

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสาร 5G ย่านความถี่ 28 GHz และ 2.6 GHz
สำหรับการใช้งานภายนอกอาคาร

ณรงค์ รัตน์ะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ปีการศึกษา 2564

**5G COMMUNICATION PERFORMANCE COMPARISON OF 28 GHz AND 2.6 GHz
BAND FOR OUTDOOR USANGE**

NARONG RATTANA

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Computer and Telecommunication Engineering
College of Innovative Technology And Engineering,
Dhurakij Pundit University
Academic Year 2021**



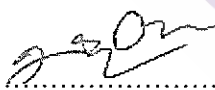
ใบรับรองวิทยานิพนธ์
วิทยาลัยนวัตกรรมการด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพาจปภัตติย์
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสาร 5G ย่านความถี่ 28 GHz และ 2.6 GHz
สำหรับการใช้งานภายนอกอาคาร
เสนอโดย นายณรงค์ รัตนะ
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ธนัญ จารุวิทย์โกวิท
ได้พิจารณาเห็นชอบ โดยคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์แล้ว


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ถัณญกร วุฒิสัทติกุลกิจ)


.....กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(อาจารย์ ดร.ธนัญ จารุวิทย์โกวิท)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภาคะพันธ์)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มันฉมิกา อ่องแดง)

วิทยาลัยนวัตกรรมการด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์รับรองแล้ว


.....คณบดีวิทยาลัยนวัตกรรมการด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรมศาสตร์
(อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภาคะพันธ์)

วันที่ ๖ เดือน ๒๕๖๕ พ.ศ. ๒๕๖๕

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสาร 5G ย่านความถี่ 28 GHz และ 2.6 GHz สำหรับการใช้งานภายนอกอาคาร
ชื่อผู้เขียน	ณรงค์ รัตนะ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ธนัญ จารุวิทย์โกวิท
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา และวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz สำหรับเครือข่ายการสื่อสาร 5G แบบภายนอกอาคาร ทำการศึกษาโดยจำลองเครือข่ายการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ในสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท พื้นที่ชานเมือง และพื้นที่ตัวเมืองด้วยโมเดล mmWave ในโปรแกรมจำลองเครือข่าย (Network Simulation 3 : NS3) ซึ่งในแต่ละพื้นที่แบบจำลองกำหนดขนาดเป็น 4 ตารางกิโลเมตร ในแบบจำลองประกอบด้วยอุปกรณ์ผู้ใช้งาน (User Equipment : UE) จำนวน 26 ชุด และแถบกว้างความถี่ (Bandwidth) 100 MHz กำหนดการทดสอบแบบจำลองโดยรับส่งข้อมูลแบบหนึ่งผู้ส่งต่อหนึ่งผู้รับเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ Bandwidth ร่วมกันและกำหนดเงื่อนไขความเร็วในการดาวน์โหลดข้อมูลเฉลี่ย (Average Throughput) ต้องมากกว่า 1 Gbps ในทุกพื้นที่แบบจำลอง ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเรื่องประสิทธิภาพ Throughput ต่อจำนวนสถานีฐาน (gNodeB) ในแต่ละพื้นที่แบบจำลอง ทำการเก็บบันทึกผลค่า Throughput ของ UE แต่ละตำแหน่งประเมินผลการทำงานของแบบจำลองเพื่อหาความเหมาะสมในการใช้งานคลื่นความถี่ของแต่ละพื้นที่

ผลการทำงานของแบบจำลองเครือข่ายการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร สำหรับการใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz ในพื้นที่ชนบทและพื้นที่ชานเมืองกำหนดจำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 1 โหนด และ 4 โหนด ในพื้นที่ตัวเมือง ส่วนแบบจำลองสำหรับการใช้งานคลื่นความถี่ 28 GHz ในพื้นที่ชนบทจำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 16 โหนด พื้นที่ชานเมืองจำนวน 20 โหนด และพื้นที่ตัวเมืองจำนวน 22 โหนด ซึ่งให้ค่าเฉลี่ย Throughput มากกว่า 1 Gbps ในแต่ละพื้นที่

จะเห็นว่าคลื่นความถี่ 28 GHz ในพื้นที่ชนบทต้องจำลอง gNodeB มากกว่าย่านความถี่ 2.6 GHz ถึง 16 เท่า พื้นที่ชานเมือง 20 เท่า และพื้นที่ตัวเมือง 5.5 เท่า เพื่อให้ค่าเฉลี่ย Throughput มากกว่า 1 Gbps ในแต่ละพื้นที่

จากการวิจัยพบว่าการเลือกใช้งานคลื่นความถี่ที่เหมาะสมในแต่ละสภาพแวดล้อมหรือพื้นที่บริเวณนั้นๆ โดยเลือกใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz ซึ่งให้สัญญาณครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างเป็นคลื่นความถี่หลัก และใช้งานคลื่นความถี่ 28 GHz เป็นคลื่นความถี่เสริมในพื้นที่ที่มีความต้องการใช้งานที่หนาแน่น หรือพื้นที่เฉพาะบริเวณได้ เช่น ห้างสรรพสินค้า ศูนย์จัดแสดงสินค้า สนามกีฬา แหล่งโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น



Thesis Title	5G COMMUNICATION PERFORMANCE COMPARISON OF 28 GHz AND 2.6 GHz BAND FOR OUTDOOR USANGE
Author	Narong Rattana
Thesis Advisor	Dr. Tanun Jaruvitayakovit
Department	Computer and Telecommunications Technology Engineering
Academic Year	2021

ABSTRACT

This research aimed to study and analyze the 2.6 GHz and 28 GHz frequency bands for 5G communication outdoor usage. Developed from mmWave module of the Network Simulation 3 program (NS-3) to build the 5G communication model in 3 areas is Rural, Sub-Urban, and Urban areas. Each model has an area is 4 Square Kilometers. Contains with several Used Equipment (UE) is 26 nodes and the bandwidth is 100 Mbps. To avoid sharing bandwidth, Data is transmitted point-to-point. And the average throughput must be more than 1 Gbps, the same in all models. Focuses on throughput efficiency per number of gNodeB are installed in each model. Recorded the throughput of each UE. Evaluate the performance of the model and minimize the number of gNodeB.

The performance of the 5G outdoor communications model for 2.6 GHz band deployment in rural and suburban created 1 node of gNodeB and urban areas created 4 nodes The 28 GHz band in the rural area has created gNodeB is 16 nodes, the suburban area is 20 nodes, and 22 nodes for the urban areas. Achieve the coverage area and lowest number of gNodeB is providing an average throughput of more than 1 Gbps.

From research, it was found that the size, volume, density of the building, and the wall material types of the building affect the propagation. It's a significant obstacle for the mmWave band which is a high-frequency band. Therefore, required gNodeB more than the low-frequency bands in the same area. The 28 GHz band requires the gNodeB more than the 2.6 GHz band is 16 times for the rural areas, 20 times for the suburban areas, and 5.5 times for the urban areas.

From the research, it was found that choosing the right spectrum for each environment or area. By choosing to use the 2.6 GHz to the main frequency band, which provides a wide area coverage And use the 28 GHz band as a supplementary frequency in densely demanding areas. Or specific areas such as shopping malls Exhibition centers, stadiums, industrial sites, etc.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากท่านอาจารย์ ดร.ธัญญ์ จารุวิทย์โกวิท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ซึ่งแนะแนวทางการทำวิจัย การจัดทำวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอนและทุกกระบวนการ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ตลอดจนคณะกรรมการทุกท่าน ที่ชี้แนะแนวทางจนสามารถสอบวิทยานิพนธ์ได้แล้วเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณผู้ซึ่งเป็นบิดาและมารดา ตลอดทั้งครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจและคอยให้ความรักมาโดยตลอดเวลา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องในห้องเรียนและที่ทำงาน ที่คอยให้คำปรึกษาตลอดเวลา ระยะเวลาการศึกษา

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคุณอาจารย์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง สำหรับข้อบกพร่องต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

ณรงค์ รัตนะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ฅ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	3
2. แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คุณสมบัติหลัก 3 ประการของเทคโนโลยีการสื่อสาร 5G.....	4
2.2 คลื่นความถี่ย่านมิลลิเมตร (mmWave).....	7
2.3 การแพร่กระจายคลื่น.....	9
2.4 โครงสร้างเฟรมข้อมูล 5G mmWave.....	10
2.5 แบบจำลองเครือข่ายการสื่อสาร 5G.....	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
3. การดำเนินงานวิจัย.....	22
3.1 ภาพรวมการทำงานของแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร.....	22
3.2 สมมติฐานของงานวิจัย.....	23
3.3 การออกแบบสภาพแวดล้อมพื้นที่แบบจำลอง.....	24
3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และรูปแบบข้อมูล.....	32
3.5 ขั้นตอนการทำงานและการบันทึกผลแบบจำลอง.....	33

สารบัญ (ต่อ)

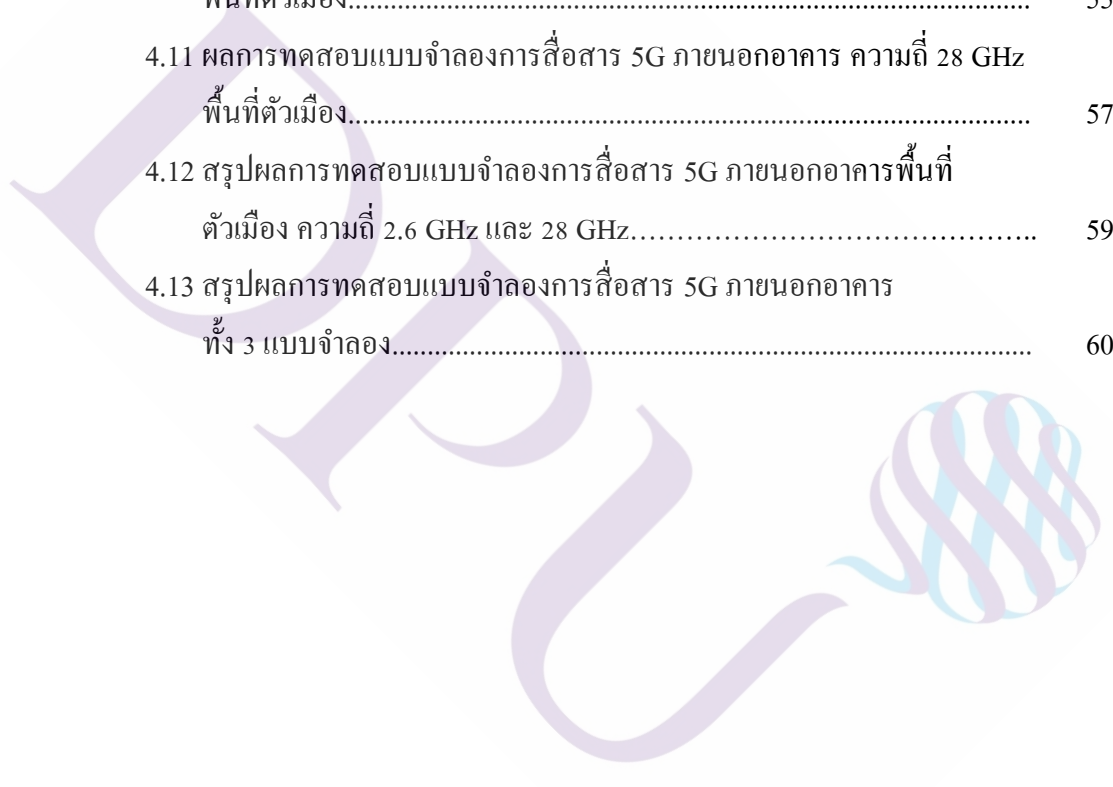
บทที่	หน้า
4. ผลการวิจัย.....	36
4.1 การกำหนดตำแหน่ง UE เพื่อใช้ในการทดสอบแบบจำลองในแต่ละพื้นที่.....	36
4.2 ผลการทดสอบการทำงานแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ชนบท.....	38
4.3 ผลการทดสอบการทำงานแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ชนเมือง.....	46
4.4 ผลการทดสอบการทำงานแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ตัวเมือง.....	54
4.5 อภิปรายผลการทดสอบใช้งานการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz ใน 3 พื้นที่แบบจำลอง.....	59
5. สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	62
5.2 ข้อจำกัดงานวิจัย.....	64
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	65
บรรณานุกรม.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	69

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินการวิจัย.....	4
2.1 ค่า Numerologies(μ) และค่า Subcarrier Spacing (Δf).....	11
2.2 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างเฟรมข้อมูลสำหรับงานวิจัย.....	13
2.3 ค่าการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นของแต่ละความถี่.....	19
2.4 ค่าความหน่วงเวลาในการแพร่กระจายในสถานะ NLOS.....	20
2.5 แสดงการวิเคราะห์ Link Budget ที่สถานการณ์ต่างๆ ของย่านความถี่ 28 GHz....	20
2.6 ตารางเปรียบเทียบงานวิจัย.....	21
3.1 การกำหนดตำแหน่ง ขนาด และประเภทอาคารในแบบจำลองพื้นที่ชนบท...	26
3.2 การกำหนดตำแหน่ง ขนาด และประเภทอาคารในแบบจำลองพื้นที่ ชนเมือง.....	28
3.3 การกำหนดตำแหน่ง ขนาด และประเภทอาคารในแบบจำลองพื้นที่ตัวเมือง..	30
3.4 ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองการสื่อสาร 5G ทั้ง 3 พื้นที่แบบจำลอง.....	32
3.5 ประเภทข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G.....	33
4.1 การกำหนดตำแหน่ง UE ในพื้นที่แบบจำลองทั้ง 3 พื้นที่.....	37
4.2 ผลการทำงานแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบทความถี่ 2.6 GHz.....	39
4.3 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท 14 gNodeB ความถี่ 28 GHz.....	42
4.4 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 28 GHz พื้นที่ชนบท gNodeB จำนวน 16 โหนด.....	44
4.5 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท ความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz.....	46
4.6 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนเมือง ความถี่ 2.6 GHz.....	47
4.7 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนเมือง 16 gNodeB ความถี่ 28 GHz.....	50

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 28 GHz พื้นที่ชานเมือง gNodeB จำนวน 20 โหนด.....	52
4.9 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ชานเมืองความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz.....	54
4.10 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 2.6 GHz พื้นที่ตัวเมือง.....	55
4.11 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 28 GHz พื้นที่ตัวเมือง.....	57
4.12 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ตัวเมือง ความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz.....	59
4.13 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ทั้ง 3 แบบจำลอง.....	60



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 เป้าหมายโดยรวมการพัฒนาคุณสมบัติของระบบสื่อสาร 5G.....	6
2.2 ตัวอย่างการใช้งานเครือข่ายการสื่อสาร 5G.....	7
2.3 ย่านความถี่ใช้งานสำหรับระบบการสื่อสาร 5G.....	8
2.4 การสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นในอากาศความถี่ย่าน mmWave.....	10
2.5 ตัวอย่างโครงสร้างเฟรมข้อมูล 5G mmWave.....	12
2.6 ไดอะแกรมโมเดลจำลองการสื่อสารด้วย NS-3 mmWave Model.....	15
2.7 การลดทอนคลื่นสัญญาณเมื่อทะลุทะลวงสิ่งกีดขวาง.....	16
2.8 ตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์ LOS และ NLOS กีดขวางคลื่นโดยอาคาร.....	17
3.1 แผนภาพแบบจำลองเครือข่ายการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร.....	22
3.2 แบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท.....	26
3.3 แบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ชานเมือง.....	28
3.4 แบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ตัวเมือง.....	30
3.5 การบันทึกผลการทำงานของแบบจำลองเป็นไฟล์ RxPacketTraceUe.txt.....	35
4.1 แสดงตำแหน่งของ UE ในแบบจำลองทั้ง 3 พื้นที่.....	36
4.2 ภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ชนบทความถี่ 2.6 GHz.....	39
4.3 ภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ชนบท 14 gNodeB ความถี่ 28 GHz.....	41
4.4 ภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ชนบท 16 gNodeB ความถี่ 28 GHz.....	44
4.5 ภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ชานเมือง ความถี่ 2.6 GHz.....	47
4.6 ภาพจำลองผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ชานเมือง 16 gNodeB ความถี่ 28 GHz.....	49
4.7 ภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ชานเมือง 20 gNodeB ความถี่ 28 GHz.....	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.8 ภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ตัวเมือง ความถี่ 2.6 GHz.....	55
4.9 ภาพจำลองผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ ตัวเมือง ความถี่ 28 GHz.....	57
4.10 แสดงกราฟสรุปผลการทดสอบของแบบจำลองทั้งสามพื้นที่ความถี่ 2.6 GHz	61
4.11 แสดงกราฟสรุปผลการทดสอบของแบบจำลองทั้งสามพื้นที่ความถี่ 28 GHz..	61



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีการสื่อสารได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เริ่มตั้งแต่ยุคแรกที่ระบบการสื่อสารเป็นแบบแอนะล็อก (1th Generation; 1G) และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเรื่อยมาเพื่อให้สามารถรองรับอุปกรณ์การสื่อสารที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และจำนวนความต้องการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น จนถึงยุคปัจจุบันที่การสื่อสารเป็นระบบดิจิทัลที่ไม่เป็นเพียงแค่การสื่อสารด้วยความถี่วิทยุเท่านั้น แต่เป็นการสื่อสารข้อมูลต่าง ๆ มากมายมหาศาล และสามารถสื่อสารได้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่หลากหลายที่สามารถเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ในระยะทางไกลได้อย่างรวดเร็ว มั่นคง แม่นยำ และค่าความหน่วงเวลาที่ต่ำมาก เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้งานระบบสื่อสารที่หลากหลายเพิ่มมากขึ้น ปัจจุบันได้พัฒนาระบบการสื่อสารมาถึงยุคที่ 5 (5th Generation; 5G) และกำลังอยู่ในระยะการเปลี่ยนแปลงจากการสื่อสารยุคที่ 4 (4th Generation; 4G) ไปสู่ยุค 5G หรืออาจยังมีการใช้งานควบคู่กันของทั้ง 2 ยุค เนื่องจากการสื่อสาร 5G นั้นต้องรองรับข้อมูลที่มากมายมหาศาล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาย่านความถี่ที่มีแถบกว้างความถี่ที่กว้างมาก เพื่อสามารถรองรับการใช้งานเหล่านี้ คลื่นความถี่ในย่านความถี่สูงอย่างย่านมิลลิเมตรเวฟ (mmWave) จึงเป็นย่านความถี่ที่ได้รับความสนใจนำมาใช้งาน

ความถี่ย่าน mmWave เป็นย่านความถี่ที่มีความยาวคลื่นในระดับมิลลิเมตร โดยเฉพาะคลื่นความถี่ย่าน ตั้งแต่ 30-300 GHz นั้นมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1-10 มิลลิเมตรเท่านั้น ความถี่ที่สูงทำให้ความยาวคลื่นสั้นลง mmWave จึงมีข้อจำกัดในหลายๆด้านเช่น ระบบประมวลผลสัญญาณที่มีความซับซ้อนมากขึ้น การกระจายสัญญาณได้ในระยะทางที่สั้นลง การศึกษาประสิทธิภาพความถี่ย่าน mmWave เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานได้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับแต่ละสภาพพื้นที่การใช้งาน เพื่อเป็นประโยชน์ให้กับผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถประเมินต้นทุนในการให้บริการในเบื้องต้นก่อนการติดตั้งจริง ส่งผลต่อผู้บริโภคที่สามารถใช้งานเครือข่ายได้อย่างเต็มประสิทธิภาพในราคาที่เหมาะสม งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเกี่ยวกับความเหมาะสมต่อการใช้งานการสื่อสาร 5G แบบภายนอกอาคารของคลื่นความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz ในพื้นที่ชนบท ชานเมือง และตัวเมือง โดยกำหนดให้ค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลในพื้นที่แบบจำลอง

(Throughput) เฉลี่ยมากกว่า 1 Gbps และทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz ต่อพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและสร้างแบบจำลองเครือข่ายการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารในสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท ชานเมือง และพื้นที่ตัวเมืองความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz

2. เพื่อพิจารณาจำนวนสถานีฐาน (gNodeB) น้อยที่สุดที่ให้สัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่ของย่านความถี่ 2.6 GHz กับ 28 GHz ต่อค่าประสิทธิภาพการดาวน์โหลดข้อมูลเฉลี่ยในพื้นที่ (Throughput Average) มากกว่า 1 Gbps ในแบบจำลองพื้นที่ชนบท ชานเมือง และตัวเมือง

3. เพื่อศึกษาและพิจารณาความเหมาะสมต่อการใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz ในพื้นที่ชนบท ชานเมือง และพื้นที่ตัวเมือง

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

เทคโนโลยีการสื่อสาร 5G สำหรับการรองรับการใช้งานคุณสมบัติด้านการรับการส่งผ่านข้อมูลความเร็วสูง จึงได้มองหาแถบกว้างความถี่ (Bandwidth) ที่มีความกว้างมากเพียงพอต่อการใช้งาน ดังนั้นความถี่สูงย่าน mmWave เช่นความถี่ 28 GHz ซึ่งมี Bandwidth ให้ใช้งานที่กว้างมากเพียงพอต่อความต้องการ จึงได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้งาน และในปัจจุบันย่านความถี่ต่ำซึ่งมี Bandwidth ให้ใช้งานที่แคบหรืออาจต้องใช้งานหลายย่านความถี่มารวมกันเพื่อให้ได้ Bandwidth ที่กว้างมากเพียงพอต่อการใช้งานซึ่งทำให้เกิดความซับซ้อน และความหน่วงเวลาภายในเครือข่าย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลในการใช้งานการสื่อสาร 5G ย่านความถี่ mmWave ที่ความถี่ 28 GHz กับความถี่ต่ำ 2.6 GHz ภายนอกอาคาร ในพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมและความคุ้มค่าในการลงทุนเครือข่ายและประโยชน์แก่ผู้ใช้บริการ ซึ่งสมมติฐานงานวิจัยคือ เลือกใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz ซึ่งให้พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณที่กว้าง (Coverage Area) เป็นคลื่นความถี่หลักในทุกพื้นที่ แล้วใช้คลื่นความถี่ 28 GHz เป็นคลื่นความถี่เสริมในพื้นที่เฉพาะบริเวณที่มีความต้องการใช้งานที่หนาแน่น เพราะสามารถควบคุมสถานะของสัญญาณได้ดีกว่า เช่น บริเวณแหล่งชุมชน ห้างสรรพสินค้า ศูนย์จัดแสดงสินค้า สนามกีฬา แหล่งโรงงาน อุตสาหกรรม เป็นต้น

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของการทำวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเครือข่ายการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารสำหรับคลื่นความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz เพื่อหาความเหมาะสมต่อการใช้งานในสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท ชานเมือง และตัวเมือง โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1. สร้างแบบจำลองเครือข่ายการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารในพื้นที่ชนบท ชานเมือง และพื้นที่ตัวเมือง ความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz ด้วยโปรแกรมจำลองเครือข่าย NS-3
2. กำหนดให้พื้นที่แบบจำลองเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดกว้าง 2 กิโลเมตร และยาว 2 กิโลเมตร เท่ากันทุกพื้นที่แบบจำลอง
3. กำหนดให้แบบจำลองมีอุปกรณ์ผู้ใช้งาน (User Equipment : UE) 26 ชุดเท่ากัน และมีตำแหน่งพิกัดในแบบจำลองเป็นตำแหน่งเดียวกันทุกพื้นที่แบบจำลอง
4. ทดสอบและบันทึกผลการทำงานของแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท ชานเมือง และตัวเมือง ความถี่ 2.6 GHz และความถี่ 28 GHz โดยค่าเฉลี่ย Throughput ของทั้ง 26 UEs ต้องได้ค่ามากกว่า 1 Gbps
5. เปรียบเทียบจำนวน gNodeB ของแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท ชานเมือง และตัวเมือง ความถี่ 2.6 GHz และความถี่ 28 GHz

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ประโยชน์ให้กับผู้ให้บริการเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่สามารถประเมินต้นทุนในการให้บริการในเบื้องต้นก่อนการติดตั้งจริงได้ ส่งผลให้ผู้บริโภคสามารถใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและราคาที่เหมาะสม
2. ทำให้ทราบถึงความหนาแน่น ลักษณะสิ่งปลูกสร้าง ของอาคารบ้านเรือนในแต่ละพื้นที่เป็นอุปสรรคต่อการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz แยกต่างหาก
3. ทำให้ทราบถึงความสามารถในการแพร่กระจายคลื่นในพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมแตกต่างกันของความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz

1.6 แผนการดำเนินงาน

สำหรับการดำเนินการทำวิจัยนี้ เนื่องจากผู้วิจัยมีความสนใจในเทคโนโลยีการสื่อสาร 5G จึงเริ่มทำการศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลตามแผนการดำเนินการวิจัยในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินการวิจัย

รายละเอียดงาน	ระ ย ะ เ ว ล า				
	ม.ค.-พ.ค. 63	มิ.ย.-ต.ค. 63	พ.ย. - ธ.ค. 63	ม.ค.-พ.พ.64	มิ.ค.-64
1. ศึกษาคั่นคว่ำและรวบรวมข้อมูล					
2. ศึกษาวิธีการใช้งาน โปรแกรม NS-3					
3. ออกแบบภาพรวมแบบจำลอง					
4. เขียนโปรแกรมจำลองเครือข่ายด้วยโปรแกรม NS-3					
5. ทดสอบแบบจำลอง					
6. วิเคราะห์ข้อมูลและปรับปรุงแก้ไข					
7. สรุปการดำเนินการและจัดทำรูปเล่มงานวิจัย					

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีการสื่อสาร 5G ได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานการสื่อสารไร้สาย ซึ่งปัจจุบันมีความต้องการในการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น และอุปกรณ์การเชื่อมต่อเครือข่ายที่หลากหลายที่มีความต้องการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นนั้นจึงต้องจัดหาย่านความถี่ที่มี Bandwidth ที่กว้างมากเพียงพอสำหรับความต้องการในการใช้งานเพื่อแก้ปัญหาคอขวดของเครือข่ายย่านความถี่สูงตั้งแต่ 30 ถึง 300 GHz หรือย่าน mmWave จึงเป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งจากนักวิจัยด้านโทรคมนาคม และผู้ให้บริการเครือข่ายการสื่อสาร เนื่องจากมี Bandwidth ที่กว้างมากให้ใช้งาน และเสาอากาศที่มีขนาดเล็กเนื่องจากความถี่ที่สูงขึ้นจะทำให้เสาอากาศมีขนาดเล็กลง ทำให้สามารถใช้เสาอากาศแบบอาร์เรย์ได้จำนวนมากขึ้นไปด้วย เครือข่ายสามารถรองรับการใช้งานที่ต้องการการส่งผ่านข้อมูลความเร็วสูงระดับกิกะบิตต่อวินาที (Gbps) การเข้าใช้งานเครือข่ายได้พร้อมกันได้จำนวนมาก และความหน่วงเวลาที่ต่ำ ตามคุณสมบัติหลัก 3 ประการของเทคโนโลยีการสื่อสาร 5G ดังนี้ [10]

2.1 คุณสมบัติหลัก 3 ประการของเทคโนโลยีการสื่อสาร 5G [13]

คุณสมบัติหลัก 3 ประการของเทคโนโลยีการสื่อสาร 5G มีดังนี้

2.1.1 eMBB (enhanced Mobile Broadband)

เป็นคุณสมบัติด้านการรองรับการส่งผ่านข้อมูลความเร็วสูงในระดับกิกะบิตต่อวินาที (Gbps) ซึ่งคุณสมบัตินี้ตอบสนองความต้องการด้านการเข้าถึงข้อมูลที่มีความรวดเร็ว เพื่อรองรับกิจกรรมออนไลน์ที่ใช้ Bandwidth ที่กว้างมากได้ เช่น การรับชมวิดีโอหรือการเล่นเกมออนไลน์ รวมถึงการใช้งานความจริงเสริม (Augmented Reality: AR) และความจริงเสมือน (Virtual Reality: VR) เป็นต้น

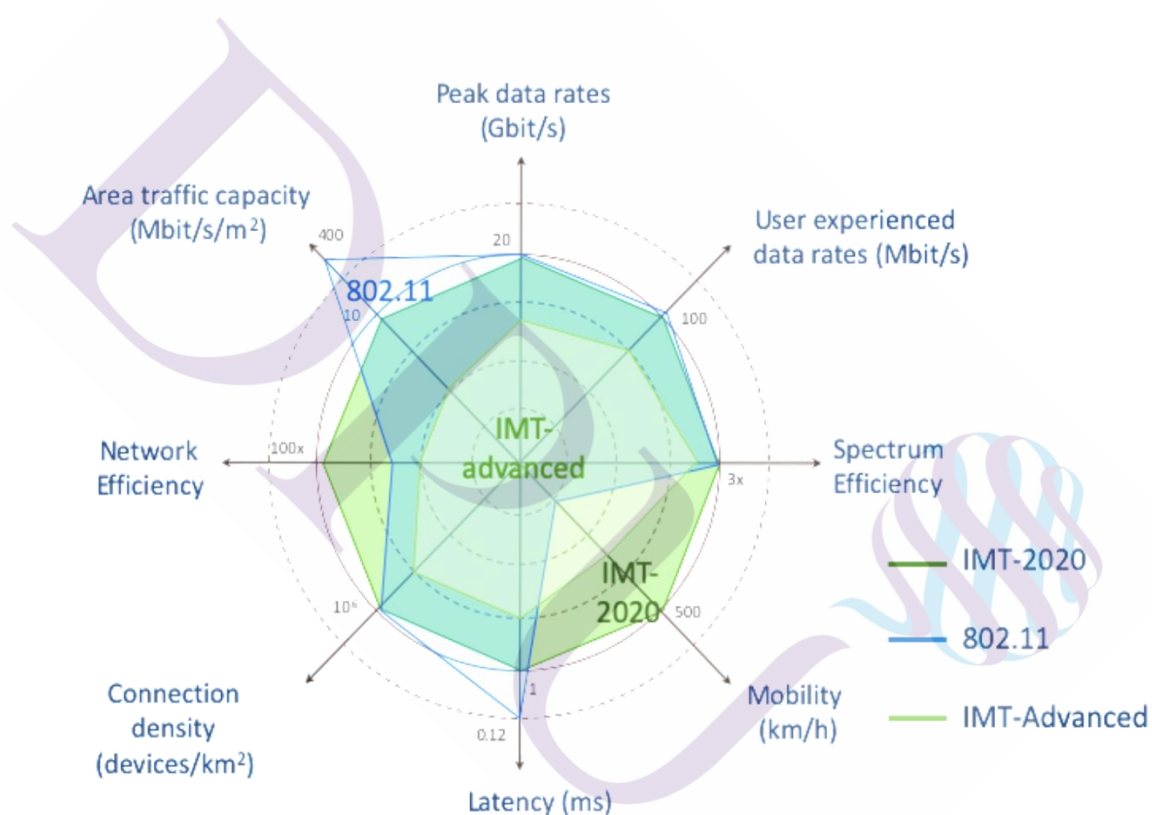
2.1.2 mMTC (massive Machine Type Communications)

เป็นคุณสมบัติที่สามารถรองรับการเชื่อมต่อเข้าใช้งานเครือข่ายของอุปกรณ์จำนวนมากในพื้นที่เดียวกัน โดยสามารถรองรับได้ปริมาณมากถึงระดับ 1,000,000 อุปกรณ์ต่อตารางกิโลเมตร ซึ่งการส่งข้อมูลของอุปกรณ์ที่ใช้งานในลักษณะนี้จะเป็นการส่งข้อมูลปริมาณน้อย ที่ไม่ต้องการ

ความเร็วสูง หรือความหน่วงเวลาต่ำ ซึ่งความสามารถนี้ทำให้การสื่อสารระบบ 5G ด้วยเหตุนี้ mMTC จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะช่วยพัฒนาศักยภาพของ Internet of Think (IoT) ให้ก้าวไกลยิ่งขึ้น

2.1.3 URLLC (Ultra-reliable and Low Latency Communications)

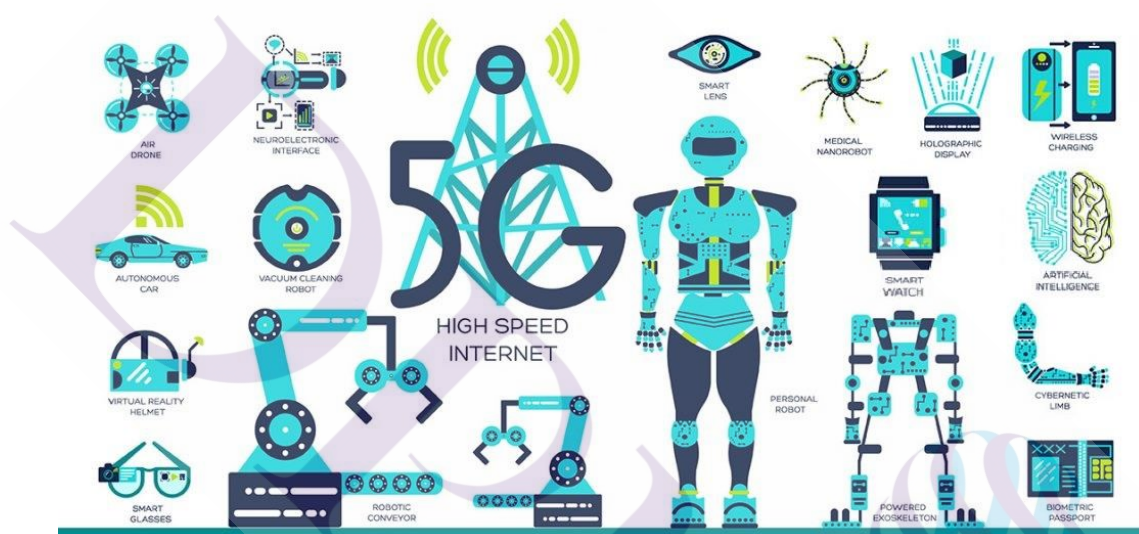
เป็นคุณสมบัติที่ต้องการความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีความเสถียรมาก รวมทั้งมีความหน่วงเวลา (latency) หรือความหน่วงในการส่งข้อมูลต่ำในระดับ 1 มิลลิวินาที ซึ่งความสามารถนี้ทำให้เทคโนโลยี 5G ส่งผ่านข้อมูลระหว่างกันเป็นไปแบบ Real time มากขึ้น เหมาะกับการใช้งานระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง (Critical Application) เช่นการผ่าตัดทางไกล การควบคุมเครื่องจักรในโรงงานหรือการควบคุมรถยนต์ไร้คนขับ



ภาพที่ 2.1 เป้าหมายโดยรวมการพัฒนาคุณสมบัติของระบบสื่อสาร 5G

ที่มา: <https://www.standardsuniversity.org/e-magazine/march-2018-volume-8-issue-1-5g-802-11/how-well-positioned-is-ieee-802-11ax-to-meet-the-imt-2020-performance-requirements/>

การใช้งานคลื่นความถี่ย่าน mmWave มีข้อจำกัดในหลายประการ เนื่องจากความถี่สูงสามารถกระจายคลื่นได้ในระยะทางที่สั้นกว่าย่านความถี่ต่ำ ความอ่อนไหวต่อสิ่งกีดขวางคลื่นมีสูง การลดทอนของคลื่นในบรรยากาศ หรือแม้กระทั่งร่างกายมนุษย์ก็สามารถลดทอนคุณภาพของคลื่นลงได้ จึงมีความเป็นไปได้ว่าคลื่นความถี่ย่าน mmWave นี้จะถูกใช้งานควบคู่ไปกับคลื่นความถี่ย่านต่ำกว่า 6 GHz เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากข้อดีและข้อเสียของคลื่นความถี่ทั้งสองย่านได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการใช้งานแต่ละสภาพพื้นที่ ภาพที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการใช้งานเครือข่ายการสื่อสาร 5G ตามคุณสมบัติหลักในปัจจุบันและในอนาคตต่อไป



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างการใช้งานเครือข่ายการสื่อสาร 5G

ที่มา: <https://www.salika.co/wp-content/uploads/2019/04/5g-used-case-in-thailand>

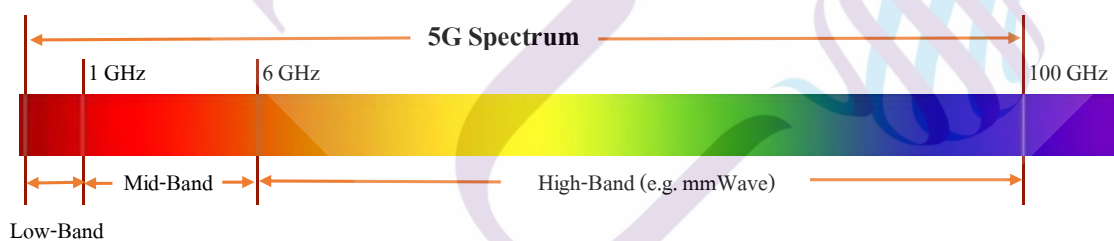
2.2 คลื่นความถี่ย่านมิลลิเมตร (mmWave) [6]

เนื่องจากความถี่ย่าน mmWave เป็นย่านความถี่สูง จึงทำให้ในคลื่นย่านความถี่นี้เดินทางเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับคลื่นแสงโดยคลื่น mmWave จะไม่เดินทางไปตามพื้นดินเหมือนกับคลื่นความถี่ต่ำ และไม่สะท้อนกับพื้นดินและชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (ionosphere) เหมือนกับคลื่น HF (High Frequency) หรือ VHF (Very High Frequency) และยังมีค่าการลดทอนที่สูงมากในชั้นบรรยากาศ (attenuation) การเลี้ยวเบน (diffraction) การแทรกสอด (diffraction) การกระเจิง (scattering) และการทะลุทะลวงผ่านวัตถุ (material penetration) โดยเฉพาะที่ความถี่ 60 GHz และยังสามารถถูกดูดซับโดยความชื้นได้ โดยเฉพาะที่ความถี่ 24 GHz และ 184 GHz

นอกจากนี้ยังมีการลดทอนจากฝนตกเนื่องจากความยาวคลื่นของความถี่ย่าน mmWave มีขนาดใกล้เคียงกับเม็ดฝนพลังงานของคลื่นส่วนใหญ่จึงถูกดูดซับไปกับฝน

ความถี่ย่าน mmWave นี้ให้พื้นที่ครอบคลุม (coverage area) ไม่มากจึงทำให้สามารถนำคลื่นย่านนี้มาใช้งานซ้ำ (frequency reuse) ในพื้นที่ต่าง ๆ ได้มากกว่าคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่า และเหตุที่คลื่น mmWave มีความยาวคลื่นน้อยมากจึงทำให้สามารถออกแบบให้สายอากาศมีขนาดเล็กและมีความกว้างของบีบแคบมาก สามารถเพิ่มจำนวนสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับได้อย่างมากมาย ซึ่งเรียกเทคโนโลยีนี้ว่า massive MIMO (Multi-Input Multi-Output) ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้สามารถเพิ่มการใช้ความถี่ซ้ำ และช่วยชดเชยกับการลดทอนของคลื่นได้เป็นอย่างดี

การสื่อสาร 5G ที่ต้องการความสามารถในการส่งผ่านข้อมูลที่มากมายได้อย่างรวดเร็ว จึงต้องมีการจัดหาย่านความถี่ที่มี Bandwidth ที่กว้างมากพอ ความถี่ย่าน mmWave จึงเป็นที่น่าสนใจในการนำมาใช้งานซึ่งมี Bandwidth ที่กว้างมากถึง 1 GHz และคาดว่าจะสามารถส่งข้อมูลได้สูงถึง 20 Gbps จึงเหมาะต่อการใช้งานอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง (High Speed Internet) การสื่อสารระหว่างยานพาหนะและยานพาหนะ (Vehicle-to-Vehicle Communication) การสื่อสารระหว่างยานพาหนะและระบบพื้นฐาน (Vehicle-to-Infrastructure Communication) และการสื่อสารระหว่างเครื่องจักรและเครื่องจักร (Machine-to-Machine Communication) ภาพที่ 2.3 แสดงการใช้งานในความถี่ย่านต่างๆ สำหรับระบบการสื่อสาร 5G



ภาพที่ 2.3 ย่านความถี่ใช้งานสำหรับระบบการสื่อสาร 5G

ที่มา: <https://ujg433eawlo3i4uqknhm8e1b-wpengine.netdna-ssl.com/wpcontent/uploads/2017/12/5G>

2.3 การแพร่กระจายคลื่น

การแพร่กระจายคลื่นสัญญาณไปในอากาศเพื่อครอบคลุมพื้นที่การให้บริการเครือข่ายการสื่อสารวิทยุ จากตัวส่งสัญญาณถึงตัวรับสัญญาณที่อยู่ห่างกัน โดยมีระยะทางตั้งแต่หลายเมตรจนถึงหลายกิโลเมตรตามคลื่นความถี่ที่ใช้งาน [6]

2.3.1 การสูญเสียในอากาศของคลื่นความถี่ (Free-Space Losses)

การส่งคลื่นย่านความถี่ mmWave ซึ่งความถี่ย่านนี้จะเกิดการสูญเสียในอากาศที่สูงมาก การสูญเสียในการส่งคลื่นในอากาศตามกฎของ Friis แสดงในสมการ 2.1

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ P_t คือค่ากำลังส่งของด้านส่ง P_r คือค่ากำลังที่ด้านรับ G_t คือค่าอัตราขยายของเสาอากาศด้านส่ง G_r คือค่าอัตราขยายของเสาอากาศด้านรับ λ คือค่าความยาวคลื่น และ d คือค่าระยะทางระหว่างด้านส่งกับด้านรับ

ค่าอัตราขยายของเสาอากาศมีความสัมพันธ์กับค่า Effective Aperture (A_{eff}) ดังแสดงในสมการที่ (2.2)

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff} \quad (2.2)$$

จากสมการ (2.1) แสดงให้เห็นได้ว่าค่ากำลังสัญญาณด้านรับจะมีค่ากำลังลดลงเป็นกำลังสองของระยะทางระหว่างด้านรับกับด้านส่งตามสมการการสูญเสียในอากาศของ Friis (Friis Free Space Losses)

การสูญเสียตามเส้นทางการกระจายคลื่น (Free Space Path Loss) เป็นความแตกต่างระหว่างกำลังด้านส่งกับกำลังด้านรับที่รับได้ วัดค่ากำลังสัญญาณในหน่วยเดซิเบล (Decibel: dB) แสดงในสมการ (2.3)

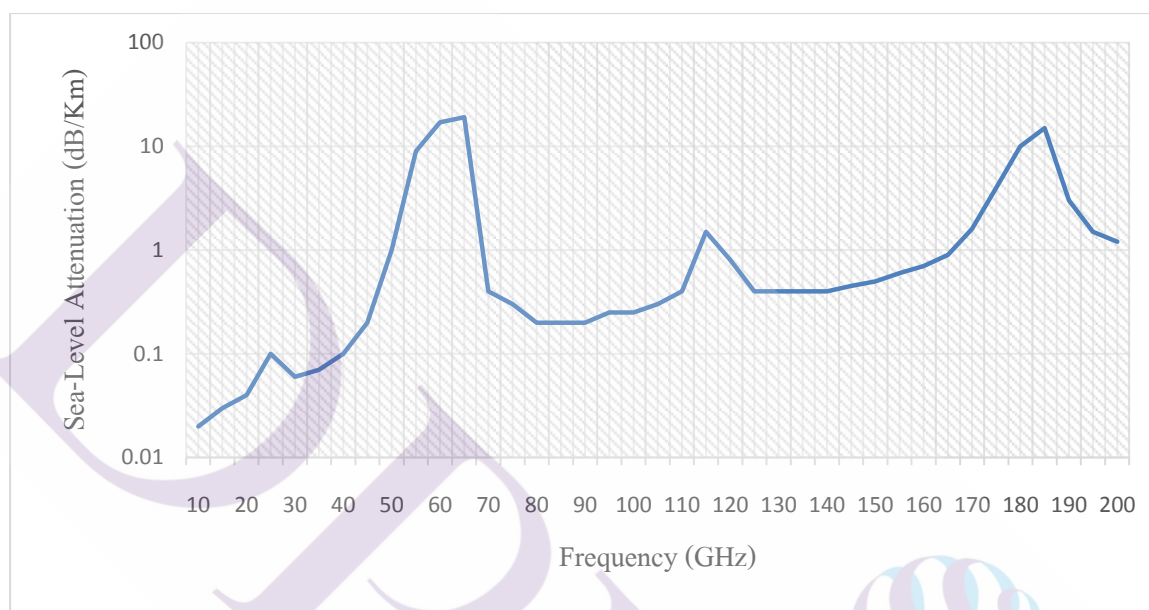
$$PL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (2.3)$$

กรณีไม่นำอัตราขยายของเสาอากาศมาพิจารณาด้วยแสดงในสมการ (2.4)

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (2.4)$$

2.3.2 การสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นในบรรยากาศ

การสูญเสียที่เกิดจากก๊าซในบรรยากาศสำหรับความถี่ย่าน mmWave นั้นจะมีความอ่อนไหวต่อการลดทอนคลื่นสัญญาณที่เกิดจากก๊าซในบรรยากาศเช่น จากออกซิเจนในอากาศ (O_2) หรือไอน้ำ (H_2O) จากภาพที่ 2.4 จะเห็นว่าที่ความถี่ 60 GHz และ 180 GHz จะเกิดค่าการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นในอากาศที่สูงมาก [4],[6]



ภาพที่ 2.4 การสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นในอากาศความถี่ย่าน mmWave [4]

2.4 โครงสร้างเฟรมข้อมูล 5G mmWave [6], [7], [10]

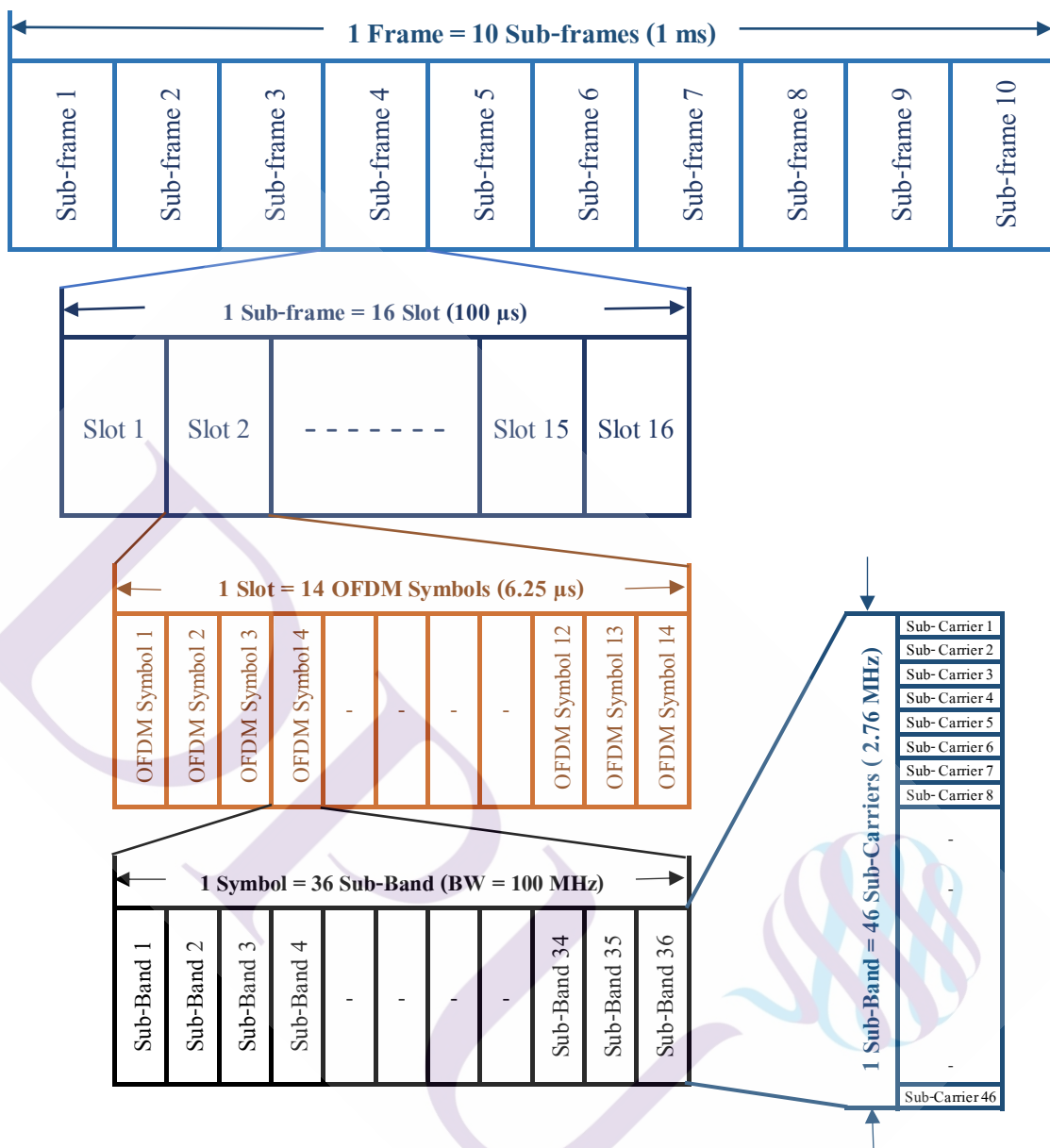
โครงสร้างเฟรมข้อมูลของเทคโนโลยีการสื่อสาร 5G เป็นโครงสร้างแบบ Time Division Duplex (TDD) สำหรับข้อมูลด้าน Uplink และ Downlink เพื่อให้สามารถรองรับและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน Bandwidth ที่กว้างและประโยชน์ในการใช้งานช่องสัญญาณ ซึ่งมีช่วงเวลา (Symbol periods) และความยาวของ Slot ที่สั้นมากทำให้สามารถลดค่า Latency ในเครือข่ายและเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านข้อมูลได้ปริมาณที่มากขึ้นได้

เฟรมข้อมูลสำหรับใช้งานวิจัยได้ทำการประยุกต์จาก NS-3 mmWave module มีการปรับปรุงโครงสร้างของเฟรมข้อมูล เพื่อให้สามารถรองรับ Bandwidth ขนาด 100 MHz โครงสร้างของเฟรมข้อมูลแต่ละเฟรมมีความยาว 1 ms ประกอบด้วย 10 Subframes แต่ละ Subframe แยกออกเป็น 16 Slot แต่ละ Slot สามารถแยกออก 14 Orthogonal Frequency Division Multiple

Symbols (OFDM Symbol) ซึ่งมีความยาว 6.25 μ s และในแต่ละ OFDM Symbols ยังสามารถแบ่งออกเป็น 36 Sub-Band สำหรับ Bandwidth 100 MHz แต่ละ Sub-Band มีความกว้าง 2.76 MHz และมีความกว้างของคลื่นพาหะย่อย (Subcarrier Spacing) เท่ากับ 60 KHz ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่า Numerologies (μ) ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และโครงสร้างของเฟรมข้อมูลแสดงในภาพที่ 2.5

ตารางที่ 2.1 ค่า Numerologies (μ) และค่า Subcarrier Spacing (Δf)

Numerologies (μ)	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15 [KHz]$	Cyclic Prefix
0	15	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal, Extended
3	120	Normal
4	240	Normal
5	480	Normal



ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างโครงสร้างเฟรมข้อมูล 5G mmWave [10]

รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างเฟรมข้อมูลสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้แสดง
รายละเอียดในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างเฟรมข้อมูลสำหรับงานวิจัย

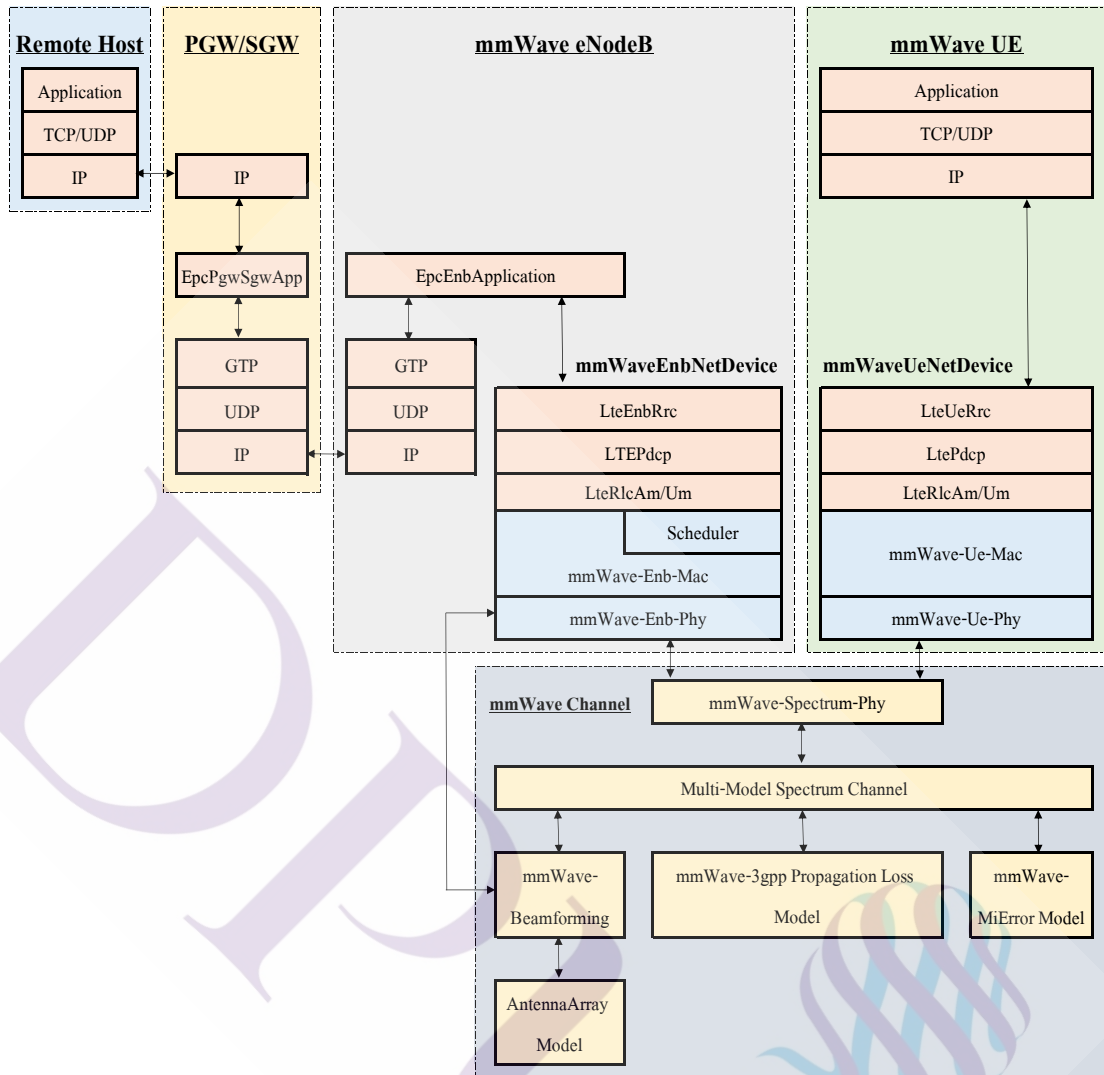
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ 28 GHz	ค่าพารามิเตอร์ 2.6 GHz	รายละเอียด
SubframePerFrame	10	10	Number of subframes in one frame
SubframePeriod	100	100	Length of one subframe in μs
SlotPerSubframe	16	4	Number of slot per sub-frame
SymbolPerSlot	14	14	Number of OFDM Symbols per Slot
SymbolPeriod	0.44×10^{-6}	1.78×10^{-6}	Length of OFDM Symbols in μs
ChunkPerRB	36	72	Number of Sub-Band
SubCarriersPerChunk	46	46	Number of subcarriers in each sub-band
Subcarrier Spacing	60×10^3	30×10^3	Subcarrier Spacing in Hz
ChunkWidth	2.76×10^6	1.38×10^6	Width of one sub-band in Hz
CenterFreq	28×10^9	2.6×10^9	Carrier frequency in Hz
BandWidth	100×10^6	100×10^6	Band Width in Hz
NumDlCtrlSymbols	1	1	Downlink control symbols per subframe
NumUlCtrlSymbols	1	1	Uplink control symbols per subframe
NumHarqProcess	20	20	Number of concurrent stop-and-wait Hybrid ARQ processes per user

2.5 แบบจำลองเครือข่ายการสื่อสาร 5G [5]

โปรแกรมจำลองเครือข่าย (Network Simulator 3; NS-3) ได้มีการพัฒนาแบบจำลองการสื่อสาร 5G ที่เรียกว่า NS-3 mmWave Model สำหรับรองรับการจำลองเครือข่ายการสื่อสาร 5G ย่านความถี่สูง (mmWave)

2.5.1 แบบจำลองเครือข่ายการสื่อสาร 5G ความถี่ย่าน mmWave

แบบจำลองเครือข่ายการสื่อสารความถี่ย่าน mmWave หรือ NS-3 mmWave Model สำหรับจำลองสถานการณ์การสื่อสาร 5G สำหรับความถี่ย่าน mmWave ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันเช่น สภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท (Rural Macro Cell; RMa) พื้นที่ชานเมือง (Sub-Urban Macro Cell; UMa) พื้นที่ตัวเมือง (Urban Micro Cell-StreetCanyon; Umi) พื้นที่ภายในออฟฟิศแบบผสม (InH-Office Mixed) พื้นที่ภายในออฟฟิศแบบเปิด (InH-Office Open) และพื้นที่ห้างสรรพสินค้า (InH-Shopping Mall) ใน NS-3 mmWave โมเดลยังประกอบไปด้วยโมเดลย่อยต่างๆซึ่งทำหน้าที่แตกต่างกันไปในเครือข่ายการสื่อสาร 5G ย่านความถี่ mmWave เช่น โมเดลการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณ (Propagation Loss Model) โมเดลช่องสัญญาณ (Channel Model) โมเดลชั้นกายภาพ (Physical Model) และโมเดลอื่นๆ สามารถพัฒนาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษา C++ ภาพที่ 2.6 แสดงไดอะแกรมโมเดลจำลองการสื่อสารด้วย NS-3 mmWave Model [5], [6], [7]



ภาพที่ 2.6 ไดอะแกรมโมเดลจำลองการสื่อสารด้วย NS-3 mmWave Model

2.5.2 แบบจำลองการสูญเสียในการแพร่กระจายคลื่น (Propagation Path Loss Model)

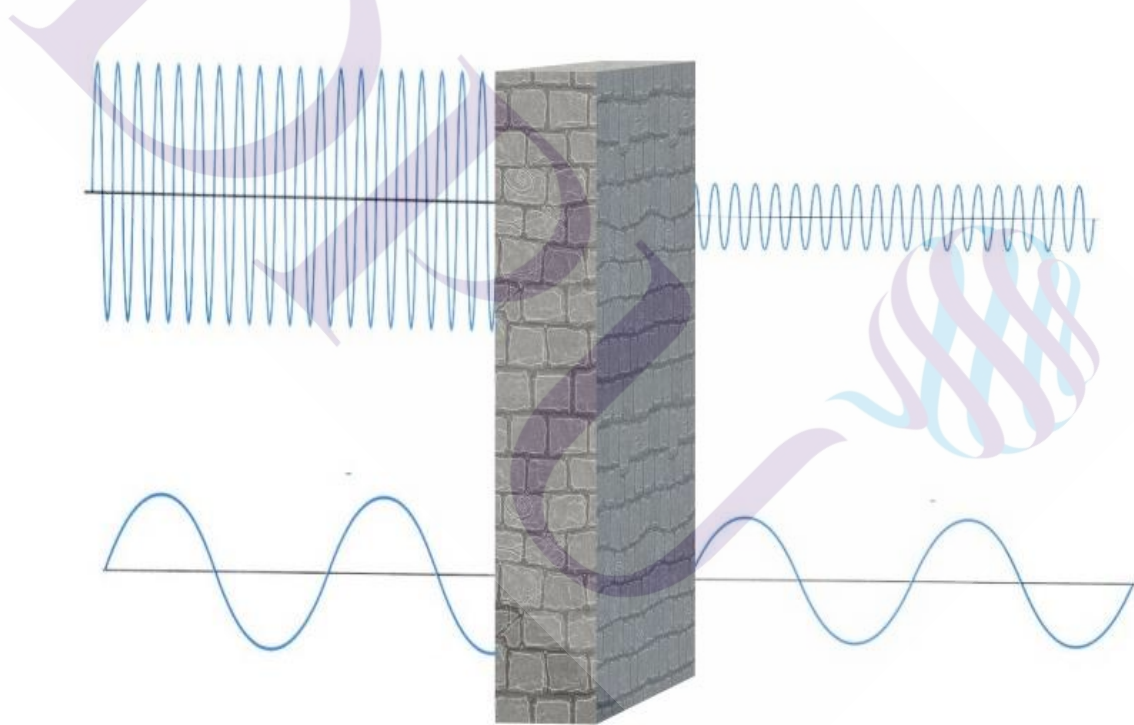
ย่านความถี่ต่ำการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นจะมีค่าต่ำ ทำให้ได้พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณที่กว้าง และย่านความถี่สูงจะมีค่าการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นเพิ่มมากขึ้นตามความถี่ที่สูงขึ้นพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณจึงแคบลงตามไปด้วย ย่านความถี่จึงมีผลกระทบต่อระยะทางการเดินทางของคลื่น การสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณในพื้นที่ที่โล่ง ไม่มีสิ่งกีดขวางคลื่น (Line Of Sight : LOS) แสดงในสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.5) เป็นการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นที่แปรผันตามความถี่และระยะทาง [8]

$$Pathloss = 20\log_{10} \left[\frac{4\pi d}{\lambda} \right] dB \quad (2.4)$$

$$PLdB = 92.44 + 20\log_{10} f(GHz) + 20\log_{10} d(Km) \quad (2.5)$$

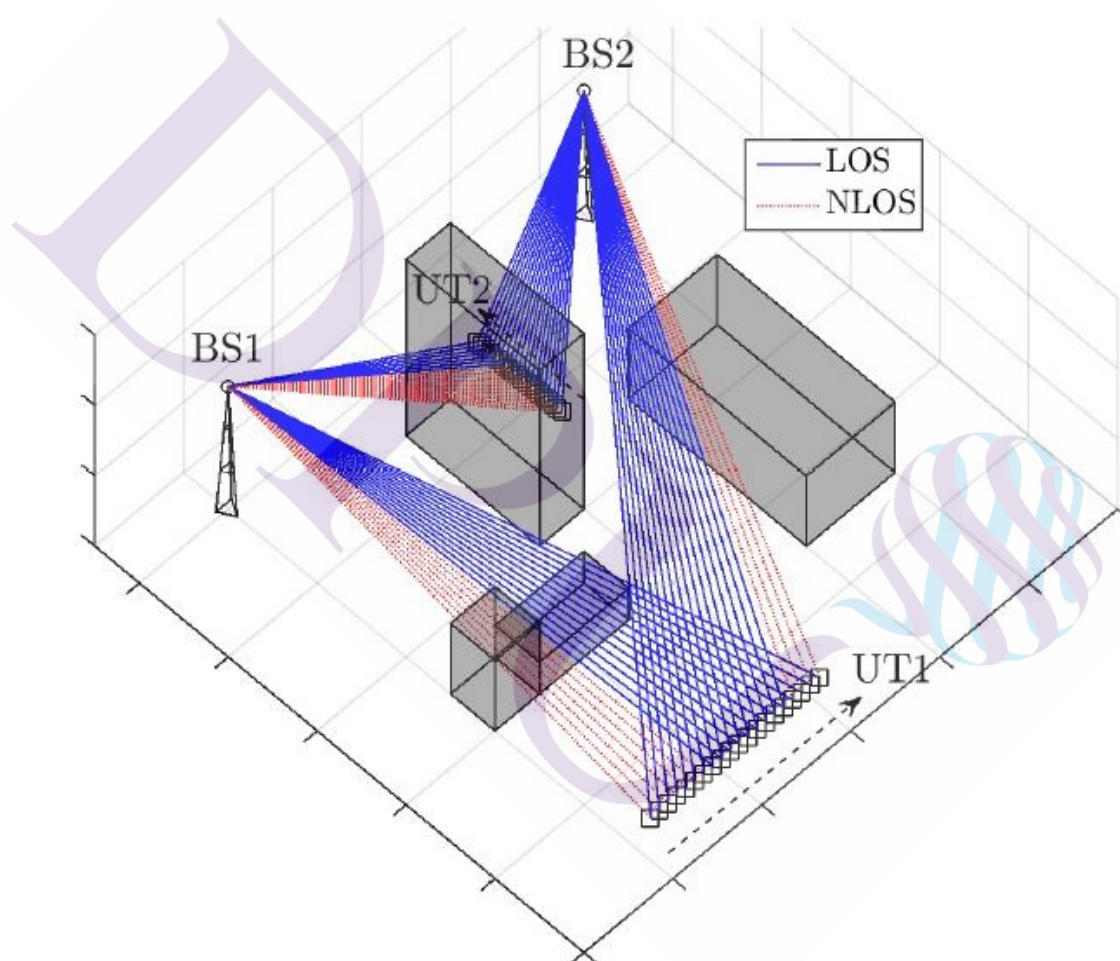
เมื่อ d คือระยะทางระหว่างตัวส่ง (Tx) กับตัวรับสัญญาณ (Rx) ในหน่วยเมตร และ λ คือความยาวคลื่น

ในสถานะที่มีสิ่งกีดขวางคลื่น (Non-Line-Of-Sight : NLOS) ที่ย่านความถี่สูงการสูญเสียจากการแพร่กระจายคลื่นสูง และเมื่อมีสิ่งกีดขวางคลื่นทำให้การสูญเสียเพิ่มมากขึ้นไปอีก เนื่องจากย่านความถี่สูงมีความสามารถในการทะลุทะลวงสิ่งกีดขวางที่ไม่ดีนัก การลดลงของความแรงคลื่นสัญญาณสูงมากดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การลดทอนคลื่นสัญญาณเมื่อทะลุทะลวงสิ่งกีดขวาง [8]

ในแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น mmWave-3gpp-Propagation-Loss-Model ที่มีอยู่ในโปรแกรม NS-3 นั้น มีการคำนวณการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบภายนอกอาคาร (Outdoor to Outdoor) และแบบภายในอาคาร (Indoor to Indoor) โดยมีเงื่อนไขตามสถานะของช่องสัญญาณว่าเป็นสถานะ LOS หรือ NLOS ระยะทาง ความสูงของสถานีฐาน และสภาพแวดล้อมในการจำลอง เช่น RMa Uma Umi หรือ InH-Office และยังมีการนำส่วนที่เป็นคลื่นเงาสะท้อน (Wave Shadow) มาคำนวณร่วมในแบบจำลองการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น



ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์ LOS และ NLOS ที่คขวางคลื่นโดยอาคาร [5]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของคลื่นความถี่ 28 GHz มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.6.1 5G NR Coverage Performance and Beam Management Demonstrated in an Outdoor Urban Environment at 28 GHz [2]

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของคลื่นความถี่ 28 GHz โดยระบบทดสอบ 5G NR และใช้สายอากาศแบบ Massive MIMO ทดสอบโดยการรับส่งสัญญาณแบบหนึ่งผู้รับ (Single User) และแบบหลายผู้รับ (Multi-User) กำหนดแถบกว้างความถี่ 400 MHz ในสภาพแวดล้อมเมืองแบบกึ่งภายในและภายนอกอาคารเพื่อประเมินประสิทธิภาพของสัญญาณครอบคลุมและการแพร่กระจายคลื่น การทดสอบพบว่าค่า Throughput สูงสุดมีค่าเท่ากับ 6.2 Gbps หรือ 15.5 bps/Hz ในสภาวะ LOS และการใช้งานสายอากาศแบบ Massive MIMO เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้สามารถเพิ่มการรองรับการใช้งานของ UE จำนวนมากได้ จากการศึกษางานวิจัยนี้ พบว่ามีข้อดีและข้อจำกัดดังนี้

ข้อดีของงานวิจัย

- 1) เป็นการทดสอบที่ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์วัดทดสอบจริง
- 2) ทดสอบโดย UE มีการเคลื่อนที่ความเร็ว 5-10 km/h
- 3) มีการทดสอบการรับส่งสัญญาณแบบหนึ่งผู้รับ (Single User) และแบบหลายผู้รับ (Multi-User)

ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1) การทดสอบจะมุ่งเน้นไปที่ประสิทธิภาพของสายอากาศ
- 2) การทดสอบอยู่ในพื้นที่สภาพแวดล้อมไม่หลากหลาย
- 3) ความสูงของอุปกรณ์ด้านส่งมีระยะความสูงเดียว
- 4) อุปกรณ์ด้านรับสัญญาณเป็นแบบ Mobile

2.6.2 Propagation Path Loss Modeling and Coverage Measurements in Urban Microcell in mmWave Frequency Bands [8]

งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นและการวัดพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณคลื่นความถี่ 10 GHz 28 GHz 38GHz และ 60 GHz โดยใช้สายอากาศแบบฮอร์นที่ด้านส่งและสายอากาศแบบรอบทิศทางที่ด้านรับ วัดและบันทึกค่าความหน่วงเวลา ค่าการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น แยกวัดตามระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ มุมและทิศทางของสายอากาศที่แตกต่างกัน ทำการวัดและทดสอบในหลายสภาพแวดล้อมพื้นที่จริง

2.6.2.1 ค่าการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่น วัดค่าการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นแบบภายนอกอาคาร ซึ่งกำหนดให้ความสูงของสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับอยู่ในระดับต่ำกว่าหลังคาของอาคาร และระยะห่างระหว่างสายอากาศด้านส่งกับด้านรับมีระยะเป็น 20 เมตร 100 เมตร และ 200 เมตร ค่าการสูญเสียที่วัดได้ในแต่ละย่านความถี่แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าการสูญเสียในเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นของแต่ละความถี่

ความถี่	ระยะทาง	NLOS (dB)	LOS (dB)
10 GHz	20	91.3	79.4
	100	113.5	91.8
	200	124.0	97.7
28 GHz	20	95.6	84.2
	100	121.7	96.3
	200	132.3	104.7
38 GHz	20	103.9	91.0
	100	131.1	104.2
	200	142.1	109.8
60 GHz	20	107.6	97.3
	100	135.8	112.7
	200	147.4	119.3

2.6.2.2 ค่าความหน่วงเวลาในการแพร่กระจาย จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการขยายของสายอากาศลดลงซึ่งเกิดจากการที่ Beam Forming ที่กว้างขึ้น และกลับกันจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราการขยายของสายอากาศลดลงซึ่งเกิดจากการที่ Beam Forming แคบลง

ตารางที่ 2.4 ค่าความหน่วงเวลาในการแพร่กระจายในสถานะ NLOS

รายละเอียด	28GHz	38 GHz	60 GHz
Mean RMS delay spread (ns)	74.4	22.8	7.2
Max RMS delay spread (ns)	455.3	184.1	37.7

2.6.2.3 สัญญาณครอบคลุมพื้นที่แบบภายนอกอาคารและค่า Link budget ทำการวิเคราะห์ที่ย่านความถี่ 28 GHz เนื่องจากเป็นย่านความถี่กลางของระบบทดสอบ กำหนดค่ากำลังส่ง Tx EIRP รวมค่าอัตราการขยายด้านรับเป็น 66 dBm ประกอบด้วยกำลังส่งของสถานีฐาน 30 dBm อัตราการขยายสายอากาศด้านส่ง 26 dBi อัตราการขยายสายอากาศด้านรับ 10 dBi และมี Bandwidth เป็น 1 GHz ตารางที่ 2.5 แสดงการวิเคราะห์ Link Budget ที่สถานการณ์ต่างๆ ของย่านความถี่ 28 GHz

ตารางที่ 2.5 แสดงการวิเคราะห์ Link Budget ที่สถานการณ์ต่างๆ ของย่านความถี่ 28 GHz

สภาพแวดล้อม	พื้นที่เปิดโล่ง	พื้นที่ชานเมือง	พื้นที่ตัวเมือง
LOS/NLOS	LOS	NLOS	NLOS
Path Loss Model	$PL(d) = 61.4 + 20\log_{10}(d)$	$PL(d) = 47.2 + 29.8\log_{10}(d)$	$PL(d) = 61.4 + 34.1\log_{10}(d)$
Max. Distance for 1 Gbps	976 Meter	305 Meter	58 Meter

จากการศึกษางานวิจัยนี้ พบว่ามีข้อดีและข้อจำกัดดังนี้

ข้อดีของงานวิจัย

- 1) เป็นการทดสอบในพื้นที่จริงใช้เครื่องมือและอุปกรณ์วัดทดสอบจริง
- 2) ทดสอบหลากหลายย่านความถี่
- 3) ทดสอบในหลายสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

ข้อจำกัดของงานวิจัย

ระยะเวลาทางระหว่างด้านส่งกับด้านรับไม่หลากหลาย

ตารางที่ 2.6 ตารางเปรียบเทียบงานวิจัย

รายละเอียด	การทดสอบ	สภาพแวดล้อมพื้นที่ทดสอบ	ระยะห่างระหว่างด้านส่งกับด้านรับ	การเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ด้านรับ	สถานะสัญญาณ	ความสูงของสถานีฐาน
งานวิจัยที่นำเสนอ	โปรแกรมจำลองเครือข่าย NS-3	สภาพแวดล้อมชนบท ชานเมือง และตัวเมือง	หลากหลายระยะ	1 m/s	LOS and NLOS	15, 25 และ 35 เมตร
5G NR Coverage, Performance and Beam Management Demonstrated in an Outdoor Urban Environment at 28 GHz	เครื่องมือและอุปกรณ์จริง	Urban in Stockholm Sweden	หลากหลายระยะ	5-10 km/h	LOS and NLOS	ระดับเดียว
Propagation Path Loss Modeling and Coverage Measurements in Urban Microcell in mmWave Frequency Bands	เครื่องมือและอุปกรณ์จริง	Open Space, Cmapus and Dense Urban	กำหนดเพียง 3 ระยะ	ไม่มีการเคลื่อนที่	LOS and NLOS	ระดับเดียว

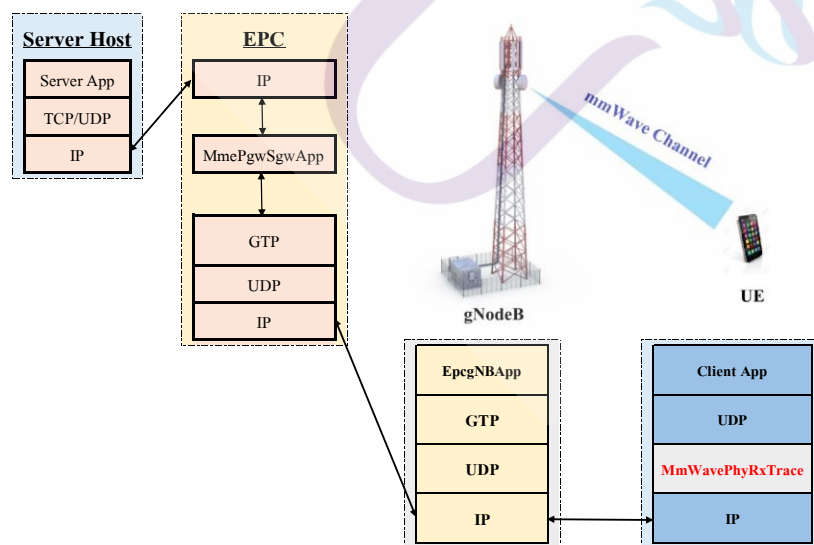
บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยส่วนการออกแบบภาพรวมการทำงาน การออกแบบสภาพแวดล้อมแบบจำลอง ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง การทดสอบ การบันทึกผล และการวิเคราะห์การทำงานแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 2.6 GHz กับความถี่ 28 GHz ในสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท ชานเมือง และตัวเมือง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ภาพรวมการทำงานของแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร

การทำงานของแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารภายนอกอาคาร ความถี่ 2.6 GHz กับ 28 GHz ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วน Server Host ส่วน 5G Core Network (EPC) ส่วนสถานีฐาน (gNodeB) ส่วน mmWave Channel และส่วนของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน (UE) ทั้งหมดถูกจำลองขึ้นเพื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันคือ สภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท พื้นที่ชานเมือง และพื้นที่ตัวเมือง ซึ่งแสดงรายละเอียดในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพแบบจำลองเครือข่ายการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร

จากภาพที่ 3.1 สามารถแสดงรายละเอียดการจำลองอุปกรณ์และการทำงานในภาคส่วนต่างๆของแบบจำลองได้ดังต่อไปนี้

- 1) Server Host (Server Application) ทำหน้าที่เป็นส่วนให้บริการข้อมูล Data Application แก่ UE ที่ต้องการเข้าถึงและทำการ Download ข้อมูล
- 2) โครงข่ายหลัก Evolved Packet Core (EPC) โครงข่ายหลัก Evolved Packet Core (EPC) ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักและซึ่งมีหน้าที่การทำงานต่อไปนี้
- 3) Mobility Management Entity (MME) เป็นอุปกรณ์สำหรับการจัดการส่วนควบคุม (Control Plane) การใช้งานเครือข่ายและการจัดการเกี่ยวกับการติดตามการเคลื่อนที่ของ UE
- 4) Serving Gateway (S-GW) เป็นเกตเวย์สำหรับใช้ในการเชื่อมต่อกับส่วนโครงข่ายไร้สาย E-UTRAN โดยจะทำการสร้างส่วนของการขนส่งข้อมูล (Bearer) สำหรับ UE แต่ละราย แล้วส่งต่อไปที่ P-GW เพื่อส่งออกปลายทางต่อไป
- 5) Packet Data Network Gateway (P-GW) ทำหน้าที่เป็นเกตเวย์เพื่อเชื่อมกับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตภายนอก จัดสรร IP Address และ Bandwidth แก่ UE
- 6) สถานีฐาน (gNodeB) ทำหน้าที่เป็นโครงข่ายไร้สายเพื่อใช้ในการกระจายคลื่นสัญญาณความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz ให้กับ UE และครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่แบบจำลอง
- 7) mmWave Channel ทำหน้าที่เป็นช่องสัญญาณการสื่อสารระหว่าง UE กับ gNodeB โดยการใช้งานโมเดล mmWave Channel ซึ่งประกอบไปด้วยฟังก์ชันการทำงานของสายอากาศเช่น ฟังก์ชันการ Beamforming ฟังก์ชัน Multi Input Multi Output (MIMO) ของสายอากาศ
- 8) อุปกรณ์ผู้ใช้งาน (UE) ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ใช้งานในเครือข่าย เพื่อทำการ Download ข้อมูล Data Application และได้ทำการเพิ่มส่วนของการติดตามบันทึกจำนวนข้อมูล Data Packet ที่เรียกว่า mmWavePhyRxTrace เข้าไปด้วย ซึ่งสามารถบันทึกจำนวน Data Packet ตลอดการทำงานของแบบจำลอง และแสดงผลเป็นไฟล์ข้อมูลที่สามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพการส่งผ่านข้อมูลได้

3.2 สมมติฐานของงานวิจัย

3.2.1 การสื่อสาร 5G กับการใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz

คลื่นความถี่ 2.6 GHz มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นคลื่นความถี่หลักในทุกพื้นที่ เนื่องจากเป็นคลื่นความถี่ที่สามารถให้พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณที่กว้าง และใช้คลื่นความถี่ 28 GHz เป็นคลื่นเสริมในพื้นที่เฉพาะบริเวณ (Hot Spot) ที่มีความต้องการใช้งานเครือข่ายที่หนาแน่น

3.2.2 การสื่อสาร 5G กับการใช้งานคลื่นความถี่ 28 GHz

คลื่นความถี่ 28 GHz มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นคลื่นความถี่เสริมในทุกพื้นที่ โดยสามารถกำหนดใช้ในพื้นที่เฉพาะบริเวณที่มีผู้ใช้บริการหนาแน่น เช่น บริเวณห้างสรรพสินค้า ศูนย์จัดแสดงสินค้า สนามกีฬา บริเวณสำนักงาน แหล่งโรงงานอุตสาหกรรมหรือนิคมอุตสาหกรรม เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบแบบจำลองและออกแบบการทดสอบ เพื่อใช้ในการทดสอบสมมติฐานข้างต้นโดยทำการจำลองระบบดังนี้

1) ทดสอบการใช้งานเครือข่ายการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร คลื่นความถี่ 2.6 GHz กับ 28 GHz ในพื้นที่ชนบท เพื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ความเหมาะสมต่อการใช้งานคลื่นความถี่ ทั้ง 2 คลื่นในพื้นที่ชนบท

2) ทดสอบการใช้งานเครือข่ายการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร คลื่นความถี่ 2.6 GHz กับ 28 GHz ในพื้นที่ชานเมือง เพื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ความเหมาะสมต่อการใช้งานคลื่นความถี่ ทั้ง 2 คลื่นในพื้นที่ชานเมือง

3) ทดสอบการใช้งานเครือข่ายการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร คลื่นความถี่ 2.6 GHz กับ 28 GHz ในพื้นที่ตัวเมือง เพื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ความเหมาะสมต่อการใช้งานคลื่นความถี่ ทั้ง 2 คลื่นในพื้นที่ตัวเมือง

3.3 การออกแบบสภาพแวดล้อมพื้นที่แบบจำลอง

การสื่อสาร 5G ความถี่ 2.6 GHz กับ 28 GHz มีการใช้งานทั้งภายในและภายนอกอาคาร สำหรับการออกแบบเครือข่ายเพื่อใช้งานภายในอาคารซึ่งเป็นการใช้งานจำกัดภายในพื้นที่การออกแบบเครือข่ายจึงขึ้นอยู่กับลักษณะ ประเภท และขนาดของอาคาร และแต่ละอาคารมีพื้นที่ความต้องการใช้งานที่แตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจในการเปรียบเทียบใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz กับ 28 GHz สำหรับการสื่อสาร 5G แบบภายนอกอาคาร ซึ่งเป็นพื้นที่กว้างในสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท ชานเมือง และตัวเมือง เพื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานต่อผู้ใช้บริการเครือข่ายและความคุ้มค่าในการลงทุนของผู้ให้บริการ

แบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบให้มีลักษณะเป็น 3 สภาพแวดล้อมคือ สภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท สภาพแวดล้อมพื้นที่ชานเมือง และสภาพแวดล้อมพื้นที่ตัวเมือง ออกแบบให้แต่ละสภาพแวดล้อมมีลักษณะเป็นพื้นที่ราบ มีพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 2,000 เมตร และยาว 2,000 เมตร เท่ากันทุกสภาพแวดล้อม โดยแต่ละสภาพแวดล้อมได้ออกแบบให้มีขนาด ความสูง ประเภท และ

ความหนาแน่นของอาคารที่แตกต่างกันตามแต่ละสภาพแวดล้อม โดยประเภทของอาคารออกแบบ โดยใช้ Building Model ของโปรแกรม NS-3 ซึ่งมีให้เลือกใช้งานอยู่ 3 ประเภทดังนี้

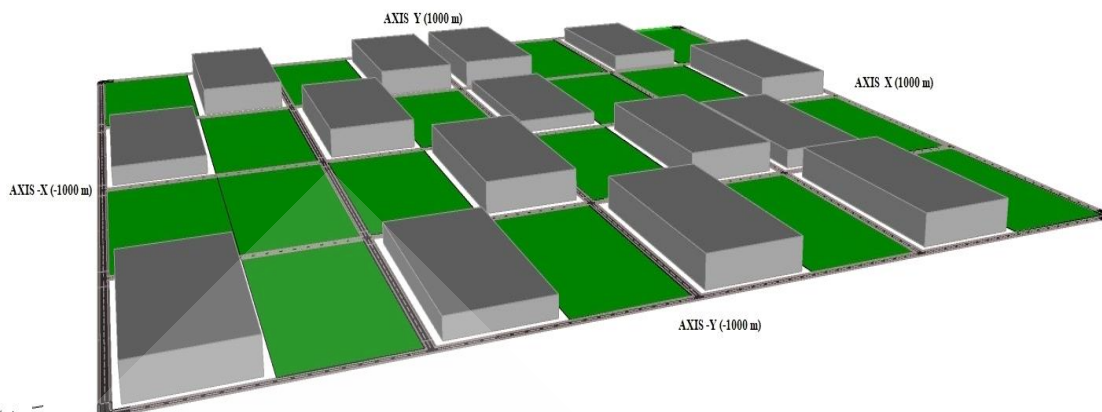
- 1) ประเภทอาคารที่พักอาศัย (Residential)
- 2) ประเภทอาคารพาณิชย์ (Commercial)
- 3) ประเภทอาคารสำนักงาน (Office)

แบบจำลองของอาคารสามารถกำหนดตำแหน่ง ขนาด ความสูง จำนวนชั้น จำนวนห้อง และสามารถกำหนดชนิดของผนังด้านนอกอาคารได้ ซึ่งชนิดของผนังด้านนอกอาคารในแบบจำลองของโปรแกรม NS-3 มีให้เลือกใช้อยู่ 4 ชนิดดังนี้

- 1) ผนังด้านนอกอาคารที่ทำจากไม้ (Wood)
- 2) ผนังด้านนอกอาคารที่ทำจากคอนกรีตแบบมีช่องหน้าต่าง (Concrete with Windows)
- 3) ผนังด้านนอกอาคารที่ทำจากคอนกรีตไม่มีช่องหน้าต่าง (Concrete without Windows)
- 4) ผนังด้านนอกอาคารที่ทำจากอิฐบล็อก (Stone Blocks)

3.3.1 การออกแบบสภาพแวดล้อมแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท

ในการออกแบบ แบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท ออกแบบให้อาคารที่อยู่อาศัยไม่หนาแน่นมาก เป็นพื้นที่โล่งกว้างเป็นส่วนใหญ่ โดยจำลองให้พื้นที่ประกอบด้วยอาคารเป็นประเภทที่พักอาศัย โดยมีผนังด้านนอกของตัวอาคารเป็นไม้เหมือนกันทุกอาคาร แต่ละอาคารมีขนาดความสูงไม่เกิน 2 ชั้น โดยมีความสูงเฉลี่ย 7 เมตร และมีขนาดพื้นที่ของอาคารทั้งหมดคิดเป็น 21.8% ของพื้นที่แบบจำลองทั้งหมด ซึ่งโปรแกรม NS-3 สามารถจำลองอาคารต่างๆ เป็นรูปทรงกล่องสี่เหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท

แบบจำลองสภาพแวดล้อมสามารถกำหนดตำแหน่ง ขนาด ความสูง และประเภทของอาคาร โดยแต่ละอาคารสามารถกำหนดจำนวนชั้น จำนวนห้องในแต่ละชั้น และขนาดของห้องได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การกำหนดตำแหน่ง ขนาด และประเภทอาคาร ในแบบจำลองพื้นที่ชนบท

ลำดับ	อาคารสูง (เมตร)	จำนวนชั้น	ขนาดห้อง (กว้าง×ยาว×สูง) เมตร	พิกัดแนวแกน X (เมตร)	พิกัดแนวแกน Y (เมตร)	ประเภทอาคาร
1	8	2	4×4×3	(-650)-(-500)	520-880	Residential
2	8	2	4×4×3	(-20)-(-250)	520-780	Residential
3	8	2	4×4×3	20-180	520-780	Residential
4	5	1	4×4×3	500-750	520-780	Residential
5	5	1	4×4×3	(-980)-(-800)	20-480	Residential
6	8	2	4×4×3	(-500)-(-300)	20-400	Residential
7	5	1	4×4×3	30-200	30-400	Residential
8	8	2	4×4×3	850-950	40-460	Residential
9	8	2	4×4×3	(-200)-(-30)	(-400)-(-40)	Residential

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

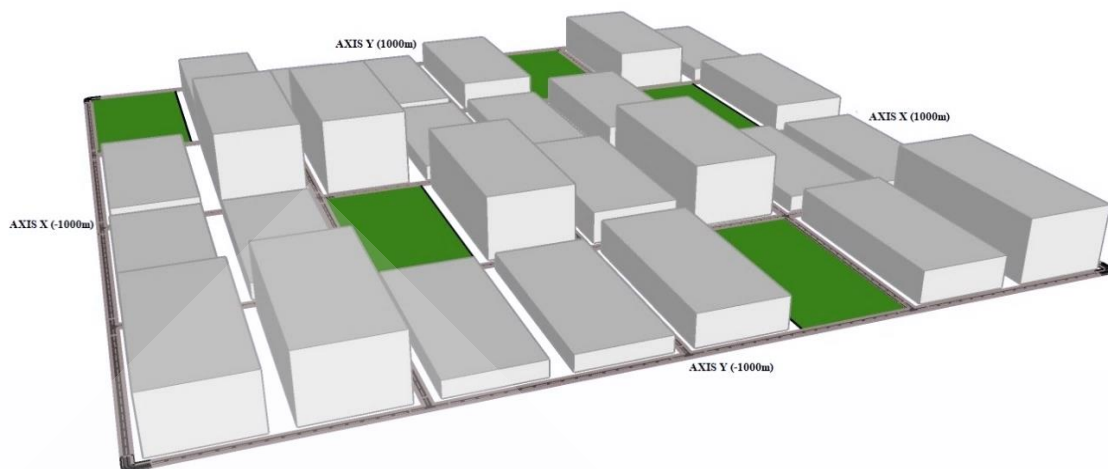
ลำดับ	อาคารสูง (เมตร)	จำนวน ชั้น	ขนาดห้อง (กว้าง×ยาว×สูง) เมตร	พิกัดแนวแกน X (เมตร)	พิกัดแนวแกน Y (เมตร)	ประเภทอาคาร
10	8	2	4×4×3	350-500	(-440)-(-40)	Residential
11	5	1	4×4×3	550-720	(-400)-(-40)	Residential
12	8	2	4×4×3	(-980)-(-800)	(-880)-(-520)	Residential
13	5	1	4×4×3	(-500)-(-300)	(-780)-(-520)	Residential
14	8	2	4×4×3	50-200	(-550)-(-780)	Residential
15	8	2	4×4×3	500-650	(-880)-(-520)	Residential

3.3.2 การออกแบบสภาพแวดล้อมแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง

ในการออกแบบ แบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ชานเมือง ออกแบบให้พื้นที่มีอาคารตั้งปลูกสร้างค่อนข้างหนาแน่น โดยมีพื้นที่ของอาคารทั้งหมดคิดเป็น 49.1% ของพื้นที่แบบจำลองทั้งหมด อาคารในพื้นที่ที่มีความสูงเฉลี่ย 13 เมตร มีจำนวนชั้นเฉลี่ยเป็น 4 ชั้น แต่ละอาคารกำหนดให้ผนังด้านนอกอาคารเป็นไม้กับคอนกรีตแบบมีหน้าต่าง และกำหนดประเภทของอาคารเป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

- 1) ประเภทอาคารที่พักอาศัย
- 2) ประเภทอาคารพาณิชย์
- 3) ประเภทอาคารสำนักงาน

แบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ชานเมืองจะเห็นว่าพื้นที่ประกอบด้วยอาคารขนาดใหญ่ และหนาแน่นมากกว่าพื้นที่ชนบท ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ชานเมือง

รายละเอียดการกำหนดตำแหน่ง ขนาด ความสูง จำนวนชั้น ขนาดห้อง จำนวนห้องในแต่ละชั้น และประเภทอาคารในแบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ชานเมืองแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การกำหนดตำแหน่ง ขนาด และประเภทอาคาร ในแบบจำลองพื้นที่ชานเมือง

ลำดับ	อาคารสูง (เมตร)	จำนวน ชั้น	ขนาดห้อง (กว้าง×ยาว×สูง) เมตร	พิกัดแนวแกน X (เมตร)	พิกัดแนวแกน Y (เมตร)	ชนิดอาคาร
1	12	4	20×20×3	(-730)-(-550)	550 - 950	Commercial
2	6	2	4×4×3	(-550)- (-350)	550 - 950	Residential
3	6	2	4×4×3	(-230)-(-20)	550 - 950	Residential
4	12	4	20×20×3	20-230	550 - 950	Commercial
5	18	6	20×40×3	650-730	550 - 950	Office
6	6	2	4×4×3	850-950	550 - 950	Residential
7	6	2	4×4×3	(-950)-(-850)	50-480	Residential
8	30	10	4×4×3	(-730)-(-650)	50-450	Residential
9	30	10	20×40×3	(-480)-(-300)	50-450	Office
10	6	2	4×4×3	(-230)-(-20)	30-450	Residential
11	6	2	4×4×3	20-230	30-470	Residential

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ลำดับ	อาคารสูง (เมตร)	จำนวน ชั้น	ขนาดห้อง (กว้าง×ยาว×สูง) เมตร	พิกัดแนวแกน X (เมตร)	พิกัดแนวแกน Y (เมตร)	ชนิดอาคาร
12	12	4	20×20×3	320-550	30-450	Commercial
13	12	4	20×20×3	800-950	30-450	Commercial
14	6	2	4×4×3	(-950)-(-800)	(-450)-(-30)	Residential
15	6	2	4×4×3	(-730)-(-550)	(-450)-(-50)	Residential
16	24	8	4×4×3	(-230)-(-20)	(-450)-(-40)	Residential
17	12	4	20×20×3	20-230	(-450)-(-50)	Commercial
18	24	8	20×40×3	350-550	(-450)-(-30)	Office
19	6	2	4×4×3	550-730	(-450)-(-40)	Residential
20	6	2	4×4×3	800-990	(-450)-(-50)	Residential
21	24	8	4×4×3	(-980)-(-800)	(-950)-(-530)	Residential
22	24	8	20×40×3	(-730)-(-550)	(-950)-(-550)	Office
23	6	2	4×4×3	(-480)-(-300)	(-950)-(-550)	Residential
24	6	2	4×4×3	(-230) - (-20)	(-950) - (-550)	Residential
25	12	4	20×20×3	20-230	(-950) - (-550)	Commercial
26	12	4	20×20×3	550-730	(-950) - (-550)	Commercial
27	24	8	4×4×3	800-980	(-950) - (-550)	Residential

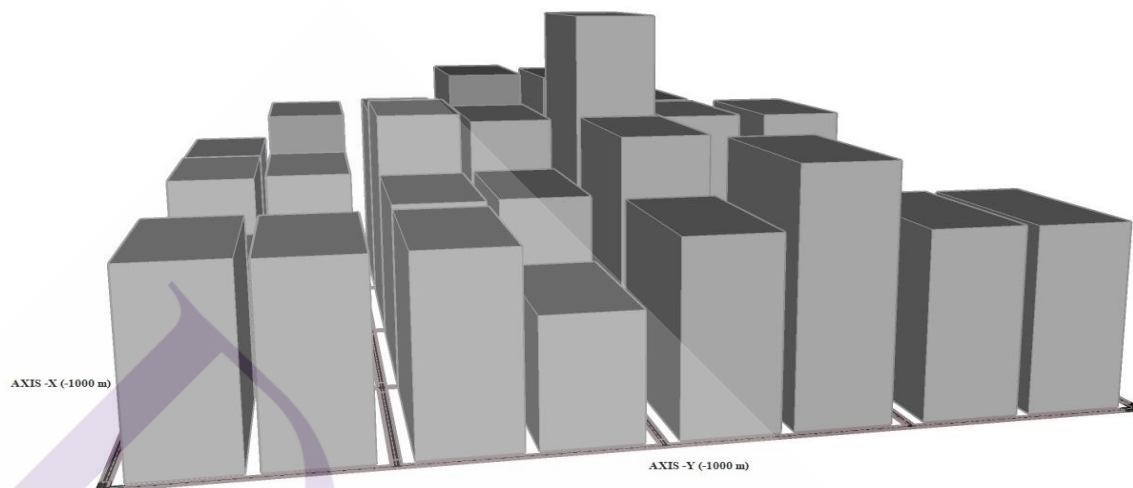
3.3.3 การออกแบบสภาพแวดล้อมแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ตัวเมือง

ในการออกแบบ แบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ตัวเมือง จำลองสภาพแวดล้อมเป็นพื้นที่ราบ ในพื้นที่ประกอบด้วยอาคารขนาดใหญ่ สูง และหนาแน่นมาก ในแบบจำลองได้กำหนดประเภทของอาคารเป็น 3 ประเภทดังนี้

- 1) ประเภทอาคารที่พักอาศัย
- 2) ประเภทอาคารพาณิชย์
- 3) ประเภทอาคารสำนักงาน

โดยอาคารในแบบจำลองพื้นที่ตัวเมือง กำหนดให้มีความสูงของอาคารเฉลี่ย 93 เมตร จำนวนชั้นเฉลี่ย 31 ชั้น โดยอาคารแต่ละประเภทได้กำหนดให้ผนังด้านนอกเป็นชนิดคอนกรีตแบบ

มีหน้าต่าง มีพื้นที่ตัวอาคารทั้งหมดคิดเป็น 71.8% ของพื้นที่แบบจำลอง แบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ตัวเมืองแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ตัวเมือง

รายละเอียดการกำหนดตำแหน่ง ขนาด ความสูง จำนวนชั้น ขนาดห้อง จำนวนห้องในแต่ละชั้น และประเภทอาคารในแบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ชานเมืองแสดงรายละเอียดในตารางที่ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การกำหนดตำแหน่ง ขนาด และประเภทอาคาร ในแบบจำลองพื้นที่ตัวเมือง

ลำดับ	อาคารสูง (เมตร)	จำนวน ชั้น	ขนาดห้อง (กว้าง× ยาว×สูง) เมตร	พิกัดแนวแกน X (เมตร)	พิกัดแนวแกน Y (เมตร)	ชนิดอาคาร
1	90	30	20×15×3	(-980)-(-750)	520-950	Residential
2	120	40	20×15×3	(-740)-(-520)	520-950	Residential
3	120	40	20×40×3	(-480)-(-240)	600-950	Residential
4	135	45	20×40×3	(-220)-(-20)	600-950	Office
5	135	45	20×40×3	20-250	520-950	Office
6	120	40	20×40×3	260-500	520-950	Office

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

ลำดับ	อาคารสูง (เมตร)	จำนวน ชั้น	ขนาดห้อง (กว้าง× ยาว×สูง) เมตร	พิกัดแนวแกน X (เมตร)	พิกัดแนวแกน Y (เมตร)	ชนิดอาคาร
7	45	15	20×20×3	550-750	520-950	Commercial
8	45	15	20×20×3	780-980	520-950	Commercial
9	90	30	20×15×3	(-980)-(-770)	50-480	Residential
10	90	30	20×15×3	(-700)-(-520)	50-480	Residential
11	120	40	20×40×3	(-480)-(-240)	50-480	Office
12	120	40	20×40×3	(-220)-(-20)	50-480	Office
13	180	60	20×40×3	20-250	50-380	Office
14	120	40	20×15×3	260-500	30-480	Residential
15	120	40	20×15×3	550-750	50-380	Residential
16	60	20	20×15×3	780-980	50-480	Commercial
17	60	20	20×15×3	(-980)-(-780)	(-450)-(-50)	Commercial
18	60	20	20×15×3	(-700)-(-530)	(-450)-(-50)	Office
19	90	30	20×15×3	(-480)-(-240)	(-450)-(-50)	Office
20	90	30	20×15×3	(-220)-(-20)	(-450)-(-40)	Residential
21	120	40	20×15×3	20-250	(-450)-(-50)	Residential
22	60	20	20×15×3	260-500	(-470)-(-30)	Residential
23	30	10	20×15×3	550-750	(-450)-(-30)	Commercial
24	30	10	20×15×3	780-980	(-450)-(-50)	Commercial
25	90	30	20×15×3	(-980)-(-760)	(-950)-(-520)	Residential
26	90	30	20×15×3	(-720)-(-520)	(-920)-(-520)	Residential
27	90	30	20×15×3	(-490)-(-260)	(-950)-(-520)	Office
28	60	20	20×15×3	(-240)-(-20)	(-920)-(-520)	Office
29	90	30	20×15×3	20-250	(-950)-(-520)	Residential
30	120	40	20×15×3	260-500	(-950)-(-520)	Residential
31	90	30	20×15×3	550-750	(-950)-(-520)	Residential
32	90	30	20×15×3	780-980	(-950)-(-520)	Office

3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และรูปแบบข้อมูล

ในการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 2.6 GHz และความถี่ 28 GHz ของทั้ง 3 สภาพแวดล้อมนั้น มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์และรูปแบบของข้อมูลเพื่อใช้ในการทดสอบแบบจำลองทั้ง 3 สภาพแวดล้อมเป็นค่าเดียวกันทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร

การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 2.6 GHz และความถี่ 28 GHz พื้นที่ชนบท ชานเมือง และตัวเมือง โดยทั้ง 3 พื้นที่กำหนดให้มีค่าพารามิเตอร์เหมือนกัน เพื่อให้สามารถนำผลการทดสอบแบบจำลอง มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกันได้ ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์แบบจำลองการสื่อสาร 5G ทั้ง 3 พื้นที่แบบจำลอง

Description	Rural		Sub-Urban		Urban	
	Carrier Frequency (GHz)	2.6	28	2.6	28	2.6
Subcarrier Spacing (KHz)	30	60	30	60	30	60
gNodeB Antenna Hight (m)	35		25		15	
Bandwidth	100 MHz					
Antenna (MIMO)	gNodeB = 8x8 and UE = 4x4					
Maximum Modulation	256 QAM					
Radio Access	OFDM					
Duplex	TDD					
Power Transmission (Tx)	43 dBi					
Power Receiver (Rx)	30 dBi					
Building Type	Residential, Commercial and Office					
External Walls of Building Type	Wood and Concrete with Windows					

3.4.2 ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง

ในการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารทั้ง 3 พื้นที่ จะใช้ข้อมูลเป็น UDP Data Application และรูปแบบการส่งข้อมูลเป็นแบบ On/Off Application โดยกำหนดให้ช่วงเวลาในการส่งข้อมูล (On Time) เป็นเวลา 1 วินาที และช่วงเวลาในการไม่ส่งข้อมูล (Off Time) เป็นเวลา 0 วินาที เป็นการส่งข้อมูลแบบต่อเนื่อง มีอัตราการส่งข้อมูลเป็น 10 Gbps ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.5 ทำการส่งข้อมูลระหว่าง gNodeB กับ UE ที่ละตำแหน่ง ซึ่งมีระยะห่างแตกต่างกันตามแบบจำลองแต่ละพื้นที่ บันทึกผลการทำงานของแบบจำลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ Throughput ต่อจำนวน gNodeB ในพื้นที่ตามสมมติฐานของงานวิจัย

ตารางที่ 3.5 ประเภทข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G

ประเภทของข้อมูล	UDP (Data Application)
ขนาดของ Packet ข้อมูล	1,500 Bytes
อัตราการส่งข้อมูล (Bit Rate)	10 Gbps
รูปแบบการส่งข้อมูล	On/Off Application
On Time (Second)	1 วินาที
Off Time (Second)	0 วินาที

3.5 ขั้นตอนการทำงานและการบันทึกผลแบบจำลอง

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนี้เป็นการจำลองสถานการณ์การสื่อสาร 5G แบบภายนอกอาคาร ความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน คือสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท สภาพแวดล้อมพื้นที่ชานเมือง และสภาพแวดล้อมพื้นที่ตัวเมือง โดยมุ่งเน้นไปในการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการส่งข้อมูลต่อจำนวน gNodeB ที่สามารถให้ค่าเฉลี่ย Throughput มากกว่า 1 Gbps และทำการนำข้อมูลที่ได้จากการทำงานของแบบจำลองมาทำการเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมในการใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz กับ 28 GHz ในแต่ละพื้นที่ ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรม NS-3 ในการจำลองเพื่อทำการทดสอบตามสมมติฐานของงานวิจัยดังนี้

3.5.1 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง

การทำงานของแบบจำลองได้ทำการจำลองการทำงานของเครือข่ายการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร แยกออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนของการจำลองการใช้งานความถี่ 2.6 GHz สำหรับการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารในแบบจำลองสภาพแวดล้อมทั้ง 3 พื้นที่ การใช้งานความถี่ 28 GHz สำหรับการสื่อสาร 5G ในแบบจำลองสภาพแวดล้อมทั้ง 3 พื้นที่ และส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองทั้งคลื่นความถี่ 2.6 GHz กับ 28 GHz. ในทั้ง 3 พื้นที่มาทำการเปรียบเทียบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1.1 จำลองและวิเคราะห์ผลการทำงานของแบบจำลองการสื่อสาร 5G ความถี่ 2.6 GHz ภายนอกอาคาร ในแบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท พื้นที่ชานเมือง และพื้นที่ตัวเมือง ทำการบันทึกผลการทำงานของแบบจำลอง เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลและใช้ในการเปรียบเทียบ

3.5.1.2 จำลองและวิเคราะห์ผลการทำงานของแบบจำลองการสื่อสาร 5G ความถี่ 28 GHz ภายนอกอาคาร ในแบบจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท พื้นที่ชานเมือง และพื้นที่ตัวเมือง ทำการบันทึกผลการทำงานของแบบจำลอง เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลและใช้ในการเปรียบเทียบ

3.5.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองทั้ง 2 คลื่นความถี่ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกผลการทำงานของแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz กับ 28 GHz สำหรับการสื่อสาร 5G ในพื้นที่สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

3.5.2 ขั้นตอนการบันทึกผลการทำงานของแบบจำลอง

การบันทึกผลการทำงานของแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz . ในแต่ละพื้นที่แบบจำลอง ได้ทำการบันทึกค่าผลการทำงานที่ UE ทีละตำแหน่ง โดยกำหนดให้บันทึกเป็นไฟล์ชื่อ RxPacketTraceUe.txt ดังแสดงในภาพที่ 3.5 แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย Throughput และเปรียบเทียบกับจำนวน gNodeB ในพื้นที่นั้นๆ เพื่อนำผลมาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกันทั้ง 3 พื้นที่

1	Mode	time	frame	subF	1stSym	symbol#	cellId	rnti	ccId	tbSize	mcs	rv	SINR (dB)
2	DL	1.0001	1000	0	1	222	1	1	0	32395	12	0	3.35936
3	DL	1.0002	1000	1	1	222	1	1	0	32395	12	0	3.35377
4	DL	1.0003	1000	2	1	222	1	1	0	32395	12	0	3.33713
5	DL	1.0004	1000	3	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.32374
6	DL	1.0005	1000	4	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.32297
7	DL	1.0006	1000	5	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.31723
8	DL	1.0007	1000	6	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.32594
9	DL	1.0008	1000	7	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.32154
10	DL	1.0009	1000	8	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.31136
11	DL	1.001	1000	9	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.32273
12	DL	1.0011	1001	0	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.35634
13	DL	1.0012	1001	1	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.35469
14	DL	1.0013	1001	2	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.35911
15	DL	1.0014	1001	3	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.38185
16	DL	1.0015	1001	4	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.38019
17	DL	1.0016	1001	5	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.38776
18	DL	1.0017	1001	6	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.36001
19	DL	1.0018	1001	7	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.37447
20	DL	1.0019	1001	8	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.37215
21	DL	1.002	1001	9	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.39074
22	DL	1.0021	1002	0	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.39674
23	DL	1.0022	1002	1	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.40584
24	DL	1.0023	1002	2	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.43343
25	DL	1.0024	1002	3	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.42756
26	DL	1.0025	1002	4	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.39706
27	DL	1.0026	1002	5	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.38829
28	DL	1.0027	1002	6	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.37934
29	DL	1.0028	1002	7	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.37795
30	DL	1.0029	1002	8	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.41207
31	DL	1.003	1002	9	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.41534
32	DL	1.0031	1003	0	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.4041
33	DL	1.0032	1003	1	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.37253
34	DL	1.0033	1003	2	1	222	1	1	0	19259	8	0	3.38963

ภาพที่ 3.5 การบันทึกผลการทำงานของแบบจำลองเป็นไฟล์ RxPacketTraceUe.txt

ทำการรวบรวมผลการทำงานของแบบจำลองที่ UE ทั้ง 26 ตำแหน่งแล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย Throughput ของคลื่นความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz แล้วนำมาทำการวิเคราะห์ผลการทำงานของแบบจำลองนั้นๆ สมการที่ 3.1 แสดงการคำนวณค่า Throughput

$$TP(Mbps) = \frac{\text{Sum}(tbSize) \times (\text{MIMO})}{10^6(t)} \quad [3.1]$$

เมื่อ TP(Mbps) คือ Throughput หน่วย Mbps, Sum(tbSize) คือ ผลรวมของ Transport Box Size หน่วยเป็น Bits, MIMO คือ Multiple-Input and Multiple-Output Antenna และ t คือ ระยะเวลาในการทำงานของแบบจำลอง

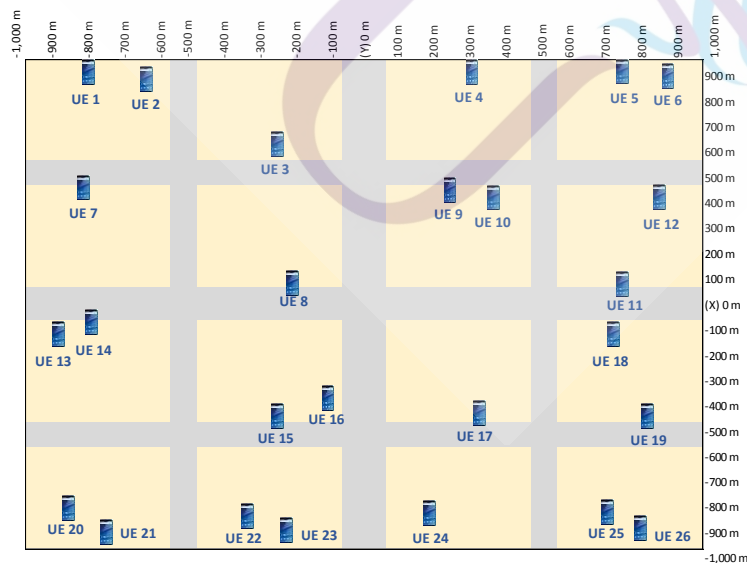
บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย ทำการทดสอบเปรียบเทียบการใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz กับ 28 GHz เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมต่อการใช้งานการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารในสภาพแวดล้อมพื้นที่ชนบท พื้นที่ชานเมือง และพื้นที่ตัวเมือง ด้วยแบบจำลองการสื่อสาร 5G ที่สร้างขึ้นในบทที่ 3 ทำการบันทึกผลการทดสอบแยกตามแบบจำลองแต่ละพื้นที่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การกำหนดตำแหน่ง UE เพื่อใช้ในการทดสอบแบบจำลองในแต่ละพื้นที่

การกำหนดตำแหน่งของ UE ในแบบจำลองทุกพื้นที่ ทำการจัดวางในพิกัดตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลองได้ การกำหนดตำแหน่งของ UE ตามแนวแกน X แกน Y และแกน Z แสดงในภาพที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดตำแหน่งของ UE แต่ละจุด



ภาพที่ 4.1 แสดงตำแหน่งของ UE ในแบบจำลองทั้ง 3 พื้นที่

ตารางที่ 4.1 การกำหนดตำแหน่ง UE ในพื้นที่แบบจำลองทั้ง 3 พื้นที่

ลำดับที่	พิกัดตามแนวแกน X (เมตร)	พิกัดตามแนวแกน Y (เมตร)	พิกัดตามแนวแกน Z (เมตร)
1	-800	950	1.6
2	-650	900	1.6
3	-280	580	1.6
4	300	950	1.6
5	740	950	1.6
6	860	900	1.6
7	-800	450	1.6
8	-240	48	1.6
9	220	450	1.6
10	350	410	1.6
11	730	50	1.6
12	830	450	1.6
13	-880	-130	1.6
14	-740	-49	1.6
15	-280	-460	1.6
16	-100	-340	1.6
17	300	-430	1.6
18	700	-110	1.6
19	780	-450	1.6
20	-810	-850	1.6
21	-760	-950	1.6
22	-370	-870	1.6

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

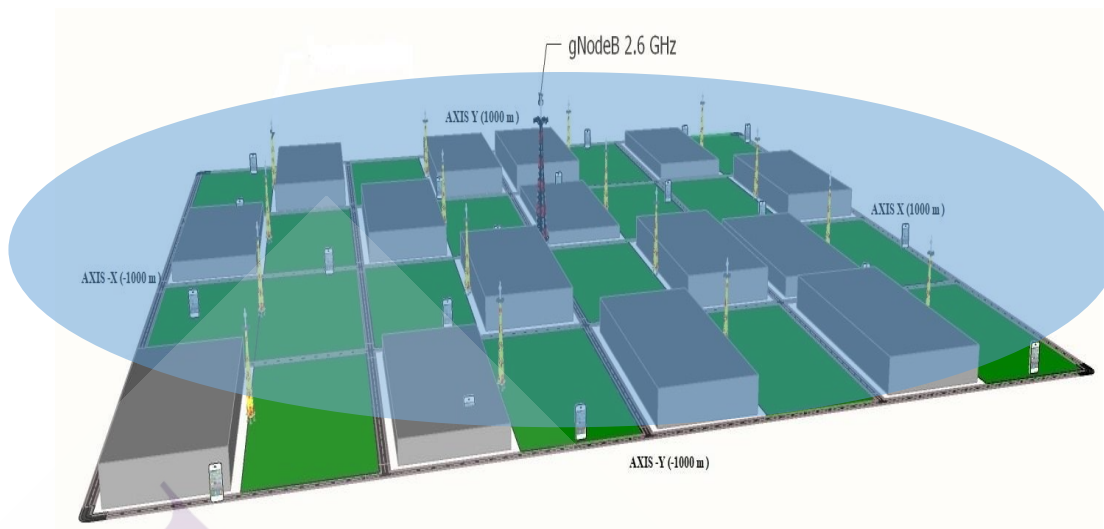
ลำดับที่	พิกัดตามแนวแกน X (เมตร)	พิกัดตามแนวแกน Y (เมตร)	พิกัดตามแนวแกน Z (เมตร)
23	-240	-955	1.6
24	150	-820	1.6
25	690	-860	1.6
26	760	-955	1.6

4.2 ผลการทดสอบการทำงานแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท

ผลการทดสอบการทำงานของแบบจำลองพื้นที่ชนบทแยกออกเป็น 2 ส่วนตามคลื่นความถี่ที่ใช้คือ คลื่นความถี่ 2.6 GHz และคลื่นความถี่ 28 GHz ซึ่งผลการทดสอบทำงานของแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการทดสอบทำงานแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท ความถี่ 2.6 GHz

แบบจำลองพื้นที่ชนบทคลื่นความถี่ 2.6 GHz ทำการจำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 1 โหนด บริเวณกึ่งกลางของพื้นที่แบบจำลอง ทดสอบทำการสื่อสารข้อมูลแบบ On/Off Application ระหว่าง gNodeB กับ UE ที่ละตำแหน่งตามตารางที่ 4.1 ในการทดสอบ โดยผลการทดสอบบันทึกลงในตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.2 แสดงภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบทความถี่ 2.6 GHz



ภาพที่ 4.2 ภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบทความถี่ 2.6 GHz

ตารางที่ 4.2 ผลการทำงานแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบทความถี่ 2.6 GHz

UE No.	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
1	-800	950	0	0	1,242	1,005.77
2	-650	900	0	0	1,110	1,175.30
3	-280	580	0	0	644	1,816.92
4	300	950	0	0	996	1,339.04
5	740	950	0	0	1,204	955.88
6	860	900	0	0	1,245	1,816.84
7	-800	450	0	0	918	1,425.45
8	-240	48	0	0	245	1,816.92

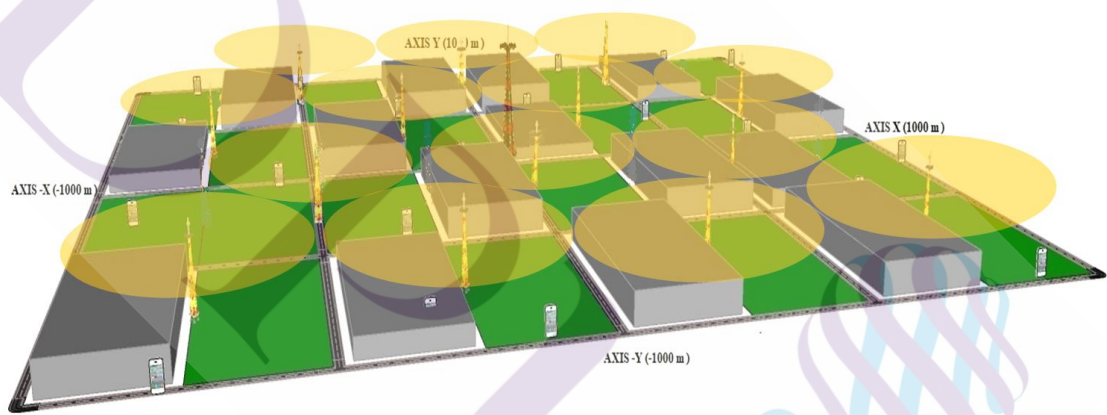
ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

UE No.	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
9	220	450	0	0	501	1,779.20
10	350	410	0	0	539	1,816.92
11	730	50	0	0	732	1,816.92
12	830	450	0	0	944	1,383.32
13	-880	-130	0	0	890	1,816.92
14	-740	-49	0	0	742	1,816.92
15	-280	-460	0	0	539	1,816.92
16	-100	-340	0	0	354	1,811.46
17	300	-430	0	0	524	1,768.24
18	700	-110	0	0	709	1,627.08
19	780	-450	0	0	900	1,438.05
20	-810	-850	0	0	1,174	1,044.09
21	-760	-950	0	0	1,217	1,816.92
22	-370	-870	0	0	945	1,386.53
23	-240	-955	0	0	985	1,816.92
24	150	-820	0	0	834	1,500.34
25	690	-860			1,103	1,178.69
26	760	-955	0	0	1,221	971.75

4.2.2 ผลการทำงานแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท ความถี่ 28 GHz

ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับพื้นที่ชนบทความถี่ 28 GHz ทำการทดสอบตามจำนวนของ gNodeB ที่ได้จำลองขึ้นในพื้นที่คือจำนวน 14 โหนดและจำนวน 16 โหนด เพื่อทดสอบหาจำนวน gNodeB น้อยที่สุดที่สามารถให้สัญญาณครอบคลุมพื้นที่มากที่สุด และให้ค่าเฉลี่ย Throughput มากกว่า 1 Gbps ทำการทดสอบโดยการส่งผ่านข้อมูลแบบ On/Off Application ระหว่าง gNodeB กับ UE แต่ละตำแหน่งตามตารางที่ 4.1 และทำการทดสอบไปจนครบทุกตำแหน่ง ผลการทดสอบแบบจำลองแสดงดังต่อไปนี้

4.2.2.1 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท 14 gNodeB ความถี่ 28 GHz วงกลมสีส้มแสดงพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณของแต่ละโหนด ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท 14 gNodeB ความถี่ 28 GHz

ผลการทดสอบการทำงานแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร พื้นที่ชนบท ความถี่ 28 GHz โดยจำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 14 โหนดในการทดสอบ แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท 14 gNodeB
ความถี่ 28 GHz

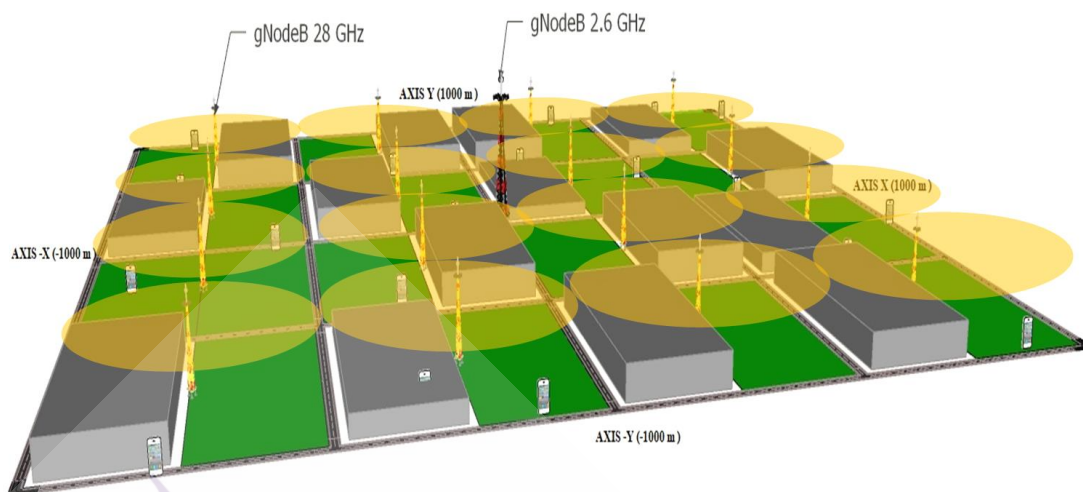
UE No.	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
1	-800	950	Cell 1	-500	750	361	0
2	-650	900	Cell 1	-500	750	212	874.42
3	-280	580	Cell 2	0	750	328	0
4	300	950	Cell 3	500	750	283	1133.28
5	740	950	Cell 3	500	750	312	0
6	860	900	Cell 3	500	750	390	0
7	-800	450	Cell 4	-750	250	206	1,344.15
8	-240	48	Cell 5	-250	250	202	1,383.66
9	220	450	Cell 6	250	250	202	1,507.09
10	350	410	Cell 6	250	250	189	1,561.83
11	730	50	Cell 7	750	250	201	1,451.51
12	830	450	Cell 7	750	250	215	1,144.90
13	-880	-130	Cell 8	-500	-250	398	0
14	-740	-49	Cell 8	-500	-250	313	1,135.77
15	-280	-460	Cell 9	0	-250	350	0
16	-100	-340	Cell 9	0	-250	212	874.42
17	300	-430	Cell 10	500	-250	269	0
18	700	-110	Cell 10	500	-250	244	771.6
19	780	-450	Cell 10	500	-250	344	0

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

UE No.	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
20	-810	-850	Cell 11	-750	-750	117	1,223.20
21	-760	-950	Cell 11	-750	-750	200	1,202.98
22	-370	-870	Cell 12	-250	-750	170	1,036.52
23	-240	-955	Cell 12	-250	-750	205	1,380.64
24	150	-820	Cell 13	250	-750	122	1,132.75
25	690	-860	Cell 14	750	-750	125	1,206.99
26	760	-955	Cell 14	750	-750	205	1,380.64

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าในพื้นที่มี UE ที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้จำนวน 8 จุด โดยมีค่า Throughput เท่ากับ 0 Mbps จึงทำให้ได้ค่าเฉลี่ย Throughput ในพื้นที่ต่ำกว่าสมมติฐานของงานวิจัยที่ 1 Gbps

4.2.2.2 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท 16 gNodeB ความถี่ 28 GHz ผลการทดสอบแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.4 แสดงภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท 16 gNodeB ความถี่ 28 GHz



ภาพที่ 4.4 ภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท 16 gNodeB ความถี่ 28 GHz

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 28 GHz พื้นที่ชนบท gNodeB จำนวน 16 โหนด

UE No.	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
1	-800	950	Cell 1	-750	750	206	1,344.15
2	-650	900	Cell 1	-750	750	180	1,521.21
3	-280	580	Cell 2	-250	750	173	1,672.44
4	300	950	Cell 3	250	750	206	1,135.90
5	740	950	Cell 4	750	750	200	1,202.98
6	860	900	Cell 4	750	750	186	1,597.87
7	-800	450	Cell 5	-750	250	206	1,344.15
8	-240	48	Cell 6	-250	250	202	1,383.66

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

UE No.	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
9	220	450	Cell 7	250	250	202	1,507.09
10	350	410	Cell 7	250	250	189	1,561.83
11	730	50	Cell 8	750	250	201	1,451.51
12	830	450	Cell 8	750	250	215	1,144.90
13	-880	-130	Cell 9	-750	-250	177	1,499.82
14	-740	-49	Cell 9	-750	-250	201	1,300.65
15	-280	-460	Cell 10	-250	-250	212	1,194.08
16	-100	-340	Cell 10	-250	-250	180	1,038.57
17	300	-430	Cell 11	250	-250	187	840.85
18	700	-110	Cell 12	750	-250	149	1,174.85
19	780	-450	Cell 12	750	-250	202	1,381.89
20	-810	-850	Cell 13	-750	-750	117	1,223.20
21	-760	-950	Cell 13	-750	-750	200	1,202.98
22	-370	-870	Cell 14	-250	-750	170	1,036.52
23	-240	-955	Cell 14	-250	-750	205	1,380.64
24	150	-820	Cell 15	250	-750	122	1,132.75
25	690	-860	Cell 16	750	-750	125	1,206.99
26	760	-955	Cell 16	750	-750	205	1,380.64

จากผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบทความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz จะเห็นว่าที่คลื่นความถี่ 28 GHz สำหรับ 14 gNodeB มีค่า Throughput ต่ำสุดเป็น 0 bps ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีจุดอับสัญญาณที่ UE บางตำแหน่งในพื้นที่ ส่งผลให้ค่า Throughput เฉลี่ยเป็น 836.39 Mbps ซึ่งต่ำกว่าเงื่อนไขของงานวิจัย ตารางที่ 4.5 แสดงผลสรุปการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท ความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz

ตารางที่ 4.5 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท ความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz

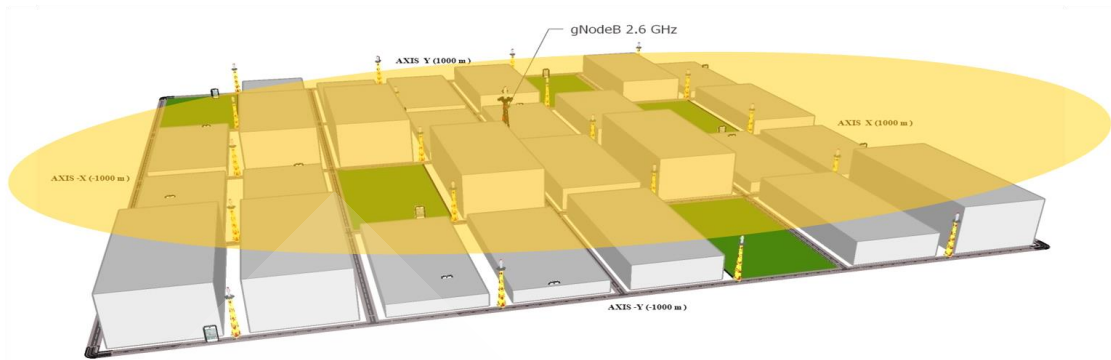
แบบจำลองพื้นที่ ชนบท	จำนวน gNodeB	จำนวน UE	Throughput ต่ำสุด (Mbps)	Throughput สูงสุด (Mbps)	Throughput เฉลี่ย (Mbps)
ความถี่ 2.6 GHz	1	26	955.88	1,816.92	1,536.90
ความถี่ 28 GHz	14	26	0	1,561.83	836.39
ความถี่ 28 GHz	16	26	840.85	1,672.44	1,302.39

4.3 ผลการทดสอบการทำงานแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง

การทดสอบทำงานแบบจำลองพื้นที่ชานเมืองแยกทำการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือ ทดสอบโดยใช้ความถี่ 2.6 GHz และทดสอบโดยใช้ความถี่ 28 GHz ทดสอบทำการสื่อสารข้อมูลแบบ On/Off Application ระหว่าง gNodeB กับ UE ที่ละตำแหน่งตามตารางที่ 4.1 ในการทดสอบผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง ความถี่ 2.6 GHz

สำหรับการใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz ในพื้นที่ชานเมือง ทำการจำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 1 โหนด บริเวณกึ่งกลางของพื้นที่ เช่นเดียวกับแบบจำลองพื้นที่ชนบท ผลการทดสอบของแบบจำลองแสดงในภาพที่ 4.5 และผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.5 ภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง ความถี่ 2.6 GHz

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง ความถี่ 2.6 GHz

UE	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
1	-800	950	Cell 1	0	0	1,242	759.36
2	-650	900	Cell 1	0	0	1,110	793.01
3	-280	580	Cell 1	0	0	644	1,068.84
4	300	950	Cell 1	0	0	996	824.32
5	740	950	Cell 1	0	0	1,204	760.04
6	860	900	Cell 1	0	0	1,245	772.68
7	-800	450	Cell 1	0	0	918	922.23
8	-240	48	Cell 1	0	0	245	1,378.19
9	220	450	Cell 1	0	0	501	1,271.54
10	350	410	Cell 1	0	0	539	1,206.33

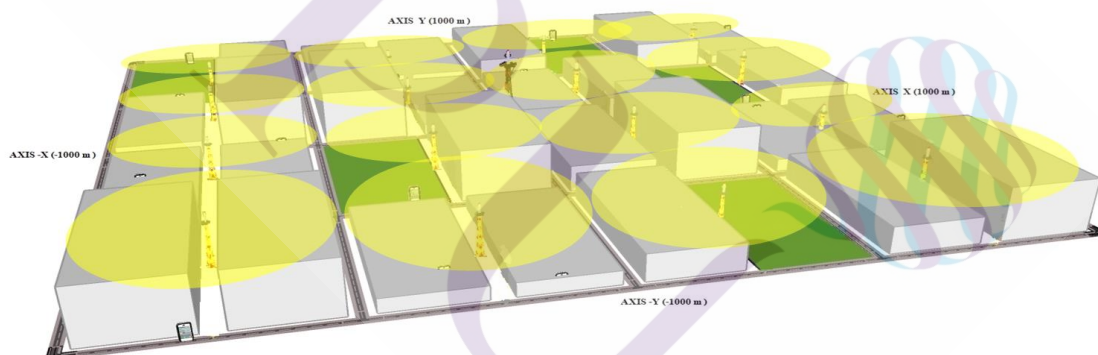
ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

UE	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
11	730	50	Cell 1	0	0	732	1,803.43
12	830	450	Cell 1	0	0	944	874.54
13	-880	-130	Cell 1	0	0	890	960.44
14	-740	-49	Cell 1	0	0	742	1,803.02
15	-280	-460	Cell 1	0	0	539	1,213.53
16	-100	-340	Cell 1	0	0	354	1,556.28
17	300	-430	Cell 1	0	0	524	1,226.89
18	700	-110	Cell 1	0	0	709	1,806.42
19	780	-450	Cell 1	0	0	900	917.90
20	-810	-850	Cell 1	0	0	1,174	770.52
21	-760	-950	Cell 1	0	0	1,217	790.17
22	-370	-870	Cell 1	0	0	945	876.81
23	-240	-955	Cell 1	0	0	985	797.03
24	150	-820	Cell 1	0	0	834	993.15
25	690	-860	Cell 1	0	0	1,103	800.28
26	760	-955	Cell 1	0	0	1,221	806.05

4.3.2 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง ความถี่ 28 GHz

สำหรับการทดสอบการใช้งานคลื่นความถี่ 28 GHz ในพื้นที่ชานเมือง แยกผลการทดสอบของแบบจำลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ทดสอบจำลอง gNodeB จำนวน 16 โหนด กับจำนวน 20 โหนด เพื่อใช้ในการทดสอบหาจำนวน gNodeB น้อยที่สุดที่สามารถให้สัญญาณครอบคลุมพื้นที่แบบจำลองมากที่สุด และให้ค่าเฉลี่ย Throughput มากกว่า 1 Gbps ทำการทดสอบโดยทำการส่งผ่านข้อมูลรูปแบบ On/Off Application ส่งข้อมูลแบบต่อเนื่องระหว่าง gNodeB กับ UE ทดสอบจนครบ UE ทุกตำแหน่ง รายละเอียดผลการทดสอบแบบจำลองแสดงดังต่อไปนี้

4.3.2.1 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง 16 gNodeB ความถี่ 28 GHz ซึ่งเป็นการทดสอบที่จำนวนเท่ากับแบบจำลองพื้นที่ชนบท และเป็นตำแหน่งเดียวกัน มาทดสอบใช้ในพื้นที่ชานเมืองเพื่อทำการเปรียบเทียบผล ภาพที่ 4.6 แสดงภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง และผลการทดสอบแบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.7



ภาพที่ 4.6 ภาพจำลองผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง 16 gNodeB ความถี่ 28 GHz

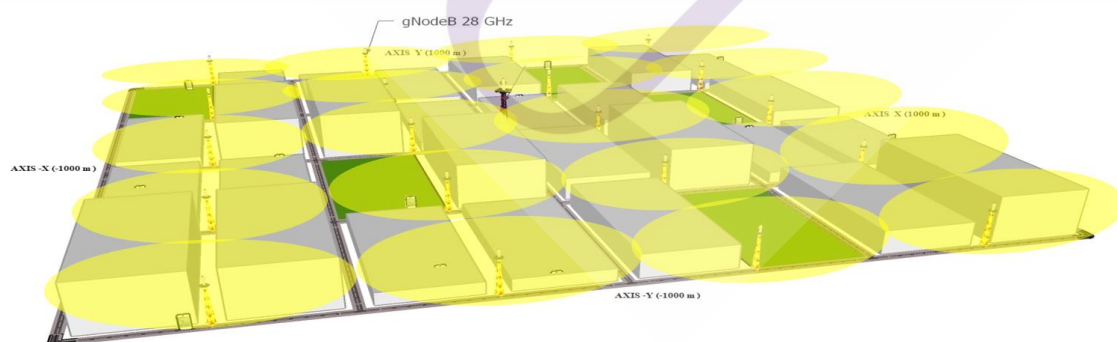
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง 16 gNodeB ความถี่ 28 GHz

UE No.	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
1	-800	950	Cell 1	-750	750	206	689.75
2	-650	900	Cell 1	-750	750	180	602.98
3	-280	580	Cell 2	-250	750	173	1,001.59
4	300	950	Cell 3	250	750	206	857.37
5	740	950	Cell 4	750	750	200	757.32
6	860	900	Cell 4	750	750	186	617.24
7	-800	450	Cell 5	-750	250	206	580.23
8	-240	48	Cell 6	-250	250	202	879.74
9	220	450	Cell 7	250	250	202	802.76
10	350	410	Cell 7	250	250	189	941.05
11	730	50	Cell 8	750	250	201	689.57
12	830	450	Cell 8	750	250	215	533.10
13	-880	-130	Cell 9	-750	-250	177	772.26
14	-740	-49	Cell 9	-750	-250	201	812.49
15	-280	-460	Cell 10	-250	-250	212	667.39
16	-100	-340	Cell 10	-250	-250	175	901.04
17	300	-430	Cell 11	250	-250	187	643.11
18	700	-110	Cell 12	750	-250	149	999.59
19	780	-450	Cell 12	750	-250	202	947.57

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

UE No.	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
20	-810	-850	Cell 13	-750	-750	117	866.66
21	-760	-950	Cell 13	-750	-750	200	947.57
22	-370	-870	Cell 14	-250	-750	170	987.71
23	-240	-955	Cell 14	-250	-750	205	659.20
24	150	-820	Cell 15	250	-750	122	1,154.03
25	690	-860	Cell 16	750	-750	125	1,047.53
26	760	-955	Cell 16	750	-750	205	659.20

4.3.2.2 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง 20 gNodeB ความถี่ 28 GHz ภาพที่ 4.7 แสดงภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง 20 gNodeB ความถี่ 28 GHz และตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบการทำงาน



ภาพที่ 4.7 ภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง 20 gNodeB ความถี่ 28 GHz

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 28 GHz พื้นที่ชานเมือง gNodeB จำนวน 20 โหนด

UE No.	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
1	-800	950	1	-750	1000	71	1,948.93
2	-650	900	1	-750	1000	141	1,172.49
3	-280	580	6	-250	500	85	1,673.02
4	300	950	3	250	1000	71	1,911.00
5	740	950	4	750	1000	51	2,250.25
6	860	900	4	750	1000	149	950.42
7	-800	450	5	-750	500	71	1,948.93
8	-240	48	10	-250	0	49	2,259.27
9	220	450	7	250	500	58	2,150.80
10	350	410	7	250	500	135	1,221.86
11	730	50	12	750	0	54	2,214.12
12	830	450	8	750	500	94	1,219.94
13	-880	-130	9	-750	0	184	478.61
14	-740	-49	9	-750	0	50	2,246.89
15	-280	-460	14	-250	-500	50	2,280.53
16	-100	-340	14	-250	-500	141	865.65
17	300	-430	15	250	-500	86	1,645.66
18	700	-110	12	750	0	121	1,253.17

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

UE No.	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
19	780	-450	16	750	-500	58	2,099.33
20	-810	-850	17	-750	-1000	162	974.97
21	-760	-950	17	-750	-1000	51	2,250.25
22	-370	-870	18	-250	-1000	177	957.65
23	-240	-955	18	-250	-1000	46	2,295.52
24	150	-820	19	250	-1000	206	507.87
25	690	-860	20	750	-1000	152	941.18
26	760	-955	20	750	-1000	46	2,295.52

จากผลการทดสอบการใช้งานความถี่ 2.6 GHz กับ 28 GHz ในพื้นที่ชานเมือง สามารถสรุปผลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยการใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz สามารถใช้การติดตั้ง gNodeB จำนวน 1 โหนดเท่ากับพื้นที่ชนบทได้ แต่ได้ค่าเฉลี่ย Throughput น้อยกว่าพื้นที่ชนบท 469.48 Mbps ส่วนคลื่นความถี่ 28 GHz ทำการจำลองเป็น 16 gNodeB เท่ากับพื้นที่ชนบท แต่ได้ค่าเฉลี่ย Throughput เป็น 808.28 Mbps ซึ่งมีค่าน้อยกว่าข้อกำหนดของงานวิจัยนี้ จึงทำการทดสอบโดยจำลอง gNodeB เพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 20 โหนด จนได้ค่าเฉลี่ย Throughput มากกว่า 1 Gbps ตามเงื่อนไขของงานวิจัย

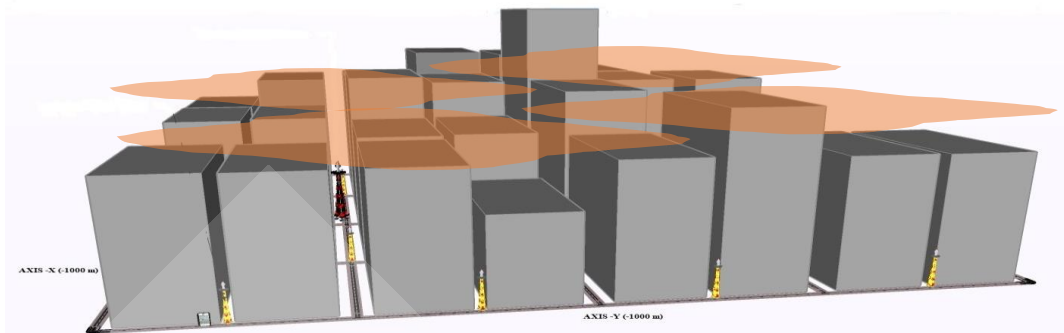
ตารางที่ 4.9 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมืองความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz

แบบจำลองพื้นที่ ชานเมือง	จำนวน gNodeB	จำนวน UE	Throughput ต่ำสุด (Mbps)	Throughput สูงสุด (Mbps)	Throughput เฉลี่ย (Mbps)
ความถี่ 2.6 GHz	1	26	759.36	1,806.42	1,067.42
ความถี่ 28 GHz	16	26	533.10	1,154.03	808.28
ความถี่ 28 GHz	20	26	478.61	2,295.52	1,615.92

4.4 ผลการทดสอบการทำงานแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ตัวเมือง

แบบจำลองพื้นที่ตัวเมืองทำการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนเช่นเดียวกับแบบจำลองพื้นที่ชนบทและชานเมือง คือทำการทดสอบที่คลื่นความถี่ 2.6 GHz และคลื่นความถี่ 28 GHz ทดสอบทำการสื่อสารข้อมูลแบบ On/Off Application ระหว่าง gNodeB กับ UE ที่ละตำแหน่งตามตารางที่ 4.1 ในการทดลองผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ตัวเมือง ความถี่ 2.6 GHz สำหรับการทดสอบใช้งานความถี่ 2.6 GHz ในแบบจำลองพื้นที่ตัวเมือง ซึ่งมีสภาพแวดล้อมที่หนาแน่นไปด้วยอาคารขนาดใหญ่และสูงจำนวนมาก gNodeB จำนวน 1 โหนดเท่ากับแบบจำลองพื้นที่ชนบทและชานเมือง ไม่สามารถให้สัญญาณครอบคลุม UE ทุกตำแหน่งได้ ดังนั้นการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ตัวเมือง ความถี่ 2.6 GHz จึงทำการทดสอบโดยจำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 4 โหนด เพื่อให้ได้สัญญาณครอบคลุม UE ทุกตำแหน่งในพื้นที่ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 และตารางบันทึกผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.10



ภาพที่ 4.8 ภาพจำลองการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ตัวความถี่ 2.6 GHz

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 2.6 GHz พื้นที่ตัวเมือง

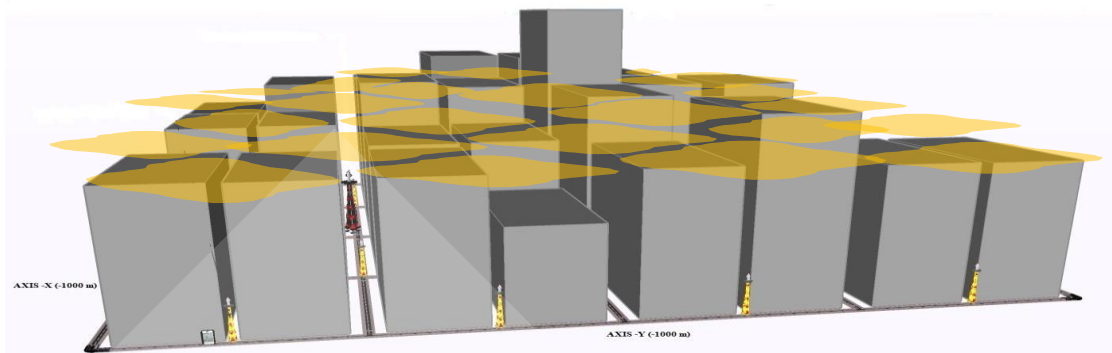
UE No.	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
1	-800	950	Cell 2	-500	250	762	1,151.17
2	-650	900	Cell 2	-500	250	667	1,527.98
3	-280	580	Cell 2	-500	250	397	1,795.90
4	300	950	Cell 1	250	750	206	1,816.92
5	740	950	Cell 1	250	750	529	1,624.52
6	860	900	Cell 1	250	750	628	1,445.00
7	-800	450	Cell 2	-500	250	361	1,801.62
8	-240	48	Cell 2	-500	250	329	1,808.55
9	220	450	Cell 1	250	750	301	1,811.67
10	350	410	Cell 1	250	750	354	1,802.47

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

UE No.	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
11	730	50	Cell 3	500	-250	378	1,796.86
12	830	450	Cell 1	250	750	653	1,518.45
13	-880	-130	Cell 2	-500	250	537	1,754.85
14	-740	-49	Cell 2	-500	250	383	1,796.76
15	-280	-460	Cell 4	-250	-750	292	1,813.63
16	-100	-340	Cell 4	-250	-750	437	1,789.63
17	300	-430	Cell 3	500	-250	269	1,816.45
18	700	-110	Cell 3	500	-250	244	1,816.92
19	780	-450	Cell 3	500	-250	344	1,805.85
20	-810	-850	Cell 4	-250	-750	569	1,432.06
21	-760	-950	Cell 4	-250	-750	548	1,755.49
22	-370	-870	Cell 4	-250	-750	170	1,816.92
23	-240	-955	Cell 4	-250	-750	205	1,816.92
24	150	-820	Cell 4	-250	-750	406	1,795.17
25	690	-860	Cell 3	500	-250	639	1,407.38
26	760	-955	Cell 3	500	-250	751	1,113.04

4.4.2 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ตัวเมือง ความถี่ 28 GHz

ทำการทดสอบโดยทำการจำลอง gNodeB จำนวน 22 โหนด มุมของถนนตามที่ได้ ออกแบบเพื่อให้สัญญาณครอบคลุมบริเวณถนนทุกเส้นทางในแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 4.9 ทำ การทดสอบโดยการส่งข้อมูลระหว่าง gNodeB กับ UE ที่ละตำแหน่งตามตารางที่ 4.1 ผลการ ทดสอบบันทึกค่าลงในตารางที่ 4.11



ภาพที่ 4.9 ภาพจำลองผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ตัวเมือง
ความถี่ 28 GHz

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 28 GHz พื้นที่ตัว
เมือง

UE	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
1	-800	950	Cell 1	-750	1000	71	2,257.72
2	-650	900	Cell 1	-750	1000	141	1,391.55
3	-280	580	Cell 6	-500	500	234	853.28
4	300	950	Cell 3	250	1000	71	2,223.28
5	740	950	Cell 4	750	1000	51	2,388.07
6	860	900	Cell 4	750	1000	149	1,160.79
7	-800	450	Cell 5	-1000	500	206	1,346.94
8	-240	48	Cell 11	-250	0	49	2,388.44
9	220	450	Cell 7	0	500	226	974.50

ตารางที่ 4.11 (ต่อ)

UE	UE แนวแกน X (m)	UE แนวแกน Y (m)	gNodeB No.	gNodeB แนวแกน X (m)	gNodeB แนวแกน Y (m)	ระยะห่าง UE กับ gNodeB (m)	Throughput (Mbps)
10	350	410	Cell 8	500	500	175	1,366.14
11	730	50	Cell 13	750	0	54	2,373.63
12	830	450	Cell 9	1000	500	177	1,229.40
13	-880	-130	Cell 10	-750	0	184	1,314.21
14	-740	-49	Cell 10	-750	0	50	2,377.56
15	-280	-460	Cell 15	-500	-500	224	923.13
16	-100	-340	Cell 16	0	-500	180	2,035.96
17	300	-430	Cell 17	500	-500	212	1,351.63
18	700	-110	Cell 13	750	0	121	1,613.40
19	780	-450	Cell 17	1000	-500	226	955.60
20	-810	-850	Cell 19	-750	-1000	162	1,706.62
21	-760	-950	Cell 19	-750	-1000	51	2,388.07
22	-370	-870	Cell 20	-250	-1000	177	1,092.17
23	-240	-955	Cell 20	-250	-1000	46	2,416.76
24	150	-820	Cell 21	250	-1000	206	1,508.99
25	690	-860	Cell 22	750	-1000	152	1,676.69
26	760	-955	Cell 22	750	-1000	46	2,416.76

จากผลการทดสอบการทำงานของแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ตัวเมืองทั้ง 2 คลื่นความถี่สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ตัวเมืองความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz

แบบจำลองพื้นที่ ตัวเมือง	จำนวน gNodeB	จำนวน UE	Throughput ต่ำสุด (Mbps)	Throughput สูงสุด (Mbps)	Throughput เฉลี่ย (Mbps)
ความถี่ 2.6 GHz	4	26	1,113.04	1,816.92	1,678.16
ความถี่ 28 GHz	22	26	853.28	2,416.76	1,681.97

4.5 อภิปรายผลการทดสอบใช้งานการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz ใน 3 พื้นที่แบบจำลอง

ผลจากการทดสอบการใช้งานเครือข่ายการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคาร ความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz ในแบบจำลองพื้นที่ชนบท ที่ชานเมือง และพื้นที่ตัวเมือง โดยมีพิกัดตำแหน่งของ UE ในทุกพื้นที่แบบจำลอง ค่ากำลังส่งสัญญาณ ขนาดความกว้าง Bandwidth และชนิดของข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบเป็นค่าเดียวกันทั้ง 3 พื้นที่ อภิปรายผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารทั้ง 3 พื้นที่ได้ดังนี้

คลื่นความถี่ 2.6 GHz สำหรับแบบจำลองพื้นที่ชนบทและแบบจำลองพื้นที่ชานเมือง ทำการจำลอง gNodeB ขึ้นในพื้นที่จำนวน 1 โหนด บริเวณจุดศูนย์กลางพื้นที่ สามารถให้สัญญาณครอบคลุม UE ทุกตำแหน่งในพื้นที่ ส่วนแบบจำลองพื้นที่ตัวเมืองทำการจำลอง gNodeB ขึ้นจำนวนถึง 4 โหนดจึงจะสามารถให้สัญญาณครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ได้ ซึ่งจะเห็นว่าหากมีการใช้งานที่หนาแน่นมากๆ Bandwidth จะถูกแบ่งปันตามจำนวนของ UE ที่ใช้งานในพื้นที่ จะทำให้ค่าเฉลี่ย Throughput ลดลงมาก เนื่องจากมีจำนวน gNodeB ในพื้นที่น้อย

คลื่นความถี่ 28 GHz จำลอง gNodeB ขึ้นในแบบจำลองพื้นที่ชนบทเป็นจำนวน 16 โหนด แบบจำลองพื้นที่ชานเมือง 20 โหนด และแบบจำลองพื้นที่ตัวเมืองจำนวน 22 โหนด เนื่องจากเป็นย่านความถี่สูงจึงให้พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณที่แคบกว่าย่านความถี่ต่ำ และจะเห็นว่าจำนวนของ gNodeB ที่จำลองขึ้นจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่น ขนาด ความสูง และวัสดุที่ใช้สร้างอาคารในแต่ละแบบจำลองที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งจำนวนโหนดที่มากขึ้นจึงทำให้สามารถรองรับการใช้งานที่หนาแน่นได้ เนื่องจากจำนวน gNodeB ที่มีมากกว่า จึงเหมาะกับพื้นที่ที่มีการใช้งานที่

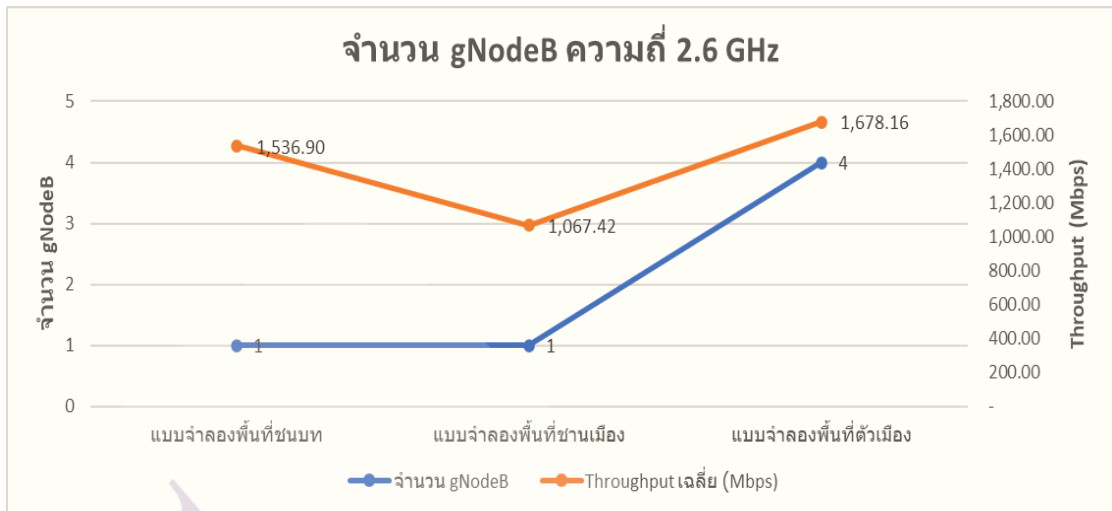
หนาแน่นมาก หรือพื้นที่เฉพาะบริเวณ (Hot Spot) แต่จะเป็นการสิ้นเปลืองสำหรับการใช้งานในพื้นที่ชนบท เนื่องจากมีการใช้งานเครือข่ายที่กระจายเป็นบริเวณกว้าง

ดังนั้นคลื่นความถี่ 2.6 GHz มีความเหมาะสมต่อการใช้งานเป็นคลื่นความถี่หลักในทุกพื้นที่ เนื่องจากคลื่นสัญญาณสามารถแพร่กระจายครอบคลุมได้เป็นบริเวณกว้าง ส่วนคลื่นความถี่ 28 GHz เหมาะกับการใช้งานเป็นคลื่นความถี่เสริมในทุกพื้นที่เช่นกัน แต่เป็นการกำหนดใช้งานในพื้นที่เฉพาะบริเวณที่มีความต้องการการใช้งานหนาแน่น เช่น บริเวณห้างสรรพสินค้า ศูนย์จัดแสดงสินค้า สนามกีฬา บริเวณสำนักงาน (Office) แหล่งโรงงานอุตสาหกรรมหรือนิคมอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื่องจากเป็นย่านความถี่สูงจึงสามารถกำหนดสถานะของสัญญาณในพื้นที่เฉพาะบริเวณได้สะดวก การสรุปผลการวิจัยแสดงในตารางที่ 4.13

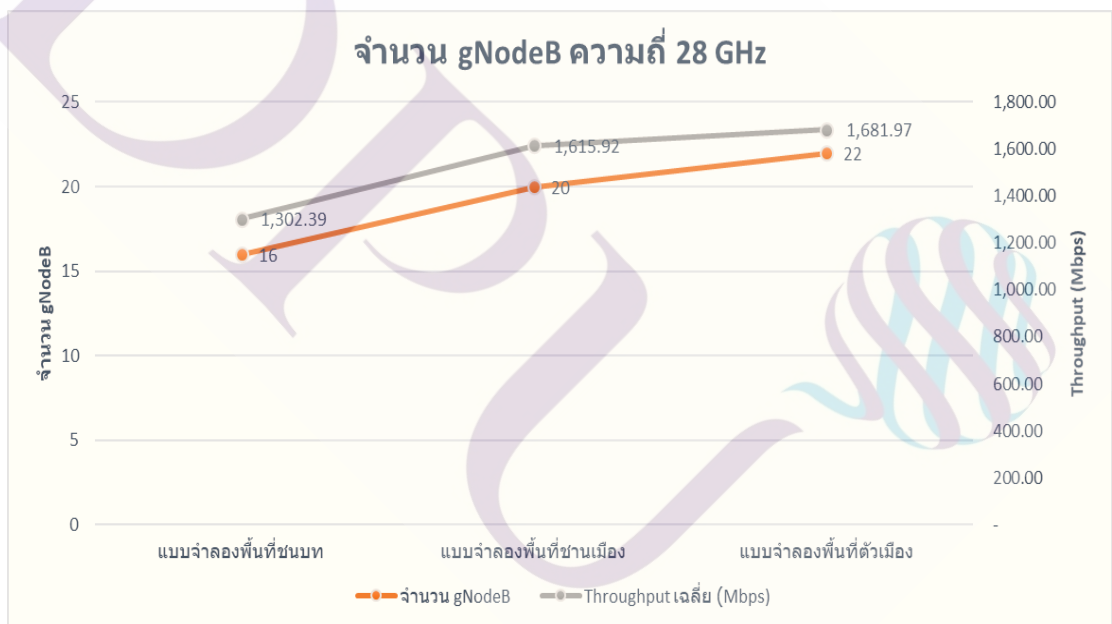
ตารางที่ 4.13 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารทั้ง 3 แบบจำลอง

รายละเอียด	แบบจำลองพื้นที่ชนบท		แบบจำลองพื้นที่ชานเมือง		แบบจำลองพื้นที่ตัวเมือง	
	2.6 GHz	28 GHz	2.6 GHz	28 GHz	2.6 GHz	28 GHz
ความถี่	2.6 GHz	28 GHz	2.6 GHz	28 GHz	2.6 GHz	28 GHz
จำนวน gNodeB	1	16	1	20	4	22
ค่าเฉลี่ย MCS	17	24	18	18	26	20
ค่า Throughput ต่ำสุด (Mbps)	955.88	840.85	759.36	478.61	1,113.04	853.28
ค่า Throughput สูงสุด (Mbps)	1,816.92	1,672.44	1,806.42	2,295.52	1,816.92	2,416.76
ค่า Throughput เฉลี่ย (Mbps)	1,536.90	1,302.39	1,067.42	1,615.92	1,678.16	1,681.97

กราฟแสดงผลการทดสอบของแบบจำลองทั้งสามพื้นที่ โดยเปรียบเทียบจำนวนของ gNodeB ที่น้อยที่สุดที่ให้สัญญาณครอบคลุมมากที่สุดในแต่ละพื้นที่ต่อค่าเฉลี่ย Throughput มากกว่า 1 Gbps ของคลื่นความถี่ 2.6 GHz และ 28 GHz แสดงในภาพที่ 4.17 และ 4.18



ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟสรุปผลการทดสอบของแบบจำลองทั้งสามพื้นที่ความถี่ 2.6 GHz



ภาพที่ 4.11 แสดงกราฟสรุปผลการทดสอบของแบบจำลองทั้งสามพื้นที่ความถี่ 28 GHz

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอสรุปผลจากการทดสอบงานวิจัย รวมทั้งข้อจำกัดของแบบจำลอง และข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางในการนำงานวิจัยนี้ไปเพิ่มเติม ปรับปรุง และพัฒนาต่อไปให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการแยกสรุปผลออกเป็น 2 ส่วนตามคลื่นความถี่ที่ใช้ทดสอบคือ คลื่นความถี่ 2.6 GHz และคลื่นความถี่ 28 GHz ในแต่ละพื้นที่สรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 สรุปผลการทดสอบคลื่นความถี่ 2.6 GHz ในพื้นที่ชนบท ชานเมือง และตัวเมือง

การทดสอบการใช้งานคลื่นความถี่ 2.6 GHz ในแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท ชานเมือง และตัวเมือง รายละเอียดสรุปมีดังต่อไปนี้

5.1.1.1 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท จำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 1 โหนด บริเวณจุดกึ่งกลางของแบบจำลอง สามารถกระจายสัญญาณได้ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่แบบจำลอง และได้ค่าเฉลี่ย Throughput เท่ากับ 1.53 Gbps ค่า Throughput สูงสุดเท่ากับ 1.86 Gbps และค่า Throughput ต่ำสุดเท่ากับ 955.8 Mbps แสดงให้เห็นว่า UE ทุกตำแหน่งสามารถรับสัญญาณได้ดี

5.1.1.2 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง จำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 1 โหนด บริเวณจุดกึ่งกลางของแบบจำลองเหมือนกับแบบจำลองพื้นที่ชนบท สามารถกระจายสัญญาณได้ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่แบบจำลอง และได้ค่าเฉลี่ย Throughput เท่ากับ 1.06 Gbps ค่า Throughput สูงสุดเท่ากับ 1.80 Gbps และค่า Throughput ต่ำสุดเท่ากับ 759.3 Mbps จะเห็นว่า UE สามารถรับสัญญาณได้ทุกตำแหน่ง

5.1.1.3 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ตัวเมือง จำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 4 โหนด ซึ่งมากกว่าแบบจำลองพื้นที่ชนบท และชานเมืองถึง 4 เท่า จึงจะสามารถกระจายสัญญาณได้ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่แบบจำลอง โดยได้ค่าเฉลี่ย Throughput เท่ากับ 1.67 Gbps ค่า Throughput สูงสุดเท่ากับ 1.81 Gbps และค่า Throughput ต่ำสุดเท่ากับ 1.1

Gbps จะเห็นว่า UE ทุกตำแหน่งสามารถรับสัญญาณได้ดี และค่าเฉลี่ย Throughput สูงกว่าแบบจำลองพื้นที่ชนบท และชานเมือง แต่ต้องจำลอง gNodeB ขึ้นมากกว่าถึง 4 เท่า

5.1.2 สรุปผลการทดสอบคลื่นความถี่ 28 GHz พื้นที่ชนบท ชานเมือง และตัวเมือง

ผลการทดสอบคลื่นความถี่ 28 GHz ในแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท ชานเมือง และตัวเมือง สรุปได้ดังนี้

5.1.2.1 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชนบท คลื่นความถี่ 28 GHz โดยจำลอง gNodeB ขึ้นเป็น 2 จำนวนคือ

1) จำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 14 โหนดได้ค่าเฉลี่ย Throughput เท่ากับ 836.3 Mbps ค่า Throughput สูงสุดเท่ากับ 1.56 Gbps และค่า Throughput ต่ำสุดเท่ากับ 0 Mbps จะเห็นว่าในพื้นที่แบบจำลองมีจุดอับของสัญญาณ และค่าเฉลี่ย Throughput น้อยกว่า 1 Gbps

2) จำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 16 โหนดได้ค่าเฉลี่ย Throughput เท่ากับ 1.3 Gbps ค่า Throughput สูงสุดเท่ากับ 1.67 Gbps และค่า Throughput ต่ำสุดเท่ากับ 840.8 Mbps จะเห็นว่าสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่แบบจำลอง และได้ค่าเฉลี่ย Throughput ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

5.1.2.2 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ชานเมือง คลื่นความถี่ 28 GHz โดยจำลอง gNodeB ขึ้นเป็น 2 จำนวนคือ

1) จำลอง gNodeB ขึ้น จำนวน 16 โหนดเท่ากับพื้นที่ชนบท ได้ค่าเฉลี่ย Throughput เท่ากับ 808.28 Mbps ค่า Throughput สูงสุดเท่ากับ 1.15 Gbps และค่า Throughput ต่ำสุดเท่ากับ 533.10 Mbps จะเห็นว่าได้ค่าเฉลี่ย Throughput น้อยกว่า 1 Gbps

2) จำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 20 โหนดได้ค่าเฉลี่ย Throughput เท่ากับ 1.61 Gbps ค่า Throughput สูงสุดเท่ากับ 2.29 Gbps และค่า Throughput ต่ำสุดเท่ากับ 478.61 Mbps จะเห็นว่าสามารถให้สัญญาณครอบคลุม และได้ค่าเฉลี่ย Throughput มากกว่า 1 Gbps ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

5.1.2.3 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองการสื่อสาร 5G ภายนอกอาคารพื้นที่ตัวเมือง คลื่นความถี่ 28 GHz โดยจำลอง gNodeB ขึ้นจำนวน 22 โหนดได้ค่าเฉลี่ย Throughput เท่ากับ 1.68 Gbps ค่า Throughput สูงสุดเท่ากับ 2.41 Gbps และค่า Throughput ต่ำสุดเท่ากับ 853.28 Mbps จะเห็นว่าสามารถให้สัญญาณครอบคลุมบริเวณถนนมากที่สุด และได้ค่าเฉลี่ย Throughput มากกว่า 1 Gbps ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ผลการทดสอบของแบบจำลองสามารถสรุปได้ว่าคลื่นความถี่ 2.6 GHz เหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่ชนบทและชานเมือง ซึ่งมีความต้องการใช้งานเครือข่ายที่กระจายเป็นบริเวณกว้าง แล้วใช้คลื่นความถี่ 28GHz ให้บริการในบริเวณเฉพาะจุดที่มีความต้องการใช้งานที่หนาแน่นมาก

คลื่นความถี่ 28GHz นี้สามารถกระจายคลื่นสัญญาณได้พื้นที่ไม่กว้างมาก ทำให้สามารถควบคุมสถานะของสัญญาณได้ง่ายกว่าความถี่ 2.6GHz จึงเหมาะกับการใช้งานในพื้นที่ชานเมือง พื้นที่ตัวเมือง หรือพื้นที่เฉพาะจุดที่มีความต้องการใช้งานที่หนาแน่นมาก เช่น ห้างสรรพสินค้า ศูนย์จัดแสดงสินค้า สนามกีฬา สำนักงาน แหล่งโรงงานอุตสาหกรรม หรือนิคมอุตสาหกรรม เป็นต้น

สำหรับการออกแบบใช้งานในพื้นที่จริงอาจเลือกใช้งานย่านความถี่ทั้งสองย่านพร้อมกันได้ตามความเหมาะสมของปริมาณการใช้งานในพื้นที่นั้นๆ เช่น ผู้ให้บริการเครือข่าย 5G อาจใช้งานคลื่นความถี่ 2.6GHz เป็นคลื่นความถี่หลัก เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณ 5G บริเวณกว้าง และใช้คลื่นความถี่ 28GHz ให้บริการในบริเวณเฉพาะจุดที่มีความต้องการใช้งานที่หนาแน่นมาก ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมในการการลงทุนของผู้ให้บริการ 5G และประโยชน์สูงสุดต่อผู้ใช้งาน

5.2 ข้อกำหนดงานวิจัย

ข้อกำหนดของงานวิจัยนี้สามารถแยกออกเป็นข้อได้ดังนี้

1) งานวิจัยนี้ทดสอบคุณสมบัติด้านการรองรับการส่งผ่านข้อมูลความเร็วสูง ตอบสนองความต้องการด้านการเข้าถึงและส่งผ่านข้อมูลที่มีความรวดเร็ว ซึ่งเป็น 1 ใน 3 ของคุณสมบัติหลักของการสื่อสาร 5G

2) การทดสอบเครือข่ายการสื่อสาร 5G โดยการส่งผ่านข้อมูลระหว่าง gNodeB กับ UE แบบทีละจุดจึงไม่มีการสอดแทรกสัญญาณของโหนดใกล้เคียง

3) โปรแกรม NS-3 ขาดรายละเอียดของพื้นที่ เช่น แบบจำลองต้นไม้ แบบจำลองภูเขา แบบจำลองแหล่งน้ำ เป็นต้น

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยนี้ยังมีข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาอนาคตของงานวิจัย เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ดังต่อไปนี้

1) ความถี่สูงย่าน mmWave เป็นย่านความถี่ที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านการขออนุญาตใช้งานความถี่กับหน่วยงานของภาครัฐ จึงเป็นที่น่าสนใจสำหรับการทดสอบคุณสมบัติของคลื่นความถี่ย่านนี้ในด้านอื่นๆอีก เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2) เนื่องจากปัจจุบันการสื่อสารกำลังอยู่ระหว่างการเปลี่ยนจากระบบการ 4G ไปเป็นระบบ 5G สามารถพัฒนาแบบจำลองนี้ให้สามารถใช้งานร่วมกันได้กับทั้ง 2 ระบบ

3) โปรแกรม NS-3 การกำหนดพิกัดตำแหน่งของแบบจำลองอุปกรณ์เครือข่ายแบบจำลองสภาพแวดล้อมหรืออาคารต่างๆ ยังไม่สะดวก และผลการทำงานของแบบจำลองจะไม่สามารถแสดงเป็นภาพกราฟฟิกที่สวยงามได้ อาจทำการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถแสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (Graphical User Interface, GUI) เพื่อให้สะดวกในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงผลการทำงานของแบบจำลองเป็นภาพกราฟฟิกที่สวยงาม และสามารถใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์เพื่อประเมินต้นทุนก่อนการใช้งานจริงของผู้ให้บริการเครือข่ายการสื่อสาร 5G ต่อไปในอนาคต



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- [1] A.I. Sulyman, A.T. Nassar, M.K. Samimi, G.R. MacCartney, T.S. Rappaport, and A. Alsanie, "Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz millimeter-wave bands," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 52, no. 9, pp. 78-86, September 2014.
- [2] Björn Halvarsson, Kjell Larsson, Magnus Thurfjell, Kimmo Hiltunen, Khanh Tran, Paulo Machado Daniel Juchnevicius and Henrik Asplund. "5G NR Coverage, Performance and Beam Management Demonstrated in an Outdoor Urban Environment at 28 GHz".
- [3] Hassana Ganame, Liu Yingzhuang, Hakim Ghazzai and Drissa Kamissoko "5G Base Station Deployment Perspectives in Millimeter Wave Frequencies Using Meta-Heuristic Algorithms" Published: 8 November 2019.
- [4] MacCartney, G.R., Zhang, J., Nie, S., Rappaport, T.S., "Path Loss Models for 5G Millimeter Wave Propagation Channels in Urban Microcells" *IEEE Global Communications Conference, Exhibition & Industry Forum (GLOBECOM)*, Dec. 9~13, 2013.
- [5] Menglei Zhang_, Michele Polese_, Marco Mezzavilla_, Sundeep Rangan_, Michele Zorzi "NS-3 Implementation of the 3GPP MIMO Channel Model for Frequency Spectrum above 6 GHz" NYU Tandon School of Engineering, New York University, Brooklyn NY, USA arXiv:1702.04822v1 [cs.IT] 16 Feb 2017
- [6] Michele Zorzi, Marco Giordani "A Simulation Study of Cell-Search Techniques in 5G Millimeter-Wave Cellular Networks" Master Thesis in TELECOMMUNICATION ENGINEERING (12th October, 2015).
- [7] M. Mezzavilla, S. Dutta, M. Zhang, M. R. Akdeniz, S. Rangan "5G mmWave Module for the ns-3 Network Simulator" NYU Polytechnic School of Engineering 2 MetroTech Center, 11211, Brooklyn, New York. arXiv:1506.08801v1 [cs.NI] 29 Jun 2015
- [8] Mohammed B. Majed^{1,2} and Tharek Abd. Rahman¹ "Propagation Path Loss Modeling And Coverage Measurements In Urban Microcell In Millimeter Wave Frequency Bands" *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* VOL. 13, NO. 8, APRIL 2018
- [9] ns-3 Model Library Release ns-3 dev Oct 07, 2021 <https://www.nsnam.org/docs/models/ns-3-model-library.pdf>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Russell Ford, Menglei Zhang, Sourjya Dutta Marco Mezzavilla, Sundeep Rangan “A Framework for End-to-End Evaluation of 5G mmWave Cellular Networks in ns-3” 8 May 2016
- [11] T.S. Rappaport, Y. Xing, G.R. Mac Cartney, Jr., A.F. Molisch, E. Mellios, J.Zhang, “Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a focus on Propagation Models,” in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Special Issue on 5G, Nov. 2017.
- [12] Yong Niu, Yong Li, Member, IEEE, Depeng Jin, Member, IEEE, Li Su, and Athanasios V. Vasilakos, Senior Member, IEEE “ A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and Challenges” arXiv:1502.07228v1 [cs.NI] 25 Feb 2015.
- [13] สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, เทคโนโลยี 5G กับผลประโยชน์ด้านเศรษฐกิจของประเทศไทย: Smart Contract และผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจต่ออุตสาหกรรมไทย, 2561. หน้า 2 – 6.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

นายณรงค์ รัตนะ

ประวัติการศึกษา

ปี พ.ศ.2552 ปริญญาตรี

สาขาวิศวกรรมศาสตร์อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

วิศวกรระบบสื่อสารและควบคุมรถไฟ

บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน)

