

การใช้รถโดยสารประจำทางเป็นโหนดที่ขอบในเครือข่ายยานพาหนะ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

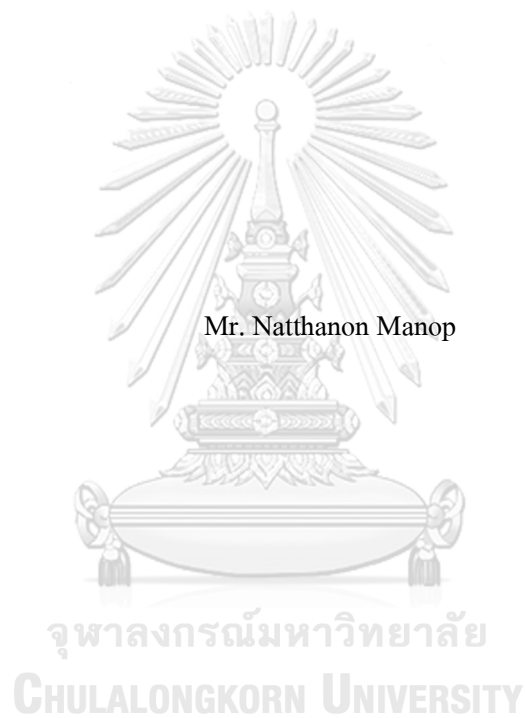
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

USING BUSES AS EDGE NODES IN VEHICULAR NETWORKS



Mr. Natthanon Manop

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

Department of Computer Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้รถโดยสารประจำทางเป็นโหมดที่ขอบในเครือข่ายยานพาหนะ
โดย	นายณัฐนนท์ มานพ
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริก ภิรมย์โสภา)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ หนูไพโรจน์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ ผลเพิ่ม)	

ณัฐนนท์ มานพ : การใช้รถโดยสารประจำทางเป็นโหนดที่ขอบในเครือข่าย
ยานพาหนะ. (USING BUSES AS EDGE NODES IN VEHICULAR NETWORKS)
อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.กฤษติกา โรจนวิบูลย์ชัย

การเติบโตของเครือข่ายไร้สายแบบแอดฮอกบนยานพาหนะได้ทำให้เกิดการพัฒนาแอปพลิเคชันบนยานพาหนะต่าง ๆ มากมาย เพื่อตอบสนองต่อการเติบโตนี้โครงสร้างระบบการคำนวณแบบขอบบนยานพาหนะจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อมุ่งเน้นไปที่การติดตั้งโหนดที่ขอบที่มักติดตั้งที่สถานีรับส่งสัญญาณข้างทาง อย่างไรก็ตามการติดตั้งสถานีในพื้นที่ขนาดใหญ่ต้องพิจารณาให้ครอบคลุมพื้นที่การให้บริการมากที่สุด งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอโครงสร้างระบบใหม่ชื่อว่า Buses as an Infrastructure ซึ่งได้มีการใช้งานให้รถโดยสารประจำทางเป็นโหนดที่ขอบในการให้บริการทรัพยากรในการคำนวณและบริการอื่น ๆ แก่ผู้ใช้งาน โดยงานวิจัยนี้ได้มีการใช้ข้อได้เปรียบของระบบขนส่งสาธารณะที่มีอยู่แล้วเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโหนดที่ขอบแบบดั้งเดิม อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังได้เสนอฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการคำนวณหาการติดตั้งโหนดที่ขอบบนรถโดยสารประจำทางโดยให้ลำดับความสำคัญแก่จำนวนงานที่เกิดขึ้นคู่กับการใช้เทคนิคการเลือก N ลำดับสูงสุด โดยได้ทำการทดลองบนสภาพแวดล้อมจำลองและบนชุดข้อมูลจริง ผลการทดลองเมื่อเทียบกับรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับสถานีรับส่งสัญญาณข้างทางแสดงให้เห็นว่าฮิวริสติกอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถให้จำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ขอบสามารถให้บริการได้สูงขึ้นกว่า 6.08% - 52.20% และสามารถให้จำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ขอบสามารถให้บริการได้สูงขึ้น 15.23% เมื่อเทียบกับรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับสถานีรับส่งสัญญาณข้างทางบนสภาพแวดล้อมจำลองและให้ผลรวมของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้สูงขึ้น 54.24% เมื่อเทียบกับรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับสถานีรับส่งสัญญาณข้างทางบนชุดข้อมูลจริง

สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิติดี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6470422221 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORD: bus as an infrastructure, public buses, edge nodes, vehicular ad hoc networks,
edge computing, public transport

Natthanon Manop : USING BUSES AS EDGE NODES IN VEHICULAR
NETWORKS. Advisor: Assoc. Prof. KULTIDA ROJVIBOONCHAI, Ph.D.

The growth of Vehicular Ad Hoc Networks (VANET) has enabled the development of various vehicular applications, such as traffic control systems, autonomous vehicles, and augmented/virtual reality (AR/VR) technologies which indicate that it is essential to improve the efficiency of the network. To address the importance, Vehicular Edge Computing has been developed, focusing on installing edge nodes at the stationary nodes, typically Road-Side Units (RSUs). However, the large-scale RSU installation must be considered to maximize the service area. So, the mobile edge node is more suitable for this circumstance. In this paper, we propose a new Buses as an Infrastructure (Baal) framework in which buses are used as edge nodes for providing computational resources and other services to the end user. We take advantage of the existing public transport system to reduce the deployment cost. We also propose a heuristic algorithm to find the optimal bus route for edge node deployment by prioritizing the number of workloads with the top-N technique. We perform the experiments on a simulated environment and a real dataset. We verify that our heuristic algorithm provides 6.08-52.20% more served vehicles and also provides 15.23% more served vehicles than the fixed RSUs approach on the simulated environment and 54.24% more total connectivity time than the fixed RSUs approach on the real dataset.

Field of Study: Computer Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ อีกทั้งยังช่วยแนะนำการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.เกริก ภิรมย์ โสภากา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ หนูไพโรจน์ และกรรมการภายนอกรองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ ผลเพิ่ม ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประเด็นและเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาสำหรับนิสิตเก่าวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณทั้งเพื่อน ๆ รุ่นพี่และรุ่นน้องที่เป็นสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมระบบสารสนเทศ (ISEL) ที่ได้ให้ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้โอกาสในการศึกษาต่อระดับปริญญาโท และคอยให้กำลังใจตลอดมาจนสุดท้ายได้ออกมาเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ณัฐนนท์ มานพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.4 คุณค่าทางวิชาการ	4
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 ผลงานตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 3 แนวคิดและหลักการในงานวิจัย	13
3.1 องค์ประกอบของโครงสร้างระบบ	13

3.3 อิวิสตติกอัลกอรีทึมสำหรับการคำนวณหาการติดตั้งโหนดที่ขอบบนรถโดยสารประจำทาง	
16	
บทที่ 4 การวัดประเมินและผลการทดลอง.....	19
4.1 การวัดประเมินผล	19
4.2 ผลการทดลอง	30
บทที่ 5 บนสรุปของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	46
5.1 บทสรุปของงานวิจัย	46
5.2 การอภิปราย	46
5.1 ข้อเสนอแนะและข้อจำกัด.....	48
บรรณานุกรม	50
ประวัติผู้เขียน	53



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้สร้างแผนที่บนสภาพแวดล้อมจำลอง.....	20
ตารางที่ 2 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับรถโดยสารแต่ละคันบนสภาพแวดล้อมจำลอง	23
ตารางที่ 3 จำนวนยานพาหนะที่โหนดที่สามารถให้บริการได้จำแนกตามรายชื่อแยก	32
ตารางที่ 4 จำนวนยานพาหนะที่โหนดที่สามารถให้บริการได้จำแนกตามหมายเลขเส้นทางรถโดยสารประจำทาง	33
ตารางที่ 5 ค่าสถิติของระยะเวลาที่ติดต่อกันได้	45



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 แสดงการเพิ่มขึ้นของหุ่นยนต์พลังงานไฟฟ้าส่วนบุคคล	1
ภาพที่ 2 แสดงการเพิ่มขึ้นของส่วนแบ่งการตลาดของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าสาธารณะ	1
ภาพที่ 3 แสดง โครงร่างระบบการคำนวณแบบขอบบนยานพาหนะโดยทั่วไป	13
ภาพที่ 4 แสดง โครงร่างระบบการคำนวณแบบขอบบนยานพาหนะที่นำเสนอ (Buses as an Infrastructure framework)	15
ภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างแผนที่จำลองอย่างง่ายบนสภาพแวดล้อมจำลอง	20
ภาพที่ 6 แสดงรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU (The fixed RSUs approach)	21
ภาพที่ 7 แสดงรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบเต็ม (The full deployment approach)	21
ภาพที่ 8 แสดงตัวอย่างแผนที่ที่ได้จาก Top-N heuristic algorithm โดยที่ N มีค่าเท่ากับ 4	22
ภาพที่ 9 แสดงตัวอย่างแผนที่จำลองอย่างง่ายบนชุดข้อมูลจริง	24
ภาพที่ 10 แสดงจุดข้อมูลคร่าว ๆ จากบนชุดข้อมูลจริงบนกราฟ	25
ภาพที่ 11 แสดงตัวแทนจุดที่จะติดตั้งโหนดที่ขอบ(สีชมพู)	25
ภาพที่ 12 แสดงเส้นทางของรถโดยสารประจำทางบนชุดข้อมูลจริง	26
ภาพที่ 13 แสดงรายละเอียดของรถโดยสารประจำทางแต่ละเส้นทาง	26
ภาพที่ 14 แสดงเส้นทางของรถโดยสารประจำทางที่ถูกเลือกให้ติดตั้งโหนดที่ขอบ	27
ภาพที่ 15 แสดงการวาดเส้นทางที่กำหนดได้บนแผนที่ด้วย Google My Map	28
ภาพที่ 16 แสดงการสร้างแผนที่และแปลงข้อมูลจากระบบพิกัดละติจูด/ลองจิจูดให้เป็นพิกัดของจุดกำเนิด (0, 0)	29
ภาพที่ 17 แสดงตัวอย่างจุดของข้อมูลที่หลังจากการทำความสะอาดข้อมูลและเพิ่มเติมจุดของข้อมูลที่ขาดหายไป	30
ภาพที่ 18 แสดงจำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ขอบสามารถให้บริการได้บนสภาพแวดล้อมจำลอง	31

ภาพที่ 19 แสดงเส้นทางรถโดยสารประจำทางและจุดที่เลือกในการติดตั้งโหนดที่ชอบ	32
ภาพที่ 20 แสดงผลรวมของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกัน ได้บนสภาพแวดล้อมจำลอง	33
ภาพที่ 21 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง The full deployment approach และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 1	35
ภาพที่ 22 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง The full deployment approach และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 2	36
ภาพที่ 23 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง The full deployment approach และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 3	37
ภาพที่ 24 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง The full deployment approach และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 4	38
ภาพที่ 25 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง The full deployment approach และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 5	39
ภาพที่ 26 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง Top-4 heuristic algorithm และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 1	40
ภาพที่ 27 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง Top-4 heuristic algorithm และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 2	41
ภาพที่ 28 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง Top-4 heuristic algorithm และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 3	42

ภาพที่ 29 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง Top-4 heuristic algorithm และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 4.....43

ภาพที่ 30 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง Top-4 heuristic algorithm และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 5.....44

ภาพที่ 31 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง รูปแบบที่โหนดที่ชอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางและรูปแบบที่โหนดที่ชอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU บนชุดข้อมูลจริง.....45

ภาพที่ 32 แสดงความถี่ของข้อมูลที่กระจุกตัวในช่วงระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารได้ค่า.....48



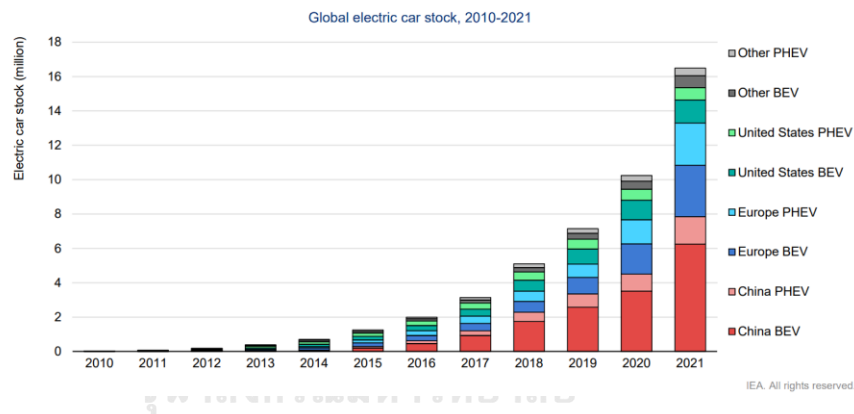
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

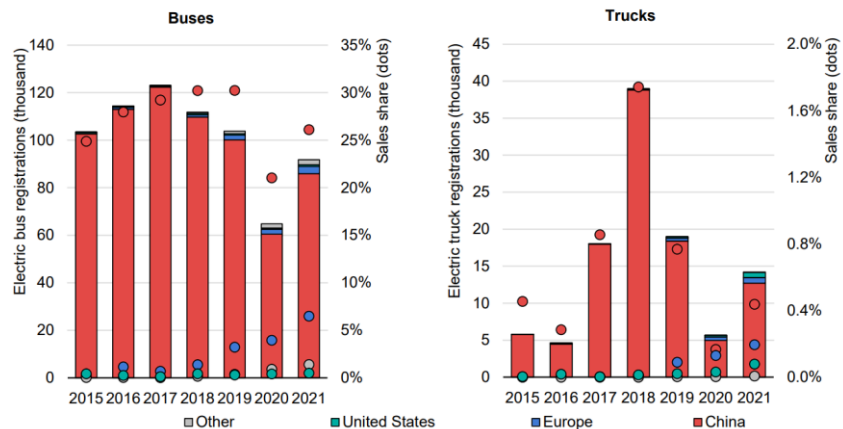
กระแสความนิยมของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลกในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ทั้งในด้านของรถยนต์โดยสารส่วนบุคคลและรถยนต์โดยสารสาธารณะ โดยสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของหุ้นเกี่ยวกับรถยนต์พลังงานไฟฟ้าส่วนบุคคลและส่วนแบ่งการตลาดของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าสาธารณะตั้งแต่ปี ค.ศ. 2018 ถึง ค.ศ. 2021 [1] ดังแสดงในภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เนื่องจากรถยนต์พลังงานไฟฟ้ามีข้อดีหลายประการสำหรับผู้ขับขี่และสภาพแวดล้อม เช่น เสี่ยงรบกวนที่น้อยกว่า ลดการก่อก๊าซพิษจากท่อไอเสียและประหยัดค่าใช้จ่ายการเติมพลังงานมากกว่า

Over 16.5 million electric cars were on the road in 2021, a tripling in just three years



ภาพที่ 1 แสดงการเพิ่มขึ้นของหุ้นรถยนต์พลังงานไฟฟ้าส่วนบุคคล

Electric bus and truck registrations and sales shares by region, 2015-2021



ภาพที่ 2 แสดงการเพิ่มขึ้นของส่วนแบ่งการตลาดของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าสาธารณะ

เครือข่ายยานพาหนะ (Vehicular Network) จึงสำคัญเพื่อเป็นเครือข่ายที่ทำให้รถยนต์พลังงานไฟฟ้าเหล่านี้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ซึ่งเครือข่ายยานพาหนะเป็นเครือข่ายการติดต่อสื่อสารที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างยานพาหนะกับยานพาหนะด้วยกันหรือโครงสร้างพื้นฐานที่ถูกติดตั้งอยู่บนท้องถนน ซึ่งในปัจจุบันนักวิจัยในวงการติดต่อสื่อสารให้ความสำคัญและเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก และได้ถูกนำมาประยุกต์และปรับใช้เพื่อให้เครือข่ายการสื่อสารบนยานพาหนะเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

จาก [2] สถาปัตยกรรมของเครือข่ายยานพาหนะ ประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ ยานพาหนะซึ่งมีบทบาทเป็นผู้ใช้งาน, สถานีรับส่งสัญญาณข้างทางหรือ Road-Side Unit (RSU) ซึ่งทำหน้าที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่ถูกติดตั้งและกระจายอยู่ตามจุดต่างๆ บนท้องถนนและ base station ซึ่งจะเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่ผู้ให้บริการโทรศัพท์เป็นผู้ให้บริการ โดยมีรูปแบบการติดต่อสื่อสารอยู่ด้วยกัน 3 แบบ ได้แก่ รูปแบบ Vehicle-to-Infrastructure (V2I) ซึ่งเป็นการสื่อสารกันระหว่างยานพาหนะกับ RSU หรือ base station โดยสื่อสารแบบ cellular (5G/6G), รูปแบบ Vehicle-to-Vehicle (V2V) ซึ่งการสื่อสารกันระหว่างยานพาหนะด้วยกันเองโดยใช้มาตรฐาน IEEE 802.11p [3] และรูปแบบ Infrastructure-to-Infrastructure (I2I) ซึ่งเป็นการสื่อสารกันระหว่าง RSU กับ RSU ด้วยกันเองหรือกับ base station โดยสื่อสารในรูปแบบสายสัญญาณ

จากการเติบโตขึ้นของเครือข่ายยานพาหนะนั้นแอปพลิเคชันบนยานพาหนะสามารถที่จะนำประโยชน์ของเครือข่ายนี้มาปรับใช้งานได้ ทำให้เกิดเป็นแอปพลิเคชันต่างๆ ตามมา ยกตัวอย่างเช่น ระบบควบคุมการจราจร รถยนต์ไร้คนขับอัตโนมัติ ความเป็นจริงเสริม/ความจริงเสมือน (augmented reality/virtual reality) ฯลฯ

เนื่องจากเป็นเครือข่ายที่ในอนาคตจะกลายเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับแอปพลิเคชันต่างๆ บนรถยนต์และท้องถนน ความต้องการของแอปพลิเคชันจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ นอกจากนี้แต่ละแอปพลิเคชันยังมีความต้องการที่ต่างกันอีกด้วย เช่น การประมวลผลข้อมูลจำนวนมาก การประมวลผลข้อมูลแบบ real-time ฯลฯ ซึ่งหากนำข้อมูลไปประมวลผลที่เซิร์ฟเวอร์ส่วนกลางที่มักจะนิยมติดตั้งในรูปแบบ cloud computing [4] จะทำให้ปริมาณข้อมูลที่ถูกส่งผ่านเครือข่ายมีจำนวนมากขึ้นและการประมวลผลข้อมูลเป็นไปอย่างล่าช้า ทำให้เกิดเป็นความท้าทายในการปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น

จากความท้าทายที่กล่าวมาข้างต้น จึงเกิดเป็นแนวคิดของการประมวลผลที่ขอบของเครือข่าย หรือ edge computing ซึ่งเป็นการนำโหนดที่ขอบ (edge node) ที่มีความสามารถในการคำนวณมาติดตั้งอยู่ในเครือข่ายให้ใกล้กับผู้ใช้งาน ซึ่งในกรณีของเครือข่ายยานพาหนะนั้นนั้นมักนิยมติดตั้งไว้ใกล้กับ RSU โดยติดต่อสื่อสารกันผ่านสายสัญญาณ เพื่อให้ยานพาหนะที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงที่ต้องการจะประมวลผลข้อมูลสามารถที่จะรับ-ส่งข้อมูลกับการนำโหนดที่ขอบได้ [5] ซึ่งสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือการหาตำแหน่งการติดตั้งโหนดที่ขอบ (edge node placement) เพื่อให้ความล่าช้าของการส่งข้อมูลระหว่างยานพาหนะและโหนดที่ขอบน้อยที่สุดและครอบคลุมพื้นที่บริการมากที่สุด แต่ก็จะต้องคำนึงจำนวนของโหนดที่ขอบที่ต้องใช้เนื่องจากราคาในการติดตั้งโหนดที่ขอบและ RSU เหล่านี้สูงมากเช่นกัน [6]

ในปัจจุบันการพัฒนา edge computing ในเครือข่ายยานพาหนะจึงเป็นหัวข้อที่นักวิจัยจำนวนมากศึกษาและค้นคว้าหาวิธีการ, สถาปัตยกรรมและอัลกอริทึมใหม่ๆ ในการหาตำแหน่งที่ดีที่สุด โดยประเด็นสำคัญที่ให้ความสำคัญคือความล่าช้า (delay) ในการติดต่อสื่อสาร ซึ่งงานวิจัยส่วนมากนั้นจะเน้นไปที่การหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimization) เพื่อหาตำแหน่งการติดตั้ง edge node ที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามวิธีการที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการลดความล่าช้าในการติดต่อสื่อสารคือการนำ edge node เหล่านี้ไปให้อยู่ใกล้กับผู้ใช้งานมากที่สุด ซึ่งหลายๆ งานวิจัยก็ไม่ได้คำนึงถึงการใช้ประโยชน์จากระบบขนส่งสาธารณะหรือหากใช้ก็เพื่อเพียงใช้เป็นตัวกลางในการส่งผ่านข้อมูลจากผู้ใช้งานไปยัง RSU ที่อยู่ใกล้เคียงหรือการกระจายข้อความเท่านั้น [7]

จากที่กล่าวไปข้างต้น เพื่อใช้ประโยชน์จากระบบขนส่งสาธารณะที่มีอยู่ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการในการคำนวณหาติดตั้งโหนดที่ขอบบนรถโดยสารประจำทาง มีเป้าหมายเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโหนด โดยใช้ประโยชน์จากข้อได้เปรียบของการใช้รถโดยสารประจำทางเป็นโหนดที่ขอบ โดยพิจารณาถึงจำนวนยานพาหนะรอบข้างที่สามารถติดต่อสื่อสารกับรถโดยสารประจำทางที่ถูกเลือกเป็นโหนดและระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้ระหว่างยานพาหนะรอบข้างกับรถโดยสารประจำทางที่ถูกเลือกเป็นโหนด

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอโครงสร้างระบบสำหรับการใช้รถโดยสารประจำทางเป็นโหนดที่ขอบและฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการคำนวณหาการติดตั้งโหนดที่ขอบบนรถโดยสารประจำทางที่เหมาะสม มีเป้าหมายเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโหนดที่ขอบ โดยพิจารณาถึงจำนวน

ยานพาหนะรอบข้างที่สามารถติดต่อสื่อสารกับรถโดยสารประจำทางที่ถูกเลือกเป็นโหนดที่ชอบ และระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้ระหว่างยานพาหนะรอบข้างกับรถโดยสารประจำทางที่ถูกเลือกเป็นโหนด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ใช้ข้อมูลตำแหน่งของรถโดยสารประจำทางและยานพาหนะส่วนบุคคลในการพิจารณาเท่านั้น
2. การจำลองการเคลื่อนที่ของรถโดยสารประจำทางและยานพาหนะรอบข้างในสภาพการจราจรจำลองถูกสร้างด้วยโปรแกรม Simulation of Urban Mobility (SUMO) เวอร์ชัน 1.8.0
3. การประมวลผล การจำลองการสื่อสารและอัลกอริทึมที่ใช้คำนวณหาการติดตั้งโหนดที่ขอบบนรถโดยสารประจำทางที่เหมาะสม ถูกสร้างด้วยโปรแกรมภาษา Python
4. ชุดข้อมูลจริงของตำแหน่งยานพาหนะส่วนบุคคลถูกนำมาจากมูลนิธิศูนย์ข้อมูลจราจรอัจฉริยะไทย (ITIC) เป็นหนึ่งตัวอย่างจากชุดข้อมูลที่บันทึกการเคลื่อนที่ของรถยนต์รับจ้าง (Taxi) ภายในเขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร
5. ข้อมูลเส้นทางการเดินรถโดยสารประจำทางถูกนำมาจากเว็บไซต์องค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพหรือขสมก. (BMTA)

1.4 คุณค่าทางวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. สามารถที่จะนำการคำนวณหาติดตั้งโหนดที่ขอบบนรถโดยสารประจำทางไปใช้กับระบบขนส่งสาธารณะประเภทอื่นได้ เช่น รถไฟ เป็นต้น
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริงจากแหล่งข้อมูลอื่นได้
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบที่มีสถานีรับส่งสัญญาณข้างทางติดตั้งอยู่แล้วได้

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาตำแหน่งการติดตั้งโหนดที่ขอบที่ดีที่สุดสำหรับเครือข่ายยานพาหนะ
2. ออกแบบโครงสร้างระบบสำหรับการใช้รถโดยสารประจำทางเป็นโหนดที่ขอบแทนการใช้สถานีรับส่งสัญญาณข้างทาง

3. ทำการทดลองเบื้องต้นเกี่ยวกับการจำลองการเคลื่อนที่ของรถโดยสารประจำทางและยานพาหนะรอบข้างในสถานการณ์จำลองเมืองแบบกริด โดยโปรแกรม SUMO
4. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3. และศึกษาถึงคุณลักษณะที่เป็นประโยชน์ของการใช้รถโดยสารประจำทางเป็นโหมดที่ขอบในโครงร่างระบบที่ออกแบบไว้ในข้อ 2.
5. ออกแบบฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการคำนวณหาการติดตั้งโหมดที่ขอบบนรถโดยสารประจำทาง
6. ทำการจำลอง 3 สถานการณ์ ได้แก่ การใช้สถานีรับส่งสัญญาณข้างทางเป็นโหมดที่ขอบการใช้สายของรถโดยสารประจำทางทั้งหมดเป็นโหมดที่ขอบและการใช้วิธีการเลือกสายของรถโดยสารประจำทางจากข้อ 5. เป็นโหมดที่ขอบ โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดลองข้อ 3.
7. ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์และวิเคราะห์ผลในข้อ 6.
8. ศึกษารูปแบบและทำการเตรียมข้อมูลจริงจาก iTIC และเส้นทางการเดินรถโดยสารประจำทางจาก BMTA
9. ทำการทดลองในรูปแบบข้อ 6. บนข้อมูลจริงจากข้อ 8.
10. ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์และวิเคราะห์ผลการทดลองในข้อ 9.
11. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

1.6 ผลงานตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์

บทความชื่อ “Using Buses as Edge Nodes in Vehicular Networks” โดย Natthanon Manop, Karnkitti Kittikamron, Adsadawut Chanakitkarnchok และ Kultida Rojviboonchai ตีพิมพ์และนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการชื่อ “The 20th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering” ซึ่งจัดขึ้น ณ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 28 มิถุนายน - 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2566

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การคำนวณแบบคลาวด์ (Cloud Computing)

การคำนวณแบบคลาวด์คือการใช้เครื่องแม่ข่ายที่ตั้งอยู่ห่างไกลจากผู้ใช้งาน เพื่อเก็บรักษาจัดการและประมวลผลข้อมูล แทนที่จะพึ่งพาเซิร์ฟเวอร์ในเครื่องคอมพิวเตอร์หรือเซิร์ฟเวอร์ส่วนตัว ซึ่งบริการเหล่านี้อาศัยการส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ต ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลและบริการต่าง ๆ ได้ผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น คอมพิวเตอร์ส่วนตัว สมาร์ทโฟน หรือแท็บเล็ต ซึ่งการคำนวณแบบคลาวด์ให้บริการหลายประเภท ตัวอย่างเช่น

- **พื้นที่จัดเก็บข้อมูล (Storage):** บริการเก็บรักษาข้อมูลในรูปแบบคลาวด์ ที่สามารถเพิ่มหรือลดขนาดของพื้นที่ได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน
- **ฐานข้อมูล (Databases):** บริการฐานข้อมูลที่มีการจัดเก็บและจัดการข้อมูลต่าง ๆ ในรูปแบบคลาวด์ เป็นตัวกลางในการเก็บข้อมูลที่สามารถเข้าถึงได้จากทุกที่
- **ซอฟต์แวร์และแอปพลิเคชัน (Software and Applications):** บริการให้ผู้ใช้เข้าถึงและใช้งานซอฟต์แวร์ และแอปพลิเคชันต่าง ๆ ที่อยู่บนคลาวด์ ผู้ใช้สามารถเรียกใช้และใช้งานผ่านอินเทอร์เน็ตได้

โดยการคำนวณแบบคลาวด์มีข้อดีหลายประการ ตัวอย่างเช่น

- **ความยืดหยุ่น:** การคำนวณแบบคลาวด์ช่วยให้ผู้ใช้สามารถขยายหรือลดขนาดทรัพยากรได้ตามความต้องการ และสามารถปรับเปลี่ยนการใช้บริการได้อย่างรวดเร็ว
- **ประหยัดต้นทุน:** ไม่ต้องลงทุนในการสร้างและบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐานของคอมพิวเตอร์ และสามารถชำระค่าบริการตามการใช้งานจริงได้
- **ความสะดวกในการเข้าถึง:** สามารถเข้าถึงข้อมูลและบริการผ่านอินเทอร์เน็ตได้ทุกที่และทุกเวลาผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ

- ความเชื่อถือได้และความทนทาน: บริการการคำนวณแบบคลาวด์มักมีศูนย์ข้อมูลหลายแห่งที่มีการสำรองข้อมูลและการกู้คืนทรัพยากร จึงมีความเชื่อถือได้ในเรื่องความพร้อมรองรับและความทนทาน
- การทำงานร่วมกันและขยายขนาด: ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถทำงานร่วมกันเป็นทีมได้ สามารถแบ่งปันทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถขยายขนาดการใช้งานได้ตามความต้องการ

2.1.2 การคำนวณแบบขอบ (Edge Computing)

การคำนวณแบบขอบเป็นแนวคิดในการคำนวณที่นำหน่วยประมวลผลและการเก็บข้อมูลมาใกล้แหล่งที่มาของข้อมูล โดยไม่พึ่งพาเครื่องแม่ข่ายส่วนกลาง ซึ่งในการคำนวณแบบขอบนั้น การประมวลผลและการวิเคราะห์ข้อมูลเกิดขึ้นที่มักอยู่ใกล้กับอุปกรณ์หรือเซ็นเซอร์ที่สร้างข้อมูล

แนวคิดของการคำนวณแบบขอบคือเพื่อลดความล่าช้า เพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์และเพิ่มประสิทธิภาพรวมของระบบ โดยการประมวลผลข้อมูลใกล้แหล่งที่มาจะช่วยลดเวลาและแบนด์วิดท์ที่ต้องใช้ในการส่งข้อมูลไปยังเครื่องแม่ข่ายที่ตั้งอยู่ห่างไกลจากผู้ใช้งาน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งโดยเฉพาะในสถานการณ์ที่ต้องการการประมวลผลแบบเรียลไทม์ เช่น ในแอปพลิเคชันเกี่ยวกับอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (IoT), ยานยนต์ไร้คนขับ, อุตสาหกรรมอัตโนมัติและเมืองอัจฉริยะ

ในการคำนวณแบบขอบนั้น อุปกรณ์หรือโหนดที่ขอบจะต้องรับผิดชอบในการประมวลผล, กรอง, และวิเคราะห์ข้อมูล อุปกรณ์เหล่านี้สามารถเป็นได้ตั้งแต่อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์, เกตเวย์ ไปจนถึงโหนดที่ขอบที่ติดตั้งใกล้แหล่งที่มาของข้อมูล ซึ่งการคำนวณแบบขอบมีความได้เปรียบหลายประการ ตัวอย่างเช่น

- ลดความล่าช้า: โดยการประมวลผลข้อมูลใกล้แหล่งที่มาสามารถลดเวลาตอบสนองลงได้ เพราะข้อมูลไม่ต้องส่งไปยังเครื่องแม่ข่ายที่ตั้งอยู่ห่างไกลจากผู้ใช้งานสำหรับการประมวลผลข้อมูลและการตอบสนอง
- การจัดการแบนด์วิดท์: การคำนวณแบบขอบช่วยลดปริมาณข้อมูลที่ต้องส่งไปยังคลาวด์ ลดความต้องการแบนด์วิดท์และต้นทุนที่เกี่ยวข้อง

- ความเป็นส่วนตัวและความปลอดภัย: บางข้อมูลที่เป็นความลับสามารถประมวลผลในพื้นที่นั้น ๆ โดยไม่ต้องส่งไปยังเครื่องแม่ข่ายภายนอก รักษาความเป็นส่วนตัวของข้อมูลดีขึ้นและลดความเสี่ยงในการละเมิดข้อมูล
- ความสามารถในการทำงานแบบออฟไลน์: อุปกรณ์หรือโหนดที่ขอบสามารถทำงานต่อไปได้แม้จะไม่มี การเชื่อมต่อ กับเครื่องแม่ข่ายส่วนกลาง ทำให้ระบบทำงานได้โดยไม่มีขาดการเชื่อมต่อ
- ความยืดหยุ่นในการขยายขนาด: การคำนวณแบบขอบช่วยให้มีทรัพยากรที่กระจายอยู่และสามารถขยายขนาดเพื่อเข้ารอบตามความต้องการที่เพิ่มขึ้นได้โดยไม่กระทบต่อเครื่องแม่ข่ายส่วนกลาง

อย่างไรก็ตาม การคำนวณแบบขอบไม่ได้เป็นการแทนที่การคำนวณแบบคลาวด์ แต่เป็นการเสริมสร้างและร่วมทำงานกับบริการคลาวด์โดยการถ่ายโอนงานประมวลผลไปยังโหนดที่ขอบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานเครือข่ายและให้ข้อมูลแบบเรียลไทม์ การคำนวณแบบขอบและการคำนวณแบบคลาวด์สามารถทำงานร่วมกันในรูปแบบไฮบริดเพื่อให้ได้สมดุลที่ดีที่สุดของการประมวลผลพื้นที่นั้น ๆ และบริการคลาวด์ตามความต้องการของแอปพลิเคชันหรือกรณีการใช้งานที่เฉพาะเจาะจง

2.1.3 เครือข่ายยานพาหนะ (Vehicular Network)

เครือข่ายยานพาหนะ (Vehicular Network) เป็นโครงสร้างเครือข่ายที่เป็นทางการที่ช่วยให้การสื่อสารและการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างยานพาหนะและสิ่งแวดล้อมที่อยู่บริเวณใกล้เคียงเกิดขึ้น โดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเพื่อเชื่อมต่อระหว่างยานพาหนะกันเอง ระหว่างโครงสร้างพื้นฐานท้องถนนหรือผู้คนสัญจรบนท้องถนน ซึ่งเครือข่ายยานพาหนะนี้ถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มความปลอดภัยทางถนน เพิ่มประสิทธิภาพการจราจร และให้บริการต่าง ๆ แก่ผู้ขับขี่และผู้โดยสาร โดยมีองค์ประกอบและคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ ตัวอย่างเช่น

- การสื่อสารระหว่างยานพาหนะ (V2V Communication): การสื่อสารระหว่างยานพาหนะทำให้ยานพาหนะสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลโดยตรงกับยานพาหนะใกล้เคียง นี้ช่วยให้สามารถแบ่งปันข้อมูลแบบเรียลไทม์ เช่น ตำแหน่งที่ตั้ง, ความเร็ว, การเร่งความเร็ว และ

การเบรก ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการป้องกันการชนกัน, การขับร่วมกัน, และการจัดการจราจร

- การสื่อสารระหว่างยานพาหนะและโครงสร้างทางข้ามถนน (V2I Communication): การสื่อสารระหว่างยานพาหนะและโครงสร้างทางข้ามถนน เช่น สัญญาณไฟจราจร, ป้ายจราจร และด่านค่าผ่านทาง ช่วยให้สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น เงื่อนไขการจราจร, อัตราขบวนท้องถนน, และเวลาสัญญาณไฟจราจร ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจราจรและเพิ่มความปลอดภัยของผู้ขับขี่ได้
- การสื่อสารระหว่างยานพาหนะและคนเดินเท้า (V2P Communication): การสื่อสารระหว่างยานพาหนะและคนเดินเท้าช่วยให้ยานพาหนะสามารถปฏิบัติต่อคนเดินเท้า, จักรยานและผู้ใช้ถนนที่มีความเสี่ยงได้ โดยการแลกเปลี่ยนข้อมูลทำให้ยานพาหนะสามารถตรวจจับและตอบสนองต่อความเสี่ยงได้ ให้คำเตือนหรือแจ้งเตือนทั้งผู้ขับขี่และคนเดินเท้าเพื่อป้องกันอุบัติเหตุ
- การสื่อสารระหว่างยานพาหนะและคลาวด์ (V2C Communication): การสื่อสารระหว่างยานพาหนะและบริการทางคลาวด์ (Vehicle-to-Cloud Communication) นั้นเกี่ยวข้องกับ การเชื่อมต่อระหว่างยานพาหนะกับบริการที่อยู่บนคลาวด์ ยานพาหนะสามารถอัปโหลดและดาวน์โหลดข้อมูลไปยังและจากคลาวด์ เพื่อให้สามารถเข้าถึงบริการต่าง ๆ เช่น ข้อมูลการจราจรแบบเรียลไทม์, การนำทาง, การให้บริการสื่อบันเทิงและแอปพลิเคชันได้
- ระบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligent Transportation Systems - ITS): เครื่องข่ายยานพาหนะเป็นส่วนสำคัญของระบบขนส่งอัจฉริยะ (Intelligent Transportation Systems - ITS) ซึ่งรวมเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่งและความปลอดภัย องค์ประกอบของ ITS รวมถึงการควบคุมสัญญาณไฟจราจรที่ปรับตัวได้, การนำเส้นทางแบบพลวัตและการตรวจจับเหตุการณ์ และบริการฉุกเฉิน
- เทคโนโลยีไร้สาย: เครื่องข่ายยานพาหนะใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายต่าง ๆ เช่น Dedicated Short-Range Communication (DSRC) และ Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) เพื่อให้การสื่อสารระหว่างยานพาหนะและโครงสร้างเกิดขึ้น ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้ให้การเชื่อมต่อที่ความล่าช้าต่ำและความเชื่อถือสำหรับการแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบเรียลไทม์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาและปรับปรุงเครือข่ายยานพาหนะปัจจุบันมีอยู่เป็นจำนวนมาก โดยส่วนมากแล้วจะเป็นการเพิ่มคุณภาพสำหรับการให้บริการผู้ใช้งาน (Quality of Service) ซึ่งงานวิจัยที่มุ่งเน้นในด้านนี้จะเน้นการตอบสนองแบบทันเวลาแต่ก็ยังคงพิจารณาทางด้านผู้ให้บริการในด้านของราคาในการติดตั้งอุปกรณ์และการจัดการเครือข่าย จึงมีงานวิจัยที่หาทางนำ service ต่างๆ เหล่านี้ให้อยู่ใกล้กับผู้ใช้งานมากที่สุด ซึ่งทำให้เกิดงานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุง edge computing ให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพกับเครือข่ายยานพาหนะในปัจจุบัน ซึ่งงานวิจัยด้านนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือแบบ โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่กับที่หรือ stationary edge node [8-11] และ โหนดที่ขอบที่เคลื่อนที่หรือ mobile edge node [7, 12, 13]

สำหรับประเภท stationary edge node นั้น ส่วนมากโหนดที่ขอบจะถูกติดตั้งอยู่กับ RSU งานวิจัยที่เกี่ยวข้องประเภทนี้ได้แก่

งานวิจัย [8] ได้นำประโยชน์ของ 5G micro base station (gNB) เพื่อนำมาใช้แทน RSU แบบดั้งเดิม โดย topology ของระบบที่ถูกแบ่งเป็นชั้นๆ ได้แก่ 5G base station, edge computing unit, gNB และ vehicle จากบนลงล่างตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยได้นำเสนอ greedy algorithm ในการหาคู่ของโหนดชั้นบน (โหนดพ่อ) กับโหนดชั้นล่าง (โหนดลูก) โดยให้ใช้จำนวนโหนดพ่อให้น้อยที่สุดเพื่อครอบคลุมโหนดลูกมากที่สุด และนำเสนอ Cost-Effective Heuristic Algorithm (CEHA) เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จาก greedy algorithm ไม่ติด local optimal solution ด้วยการนำ probability matrix มาใช้แนะนำการจับคู่ของโหนดพ่อกับโหนดลูก ซึ่งทำให้ระบบสามารถที่จะทำให้ response time และ bandwidth ของการติดต่อสื่อสารลดลง โดยอยู่ภายใต้ข้อจำกัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง

งานวิจัย [9] ได้นำเสนอ DRLD-SP โดยการใช้การเก็บผลตอบรับ (feedback) จากผู้ใช้งานเพื่อหาจุดให้บริการที่เหมาะสม โดยใช้ actor-critic network ที่เป็น policy-value function กับ deep neural network (DNN)

งานวิจัย [10] ได้นำเสนอ heuristic multi-objective optimization โดยพิจารณา latency, deployment และ runtime cost โดยในงานวิจัยได้นำข้อมูลการเคลื่อนที่ของรถยนต์รับจ้างมาประมวลผลอยู่ในรูปแบบช่องตารางและการเคลื่อนที่ระหว่างช่องเพื่อจัดช่องตารางดังกล่าวเป็น cluster และทำการหา cluster's head เพื่อเป็นจุดที่ใช้ติดตั้ง edge node เพื่อเป้าหมายของงานวิจัยนี้คือต้องการที่จะหาค่าที่เหมาะสมระหว่างราคาของการติดตั้ง, runtime overhead และ average delay

โดยจุดเด่นของงานวิจัยนี้คือใช้ data set จริงจาก Shanghai taxi trace เพื่อที่จะหาข้อมูลเชิงลึกของรูปแบบการจราจรเพื่อใช้ในการทำ heuristic optimization

งานวิจัย [11] ได้นำเสนอขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการหาตำแหน่งในการติดตั้ง edge node บน RSU โดยมีการพิจารณาถึง 6 เป้าหมายที่มุ่งมองของผู้ใช้งานและผู้ให้บริการ ได้แก่ latency, workload balancing, energy consumption, deployment costs, transmission reliability และ ES quantity โดยได้มีการนำเสนอ many-objective evolutionary algorithm มาใช้ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดจุดเด่นของงานวิจัยนี้คือมีจำนวนเป้าหมายในการพิจารณามากที่สุดถึง 6 เป้าหมายเมื่อเทียบกับงานวิจัยที่เคยมีมาก่อน

ซึ่งตัววัดที่ปรากฏเหมือนกันในงานวิจัยเหล่านี้คือความล่าช้าและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งซึ่งสำหรับค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง stationary edge node นั้นมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับ mobile edge node ดังนั้น mobile edge node จึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจในการนำยานพาหนะไม่ว่าจะกำลังขับขี้อยู่บนท้องถนนหรือจอดอยู่ก็ตาม ดังนั้นการขนส่งสาธารณะจึงเป็นอันดับแรก ๆ ที่จะถูกนำมาใช้เพื่อให้บริการแก่ผู้ใช้งาน โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องประเภทนี้ได้แก่

งานวิจัย [7] ได้นำเสนอสถาปัตยกรรม two-tier BUS-VANET ใช้ควบคุม โครงสร้างพื้นฐานสำหรับการจราจรกับรถโดยสาร RSU ที่ติดตั้งอยู่และส่วนควบคุมการจราจรส่วนกลาง (Traffic Control Center, TCC) โดยในสถาปัตยกรรมที่นำเสนอใหม่นี้อนุญาตให้มีการติดต่อสื่อสารกับแบบ V2V ผ่านทางรถบัสซึ่งทำตัวเปรียบเสมือนกระดูกสันหลังของเครือข่ายไปยัง RSU ที่ติดตั้งอยู่ โดย TTC จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลการจราจรจากรถบัสและ RSU เพื่อตัดสินใจ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ให้ผลลัพธ์ในเชิงอัตราการส่งกลุ่มข้อมูล (packet delivery rate) ที่สูงกว่าและให้ความล่าช้าของการส่ง (delivery delay) ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับสถาปัตยกรรม VANET แบบดั้งเดิม

งานวิจัย [12] ชื่อว่า Bus-Based Routing Technique (BRT) routing scheme เพื่อเรียนรู้เวลาที่ต้องการของการส่งข้อมูลไปยัง RSU ที่ติดตั้งอยู่ผ่านทางรถบัสที่กำหนดไว้โดยการทำงานการเคลื่อนที่ของรถบัส ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ระบุว่าสามารถให้สัดส่วนการส่งข้อมูลที่ดีและมีความล่าช้าระหว่างต้นทาง-ปลายทางต่ำ

งานวิจัย [13] ได้นำเสนอ routing protocol ที่ใกล้เคียงกับงานวิจัย [12] ชื่อว่า Taxi and Public transport based heterogeneous vehicular network Fuzzy Routing (TPFR) ซึ่งใช้การคัดเลือก

ยานพาหนะที่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับการทำ routing โดยขึ้นอยู่กับประเภทของยานพาหนะ ระยะห่างจากผู้รับ สภาพการณ์การจราจรและตำแหน่งของยานพาหนะ ซึ่งผลลัพธ์จากงานวิจัย แสดงให้เห็นว่า routing protocol ที่นำเสนอสามารถให้สัดส่วนการส่งข้อมูลที่ดีและมีความล่าช้า ระหว่างต้นทาง-ปลายทางต่ำเมื่อเทียบกับ routing protocol อื่น ๆ

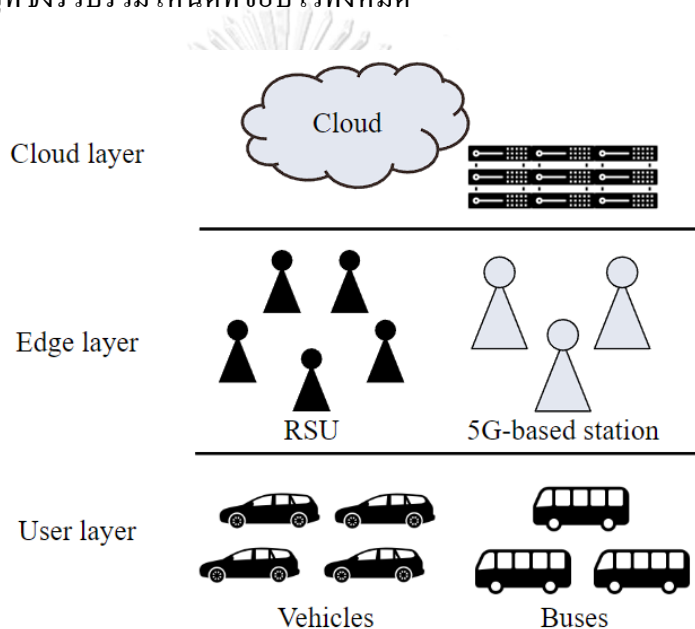


บทที่ 3

แนวคิดและหลักการในงานวิจัย

3.1 องค์ประกอบของโครงสร้างระบบ

สำหรับโครงสร้างระบบการคำนวณแบบขอบบนยานพาหนะ (Vehicular Edge Computing) โดยทั่วไปนั้นประกอบไปด้วยกัน 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นคลาวด์ (Cloud layer) ชั้นขอบ (Edge layer) และ ชั้นผู้ใช้งาน (User layer) ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งสำหรับการวางตำแหน่งขอบโหนดที่ขอบนั้น ชั้นขอบเป็นชั้นที่สำคัญที่ซึ่งรวบรวมโหนดที่ขอบไว้ทั้งหมด



ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างระบบการคำนวณแบบขอบบนยานพาหนะ โดยทั่วไป

สำหรับโครงสร้างระบบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีชื่อว่า Buses as an Infrastructure ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยโครงสร้างนี้ได้ใช้ข้อได้เปรียบของระบบขนส่งสาธารณะที่มีอยู่บนชั้นผู้ใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งรถโดยสารประจำทางเพื่อที่จะให้ทำงานเป็นโหนดที่ขอบของระบบ เนื่องจากข้อจำกัดในด้านค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโหนดของโหนดที่ขอบที่อยู่หนึ่งที่ทำให้การเชื่อมต่อระหว่างชั้นผู้ใช้งานและชั้นขอบเป็นไปอย่างจำกัด ณ บริเวณที่โหนดนั้นติดตั้งอยู่เท่านั้น ในทางตรงกันข้ามนั้นรถโดยสารประจำทางสามารถเข้าถึงพื้นที่ที่ไม่มีโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการติดตั้งโหนดหรือพื้นที่ที่สัญญาณอ่อนได้ทำให้รถโดยสารประจำทางเหล่านี้สามารถให้บริการผู้ใช้งานได้มากกว่าด้วยเวลาเชื่อมต่อที่เพียงพอ ทำให้ผู้ใช้งานซึ่งเป็นยานพาหนะรอบข้างสามารถเข้าถึงทรัพยากรและบริการได้ผ่านทางรถโดยสารประจำทาง ดังนั้นรถโดยสารประจำทางจึงมีเหมาะสมที่

จะถูกใช้งานเป็น โหนดที่ขอบในโครงสร้างระบบนี้จากเหตุผลที่กล่าวไปข้างต้น โดยรายละเอียดของแต่ละชั้นของโครงสร้างระบบอธิบายได้ตามนี้

1. ชั้นคลาวด์ (Cloud layer)

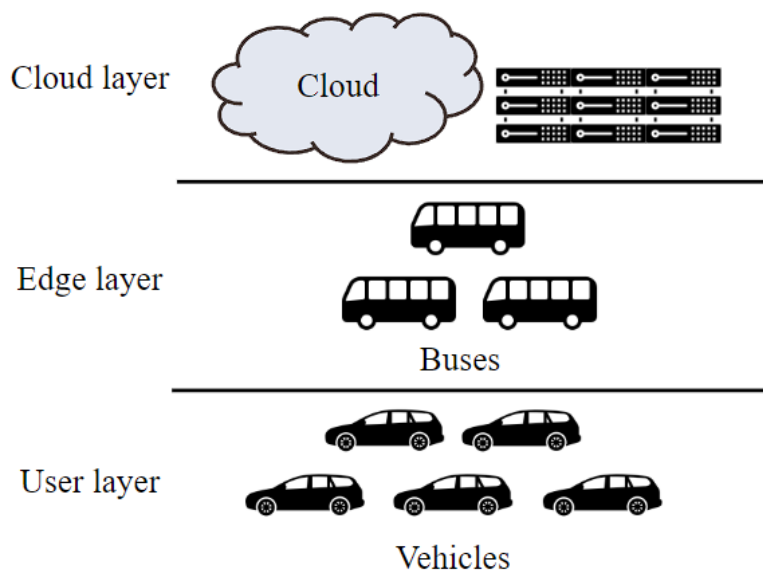
ในชั้นนี้ประกอบไปด้วยเครื่องแม่ข่ายส่วนกลางหนึ่งหรือหลาย ๆ เครื่องเพื่อให้บริการต่าง ๆ ในมุมมองภาพรวม เช่น การติดตามและการจัดการจราจร โดยในชั้นนี้จะเป็นชั้นที่มีความสามารถในการคำนวณที่สูงที่สุด สามารถรองรับจำนวนงานที่เกิดขึ้นที่ชั้นของไม่สามารถรองรับได้ อย่างไรก็ตามระยะทางระหว่างชั้นนี้และชั้นผู้ใช้งานนั้นห่างไกลกัน ทำให้เกิดปัญหาเรื่องความล่าช้าของการส่งงานที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นปัญหาทั่วไปที่มักเกิดขึ้น

2. ชั้นขอบ (Edge layer)

ในชั้นนี้จะเป็นชั้นที่ถูกนำเสนอขึ้นเพื่อประมวลผลข้อมูลที่ต้องการความล่าช้าของการส่งข้อมูลต่ำและต้องการการประมวลผลในระดับกลาง ซึ่งรถโดยสารประจำทางจะเป็นผู้ที่ให้บริการในส่วนนี้ ผู้ใช้งานสามารถร้องขอเพื่อที่จะใช้งานทรัพยากรในการคำนวณจากชั้นนี้ได้ซึ่งระยะทางจากชั้นนี้ไปยังชั้นผู้ใช้งานสั้นกว่าชั้นคลาวด์ หากมีการร้องขอใด ๆ ที่เกินความสามารถในการให้บริการของชั้นนี้ คำร้องขอนั้นจะถูกส่งไปจัดการที่ชั้นคลาวด์ต่อไป

3. ชั้นผู้ใช้งาน (User layer)

ในชั้นนี้นั้นยานพาหนะอื่นใด ๆ ที่ไม่ใช่รถโดยสารประจำทางที่ถูกเลือกเป็นโหนดที่ขอบจะถูกเป็นพิจารณาเป็นผู้ใช้งานทั้งหมด โดยผู้ใช้งานจะมีลักษณะของการสร้างและส่งข้อมูลตลอดเวลาไปยังชั้นขอบและส่งคำร้องเพื่อให้ชั้นขอบประมวลผลข้อมูลเหล่านั้นให้ โดยการสื่อสารในรูปแบบ Vehicle-to-Infrastructure (V2I) และรูปแบบ Infrastructure-to-Infrastructure (I2I) นั้น จะอยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.11p, DSRC หรือ 5G



ภาพที่ 4 แสดง โครงร่างระบบการคำนวณแบบขอบบนยานพาหนะที่นำเสนอ (Buses as an Infrastructure framework)

3.2 ข้อได้เปรียบของการใช้รถโดยสารประจำทางเป็นโหนดที่ขอบ

3.2.1 ระยะห่างระหว่างรถโดยสารประจำทางไปยังผู้ใช้งานสั้น

รถโดยสารประจำทางส่วนมากเคลื่อนที่อยู่บนท้องถนนที่อยู่ใกล้กับยานพาหนะและผู้สัญจรบนท้องถนนโดยรอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของผู้โดยสารที่เคลื่อนที่ไปด้วยกันกับรถโดยสาร ทำให้ความล่าช้าในการติดต่อสื่อสารกับรถโดยสารน้อยกว่าติดต่อกับ RSU ปกติ

3.2.2 รถโดยสารประจำทางเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีผู้ใช้งานหนาแน่น

เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถโดยสารประจำทางมักถูกออกแบบมาเป็นอย่างดีเพื่อให้รองรับต่อจำนวนผู้ใช้งานจำนวนมาก ดังนั้นโดยส่วนมากแล้ว รถโดยสารจะผ่านจุดสำคัญๆ เช่น โรงเรียน โรงพยาบาล ห้างสรรพสินค้า เป็นต้น หากติดตั้ง edge node กับรถโดยสารเหล่านี้ จะทำให้ครอบคลุมพื้นที่มากกว่าใช้ RSU ปกติ

3.2.3 ระยะเวลาของการเชื่อมต่อกันระหว่างยานพาหนะมาก

ในกรณีที่รถโดยสารประจำทางและรถรอบข้างเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน รถโดยสารรอบนั้นจะสามารถติดต่อสื่อสารกับ edge node บนรถโดยสารได้เป็นเวลานานมากกว่ากับ RSU ปกติ

3.3 อีวีริสติกอัลกอริทึมสำหรับการคำนวณหาการติดตั้งโหนดที่ขอบบนรถโดยสารประจำทาง

จุดประสงค์ของอัลกอริทึมที่นำเสนอที่นี่คือเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโดยอีวีริสติกอัลกอริทึมนี้จะเลือกเส้นทางของรถโดยสารประจำทางเพื่อใช้เป็นโหนดที่ขอบตามจำนวนงานที่เกิดขึ้นในเส้นทางของรถโดยสารประจำทาง โดยจะมีการใช้ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ประกอบด้วย ตำแหน่งของรถโดยสารประจำทาง เส้นทางของรถโดยสารประจำทางและตำแหน่งของยานพาหนะของผู้ใช้งาน เพื่อใช้ในการคำนวณความหนาแน่นของจำนวนงานที่เกิดขึ้นบนถนนแต่ละเส้น

การทำงานอัลกอริทึมที่นี้อยู่บนสมมติฐานว่า ข้อมูลของแต่ละเส้นทางนั้นถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า ตัวอย่างเช่น เลนปัจจุบันของรถโดยสารประจำทาง เป็นต้น โดยให้ $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ แทนเซตของยานพาหนะของผู้ใช้งาน $B = \{b_1, \dots, b_m\}$ แทนเซตของเส้นทางของรถโดยสารประจำทาง และ $R_{b_i} = \{r_{b_i,1}, \dots, r_{b_i,k}\}$ แทนเซตของเส้นถนนที่อยู่ในเส้นทางของรถโดยสารประจำทาง b_i โดยในขั้นตอนแรกนั้นจะทำการนับจำนวนของยานพาหนะของผู้ใช้งานในช่วงเวลาตั้งแต่ 1 ถึง T และจัดกลุ่มตามเส้นทางของรถโดยสารประจำทาง ดังนั้นจึงสามารถคำนวณจำนวนงาน w_{b_i} ที่เกิดขึ้นบนเส้นทางของรถโดยสารประจำทาง b_i ใด ๆ ได้ดังสมการที่ 1

$$w_{b_i} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N l_{b_i, v_j}(t) \quad (1)$$

โดยที่ $l_{b_i, v_j}(t)$ แทนการที่ยานพาหนะของผู้ใช้งาน v_j กำลังจับอยู่บนเลนที่อยู่บนเส้นทางของรถโดยสารประจำทาง b_i ที่เวลา t หรือไม่ ถ้ายานพาหนะของผู้ใช้งาน v_j กำลังจับอยู่บนเลนที่อยู่บนเส้นทางของรถโดยสารประจำทาง b_i ที่เวลา t แล้ว $l_{b_i, v_j}(t)$ จะมีค่าเท่ากับ 1 ถ้าไม่จะมีค่าเท่ากับ 0

จากนั้นทำการคำนวณหาจำนวนงานต่อระยะทางที่รถโดยสารประจำทาง $b_i \in B$ แทนด้วยความหนาแน่นของงาน WD_{b_i} ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$WD_{b_i} = \frac{\sum_{r=1}^k w_{b_i, r}}{D_{b_i}} \quad (2)$$

โดยที่ D_{b_i} แทนระยะทางรวมทั้งหมดของรถโดยสารประจำทาง b_i และ $w_{b_i,r}$ แทนจำนวนงานของรถโดยสารประจำทาง b_i บนถนน $r_{b_i,r} \in R_{b_i}$

ในขั้นตอนสุดท้าย จะใช้สมการการหาค่าเหมาะที่สุดแสดงดังสมการที่ 3 เพื่อเลือกเส้นทางของรถโดยสารประจำทางเพื่อใช้เป็นโหนดที่ขอบ โดยจะเป็นการเลือกเส้นทางของรถโดยสารประจำทางจำนวน N แรกที่มีความความหนาแน่นของงานมากที่สุด โดยค่าใช้จ่ายที่ถูกจำกัดไว้จำนวน N เส้นทางแรกเป็นไปตามสมการข้อจำกัดที่ 4

$$\max \sum_{b \in B} w D_b x_n \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_{n=1}^N x_n \leq N ; x_n \in \{0, 1\} \quad (4)$$

โดยรหัสเทียมสำหรับฮิวริสติกอัลกอริทึมนี้แสดงได้ตามอัลกอริทึมที่ 1 โดยข้อมูลขาเข้าสำหรับอัลกอริทึมนี้ประกอบด้วย 1) เซ็ตของรถโดยสารประจำทาง B ที่ประกอบด้วยรหัสประจำตัวของรถที่ไม่ซ้ำกัน 2) รายการตราเวลา TL ที่จะถูกใช้ในวงวนสำหรับนำข้อมูลของแต่ละยานพาหนะของผู้ใช้งาน ณ จุดเวลานั้น 3) จำนวนเส้นทางของรถโดยสารประจำทาง N ที่จะให้ถูกเลือกเป็นโหนดที่ขอบ 4) รายการข้อมูลของยานพาหนะของผู้ใช้งาน V เรียงตามจุดเวลาในรายการตราเวลา 5) เซ็ตของเลน L_b ที่รถโดยสารประจำทางคันที่ b ผ่าน 6) ค่า $L_b(t)$ ซึ่งเลนปัจจุบันที่ยานพาหนะของผู้ใช้งาน v อยู่ ณ เวลา t และ 7) ระยะทางรวมทั้งหมดของแต่ละรถโดยสารประจำทาง D_b โดยมีข้อมูลขาออกรายการของรถโดยสารประจำทางจำนวน N คันแรกตามจำนวนความหนาแน่นของงาน

อัลกอริทึมที่ 1 รหัสเทียมสำหรับฮิวริสติกอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณหาการติดตั้งโหนดที่ขอบ
บนรถโดยสารประจำทาง

Algorithm 1 Heuristic Algorithm

Input: B is the bus set, TL is the list of timestamps containing the location of each vehicle, N is the maximum number of selected bus routes, V is the list of vehicle information of every timestamp which $V(t)$ is the list of vehicle information at timestamp t , L_b is the set of lanes that bus b passing through, $l_v(t)$ is the current lane of vehicle v at timestamp t . D_b is the total route distance of bus b .

Output: list of the first N bus routes

- 1: Let W is the workload set of all bus;
 - 2: Let W_b is the total workload on bus b ;
 - 3: Let WD is the workload density set of all bus;
 - 4: Let WD_b is the workload density of bus b ;
 - 5: **for** Each timestamp t in TL **do**
 - 6: **for** Each vehicle information in $V(t)$ **do**
 - 7: **if** current vehicle lane $l_v(t)$ is in L_b **then**
 - 8: **if** W_b is not in W **then**
 - 9: Add W_b into W ;
 - 10: **else**
 - 11: $W_b := W_b + 1$;
 - 12: **end if**
 - 13: **end if**
 - 14: **end for**
 - 15: **end for**
 - 16: **for** Each W_b in W **do**
 - 17: Calculate workload density $WD_b = W_b / D_b$;
 - 18: Add WD_b in WD ;
 - 19: **end for**
 - 20: Sort WD in descending order;
 - 21: **Return** the optimal number of bus routes N associated with WD as the output;
-

บทที่ 4

การวัดประเมินและผลการทดลอง

4.1 การวัดประเมินผล

4.1.1 วัดที่ใช้ (Metrics)

4.1.1.1 จำนวนยานพาหนะที่โหนดที่สามารถให้บริการได้ (The number of served vehicle)

เป็นผลรวมของจำนวนยานพาหนะทั้งหมดที่ยานพาหนะสามารถติดต่อสื่อสารกับโหนดที่ขอบโหนดใดโหนดหนึ่งได้ตั้งแต่เวลา 1 ถึง T แทนด้วย $|SV|$ โดยที่ $SV \subset V$ โดยระยะห่างระหว่างกันไม่ระยะติดต่อสื่อสารกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ระยะติดต่อสื่อสารอยู่ที่ 300 เมตร โดยอยู่บนสมมติฐานที่ว่าโหนดที่ขอบมีทรัพยากรเพียงพอที่สามารถรองรับงานจากยานพาหนะได้ไม่จำกัด

4.1.1.2 ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้ (The total connectivity time)

เป็นช่วงระยะเวลารวมในหน่วยวินาทีที่ยานพาหนะและโหนดที่ขอบอยู่ในระยะติดต่อสื่อสารแทนด้วย CT_{total} โดยยานพาหนะหนึ่งคันอาจจะเชื่อมต่อกับโหนดที่ขอบได้หลายครั้ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลรวมของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารได้ของยานพาหนะแต่ละคันดังสมการที่

5

$$CT_{total} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k CT_{i,j} \quad (5)$$

โดยที่ $CT_{i,j}$ แทนระยะเวลาที่ติดต่อเชื่อมต่อกันได้ของรถคันที่ i ครั้งที่ j

n แทนจำนวนยานพาหนะ

k แทนจำนวนครั้งที่ติดต่อเชื่อมต่อกันได้ของรถคันที่ i

4.1.2 การทดลองบนสภาพแวดล้อมจำลอง

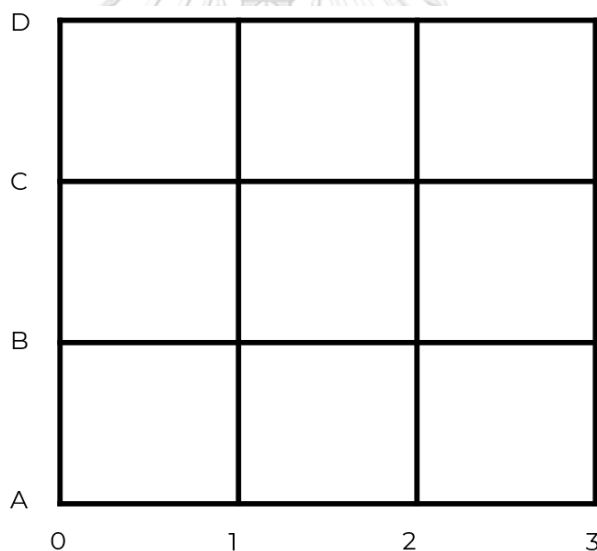
4.1.2.1 การสร้างแผนที่ (Map generation)

สำหรับการสร้างแผนที่บนสภาพแวดล้อมจำลอง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Simulation of Urban Mobility (SUMO) ในการสร้างแผนที่ถนนจำลองแบบตาราง โดยใช้คำสั่ง netgenerate ใน

การสร้างถนนแบบตารางขนาด $4 \times 4 \text{ km}^2$ โดยที่ถนนแต่ละเส้นมีระยะทาง 1000 เมตร และแต่ละถนนประกอบด้วย 2 เลน โดยจะให้ให้มีจุดจอดรถโดยสารประจำทางที่กึ่งกลางทั้งสองฝั่งของถนนทุกเส้น โดยมีพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยตัวอย่างแผนที่แสดงในภาพที่ 5

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้สร้างแผนที่บนสภาพแวดล้อมจำลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
ขนาดแผนที่	4 กม. x 4 กม.
จำนวนเลน	2 เลน
จำนวนสายรถโดยสารประจำทาง	6 สาย
ความยาวของสถานีจอดรถโดยสารประจำทาง	24 เมตร
ระยะเวลาที่รถโดยสารประจำทางจอดแต่ละสถานี	20 วินาที
เวลารอเพื่อสภาพแวดล้อมพร้อม	600 วินาที
เวลาที่ใช้ในการจำลอง	600 วินาที

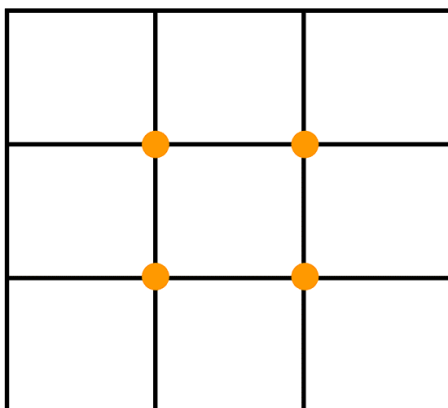


ภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างแผนที่จำลองอย่างง่ายบนสภาพแวดล้อมจำลอง

4.1.2.2 การกำหนดเส้นทางของรถโดยสารประจำทางและตำแหน่งการติดตั้งโหนดที่ขอบ

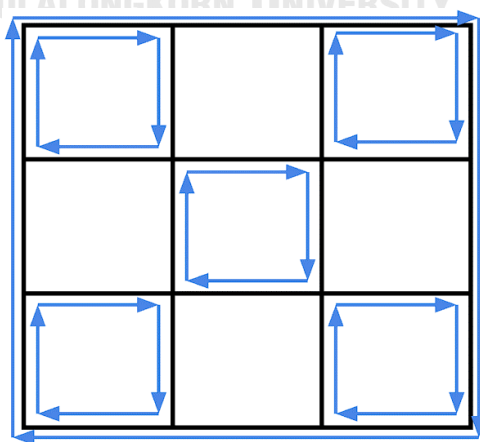
สำหรับการกำหนดเส้นทางของรถโดยสารประจำทางและตำแหน่งการติดตั้งโหนดที่ขอบนั้น แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

1. รูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU (The fixed RSUs approach) โดยให้โหนดที่ขอบจำนวน 4 โหนดติดตั้งอยู่บนแต่ละ RSU ที่อยู่กึ่งกลางของแต่ละสี่แยกในแผนที่จำลอง ดังแสดงในภาพที่ 6 เพื่อรองรับยานพาหนะในบริเวณนี้ที่คาดว่าจะมีการจราจรหนาแน่น



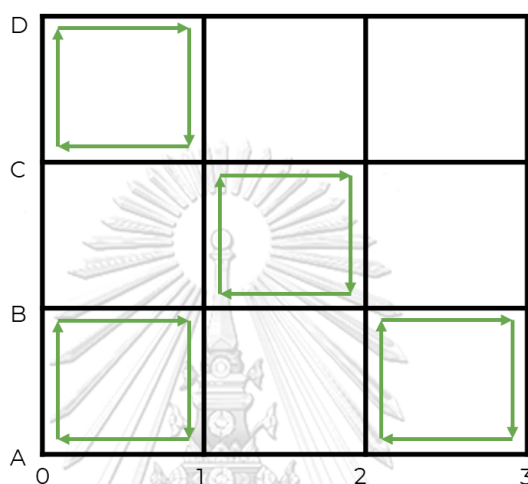
ภาพที่ 6 แสดงรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU (The fixed RSUs approach)

2. รูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบเต็ม (The full deployment approach) ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีการปรับใช้โครงข่ายระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยจะมีการวางเส้นทางของรถโดยสารประจำทางอย่างง่ายในรูปแบบตารางหมากรุกให้ครอบคลุมพื้นที่ถนนโดยส่วนมากในแผนที่จำลองแล้วทำการเลือกเส้นทางทั้งหมดเพื่อใช้ในการติดตั้งโหนดที่ขอบดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งเปรียบเสมือนมีการปรับใช้งานโครงข่ายระบบ แต่ไม่ได้มีการใช้งานฮิวริสติกอัลกอริทึมที่นำเสนอเพื่อต้องการที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระหว่างการใช้งานและไม่ใช้งานฮิวริสติกอัลกอริทึม



ภาพที่ 7 แสดงรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบเต็ม (The full deployment approach)

3. รูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบมีการใช้งานฮิวริสติกอัลกอริทึมที่เลือก N เส้นทางที่มีความความหนาแน่นของงานมากที่สุด (Top-N heuristic algorithm) และเพื่อต้องการเปรียบเทียบผลลัพธ์ในเชิงประสิทธิภาพเทียบกับรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU ผู้วิจัยจึงให้ N มีค่าเท่ากับ 4 เพื่อให้จำนวนโหนดที่ขอบเท่ากับรูปแบบดังกล่าว โดยตัวอย่างแผนภาพที่ได้แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แสดงตัวอย่างแผนภาพที่ได้จาก Top-N heuristic algorithm โดยที่ N มีค่าเท่ากับ 4

4.1.2.3 การจำลองสภาพการจราจร (Traffic simulation)

สำหรับการเคลื่อนที่ของรถโดยสารประจำทางนั้นจะจำลองบนโปรแกรม SUMO โดยให้แต่ละเส้นทางมีรถโดยสารประจำทางอยู่เส้นทางละ 1 คัน และให้วิ่งตามเข็มนาฬิกาเริ่มต้นจากขอบซ้ายล่างของวงวนดังแสดงไปแล้วในภาพที่ 7 โดยแต่ละคันจะจอดที่จุดจอดรถโดยสารที่กึ่งกลางของถนนทุกเส้น รถแต่ละคันมีอัตราเร่งขึ้นที่ 2.6 เมตร/วินาที², อัตราเร่งลงที่ 4.5 เมตร/วินาที², Car-Following Model(σ) เป็น 0, ระยะห่างระหว่างกันอย่างน้อย 3 เมตรและความเร็วสูงสุดที่ 70 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับรถโดยสารแต่ละคันแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับรถโดยสารแต่ละคันบนสภาพแวดล้อมจำลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
อัตราเร่งขึ้น	2.6 เมตร/วินาที ²
อัตราเร่งลง	4.5 เมตร/วินาที ²
ระยะห่างระหว่างกันอย่างน้อย	3 เมตร
ความเร็วสูงสุด	70 กิโลเมตร/ชั่วโมง

สำหรับการเคลื่อนที่ของรถยนต์ทั่วไปนั้นจะมีรูปแบบการเคลื่อนที่ random trip โดยใช้คำสั่ง สคริป randomTrips โดยกำหนดให้มีความหนาแน่นของยานพาหนะตั้งแต่ 20 ถึง 60 คัน/ตาราง กิโลเมตร โดยเพิ่มทีละ 10 คัน/ตารางกิโลเมตร ทำการจำลอง 5 ครั้งในแต่ละความหนาแน่น รวม ทั้งหมด 25 ชุดการเคลื่อนที่ เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพต่อไป

4.1.2.4 เกณฑ์เปรียบเทียบ (Benchmarking)

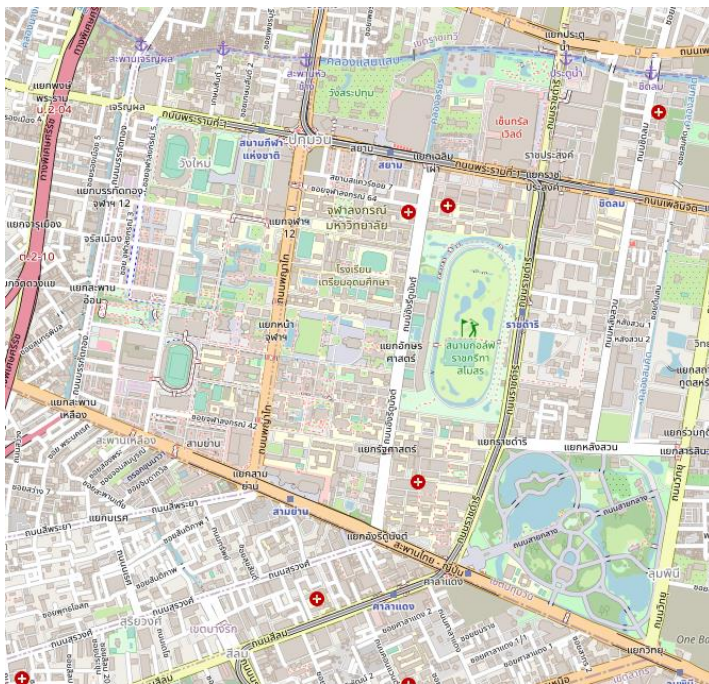
สำหรับเกณฑ์การเปรียบเทียบสำหรับการทดลองบนสภาพแวดล้อมจำลองประกอบด้วย สถานการณ์ใน 3 รูปแบบดังที่กล่าวไปข้างต้นในส่วนการกำหนดเส้นทางของรถโดยสารประจำทาง และตำแหน่งการติดตั้งโหนดที่ขอบ ได้แก่

1. รูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU (The fixed RSUs approach)
2. รูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบเต็ม (The full deployment approach)
3. รูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบมีการใช้งานฮิวริสติกอัลกอริทึมที่ โดยเลือก N เส้นทางที่มีความหนาแน่นของงานมากที่สุด (Top-N heuristic algorithm) โดยเลือกให้ N มีค่าเท่ากับ 4

4.1.3 การทดลองบนชุดข้อมูลจริง

4.1.3.1 การสร้างแผนที่ (Map generation)

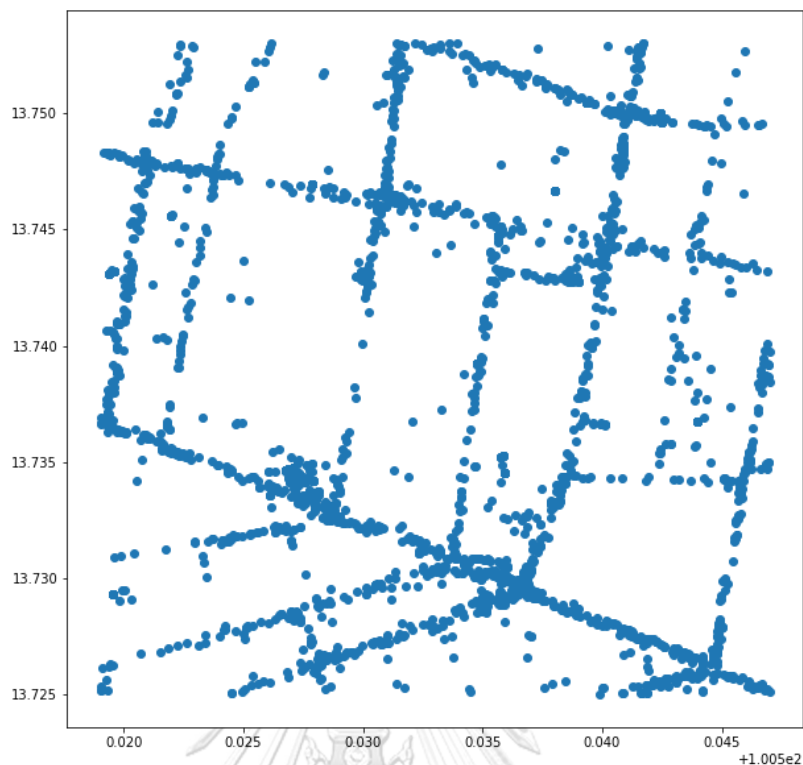
สำหรับแผนที่บนชุดข้อมูลจริงในงานวิจัยนี้นั้นถูกนำมาจากพื้นที่บางส่วนของเขตปทุมวัน ใน กรุงเทพมหานคร ดังแสดงในภาพที่ 9 โดยมีพื้นที่ขนาดประมาณ 3000x3000 ตารางเมตรหรือ 9 ตารางกิโลเมตร โดยมีจุดกึ่งกลางอยู่ที่พิกัดละติจูดที่ 13.739 และลองจิจูดที่ 100.533



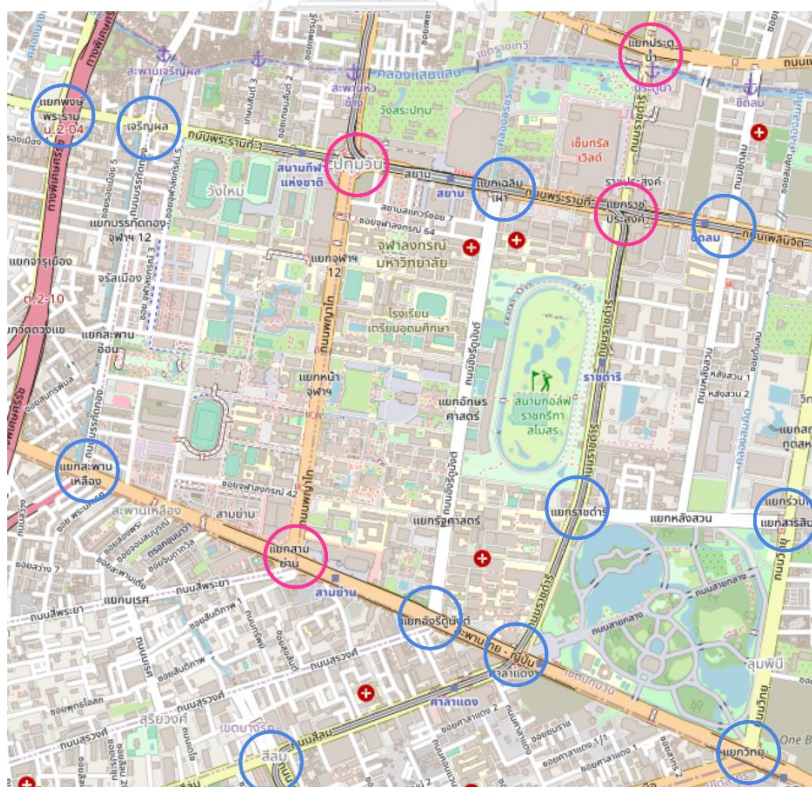
ภาพที่ 9 แสดงตัวอย่างแผนที่จำลองอย่างง่ายบนชุดข้อมูลจริง

4.1.3.2 การกำหนดเส้นทางของรถโดยสารประจำทางและตำแหน่งการติดตั้งโหนดที่ชอบ

สำหรับการเลือกตำแหน่งการติดตั้งโหนดที่ชอบนั้น โดยส่วนมากแล้วผู้ให้บริการมักนิยมติดตั้งโหนดที่ชอบไว้กับ RSU ซึ่งนิยามที่จะติดตั้งที่จุดที่เป็นแยก เช่น สามแยกหรือสี่แยก ที่มีปริมาณรถที่ค่อนข้างหนาแน่น ผู้วิจัยจึงได้ทำการตรวจสอบข้อมูลการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจากฐานข้อมูล iTIC [14] เพื่อที่จะหาจุดที่มีความสมเหตุสมผลที่จะติดตั้ง RSU ในสถานการณ์จริง โดยการลองวาดจุดข้อมูลคร่าว ๆ ลงบนกราฟแล้วได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 10 แล้วจึงทำการเลือกสี่แยกจำนวน 4 แยกมาเป็นตัวแทนในการติดตั้งโหนดที่ชอบดังแสดงเป็นวงกลมสีชมพูในภาพที่ 11 ซึ่งประกอบไปด้วย 1) แยกปทุมวัน 2) แยกราชประสงค์ 3) แยกประตูน้ำและ 4) แยกสามย่าน



ภาพที่ 10 แสดงจุดข้อมูลคร่าว ๆ จากบนชุดข้อมูลจริงบนกราฟ



ภาพที่ 11 แสดงตัวแทนจุดที่จะติดตั้งโหนดที่ขอบ(สีชมพู)

เส้นทางของรถโดยสารประจำทางจะนำมาจากเว็บไซต์ขององค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ (ขสมก.) [15] ตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 12

Line	Area	Start - End	Type	Period
2	3	Samrong Depot - pak-klong market	• Sharing Service(Mini Bus)	05:00 - 22:00
2	3	Mega - Pak Khlong talad	• Regular(Beige - Red)	All day all night
3	8	Northern Bus Ter.(New) - Khlong San	• Regular(Beige - Red) • Air Condition(Euro 2)	All day all night
4	4	Khlongtoei - Thanamphasicharoen	• Regular(Beige - Red) • Air Condition(Beige - Blue)	All day all night
7n	6	Phuthamonthon2 - Phahurat	• Regular(Beige - Red)	-
15	5	The Mall thapra - Sanamluang	• Regular(Beige - Red) • Air Condition(Euro 2)	05:00 - 23:00
16	8	Bangkok bus terminal (Jatujak) - Surawong	• Regular(Beige - Red) • Air Condition(Euro 2)	05:00 - 22:00
18	7	Tha-It - Victory Monument	• Regular(Beige - Red)	05:00 - 22:00
20	5	Phra Bin East - Din Daeng Pier	• Regular(Beige - Red) • Air Condition(Beige - Blue)	05:00 - 22:00

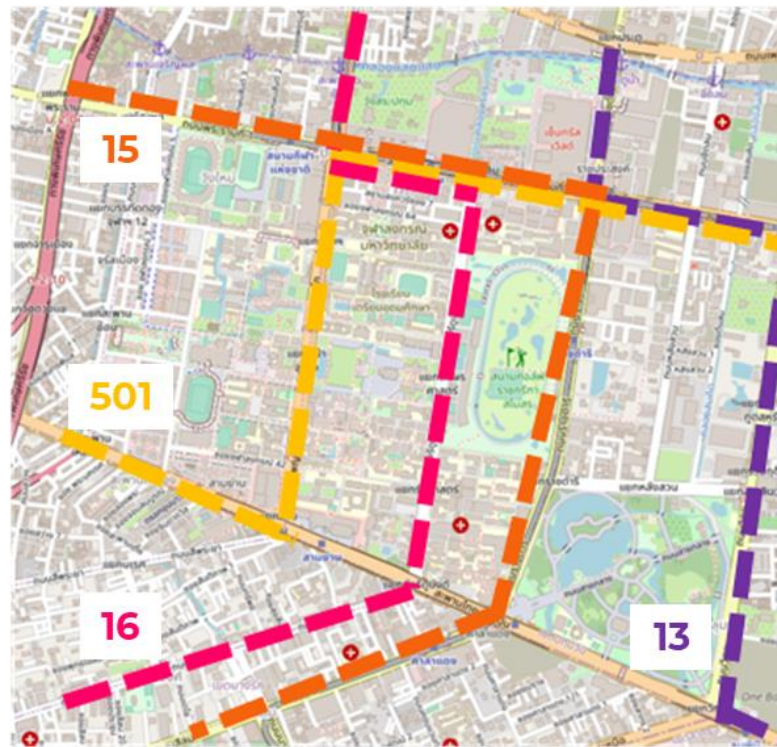
ภาพที่ 12 แสดงเส้นทางของรถโดยสารประจำทางบนชุดข้อมูลจริง

โดยรายละเอียดข้อมูลของแต่ละเส้นทางได้แก่ 1) หมายเลขสาย 2) ชื่อสถานีต้นทาง 3) ชื่อสถานีปลายทาง 4) ประเภทการวิ่ง 5) ประเภทรถ 6) เวลาที่ให้บริการ 7) ช่วงเวลาเดินรถ 8) รายชื่อสถานีที่ผ่านเที่ยวไป และ 9) รายชื่อสถานีผ่านเที่ยวกลับ ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 13

สาย 1	
เขตการเดินรถ:	4
ต้นทาง:	ถนนคอก
ปลายทาง:	ท่าช้าง
ประเภทการวิ่ง:	เส้นทางปกติ
ประเภทรถ:	รถธรรมดา(ครีม - แดง)
เวลาที่ให้บริการ:	ระบุช่วงเวลา
ช่วงเวลาเดินรถ:	03:00 - 21:40
เที่ยวไป:	66 ท่ารถถนนคอก ตรงข้ามโรงพยาบาลเจริญกรุงประชารักษ์ ซอยเจริญกรุง 86 ตรงข้ามตลาดบางคอกแหลม วัดกลางบึงชาวนา วัดพระยาไกร เอเชียทีค เดอะเว็ทซ์พาร์ค วัดราชสิงขร แม่น้ำเรสซิเดนซ์ วัดสุวรรณवास ไปรษณีย์วัดพระยาไกร องค์การสะพานปลา โรงเรียนวัดสุทธิวราราม โรงเรียนสตรีศรีสุโขทัย วัดยานนาวา โรบินสันบางรัก โรงเรียนอัสสัมชัญบางรัก สำนักงานปราชญ์ไญ้กลาง ตลาดน้อย แยกทรงวาด โรงพยาบาลเว็ทซ์พาร์ค อี แยกเฉลิมบุรี ตลาดเก่าเยาวราช วัดศักดิ์ รัชฎา เจมส์ทงก หน่วยงานวิชาการรักษาดินแดน สวนนาคาภิรมย์ ท่าราชวรดิษฐ์ ท่าช้าง
เที่ยวกลับ:	66 ท่าช้าง สานทอง (ตรงข้ามวัดพระนาค) วิเศษราษฎร์ ตรงข้ามจวนกลาง ตรงข้ามเฉลิมกรุง สี่แยกราชประสงค์ คลองถม (สี่แยกเจริญกรุง) และไขนันทารักษ์ วะเข็ญไฉน ข้างหลาว แยกหัวลำโพง วัดมหาธาตุวราราม ซอยวัดมหาธาตุวราราม วัดแก้วแจ่มฟ้า ซอยคลองพระ สถานีตำรวจนครบาลบางรัก ทองมรดก นิลเชน เสน่ มณเฑียรณ์ ตรงข้ามโรงแรมโรเบิร์ตสัน ตรงข้ามโรบินสันบางรัก ตรงข้าม วัดยานนาวา ซอยเจริญกรุง 57 วัดสุทธิวราราม ตรงข้ามองค์การสะพานปลา ควบกันหน้า ซอยเจริญกรุง 81 (บ้านใหม่) ตรงข้ามโรงแรมแม่น้ำรามมาศพลาซ่า พนาสิริ ตรงข้ามวัดราชสิงขร ตรงข้ามเอเชียทีค สถานีตำรวจนครบาลวัดพระยาไกร ตรงข้ามวัดกลางบึงชาวนา ตลาดบางคอกแหลม ตรงข้ามซอยเจริญกรุง 86 โรงพยาบาลเจริญกรุงประชารักษ์ ท่ารถถนนคอก

ภาพที่ 13 แสดงรายละเอียดของรถโดยสารประจำทางแต่ละเส้นทาง

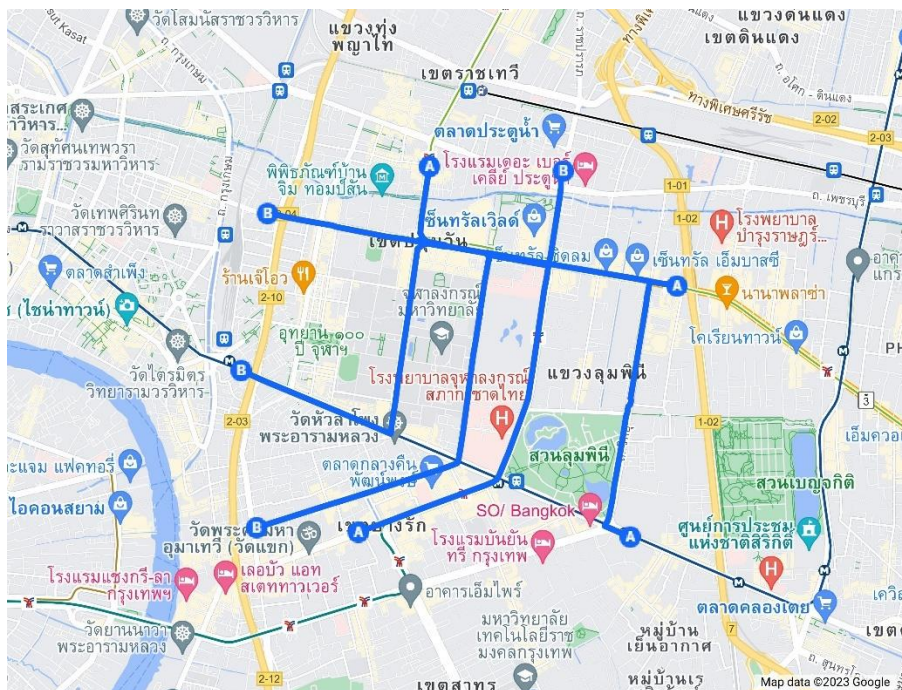
เนื่องจากจำนวนเส้นทางของรถโดยสารประจำทางจากชุดข้อมูลจริงมีอยู่จำนวนมากและอีกทั้งข้อมูลสถานีที่ผ่านที่ได้จากเว็บไซต์ขององค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพอยู่ในรูปแบบของตัวอักษรโดยผู้วิจัยได้เลือกเส้นทางของรถโดยสารประจำทางที่เคลื่อนที่ในแผนที่บนชุดข้อมูลจริงที่เลือกมาจำนวน 4 เส้นทาง ได้แก่ สาย 13, 15, 16 และ 501 ที่มีช่วงเวลาเดินรถสอดคล้องกับช่วงเวลาของข้อมูลจากฐานข้อมูล iTIC ดังแสดงในภาพที่ 14 เพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการทำการจำลองสภาพการจราจรต่อไป



ภาพที่ 14 แสดงเส้นทางของรถโดยสารประจำทางที่ถูกเลือกให้ติดตั้งโหนดที่ขอบ

4.1.3.3 การจำลองสภาพการจราจร (Traffic simulation)

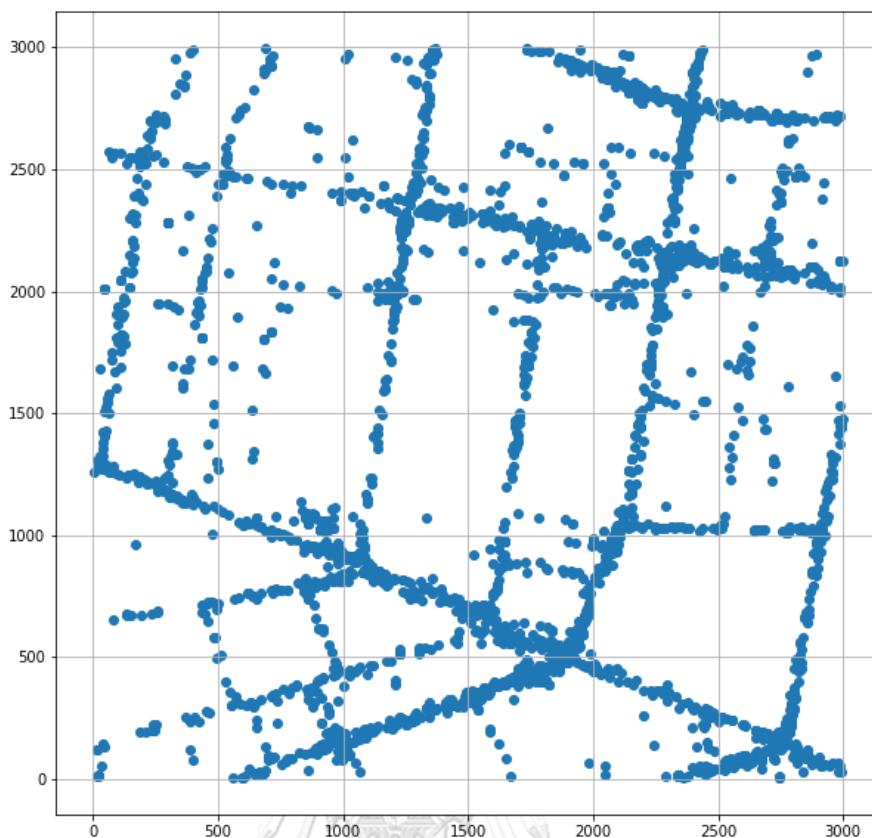
จากเส้นทางของรถโดยสารประจำทางที่เคลื่อนที่ในแผนที่บนชุดข้อมูลจริงที่เลือกมาจำนวน 4 เส้นทาง ได้แก่ สาย 13, 15, 16 และ 501 ผู้วิจัยได้ทำการแปลงเส้นทางที่รถโดยสารนั้นเคลื่อนที่ให้อยู่ในรูปแบบพิกัดละติจูดและลองจิจูด โดยใช้เครื่องมือ Google My Map ที่สามารถวาดเส้นทางที่กำหนดได้บนแผนที่ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แสดงการวาดเส้นทางที่กำหนดได้บนแผนที่ด้วย Google My Map

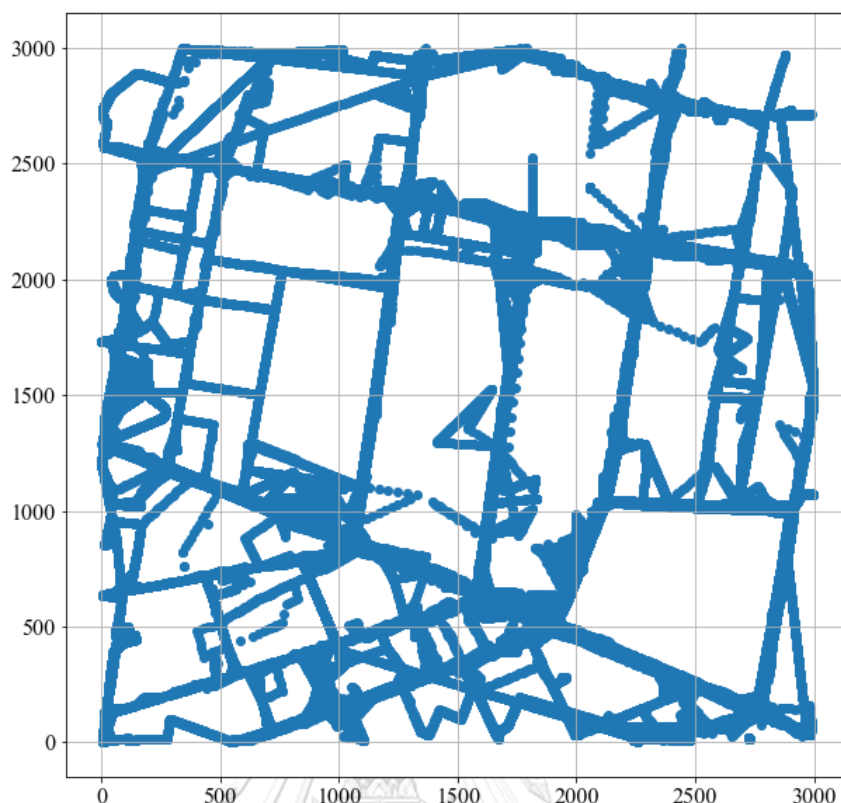
จากนั้นทำการส่งออกข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ Keyhole Markup Language (KML) เพื่อสกัดเอาเฉพาะค่าละติจูดและลองจิจูด ซึ่งสุดท้ายแล้วจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบรายการของค่าละติจูดและลองจิจูดของรถโดยสารแต่ละสาย แล้วทำการจำลองสภาพการจราจร โดยให้รถโดยสารวิ่งเป็นรอบ ๆ ตามจุดที่เป็นจริงของสายรถนั้นวนไปเรื่อย ๆ ด้วยความเร็วเฉลี่ยที่ 22.3 กิโลเมตร/ชั่วโมงอ้างอิงจากชุดข้อมูลสรุปอัตราความเร็วเฉลี่ยของรถยนต์ส่วนบุคคลในเขตกรุงเทพมหานคร (ช่วงเร่งด่วนเช้า 06.00 - 09.00 น.) สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร [16] โดยไม่ได้มีการหยุดที่ป้ายให้หยุดตามจุดต่าง ๆ และไม่มีปฏิสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมจริง เช่น ไม่ได้จอดสี่แยกเมื่อมีสัญญาณให้จอด เป็นต้น

ส่วนการเคลื่อนที่ของรถยนต์ทั่วไปจะเป็นการอนุมานจากข้อมูลตำแหน่งของรถแท็กซี่จากฐานข้อมูล iTIC โดยได้ทำการเลือกข้อมูลจากชุดข้อมูลวันจันทร์ที่ 13 ธันวาคม พ.ศ. 2564 เวลา 08:00 – 10:00 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการจราจรอย่างหนาแน่นในช่วงเช้า โดยกรองข้อมูลให้อยู่ในช่วงพื้นที่ที่กำหนดในขั้นตอนการสร้างแผนที่และแปลงข้อมูลจากระบบพิกัดละติจูด/ลองจิจูดให้เป็นพิกัดของจุดกำเนิด (0, 0) เพื่อให้สามารถนำไปประมวลผลต่อได้ง่าย ซึ่งได้ข้อมูลรถที่มีเลขประจำตัวต่างกันจำนวน 251 คัน ประกอบจุดของข้อมูลจำนวน 2364 จุดข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แสดงการสร้างแผนที่และแปลงข้อมูลจากระบบพิกัดละติจูด/ลองจิจูดให้เป็นพิกัดของจุด
กำเนิด $(0, 0)$

เนื่องจากจำนวนจุดของข้อมูลที่ได้มีจำนวนน้อยมาก อีกทั้งจุดของข้อมูลที่ได้ยังไม่มี ความต่อเนื่องทำให้ยังไม่สามารถนำไปประมวลผลเพื่อหาค่าตามตัววัดที่ระบุไว้ได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการทำ ความสะอาดข้อมูลและเพิ่มเติมจุดของข้อมูลที่ขาดหายไปโดยอาศัยหลักการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด ระหว่างจุดของข้อมูลที่หายไปด้วย Python Library ที่ชื่อว่า OSMnx เวอร์ชัน 1.5.1 และฟังก์ชัน DataFrame.interpolate ของ Pandas Python Library จึงได้จุดของข้อมูลที่เพียงพอต่อการคำนวณหา ค่าตามตัววัดได้และทำการวัดผลต่อไป ภาพที่ 17 แสดงตัวอย่างจุดของข้อมูลหลังจากการทำความสะอาดข้อมูลและเพิ่มเติมจุดของข้อมูลที่ขาดหายไป



ภาพที่ 17 แสดงตัวอย่างจุดของข้อมูลหลังจากการทำความสะอาดข้อมูลและเพิ่มเติมจุดของข้อมูลที่ขาดหายไป

4.1.3.4 เกณฑ์เปรียบเทียบ (Benchmarking)

สำหรับเกณฑ์การเปรียบเทียบสำหรับการทดลองบนชุดข้อมูลจริงจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการเลือกให้เส้นทางของรถโดยสารประจำทางที่เคลื่อนที่ในแผนที่บนชุดข้อมูลจริงที่เลือกมาจำนวน 4 เส้นทางกับการเลือกสี่แยกจำนวน 4 แยกมาเป็นตัวแทนในการติดตั้งโหนดที่ขอบไว้กับ RSU

4.2 ผลการทดลอง

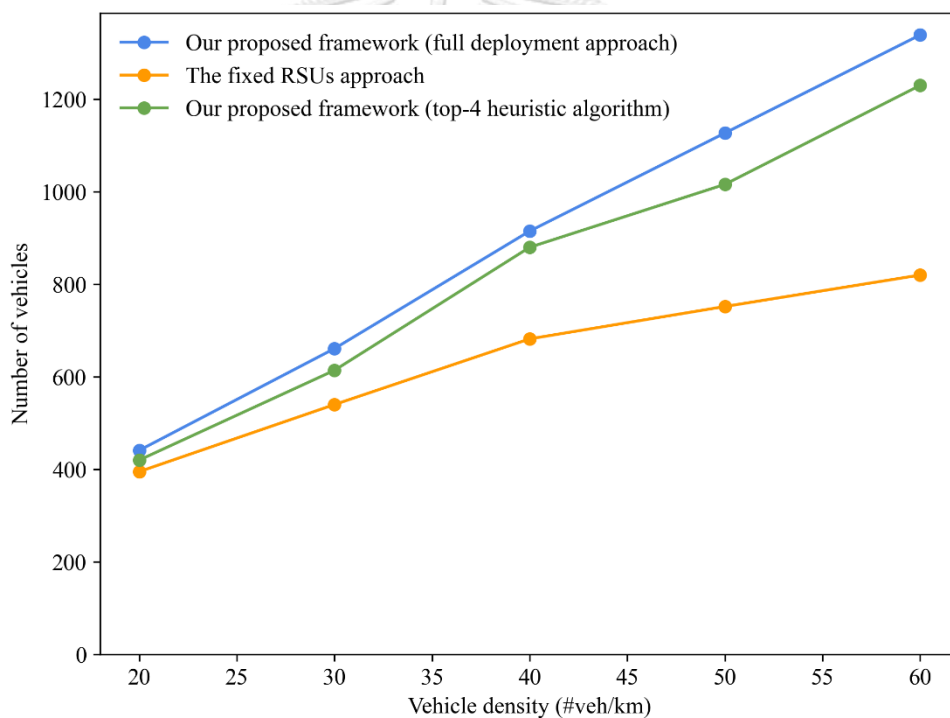
4.2.1 ผลการทดลองจำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ของสามารถให้บริการได้

4.2.1.1 บนสภาพแวดล้อมจำลอง

จากผลการทดลองโดยการทดลองที่ความหนาแน่นของยานพาหนะที่แตกต่างกันตั้งแต่ 20 ถึง 60 คัน/ตารางกิโลเมตรบนสภาพแวดล้อมจำลองพบว่ารูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบเต็ม (The full deployment approach) ที่นำเสนอให้จำนวนยานพาหนะที่โหนดที่

ของสามารถให้บริการได้สูงกว่ารูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU (The fixed RSUs approach) ในทุกความหนาแน่นของยานพาหนะ

นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่ารูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบมีการใช้งานฮีริสติกอัลกอริทึมที่โดยเลือก N เส้นทางที่มีความหนาแน่นของงานมากที่สุด (Top-N heuristic algorithm) โดยเลือกให้ N มีค่าเท่ากับ 4 นั้นสามารถให้จำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ของสามารถให้บริการได้สูงกว่ารูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU (The fixed RSUs approach) ในทุกความหนาแน่นของยานพาหนะเช่นเดียวกัน สูงกว่าประมาณ 6.08% โดยเฉลี่ยที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 คัน/ตารางกิโลเมตรและสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 52.20% โดยเฉลี่ยที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 18

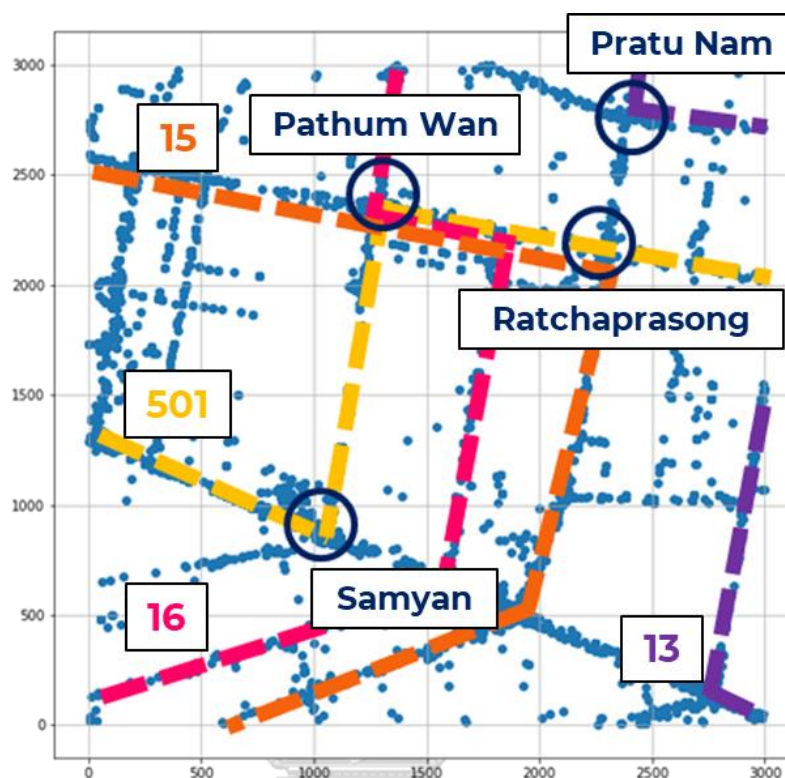


ภาพที่ 18 แสดงจำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ของสามารถให้บริการได้บนสภาพแวดล้อมจำลอง

4.2.1.2 บนชุดข้อมูลจริง

จากผลการทดลองบนชุดข้อมูลจริงดังแสดงในตัวอย่างแผนที่ตามภาพที่ 19 นั้น พบว่าจำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ขอบสามารถให้บริการของรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU อยู่ที่

151 คัน และจำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ของสามารถให้บริการของรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางอยู่ที่ 174 คัน ซึ่งมากกว่าอยู่ที่จำนวน 23 คัน ซึ่งคิดเป็นประมาณ 15.23%



ภาพที่ 19 แสดงเส้นทางรถโดยสารประจำทางและจุดที่เลือกในการติดตั้งโหนดที่ขอบ นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการแยกจำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ของสามารถให้บริการได้ที่ได้ตามรายการรายชื่อแยกและหมายเลขเส้นทางของรถโดยสารประจำทางดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 จำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ของสามารถให้บริการได้จำแนกตามรายชื่อแยก

รายชื่อแยก	จำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ของสามารถให้บริการได้บน RSU นั้น ๆ (คัน)
แยกสามย่าน	69
แยกปทุมวัน	69
แยกราชประสงค์	58
แยกประตูน้ำ	62

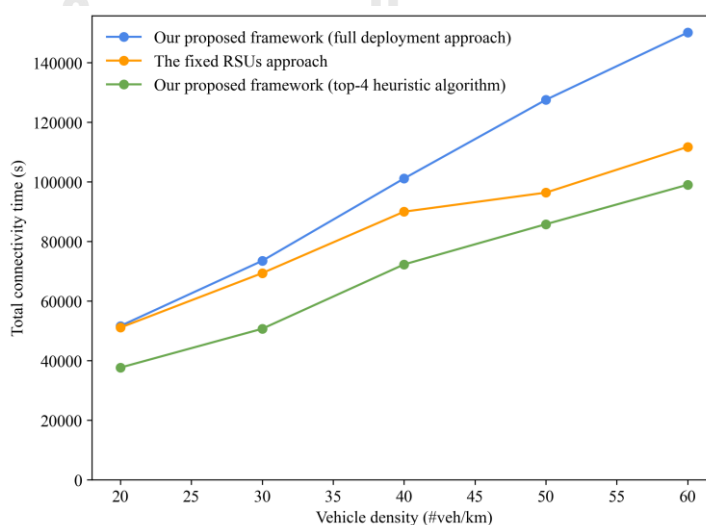
ตารางที่ 4 จำนวนยานพาหนะที่โหนดที่สามารถให้บริการได้จำแนกตามหมายเลขเส้นทางรถ
โดยสารประจำทาง

หมายเลขเส้นทางรถ โดยสารประจำทาง	จำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ ของสามารถให้บริการได้บนเส้นทางนั้น ๆ (คัน)
13	93
15	99
16	82
501	91

4.2.2 ผลการทดลองผลรวมของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้

4.2.2.1 บนสภาพแวดล้อมจำลอง

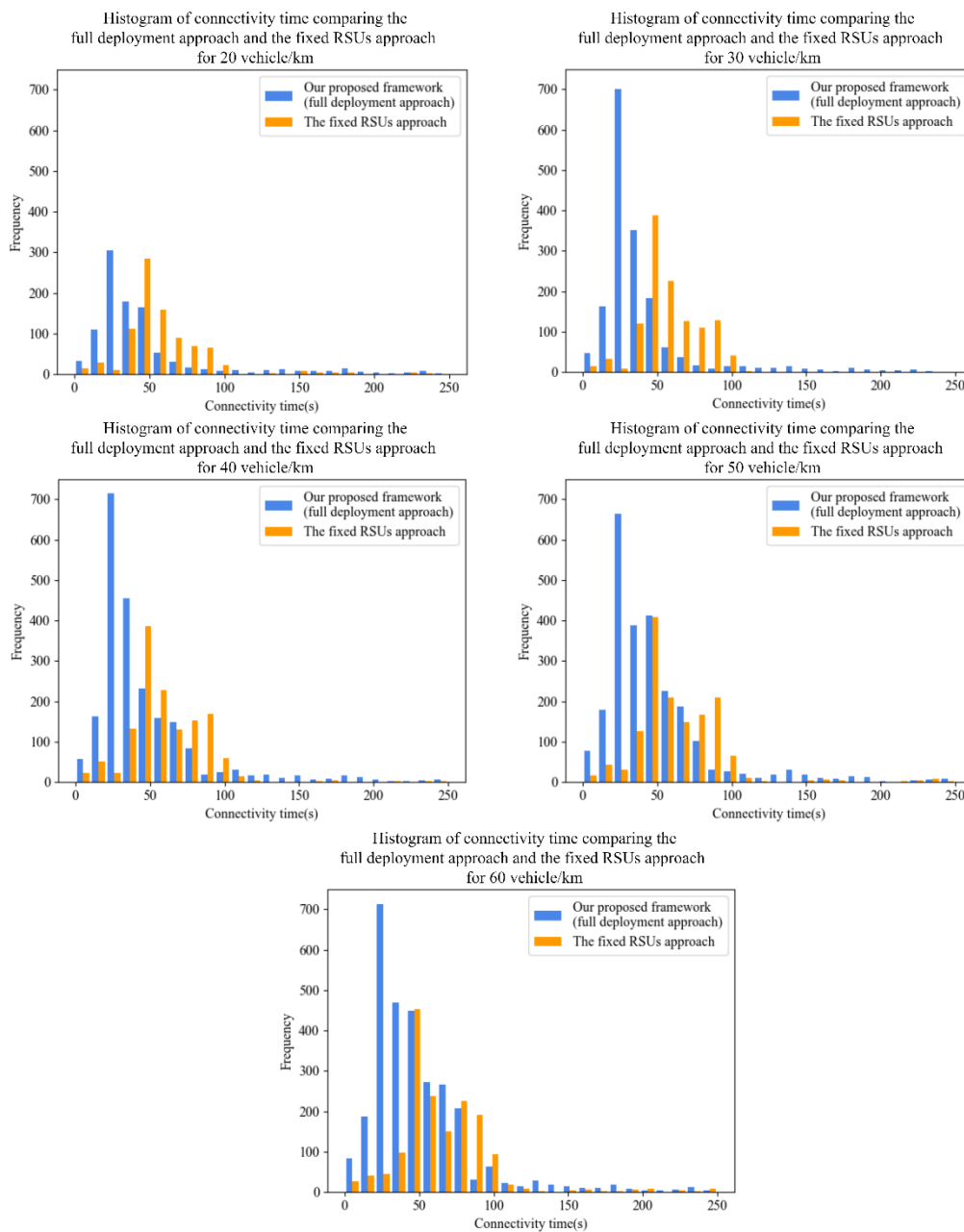
จากการทดลองหาผลรวมของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้บนสภาพแวดล้อมจำลองทั้ง 3 รูปแบบพบว่าผลรวมของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันของรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบเต็ม (The full deployment approach) สูงกว่าของรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU (The fixed RSUs approach) ในทุกความหนาแน่นของยานพาหนะ ส่วนรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบมีการใช้งานอัลกอริทึมที่โดยเลือก N เส้นทางที่มีความหนาแน่นของงานมากที่สุด (Top-N heuristic algorithm) ให้ผลรวมที่ต่ำกว่าของรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU (The fixed RSUs approach) อยู่ที่ประมาณ 11.00-26.28% ดังแสดงในภาพที่ 20



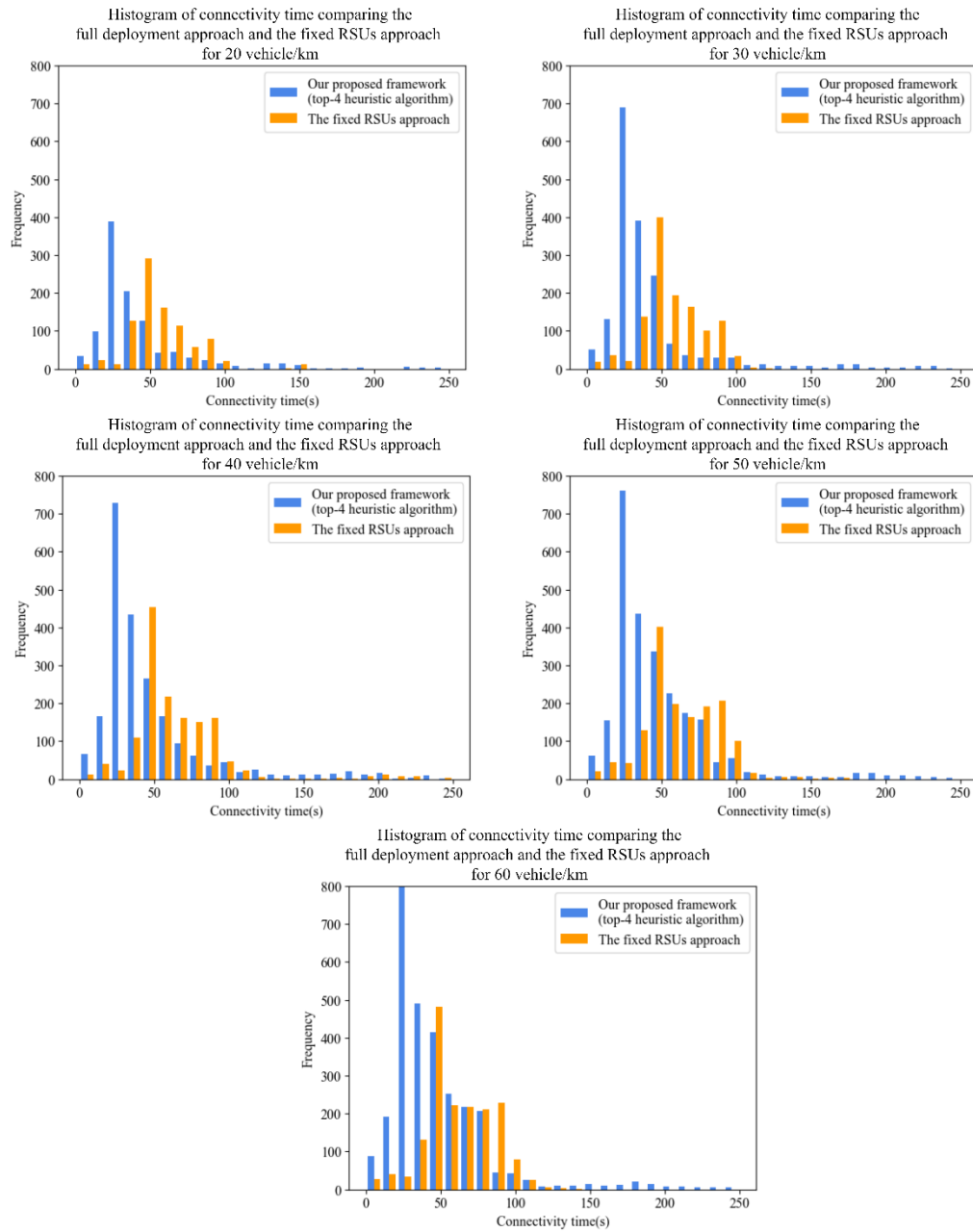
ภาพที่ 20 แสดงผลรวมของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้บนสภาพแวดล้อมจำลอง

โดยสามารถแจกแจงผลการทดลองตามความถี่ในแต่ละความหนาแน่นของยานพาหนะของแต่ละครั้งของการทดลองได้เป็นฮิสโทแกรม ซึ่งโดยภาพรวมแล้วรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU, รูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบเต็มและรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบมีการใช้งานฮิวริสติกอัลกอริทึมให้ค่าเฉลี่ยประมาณ 65, 49, 46 วินาทีตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 21-30

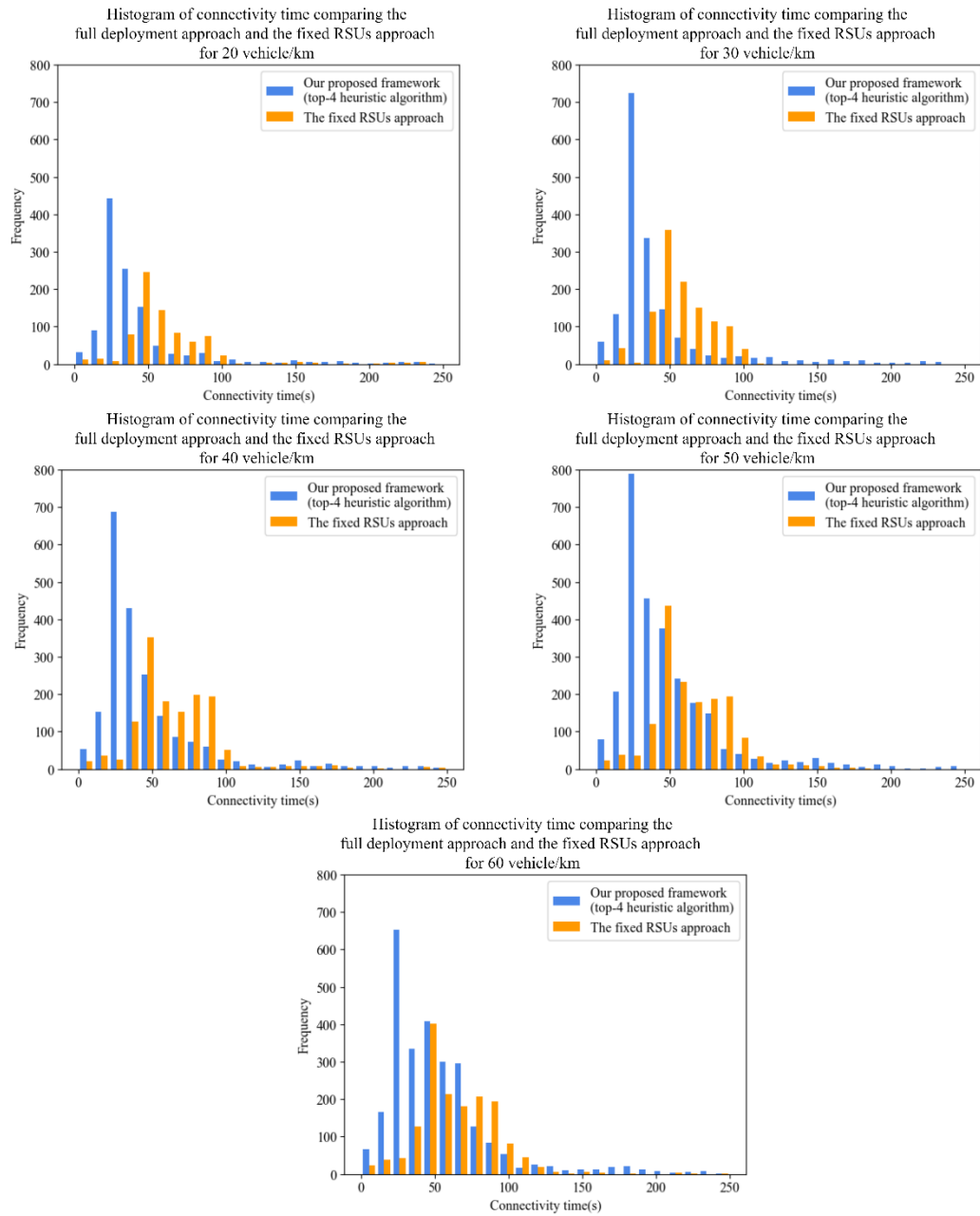




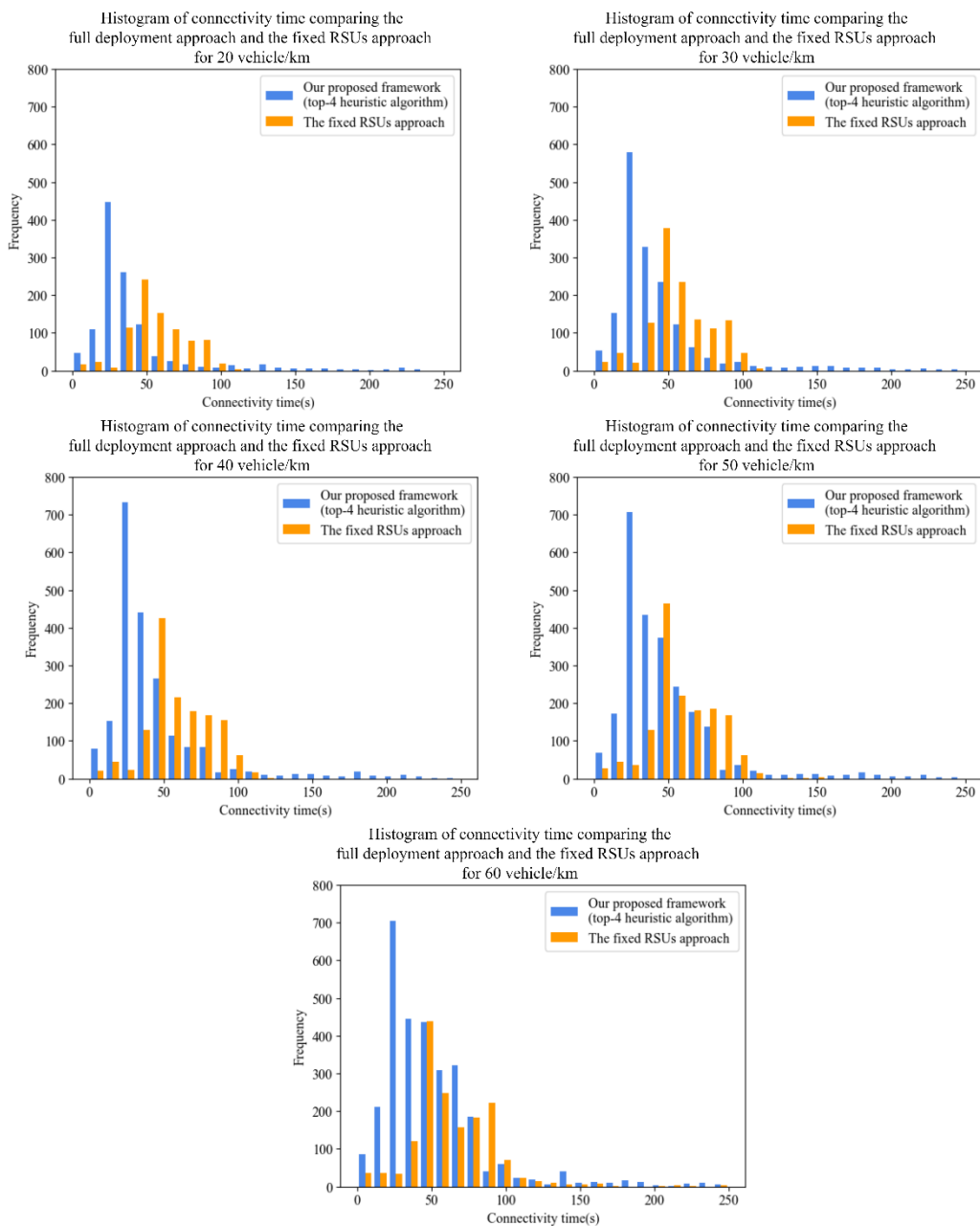
ภาพที่ 21 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง *The full deployment approach* และ *The fixed RSUs approach* ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 1



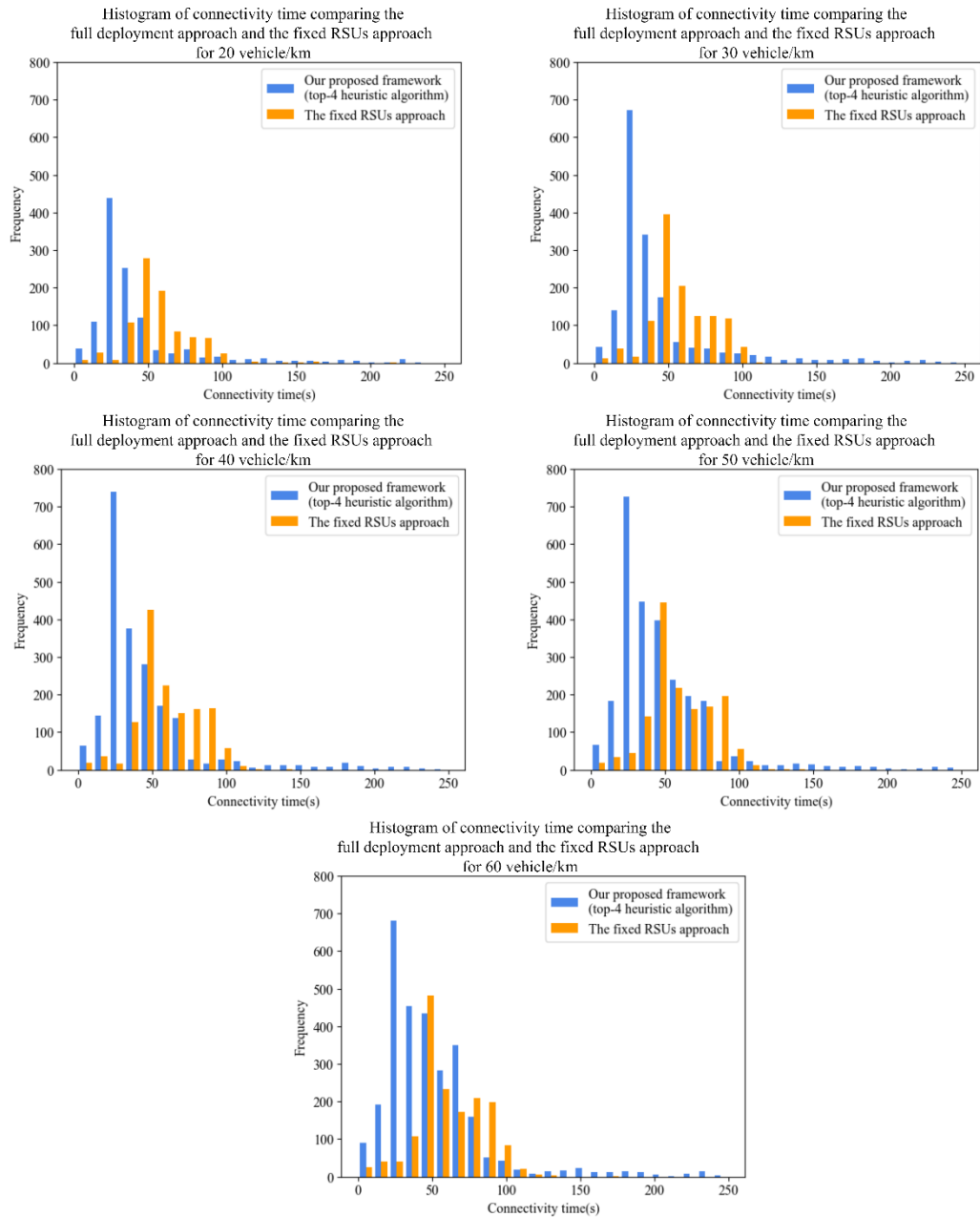
ภาพที่ 22 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง *The full deployment approach* และ *The fixed RSUs approach* ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 2



ภาพที่ 23 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง *The full deployment approach* และ *The fixed RSUs approach* ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 3

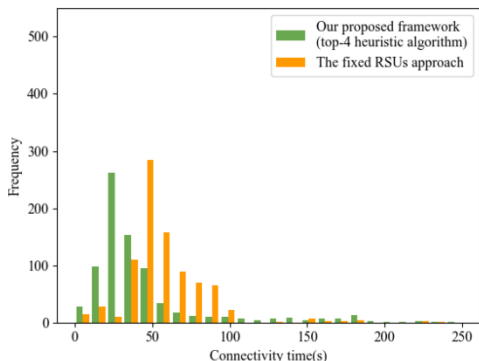


ภาพที่ 24 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง *The full deployment approach* และ *The fixed RSUs approach* ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 4

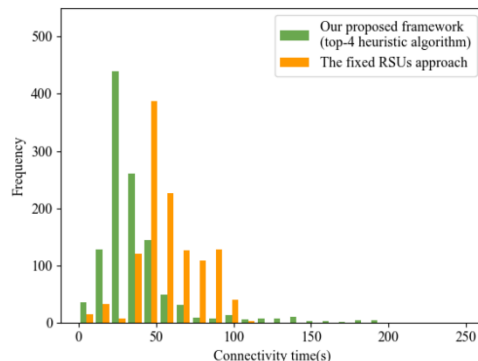


ภาพที่ 25 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง *The full deployment approach* และ *The fixed RSUs approach* ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 5

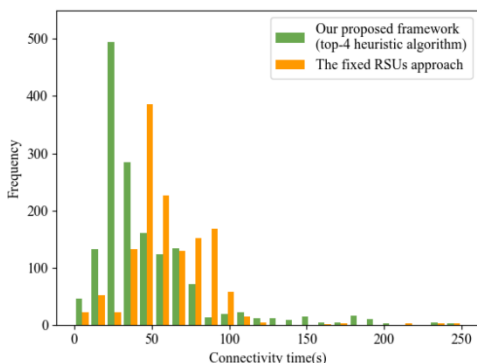
Histogram of connectivity time comparing the top-4 heuristic algorithm and the fixed RSUs approach for 20 vehicle/km



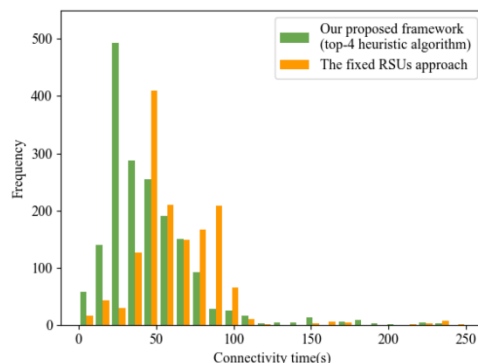
Histogram of connectivity time comparing the top-4 heuristic algorithm and the fixed RSUs approach for 30 vehicle/km



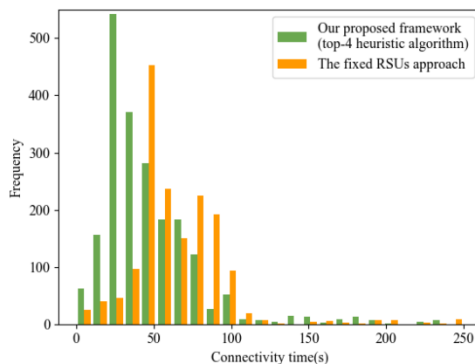
Histogram of connectivity time comparing the top-4 heuristic algorithm and the fixed RSUs approach for 40 vehicle/km



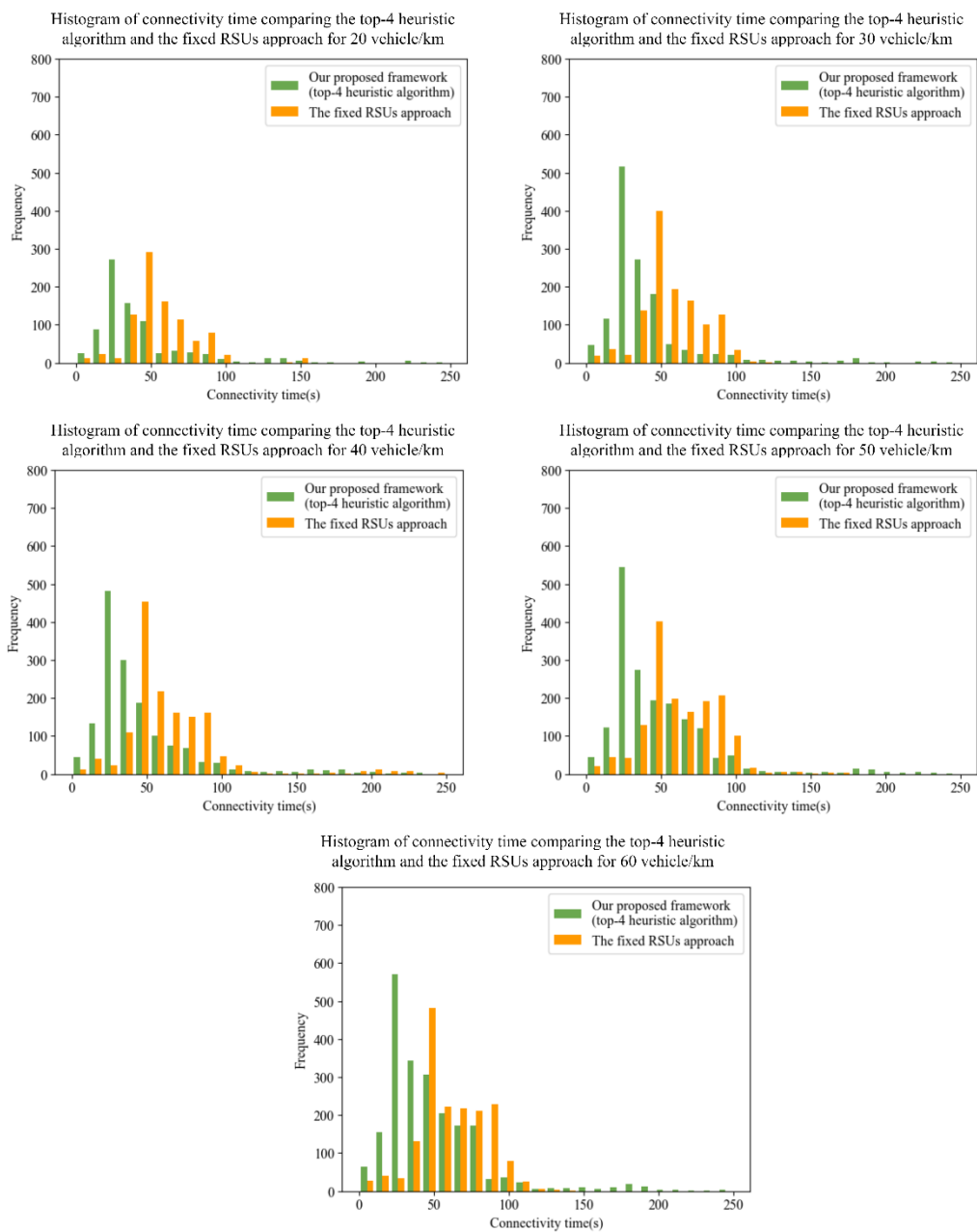
Histogram of connectivity time comparing the top-4 heuristic algorithm and the fixed RSUs approach for 50 vehicle/km



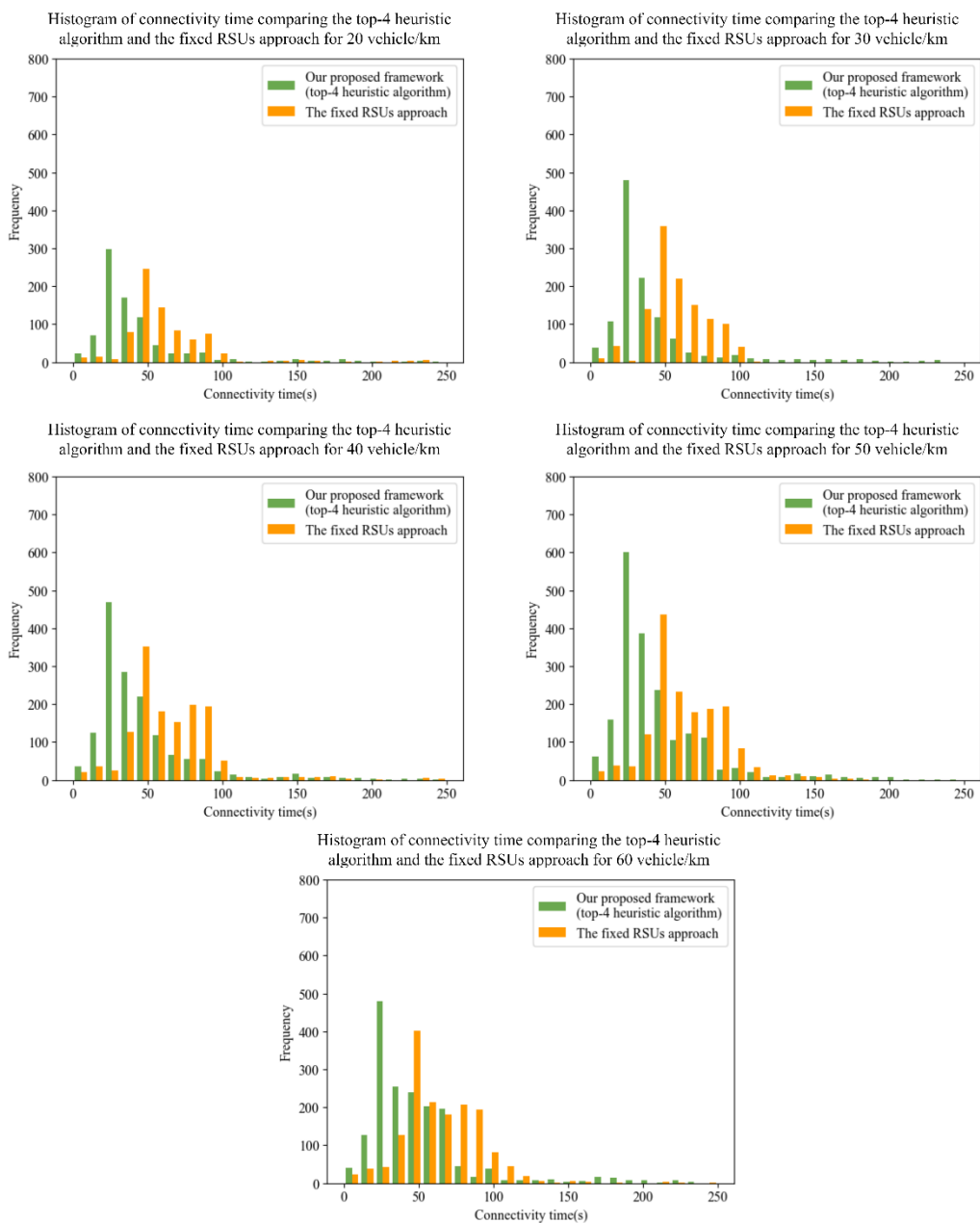
Histogram of connectivity time comparing the top-4 heuristic algorithm and the fixed RSUs approach for 60 vehicle/km



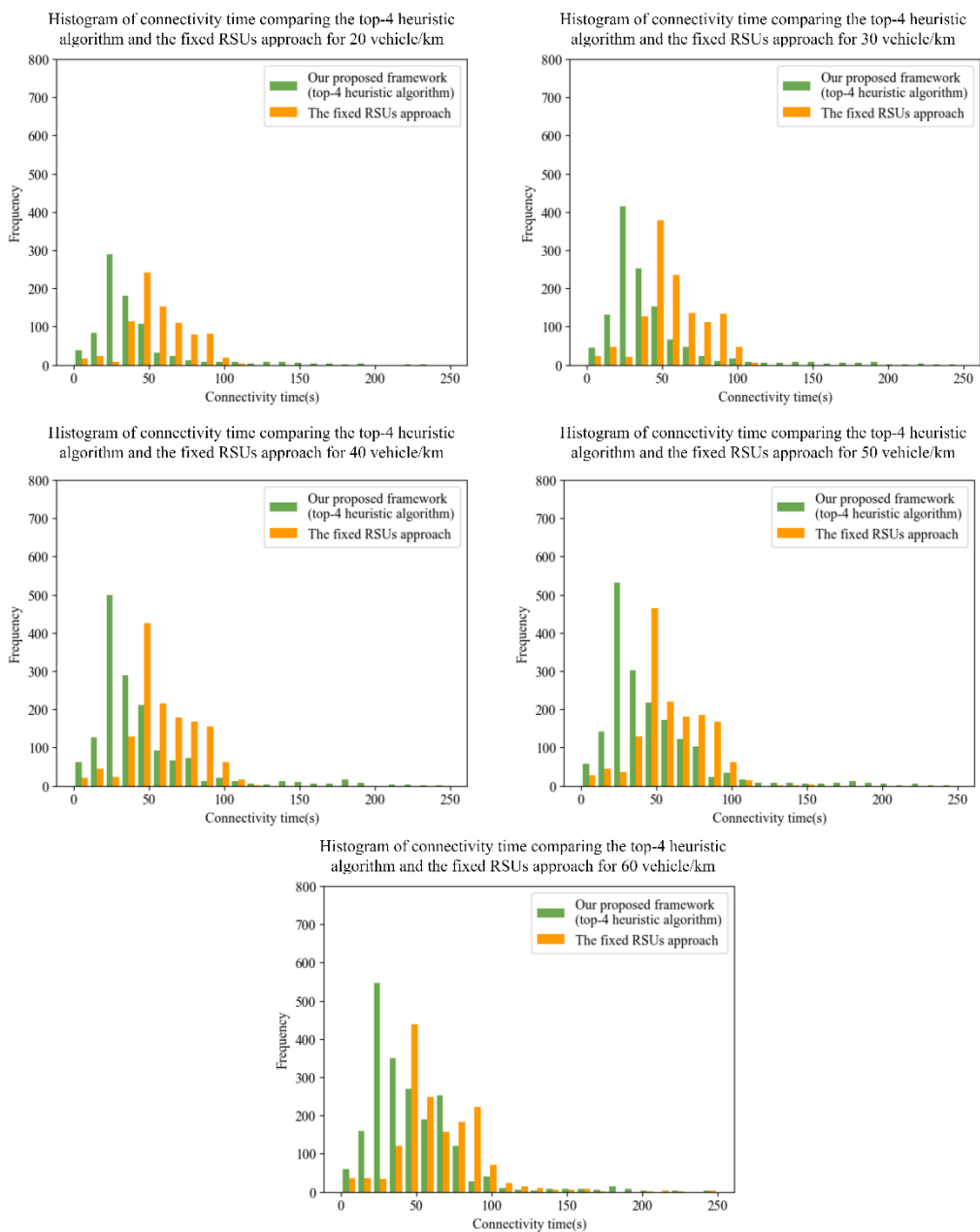
ภาพที่ 26 ฮิสโตแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง Top-4 heuristic algorithm และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 1



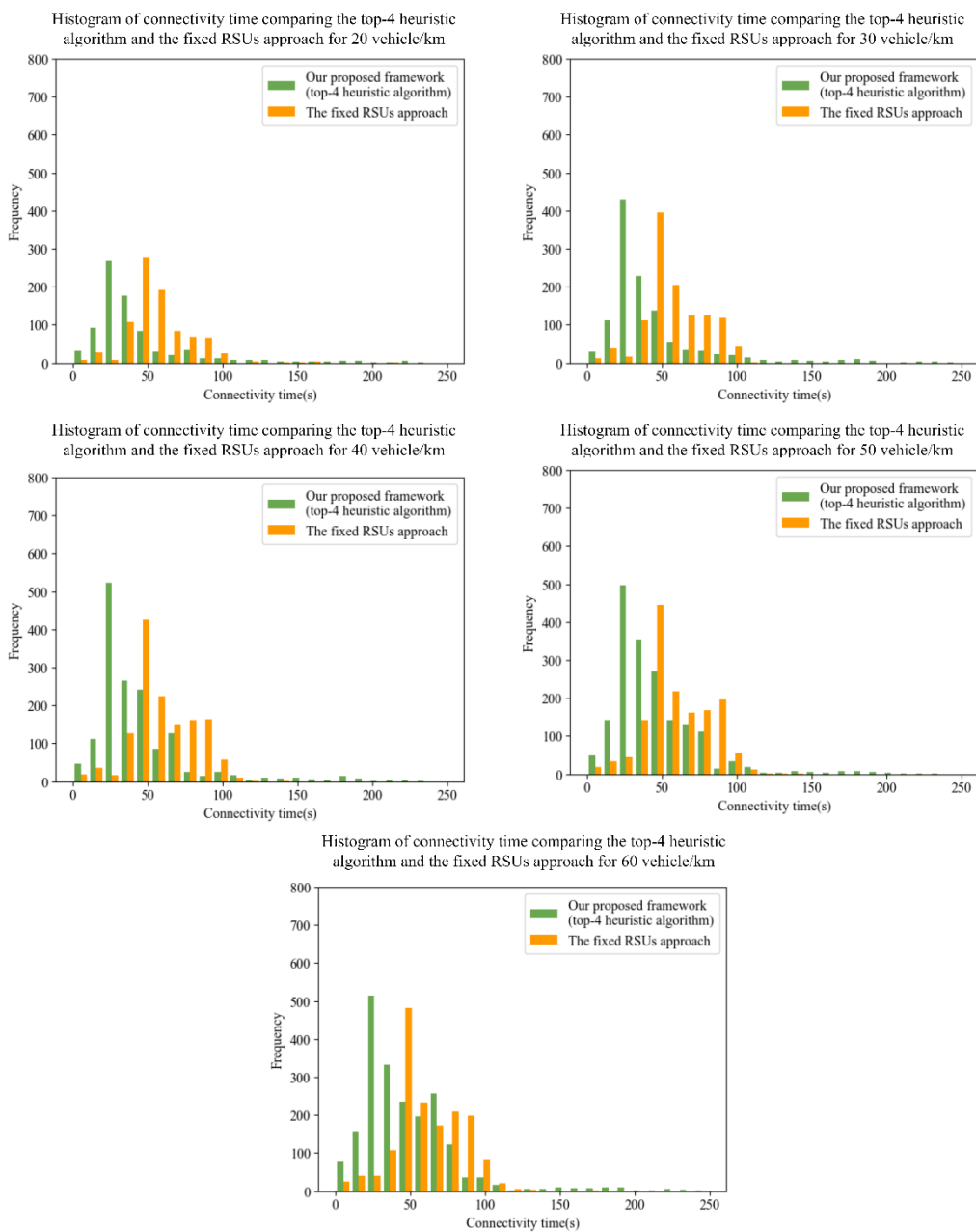
ภาพที่ 27 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง Top-4 heuristic algorithm และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 2



ภาพที่ 28 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง Top-4 heuristic algorithm และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 3



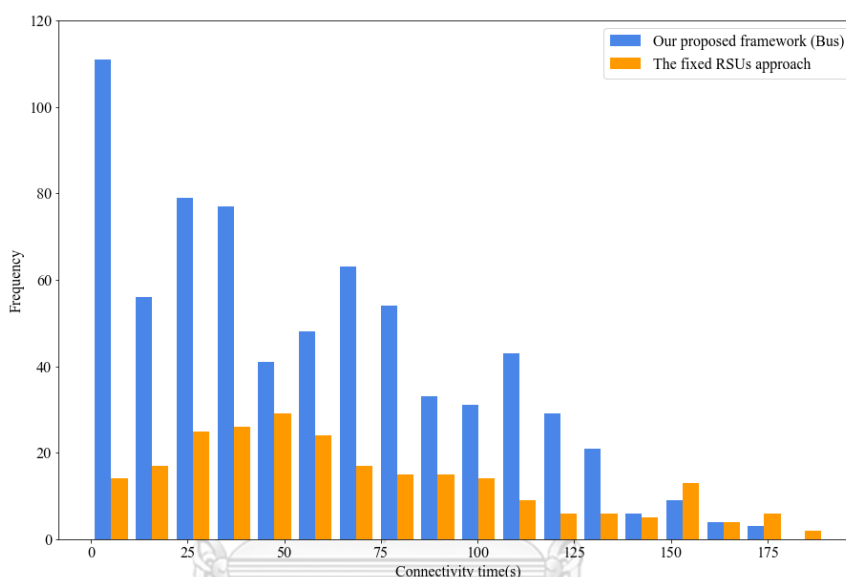
ภาพที่ 29 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง Top-4 heuristic algorithm และ The fixed RSUs approach ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 4



ภาพที่ 30 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่าง *Top-4 heuristic algorithm* และ *The fixed RSUs approach* ที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 - 60 คัน/ตารางกิโลเมตร ของการทดลองครั้งที่ 5

4.2.2.2 บนชุดข้อมูลจริง

จากการทดลองหาผลรวมของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้ในบนชุดข้อมูลจริงพบว่าค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้ของรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางสูงกว่าของรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU โดยอยู่ที่ 39987 และ 17098 วินาทีตามลำดับ โดยคิดเป็นประมาณ 54.24% โดยสามารถแจกแจงผลการทดลองในรูปแบบความถี่ที่เกิดขึ้นได้ในรูปแบบฮิสโทแกรมดังแสดงในภาพที่ 30 และมีค่าสถิติตามตารางที่ 5



ภาพที่ 31 ฮิสโทแกรมเปรียบเทียบค่าของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้และความถี่ระหว่างรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางและรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU บนชุดข้อมูลจริง

ตารางที่ 5 ค่าสถิติของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้

ค่าสถิติของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้	รูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทาง	รูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU
ค่าต่ำสุด (วินาที)	1.00	3.00
ค่าสูงสุด (วินาที)	173.00	182.00
ค่าเฉลี่ย (วินาที)	56.48	69.22
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (วินาที)	41.61	45.46
จำนวนข้อมูล	708	247

บทที่ 5

บทสรุปของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอที่ได้นำเสนอโครงร่างระบบที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีชื่อว่า Buses as an Infrastructure framework ซึ่งได้มีการใช้งานให้รถโดยสารประจำทางเป็นโหนดที่ขอบในเครือข่ายยานพาหนะที่ให้บริการทรัพยากรในการคำนวณและบริการต่าง ๆ แก่ผู้ใช้งาน โดยงานวิจัยนี้ได้มีการใช้ข้อได้เปรียบของระบบขนส่งสาธารณะที่มีอยู่แล้วเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโหนดที่ขอบแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้เสนอฮิวริสติกอัลกอริทึมสำหรับการคำนวณหาการติดตั้งโหนดที่ขอบบนรถโดยสารประจำทางโดยให้ลำดับความสำคัญแก่จำนวนงานที่เกิดขึ้น โดยใช้เทคนิคในการเลือก N ลำดับที่สูงที่สุดของความหนาแน่นของงาน (Top-N heuristic algorithm) โดยได้ทำการทดลองบนสภาพแวดล้อมจำลองและบนชุดข้อมูลจริง ผลการทดลองบนสภาพแวดล้อมจำลองแสดงให้เห็นว่ารูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบมีการใช้งานฮิวริสติกอัลกอริทึมที่โดยเลือก N เส้นทางที่มีความความหนาแน่นของงานมากที่สุดให้จำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ขอบสามารถให้บริการได้สูงกว่ารูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU (The fixed RSUs approach) ตั้งแต่ 6.08% โดยเฉลี่ยที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 20 คัน/ตารางกิโลเมตรและสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 52.20% โดยเฉลี่ยที่ความหนาแน่นของยานพาหนะ 60 คัน/ตารางกิโลเมตรในกรณีที่การบริการต้องการค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้อยู่ที่ประมาณ 46 วินาที ส่วนผลการทดลองบนชุดข้อมูลจริงระหว่างรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางและรูปแบบที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่กับที่บน RSU แสดงให้เห็นว่าจำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ขอบสามารถให้บริการได้ของอยู่ที่ 174 คัน และ 151 คันตามลำดับ สูงกว่าอยู่จำนวน 23 คัน คิดเป็นประมาณ 15.23% และให้ผลรวมของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้อยู่ที่ 39987 และ 17098 วินาทีตามลำดับ สูงกว่าคิดเป็นประมาณ 54.24%

5.2 การอภิปราย

5.2.1 การพิจารณาผลการทดลองจำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ขอบสามารถให้บริการได้บน

สภาพแวดล้อมจำลอง

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้รถโดยสารประจำทางวิ่งเป็นวงรอบ ทำให้โอกาสที่รถโดยสารประจำทางที่มีโหนดที่ขอบติดตั้งอยู่อยู่ในระยะการติดต่อสื่อสารของยานพาหนะโดยรอบ

เพิ่มมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม ในกรณีของรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บน RSU การที่โหนดที่ขอบติดตั้งอยู่ตรงกลางแต่ละสี่แยกนั้นทำให้โอกาสที่ยานพาหนะในการทดลองเข้าถึงโหนดที่ขอบได้น้อยกว่า เช่น รถบางคันอาจจะไม่วิ่งผ่านสี่แยกเลยก็ได้ เป็นต้น ทั้งนี้ยังแสดงให้เห็นว่ารูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางแบบมีการใช้งานฮิวริสติกอัลกอริทึมที่โดยเลือก N เส้นทางที่มีความความหนาแน่นของงานมากที่สุดสามารถให้ผลลัพธ์ได้ใกล้เคียงกับรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางที่ไม่มีการใช้งานฮิวริสติกอัลกอริทึมและใช้จำนวนโหนดที่น้อยกว่าซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโหนดได้มากกว่า

5.2.2 การพิจารณาผลการทดลองผลรวมระยะเวลาที่ติดต่อดีสื่อสารกันได้บนสภาพแวดล้อมจำลอง
 เนื่องด้วยลักษณะการเคลื่อนของยานพาหนะส่วนใหญ่นั้นมักจะมีแนวโน้มที่จะเกาะกลุ่มกันที่บริเวณสี่แยกเป็นช่วงระยะเวลาพอสมควร ดังนั้นจึงทำให้ยานพาหนะที่สามารถเข้าถึงโหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บน RSU บริเวณสี่แยกนั้นสามารถที่จะเชื่อมกับโหนดที่ขอบได้นานกว่า ทำให้เกิดความถี่ในช่วงที่ระยะเวลาที่ติดต่อดีสื่อสารกันได้มาก ส่งผลให้ผลรวมของระยะเวลาที่ติดต่อดีสื่อสารกันในรูปแบบโหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บน RSU สูงกว่ารูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางที่มีการใช้งานฮิวริสติกอัลกอริทึม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางทั้งแบบที่มีและไม่มีการใช้งานฮิวริสติกอัลกอริทึมแล้วพบว่าผลรวมของระยะเวลาที่ติดต่อดีสื่อสารกันได้ไม่ได้ต่างกันมาก แต่แบบที่มีการใช้งานฮิวริสติกอัลกอริทึมใช้จำนวนโหนดที่น้อยกว่าซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งโหนดได้มากกว่า

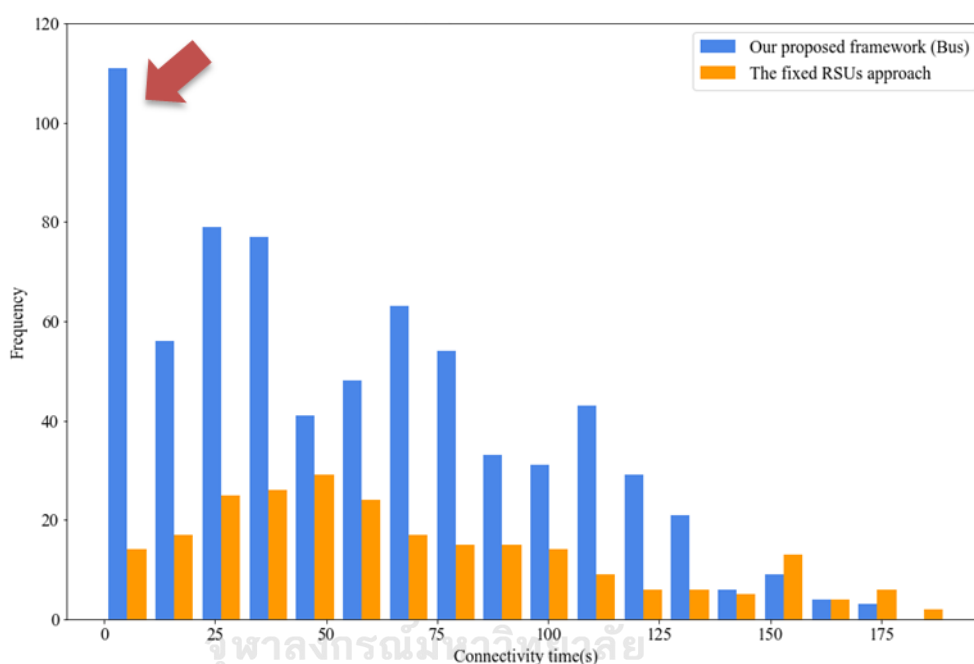
5.2.3 การพิจารณาผลการทดลองจำนวนยานพาหนะที่โหนดที่ขอบสามารถให้บริการได้บนชุดข้อมูลจริง

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้รถโดยสารประจำทางวิ่งในลักษณะที่ไม่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งรอบข้างกล่าวคือไม่ได้จอดสี่แยกเมื่อมีสัญญาณให้จอดแต่วิ่งไปเรื่อย ๆ ตามเส้นทางเดินรถด้วยความเร็วที่กำหนดไว้ ทำให้โอกาสที่รถโดยสารประจำทางที่มีโหนดที่ขอบติดตั้งอยู่จะอยู่ในระยะการติดต่อดีสื่อสารของยานพาหนะโดยรอบมากขึ้นกว่าที่ควรจะเป็น

5.2.4 การพิจารณาผลการทดลองผลรวมระยะเวลาที่ติดต่อดีสื่อสารกันได้บนชุดข้อมูลจริง

ลักษณะการเคลื่อนของยานพาหนะส่วนใหญ่นั้นได้เคียงกับลักษณะที่เกิดขึ้นบนสภาพแวดล้อมจำลองคือค่อนข้างเกาะกลุ่มกันที่บริเวณสี่แยกดังนั้นจึงทำให้ยานพาหนะที่สามารถเข้าถึงโหนดที่

ขอบที่ติดตั้งอยู่บน RSU บริเวณสี่แยกนั้นสามารถที่จะเชื่อมกับโหนดที่ขอบได้นานกว่า ทำให้เกิดความถี่ในช่วงที่ระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้สูง ต่างจากของรูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทางที่ความถี่นั้นกระจายตัวอยู่ในช่วงระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันได้ไม่สูงมาก ส่งผลให้ของค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันในรูปแบบ โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บน RSU สูงกว่ารูปแบบที่โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บนรถประจำทาง อีกทั้งผลจากการที่ข้อมูลไม่ต่อเนื่องทำให้ยานพาหนะจำนวนมากมีในช่วงระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารกันที่ 1 วินาทีแสดงลักษณะการเชื่อมต่อแบบติด ๆ ดับ ๆ ดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 32 แสดงความถี่ของข้อมูลที่กระจุกตัวในช่วงระยะเวลาที่ติดต่อสื่อสารได้ต่ำ

5.1 ข้อเสนอแนะและข้อจำกัด

การออกแบบสถานการณ์สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้นั้นยังเป็นสถานการณ์แบบจำลองที่พิจารณาถึงแนวคิดโดยทั่วไปที่น่าจะเกิดขึ้นในความเป็นจริงซึ่งยังแตกต่างจากสถานการณ์ในความเป็นจริงอยู่หลายประการ เช่น แนวคิดในการวางโหนดที่ขอบบน RSU ที่จุดที่เป็นสี่แยกนั้นอยู่บนแนวคิดที่ว่าจุดที่เป็นสี่แยกนั้นน่าจะมีผู้ใช้งานอยู่อย่างหนาแน่น โดยปกติซึ่งในความเป็นจริงนั้นอาจจะต้องพิจารณาถึงหลาย ๆ ปัจจัย เช่น จำนวนของงานที่เกิดขึ้นจริง ๆ, ความคุ้มค่าต่อค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่จุดนั้น ๆ เป็นต้น ส่วนแนวคิดในการวางเส้นทางของรถโดยสารประจำทางในงานวิจัยนี้เป็นแนวคิดอย่างง่ายเพื่อให้ครอบคลุมถนนทุกเส้นทางซึ่งในความเป็นจริงนั้นจะต้อง

พิจารณาถึงหลาย ๆ ปัจจัย เช่น การรองรับผู้ใช้งาน, เส้นทางที่รถโดยสารสาธารณะสามารถให้บริการได้ เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงกรณีใช้งาน (use-case) ที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อสถานการณ์ในความเป็นจริง ยกตัวอย่างเช่น Cooperative ML สำหรับการประมวลผลข้อมูล sensor จากผู้ใช้งานบนท้องถนนในการทำงานของรถยนต์ไร้คนขับที่มีข้อมูลที่ต้องการรับ-ส่งจำนวนมากที่ต้องการการประมวลผลที่สูงมากกว่าเมื่อเทียบกับจำนวนยานพาหนะยาน โดยตรง หรือการประชุมผ่านทางวิดีโอ (Video conference), AR/VR หรือการเล่นเกมบนยานพาหนะที่ต้องการทั้งการรับ-ส่งข้อมูลที่มีความล่าช้าต่ำและขนาดของข้อมูลจำนวนมาก

แบบจำลองในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างยานพาหนะ ในงานวิจัยนี้ยังเป็นการทดลองบนสมมติฐานแบบง่ายอยู่ซึ่งยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการติดต่อสื่อสารระหว่างยานพาหนะเช่น การใช้งานพลังงานของอุปกรณ์ เพื่อให้การทดลองนั้นใกล้เคียงกับความเป็นจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของความเสถียรภาพของการเชื่อมต่อที่เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมาก อีกทั้งเรื่องของการเชื่อมต่อจากรถโดยสารประจำทางไปยังสถานีรับส่งสัญญาณข้างทางเพื่อการรับส่งข้อมูลที่จำเป็นกับโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ นอกจากนี้ในเรื่องของข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้นในงานวิจัยนี้ยังใช้ข้อมูลเพียงชุดข้อมูลเดียว เพื่อให้การทดลองสมจริงมากขึ้นควรใช้ชุดข้อมูลคนละชุดกันในการหาเส้นทางที่เหมาะสมในการวางแผนและทำการทดลองวัดการติดต่อสื่อสารกันระหว่างยานพาหนะ

สำหรับตัววัดที่ใช้ในการทดลองนี้ยังเป็นตัววัดแบบง่ายเพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวคิดของการใช้รถโดยสารประจำทางเป็น โหนดที่ขอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอตัววัดจำนวนยานพาหนะที่โหนดที่สามารถให้บริการได้ซึ่งให้ผลออกมาได้ค่อนข้างดี แต่สำหรับในการใช้งานจริงนั้นตัววัดที่แสดงให้เห็นจุดเด่นมากกว่าสามารถเป็นตัววัดที่แสดงพื้นที่การให้บริการ (Coverage area) เพื่อสะท้อนให้เห็นว่าการใช้รถโดยสารประจำทางเป็น โหนดที่ขอบนั้นแทนรูปแบบ โหนดที่ขอบที่ติดตั้งอยู่บน RSU นั้นได้เปรียบมากกว่า

สำหรับแนวคิดในการออกแบบทดลองนั้น ในงานวิจัยนี้การวางแผนเส้นทางของรถโดยสารประจำทางยังเป็นเส้นทางแบบง่ายที่พิจารณาถึงพื้นที่ที่ครอบคลุมเพียงอย่างเดียว เพื่อให้การทดลองสมจริงมากขึ้นนั้นจำเป็นจะต้องพิจารณาถึงเรื่องเส้นทางที่ไม่ปะติดปะต่อกัน (disjoint path) การทับซ้อนของเส้นทาง (overlapping) รวมไปถึงทิศทางของเคลื่อนที่ของรถโดยสารประจำทางร่วมด้วย

บรรณานุกรม

1. Agency, I.E., *Global EV Outlook 2022*. 2022.
2. Institute, E.T.S., *ETSI EN 302 665 V1.1.1 (2010-09)*. 2010.
3. *IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments*. IEEE Std 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11n-2009, and IEEE Std 802.11w-2009), 2010: p. 1-51.
4. Lee, M. and T. Atkison, *VANET applications: Past, present, and future*. Vehicular Communications, 2021. **28**: p. 100310.
5. Mach, P. and Z. Becvar, *Mobile Edge Computing: A Survey on Architecture and Computation Offloading*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017. **19**(3): p. 1628-1656.
6. Xue, L., Y. Yang, and D. Dong, *Roadside Infrastructure Planning Scheme for the Urban Vehicular Networks*. Transportation Research Procedia, 2017. **25**: p. 1380-1396.
7. Jiang, X. and D.H.C. Du, *BUS-VANET: A BUS Vehicular Network Integrated with Traffic Infrastructure*. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2015. **7**(2): p. 47-57.
8. Lin, B., X. Zhou, and J. Duan, *Dimensioning and Layout Planning of 5G-Based Vehicular Edge Computing Networks Towards Intelligent Transportation*. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2020. **1**: p. 146-155.
9. Talpur, A. and M. Gurusamy, *DRLD-SP: A Deep-Reinforcement-Learning-Based Dynamic Service Placement in Edge-Enabled Internet of Vehicles*. IEEE Internet of Things Journal, 2022. **9**(8): p. 6239-6251.
10. Chang, L., et al., *Edge Server Placement for Vehicular Ad Hoc Networks in Metropolitans*. IEEE Internet of Things Journal, 2022. **9**(2): p. 1575-1590.
11. Cao, B., et al., *Large-Scale Many-Objective Deployment Optimization of Edge Servers*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021. **22**(6): p. 3841-3849.
12. Chaib, N., et al., *BRT: Bus-Based Routing Technique in Urban Vehicular Networks*. IEEE

- Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020. **21**(11): p. 4550-4562.
13. Li, G., et al. *Routing in taxi and public transport based heterogeneous vehicular networks. in 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*. 2016.
 14. Foundation, I.T.I.C., *iTIC Open Data Archives*. 2022.
 15. Authority, B.M.T. *Bus Lines*. 2022 [cited 2022 12,12]; Available from: <http://www.bmta.co.th/th/bus-lines>.
 16. สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, สรุปอัตราความเร็วเฉลี่ยของรถยนต์ส่วนบุคคลในเขตกรุงเทพมหานคร (ช่วงเร่งด่วนเช้า 06.00 - 09.00 น.). 2564: ระบบบัญชีข้อมูลด้านคมนาคม (MOT Data Catalog).





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายณัฐนันท์ มานพ
วัน เดือน ปี เกิด	9 เมษายน 2542
สถานที่เกิด	ชลบุรี
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	อาคาร พี.พี.1 เรสซิเดนซ์ เลขที่ 22/10 ถนนราชปรารภ แขวงถนนพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY