมาเปรียบเทียบพิจารณาเพียงค่าความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับเท่านั้น

สรุปสุดท้ายนี้ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในทุกตัวชี้วัดทั้งในด้านการประหยัดพลังงานและด้านคุณภาพของสัญญาณ โดยมีระบบที่ใช้วิธีการแบบดั้งเดิมได้ผลลัพธ์เป็นลำดับที่สอง ซึ่งดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการผสมสผานแบบฮีสเตอรีซีสที่ได้ผลลัพธ์เป็นลำดับสุดท้ายในทุกตัวชี้วัด ทั้งนี้เนื่องจากระบบที่ใช้วิธีการแบบดั้งเดิมนั้นพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับหักลบกับค่าสัญญาณแทรกสอดในเครือข่ายและค่าสัญญาณรบกวนในระบบด้วย ในขณะที่วิธีการผสมสผานแบบฮีสเตอรีซีสนั้น พิจารณาเพียงค่าความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้ได้รับที่เป็นการเปรียบเทียบค่าความแรงของสัญญาณของทั้งสถานีต้นทางและปลายทางเมื่อถึงเกณฑ์ค่าความต่างระหว่างสองสถานีฐานเพียงอย่างเดียว

5.3 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบ รวมไปถึงกระบวนการการจัดการพลังงานสำหรับการเปลี่ยนช่องสัญญาณ และประเมินประสิทธิภาพของระบบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอยู่ในรูปแบบของการจำลองเท่านั้น หากสามารถสร้างออกมาเป็นชิ้นงานและนำมาทดสอบกับสภาพแวดล้อมจริงได้ จะทำให้สามารถเข้าใจสภาพการใช้งานจริงได้มากยิ่งขึ้น และอาจต่อยอดความคิดริเริ่มเพื่อพัฒนาผลงานใหม่ให้ดีขึ้นยิ่งกว่าเดิมได้

บรรณานุกรม

1. Energy efficiency in sleep mode for 5g femtocells. 2017 Wireless Days; 2017.
2. Deruyck M, Joseph W, Martens L. Power consumption model for macrocell and microcell base stations. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2014;25(3):320-33.
3. Green handoff in femtocell network. 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC); 2019.
4. A novel handover decision-making algorithm for hetnets. 2015 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT); 2015.
5. Handover decision algorithm in femtocell long term evolution networks. 2018 Seventh International Conference on Communications and Networking (ComNet); 2018.
6. Handover performance analysis on femtocell technology in collaboration with wimax. 2020 14th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA; 2020.
7. Improving system performance in indoor environment by designing femtocell considering interference and mobility management. 2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC); 2021.
8. Zhang J, Xiao Z, Zhang X, Liu E. Two-tier femto-macro wireless networks: Technical issues and future trends. URSI Radio Science Bulletin. 2013;2013(345):51-63.
9. Xenakis D, Passas N, Merakos L, Verikoukis C. Mobility management for femtocells in lte-advanced: Key aspects and survey of handover decision algorithms. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2014;16(1):64-91.
10. กุฏี จ. มารู้จักกับ 1g 2g 3g 4g กันเถอะ. 2021.
11. 1to4generation.blogspot. วิวัฒนาการของเทคโนโลยีจาก 1g สู่ 4g lte. 2014.
12. telecom10.blogspot. 2g : Second generation. 2014.
13. GSMARENA. Apple iphone 3g. 2008.
14. Ketwarinravipa. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ 3g และ 4g. 2013.
15. INTERTRADE S. ระบบ 3g 4g 5g แตกต่างกันยังไง. 2020.

16. DIGIBYTE. International workshop on future 5g standards and spectrum. 2015.
17. Ahmed A, Merghem-Boulahia L, Gaiti D. An intelligent agent-based scheme for vertical handover management across heterogeneous networks. Annales des Télécommunications. 2011;66:583-602.
18. Vertical handover decision based on hybrid artificial neural networks in hetnets of 5g. 2021 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP); 2021.
19. Dynamic base station repositioning to improve performance of drone small cells. 2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps); 2016.
20. Green energy of handover management in seamless networks. 2023 International Conference On Cyber Management And Engineering (CyMaEn); 2023. https://ieeexplore.ieee.org/document/10050950/

ภาคผนวก

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จิณณ์ชยา ทรัพย์วัชรสกุล
วัน เดือน ปี เกิด	1 มิถุนายน 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ