



กทปส

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนา
กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

การทดลองการสื่อสารด้วยระบบ 5G สำหรับรถไร้คนขับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ได้รับทุนอุดหนุนจาก

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ
(สำนักงาน กสทช.)

คำนำ

ตามสัญญาเลขที่ B63-2-(2)-008 สัญญารับทุนวิจัยและพัฒนากิจกรรมกระจายเสียง กิจกรรมโทรทัศน์ และกิจกรรมโทรคมนาคม สำหรับผู้ที่ได้รับการส่งเสริมและสนับสนุนเงินจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจกรรมกระจายเสียง กิจกรรมโทรทัศน์ และกิจกรรมโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ โครงการ “การทดลองการสื่อสารระบบ 5G สำหรับรถไร้คนขับ” ลงนามสัญญาเมื่อวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2564 และ ขอย้ายการสิ้นสุดโครงการเป็นวันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 บัดนี้คณะนักวิจัยดำเนินการมาเป็นระยะเวลา 23 เดือน โดยได้ดำเนินการเสร็จสิ้นตามวัตถุประสงค์ของโครงการ ในการนี้จึงขอส่งเอกสารรายงานฉบับสมบูรณ์ รายละเอียดตามเอกสารที่ส่งมาพร้อมนี้

สรวิศ นฤปิติ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ นฤปิติ)

29 พฤษภาคม 2566

สารบัญ

คำนำ.....	i
สารบัญ	ii
สารบัญรูปภาพ.....	iv
สารบัญตาราง	xvi
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	1
1.3 สรุปผลการดำเนินการ	3
1.3.1 การออกแบบ จัดหาและติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า (EV Charging Station).....	3
1.3.2 การนำเข้ารถยนต์อัตโนมัติ	10
1.3.3 การตรวจรับรถอัตโนมัติ และการทดสอบ.....	17
1.3.4 การพัฒนาระบบควบคุมการขับขี่ (การทดสอบ).....	20
1.3.5 การติดตั้งระบบสื่อสารในรถไร้คนขับ.....	24
1.3.6 การออกแบบ Use cases	24
1.3.7 การจัดหา และติดตั้งระบบแสดงผล	28
1.3.8 การจัดทำ HD Map	29
1.3.9 การทดสอบการใช้งานจริง (ขยายความในบท 3).....	33
1.3.10 การทดสอบนำรถต้นแบบไปให้บริการรับส่งผู้โดยสารในพื้นที่ทดสอบ	37
1.3.11 การจัดงานสาธิตการทำงานของรถรับส่งผู้โดยสารไร้คนขับ (Demo Day).....	39
บทที่ 2 สรุปการทบทวนวรรณกรรมด้านการสื่อสารและรถไร้คนขับ	41
2.1 เทคโนโลยีและการพัฒนา Autonomous Vehicle (AV)	41
2.1.1 ส่วนประกอบของเทคโนโลยี Connected and Autonomous Vehicle (CAV).....	41
2.1.2 ระดับขั้นของระบบขับขี่อัตโนมัติ	42



2.1.3	สถาปัตยกรรมของระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Autonomous Driving System) และส่วนประกอบ.....	48
2.1.4	แนวโน้มการพัฒนายานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ.....	56
2.1.5	เทคโนโลยียานยนต์อัตโนมัติกับการให้บริการยานยนต์แบบใหม่ การแบ่งปันการใช้รถ และการขนส่ง	59
2.2	เทคโนโลยี C-ITS และ 5G C-V2X.....	61
2.2.1	บทนำ.....	61
2.2.2	ขนาดของอุตสาหกรรม.....	63
2.2.3	ระดับการควบคุมยานยนต์อัตโนมัติกับเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง.....	65
2.2.4	เทคโนโลยี 5G กับการควบคุมยานยนต์อัตโนมัติ	68
2.2.5	เทคโนโลยี 5G-Based C-V2X.....	74
2.2.6	ตัวอย่างการใช้งานเทคโนโลยี 5G-Based C-V2X ในต่างประเทศ	79
2.3	Use Cases	88
2.3.1	บทนำ.....	88
2.3.2	เทคโนโลยีการแจ้งเตือนการเกิดอุบัติเหตุ	90
2.3.3	เทคโนโลยีการตรวจจับอาการง่วงนอน	92
2.3.4	เทคโนโลยีการนับจำนวนผู้โดยสาร.....	94
2.3.5	เทคโนโลยีการสตรีมวิดีโอ.....	96
2.3.6	เทคโนโลยีการแสดงผล	97
บทที่ 3	ผลการทดสอบ	100
3.1	ผลการทดสอบการใช้งานจริงของรถต้นแบบ (จู่ฟ่า และ กสทช.).....	100
3.2	ผลการทดสอบระบบสื่อสาร (จู่ฟ่า และ กสทช.)	103
3.2.1	การทดสอบวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่าย 5G	103
3.2.2	การทดสอบอุปกรณ์สื่อสารระบบ 5G ในห้องปฏิบัติการ.....	113
3.2.3	การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G	120
3.2.4	การติดตั้ง Video Wall สำหรับศูนย์บัญชาการรถยนต์ไร้คนขับ	139
3.3	ผลการทดสอบการขับขี่	142
3.4	Use Cases	146
3.4.1	สถาปัตยกรรมของระบบ	146



3.4.2 รายละเอียดของโมดูลภายในระบบ	147
3.5 ผลทดสอบการนำรถต้นแบบในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารภายในบริเวณที่ทำการทดสอบ.....	177
บทที่ 4 ภาพกิจกรรม วันสาริตการทำงาน ณ กสทช.....	182
บทที่ 5 องค์ความรู้จากการดำเนินโครงการและข้อเสนอแนวทางกำหนดนโยบายภาครัฐ	187
5.1 องค์ความรู้ที่ได้จากการพัฒนาระบบในโครงการ Autonomous Shuttle Low speed/short distance – predefined route	187
5.2 อภิปราย	189
5.2.1 รถอัตโนมัติ.....	189
5.2.2 ระบบสื่อสาร 5G	191
5.2.3 ข้อมูลและUse case	194
5.3 แนวทางการกำหนดนโยบายภาครัฐต่อเทคโนโลยีรถไร้คนขับและการสื่อสารที่เกี่ยวข้อง	205
5.3.1 ด้านเทคโนโลยี.....	206
5.3.2 ด้านนโยบาย กฎระเบียบข้อบังคับ และมาตรฐาน	207
5.3.3 ด้านโครงสร้างพื้นฐาน	208
5.3.4 ด้านการยอมรับของผู้บริโภค	209
เอกสารอ้างอิง	211
ภาคผนวก	217

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่ 1-1 พื้นที่ที่วางแผนออกแบบให้ครอบคลุมสัญญาณ 5G.....	2
รูปที่ 1-2 ข้อเสนอเพื่อกำหนดพื้นที่สำหรับติดตั้ง EV Station	5
รูปที่ 1-3 เข้าสำรวจพื้นที่เพื่อพัฒนาแบบก่อสร้าง เมื่อ 25 มิถุนายน พ.ศ. 2564	5



รูปที่ 1-4 แบบก่อสร้าง ณ เดือนมิถุนายน 2564	6
รูปที่ 1-5 พื้นที่ติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า	7
รูปที่ 1-6 รายละเอียดของแท่นติด charger ที่ใช้จริงในโครงการ	7
รูปที่ 1-7 แบบก่อสร้างของพื้นที่และแท่นติด charger	8
รูปที่ 1-8 การดำเนินการปรับพื้นที่และเข้าแบบฐานเพื่อพร้อมติดตั้ง	8
รูปที่ 1-9 สถานีประจุไฟฟ้า (EV Charging Station) ที่เสร็จสิ้นและตรวจรับเรียบร้อยแล้ว	9
รูปที่ 1-10 การทดสอบเครื่อง charger ด้วย EV Tester สำหรับเครื่องทั้งสองตัว สถานะ ผ่าน ทั้งสองตัว	9
รูปที่ 1-11 การติดตั้งป้ายและวิธีใช้งาน พร้อมทั้ง emergency contact ทั้งที่บริเวณ charger และบริเวณตู้ EVDB	10
รูปที่ 1-12 การขนส่งรถอัตโนมัติมายังประเทศไทยโดยทางเรือ จากไต้หวัน	11
รูปที่ 1-13 การเตรียมการขนส่งรถอัตโนมัติออกจากท่าเรือแหลมฉบัง	12
รูปที่ 1-14 การขนย้ายรถอัตโนมัติ มายังบริษัท Takuni เพื่อเก็บรักษาในวงที่มีการตรวจสอบ และดำเนินการเท รณิงการใช้งานรถ	12
รูปที่ 1-15 รถอัตโนมัติ Turing รุ่น OPAL T1	13
รูปที่ 1-16 รถอัตโนมัติ Turing รุ่น OPAL T2	13
รูปที่ 1-17 Sensor Layout ของ Turing OPAL T1	15
รูปที่ 1-18 Sensor Layout ของ Turing OPAL T2	17
รูปที่ 1-19 แสดงการเข้ารับการอบรมจากผู้ผลิต และเตรียมการรับมอบรถ (30 เมษายน พ.ศ. 2565)	18
รูปที่ 1-20 แสดงการตรวจสอบการทำงานของรถ ทดสอบคุณลักษณะ และฟังก์ชันการทำงานของรถ (4 พฤษภาคม พ.ศ. 2565)	19
รูปที่ 1-21 แสดงการ ทดสอบรถอัตโนมัติเพื่อทราบถึงสมรรถนะ ความปลอดภัย และการทำงานของระบบต่าง ๆ ก่อนรับมอบรถ (4 พฤษภาคม พ.ศ. 2565)	19
รูปที่ 1-22 แสดงการทดสอบรถอัตโนมัติเพื่อทราบถึงสมรรถนะ ความปลอดภัย และการทำงานของระบบต่าง ๆ ที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (มิถุนายน 2565)	20



รูปที่ 1-23 แสดง Waypoint (จุดเส้นทางวิ่งของรถอัตโนมัติ) บนแผนที่ความละเอียดสูง ในบริเวณที่ทดสอบใน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	21
รูปที่ 1-24 แสดง Waypoint (จุดเส้นทางวิ่งของรถอัตโนมัติ) บนแผนที่ความละเอียดสูง ในบริเวณที่ทดสอบใน สำนักงาน กสทช ซอยสายลม.....	22
รูปที่ 1-25 แสดงหน้าจอของโปรแกรมควบคุมของรถอัตโนมัติ (ROS / AUTOWARE).....	23
รูปที่ 1-26 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม Pure pursuit ที่ใช้ควบคุมการวิ่งตาม Waypoint ที่สร้างบนแผนที่ความ ละเอียดสูง	23
รูปที่ 1-27 สถาปัตยกรรม Vehicular-Edge-Cloud Computing.....	25
รูปที่ 1-28 Use Cases ภายในโครงการ	28
รูปที่ 1-29 ของศูนย์บัญชาการรถยนต์ไร้คนขับ	28
รูปที่ 1-30 กระบวนการสร้างแผนที่ความละเอียดสูง (HD Map)	30
รูปที่ 1-31 รถที่ใช้เก็บข้อมูล เพื่อทำแผนที่ความละเอียดสูง ที่ภายใน สำนักงาน กสทช และ ซอยสายลม	30
รูปที่ 1-32 แผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สร้างขึ้นในโครงการ	31
รูปที่ 1-33 แผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สร้างขึ้นในโครงการ	32
รูปที่ 1-34 แผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) บริเวณสำนักงาน กสทช และ ซอยสายลม ที่สร้างขึ้นในโครงการ.....	32
รูปที่ 1-35 แผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) บริเวณสำนักงาน กสทช และ ซอยสายลม ที่สร้างขึ้นในโครงการ.....	33
รูปที่ 1-36 การทดสอบรถอัตโนมัติ T1 ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	34
รูปที่ 1-37 การทดสอบรถอัตโนมัติ T2-W ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	34
รูปที่ 1-38 การทดสอบรถอัตโนมัติ T2-B ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	35
รูปที่ 1-39 การทดสอบรถอัตโนมัติ T1 ภายในสำนักงาน กสทช	35
รูปที่ 1-40 การทดสอบรถอัตโนมัติ T2-W ภายในสำนักงาน กสทช	36
รูปที่ 1-41 การทดสอบรถอัตโนมัติ T2-B ภายในสำนักงาน กสทช.....	36
รูปที่ 1-42 แสดงระบบ Operation Dashboard ของรถอัตโนมัติ.....	37
รูปที่ 1-43 ภาพการทดสอบการนำรถต้นแบบในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารในบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ...	38



รูปที่ 1-44 ภาพการทดสอบการนำรถต้นแบบในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารในบริเวณ สำนักงาน กสทช.....	38
รูปที่ 1-45 แสดงงานสาธิตการทำงานของ รถรับส่งผู้โดยสารไร้คนขับ และผลลัพธ์เบื้องต้นจากโครงการ การทดลอง การสื่อสารด้วยระบบ 5G สำหรับรถไร้คนขับ (15 กันยายน พ.ศ. 2565)	39
รูปที่ 1-46 งานสาธิตการทำงานของรถรับส่งผู้โดยสารไร้คนขับ ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (15 กันยายน พ.ศ. 2565).....	40
รูปที่ 2-1 ส่วนประกอบของเทคโนโลยี Connected and Autonomous Vehicle (CAV)	42
รูปที่ 2-2 ระดับขั้นของระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติที่จัดแบ่งโดยสมาคมวิศวกรรมยานยนต์นานาชาติ (Society of Automotive Engineers International: SAE International) (STEINLAW, 2019).....	44
รูปที่ 2-3 ส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Parra L., 2016)	48
รูปที่ 2-4 ประเภทของระบบตรวจจับ (Sensor) (รูปภาพจาก McKinsey & Co.).....	49
รูปที่ 2-5 คุณสมบัติของระบบตรวจจับ (Sensor) ประเภทต่าง ๆ (รูปภาพจาก McKinsey & Co.).....	49
รูปที่ 2-6 ความสามารถของเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ (Jason M., 2018)	52
รูปที่ 2-7 ความสามารถของเซนเซอร์เทียบระหว่าง AV กับมนุษย์และระบบ CV และ CAV (Gilbert S., 2017)	52
รูปที่ 2-8 รถยนต์อัตโนมัติของบริษัท Tesla UBER และ Waymo (ข้อมูลจาก Tesla, UBER และ Waymo)	53
รูปที่ 2-9 บริษัทที่บุกเบิกในอุตสาหกรรมยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (GrayB., 2021).....	58
รูปที่ 2-10 Strategic Partnership Segments (GrayB., 2021)	58
รูปที่ 2-11 Automated Driving Systems Leader board (Alex D., 2017)	59
รูปที่ 2-12 Easy Mile (First-Last Mile Vehicle) ยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับขนส่งมวลชน (Trevor M., 2017).....	60
รูปที่ 2-13 Robo Taxi “Easy Ride” โดย บริษัท Nissan และ DeNA (Tajitsu N., 2018).....	60
รูปที่ 2-14 ตัวอย่างบริษัทที่พัฒนาระบบขนส่งสินค้าโดยใช้เทคโนโลยีขับเคลื่อนอัตโนมัติ (FutureBridge., 2020)	61
รูปที่ 2-15 ข้อมูลที่ใช้สำหรับการตัดสินใจของ Advanced Driving Assistance System (ADAS) (R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020)	62
รูปที่ 2-16 เซนเซอร์ของระบบ ADAS (TE CONNECTIVITY., n.d.)	63
รูปที่ 2-17 การคาดการณ์ขนาดอุตสาหกรรมยานยนต์ไร้คนขับ (TE CONNECTIVITY., n.d.).....	63



รูปที่ 2-18 การเชื่อมต่อข้อมูลและเซนเซอร์ กับขนาดอุตสาหกรรมยานยนต์ไร้คนขับ (TE CONNECTIVITY., n.d.).	64
รูปที่ 2-19 ระดับการควบคุมยานยนต์อัตโนมัติ.....	65
รูปที่ 2-20 ระดับการควบคุมรถอัตโนมัติในอีกรูปแบบหนึ่ง (Robert Day ARM., 2019).....	65
รูปที่ 2-21 C-V2X โดยใช้ Wide-Area Communication และ MEC Server หลัง Base Station (R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020).....	67
รูปที่ 2-22 ลักษณะภายใน ยานยนต์ไร้คนขับ ในอนาคต.....	67
รูปที่ 2-23 ความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นสำหรับเทคโนโลยียานยนต์ไร้คนขับในอนาคต	68
รูปที่ 2-24 Platoon Model (R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020).....	69
รูปที่ 2-25 Edge Computing สำหรับ Platoons (R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020)	71
รูปที่ 2-26 HD map edge computing สำหรับ 5G-V2X (R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020)	72
รูปที่ 2-27 การดาวน์โหลด HD map ที่อัปเดตจากส่วนกลางแล้ว (R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020)	73
รูปที่ 2-28 การอัปเดต HD map ที่ update เฉพาะที่ต่างจาก HD map เดิม (R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020).....	73
รูปที่ 2-29 การสื่อสารระหว่างรถกับสรรพสิ่ง (V2X) รูปแบบต่าง ๆ (C. R. Stork and F. Duarte-Figueiredo., 2020)	74
รูปที่ 2-30 คุณสมบัติหลัก 3 ประการของเทคโนโลยี 5G และตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานที่ใช้คุณสมบัติดังกล่าว (Upendra Kumar Tiwari., 2020)	76
รูปที่ 2-31 แผนผังแสดงลำดับเวลาของการพัฒนาเทคโนโลยี 5G NR C-V2X โดย 3GPP (J. Springer (5GAA), 5G., 2019).....	77
รูปที่ 2-32 โหมดการสื่อสารของเทคโนโลยี 5G NR C-V2X (Qualcomm Technologies., 2018).....	78
รูปที่ 2-33 การทำงานร่วมกันของการสื่อสาร 2 โหมดของเทคโนโลยี 5G NR C-V2X (J. Springer (5GAA), 5G., 2019).....	78
รูปที่ 2-34 การทดสอบการใช้งานจริงในดีทรอยต์ โดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยมิชิแกน	81
รูปที่ 2-35 การทดสอบการใช้งานจริงในแอนอาร์เบอร์ โดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X.....	82
รูปที่ 2-36 การทดสอบการใช้งานจริงโดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในบาร์เซโลนา.....	83



รูปที่ 2-37 การทดสอบการใช้งานจริงโดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในเมือง Turin ประเทศ Italy.....	84
รูปที่ 2-38 การทดสอบการใช้งานจริงโดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในประเทศญี่ปุ่น.....	85
รูปที่ 2-39 การทดสอบการใช้งานจริงโดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในประเทศเกาหลีใต้ใน K-city.....	86
รูปที่ 2-40 การทดสอบการใช้งานจริงโดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในประเทศจีน	88
รูปที่ 2-41 ภาพตัวอย่างการตรวจจับผู้ขับขี่ที่มีอาการง่วงผ่านกล้องที่ติดตั้งในรถยนต์ (PADMAVATHY SUBRAMANIAN., 2021).....	90
รูปที่ 2-42 รูปตัวอย่างแสดงขั้นตอนของระบบตรวจจับอุบัติเหตุ [Dashora, 2020].....	91
รูปที่ 2-43 ตัวอย่างการตรวจจับอาการง่วงนอนด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง [DataFlair, 2021].....	92
รูปที่ 2-44 ตัวอย่างการตรวจจับอาการง่วงนอนด้วยอัลกอริทึมบนพื้นฐานที่กำหนด [Rosebrock, 2017].....	93
รูปที่ 2-45 ตัวอย่างรูปพฤติกรรมของผู้ขับขี่ได้จาก NVIDIA DRIVE IX.....	94
รูปที่ 2-46 ภาพตัวอย่างการตรวจจับวัตถุโดยใช้ YOLOv5 [Maindola, 2021]	95
รูปที่ 2-47 NVIDIA DeepStream SDK.....	96
รูปที่ 2-48 ตัวอย่างโปรโตคอลสำหรับสตรีมมิ่ง [Traci, 2022].....	97
รูปที่ 2-49 ตัวอย่าง Grafana Dashboard [Ngamlap, 2017]	98
รูปที่ 2-50 ตัวอย่างการทำ Tableau Visualization	98
รูปที่ 2-51 ตัวอย่าง Tableau Dashboard.....	99
รูปที่ 3-1 เส้นทางในการทดสอบบริเวณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	101
รูปที่ 3-2 เส้นทางในการทดสอบบริเวณ สำนักงาน กสทช	102
รูปที่ 3-3 เส้นทางสำหรับทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	104
รูปที่ 3-4 เส้นทางสำหรับทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติภายในบริเวณสำนักงาน กสทช.	105
รูปที่ 3-5 อุปกรณ์เครื่องมือวัดทดสอบคุณภาพสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G.....	105
รูปที่ 3-6 การเดินทดสอบวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ตามเส้นทางทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในพื้นที่ (ก) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ข) สำนักงาน กสทช.	106



รูปที่ 3-7 ผลการวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	107
รูปที่ 3-8 ผลการวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่สำนักงาน กสทช.....	108
รูปที่ 3-9 กำลังที่ได้รับของสัญญาณอ้างอิง (SS-RSRP) ก่อนและหลังปรับสัญญาณให้เหมาะสมบนเส้นทางทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ที่มา : บริษัท AWN).....	111
รูปที่ 3-10 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (SS-SINR) ก่อนและหลังปรับสัญญาณให้เหมาะสมบนเส้นทางทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	112
รูปที่ 3-11 อุปกรณ์สื่อสารระบบ 5G (5G CPE) 2 รุ่น ที่ใช้ทดสอบการสื่อสารผ่านเครือข่าย 5G ในโครงการ.....	113
รูปที่ 3-12 เครื่องมือทดสอบและจำลองการรับส่งสัญญาณระบบ 5G (MT8000A).....	114
รูปที่ 3-13 (ก) การจัดวางอุปกรณ์ 5G CPE ในการทดสอบ (ข) เครื่องคอมพิวเตอร์ติดตั้งโปรแกรมสำหรับควบคุมและแสดงผลการทดสอบ.....	115
รูปที่ 3-14 หน้าจอโปรแกรมสำหรับกำหนดค่าพารามิเตอร์ ควบคุม และแสดงผลการทดสอบ	116
รูปที่ 3-15 ผลการทดสอบลักษณะเฉพาะในการรับส่งสัญญาณ RF ของอุปกรณ์ 5G CPE สีดำ.....	117
รูปที่ 3-16 อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput) สำหรับมอดูเลชันแบบต่าง ๆ.....	118
รูปที่ 3-17 Error Vector Magnitude (EVM) สำหรับมอดูเลชันแบบต่าง ๆ.....	118
รูปที่ 3-18 การสื่อสารระหว่างรถกับสรรพสิ่ง (V2X) รูปแบบต่าง ๆ.....	121
รูปที่ 3-19 การเชื่อมต่อระหว่างยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติและเครือข่ายระบบ 5G ของผู้ให้บริการเครือข่าย	122
รูปที่ 3-20 พารามิเตอร์หลักที่ใช้วัดประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G	122
รูปที่ 3-21 การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ด้วยอุปกรณ์ทดสอบเครือข่าย.....	123
รูปที่ 3-22 รูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	123
รูปที่ 3-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการสูญเสียกลุ่มข้อมูล (Packet loss) กับ ค่าอัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput) (ทดสอบที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย).....	124
รูปที่ 3-24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Latency (end-to-end) กับ Throughput	125
รูปที่ 3-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความหน่วงเวลา (Latency end-to-end) กับ ค่าอัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput).....	125



รูปที่ 3-26 รูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่สำนักงาน กสทช.	126
รูปที่ 3-27 การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่สำนักงาน กสทช.	126
รูปที่ 3-28 กราฟแสดงค่า Latency (end-to-end) ของการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ระหว่างยานยนต์รับส่ง ผู้โดยสารอัตโนมัติ และ Operation dashboard ในพื้นที่สำนักงาน กสทช.	127
รูปที่ 3-29 ฉากทัศน์การทดสอบที่ 1 สำหรับการวัดประสิทธิภาพการสื่อสารด้วย Network Master Pro MT1000A	128
รูปที่ 3-30 Log file แสดงผลการทดสอบด้วย Network Master Pro MT1000A	129
รูปที่ 3-31 ความสัมพันธ์ระหว่าง Packet loss rate และ Throughput สำหรับความเร็วรถยนต์ทดสอบค่าต่าง ๆ	130
รูปที่ 3-32 ฉากทัศน์การทดสอบที่ 2 สำหรับการวัดประสิทธิภาพการสื่อสารของยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติผ่าน เครือข่ายระบบ 5G ด้วย Network Master Pro MT1000A	131
รูปที่ 3-33 ความสัมพันธ์ระหว่าง Packet loss rate และ Throughput ของการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสาร ผ่านเครือข่ายระบบ 5G เปรียบเทียบระหว่างกรณีใช้สายอากาศประจำตัวอุปกรณ์ 5G CPE และใช้สายอากาศ ภายนอก	132
รูปที่ 3-34 ความสัมพันธ์ระหว่าง Packet loss rate และ Throughput ของการทดสอบประสิทธิภาพ.....	132
รูปที่ 3-35 ตัวอย่างข้อมูล Log file แสดง Band ที่ใช้งาน และอัตราส่วน DL:UL	134
รูปที่ 3-36 ตัวอย่างข้อมูล Log file แสดง Physical cell identity (PCI).....	135
รูปที่ 3-37 การมอดูเลชันในแต่ละช่วงเวลา	136
รูปที่ 3-38 Throughput ของฝั่ง Uplink และ Downlink ของอุปกรณ์ 5G CPE ที่จัดเก็บไว้.....	137
รูปที่ 3-39 Aten VM5808H 8 x 8 HDMI Matrix Switch	139
รูปที่ 3-40 ตัวอย่างหน้าการตั้งค่า Profile สำหรับ Aten.....	140
รูปที่ 3-41 รูปแบบการแสดงผลที่ตั้งค่า Profile สำหรับโครงการนี้.....	140
รูปที่ 3-42 ผลการทดสอบการแสดงผลของ Video Wall.....	141
รูปที่ 3-43 ผลการทดลองวิ่ง รถ T1 ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	142
รูปที่ 3-44 แสดงผลการทดลองวิ่ง รถ T2-W ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	143



รูปที่ 3-45 แสดงผลการทดลองวิ่ง รถ T2-B ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	143
รูปที่ 3-46 แสดงผลการทดลองวิ่ง รถ T1 ในพื้นที่สำนักงาน กสทช.....	144
รูปที่ 3-47 แสดงผลการทดลองวิ่ง รถ T2-W ในพื้นที่สำนักงาน กสทช.....	144
รูปที่ 3-48 ดงผลการทดลองวิ่ง รถ T2-B ในพื้นที่สำนักงาน กสทช.....	145
รูปที่ 3-49 สถาปัตยกรรมของระบบ Vehicular-Edge-Cloud Computing.....	146
รูปที่ 3-50 ตัวอย่างผลลัพธ์จากอัลกอริทึม 1: อัลกอริทึมของเครื่อง (Machine Learning).....	148
รูปที่ 3-51 ตัวอย่างผลลัพธ์จากอัลกอริทึม 2: อัลกอริทึมบนพื้นฐานที่กำหนด (Rule-Based Algorithm)	148
รูปที่ 3-52 ตัวอย่างผลลัพธ์จากอัลกอริทึม 1 ที่ตรวจจับตำแหน่งของตาแต่ละข้างบนใบหน้าผิดพลาด และไม่สามารถตรวจจับตำแหน่งใบหน้าได้	149
รูปที่ 3-53 ตัวอย่างผลลัพธ์จากอัลกอริทึม 3 อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องฉบับปรับปรุง (E-ML: Enhanced Machine Learning Algorithm)	150
รูปที่ 3-54 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ระบบไม่สามารถตรวจจับตำแหน่งใบหน้าได้.....	153
รูปที่ 3-55 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ระบบทำการตรวจจับใบหน้าผิดพลาด	154
รูปที่ 3-56 ตัวอย่างภาพการทดลองการนับจำนวนผู้โดยสาร	155
รูปที่ 3-57 ภาพตัวอย่างวิดีโอ	157
รูปที่ 3-58 แอปพลิเคชันภายในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ	158
รูปที่ 3-59 การแจ้งเตือนขึ้นที่แดชบอร์ดสำหรับสังเกตการณ์	158
รูปที่ 3-60 รายการอุบัติเหตุย้อนหลัง.....	159
รูปที่ 3-61 ตัวอย่างปิกมุดอุบัติเหตุในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ	159
รูปที่ 3-62 สถาปัตยกรรมของระบบบนเครื่องแม่ข่าย	160
รูปที่ 3-63 ตัวอย่างหน้าเข้าสู่ระบบ.....	162
รูปที่ 3-64 ตัวอย่างหน้าแสดงตารางรายการกล้องทั้งหมดในระบบ	163
รูปที่ 3-65 ตัวอย่างหน้าสร้างกล้อง.....	163



รูปที่ 3-66 ตัวอย่างหน้าแก้ไขข้อมูลกล้อง	164
รูปที่ 3-67 ตัวอย่างหน้าแสดงตารางรายการรถขับซื้ออัตโนมัติทั้งหมดในระบบ	164
รูปที่ 3-68 ตัวอย่างหน้าสร้างรถขับซื้ออัตโนมัติ	165
รูปที่ 3-69 ตัวอย่างหน้าแก้ไขรถขับซื้ออัตโนมัติ.....	165
รูปที่ 3-70 ตัวอย่างหน้าแสดงตารางรายการผู้ขับขี่ทั้งหมด.....	166
รูปที่ 3-71 ตัวอย่างหน้าสร้างผู้ขับขี่	167
รูปที่ 3-72 ตัวอย่างหน้าแก้ไขข้อมูลผู้ขับขี่.....	168
รูปที่ 3-73 ตัวอย่างหน้าข้อมูลจำนวนผู้โดยสารภายในรถขับซื้ออัตโนมัติเมื่อเกิดที่หมดรถขับซื้ออัตโนมัติ	169
รูปที่ 3-74 ตัวอย่างหน้าแสดงข้อมูลอุบัติเหตุเมื่อเกิดที่หมดอุบัติเหตุ	170
รูปที่ 3-75 ตัวอย่างหน้าแดชบอร์ดภาพรวม	170
รูปที่ 3-76 ตัวอย่างหน้าแดชบอร์ด Heartbeat	171
รูปที่ 3-77 แสดงตัวอย่างหน้าแดชบอร์ดรถขับซื้ออัตโนมัติรายคัน	172
รูปที่ 3-78 ตัวอย่างหน้าแดชบอร์ดผู้ขับขี่รายคน	173
รูปที่ 3-79 ตัวอย่างมุมมองของกล้องทุกกล้องในรถขับซื้ออัตโนมัติทุกคัน.....	174
รูปที่ 3-80 หน้าต่างแจ้งเตือนในกระดิ่งแจ้งเตือน	174
รูปที่ 3-81 General Database Design (PostgreSQL)	175
รูปที่ 3-82 Message Data Flow Design.....	176
รูปที่ 3-83 Video Streaming Data Flow Design	177
รูปที่ 3-84 Waypoint ในแผนที่ความละเอียดสูง เส้นทางและแผนการวิ่ง ของการทดลองรับส่งผู้โดยสารด้วยรถ อัตโนมัติในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	179
รูปที่ 3-85 Waypoint ในแผนที่ความละเอียดสูง เส้นทางและแผนการวิ่ง ของการทดลองรับส่งผู้โดยสารด้วยรถ อัตโนมัติในพื้นที่สำนักงาน กสทช.....	180
รูปที่ 3-86 ภาพการทดสอบการนำรถต้นแบบในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารในบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย .	181



รูปที่ 3-87 ภาพการทดสอบการนำรถต้นแบบในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารในบริเวณ สำนักงาน กสทช.....	181
รูปที่ 4-1 ภาพบรรยากาศก่อนการสาธิตการทำงานรถไร้คนขับ.....	182
รูปที่ 4-2 ภาพที่ระลึกภายในห้องประชุมในวันกิจกรรม	182
รูปที่ 4-3 ภาพถ่ายรวมทีมงานโครงการ.....	183
รูปที่ 4-4 อุปกรณ์ควบคุมบางส่วนภายในรถทดสอบ	183
รูปที่ 4-5 บรรยากาศภายในรถทดสอบ	184
รูปที่ 4-6 รถที่อยู่ระหว่างการสาธิต.....	184
รูปที่ 4-7 บรรยากาศภายในฐานต่าง ๆ ในห้องประชุม (1).....	184
รูปที่ 4-8 บรรยากาศภายในฐานต่าง ๆ ในห้องประชุม (2).....	185
รูปที่ 4-9 ภาพบรรยากาศระหว่างการสาธิต	185
รูปที่ 4-10 ประมวลภาพกิจกรรมในช่วงต้นและการบรรยาย.....	186
รูปที่ 5-1 ข้อจำกัดของเซนเซอร์ กล้อง Radar และ LiDAR.....	192
รูปที่ 5-2 GNSS ที่ได้จากโครงข่ายสื่อสาร 5G	192
รูปที่ 5-3 Use Cases สำหรับวิศวกรรมยานยนต์กับเทคโนโลยี 5G.....	193
รูปที่ 5-4 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบผลลัพธ์การตรวจจับใบหน้าของ E-ML (ซ้าย), Dlib68 (กลาง), และ MediaPipe Face Mesh (ขวา).....	196
รูปที่ 5-5 การเปรียบเทียบ CPU Utilization ของแต่ละโมเดล	197
รูปที่ 5-6 การเปรียบเทียบการใช้งานหน่วยความจำของแต่ละโมเดล	197
รูปที่ 5-7 CPU Utilization ของ MediaPipe Face Mesh ที่ทำงานกับวิดีโอที่มีค่าความละเอียดต่าง ๆ.....	199
รูปที่ 5-8 Memory Usage ของ MediaPipe Face Mesh ที่ทำงานกับวิดีโอที่มีค่าความละเอียดต่าง ๆ.....	199
รูปที่ 5-9 แบนด์วิดท์ของ MediaPipe Face Mesh ที่ทำงานกับวิดีโอที่มีค่าความละเอียดต่าง ๆ	200
รูปที่ 5-10 ตัวอย่างการระบุคนผิดพลาดเมื่อไม่ทำการตัดพื้นที่โดยรอบก่อน.....	202
รูปที่ 5-11 การตัวอย่างเฟรมที่ทำการตัดพื้นที่ออกก่อนแล้ว.....	202



รูปที่ 5-12 ตัวอย่างภาพจากกล้องที่ติดด้านหน้า.....	203
รูปที่ 5-13 ตัวอย่างภาพจากกล้องที่ติดด้านหลัง.....	204



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1-1 สเปกของอุปกรณ์ PTT AC Charger.....	3
ตารางที่ 1-2 Vehicle Specification ของ Turing OPAL T1.....	14
ตารางที่ 1-3 Sensor List ของ Turing OPAL T1.....	15
ตารางที่ 1-4 Vehicle Specification ของ Turing OPAL T2.....	15
ตารางที่ 1-5 Sensor List ของ Turing OPAL T2.....	16
ตารางที่ 1-6 รายการอุปกรณ์.....	25
ตารางที่ 2-1 ระดับชั้นของระบบขับขี่อัตโนมัติ	42
ตารางที่ 2-2 รูปแบบระบบควบคุมความเร็วแบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive Cruise control: ACC) ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ (ข้อมูลจาก SAE International)	46
ตารางที่ 2-3 รูปแบบระบบเบรกฉุกเฉินอัตโนมัติ (Autonomous Emergency Brake: AEB) ของแต่ละบริษัท ผู้ผลิตรถยนต์ (ข้อมูลจาก SAE International)	47
ตารางที่ 2-4 รูปแบบระบบแจ้งเตือนการออกนอกช่องทางจราจรโดยไม่ตั้งใจ (Lane Departure Warning) / ระบบช่วยรักษาให้รถอยู่ในช่องทางจราจรโดยอัตโนมัติ (Lane Keeping Assistance: LKA) ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ (ข้อมูลจาก SAE International).....	47
ตารางที่ 2-5 รูปแบบ ระบบช่วยจอดรถ (Parking Assistance System) ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ (ข้อมูลจาก SAE International).....	48
ตารางที่ 2-6 คุณสมบัติการใช้งานและข้อจำกัดของแต่ละเทคโนโลยี.....	74
ตารางที่ 2-7 คุณสมบัติทางเทคนิคของเทคโนโลยี 5G NR C-V2X เปรียบเทียบกับเทคโนโลยีอื่น ๆ (C. R. Stork and F. Duarte-Figueiredo., 2020)	79
ตารางที่ 3-1 ผลการทดสอบการส่งข้อมูลจากรถไปยัง Operation Dashboard (VDO Wall) ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	102
ตารางที่ 3-2 ผลการทดสอบการส่งข้อมูลจากรถไปยัง Operation Dashboard (VDO Wall) ที่สำนักงาน กสทช. 102	
ตารางที่ 3-3 ข้อมูลจาก Log file ผลการทดสอบการสื่อสาร ของอุปกรณ์ 5G CPE ที่โครงการฯ จัดหามา	133
ตารางที่ 3-4 ผลการทดสอบการตรวจจับอาการรบกวนของอัลกอริทึม 1: อัลกอริทึมของเครื่อง (Machine Learning).....	150
ตารางที่ 3-5 ผลการทดสอบการตรวจจับอาการรบกวนอัลกอริทึม 2: อัลกอริทึมบนพื้นฐานที่กำหนด (Rule-Based Algorithm).....	151



ตารางที่ 3-6 ผลการทดสอบการตรวจจับอาการง่วงนอนของอัลกอริทึม 3: อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องฉบับปรับปรุง (E-ML: Enhanced Machine Learning Algorithm).....	151
ตารางที่ 3-7 ผลการทดสอบค่าชี้วัดประสิทธิภาพการตรวจจับอาการง่วงนอนของทั้ง 3 อัลกอริทึม	152
ตารางที่ 3-8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำในการนับจำนวนผู้โดยสารของโปรแกรมประยุกต์สำเร็จรูปที่ติดตั้งมาพร้อมกับกล้องที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท Dahua.....	155
ตารางที่ 3-9 รายละเอียดคุณสมบัติของวิดีโอที่ใช้ในการทดลอง.....	157
ตารางที่ 3-10 หน้าที่ขององค์ประกอบใน Web Service.....	161
ตารางที่ 5-1 สรุปผลการทดสอบ	198
ตารางที่ 5-2 สรุปผลการทดสอบของ MediaPipe Face Mesh ที่ทำงานกับวิดีโอที่มีค่าความละเอียดต่าง ๆ.....	200



บทที่ 1

บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. สร้างความร่วมมือระหว่างหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง พร้อมทั้งภาคเอกชน และการศึกษาเพื่อร่วมวิจัย ทดสอบ ระบบรถไร้คนขับในระดับต่าง ๆ
2. เพื่อศึกษาข้อมูลทางเทคนิค ข้อจำกัด และปัจจัยแวดล้อมที่อาจส่งผลต่อการตัดสินใจหรือการควบคุมรถได้
3. ทดสอบความสามารถในการตรวจจับ และการบ่งชี้วัตถุของระบบตรวจจับของรถไร้คนขับ
4. ทดสอบการนำเอาระบบสื่อสารภายใต้โครงข่าย 5G มาใช้งานระหว่างรถไร้คนขับกับระบบอื่น ๆ ในรูปแบบการติดต่อสื่อสาร C-V2X
5. พัฒนาและทดสอบ Use cases ของการนำเทคโนโลยี 5G มาใช้ในรถไร้คนขับ
6. นำข้อมูลจากการทดสอบมาใช้ในการกำหนดแผนและแนวทางข้อกำหนดเบื้องต้นของการใช้ของรถไร้คนขับ รวมถึงระบบสาธารณูปโภคอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดต่อผู้บริโภครและประชาชนผู้ใช้ท้องถนน

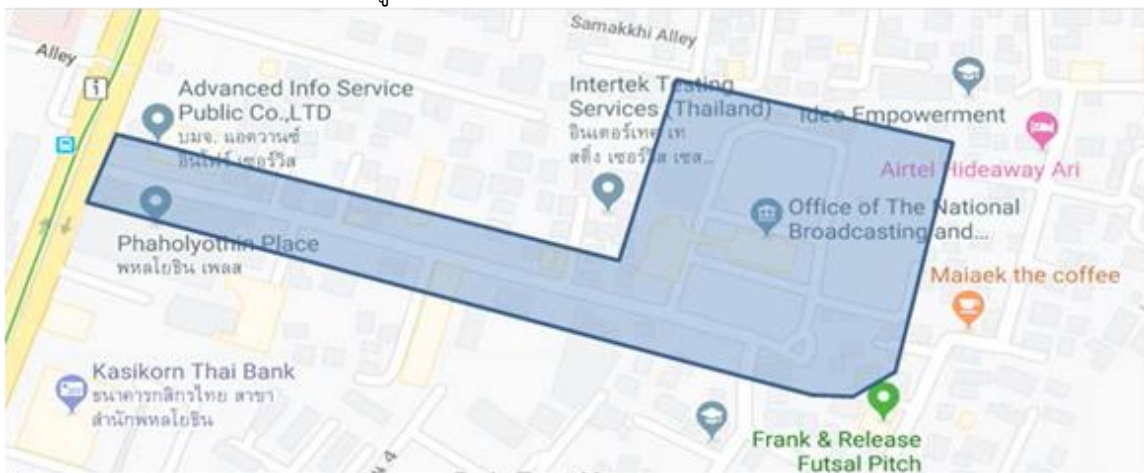
1.2 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้เป็นการจัดเตรียมโครงสร้างพื้นฐานบางส่วนตามจำเป็นในการทดสอบเชื่อมต่อเข้ากับ Core Network ของผู้ให้บริการโทรศัพท์มือถือที่เข้าร่วมโครงการ พร้อมทั้งดำเนินการจัดเตรียม หรือ สร้าง ประกอบ รถไร้คนขับอย่างน้อยระดับที่ 2 กล่าวคือ เป็นรถไร้คนขับที่ประกอบด้วยระบบเซนเซอร์ที่จำเป็นต่อการตรวจจับวัตถุรอบบริเวณที่ขับขี พร้อมทั้งมีระบบควบคุมอัตโนมัติบางส่วน แต่ยังมีผู้ขับขีที่มีการควบคุม และเฝ้าดูสภาพแวดล้อมรอบรถตลอดเวลา อีกทั้ง ผู้ดำเนินการโครงการได้ทำการเก็บข้อมูลในการขับขีจาก เซนเซอร์และระบบควบคุมต่าง ๆ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการสื่อสารผ่านระบบโครงข่าย 5G มาร่วม ประยุกต์ใช้ในการสื่อสารแบบ Cellular Vehicle – to - Everything: C-V2X ด้วยคลื่นความถี่สำหรับกิจการ โทรคมนาคมย่าน 26 GHz หรือ 28 GHz หรือตามที่สำนักงานฯ กำหนด ส่งเสริมความร่วมมือระหว่างหลาย หน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชน รวมถึงสถาบันทางการศึกษา เพื่อร่วมกันพิจารณาข้อมูลทางเทคนิค ทั้งใน ด้าน Proof-of-Concept และข้อกำหนดของอุปกรณ์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดนโยบาย และการวางแผนงานต่อการนำเทคโนโลยีระบบ รถยนต์ไร้คนขับและการสื่อสารด้วยเทคโนโลยี 5G มาใช้ในประเทศไทย

1. จัดทำแผนรายละเอียดของโครงการ ประสานความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ทบทวน วรรณกรรมองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศ และต่างประเทศ



2. ทำการสำรวจ และออกแบบพร้อมทั้งขออนุญาตในการใช้พื้นที่กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อวางโครงข่าย 5G สำหรับโครงการ โดยครอบคลุมพื้นที่ภายในบริเวณสำนักงาน กสทช. และถนนพหลโยธินซอย 8 บางส่วน ดังรูปที่ 1-1



รูปที่ 1-1 พื้นที่ที่วางแผนออกแบบให้ครอบคลุมสัญญาณ 5G

3. ออกแบบ และติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า เพื่อใช้ชาร์จให้แก่ยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ภายในบริเวณพื้นที่ของสำนักงาน กสทช.
4. ทำการนำเข้าอุปกรณ์ รถ และชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องเพื่อจัดเตรียม หรือติดตั้งเข้ากับรถไร้คนขับอย่างน้อยระดับที่ 2
5. ติดตั้งโครงสร้างพื้นฐานบางส่วนตามจำเป็นในการทดสอบ เชื่อมต่อกับ Core Network ของผู้ให้บริการโครงข่ายโทรศัพท์มือถือ
6. ทำการติดตั้งระบบสื่อสารบนรถไร้คนขับด้วยเทคโนโลยี 5G และทดสอบการสื่อสารร่วมกับผู้ให้บริการโครงข่ายโทรศัพท์มือถือ
7. ทดสอบการใช้งานจริงของรถต้นแบบในพื้นที่ที่กำหนด โดยทำการทดสอบ ดังนี้
 - 7.1. ทดสอบ และเก็บข้อมูลการทำงานพื้นฐาน และความสามารถของระบบเซนเซอร์ต่าง ๆ ของยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ผ่านเครือข่าย 5G
 - 7.2. ทดสอบการสื่อสาร Broadband ระหว่าง ยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ กับ เครือข่าย 5G โดยการส่งผ่านข้อมูลภายในรถ หรือสิ่งแวดลอมกลับไป (C-V2N) ทั้ง uplink/downlink
 - 7.3. ทดสอบระบบควบคุมการขับขี่โดยมีผู้ขับขี่คอยดูแลควบคุมรถอยู่ตลอดเวลา
8. ทดสอบการนำรถต้นแบบในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารภายในบริเวณที่ทำการทดสอบ
9. ศึกษาและรวบรวม เงื่อนไขและข้อกำหนดเบื้องต้นที่จำเป็น สำหรับการกำหนดนโยบายภาคต่อเทคโนโลยีรถไร้คนขับ และการสื่อสารที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ การทดสอบโครงการนี้มุ่งเน้นการทดสอบกับรถไร้คนขับอย่างน้อยระดับที่ 2 คือ มีระบบอัตโนมัติบางส่วน (Partial Automation) เช่น การเร่งความเร็วหรือหมุนพวงมาลัยรถ และผู้ขับขี่สามารถ ปล่อยมือจากพวงมาลัยได้ระยะเวลาหนึ่ง แต่ผู้ขับขี่ยังต้องมีส่วนในการควบคุมและต้องคอยเฝ้าดูสภาพแวดล้อมรอบรถ

10. เรื่องการศึกษาข้อมูล

11. ข้อเสนอแนะทางในการพัฒนารถไร้คนขับจากระดับที่ 2 ขึ้นไป

1.3 สรุปผลการดำเนินการ

1.3.1 การออกแบบ จัดหาและติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า (EV Charging Station)

1.3.1.1 กรอบการดำเนินการทั้งหมด

ตามข้อกำหนดของโครงการ ทางโครงการต้องออกแบบ จัดหา และติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า (EV Charging Station) ที่เหมาะสมกับยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในโครงการ เพื่อใช้ประจุไฟฟ้าให้แก่ยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ภายในบริเวณพื้นที่ของ สำนักงาน กสทช. โดยมีกรอบการดำเนินการดังนี้

1) ระบุสเปกของอุปกรณ์ที่สอดคล้องกับตัวรถด้วยข้อมูลล่าสุดจากผู้ผลิต

ข้อมูลทางเทคนิคของ PTT AC Charger

รุ่น 7kW ECO มีพิกัดกำลัง 7.4 kW ทำงานที่กระแส 32 A ด้วยปลั๊กประจุไฟ type 2 จำนวน 2 เครื่อง พร้อมแท่น พร้อมเชื่อมต่อกับตู้ไฟต้นทางของอาคาร พร้อมด้วยข้อมูลในรายละเอียดดังตาราง

ตารางที่ 1-1 สเปกของอุปกรณ์ PTT AC Charger

Power input	50Hz;230V 1L + G + neutral
Charge Mode	Mode 3; IEC61851 SAE J1772 GB/T 18487.1
Charging connector	Type 2 Charging plug with 5M Cable IEC 62196-2, 32 A /250 V (AC)
Output Current	32 A (Single phase)
Power output	7.4 kW
Protection	Safety test IEC 61010-1 Breaking capacity EN/IEC 61009-1 Earth-leakage sensitivity 30 mA IEC61851 Compatibility

2) ประสานตัวแทน กสทช. จัดหาพื้นที่สำหรับติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า บริเวณซอยสายลม



- 3) จัดหาอุปกรณ์ประจุไฟฟ้า พร้อมผู้รับเหมาปรับปรุงพื้นที่
- 4) ติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า พร้อมนำเสนอข้อมูลโครงการที่เกี่ยวข้อง

1.3.1.2 การกำหนดพื้นที่สำหรับติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า

ทางโครงการได้นำเสนอความต้องการสำหรับตำแหน่งสถานีประจุไฟฟ้าเพื่อหารือกับผู้เกี่ยวข้องเพื่อกำหนดพื้นที่สำหรับติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า ดังรูปที่ 1-2 โดยในช่วงกลางเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2564 หลังจากทางโครงการได้นำเสนอข้อเสนอดังกล่าว และได้รับการตัดสินใจตำแหน่งสถานีประจุไฟฟ้าเป็นพื้นที่หน้าสำนักเทคโนโลยีสารสนเทศ ทางโครงการหารือกับผู้รับเหมา เพื่อเข้าสำรวจพื้นที่ (ดังรูปที่ 1-3) โดยทางผู้รับเหมาได้พัฒนาแบบพร้อมระบุ BOQ เสร็จสิ้นพร้อมดำเนินการก่อสร้าง (ดังรูปที่ 1-4)



ความต้องการสำหรับตำแหน่งสถานีประจุไฟฟ้า

- ใกล้เคียงอาคาร เพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองระยะสายไฟ
- เป็นสัดส่วนเพื่อให้มีความโดดเด่นต่อสาธารณะ
- ส่งมอบพื้นที่ได้โดยเร็วเพื่อดำเนินการได้ทันกำหนด



ข้อเสนอ 1: หน้าสำนักเทคโนโลยีสารสนเทศ

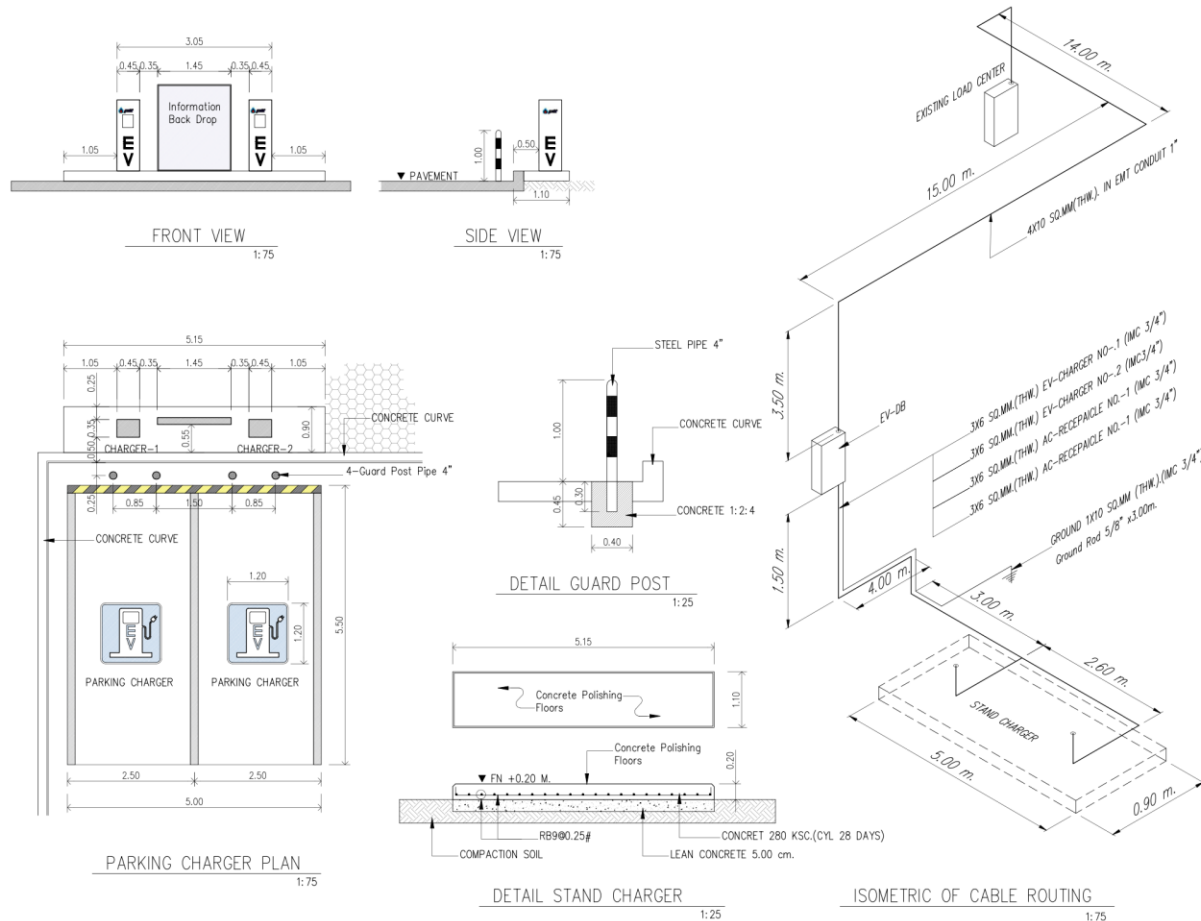


ข้อเสนอ 2: หน้าอาคาร 2

รูปที่ 1-2 ข้อเสนอเพื่อกำหนดพื้นที่สำหรับติดตั้ง EV Station



รูปที่ 1-3 เข้าสำรวจพื้นที่เพื่อพัฒนาแบบก่อสร้าง เมื่อ 25 มิถุนายน พ.ศ. 2564



รูปที่ 1-4 แบบก่อสร้าง ณ เดือนมิถุนายน 2564

1.3.1.3 การติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า

หลังจากรับการยืนยันพื้นที่/เข้าสำรวจ/ทำแบบแล้ว ภายหลัง ได้มีการเปลี่ยนพื้นที่ติดตั้งใหม่ ทางโครงการจึงต้องเข้าไปสำรวจพื้นที่ พร้อมประสานผู้รับเหมาเพื่อทำแบบใหม่ ผนวกกับกรณีโควิด-19 ที่ทำให้ การเข้าพื้นที่ติดตั้งเป็นไปได้ลำบาก การดำเนินการจึงมีความล่าช้า รูปที่ 1-5 แสดงพื้นที่ติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า โดยรายละเอียดของแท่นติดตั้ง charger ที่ใช้จริงในโครงการเป็นดังรูปที่ 1-6





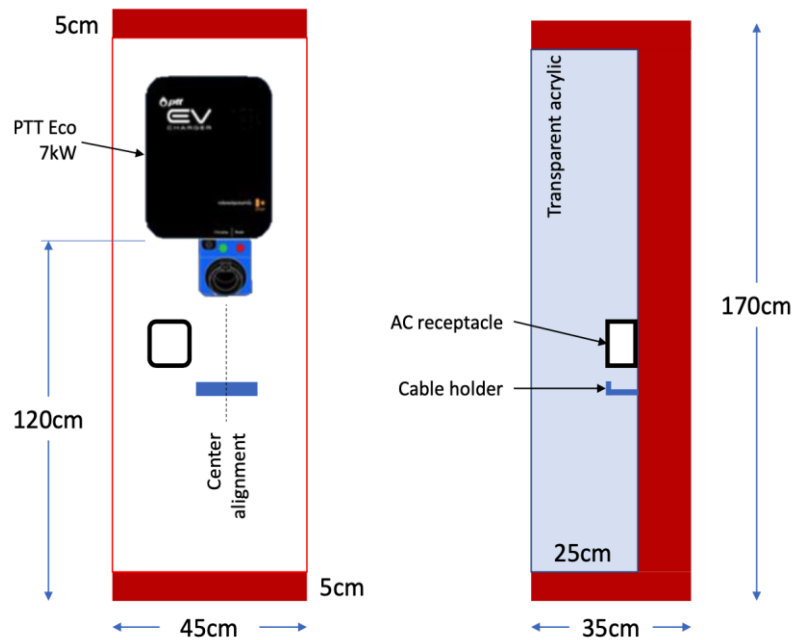
รูปที่ 1-5 พื้นที่ติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้า

แท่นติดตั้ง charger ประกอบด้วย

- 1) PTT Eco 7kW
- 2) AC receptacle (3pins)
- 3) Charging cable hook
- 4) Stainless steel (SS) structure
- 5) SS or aluminum (Al) plate outer surface
- 6) Acrylic plate side covers

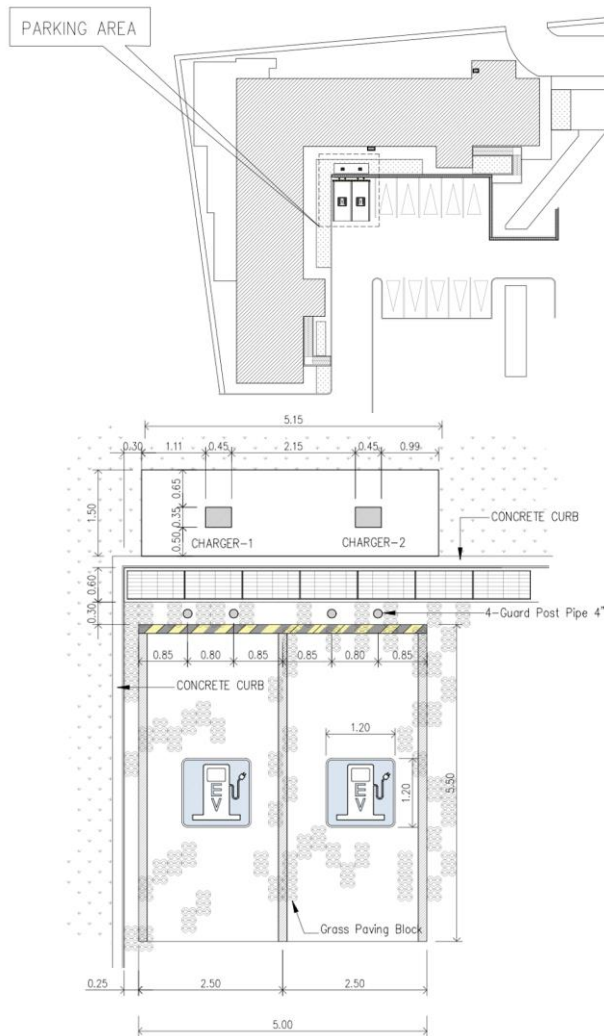
คุณสมบัติของสถานีประจุไฟฟ้า

รุ่น 7kW ECO มีพิกัดกำลัง 7.4 กิโลวัตต์ ทำงานที่กระแส 32 แอมแปร์ ด้วยปลั๊กประจุไฟ type 2 จำนวน 2 เครื่อง พร้อมแท่น พร้อมเชื่อมต่อกับตู้ไฟต้นทางของอาคาร



รูปที่ 1-6 รายละเอียดของแท่นติดตั้ง charger ที่ใช้จริงในโครงการ

จากแบบก่อสร้างดังรูปที่ 1-7 ผู้รับเหมาได้เข้าดำเนินการปรับพื้นที่ เข้าแบบฐาน เทปูน และขัดผิว ต่อด้วยงานเดินท่อสายไฟรอบอาคารให้เรียบร้อย พร้อมร้อยสายไฟ และติดตั้งระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 1-8



รูปที่ 1-7 แบบก่อสร้างของพื้นที่และแทนติด charger



รูปที่ 1-8 การดำเนินการปรับพื้นที่และเข้าแบบฐานเพื่อพร้อมติดตั้ง

1.3.1.4 การตรวจรับ

เมื่อปรับปรุงพื้นที่เรียบร้อยแล้ว พร้อมการติดตั้งแท่นติดตั้ง charger และตัว charger ก็ได้สถานีประจุไฟฟ้า (EV Charging Station) ที่เหมาะสมกับรถไร้คนขับในโครงการ เพื่อใช้ประจุไฟฟ้าให้แก่รถไร้คนขับภายในบริเวณพื้นที่ของสำนักงาน กสทช. ดังรูปที่ 1-9 โดยในการตรวจรับ ประกอบด้วยการตรวจสอบการติดตั้งวงจรจ่ายไฟ พร้อมทดสอบด้วย EV tester (ดังรูปที่ 1-10) เพื่อยืนยันระยะเวลาตัดกระแสไฟฟ้ารั่ว ความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้า และการใช้งานบัตร RFID โดยเพื่อความปลอดภัย และความสะดวกในการใช้งาน ทางโครงการได้ประสานกับผู้รับเหมาเพื่อติดตั้งป้าย และวิธีใช้งาน พร้อมทั้ง Emergency contact ทั้งที่บริเวณ charger และบริเวณตู้ EVDB ดังรูปที่ 1-11



รูปที่ 1-9 สถานีประจุไฟฟ้า (EV Charging Station) ที่เสร็จสิ้นและตรวจรับเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 1-10 การทดสอบเครื่อง charger ด้วย EV Tester สำหรับเครื่องทั้งสองตัว สถานะ ผ่าน ทั้งสองตัว



รูปที่ 1-11 การติดตั้งป้ายและวิธีใช้งาน พร้อมทั้ง emergency contact ทั้งที่บริเวณ charger และบริเวณตู้ EVDB

1.3.2 การนำเข้ารถอัตโนมัติ

กิจกรรมด้านการจัดหายานยนต์อัตโนมัติ และอุปกรณ์ที่ดำเนินการ มีดังนี้

1. ในเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2564 ได้ทำสัญญาซื้อรถอัตโนมัติกับบริษัท TRON ENERGY TECHNOLOGY CORPORATION ประเทศไต้หวัน เพื่อจัดซื้อรถอัตโนมัติจำนวน 3 คัน ได้แก่ Turing OPAL T1 จำนวน 1 คัน และ Turing OPAL T2 จำนวน 2 คัน
2. ในช่วงเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 บริษัทผู้ขายได้จัดส่งรถอัตโนมัติทั้ง สามคัน มายังประเทศไทย ด้วยการขนส่งทางเรือ มายังท่าเรือแหลมฉบัง โดยรถถึงท่าเรือแหลมฉบังใน ช่วงสัปดาห์ที่ 4 ของเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2564
3. ทางคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการในขั้นตอนการขอละเว้นภาษีนำเข้า ตั้งแต่ช่วงเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 - มีนาคม พ.ศ. 2565
 - 1) 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564 จัดทำ และส่งหนังสือลงนามโดยอธิการบดี ถึง รมว. กระทรวง อว. เพื่อขอให้พิจารณาอนุมัติโครงการวิจัยเพื่อใช้ประกอบการรับรองการยกเว้นอากรสำหรับของที่นำมาเพื่อการศึกษา และวิจัย ซึ่งต้องใช้ในการขออนุมัติการละเว้นภาษีจาก คณะกรรมการพิจารณายกเว้นอากรนำเข้าสื่อ วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ทางการศึกษา (กระทรวงศึกษาธิการ)
 - 2) 29 ธันวาคม พ.ศ. 2564 ได้รับการอนุมัติโครงการวิจัยเพื่อใช้ประกอบการรับรองการยกเว้นอากรสำหรับของที่นำมาเพื่อการศึกษา และวิจัยจาก รมว.อว.
 - 3) มกราคม - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 ดำเนินการทำเรื่องเพื่อเสนอยังคณะกรรมการพิจารณายกเว้นอากรนำเข้าสื่อ วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ทางการศึกษา (กระทรวงศึกษาธิการ) เพื่อขอยกเว้นอากรนำเข้า ตามมาตรา 12 แห่งพระราชกำหนดพิกัด อัตราศุลกากร พ.ศ. 2530 และทำการแก้ไขเอกสารต่างๆตามที่ได้รับการข้อเสนอแนะจากเลขานุการคณะกรรมการฯ

- 4) 27 มกราคม พ.ศ. 2565 ประชุมหารือกับ ผู้บริหารฯ สำนักงานศุลกากรท่าเรือแหลมฉบัง (สทบ.) เพื่อหารือแนวทางการนำรถอัตโนมัติออกจากท่าเรือฯ โดยเร็วที่สุด
- 5) 9 มีนาคม พ.ศ. 2565 ได้รับการอนุมัติจาก คณะกรรมการพิจารณาขออนุญาตนำเข้าสื่อ วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ทางการศึกษา และ ปลัดกระทรวงศึกษาธิการ
4. เมื่อได้รับหนังสืออนุมัติขออนุญาตจากกระทรวงศึกษาธิการ บริษัท Shipping ดำเนินการขออนุญาตออกจากท่าเรือ
5. 19 มีนาคม พ.ศ. 2565 นำรถออกจากท่าเรือแหลมฉบัง ไปยัง บริษัทคู่ค้าของบริษัท TRON ENERGY TECHNOLOGY CORPORATION ซึ่งจะเป็นสถานที่สำหรับการเก็บรักษาในระหว่างที่มีการตรวจสอบ และดำเนินการเทรนนิ่งการใช้งานรถ



รูปที่ 1-12 การขนส่งรถอัตโนมัติมายังประเทศไทยโดยทางเรือ จากไต้หวัน



รูปที่ 1-13 การเตรียมการขนส่งรถอัตโนมัติออกจากท่าเรือแหลมฉบัง



รูปที่ 1-14 การขนย้ายรถอัตโนมัติ มายังบริษัท Takuni เพื่อเก็บรักษาในระหว่างที่มีการตรวจสอบ และดำเนินการเทรนนิ่งการใช้งานรถ





รูปที่ 1-15 รถอัตโนมัติ Turing รุ่น OPAL T1



รูปที่ 1-16 รถอัตโนมัติ Turing รุ่น OPAL T2

คุณลักษณะของรถ Turing OPAL T1 มีดังนี้

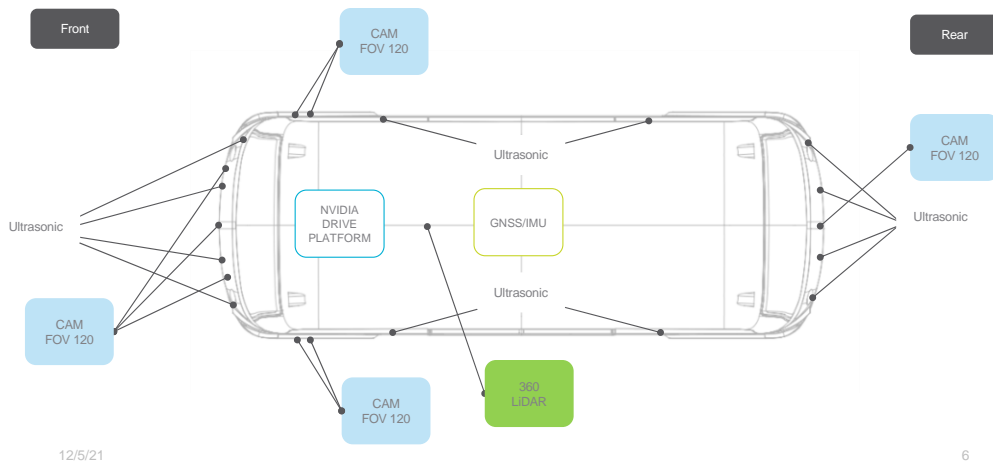
ตารางที่ 1-2 Vehicle Specification ของ Turing OPAL T1

Model		Unit	Turing OPAL
Dimension	Length	mm	4300
	Width	mm	1500
	Height	mm	1965
	Wheelbase	mm	2580
Passenger		pax	8-11
Seats		pcs	8-11
Weight	Curb Weight	kg	1200
Performance	Max. Speed	km/h	28
	Gradeability	%	20
Battery	Trojan T-875	pcs	9
	Type	--	Lead Acid
	Nominal Capacity	Ah	160
	Nominal Voltage	V	72
	On-board charger LL 722oH Input: 220Vca 50/60Hz Output: 72VDC 20A	pcs	1
Motor	Type	--	PM
	Rated Power	kW	7.5
	Peak Power	kW	20
Air conditioner		set	2

ตารางที่ 1-3 Sensor List ของ Turing OPAL T1

Item	Quantity	Model	Specification
Camera	8	Sekonix AR0231	1920*1208, 60/120 FOV
ultrasonic sensor (plus 1 ECU)	12	Whetron IRC-APA-12S-000	Long range mode : 2.5m (ϕ 75mm Pole), CAN BUS*2
Computing Node	1	NVIDIA DRIVE PX2 AF	Tegra Parker 2, GP106*2
GNSS/IMU	1	XSENS MTi-G710	GNSS/INS
LiDAR	1	Velodyne VLP-16	16 bins, 300,000 point/s, 360° Horizontal FOV, $\pm 15^\circ$ Vertical FOV

T1 sensor layout



รูปที่ 1-17 Sensor Layout ของ Turing OPAL T1

คุณลักษณะของรถ Turing OPAL T2 มีดังนี้

ตารางที่ 1-4 Vehicle Specification ของ Turing OPAL T2

Model		Unit	TRN6430
Dimension	Length	mm	4300
	Width	mm	1610



Model		Unit	TRN6430
	Height	mm	2430
	Wheelbase	mm	2894
Passenger		pax	10+2
Seats		pcs	10
Weight	Curb Weight	kg	1374
	Gross Vehicle Weight	kg	2200
Performance	Max. Speed	km/h	40
	Gradeability	%	≥20
Battery	Type	--	Lithium Ion
	Nominal Capacity	Ah	160
	Nominal Voltage	V	72
Motor	Type	--	IM
	Rated Power	kW	7.5
	Peak Power	kW	20
Wheel	Type	--	185 65R15
onboard charging		--	Yes
kW Charging rating		W	1700
Air conditioner		set	1

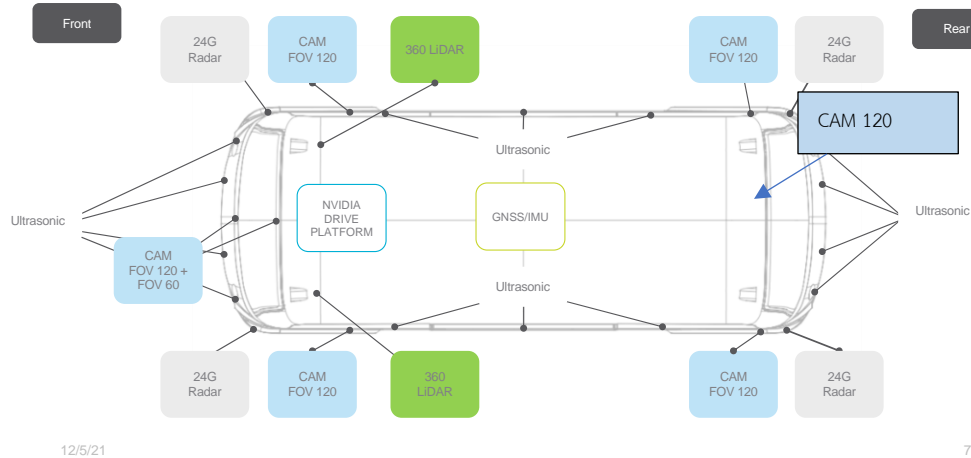
ตารางที่ 1-5 Sensor List ของ Turing OPAL T2

Item	Quantity	Model	Specification
Camera	7	Sekonix AR0231	1920*1208, 60/120 FOV
ultrasonic sensor (plus 1 ECU)	12	Whetron IRC-APA-12S-000	Long range mode : 2.5m (ϕ 75mm Pole), CAN BUS*2
Processing node	1	NVIDIA DRIVE PX2 AF	Tegra Parker 2, GP106*2
GNSS/IMU	1	XSENS MTi-G710	GNSS/INS
LiDAR	2	Velodyne VLP-16	16 bins, 300,000 point/s, 360° Horizontal FOV, \pm 15° Vertical FOV



Radar	4	Smartmicro type 31 antenna 0A0601-1F0600	Max. Range on Pedestrian 20 m. Max. Range on Passenger car 45 m. CAN V2.0b
-------	---	--	--

T2 sensor layout



รูปที่ 1-18 Sensor Layout ของ Turing OPAL T2

1.3.3 การตรวจรับรถอัตโนมัติ และการทดสอบ

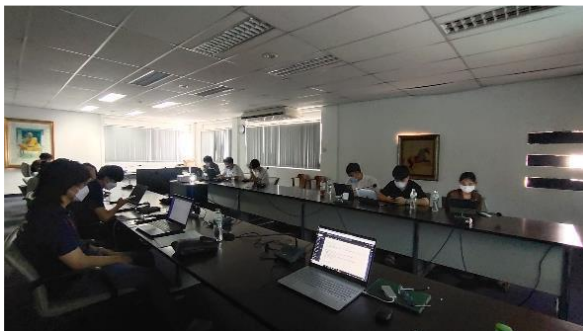
หลังจากที่รถได้ถูกนำออกจากคลังการ และจัดเก็บไว้ที่คู้ค่าของ บริษัท TRON ENERGY TECHNOLOGY CORPORATION คณะวิจัยได้เข้าไปรับการอบรมเกี่ยวกับรถ และระบบต่างๆที่เกี่ยวข้อง และได้ตรวจสอบและรับมอบรถ ตามลำดับเวลาดังนี้

1. 30 เมษายน พ.ศ. 2565 เข้ารับการอบรมจากผู้ผลิต และเตรียมการรับมอบรถ
2. 4 พฤษภาคม พ.ศ. 2565 ตรวจสอบรถ ตามรายละเอียดงาน การทดสอบรถไร้คนขับ ในด้านฟังก์ชันการทำงานของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าระบบเบรก และระบบเลี้ยวของรถ รวมทั้งระบบควบคุมและความปลอดภัยของรถ ในพื้นที่ทดสอบเฉพาะ โดยงานสองส่วนคือ
 - ทดสอบคุณลักษณะและฟังก์ชันการทำงานของรถ ได้แก่ การตรวจสอบการทำงานของ เซนเซอร์ และระบบต่างๆที่เกี่ยวข้อง
 - ทดสอบรถอัตโนมัติเพื่อทราบถึงสมรรถนะ ความปลอดภัย และการทำงานของระบบต่าง ๆ (basic function and performance test) ได้แก่ การทดสอบระบบขับเคลื่อน ระบบเลี้ยว ระบบเบรก และระบบขับอัตโนมัติของรถ

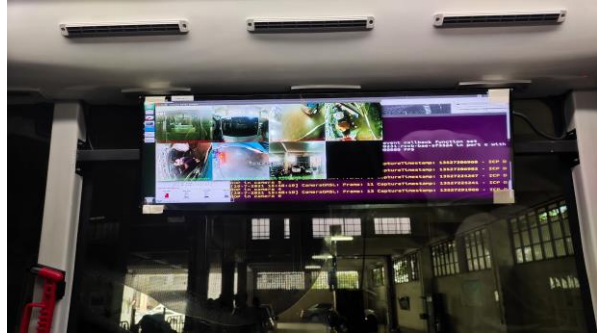
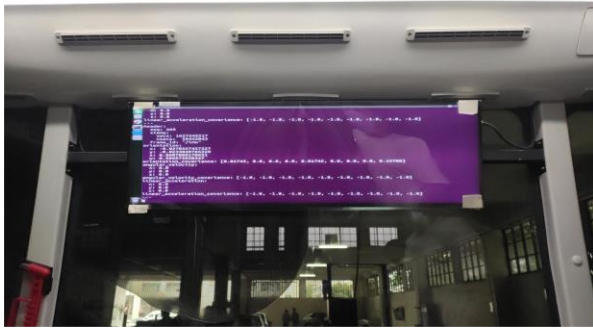


จากการตรวจสอบพบว่าเป็นไปตามข้อมูล และคุณลักษณะของรถที่บริษัทระบุไว้ จึงรับมอบรถทั้ง สามคัน

3. 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2565 นำรถมายังจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเริ่มงานในกิจกรรมของโครงการ
4. มิถุนายน พ.ศ. 2565 ทดสอบรถไร้คนขับ ในด้านฟังก์ชันการทำงานของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าระบบเบรก และระบบเลี้ยวของรถ รวมทั้งระบบควบคุมและความปลอดภัยของรถ ในพื้นที่ทดสอบเฉพาะที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทดสอบระบบการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า รถทั้งสองรุ่นสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ตามค่าที่ระบุมา คือ รถรุ่น T1 ได้ความเร็วสูงสุด 28 กิโลเมตรต่อชั่วโมง รถรุ่น T2 ได้ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ด้านการเบรกของรถ ทำการทดสอบที่ความเร็วต่างๆ เพื่อวัดระยะเบรก และตรวจสอบการทรงตัวของรถ ที่ความเร็วต่างๆ ภายในช่วงความเร็วที่จะใช้วิ่งรถอัตโนมัตินี้ ได้แก่ ความเร็วไม่เกิน 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่า มีระยะเบรกของรถทั้งสองรุ่น ใกล้เคียงกัน คือ ใช้ระยะเบรก 2 เมตร เมื่อวิ่งด้วยความเร็ว 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ 3 เมตร เมื่อวิ่งด้วยความเร็ว 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ และผลการทดสอบการเลี้ยว พบว่า รถรุ่น T1 มีวงเลี้ยวต่ำสุด 7.2 เมตร ส่วนรถรุ่น T2 มีวงเลี้ยวต่ำสุด 8 เมตร ส่วนการควบคุม ได้ทำการทดสอบการใช้ Joy stick ในการควบคุมรถ และการควบคุมการเปิดปิดประตูรถ พบว่าสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย Joy stick มีการตอบสนองที่เร็วเพียงพอในการควบคุมรถ ไม่พบอาการ Delay ของสัญญาณควบคุม



รูปที่ 1-19 แสดงการเข้ารับการอบรมจากผู้ผลิต และเตรียมการรับมอบรถ (30 เมษายน พ.ศ. 2565)

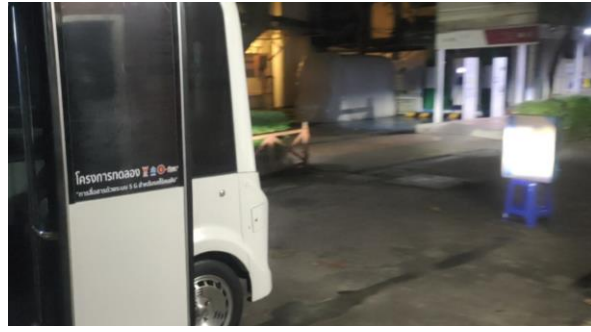


รูปที่ 1-20 แสดงการตรวจสอบการทำงานของรถ ทดสอบคุณลักษณะ และฟังก์ชันการทำงานของรถ (4 พฤษภาคม พ.ศ. 2565)



รูปที่ 1-21 แสดงการ ทดสอบรถอัตโนมัติเพื่อทราบถึงสมรรถนะ ความปลอดภัย และการทำงานของระบบต่าง ๆ ก่อนรับมอบรถ (4 พฤษภาคม พ.ศ. 2565)

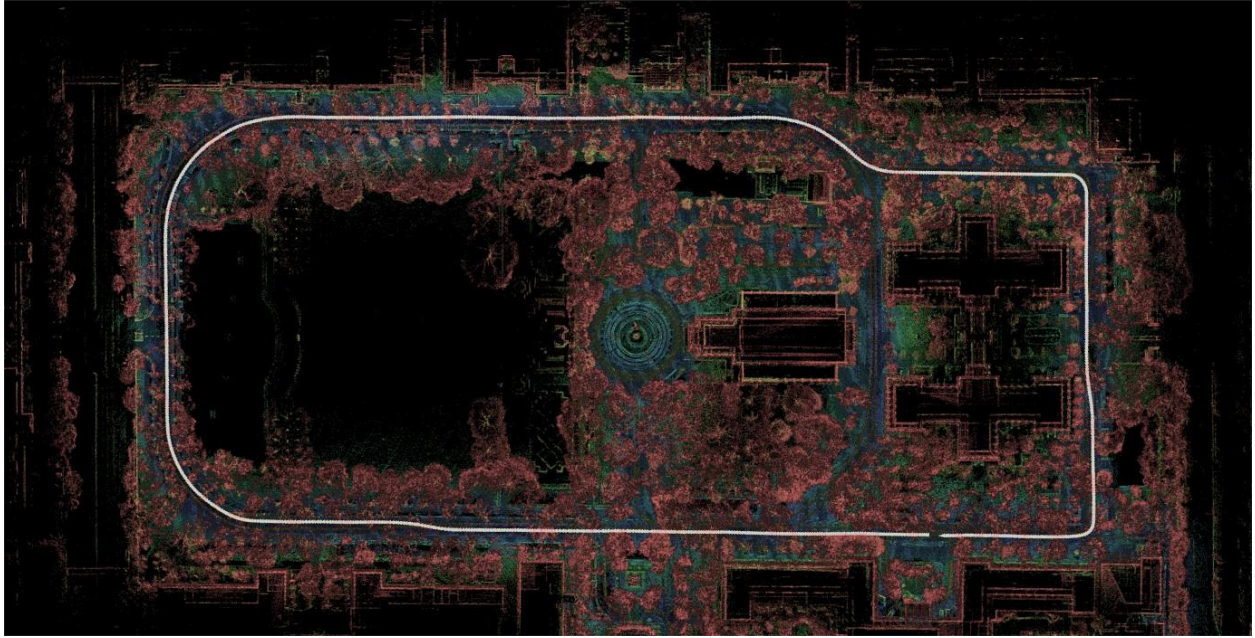




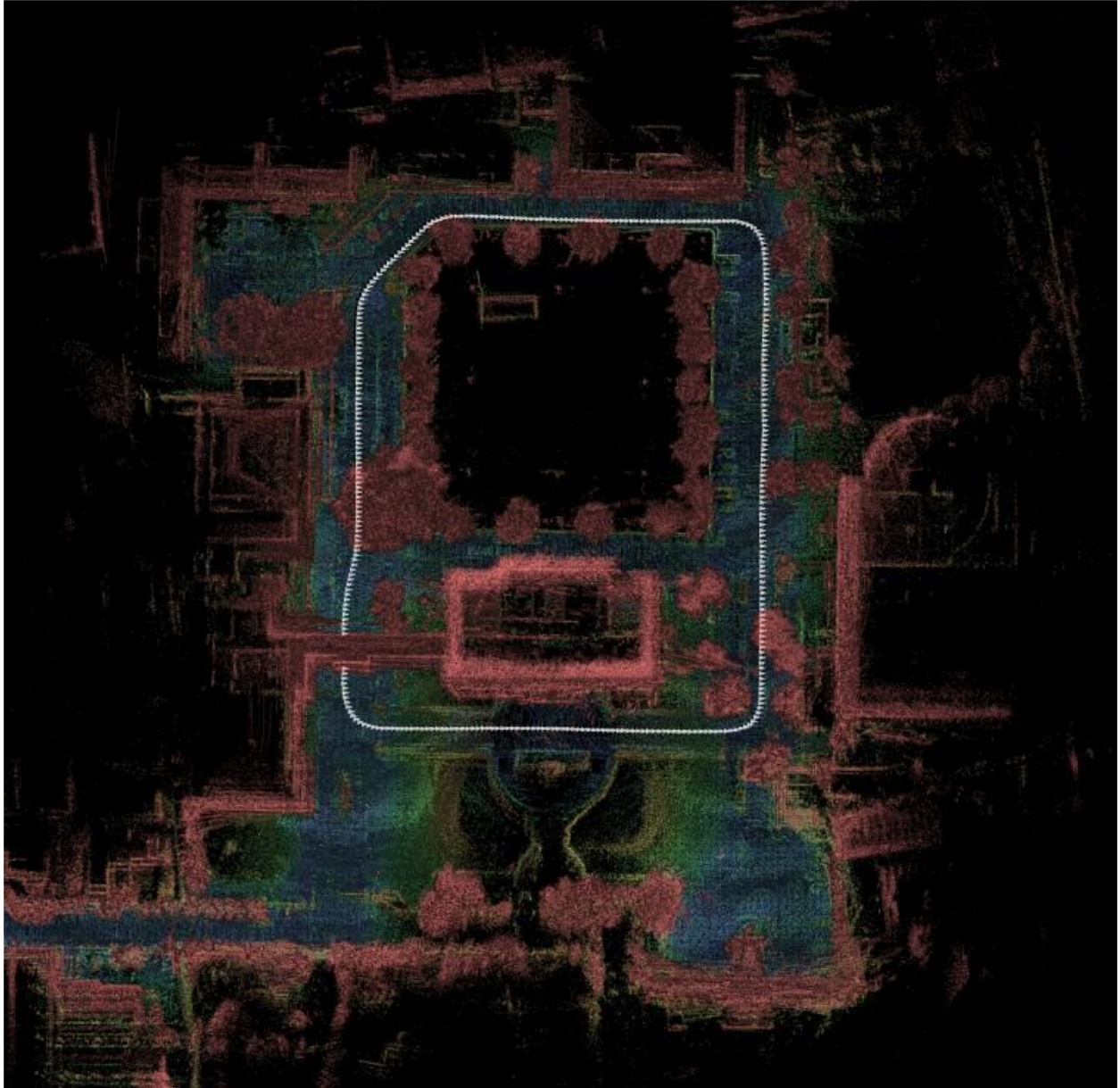
รูปที่ 1-22 แสดงการทดสอบรถอัตโนมัติเพื่อทราบถึงสมรรถนะ ความปลอดภัย และการทำงานของระบบต่าง ๆ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (มิถุนายน 2565)

1.3.4 การพัฒนาระบบควบคุมการขับขี่ (การทดสอบ)

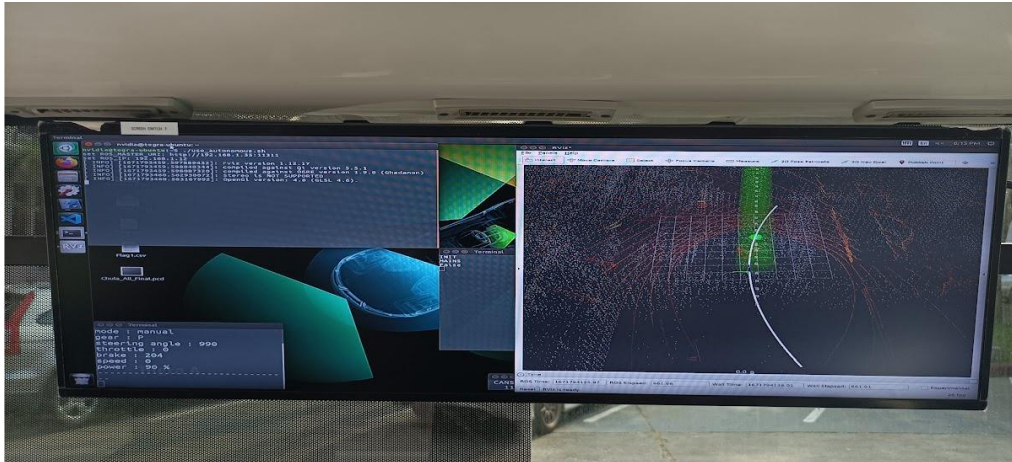
การพัฒนาระบบควบคุมการขับขี่ หมายถึง ระบบควบคุมขั้นสูง (High level control) ของรถอัตโนมัติ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ส่วนระบุตำแหน่ง (Localization) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) และการวางแผนการวิ่ง (Path planning) ซึ่งเกี่ยวกับการควบคุมการขับขี่ ในโครงการนี้ใช้โปรแกรม โอเพ่นซอร์ส (Open source program) AUTOWARE ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ ROS (Robot Operating System) ในระบบควบคุมขั้นสูงนี้ โดยได้มีการปรับค่า และเพิ่มเติมส่วนต่างๆที่จำเป็นลงในโปรแกรม วิธีที่เลือกใช้ในการควบคุมการวางแผนการวิ่งใช้การสร้างจุดเส้นทางการวิ่ง (Waypoint) บนแผนที่ความละเอียดสูงที่สร้างขึ้น โดยการเก็บข้อมูล Waypoint จากการวิ่งรถ และเก็บข้อมูลตามเส้นทาง และทำการตรวจสอบ และปรับตำแหน่ง Waypoint รวมถึงความเร็วของรถที่แต่ละ Waypoint (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บริเวณทางโค้ง) ให้มีความเหมาะสม และปลอดภัยต่อการขับขี่ จากนั้นใช้อัลกอริทึม Pure pursuit ในการควบคุมให้รถวิ่งตาม Waypoint ที่ได้จัดทำไว้ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ รูปที่ 1-23 และ รูปที่ 1-24 เป็น Waypoint บนแผนที่ความละเอียดสูงของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำนักงาน กสทช ซอยสายลม ตามลำดับ และผลลัพธ์แสดงการทำงานของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 1-25 คือ หน้าจอของรถอัตโนมัติ ที่แสดงโปรแกรมควบคุมของรถอัตโนมัติ (ROS / AUTOWARE) ที่ใช้ในโครงการ และรูปที่ 1-26 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม Pure pursuit ที่ใช้ควบคุมการวิ่งตาม Waypoint ที่สร้างบนแผนที่ความละเอียดสูงบนรถอัตโนมัติ



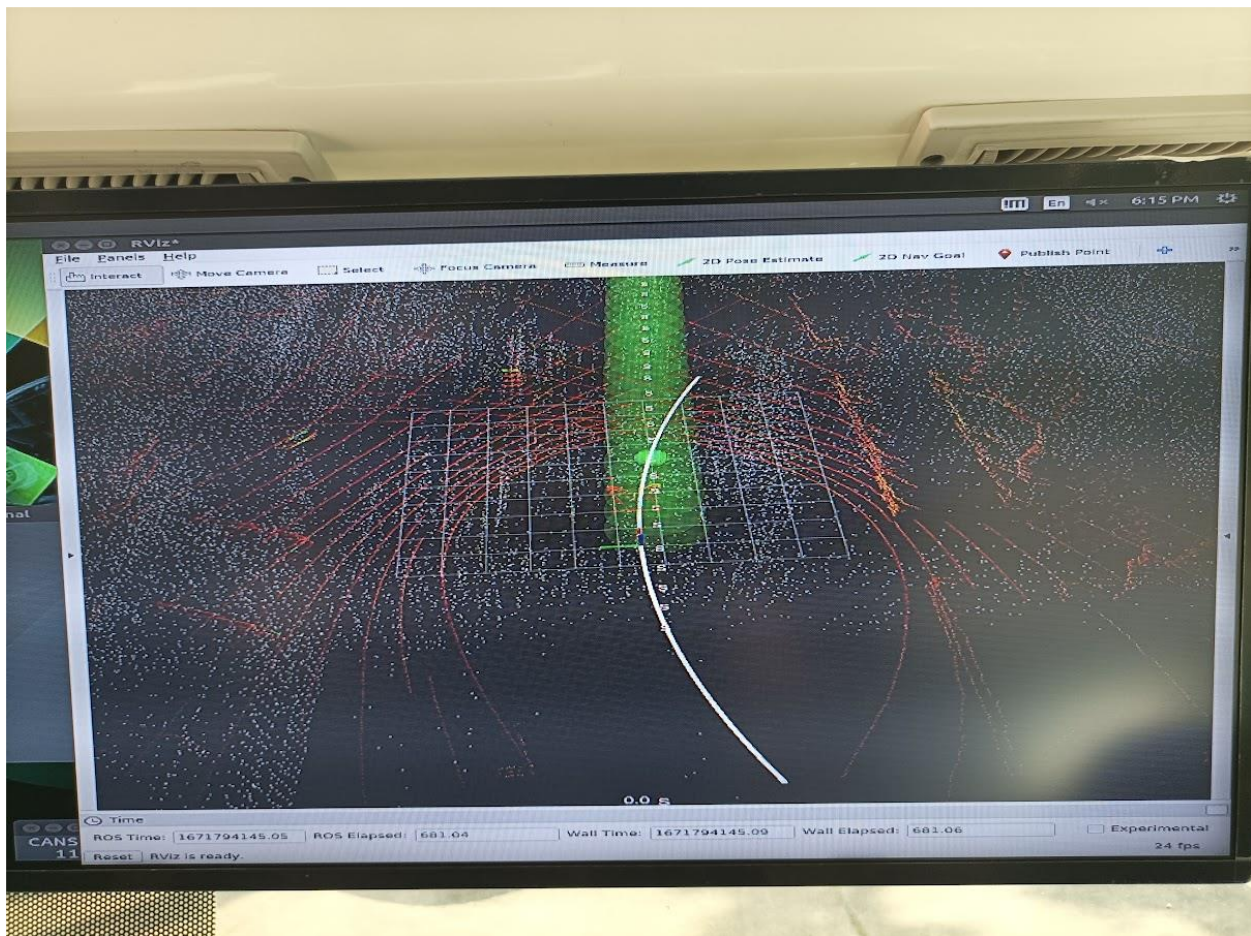
รูปที่ 1-23 แสดง Waypoint (จุดเส้นทางวิ่งของรถอัตโนมัติ) บนแผนที่ความละเอียดสูง ในบริเวณที่ทดสอบ
ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1-24 แสดง Waypoint (จุดเส้นทางวิ่งของรถอัตโนมัติ) บนแผนที่ความละเอียดสูง ในบริเวณที่ทดสอบในสำนักงาน กสทช ชอยสายลม



รูปที่ 1-25 แสดงหน้าจอของโปรแกรมควบคุมของรถอัตโนมัติ (ROS / AUTOWARE)



รูปที่ 1-26 แสดงการทำงานของอัลกอริทึม Pure pursuit ที่ใช้ควบคุมการวิ่งตาม Waypoint ที่สร้างบนแผนที่ความละเอียดสูง



1.3.5 การติดตั้งระบบสื่อสารในรถไร้คนขับ

ระบบสื่อสารในรถไร้คนขับสำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่างรถกับส่วนอื่น ๆ ที่ติดตั้งประจำที่ เช่น VDO Walls หรือ Operation Dashboard โดยผ่านเครือข่ายระบบ 5G ใช้อุปกรณ์สื่อสารชนิด 5G Customer Premise Equipment (CPE) ติดตั้งภายในรถ และใส่บัตรระบุผู้เช่า (SIM card) ซึ่งผู้ให้บริการเครือข่าย (บริษัท AWN) จัดหาให้ โดยตั้งค่าโปรไฟล์ของ SIM card ซึ่งอนุญาตให้สามารถรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ 5G CPE ได้ อุปกรณ์ 5G CPE มีสายอากาศในตัวติดตั้งมาด้วย นอกจากนั้น คณะผู้วิจัยได้ทดลองติดตั้งสายอากาศ ที่มีอัตราขยายสูง ภายนอกตัวรถ บริเวณหลังคาของรถไร้คนขับ 1 คัน และเดินสายนำสัญญาณมาเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ 5G CPE ที่ติดตั้งในรถ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารของการทำงานของสายอากาศทั้ง 2 แบบ สำหรับส่วนอื่น ๆ ที่ต้องการรับส่งข้อมูลกับรถไร้คนขับ เช่น VDO Walls หรือ Operation Dashboard ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ 5G CPE เช่นเดียวกัน

สำหรับเครือข่ายระบบ 5G ที่ใช้ในการทดสอบการสื่อสารสำหรับรถไร้คนขับในโครงการนี้ เป็นเครือข่ายของผู้ให้บริการโทรคมนาคม คือ บริษัท แอดวานซ์ไวร์เลสเน็ตเวิร์ค จำกัด (AWN) ใช้คลื่นความถี่ 2,600 MHz (Band n41) และเป็นเครือข่ายแบบ 5G Stand-alone (SA) โดยบริษัท AWN ได้ช่วยตรวจสอบและปรับปรุงสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ให้มีความครอบคลุม และคุณภาพของสัญญาณดี เพียงพอต่อการทดสอบรถไร้คนขับ ตลอดแนวเส้นทางเดินรถในพื้นที่ที่กำหนด ได้แก่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำนักงาน กสทช.

การทดสอบด้านการสื่อสารด้วยระบบ 5G สำหรับรถไร้คนขับ ในโครงการนี้ ประกอบด้วยการทดสอบ 3 ส่วนหลักๆ คือ

- 1) การทดสอบวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่าย 5G เพื่อให้มั่นใจว่าสัญญาณระบบ 5G ที่ใช้ในการทดสอบการสื่อสารสำหรับรถไร้คนขับ มีความครอบคลุม และคุณภาพของสัญญาณดีเพียงพอตลอดเส้นทางที่ทดสอบรถไร้คนขับ
- 2) การทดสอบอุปกรณ์สื่อสาร 5G CPE เพื่อวัดค่าลักษณะเฉพาะ (Characteristics) ในการรับส่งสัญญาณระบบ 5G เพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์สามารถทำงานได้ตามที่มาตรฐานกำหนด และใช้ผลการวัดทดสอบเป็นค่าอ้างอิงสำหรับข้อกำหนดของอุปกรณ์สื่อสารระบบ 5G ที่จะนำมาใช้งานสำหรับรถไร้คนขับในอนาคต
- 3) การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ระหว่างรถไร้คนขับ และอุปกรณ์ปลายทางที่อยู่ประจำที่ โดยพิจารณาพารามิเตอร์หลัก 3 ด้าน ได้แก่ อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput) ความหน่วงเวลา (Latency) และอัตราการสูญเสียกลุ่มข้อมูล (Packet loss) เพื่อนำมาวิเคราะห์และประเมินศักยภาพและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติในการประยุกต์ใช้งานเครือข่ายระบบ 5G สำหรับการสื่อสารของรถไร้คนขับในอนาคต

1.3.6 การออกแบบ Use cases

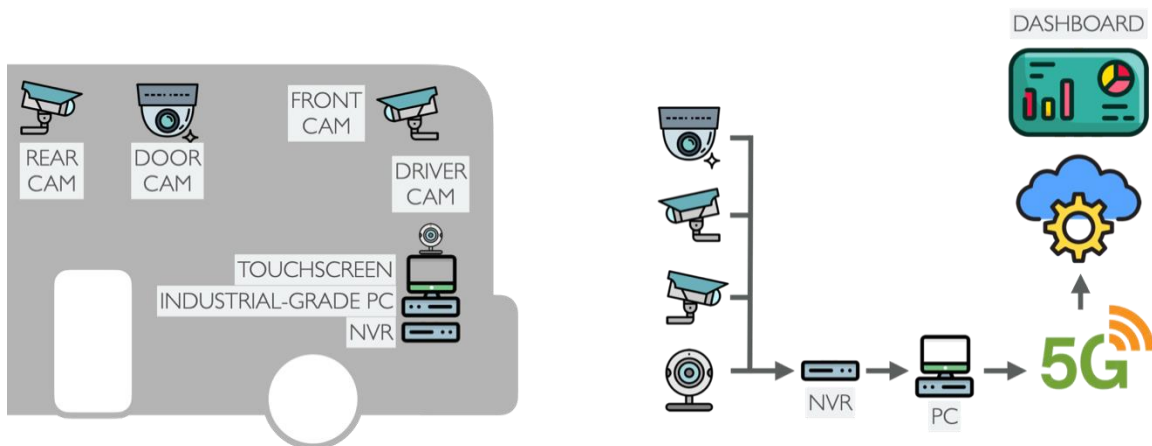
การออกแบบและพัฒนา Use Cases ของการนำเทคโนโลยีการสื่อสาร 5G มาใช้กับรถไร้คนขับ จัดทำขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และความปลอดภัยของระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติผ่านการแบ่งปันข้อมูลผ่านการติดต่อสื่อสารระหว่างรถยนต์กับรถยนต์ (V2V: Vehicle-to-Vehicle) การติดต่อสื่อสารระหว่างรถยนต์กับโครงสร้างพื้นฐาน



(V2I: Vehicle-to-Infrastructure) และการติดต่อสื่อสารระหว่างรถยนต์กับเครือข่าย (V2N : Vehicle-to-Network) ที่เกี่ยวกับโปรแกรมประยุกต์ด้านความปลอดภัย เช่น

- การส่งสัญญาณเตือนการเกิดอุบัติเหตุโดยใช้การสื่อสารระหว่างรถยนต์กับรถยนต์โดยตรงหรือการติดต่อสื่อสารระหว่างรถยนต์กับรถยนต์ผ่านโครงสร้างพื้นฐาน (V2I2V: Vehicle-to-Infrastructure-to-Vehicle)
- การตรวจจับอาการง่วงนอนหรือหลับในของผู้ขับขี่ผ่านการประมวลผลภาพ (Driver Drowsiness Detection by Image Processing)







นอกจากนี้ทางโครงการยังได้ออกแบบสถาปัตยกรรม Vehicular-Edge-Cloud Computing ขึ้นเพื่อเป็นแบบอย่างสำหรับการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI: Artificial Intelligence), การเรียนรู้ของเครื่อง (ML: Machine Learning), การสื่อสาร 5G และรถขับเคลื่อนอัตโนมัติมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน ดังรูปที่ 1-27 โดยมีคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการดังแสดงในตารางที่ 1-6






รูปที่ 1-27 สถาปัตยกรรม Vehicular-Edge-Cloud Computing

ตารางที่ 1-6 รายการอุปกรณ์

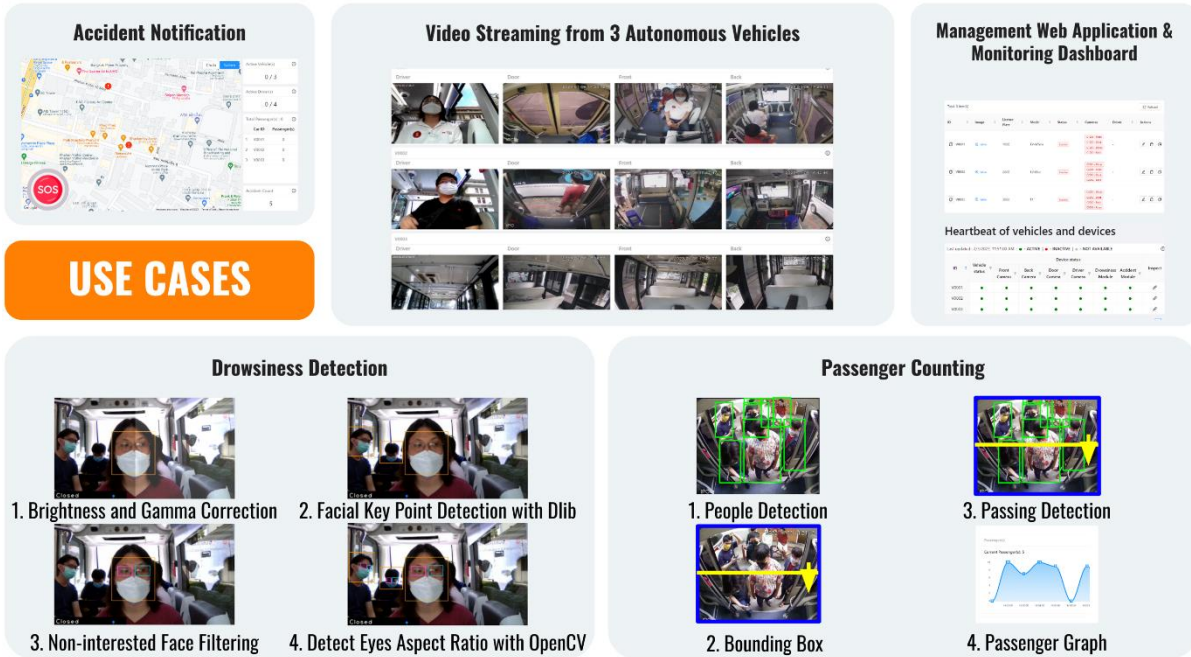
	รายการ	รูปภาพอุปกรณ์
1	กล้องติดในรถ ตำแหน่งด้านหน้า [Dahua IPC-HFW5541EP-ZE]	

	รายการ	รูปภาพอุปกรณ์
2	กล้องติดในรถ ตำแหน่งด้านหลัง [Dahua IPC-HFW5541EP-ZE]	
3	กล้องติดในรถ ตำแหน่งประตู เพื่อนับจำนวนผู้โดยสารขึ้นลงจากรถ [Dahua IPC-HDBW5541EP-ZE]	
4	อุปกรณ์บันทึกและประมวลผล AI-NVR และจ่ายไฟผ่าน Ethernet [Dahua NVR4104HS-P-4K2S/L]	
5	กล้องติดในรถ ตำแหน่งผู้ขับขี่ เพื่อดูอาการง่วงนอนของผู้ขับขี่ [ASUS ROG EYE S - Streaming Camera]	
6	Industrial PC ติดตั้งภายในรถเพื่อประมวลผล [Kingdel / i7-10870H / 8GB DDR4 / 256GB SSD / GTX 1650 4GB GDDR6]	
7	DC-AC Power Inverter ติดตั้งภายในรถเพื่อแปลงไฟ [NV 12V 3500W Pure Sine]	

	รายการ	รูปภาพอุปกรณ์
8	Full HD - Touch Screen ติดตั้งภายในรถเพื่อแสดงผล [WaveShare 15.6 1080p Capacitive Touch screen]	
9	Notebook Asus [TUF Gaming Dash F15 FX506HM-HN008T]	
10	Notebook Acer [Swift 3 SF314-511-77A6]	

โดยในโครงการนี้ได้ออกแบบ Use Cases เป็น 5 โมดูล ได้แก่

- 1) โมดูลนับจำนวนผู้โดยสาร (Passenger Counting Module)
- 2) โมดูลสตรีมมิ่งวิดีโอหลายแหล่ง แบบเรียลไทม์ (Real-time Multi-video Streaming Module)
- 3) โมดูลตรวจจับอาการง่วงนอน (Drowsiness Detection Module)
- 4) โมดูลแจ้งเตือนการเกิดอุบัติเหตุ (Accident Notification Module)
- 5) เว็บไซต์แอปพลิเคชันการจัดการ และแดชบอร์ดสำหรับสังเกตการณ์ (Management Web Application and Monitoring Dashboard)

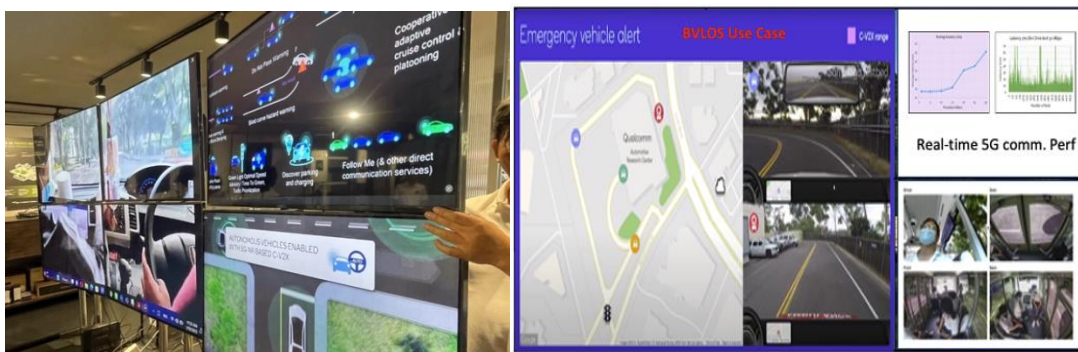


รูปที่ 1-28 Use Cases ภายในโครงการ

1.3.7 การจัดหา และติดตั้งระบบแสดงผล

ระบบแสดงผลเป็นศูนย์กลางแสดงผล และสถานะการดำเนินงานของ

- รถยนต์ไร้คนขับในโครงการ ซึ่งในที่นี้คือ ยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ จำนวน 3 คัน
- ประสิทธิภาพการสื่อสาร
- Use cases



รูปที่ 1-29 ของศูนย์บัญชาการรถยนต์ไร้คนขับ

โครงการทำการติดตั้ง Video Wall เพื่อใช้สำหรับแสดงผล และสถานะการดำเนินงาน ณ ศูนย์บัญชาการรถไร้คนขับ โดยที่ Video Wall ประกอบด้วยหน้าจอขนาด 55 นิ้ว จำนวน 6 จอ แบบ 6x2 Video Wall ขนาดใหญ่ที่ติดตั้งนี้ จะช่วยตอบสนองต่อการควบคุม และส่งยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในโครงการ ฝ้าตรวจสอบสถานะการทำงานของรถแต่ละคัน เช่น เซนเซอร์ประจำรถ สถานะของแบตเตอรี่ HD Map หรือ วิดีโอ



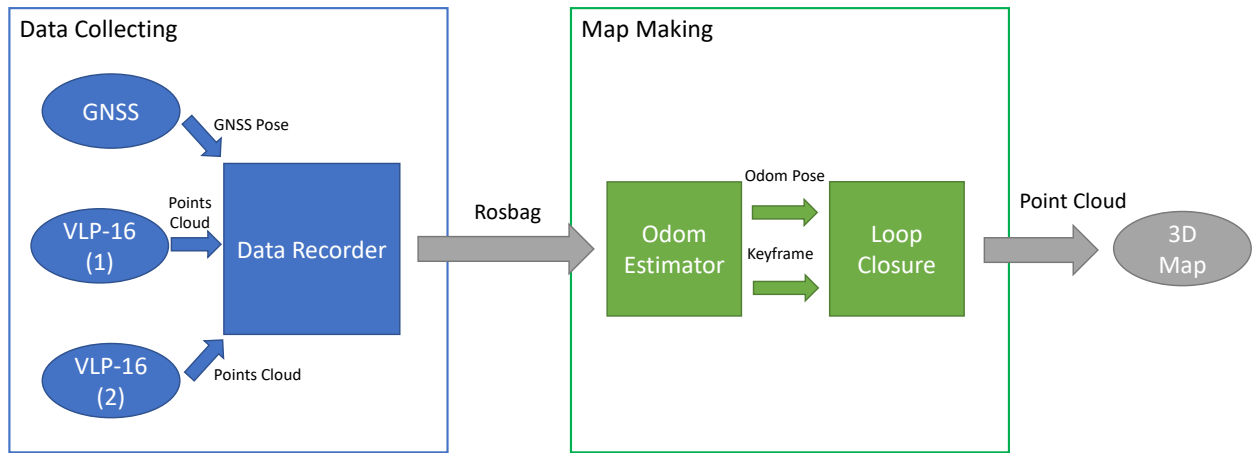
ประจำรถ ฝ้าดูสถานะของการติดต่อสื่อสาร 5G ทั้งแบบ online และ offline เพื่อวางแผน และปรับปรุง ประสิทธิภาพของการติดต่อสื่อสาร ตำแหน่งของรถไร้คนขับในพื้นที่ทดสอบ (สาธารณะ) โปรแกรมประยุกต์ด้าน ความปลอดภัย เช่น การเตือนภัยการเกิดอุบัติเหตุ การเฝ้าตรวจแจ้งเตือนผ่านการสื่อสารนอกแนวสายตา (BVLOS) หรือ การตรวจจับอาการง่วงนอน เป็นต้น

Video Wall ควบคุมด้วย HDMI Switcher (8 HDMI inputs และ 8 HDMI outputs) โดยเชื่อมต่อ โดยตรงผ่านช่องสัญญาณ HDMI กับ Server ทั้ง 3 Servers ได้แก่ ยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ Driving safety และ BVLOS โดยสามารถปรับการแสดงผลของแต่ละ Server ให้มีขนาดใหญ่เล็กบน Video wall ได้ตามต้องการ

ในอนาคต Video Wall จะช่วยประเมิน และเพิ่มประสิทธิภาพ C-V2X ได้โดยการเพิ่มจำนวน Server ของ Application หรือ Use cases อื่น ๆ Video Wall จะช่วยประมวลผลชุดข้อมูลที่ซับซ้อนของ C-V2X หรือ ตรวจสอบสถานะการฝึกฝน AI ในการตรวจจับวัตถุ หรือ ควบคุมขบวนรถยนต์ไร้คนขับ ตลอดจนเพิ่มประสิทธิภาพ ในการวางแผน และการกำหนดนโยบายที่ดีขึ้น

1.3.8 การจัดทำ HD Map

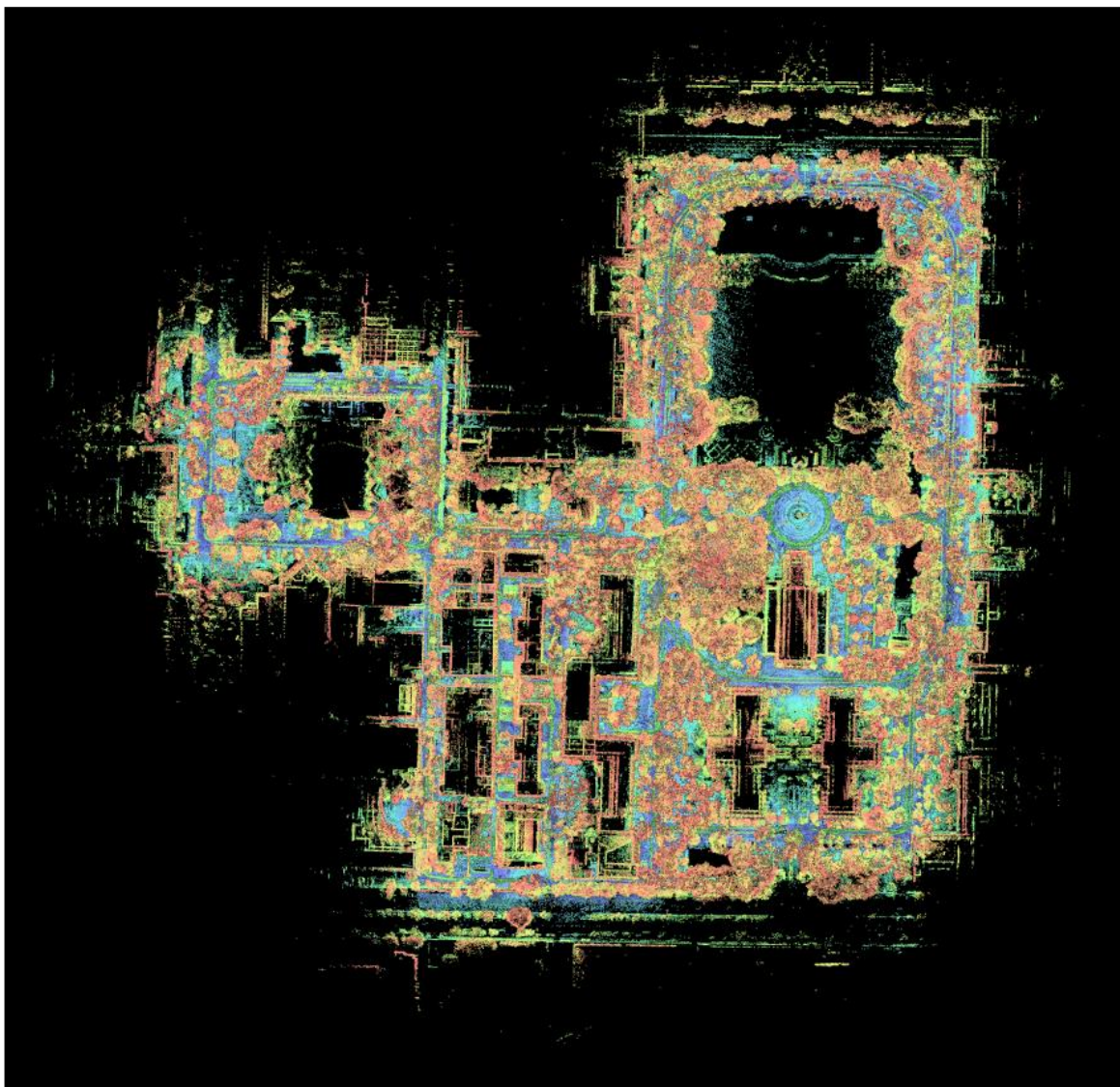
ในโครงการได้จัดทำแผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ สำนักงาน กสทช ซอยสายลม โดยมีกระบวนการสร้างแผนที่ความละเอียดสูง (HD map) ดังแสดงในรูปที่ 1-30 คือ เก็บข้อมูลจาก LiDAR จำนวน 2 ตัวที่ติดตั้งบนรถ และข้อมูลพิกัดจากเซนเซอร์ระบุตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม นำร่อง (GNSS) แล้วนำข้อมูลที่จัดเก็บจากการวิ่งรถในบริเวณที่ต้องการทำแผนที่ฯ ดังแสดงในรูปที่ 1-31 เก็บในรูปแบบของไฟล์ Rosbag ที่ใช้ในระบบปฏิบัติการ ROS (Robot Operating System) ที่ใช้ในรถอัตโนมัติ จากนั้น ในกระบวนการสร้างแผนที่ จะนำข้อมูลจาก Rosbag มาผ่านการประมวลผลพิกัดและปิดรูปแผนที่ แล้วจึงสร้างแผนที่สามมิติในรูปแบบ Point cloud ขึ้น ซึ่งเป็นแผนที่ความละเอียดสูงที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง (Localization) และวางแผนการวิ่ง (Path planning) ของรถอัตโนมัติต่อไป ผลลัพธ์ของแผนที่ ความละเอียดสูง ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ สำนักงาน กสทช ซอยสายลม ดังแสดงในรูปที่ 1-32 ถึงรูปที่ 1-35



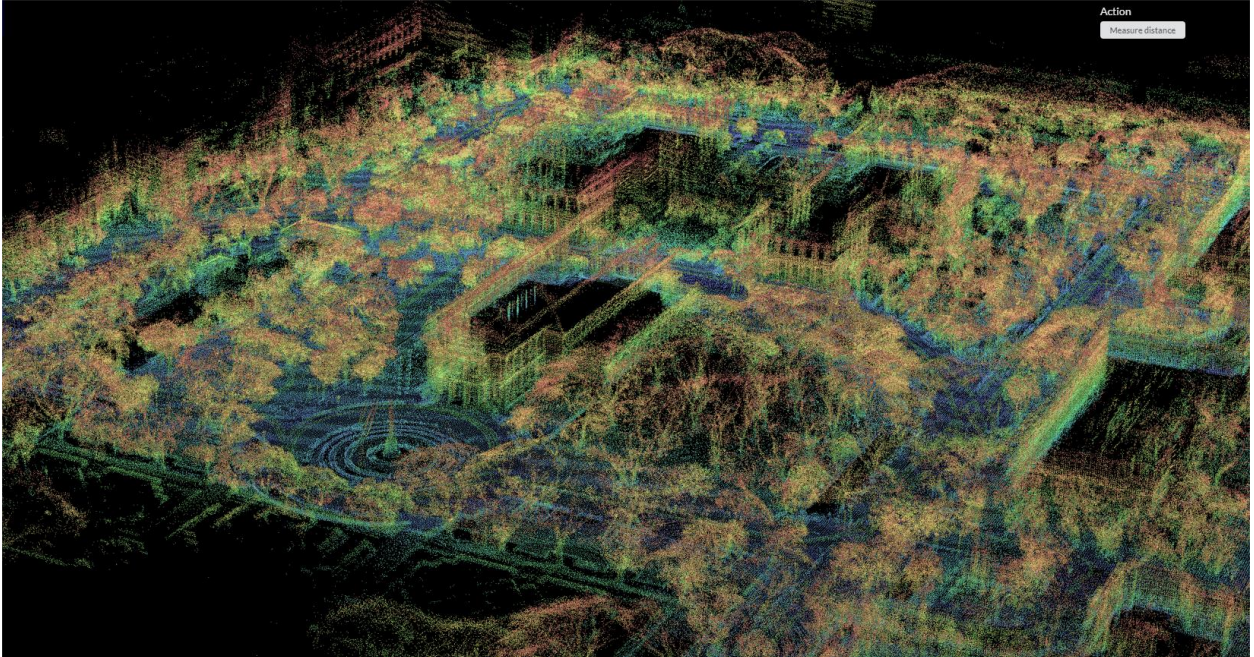
รูปที่ 1-30 กระบวนการสร้างแผนที่ความละเอียดสูง (HD Map)



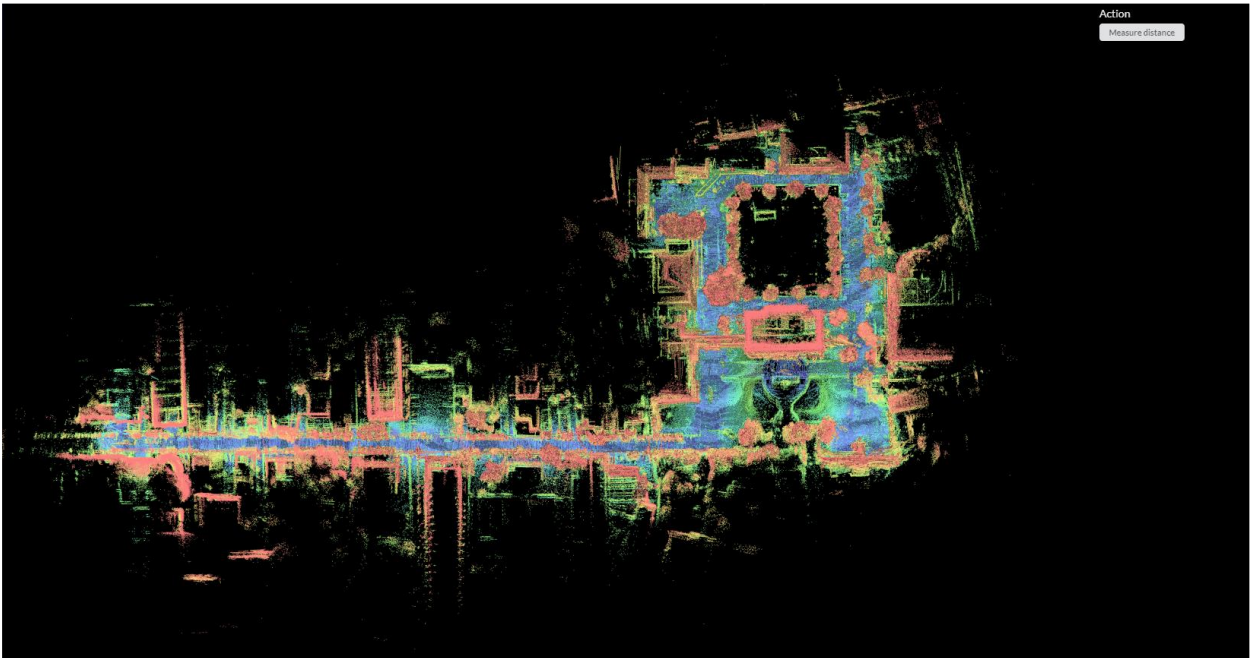
รูปที่ 1-31 รถที่ใช้เก็บข้อมูล เพื่อทำแผนที่ความละเอียดสูง ที่ภายใน สำนักงาน กสทช และ ซอยสายลม



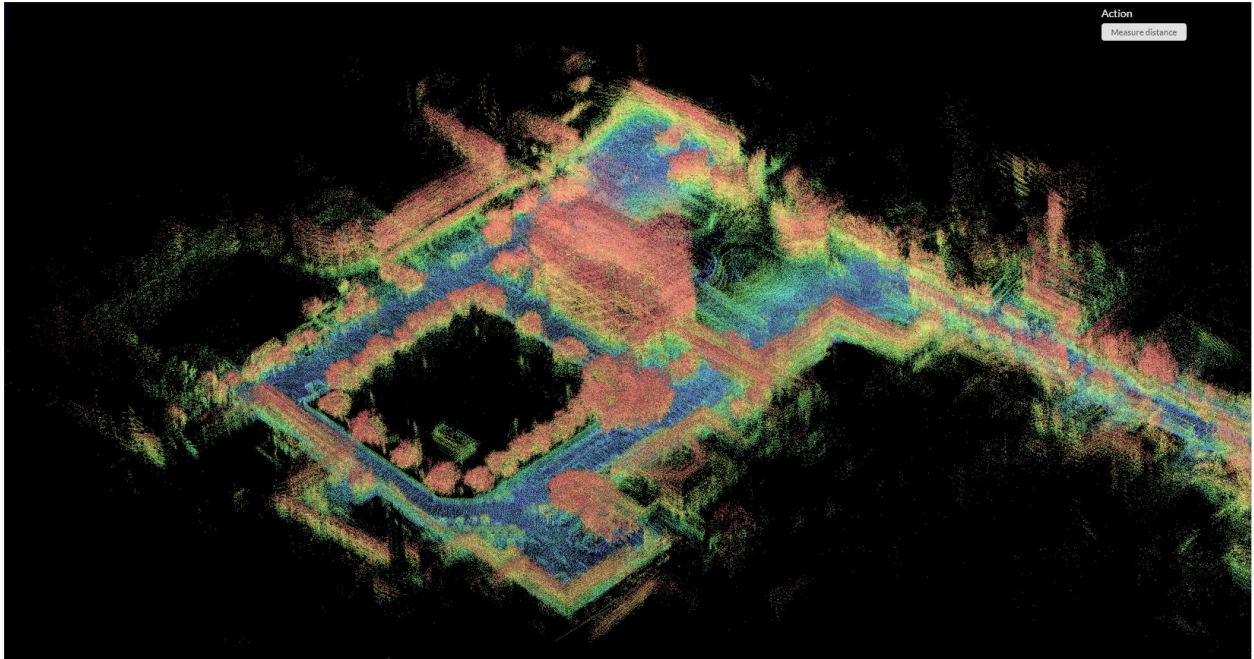
รูปที่ 1-32 แผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สร้างขึ้นในโครงการ



รูปที่ 1-33 แผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สร้างขึ้นในโครงการ



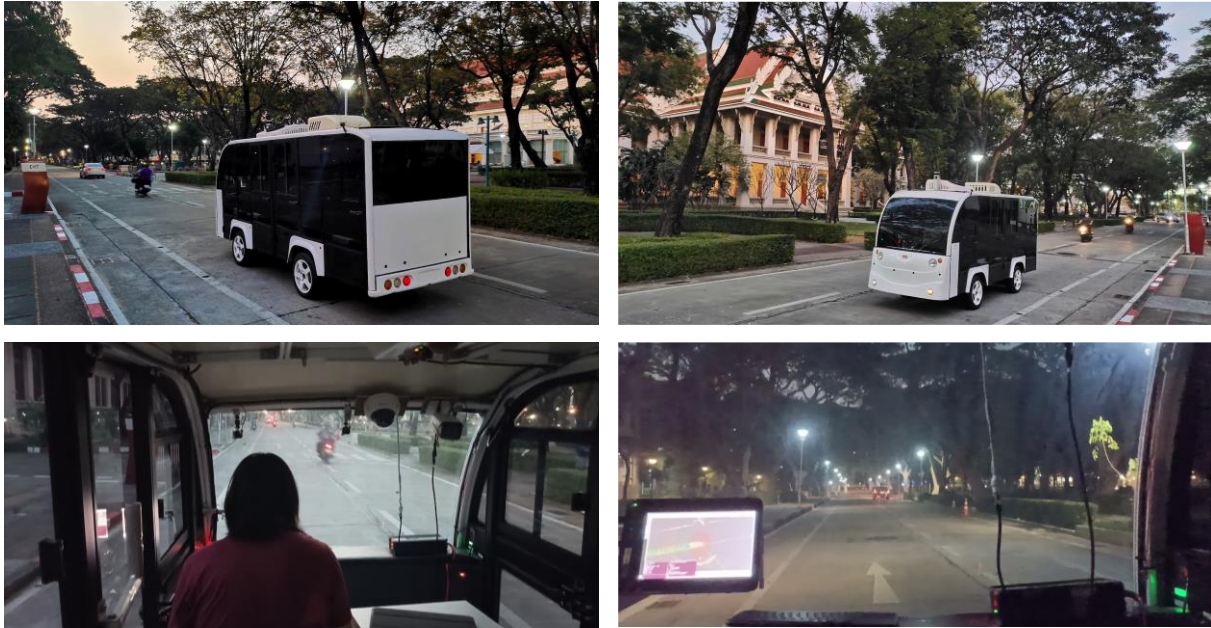
รูปที่ 1-34 แผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) บริเวณสำนักงาน กสทช และ ซอยสายลม ที่สร้างขึ้นในโครงการ



รูปที่ 1-35 แผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) บริเวณสำนักงาน กสทช และ ซอยสายลม ที่สร้างขึ้นในโครงการ

1.3.9 การทดสอบการใช้งานจริง (ขยายความในบท 3)

การทดลองการใช้งานจริงของรถต้นแบบได้ดำเนินการ ทั้งในบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ สำนักงาน กสทช ซอยสายลม โดยดำเนินการทั้งในช่วงเวลากลางคืน และกลางวัน เพื่อคำนึงถึงความปลอดภัย ในการทดสอบ โดยมีผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) และผู้ช่วย (Safe driver assistance) ทำหน้าที่ ดำเนินการทดลองตลอดเวลา และเก็บข้อมูลของรถ เช่น ตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง และโหมดการขับขี่ (แบบอัตโนมัติ หรือแบบ Manual) ไปด้วย ภาพการทดลองในทั้งสองบริเวณ แสดงในรูปที่ 1-36 ถึงรูปที่ 1-41 และ ในช่วงที่มีการทดสอบร่วมกับ ระบบ Operation dashboard (VDO Wall) ได้ดำเนินการเก็บข้อมูล ความเร็ว และความหน่วงเวลา (Latency) ของการดาวน์โหลดข้อมูลที่ Operation dashboard ไปด้วย ดังแสดงใน รูปที่ 1-42 โดยข้อมูลที่มีการส่งมายัง Operation dashboard จากรถแต่ละคัน ประกอบด้วย ตำแหน่งรถ ความเร็ว เปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ (SOC) โหมดการขับขี่ (Manual or Auto) กล้องหน้า และหลังของรถ และข้อมูลจาก LiDAR ของรถ (รถ T1 มี LiDAR 1 ตัว รถT2 มี LiDAR 2 ตัว)



รูปที่ 1-36 การทดสอบรถอัตโนมัติ T1 ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1-37 การทดสอบรถอัตโนมัติ T2-W ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1-38 การทดสอบรถอัตโนมัติ T2-B ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

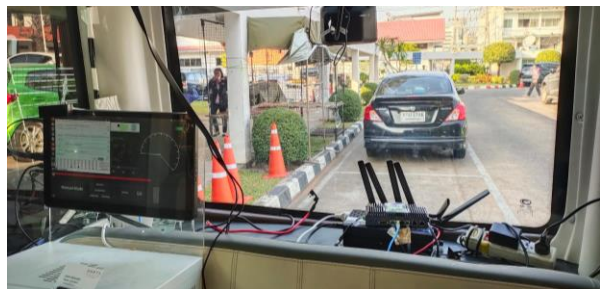


รูปที่ 1-39 การทดสอบรถอัตโนมัติ T1 ภายในสำนักงาน กสทช





รูปที่ 1-40 การทดสอบรถอัตโนมัติ T2-W ภายในสำนักงาน กสทช



รูปที่ 1-41 การทดสอบรถอัตโนมัติ T2-B ภายในสำนักงาน กสทช

Operation Dashboard



รูปที่ 1-42 แสดงระบบ Operation Dashboard ของรถอัตโนมัติ

ทั้งนี้ผลการทดลองจะแสดงในบทที่ 3 ของรายงานฉบับนี้

1.3.10 การทดสอบนำรถต้นแบบไปให้บริการรับส่งผู้โดยสารในพื้นที่ทดสอบ

การทดสอบให้บริการรับส่งผู้โดยสารในพื้นที่ทดสอบ ได้ดำเนินการโดยการนัดหมายผู้สนใจ รวมถึงการสาธิตการทำงานของรถต้นแบบรับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติด้วย โดยส่วนใหญ่ผู้เข้าร่วมเป็นนิสิต และบุคลากรของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมถึงแขกที่มาเยี่ยมชมที่ศูนย์วิจัยฯ ภาพการทดสอบฯ ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำนักงาน กสทช แสดงในรูปที่ 1-43 และ รูปที่ 1-44 โดยคณะวิจัยได้ออกแบบ Operational design domain (ODD) ของการวิ่งทดสอบฯ โดยคำนึงถึงความปลอดภัย รายละเอียดเพิ่มเติมจะอยู่ใน บทที่ 3 ของรายงานฉบับนี้ และผลการทดลองฯ พบว่า ไม่มีอุบัติเหตุเกิดขึ้นแต่อย่างใด และผู้ร่วมทดลองนั่งไม่รู้สึกรไม่ปลอดภัยขณะนั่งในรถ



รูปที่ 1-43 ภาพการทดสอบการนำรถต้นแบบในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารในบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1-44 ภาพการทดสอบการนำรถต้นแบบในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารในบริเวณ สำนักงาน กสทช



1.3.11 การจัดงานสาธิตการทำงานของรถรับส่งผู้โดยสารไร้คนขับ (Demo Day)



รูปที่ 1-45 แสดงงานสาธิตการทำงานของ รถรับส่งผู้โดยสารไร้คนขับ และผลลัพธ์เบื้องต้นจากโครงการ การทดลองการสื่อสารด้วยระบบ 5G สำหรับรถไร้คนขับ (15 กันยายน พ.ศ. 2565)

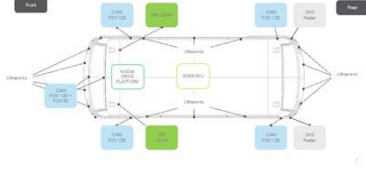


Demonstration of Autonomous Shuttle @Chulalongkorn University 15/09/2022



ODD:

- Low speed automated vehicle in predefined route at CU campus
- Autonomous mode will be operated between Shuttle pod bus stop and brief stop location
- Safe driver will operate vehicle manually anytime for safety
- Safe driver must confirm for safety before start autonomous mode at bus stop / brief stop
- Total Demo route distance: 1.2 km
- Autonomous route distance: 0.65 Km
- Max speed: 10 km/h
- No. of passenger: 5-6
- No. of staff : 3



รูปที่ 1-46 งานสาธิตการทำงานของรถรับส่งผู้โดยสารไร้คนขับ ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (15 กันยายน พ.ศ. 2565)



บทที่ 2

สรุปการทบทวนวรรณกรรมด้านการสื่อสารและรถไร้คนขับ

2.1 เทคโนโลยีและการพัฒนา Autonomous Vehicle (AV)

2.1.1 ส่วนประกอบของเทคโนโลยี Connected and Autonomous Vehicle (CAV)

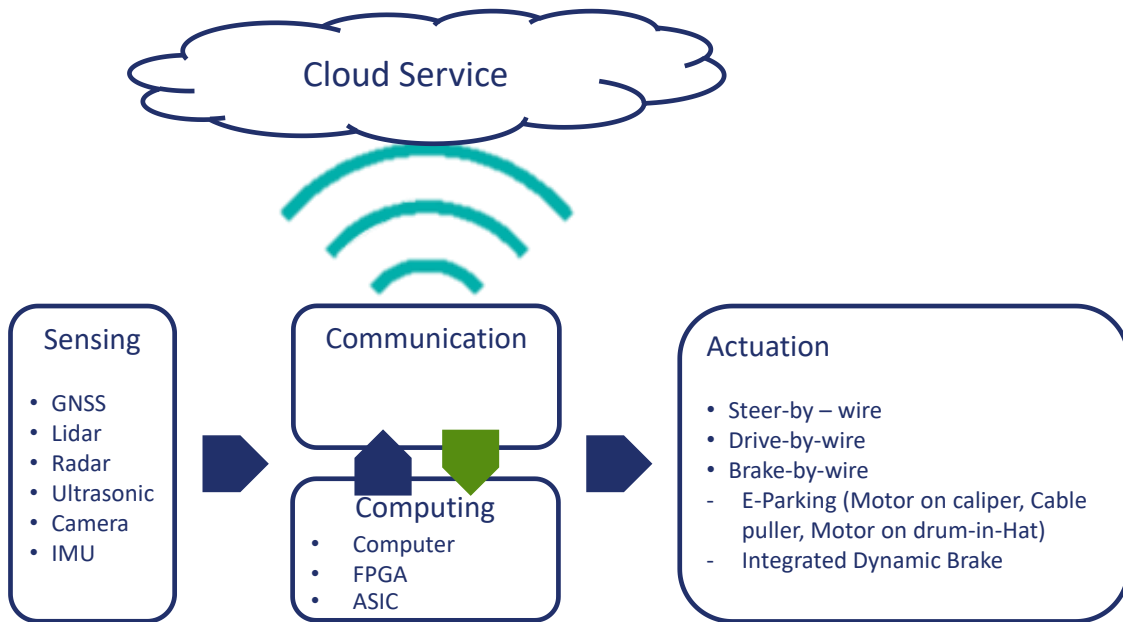
เทคโนโลยี CAV คือ เทคโนโลยี ยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Autonomous vehicle) และ มีการเชื่อมต่อกับสิ่งต่าง ๆ (Connected vehicle) ในภาพกว้างๆ จะประกอบไปด้วย 5 ส่วนหลักดังแสดงในรูปที่ 2-1 คือ

- **ระบบตรวจจับ (Sensing)** ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ตรวจจับสิ่งต่าง ๆ รอบรถ อาทิ ระบบดาวเทียมนำร่อง (Global Network Satellite System: GNSS) ระบบตรวจจับแสงและวัดระยะ (Light Detection And Ranging System: LiDAR) ระบบตรวจจับเป้าหมายระยะไกลด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Detection and Ranging: Radar) เซนเซอร์ที่ใช้สำหรับตรวจจับวัตถุต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการสะท้อนของคลื่นความถี่เสียง (Ultrasonic) กล้อง อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็ว (Odometry sensors) และ อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (Inertia Mass unit: IMU) โดยส่วนใหญ่ในยานยนต์อัตโนมัติจะมีระบบตรวจจับหลายระบบทำงานร่วมกัน (Sensor fusion system)
- **ระบบสื่อสาร (Communication)** เป็นส่วนที่ใช้สื่อสารระหว่างรถกับสรรพสิ่ง (Vehicle-to-everything: V2X) อาทิ การติดต่อสื่อสารระหว่างรถยนต์กับรถยนต์ (V2V: Vehicle-to-Vehicle) โครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) (V2I) และ คลาวด์ (Cloud) (V2C หรือ V2N) เป็นต้น การสื่อสารนี้จะช่วยให้สามารถเพิ่มความปลอดภัยของยานยนต์อัตโนมัติได้มากขึ้น เนื่องจากสามารถรับข้อมูลที่อยู่ นอกเหนือระยะที่ระบบตรวจจับในรถสามารถวัดค่าได้จากรถหรือโครงสร้างพื้นฐานอื่น ๆ
- **ระบบบริการผ่านคลาวด์ (Cloud Service)** คือ ระบบการประมวลผลหรือการจัดเก็บข้อมูลของผู้ใช้งาน ที่ถูกจัดเก็บบนเครื่องเซิร์ฟเวอร์ ซึ่งข้อมูลจำนวนมากจากยานยนต์ทั้งที่เป็นยานยนต์อัตโนมัติในระดับชั้นต่าง ๆ (Vehicle telematics system) จะถูกส่งขึ้นไปประมวลผล จัดเก็บ และแบ่งปันกับยานยนต์อื่น ๆ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่ เพิ่มประสิทธิภาพของระบบจราจร ลดการใช้พลังงาน และลดปล่อยมลพิษ เป็นต้น
- **ระบบประมวลผล (Computing)** เป็นส่วนประมวลผลสำหรับยานยนต์อัตโนมัติ ซึ่งมีการติดตั้งโปรแกรมซอฟต์แวร์ในการติดต่อสื่อสารกับระบบต่าง ๆ ประมวลผลข้อมูล และคำนวณค่าต่าง ๆ ในระบบที่เกี่ยวข้อง เช่น ระบบรับรู้สภาพแวดล้อม (Perception system) ซึ่งทำหน้าที่รับข้อมูลจากระบบตรวจจับต่าง ๆ มาประมวลผลเพื่อให้ทราบถึงสภาพแวดล้อมรอบๆรถในขณะนั้น และในขณะเดียวกันระบบระบุตำแหน่ง (Localization system) จะประมวลผลให้ทราบถึงตำแหน่งของรถบนแผนที่ความละเอียดสูง และระบบวางแผนการเคลื่อนที่ของรถ (Path planning system) จะคาดการณ์และตัดสินใจควบคุมการเคลื่อนที่ของรถที่เหมาะสมกับสภาวะขณะนั้นและส่งการไปยังระบบกระตุ้น



การทำงาน (Actuation system) ที่เกี่ยวข้อง ระบบประมวลผลส่วนใหญ่จะเป็นคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง หรือระบบประมวลผลที่ออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับใช้กับยานยนต์อัตโนมัติ

- **ระบบกระตุ้นการทำงาน (Actuation)** เป็นส่วนที่ทำหน้าที่กระทำการควบคุมการบังคับเลี้ยว ความเร็ว และเบรก ของรถผ่านการสั่งการด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า (Steer-By-wire, Drive-by-wire, Brake-by-wire system) และยังรวมถึงส่วนบังคับควบคุมอื่น ๆ ของรถที่สั่งการด้วยสัญญาณไฟฟ้าเพื่อช่วยเสริมการทำงานของรถ เช่น การปรับตัวของไฟหน้ารถแบบแปรผัน (Adaptive headlamp) การควบคุมเสถียรภาพของรถด้วยการควบคุมโมเมนต์การหมุนรถโดยตรง (Direct Yaw moment control) โดยการใช้อมอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2-1 ส่วนประกอบของเทคโนโลยี Connected and Autonomous Vehicle (CAV)

2.1.2 ระดับขั้นของระบบขับขี่อัตโนมัติ






















ระดับขั้นของระบบขับขี่อัตโนมัติที่จัดแบ่งโดยสมาคมวิศวกรรมยานยนต์นานาชาติ (Society of Automotive Engineers International: SAE International) ดังแสดงในรูปที่ 2-2 สามารถแบ่งออกได้เป็นระดับขั้นที่ 0 ถึง 5 มีรายละเอียด คือ

ตารางที่ 2-1 ระดับขั้นของระบบขับขี่อัตโนมัติ

ระดับขั้น	รายละเอียดของระบบอัตโนมัติในรถ
0	ไม่มีระบบช่วยเหลือใด ๆ ในรถ คนขับต้องเป็นผู้รับผิดชอบในการขับขี่ทั้งหมด

ระดับขั้น	รายละเอียดของระบบอัตโนมัติในรถ
1	ผู้ขับขี่ยังเป็นผู้รับผิดชอบในการขับขี่ทั้งหมด แต่มีระบบช่วยเตือนหรือช่วยเหลือในการขับขี่ (Advanced Driver Assistant System: ADAS) เบื้องต้นหนึ่งระบบ เช่น ระบบควบคุมความเร็วและเบรก อาทิเช่นระบบควบคุมความเร็วแบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive Cruise control: ACC) ระบบเบรกฉุกเฉินอัตโนมัติ (Autonomous Emergency Brake: AEB) หรือ การควบคุมให้อยู่ในช่องจราจร เช่น ระบบแจ้งเตือนการออกนอกช่องจราจรโดยไม่ตั้งใจ (Lane Departure Warning) หรือ ระบบช่วยรักษาให้รถอยู่ในช่องจราจรโดยอัตโนมัติ (Lane Keeping Assistance: LKA) เป็นต้น
2	ผู้ขับขี่รับผิดชอบการขับขี่เป็นส่วนใหญ่ มีบางช่วงที่อาจละสายตา หรือการควบคุมได้ในช่วงสั้นๆ ไม่ถึง 1 นาที ซึ่งอาจเกิดได้จากการที่ผู้ขับขี่ใช้โทรศัพท์มือถือ เหม่อลอย หลับใน เป็นต้น โดยจะมีระบบช่วยเหลือในการขับขี่ที่สามารถช่วยควบคุมรถได้ในช่วงนั้น (Pilot assistance) ซึ่งมีระบบ ADAS ที่ทำงานร่วมกันเป็นส่วนสำคัญของระบบ เช่น ระบบควบคุมความเร็วแบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive Cruise Control: ACC) ระบบเบรกฉุกเฉินอัตโนมัติ (Automatic Emergency Brake: AEB) และระบบรักษาตำแหน่งในช่องจราจร (Lane Keeping Assistance: LKA) ทำงานร่วมกัน ในระบบ Pilot assistance ทำให้รถยังอยู่ในช่องจราจรและรักษาความเร็วและระยะห่าง ไม่ให้ชนรถคันหน้าได้ เป็นต้น
3	ระบบสามารถขับรถยนต์แทนคนได้ในบางสถานะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในถนนที่มีความซับซ้อนของการจราจรไม่สูงมากนัก และได้รับการยินยอมให้ใช้งานรถยนต์อัตโนมัติได้ เช่น ทางด่วน ถนนขนาดใหญ่ หรือช่องจราจรพิเศษ (Dedicated lane) เป็นต้น ผู้ขับขี่มีหน้าที่ต้องเข้าควบคุมรถแทนที่ระบบ ในสถานะที่ระบบขับขี่อัตโนมัติไม่สามารถทำงานได้ หรือเมื่อสิ้นสุดเขตถนนที่สามารถใช้งานระบบขับขี่อัตโนมัติดังกล่าวได้
4	ระบบสามารถขับขี่แทนคนได้ทั้งหมด ในเกือบทุกสถานะของถนนและการจราจร แต่คนยังต้องนั่งอยู่ในรถโดยไม่ต้องรับภาระการควบคุมรถแต่อย่างใด นอกจากเหตุฉุกเฉินเท่านั้น
5	ระบบสามารถขับขี่แทนคนได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่จำเป็นต้องมีคนนั่งอยู่ในรถ รถยนต์ไม่จำเป็นต้องมี คันเร่ง คันเบรก หรือ พวงมาลัย อีกต่อไป การที่รถยนต์อัตโนมัติสามารถวิ่งโดยไม่มีคนนั่งในรถ ทำให้สามารถใช้รถในบริการแบบใหม่ได้หลากหลายขึ้น และสามารถเพิ่มการใช้งานรถได้มากขึ้นด้วย เช่น ใช้รถเป็นแท็กซี่อัตโนมัติ (Robo Taxi) หรือเป็นรถส่งของอัตโนมัติ (Autonomous Delivery Vehicle) เป็นต้น

For on-road vehicles

		 Human driver	 Automated system		
		Steering and acceleration/deceleration	Monitoring of driving environment	Fallback when automation fails	Automated system is in control
Human driver monitors the road	0 NO AUTOMATION				N/A
	1 DRIVER ASSISTANCE				SOME DRIVING MODES
	2 PARTIAL AUTOMATION				SOME DRIVING MODES
Automated driving system monitors the road	3 CONDITIONAL AUTOMATION				SOME DRIVING MODES
	4 HIGH AUTOMATION				SOME DRIVING MODES
	5 FULL AUTOMATION				

รูปที่ 2-2 ระดับชั้นของระบบขับขี่อัตโนมัติที่จัดแบ่งโดยสมาคมวิศวกรยานยนต์นานาชาติ (Society of Automotive Engineers International: SAE International) (STEINLAW, 2019)

เมื่อพิจารณาระดับชั้นของระบบขับขี่อัตโนมัติ (ตารางที่ 2-1 และรูปที่ 2-2) พบว่า ในระดับชั้นที่ 1 และ 2 ระบบที่ติดตั้งในรถจะเป็นระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูง (Advanced Driver Assistant System: ADAS) ซึ่งมีหลายระบบ อาทิ

- **ระบบควบคุมความเร็วแบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive Cruise control: ACC)** เป็นระบบที่ช่วยควบคุมความเร็วของรถตามที่ตั้งค่าไว้ และปรับความเร็วโดยอัตโนมัติให้เท่ากับรถคันหน้าที่กำลังวิ่งด้วยความเร็วช้ากว่า โดยระบบ ACC จะรักษาระยะห่างถึงคันหน้าให้เหมาะสมเพื่อความปลอดภัยอีกด้วย ACC บางระบบสามารถทำงานได้จนถึงความเร็วต่ำค่าหนึ่ง เช่น 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แล้วระบบจะตัดการทำงาน ผู้ขับขี่ต้องควบคุมความเร็วของรถและระยะถึงรถคันหน้าด้วยตัวเอง ในขณะที่ ACC บางระบบสามารถทำงานได้จนถึงความเร็วเป็นศูนย์ และสามารถออกตัวโดยอัตโนมัติ เมื่อรถคันหน้าเริ่มเคลื่อนตัว (Stop-and-go ACC) รูปแบบของระบบตรวจจับ (Sensing system) และระบบกระตุ้นการทำงาน (Actuation) ของรถยนต์บริษัทต่าง ๆ มีหลากหลายรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2-2 พบว่า ส่วนใหญ่จะใช้ระบบตรวจจับประกอบไปด้วย เรดาร์ระยะไกล (Long range Radar) และกล้อง 1 ตัว

เป็นอย่างน้อย ในหลายบริษัทใช้กล้องแบบสเตอริโอ (Stereo camera) ส่วนระบบกระตุ้นการทำงานจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนควบคุมความเร็วของรถด้วยสัญญาณไฟฟ้า (Drive-by-wire system) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแบบ ลีนปีกผีเสื้อไฟฟ้า (Electronic Throttle) และระบบควบคุมเบรกด้วยสัญญาณไฟฟ้า (Brake-by-wire system) ซึ่งมีใช้แพร่หลายอยู่ 2 แบบ คือ แบบใช้มอเตอร์ออกแรงกดที่เบรคคาลิปเปอร์ (Motor on caliper) และแบบที่ใช้การควบคุมที่ควบรวมไปกับระบบควบคุมเบรกป้องกันล้อล็อก (Integrated brake control)








- **ระบบเบรกฉุกเฉินอัตโนมัติ (Autonomous Emergency Brake: AEB)** เป็นระบบช่วยเหลือให้รถสามารถเบรกโดยอัตโนมัติเมื่อระบบสามารถตรวจจับรถยนต์ จักรยาน คนเดินถนน และวัตถุอื่น ๆ ที่ระบบรองรับ ในระยะที่ใกล้จนมีความเสี่ยงที่จะเกิดการชน โดยในช่วงแรกระบบจะแจ้งเตือนให้ผู้ขับขี่ทำการเบรก แต่เมื่อเวลาผ่านไปชั่วขณะแล้วยังไม่มีการเบรกจากผู้ขับขี่ ระบบจะเริ่มเบรกโดยใช้ความหน่วงเริ่มต้น แต่หากผู้ขับขี่ยังไม่กระทำการใดๆ ระบบจะทำการเบรกเต็มที่ (Full brake) ในช่วงสุดท้ายเพื่อหลีกเลี่ยงการชน รูปแบบของระบบตรวจจับ (Sensing system) และระบบกระตุ้นการทำงาน (Actuation) ของรถยนต์บริษัทต่าง ๆ มีหลากหลายรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2-3 พบว่าระบบตรวจจับ (Sensing system) และระบบกระตุ้นการทำงาน (Actuation) มักจะใช้ระบบร่วมกันกับระบบ Adaptive Cruise Control (ACC) แต่ความแตกต่างจะอยู่ในอัลกอริทึมในโปรแกรมควบคุมในหน่วยประมวลผล ในขณะที่ระบบแจ้งเตือน (Warning system) โดยส่วนมากจะเป็นการแจ้งเตือนด้วยเสียง และการแสดงผล (Indicator and Buzzer)
- **ระบบแจ้งเตือนการออกนอกช่องทางจราจรโดยไม่ตั้งใจ (Lane Departure Warning) และระบบช่วยรักษาให้รถอยู่ในช่องทางจราจรโดยอัตโนมัติ (Lane Keeping Assistance: LKA)** เป็นระบบที่ตรวจจับตำแหน่งของรถเทียบกับขอบช่องทางจราจร (Traffic lane) โดยระบบจะใช้กล้องและระบบ image processing ในการตรวจจับขอบของช่องทางจราจร และเทียบกับตำแหน่งรถ เมื่อพบว่ารถอยู่ใกล้กับขอบช่องทางจราจรมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ ระบบจะเตือนให้ผู้ขับขี่ระวังและ ควบคุมรถกลับเข้าสู่ช่องทางจราจร แต่หากไม่มีการตอบสนอง ระบบจะควบคุมระบบพวงมาลัยให้ควบคุมทิศทางรถกลับเข้าสู่ช่องทางจราจรเองโดยอัตโนมัติ ทั้งนี้ระบบจะสามารถทราบได้ว่า รถกำลังออกนอกช่องทางจราจรด้วยความตั้งใจหรือไม่ โดยดูจากสัญญาณไฟเลี้ยวที่ผู้ขับขี่ใช้ขณะเปลี่ยนช่องทาง หากไม่มีการใช้ไฟสัญญาณ ระบบจะทำงาน แต่ทั้งนี้หากผู้ขับขี่เปลี่ยนช่องทางโดยไม่ได้เปิดไฟเลี้ยว ก็สามารถทำได้โดยต้องออกแรงเลี้ยวเพื่อชนะแรงฝืนของมอเตอร์ไฟฟ้าในระบบบังคับเลี้ยว รูปแบบของระบบตรวจจับ (Sensing system) และระบบกระตุ้นการทำงาน (Actuation) ของรถยนต์บริษัทต่าง ๆ มีหลากหลายรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2-4 ระบบตรวจจับทั้งหมดใช้กล้อง แต่มีความหลากหลายในรูปแบบของกล้อง เช่น มีการใช้กล้องเดี่ยวแบบเลนส์เดี่ยว (Single lens camera) และสามเลนส์ (3 lens camera) และกล้องแบบสเตอริโอ










(Stereo camera) และยังพบว่ากล้องที่ใช้อาจเป็นตัวเดียวกับที่ใช้ในระบบ ACC และ AEB หรือไม่ได้ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งการติดตั้งและมุมมองของกล้อง ในระบบกระตุ้นการทำงาน (Actuation) พบว่าส่วนใหญ่ใช้ระบบแบบเดียวกัน คือ ใช้มอเตอร์ช่วยผ่อนแรงด้วยไฟฟ้าในระบบบังคับเลี้ยว (Rack Assisted EPS) ระบบแจ้งเตือน (Warning system) โดยส่วนมากจะเป็นการแจ้งเตือนด้วยเสียง และการแสดงผล (Indicator and Buzzer)

- **ระบบช่วยจอดรถ (Parking Assistance System)** เป็นระบบช่วยจอดรถโดยอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ โดยแบบอัตโนมัติระบบตรวจจับจะตรวจจับช่องจอด และระบบประมวลผลคำนวณเส้นทางการเข้าจอด และควบคุมระบบบังคับเลี้ยวและความเร็ว/เบรก ในบางระบบที่เป็นกึ่งอัตโนมัติผู้ขับขี่จะต้องควบคุม คันเร่งและเบรกเอง โดยระบบจะควบคุมให้เฉพาะพวงมาลัย รูปแบบของระบบตรวจจับ (Sensing system) และระบบกระตุ้นการทำงาน (Actuation) ของรถยนต์บริษัทต่าง ๆ มีหลากหลายรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2-5 ระบบตรวจจับ พบว่า ส่วนใหญ่จะใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic) และกล้อง ส่วนระบบกระตุ้นการทำงาน (Actuation) มักใช้ระบบร่วมกับที่มีอยู่ในระบบอื่น ๆ เช่น LKA ACC AEB เป็นต้น การแจ้งเตือน จะใช้เสียงเป็นตัวเตือนผู้ขับขี่ เมื่อรถเข้าใกล้วัตถุอื่นมากเกินไป








ตารางที่ 2-2 รูปแบบระบบควบคุมความเร็วแบบปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive Cruise control: ACC) ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ (ข้อมูลจาก SAE International)

	SENSING		ACTUATION	
	RADAR	CAMERA	DRIVE-BY-WIRE	BRAKE-BY-WIRE
	Long Range Radar	3 Lens Camera	Electronic Throttle	Motor on caliper
	Long Range Radar	Single Lens Camera	Electronic Throttle	Integrated Brake Control
	Long Range Radar	Single Lens Camera	Electronic Throttle	?
	Long Range Radar	Single Lens Camera	Electronic Throttle	Motor on caliper
	Long Range Radar	3 Lens Camera	E-Powertrain	Motor on caliper
	-	Stereo Camera	Electronic Throttle	?
	Long Range Radar	Single Lens Camera	E-Powertrain	Integrated Brake Control

ตารางที่ 2-3 รูปแบบระบบเบรกฉุกเฉินอัตโนมัติ (Autonomous Emergency Brake: AEB) ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ (ข้อมูลจาก SAE International)

	SENSING		ACTUATION	WARNING
	RADAR	CAMERA		
	Long Range Radar	3 Lens Camera	Motor on caliper	Buzzer
	Long Range Radar	Single Lens Camera	Integrated Brake Control	Indicator & Buzzer
	Long Range Radar	Single Lens Camera	?	Indicator & Buzzer
	Long Range Radar	Single Lens Camera	Motor on caliper	Indicator & Buzzer
	Long Range Radar	3 Lens Camera	Motor on caliper	?
	-	Stereo Camera	?	Indicator & Buzzer
	Long Range Radar	Single Lens Camera	Integrated Brake Control	Indicator & Buzzer

ตารางที่ 2-4 รูปแบบระบบแจ้งเตือนการออกนอกช่องจราจรโดยไม่ตั้งใจ (Lane Departure Warning) / ระบบช่วยรักษาให้รถอยู่ในช่องจราจรโดยอัตโนมัติ (Lane Keeping Assistance: LKA) ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ (ข้อมูลจาก SAE International)

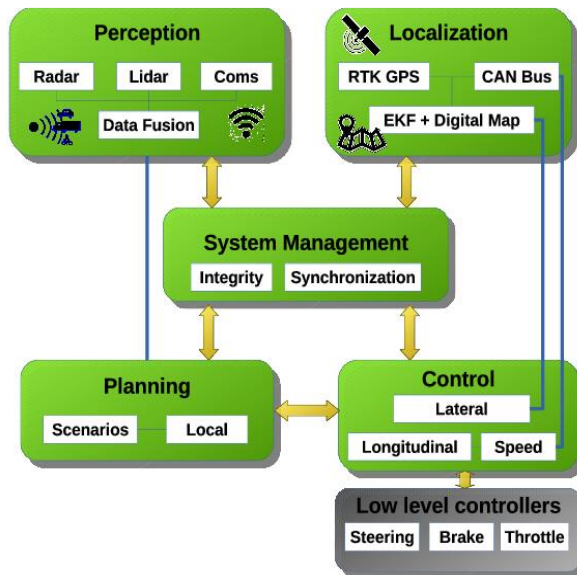
	SENSING	ACTUATION	WARNING
	3 Lens Camera	Rack Assisted EPS	Steering Vibrate
	Single Lens Camera	Rack Assisted EPS	Steering Vibrate
	Single Lens Camera	?	Indicator & Buzzer
	Single Lens Camera	Rack Assisted EPS	-
	3 Lens Camera	Rack Assisted EPS	Steering Vibrate
	Stereo Camera	?	Indicator & Buzzer
	Single Lens Camera	Column Assisted EPS	Indicator & Buzzer

ตารางที่ 2-5 รูปแบบ ระบบช่วยจอดรถ (Parking Assistance System) ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตรายยนต์ (ข้อมูลจาก SAE International)

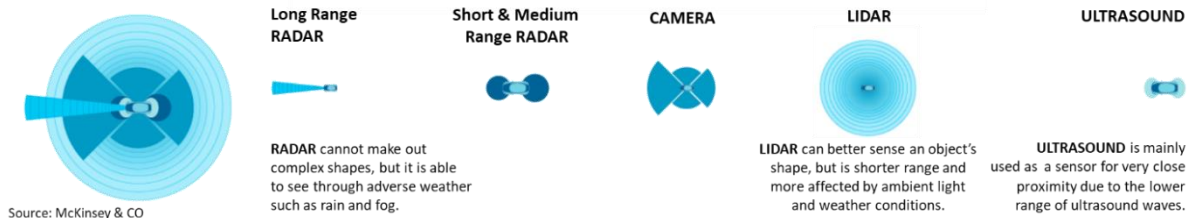
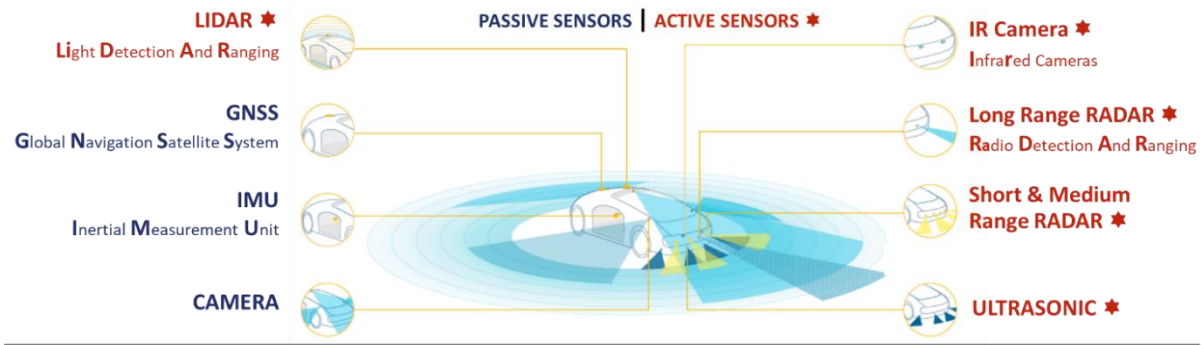
	SENSING	ACTUATION			WARNING
		Steer-by-Wire	Drive-by-Wire	Brake-by-Wire	
	Ultra Sonic	Rack Assisted EPS	-	-	Buzzer
	Ultra Sonic	-	-	-	Buzzer
	Ultra Sonic	-	-	-	Buzzer
	Ultra Sonic	Rack Assisted EPS	-	-	Buzzer
	Ultra Sonic	Rack Assisted EPS	E-Powertrain	Motor on caliper	?
	Ultra Sonic	-	-	?	Buzzer
	360 Cameras Ultrasonic	Column Assisted EPS	E-Powertrain	Integrated Brake Control	Buzzer

2.1.3 สถาปัตยกรรมของระบบขับขี่อัตโนมัติ (Autonomous Driving System) และส่วนประกอบ

สถาปัตยกรรมของระบบขับขี่อัตโนมัติ (Autonomous driving system) เป็นดังแสดงในรูปที่ 2-3 มีส่วนประกอบดังนี้



รูปที่ 2-3 ส่วนประกอบของระบบขับขี่อัตโนมัติ (Parra L., 2016)



Source: McKinsey & Co

รูปที่ 2-4 ประเภทของระบบตรวจจับ (Sensor) (รูปภาพจาก McKinsey & Co.)

	LONG RANGE RADAR	SHORT & MEDIUM RANGE RADAR	CAMERA	LIDAR	ULTRASOUND
MEASUREMENT DISTANCE (m)	0.2 – 300		0 – 250	Up to 250	0.02 – 10
COST (USD)	30 – 400		4 – 200	1,000 – 75000	30 – 400
DATA RATE (Mbps)	0.1 – 15		500 – 3500	20 – 100	< 0.01

รูปที่ 2-5 คุณสมบัติของระบบตรวจจับ (Sensor) ประเภทต่าง ๆ (รูปภาพจาก McKinsey & Co.)

1) ระบบรับรู้ (Perception) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่รับรู้ถึงสิ่งที่อยู่รอบ ๆ ตัวรถ โดยการตรวจจับด้วยระบบตรวจจับ (Sensor) และใช้ซอฟต์แวร์ (Software) จำแนกแยกแยะ (Classification) วัตถุที่ตรวจจับได้ว่าเป็นวัตถุอะไร เช่น รถยนต์ คน สัตว์ จักรยาน มอเตอร์ไซด์ ขอบเขตของช่องจราจรและถนน เป็นต้น โดยระบบนี้ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ ได้แก่ เซนเซอร์ หน่วยประมวลผลและซอฟต์แวร์ โดยเซนเซอร์ที่มีการใช้งานกันในระบบนี้ แสดงในรูปที่ 2-4 และรูปที่ 2-5 ได้แก่

- **Radio detection and ranging (Radar)** เป็นระบบตรวจจับ (Sensor) ที่ใช้สัญญาณวิทยุตรวจจับการมีอยู่และระยะของวัตถุ โดย Radar สามารถตรวจจับวัตถุได้ทั้งระยะใกล้และไกล



แต่ระยะการตรวจจับวัตถุจะแปรผกผันกับองศาที่ Radar จะตรวจจับวัตถุได้ กล่าวคือ หากต้องการตรวจจับวัตถุในระยะไกล จะมืองศาในการตรวจจับแคบ แต่หากต้องการตรวจจับวัตถุในระยะใกล้ จะมืองศาในการตรวจจับกว้างกว่า โดย Radar มีข้อดี คือ สามารถใช้งานได้ในทุกสภาพอากาศและมีราคาถูกกว่า LiDAR แต่อย่างไรก็ดี Radar ยังมีข้อเสีย ด้านการตรวจจับรูปทรง และขอบเขตของวัตถุ Radar มีระยะในการตรวจจับได้ตั้งแต่ 0.2-300 เมตร และมีปริมาณอัตราของขนาดข้อมูล (Data rate) อยู่ที่ 0.1-15 Mbps

- **Light Detection And Ranging (LiDAR)** มีการทำงานคล้าย Radar แต่ใช้แสงเป็นตัวกลางในการตรวจจับวัตถุแทนสัญญาณวิทยุ โดย LiDAR มีข้อดีด้านระยะในการตรวจจับที่ไกล และมืองศาในการตรวจจับที่กว้าง รวมไปถึงมีความละเอียดสูงทำให้สามารถตรวจจับรูปทรงของวัตถุได้ แต่อย่างไรก็ดี การใช้ LiDAR ก็ต้องแลกมาด้วยข้อเสียที่การทำงานจะมีประสิทธิภาพลดลงในสภาพอากาศที่แย่มากและมีราคาสูง LiDAR มีระยะในการตรวจจับได้ตั้งแต่ 0-250 เมตร และมีปริมาณอัตราของขนาดข้อมูล(Data rate) น้อยมากคือ น้อยกว่าอยู่ที่ 20-100 Mbps
- **Ultrasound (Ultrasonic)** มีลักษณะการทำงานคล้าย Radar และ LiDAR แต่ใช้คลื่นเสียงแทนคลื่นวิทยุและแสง ทำให้ Ultrasound มีระยะตรวจจับที่สั้น เหมาะสำหรับระบบที่ทำงานในความเร็วดำ แต่ Ultrasound มีข้อดีที่มีราคาไม่สูง เช่น เซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic) จะมีระยะในการตรวจจับได้ดีในระยะใกล้ ตั้งแต่ 0.02-10 เมตร และมีปริมาณอัตราของขนาดข้อมูล (Data rate) น้อยมาก คือ น้อยกว่า 0.01 Mbps
- **Camera** เปรียบเสมือนการจำลองตาของมนุษย์ ที่สามารถจำแนกวัตถุจากลักษณะเฉพาะ (Feature) ได้มากกว่ารูปทรงดังที่ LiDAR สามารถทำได้ ส่งผลให้การใช้ กล้อง (Camera) เพิ่มความสามารถในการจำแนกประเภทวัตถุ (Classification) ให้แก่รถยนต์ได้ แต่อย่างไรก็ดี ขอบเขตการใช้งานกล้อง มีลักษณะคล้ายกับตามนุษย์ กล่าวคือ หากอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีทัศนวิสัยแย่มาก กล้องจะมีประสิทธิภาพลดลง นอกจากนี้ กระบวนการจำแนกประเภทวัตถุ จำเป็นต้องใช้ความสามารถในการคำนวณค่อนข้างสูง ดังนั้นระบบฝังตัว (Embedded System) ที่ใช้งานกับกล้องจึงจำเป็นต้องมีสมรรถนะสูงด้วยเช่นกัน กล้องจะมีระยะในการตรวจจับได้ตั้งแต่ 0 -250 เมตร และมีปริมาณอัตราของขนาดข้อมูล (Data rate) อยู่ที่ 500-3500 Mbps ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับ Radar และ LiDAR
- **Inertial Measurement Unit (IMU)** เป็นระบบตรวจจับ (Sensor) ที่สามารถตรวจจับสถานะของรถยนต์ได้ โดย IMU สามารถตรวจจับความเร่งเชิงเส้น ความเร่งเชิงมุม และทิศทางของรถยนต์ได้ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้เพื่อให้ระบบฝังตัว (Embedded System) ทราบว่าในขณะที่รถยนต์มีสถานะเป็นอย่างไร โดยราคาของ IMU จะแปรผันกับจำนวนตัวแปรที่ระบบตรวจจับ (Sensor) สามารถตรวจจับได้ โดย IMU ที่สามารถตรวจจับได้ 9 ตัวแปรที่มีความแม่นยำสูง อาจมีราคาหลักหลายแสนบาท IMU มีปริมาณอัตราของขนาดข้อมูล (Data rate) ต่ำเมื่อเทียบกับเซนเซอร์ตัวอื่น



- **Global Navigation Satellite System (GNSS)** เป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถระบุตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียม ซึ่งเราอาจคุ้นเคยในชื่อ GPS ที่เป็นระบบดาวเทียมระบุตำแหน่งของสหรัฐอเมริกา ข้อดีของ GNSS คือมีราคาถูก และไม่จำเป็นต้องทำแผนที่ เพื่อการใช้งาน ในขณะที่ข้อเสียของการใช้ดาวเทียม คือ อาจได้ผลลัพธ์ที่คลาดเคลื่อนในหลักเมตร และหากใช้งานในพื้นที่อับสัญญาณ เช่น ในอุโมงค์หรือในเมืองที่มีอาคารสูง อาจส่งผลให้เกิดการคลาดเคลื่อนมากขึ้น หรือถึงขั้นสัญญาณขาดหายไปได้ GNSS มีปริมาณอัตราของขนาดข้อมูล (Data rate) ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเซนเซอร์ตัวอื่น ๆ

ทั้งนี้เซนเซอร์ต่าง ๆ ที่กล่าวมา สามารถจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

- **Passive sensor** คือ เซนเซอร์ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีการปล่อยสัญญาณออกไปภายนอก ได้แก่ GNSS IMU และ Camera
- **Active sensor** คือ เซนเซอร์ที่จะสามารถทำงานได้ โดยมีการปล่อยสัญญาณออกไปภายนอก ได้แก่ LiDAR Infrared camera Radar และ Ultrasonic

เมื่อพิจารณารูปที่ 2-6 พบว่า ความสามารถ และคุณสมบัติของเซนเซอร์ประเภทต่าง ๆ ในฟังก์ชันการตรวจจับและคุณลักษณะต่าง ๆ มีความแตกต่างกันไปตามประเภทของเซนเซอร์ ซึ่งพบว่าไม่มีเซนเซอร์ใดสามารถทำได้ดีในทุกหัวข้อ ดังนั้น จึงมีการแก้ปัญหาโดยการนำเซนเซอร์หลายประเภทมาทำงานร่วมกัน (Sensor Fusion) ผ่านซอฟต์แวร์ในระบบประมวลผล ที่ทำหน้าที่ประมวลข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ และนำมาควรวมหรือผสานเป็นชุดข้อมูลที่มีความละเอียด แม่นยำ และเชื่อถือได้มากขึ้น ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเซนเซอร์ต่าง ๆ ในรถอัตโนมัติ (Autonomous Vehicle: AV) ซึ่งไม่ได้ทำงานร่วมกัน (Non-Fusion sensor) กับรถที่มีระบบเชื่อมต่อ (Connected Vehicle: CV) และรถอัตโนมัติที่มีระบบเชื่อมต่อ (Connected and Autonomous Vehicle: CAV) ดังแสดงในรูปที่ 2-7 พบว่า รถ CAV มีผลออกมาดีที่สุดในเรื่องความสามารถในการทำงานในการตรวจจับตามหัวข้อต่าง ๆ ได้ดีทุกหัวข้อ ซึ่งเมื่อเทียบกับ กรณีของ AV และ CV ยังมีอีกหลายหัวข้อที่ไม่สามารถทำงานได้ดี หรือไม่สามารทำงานได้ เช่น CV ไม่สามารถตรวจจับวัตถุ (Object detection) แยกแยะวัตถุ (Object classification) กับระบุขอบเขตของวัตถุ (Edge detection) การตรวจจับขอบช่องจราจร (Lane tracking) และการทำงานในสภาวะแสดงน้อยหรือมืด แต่ CV จะมีข้อดีในการที่สามารถรับข้อมูลจากระยะไกล ทำให้รถสามารถรับรู้ข้อมูลในระยะที่ไกลกว่าที่เซนเซอร์บนรถจะตรวจจับได้ เช่น ในระยะมากกว่า 300 เมตรขึ้นไปจนถึงหลักกิโลเมตร และเมื่อผสานกับเซนเซอร์ที่อยู่บนรถ AV แล้ว CAV จะตอบโจทยในการผสานความสามารถของ AV และ CV เข้าด้วยกัน ทำให้ระบบรับรู้มีความสามารถ และแม่นยำสูงขึ้น ในปัจจุบันบริษัทต่าง ๆ ที่กำลังพัฒนารถยนต์ขับขี่อัตโนมัติ จะมีรูปแบบการติดตั้งเซนเซอร์และระบบเชื่อมต่อที่มีการออกแบบเฉพาะของแต่ละค่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปแบบ ประเภท จำนวน และ ตำแหน่งที่ติดตั้งเซนเซอร์บนรถ ดังแสดงในรูปที่ 2-8



Sensor fusion will provide redundancy for autonomous functions.

Sensor function ratings

● Good ● Fair ● Poor

	Camera	Radar	Lidar	Ultra-sonic	Radar + lidar	Lidar + camera	Radar + camera
Object detection	●	●	●	●	●	●	●
Object classification	●	●	●	●	●	●	●
Distance estimation	●	●	●	●	●	●	●
Object-edge precision	●	●	●	●	●	●	●
Lane tracking	●	●	●	●	●	●	●
Range of visibility	●	●	●	●	●	●	●
Functionality in bad weather	●	●	●	●	●	●	●
Functionality in poor lighting	●	●	●	●	●	●	●
Cost	●	●	●	●	●	●	●
Production readiness	●	●	●	●	●	●	●

Radar and camera most likely combination in next 5–8 years, although solid-state lidar and camera¹ will be dominant in the long term when proven and integrated into mass-production designs

¹Comparison with other technologies not yet possible due to low maturity of technology.

McKinsey&Company

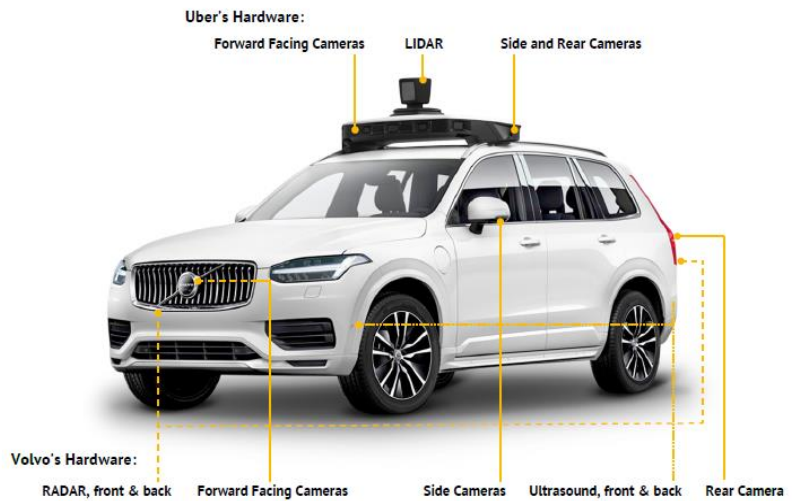
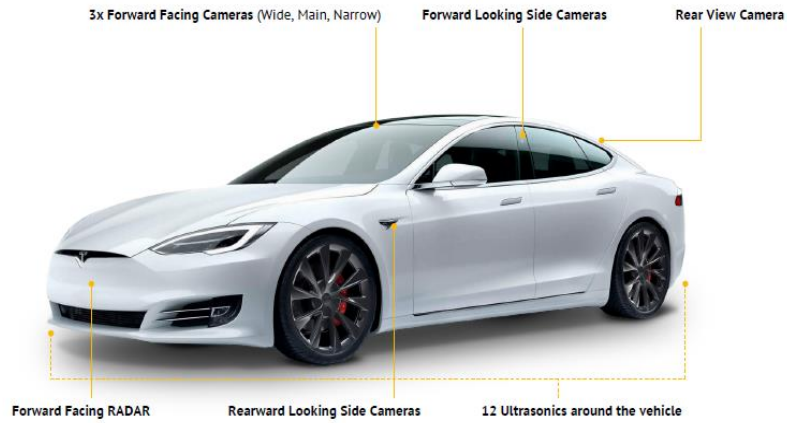
รูปที่ 2-6 ความสามารถของเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ (Jason M., 2018)

Summary of the key operating characteristics of each sensor as they apply to autonomous vehicles. (AV sensor performance summary adapted, in part, from WCP, 2016.)

Performance aspect	Human	AV			CV	CAV
		Radar	Lidar	Camera	DSRC	CV+AV
Object detection	Good	Good	Good	Fair	n/a	Good
Object classification	Good	Poor	Fair	Good	n/a	Good
Distance estimation	Fair	Good	Good	Fair	Good	Good
Edge detection	Good	Poor	Good	Good	n/a	Good
Lane tracking	Good	Poor	Poor	Good	n/a	Good
Visibility range	Good	Good	Fair	Fair	Good	Good
Poor weather performance	Fair	Good	Fair	Poor	Good	Good
Dark or low illumination performance	Poor	Good	Good	Fair	n/a	Good
Ability to communicate with other traffic and infrastructure	Poor	n/a	n/a	n/a	Good	Good

รูปที่ 2-7 ความสามารถของเซนเซอร์เทียบระหว่าง AV กับมนุษย์และระบบ CV และ CAV (Gilbert S., 2017)





รูปที่ 2-8 รถยนต์
บริษัท Tesla
Waymo (ข้อมูล
UBER และ

อัตโนมัติของ
UBER และ
จาก Tesla,
Waymo)



2) **ระบบระบุตำแหน่ง (Localization)** คือ ระบบที่ใช้สำหรับระบุตำแหน่งของยานยนต์ โดยจะทำงานร่วมกับแผนที่ความละเอียดสูง (High-definition Map) ที่ได้จัดทำไว้ล่วงหน้าเพื่อให้ทราบถึงสิ่งที่อยู่ในบริเวณที่รถวิ่งผ่านว่ามีสิ่งใดอยู่ที่บริเวณรอบรถ ในขณะที่รถวิ่งผ่านพื้นที่ในแผนที่ เซนเซอร์ในระบบรับรู้ (Perception) จะทำการตรวจจับวัตถุรอบ ๆ รถ และเปรียบเทียบกับแผนที่ เพื่อใช้ในการวางแผนการขับขี่ ระบบระบุตำแหน่ง (Localization) แบ่งออกเป็น ตามประเภทของระบบตรวจจับ (Sensor) และวิธีการที่ใช้ ได้แก่

- **การระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมนำร่อง (GNSS Localization)** เป็นกระบวนการระบุตำแหน่งที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ดีการระบุตำแหน่งด้วยวิธีนี้ถือว่ามีความคลาดเคลื่อนหลักเมตร ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงสำหรับการใช้งานในยานยนต์เชื่อมต่อและขับเคลื่อนอัตโนมัติ เนื่องจากการระบุตำแหน่งคลาดเคลื่อนไปเพียง 1 เมตร อาจทำให้รถยนต์รับรู้ตำแหน่งคาดเคลื่อนไปอีกหนึ่งช่องจราจรได้ ดังนั้น การระบุตำแหน่งด้วยความเที่ยมนำร่องจึงจำเป็นต้องมีวิธีการลดความคาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ 1) ใช้ Inertia Measured Units (IMU) ในการตรวจจับการเคลื่อนที่ของรถยนต์ และนำมาชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่ได้รับจากดาวเทียมนำร่อง และ 2) ใช้สถานีภาคพื้น (Base Station) ที่รับสัญญาณดาวเทียมนำร่อง ชดเชยความคลาดเคลื่อนของตัวรับสัญญาณดาวเทียมนำร่องที่ติดตั้งอยู่บนรถยนต์ ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้สามารถลดความคาดเคลื่อนได้เหลือเพียงไม่กี่เซนติเมตร
- **การระบุตำแหน่งด้วย LiDAR (LiDAR Localization)** เป็นกระบวนการระบุตำแหน่งโดยการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้รับจาก LiDAR มาเปรียบเทียบกับหาตำแหน่งกับข้อมูลอ้างอิงจากแผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) ซึ่งถูกสร้างไว้ล่วงหน้าด้วยกระบวนการ Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) ซึ่งวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนในหลักเซนติเมตร
- **การระบุตำแหน่งด้วยกล้อง (Vision Localization)** เป็นกระบวนการที่ใช้กล้องและระบบประมวลผลทางภาพ (Image processing) ในการระบุตำแหน่งของรถเทียบกับสิ่งแวดล้อมรอบๆ เช่น เส้นแบ่งช่องจราจร รถที่อยู่ด้านหน้า โดยมีการใช้งานในระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูง (ADAS) และระบบช่วยจอดอัตโนมัติ ซึ่งอยู่ในยานยนต์อัตโนมัติระดับขั้นที่ 1 และ 2 ซึ่งวิธีการนี้มีความคลาดเคลื่อนในหลักเซนติเมตร และขณะนี้กำลังมีการวิจัยและพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในยานยนต์อัตโนมัติระดับขั้นที่ 3 และสูงกว่า ด้วยการใส่กล้องจำนวนมากที่ติดอยู่รอบๆรถ
- **การระบุตำแหน่งด้วยการใช้เซนเซอร์หลายแบบร่วมกัน (Sensor Fusion Localization)** เป็นกระบวนการที่นำเซนเซอร์หลายแบบมาทำงานร่วมกัน เช่น GNSS ร่วมกับ LiDAR Radar ร่วมกับกล้อง เป็นต้น เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ความเชื่อถือได้ ของระบบ

3) **การวางแผน (Planning)** คือ ส่วนที่ใช้วางแผนการขับขี่ว่าจะขับขี่อย่างไร ในส่วนนี้เป็นส่วนที่จำลองการวางแผนและตัดสินใจในการขับขี่รถของมนุษย์ โดยอาศัยข้อมูลจากระบบ Perception และ



ระบบระบุตำแหน่ง ในการวางแผน และตัดสินใจ เช่น การกำหนดเส้นทางการวิ่งจากจุดเริ่มต้นถึงปลายทาง การกำหนดรูปแบบการขับชี้ระหว่างเส้นทาง เป็นต้น โดยการวางแผนสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท ดังนี้

- **การวางแผนการเดินทาง (Mission Planning)** เป็นการวางแผนเส้นทางการเดินทางของรถยนต์ ซึ่งมีหลักการและแนวคิดเช่นเดียวกับ Application นำทางที่ถูกใช้งานอยู่ในปัจจุบันทั้งใน Smart Phone (เช่น Google map) และที่ติดตั้งเพื่อเป็นระบบนำทาง (Navigation System) ในรถยนต์ ทั้งนี้ ผู้ให้บริการแต่ละรายอาจมีรูปแบบการวางแผนการเดินทางของรถยนต์ที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะการให้บริการ อาทิ ผู้ให้บริการ Mobility Service Platform อาจกำหนดเส้นเส้นทางที่ทำให้ผู้ใช้บริการมีระยะเวลาในการเดินทางสั้นที่สุด เป็นต้น
 - **การวางแผนการเคลื่อนที่ (Motion Planning)** เป็นการวางแผนการเคลื่อนที่ของรถยนต์ในระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง รวมไปถึงการตัดสินใจต่อสถานการณ์เฉพาะหน้าที่เจอ อาทิ เมื่อเจอสัญญาณไฟจราจรจะทำอย่างไร หรือเมื่อมีรถยนต์จอดขวางทางจราจรจะทำอย่างไร ซึ่งปัจจุบัน มีแนวคิดการวางแผนการเคลื่อนที่อยู่ 2 วิธี คือการตัดสินใจตามหลักข้อบทกฎหมาย (Rule Based Decision) และการใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นจากข้อมูลการขับขี่ (Data Based Decision)
- 4) **การควบคุม (Control)** คือ ส่วนที่ควบคุมให้รถวิ่งได้ตามแผนการขับขี่ที่กำหนดขึ้น เช่น การควบคุมความเร็ว การเร่ง เบรก การเลี้ยว เปลี่ยนช่องจราจร การถอยรถ การจอด เป็นต้น โดยระบบนี้จะถูกออกแบบตามหลักพลศาสตร์และจลศาสตร์ของรถอัตโนมัติ เพื่อให้การควบคุมเป็นไปอย่างเหมาะสม แม่นยำ และปลอดภัย การควบคุมรถยนต์นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ตามทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ ได้แก่
- **การควบคุมรถยนต์ในแนวยาว (Longitudinal Control)** เป็นการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถยนต์ โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมคันเร่ง (Throttle Controller) และอุปกรณ์ควบคุมเบรก (Brake Controller) ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองชนิดจะต้องถูกออกแบบให้ทำงานร่วมกันสำหรับควบคุมความเร็วรถยนต์ (Cruise Controller)
 - **การควบคุมรถยนต์ในแนวขวาง (Lateral Control)** เป็นการควบคุมทิศทางในการเคลื่อนที่ของรถยนต์ผ่านการควบคุมพวงมาลัย (Steering Controller) ซึ่งใช้สำหรับการควบคุมเมื่อต้องการเปลี่ยนทิศทางการวิ่ง เช่น การเปลี่ยนช่องทางการวิ่ง การเลี้ยว และการถอยรถ
- 5) **ระบบควบคุมระดับต่ำ (Low Level Control)** คือ ส่วนที่ควบคุมฟังก์ชันการบังคับรถ เช่น การควบคุมระบบขับเคลื่อน ระบบเบรก ระบบบังคับเลี้ยว ให้ทำหน้าที่ตามการควบคุมรถให้วิ่งตามแผนการขับขี่ที่ต้องการ โดยการทำงานของตัวกระตุ้น (Actuator) ที่ควบคุมฟังก์ชันการบังคับรถ ทั้งนี้ อุปกรณ์ตัวกระตุ้น (Actuator) จะถูกออกแบบให้มีระบบฝังตัว (Embedded System) ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแต่ละอุปกรณ์ด้วย ซึ่งเรียกว่าระบบการควบคุมระดับต่ำ (Low-level control system) ในขณะที่ การควบคุมที่ใช้ความสามารถในการรับรู้



ความสามารถในการระบุตำแหน่ง ในขณะที่ความสามารถในการวางแผนเรียกว่า ระบบการควบคุมระดับสูง (High-level control system) สำหรับการควบคุมรถยนต์สามารถทำได้ 3 รูปแบบ คือ

- **ควบคุมความเร็วด้วยสัญญาณ (Drive-by-wire)** รถยนต์ในปัจจุบันส่วนใหญ่มีความสามารถในการควบคุมความเร็วด้วยสัญญาณอยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ดีวิธีการควบคุมอาจแตกต่างกันออกไปตามแหล่งต้นกำลัง โดยรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายใน จะควบคุมความเร็วด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า ลิ้นปีกผีเสื้อไฟฟ้า (E-Throttle Valve) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมปริมาณอากาศที่จะไหลเข้าสู่เครื่องยนต์ และรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า จะมีระบบควบคุมกำลังของรถยนต์ (Power Control Unit) สำหรับควบคุมความเร็วของรถยนต์อยู่แล้ว
- **ควบคุมเบรกด้วยสัญญาณ (Brake-by-wire)** ปัจจุบันได้รับความนิยมอยู่ 2 ลักษณะ คือ การเบรกด้วยมอเตอร์ที่ติดตั้งอยู่บนเบรกคาลิเปอร์ (Motor-on-caliper) ซึ่งเป็นการประยุกต์จากระบบเบรกมือไฟฟ้า (E-parking brake) และการเบรกด้วยแม่ปั๊มเบรกไฟฟ้า (Integrated Brake Control) ซึ่งอาจพบได้ในรถยนต์ไฟฟ้าที่ต้องออกแบบระบบเบรกใหม่เนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้าไม่มีเครื่องยนต์ที่จะสร้างสุญญากาศเพื่อใช้สำหรับแม่ปั๊มเบรกแบบเดิมได้
- **ควบคุมพวงมาลัยด้วยสัญญาณ (Steer-by-wire)** ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนพวงมาลัยจากระบบพวงมาลัยเพาเวอร์แบบไฟฟ้า (Electric power steering) ซึ่งแต่เดิมถูกออกแบบมาสำหรับช่วยผ่อนแรงเล็กน้อยให้แก่ผู้ขับขี่ ทั้งนี้ ในระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ (Driver support feature) มอเตอร์ของระบบพวงมาลัยเพาเวอร์แบบไฟฟ้าจะเข้าไปบังคับเลี้ยวพวงมาลัยโดยตรงเพื่อควบคุมทิศทางการเลี้ยวของรถยนต์ โดยระบบ Steer-by-wire จะติดตั้งมอเตอร์ที่แตกต่างกันออกไป 3 รูปแบบ คือ ติดตั้งที่แกนพวงมาลัย (Column assist EPS) ติดตั้งที่เฟืองตัวเล็ก (Pinion assist EPS) และติดตั้งที่เฟืองสะพาน (Rack assist EPS) ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับการออกแบบและพื้นที่ในการติดตั้ง

6) **System Management** คือ ส่วนที่จัดการระบบให้แลกเปลี่ยนข้อมูลและทำงานร่วมกันอย่างถูกต้องผ่านระบบประมวลผล

ส่วนประกอบที่เป็นซอฟต์แวร์ที่ได้ยกมานี้ยกเว้น Low Level Control ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ระบบฝังตัว (Embedded software) จะอยู่ในระบบควบคุมขั้นสูง (High level control) ที่เป็นโปรแกรมที่ทำงานบน Middleware ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการ เช่น Robot Operation System (ROS) เป็นต้น โดยซอฟต์แวร์ของระบบควบคุมขั้นสูงนี้อาจอยู่ในรูปแบบของการพัฒนาขึ้นเอง โดยบริษัทผู้พัฒนาระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ หรือใช้ซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ส (Open source software) ที่มีผู้พัฒนาขึ้นและเปิดให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงการเขียนซอร์สโค้ด (Source code) หรือการแก้ไขเพิ่มเติมในซอฟต์แวร์ได้ ซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สของระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ ที่มีความนิยมในปัจจุบันมีหลายแพลตฟอร์ม อาทิ AUTOWARE ของบริษัท Tier IV ประเทศญี่ปุ่น และApollo ของบริษัท Baidu ประเทศจีน เป็นต้น

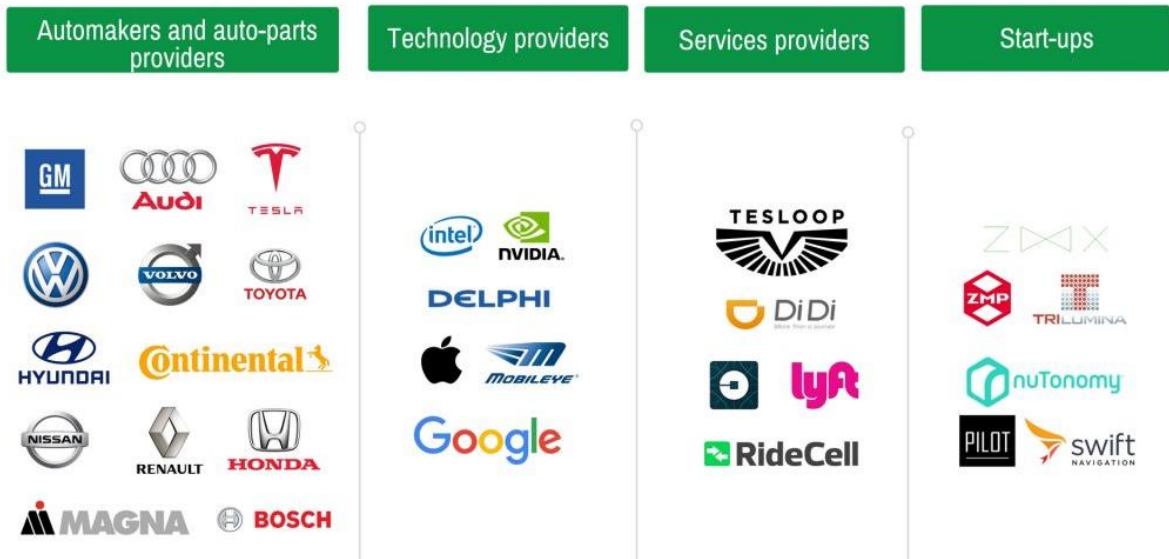
2.1.4 แนวโน้มการพัฒนาขี้อัตโนมัติ

ปัจจุบันยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว จากรูปที่ 2-9 จะเห็นว่ามีหลายบริษัทจากหลากหลายประเภทที่บุกเบิกในการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยมีทั้งที่เป็น

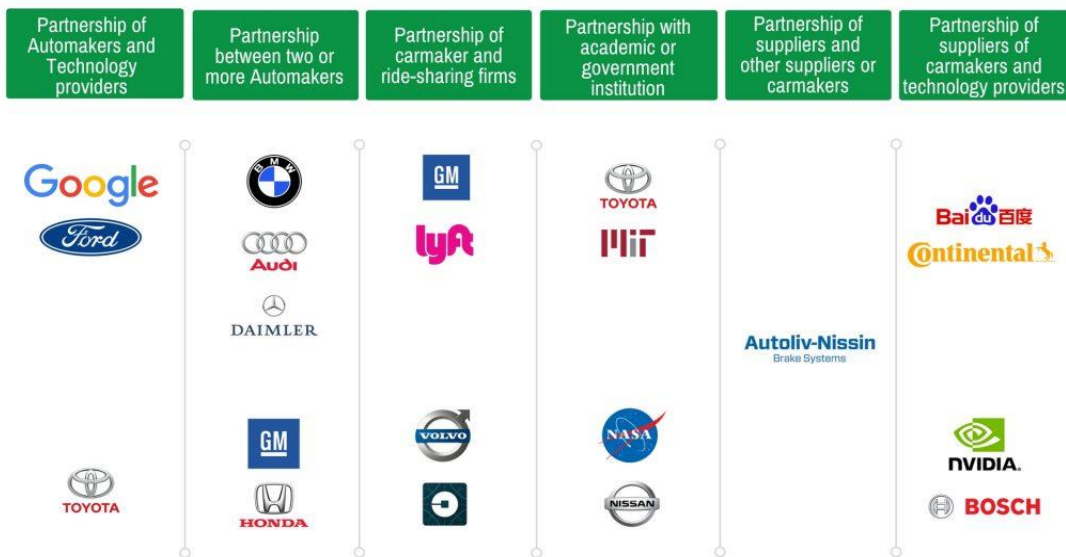


กลุ่มบริษัทผู้ผลิตยานยนต์และชิ้นส่วน กลุ่มบริษัทด้านเทคโนโลยี (Technology providers) กลุ่มด้านการให้บริการ (Service providers) และบริษัทสตาร์ทอัพ (Start-ups) จะเห็นว่าบริษัทนอกกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์เข้ามามีบทบาทมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มบริษัทด้านเทคโนโลยี เช่น บริษัท Intel และ Nvidia ที่พัฒนาระบบประมวลผลของรถยนต์อัตโนมัติ Google และ Apple ที่พัฒนาระบบต่าง ๆ ในรถขับอัตโนมัติ เช่น ระบบ AI ของบริษัท Mobileye ที่พัฒนาระบบ Vision ในรถขับอัตโนมัติ เป็นต้น ส่วนอีกกลุ่มบริษัทที่มีบทบาทอย่างสูง และมีแนวโน้มที่จะมีส่วนแบ่งในห่วงโซ่คุณค่าของอุตสาหกรรมยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติมาก คือ บริษัทผู้ให้บริการ เช่น บริการรถแบ่งปันกันใช้ (Ride sharing) ต่าง ๆ ที่พัฒนารถขับอัตโนมัติเพื่อใช้ในธุรกิจการให้บริการของตน โดยใช้รถยนต์ของบริษัทผู้ผลิตยานยนต์ที่ร่วมกันพัฒนาเป็นพื้นฐาน และทำการทดสอบอย่างกว้างขวางในประเทศที่เปิดกว้างในการทดสอบรถอัตโนมัติ เช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกา กลุ่มทวีปยุโรป เป็นต้น บริษัทผู้ให้บริการบางแห่งอยู่ในรูปบริษัท Start-ups ที่กำลังพัฒนารถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติอย่างจริงจัง เช่น บริษัท nuTonomy ที่เริ่มต้นจาก Boston สหรัฐอเมริกา และขยายมาสู่ประเทศสิงคโปร์ เปิดให้บริการรถแท็กซี่ไร้คนขับอย่างเต็มรูปแบบในปลายปี 2018 หลังจากที่ได้มีการทดลองให้บริการมาระยะเวลาหนึ่ง บริษัท Start-ups บางแห่งทำตัวเป็นบริษัทที่สนับสนุนเทคโนโลยียานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ เช่น บริษัท ZMP ซึ่งเป็นบริษัทในประเทศญี่ปุ่น ให้บริการตัดแปลงรถยนต์และสร้างเป็นรถขับอัตโนมัติ หรือการช่วยปรับการออกแบบรถอัตโนมัติ โดยมีแนวทางของบริษัท คือ Robot of Everything การนำเทคโนโลยีหุ่นยนต์มาปรับใช้กับหลากหลายสิ่ง

ด้วยเหตุผลหลายอย่าง เช่น เพื่อลดต้นทุน ลดเวลาในการพัฒนา หรือการเข้าถึงเทคโนโลยีและข้อมูล กลุ่มบริษัทเหล่านี้จึงมีการรวมตัวกัน เพื่อพัฒนารถยนต์อัตโนมัติร่วมกัน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2-10 เช่น การร่วมกันระหว่างบริษัทผู้ผลิตยานยนต์และบริษัทด้านเทคโนโลยี (Ford-Google และ Toyota-Microsoft เป็นต้น) การร่วมกันระหว่างบริษัทผู้ผลิตยานยนต์มากกว่า 2 บริษัท (BMW-Audi-Daimler และ GM-Honda เป็นต้น) การร่วมกันระหว่างบริษัทผู้ผลิตยานยนต์และบริษัทด้านการให้บริการรถแบ่งปันกันใช้ (Ride-sharing) (GM-Lyft และ Volvo-Uber เป็นต้น) การร่วมกันกับภาคการศึกษาหรือสถาบันของรัฐ (Toyota-MIT และ Nissan-NASA เป็นต้น) การรวมตัวกันของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน (Autoliv-Nissan) และ การร่วมกันของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และบริษัทด้านเทคโนโลยี (Continental-Baidu และ Bosch-NVIDIA เป็นต้น) จะเห็นได้ว่า แนวโน้มการพัฒนาหรือดำเนินธุรกิจด้านยานยนต์อัตโนมัตินี้ บริษัทจำเป็นต้องมีพาร์ทเนอร์ที่ดำเนินงานร่วมกัน และอาจมาจากกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ หรือนอกกลุ่มก็ได้ จากการศึกษาของ Navigant Research ในปี 2017 (Parra L., 2016) ดังแสดงในรูปที่ 2-11 พบว่ามี 5 บริษัทที่เป็นผู้นำในการพัฒนารถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ ได้แก่ Ford GM Renault-Nissan Daimler และ Volkswagen ในขณะที่กลุ่มที่สองเป็นกลุ่มที่รองลงมาที่กำลังเป็นคู่แข่งกับกลุ่มผู้นำ เช่น Waymo (Google) อยู่ในลำดับที่หก และ Tesla ในลำดับที่สิบสอง ส่วนกลุ่มที่สาม คือ กลุ่มที่กำลังพัฒนาขึ้นมา เช่น Uber ในลำดับที่ สิบหก ที่ตามหลัง Honda nuTonomy และ Baidu



รูปที่ 2-9 บริษัทที่บุกเบิกในอุตสาหกรรมยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (GrayB., 2021)



รูปที่ 2-10 Strategic Partnership Segments (GrayB., 2021)



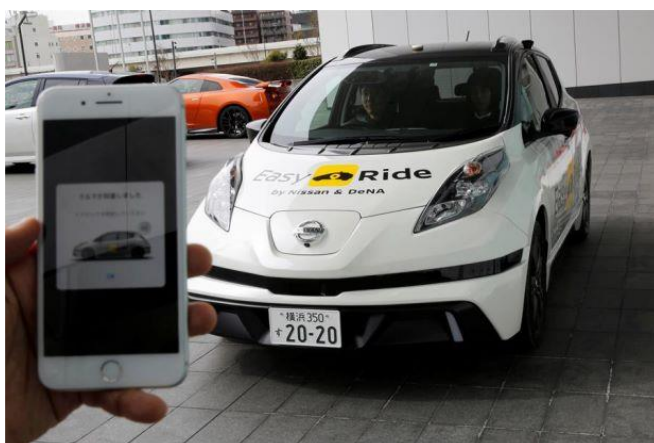
รูปที่ 2-11 Automated Driving Systems Leader board (Alex D., 2017)

2.1.5 เทคโนโลยียานยนต์อัตโนมัติกับการให้บริการยานยนต์แบบใหม่ การแบ่งปันการจราจร และการขนส่ง

การแบ่งปันการจราจร (Ride sharing) มีจุดประสงค์เพื่อสร้างความคล่องตัวและยืดหยุ่นให้กับผู้โดยสารในการเดินทางด้วยระบบขนส่งมวลชนในเมือง ในปัจจุบันมีทั้งที่เป็น การจราจรจักรยานร่วมกัน (Bike Sharing) ที่มีให้บริการในเมืองใหญ่ๆแทบทุกแห่ง และแบบที่เป็นการจราจรไฟฟ้าร่วมกัน (EV Ride Sharing) ซึ่งเน้นความสะดวกปลอดภัยและสามารถเดินทางได้ระยะทางไกลกว่าจักรยาน มีการใช้งานแล้วในหลายประเทศ ทั้งใน กลุ่มทวีปยุโรป สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น สิงคโปร์ เป็นต้น ซึ่งมีแนวโน้มกำลังขยายตัวอย่างรวดเร็ว และเป็นที่น่าสนใจจากทั้งบริษัทผู้ผลิตรถยนต์และบริษัทผู้ให้บริการอย่างมาก รูปแบบธุรกิจอีกแนวหนึ่งที่กำลังมีบริษัทขนาดใหญ่ และ Start up จำนวนมากกำลังพัฒนา คือ การนำรถขับอัตโนมัติ มาใช้งานในธุรกิจ Ride Hailing และ Ride Sharing เช่น Easy Mile (รูปที่ 2-12) และ Robo Taxi ซึ่งเป็นธุรกิจการให้บริการแท็กซี่ไร้คนขับ โดยผู้โดยสารสามารถเรียกบริการได้ผ่านแอปพลิเคชันใน smart phone รถจะวิ่งมารับผู้โดยสารที่จุดที่ได้นัดหมายไว้ในรูปที่ 2-13 แสดง Robo Taxi “Easy Ride” โดยบริษัท Nissan และ DeNA ที่มีการทดสอบการให้บริการที่เมือง Yokohama ประเทศญี่ปุ่น ในเดือนมีนาคม 2018 จะเห็นได้ว่า จากแนวโน้มของธุรกิจข้างต้น คนจะมีแนวโน้มเป็นเจ้าของรถยนต์น้อยลง เนื่องจากความจำเป็นที่ต้องซื้อรถลดลง ทำให้การเดินทางแบบ Multi-modal สะดวก รวดเร็วกว่า และค่าใช้จ่ายโดยรวม (Total cost) ของการเดินทางเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายของการเป็นเจ้าของรถ (Car total cost of ownership) จะมีแนวโน้มน้อยกว่าในที่สุด ทำให้แรงจูงใจในการซื้อรถลดลง ทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนจาก การเป็นเจ้าของรถ มาเป็น ผู้ใช้บริการรถ (Mobility as a service)









รูปที่ 2-12 Easy Mile (First-Last Mile Vehicle) ยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับขนส่งมวลชน (Trevor M., 2017)



รูปที่ 2-13 Robo Taxi “Easy Ride” โดย บริษัท Nissan และ DeNA (Tajitsu N., 2018)

ในด้านการขนส่งสินค้า ได้มีการนำเทคโนโลยีขับเคลื่อนอัตโนมัติมาใช้ในรูปแบบต่างๆ เช่น การใช้เทคโนโลยี Platooning ในการควบคุมรถบรรทุกให้วิ่งไปด้วยกันเป็นขบวนบนทางด่วนเพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงาน การส่งและเคลื่อนย้ายสิ่งของในโรงงานและพื้นที่ปิดต่าง ๆ ทั้งในและนอกอาคารอย่างอัตโนมัติ การใช้เทคโนโลยีขับเคลื่อนอัตโนมัติ เพื่อส่งสินค้า หรืออาหารไปยังผู้รับตามบ้านทั้งแบบที่วิ่งบนถนนและบนทางเท้า ซึ่งรูปแบบนี้จะมีแนวโน้มเติบโตขึ้นตามกระแสของการค้าขายออนไลน์ และบริการ Food delivery ต่าง ๆ ที่กำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน โดยมีบริษัทที่เข้ามาพัฒนาเทคโนโลยีและดำเนินธุรกิจมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2-14

Side-walk vehicle		
	The sidewalk vehicles are designed to travel at a speed of 4-6 km/hr. This lower speed is chosen to increase safety and give time to remote tele-operators to take control in case of emergency situation.	
On-road delivery van		
	Autonomous delivery vans are electrical built-to-purpose on-road vehicles. In the recent times, they are proving to be a competitor to sidewalk last mile delivery robots.	
Autonomous trucks		
	Subjected to autonomous trucks, mobility sector is trying to address several key pain points facing the trucking industry such as driver shortage and productivity.	

รูปที่ 2-14 ตัวอย่างบริษัทที่พัฒนาระบบขนส่งสินค้าโดยใช้เทคโนโลยีขับเคลื่อนอัตโนมัติ (FutureBridge., 2020)

2.2 เทคโนโลยี C-ITS และ 5G C-V2X

2.2.1 บทนำ

US National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) พบว่า ร้อยละ 94 ของอุบัติเหตุเกิดจากความผิดพลาดของมนุษย์ โดยที่ ร้อยละ 41 เกิดจากการจำแนกที่ผิดพลาด เช่น ไม่สนใจ ระมัดระวังไม่เพียงพอ เป็นต้น ร้อยละ 33 เกิดจากการตัดสินใจผิดพลาด เช่น คาดการณ์การเคลื่อนที่ หรือความเร็วของผู้อื่นผิด

Breakthrough ทางด้านการสื่อสารไร้สายที่มีแบนด์วิธขนาดใหญ่ การระบุตำแหน่ง และ machine learning เทคโนโลยีด้านเซนเซอร์ และอื่น ๆ จะทำให้เราสามารถลดมนุษย์จากการควบคุมยานยนต์ ทั้งนี้ เทคโนโลยีในการควบคุมยานยนต์อัตโนมัติ สามารถจัดแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

- Sensing อาศัยเซนเซอร์ เช่น Radar LiDAR หรือ กล้อง เพื่อช่วยให้ยานยนต์สามารถเรียนรู้สภาพแวดล้อม
- Robotics การวางแผนและการตัดสินใจลำดับต่าง ๆ ของข้อมูลทางกล จำเป็นสำหรับการบังคับอัตโนมัติ

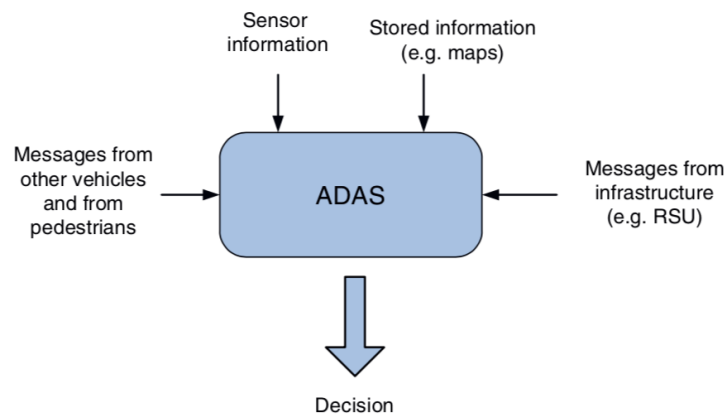
แม้ว่า เซนเซอร์จะเป็นหัวใจของการขับเคลื่อนอัตโนมัติ แต่ก็ยังไม่เป็นคำตอบของทั้งหมด เนื่องจาก

- เซนเซอร์ครอบคลุมระยะใกล้ ปกติอยู่ในแนวสายตา (line of sight) ไม่สามารถมองข้ามสิ่งกีดขวาง เช่น ตึก ต้นไม้ หรือ รถขนาดใหญ่ได้
- เซนเซอร์ตรวจจับผิดพลาด เช่น กล้องอาจตัดสินใจผิดพลาดจากเงื่อนไขของแสง สภาพอากาศ มีผลต่อ Radar และ LiDAR ดังนั้น ยานยนต์ที่มีระบบ Advanced Driving Assistance System (ADAS) หรือ ขับเคลื่อนอัตโนมัติจำเป็นต้องมีผู้ขับขี่ที่ alert และสามารถเข้ามาควบคุมยานยนต์ได้ทันทีเมื่อเกิดเหตุไม่คาดฝัน

- เซนเซอร์ ไม่สามารถรับรู้ข้อมูลของยานยนต์ที่อยู่ใกล้เคียง แม้ว่าจะสามารถทดแทนผู้ขับขี่ โดยใช้เซนเซอร์ที่ความเที่ยงตรงสูง แต่ก็ยังไม่สามารถทำให้การจราจรดีที่สุด ลดเวลาในการเดินทาง หรือลดการใช้พลังงานได้

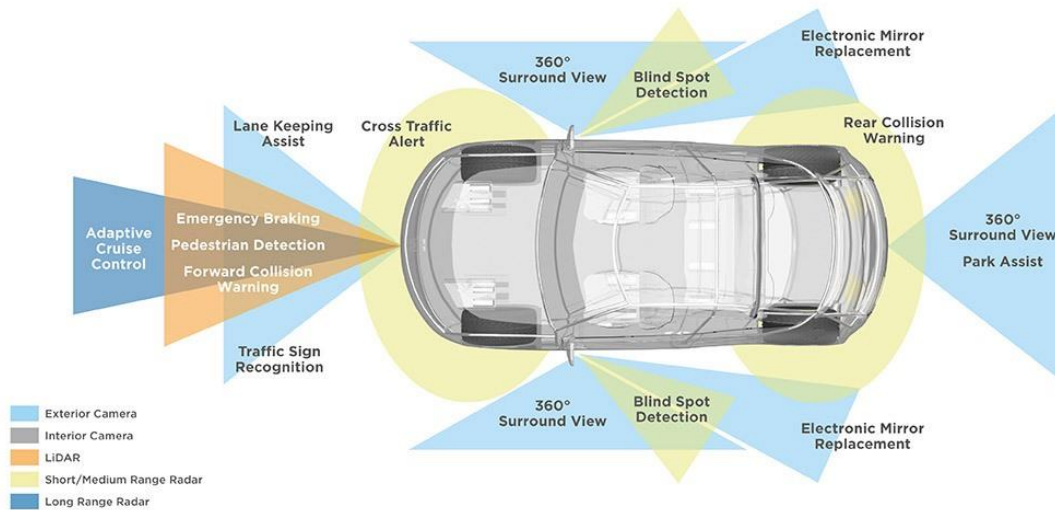
จากข้อจำกัดของเซนเซอร์ เมื่อนำการสื่อสารแบบ wide-area มาร่วมใช้จะทำให้การควบคุมอัตโนมัติสามารถทำได้ดียิ่งขึ้น การแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างรถกับโครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure) หรือ ระหว่างรถด้วยกันเองจะทำให้การตัดสินใจของ ADAS ดีขึ้น การทำงานของ ADAS แสดงดังในรูปที่ 2-15 และ รูปที่ 2-16 ตามลำดับ

ยานยนต์ไร้คนขับในอนาคตจะฉลาดกว่ามนุษย์ ยกตัวอย่างเช่น รถยนต์ A แล่นด้วยความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แล้วมีรถยนต์ B แทรกหน้ารถยนต์ A เพื่อหลีกเลี่ยงอุบัติเหตุ รถยนต์ทั้งสองต้องคุยกัน เพื่อที่จะให้รถยนต์ A และรถยนต์ B เร่งเครื่องเพื่อหลีกเลี่ยงการชน



รูปที่ 2-15 ข้อมูลที่ใช้สำหรับการตัดสินใจของ Advanced Driving Assistance System (ADAS)

(R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020)



รูปที่ 2-16 เซนเซอร์ของระบบ ADAS (TE CONNECTIVITY., n.d.)

2.2.2 ขนาดของอุตสาหกรรม

ขนาดของอุตสาหกรรมยานยนต์ไร้คนขับได้ถูกคาดการณ์ว่าจะมียานยนต์ไร้คนขับที่ขายทั่วโลกไม่ต่ำกว่า 72.5 ล้านคันภายในปี ค.ศ. 2023 และจะมียานยนต์ไร้คนขับระดับที่ 5 ถึง ร้อยละ 15 ของรถทั้งหมด อุตสาหกรรมยานยนต์ไร้คนขับจะมีขนาดใหญ่่มาก ดังแสดงในรูปที่ 2-17 ส่วนรูปที่ 2-18 แสดงองค์ประกอบของการเชื่อมต่อข้อมูลและเซนเซอร์

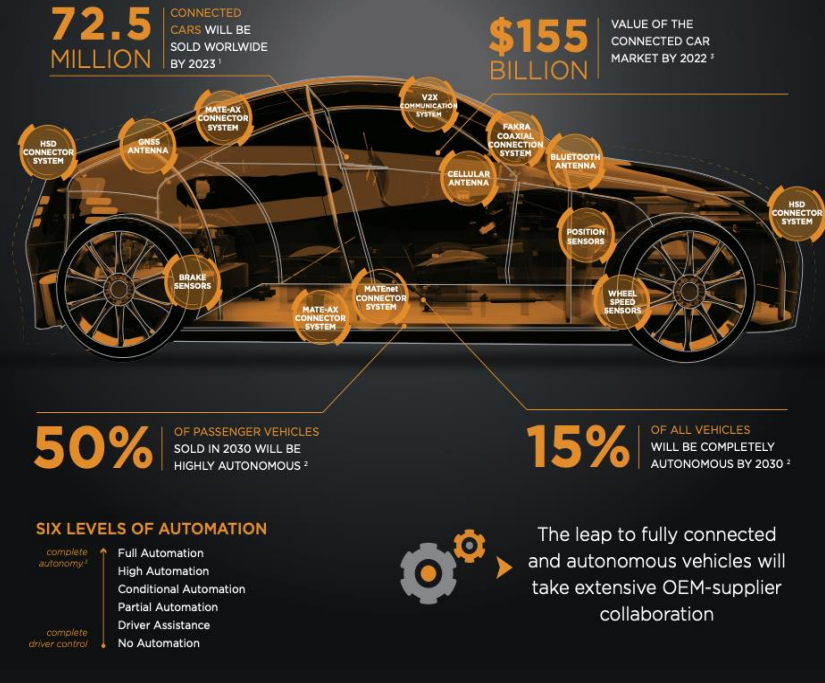


รูปที่ 2-17 การคาดการณ์ขนาดอุตสาหกรรมยานยนต์ไร้คนขับ (TE CONNECTIVITY., n.d.)

THE ROAD TO AUTONOMOUS DRIVING

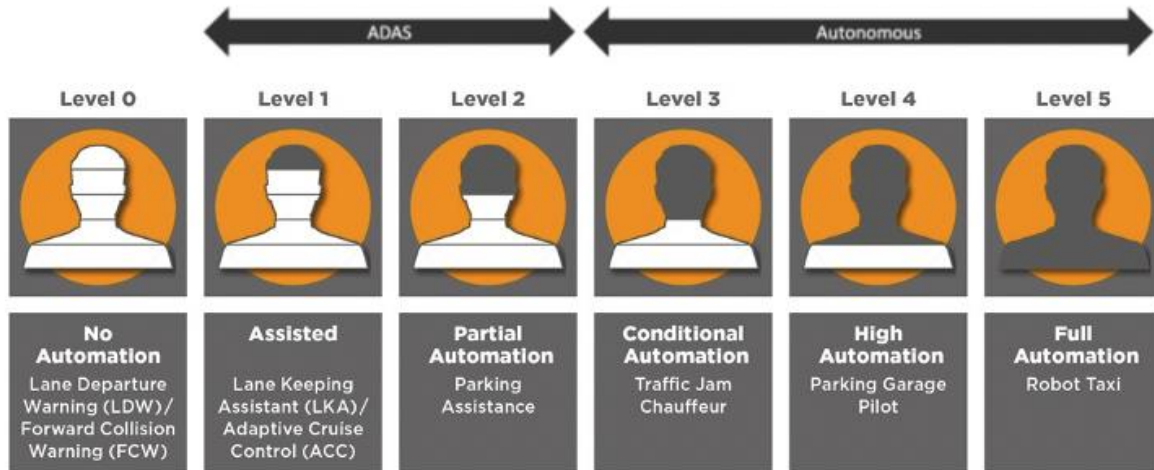
Transforming Vision into Reality

CREATING END-TO-END DATA CONNECTIVITY & SENSOR SOLUTIONS



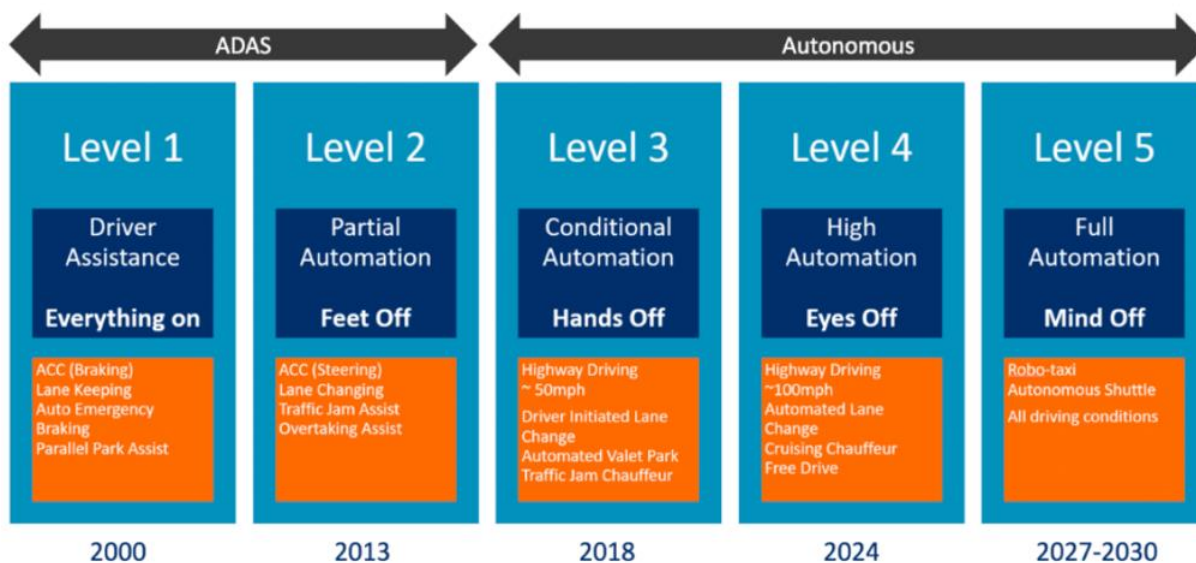
รูปที่ 2-18 การเชื่อมต่อข้อมูลและเซนเซอร์ กับขนาดอุตสาหกรรมยานยนต์ไร้คนขับ (TE CONNECTIVITY., n.d.)

2.2.3 ระดับการควบคุมยานยนต์อัตโนมัติกับเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง



The levels of vehicle automation according to the Society of Automotive Engineers (SAE) 2018.

รูปที่ 2-19 ระดับการควบคุมยานยนต์อัตโนมัติ



รูปที่ 2-20 ระดับการควบคุมรถอัตโนมัติในอีกรูปแบบหนึ่ง (Robert Day ARM., 2019)

รูปที่ 2-19 แสดงระดับการควบคุมรถอัตโนมัติระดับที่ 0 ซึ่งกำหนดให้เป็นระดับที่มนุษย์ทำการควบคุมทั้งหมด ส่วนระดับที่ 1 ถึงระดับที่ 2 เป็นระดับที่มี ADAS โดยจะมีความสามารถในการควบคุมอัตโนมัติเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้ ในระดับที่ 5 ยานยนต์ไร้คนขับไม่จำเป็นต้องใช้มนุษย์ในการควบคุมยานยนต์ ทั้งนี้ ฟังก์ชันของ ADAS ระดับที่ 2 ที่สำคัญ ได้แก่ Adaptive Cruise Control (ACC), lane tracking และ Emergency Brake

จากรูปที่ 2-20 IEEE Spectrum (Robert Day ARM., 2019) กล่าวว่าระดับที่ 3 เหมาะสมที่จะปรับเปลี่ยนจาก ADAS ไปสู่การขับเคลื่อนด้วยตนเอง อย่างไรก็ตาม ผู้ผลิตรถยนต์หลายรายอยากให้ยกเว้นระดับที่ 3 เนื่องจากต้องการขจัดความสับสนว่าใครจะเป็นผู้รับผิดชอบกรณีเกิดอุบัติเหตุ นอกจากนี้ในระดับที่ 3 นี้ ได้มีผู้เสนอให้มีกล้องตรวจสอบภายในรถ และซอฟต์แวร์ที่มีอัลกอริทึมซับซ้อน เพื่อตรวจสอบว่าผู้ขับขี่อยู่ในสถานะที่พร้อมจะกลับมาควบคุมรถหรือไม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความซับซ้อนของอุปกรณ์จะเพิ่มขึ้นอย่างมากจากระดับที่ 3 ไปสู่ระดับที่ 4

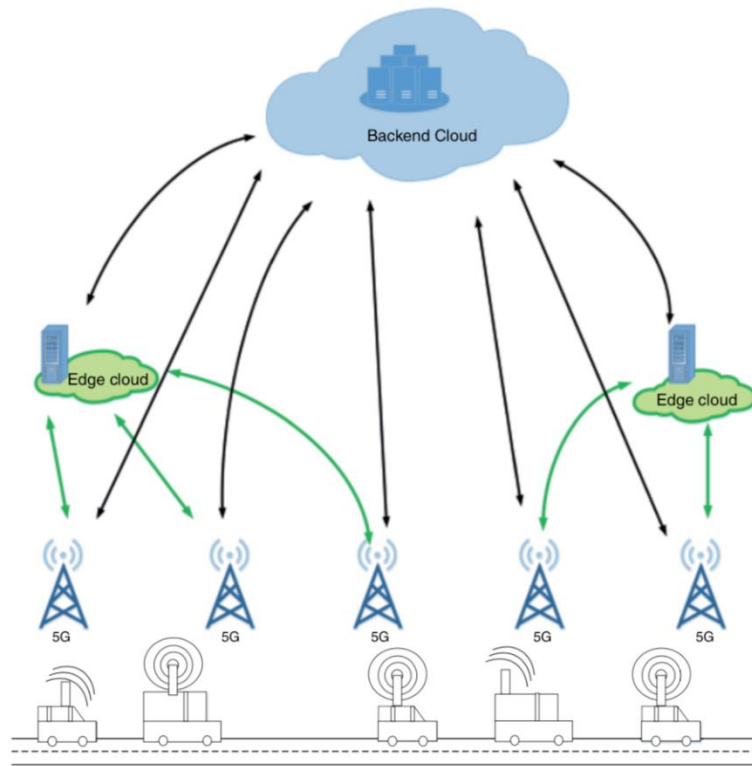
เนื่องจากความซับซ้อนของอัลกอริทึมในการควบคุมยานยนต์อัตโนมัติเพิ่มขึ้น โค้ดที่ใช้ในการควบคุมอาจมีมากถึง 1 พันล้านบรรทัด ซึ่งจะทำให้ Embedded CPU ต้องเปลี่ยนเป็น CPU ในรูปแบบ off-the-shelf server (Robert Day ARM., 2019) นอกจากนี้ CPU ยังต้องมีหน้าที่ Split-and-Lock ซึ่งก็คือในภาวะปกติ CPU จะอยู่ในโหมด Split โดยที่ CPU ที่เป็น Multi-core ต่างจะแยกกันทำงาน แต่เมื่อต้องการความปลอดภัยขั้นสูง CPU จะปรับไปอยู่ในโหมด Lock โดยที่ CPU จะถูกแบ่งออกเป็นคลัสเตอร์ และทำหน้าที่ตรวจสอบซึ่งกันและกันเอง ยานยนต์ไร้คนขับในระดับที่ 3 มีความเหมาะสมกับการขับขี่ที่นำเบื้อ เช่น ระยะทางไกลหรือการจราจรคับคั่ง

ยานยนต์ไร้คนขับในระดับที่ 3 และ 4 จะทำงานร่วมกันระหว่างกับข้อมูลจากระบบต่าง ๆ ภายในยานยนต์ ข้อมูลในการตัดสินใจจะมาจากสภาพแวดล้อมที่ได้จากเซนเซอร์ ส่วนยานยนต์ไร้คนขับในระดับที่ 5 (R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020) จำเป็นที่จะต้อง 1) รู้สภาพแวดล้อมที่เกินข้อจำกัดของเซนเซอร์ของยานยนต์ (Beyond the limits of sensors on the vehicle) 2) ตัดสินใจจากข้อมูลหลายด้าน ด้วยเหตุนี้ HD maps ที่มีการ Update ข้อมูลตลอดเวลาจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับยานยนต์ไร้คนขับในระดับที่ 5

รูปที่ 2-21 แสดงระบบควบคุมยานยนต์อัตโนมัติในระดับที่ 5 ที่ทำงานร่วมกันระหว่างเซนเซอร์ประจำรถและการสื่อสารแบบ wide-area communication ซึ่งต้องมีการทำงานร่วมกับ Multi-Access Edge (MEC) ทั้งนี้การคำนวณด้วย MEC ตามการประยุกต์ใช้งานได้ 2 แบบ คือ Stateless กับ Stateful

รูปที่ 2-22 แสดงลักษณะภายในไร้คนขับรถในอนาคต รูปที่ 2-23 แสดงความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นจาก 150 Mbps ไปสู่ 24 Gbps ซึ่งต้องอาศัยพื้นฐานที่สำคัญทางด้าน ความสามารถของสายอากาศ การเชื่อมต่อข้อมูล และความซับซ้อนของเซนเซอร์ และกล้อง ระบบกล้องที่ติดตั้งในยานยนต์ต้องมีความละเอียดสูง มี Frame rate ที่สูงขึ้น หรือเป็นกล้อง Stereo เพื่อการประมาณการระยะห่าง (Distance) ที่ถูกต้องแม่นยำ





รูปที่ 2-21 C-V2X โดยใช้ Wide-Area Communication และ MEC Server หลัง Base Station
(R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020)



รูปที่ 2-22 ลักษณะภายใน ยานยนต์ไร้คนขับ ในอนาคต

DATA SPEED EVOLUTION FOR AUTONOMOUS DRIVING

150 Mbps

24Gbps

TECHNICAL CHALLENGES OF AUTONOMOUS DRIVING



NEXT-GENERATION
ARCHITECTURES



EXTERNAL
CONNECTIVITY



SAFETY



HIGH
PERFORMANCE



RELIABILITY &
ROBUSTNESS



SMARTER
DESIGN

รูปที่ 2-23 ความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นสำหรับเทคโนโลยียานยนต์ไร้คนขับในอนาคต

2.2.4 เทคโนโลยี 5G กับการควบคุมยานยนต์อัตโนมัติ

เทคโนโลยี 5G มีความจำเป็นสำหรับ ยานยนต์เชื่อมต่อ (Connected vehicle) ที่จะต้องใช้ข้อมูลจำนวนมาก และต้องควบคุมอุปกรณ์ภายในยานยนต์อย่างรวดเร็ว เทคโนโลยี 5G มีความเร็วในการรับส่งข้อมูล (Data rate) ที่สูงขึ้นและความหน่วง (Latency) ที่น้อยลง นอกจากความเร็วที่เพิ่มขึ้น และความหน่วงที่ลดลงของ 5G แล้ว Edge computing เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญต่อการควบคุมยานยนต์อัตโนมัติ Edge computing เป็นอุปกรณ์ชาญฉลาดที่อยู่ใกล้กับผู้ใช้ ดังนั้น Edge computing และอัตราการรับส่งข้อมูลความเร็วสูง จะทำให้คุณลักษณะสำคัญของ ADAS มีความชาญฉลาดขึ้น

การใช้งาน MEC ในงานที่มี Mobility นั้นมีการศึกษากันใน ETSI MEC [18,19]

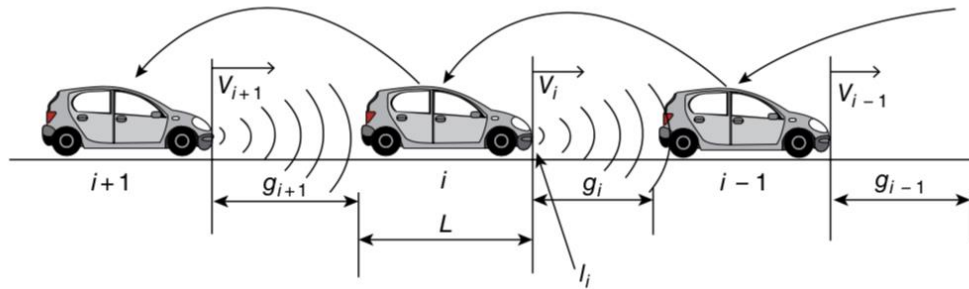
มีการคาดการณ์ว่า ยานยนต์ไร้คนขับระดับที่ 4 และ 5 หากผลิตในปี 2020 จะมีราคาแพงกว่ารถปกติประมาณ \$75,000 ถึง \$100,000 ซึ่งการประมาณดังกล่าวอาจต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากเซนเซอร์ที่สามารถรองรับยานยนต์ไร้คนขับระดับที่ 4 และ 5 ได้ อาจทำให้มีราคาแพงมากกว่านั้นขึ้นไปอีก ดังนั้นยานยนต์ไร้คนขับส่วนบุคคลในอนาคตอันใกล้นี้ก็จะมีจำนวนน้อย ความเป็นไปได้ในระยะแรก คือ ยานยนต์ไร้คนขับที่เป็นแบบ Mobility-as-a-Service (MaaS), Ride Sharing และ Robot taxi

Use cases ของยานยนต์เชื่อมต่อที่สำคัญ ได้แก่ ขบวนยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (vehicle platooning) และแผนที่ความละเอียดสูง (High-definition map: HD map) (R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020) เป็นหนึ่งในการประยุกต์ที่สำคัญในอนาคตอันใกล้นี้ โดยที่ Vehicle platooning จะสามารถลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงได้ดี เนื่องจากสามารถลดพลศาสตร์ทางอากาศหน้ายานยนต์ของคันที่ตามหลังได้ อนึ่ง 5G ที่ทำงานร่วมกับ Edge computing จะเป็นกลจักรสำคัญต่อประสบการณ์ของผู้ใช้ยานยนต์ไร้คนขับในอนาคต

โดยที่ สำหรับ Vehicle platooning นั้น ฟังก์ชัน Adaptive cruise control (ACC) จะถูกขยายไปเป็น Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) เมื่อทำงานร่วมกับ C-V2X (Connected vehicle to



everything) ก็จะทำให้เกิด Cooperative intelligent transportation system (C-ITS) แบบจำลองของ Vehicle platooning แสดงดังในรูปที่ 2-24



รูปที่ 2-24 Platoon Model (R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020)

ข้อมูลระหว่างรถต่อรถในขบวนยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Vehicle platooning) ทำให้ฟังก์ชัน CACC เป็นจริง แต่การทำงานของ Platoon จะมีประสิทธิภาพสูงสุดก็ต่อเมื่อ ในสถานการณ์ดังต่อไปนี้

- ในสภาพแวดล้อมที่รถทุกคันต้องอยู่ในช่องทางเดินรถ และถนนมีความโค้งหรือลาดชัน
- อุปกรณ์กลในรถแต่ละครั้งมีพลังและความหน่วงที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น
- การเบรกอย่างกะทันหัน จากอุปกรณ์กลบกพร่อง หรือ การเร่งและลดความเร็วอย่างไม่เป็นธรรมชาติ หรือ speed jerk
- Time headway ที่ควรมีการปรับให้ดีที่สุดที่ขึ้นกับเงื่อนไขความเร็วและการจราจร
- การแทรกเข้าและแทรกออกของยานยนต์อื่นที่ไม่ใช่ของขบวนยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ
- การเข้าร่วม หรือ ออกจากขบวนยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ

เพื่อให้ Vehicle platooning สามารถสื่อสารกันได้ทั้งหมด ตามข้อกำหนดข้างต้น จึงได้มีการศึกษาการทำ Vehicle platooning ด้วยโครงข่ายสื่อสาร 4G/LTE ตาม Release 14 ของ 3GPP และได้มีการจำลองซึ่งพบว่า สำหรับขบวนรถจำนวน 15 คัน บนถนน Highway 4 ช่องทาง มี Time headway เท่ากับ 0.5 วินาที ความหน่วงในการสื่อสาร 100 มิลลิวินาที ข้อมูลของรถยาว 300 bytes ข้อมูลส่ง 13.33 ครั้งต่อวินาที ความเร็วเฉลี่ยของขบวนเท่ากับ 30 เมตรต่อวินาที พบว่า 4G/LTE สามารถรองรับการทำงานได้

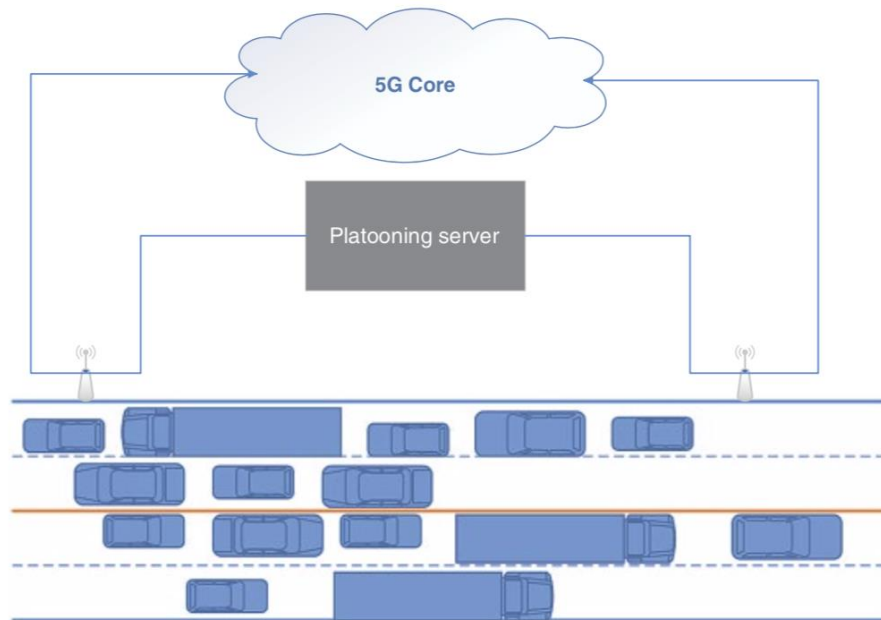
ในที่นี่ ข้อมูลรถ ขนาด 300 Bytes เป็นเพียงข้อมูลพื้นฐานเท่านั้น ถ้าต้องการส่งข้อมูลเกี่ยวกับรถเซนเซอร์ หรือมีจำนวนรถที่มากขึ้น โครงข่าย 4G/LTE จะไม่สามารถรองรับการสื่อสารได้ นอกจากนี้เพื่อให้ Packet error มีค่าน้อย 4G/LTE ต้องใช้กำลังในการส่งมากขึ้น ทำให้มีค่าใช้จ่าย และใช้ทรัพยากรที่มากขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งจำนวนยานยนต์ในระบบจะลดลง ในขณะที่เทคโนโลยี 5G NR ได้เปรียบในเรื่อง

- ความจุของเซลล์ (Capacity) เพราะ NR มีแบนด์วิดท์ที่กว้างกว่า หรือ มีการใช้ MIMO และ การเข้ารหัส LDPC จึงทำให้ Spectral efficiency ดีขึ้น
- ความน่าเชื่อถือ (Reliability) เพราะ NR มี Frame structure ที่สนับสนุน Ultra-reliable communication ใช้ Polar code ในการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาดของ Control channel มี Repetition of transmission, Channel state information (CSI) และการส่ง Packet ซ้ำ ผ่าน Packet Data Convergence Protocol (PDCP) layer
- ความหน่วง (latency) แม้ว่า CACC จะไม่มีผลต่อความหน่วงเท่าไร (100 มิลลิวินาที) แต่ในกรณีที่มีการเบรกกะทันหัน จำเป็นต้องมีการสื่อสารที่มีความหน่วงต่ำ 5G NR สามารถให้การสื่อสารที่มีความหน่วงต่ำกว่า 4 มิลลิวินาที ได้



ดังนั้น การทำ Platoon โดยใช้เทคโนโลยี 5G จึงสามารถส่งข้อมูลเกี่ยวกับ Speed, Target acceleration, Gap, ขนาดและน้ำหนักของยานยนต์ในขบวนที่ต้องการระยะเวลาที่ใช้ในการเบรก/เร่งสั้นหรือยาว ไม่เท่ากัน สภาพถนนและการจราจร และความปลอดภัย

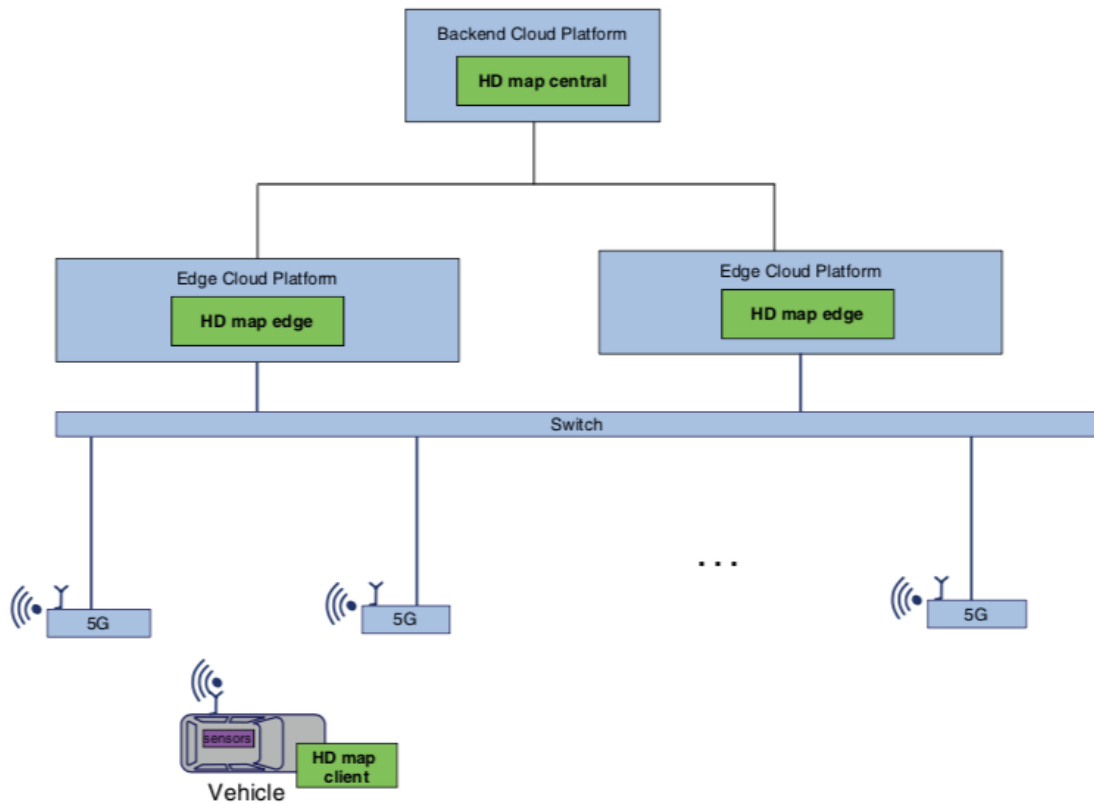
การส่งข้อมูลจากรถแต่ละคันในขบวนในลักษณะนี้ เป็นเหมือนการทำ Crowdsourcing ข้อมูลไปด้วยในตัว รูปที่ 2-25 แสดงการทำงานของ Platoon (Convoy management) ร่วมกับ Edge computing



รูปที่ 2-25 Edge Computing สำหรับ Platoons (R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020)

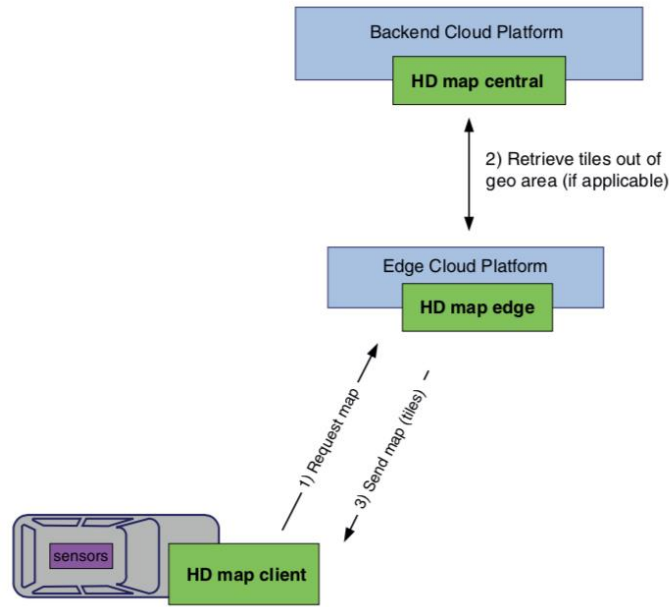
นอกจากการยกระดับ ADAS ด้วยการ Platooning แล้ว การอัปเดตข้อมูล LiDAR และ Radar แบบเวลาจริง หรือ HD map ก็เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการควบคุมยานยนต์อัตโนมัติ

Use cases ของ V2X ที่จะนำไปเกิดยานยนต์อัตโนมัติแบบเต็มรูปแบบ ได้แก่ cooperative lane change, Collision avoidance และ Convoy management รวมทั้ง Use cases ที่สำคัญ ได้แก่ ระบบ Pre-sense warning ที่ในบางกรณีจำเป็นต้องมี การแจ้งเตือนก่อนแนวสายตา (Beyond visual line of sight: BVLOS)

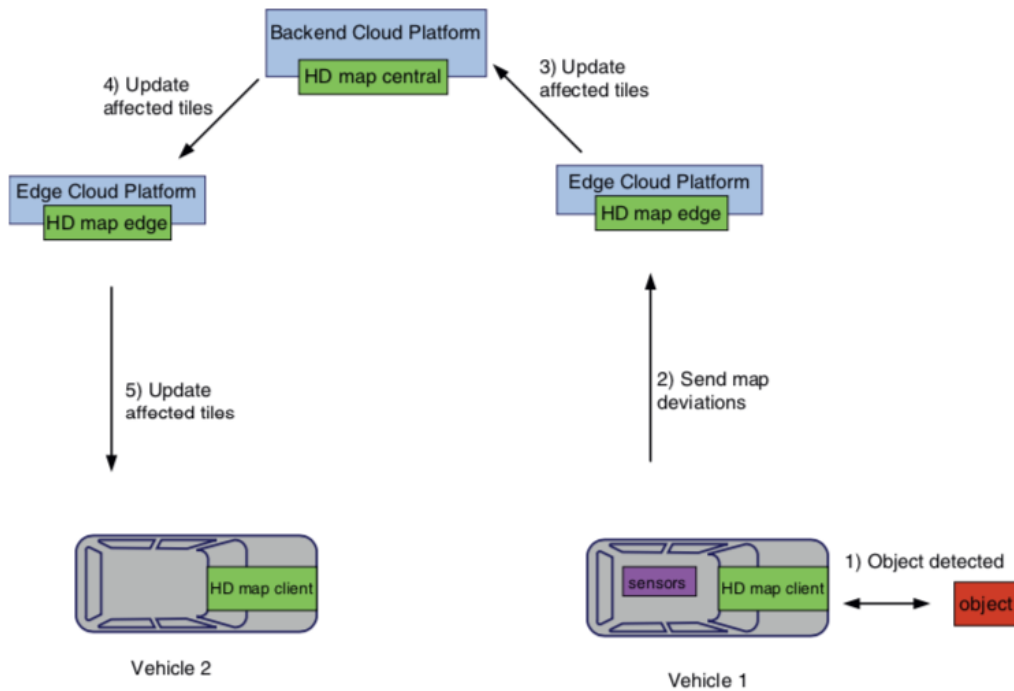


รูปที่ 2-26 HD map edge computing สำหรับ 5G-V2X (R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020)

รูปที่ 2-26 แสดง 5G-V2X ที่ทำงานผ่าน HD map Client ติดตั้งบนรถ HD map edge และ HD map cloud ส่วนรูปที่ 2-27 และรูปที่ 2-28 แสดงการดาวน์โหลด (ที่ได้ข้อมูลจาก vehicle อื่น ในลักษณะของ crowdsourcing) และการอัปเดต HD map (อัปเดตเฉพาะที่ต่างจาก HD map เดิม ผ่านระบบ time-stamp) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ในบางกรณี เช่น รถ คนข้ามถนน หรือ จักรยาน อาจไม่ต้องการอัปเดต HD map



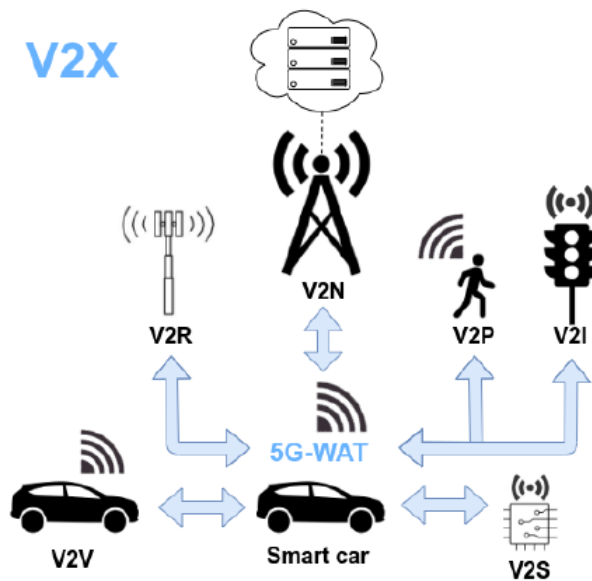
รูปที่ 2-27 การดาวน์โหลด HD map ที่อัปเดตจากส่วนกลางแล้ว
(R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020)



รูปที่ 2-28 การอัปเดต HD map ที่ update เฉพาะที่ต่างจาก HD map เดิม
(R. Vannithamby and A.C.K. Soong., 2020)

2.2.5 เทคโนโลยี 5G-Based C-V2X

ระบบจราจรอัจฉริยะแบบร่วมมือกัน (Co-operative Intelligent Transport System: C-ITS) เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีใหม่สำหรับการเชื่อมต่อและการสื่อสารระหว่างรถกับสรรพสิ่ง (Vehicle-to-Everything: V2X) ได้แก่ รถกับรถ (Vehicle-to-Vehicle: V2V) รถกับโครงสร้างพื้นฐาน (Vehicle-to-Infrastructure: V2I) รถกับคนเดินถนน (Vehicle-to-Pedestrian: V2P) รถกับโครงข่าย (Vehicle-to-Network: V2N) รถกับสถานีรับส่งสัญญาณริมถนน (Vehicle-to-Roadside Unit: V2R) และรถกับเซนเซอร์ (Vehicle-to-Sensor: V2S) ดังแสดงในรูปที่ 2-29 เทคโนโลยีการสื่อสาร V2X เป็นองค์ประกอบที่สำคัญและจำเป็นของระบบรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบเชื่อมต่อกัน (Connected Autonomous Vehicle: CAV) ซึ่งจะช่วยเพิ่มความปลอดภัยบนท้องถนนและประสิทธิภาพของการจราจรและขนส่ง



รูปที่ 2-29 การสื่อสารระหว่างรถกับสรรพสิ่ง (V2X) รูปแบบต่าง ๆ
(C. R. Stork and F. Duarte-Figueiredo., 2020)

เทคโนโลยีการสื่อสารหลักที่ใช้สำหรับระบบ C-ITS ได้แก่ Dedicated Short Range Communication (DSRC) และ Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) ซึ่ง มีคุณลักษณะการใช้งานและข้อจำกัดของแต่ละเทคโนโลยี ดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 คุณลักษณะการใช้งานและข้อจำกัดของแต่ละเทคโนโลยี

เทคโนโลยี	คุณลักษณะการใช้งาน	ข้อจำกัด
C-V2X (4G/LTE)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ รองรับเชื่อมต่อระยะไกลถึง 2 กม. ▪ มีความหน่วงเวลาประมาณ 1.5 – 3.5 วินาที 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ มีค่าใช้จ่ายในการใช้โครงข่าย

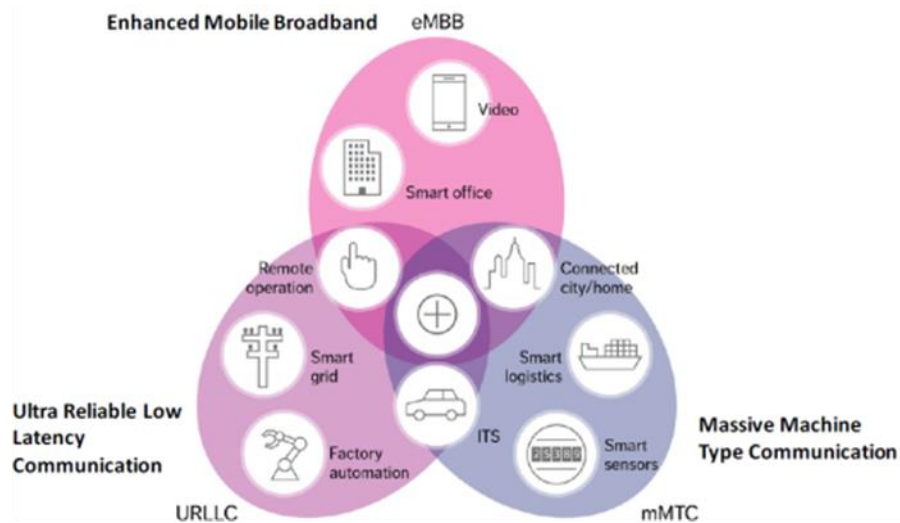
เทคโนโลยี	คุณลักษณะการใช้งาน	ข้อจำกัด
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ รองรับการส่งข้อมูลสื่อประสมที่ต้องการแบนด์วิดท์มาก ๆ ▪ รองรับการสื่อสารแบบ Non Line-of-sight (Non LOS) ▪ เหมาะสมใช้งานสำหรับ V2I แต่สามารถใช้กับ V2V ได้ 	
DSRC	<ul style="list-style-type: none"> ▪ รองรับการเชื่อมต่อระยะใกล้ถึงปานกลาง 300 – 1000 เมตร ▪ มีความหน่วงเวลาประมาณ 0.2 มิลลิวินาที ▪ อัตราเร็วในการส่งข้อมูลได้ถึง 27 Mbps ▪ เหมาะสมใช้งานสำหรับ V2V แต่สามารถใช้กับ V2I ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ รองรับการสื่อสารเฉพาะแบบ Line-of-sight (LOS) ▪ ไม่เหมาะสำหรับส่งข้อมูลสื่อประสมที่ต้องการแบนด์วิดท์มาก ๆ ▪ ไม่มีโครงข่ายที่มีสัญญาณครอบคลุมในบริเวณกว้าง

ระบบจราจรอัจฉริยะ C-ITS โดยใช้เทคโนโลยีสื่อสาร C-V2X เป็นหนึ่งในการประยุกต์ใช้งาน (Use case) ที่สำคัญและเทคโนโลยีสื่อสารระบบ 5G ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายยุคที่ 5 ที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานของระบบนิเวศดิจิทัล (Digital ecosystem) ในยุคปัจจุบัน โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่

1) Enhanced Mobile Broadband (eMBB) คือ ความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงในระดับกิกะบิตต่อวินาที (Gbps) พร้อมเพิ่มความสามารถในการรับส่งข้อมูลในขณะที่เคลื่อนที่ (Mobility)

2) Ultra-Reliable Low-Latency Communication (uRLLC) คือ ความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีความเสถียรมากและมีความหน่วงเวลาในระดับต่ำมาก ๆ (น้อยกว่า 10 มิลลิวินาที) เหมาะสำหรับภารกิจที่สำคัญยิ่ง (Mission critical) ทั้งหลาย

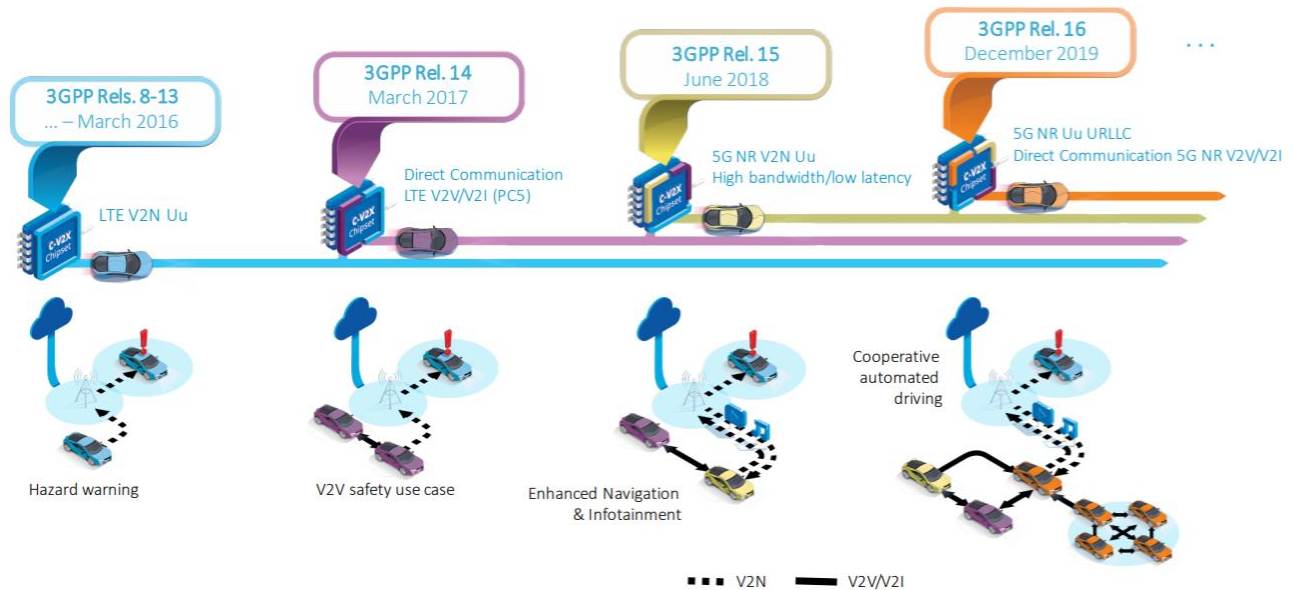
3) Massive Machine Type Communication (mMTC) คือ ความสามารถในการเชื่อมต่ออุปกรณ์จำนวนมากในพื้นที่เดียวกัน โดยมีปริมาณมากถึงระดับล้านอุปกรณ์ต่อตารางกิโลเมตร



รูปที่ 2-30 คุณสมบัติหลัก 3 ประการของเทคโนโลยี 5G และตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานที่ใช้คุณสมบัติดังกล่าว (Upendra Kumar Tiwari., 2020)

ระบบจราจรอัจฉริยะ C-ITS มีความจำเป็นในการใช้คุณสมบัติ URLLC และ mMTC ของเทคโนโลยี 5G ดังแสดงในรูปที่ 2-30

แผนผังแสดงลำดับเวลา (Timeline) ของการพัฒนามาตรฐานเทคโนโลยี C-V2X โดยหน่วยงาน 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) แสดงดังรูปที่ 2-31 เทคโนโลยี C-V2X ได้เริ่มถูกกำหนดในมาตรฐาน 3GPP Release 13 (ปี ค.ศ. 2016) สำหรับการสื่อสารแบบ V2N ผ่านโครงข่าย 4G/LTE ทาง LTE-Uu Interface (การเชื่อมต่อระหว่าง User Equipment (UE) กับสถานีฐาน 4G (eNodeB)) รองรับการประยุกต์ใช้งานในการแจ้งเตือนภัย ต่อมาใน ปี ค.ศ. 2017 มาตรฐาน 3GPP Release 14 ได้เพิ่มการสื่อสารโดยตรงแบบ V2V และ V2I โดยใช้ PC5 Interface ทำให้เพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่ ถัดมาใน ปี ค.ศ. 2018 มาตรฐาน 3GPP Release 15 ได้กำหนดมาตรฐาน C-V2X โดยใช้เทคโนโลยี 5G NR สำหรับการสื่อสารแบบ V2N ผ่านโครงข่าย 5G ทาง NR-Uu Interface (การเชื่อมต่อระหว่าง User Equipment (UE) กับสถานีฐาน 5G (gNodeB)) ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ แบนด์วิทที่กว้างขึ้นจึงสามารถรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้น (eMBB) และความหน่วงเวลาดำเนินการต่ำลง รองรับการประยุกต์ใช้งานระบบนำทางที่มีสมรรถนะสูงชันและสาระบันเทิง (Infotainment) สำหรับมาตรฐาน 3GPP Release 16 (ปี ค.ศ. 2019) ได้เพิ่มมาตรฐานของการสื่อสารโดยตรงแบบ V2V และ V2I โดยผ่าน PC5 Interface ซึ่งเป็นการสื่อสารที่มีความเชื่อถือได้สูงและความหน่วงเวลาที่ต่ำมาก (URLLC) สามารถรองรับการประยุกต์ใช้งานรถไร้คนขับที่เชื่อมต่อถึงกัน (Connected Autonomous Vehicle: CAV) อย่างเต็มรูปแบบ



รูปที่ 2-31 แผนผังแสดงลำดับเวลาของการพัฒนาเทคโนโลยี 5G NR C-V2X โดย 3GPP (J. Springer (5GAA), 5G., 2019)

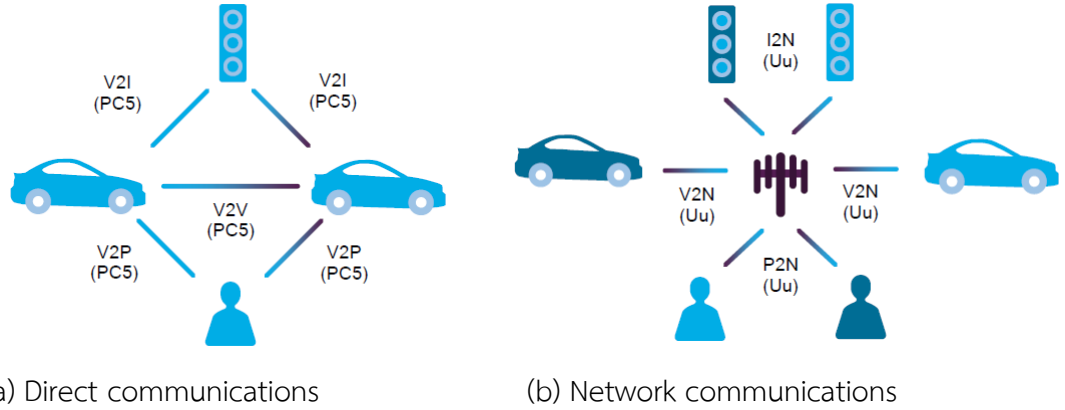
เทคโนโลยี 5G NR C-V2X ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการประยุกต์ใช้งานรถไร้คนขับที่เชื่อมต่อถึงกัน (CAV) โดยใช้คุณสมบัติที่สำคัญของเทคโนโลยี 5G ซึ่งตอบสนองความต้องการด้านการสื่อสารสำหรับฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ ของ CAV ได้แก่

- Higher throughput
- Lower latency
- Higher reliability
- High vehicle speeds

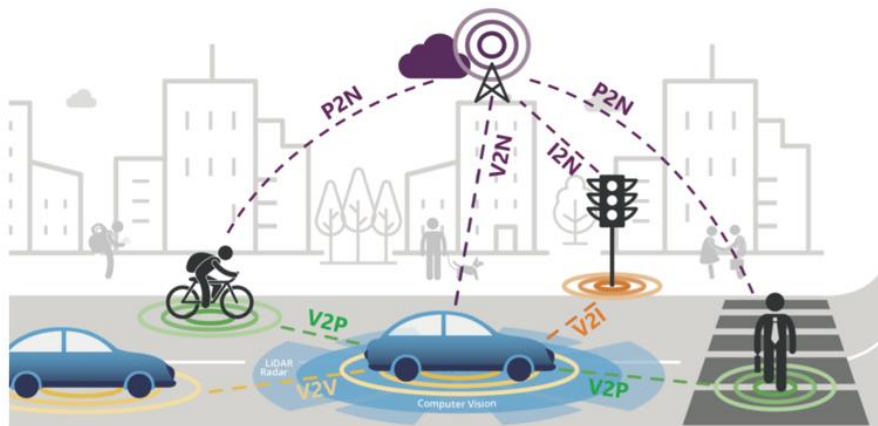
เทคโนโลยี 5G NR C-V2X ยังสามารถทำงานร่วมกันโดยใช้คลื่นความถี่เดียวกัน (Coexistence) และเข้ากันได้ (Compatible) กับเทคโนโลยี LTE C-V2X ตามมาตรฐาน 3GPP Release 14 อีกด้วย

เทคโนโลยี 5G NR C-V2X ประกอบด้วยวิธีการสื่อสาร 2 โหมด ทำงานเสริมกัน ได้แก่

- การสื่อสารโดยตรง (Direct communications) ระหว่างรถและสรรพสิ่งผ่านทาง PC5 Interface โดยไม่ต้องผ่านโครงข่าย 5G ของผู้ให้บริการโทรคมนาคม จึงมีความหน่วงเวลาน้อยมาก ใช้สำหรับการสื่อสารระยะใกล้ (< 1 กิโลเมตร) สำหรับ V2V, V2I และ V2P ในการส่งข้อมูลของรถ เช่น ตำแหน่ง ความเร็ว ฯลฯ และการแจ้งเตือนภัยในระยะใกล้



รูปที่ 2-32 โหมดการสื่อสารของเทคโนโลยี 5G NR C-V2X (Qualcomm Technologies., 2018)



รูปที่ 2-33 การทำงานร่วมกันของการสื่อสาร 2 โหมดของเทคโนโลยี 5G NR C-V2X (J. Springer (5GAA), 5G., 2019)

■ การสื่อสารผ่านโครงข่าย (Network communications) เป็นการสื่อสารระหว่างรถและสรรพสิ่งในระยะไกล (> 1 กิโลเมตร) ผ่านทางโครงข่าย 5G ของผู้ให้บริการโทรคมนาคม ทาง Uu interface ได้แก่ การสื่อสาร V2N, I2N และ P2N ใช้สำหรับการแจ้งเตือนอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในระยะไกล

การสื่อสารทั้ง 2 โหมด ของเทคโนโลยี 5G NR C-V2X แสดงดังรูปที่ 2-32 ส่วนรูปที่ 2-33 แสดงการทำงานร่วมกันของการสื่อสารทั้ง 2 โหมด

คุณสมบัติทางเทคนิคของเทคโนโลยี 5G NR C-V2X เปรียบเทียบกับเทคโนโลยี DSRC, LTE C-V2X และ 4G/LTE แสดงดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 คุณสมบัติทางเทคนิคของเทคโนโลยี 5G NR C-V2X เปรียบเทียบกับเทคโนโลยีอื่น ๆ (C. R. Stork and F. Duarte-Figueiredo., 2020)

Technical Aspects	DSRC	LTE-V2X	4G	5G V2X
Theoretical bit rate	3-27 Mb/s	20 Mb/s (uplink) 80 Mb/s (downlink)	75 Mb/s (uplink) 300 Mb/s (downlink)	10 Gb/s (uplink) 20 Gb/s (downlink)
Practice bit rate	3.5 Mb/s	-	20 Mb/s	1 Gb/s
Theoretical coverage	500 m	More than 1 km	5 km	1732 m (rural) 500 m (urban macro) 200 m (urban micro)
Practice coverage	Less than 500 m	Up to 150 m (urban) Up to 320 m (highway)	Up to 2 km	-
Theoretical mobility support	More than 250 km/h	Less than 140 km/h	Between 120 and 350 km/h	Up to 500 km/h
Theoretical latency	Less than 50 ms	Less than 100 ms or less than 20 ms in emergency situations	Less than 10 ms	Less than 4 ms
Frequency band	5.9 GHz	5.9 GHz	0.45 - 3.8 GHz Unlicensed band (5 GHz)	0.45 - 6 GHz (Frequency range 1) 24 - 52.6 GHz (Frequency range 2)
System bandwidth	10 MHz	10 MHz	20 MHz	50, 100, 200, 400 MHz (above 6 GHz)
Subcarrier spacing	156.25kHz	15kHz	15kHz	15, 30, 60 kHz (Frequency range 1) 60, 120 kHz (Frequency range 2)
Multi-tier RAT	2-tier	2-tier	3-tier	n-tier
Number of subcarriers	52	600	1200	3300
Power limits [Effective Isotropic Radiated Power (EIRP)]	33 dBm (Private RSUs and mobile OBU) 40 dBm (Public safety mobile OBU) 44.8 dBm (Public safety RSUs)	23 dBm (OBU) 33 dBm (RSU)	23 dBm (OBU) 33 dBm (RSU)	33 dBm (OBU and RSU) 46 dBm (BSs)

Qualcomm บริษัทผู้ผลิตชิปเซต (Chipset) รายใหญ่ของโลกได้เปิดตัวชิปเซต C-V2X ได้แก่ Qualcomm 9150 C-V2x ชิปเซตรุ่นแรกรองรับการสื่อสารระหว่างรถกับสรรพสิ่งโดยใช้คลื่นความถี่ ITS 5.9 GHz ตามมาตรฐานของ 3GPP เริ่มออกสู่ตลาดในช่วงปลายปี ค.ศ. 2018 โดยมีบริษัทผู้ผลิตรถยนต์พันธมิตรที่นำชิปเซตนี้ไปใช้งาน ได้แก่ Ford, Audi, PSA Groupe (ผู้ผลิตรถยนต์ยี่ห้อ Citroën, Peugeot, Opel) และ SAIC Motor (ผู้ผลิตรถยนต์ยี่ห้อ MG) ในปัจจุบัน ชิปเซต Qualcomm 9150 C-V2x รองรับการสื่อสารด้วยเทคโนโลยี 5G NR และได้ถูกนำไปใช้งานในอุปกรณ์ C-V2X ทั้งอุปกรณ์สำหรับติดตั้งบนตัวรถ (Onboard units) และอุปกรณ์ที่ติดตั้งริมถนน (Roadside units) โดยผู้ผลิตหลายราย

2.2.6 ตัวอย่างการใช้งานเทคโนโลยี 5G-Based C-V2X ในต่างประเทศ

1) ประเทศสหรัฐอเมริกา

Federal Communications Commission (FCC) ได้จัดสรรคลื่นความถี่ 5.9 GHz สำหรับการสื่อสาร V2X ในประเทศสหรัฐอเมริกา (FCC, 2020) ซึ่งขณะนี้เทคโนโลยี 5G V2X กำลังได้รับการทดสอบ และทดลองใช้งานในหลายเมืองในสหรัฐอเมริกา ได้แก่ ดีทรอยต์ (Detroit), แอนอาร์เบอร์ (Ann Arbor) ในเมืองดีทรอยต์ (University of Michigan, 2020) กรมการขนส่งมิชิแกน (MDOT) กำลังปรับใช้เครือข่าย 5G V2X เพื่อปรับปรุงความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการขนส่ง เครือข่ายนี้จะช่วยให้ยานพาหนะที่เชื่อมต่อกันสามารถสื่อสารระหว่างกันและกับโครงสร้างพื้นฐาน เช่น สัญญาณไฟจราจร เพื่อลดความแออัดและเพิ่มความปลอดภัย เครือข่าย



นี้มีจุดประสงค์เพื่อให้ยานพาหนะที่เชื่อมต่อกันสามารถสื่อสารระหว่างกันและกับโครงสร้างพื้นฐาน เช่น สัญญาณไฟจราจรและป้ายบอกทาง

การปรับใช้นี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการ American Center for Mobility (ACM) ที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาและทดสอบเทคโนโลยียานพาหนะที่เชื่อมต่อและทำงานอัตโนมัติ ACM เป็นสถานที่ทดสอบขนาด 500 เอเคอร์ที่มีสภาพแวดล้อมการทดสอบที่หลากหลาย เช่น ทางหลวงพิเศษ ทางแยกในเมือง และถนนในชนบท ซึ่งเครือข่าย 5G V2X ในดีทรอยต์จะใช้ย่านความถี่ 5.9 GHz ซึ่งได้รับการจัดสรรโดย FCC ตามที่กล่าวข้างต้น

สำหรับการสื่อสาร V2X เครือข่ายจะแบ่งออกเป็นเฟสต่าง ๆ โดยเฟสแรกมุ่งเน้นไปที่การปรับใช้โครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นเพื่อรองรับการสื่อสาร V2X เช่น ยูนิตริมถนนและเคเบิลใยแก้วนำแสง

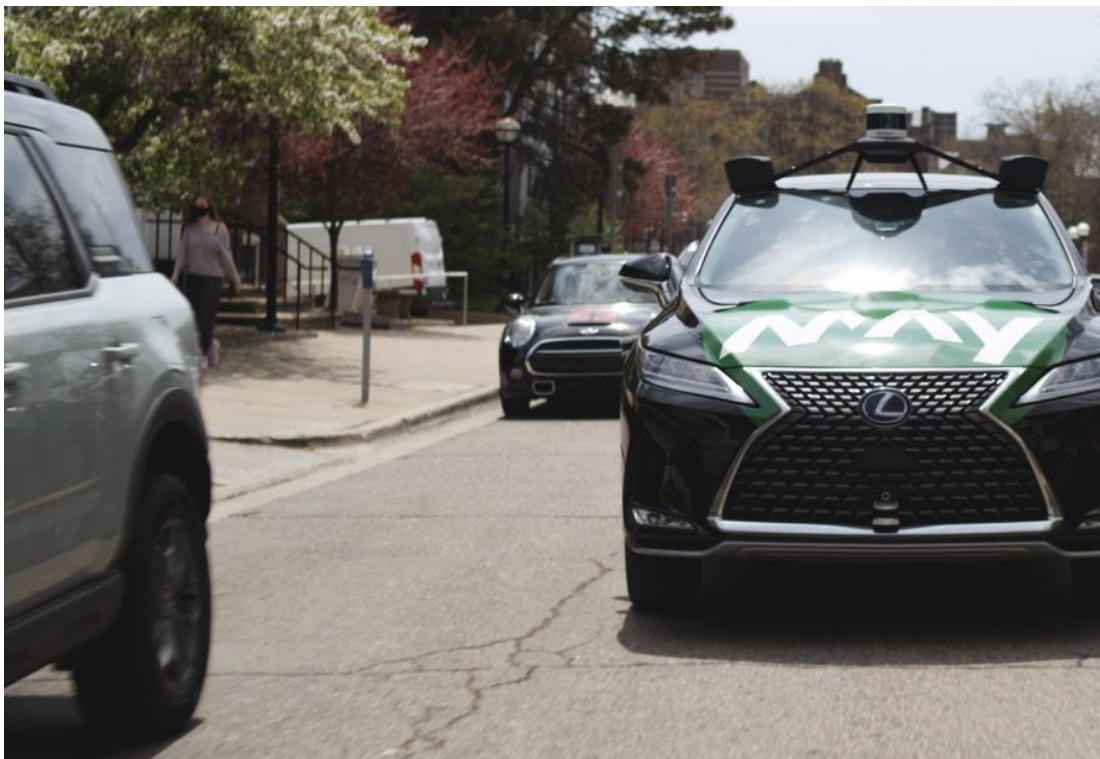
ระยะที่สองของการปรับใช้จะมุ่งเน้นไปที่การทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของเครือข่าย V2X การทดสอบจะเป็นการประกอบยานพาหนะที่ผสมผสานด้วยเทคโนโลยี V2X และการประเมินประสิทธิภาพของเครือข่ายในสภาพการใช้งานจริง การทดสอบยังเกี่ยวข้องกับการประเมินผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการใช้เทคโนโลยี V2X เช่น มีความปลอดภัยที่ดีขึ้น ลดความแออัดของสภาพจราจร และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงที่ดีขึ้น โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่

ทาง MDOT คาดหวังว่าเครือข่าย 5G V2X จะปรับปรุงความปลอดภัยและเพิ่มประสิทธิภาพการขนส่ง โดยทำให้ยานพาหนะสามารถสื่อสารระหว่างกันและกับโครงสร้างพื้นฐาน ตัวอย่างเช่น ยานพาหนะจะสามารถรับข้อมูลตามเวลาจริง (real-time) เกี่ยวกับสภาพการจราจร การปิดถนน และอันตรายอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้ผู้ขับขี่สามารถตัดสินใจได้อย่างแม่นยำและชัดเจนเกี่ยวกับเส้นทางรวมไปถึงพฤติกรรมที่ขับขี่เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและลดความแออัดในท้ายที่สุด



รูปที่ 2-34 การทดสอบการใช้งานจริงในดีทรอยต์ โดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยมิชิแกน

ในแอนอาร์เบอร์ (University of Michigan, 2021) MTC กำลังดำเนินการติดตั้งการใช้งานเทคโนโลยี 5G V2X ในวงกว้างและรองรับการใช้งานยานพาหนะประมาณ 9,000 คันที่มีการติดตั้งเทคโนโลยี V2X และรวมถึงติดตั้งบริเวณริมถนนเป็นจำนวนทั้งสิ้น 30 จุด ซึ่งจะติดตั้งตามทางแยกและจุดที่อาจเกิดอุบัติเหตุได้ง่ายทั่วมือง โดยเป้าหมายของการปรับใช้ คือ การใช้ศักยภาพของเทคโนโลยี V2X เพื่อปรับปรุงความปลอดภัยและประสิทธิภาพการขนส่ง โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของความคิดริเริ่มขนาดใหญ่เพื่อพัฒนาและทดสอบเทคโนโลยียานพาหนะที่เชื่อมต่อและทำงานอัตโนมัติในสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 2-35 การทดสอบการใช้งานจริงในแอนอาร์เบอร์ โดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X

การใช้งานแอนอาร์เบอร์จะประกอบด้วยเทคโนโลยี V2X หลายประเภท รวมถึง Dedicated Short-Range Communications (DSRC) และ Cellular-V2X (C-V2X) ซึ่ง DSRC เป็นเทคโนโลยี Wi-Fi ที่ทำงานบนย่านความถี่ 5.9 GHz ในขณะที่ C-V2X ใช้เครือข่ายเซลลูลาร์เพื่อให้การสื่อสารระหว่างยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐาน การปรับใช้กำลังดำเนินการโดยร่วมมือกับหลายภาคส่วน ได้แก่ ผู้ผลิตยานยนต์ ผู้ให้บริการเทคโนโลยี และหน่วยงานรัฐบาล โดยวัตถุประสงค์หลักเพื่อแสดงให้เห็นถึงประโยชน์และความเป็นไปได้ของเทคโนโลยี V2X ในการประเมินประสิทธิภาพของเทคโนโลยี V2X นั้น ทาง MTC ได้กำลังรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ เช่น รูปแบบการจราจร พฤติกรรมของยานพาหนะ และข้อมูลที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เพื่อใช้ในการนำเทคโนโลยี V2X และสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปปรับใช้ในอนาคตเพื่อให้เทคโนโลยีนี้มีความกว้างขวางมากยิ่งขึ้น

2) ประเทศสเปน (5G Barcelona, 2019) (Business Wire, 2020)

ในเมืองบาร์เซโลนา ประเทศสเปน สภาเทศบาลเมืองกำลังใช้เทคโนโลยี 5G V2X เพื่อปรับปรุงการจราจรและลดความแออัด โครงการนี้รวมถึงการติดตั้งเทคโนโลยีเหล่านี้ตามริมถนน รวมไปถึงบนยานพาหนะ ทำให้สามารถสื่อสารแบบเรียลไทม์ระหว่างยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐานได้ ความคิดริเริ่มนี้ได้เกิดขึ้นและมีแผนที่จะพัฒนาเป็นขนาดใหญ่ เพื่อพัฒนาให้สามารถตอบโจทย์ความต้องการของผู้ใช้งาน มีการทดสอบเทคโนโลยียานยนต์ให้สามารถเชื่อมต่อกันแบบอัตโนมัติ และสามารถใช้งานได้จริงในยุโรป โดยแผนพัฒนานี้ได้รับความร่วมมือกับ SEAT ผู้ผลิตรถยนต์สัญชาติสเปน



รูปที่ 2-36 การทดสอบการใช้งานจริงโดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในบาร์เซโลนา

เทคโนโลยี 5G V2X ที่ใช้ในบาร์เซโลนาช่วยให้ยานพาหนะสามารถสื่อสารระหว่างกันกับโครงสร้างพื้นฐานแบบเรียลไทม์ โดยให้ข้อมูลเกี่ยวกับสภาพการจราจรและอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปปรับปรุงแก้ไข และนำไปใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการจราจร ลดความแออัดบนท้องถนน และปรับปรุงความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น ทาง SEAT เองได้เตรียมความพร้อมสำหรับจัดเตรียมยานพาหนะและติดตั้งเทคโนโลยีสำคัญของ 5G V2X โดยมีวัตถุประสงค์ช่วยให้ยานพาหนะสามารถรับและส่งข้อมูลไปยังหน่วยริมถนนและไปยังยานพาหนะอื่น ๆ ที่ติดตั้งเทคโนโลยี V2X สามารถติดต่อสื่อสารกันไปได้แบบไม่ติดขัด

การใช้เทคโนโลยีนี้ในบาร์เซโลนาคาดว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากต่อการขนส่งในเมือง ด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของการจราจรและลดความแออัดบนท้องถนน อีกทั้งเทคโนโลยีนี้สามารถช่วยลดเวลาเดินทางและปรับปรุงคุณภาพอากาศ รวมไปถึงสามารถปรับปรุงความปลอดภัยด้วยการให้ข้อมูลตามเวลาจริงเกี่ยวกับอันตรายที่อาจเกิดขึ้น เช่น อุบัติเหตุหรือการปิดถนน เป็นต้น

3) ประเทศอิตาลี (5G-Carmen, 2022)

ในเมือง Turin ประเทศอิตาลี โครงการ 5G-CARMEN กำลังใช้เทคโนโลยี 5G V2X เพื่อปรับปรุงความปลอดภัยบนท้องถนนและจัดการสภาพจราจร โดยโครงการนี้ประกอบไปด้วยการติดตั้งเทคโนโลยีนี้ตามยูนิตริมถนนและในยานพาหนะ ทำให้สามารถสื่อสารแบบเรียลไทม์ระหว่างยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐาน

โครงการ 5G-CARMEN เป็นความร่วมมือระหว่างหลายองค์กรในอิตาลี เมือง Turin กระทรวงคมนาคมของอิตาลี และบริษัทโทรคมนาคม TIM เป็นต้น เทคโนโลยี 5G V2X ที่กำลังปรับใช้ใน Turin ช่วยให้ยานพาหนะสามารถสื่อสารระหว่างกันและกับโครงสร้างพื้นฐานแบบเรียลไทม์ โดยให้ข้อมูลเกี่ยวกับสภาพการจราจรและอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ข้อมูลนี้สามารถใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของการจราจร ลดความแออัด และปรับปรุงความปลอดภัย ซึ่งโครงการ 5G-CARMEN กำลังทดสอบกรณีการใช้งานที่แตกต่างกันสำหรับเทคโนโลยีนี้ รวมถึงนำไปใช้การจัดการการขนส่งสาธารณะ การเพิ่มประสิทธิภาพบริการจัดส่ง และการนำไปรวมกับเทคโนโลยีขับเคลื่อนโดยไฟฟ้า



รูปที่ 2-37 การทดสอบการใช้งานจริงโดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในเมือง Turin ประเทศ Italy

4) ประเทศญี่ปุ่น (Telecom Review, 2018)

ในปี 2565 ญี่ปุ่นได้จัดการทดสอบขนาดใหญ่ของเทคโนโลยี C-V2X เพื่อปรับปรุงความปลอดภัยและเพิ่มประสิทธิภาพการจราจร การทดสอบนี้ใช้จำนวนยานพาหนะมากกว่า 100 คัน และติดตั้งเทคโนโลยี C-V2X ที่สามารถสื่อสารระหว่างกันเอง รวมถึงสามารถติดต่อกับโครงสร้างพื้นฐานริมถนน การทดสอบดังกล่าวเกิดขึ้นในหลายเมืองทั่วประเทศญี่ปุ่น และเป็นส่วนหนึ่งของความพยายามของรัฐบาลในการเร่งพัฒนา และปรับใช้ระบบขนส่งขั้นสูง เนื่องจากเทคโนโลยี C-V2X ที่ใช้เครือข่าย 5G สามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือในการสื่อสารและมีความหน่วงต่ำกว่าเทคโนโลยี Dedicated Short Range Communications (DSRC) ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

NTT Docomo หนึ่งในบริษัทโทรคมนาคมรายใหญ่ในญี่ปุ่นได้ร่วมมือกับทาง SONY ในปรับใช้เทคโนโลยี 5G V2X เพื่อปรับปรุงความปลอดภัยบนท้องถนนและการจัดการจราจร เทคโนโลยี 5G V2X ที่ใช้งานโดย NTT Docomo ในญี่ปุ่นช่วยให้ยานพาหนะสามารถสื่อสารระหว่างกันและกับโครงสร้างพื้นฐานแบบเรียลไทม์ โดยให้

ข้อมูลเกี่ยวกับสภาพการจราจรและอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ข้อมูลนี้สามารถใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของการจราจร ลดความแออัด และปรับปรุงความปลอดภัย

หนึ่งในโครงการเด่นที่ใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในญี่ปุ่นคือ "โครงการ 5G Mobility" ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่าง NTT Docomo และพันธมิตรต่าง ๆ ได้แก่ Toyota และ Panasonic เป้าหมายของโครงการเพื่อพัฒนาและทดสอบกรณีการใช้งานต่าง ๆ สำหรับเทคโนโลยี 5G V2X ในเขตเมืองและชนบท เช่น หมวดยานพาหนะ การข้ามระยะไกล และระบบขนส่งอัจฉริยะ

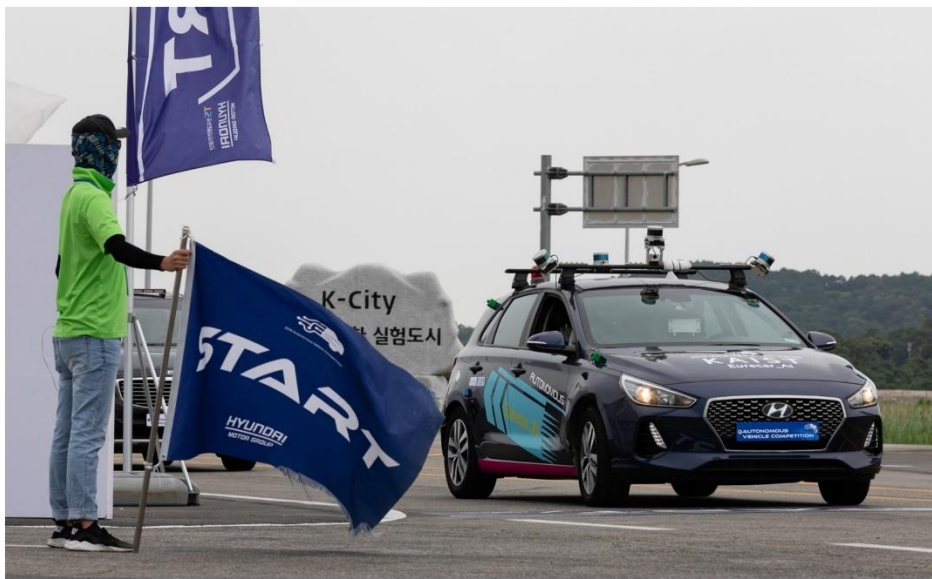


รูปที่ 2-38 การทดสอบการใช้งานจริงโดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในประเทศญี่ปุ่น

NTT Docomo ยังทำงานร่วมกับรัฐบาลญี่ปุ่นในโครงการ "National Strategic Special Zone for IoT and 5G" ซึ่งเป็นโครงการที่มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาและทดสอบเทคโนโลยี IoT และ 5G ใหม่ รวมถึงเทคโนโลยี 5G V2X โครงการนี้เกี่ยวข้องกับการติดตั้งหน่วยริมถนนและหน่วยบนรถที่เปิดใช้งาน 5G ในยานพาหนะเพื่อปรับปรุงการจัดการจราจรและความปลอดภัย ซึ่งการใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในญี่ปุ่นคาดว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการขนส่งในประเทศ

5) ประเทศเกาหลี (Jung C, 2020)

เกาหลีใต้เป็นหนึ่งในประเทศชั้นนำในการใช้เทคโนโลยี 5G V2X โดยได้รับการสนับสนุนภายใต้รัฐบาลเกาหลีใต้ ในการส่งเสริมการพัฒนาและการใช้งานยานพาหนะที่เชื่อมต่อและเป็นอิสระ (CAV) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของจุดริเริ่มโครงการ "Digital New Deal" หนึ่งในโครงการที่โดดเด่น ซึ่งใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในเกาหลีใต้ คือโครงการ K-City ซึ่งเป็นพื้นที่ทดสอบขนาดใหญ่สำหรับ CAV โครงการนี้เปิดตัวไปแล้วในปี 2561 ประกอบด้วยเมืองจำลองที่มีสภาพถนนและโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ ได้แก่ อุโมงค์ สะพาน และทางหลวง เป้าหมายของโครงการ K-City นั้น เพื่อทดสอบและพัฒนาการใช้งานในกรณีต่าง ๆ สำหรับ CAVs รวมถึงการจัดหมวดหมู่ยานพาหนะ การชำระระยะไกล และระบบขนส่งอัจฉริยะ คุณสมบัติหลักและข้อได้เปรียบของระบบโครงข่าย 5G V2X ได้แก่ มีแบนด์วิธสูง ค่าความหน่วงเวลาต่ำ และการครอบคลุมที่กว้าง ซึ่งสรุปได้ว่าเทคโนโลยี 5G V2X มีศักยภาพในเชิงปฏิบัติที่ดีในระบบโครงข่ายสื่อสาร 5G V2X และมีประสิทธิภาพในการโต้ตอบกับยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐาน และรองรับการใช้งานในหลายแอปพลิเคชันที่หลากหลายพร้อมกัน ตั้งแต่ระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูงไปจนถึงการขับขี่อัตโนมัติ



รูปที่ 2-39 การทดสอบการใช้งานจริงโดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในประเทศเกาหลีใต้ใน K-city

โครงการ K-City ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทโทรคมนาคมรายใหญ่ของเกาหลีใต้ ได้แก่ SK Telecom, KT และ LG Uplus ซึ่งกำลังปรับใช้เครือข่ายและโครงสร้างพื้นฐาน 5G เพื่อเปิดใช้งานการสื่อสารโครงข่าย 5G V2X นอกจากนั้นบริษัทเหล่านี้ยังเป็นพันธมิตรกับผู้ผลิตรายอื่น เช่น Hyundai และ Kia ซึ่งเป็นยานพาหนะที่นำมาใช้ในการพัฒนาและทดสอบเทคโนโลยี CAV

นอกจากโครงการ K-City แล้ว เกาหลีใต้ยังใช้เทคโนโลยี 5G V2X บนถนนสาธารณะในหลายเมืองด้วย ตัวอย่างเช่น SK Telecom และ Hyundai ได้เปิดตัวโครงการนำร่องเพื่อใช้เทคโนโลยี 5G V2X บนถนนยาว 5.4



กิโลเมตร ในเมือง Sejong โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงศักยภาพของเทคโนโลยี V2X ในการปรับปรุงความปลอดภัยทางถนน และลดความแออัดของการจราจร

6) ประเทศจีน (Eric Walz, 2021)

Baidu เป็นบริษัทยักษ์ใหญ่ด้านเทคโนโลยีของจีนได้ประกาศเปิดตัว Apollo Air ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มใหม่สำหรับการขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ใช้ข้อมูลเรียลไทม์จากยูนิตข้างถนนที่เชื่อมต่อกับ 5G Apollo Air ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ Apollo นำโดย Baidu เพื่อวัตถุประสงค์มุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีไร้คนขับ และให้บริการแก่ผู้ผลิตรถยนต์รวมถึงพันธมิตรอื่น ๆ

แพลตฟอร์มใหม่นี้ใช้เทคโนโลยีการสื่อสาร 5G V2X สำหรับใช้ในการสื่อสารแบบเรียลไทม์ระหว่างยานพาหนะด้วยกัน และยูนิตข้างถนน เทคโนโลยีนี้เองทำให้สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลได้ถูกต้อง แม่นยำและทันที่วงที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ยานพาหนะที่ขับเคลื่อนด้วยตนเอง สามารถตัดสินใจได้อย่างถูกต้องและเต็มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งยูนิตรถยนต์มีการติดตั้งระบบเซนเซอร์ และกล้อง เพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสภาพจราจร สภาพถนน และข้อมูลที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ณ ขณะนั้นซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งไปยังยานพาหนะแบบเรียลไทม์

Apollo Air ได้รับการออกแบบให้เป็นแพลตฟอร์มแบบเปิด นันหมายความว่าผู้ผลิตรถยนต์หรือพันธมิตรรายอื่นสามารถใช้ได้ ประกอบกับชุดพัฒนาซอฟต์แวร์ (SDK) ที่ช่วยให้นักพัฒนาสามารถสร้าง ปรับแต่งและทดสอบระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติของตนเองได้ Baidu ได้ร่วมมือกับผู้ผลิตรถยนต์หลายราย เช่น BAIC Group, BYD และ Changan Automobile เพื่อทดสอบสมรรถนะประสิทธิภาพในสภาวะแวดล้อมจริง

การใช้เทคโนโลยี 5G V2X ใน Apollo Air มีประโยชน์หลายประการ ในด้านการเปิดใช้งานการสื่อสารแบบเรียลไทม์ระหว่างยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐาน เทคโนโลยีนี้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพความปลอดภัยบนท้องถนน ลดความแออัดของการจราจร และเพิ่มประสบการณ์การขับขี่ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายและความซับซ้อนของเทคโนโลยีไร้คนขับ โดยอนุญาตให้ยานพาหนะสามารถใช้ข้อมูลจาก ยูนิตข้างถนนที่มีการติดตั้งเทคโนโลยี 5G V2X มาช่วยผสมผสานการประมวลผลการตัดสินใจร่วมกับเซนเซอร์ และกล้องบนรถ



รูปที่ 2-40 การทดสอบการใช้งานจริงโดยใช้เทคโนโลยี 5G V2X ในประเทศจีน

การเปิดตัวของ Apollo Air เป็นสัญญาณของแนวโน้มในการรวมเทคโนโลยีการขับเคลื่อนอัตโนมัติและการสื่อสาร 5G V2X เข้าด้วยกัน ในขณะเดียวกันการใช้งานและขยายสัญญาณเครือข่าย 5G ยังคงขยายไปทั่วโลก และมีแนวโน้มว่าระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ จะต้องพึ่งพาเทคโนโลยีนี้มากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และความปลอดภัย

2.3 Use Cases

2.3.1 บทนำ

โดยเฉลี่ยแต่ละปีทั่วโลกจะมีผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุบนท้องถนนประมาณ 1.35 ล้านคน (ASIRT, 2023) สำหรับประเทศไทยนั้น จากสถิติทุก ๆ 1 ชั่วโมง จะมีผู้เสียชีวิต 2 คน จากอุบัติเหตุทางถนน (ThaiRSC, 2023) ซึ่งนับว่าเป็นอัตราการเกิดอุบัติเหตุที่สูงมาก ดังนั้นการพัฒนา แก้ไขและปรับปรุงเรื่องของความปลอดภัยบนท้องถนนจึงเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่ง โดยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้พยายามเพิ่มความปลอดภัยบนท้องถนน (Lyu, 2020) แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มักติดปัญหาเรื่องเทคโนโลยีสำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์บนยานพาหนะหรืออุปกรณ์บนโครงสร้างพื้นฐาน เนื่องจากเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการสื่อสารในปัจจุบัน มีขีดจำกัดของความหน่วงเวลา (Latency) ที่สูง ทำให้ไม่สามารถตอบสนองได้ทันที ซึ่งอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ ประกอบกับขีดจำกัดเรื่องอัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput) ที่น้อย ทำให้ไม่สามารถส่งข้อมูลจำนวนมากไปประมวลผลและวิเคราะห์ เพื่อให้เกิดประโยชน์ได้ ทั้งนี้ ด้วยการพัฒนาต่อยอดเทคโนโลยีอย่างก้าวกระโดดทำปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่ชื่อว่า “5G” ซึ่งเป็นเทคโนโลยี

สำหรับการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และได้ก้าวข้ามขีดจำกัดต่าง ๆ ในอดีตทั้งในเรื่องของความหน่วงและความเร็วในการส่งข้อมูล กล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบกับเครือข่าย 4G แล้ว ในเครือข่าย 5G นั้น สามารถให้ความเร็วในการส่งข้อมูลได้ถึง 20 Gbps ซึ่งมากกว่าเครือข่าย 4G ถึง 20 เท่า (ETSI, 2023) และให้ค่าความหน่วงเพียง 1 มิลลิวินาที ดังนั้น ในอนาคตอันใกล้ จึงสามารถประยุกต์เทคโนโลยี 5G นี้ เป็นแกนกลางสำคัญในการสร้างระบบเพื่อพัฒนาและเพิ่มความปลอดภัยบนท้องถนนได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการบริหารจัดการได้อีกด้วย โดยในระยะหลังได้มีงานวิจัย เช่น การทำนายความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุด้วยการใช้ Big Data Mining และการวิเคราะห์ข้อมูลจริงของการเกิดอุบัติเหตุ (Zhao, 2019) การเสนอโอกาสในการใช้งานโครงข่ายรูปแบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับสภาพท้องถนนและปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ (Zadobrischi, 2021) การพัฒนากระบวนการในการส่งข้อมูลให้มีความเสถียรมากขึ้น (Li, 2020)

โดยในต่างประเทศ ได้มีการศึกษา Use Cases ของระบบ 5G-V2X ตัวอย่างเช่น งานวิจัยใน (Maior, 2020) และ บริษัท NTT DoCoMo ในประเทศญี่ปุ่น (NTT Docomo, 2023) ได้ศึกษาการตรวจจับผู้ขับขี่ที่มีอาการง่วงผ่านกล้องที่ติดอยู่ในรถยนต์ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยบนท้องถนนได้ (ดังแสดงในรูปที่ 2-41) บริษัท Nokia ในประเทศแถบยุโรปได้ศึกษาการสื่อสารระหว่างรถยนต์และโครงข่ายพื้นฐานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยบนท้องถนน (Nokia, 2023) บริษัท General Motors ในประเทศสหรัฐอเมริกา พัฒนารถยนต์ที่สามารถเชื่อมต่อกันได้ผ่านเครือข่าย 5G [CNBC, 2020] และบริษัท Huawei ในประเทศจีน ได้พัฒนาระบบ 5G บนรถโดยสารสาธารณะให้สามารถเชื่อมต่อ Internet ความเร็วสูงได้ (Huawei, 2023) โดยจะเห็นว่า Use Cases เหล่านี้จะใช้หลักการการส่งผ่านข้อมูลภายในรถกลับไปศูนย์ควบคุมกลาง (C-V2N) เป็นหลัก



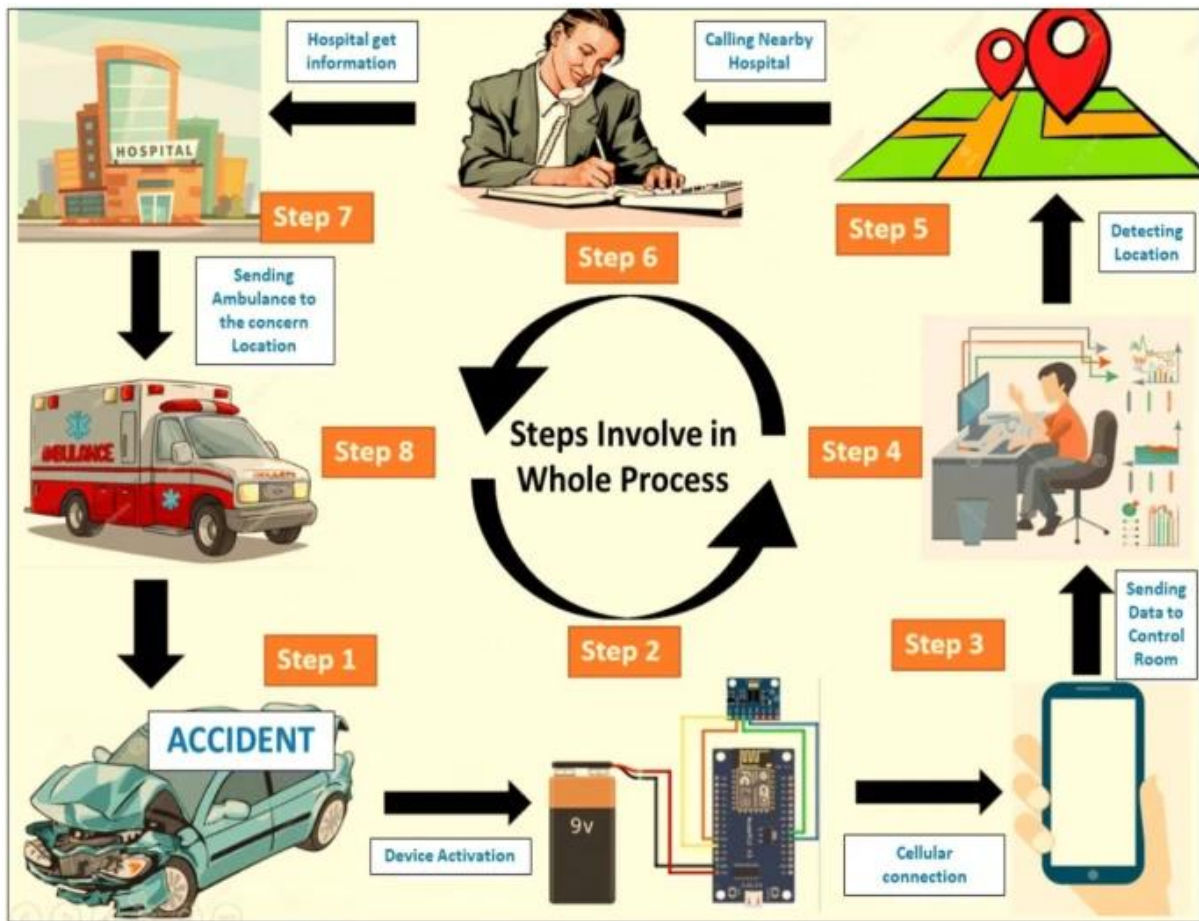
รูปที่ 2-41 ภาพตัวอย่างการตรวจจับผู้ขับขี่ที่มีอาการง่วงผ่านกล้องที่ติดอยู่ในรถยนต์ (PADMAVATHY SUBRAMANIAN., 2021)

2.3.2 เทคโนโลยีการแจ้งเตือนการเกิดอุบัติเหตุ

เทคโนโลยีในการแจ้งเตือนการเกิดอุบัติเหตุในเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างเซนเซอร์และระบบประมวลผลเพื่อให้สามารถระบุตำแหน่ง ความรุนแรง ความเร็ว ณ ขณะการเกิดอุบัติเหตุและด้านที่เกิดอุบัติเหตุได้อย่างแม่นยำ ในด้านของข้อมูลนั้นจะใช้ข้อมูลที่วัดได้จากเซนเซอร์ โดยปัจจุบันเซนเซอร์ที่นิยมใช้ในการตรวจจับการเกิดอุบัติเหตุมีอยู่ 2 เซนเซอร์ ได้แก่ เซนเซอร์ตรวจจับการชน (Crash Sensor) และเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer Sensor)

(Raut, 2014) ได้นำเสนอระบบแจ้งเตือนอุบัติเหตุโดยใช้ Internet of Things (IoT) และ Cloud โดยการพัฒนาารบบควบคุมและรับข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ เช่น XBee WiFi Module, Xbee Shield, GPS Module, Seeduino และ Crash Sensors เพื่อนำไปใช้ติดตั้งที่ด้านหน้าของรถยนต์เพื่อใช้ตรวจจับการอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้นจากการชนจากด้านหน้า โดยหลักการทำงาน คือ เมื่อ Crash Sensors ตรวจจับได้ว่าการปะทะสัญญาณการปะทะและข้อมูลตำแหน่งจาก GPS จะถูกส่งผ่าน Seeduino Controller Board ไปยัง XBee WiFi Module และส่งข้อมูลไปยังระบบ Cloud เพื่อทำการหาโรงพยาบาลใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ส่งมาเพื่อให้ผู้ขับขี่ไปรับความช่วยเหลือได้อย่างทันท่วงที

เพื่อให้การตรวจจับอุบัติเหตุแม่นยำมากยิ่งขึ้น ต่อมา (Dashora, 2020) ได้พัฒนานำเอาเซนเซอร์วัดความเร่งมาใช้ระบุด้านของรถที่เกิดอุบัติเหตุโดยมีการใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง 2 ตัว ในการตรวจความเร่งที่ด้านหน้าและด้านหลังของรถ เมื่อรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วหากมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นจะทำให้ความเร่งที่เกิดขึ้นด้านหน้าและด้านหลังไม่เท่ากัน หากความต่างของความเร่งเป็นค่าบวก แสดงว่า เกิดการชนจากด้านหน้าและในทางกลับกันความเร่งจะเป็นค่าลบ เมื่อเกิดการชนทางด้านหลัง เมื่อตรวจจับการเกิดอุบัติเหตุได้ ข้อมูลด้านของการเกิดอุบัติเหตุพร้อมกับตำแหน่งจะถูกส่งไปยังระบบ Cloud เพื่อทำการหาโรงพยาบาลใกล้เคียงต่อไป ตัวอย่างแสดงขั้นตอนของระบบตรวจจับอุบัติเหตุแสดงในรูปที่ 2-42



รูปที่ 2-42 รูปตัวอย่างแสดงขั้นตอนของระบบตรวจจับอุบัติเหตุ (Dashora, 2020)

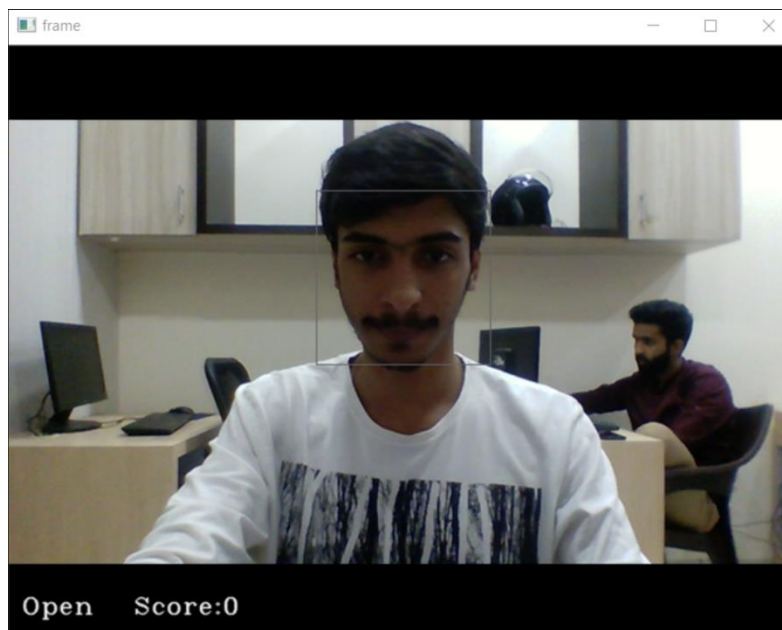
เพื่อให้การตรวจจับอุบัติเหตุสามารถแบ่งแยกประเภทของข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความรุนแรงของการเกิดอุบัติเหตุ (Balfaqih, 2022) ได้นำเสนอ และพัฒนาระบบต้นแบบทดสอบในการตรวจจับและแบ่งแยกประเภทของการเกิดอุบัติเหตุ โดยได้มีการออกแบบสถาปัตยกรรมในการติดตั้งอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้นบนรถยนต์ ได้แก่ เซนเซอร์ตรวจจับไฟและคว้น GPS เซนเซอร์วัดความเร่ง เซนเซอร์วัดแรง และการปะทะ และเซนเซอร์วัดกระแส โดยมี Microcontroller ในการรวบรวมและประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์เหล่านี้ โดยได้มี

การใช้การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อนำข้อมูลต่าง ๆ จากเซนเซอร์ไปทำการหาโมเดล เพื่อใช้ในการแบ่งประเภทของความรุนแรงของการเกิดอุบัติเหตุ โดยได้มีการเปรียบเทียบโมเดลการจำแนก (Classification Model) ต่าง ๆ ได้แก่ Gaussian Mixture Model (GMM), Naive-Bayes Tree (NB), Decision Tree (DT), และ Classification and Regression Trees (CART) เพื่อหาโมเดลที่เหมาะสมที่สุด เมื่อโมเดลตรวจจับได้ว่ามีอุบัติเหตุเกิดขึ้น Microcontroller ก็ทำการส่งข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุไปยัง Emergency Service ผ่านทาง GSM Transmitter ต่อไป

2.3.3 เทคโนโลยีการตรวจจับอาการง่วงนอน

เทคโนโลยีการตรวจจับอาการง่วงนอนนั้นส่วนมากใช้วิธีตรวจจับตำแหน่งใบหน้า และดวงตาของผู้ขับขี่ เพื่อนำมาวิเคราะห์ว่าผู้ขับขี่มีอาการง่วงนอนอยู่ในขณะนั้นหรือไม่ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง (ML: Machine Learning Algorithm) และอัลกอริทึมบนพื้นฐานที่กำหนด (Rule-Based Algorithm)

(DataFlair, 2021) ได้ยกตัวอย่างอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการตรวจจับอาการง่วงนอนของผู้ขับขี่โดย (1) ใช้ OpenCV สำหรับรวบรวมภาพจากกล้องเว็บแคม (2) จากนั้นทำการตรวจจับใบหน้าภายในรูปภาพนั้นและสร้างพื้นที่ที่สนใจ (ROI: Region of Interest) (3) ก่อนที่จะตรวจจับดวงตาภายในพื้นที่ที่สนใจ (4) แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) เพื่อจำแนกว่าดวงตาของบุคคลนั้นเปิดหรือปิด (5) ปิดท้ายด้วยการคำนวณคะแนนว่าคุณคนนั้นมีอาการง่วงนอนหรือไม่



รูปที่ 2-43 ตัวอย่างการตรวจจับอาการง่วงนอนด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง (DataFlair, 2021)

(Rosebrock, 2017) ได้พัฒนาต่อยอดการตรวจจับการกระพริบตาเดิมเพื่อให้สามารถตรวจจับอาการง่วงนอนได้ โดยการใช้ OpenCV, dlib, และ Python งานนี้ได้ทำการใช้ Raspberry PI 3 ในการตรวจจับอาการง่วงนอน แต่พบว่า Raspberry PI นั้นไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการตรวจจับขอบเขตใบหน้าแบบเรียลไทม์ การตรวจจับอาการง่วงนอนนั้น (1) เริ่มต้นด้วยการตรวจจับขอบเขตใบหน้าและทำการค้นหาพื้นที่ดวงตา (Eye Regions) ภายในขอบเขตใบหน้า (2) จากนั้นทำการคำนวณหาสัดส่วนลักษณะดวงตา (EAR: Eye Aspect Ratio) เพื่อระบุว่าดวงตานั้นเปิดหรือปิดอยู่ โดยเปรียบเทียบกับค่าพื้นฐานที่กำหนดไว้ล่วงหน้า (3) เมื่อตรวจจับดวงตาแล้วพบว่าดวงตาปิดอยู่เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้วก็จะมีการแจ้งเตือนเพื่อปลุกผู้ขับขี่ต่อไป



รูปที่ 2-44 ตัวอย่างการตรวจจับอาการง่วงนอนด้วยอัลกอริทึมบนพื้นฐานที่กำหนด [Rosebrock, 2017]

นอกจากผู้พัฒนาทั่วไปแล้ว บริษัท NVIDIA ยังได้มีการพัฒนาไลบรารีที่ช่วยตรวจจับพฤติกรรมผู้ขับขี่ที่เรียกว่า NVIDIA DRIVE IX ที่สามารถตรวจจับทั้งตำแหน่งดวงตาและศีรษะ ทำให้สามารถประเมินพฤติกรรมของผู้ขับขี่ได้ว่ามีความระมัดระวังขณะขับรถหรือไม่ โดยไลบรารีนี้ได้ประยุกต์ใช้เครือข่ายระบบประสาทเชิงลึก (DNN: Deep Neural Network) หลายตัวในการจำแนกใบหน้าและถอดรหัสการแสดงออกของผู้ขับขี่ โดยเริ่มต้นด้วย (1) การตรวจจับใบหน้า (2) ระบุจุดสำคัญต่าง ๆ เช่น พื้นที่ดวงตา จมูก เป็นต้น นอกเหนือจากวิธีพื้นฐานแล้วยังมีการใช้ (1) GazeNet ตรวจจับการจ้องมองเพื่อบ่งบอกว่าผู้ขับขี่สามารถมองเห็นสิ่งกีดขวางบนถนนได้หรือไม่ (2) SleepNet ในการตรวจจับอาการง่วงนอน โดยจำแนกว่าดวงตาเปิดหรือปิดอยู่ ผ่าน State Machine เพื่อระบุระดับอาการเหนื่อยล้าของดวงตา (3) ActivityNet เพื่อติดตามกิจกรรมของผู้ขับขี่ ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานโทรศัพท์มือถือ การจับหรือปล่อยพวงมาลัย และความเอาใจใส่ของผู้ขับขี่ต่อเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบนถนน ตัว DRIVE IX ยังสามารถตรวจจับได้ว่าผู้ขับขี่นั่งบนที่นั่งอย่างถูกต้องและให้ความสนใจกับเหตุการณ์บนถนนอยู่หรือไม่อีกด้วย

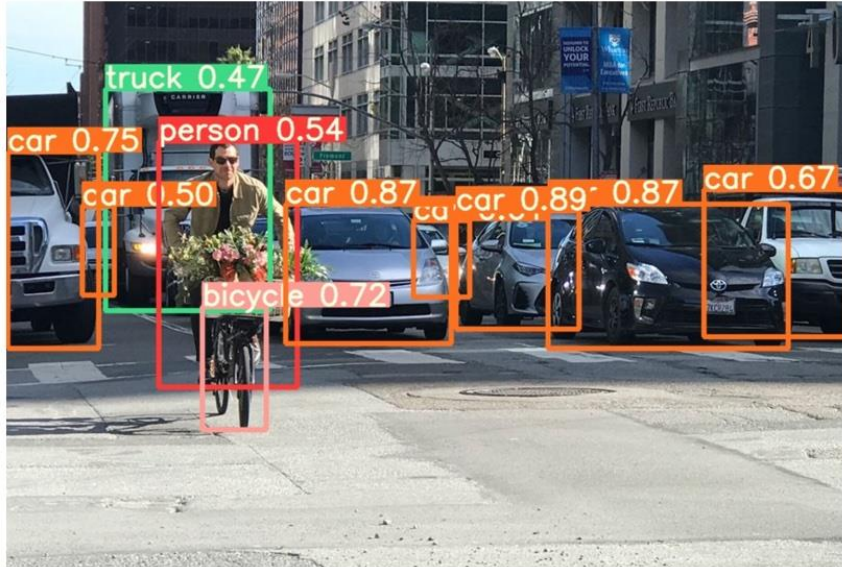


รูปที่ 2-45 ตัวอย่างรูปพฤติกรรมของผู้ขับขี่ได้จาก NVIDIA DRIVE IX

2.3.4 เทคโนโลยีการนับจำนวนผู้โดยสาร

เทคโนโลยีการนับผู้โดยสารส่วนมากอาศัยการประมวลผลด้วยภาพด้วยซอฟต์แวร์ในการตรวจจับวัตถุต่าง ๆ ภายในภาพ เพื่อคัดกรองเฉพาะวัตถุที่ถูกระบุว่าเป็นคน และนับจำนวนคนที่ถูกต้อง

YOLOv5 เป็นอัลกอริทึมในการตรวจจับวัตถุถูกนำเสนอโดย Ultralytics (YOLOv5, 2020) สามารถนำมาใช้สำหรับการนับคน โดยอัลกอริทึมนี้สามารถตรวจจับและติดตามบุคคลในเวลาจริงได้ นอกจากนี้ YOLOv5 ยังสามารถฝึกและปรับปรุงประสิทธิภาพบนชุดข้อมูลขนาดใหญ่ในสถานที่ต่าง ๆ เช่น ห้างสรรพสินค้าหรือสนามบิน เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับและนับคน และยังมีเวลาตอบสนองที่รวดเร็ว รวมไปถึงความแม่นยำสูงทำให้เป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในการนับผู้โดยสาร



รูปที่ 2-46 ภาพตัวอย่างการตรวจจับวัตถุโดยใช้ YOLOv5 (Maindola, 2021)

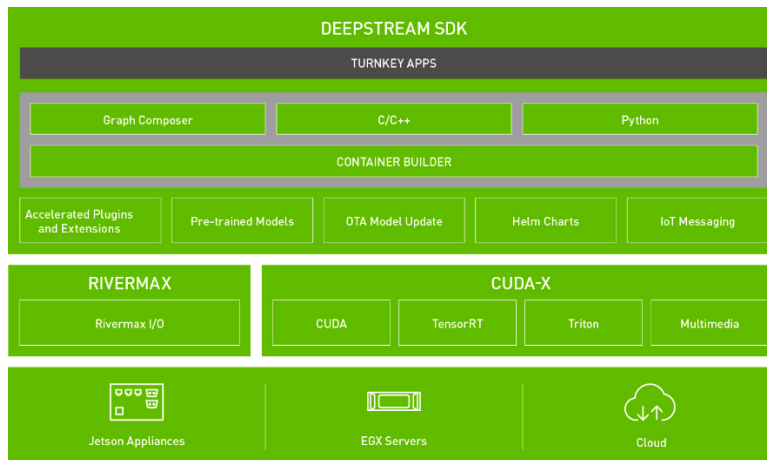
การนับจำนวนผู้โดยสารในรถขับซีอีเอ็มมีความท้าทายกว่าการนับคนโดยทั่วไป เนื่องด้วยข้อจำกัดภายในรถขับซีอีเอ็มที่ทางสภาพแสงที่มีความสว่างไม่คงที่ มุมมองการมองเห็นของภาพที่ได้จากกล้องที่แคบและต่ำ และจำนวนคนที่หนาแน่น

เนื่องด้วยการใช้งานจริง การประมวลผลภาพที่เท่าทันต่อเวลามีความสำคัญเป็นอย่างมาก (Ren, 2020) พัฒนาโมเดลในการนับจำนวนคนโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกที่ชื่อว่า SqueezeNet เพื่อลดขนาดของโมเดลที่ใช้ในการนับจำนวนคน รวมถึงลดจำนวนพารามิเตอร์ ซึ่งช่วยให้เวลาที่ใช้ในการประมวลผลลดลง โดยมีขั้นตอน คือ (1) ปรับความสูงและมุมกล้องและตั้งค่าเกณฑ์ในการตรวจจับ (2) ใช้วิธีการแบ่งส่วนเพื่อให้ได้จำนวนกล่องในการตรวจจับมากขึ้น (3) ออกแบบและสร้างเครือข่ายการเรียนรู้ด้วย Fire Layer (4) ตรวจจับและนับจำนวนคนโดยใช้การเลือกขอบเขตที่เหมาะสม (5) ประมวลผลและสรุปผลข้อมูลจำนวนคน (6) นำออกผลลัพธ์ จากการทดลองพบว่า โมเดลที่พัฒนาขึ้นมีจำนวนพารามิเตอร์ลดลงร้อยละ 11.5 สามารถตรวจจับและนับจำนวนคนได้ 41 เฟรมต่อวินาที และมีความเที่ยงตรงโดยเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 72

ความแม่นยำในการนับจำนวนคนลดลงในที่มีความหนาแน่นของกลุ่มคนมาก เช่น บนท้องถนน บนรถโดยสาร ในห้างสรรพสินค้า เป็นต้น (Qi, 2021) ได้นำ YOLOv5 มาปรับใช้ในการนับจำนวนคนในฝูงชน และมีการปรับปรุงอัลกอริทึม YOLOv5 โดยการใช้วิธีการจัดแจงพีเจอร์ของภาพใหม่ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น และสามารถตรวจจับเป้าหมายขนาดเล็กในรูปภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น อัลกอริทึมที่ได้พัฒนานั้นสามารถให้ความแม่นยำในการนับจำนวนคนในฝูงชนถึงร้อยละ 98.54 และได้ค่าความผิดพลาด RMSE ลดลงจากเดิมถึง 41.7

2.3.5 เทคโนโลยีการสตรีมวิดีโอ

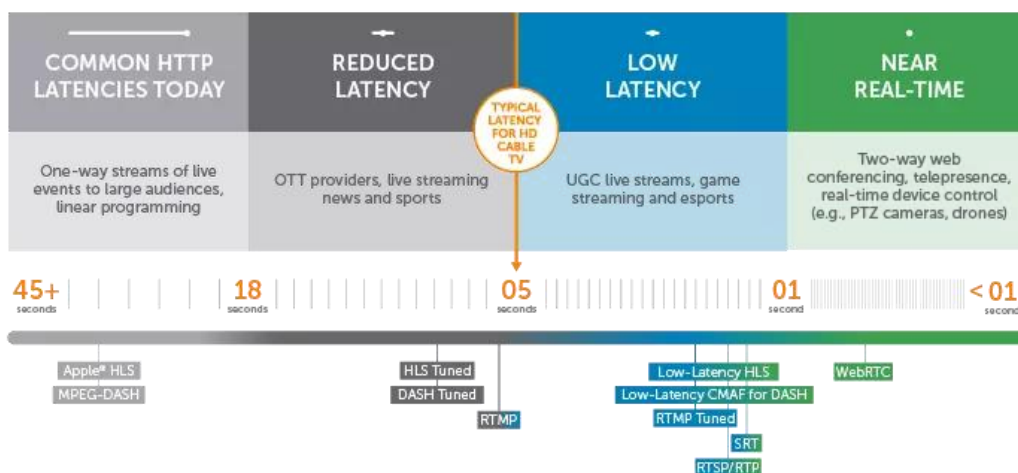
ปัจจุบันมีการใช้งานกล้องเพื่อบันทึกทั้งภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหวในการตรวจสอบสภาพการจราจร รวมไปถึงการตรวจจับผู้ทำผิดกฎหมายเป็นจำนวนมาก การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในการวิเคราะห์ภาพเคลื่อนไหวแบบเรียลไทม์และส่งข้อมูลไปยังศูนย์ควบคุมนั้นถือเป็นความท้าทายอย่างหนึ่งในการทำงาน บริษัท NVIDIA ได้มีการพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์สตรีมมิ่งแบบครบวงจรขึ้น ชื่อว่า NVIDIA DeepStream SDK (DeepStream, 2023) โดยเครื่องมือนี้ช่วยให้ผู้พัฒนาสามารถสร้าง Pipeline ในการวิเคราะห์วิดีโอ รูปภาพ และข้อมูลเซนเซอร์แบบเรียลไทม์ได้



รูปที่ 2-47 NVIDIA DeepStream SDK

โดยโพรโทคอลสำหรับการทำสตรีมมิ่งวิดีโอที่นิยมกัน คือ RTSP และ RTMP ซึ่งสนับสนุนการสตรีมมิ่งแบบความล่าช้าต่ำ (Low-Latency Streaming) แต่โดยพื้นฐานแล้วโพรโทคอลทั้งสองตัวนี้ไม่รองรับการใช้งานกับเว็บเบราว์เซอร์ส่วนใหญ่ จึงได้เกิดการพัฒนาโพรโทคอลสำหรับสตรีมมิ่งอื่น ๆ มาอย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 2-48

STREAMING LATENCY AND INTERACTIVITY CONTINUUM

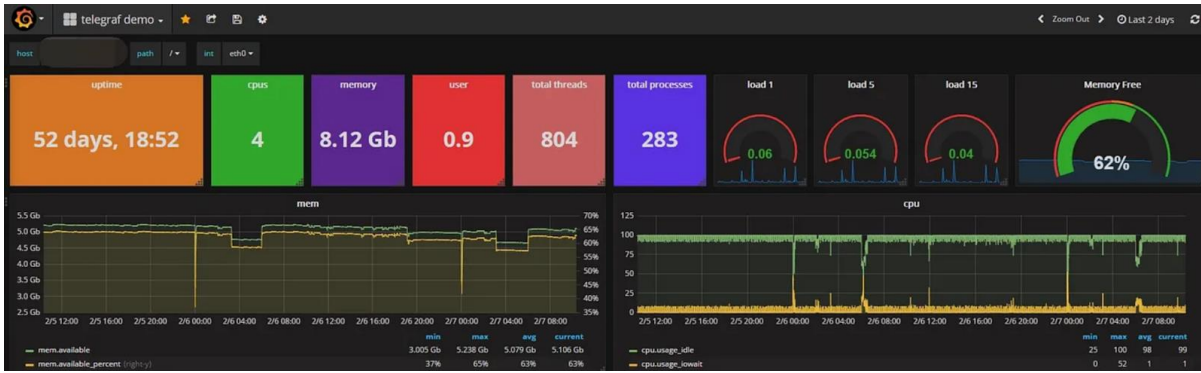


รูปที่ 2-48 ตัวอย่างโพรโทคอลสำหรับสตรีมมิ่ง [Traci, 2022]

2.3.6 เทคโนโลยีการแสดงผล

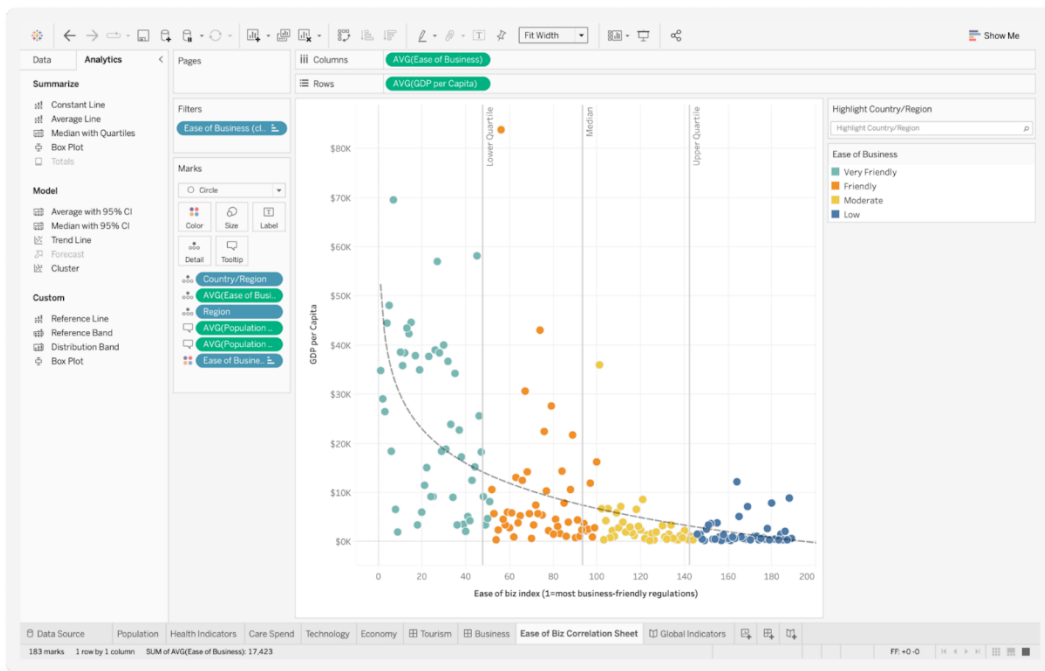
ปัจจุบันมีเทคโนโลยีและเครื่องมือการแสดงผลมากมายถูกคิดค้นและพัฒนา เพื่อที่จะอำนวยความสะดวกในการจัดการข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลของอุปกรณ์ต่าง ๆ

(Grafana, 2023) คือ เครื่องมือแบบ Open Source ที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อทำหน้าที่เป็น Dashboard ในการแสดงผลและจัดการข้อมูลที่เชื่อมต่อกับแหล่งข้อมูลและฐานข้อมูลต่าง ๆ เช่น InfluxDB ซึ่งเป็นฐานข้อมูลสำหรับข้อมูลลำดับเวลา และ Elasticsearch ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการทำโปรแกรมค้นหา เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล เป็นต้น โดย Grafana สามารถนำเสนอข้อมูล Metrics ที่มีความเฉพาะเจาะจง เช่น CPU และค่าที่ได้จากเซนเซอร์ต่าง ๆ ในรูปแบบของ Time Series Graph ได้ และรองรับการแสดงผลหลายประเภท เช่น แผนภูมิแท่ง ฮิสโทแกรม แผนภูมิวงกลม ตัวเลข เกจ ตาราง และ Heatmap เป็นต้น อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน เช่น การปรับแต่งมุมมองการสรุปข้อมูล การเลือกช่วงในการสรุปข้อมูล และความสะดวกในการติดต่อกับฐานข้อมูล ทำให้ Grafana ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 2-49 ตัวอย่าง Grafana Dashboard (Ngamlap, 2017)

(Tableau, 2023) เป็นอีกหนึ่งเครื่องมือในการแสดงผลข้อมูลที่เป็นที่นิยม เครื่องมือนี้สามารถที่จะใช้งานได้ง่าย เหมาะสำหรับผู้ใช้งานทั่วไปที่ไม่ต้องมีทักษะทางด้านโปรแกรมก็สามารถใช้งานได้ โดยสามารถนำข้อมูลที่เชื่อมต่อกับแหล่งข้อมูลได้หลายประเภทไม่ว่าจากไฟล์ข้อมูล ฐานข้อมูล SQL หรือ Data Warehouse มาสร้างเป็น Visualization ได้ผ่านหน้าจอกการปรับแต่ง จากนั้นสามารถผสมผสาน Visualization ที่ได้ออกแบบมารวมกันเป็นแดชบอร์ดได้อีกด้วย โดยจุดเด่นของเครื่องมือนี้ คือ สามารถช่วยผู้ใช้งานวิเคราะห์ข้อมูลแบบ In-Memory ได้ ซึ่งช่วยให้การวิเคราะห์ข้อมูลมีความรวดเร็วสูงมาก



รูปที่ 2-50 ตัวอย่างการทำ Tableau Visualization





รูปที่ 2-51 ตัวอย่าง Tableau Dashboard

บทที่ 3

ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบการใช้งานจริงของรถต้นแบบ (จุฬา และ กสทช.)

1. ทดสอบและเก็บข้อมูลการทำงานพื้นฐาน และความสามารถของระบบเซนเซอร์ต่างๆของยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ผ่านเครือข่าย 5G

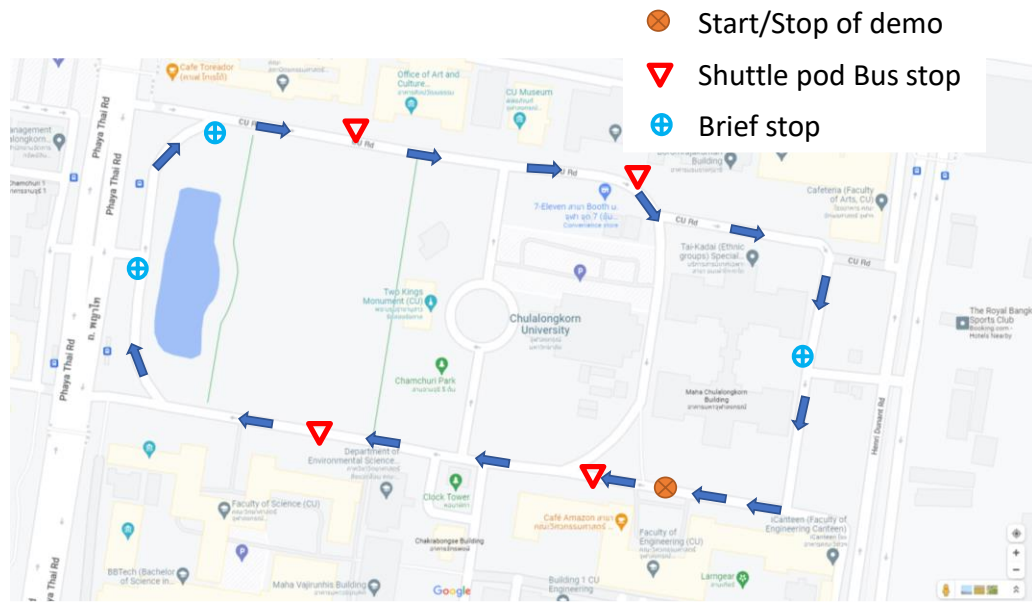
การทดสอบเก็บข้อมูลพื้นฐานและความสามารถของเซนเซอร์ต่างๆ ได้ดำเนินการ และมีผลดังนี้

- 1) กล้อง มุมของการมองเห็นของกล้องที่ใช้เป็นหลักจะมี Field of View (FOV) 120 องศา โดยกล้องด้านหน้าและหลังรถ เมื่อใช้ FOV 120 องศา จะสามารถจับภาพวัตถุได้เพียงพอหากรถวิ่งด้วยความเร็วต่ำ เช่น ไม่เกิน 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แต่หากใช้ความเร็วมากขึ้นจำเป็นต้องใช้กล้องหรือเซนเซอร์อื่นเพิ่มเติม เพื่อช่วยตรวจจับวัตถุในบริเวณจุดอับสายตา (Blind spot) ส่วนระยะที่เห็นวัตถุได้ของกล้องที่ใช้พบว่า มีระยะไม่น้อยกว่า 50 เมตร จึงเพียงพอต่อการใช้งานในการทดลองที่วิ่งด้วยความเร็วต่ำนี้
- 2) LiDAR มีมุมของการจับวัตถุได้รอบตัว (360 องศา) โดยคุณลักษณะของ LiDAR รุ่นที่ใช้ในรถนี้มีลำแสงเลเซอร์จำนวน 16 เส้น ซึ่งสามารถส่งลำแสงเลเซอร์ไปได้ไกลกว่า 100 เมตร แต่จากการทดลองระยะหวังผล ที่สามารถใช้งานได้เพื่อให้จำนวนจุด Point cloud มีจำนวนเพียงพอเพื่อให้สามารถระบุประเภทของวัตถุได้ (Object classification) อย่างแม่นยำอยู่ในระยะ 20 เมตร ซึ่งมีผลต่อการทำงานของรถอัตโนมัติ คือ ระยะที่ตรวจจับวัตถุได้ของ LiDAR ควรต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการทำงาน และระยะเบรกของรถอัตโนมัติ สำหรับความเร็ว และระยะเบรกของรถที่ใช้ในการทดลองของโครงการนี้สามารถใช้ LiDAR นี้ได้อย่างดี ในกรณีของรถ T2 มี LiDAR จำนวน 2 ตัว โดยบริเวณด้านหน้าของรถจะมีการซ้อนทับกันของจำนวนจุด Point cloud ของ LiDAR ทั้งสองตัว ทำให้เพิ่มระยะหวังผลของการระบุประเภทของวัตถุได้ (Object classification) เพิ่มขึ้นอย่างน้อยร้อยละ 50 อีกวิธีที่สามารถทำได้เมื่อต้องการเพิ่มระยะหวังผลของการระบุประเภทของวัตถุได้ คือ การเลือกใช้ LiDAR ที่มีจำนวนลำแสงเลเซอร์มากขึ้น เช่น 32 64 หรือ 128 เส้น เป็นต้น แต่ราคาก็จะสูงขึ้นอย่างมีนัยยะ
- 3) เซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic) มีการติดตั้งไว้บริเวณด้านหน้า และหลังของรถเป็นส่วนใหญ่ เซนเซอร์ชนิดนี้เป็น เซนเซอร์ที่นิยมใช้ในการตรวจระยะห่างจากวัตถุในระยะใกล้ จากการทดลอง ระยะที่เซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic) นี้ตรวจจับได้อยู่ระยะ ไกลสุด ประมาณ 6-7 เมตร ซึ่งเพียงพอต่อการนำมาใช้เป็น เซนเซอร์ช่วยจอด และระบบ เบรกอัตโนมัติ ในกรณีวิ่งด้วยความเร็วต่ำมาก เช่น 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากการทดลองพบปัญหาของ noise ในระบบ และระยะไกลสุดที่เซนเซอร์แต่ลำตัวจับได้ ไม่เท่ากันทุกตัว
- 4) GNSS/IMU ในการทดลองจะมีการวัดระยะความแม่นยำของตำแหน่งที่ได้จาก GNSS เทียบกับตำแหน่งในแผนที่ความละเอียดสูง พบว่า มีความคลาดเคลื่อนสูงในระดับ 1-4 เมตร เนื่องจากพื้นที่ทดสอบมีสิ่งกีดขวาง เช่น อาคาร ต้นไม้ ที่บดบังสัญญาณ ทำให้เกิดปัญหา multi-path ส่งผลให้ตำแหน่งที่ได้



คลาดเคลื่อน ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการ ใช้อัลกอริทึม RTK (Realtime Kinematics) โดยใช้ข้อมูลจากสถานีฐาน (Base station) มาช่วยลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้

ในการนี้คณะวิจัยได้มีการส่งข้อมูลจากรถทดสอบโดยส่งข้อมูลเซนเซอร์ของรถผ่านเครือข่าย 5G มายัง Operation dashboard จากรถแต่ละคัน ประกอบด้วย ตำแหน่งรถ ความเร็ว เพอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ (SOC) โหมดการขับขี่ (Manual or Auto) กล้องหน้าและหลังของรถ และข้อมูลจาก LiDAR ของรถ (รถ T1 มี LiDAR 1 ตัว รถ T2 มี LiDAR 2 ตัว) ผลการทดสอบ โดยเส้นทางในการทดสอบบริเวณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำนักงาน กสทช เป็นดังแผนภาพ ในรูปที่ 3-1 และรูปที่ 3-2 ผลของการทดสอบ แสดงในตารางที่ 3-1 และตารางที่ 3-2

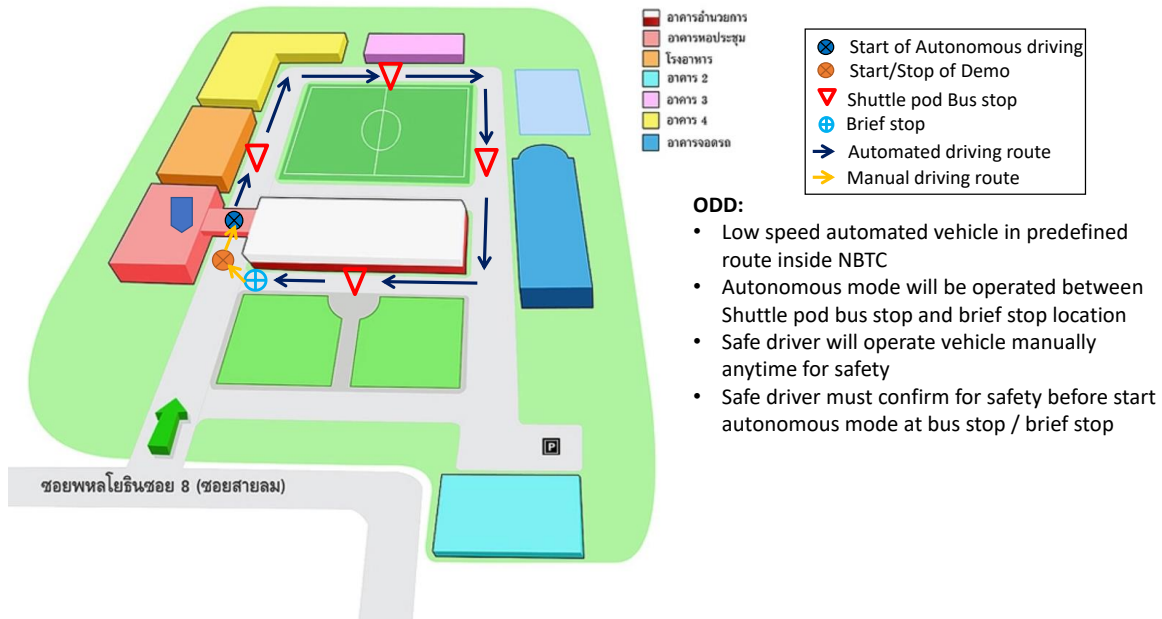


ODD:

- Low speed automated vehicle in predefined route at CU campus
- Autonomous mode will be operated between Shuttle pod bus stop and brief stop location
- Safe driver will operate vehicle manually anytime for safety
- Safe driver must confirm for safety before start autonomous mode at bus stop / brief stop

รูปที่ 3-1 เส้นทางในการทดสอบบริเวณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3-2 เส้นทางในการทดสอบบริเวณ สำนักงาน กสทช

ตารางที่ 3-1 ผลการทดสอบการส่งข้อมูลจากรถไปยัง Operation Dashboard (VDO Wall) ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Station	Download Speed (MB/s)			Upload Speed (MB/s)		
	min	average	max	min	average	max
T1	0.99885	1.14	5.15	0.00029	2.14	11.59
T2B	0.00047	0.13	14.56	0.00047	21.46	170.27
T2W	0.00047	0.34	16.94	0.00047	13.27	152.90
Videowall	0.0027	14.45	161.99	0.00317	0.16	1.87

Operation Dashboard	Latency (ms)								
	min			average			max		
	T1	T2B	T2W	T1	T2B	T2W	T1	T2B	T2W
	17.94	17.93	17.98	31.81	42.86	46.31	311.17	939.52	1,267.71

ตารางที่ 3-2 ผลการทดสอบการส่งข้อมูลจากรถไปยัง Operation Dashboard (VDO Wall) ที่สำนักงาน กสทช

Station	Download Speed (MB/s)			Upload Speed (MB/s)		
	min	average	max	min	average	max
T1	1.00	13.00	13.12	0.10	0.35	2.43
T2B	0.00006	2.81	19.19	0.001	336.72	428.15
T2W	0.00009	5.77	19.26	0.0001	180.83	246.79
Videowall	0.03	174.79	276.19	0.003	6.82	6.84

Operation	Latency (ms)								
	min			average			max		
Dashboard	T1	T2B	T2W	T1	T2B	T2W	T1	T2B	T2W
	18.70	18.95	1.04	30.28	33.27	33.91	152.59	854.62	753.07

จากการทดสอบการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ผ่านเครือข่าย 5G โดยทำการทดลองพร้อมกัน (รถทั้งสามคัน) ทั้ง รถรุ่น T1 T2-W และ T2-B โดยในการทดลองเป็นการส่งข้อมูล เพื่อใช้ตรวจสอบการทำงานของรถขณะทดลอง ซึ่งเพียงพอ แม้จะพบค่าความหน่วงเวลา (Latency) ที่มากในบางช่วงของการทดลอง แต่ความหน่วงเฉลี่ยยังอยู่ในย่านที่สามารถใช้งานได้ เพื่อการตรวจสอบได้อย่างไม่มีปัญหา (ทำให้เกิดการกระตุกของวีดีโอบ้าง) แต่หากการส่งข้อมูลจากเซนเซอร์มาเพื่อใช้ประมวลผลและส่งกลับไปควบคุมหรือสั่งการที่รถ จะมีหลายช่วงที่มีความหน่วงสูงเกินไป ซึ่งจำเป็นต้องมีการวางแผนเพื่อรองรับการใช้งานดังกล่าวต่อไป โดยการแก้ไขปัญหาค่าความหน่วงสูง ในบางช่วงสามารถแก้ไขได้โดยการใช้กระบวนการสื่อสาร (Communication Protocol) ที่ออกแบบสำหรับการส่งข้อมูลแต่ละประเภท โดยมีความหน่วงต่ำ อาทิ WebRTC สำหรับการส่งข้อมูลวีดีโอ

3.2 ผลการทดสอบระบบสื่อสาร (จู่พา และ กสทช.)

การทดสอบการสื่อสารด้วยระบบ 5G สำหรับรถไร้คนขับ ในโครงการนี้ ประกอบด้วย การทดสอบ 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่

- 1) การทดสอบวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่าย 5G ในบริเวณเส้นทางสำหรับทดสอบรถไร้คนขับ ในพื้นที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภายในสำนักงาน กสทช.
- 2) การทดสอบอุปกรณ์สื่อสารระบบ 5G (5G CPE) สำหรับติดตั้งในรถไร้คนขับ และที่ VDO Walls ในห้องปฏิบัติการ
- 3) การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ระหว่างรถไร้คนขับที่แล่นตามเส้นทางและ VDO Walls

3.2.1 การทดสอบวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่าย 5G

เครือข่ายสื่อสารไร้สายระบบ 5G ที่ใช้ในการทดสอบการสื่อสารสำหรับยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ในโครงการนี้ เป็นเครือข่ายของผู้ให้บริการโทรคมนาคม คือ บริษัท แอดวานซ์ ไวร์เลส เน็ทเวอร์ค จำกัด (AWN) โดยใช้คลื่นความถี่ 2,600 MHz (Band n41) และเป็นเครือข่าย 5G แบบ Stand-alone (SA) โดยบริษัทมีหน้าที่รับผิดชอบในการจัดให้มีสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ที่มีความครอบคลุมและคุณภาพของสัญญาณเพียงพอต่อการทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในบริเวณพื้นที่ที่กำหนด ได้แก่ พื้นที่ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังรูปที่ 3-3 ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ใช้เป็นพื้นที่สำหรับการทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในระยะแรกของการดำเนินโครงการ ก่อนจะนำยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติไปทดสอบในพื้นที่ภายในสำนักงาน กสทช. ดังรูปที่ 3-4

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อตรวจสอบยืนยันว่าสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ที่ใช้ในการทดสอบการสื่อสารสำหรับยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในโครงการนี้ มีความครอบคลุมและคุณภาพของสัญญาณ

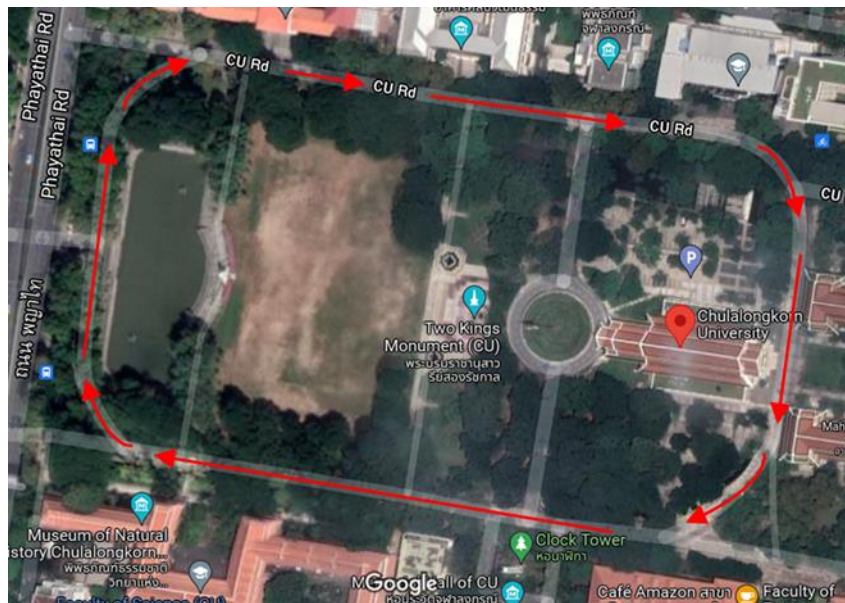


เพียงพอลดเส้นทางที่ทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ การทดสอบวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ทำโดยใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดดังรูปที่ 3-5 เติมนิวตริสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ของบริษัท AWN ตามเส้นทางสำหรับทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ในบริเวณพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภายในสำนักงาน กสทช. ดังรูปที่ 3-6 อุปกรณ์เครื่องมือวัด ดังรูปที่ 3-5 ประกอบด้วย

- 1) สมาร์ทโฟน (Smart phone) ติดตั้งโปรแกรมสำหรับตั้งค่าและควบคุมการวัดทดสอบ และบันทึกผลการวัด
- 2) อุปกรณ์สแกนเนอร์ (Scanner) พร้อมสายอากาศ

การวัดทดสอบค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ในชั้นกายภาพ อ้างอิงตามมาตรฐาน 3GPP TS 38.215 “NR; Physical layer measurements” (3GPP, 2022-03) โดยมีค่าพารามิเตอร์หลัก ซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ได้แก่

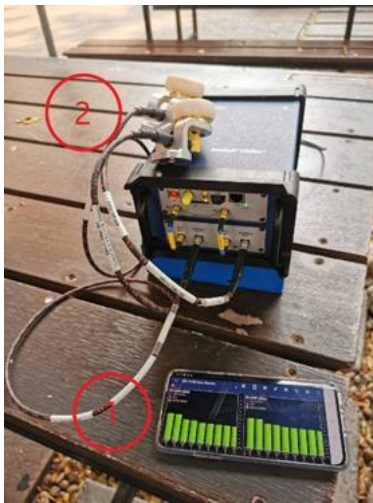
- กำลังที่ได้รับของสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal Received Power : RSRP)
- อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (Signal-to-Interference-and-Noise Ratio : SINR)



รูปที่ 3-3 เส้นทางสำหรับทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-4 เส้นทางสำหรับทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติภายในบริเวณสำนักงาน กสทช.



รูปที่ 3-5 อุปกรณ์เครื่องมือวัดทดสอบคุณภาพสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G



(ก)



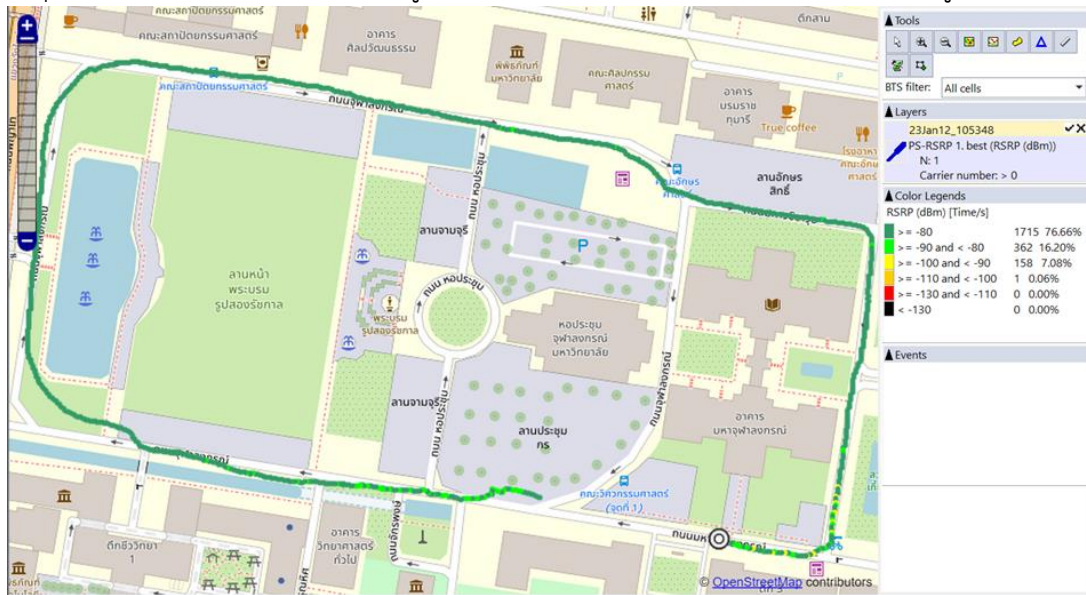
(ข)

รูปที่ 3-6 การเดินทดสอบวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ตามเส้นทางทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในพื้นที่ (ก) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ข) สำนักงาน กสทช.

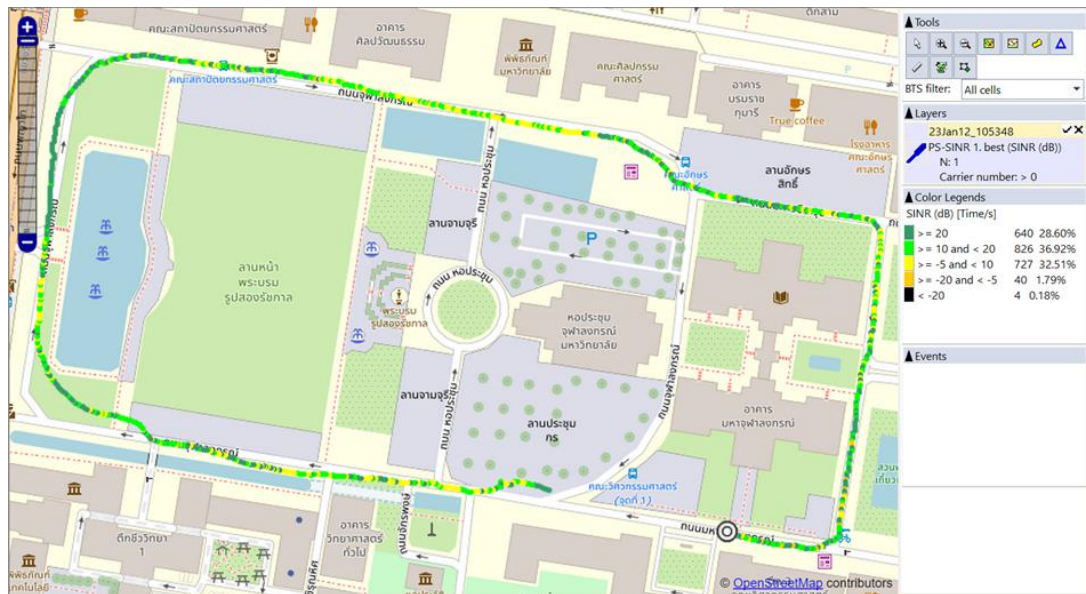
ค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ในชั้นกายภาพที่วัดทดสอบ อ้างอิงตามมาตรฐาน 3GPP TS 38.215 “NR; Physical layer measurements” (3GPP, 2022-03) สำหรับค่าพารามิเตอร์หลัก ซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ได้แก่

- กำลังของสัญญาณอ้างอิงที่รับได้ (Reference Signal Received Power: RSRP)
- อัตราส่วนกำลังของสัญญาณสื่อสารต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (Signal-to-Interference-and-Noise Ratio : SINR)

ผลการวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ตามเส้นทางทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงดังรูปที่ 3-7 และในพื้นที่สำนักงาน กสทช. แสดงดังรูปที่ 38 ตามลำดับ



(ก) กำลังที่ได้รับของสัญญาณอ้างอิง (PS-RSRP)



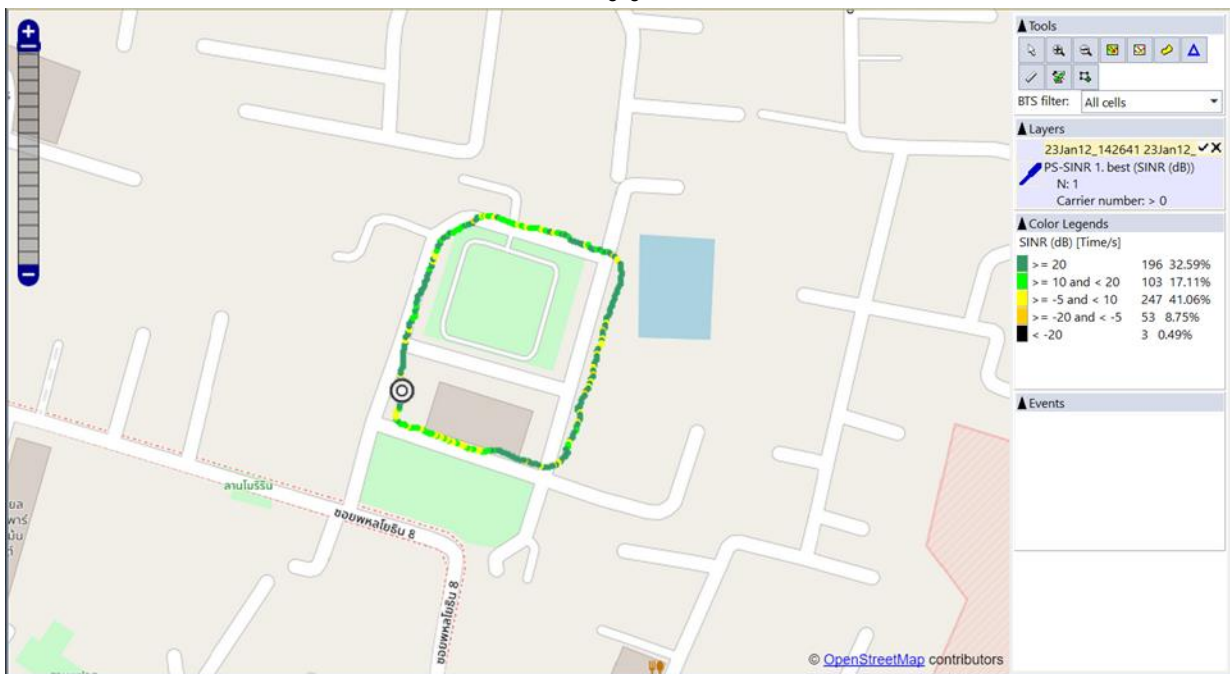
(ข) อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด และสัญญาณรบกวน (PS-SINR)

รูปที่ 3-7 ผลการวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





(ก) กำลังที่ได้รับของสัญญาณอ้างอิง (PS-RSRP)



(ข) อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (PS-SINR)

รูปที่ 3-8 ผลการวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่สำนักงาน กสทช.

ทั้งนี้ ความหมายของสีต่างๆ ที่แทนช่วงค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ในรูปที่ 3-7 และรูปที่ 3-8 สามารถแปลความหมายเชิงคุณภาพ (Qualitative) ได้ดังนี้สีเขียวเข้ม หมายถึง ดีมาก (Excellent)

- สีเขียวเข้ม หมายถึง ดีมาก (Excellent)
- สีเขียวอ่อน หมายถึง ดี (Good)
- สีเหลือง หมายถึง ปานกลาง (Fair)
- สีส้ม หมายถึง แย่ (Poor)
- สีแดง หมายถึง แย่มาก (Very poor)
- สีดำ หมายถึง มีค่าน้อยมาก

จากผลการทดสอบวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่า กำลังที่ได้รับของสัญญาณอ้างอิง (RSRP) มากกว่าหรือเท่ากับ -100 dBm (สีเขียวเข้ม เขียวอ่อน และเหลือง) ในพื้นที่เกือบ 100% ของเส้นทางทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติทั้งหมด ดังรูปที่ 3-7 ส่วนรูปที่ 3-8 แสดงให้เห็นว่า สัญญาณเครือข่ายระบบ 5G มีค่า SINR สูงกว่า -5 dB (สีเขียวเข้ม เขียวอ่อน และเหลือง) ในบริเวณส่วนใหญ่ประมาณ 98% ของเส้นทางทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ มีเพียงส่วนน้อยมาก ณ ตำแหน่งบางจุดที่มีค่า SINR ต่ำกว่า -5 dB จากการตรวจสอบและวิเคราะห์สาเหตุร่วมกับผู้ให้บริการเครือข่ายระบบ 5G พบว่า ตำแหน่งที่ค่า SINR ของสัญญาณมีค่าต่ำ เกิดจากการทับซ้อนของลำคลื่นสัญญาณที่ส่งมาจากต่างสถานีฐาน จึงเกิดการรบกวนกันของสัญญาณ เนื่องจากการวางแผนติดตั้งเครือข่าย (Network planning) และการปรับสัญญาณเครือข่ายให้เหมาะสม (Network optimization) ของผู้ให้บริการเครือข่าย ในปัจจุบันมุ่งเน้นการให้บริการแก่ผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นหลัก ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะไม่ได้ใช้งานบนถนนหรือเส้นทางจราจร จึงทำให้สัญญาณเครือข่ายในบริเวณดังกล่าวอาจไม่ได้ถูกปรับให้มีคุณภาพดีที่สุด

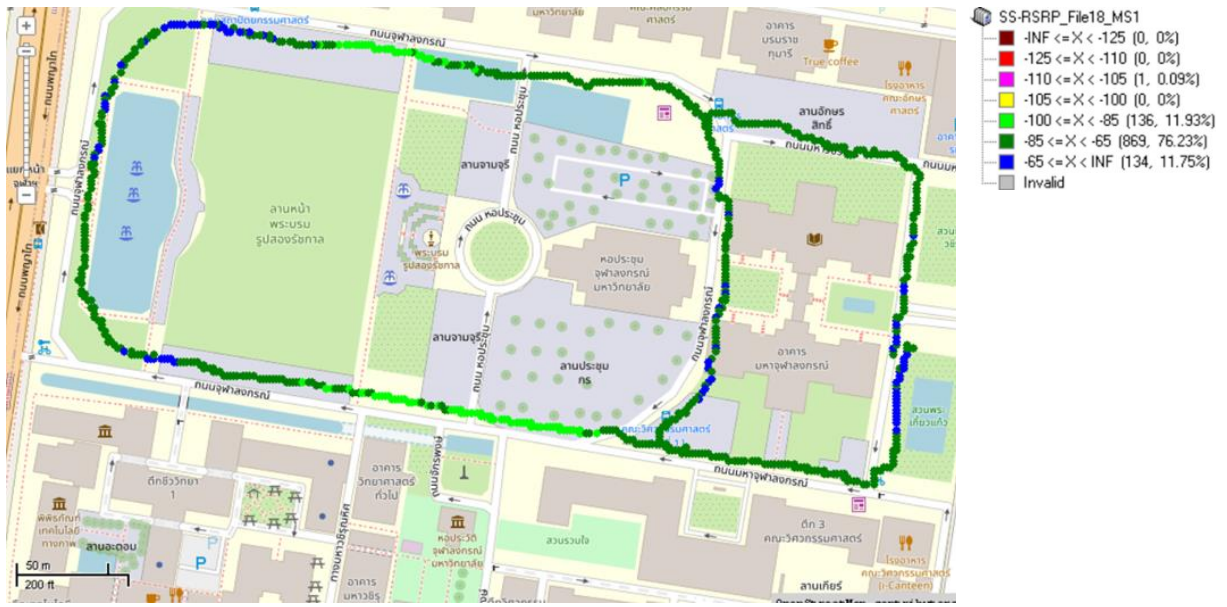
จากผลการทดสอบวัดคุณภาพสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่สำนักงาน กสทช. พบว่า กำลังสัญญาณที่รับได้ (RSRP) มากกว่าหรือเท่ากับ -100 dBm (สีเขียวเข้ม เขียวอ่อน และเหลือง) ในบริเวณส่วนใหญ่ประมาณ 92% ของเส้นทางทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ดังรูปที่ 3-9 และสัญญาณมีค่า SINR สูงกว่า -5 dB (สีเขียวเข้ม เขียวอ่อน และเหลือง) ในบริเวณส่วนใหญ่ประมาณ 91% ของเส้นทางทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ดังรูปที่ 3-10 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้งสองมีความสอดคล้องกัน สำหรับช่วงเส้นทางด้านหน้าอาคารอำนวยการเลี้ยวไปยังอาคารหอประชุม สังเกตว่าสัญญาณมีค่า RSRP และค่า SINR เป็นสีเขียวอ่อนและสีเหลืองส่วนใหญ่ ซึ่งคาดว่าสาเหตุจากการที่สัญญาณจากสถานีฐานระบบ 5G อาจถูกอาคารอำนวยการบดบังสัญญาณ จึงทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณบางส่วนในบริเวณดังกล่าว หากแต่ความแรงของสัญญาณยังอยู่ในระดับที่สามารถใช้งานได้ ทั้งนี้ ผู้ให้บริการเครือข่ายสามารถปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณในบริเวณที่ถูกบดบังสัญญาณให้ดีขึ้นได้โดยการปรับมุมเอียงของสายอากาศสถานีฐานเดิม หรือปรับให้สถานีฐานอื่นที่อยู่ตำแหน่งไม่ถูกบดบังสัญญาณส่งสัญญาณมาแทนสถานีฐานเดิม หรือหากจำเป็นต้องติดตั้งสถานี



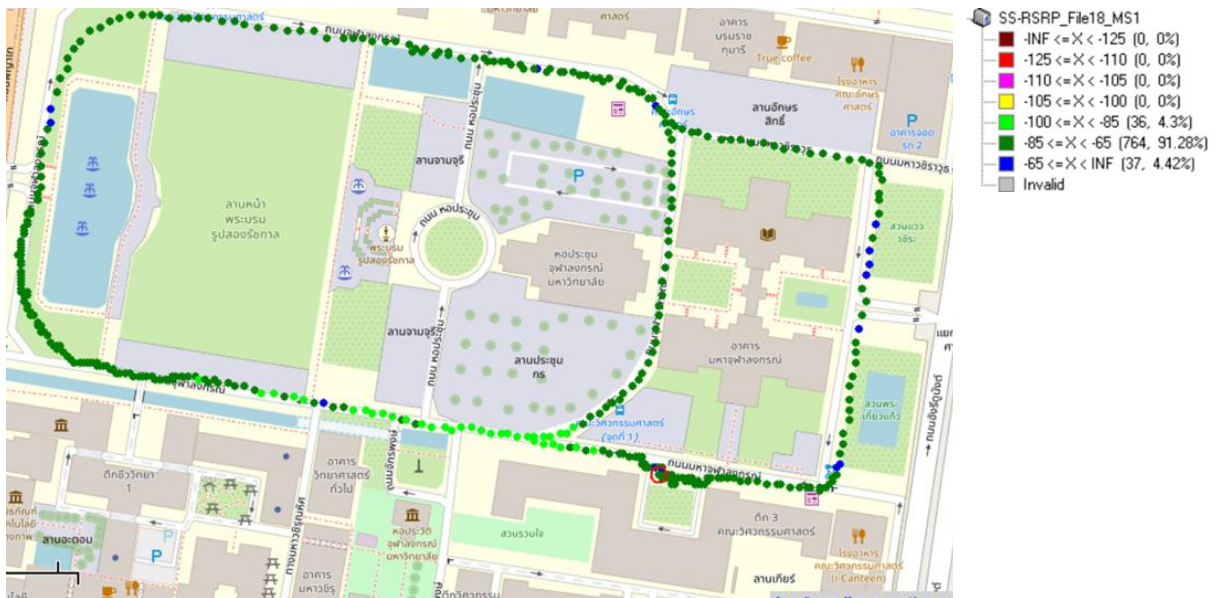
ฐานย่อยมาช่วยเสริมในการส่งสัญญาณมายังบริเวณดังกล่าว แต่ทั้งนี้อาจต้องพิจารณาถึงความคุ้มค่าต่อการใช้งานในการติดตั้งด้วย

ทั้งนี้ ทางผู้ให้บริการเครือข่ายได้ดำเนินการปรับสัญญาณเครือข่ายให้มีคุณภาพเหมาะสม (Optimization) บนเส้นทางทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อแก้ไขปัญหาการทับซ้อนของลำคลื่นสัญญาณที่ส่งมาจากต่างสถานีฐาน และได้ทดลองวัดคุณภาพสัญญาณอีกครั้งหลังการปรับสัญญาณ ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบก่อนและหลังการปรับสัญญาณ ดังรูปที่ 3-9 สำหรับกำลังที่รับของสัญญาณอ้างอิง (SS-RSRP) และรูปที่ 3-10 สำหรับอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (SS-SINR) จากรูปที่ 3-9 จะเห็นว่า หลังการปรับสัญญาณ ค่า RSRP ดีกว่าก่อนการปรับสัญญาณอย่างชัดเจน โดยมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ -85 dBm เกือบตลอดเส้นทางเดินรถ (ประมาณ 95% ของเส้นทางทั้งหมด) และมีเพียงบางตำแหน่งที่ค่า RSRP อยู่ระหว่าง -100 ถึง -85 dBm และไม่มีตำแหน่งใดเลยบนเส้นทางที่ค่า RSRP ต่ำกว่า -100 dBm ส่วนรูปที่ 3-10 แสดงให้เห็นว่าค่า SINR ดีขึ้นอย่างชัดเจน หลังการปรับสัญญาณ โดยมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 3 dB เกือบตลอดเส้นทางเดินรถ (ประมาณ 95% ของเส้นทางทั้งหมด) ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการปรับสัญญาณเครือข่ายระบบ 5G ในแนวเส้นทางเดินรถให้เหมาะสมตลอดเส้นทางโดยไร้รอยต่อ สำหรับการให้บริการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพและมีความเชื่อถือแก่ยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติหรือระบบจราจรอัจฉริยะ สำหรับการใช้งานจริงในอนาคต





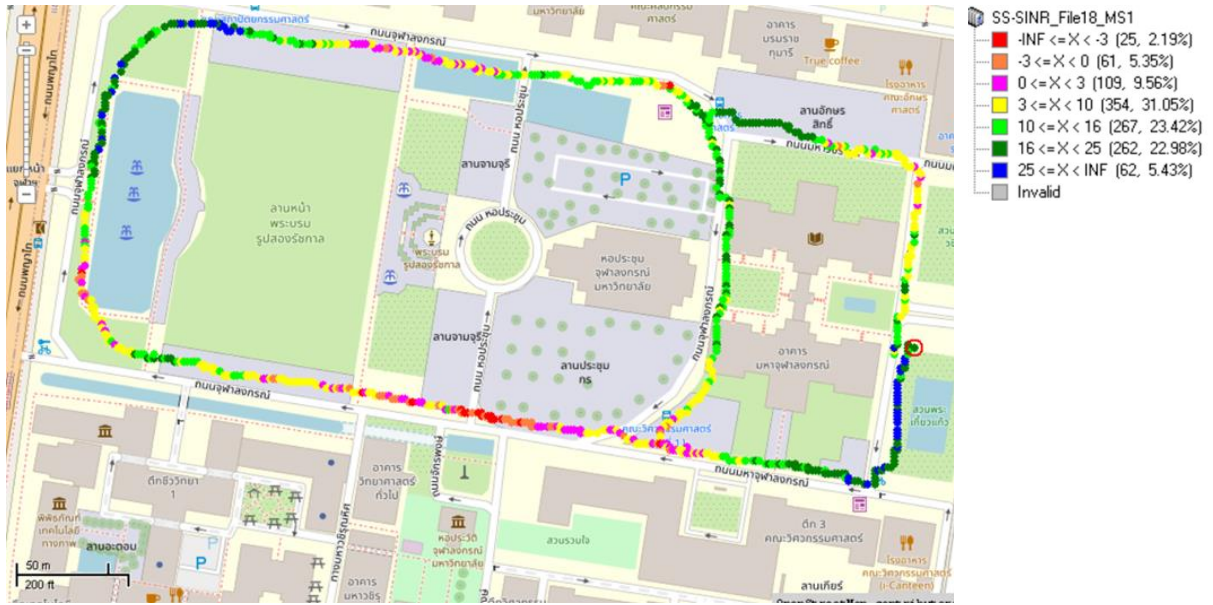
(ก) ก่อนการปรับสัญญาณให้เหมาะสม



(ข) หลังการปรับสัญญาณให้เหมาะสม

รูปที่ 3-9 กำลังที่ได้รับของสัญญาณอ้างอิง (SS-RSRP) ก่อนและหลังปรับสัญญาณให้เหมาะสมบนเส้นทางทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ที่มา : บริษัท AWN)





(ก) ก่อนการปรับสัญญาณให้เหมาะสม



(ข) หลังการปรับสัญญาณให้เหมาะสม

รูปที่ 3-10 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (SS-SINR) ก่อนและหลังปรับสัญญาณให้เหมาะสมบนเส้นทางทดสอบยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ที่มา : บริษัท AWN)

3.2.2 การทดสอบอุปกรณ์สื่อสารระบบ 5G ในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์สื่อสารระบบ 5G สำหรับติดตั้งในยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ และที่ VDO wall (Operation dashboard) เพื่อเชื่อมต่อสื่อสารกับเครือข่ายระบบ 5G ของผู้ให้บริการ เป็นอุปกรณ์ชนิด 5G Customer Premise Equipment (5G CPE) หรือ 5G Router โดยในโครงการวิจัยนี้มีการใช้งาน 5G CPE 2 รุ่น สำหรับการทดสอบในโครงการ ดังภาพที่ 3.2.9 ได้แก่

- 5G CPE สีขาว ยี่ห้อ Huawei รุ่น N5368x ใช้สายอากาศในตัว (Internal antenna) อยู่ภายในกล่อง ดังรูปที่ 3-11 (ก) โดยบริษัท AWN ให้โครงการยืมมาใช้งานในการทดสอบในช่วงแรกของการดำเนินงาน ก่อนที่โครงการจะจัดหาอุปกรณ์ 5G CPE ของโครงการเองมาใช้งาน อุปกรณ์ 5G CPE รุ่นนี้ไม่สามารถ นำสายอากาศภายนอก (External antenna) มาติดตั้งเพิ่มเติมได้
- 5G CPE สีดำ ยี่ห้อ Quanta ใช้สายอากาศแบบ MIMO ติดตั้งภายนอกตัวกล่อง ดังรูปที่ 3-11 (ข) ซึ่งทางโครงการจัดหาเอง อุปกรณ์ 5G CPE รุ่นนี้สามารถนำสายอากาศภายนอกมาเชื่อมต่อเพื่อเพิ่มเติม อัตราขยายได้



(ก) ยี่ห้อ Huawei



(ข) ยี่ห้อ Quanta

รูปที่ 3-11 อุปกรณ์สื่อสารระบบ 5G (5G CPE) 2 รุ่น ที่ใช้ทดสอบการสื่อสารผ่านเครือข่าย 5G ในโครงการ

โครงการนี้ได้มีการวัดทดสอบอุปกรณ์ 5G CPE สีดำ ในห้องปฏิบัติการ เพื่อตรวจสอบว่าอุปกรณ์สามารถทำงานได้ถูกต้องตามมาตรฐานที่กำหนด และมีความพร้อมในการนำไปใช้งานเพื่อทดสอบรับส่งข้อมูลระหว่าง

ยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ และ Operation dashboard โดยผ่านเครือข่ายระบบ 5G ของผู้ให้บริการ นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ผลการวัดทดสอบในห้องปฏิบัติการนี้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับข้อกำหนดทางเทคนิคของอุปกรณ์สื่อสารระบบ 5G ที่จะนำมาใช้งานสำหรับยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในอนาคต การทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นการวัดค่าลักษณะเฉพาะ (Characteristics) ในการรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ (RF) ของอุปกรณ์ 5G CPE ที่ทำการทดสอบ โดยการทดลองรับส่งสัญญาณเสมือนจริงในระบบ 5G กับอุปกรณ์เครื่องมือวัด ได้แก่ เครื่องมือทดสอบและจำลองการรับส่งสัญญาณระบบ 5G (Radio Communication Test Station MT8000A) ดังรูปที่ 3-12 ซึ่งจำลองตัวเองเป็นสถานีฐาน (Base station) ของเครือข่ายระบบ 5G การทดสอบใช้ย่านความถี่ 2,600 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่เดียวกับสัญญาณเครือข่าย 5G ของผู้ให้บริการที่ใช้ในการทดสอบในโครงการนี้



รูปที่ 3-12 เครื่องมือทดสอบและจำลองการรับส่งสัญญาณระบบ 5G (MT8000A)

ค่าลักษณะเฉพาะในการรับส่งสัญญาณ RF ของอุปกรณ์ 5G CPE ที่ทำการทดสอบ อ้างอิงตามมาตรฐาน 3GPP TS 38.521-3 “NR; User equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception” (3GPP, 2021-06) ได้แก่

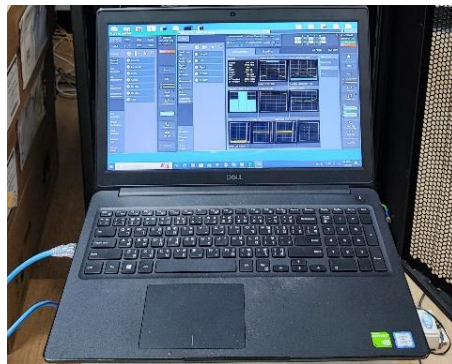
- Tx power
- Occupied bandwidth (OBW)
- Spectrum emission mask (SEM)
- Adjacent channel power leakage ratio (ACLR)
- Frequency error
- Phase error
- Error vector magnitude (EVM)
- Constellation

การจัดวางอุปกรณ์ 5G CPE ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และหน้าจอโปรแกรมสำหรับกำหนดค่าพารามิเตอร์ ควบคุม และแสดงผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3-13 และ Error! Reference source not

found. ตามลำดับ ผลการทดสอบลักษณะเฉพาะในการรับส่งสัญญาณ RF ของอุปกรณ์ 5G CPE สีดำ แสดงดังรูปที่ 3-15 ถึงรูปที่ 3-17

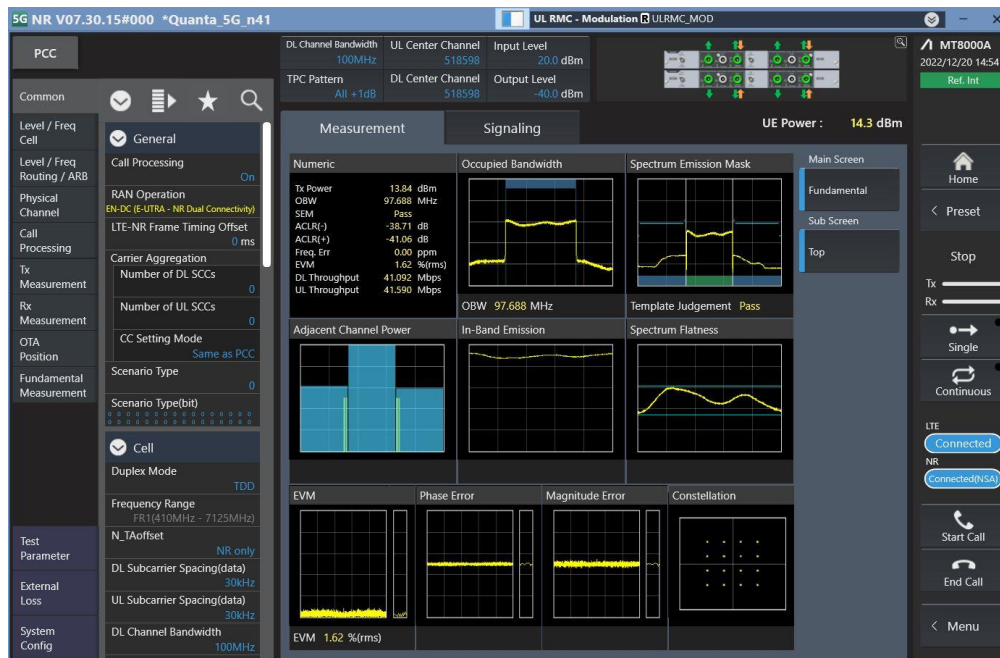


(ก)



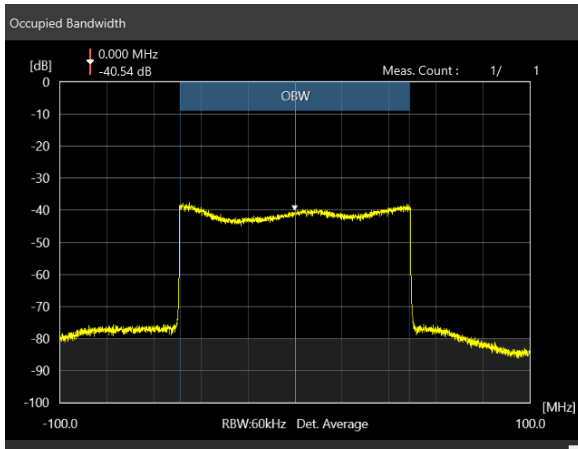
(ข)

รูปที่ 3-13 (ก) การจัดวางอุปกรณ์ 5G CPE ในการทดสอบ (ข) เครื่องคอมพิวเตอร์ติดตั้งโปรแกรมสำหรับควบคุมและแสดงผลการทดสอบ

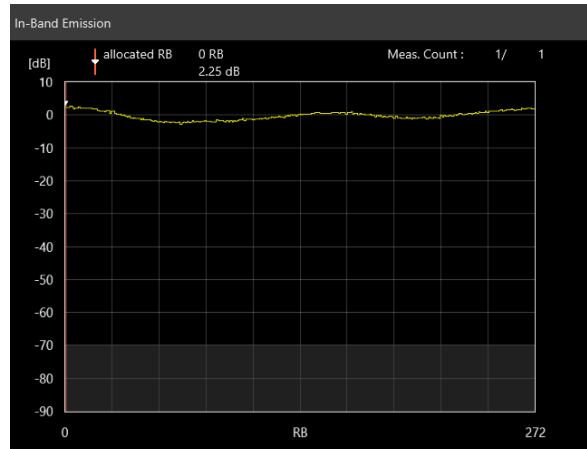


รูปที่ 3-14 หน้าจอโปรแกรมสำหรับกำหนดค่าพารามิเตอร์ ควบคุม และแสดงผลการทดสอบ

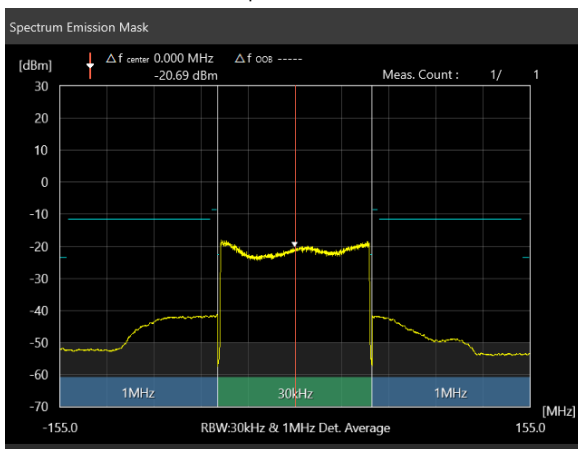




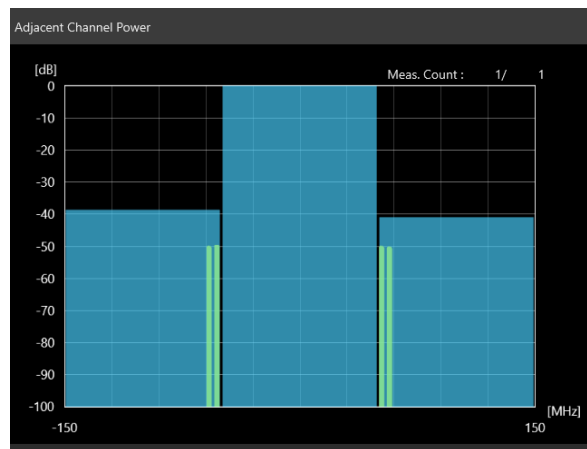
(ก) Occupied Bandwidth



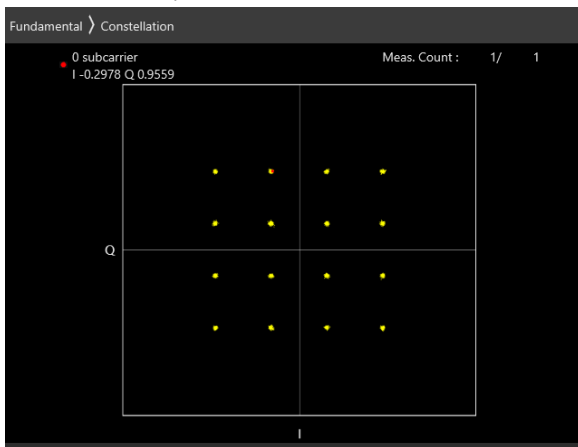
(ข) In-Band Emission



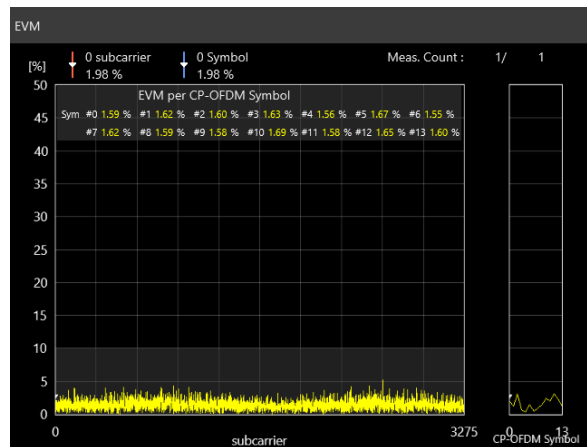
(ค) Spectrum Emission Mask



(ง) Adjacent Channel Power Leakage



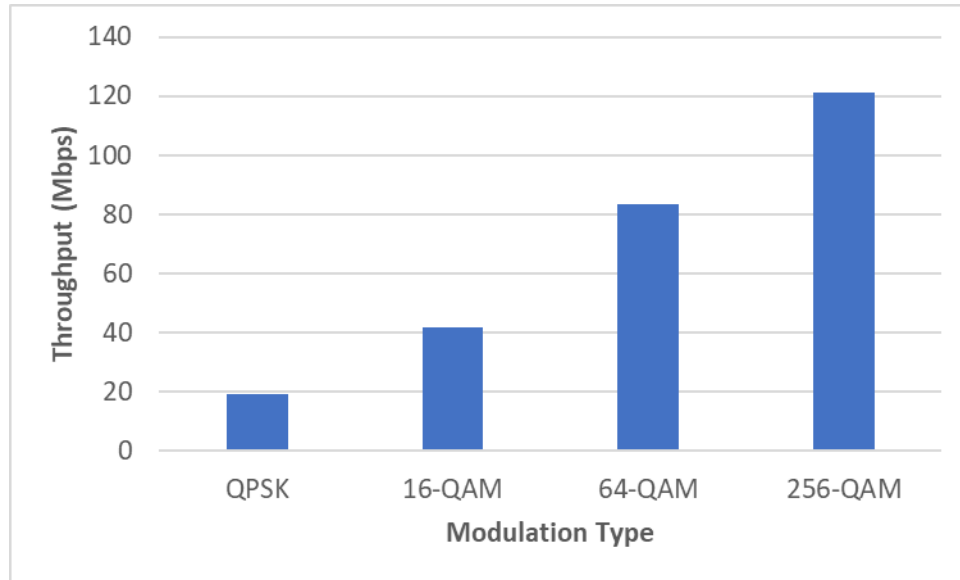
(จ) Constellation Diagram



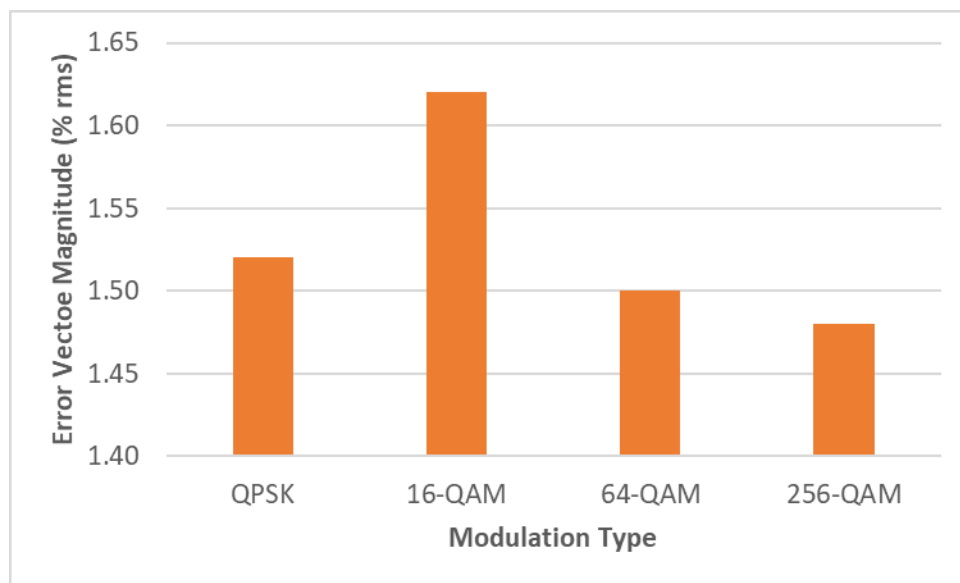
(ฉ) Error Vector Magnitude

รูปที่ 3-15 ผลการทดสอบลักษณะเฉพาะในการรับส่งสัญญาณ RF ของอุปกรณ์ 5G CPE สีดำ





รูปที่ 3-16 อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput) สำหรับมอดูเลชันแบบต่าง ๆ



รูปที่ 3-17 Error Vector Magnitude (EVM) สำหรับมอดูเลชันแบบต่าง ๆ

รูปที่ 3-15 (ก) แสดงสเปกตรัมของสัญญาณและความกว้างแถบความถี่ที่ใช้งาน (Occupied Bandwidth) มีค่าเท่ากับ 97.69 MHz จากความกว้างแถบความถี่ของช่องสัญญาณ (Channel Bandwidth) ขนาด 100 MHz จะได้ว่า สัญญาณมีแถบความถี่คุ่ม (Guard band) เท่ากับ 2.31 MHz หรือคิดเป็น 2.31% ของ Channel Bandwidth สำหรับรูปที่ 3-15 (ข) แสดงสเปกตรัมของสัญญาณในส่วนที่อยู่ภายในช่องสัญญาณ (In-band Emission) จะเห็นได้ว่า สเปกตรัมมีค่าแอมพลิจูดค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งแถบความถี่ภายในช่อง โดยมีค่าผันผวนในช่วงแคบ ๆ รูปที่ 3-15 (ค) แสดงการแพร่สัญญาณออกนอกแถบไปนช่องสัญญาณข้างเคียง

ในรูปของความหนาแน่นกำลังของสเปกตรัม โดยมีค่าไม่ควรเกินตามที่มาตรฐานของ 3GPP กำหนด ซึ่งแสดงในรูปของ Spectrum emission mask (เส้นแนวนอนสีฟ้า) ส่วนรูปที่ 3-15 (ง) แสดงอัตราส่วนของกำลังสัญญาณที่แพร่ออกนอกแถบไปในช่องสัญญาณข้างเคียงเทียบกับกำลังสัญญาณที่อยู่ภายในช่องสัญญาณ (Adjacent channel power leakage) รูปที่ 3-15 (จ) เป็นแผนภาพคอนสเทลเลชัน (Constellation diagram) ซึ่งแสดงมอดูเลชันของสัญญาณ ส่วนรูปที่ 3-15 (ฉ) แสดงค่า Error Vector Magnitude (EVM) ซึ่งบ่งบอกความคลาดเคลื่อนของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่ได้รับจริงจากค่าที่ควรได้รับทางทฤษฎี

รูปที่ 3-16 แสดงอัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput) ของอุปกรณ์ 5G CPE สำหรับกรณีเลือกใช้มอดูเลชันแบบต่าง ๆ ได้แก่ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) และ M -QAM (M-ary Quadrature Amplitude Modulation) โดยที่ M คือ ระดับการมอดูเลชัน หรือจำนวนสัญลักษณ์ (Symbols) ทั้งหมดที่เป็นไปได้ ซึ่งขึ้นกับจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ k ตามความสัมพันธ์ $M = 2^k$ จากรูปที่ 3-16 จะเห็นว่า Throughput มีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับการมอดูเลชันและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

รูปที่ 3-17 แสดงค่า Error Vector Magnitude (EVM) สำหรับมอดูเลชันระดับต่าง ๆ ค่า EVM เป็นค่าความแตกต่างระหว่างจุดบน Signal Constellation ของสัญญาณที่ควรได้รับ (Ideal Received Constellation Points) และจุดของสัญญาณที่ได้รับจริง (Actual Received Constellation Points) ซึ่งเป็นการวัดความผิดเพี้ยน (Distortion) และสัญญาณรบกวน (Noise) ในสัญญาณที่ได้รับ แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ rms ค่า EVM สามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของมอดูเลชันแบบต่าง ๆ (Modulation schemes) และโดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้สำหรับตรวจจับความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดจากการแปรผันแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear distortion) ของตัวส่งหรือตัวรับ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในระบบสื่อสารแบบดิจิทัลความเร็วสูง จากผลการทดลองพบว่า ค่า EVM มีค่าค่อนข้างคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักสำหรับมอดูเลชันแต่ละระดับ ซึ่งเป็นไปตามความคาดหวังสำหรับอุปกรณ์สื่อสารที่ตัวส่งและตัวรับได้ถูกออกแบบอย่างดี และตรงตามมาตรฐาน

นอกจาก EVM ยังมีตัวชี้วัดที่นิยมใช้ในการวัดประสิทธิภาพของระบบสื่อสารแบบดิจิทัล ได้แก่ Bit Error Rate (BER) ซึ่งวัดจำนวนบิตผิดพลาดในข้อมูลที่ได้รับ เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนบิตที่ถูกส่งออกไป แสดงผลเป็นอัตราส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ ค่า BER สามารถใช้สำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการแก้ไขข้อผิดพลาดที่แตกต่างกันระหว่างระบบต่าง ๆ และใช้สำหรับประมาณการอัตราการเกิดข้อผิดพลาดในระบบสื่อสารได้ โดยทั่วไป BER เมื่อใช้ Modulation schemes แบบต่าง ๆ จะมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับสภาพช่องสัญญาณหรือคุณภาพของสัญญาณเครือข่ายที่ใช้การสื่อสาร ระดับสัญญาณรบกวน และความไว (Sensitivity) ของตัวรับ สำหรับระบบสื่อสาร 5G ทาง 3GPP ได้กำหนดตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบสื่อสารในชั้นกายภาพเป็น Block error rate (BLER) ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างจำนวนบล็อกของข้อมูลที่ได้รับและเกิดความผิดพลาดกับจำนวนบล็อกที่ถูกส่งทั้งหมดในจำนวนเฟรมที่กำหนด (Kalyani, 2021) ค่า BLER จะขึ้นกับสภาพช่องสัญญาณและระดับสัญญาณรบกวน สำหรับ Modulation scheme แบบใด ๆ



หากช่องสัญญาณมีสภาพดี หรืออัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio : SNR) มีค่าสูง ค่า BLER ก็จะต่ำ ในทางกลับกัน สำหรับค่า SNR ใด ๆ เมื่อใช้ระดับมอดูเลชันที่สูงขึ้น โอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวนก็จะเพิ่มขึ้น และค่า BLER ก็จะสูงขึ้น ค่า BLER สัมพันธ์กับค่า Throughput ซึ่งเป็นตัววัดจำนวนบิตของข้อมูลที่รับส่งได้สำเร็จในช่วงเวลาใด ๆ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Throughput} = (1 - \text{BLER}) * \frac{\text{Bits per block}}{\text{Transmit time per block}}$$

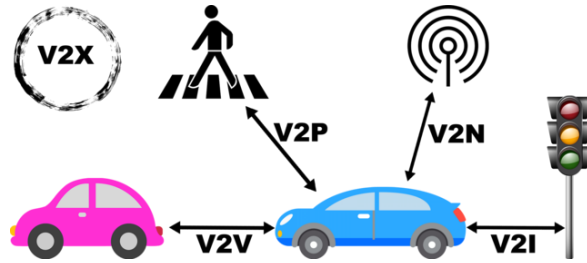
ดังนั้น หากค่า BLER ต่ำ ค่า Throughput ก็จะสูง สำหรับระบบสื่อสาร 5G มาตรฐานได้กำหนดให้ค่า BLER $\leq 10\%$ ดังนั้น สถานีฐาน 5G (gNodeB) จะใช้ขั้นตอนวิธี Link-adaptation algorithm โดยการปรับ Modulation and Coding Scheme (MCS) ให้เหมาะสมกับสภาพของช่องสัญญาณ จากข้อมูลป้อนกลับ (Feedback) โดยอุปกรณ์ใช้งาน (UE) เพื่อพยายามรักษาค่า BLER ไม่ให้เกินค่าตามที่มาตรฐานกำหนด

ในการทดสอบอุปกรณ์ 5G CPE ในห้องปฏิบัติการ โดยเครื่องมือทดสอบและจำลองการรับส่งสัญญาณระบบ 5G (MT8000A) เป็นการทดสอบลักษณะเฉพาะของตัวรับส่งสัญญาณ RF ของอุปกรณ์ 5G CPE ว่าทำงานได้ถูกต้องและเป็นไปตามมาตรฐาน เครื่องมือวัด MT8000A จึงไม่ได้ถูกออกแบบมาสำหรับวัดทดสอบค่า BER หรือ BLER ซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบสื่อสารที่ขึ้นกับปัจจัยของสภาพช่องสัญญาณและระดับสัญญาณรบกวน นอกเหนือจากลักษณะเฉพาะของตัวรับส่งสัญญาณของอุปกรณ์ 5G CPE เอง ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ 5G CPE ผ่านเครือข่ายระบบ 5G ได้ถูกวัดทดสอบในรูปอัตราสูญเสียของแพคเกจ (Packet loss rate) ดังแสดงผลในหัวข้อ 3.2.3 ซึ่งเป็นการทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ 5G CPE ซึ่งติดตั้งในยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ และ Operation dashboard ผ่านเครือข่ายระบบ 5G ของผู้ให้บริการในสภาพแวดล้อมใช้งานจริง ค่า Packet loss rate คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนแพคเกจที่ไม่ได้รับกับจำนวนแพคเกจที่ส่งทั้งหมด เป็นตัวชี้วัดความเชื่อถือได้ (Reliability) ของเครือข่าย

3.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G

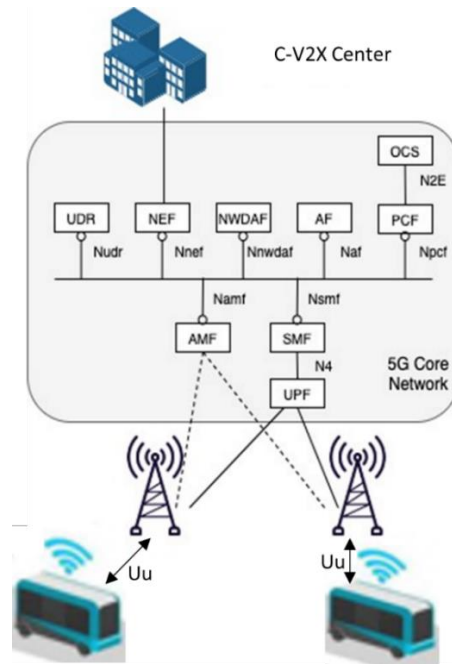
การสื่อสารสำหรับยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในโครงการนี้เป็นการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ของผู้ให้บริการเครือข่าย ได้แก่ บริษัท แอดวานซ์ไวร์เลสเน็ตเวิร์ค จำกัด (Advanced Wireless Network : AWN) ซึ่งเรียกว่า การสื่อสารแบบ Vehicle-to-Network (V2N) โดยจะเป็นส่วนหนึ่งของระบบการสื่อสารระหว่างรถกับสรรพสิ่ง (Vehicle-to-Everything : V2X) สำหรับยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติและระบบจราจรอัจฉริยะ (Intelligent Transportation System : ITS) ที่เต็มรูปแบบ ดังฉลากทัศนียภาพในอนาคตที่แสดงในรูปที่ 3-18





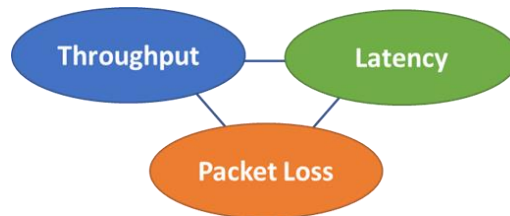
รูปที่ 3-18 การสื่อสารระหว่างรถกับสรรพสิ่ง (V2X) รูปแบบต่าง ๆ
 (ที่มา : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Types_V2X_.png)

การสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ในโครงการนี้ ใช้อุปกรณ์ 5G CPE ใส่บัตรระบุผู้เช่า (SIM card) ซึ่งผู้ให้บริการเครือข่ายได้แก่ บริษัท AWN จัดหาให้ สำหรับเชื่อมต่อกับเครือข่ายระบบ 5G โดยติดตั้งอุปกรณ์ 5G CPE ในยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติแต่ละคัน และที่ Operation Dashboard (หรือ VDO Walls) เพื่อสื่อสารรับส่งข้อมูลกับรถ สำหรับ SIM card ที่ใช้ในการทดลองในโครงการนี้ บริษัท AWN ได้ตั้งค่าโปรไฟล์ ให้มีลำดับความสำคัญ (Priority) สูงกว่า SIM card สำหรับผู้ใช้งานทั่วไป (General subscriber) อุปกรณ์ 5G CPE เชื่อมต่อกับสถานีฐานระบบ 5G ผ่านทาง Uu interface และเชื่อมต่อไปยังเครือข่ายส่วนกลางระบบ 5G (5G core network) ผ่านทาง Access and Mobility Management Function (AMF) ดังแสดงด้วย เส้นประในรูปที่ 3-19 โดย SIM card จะได้รับการจัดสรรเลขที่อยู่ไอพีที่เฉพาะเจาะจง (Fixed IP address) จาก Core network



รูปที่ 3-19 การเชื่อมต่อระหว่างยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติและเครือข่ายระบบ 5G ของผู้ให้บริการเครือข่าย

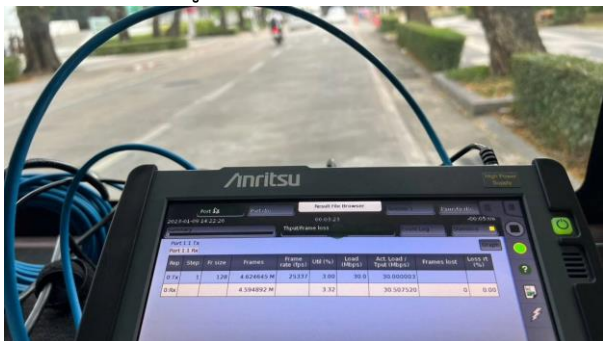
ในการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G จะพิจารณาพารามิเตอร์หลัก 3 ตัว ได้แก่ อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput) ความหน่วงเวลา (Latency) และอัตราการสูญเสียของแพค (Packet loss rate) ดังรูปที่ 3-20 ซึ่งเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการสื่อสารในชั้นเครือข่าย (Network layer)



รูปที่ 3-20 พารามิเตอร์หลักที่ใช้วัดประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ได้ดำเนินการ 2 วิธี ได้แก่

- 1) การทดสอบด้วย Network Protocol โดยใช้ไนต์บูกคอมพิวเตอร์ติดตั้งโปรแกรม iPerf และโปรแกรม HrPing จำลองเป็นอุปกรณ์รับส่งข้อมูลเชื่อมต่อกับ 5G CPE โดยฝั่งหนึ่งซึ่งติดตั้งบนยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ และอีกฝั่งหนึ่งวางประจำที่ จำลองเสมือนเป็น Operation Dashboard อุปกรณ์รับส่งข้อมูลที่อยู่บนรถจะส่งข้อมูลจำลองเสมือนจริงผ่านเครือข่ายระบบ 5G มายังอุปกรณ์รับส่งข้อมูลที่วางประจำที่ และทำการวัดค่าพารามิเตอร์หลักที่เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่าย ทั้ง 3 ตัว ได้แก่ Throughput, Latency และ Packet loss rate

2) การทดสอบด้วยอุปกรณ์ทดสอบเครือข่าย Network Master Pro MT1000A ฝั่งหนึ่งติดตั้งบนยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ และอีกฝั่งหนึ่งวางประจำที่ ดังรูปที่ 3-21



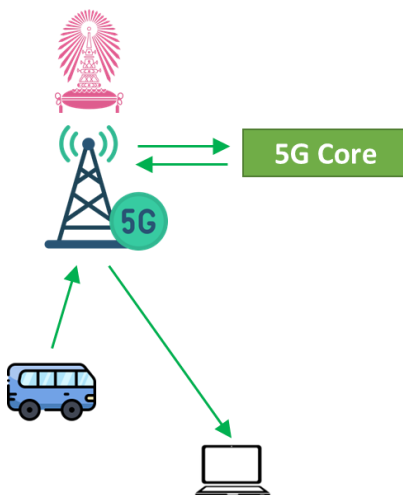
(ก) ฝั่งที่ติดตั้งบนรถ

(ข) ฝั่งที่อยู่ประจำที่

รูปที่ 3-21 การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ด้วยอุปกรณ์ทดสอบเครือข่าย

3.2.3.1 การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารด้วย Network Protocol

การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ด้วย Network Protocol ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีรูปแบบดัง Error! Reference source not found. ผลการวัดค่า Throughput, Latency และ Packet loss rate แสดงในรูปที่ 3-23 ถึงรูปที่ 3-25

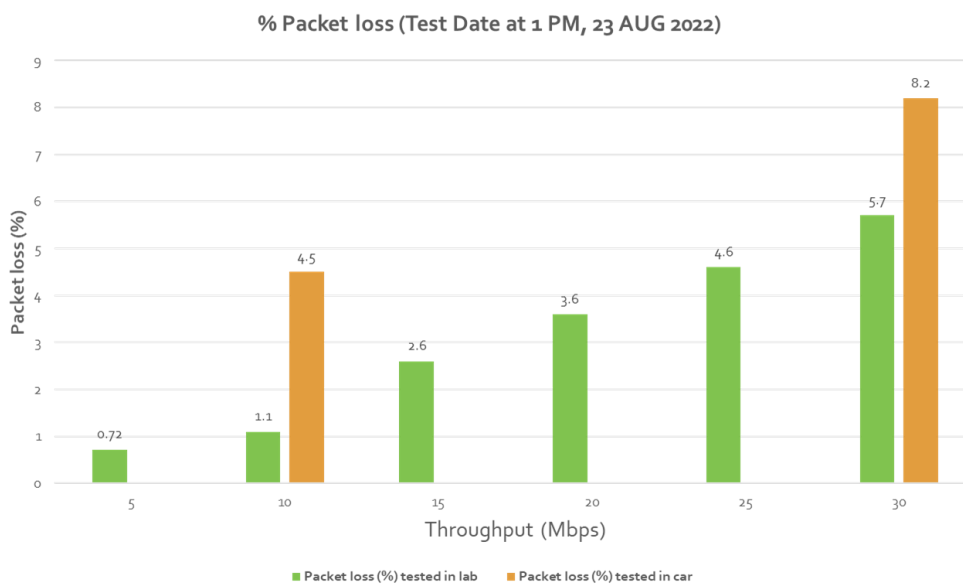


รูปที่ 3-22 รูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

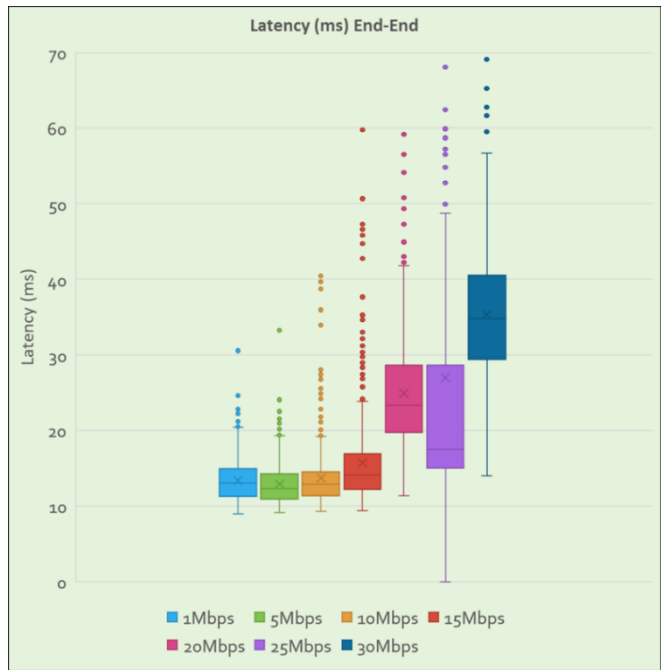
รูปที่ 3-23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Packet loss rate กับ Throughput ในรูปแบบกราฟแท่ง โดยกราฟสีเขียวแสดงผลการทดสอบรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ปลายทาง 2 เครื่อง ที่วางประจำที่ในห้องปฏิบัติการ โดยอุปกรณ์ปลายทางแต่ละเครื่องเชื่อมต่อผ่าน 5G CPE คนละตัวแยกกัน ส่วนกราฟสีส้มแสดงผลการทดสอบรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ปลายทางที่ติดตั้งบนรถซึ่งแล่นไปตามเส้นทางทดสอบกับอุปกรณ์ปลายทางที่วางประจำที่ จากกราฟจะเห็นแนวโน้มว่า เมื่ออัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput)

สูงขึ้น ค่า Packet loss rate ก็เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยจะสังเกตว่า ที่ค่า Throughput ต่ำ ๆ เช่น 5 Mbps จะมีค่า Packet loss rate น้อยมาก (< 1%) โดยอัตราการส่งข้อมูลในระดับต่ำนี้เป็นการประยุกต์ใช้งานในการแจ้งเตือนต่าง ๆ เพื่อความปลอดภัยในการขับขี่หรือเพื่อป้องกันอุบัติเหตุ ซึ่งในกรณีนี้ไม่มีข้อกังวลค่า Packet loss rate ที่น้อยมาก ๆ ส่วนในกรณีค่า Throughput สูง ๆ เช่น 30 Mbps จะเป็นการประยุกต์ใช้งานที่มีการส่งภาพวิดีโอความละเอียดสูง หรือระบบสาระบันเทิง (Infotainment) ภายในรถ ซึ่งแม้จะมี Packet loss บ้างแต่ไม่ได้มีผลกระทบต่อการใช้งานดังกล่าว จากผลการทดสอบพบว่า Packet loss มีค่าประมาณ 6-8 % ซึ่งนับว่าไม่สูงมาก

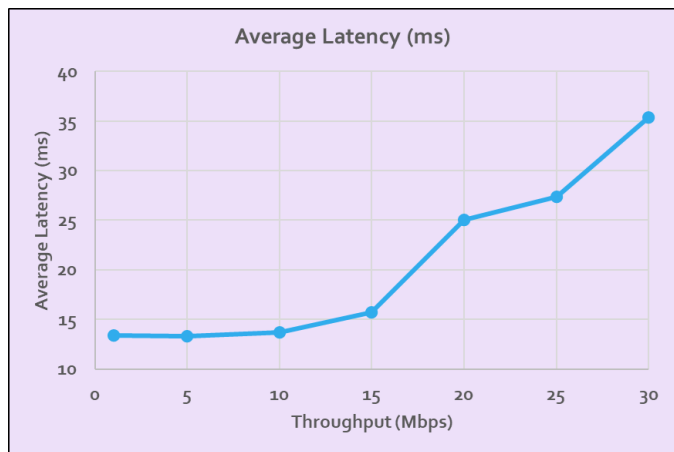
รูปที่ 3-24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Latency (end-to-end) กับ Throughput ในรูปแบบกราฟรูปกล่อง (Box plot) เพื่อแสดงการกระจายตัวของค่า Latency สำหรับ Throughput ค่าต่าง ๆ พบว่า Latency มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อ Throughput มีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นแนวโน้มได้ชัดเจนจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ Latency (end-to-end) กับ Throughput ในรูปที่ 3-25 สำหรับค่า Throughput ไม่เกิน 15 Mbps พบว่า ค่าเฉลี่ยของ Latency อยู่ระหว่าง 10 – 15 ms และสำหรับค่า Throughput สูง ๆ เช่น 30 Mbps พบว่า ค่าเฉลี่ยของ Latency เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 35 ms ซึ่งยังคงต่ำเพียงพอสำหรับการสื่อสารใน Use cases ต่าง ๆ ที่ทดสอบในโครงการนี้



รูปที่ 3-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการสูญเสียกลุ่มข้อมูล (Packet loss) กับค่าอัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput) (ทดสอบที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)



รูปที่ 3-24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Latency (end-to-end) กับ Throughput (ทดสอบที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)



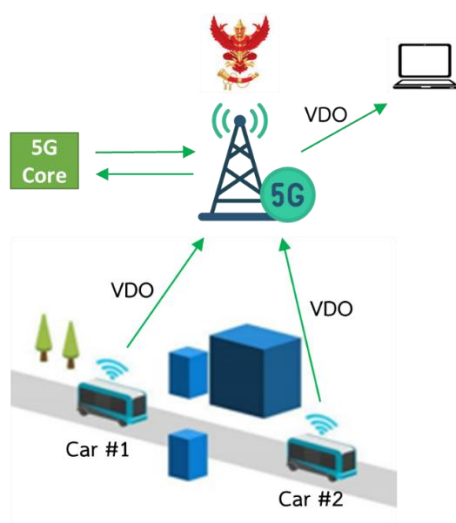
รูปที่ 3-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าความหน่วงเวลา (Latency end-to-end) กับ ค่าอัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput) (ทดสอบที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ด้วย Network Protocol ในพื้นที่สำนักงาน กสทช. มีรูปแบบดังรูปที่ 3-26 ซึ่งแตกต่างจากรูปแบบการทดลองที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเล็กน้อย โดยทดสอบกับยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ จำนวน 2 คัน ซึ่งมีอุปกรณ์ 5G CPE ติดตั้งบนรถ รถคันที่ 1 ติดตั้งสายอากาศภายนอกตัวรถบริเวณหลังคาเพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ 5G CPE ส่วนรถคันที่ 2 ใช้สายอากาศชนิด

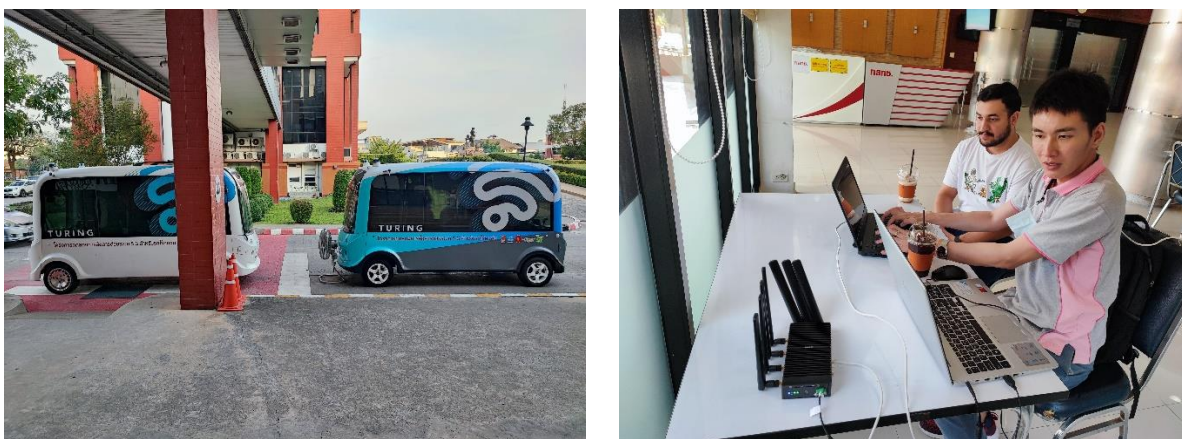
โมโมที่ติดตั้งมากับอุปกรณ์ 5G CPE ดังในรูปที่ 3-11 (ข) การทดสอบทำการวัดค่า Latency (end-to-end) ของการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ 5G CPE ที่ติดตั้งบนรถทั้ง 2 คัน และอุปกรณ์ 5G CPE ซึ่งวางที่ Operation dashboard ใน 2 สถานการณ์ ได้แก่

- ขณะรถจอดอยู่กับที่ ซึ่งไม่มีการส่งข้อมูลภาพจากกล้องวิดีโอและข้อมูลแผนที่จากรถไปยัง Operation dashboard
- ขณะรถแล่นไปตามเส้นทางทดสอบ ซึ่งมีการส่งข้อมูลภาพจากกล้องวิดีโอและข้อมูลแผนที่จากรถไปยัง Operation dashboard

บรรยากาศการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่สำนักงาน กสทช. แสดงดังรูปที่ 3-27

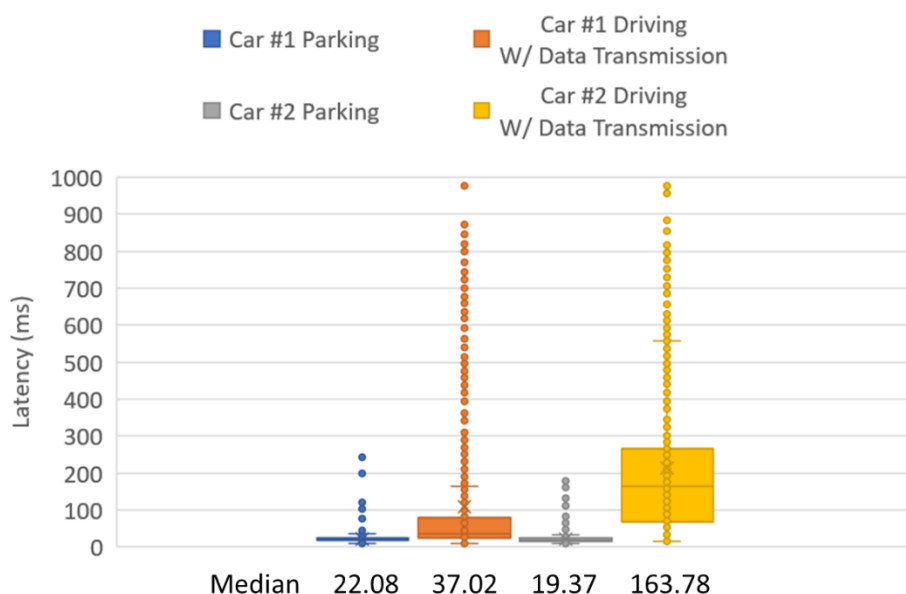


รูปที่ 3-26 รูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่สำนักงาน กสทช.



รูปที่ 3-27 การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ในพื้นที่สำนักงาน กสทช.

ผลการวัดค่า Latency (end-to-end) ของการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G แสดงดังรูปที่ 3-28 จากผลการทดลองพบว่า ขณะรถจอดอยู่กับที่และไม่มีการส่งข้อมูลภาพจากกล้องวิดีโอและข้อมูลแผนที่จากรถไปยัง Operation dashboard อัตราการรับส่งข้อมูลระหว่างรถทั้ง 2 คัน และ Operation dashboard จะน้อยมาก ค่า Latency จึงมีค่าต่ำ โดยมีค่ามัธยฐาน (Median) ประมาณ 20 ms ส่วนในขณะรถแล่นไปตามเส้นทางทดสอบ และมีการส่งข้อมูลภาพจากกล้องวิดีโอและข้อมูลแผนที่จากรถไปยัง Operation dashboard อัตราการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายระบบ 5G เพิ่มสูงขึ้นมาก ค่า Latency จึงมีค่าสูงขึ้น สำหรับรถคันที่ 1 มีค่ามัธยฐานของ Latency ประมาณ 37 ms ส่วนรถคันที่ 2 มีค่ามัธยฐานของ Latency ประมาณ 164 ms ซึ่งสาเหตุที่รถคันที่ 1 มีค่า Latency ต่ำกว่าคาดว่าเนื่องจากอุปกรณ์ 5G CPE ที่ติดตั้งในรถคันที่ 1 ใช้สายอากาศที่มีอัตราขยายสูงติดตั้งภายนอกตัวรถที่บริเวณบนหลังคารถ จึงทำให้การรับส่งสัญญาณติดต่อกับสถานีฐานระบบ 5G มีประสิทธิภาพดีกว่าอุปกรณ์ 5G CPE ที่ติดตั้งในรถคันที่ 2 ซึ่งใช้สายอากาศโมโนขนาดเล็กที่ติดมาพร้อมกับอุปกรณ์



รูปที่ 3-28 กราฟแสดงค่า Latency (end-to-end) ของการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ระหว่างยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ และ Operation dashboard ในพื้นที่สำนักงาน กสทช.

3.2.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารด้วยอุปกรณ์ทดสอบเครือข่ายและข้อมูลจัดเก็บของ CPE

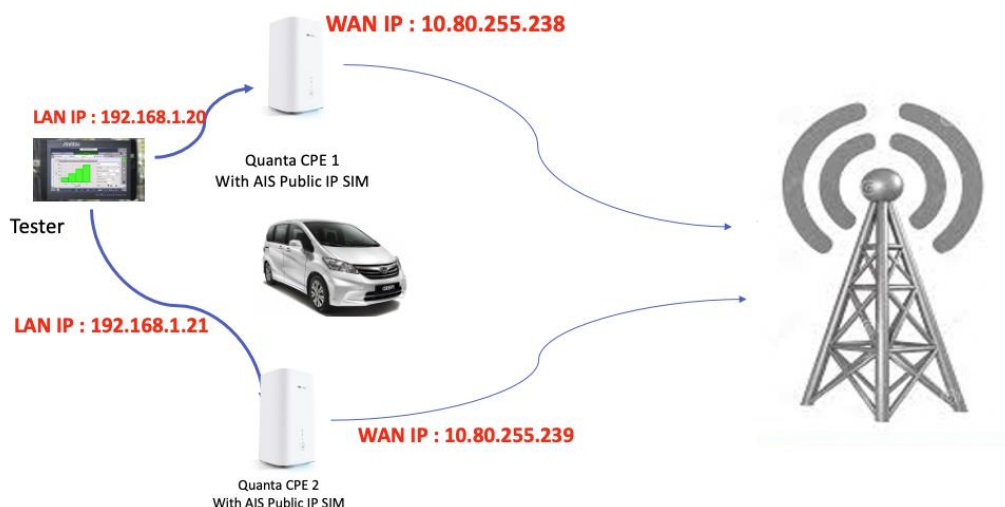
ในหัวข้อก่อนหน้านี้ เป็นการวัดค่า Throughput, Latency และ Packet loss rate ด้วย Network Protocol ในหัวข้อนี้ได้ทำการวัดค่า Throughput ด้วย Network Master Pro MT1000A และสอบทานด้วย Log File ของ 5G CPE โดยมีฉากทัศน์ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3-29

การทดสอบที่ 1 มีฉากทัศน์ดังแสดงในรูปที่ 3-11 (ก) เป็นการทดสอบอุปกรณ์ 5G CPE ที่ได้รับจากผู้ให้บริการเครือข่าย ร่วมกับ SIM card ที่ตั้งค่าโปรไฟล์ให้เป็น Fixed IP address (10.80.255.xxx)



จึงจะสามารถเชื่อมโยงภายในเครือข่ายสื่อสารได้และสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการทดสอบนี้อุปกรณ์ 5G CPE สองตัวจะเชื่อมต่อกับ Network Master Pro MT1000A และถูกติดตั้งไว้ในรถยนต์นั่งส่วนบุคคล โดยรถยนต์แล่นไปตามเส้นทางทดสอบในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในรูปที่ 3-3 ดังนั้นในการทดสอบนี้ อุปกรณ์ 5G CPE ทั้งสองตัวมีแนวโน้มที่จะเชื่อมต่อกับสถานีฐานระบบ 5G เดียวกัน เนื่องจากติดตั้งอยู่บนรถยนต์คันเดียวกัน

Throughput Performance Test Scenario



รูปที่ 3-29 ฉากทัศน์การทดสอบที่ 1 สำหรับการวัดประสิทธิภาพการสื่อสารด้วย Network Master Pro MT1000A

ในการวัดประสิทธิภาพการสื่อสารในการทดสอบนี้ ได้ตั้งสมมติฐานว่า Packet loss rate จะเป็นฟังก์ชันของทั้งความเร็วรถและ Throughput ของการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ด้วยเหตุนี้ จึงกำหนดค่าความเร็วรถไว้ที่ 20 และ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และขณะจอดอยู่กับที่ ภายหลังได้ทราบว่า ยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติที่ทดสอบในโครงการนี้ มีความเร็วเหมาะสมอยู่ที่ 10-20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ในการทดสอบได้ตั้งค่า Throughput ค่าต่าง ๆ และบันทึกค่า Route packet loss rate ดังแสดงในรูปที่ 3-30 รายละเอียดทั้งหมดของผลการทดสอบอุปกรณ์ 5G CPE ที่ได้รับจากผู้ให้บริการเครือข่าย ที่ความเร็วต่าง ๆ สามารถดูเพิ่มเติมได้ใน ภาคผนวก ง-ฉ ตามลำดับ จากภาคผนวก ง-ฉ ความสัมพันธ์ของ Packet loss rate กับอัตราการรับส่งข้อมูล (Throughput) ที่ความเร็วรถยนต์ต่าง ๆ กัน ได้นำมาแสดงในรูปที่ 3-31 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ที่ค่า Throughput มากกว่า 15 Mbps ประสิทธิภาพการสื่อสารไม่สามารถยอมรับได้ ทั้งนี้ Use cases ทั้งหมดในโครงการรวมกัน หรือการประยุกต์ใช้งานยานยนต์อัตโนมัติระดับที่ 4 และ 5 ต้องการ Throughput มากกว่า 15 Mbps

สาเหตุที่อุปกรณ์ 5G CPE ที่ได้รับจากทางผู้ให้บริการเครือข่ายมีประสิทธิภาพค่อนข้างจำกัด คาดว่าเนื่องจากอุปกรณ์ 5G CPE รุ่นนี้เหมาะสมกับการใช้งานตามบ้านเรือนทั่วไปซึ่งติดตั้งประจำที่ แต่อาจไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานที่มีการเคลื่อนที่ อาทิ ยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ เนื่องจากอุปกรณ์ 5G CPE รุ่นนี้มีสายอากาศแบบ 2x2 MIMO planar ติดตั้งภายในตัวอุปกรณ์ หรืออาจใช้ Chip set ที่มีการกีดกันทางการค้า

Document Information				
Report Name	RFC2544 – Basic			
File Name	Data Rate 5, 15, 35, 55 Mbps 30km/hr			
Customer				
Project	Project 5G C-V2X			
Operator				
Notes	Drive Test – White CPE			

Module Type	Serial no	Performance Verification Date	Performance Verification Due Date	Software Version
MT1000A	6D60011010	2017-06-05	2018-06-05	9.00
MU100010A	6D60008723	2017-06-05	2018-06-05	

RFC2544 Summary									
Start at	2022-12-26 15:11:14								
Stop at	2022-12-26 15:16:31								
GPS status	Not available								
Result summary	Warning								
Test mode	Switch/Router test								
Test	Status								
Throughput and frame loss	Completed								
Throughput	Not configured								
Frame loss	Not configured								
Latency	Not configured								
Burst	Not configured								

RFC2544 Throughput and Frameloss Results - Port 1										
Test	Rep	Step	Fr size	Frames	Frame rate (fps)	Util (%)	Load (Mbps)	Act. Load / Tput (Mbps)	Frames lost	Loss rt (%)
P1 Tx	0-Tx	1	128	3.800675 M	12668	1.50	15.0	15.000001	29797	0.78
P2 Rx	0-Tx	1	128	3.770878 M	12668	1.95		17.949824		

RFC2544 Throughput and Frameloss Results - Port 2										
Test	Rep	Step	Fr size	Frames	Frame rate (fps)	Util (%)	Load (Mbps)	Act. Load / Tput (Mbps)	Frames lost	Loss rt (%)
P2 Tx	0-Tx	1	128	3.800675 M	12668	1.50	15.0	15.000001	21121	0.56
P1 Rx	0-Tx	1	128	3.779554 M	12668	2.15		19.736320		

RFC2544 Throughput and Frameloss Results - Port 1										
Test	Rep	Step	Fr size	Frames	Frame rate (fps)	Util (%)	Load (Mbps)	Act. Load / Tput (Mbps)	Frames lost	Loss rt (%)
P1 Tx	0-Tx	1	128	8.868243 M	29560	3.50	35.0	34.999998	4.176981 M	47.10
P2 Rx	0-Tx	1	128	4.691262 M	29560	3.15		28.957120		

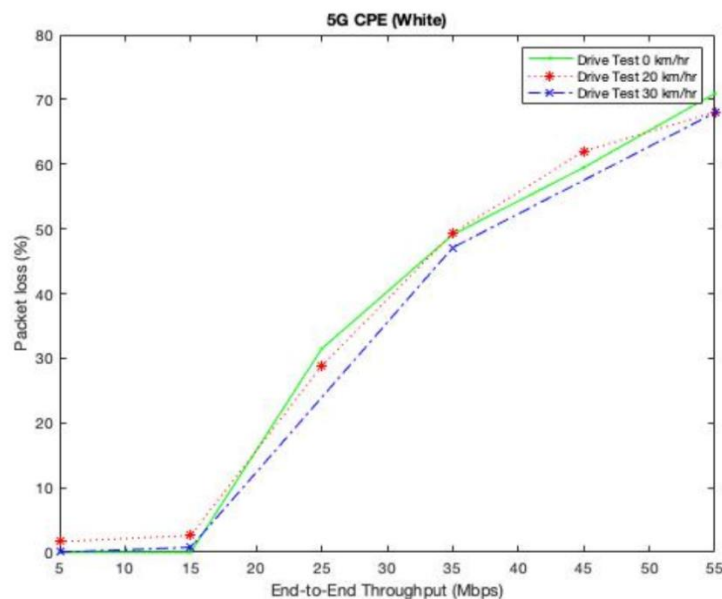
RFC2544 Throughput and Frameloss Results - Port 2										
Test	Rep	Step	Fr size	Frames	Frame rate (fps)	Util (%)	Load (Mbps)	Act. Load / Tput (Mbps)	Frames lost	Loss rt (%)
P2 Tx	0-Tx	1	128	8.868243 M	29560	3.50	35.0	35.000002	4.08913 M	46.11
P1 Rx	0-Tx	1	128	4.778930 M	29560	3.63		33.372224		

RFC2544 Throughput and Frameloss Results - Port 1										
Test	Rep	Step	Fr size	Frames	Frame rate (fps)	Util (%)	Load (Mbps)	Act. Load / Tput (Mbps)	Frames lost	Loss rt (%)
P1 Tx	0-Tx	1	128	13.935810 M	46452	5.50	55.0	54.999998	9.467408 M	67.94
P2 Rx	0-Tx	1	128	4.468402 M	46452	2.98		27.342528		

RFC2544 Throughput and Frameloss Results - Port 2										
Test	Rep	Step	Fr size	Frames	Frame rate (fps)	Util (%)	Load (Mbps)	Act. Load / Tput (Mbps)	Frames lost	Loss rt (%)
P2 Tx	0-Tx	1	128	13.935810 M	46452	5.50	55.0	55.000002	9.231979 M	66.25
P1 Rx	0-Tx	1	128	4.703831 M	46452	4.80		42.277504		

รูปที่ 3-30 Log file แสดงผลการทดสอบด้วย Network Master Pro MT1000A



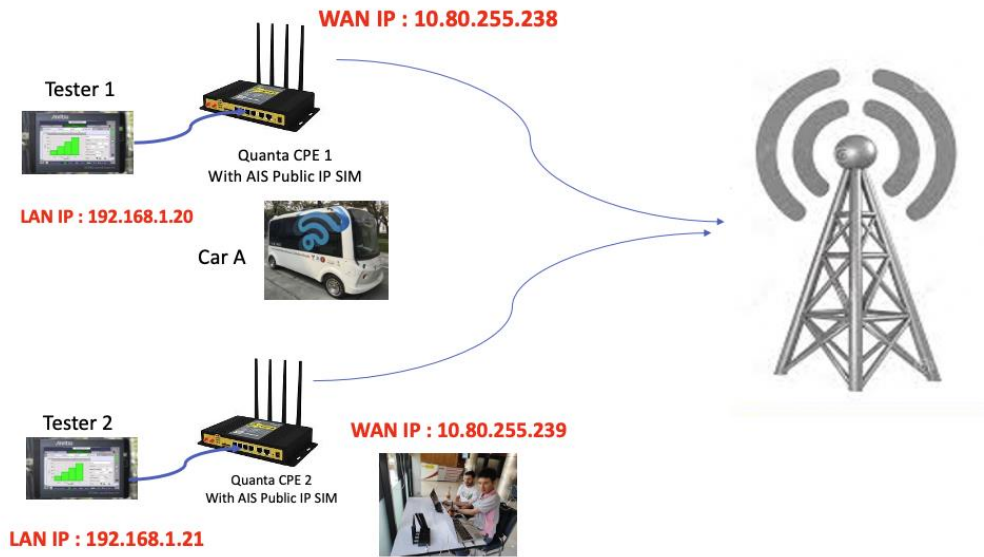


รูปที่ 3-31 ความสัมพันธ์ระหว่าง Packet loss rate และ Throughput สำหรับความเร็วรถยนต์ทดสอบค่าต่าง ๆ

จากผลการทดสอบข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการจัดหาอุปกรณ์ 5G CPE ที่มีสายอากาศแบบ 4x4 MIMO (สายอากาศประจำตัว) จากผู้ผลิตได้หวั่น ดังแสดงในรูปที่ 3-32 ซึ่งมีอัตราขยายสูงขึ้นและมีประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณดีขึ้น รวมทั้งมีพอร์ตสำหรับต่อสายอากาศภายนอกได้ (ซึ่งได้ทำการจัดหาสายอากาศภายนอกที่มีอัตราขยายสูงยิ่งขึ้นและติดตั้งบนหลังคายานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติเพื่อทำการทดสอบ)

การทดสอบที่ 2 ในการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G สำหรับยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ต้องการให้อุปกรณ์รับส่งข้อมูลแต่ละฝั่งมีการเชื่อมต่อกับสถานีฐานระบบ 5G แยกกันอย่างชัดเจนเสมือนในการใช้งานจริง จึงทำการทดสอบโดยใช้ Network Master Pro MT1000A จำนวน 2 เครื่อง โดยเครื่องหนึ่งติดตั้งประจำที่เสมือนอยู่ที่ Operation dash board ในขณะที่อีกเครื่องหนึ่งติดตั้งบนยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ซึ่งเดินทางด้วยความเร็วจริงตามเส้นทางทดสอบในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในรูปที่ 3-3 เช่นเดียวกัน ฉากทัศน์การทดสอบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3-32 ในการทดสอบนี้ อุปกรณ์ 5G CPE ฝั่งที่อยู่บนรถและฝั่งที่อยู่ประจำที่มีแนวโน้มที่จะเชื่อมต่อกับสถานีฐานระบบ 5G ที่แตกต่างกัน เนื่องจากตำแหน่งอยู่ห่างกันคนละที่ รวมทั้งมีการส่งผ่านการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐาน (Handover) ในขณะที่รถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางทดสอบ นอกจากนั้น ในการทดสอบที่ 2 คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารของอุปกรณ์ 5G CPE กรณีใช้สายอากาศติดตั้งประจำตัวและกรณีใช้สายอากาศภายนอกที่ติดตั้งบนหลังคายานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

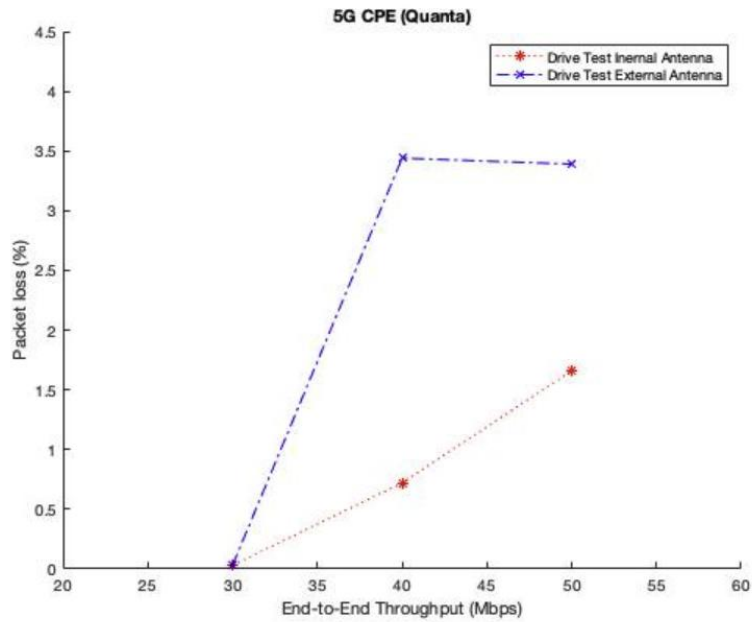
Throughput Performance Test Scenario



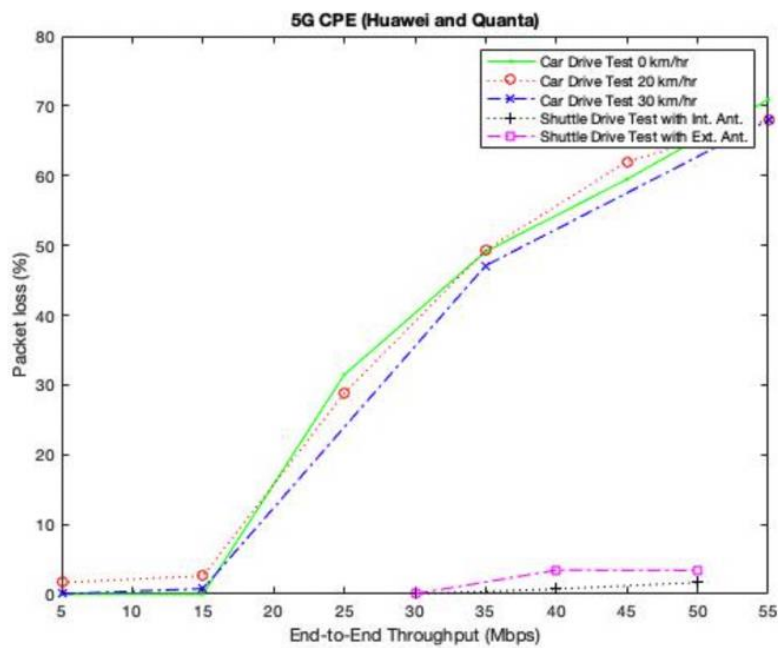
รูปที่ 3-32 ฉากทัศน์การทดสอบที่ 2 สำหรับการวัดประสิทธิภาพการสื่อสารของยานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติผ่านเครือข่ายระบบ 5G ด้วย Network Master Pro MT1000A

ผลการทดลองประสิทธิภาพการสื่อสารโดยละเอียดของอุปกรณ์ 5G CPE ที่โครงการฯ จัดหามาเอง ทั้งในกรณีใช้สายอากาศประจำตัวและกรณีใช้สายอากาศภายนอกที่ติดตั้งบนหลังคายานยนต์รับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ แสดงไว้ในภาคผนวก ข และ ค ตามลำดับ รูปที่ 3-33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Packet loss rate และ Throughput เปรียบเทียบทั้งสองกรณี สมมติฐานคาดว่ากรณีที่ใช้สายอากาศภายนอกซึ่งติดตั้งบนหลังการรถ จะมีประสิทธิภาพในการสื่อสารดีกว่ากรณีที่ใช้สายอากาศประจำตัวอุปกรณ์ 5G CPE ซึ่งติดตั้งอยู่ที่คอนโซลด้านหน้ารถ แต่ผลการทดสอบพบว่าทั้งสองกรณีแตกต่างกันไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเป็นได้ว่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณกับสายอากาศภายนอกไม่เข้าคู่หรือไม่แมตซ์กัน หรือช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศภายนอกอาจไม่เหมาะสมกับย่านความถี่ 2600 MHz หรืออาจเนื่องจากผลของการสะท้อนหรือบดบังสัญญาณโดยบางส่วนของหลังการรถ

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G โดยใช้อุปกรณ์ 5G CPE ที่โครงการฯ จัดหามาเอง เปรียบเทียบกับกรณีใช้อุปกรณ์ 5G CPE ที่ผู้ให้บริการเครือข่ายจัดหาให้ แสดงในรูปที่ 3-34 ความสัมพันธ์ระหว่าง Packet loss rate และ Throughput ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ 5G CPE ที่โครงการฯ จัดหามาเอง มีประสิทธิภาพดีกว่าอุปกรณ์ 5G CPE ที่ผู้ให้บริการเครือข่ายจัดหาให้ โดยเห็นได้จากค่า Packet loss rate ที่ต่ำกว่ามาก



รูปที่ 3-33 ความสัมพันธ์ระหว่าง Packet loss rate และ Throughput ของการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G เปรียบเทียบระหว่างกรณีใช้สายอากาศประจำตัวอุปกรณ์ 5G CPE และใช้สายอากาศภายนอก



รูปที่ 3-34 ความสัมพันธ์ระหว่าง Packet loss rate และ Throughput ของการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G เปรียบเทียบระหว่างกรณีใช้อุปกรณ์ 5G CPE ทั้ง 2 รุ่น



ตารางที่ 3-3 ข้อมูลจาก Log file ผลการทดสอบการสื่อสารของอุปกรณ์ 5G CPE ที่โครงการฯ จัดหามา

AIS Drive Testing Summary

- There's 9 inter cell handover events occurred in each test scenarios, so the signal strength and channel quality are varied during testing period.
- The signal quality and data performance statistics of both types of antenna are close
- In terms of receiving signal power, internal antenna is slightly better than external antenna, but the difference is negligible
- Average PUCCH Tx Power is lower while using internal antennas, which equals to lower energy consumption

	Combined RSRP (avg.)	Combined SNR (avg.)	CQI (avg.)	RI (avg.)	DL BLER (avg.)	DL Layer (avg.)	UL BLER (avg.)	UL Layer (avg.)	Tx Power (avg.)
External Ant. 30Mbps	-77.1 dBm	15.2 dB	10.65	1.93	4.7%	1.74	5.0%	2	-9.1 dBm
External Ant. 40Mbps	-78.4 dBm	15.8 dB	11.06	1.96	6.06%	1.64	5.8%	1.98	-8.8 dBm
External Ant. 50Mbps	-78.1 dBm	16.4 dB	10.67	1.93	6.08%	1.70	5.45%	1.99	-8.3 dBm
Internal Ant. 30Mbps	-76.0 dBm	16.1 dB	10.5	1.91	4.92%	1.78	5.34%	2	-12.09 dBm
Internal Ant. 40Mbps	-75.6 dBm	16.2 dB	10.5	1.89	5.13%	1.78	5.45%	2	-10.68 dBm
Internal Ant. 50Mbps	-76.2 dBm	15.2 dB	10.09	1.9	6.5%	1.7	5.39%	2	-11.3 dBm

ข้อดีอีกประการหนึ่งของอุปกรณ์ 5G CPE ที่โครงการฯ จัดหามา คือ อุปกรณ์สามารถจัดเก็บ Log file ผลการทดสอบการสื่อสาร ดังแสดงในตารางที่ 3-3 แม้ว่าค่าที่ได้จาก Log file (รายละเอียดในภาคผนวก ก) กับผลการทดสอบโดย Network Master Pro MT1000A (รายละเอียดในภาคผนวก ข และ ค) จะมีความแตกต่างกันอยู่บ้าง แต่ก็อยู่ในพิสัย (Range) หรือขนาด (Magnitude) เดียวกัน ซึ่งแสดงได้ว่าอุปกรณ์ 5G CPE ที่โครงการฯ จัดหามา มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานใน Use case ของโครงการฯ

นอกจากนี้ มีประเด็นที่ควรกล่าวถึงของข้อมูลจาก Log file ของอุปกรณ์ 5G CPE ที่โครงการฯ จัดหามาเอง ดังแสดงตัวอย่างบางส่วนต่อไปนี้

รูปที่ 3-35 แสดงตัวอย่าง Data Performance External Antenna (Bandwidth 30 Mbps) จะเห็นที่วงสีแดงว่า อัตราส่วน DL:UL (Downlink : Uplink) เท่ากับ 7:2 ซึ่งในปัจจุบัน เป็นที่ทราบดีว่าปริมาณข้อมูล (Traffic) ของฝั่ง Uplink เพิ่มขึ้นอย่างมาก ปัจจุบัน Peak data rate ของระบบ 5G ต่อ 1 สถานีฐานอยู่ที่ประมาณ 1 Gbps ซึ่งแสดงว่า อัตราการรับส่งข้อมูลฝั่ง Uplink น่าจะอยู่ที่ประมาณ 200 Mbps นั้นหมายถึงว่าในพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตร สามารถมียานยนต์อัตโนมัติในระดับ 2 และ 3 ได้ประมาณ 400 คัน แต่ในพื้นที่ขนาดเดียวกัน จะสามารถมียานยนต์อัตโนมัติในระดับ 4 และ 5 ซึ่งต้องการสื่อสารด้วยอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้นได้เพียง 2 - 3 คันเท่านั้นเอง นอกจากนี้ ข้อมูลในรูปที่ 3-35 ยังระบุ Band ที่ใช้งาน คือ n41 ซึ่งเป็น 5G Stand Alone (5G SA) และบอกขนาดของ Subcarrier spacing ด้วย



Data Performance - Basic Info (External Antenna, Bandwidth 30 Mbps)

RAT Mode	
MCC/MNC	520/03
TAC	030163
RRC State	
MM State	
SM State	
Band	n41
NR Frequency	2559.750 MHz
NR BW	20 MHz
LTE Frequency	
LTE BW	
NR Frame Structure	5 ms, DL:UL = 7:2
Special Sub-Frame Configuration	DL:UL = 6:4
Special Sub-Frame GP	4 Symbols
PRACH Format	Format0
PUCCH Format	UCI format 1
PBCH Subcarrier Spacing	30kHz
PDCCH Symbol Number	1 Symbols
Uplink Power Control	4dBm
SRS Enable	ON
NR TDD UL/DL Pattern 1	5 ms, DL:UL (Slot) = 7:2, DL:UL (Symbols) = 6:4
NR TDD UL/DL Pattern 2	Invalid
SRS Switch Type	no config
SRS Antennas Switch	OFF
Active UL BWP Config Subcarrier Spacing	30kHz
Active DL BWP Config Subcarrier Spacing	30kHz

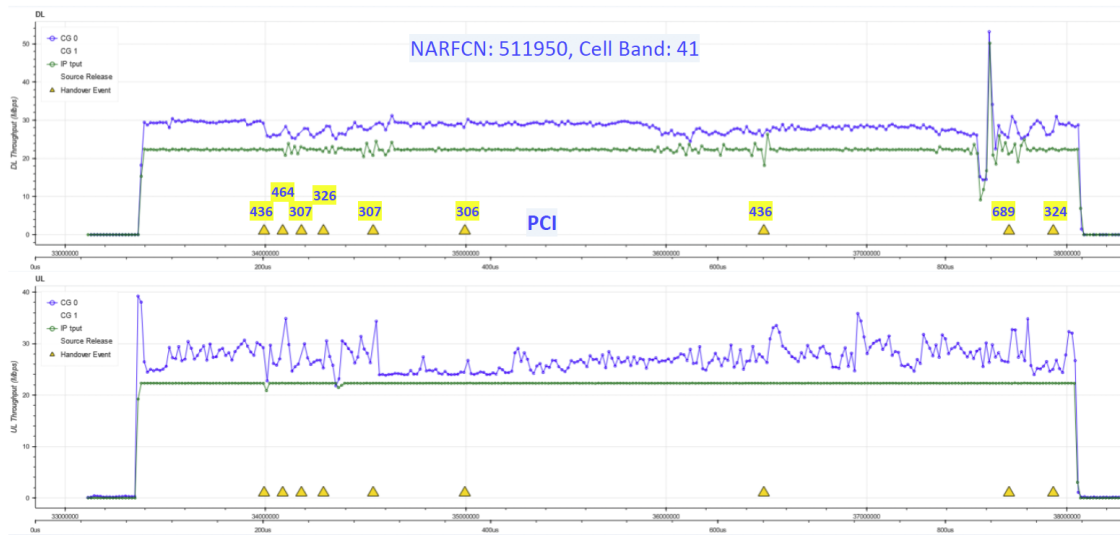
SSB NRARFCN	511950
PCI	324
SSB Index	2
SSB RSRP	-69
SSB RSRQ	-10
SSB RSI	-59
SSB SINR	18
PUSCH TxPower	15
PUCCH TxPower	-17
SRS TxPower	20

รูปที่ 3-35 ตัวอย่างข้อมูล Log file แสดง Band ที่ใช้งาน และอัตราส่วน DL:UL



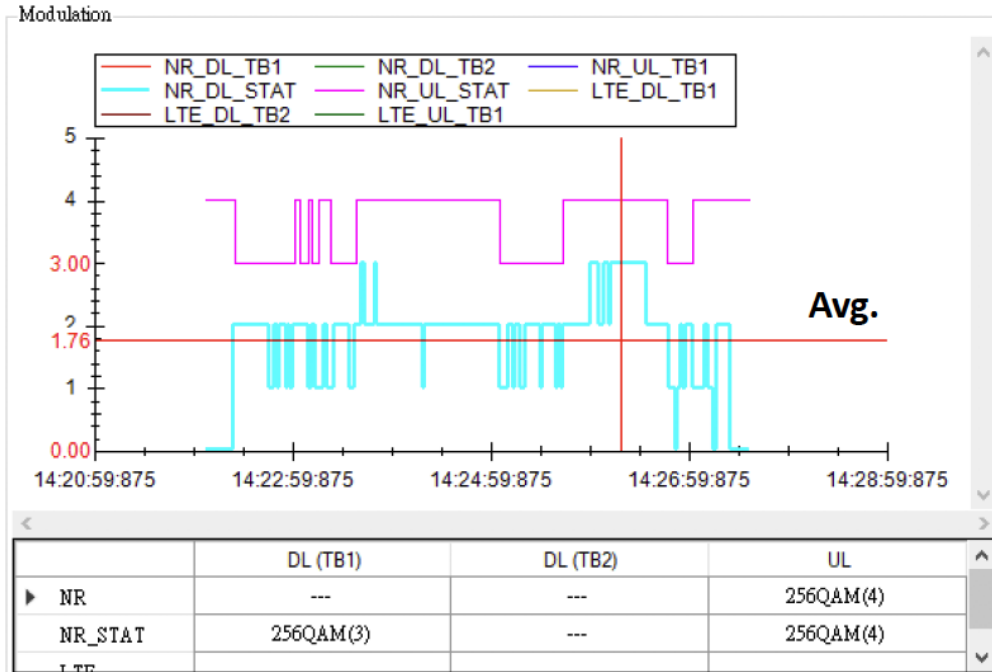
รูปที่ 3-36 แสดงให้เห็นการ Hand over ระหว่างสถานีฐาน (Physical cell identity (PCI) หมายเลข 436, 464, 307, 326, 307, 306, 436, 689 และ 324) ซึ่งมีผลต่อ Throughput ดังจะเห็นได้จากช่วงท้ายของกราฟที่มีการ Hand over ระหว่าง PCI # 436 และ 689 ซึ่งคาดว่าจะมีการซ้อนเหลื่อม (Overlap) ของสัญญาณสถานีฐาน จึงทำให้เกิดการรบกวน (Interference) ทางด้านภาคส่ง ทำให้มีผลต่อ Throughput ของฝั่ง Downlink มีค่าลดลง แต่ไม่ค่อยมีผลต่อฝั่ง Uplink เพราะเป็นการสื่อสารจากอุปกรณ์ 5G CPE ไปยังสถานีฐาน

NR Inter Cell Handover Events (External Antenna, Bandwidth 30 Mbps)



รูปที่ 3-36 ตัวอย่างข้อมูล Log file แสดง Physical cell identity (PCI)

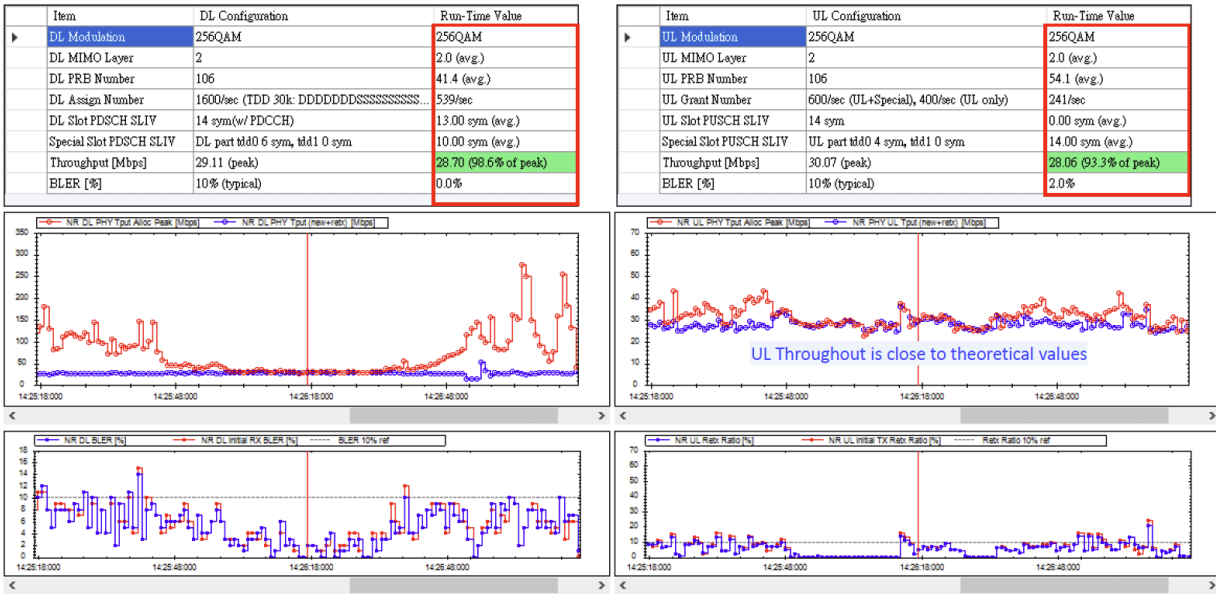
รูปที่ 3-37 แสดงการปรับเปลี่ยนการมอดูเลชันของฝั่ง Downlink (0-QPSK, 1-16QAM, 2-64QAM, 3-256QAM) และ Uplink (0-BPSK, 1-QPSK, 2-16QAM, 3-64QAM, 4-256QAM) ช่วงที่มีการปรับเปลี่ยนการมอดูเลชัน คาดว่าจะสัมพันธ์กับปริมาณข้อมูล (Traffic) ทางฝั่ง Uplink และ Downlink ในบริเวณนั้น และในช่วงเวลานั้น ๆ



รูปที่ 3-37 การมอดูเลชันในแต่ละช่วงเวลา

รูปที่ 3-38 แสดงค่า Throughput ของฝั่ง Uplink และ Downlink ตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่า Throughput มีค่าใกล้เคียงกับ 30 Mbps เพราะข้อมูลจำลองที่รับส่งโดยอุปกรณ์ 5G CPE ได้ถูกสร้างจาก Network Master Pro MT1000A ที่ทำการวัดประสิทธิภาพการสื่อสารไปพร้อมกันในขณะนั้น

5G NR Throughput Network Configuration v.s. Run-Time Value (External Antenna, Bandwidth 30 Mbps)



รูปที่ 3-38 Throughput ของฝั่ง Uplink และ Downlink ของอุปกรณ์ 5G CPE ที่จัดเก็บไว้

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการสื่อสารผ่านเครือข่ายระบบ 5G ทั้ง 2 วิธี โดยการทดสอบด้วย Network Protocol และการทดสอบด้วยอุปกรณ์ทดสอบเครือข่าย พบว่า ในบางช่วงเวลาขณะยานยนต์รับส่ง ผู้โดยสารอัตโนมัติแล่นบนเส้นทางทดสอบ อาจมีค่า Latency ของการสื่อสารผ่านเครือข่ายที่สูงขึ้นกว่าค่ามัธยฐานอย่างเห็นได้ชัดเป็นช่วง ๆ ซึ่งอาจเกิดจากการรบกวน (Interference) ของสัญญาณจากสถานีฐานที่ซ้อนเหลื่อม (Overlap) กัน (ตัวอย่างกรณีทดสอบในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) หรือการบดบังสัญญาณจากสถานีฐานโดยสิ่งแวดล้อม เช่น อาคารหรือสิ่งปลูกสร้าง (ตัวอย่างกรณีทดสอบในพื้นที่สำนักงาน กสทช.) ซึ่งแนวทางในการแก้ไขหรือป้องกันปัญหาเหล่านี้ในการใช้งานยานยนต์อัตโนมัติหรือระบบจราจรอัจฉริยะในอนาคต สามารถทำได้โดยการทำผู้ให้บริการเครือข่ายทำการปรับสัญญาณเครือข่ายให้มีคุณภาพเหมาะสม (Optimization) ตามแนวเส้นทางเดินรถตลอดเส้นทางโดยไร้รอยต่อ สำหรับการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพและมีความเชื่อถือได้ของยานยนต์อัตโนมัติ ดังตัวอย่างการปรับสัญญาณเครือข่าย 5G ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงในหัวข้อ 3.2.1 ซึ่งจะเห็นว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารให้ดีขึ้นได้

นอกจากนั้น ค่า Latency และ Packet loss rate ที่สูง อาจเนื่องมาจากความคับคั่งของเครือข่าย (Network congestion) ซึ่งเกิดจากปริมาณข้อมูลที่ถูกรับส่งผ่านเครือข่ายมากเกินไปกว่าค่าที่กำหนดไว้โดยผู้ให้บริการเครือข่าย โดยเฉพาะในทางฝั่ง Uplink ซึ่งแนวทางในการแก้ไขปัญหา อาจทำได้โดยการจัดสรรอัตราส่วนของทรัพยากรสื่อสารของเครือข่ายทางฝั่ง Uplink และ Downlink ให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในการสื่อสารของยานยนต์อัตโนมัติ ซึ่งมีความต้องการทรัพยากรและข้อกำหนดของประสิทธิภาพการสื่อสารของเครือข่ายที่แตกต่างจากการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่หรือการใช้งานอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงทั่วไป วิธีการหนึ่งที่เป็นคุณสมบัติเด่นของเทคโนโลยีระบบ 5G คือ การทำ Network slicing เพื่อจัดแบ่งทรัพยากรระบบสื่อสาร



ทางกายภาพและระบบประมวลผลที่เหมาะสมให้กับเครือข่ายย่อย สำหรับให้บริการการสื่อสารแก่ยานยนต์อัตโนมัติโดยเฉพาะ ซึ่งสามารถจัดสรรทรัพยากรเพื่อให้ความสำคัญกับความหน่วงเวลา (Latency) หรือความเชื่อถือได้ (Reliability) ของการสื่อสารผ่านเครือข่ายย่อยดังกล่าว โดยอาจต้องมีการทดลองและทดสอบร่วมกับผู้ให้บริการเครือข่ายต่อไปในอนาคต ตัวอย่างการทำ Network slicing บนเครือข่ายระบบ 5G แบบ Standalone (5G SA) เพื่อปรับปรุงคุณภาพการให้บริการ (Quality of Service : QoS) สำหรับการประยุกต์ใช้งานยานยนต์อัตโนมัติ อาทิ การทดสอบยานยนต์อัตโนมัติโดยความร่วมมือของ Deutsche Telekom, BMW Group, Valeo, Qualcomm และ Ericsson (Kadia, 2022) หรืองานวิจัยของ Abdel Hakeem (2020)



3.2.4 การติดตั้ง Video Wall สำหรับศูนย์บัญชาการรถยนต์ไร้คนขับ

Video Wall ใช้สำหรับแสดงผลที่ศูนย์ควบคุมและบัญชาการ เพื่อให้สะดวกต่อการเฝ้าสังเกตและเพิ่มมาตรฐานความปลอดภัยของระบบ โดยในส่วนนี้เราได้ทำการติดตั้งจอแสดงผลแบบ LCD ขนาด 55 นิ้ว จำนวนทั้งหมด 6 จอ

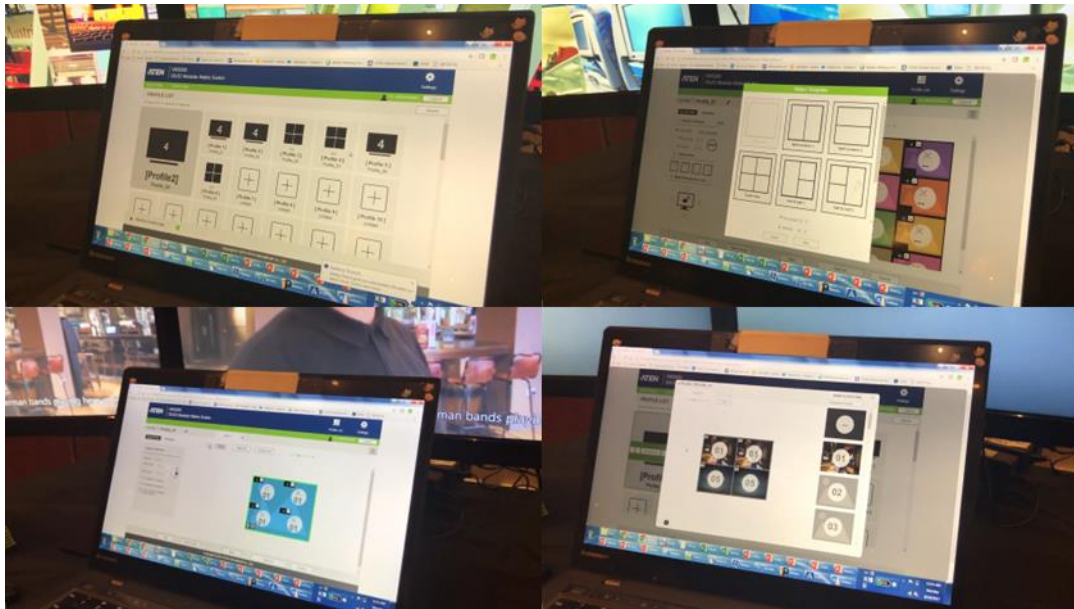
เพื่อรองรับการแสดงผลจากหลากหลายส่วน เราได้เลือกใช้ Aten VM5808H 8 x 8 HDMI Matrix Switch สำหรับในการจัดการส่วนของระบบ Video Wall ที่รองรับสัญญาณผ่านทางสาย HDMI ถึง 8 สัญญาณขาเข้า และ 8 สัญญาณขาออก ดังแสดงในรูปที่ 3-39 โดยในโครงการนี้เราได้แสดงผล Use Case ต่าง ๆ จาก 3 ส่วน ซึ่งมีสัญญาณขาเข้า ทั้งหมด 3 สัญญาณ และแสดงผลออกที่จอแสดงผลทั้ง 6 จอ



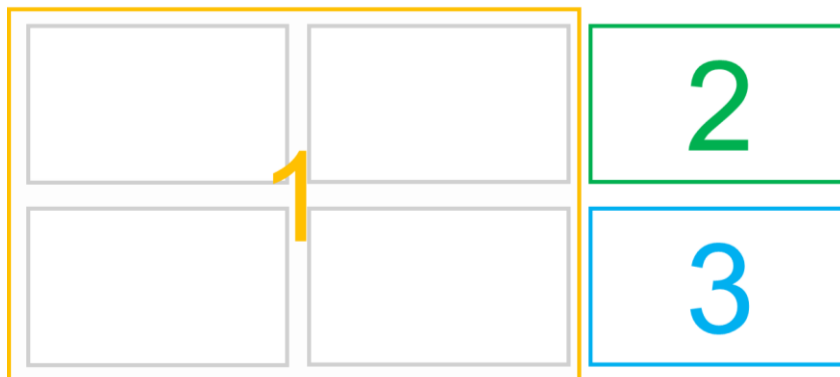
รูปที่ 3-39 Aten VM5808H 8 x 8 HDMI Matrix Switch

ที่มา <https://www.mc.co.th/eshop/8-in-8-out/3448-8-x-8-true-4k-hdmi-matrix-switch.html>

สำหรับการตั้งค่าการแสดงผล เราสามารถทำได้ผ่านการต่อสาย LAN กับเครื่อง Matrix Switcher และเข้าเข้าไปใน IP address ที่ตัวเครื่องกำหนดไว้ ในส่วนของการตั้งค่านั้นเราสามารถทำได้หลายรูปแบบตามความต้องการ ทั้งขนาดจอ ความละเอียดที่และความเร็วที่ต้องการแสดงผล และยังมีโปรแกรมในการแสดงผล 1 สัญญาณขาเข้าไปที่จอมากกว่า 1 จอแบบรวมกัน โดยในการตั้งค่าต่าง ๆ นั้นต้องคำนึงถึงการรองรับของจอแสดงผลขาออก และอุปกรณ์สายสัญญาณ HDMI ว่ารองรับกับการตั้งค่า เพราะอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการแสดงผล เช่น อาการจอกระพริบ หรือ ภาพกระตุก



รูปที่ 3-40 ตัวอย่างหน้าการตั้งค่า Profile สำหรับ Aten
 ที่มา <https://www.youtube.com/watch?v=Mlc2zoJ1djw>



รูปที่ 3-41 รูปแบบการแสดงผลที่ตั้งค่า Profile สำหรับโครงการนี้

ในโครงการนี้ เราได้ตั้งค่าสัญญาณขาออก โดยสร้าง Profile ที่จะแสดงผลออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ โดยส่วนแรกเป็นส่วนที่ต้องการแสดงผลเป็นหลัก มีขนาด 2X2 จอ ที่เป็นสัญญาณเดียวกัน แต่แสดงบน 4 จอแบบต่อเนื่อง และ ส่วนที่ 2 และ 3 นั้น มีขนาด 1X1 จอสำหรับแสดงผลสัญญาณขาเข้าที่ 2 และ 3 โดยเราได้ตั้งโปรแกรมไว้ให้สลับ 3 ส่วนนี้ จากสัญญาณขาเข้าทั้ง 3 สัญญาณ ในกรณีที่เราต้องการเฝ้าสังเกตส่วนไหนเป็นหลัก เราสามารถเปลี่ยนได้ทันที โดยการตั้งค่า profile และรูปแบบของการตั้งค่าเป็นแสดงดังในรูปที่ 3-40 และรูปที่ 3-41 ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าเราได้แบ่งเป็น 3 ส่วน และมีสัญญาณค่าเข้าแสดงตามเลข 1 2 และ 3 หลังจากที่ได้ทำการตั้งค่า และเชื่อมต่อสาย HDMI ตามตำแหน่งที่โปรแกรมไว้ในหน้าการตั้งค่าของ Aten แล้วนั้นเราได้ทำการ



ทดสอบการแสดงผลตามที่เราได้ตั้งค่า โดยการต่อสัญญาณค่าเข้า 3 สัญญาณที่แตกต่างกันได้ผลดังที่แสดง
ในรูปที่ 3-42

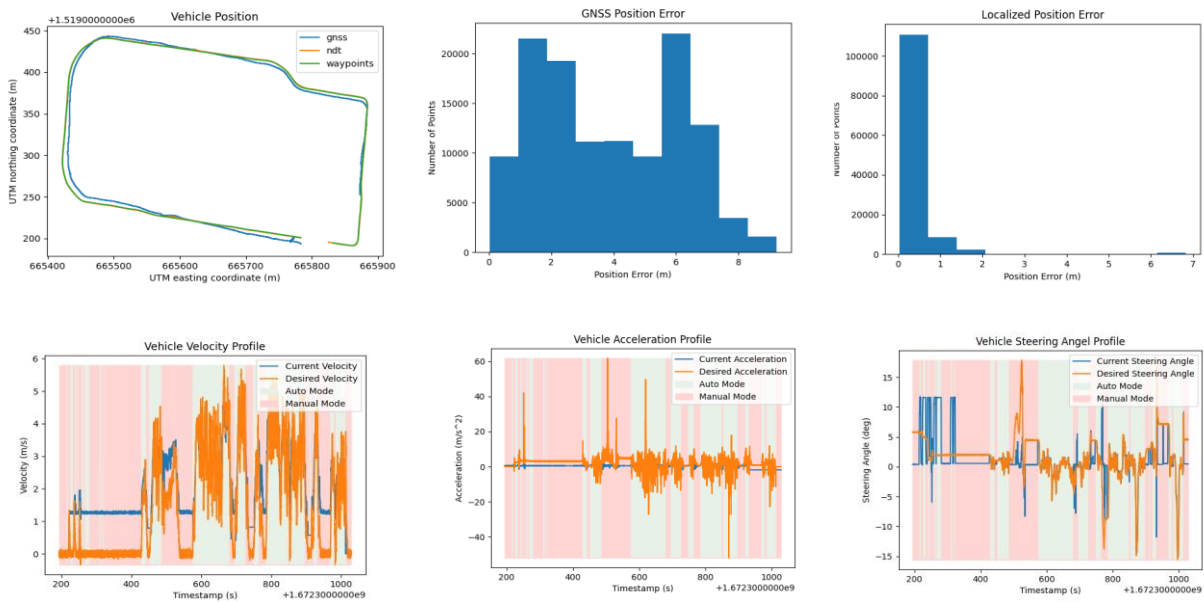


รูปที่ 3-42 ผลการทดสอบการแสดงผลของ Video Wall

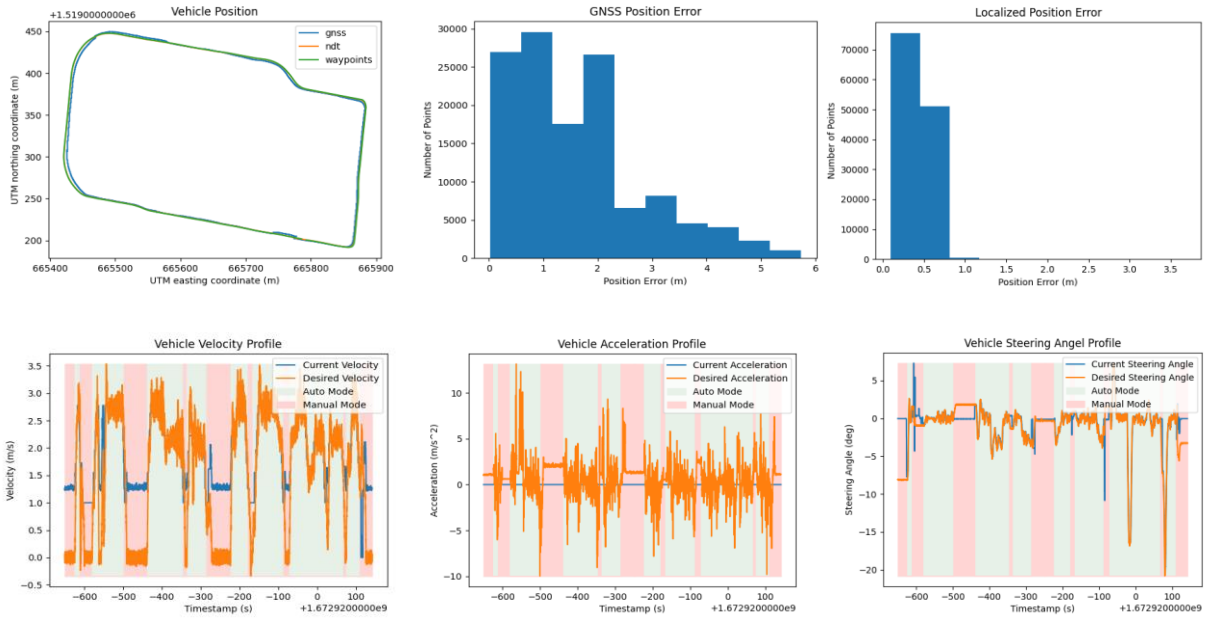
3.3 ผลการทดสอบการขับขี่

1. ทดสอบระบบควบคุมการขับขี่โดยมีผู้ขับขี่คอยดูแลควบคุมรถอยู่ตลอดเวลา

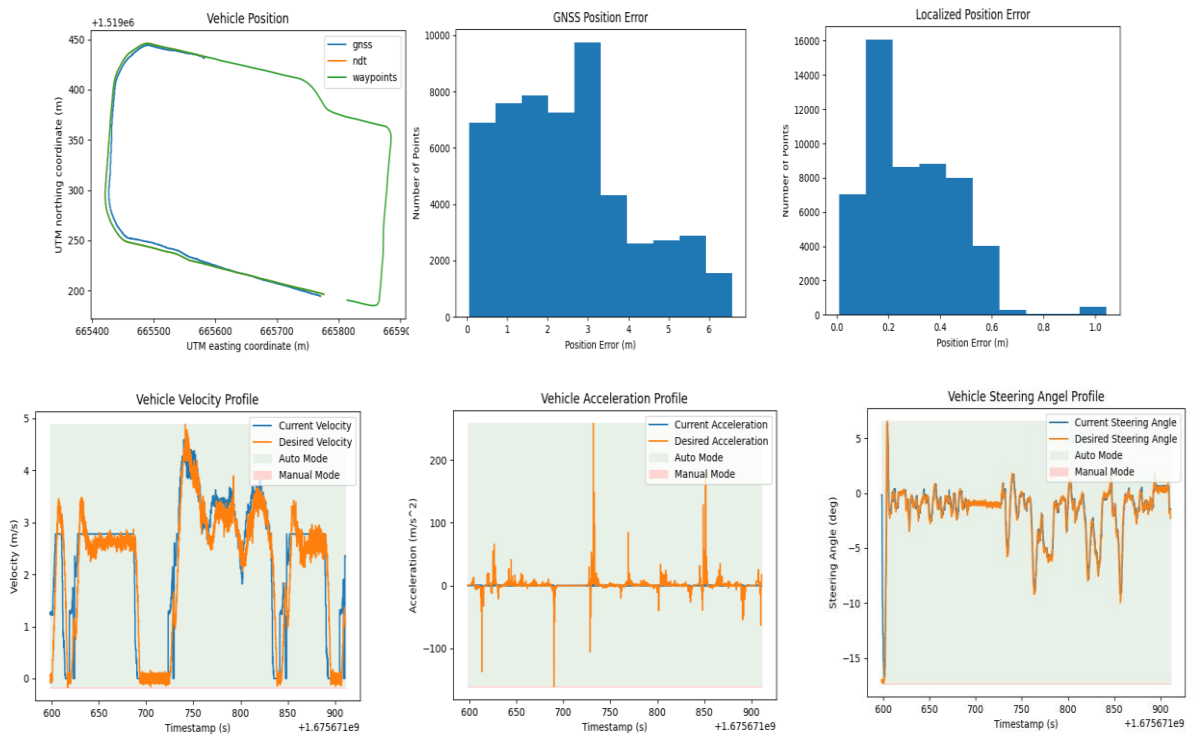
การทดลองการใช้งานจริงของรถต้นแบบได้ดำเนินการ ทั้งในบริเวณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำนักงาน กสทช. ขอยสายลม โดยได้ดำเนินการในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน โดยคำนึงถึงความปลอดภัยในการทดสอบ และจะมีผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) และผู้ช่วย (Safe driver assistance) ดำเนินการทดลองตลอดเวลา และมีการเก็บข้อมูลของรถ เช่น ตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง และโหมดการขับขี่ (แบบอัตโนมัติ หรือแบบManual) ไว้ด้วย ภาพการทดลองในทั้งสองบริเวณ แสดงในรูปที่ 1-36 ถึงรูปที่ 1-41 ในบทที่ 1 ของรายงานฉบับนี้ และในช่วงที่มีการทดสอบร่วมกับ ระบบ Operation dashboard (VDO Wall) ได้ดำเนินการเก็บข้อมูล ความเร็วและความหน่วง (Latency) ของการดาวน์โหลดข้อมูลที่ Operation dashboard ไว้ด้วย ดังแสดงในหัวข้อ 3.2 ผลของการทดลองแสดงในรูปที่ 3-43 ถึงรูปที่ 3-48 ในรูปแบบของข้อมูลตำแหน่งที่ได้จาก GNSS และจากการระบุตำแหน่งเทียบกับตำแหน่งในแผนที่ (NDT) และข้อมูลความเร็ว ความเร่ง และมุมเลี้ยวของรถขณะทดลอง จำแนกตามคัน (T1 T2-W และ T2-B) และสถานที่ทดลอง (จุฬาฯ และ กสทช)



รูปที่ 3-43 ผลการทดลองวิ่ง รถ T1 ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

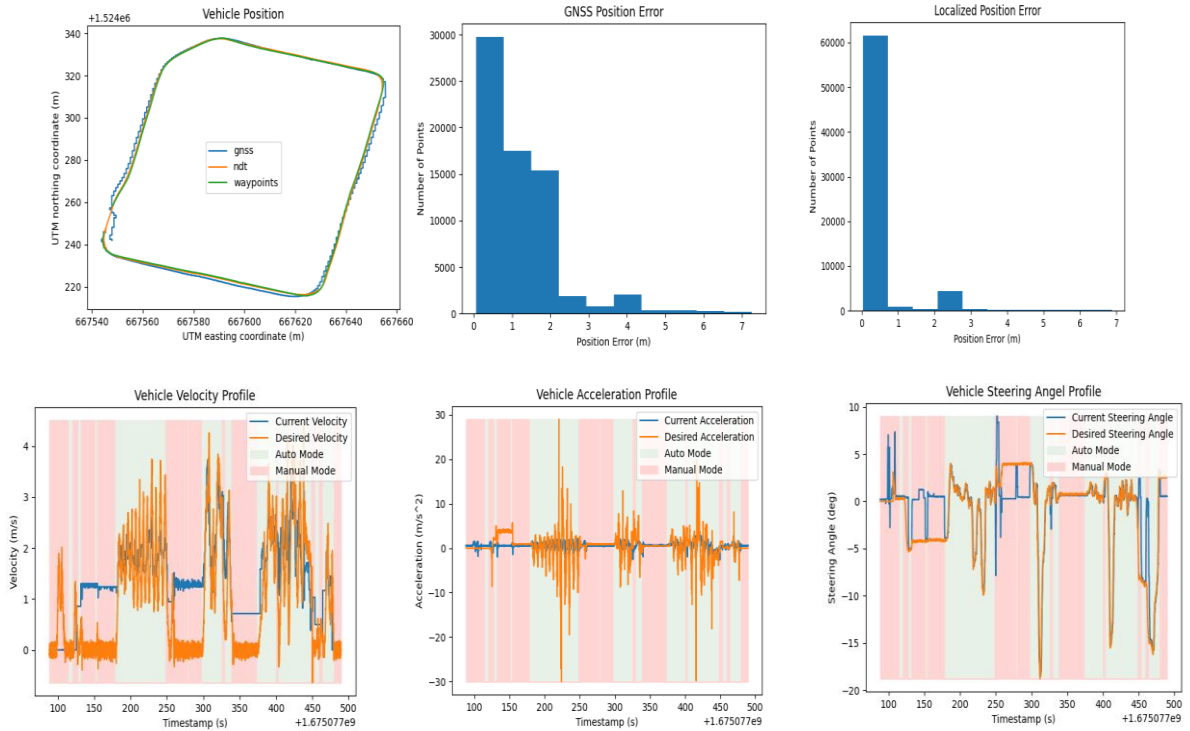


รูปที่ 3-44 แสดงผลการทดลองวิ่ง รถ T2-W ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

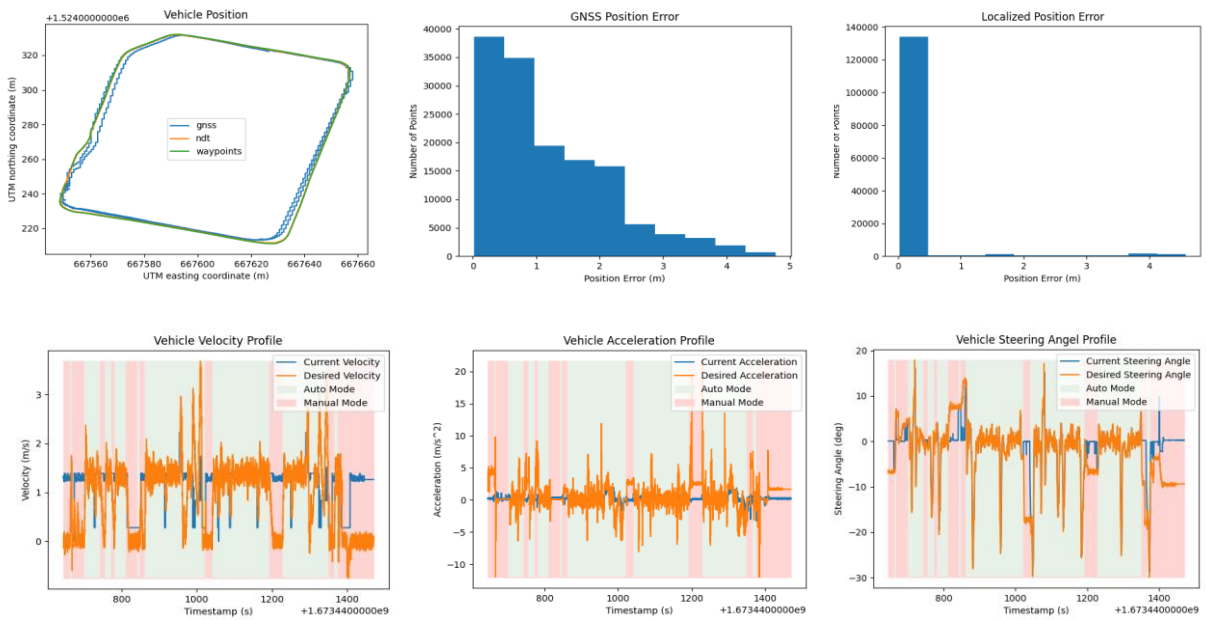


รูปที่ 3-45 แสดงผลการทดลองวิ่ง รถ T2-B ในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



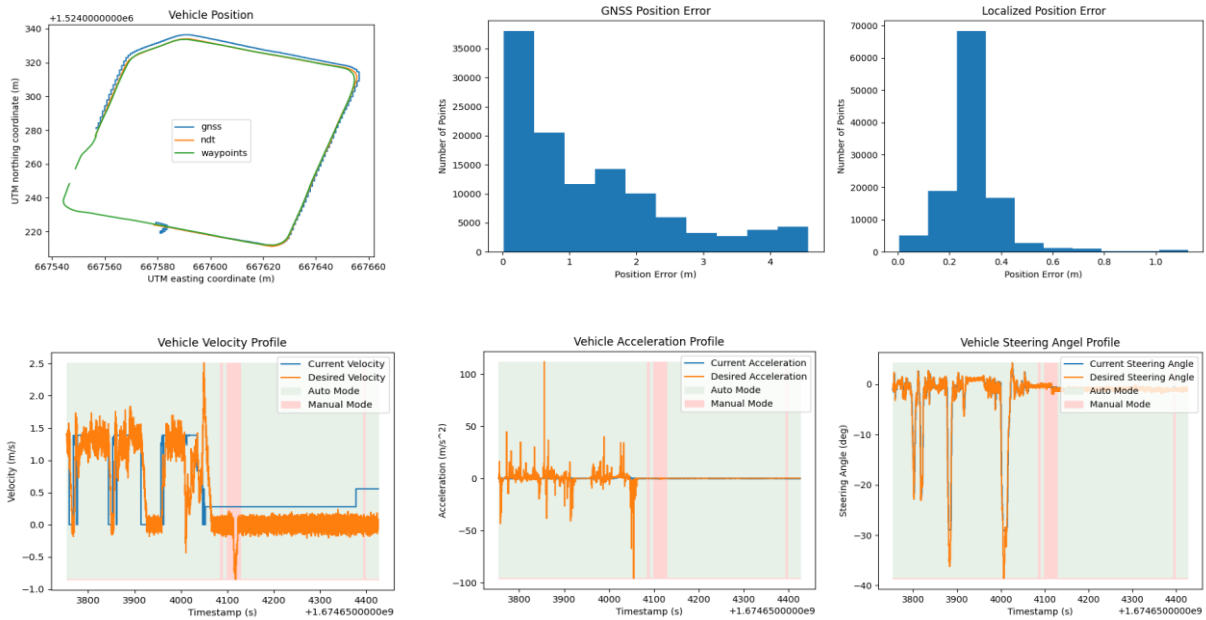


รูปที่ 3-46 แสดงผลการทดลองวิ่ง รถ T1 ในพื้นที่สำนักงาน กสทช



รูปที่ 3-47 แสดงผลการทดลองวิ่ง รถ T2-W ในพื้นที่สำนักงาน กสทช





รูปที่ 3-48 ดงผลการทดลองวิ่ง รถ T2-B ในพื้นที่สำนักงาน กสทช

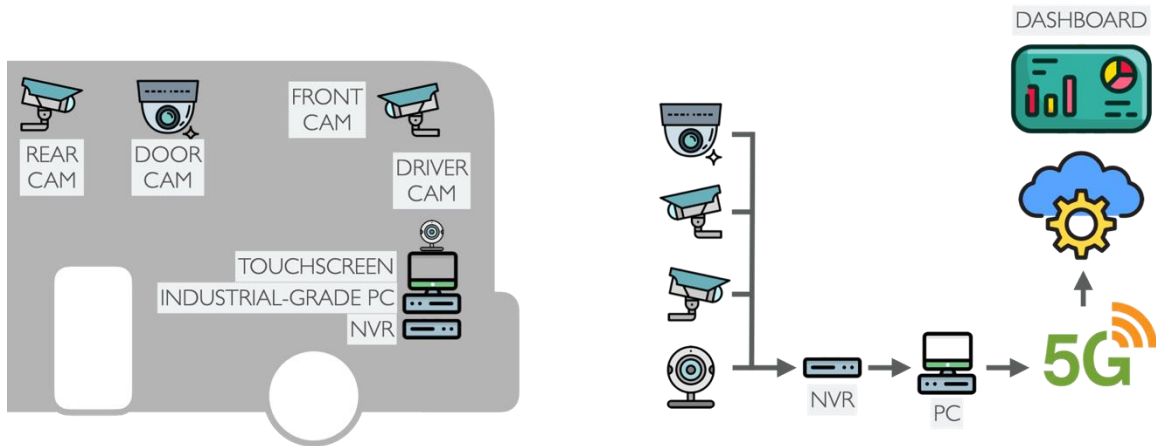
จากผลการทดลองพบว่า สามารถระบุได้ว่าในช่วงเวลาใดรถกำลังขับขี่อยู่ในโหมดขับขี่ด้วยคน (Manual mode) หรือขับขี่อัตโนมัติ (Autonomous mode) ในด้านความแม่นยำของข้อมูลตำแหน่งที่ได้จาก GNSS และจากการระบุตำแหน่ง เทียบกับตำแหน่งในแผนที่ (NDT) เมื่อเปรียบเทียบกันเส้นทางการเดินทาง (Waypoints) ที่ใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการให้บริการ พบว่า ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของข้อมูลตำแหน่งที่ได้จาก GNSS จะมากกว่าจากการระบุตำแหน่ง ทั้งในการทดลองที่จุกฬา และกสทช พิจารณาได้จากตำแหน่งจากการระบุตำแหน่ง (เส้นสีส้ม) มีตำแหน่งแทบจะตรงกับตำแหน่งของ Waypoints (เส้นสีเขียว) ดังแสดงในรูปที่ 3-43 ถึง 3-48 ทั้งนี้เนื่องมาจากในการทดลองนี้ยังไม่ได้นำอัลกอริทึม RTK (Realtime Kinematics) มาใช้ทำให้ความคลาดเคลื่อนที่ขึ้นมาสูง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่จุกฬาและกสทชฯ พบว่า ความคลาดเคลื่อนจากการระบุตำแหน่ง ไม่แตกต่างกัน แต่ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งจาก GNSS ที่ กสทช มีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากมีอาคารอยู่ใกล้เส้นทางวิ่งมากกว่าที่จุกฬา ทำให้เกิดการบดบังสัญญาณ หรือเกิด Multi-path ขึ้น ในด้านข้อมูลความเร็ว ความเร่ง และมุมเลี้ยว พบว่ามีสัญญาณรบกวน และความสามารถของระบบควบคุมความเร็วและมุมเลี้ยวของรถแต่ละคัน มีลักษณะไม่เหมือนกัน พบว่ารถ T2-B มีการตอบสนองต่อการควบคุมดีกว่า อีกสองคัน คือ T2-W และ T1 และน่าสนใจว่าแม้จะเป็นรถรุ่นเดียวกัน แต่การตอบสนองต่อการควบคุมความเร็วและความเร่งของ T2-B ดีกว่า T2-W เนื่องจากรถทั้งสองคันเป็นรถต้นแบบ มีการตั้งค่าพารามิเตอร์ในระบบควบคุมมาไม่เหมือนกัน และรถ T1 พบว่ามีการตอบสนองต่อการควบคุมความเร็วที่ไม่ค่อยเสถียรมากนักในระยะยาวหากต้องการวิ่งที่ความเร็วสูงขึ้น การตอบสนองของระบบควบคุมระดับล่างนี้จะต้องไวและแม่นยำมากขึ้น จึงควรมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในระบบควบคุมใหม่ แต่ในย่านความเร็วและรูปแบบการวิ่งทดลองในปัจจุบัน ยังสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย



3.4 Use Cases

3.4.1 สถาปัตยกรรมของระบบ

การทดสอบ Use Cases ของการนำเทคโนโลยี 5G มาใช้ในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ ในโครงการนี้ได้พิจารณาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการใช้งานระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติทั้งต่อผู้ขับขี่ ผู้โดยสาร และผู้อื่น โดยมีการเสนอสถาปัตยกรรม Vehicular-Edge-Cloud Computing ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3-49 โดยระบบประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ติดตั้งอยู่บนรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ ดังแสดงทางด้านซ้าย และภาพรวมการสื่อสารของระบบดังแสดงทางด้านขวา



รูปที่ 3-49 สถาปัตยกรรมของระบบ Vehicular-Edge-Cloud Computing

โดยมีรายละเอียดของส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. ส่วนที่ติดตั้งอยู่บนรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ อุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งอยู่บนรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ ประกอบด้วยอุปกรณ์ ดังนี้
 - 1.1. Industrial-Grade PC 1 เครื่อง ทำหน้าที่ในการประมวลผลข้อมูล รับสัญญาณภาพของกล้องแต่ละตัวและติดต่อกับเครื่องแม่ข่ายสาธารณะ
 - 1.2. Touchscreen Display 1 เครื่อง ทำหน้าที่ในการแสดงผลภาพและข้อมูล
 - 1.3. กล้อง 4 ตัว โดยกล้องตัวที่ 1 ทำหน้าที่จับภาพผู้ขับขี่ (รุ่น ASUS ROG EYE S - Streaming Camera) กล้องตัวที่ 2 และ 3 จับภาพจากด้านหน้าและหลังของรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ (รุ่น Dahua IPC-HFW5541EP-ZE) และกล้องตัวที่ 4 จับภาพที่ประตูรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ (รุ่น Dahua IPC-HDBW5541EP-ZE)
 - 1.4. Router ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อกับเครือข่าย 5G

- 1.5. อุปกรณ์บันทึกวิดีโอผ่านเครือข่าย (NVR: Network Video Recorder) ทำหน้าที่ในการบันทึกภาพจากกล้องทุกตัวในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติมาบันทึกเก็บไว้ก่อนส่งออกไปยังเครื่องแม่ข่ายเพื่อลดภาระงานของ Industrial-grade PC
2. ส่วนที่ติดตั้งบนเครื่องแม่ข่ายสาธารณะ

โมดูลที่ถูกประมวลผลในเครื่องแม่ข่ายสาธารณะ 1 เครื่องประกอบไปด้วย (1) โมดูลนับจำนวนผู้โดยสาร (Passenger Counting Module) (2) โมดูลสตรีมมิ่งวิดีโอหลายแหล่งแบบเรียลไทม์ (Real-time Multi-video Streaming Module) และเว็บแอปพลิเคชันการจัดการและแดชบอร์ดสำหรับสังเกตการณ์ (Management Web Application and Monitoring Dashboard) โดยเครื่องแม่ข่ายสาธารณะรับสัญญาณภาพจากกล้องและข้อมูลต่าง ๆ ภายในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติแต่ละคันผ่านทางเครือข่ายสัญญาณ 5G มาประมวลผลเพื่อให้บริการผู้ใช้งาน ดังนั้นการสตรีมมิ่งวิดีโอหลายแหล่งแบบเรียลไทม์ (Real-time Multi-Video Streaming) แดชบอร์ดสังเกตการณ์ (Monitoring Dashboard) และบริการแจ้งเตือนอุบัติเหตุและอาการง่วงนอน (Accident and Drowsiness Notification Service)

3.4.2 รายละเอียดของโมดูลภายในระบบ

1. โมดูลตรวจจับอาการง่วงนอน (Drowsiness Detection Module)

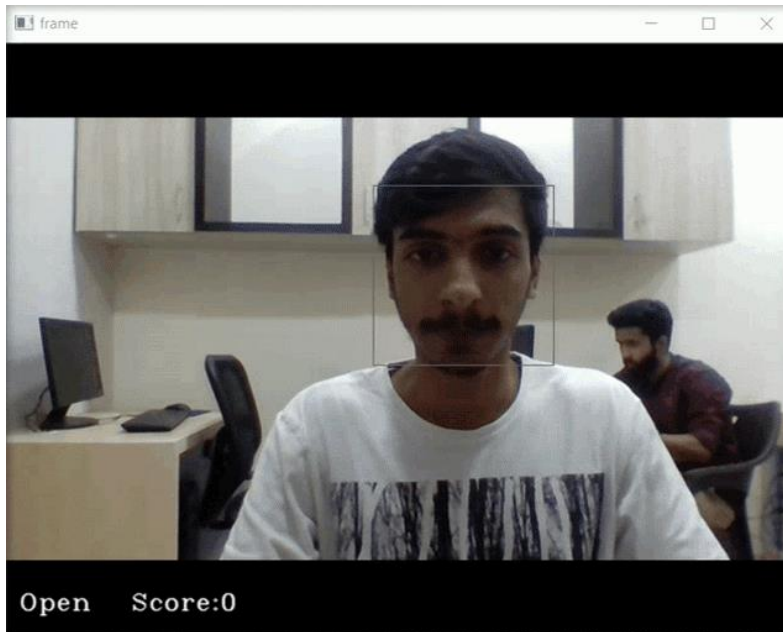
โมดูลตรวจจับอาการง่วงนอนถูกพัฒนาขึ้นด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) โดยการรับสัญญาณภาพจากกล้องตัวที่ 1 ที่จับภาพผู้ขับขี่ที่เชื่อมต่อกับ Industrial-Grade PC จากนั้นทำการประมวลผลเพื่อตรวจสอบอาการง่วงนอนของผู้ขับขี่ภายในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งการประมวลผลแบบนี้เป็นการทำงานการประมวลที่ขอบ (Edge Computing) ซึ่งช่วยย่นระยะเวลาในการส่งข้อมูล ก่อนส่งสัญญาณแจ้งเตือนกลับไปยังเครื่องแม่ข่ายสาธารณะ เพื่อบันทึกข้อมูลต่อไป

การพัฒนากระบวนการส่วนนี้ในเบื้องต้นมีเป้าหมายที่ความแม่นยำ (Accuracy) เพื่อเลือกอัลกอริทึมที่เหมาะสมที่สุดกับการนำมาใช้งานในระบบจริง โดยพิจารณา 2 อัลกอริทึม ดังนี้

1.1 อัลกอริทึม 1: อัลกอริทึมของเครื่อง (Machine Learning)

ใช้ OpenCV ในการตรวจจับตำแหน่งใบหน้า (Facial Landmark) และตำแหน่งของดวงตา (Eye Regions) จากภาพนำเข้า จากนั้นใช้โมเดลที่ได้จากการฝึกฝนการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อทำนายว่าตาแต่ละข้างปิดหรือเปิดอยู่ แล้วจึงทำการแจ้งเตือนว่าบุคคลในภาพมีอาการง่วงนอนหรือไม่ โดยพิจารณาจากเงื่อนไขจำนวนเฟรมที่ตรวจจับได้ว่าการปิดตาติดต่อกันสูงสุดนานเท่าไรตรงตามค่าที่กำหนดไว้ว่าเป็นอาการง่วงนอน (DataFlair, 2021) ดังตัวอย่างในรูปที่ 3-50

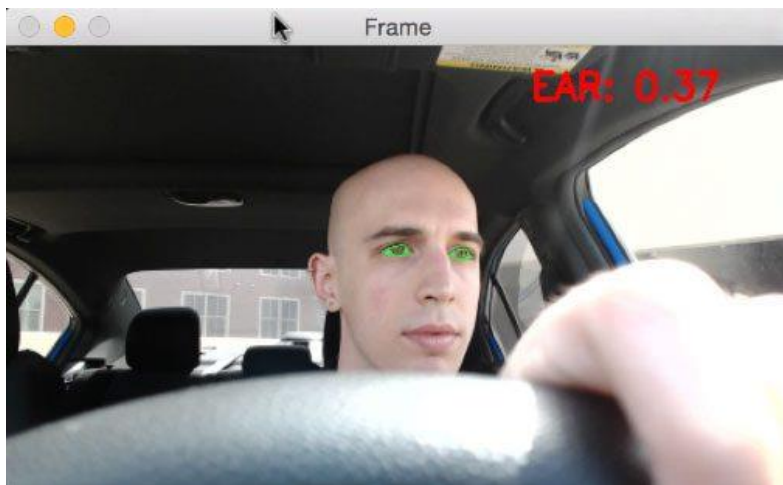




รูปที่ 3-50 ตัวอย่างผลลัพธ์จากอัลกอริทึม 1: อัลกอริทึมของเครื่อง (Machine Learning)

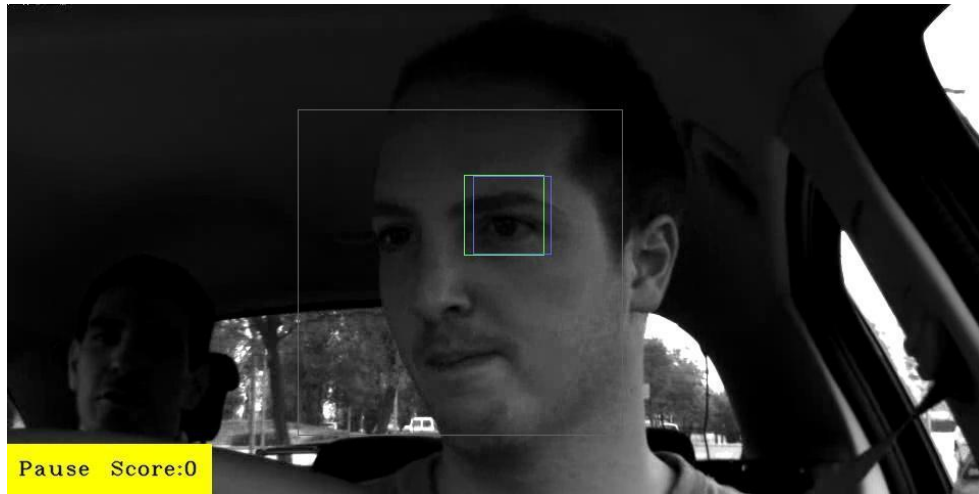
1.2 อัลกอริทึม 2: อัลกอริทึมบนพื้นฐานที่กำหนด (Rule-Based Algorithm)

ใช้ OpenCV ในการตรวจจับตำแหน่งใบหน้าและแบ่งแยกพื้นที่ของดวงตาจากใบหน้า แล้วนำไปคำนวณหาอัตราส่วนของดวงตา (EAR: Eye Aspect Ratio) เพื่อระบุว่าหลับตาหรือไม่ เมื่อตรวจจับได้ว่าการหลับตาดูติดต่อกันเกินระยะเวลาหนึ่งที่กำหนดไว้ก็จะแจ้งเตือนว่ามีอาการง่วงนอน (Rosebrock, 2017) ดังตัวอย่างในรูปที่ 3-51



รูปที่ 3-51 ตัวอย่างผลลัพธ์จากอัลกอริทึม 2: อัลกอริทึมบนพื้นฐานที่กำหนด (Rule-Based Algorithm)

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า อัลกอริทึม 1 และ 2 นั้นไม่สามารถตรวจจับใบหน้าในสภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อยได้ อีกทั้งมีข้อบกพร่องในการตรวจจับตำแหน่งของดวงตาแต่ละข้างบนใบหน้า ดังแสดงในรูปที่ 3-52

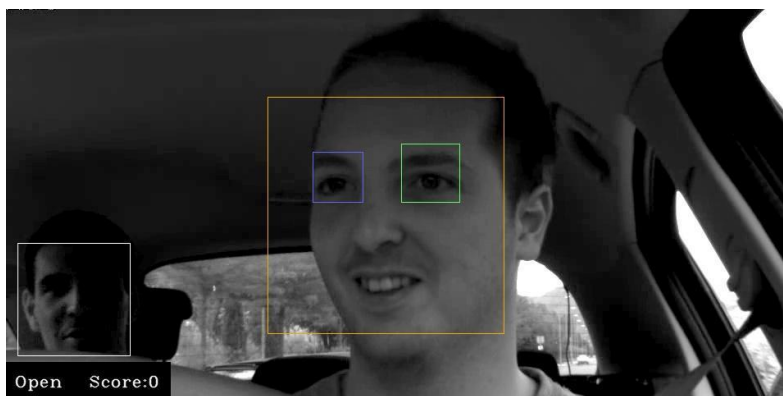


รูปที่ 3-52 ตัวอย่างผลลัพธ์จากอัลกอริทึม 1 ที่ตรวจจับตำแหน่งของตาแต่ละข้างบนใบหน้าผิดพลาด และไม่สามารถตรวจจับตำแหน่งใบหน้าได้

อย่างไรก็ตามเพื่อให้ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการตรวจจับใบหน้าในสภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อย และการตรวจจับตำแหน่งของดวงตาดีขึ้น จึงทำการปรับปรุงอัลกอริทึมใหม่ให้มีความเหมาะสมและแก้ไขข้อจำกัดข้างต้น โดยนำเสนอเป็นอัลกอริทึม 3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.3 อัลกอริทึม 3: อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องฉบับปรับปรุง (E-ML: Enhanced Machine Learning Algorithm)

อัลกอริทึมนี้ใช้การแก้ไขข้อผิดพลาดแกมมา (Gamma Error Correction) ในการปรับสภาพแวดล้อมในด้านแสงของภาพให้เหมาะสม เพื่อแก้ปัญหาตรวจจับใบหน้าในสภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อย จากนั้นใช้ OpenCV ในการตรวจจับตำแหน่งใบหน้าและเลือกประมวลผลใบหน้าที่มีขนาดพื้นที่ใหญ่ที่สุด เพื่อตรวจจับใบหน้าของคนที่อยู่ใกล้กล้องมากที่สุด ซึ่งก็คือใบหน้าของผู้ขับขี่เพียงใบหน้าเดียวเท่านั้น เมื่อได้ใบหน้ามาแล้ว จะมีการกำหนดพื้นที่ที่สนใจ (Region of Interest) ของใบหน้า มาคำนวณหาอัตราส่วนของดวงตา (Eye Aspect Ratio: EAR) เพื่อระบุว่าผู้ขับขี่หลับตาหรือไม่ เมื่อหลับตาดูติดต่อกันเกินช่วงระยะเวลาหนึ่งอย่างต่อเนื่องถึงค่าที่กำหนดไว้ก็จะมีการแจ้งเตือนว่ามีอาการง่วงนอนเกิดขึ้น



รูปที่ 3-53 ตัวอย่างผลลัพธ์จากอัลกอริทึม 3 อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องฉบับปรับปรุง (E-ML: Enhanced Machine Learning Algorithm)

ผู้วิจัยได้วัดประสิทธิภาพความแม่นยำในการตรวจจับอาการง่วงนอนจากรูปภาพของแต่ละอัลกอริทึม โดยบันทึกวิดีโอในอิริยาบถต่าง ๆ ที่แสดงถึงอาการง่วงนอนและไม่ง่วงนอน ในสภาพแวดล้อมที่มีแสงปกติ และสภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อยกับผู้เข้าร่วมทดสอบ 2 คน โดยรายการมีดังต่อไปนี้

- a) ไม่มีอาการง่วงนอน จำนวน 8 วิดีโอ
- b) มีอาการง่วงนอน จำนวน 33 วิดีโอ
 - ง่วงนอนแบบหลับตา 1, 2 และ 3 วินาที
 - ง่วงนอนแบบหรีดตา 1, 2 และ 3 วินาที
 - ง่วงนอนแบบสัปหงก 1, 2 และ 3 ครั้ง

หลังจากนั้นทำการทดสอบแต่ละวิดีโอด้วยอัลกอริทึมทั้งสามและบันทึกผลลงในตารางบันทึกผลการทดลอง โดยผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมจะมีค่าเป็นบวก (Positive) ก็ต่อเมื่ออัลกอริทึมนั้นตรวจจับได้ว่ามีอาการง่วงนอน และมีค่าเป็นลบ (Negative) ก็ต่อเมื่ออัลกอริทึมนั้นตรวจจับไม่ได้ว่ามีอาการง่วงนอน ผู้วิจัยได้ทำการสรุปผลการทดลองจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ (Predicted Outcome) กับค่าผลลัพธ์ที่คาดหวัง (Expected Outcome)

จากผลลัพธ์การตรวจจับอาการง่วงนอนของอัลกอริทึม 1: อัลกอริทึมของเครื่อง (Machine Learning) ได้ผลลัพธ์การตรวจจับอาการง่วงนอนตรงตามค่าที่คาดหวังซึ่งเป็นค่าบวก (True Positive) จำนวน 21 ผลลัพธ์ และค่าเป็นลบ (True Negative) จำนวน 10 ผลลัพธ์ และได้ผลลัพธ์การตรวจจับอาการง่วงนอนไม่ตรงตามค่าที่คาดหวัง โดยมีค่าที่คาดหวังเป็นบวก แต่ผลลัพธ์เป็นลบ (False Negative) จำนวน 5 ผลลัพธ์ และมีค่าที่คาดหวังเป็นลบแต่ผลลัพธ์เป็นบวก (False Positive) จำนวน 5 ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ผลการทดสอบการตรวจจับอาการง่วงนอนของอัลกอริทึม 1: อัลกอริทึมของเครื่อง (Machine Learning)

	Predicted Positive	Predicted Negative
--	--------------------	--------------------

Actual Positive	21	5
Actual Negative	5	10

จากผลลัพธ์การตรวจจับอาการร่งงนอนของอัลกอริทึม 2: อัลกอริทึมบนพื้นฐานที่กำหนด (Rule-Based Algorithm) ได้ผลลัพธ์การตรวจจับอาการร่งงนอนตรงตามค่าที่คาดไว้ซึ่งมีค่าเป็นบวก (True Positive) จำนวน 23 ผลลัพธ์ และมีค่าเป็นลบ (True Negative) จำนวน 5 ผลลัพธ์ และได้ผลลัพธ์การตรวจจับอาการร่งงนอนไม่ตรงตามค่าที่คาดไว้ โดยมีค่าที่คาดไว้เป็นบวกแต่ผลลัพธ์เป็นลบ (False Negative) จำนวน 3 ผลลัพธ์ และมีค่าที่คาดไว้เป็นลบ แต่ผลลัพธ์เป็นบวก (False Positive) จำนวน 10 ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ผลการทดสอบการตรวจจับอาการร่งงนอนอัลกอริทึม 2: อัลกอริทึมบนพื้นฐานที่กำหนด (Rule-Based Algorithm)

	Predicted Positive	Predicted Negative
Actual Positive	23	3
Actual Negative	10	5

จากผลลัพธ์การตรวจจับอาการร่งงนอนของอัลกอริทึม 3: อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องฉบับปรับปรุง (E-ML: Enhanced Machine Learning Algorithm) ได้ผลลัพธ์การตรวจจับอาการร่งงนอนตรงตามค่าที่คาดไว้ซึ่งมีค่าเป็นบวก (True Positive) จำนวน 23 ผลลัพธ์ และมีค่าเป็นลบ (True Negative) จำนวน 10 ผลลัพธ์ และได้ผลลัพธ์การตรวจจับอาการร่งงนอนไม่ตรงตามค่าที่คาดไว้ โดยมีค่าที่คาดไว้เป็นบวกแต่ผลลัพธ์เป็นลบ (False Negative) จำนวน 3 ผลลัพธ์ และมีค่าที่คาดไว้เป็นลบแต่ผลลัพธ์เป็นบวก (False Positive) จำนวน 5 ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 ผลการทดสอบการตรวจจับอาการร่งงนอนของอัลกอริทึม 3: อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องฉบับปรับปรุง (E-ML: Enhanced Machine Learning Algorithm)

	Predicted Positive	Predicted Negative
Actual Positive	23	3
Actual Negative	5	10

จากการทดสอบสามารถสรุปค่าชี้วัดประสิทธิภาพการทำนายผลลัพธ์ของทั้งสามอัลกอริทึมในทุกสภาพแวดล้อมของแสง โดยใช้มาตรวัด ได้แก่ ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ค่าความไว (Sensitivity) ค่าความจำเพาะ (Specificity) ค่าความแม่นยำ (Precision) อัตราความผิดพลาด (Error Rate) และค่าชี้วัดประสิทธิภาพ F1 score โดยได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 3-7



ตารางที่ 3-7 ผลการทดสอบค่าชี้วัดประสิทธิภาพการตรวจจับอาการร่งงนอนของทั้ง 3 อัลกอริทึม

Metric	Algorithm 1: ML	Algorithm 2: Rule-based	Algorithm 3: E-ML
Accuracy	0.77	0.68	0.80
Sensitivity	0.81	0.88	0.88
Specificity	0.67	0.33	0.67
Precision	0.81	0.70	0.82
Error Rate	0.24	0.32	0.20
F1 Score	0.80	0.78	0.85

จากผลการทดสอบค่าชี้วัดประสิทธิภาพการตรวจจับอาการง่วงนอน สังเกตได้ว่าอัลกอริทึม 3 ให้ค่าเชิงสถิติดีกว่าในทุกด้าน โดยอัลกอริทึม 3 สามารถแก้ไขปัญหาของ อัลกอริทึม 1 และอัลกอริทึม 2 ในการตรวจจับใบหน้าของผู้ขับขี่ได้อย่างถูกต้องทั้งในสภาพแวดล้อมที่มีแสงปกติและสภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อย และสามารถระบุตำแหน่งของดวงตาแต่ละข้างบนใบหน้าได้อย่างถูกต้อง ดังนั้น ผู้วิจัยจะใช้อัลกอริทึม 3 อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องฉบับปรับปรุง (E-ML: Enhanced Machine Learning Algorithm) ในการตรวจจับอาการง่วงนอน

จากการเลือกใช้อัลกอริทึม 3 อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องฉบับปรับปรุง (Enhanced Machine Learning Algorithm: E-ML) ในการตรวจสอบอาการง่วงนอนของผู้ขับขี่ ผู้วิจัยได้ทดสอบติดตั้งบนรถขับขี่อัตโนมัติและทำการทดสอบประสิทธิภาพกับภาพ วิดีโอที่ได้จากการทดลองการเดินรถภายในพื้นที่รอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในสภาพแวดล้อมที่มีแสงปกติและสภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อย โดยจัดให้มีผู้โดยสารคนอื่นภายในรถขับขี่อัตโนมัติ รวมไปถึงให้ผู้ขับขี่สวมใส่แว่นตาและหน้ากากอนามัยในระหว่างที่ทำการขับขี่

ผลการทดสอบพบว่า อัลกอริทึมที่ 3 ยังคงมีปัญหาในการตรวจสอบอาการง่วงนอนของผู้ขับขี่ โดยมีอัตราการตรวจจับใบหน้าของผู้ขับขี่ลดลง และมีการตรวจจับใบหน้าผิดพลาดดังตัวอย่างในรูปที่ 3-54 และรูปที่ 3-55 โดยคาดว่ามีส่วนสาเหตุจากการสวมใส่แว่นตาและหน้ากากอนามัยของผู้ขับขี่



รูปที่ 3-54 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ระบบไม่สามารถตรวจจับตำแหน่งใบหน้าได้



รูปที่ 3-55 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ระบบทำการตรวจจับใบหน้าผิดพลาด

2. โมดูลนับจำนวนผู้โดยสาร (Passenger Counting Module)

โมดูลนับจำนวนผู้โดยสารใช้ความสามารถของกล้องที่ติดตั้งบริเวณประตูในการนับจำนวนผู้โดยสาร หลักการทำงาน คือ ตัวกล้องจะทำการตีกรอบพื้นที่บริเวณประตูทางเข้าออกของรถชั่งอัตโนมัติ และขีดเส้นระบุทิศทางทางเข้าหรือออก เพื่อนับจำนวนผู้โดยสารที่เดินผ่านเส้นในทิศทางที่กำหนดว่าเป็นผู้โดยสารที่กำลังขึ้นหรือลงจากรถชั่งอัตโนมัติโดยใช้งานโปรแกรมประยุกต์สำเร็จรูปที่ติดตั้งมาพร้อมกับกล้องที่พัฒนาโดยบริษัท Dahua เนื่องจากโปรแกรมประยุกต์สำเร็จรูปดังกล่าวให้ผลลัพธ์ในรูปแบบจำนวนคนเข้าและจำนวนคนออก ในบริเวณที่กำหนดเท่านั้น ในการปรับใช้งานจริงจึงต้องใช้ผลต่างระหว่างจำนวนคนเข้าและจำนวนคนออก ที่นับได้จากโปรแกรมประยุกต์สำเร็จรูปมาคำนวณเป็นจำนวนของผู้โดยสารบนรถชั่งอัตโนมัติ หลังจากนั้นข้อมูล สัญญาณภาพและจำนวนผู้โดยสารที่ประมวลผลได้ จะถูกส่งผ่านระบบเครือข่าย 5G ไปยังเครื่องแม่ข่ายสาธารณะ เพื่อแสดงผลให้กับผู้ใช้งานและบันทึกประวัติต่อไป

ผู้วิจัยได้วัดประสิทธิภาพความแม่นยำในการนับจำนวนผู้โดยสารของ Software ที่ติดตั้งมาพร้อมกับกล้องที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท Dahua เพื่อทดสอบความเหมาะสมต่อสภาพแวดล้อมของรถชั่งอัตโนมัตินี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบสถานการณ์จำลองต่าง ๆ ที่มีโอกาสเกิดขึ้นจริง โดยมีจำนวนผู้ช่วยทดสอบเป็นผู้โดยสารในการทดลอง จำนวน 1-6 คน จำลองแต่ละสถานการณ์จำนวน 3 ครั้ง ตัวอย่างภาพการทดลองแสดงในรูปที่ 3-56 ประกอบไปด้วย 9 สถานการณ์ ดังนี้

ขึ้นพร้อมกันด้วยความเร็วปกติ	ลงพร้อมกันด้วยความเร็วปกติ	สวนกันด้วยความเร็วปกติ
ขึ้นพร้อมกันด้วยความเร็วเร็ว	ลงพร้อมกันด้วยความเร็วเร็ว	สวนกันด้วยความเร็วเร็ว

คนยืนเต็มหน้าประตูด้วยด้านนอก	เดินผ่านประตูจากด้านซ้ายไป ด้านขวาของประตู	เดินผ่านประตูจากด้านขวาไป ด้านซ้ายของประตู
-------------------------------	---	---



รูปที่ 3-56 ตัวอย่างภาพการทดลองการนับจำนวนผู้โดยสาร

หลังจากนั้นทำการทดสอบแต่ละสถานการณ์และบันทึกผลการทดลอง โดยผลการทดลองแต่ละสถานการณ์จะถูกนำมาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบน (Root-Mean-Square Error: RMSE) เทียบกับจำนวนผู้โดยสารจริงในสถานการณ์นั้น ๆ ซึ่งหากค่า RMSE เข้าใกล้ค่า 0 แสดงว่ามีความใกล้เคียงกับจำนวนผู้โดยสารจริง

จากผลลัพธ์การทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำในการนับจำนวนผู้โดยสารของโปรแกรมประยุกต์สำเร็จรูปที่ติดตั้งมาพร้อมกับกล้องที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท Dahua ดังแสดงในตารางที่ 3-8 พบว่า ในสถานการณ์ที่คนยืนเต็มหน้าประตูด้านนอก เดินผ่านประตูจากซ้ายไปขวา และเดินผ่านประตูจากขวาไปซ้ายนั้นได้ค่า RMSE ต่ำสุดที่ค่า 0 หมายความว่า สามารถนับได้อย่างถูกต้องทั้งหมด แต่ในสถานการณ์ที่ผู้โดยสารลงรถขี้อัตโนมัติ นั้นมีค่า RMSE สูงสุดที่ค่า 2.38 ในสถานการณ์ลงพร้อมกันด้วยความเร็วเร็ว

ตารางที่ 3-8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำในการนับจำนวนผู้โดยสารของโปรแกรมประยุกต์สำเร็จรูปที่ติดตั้งมาพร้อมกับกล้องที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท Dahua

Scenario ID	Description	RMSE
1	ขึ้นพร้อมกันด้วยความเร็วปกติ	0.91
2	ลงพร้อมกันด้วยความเร็วปกติ	1.56
3	สวนกันด้วยความเร็วปกติ	0.94
4	ขึ้นพร้อมกันด้วยความเร็วเร็ว	0.82
5	ลงพร้อมกันด้วยความเร็วเร็ว	2.38
6	สวนกันด้วยความเร็วเร็ว	0.47
7	คนยืนเต็มหน้าประตูด้วยด้านนอก	0.00
8	เดินผ่านประตูจากด้านซ้ายไปด้านขวาของประตู	0.00

Scenario ID	Description	RMSE
9	เดินผ่านประตูจากด้านขวาไปด้านซ้ายของประตู	0.00
	ค่าเฉลี่ยรวม	1.36

3. โมดูลสตรีมมิงวิดีโอหลายแหล่งแบบเรียลไทม์ (Real-Time Multi-Video Streaming Module)

โมดูลนี้ทำการส่งสัญญาณภาพจากกล้องทั้ง 4 ตัว ภายในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติด้วยโพรโทคอล RTSP ขึ้นไปยังเครื่องแม่ข่ายสาธารณะผ่านเครือข่ายส่วนตัวเสมือน (Virtual Private Network) ซึ่งเป็นท่อส่งสัญญาณระหว่างรถขับเคลื่อนอัตโนมัติและเครื่องแม่ข่ายสาธารณะบนเครือข่าย 5G เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการส่งข้อมูล การส่งสัญญาณภาพในระบบใช้โปรแกรมแปลงวิดีโอจาก USB Webcam เป็น RTSP ก่อน หลังจากนั้นใช้โอเพนซอร์สโมดูลส่งวิดีโออย่างต่อเนื่อง (Video Streaming Module) ที่ชื่อว่า FFmpeg ในการส่งสัญญาณภาพจากกล้องในรถยนต์ทั้ง 4 ตัวไปยังเครื่องแม่ข่ายสาธารณะต่อไป

เครือข่ายส่วนตัวเสมือนเป็นสร้างการเชื่อมต่อเครือข่ายส่วนตัวระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ผ่านอินเทอร์เน็ต โดยอุปกรณ์แต่ละตัวที่เชื่อมต่อกับเครือข่ายส่วนตัวเสมือนเดียวกันจะเปรียบเสมือนอยู่ในเครือข่ายเดียวกัน เครือข่ายส่วนตัวเสมือนนี้จะช่วยเพิ่มความปลอดภัย และความเป็นส่วนตัวในการส่งข้อมูลต่าง ๆ ระหว่างรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ และเครื่องแม่ข่ายสาธารณะได้ สำหรับระบบนี้ได้มีการติดตั้งเครื่องแม่ข่ายเครือข่ายส่วนตัวเสมือนบนเครื่องแม่ข่ายสาธารณะ และลูกค้าเครือข่ายส่วนตัวเสมือนบนรถขับเคลื่อนอัตโนมัติแต่ละคัน เพื่อเป็นช่องทางในการสื่อสารกันระหว่างรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ และเครื่องแม่ข่ายสาธารณะ

กล้องทั้ง 4 ตัวในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติเชื่อมต่อกับ Industrial-Grade PC โดย IP Camera ได้แก่ กล้องหน้ารถ กล้องหลังรถ และกล้องประตูเชื่อมต่อกับสาย LAN และกล้องตัวที่ 1 ที่จับภาพผู้ขับขี่เชื่อมต่อกับสาย USB สำหรับสัญญาณภาพจาก IP Camera ซึ่งอยู่ในรูปแบบโพรโทคอล RTSP อยู่แล้วทำให้เครื่องแม่ข่ายสาธารณะที่อยู่ในเครือข่าย VPN เดียวกันสามารถนำสัญญาณภาพไปประมวลผลต่อได้เลย ส่วนกล้องตัวที่ 1 ที่จับภาพผู้ขับขี่จะถูกแปลงโพรโทคอลของสัญญาณภาพให้อยู่ในรูปแบบ RTSP ด้วยโปรแกรมประยุกต์ที่ชื่อว่า Happytime RTSP Server เพื่อให้อยู่ในโพรโทคอล RTSP เหมือนกันกับสัญญาณภาพจาก IP Camera หลังจากนั้น Streaming Module จะทำการแปลงสัญญาณภาพในรูปแบบโพรโทคอล RTSP เป็นรูปแบบโพรโทคอล RTMP เพื่อให้ Media Server สามารถประมวลผลได้ จากนั้น Media Server จะทำการแปลงสัญญาณภาพให้อยู่ในรูปแบบโพรโทคอล HLS เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

ในการสาธิตการทดลองนั้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองวิดีโอด้วยความละเอียด บิตเรท และเฟรมเรท 2 แบบ ได้แก่ แบบไม่ลดขนาด (Full-Resolution) และแบบลดขนาด (Minimized Resolution) ดังแสดงในตารางที่ 3-9 เพื่อทดลองหาคุณภาพวิดีโอที่มีความต่อเนื่องและสิ้นเปลืองสำหรับรับชมบนแบบเรียลไทม์ มีการใช้

ทรัพยากรของระบบน้อย และเหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการปรับปรุงการตรวจจับอาการร่งวงนอนและนับจำนวนผู้โดยสารต่อไป

ตารางที่ 3-9 รายละเอียดคุณสมบัติของวิดีโอที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติ	ค่าที่ใช้แบบไม่ลดขนาด (Full-Resolution)	ค่าที่ใช้แบบลดขนาด (Minimized Resolution)
Resolution (pixel)	2592 x 1944 (~2K)	640 x 320 (SD)
Bitrate (bits/second)	25000	3072
Framerate (frames/second)	20-60	20

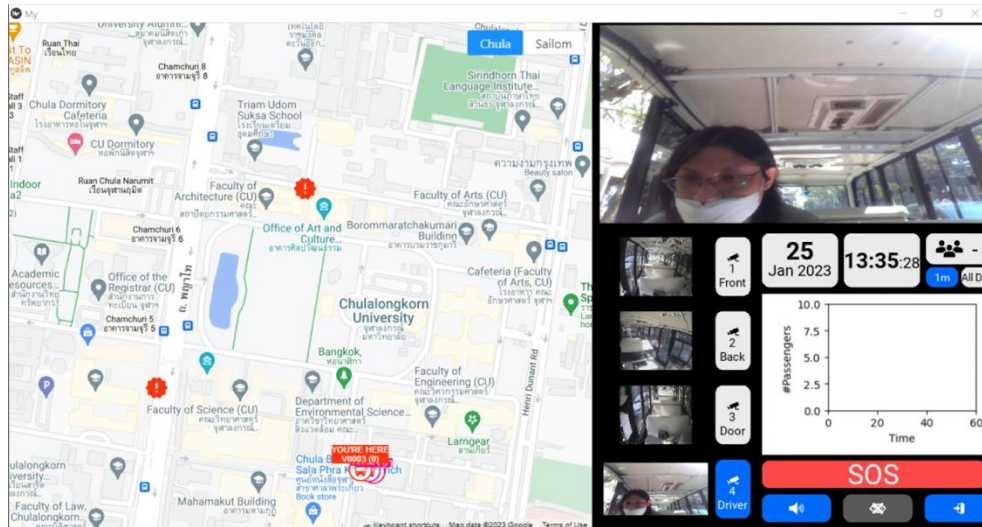
จากการทดสอบ พบว่า วิดีโอแบบไม่ลดขนาดให้สัญญาณภาพที่ละเอียดมากจนทำให้สัญญาณภาพที่ได้ไม่เสถียร มีภาพกระตุกเป็นช่วง ๆ และใช้ทรัพยากรของระบบมาก ส่วนวิดีโอแบบลดรายละเอียดให้สัญญาณภาพออกมาได้ลื่นไหล ไม่หยابจนเกินไป ใช้งานแบนด์วิดท์ไม่สูงมากและสามารถนำมาวิเคราะห์ต่อได้ในส่วนแบนด์วิดท์ที่ใช้ในการส่งสัญญาณภาพของกล้องทั้ง 4 ตัวในรถ 1 คันนั้น วิดีโอแบบไม่ลดขนาดและวิดีโอแบบลดขนาดใช้ปริมาณแบนด์วิดท์อยู่ที่ 24-28 Mbps และ 8-12 Mbps ดังแสดงในรูปที่ 3-57



รูปที่ 3-57 ภาพตัวอย่างวิดีโอ

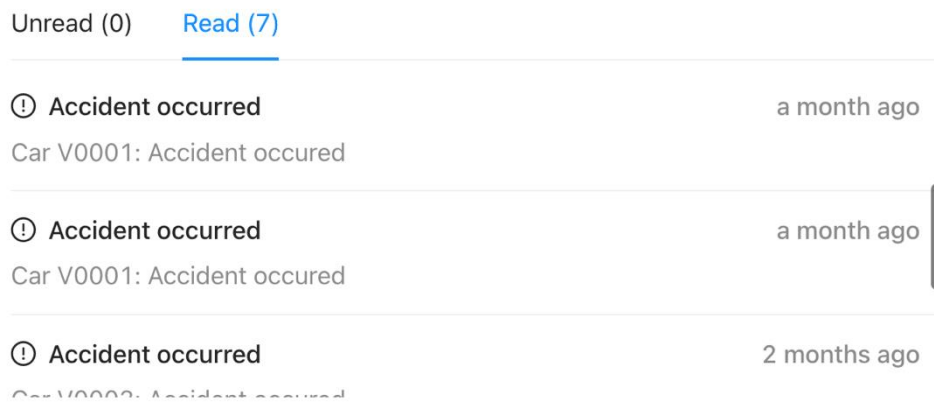
4. โมดูลการแจ้งเตือนการเกิดอุบัติเหตุ (Accident Notification Module)

โมดูลการแจ้งเตือนการเกิดอุบัติเหตุถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มความปลอดภัย และการให้ความช่วยเหลือผู้ขับขี่ในยามคับขัน โดยผู้ขับขี่สามารถแจ้งการเกิดอุบัติเหตุหรือขอความช่วยเหลือไปยังศูนย์กลางผ่านแอปพลิเคชันภายในรถขับขี่อัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 3-58



รูปที่ 3-58 แอปพลิเคชันภายในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ

เมื่อสัญญาณถูกส่งไปถึงศูนย์กลางจะมีการแจ้งเตือนขึ้นที่แดชบอร์ดสำหรับสังเกตการณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3-59 และเก็บบันทึกลงในฐานข้อมูล เพื่อตรวจสอบย้อนหลังได้ผ่านทางเว็บแอปพลิเคชันการจัดการ ดังแสดงในรูปที่ 3-60 นอกจากนี้ยังมีการแจ้งเตือนอุบัติเหตุไปยังรถขับเคลื่อนอัตโนมัติคันอื่นอีกด้วย โดยแสดงตำแหน่งที่มีการแจ้งเตือนบนแผนที่ภายในแอปพลิเคชันในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ



รูปที่ 3-59 การแจ้งเตือนขึ้นที่แดชบอร์ดสำหรับสังเกตการณ์



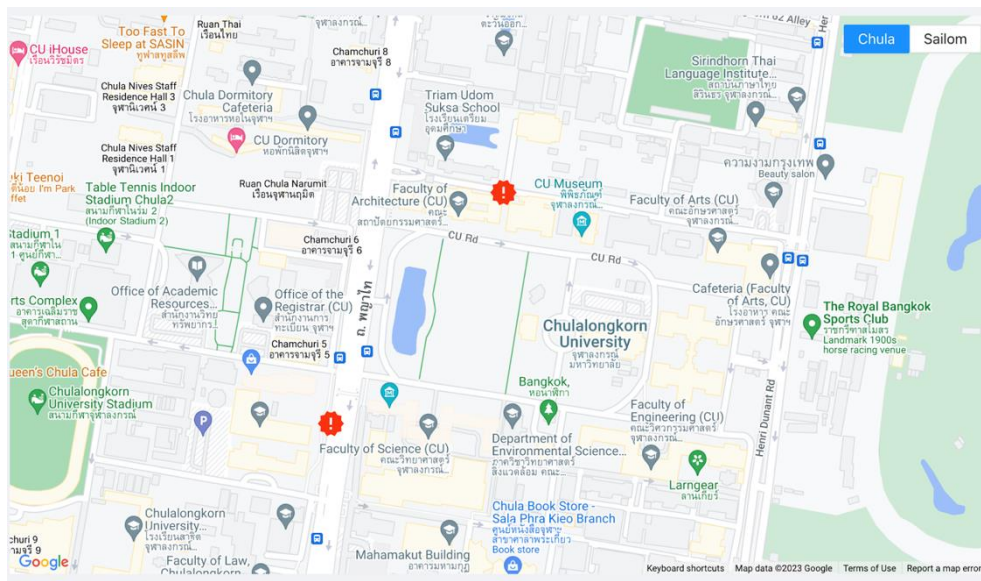
Accidents Log 09/05/2022 14:00:48 → 12/05/2022 15:00:48

Total: 5 item(s) C Reload

ID	Driver	Time Occurred	Latitude	Longitude
0b0db4f9-57bc-4200...	19e366f0-3824-486c...	09/05/2022 17:46:38	100.53364	13.74571
7fedfde7-85cb-4c8e-...	19e366f0-3824-486c...	09/05/2022 17:46:45	100.53074	13.74567
4aa2d1c8-66a8-457c...	19e366f0-3824-486c...	09/05/2022 17:47:01	100.52985	13.73966
f7999432-8b0e-4328...	19e366f0-3824-486c...	09/05/2022 17:47:03	100.53011	13.73963
3a1269cb-5802-4106...	19e366f0-3824-486c...	09/05/2022 17:47:08	100.53283	13.73922

< 1 >

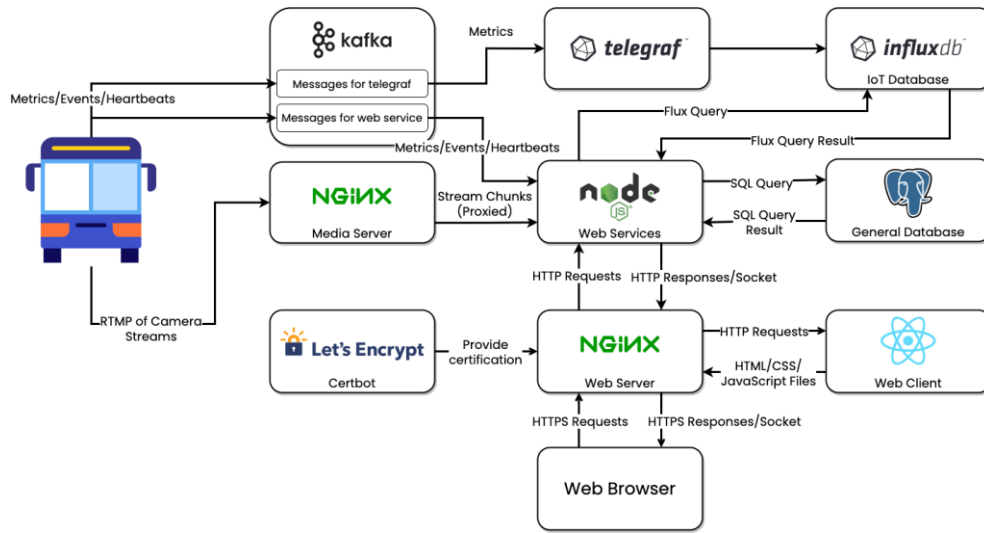
รูปที่ 3-60 รายการอุบัติเหตุย้อนหลัง



รูปที่ 3-61 ตัวอย่างปิกหมุดอุบัติเหตุในรถขับซีอีเอ็มดี



5. เว็บแอปพลิเคชันการจัดการและแดชบอร์ดสำหรับสังเกตการณ์ (Management Web Application and Monitoring Dashboard)



รูปที่ 3-62 สถาปัตยกรรมของระบบบนเครื่องแม่ข่าย

สำหรับสถาปัตยกรรมจะเริ่มต้นจากการที่รถส่งข้อมูลสองส่วน โดยส่วนแรก คือ Metrics/Events/Heartbeats ซึ่งเป็นข้อมูลเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นต่าง ๆ ภายในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ ได้แก่ การอัปเดตจำนวนผู้โดยสาร การอัปเดตตำแหน่งรถ ข้อมูลการวิ่งนอนของผู้ขับขี่ และข้อมูลการเกิดอุบัติเหตุ และส่วนที่สองคือ Video Streams (RTMP) จากกล้อง

สำหรับ Data Flow ในขั้นตอนนี้จะมีการระบุประเภทของ Message ที่ส่งได้ชัดเจนมากขึ้น กล่าวคือ รถขับเคลื่อนอัตโนมัติจะส่ง Message 3 ประเภทได้แก่ (1) Metric เป็นค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง (2) Event เป็น Message ที่ระบุถึงเหตุการณ์ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง และ (3) Heartbeat เป็นข้อมูลที่ภายในประกอบด้วยสถานะของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ สามารถบ่งชี้ได้ว่ารถคันนั้นยังคงทำงานอยู่ ข้อมูลทั้งสามประเภทนี้จะถูกเอาไปใช้โดย Web Service แต่จะมีเพียง Metric ที่ถูกเอาไปใช้โดย Telegraf เพื่อทำหน้าที่เก็บข้อมูลลง InfluxDB ซึ่งเป็น Time-Series Database

สำหรับ Services ต่าง ๆ ภายในจะรวมเป็น Web Service ซึ่งพัฒนาโดยใช้สถาปัตยกรรมแบบ Monolith ที่จะรวมทุก ๆ Logic ไว้ภายใน ทำหน้าที่ให้บริการ RESTful API และ gRPC สำหรับ Requests ต่าง ๆ

สำหรับข้อมูลที่ต้องเก็บภายในระบบมีสองส่วน ส่วนแรกคือ General Data ซึ่งเป็นข้อมูลทั่วไป เช่น ข้อมูลต่าง ๆ ของรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ กล้อง ผู้ขับขี่ และผู้ดูแลระบบ รวมไปถึงข้อมูลเหตุการณ์ต่าง ๆ ซึ่งใช้ InfluxDB เพื่อเก็บข้อมูล และส่วนที่สองคือ IoT Data ซึ่งจะเป็นข้อมูล Metrics ต่าง ๆ ที่วัดได้จากเซนเซอร์ภายในรถขับเคลื่อน

อัตโนมัติ เช่น ตำแหน่งรถขับอัตโนมัติ จำนวนผู้โดยสาร สัดส่วนดวงตาของผู้ขับขี่ เป็นต้น ซึ่งใช้ InfluxDB เพื่อเก็บข้อมูลจำพวก Time-Series Data ต่างหาก และมีการใช้ Telegraf เพื่อนำข้อมูลจาก Kafka ลง InfluxDB

สำหรับผู้ใช้งานทั่วไปจะใช้เว็บเบราว์เซอร์ในการเข้าถึงระบบผ่าน API Gateway (NGINX) ซึ่งจะไปเรียกใช้บริการต่าง ๆ ภายในอีกที สำหรับบริการที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลมาแสดงผลบนเว็บเบราว์เซอร์จะเป็น Web Client ที่ใช้ React เป็น Front-End Library และมีการทำ Web Server ขึ้นมาเพื่อทำเป็น Gateway และมีการใช้ Certbot เพื่อทำใบรับรองให้กับ Web Server ให้สามารถรองรับ HTTPS เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการส่งข้อมูลระหว่างผู้ใช้งานทั่วไป ผู้ดูแลระบบ และเครื่องแม่ข่ายสาธารณะได้

5.1 Web Service

ระบบ Web Service เป็นระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อจัดการข้อมูลต่าง ๆ ที่ถูกส่งขึ้นมาบนเครื่องแม่ข่ายสาธารณะ และส่งข้อมูลที่ขอมมาผ่านทาง API ซึ่งพัฒนาโดยใช้สถาปัตยกรรมแบบ Monolith ภายใน Web Service สามารถแบ่งแยกย่อยออกเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 3-10 หน้าที่ขององค์ประกอบใน Web Service

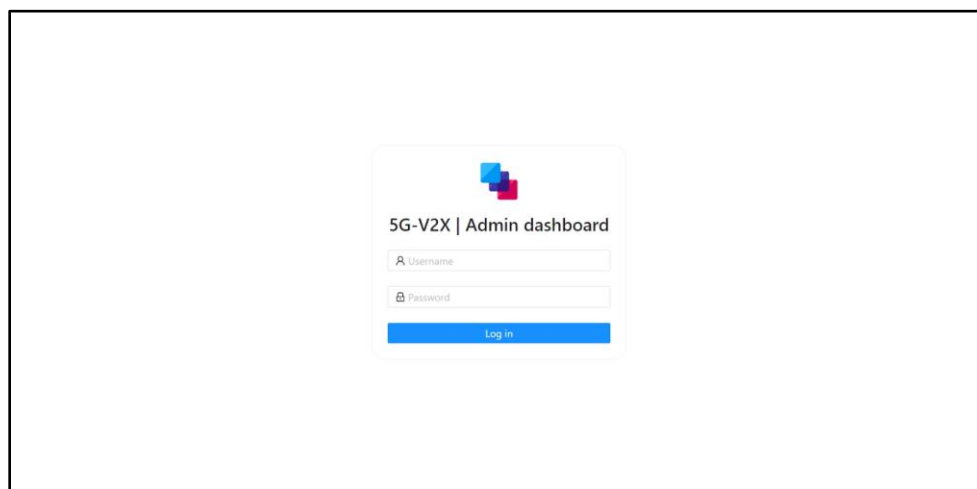
องค์ประกอบ	หน้าที่
HTTP Server	สร้าง HTTP Server ซึ่งจะกำหนด Port สำหรับการจัดการ RESTful API Requests และ Socket.IO Events ต่าง ๆ
ExpressApp	สร้าง Express Instance และกำหนด RESTful API Endpoints ในระดับโดเมน ซึ่ง Instance ของ Express จะถูกนำไปใช้ใน HTTP Server อีกที
Routers	กำหนด RESTful API Endpoints ภายในโดเมน
Service	กำหนดฟังก์ชันต่าง ๆ ภายในโดเมนที่จะถูกเรียกใช้ภายใน Web Service
KafkaConsumer	รับ Message มาจาก Kafka ทำการแปลง Message ให้ตรงกับ Interface และสตรีม Message ที่แปลงเรียบร้อยแล้วส่งเป็น Output ให้กับ SocketIO และ DBSync
SocketIO	คอยรับสตรีมข้อมูลจาก Kafka Consumer DBPolling และ DBSync เพื่อสตรีมข้อมูลไปหา Client โดยลักษณะการติดต่อจะเป็นการที่ Client ส่งข้อมูลการ Request เพื่อควบคุมการสตรีมข้อมูล
DBSync	รับสตรีมข้อมูลจาก Kafka Consumer แล้วไปเรียก Service เพื่ออัปเดตฐานข้อมูล และในกรณีที่มีการสร้างในฐานข้อมูลก็จะสตรีมข้อมูลออกไปที่ SocketIO ด้วย
DBPolling	ภายในจะมีฟังก์ชันที่เรียก Service เพื่อสอบถามข้อมูลจากฐานข้อมูลทุก ๆ ช่วงเวลาหนึ่งและสตรีมข้อมูลออกไปที่ SocketIO

5.2 Web Client



เป็นระบบหน้าบ้านที่เป็นเว็บแอปพลิเคชันการจัดการและแดชบอร์ดสำหรับสังเกตการณ์สำหรับผู้ดูแลระบบถูกพัฒนาด้วย React 17.0.2 และใช้ไลบรารีสำหรับ UI คือ Ant Design 4.18.7 โดยมีหน้าจอและคุณสมบัติดังต่อไปนี้

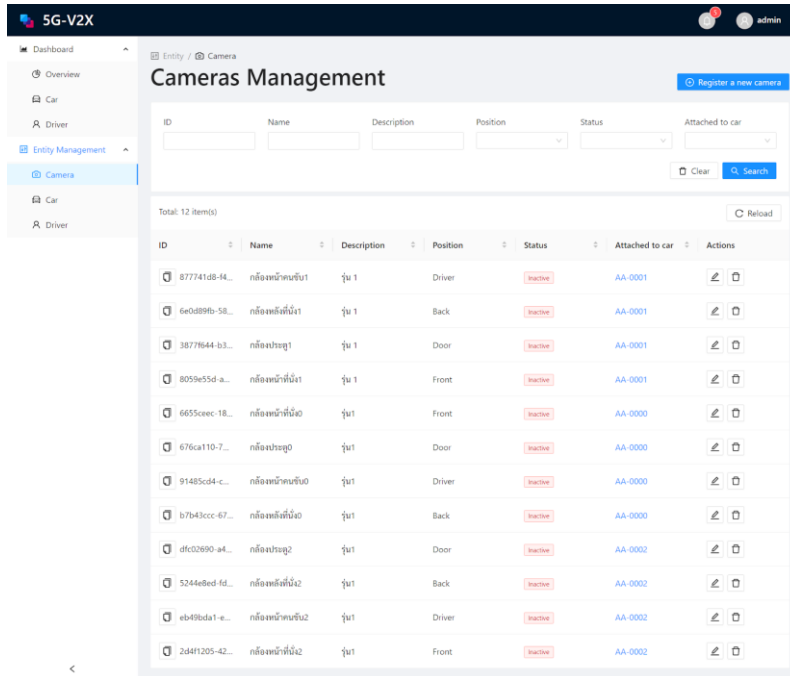
1) หน้าเข้าสู่ระบบสำหรับผู้ดูแลระบบ ที่ให้ผู้ดูแลระบบใส่ชื่อผู้ใช้งาน (Username) และรหัสผ่าน (Password) หากไม่ได้เข้าสู่ระบบจะไม่สามารถเข้าถึงหน้าอื่น ๆ ในเว็บไซต์ได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 3-63



รูปที่ 3-63 ตัวอย่างหน้าเข้าสู่ระบบ

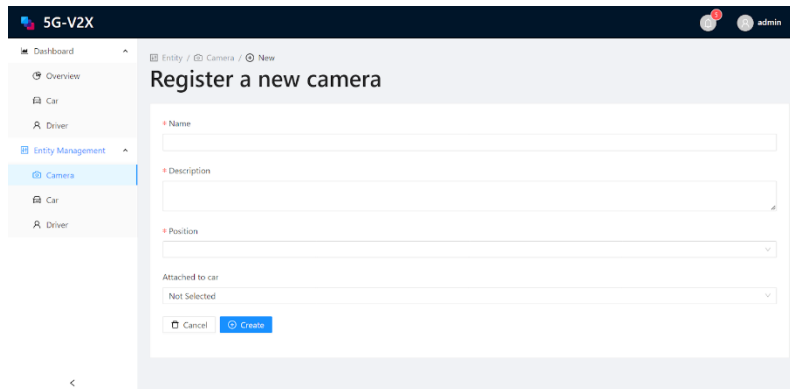
2) หน้าสำหรับการจัดการกล้องภายในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3-64 ประกอบด้วย

- ปุ่ม “Register a new camera” สำหรับไปยังหน้าสร้างกล้อง
- ฟอर्मสำหรับกรอกเพื่อกรองกล้องตามรายละเอียดที่สนใจ กดปุ่ม “Search” เพื่อกรอง และกดปุ่ม “Clear” เพื่อล้างตัวกรอง
- ตารางที่แสดงรายการของกล้องจะมีรายละเอียดดังนี้ ID, Name, Description, Position, Status, Attached to car และ Actions



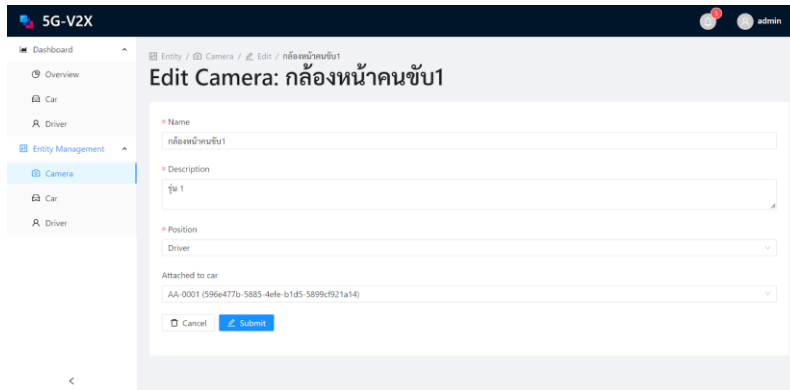
รูปที่ 3-64 ตัวอย่างหน้าแสดงตารางรายการกล้องทั้งหมดในระบบ

- หน้าสร้างกล้อง แสดงฟอร์มเพื่อกรอกข้อมูลของกล้องอันใหม่ ประกอบด้วย Name, Description, Position และ Attached to car



รูปที่ 3-65 ตัวอย่างหน้าสร้างกล้อง

- หน้าแก้ไขข้อมูลกล้อง ประกอบด้วยข้อมูลเหมือนกับหน้าสร้างกล้อง

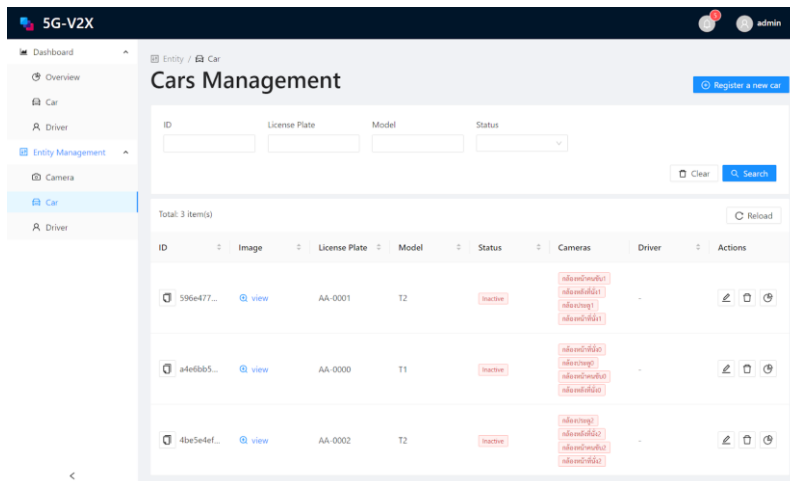


รูปที่ 3-66 ตัวอย่างหน้าแก้ไขข้อมูลกล้อง

3) หน้าสำหรับการจัดการรถขับซีอัตโนมัติภายในระบบ (Car) ประกอบด้วย

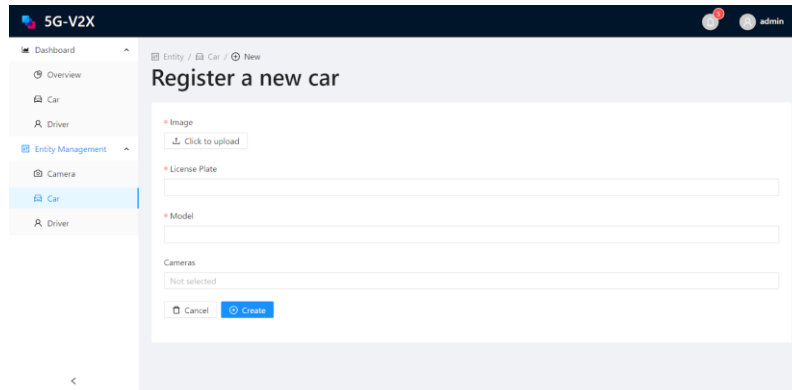
3.1) หน้าแสดงตารางรายการรถขับซีอัตโนมัติทั้งหมดในระบบ (Car Management) ประกอบด้วย

- ปุ่ม “Register a new car” สำหรับไปยังหน้าสร้างรถขับซีอัตโนมัติ
- ฟอर्मสำหรับกรอกเพื่อกองรถขับซีอัตโนมัติตามรายละเอียดที่สนใจ กดปุ่ม “Search” เพื่อกองและกดปุ่ม “Clear” เพื่อล้างตัวกรอง
- ตารางที่แสดงรายการของรถยนต์จะมีรายละเอียดดังนี้ ID, Image, License Plate, Model, Status, Cameras, Driver และ Actions



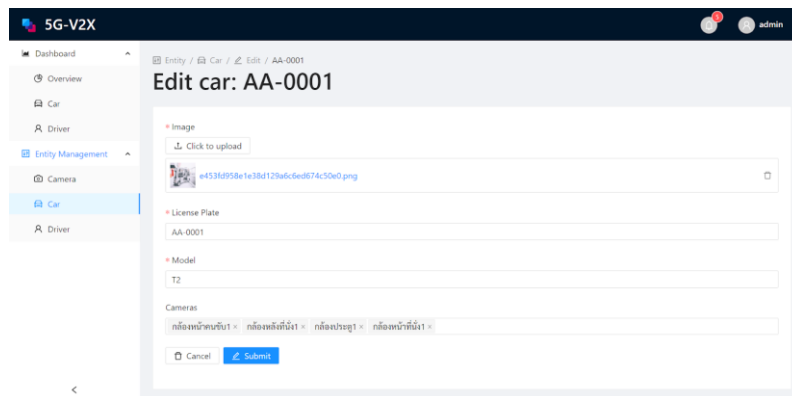
รูปที่ 3-67 ตัวอย่างหน้าแสดงตารางรายการรถขับซีอัตโนมัติทั้งหมดในระบบ

3.2) หน้าสร้างรถขับซีอัตโนมัติ (Register a New car) แสดงฟอर्मเพื่อกองข้อมูลของรถขับซีอัตโนมัติคันใหม่ ประกอบด้วย Image, License Plate, Model และ Cameras



รูปที่ 3-68 ตัวอย่างหน้าสร้างรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ

3.3) หน้าแก้ไขข้อมูลรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Edit Car)



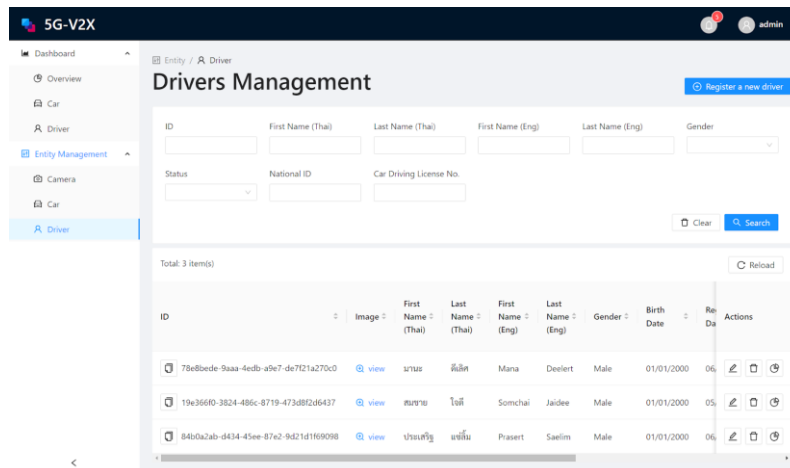
รูปที่ 3-69 ตัวอย่างหน้าแก้ไขรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ

4) หน้าสำหรับการจัดการคนขับภายในระบบ (Driver) ประกอบด้วย

4.1) หน้าแสดงตารางรายการผู้ขับขี่ทั้งหมดในระบบ ประกอบด้วย

- ปุ่ม “Register a new driver” สำหรับไปยังหน้าลงทะเบียนผู้ขับขี่

- สำหรับสำหรับกรอกเพื่อกรองข้อมูลผู้ขับขี่ที่สนใจ กดปุ่ม “Search” เพื่อกรองและกดปุ่ม “Clear” เพื่อล้างตัวกรอง
- ตารางที่แสดงรายการของผู้ขับขี่จะมีรายละเอียดดังนี้ ID, Image, First Name (Thai), Last Name (Thai), First Name (Eng), Last Name (Eng), Gender, Birth Date, Register Date, National ID, Car Driving License No., Username, Status, Now Driving และ Actions



รูปที่ 3-70 ตัวอย่างหน้าแสดงตารางรายการผู้ขับขี่ทั้งหมด

4.2) หน้าลงทะเบียนผู้ขับขี่ แสดงฟอร์มเพื่อกรอกข้อมูลของผู้ขับขี่คนใหม่ ประกอบด้วย Image, First Name (Thai), Last Name (Thai), First Name (Eng), Last Name (Eng), Gender, Birth Date, National ID และ Car Driving License No.

5G-V2X

Entity / R. Driver / New

Register a new driver

Image
↓. Click to upload

First Name (Thai)

Last Name (Thai)

First Name (Eng)

Last Name (Eng)

Gender

Birth Date
DD/MM/YYYY

National ID

Car Driving License No.

Username

Password

Cancel Create

รูปที่ 3-71 ตัวอย่างหน้าสร้างผู้ขับขี่

4.3) หน้าแก้ไขข้อมูลผู้ขับขี่

5G-V2X

admin

Dashboard

Overview

Car

Driver

Entity Management

Camera

Car

Driver

Entity / Driver / Edit / Mana Deelert

Edit Driver: Mana Deelert

* Image

Click to upload

1cc553239edbaa676287fd6cb452c73a.png

* First Name (Thai)

มานะ

* Last Name (Thai)

ดีเลิศ

* First Name (Eng)

Mana

* Last Name (Eng)

Deelert

* Gender

Male

* Birth Date

01/01/2000

* National ID

000000000019

* Car Driving License No.

12345679

* Username

mana

Cancel Submit

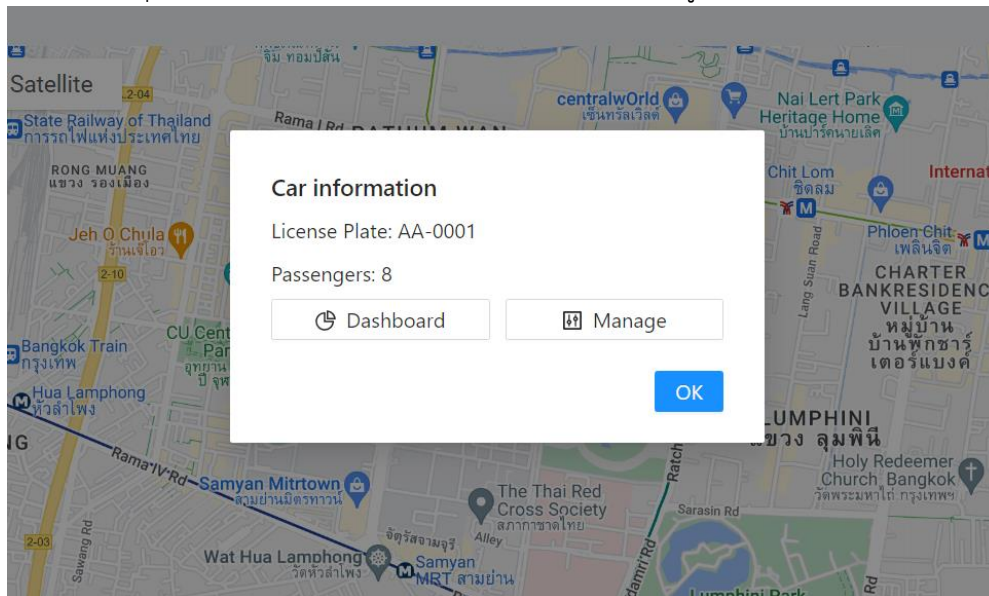
รูปที่ 3-72 ตัวอย่างหน้าแก้ไขข้อมูลผู้ขับขี่

5) หน้าแสดงภาพรวม (Overview) ประกอบด้วย

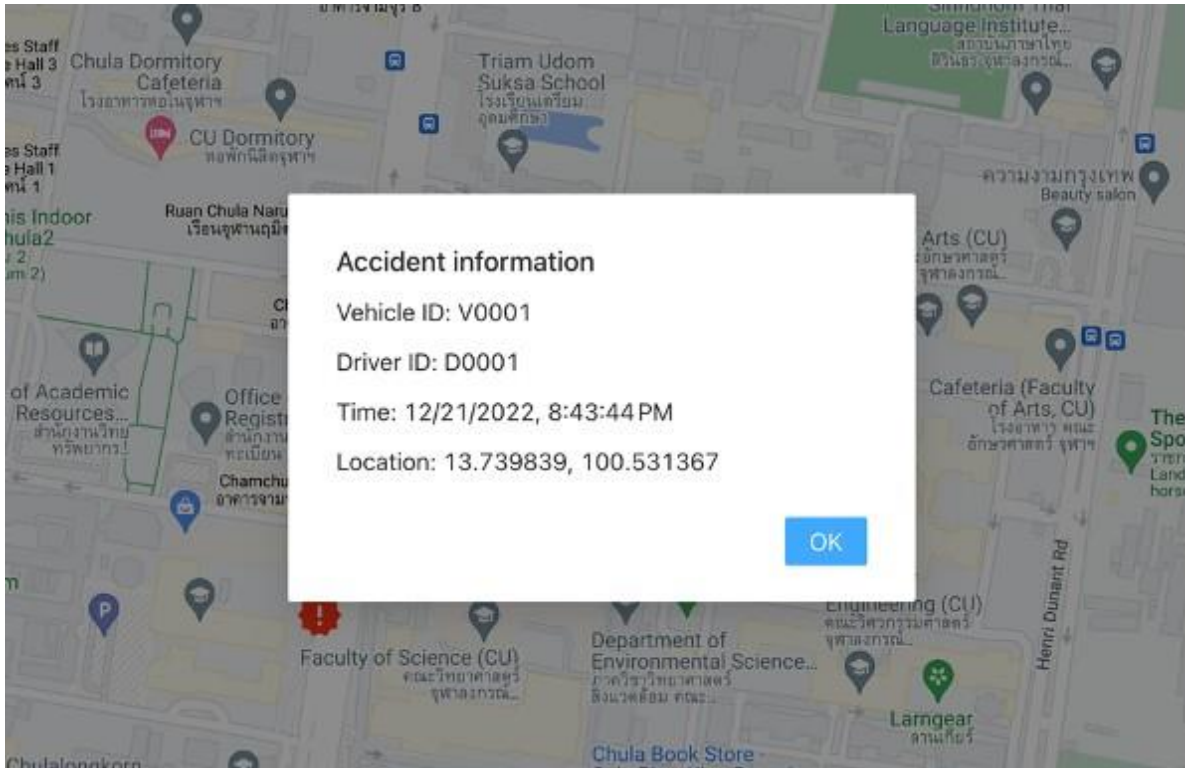
แผนที่แสดงตำแหน่งรถขับขี่อัตโนมัติแต่ละคันแบบเรียลไทม์ เมื่อกดที่รูปหมุดรถขับขี่อัตโนมัติจะแสดงหน้าต่างจำนวนผู้โดยสารภายในรถขับขี่อัตโนมัติคันนั้น รวมถึงเมื่อกดหมุดรูปเครื่องหมายตกใจ จะแสดงหน้าต่าง



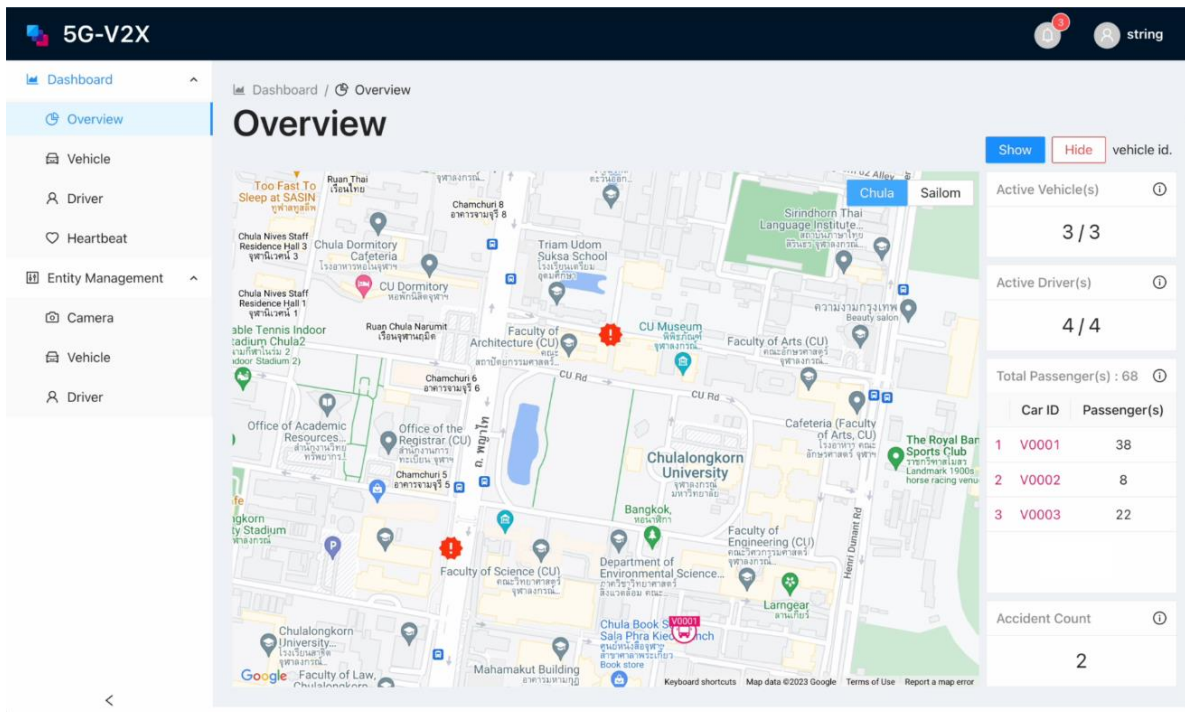
ข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับอุบัติเหตุดังกล่าว ได้แก่ Vehicle ID, Driver ID, Time และ Location มีปุ่ม “Dashboard” สำหรับไปยังหน้าแดชบอร์ดของรถขับอัตโนมัติคันนั้น ปุ่ม “Manage” สำหรับไปยังหน้าจัดการรถขับอัตโนมัติ ประกอบด้วย Active Car(s) Active Driver(s) Total Passenger(s) และ Accident Count มุมขวาบนของแผนที่ที่มีปุ่ม “Chula” และ “Sailom” สำหรับการสลับไปดูแผนที่บริเวณที่ต้องการ



รูปที่ 3-73 ตัวอย่างหน้าข้อมูลจำนวนผู้โดยสารภายในรถขับอัตโนมัติเมื่อกดที่มุมรถขับอัตโนมัติ



รูปที่ 3-74 ตัวอย่างหน้าแสดงข้อมูลอุบัติเหตุเมื่อกดที่หมุดอุบัติเหตุ



รูปที่ 3-75 ตัวอย่างหน้าแดชบอร์ดภาพรวม



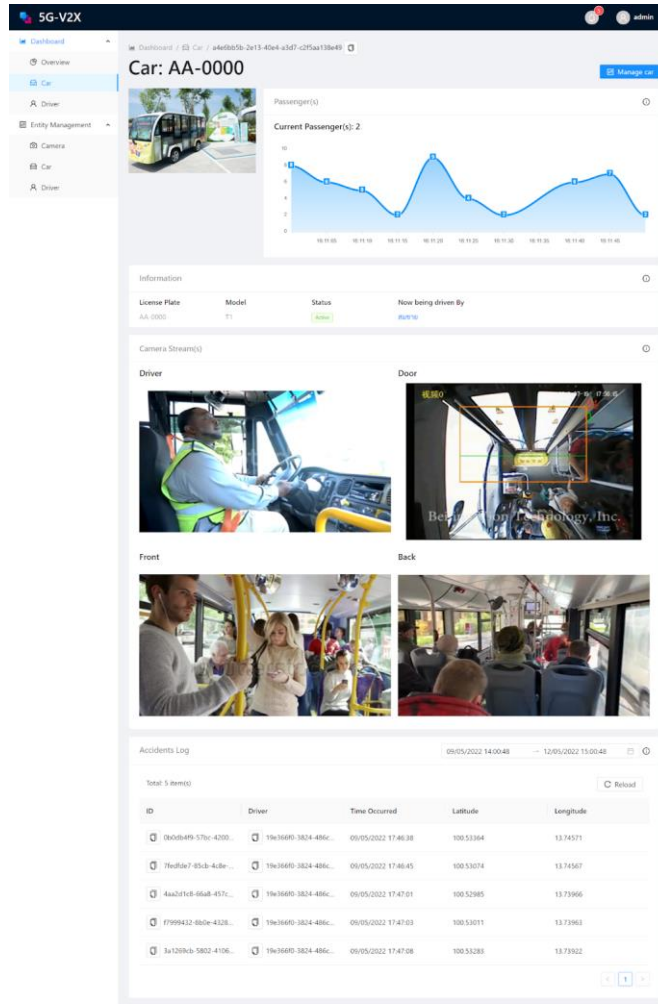
6) แดชบอร์ด Heartbeat แสดงสถานะของรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ กล้องทั้งสี่ตัว และโมดูลที่ทำงานอยู่ภายในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ ประกอบด้วย เวลาที่อัปเดตล่าสุด ID หมดแสดงสถานะ ACTIVE INACTIVE หรือ INVALID

ID	Vehicle status	Device status						Inspect
		Front Camera	Back Camera	Door Camera	Driver Camera	Drowsiness Module	Accident Module	
V0001	●	●	●	●	●	●	●	🔍
V0002	●	●	●	●	●	●	●	🔍
V0003	●	●	●	●	●	●	●	🔍

รูปที่ 3-76 ตัวอย่างหน้าแดชบอร์ด Heartbeat

7) แดชบอร์ดรถขับเคลื่อนอัตโนมัติรายคัน หัวข้อของหน้าระบุเลขทะเบียนของรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Car: AA-000) หน้าประกอบด้วย

- ปุ่ม “View all...” สำหรับการแดชบอร์ดในมุมมองที่ครบทุกคัน
- ปุ่ม “Manage car” สำหรับไปยังหน้าจัดการรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ
- รูปภาพของรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ
- กราฟแสดงจำนวนผู้โดยสารภายในรถคันนั้นกับเวลาแบบเรียลไทม์ข้อมูลเกี่ยวกับรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ ได้แก่ License Plate, Model, Status และ Now being driven by
- วิดีโอจากกล้องภายในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติทั้ง 4 ตำแหน่ง ได้แก่ กล้องที่จับภาพผู้ขับขี่ กล้องที่จับภาพประตู กล้องที่จับภาพทางด้านหน้า และกล้องที่จับภาพทางด้านหลัง
- ตารางรายการอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นกับรถขับเคลื่อนอัตโนมัติคันนี้สามารถกรองเฉพาะช่วงวันและเวลาที่กำหนดได้ ตารางประกอบด้วยรายละเอียด ID, Driver, Time Occurred, Latitude และ Longitude



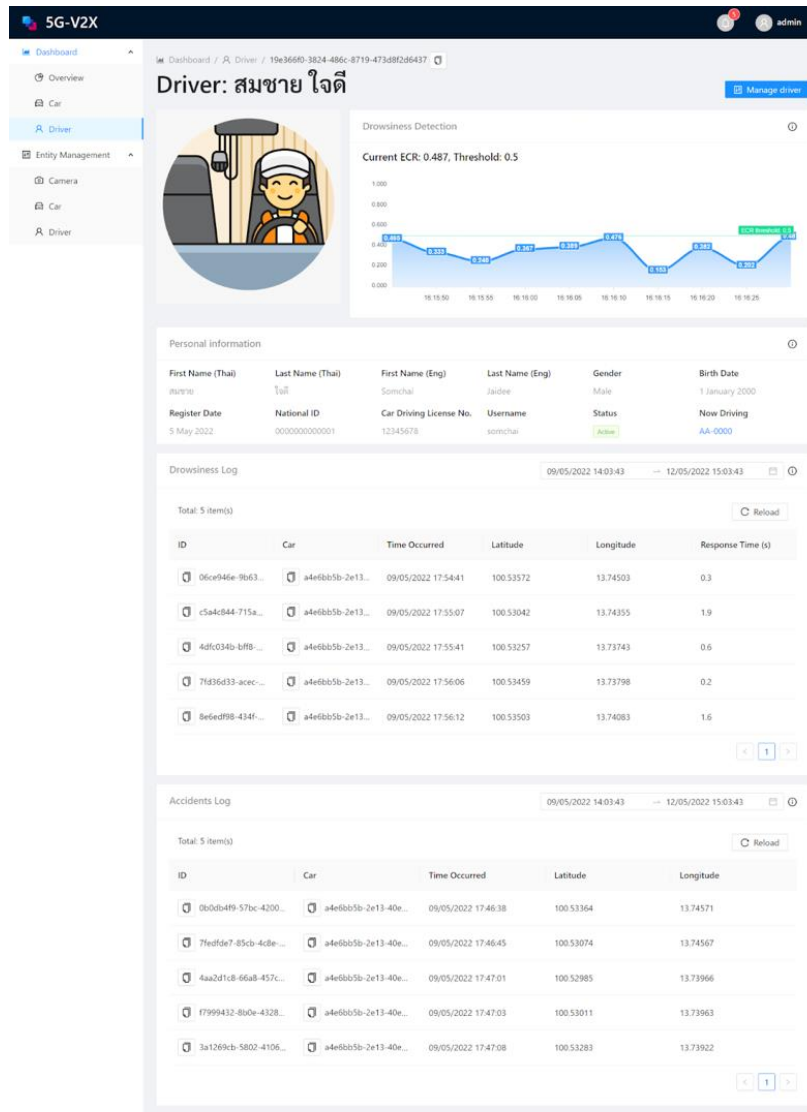
รูปที่ 3-77 แสดงตัวอย่างหน้าแดชบอร์ดรถขับเคลื่อนอัตโนมัติรายคัน

8) แดชบอร์ดผู้ขับขี่รายบุคคล หัวข้อของหน้าระบุชื่อจริงและนามสกุลของผู้ขับขี่ หน้าประกอบด้วย

- ปุ่ม “Manage driver” สำหรับไปยังหน้าจัดการผู้ขับขี่
- ภาพของผู้ขับขี่
- กราฟแสดงค่า ECR (Eye Closure Ratio) กับ เวลา แบบเรียลไทม์
- รูปข้อมูลของผู้ขับขี่ ได้แก่ First Name (Thai), Last Name (Thai), First Name (Eng), Last Name (Eng), Gender, Birth Date, Register Date, National ID, Car Driving License No., Username, Status และ Now Driving
- ตารางรายการอาการรบกวนที่เกิดขึ้นกับผู้ขับขี่คนนี้ สามารถกรองเฉพาะช่วงวันและเวลาที่กำหนดได้ ตารางประกอบด้วยรายละเอียด ID, Car, Time Occurred, Latitude, Longitude และ Response Time (s)



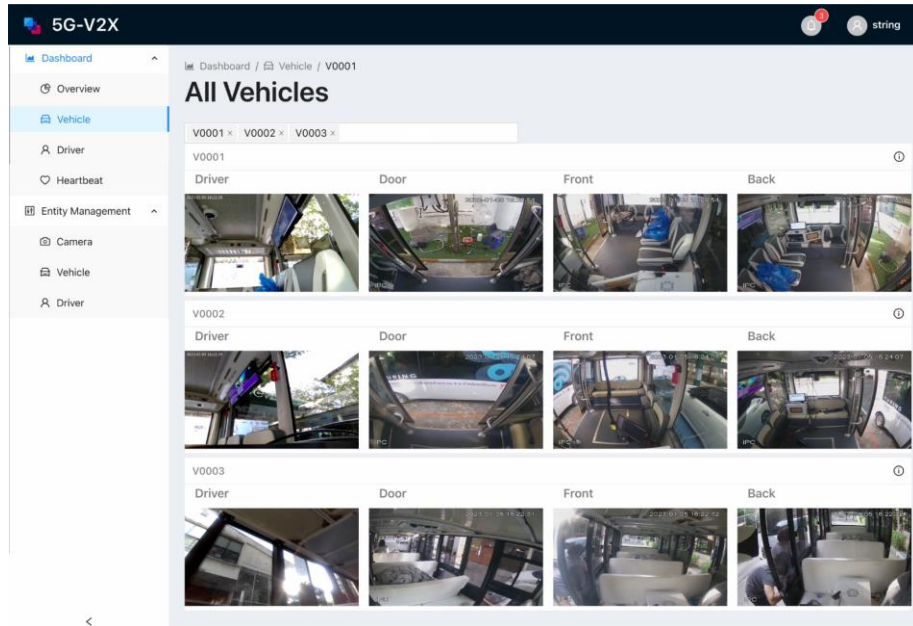
- ตารางรายการอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นกับผู้ขับขี่คนนี้ สามารถกรองเฉพาะช่วงวันและเวลาที่กำหนดได้ ตารางประกอบด้วยรายละเอียด ID, Car, Time Occurred, Latitude และ Longitude



รูปที่ 3-78 ตัวอย่างหน้าแดชบอร์ดผู้ขับขี่รายคน

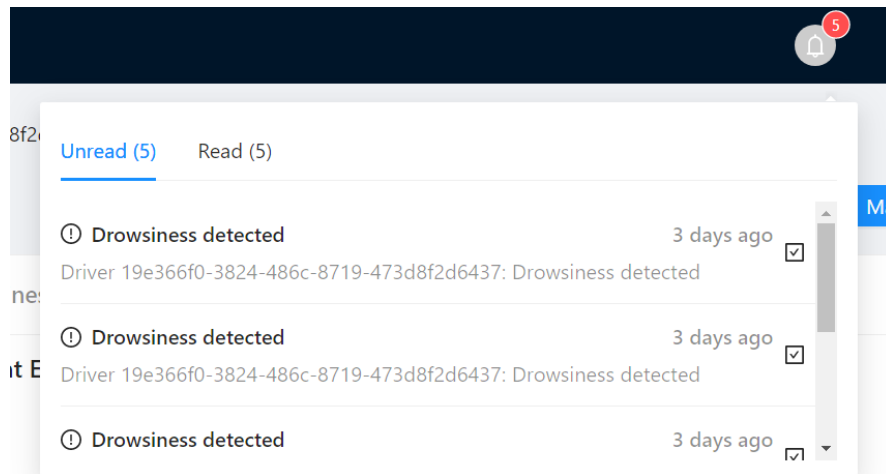
9) แดชบอร์ดแสดงผลมุมมองของกล้องทุกกล้องในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติทุกคัน





รูปที่ 3-79 ตัวอย่างมุมมองของกล้องทุกกล้องในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติทุกคัน

- ปุ่มแจ้งเตือนอุบัติเหตุ และอาการง่วงนอนของผู้ขับขี่ ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ “Unread” (รายการแจ้งเตือนที่ยังไม่ได้อ่าน) และ “Read” (รายการแจ้งเตือนที่อ่านแล้ว)



รูปที่ 3-80 หน้าต่างแจ้งเตือนในกระดิ่งแจ้งเตือน

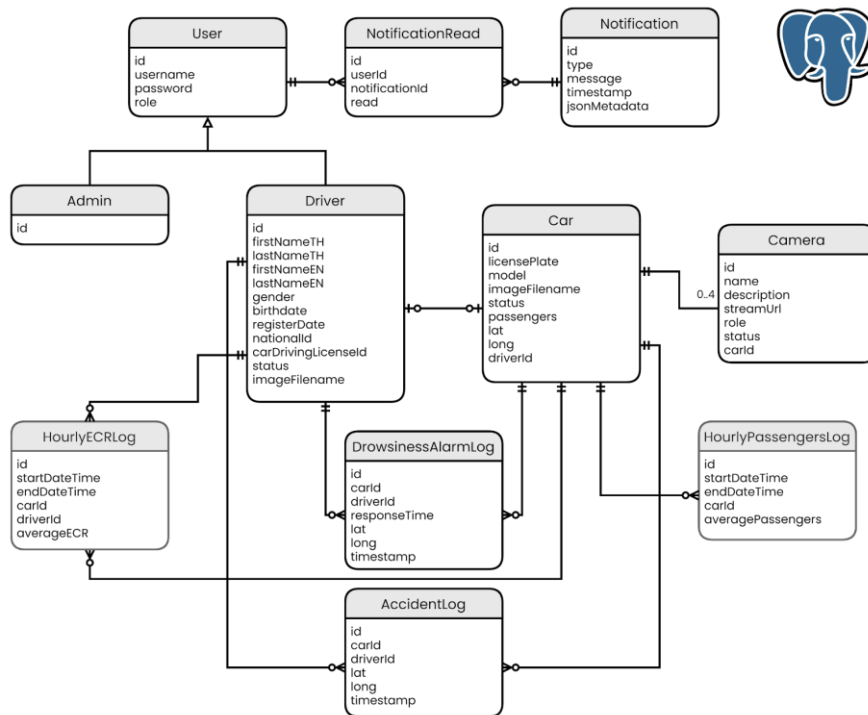
5.3 Database



ข้อมูลที่อยู่ภายในระบบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ (1) ข้อมูลทั่วไป คือ ข้อมูลของผู้ใช้งาน ระบบ ข้อมูลเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่าง ๆ และบันทึกของข้อมูลต่าง ๆ ที่ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา (2) ข้อมูลที่มีลักษณะเป็น Time-Series ซึ่งมักจะถูกส่งมาทุกช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ด้วยเหตุนี้ โครงการนี้จึงเลือกที่จะใช้ฐานข้อมูล 2 ตัว เพื่อให้สามารถประมวลผล จัดเก็บ และค้นหาข้อมูลทั้ง 2 ประเภทนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด คือ (1) PostgreSQL ซึ่งเป็นฐานข้อมูลแบบ SQL โดยโครงการนี้ได้เลือกฐานข้อมูลนี้มาจัดการกับข้อมูลทั่วไป (2) InfluxDB ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่ออกแบบมาสำหรับข้อมูลที่มีลักษณะเป็น Time-Series โดยเฉพาะ

1) General Database Design (PostgreSQL)

สำหรับ Schema Design ของการจัดเก็บข้อมูลทั่วไปใน PostgreSQL นั้น เป็นไปตาม Diagram ตามรูปที่ 3-81



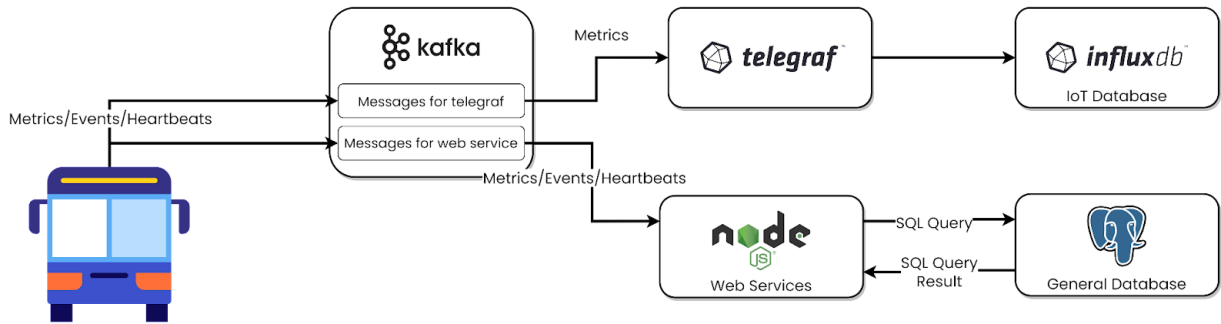
รูปที่ 3-81 General Database Design (PostgreSQL)

2) Time-series Database Design (InfluxDB)

สำหรับ Schema Design ของการจัดเก็บข้อมูลทั่วไปใน InfluxDB นั้นออกแบบโครงสร้างการเก็บข้อมูลอ้างอิงจากลักษณะของ Message ที่ส่งมาจาก Telegraf โดยมี Measurement 2 อย่าง ได้แก่ car_passenger และ driver_ecr



5.4 Messaging



รูปที่ 3-82 Message Data Flow Design

ลักษณะของข้อมูลที่ส่งมาจากรถขับเคลื่อนอัตโนมัติที่เป็นข้อความจะอยู่ในรูปแบบ JSON ทั้งหมด โดยสามารถแบ่งชนิดของ Message ตามลักษณะของข้อมูลได้ 3 ชนิด คือ Heartbeat, Metric และ Event

Message Broker ของระบบนี้ใช้เป็น Kafka โดยจะมี 2 Topic สำหรับการเดินทางของข้อมูล 2 สาย คือ (1) ข้อมูลจากรถขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ส่งผ่าน Kafka ไปที่ Telegraf ซึ่งจะถูกนำไปเก็บใน InfluxDB (2) ข้อมูลจากรถขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ส่งผ่าน Kafka ไปที่ Web Service เพื่อเก็บลง PostgreSQL และแสดงข้อมูลแบบเรียลไทม์

1) Heartbeat Message

Heartbeat เป็นข้อมูลเกี่ยวกับสถานะ Active/Inactive ของระบบและอุปกรณ์ต่าง ๆ บนรถขับเคลื่อนอัตโนมัติแต่ละคัน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำไปแสดงเป็นสถานะของระบบบนแดชบอร์ด

2) Metric Message

Metric เป็นข้อมูลเกี่ยวกับค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์บนรถขับเคลื่อนอัตโนมัติแต่ละคัน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปแสดงเป็นค่าตัวแปรและกราฟบนแดชบอร์ดสำหรับ Car Passengers และ Driver ECR จะมีการส่งไปที่ Telegraf เพื่อเก็บลงใน InfluxDB ด้วย

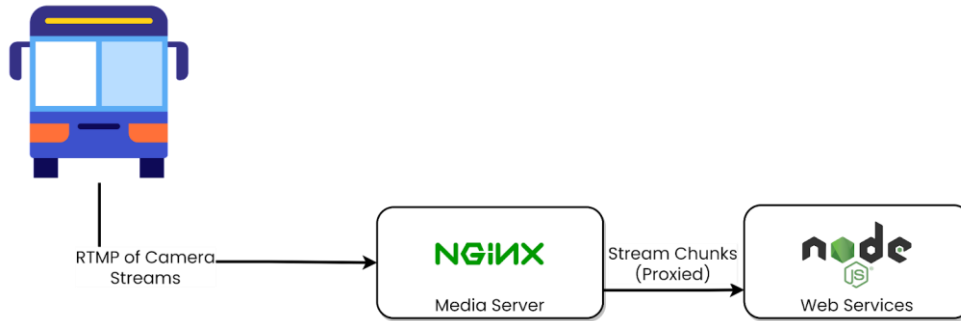
3) Event Message

Event เป็นข้อมูลที่ส่งมาที่ Kafka เมื่อเกิดเหตุการณ์ตรงตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้เท่านั้น เช่น Accident Event จะส่งมาเมื่อเกิดอุบัติเหตุ และ Drowsiness Alarm Event จะส่งมาเมื่อตรวจจับได้ว่าผู้ขับขี่ง่วงนอนเท่านั้น (ECR ใน Driver ECR มีค่าน้อยกว่า ECR Threshold) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะมีการนำไปแสดงเป็น Event Log บนหน้าแดชบอร์ดของรถขับเคลื่อนอัตโนมัติและผู้ขับขี่ และเก็บลงใน PostgreSQL

5.5 Video Streaming

สำหรับการสตรีมวิดีโอจากกล้องบนรถขับเคลื่อนอัตโนมัติจะส่งมาด้วยโพรโทคอล RTMP ไปที่ Media Server ที่พัฒนาด้วย NGINX ที่มี Plugin NGINX-RTMP-Module อยู่ ซึ่งจะถูกรับส่งมาเป็น Chunk Stream ด้วยการ Proxy โดย Web Service เพื่อนำไปแสดงบนหน้าแดชบอร์ดของรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ





รูปที่ 3-83 Video Streaming Data Flow Design

3.5 ผลทดสอบการนำรถต้นแบบในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารภายในบริเวณที่ทำการทดสอบ

การทดสอบการนำรถต้นแบบยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Autonomous Shuttle) ในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารภายในบริเวณที่ทำการทดสอบ ได้มีการวางแผนเส้นทางกรวิ่ง ดังแสดงในรูปที่ รูปที่ 3-84 และรูปที่ 3-85 โดยหลังจากที่ได้จัดทำแผนที่ความละเอียดสูง สร้างจุดเส้นทางวิ่ง (Waypoint) และทดสอบความถูกต้องของแผนที่และWaypoint แล้ว จึงทดสอบการวิ่งของรถจนมีความมั่นใจในด้านความปลอดภัย จากนั้นได้ทดสอบการจำลองการวิ่งรับส่งผู้โดยสาร ดังแสดงเป็นเส้นทางวิ่งและจุดรับส่ง (Bus stop) ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและสำนักงาน กสทช ดังแสดงในรูปที่ 3-84 และรูปที่ 3-85 ตามลำดับ

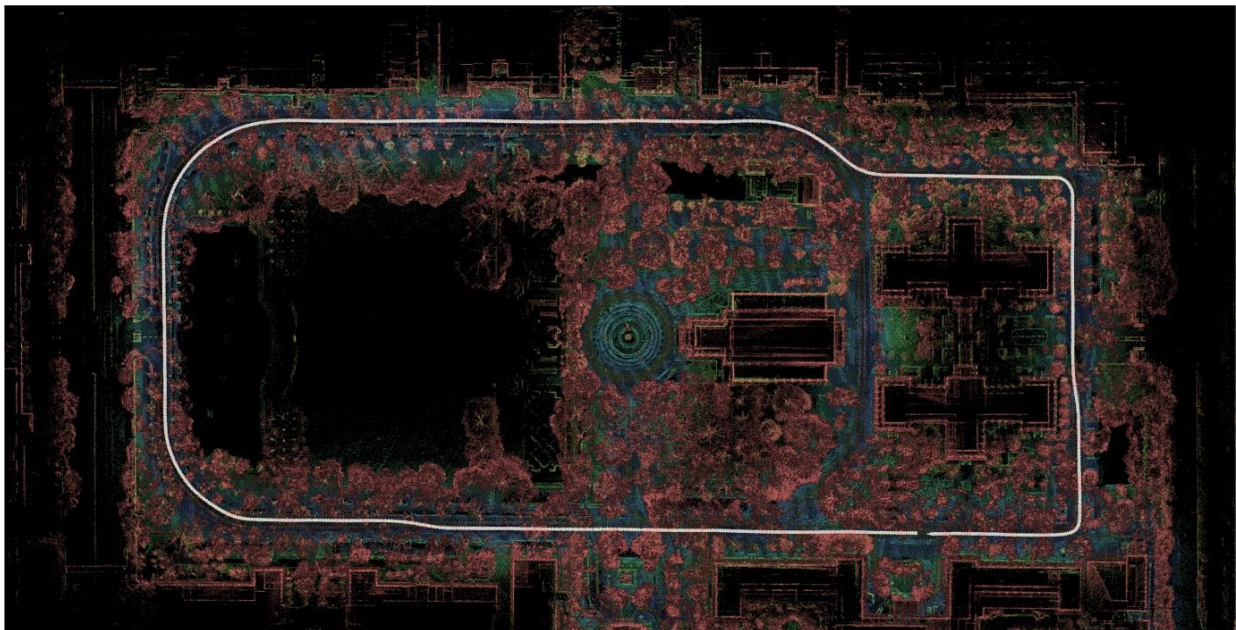
โดยที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีการจำลองที่จอดรถรับส่งผู้โดยสารจำนวน 4 จุด คือ บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ และคณะอักษรศาสตร์ และมีจุดจอดรถชั่วคราวเพื่อยืนยันความปลอดภัยบริเวณก่อนถึงทางร่วม ได้แก่ บริเวณประตูใหญ่จุฬาฯ ประตูคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ประตูคณะอักษรศาสตร์ โดยมีจุดเริ่มและสิ้นสุดการวิ่งในแต่ละรอบ บริเวณด้านหน้าป้ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ ในการวิ่งรับส่ง มีการออกแบบ Operational design domain (ODD) ระยะทางวิ่งต่อหนึ่งรอบมีระยะประมาณ 1.3 กิโลเมตร และให้วิ่งด้วยความเร็วไม่เกิน 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในหนึ่งรอบของการวิ่งมีจำนวนผู้โดยสารสูงสุด 6 คน และมี Staff ในรถจำนวน 3 คน ประกอบไปด้วย ผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) 1 คน และผู้ช่วยฯ จำนวน 2 คน โดยผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver assistance) มีหน้าที่ตรวจสอบการทำงานขอระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ และความปลอดภัยในการวิ่งของรถตลอดเวลา และทำการแทรกแซง หรือควบคุมแทนระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ ในกรณีที่มีความเสี่ยงว่าระบบจะไม่สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัย ส่วนผู้ช่วยฯจะทำหน้าที่ช่วยตรวจสอบความปลอดภัยของการวิ่งรถ และของผู้โดยสาร การเปิดปิดประตูรถ และตอบคำถามข้อสงสัยของผู้โดยสาร เป็นต้น รูปตัวอย่างของการทดลองฯในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงในรูปที่ 3-86

ที่สำนักงาน กสทช จำลองที่จอดรถรับส่งผู้โดยสารจำนวน 4 จุด บริเวณ คือ หน้าโรงอาหาร หน้าตึก 3 ทางม้าลายก่อนถึงอาคารจอดรถ และด้านหน้าประตูทางเข้าอาคารอำนวยการฝั่งด้านบนทางยกระดับ ในการวิ่งรับส่ง มีการออกแบบ Operational design domain (ODD) ระยะทางวิ่งต่อหนึ่งรอบมีระยะประมาณ 0.6 กิโลเมตร และให้วิ่งด้วยความเร็วไม่เกิน 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในหนึ่งรอบของการวิ่ง มีจำนวนผู้โดยสารสูงสุด 6

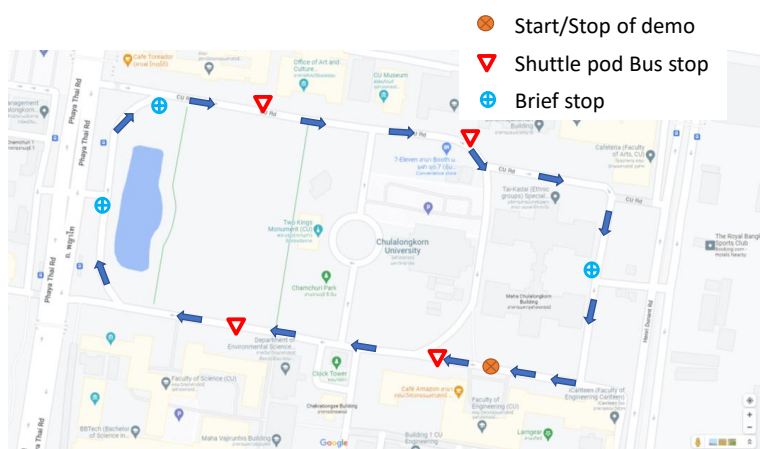
คน และมีจำนวนStaff ในรถจำนวน 3 คน ประกอบไปด้วย ผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) 1 คน และผู้ช่วยฯ จำนวน 1 คน โดย ผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) และผู้ช่วยฯจะทำหน้าที่เหมือนกับภารกิจที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รูปตัวอย่างของการทดลองฯในบริเวณสำนักงาน กสทช แสดงในรูปที่ 3-87

จากการทดสอบการนำรถต้นแบบยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Autonomous Shuttle) ในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารภายในบริเวณที่ทำการศึกษา พบว่าการทดลองเป็นไปด้วยดี ไม่มีอุบัติเหตุเกิดขึ้นแต่อย่างใด และผู้ทดลองนั่งไม่รู้สึกรถึงความปลอดภัยขณะนั่งรถ แต่ทั้งนี้พบความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Incident) ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาทิ รถพยายามแซงในระยะกระชั้นชิด การขับขี่ของรถมอเตอร์ไซด์ที่ผิดกฎและพยายามแทรกหรือแซงรถในระยะใกล้ ผู้ขับขี่สกูตเตอร์ไฟฟ้าที่ไม่ทราบกฎจราจรและขับรถตัดหน้าหรือย้อนศรขณะทดลอง รถคันหลังที่ขับตามรถทดสอบชิดเกินไป รถที่เข้าทางร่วมทางแยกวิ่งด้วยความเร็วสูงเกินกว่ากฎความปลอดภัย เป็นต้น ส่วนการทดสอบที่สำนักงาน กสทช ซึ่งพบข้อมูล Incident น้อยกว่าการทดสอบที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คือ มีกรณีรถมอเตอร์ไซด์พยายามแซงระยะกระชั้นชิด รถที่ไม่เชื่อการให้สัญญาณของพนักงานรักษาความปลอดภัยที่บริเวณทางแยก และรถจอดในที่ใกล้บริเวณทางเลี้ยวหรือจุดเริ่ม/สิ้นสุดการทดลองทำให้วิ่งรถอัตโนมัติได้ลำบาก ทั้งนี้ จะเห็นว่าทั้งสองที่ที่ทำการทดลองมีความแตกต่างกันในการเกิด Incident เนื่องจากสภาพพื้นที่ ถนน และการจราจรที่ต่างกัน กล่าวคือ ในจุฬาฯ ถนนมีสองช่องจราจรทำให้สามารถแข่งกันได้ และมีการจราจรกึ่งเปิด คือ มีรถจากภายนอกเข้ามาในมหาวิทยาลัยได้ และใช้ความเร็วในการวิ่งต่ำกว่าการจราจรภายนอกไม่มากนัก และมีจุดทางร่วมทางแยกจำนวนหนึ่ง ในขณะที่สำนักงาน กสทช เป็นถนน ช่องทางเดียว ทำให้รถแข่งกันไม่ได้ยกเว้นมอเตอร์ไซด์ รถเข้าออกมีทางเดียว ช่องทางจราจรค่อนข้างแคบในบางช่วงและมีรถจอดข้างทางจำนวนมาก และมีโอกาสเสี่ยงที่บริเวณทางเลี้ยวที่รถอัตโนมัติอาจเลี้ยวไม่พ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า สภาพการจราจรมีความซับซ้อนน้อยกว่าที่จุฬามาก ซึ่งข้อมูลการเกิด Incident นี้มีความสำคัญอย่างมากในการนำไปพัฒนาระบบตัดสินใจ (Decision making) ระบบควบคุมการวิ่ง (Path planning) รวมถึงระบบตรวจจับ ระบุ ติดตาม และคาดการณ์การเคลื่อนที่ของวัตถุ (Object detection ,classification, tracking and path prediction) ต่อไป





Test route of Autonomous Shuttle at Chulalongkorn University



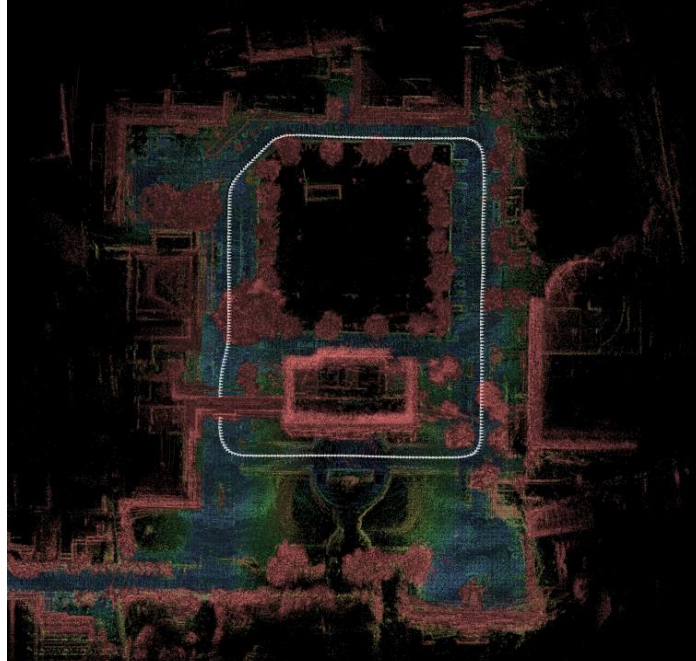
ODD:

- Low speed automated vehicle in predefined route at CU campus
- Autonomous mode will be operated between Shuttle pod bus stop and brief stop location
- Safe driver will operate vehicle manually anytime for safety
- Safe driver must confirm for safety before start autonomous mode at bus stop / brief stop

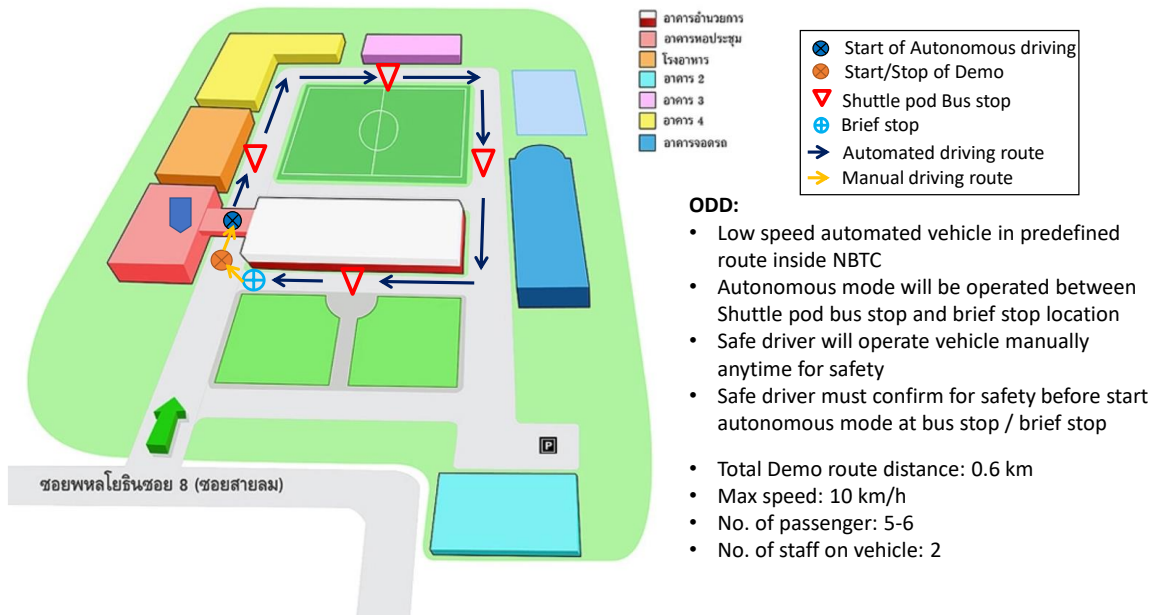
- Route distance: 1.3 km
- Max speed: 10 km/h
- No. of passenger: 5-6
- No. of staff : 3

รูปที่ 3-84 Waypoint ในแผนที่ความละเอียดสูง เส้นทางและแผนการวิ่ง ของการทดลองรับส่งผู้โดยสารด้วยรถอัตโนมัติในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





Test route of Autonomous Shuttle at NBTC Office



รูปที่ 3-85 Waypoint ในแผนที่ความละเอียดสูง เส้นทางและแผนการวิ่ง ของการทดลองรับส่งผู้โดยสารด้วยรถอัตโนมัติในพื้นที่สำนักงาน กสทช



รูปที่ 3-86 ภาพการทดสอบการนำรถต้นแบบในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารในบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-87 ภาพการทดสอบการนำรถต้นแบบในการให้บริการรับส่งผู้โดยสารในบริเวณ สำนักงาน กสทช



บทที่ 4

ภาพกิจกรรม วันสาธิตการทำงาน ณ กสทช.



รูปที่ 4-1 ภาพบรรยากาศก่อนการสาธิตการทำงานรถไร้คนขับ



รูปที่ 4-2 ภาพที่ระลึกภายในห้องประชุมในวันกิจกรรม



รูปที่ 4-3 ภาพถ่ายรวมทีมงานโครงการ



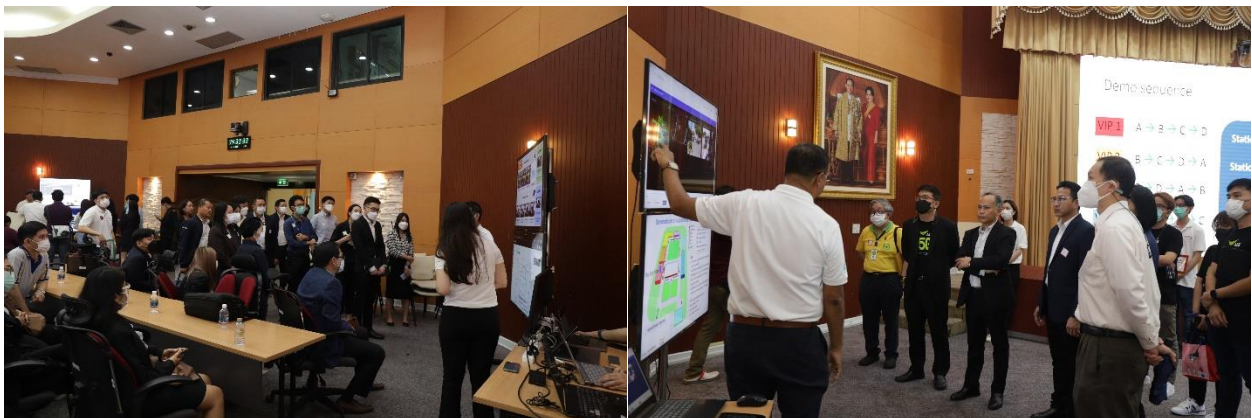
รูปที่ 4-4 อุปกรณ์ควบคุมบางส่วนภายในรถทดสอบ



รูปที่ 4-5 บรรยากาศภายในรถทดสอบ



รูปที่ 4-6 รถที่อยู่ระหว่างการสาธิต



รูปที่ 4-7 บรรยากาศภายในฐานต่าง ๆ ในห้องประชุม (1)



รูปที่ 4-8 บรรยากาศภายในฐานต่าง ๆ ในห้องประชุม (2)



รูปที่ 4-9 ภาพบรรยากาศระหว่างการสาธิต



รูปที่ 4-10 ประมวลภาพกิจกรรมในช่วงต้นและการบรรยาย

บทที่ 5

องค์ความรู้จากการดำเนินโครงการและข้อเสนอแนวทางกำหนดนโยบายภาครัฐ

5.1 องค์ความรู้ที่ได้จากการพัฒนาระบบในโครงการ Autonomous Shuttle Low speed/short distance – predefined route

ในการพัฒนาและทดลองวิ่งรถอัตโนมัติรับส่งผู้โดยสารในเส้นทางเฉพาะและมีความเร็วต่ำ (Low Speed Autonomous Shuttle in predefined route) ซึ่งเป็นรถไร้คนขับระดับที่ 3 คณะผู้วิจัยได้เรียนรู้ และได้องค์ความรู้จากการทดลองทั้งใน พื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำนักงาน กสทช โดยพบว่า การออกแบบ และกำหนด Operational Design Domain (ODD) มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเกี่ยวข้องกับความปลอดภัย และรูปแบบการวิ่งให้บริการโดยตรง ความเข้าใจในเทคโนโลยี ความสามารถ และข้อจำกัดของระบบขับอัตโนมัติที่จะเลือกใช้เป็นส่วนสำคัญมาก แต่ก็ยังมีด้านอื่นๆ ที่ต้องทำความเข้าใจและเก็บข้อมูลก่อนเพื่อให้การออกแบบ ODD ออกมาเหมาะสมและปลอดภัยในการ Operate รถอัตโนมัติ เช่น ข้อมูลเส้นทางของถนน ขนาด และจำนวน ช่องจราจร รูปแบบการจราจร ลักษณะของการวิ่งของรถในบริเวณนั้น จุดจอดรับส่งผู้โดยสารที่เหมาะสมและปลอดภัย และสภาพแวดล้อมต่างๆ ในบริเวณที่จะ operate รถอัตโนมัติ การออกแบบ ODD จะวางแผนเส้นทาง การวิ่งของรถในระดับ Global planning คือ กำหนดจุดเริ่มและสิ้นสุดการวิ่ง และเส้นทางที่รถวิ่ง ในระดับ Local planning คือ การเลือกรูปแบบการวิ่งของรถว่าควรวิ่งอย่างไร เช่น ควรวิ่งชิดช่องจราจรด้านไหน จะเปลี่ยนช่องจราจรเพื่อเลี้ยวตรงไหน ควรชะลอหรือเบรกรถที่ไหนเพื่อความปลอดภัย หรือการกำหนดให้วิ่งในช่องทางพิเศษสำหรับรถอัตโนมัติ เป็นต้น และเลือกระดับความเร็วในการวิ่งของรถ ซึ่งไม่จำเป็นต้องเท่ากันตลอดเส้นทาง โดยสามารถวิ่งเร็วได้มากกว่าในเส้นทางตรง ไม่มีทางร่วมทางแยก และมีความเสี่ยงต่ำ แต่วิ่งช้าลงในบริเวณก่อนถึงทางร่วมทางแยก และบริเวณทางเลี้ยว ที่มีความเสี่ยงมากกว่า เป็นต้น และกำหนดรูปแบบการเข้าแทรกแซงของผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) ที่เหมาะสม รวดเร็ว และต้องกระทำในช่วงไหนของเส้นทาง การ Operate รถอัตโนมัติ กำหนดจำนวนผู้ควบคุมการทดลองและหน้าที่รับผิดชอบของแต่ละคน และควรมีการเก็บข้อมูลการ Operate รถอัตโนมัติ เพื่อให้ทราบถึง Incident ที่เกิดขึ้นในช่วงที่มีการทดลองวิ่ง เพื่อนำมาแก้ไขปรับปรุง ODD ให้เหมาะสมและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ เมื่อมองจากมุมมองของผู้กำกับดูแล การที่มีการเก็บข้อมูลในการทดลอง จะมีความจำเป็นมาก เพื่อทราบถึงการทดลองว่ามีความปลอดภัยเพียงใด และหากมีอุบัติเหตุหรือเหตุการณ์ต่างๆ เกิดขึ้น จะสามารถเรียกข้อมูลมาตรวจสอบได้ เพื่อใช้เป็นหลักฐาน และข้อมูลประกอบ จากงานวิจัยนี้พบว่า ข้อมูลที่ควรมีการเก็บระหว่างการทดลอง ควรประกอบด้วย ข้อมูลโหมดการขับขี่ของรถที่กำลังควบคุมด้วยคนหรือระบบอัตโนมัติ (Manual / Auto mode) พิกัดตำแหน่งทั้งจากระบบดาวเทียมนำร่อง และการระบุตำแหน่งของรถบนแผนที่ความละเอียดสูง ความเร็ว และความเร่งของรถ ข้อมูล Input ในการควบคุมรถ (ความเร็ว มุมเลี้ยว เเปอร์เซ็นต์ของการเบรก เป็นต้น) ภาพวิดีโอจากกล้องที่ติดตั้งมองไปด้านนอกรถ อย่างน้อยที่ด้านหน้าและหลังของรถ และกล้องที่ติดตั้งภายในรถเพื่อ Monitor ผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) ข้อมูล LiDAR (เป็น option

เสริม) และ Log ของการทดลอง เช่น ผู้ใดทำหน้าที่ควบคุมการทดลอง ใครเป็นผู้ช่วย ทำการทดลองวันไหน เวลาใด สถานที่ใด มีจำนวนผู้โดยสารกี่ท่าน เป็นต้น

ด้านการสื่อสารผ่านเครือข่าย 5G จะมีบทบาทในการเพิ่มความเสถียร และปลอดภัยในการ Operate รถอัตโนมัติได้ เช่น การส่งข้อมูลของรถขณะ Operate มายังศูนย์ควบคุมกลาง เพื่อใช้ Monitor การทำงานของรถอัตโนมัติ การทำงานของผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) และสถานะของผู้โดยสารภายในรถ และสามารถควบคุมรถ เพื่อหยุดหากเกิดเหตุฉุกเฉินขึ้นกับรถ หรือ ผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) ไม่สามารถทำงานได้ และการนำเทคโนโลยี V2I มาช่วยเพิ่มความปลอดภัยโดยการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่ Roadside unit ตรวจจับได้ เช่น การตรวจจับรถในทางร่วมแล้วแจ้งไปยังรถอัตโนมัติที่กำลังมาถึงทางร่วม เพื่อให้ปรับเปลี่ยนความเร็วให้เหมาะสม และปลอดภัย เป็นต้น

ในด้านการวิ่งรถในพื้นที่สาธารณะยังมีความติดขัดในการขออนุญาตจดทะเบียนรถ โดยคณะวิจัยได้หารือกับ กรมขนส่งทางบก เรื่องการขอจดทะเบียนรถอัตโนมัติที่ใช้ในโครงการ โดยใช้ทะเบียนรถทดสอบ (Test car: TC) และพบว่ารถยังไม่สามารถจดทะเบียนได้เนื่องจาก 2 สาเหตุหลัก คือ รถไม่มีอุปกรณ์ควบคุมและส่วนควบคุมตามที่กำหนดไว้ และความเร็วของรถยังไม่ถึงขั้นต่ำที่กำหนดไว้ ดังนั้น ในการทดลองจึงกระทำในพื้นที่ควบคุมเฉพาะ ในจุฬาฯ และสำนักงาน กสทช. เป็นหลัก

ในด้านการพัฒนาระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติรับส่งผู้โดยสารในเส้นทางเฉพาะ และมีความเร็วต่ำ (Low Speed Autonomous Shuttle in predefined route) คณะวิจัยพบว่า ควรประกอบไปด้วยเซนเซอร์ขั้นต่ำ คือ LiDAR อย่างน้อย 2 ตัวขึ้นไป และมีกล้องอย่างน้อย 2 ตัว มีเซนเซอร์อัลตราโซนิก ที่บริเวณด้านหน้าและหลัง มีเซนเซอร์ระบุตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมนำร่อง (GNSS) ที่มีความแม่นยำในระดับเซนติเมตร และมีเซนเซอร์วัดความเร่ง (IMU) สามแกน ทั้งนี้จำนวนของเซนเซอร์ขึ้นกับขนาดรูปร่างและจุดอับสายตาของรถ และODD ของรถ และควรมีตัวประมวลผลที่มีสมรรถนะสูง และมีระบบการระบายความร้อนที่ดี เพื่อป้องกันการหยุดทำงานของตัวประมวลผล เมื่อมีการทำงานหนัก ควรมีตัวประมวลผลสำรองในกรณีระบบมีปัญหา และมีระบบ Cyber security ที่สามารถป้องกันการถูกบุกรุกจากภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โปรแกรมและระบบปฏิบัติการที่ใช้ควรเป็นระบบที่มีความเสถียรและเป็นระบบเปิด เพื่อให้สามารถปรับปรุงแก้ไขโปรแกรมขณะทำการพัฒนาได้ง่าย และสามารถให้ทีมงานทำงานร่วมกันได้ง่าย ทำให้ในโครงการนี้เลือกใช้ ROS / AUTOWARE ซึ่งเป็น โปรแกรมโอเพนซอส

ในด้านโครงสร้างพื้นฐาน ในโครงการนี้ไม่ได้ใช้วิธีกำหนดช่องทางพิเศษสำหรับรถอัตโนมัติเพื่อทดลอง แต่เลือกใช้วิธีให้รถอัตโนมัติวิ่งไปกับรถคันอื่นๆ ในถนน แต่หากสภาพการจราจรบริเวณที่วิ่งมีความซับซ้อน และยากต่อการวิ่งได้อย่างปลอดภัย โดยที่ผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) ไม่ต้องแทรกแซงบ่อยครั้ง ควรมีการใช้ช่องทางพิเศษและมีการควบคุมไม่ให้รถคันอื่นๆ เข้ามาวิ่งในช่องทางพิเศษนั้น

ในด้านการรับรู้ของคนทั่วไป จากการทำทดลองวิ่งรถอัตโนมัติ และมีผู้โดยสารทดลองนั่งในรถ พบว่าควรมีการสื่อสารให้คนทั่วไปได้ทราบถึงเทคโนโลยีขับเคลื่อนอัตโนมัตินี้ ว่ามีความสามารถอย่างไร มีข้อจำกัดอะไร และ



จะสร้างประโยชน์อะไรให้กับสังคมได้ การนำร่องวิ่งรถรับส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ จะเป็นช่องทางประชาสัมพันธ์ที่ดีในการสื่อสาร สร้างการรับรู้ ความเข้าใจกับคนทั่วไปได้โดยตรง และสร้างประสบการณ์ในการใช้งานรถอัตโนมัติได้อย่างกว้างขวางขึ้น

5.2 อภิปราย

5.2.1 รถอัตโนมัติ

1) การออกแบบ ODD ให้เหมาะสมและปลอดภัยในการทดลองวิ่งรถอัตโนมัติรับส่งผู้โดยสารในเส้นทางเฉพาะและมีความเร็วต่ำ (Low Speed Autonomous Shuttle in predefined route) ในสภาวะแวดล้อมการจราจร และเส้นทางการวิ่งที่แตกต่างกัน ต้องมีการวางแผนเส้นทางการวิ่งของรถในระดับ Global planning คือ กำหนดจุดเริ่มและสิ้นสุดการวิ่ง และเส้นทางที่รถวิ่ง เช่น วิ่งเป็นลูปรูเริ่มและจบการวิ่งที่จุดเดิม หรือจุดเริ่มและสิ้นสุดเป็นคนละจุดกันก็ได้ และในระดับ Local planning ออกแบบและการเลือกรูปแบบการวิ่งของรถว่าควรวิ่งอย่างไร เช่น วิ่งชิดช่องจราจรด้านไหน เปลี่ยนช่องจราจร เลี้ยว ซะลอหรือเบรกรถ เมื่อใดและอย่างไร เพื่อความปลอดภัย การกำหนดให้วิ่งในช่องทางพิเศษสำหรับรถอัตโนมัติจำเป็นหรือไม่ เป็นต้น และเลือกระดับความเร็วในการวิ่งของรถ ซึ่งไม่จำเป็นต้องเท่ากันตลอดเส้นทาง โดยสามารถวิ่งเร็วได้มากกว่าในเส้นทางตรง ไม่มีทางร่วมทางแยก และมีความเสี่ยงต่ำ แต่วิ่งช้าลงในบริเวณก่อนถึงทางร่วมทางแยก และบริเวณทางเลี้ยวที่มีความเสี่ยงมากกว่า เป็นต้น และกำหนดรูปแบบการเข้าแทรกแซงของผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) ที่เหมาะสม รวดเร็ว และต้องกระทำในช่วงใดของเส้นทางการวิ่งของรถ ODD ของการทดลองวิ่งฯ ในโครงการนี้มีดังนี้

- รถวิ่งความเร็วสูงสุด 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในเส้นทางตรง และลดความเร็วลงเหลือ 5-7 กิโลเมตรต่อชั่วโมงบริเวณทางโค้ง
- LiDAR เป็นเซนเซอร์หลักในการทำงานของรถ กล้องเป็นส่วนเสริม และมี GNSS/IMU เป็นส่วนเสริมเมื่อระบบระบุตำแหน่ง ไม่ทำงานตามปกติ เพื่อให้รถทราบตำแหน่งตัวเองในขณะนั้น
- ระบบจะหยุดรถโดยอัตโนมัติทุกครั้งที่ทางร่วมทางแยก และรอให้ผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) ยืนยันความปลอดภัยก่อนไปต่อ โดยถือว่าผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) คือ redundant ของระบบ
- ระบบจะหยุดรถโดยอัตโนมัติทุกครั้งที่ป้ายหยุดรถ (Bus stop) และรอให้ผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) ยืนยันความปลอดภัยก่อนออกรถ
- เมื่อมีรถจอดขวางในช่องทางจราจรที่รถอัตโนมัติกำลังวิ่ง ระบบจะหยุดรถและรอให้ผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver) ยืนยันว่าจะไปต่อในช่องเดิมหรือจะเลี้ยวหลบโดยใช้คนควบคุม (ในงานนี้ยังไม่ได้พัฒนาระบบหลักเลี้ยวหลบสิ่งกีดขวางอัตโนมัติแบบเต็มรูปแบบโดยไม่ต้องมีคนช่วยตัดสินใจ)

2) การเก็บข้อมูลการวิ่งของรถอัตโนมัติ เพื่อให้ทราบถึง Incident ที่เกิดขึ้นในช่วงที่มีการทดลองวิ่ง เพื่อนำมาแก้ไขปรับปรุง ODD ให้เหมาะสม และปลอดภัยมากยิ่งขึ้น จากงานวิจัยนี้พบว่าควรมีระบบเก็บข้อมูล



ดังกล่าวในระหว่างทดลองละเอียดไว้ที่ Server และที่ตัวรถเอง โดยมีข้อมูลครบถ้วนเพียงพอต่อการนำไปใช้อ้างอิงในสถานการณ์และเหตุการณ์ที่จำเป็นได้ ในโครงการนี้เก็บข้อมูลดังนี้

- ข้อมูลโหมดการขับขี่ของรถที่กำลังควบคุมด้วยคนหรือระบบอัตโนมัติ (Manual / Auto mode)
- พิกัดตำแหน่งทั้งจากระบบดาวเทียมนำร่องและการระบุตำแหน่งของรถบนแผนที่ความละเอียดสูง
- ความเร็วและความเร่งของรถ
- ข้อมูล Input ในการควบคุมรถ (ความเร็ว มุมเลี้ยว เพอร์เซ็นต์ของการเบรก เป็นต้น)
- ภาพVDO จากกล้องที่ติดตั้งมองไปด้านนอกรถ อย่างน้อยที่ด้านหน้าและหลังของรถ และกล้องที่ติดตั้งภายในรถเพื่อ Monitor ผู้ควบคุมการทดลอง (Safe driver)
- ข้อมูล LiDAR
- Log ของการทดลอง เช่น ผู้ใดทำหน้าที่ควบคุมการทดลอง ใครเป็นผู้ช่วย ทำการทดลองวันไหน เวลาใด สถานที่ใด มีจำนวนผู้โดยสารกี่ท่าน เป็นต้น

3) การนำเทคโนโลยี V2I ผ่านเครือข่าย 5G มาช่วยเพิ่มความปลอดภัยโดยการแลกเปลี่ยนข้อมูล ที่ Roadside unit ตรวจจับได้ เช่น การตรวจจับรถในทางร่วมแล้วแจ้งไปยังรถอัตโนมัติที่กำลังมาถึงทางร่วม เพื่อให้ปรับเปลี่ยนความเร็วให้เหมาะสมและปลอดภัย เป็นสิ่งที่สามารถช่วยให้รถอัตโนมัติทำงานได้อย่างปลอดภัย และเพิ่ม redundancy ให้กับระบบ โดย Roadside unit อาจเป็นรูปแบบของกล้อง CCTV ที่มีโมดูลการวิเคราะห์ ตรวจจับและวัดค่า Time-to-collision (TTC) ของรถที่ผ่านมา และวิเคราะห์ร่วมกับรถอัตโนมัติแล้วจะมีโอกาสเกิดการชนหรือไม่ ทั้งนี้นักวิจัยของโครงการจะนำเทคโนโลยีนี้มาใช้ในเฟสถัดไปของงานวิจัย

4) การทดลองในสนามทดสอบเฉพาะ จะช่วยให้สามารถจำลองสถานการณ์ต่างๆ ได้ง่ายและปลอดภัยขึ้น เหมาะสมที่จะใช้เป็น Sandbox ในการวิจัยพัฒนาและทดสอบ ให้ผ่านตาม กฎระเบียบด้านสมรรถนะและความปลอดภัยของรถอัตโนมัติ การทดลองในโครงการนี้ ทำทดลองในพื้นที่ จุฬาฯและ สำนักงาน กสทช มีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (uncontrolled conditions) อยู่หลายประการ เช่น การวิ่งของรถคันอื่นๆที่ร่วมใช้ทาง เป็นต้น ทำให้เป็นอุปสรรค และความเสี่ยงในการทดลองฯ ในช่วงแรกของการพัฒนาระบบ แต่ในกรณีที่พัฒนาระบบฯ ไปแล้วถึงจุดหนึ่ง การเกิดสถานการณ์จริง ก็จะทำให้เป็นการทวนสอบความสามารถของระบบที่ได้พัฒนาขึ้นจากสถานการณ์จริง ทั้งนี้เห็นว่าควรมีการนำกฎมาประยุกต์ใช้ เพื่อทดสอบสมรรถนะความสามารถและความปลอดภัยของรถอัตโนมัติ ก่อนอนุญาตให้ทดสอบในพื้นที่สาธารณะได้ และในขณะเดียวกันก็ต้องมีสถานที่ปิดให้ สามารถวิจัยพัฒนารถอัตโนมัติได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ ก่อนการใช้งานจริง

5) การสร้างความต่อเนื่องของงานวิจัยระบบขับขี่อัตโนมัติจะทำได้ด้วยการสร้างบุคลากรที่มีความรู้แบบสหสาขาวิชาที่มีประสบการณ์ตรงในการทำงานวิจัยและพัฒนา ในโครงการนี้สามารถสร้างบุคลากรได้จำนวนหนึ่งที่สามารถเป็นส่วนสำคัญต่อไป ทั้งนี้การมีงานวิจัยพัฒนาและการนำร่องการใช้งานอย่างต่อเนื่องจะช่วยเพิ่มปริมาณบุคลากรที่สร้างได้มากยิ่งขึ้น



5.2.2 ระบบสื่อสาร 5G

Cellular V2X เป็นเทคโนโลยีทางสื่อสารที่เหมาะสมกว่าเทคโนโลยีสื่อสารแบบอื่น เช่น DSRC (Dedicated Short-Range Communication) เนื่องจาก

- ความจุและระยะทาง (Capacity and Distance)
 - รถยนต์ไร้คนขับจำนวนมาก (Dense Autonomous Vehicles)
 - Bandwidth Efficiency และ Spectrum Efficiency

- ความหน่วงเวลา (Latency)

จากการทดลองทดสอบการสื่อสารพบว่า ความหน่วงเวลา (Latency) ส่วนใหญ่จะอยู่ที่ Over-the-air interface (OTA) เวลาแฝงของการสื่อสาร 5G ส่วนใหญ่จึงอยู่ระหว่างการติดต่อสื่อสารระหว่าง UE (user Equipment) ไปยังเสาสัญญาณ หรือ gNb ซึ่ง 5G ที่ใช้ความถี่ mmWave จะมีเวลาแฝงน้อยกว่า 5G ที่ใช้ความถี่ sub 6 GHz (subcarrier space กว้าง จำนวน slot/frame มากกว่า และ ระยะห่างระหว่าง UE กับเสาสัญญาณน้อยกว่า

- ความปลอดภัย (Safety)

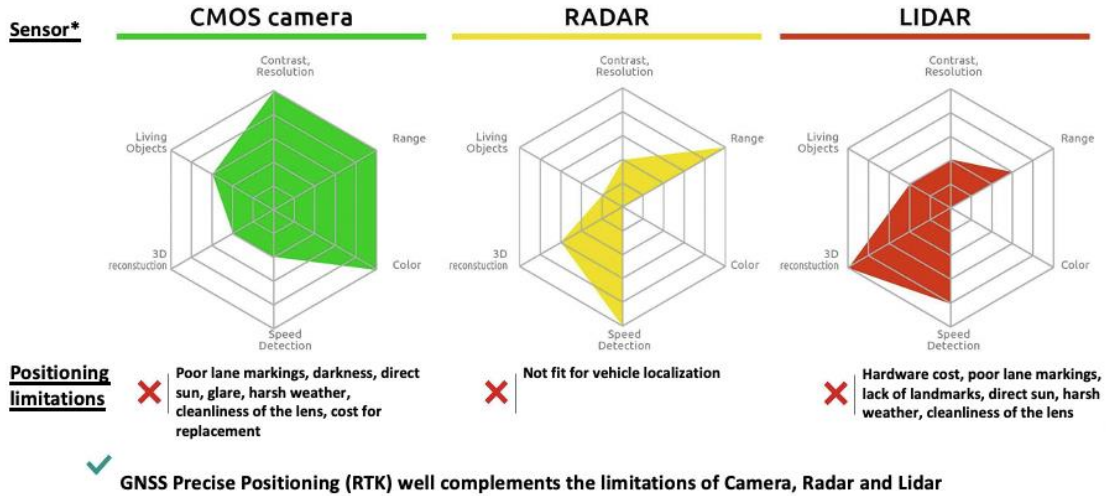
การเคลื่อนที่ของรถยนต์บนถนนจำเป็นต้องมีความน่าเชื่อถือ (Reliability) การสื่อสาร 4G LTE/5G เป็นการสื่อสารที่มีความน่าเชื่อถือได้มากที่สุดในปัจจุบัน หลัก ๆ 5G จำเป็นที่ต้องมีเพื่อหลีกเลี่ยงการชน (Collision Avoidance)

รูปที่ 5-1 แสดงข้อจำกัดของอุปกรณ์เซนเซอร์ที่ติดตั้งในรถยนต์ไร้คนขับ ในปัจจุบัน *การยั่ว GPS* หรือ *GPS Spoofing* สามารถทำได้ง่าย ใช้อุปกรณ์ที่มีราคาถูกลง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว การใช้ GPS จากโครงข่ายสื่อสาร 5G จะทำให้ GPS มีความน่าเชื่อถือกว่าการใช้ GPS ที่ติดตั้งบนรถยนต์ไร้คนขับอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 5-2 และตาม 3GPP Release 18 ใน control plane และ การ tracking ด้วย beam forming ของสายอากาศของเทคโนโลยี 5G จะทำให้ ความแม่นยำ (Accuracy) ของ 5G มีความแม่นยำมากกว่า GPS ที่ติดตั้งเฉพาะในรถยนต์ไร้คนขับ โดยจะมีความแม่นยำในระดับแนวนอน (1-2 ซม.) และแนวตั้ง (3-5 ซม.) ความแม่นยำของ GPS นี้สามารถเรียกได้ว่าเป็น RTK/Hyper Precision Location ซึ่งจะช่วยให้การทำ HD Map สำหรับรถยนต์ไร้คนขับง่ายมากขึ้นในอนาคต

- การรักษาความปลอดภัย (Security)

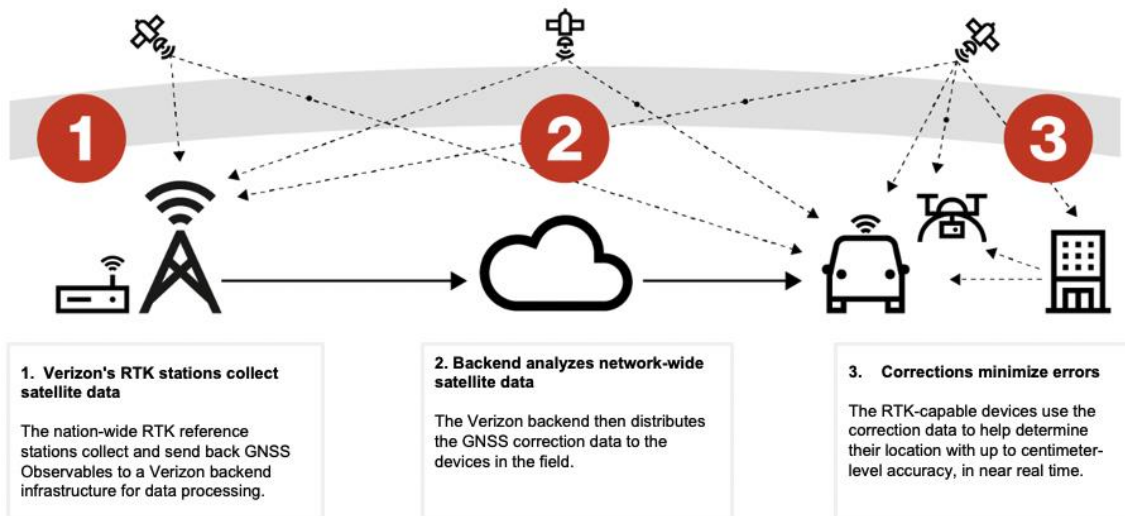
Cyber Security หรือ การทำให้การควบคุมรถยนต์ไร้คนขับ ขาดประสิทธิภาพจะต้องทำการ jam ทุกย่านความถี่และทุก base station ซึ่งแทบเป็นไปไม่ได้

Limitations of Camera / Radar / Lidar

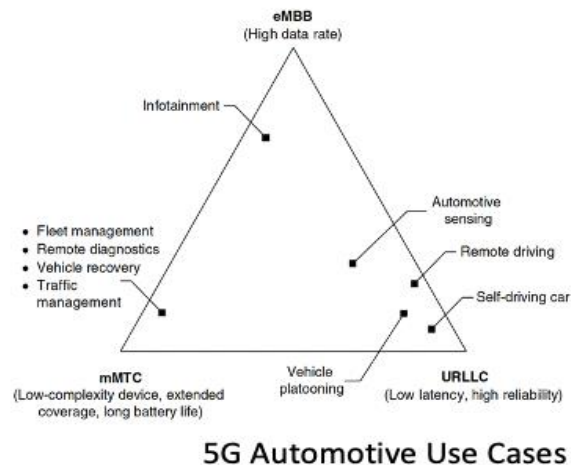
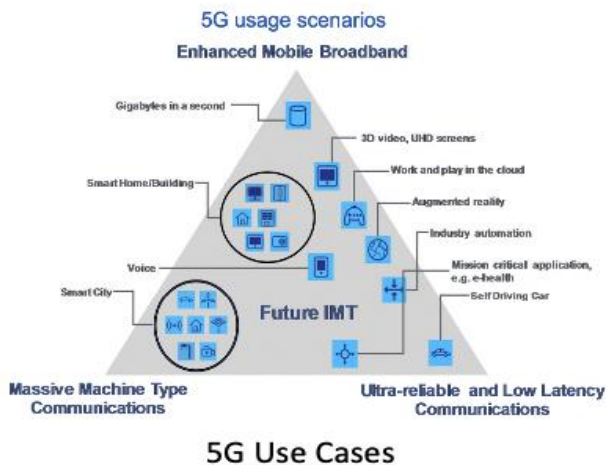


รูปที่ 5-1 ข้อจำกัดของเซนเซอร์ กล้อง Radar และ LiDAR

Carrier network is a perfect solution to fix GNSS errors



รูปที่ 5-2 GNSS ที่ได้จากโครงข่ายสื่อสาร 5G



รูปที่ 5-3 Use Cases สำหรับวิศวกรรมยานยนต์กับเทคโนโลยี 5G

Vehicle Applications (Vehicle App) ของ C-V2X จะทำให้เกิดข้อมูลที่ ต้องส่งขึ้น มากขึ้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าทราฟฟิกของ uplink เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดอัตราการรับส่งข้อมูล uplink มากขึ้น และทำให้เกิดความไม่สมดุลของการสื่อสารทางวิทยุของโครงข่ายสื่อสาร 5G

เทคโนโลยีหรือวิศวกรรมรถยนต์ไร้คนขับระดับที่ 1 ได้แก่ adaptive cruise control (ACC) และ early warning ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทยในปัจจุบัน ทั้งนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ขวามือ) Use Cases ต่าง ๆ สำหรับวิศวกรรมยานยนต์กับเทคโนโลยี 5G รถยนต์ไร้คนขับในระดับที่ 2 และ ระดับที่ 3 หรือที่เรียกว่า semi-automated driving ต้องการรับส่งข้อมูลที่สูงถึง 0.55 Mbps สำหรับ V2V และ 0.5 Mbps สำหรับ V2I และต้องการความหน่วงเวลา (Latency) 100 มิลลิวินาที

ส่วนรถยนต์ไร้คนขับในระดับที่ 4 และ ระดับที่ 5 หรือที่เรียกว่า automated driving ครบ ต้องการรับส่งข้อมูลที่ สูงถึง 53 Mbps สำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างรถยนต์กับรถยนต์ และ 50 Mbps สำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างรถยนต์กับโครงสร้างพื้นฐาน และต้องการความหน่วงเวลา (Latency) ด้วยความน่าเชื่อถือ 99.99% เนื่องจากการสื่อสาร Uplink ของ รถยนต์ไร้คนขับในระดับที่ 4 และ ระดับที่ 5 มีปริมาณข้อมูลมากกว่า ความจุ หรือ อัตราการส่งข้อมูล Uplink ภายใน 1 Cell site ของการสื่อสาร 5G ในย่านความถี่ 2.6 GHz จึงจะทำให้ไม่สามารถรองรับจำนวน รถยนต์ไร้คนขับในระดับที่ 4 และ ระดับที่ 5 ได้มากกว่า 5 คัน ในพื้นที่ประมาณ 1 ตารางกิโลเมตร ด้วยเหตุนี้ ในอนาคตจึงจะต้องติดตั้งเตรียมความพร้อมของโครงข่ายสื่อสาร 5G ที่ใช้ย่านความถี่ mmWave หรือ การประมูลย่านความถี่ใหม่เพื่อให้มีความจุหรืออัตราการรับส่งข้อมูลที่เพียงพอ

จากการทดสอบพบว่า CPE สีขาวที่ผลิตจากประเทศจีน มีคุณสมบัติที่ไม่สามารถรับส่งข้อมูลที่ความเร็วสูงได้เลย รวมทั้งจะมีปัญหาในการ handover ระหว่างสถานีฐาน ในขณะที่ CPE สีดำที่ผลิตจากประเทศไต้หวัน

สามารถรับส่งข้อมูล uplink/downlink ที่อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput) โดยประมาณ 50 Mbps โดยมี packet error น้อยกว่า 5% และมีปัญหา handover ระหว่างสถานีฐานน้อยกว่า (ดังแสดงในผลการทดลองทดสอบในบทที่ 3.2 และภาคผนวก ก) ทั้งนี้เนื่องจาก CPE สีดำที่ผลิตจากไต้หวันมีจำนวนสายอากาศติดตั้งประจำตัวแบบ 4x4 MIMO ในขณะที่ CPE สีขาวที่ผลิตจากประเทศจีน เป็นสายอากาศแบบ 2x2 พลาแนร์ และอาจมีปัญหาเรื่อง chip ที่ใช้เนื่องจากปัญหาที่กีดกันทางการค้าหรือภูมิรัฐศาสตร์

จากเหตุผลสำคัญข้างต้น คณะวิจัยมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสื่อสาร 5G สำหรับรถยนต์ไร้คนขับ ดังต่อไปนี้

1. เลือกใช้อุปกรณ์ 5G ที่มี chip set ที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อให้รถยนต์ไร้คนขับสามารถเคลื่อนที่ข้าม cell site ได้ง่าย
2. ปรับสัดส่วนอัตราการรับส่งข้อมูล uplink/downlink ให้มีสัดส่วน uplink มากขึ้น ทั้งนี้อาจต้องมีการแก้ไขของ กสทช หรือ การจัดหาและใช้ย่านความถี่ใหม่ ๆ เพื่อรองรับจำนวนรถยนต์ไร้คนขับที่เพิ่มขึ้นหรือรองรับรถยนต์ไร้คนขับในระดับที่ 4 และ 5 ในอนาคต
3. พัฒนา RTK/Hyper Precision Location หรือ เทคโนโลยี 5G ที่สามารถเพิ่มความแม่นยำของการระบุตำแหน่งรถยนต์ไร้คนขับในอนาคต

5.2.3 ข้อมูลและUse case

จากการศึกษา พัฒนา และทดสอบ Use Cases นั้น ทางผู้วิจัยได้สรุปข้อเสนอแนะ และแนวทางในการพัฒนาแยกตามโมดูลต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) โมดูลตรวจจับอาการง่วงนอน (Drowsiness Detection Module)

จากปัญหาในการตรวจสอบอาการง่วงนอนของผู้ขับขี่ในสภาพแวดล้อมจริง จึงได้มีการปรับปรุงการทำงานให้มีความแม่นยำที่สูงขึ้น โดยการนำโมเดลอื่น ๆ มาทดสอบการทำงาน เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ในโครงการ โดยมีโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

- E-ML: Enhanced Machine Learning Algorithm เป็นอัลกอริทึมที่ทางผู้วิจัยได้พัฒนาต่อยอดตามที่ได้กล่าวไว้แล้วใน หัวข้อ 3.4.2
- Dlib68: shape_predictor_68_face_landmarks (by Davis E. King) (Rajasekar, 2020) เป็นโมเดลใหม่ที่น่ามาวิเคราะห์ ซึ่งโมเดลนี้จับภาพใบหน้า 68 จุด
- MediaPipe Face Mesh (by Google) (MediaPipe, 2023) เป็นโมเดลใหม่ที่พัฒนาโดย Google โมเดลนี้ทำ 3D Facial Landmark 468 จุด

ซึ่งแต่ละโมเดลจะถูกทดสอบประสิทธิภาพการตรวจจับใบหน้าที่ได้จากวิดีโอที่ได้จากการทดลองเดินรถในสภาพแวดล้อมจริงเป็นจำนวน 3,780 เฟรม และการใช้ทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ ได้แก่ หน่วยประมวลผล (CPU) และหน่วยความจำ (Memory) ในระหว่างการทำงาน เมื่อทำการวิเคราะห์โมเดลการเรียนรู้ของเครื่องที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมต่อการใช้งานในรถขับอัตโนมัติเรียบร้อยแล้ว โมเดลดังกล่าวจะถูกทดสอบการทำงานกับ



ภาพวิดีโอการทดลองการเดินรถเดิมที่ค่าความละเอียดแตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ความละเอียดวิดีโอที่ส่งผลให้โมเดลมีประสิทธิภาพการทำงานคุ้มค่าต่อทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์และเครือข่ายที่ใช้มากที่สุด ได้แก่

- 1280x720 (720p)
- 854x480 (480p)
- 640x360 (360p)
- 640x320 (ค่าเริ่มต้นใช้งานสำหรับกล้องที่จับใบหน้าผู้ขับขี่ในโครงการนี้)
- 426x240 (240p)
- 192x144 (144p)

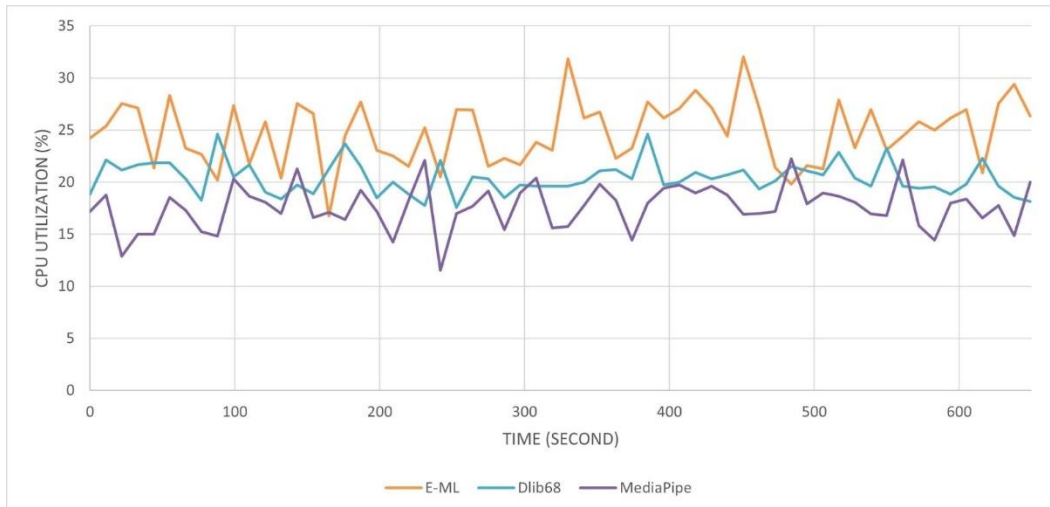
จากผลลัพธ์การตรวจจับใบหน้ากับภาพวิดีโอผู้ขับขี่ขณะการทดสอบรถขับขี่อัตโนมัติจำนวน 3780 เฟรม พบว่า อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องฉบับปรับปรุง E-ML, Dlib68, และ MediaPipe Face Mesh สามารถทำการตรวจจับบริเวณใบหน้าและดวงตาของผู้ขับขี่ได้เป็นจำนวน 213 เฟรม (5.63%), 1,064 เฟรม (28.15%) และ 3,044 เฟรม (80.53%) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5-4





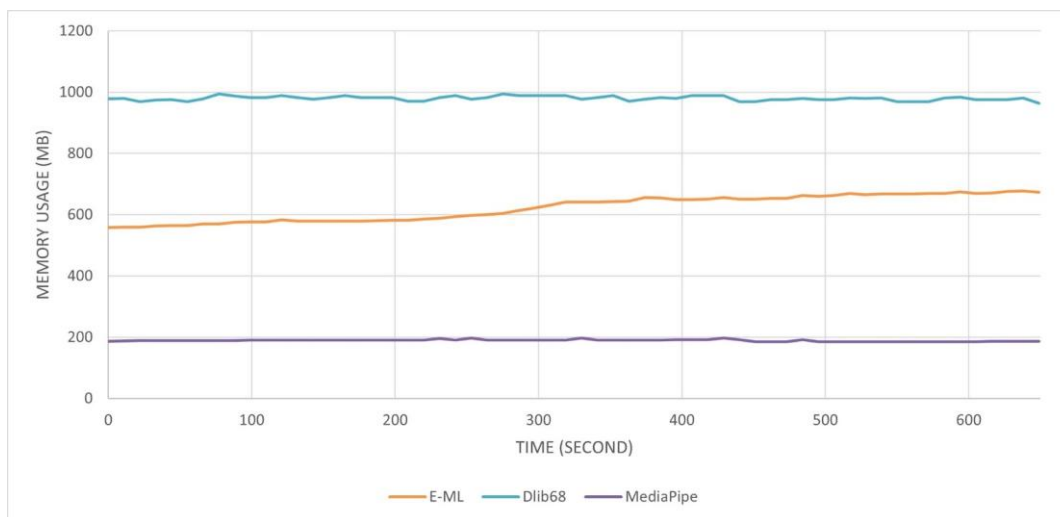
รูปที่ 5-4 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบผลลัพธ์การตรวจจับใบหน้าของ E-ML (ซ้าย), Dlib68 (กลาง), และ MediaPipe Face Mesh (ขวา)

จากการทดสอบการใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ระหว่างการทำงานของแต่ละโมเดลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำงานด้วยซีพียู AMD Ryzen 5 3550H ที่มี Base Clock ที่ 2.1 GHz และ Max. Boost Clock ที่ 3.7GHz พบว่า E-ML มีค่า CPU Utilization เฉลี่ยที่ 24.77% ในขณะที่ Dlib68 และ MediaPipe Face Mesh มีค่าดังกล่าวอยู่ที่ 20.40% และ 17.59% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5-5



รูปที่ 5-5 การเปรียบเทียบ CPU Utilization ของแต่ละโมเดล

จากการทดสอบการใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ระหว่างการทำงานของแต่ละโมเดลพบว่า E-ML มีการใช้งาน Memory เฉลี่ยที่ 622.17 MB ในขณะที่ Dlib68 และ MediaPipe Face Mesh มีค่าดังกล่าวอยู่ที่ 979.81 MB และ 189.41 MB ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5-6



รูปที่ 5-6 การเปรียบเทียบการใช้งานหน่วยความจำของแต่ละโมเดล

ค่าประสิทธิภาพการตรวจจับใบหน้าและค่าการใช้ทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์เฉลี่ยในแต่ละโมเดล ดังแสดงในตารางที่ 5-1 แสดงให้เห็นว่า MediaPipe Face Mesh มีประสิทธิภาพการตรวจจับใบหน้าได้สูงที่สุด

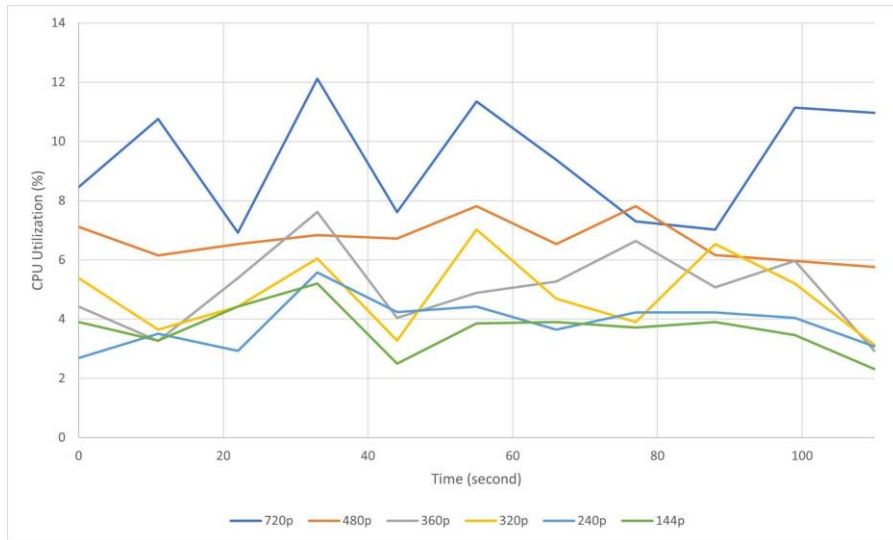
และใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์น้อยที่สุดทั้ง CPU และ Memory ดังนั้นโมเดลนี้จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถใช้ทดแทนโมเดลเดิมที่ใช้อยู่ได้

ตารางที่ 5-1 สรุปผลการทดสอบ

Model	Detection Performance (%)	Avg. CPU Utilization (%)	Avg. Memory Usage (MB)
E-ML	5.63	24.77	622.17
Dlib68	28.15	20.40	979.81
MediaPipe Face Mesh	80.53	17.59	189.41

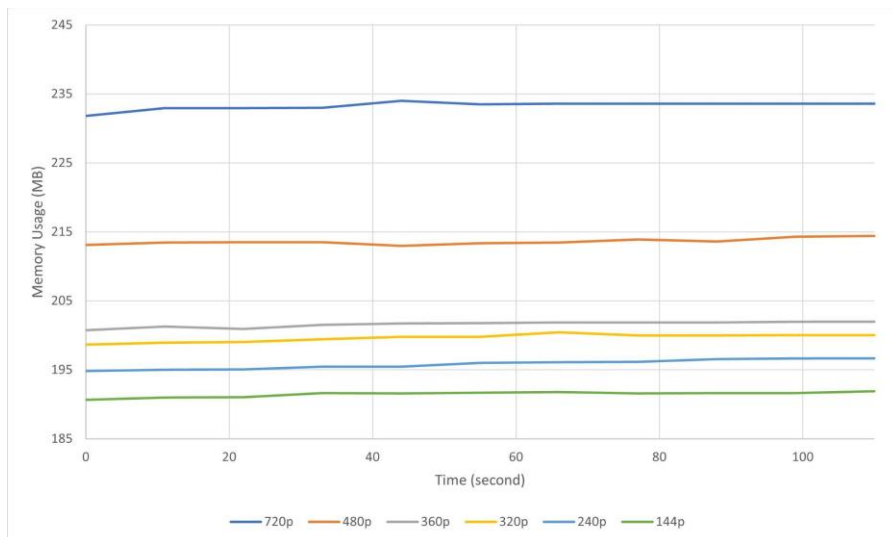
ในส่วนการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความละเอียดวิดีโอที่มีความเหมาะสมต่อการทำงานในสภาพแวดล้อมจริง จึงได้ทำการทดสอบการทำงานกับ MediaPipe Face Mesh ต่อและได้ผลลัพธ์เป็นประสิทธิภาพการตรวจจับใบหน้าโดย ค่าความละเอียด 144p สามารถตรวจจับได้ 2,911 เฟรม (78.25%), ค่าความละเอียด 240p สามารถตรวจจับได้ 2,910 เฟรม (78.22%), ค่าความละเอียด 640x320 สามารถตรวจจับได้ 3,067 เฟรม (82.45%), ค่าความละเอียด 360p สามารถตรวจจับได้ 3,049 เฟรม (81.96%), ค่าความละเอียด 480p สามารถตรวจจับได้ 3,027 เฟรม (81.37%), และค่าความละเอียด 720p สามารถตรวจจับได้ 2,995 เฟรม (80.51%)

จากการทดสอบการใช้ทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ระหว่างการทำงานของ MediaPipe Face Mesh ที่แต่ละค่าความละเอียดวิดีโอบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำงานด้วยซีพียู AMD Ryzen 5 3550H ที่มี Base Clock ที่ 2.1 GHz และ Max. Boost Clock ที่ 3.7GHz พบว่า ค่าความละเอียด 144p, 240p, 640x320, 360p, 480p, และ 720p มีค่า CPU Utilization เฉลี่ยที่ 3.68%, 3.87%, 4.84%, 5.04%, 6.67%, และ 9.36% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5-7



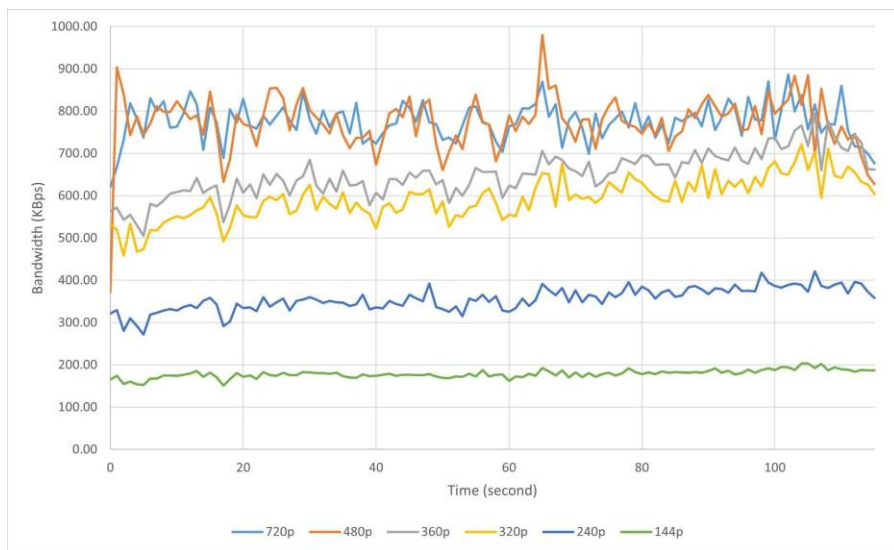
รูปที่ 5-7 CPU Utilization ของ MediaPipe Face Mesh ที่ทำงานกับวิดีโอที่มีค่าความละเอียดต่าง ๆ

จากการทดสอบการใช้ทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์ระหว่างการทำงานของ MediaPipe Face Mesh พบว่า ค่าความละเอียด 144p, 240p, 640x320, 360p, 480p, และ 720p มีการใช้งาน Memory เฉลี่ยที่ 191.45 MB, 195.80 MB, 199.65 MB, 201.59 MB, 213.59 MB, และ 233.28 MB ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5-8



รูปที่ 5-8 Memory Usage ของ MediaPipe Face Mesh ที่ทำงานกับวิดีโอที่มีค่าความละเอียดต่าง ๆ

จากการทดสอบการใช้แบนด์วิดท์ระหว่างการทำงานของ MediaPipe Face Mesh พบว่า ค่าความละเอียด 144p, 240p, 640x320, 360p, 480p, และ 720p มีการใช้งานแบนด์วิดท์ (Bandwidth) เฉลี่ยที่ 178.78 Kbps, 355.76 Kbps, 596.62 Kbps, 650.61 Kbps 773.11 Kbps, และ 775.55 Kbps ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5-9และตารางที่ 5-2



รูปที่ 5-9 แบนด์วิธของ MediaPipe Face Mesh ที่ทำงานกับวิดีโอที่มีค่าความละเอียดต่าง ๆ
 ตารางที่ 5-2 สรุปผลการทดสอบของ MediaPipe Face Mesh ที่ทำงานกับวิดีโอที่มีค่าความ
 ละเอียดต่าง ๆ

Resolution	Detection Performance (%)	Avg. CPU Utilization (%)	Avg. Memory Usage (MB)	Avg. Bandwidth (Kbps)
144p	78.25	3.68	191.45	178.72
240p	78.22	3.87	195.80	355.76
640x320	82.45	4.84	199.65	593.62
360p	81.96	5.04	201.59	650.61
480p	81.37	6.67	213.59	773.11
720p	80.51	9.36	233.28	775.55

จากผลการทดสอบพบว่าค่าความละเอียด 640x320 มีค่า Detection Performance สูงที่สุดในความละเอียดทั้งหมดอยู่ที่ 82.45% ซึ่งมี CPU Utilization และ Memory Usage ไม่แตกต่างจากความละเอียด 240p และ 360p อย่างมีนัยสำคัญจึงแสดงให้เห็นว่าที่ความละเอียด 640x320 ให้ประสิทธิภาพการทำงานต่อการใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูงสุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอให้ใช้ค่าความละเอียดวิดีโอที่ 640x320 ในการทำงานของโมดูลตรวจจับอาการง่วงนอน

กล่าวโดยสรุปคือ การตรวจจับอาการง่วงนอนด้วย MediaPipe Face Mesh ที่ถูกพัฒนาโดยบริษัท Google นั้นมีประสิทธิภาพสูงที่สุด และเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าต่อทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์และเครือข่ายควรใช้ความละเอียดของวิดีโอที่ 640x320

2) โมดูลนับจำนวนผู้โดยสาร (Passenger Counting Module)

จากผลการทดสอบนับจำนวนผู้โดยสารด้วยโปรแกรมที่ติดมากับกล้องที่จับภาพประตุนั้นสามารถเพิ่มความแม่นยำและเพื่อให้ใช้งานกับกล้องทั่วไปได้ ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบโมเดลระบุวัตถุที่เป็นที่นิยมชื่อว่า YOLOX (Ge, 2021) เพิ่มเติม

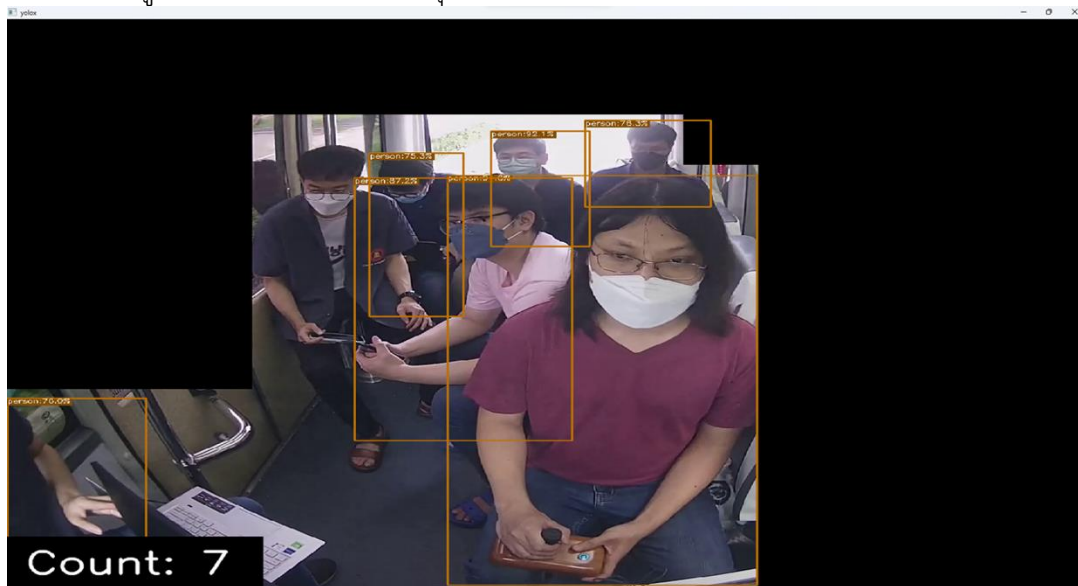
โดย YOLOX นั้นพัฒนามาจาก YOLO ซึ่งเป็นโมเดลตรวจจับวัตถุ ซึ่งใช้ Anchor-Free Architecture จึงช่วยลดเวลาการทำงานลงได้มากกว่า YOLO เดิม โดยตัวโมเดลจะแบ่งออกเป็นหลายขนาด ได้แก่ YOLOX_s, YOLOX_m, YOLOX_l, และ YOLOX_x โดยส่วนที่ต่างกัน คือ ขนาดของชุดข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้ของโมเดลซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการระบุวัตถุ จากการทดลองระบุวัตถุที่เป็นผู้โดยสารภายในรถบัสนั้น โมเดล YOLOX_m ให้ค่าประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุดในทรัพยากรที่จำกัด

การทดสอบเบื้องต้นนั้นจะใช้วิดีโอที่มีจำนวนผู้โดยสารคงที่และใช้กล้องที่ติดตั้งด้านหน้าเป็นหลัก ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองมี 2 ตัว คือ (1) Confidence Threshold เป็นค่าที่ตัวโมเดลนั้นมั่นใจว่าวัตถุในภาพเป็นวัตถุที่โมเดลทำนายก็เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการกำหนดช่วงตัวแปรนี้หมายความว่า หากวัตถุใดในรูปนั้นโมเดลทำนายต่ำกว่าค่าที่กำหนด โมเดลจะไม่พิจารณาว่าวัตถุนั้นคน (2) Non-Maximum Suppression (Nla) ในการทำนายวัตถุในภาพนั้น การกำหนดขอบเขตของวัตถุนั้นสามารถทำนายได้หลายตำแหน่ง โดย NMS จะเป็นตัวกำหนดว่าหากมีพื้นที่ที่โมเดลคิดว่าเป็นวัตถุนั้นจริงหลายพื้นที่และเกิดการซ้อนทับกันมากกว่าค่าที่กำหนด โมเดลจะรวมกล่องทั้งหมดและนับเป็นหนึ่งวัตถุ

กระบวนการเรียนรู้ของเครื่องในขั้นต้นจำเป็นต้องมีการเตรียมข้อมูลก่อน (Data Preparation) เนื่องจากมีโอกาสที่โมเดลอาจจะระบุวัตถุผิดพลาดได้ ดังแสดงในรูปที่ 5-10 โดยการตัดพื้นที่ที่ไม่เกี่ยวข้องออก ดังแสดงในรูปที่ 5-11



รูปที่ 5-10 ตัวอย่างการระบุคนผิดพลาดเมื่อไม่ทำการตัดพื้นที่โดยรอบก่อน



รูปที่ 5-11 การตัวอย่างเฟรมที่ทำการตัดพื้นที่ออกก่อนแล้ว

เนื่องจากการระบุจำนวนผู้โดยสารในกรณีที่จำนวนไม่เปลี่ยนแปลง ค่าที่ทำนายได้ควรจะเป็นค่าคงที่ เพื่อลดความผิดพลาดในการระบุคนในบางเฟรม ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เป็นค่าฐานนิยมของทุก ๆ 100 เฟรม เพื่อเป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของภาพว่ามีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนคนมากน้อยเพียงใด

จากผลการทดสอบโดยใช้ค่า Confidence Threshold ที่ 0.45 และ NMS ที่ 0.54 กับกล้องที่ติดตั้งหน้า โดยมีภาพตัวอย่างกล้องที่ติดตั้งหน้าดังรูปที่ 5-12 พบว่า ได้ค่าความแม่นยำอยู่ 97.83% ซึ่งถือว่ามีค่าความแม่นยำที่สูงมาก โดยในอนาคตสามารถนำภาพที่ติดตั้งหลังดังรูปที่ 5-13 มาช่วยในการเพิ่มความแม่นยำสำหรับ นับจำนวนผู้โดยสารในมุมมองของกล้องที่ติดตั้งหน้าด้วยได้



รูปที่ 5-12 ตัวอย่างภาพจากกล้องที่ติดตั้งหน้า



รูปที่ 5-13 ตัวอย่างภาพจากกล้องที่ติดด้านหลัง

3) โมดูลสตรีมมิ่งวิดีโอหลายแหล่งแบบเรียลไทม์ (Real-Time Multi-Video Streaming Module)

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าการส่งสัญญาณภาพแบบลดขนาดนั้นเพียงพอต่อการใช้งานในการนำไปแสดงผลและประมวลผลเพิ่มเติมในอนาคต แต่ทั้งนี้เนื่องจากการแปลงสัญญาณภาพของ Streaming Module ทำงานได้ช้า จึงส่งผลต่อความเรียลไทม์ในการรับชมภาพ เพื่อลดความล่าช้าของวิดีโอผู้วิจัยแนะนำให้พิจารณาโปรโตคอล WebRTC ซึ่งเป็นโปรโตคอลสำหรับการสื่อสารแบบเรียลไทม์สำหรับเว็บไซต์มาปรับใช้งานแทน เพื่อให้ภาพที่ได้มีความเรียลไทม์มากยิ่งขึ้น

4) โมดูลการแจ้งเตือนการเกิดอุบัติเหตุ (Accident Notification Module)

ปัจจุบันการแจ้งเตือนการเกิดอุบัติเหตุเป็นการให้ผู้ขับขี่กดปุ่มขอความช่วยเหลือด้วยตนเองผ่านทางหน้าจอ Touchscreen บนรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ ในอนาคตสามารถเพิ่มการติดต่อสื่อสารระหว่างเซนเซอร์ในรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถส่งข้อมูลเซนเซอร์จากรถขับเคลื่อนอัตโนมัติรายงานไปยังศูนย์กลางได้โดยตรง ทางศูนย์กลางก็จะสามารถให้ความช่วยเหลือได้อย่างทันที่มากยิ่งขึ้น

5) เว็บแอปพลิเคชันการจัดการและแดชบอร์ดสำหรับสังเกตการณ์ (Management Web Application and Monitoring Dashboard)

เว็บแอปพลิเคชันการจัดการและแดชบอร์ดสำหรับสังเกตการณ์ถูกติดตั้งบนเครื่องแม่ข่ายสาธารณะเพียง 1 เครื่องสำหรับการรับข้อมูลจากรถขับอัตโนมัติ 3 คัน จากผลการทดลองโมดูลสตรีมมิงวิดีโอหลายแหล่งแบบเรียลไทม์ร่วมกับโมดูลอื่น ๆ นั้นเครื่องแม่ข่ายสาธารณะ 1 เครื่องสามารถรองรับภาระงานเหล่านี้ได้อยู่ หากต้องการนำระบบไปใช้กับระบบขนส่งสาธารณะหรือระบบอื่น ๆ ที่มีปริมาณรถขับอัตโนมัติมากขึ้น จำเป็นต้องพิจารณาถึงการกระจายงานไปยังเครื่องแม่ข่ายมากกว่า 1 เครื่อง (Load Balancing) เพื่อให้สามารถรองรับปริมาณข้อมูลที่มากขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กล่าวโดยสรุปแล้ว การพัฒนา Use Cases ในรถขับอัตโนมัติให้เกิดขึ้นได้นั้นจะเป็นต้องอาศัยความร่วมมือกันระหว่างภาครัฐ ภาคเอกชน และสถานศึกษา เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ประมวลผลที่สามารถรองรับการประมวลผลบริการต่าง ๆ จำนวนมากได้ รวมไปถึงผู้ให้บริการเครือข่ายในการให้ความร่วมมือพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสำหรับรองรับปริมาณข้อมูลจำนวนมากที่จะเกิดขึ้นต่อไปในอนาคต

ตัวอย่าง Use Cases เพิ่มเติมที่สามารถเกิดขึ้นได้ในรถขับอัตโนมัติ เช่น

(1) การจำแนกวัตถุโดยรอบ (Semantic Segmentation) โดยวิเคราะห์ภาพและฉากในช่วงเวลาต่าง ๆ ผ่านการประมวลผลภาพรอบตัวรถขับอัตโนมัติ ซึ่งทำให้รถสามารถเข้าใจสภาพแวดล้อมได้เหมือนกับที่มนุษย์เข้าใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การเข้าใจปริมาณรถแต่ละประเภท เช่น รถยนต์ รถบรรทุก รถบัส ก็สามารถทำให้คาดคะเนปริมาณฝุ่นที่มีอยู่ในอากาศได้ หรือด้านสังคมและเศรษฐกิจ ทำให้สามารถเข้าใจคุณภาพชีวิต (Quality of Life) และทำให้การจัดการคุณภาพชีวิตในย่านต่าง ๆ เหมาะสมยิ่งขึ้น (Thitisiriwech, 2023 (1)) (Thitisiriwech, 2023 (2))

(2) การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมหรือมลภาวะอากาศผ่านเซนเซอร์ต่าง ๆ เช่น เซนเซอร์วัดค่าฝุ่น เซนเซอร์วัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เซนเซอร์อุณหภูมิ เซนเซอร์แสง เป็นต้น (Pielecha, 2022)

(3) การวิเคราะห์จำนวนและพฤติกรรมของผู้โดยสาร ณ จุดจอดรถต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้สามารถจัดตารางการเดินทางได้อย่างเหมาะสมกับผู้โดยสาร ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อไป

(4) การประชุมทางไกลและการเล่นเกม ในปัจจุบันข้อมูลถูกส่งผ่านแค่ภาพหรือคลิปวิดีโอ ในอนาคตสามารถประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยี ความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality) และความเป็นจริงเสมือน (Virtual Reality) รวมถึงฮอโลแกรมสามมิติ (3D Hologram) แบบเรียลไทม์จากรถยนต์คันหนึ่งไปยังคันอื่น ๆ ได้ (V2V) โดยแอปพลิเคชันเหล่านี้ต้องการแบนด์วิดท์สูงและเวลาตอบสนองต่ำ สิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิด User Experiences ที่แตกต่างไปจากเดิมอีกมากมาย (Chen, 2019)

5.3 แนวทางการกำหนดนโยบายภาครัฐต่อเทคโนโลยีรถไร้คนขับและการสื่อสารที่เกี่ยวข้อง

ในด้านรถอัตโนมัติเพื่อให้ประเทศมีความพร้อมทั้งด้านการใช้งาน และด้านเทคโนโลยีในการวิจัยและพัฒนา ควรพุ่งเป้าไปที่ 4 ด้าน คือ



- 1) ด้านเทคโนโลยี
- 2) ด้านนโยบาย กฎระเบียบข้อบังคับ และมาตรฐาน
- 3) ด้านโครงสร้างพื้นฐาน
- 4) ด้านการยอมรับของผู้บริโภค

5.3.1 ด้านเทคโนโลยี

ข้อแรก ควรมีการผลิตบุคลากรที่มีความรู้ด้านระบบอัตโนมัติ โดยเน้นที่การเรียนรู้ผ่านการทำงานวิจัยพัฒนาที่ได้ลงมือทำจริง ดังนั้นการให้ทุนวิจัยจากหน่วยงานรัฐจึงมีความจำเป็นในการสร้างบุคลากรเหล่านี้ได้ และเพื่อยกระดับงานวิจัยและพัฒนาดังกล่าว จำเป็นต้องมีการกำหนดประเด็นและหัวข้อวิจัยและให้ทุนวิจัยที่ชัดเจน และต่อเนื่อง สอดคล้องกับความต้องการของภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์อัตโนมัติและเชื่อมต่อ (CAV) รวมทั้งมีกลไกในการถ่ายทอดเทคโนโลยี (Technology transfer) เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างการวิจัยและพัฒนาและการนำผลการวิจัยไปต่อยอดในเชิงพาณิชย์อย่างเป็นรูปธรรม ทั้งนี้รูปแบบของการให้ทุนวิจัยควรมีความสอดคล้องกับแผนที่นำทางของเทคโนโลยีที่ต้องการพัฒนา และควรมีระบบติดตามและประเมินผลที่มีประสิทธิภาพด้วย

ข้อต่อมา ควรมีการผลิตบุคลากรที่มีความรู้ด้านการสื่อสาร 5G และสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง เช่น core network, วิศวกรรมวิทยุ (radio engineering), วิศวกรรมสายอากาศ, การบีบอัดสัญญาณภาพและวิดีโอ, การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล, การรักษาความปลอดภัยข้อมูล, ช่ายคอมพิวเตอร์ (computer network), อินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง (IoT), และ ระบบคอมพิวเตอร์ฝังตัว (embedded system) โดยเน้นที่การเรียนรู้ผ่านโครงการวิจัยและพัฒนา ได้มีโอกาสได้ลงมือทำจริงร่วมกับทางโอเพอร์เรเตอร์ ผู้ผลิตอุปกรณ์ทดสอบโครงข่าย และผู้ผลิตอุปกรณ์สื่อสาร โดยให้ทุนวิจัยตลอดทั้ง value chain ตั้งแต่การผลิตอุปกรณ์สื่อสาร การรวมระบบ (system integration) การประยุกต์ใช้งาน โดยเน้นส่งเสริมให้เกิดระบบนิเวศน์ 5G, อุตสาหกรรมการผลิต และการพัฒนาธุรกิจของการสื่อสาร 5G สำหรับรถยนต์ไร้คนขับ หรือ C-V2X

ติดตามเทคโนโลยี 5G/B5G (Beyond 5G) /6G ตามมาตรฐานของ 3GPP ตลอดเวลา ตัวอย่างเช่น เทคโนโลยี RTK/Hyper Precision Location ผ่านโครงข่าย 5G ที่สามารถเพิ่มความแม่นยำของการระบุตำแหน่งรถยนต์ไร้คนขับในอนาคตในระดับเซนติเมตร หรือ เทคโนโลยี 6G ที่การทำงานของสายอากาศจะเสมือนกระจกที่ต้องมีการติดตั้ง Road Side Unit (RSU) ที่ต้องควบคุมด้วย AI หรือ จัดหาอุปกรณ์ 5G แบบฝังตัวที่มี chip set ที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อให้รถยนต์ไร้คนขับสามารถเคลื่อนที่ข้าม cell site ได้โดยไร้รอยต่อ เป็นต้น

ต้องมีการสร้างองค์ความรู้ผ่านโครงการวิจัยที่กำหนดหัวข้อแบบตั้งเป้า/การศึกษาและดูงาน เพื่อพัฒนาบุคลากรทางด้าน การสื่อสาร 5G และสาขาที่เกี่ยวข้อง การสร้างรายวิชาในมหาวิทยาลัยที่ทันสมัย และถ่ายทอดองค์ความรู้ที่ได้รับผ่านสื่อและประชาชน อย่างน้อยให้มีความตระหนักรู้ถึงความจำเป็นของการใช้เทคโนโลยี 5G



5.3.2 ด้านนโยบาย กฎระเบียบข้อบังคับ และมาตรฐาน

การพัฒนาเทคโนโลยีเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการพัฒนาและใช้งานรถอัตโนมัติและเชื่อมต่อ (CAV) อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการส่งเสริมให้เกิดปัจจัยเอื้อในด้านอื่นที่ไม่ใช่เทคโนโลยีด้วยเช่นเดียวกัน การออกกฎ ระเบียบ ข้อบังคับและมาตรฐานของยานยนต์ที่สอดคล้องกับเทคโนโลยีในอนาคตของ CAV จะช่วยเร่งให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีเหล่านั้น เพื่อตอบสนองกับตลาดที่จะเกิดขึ้น อาทิเช่น การออกกฎหมายจัดตั้งพื้นที่พิเศษสำหรับการทดสอบและนำร่องการใช้งานของ ยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Autonomous vehicle) และ ยานยนต์ที่มีการเชื่อมต่อกับสรรพสิ่ง (Connected vehicle) ซึ่งพื้นที่คือ Regulatory Sandbox ที่จะสามารถทำให้ผู้พัฒนาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ทั้งในและต่างประเทศ สามารถนำรถต้นแบบมาทดสอบและนำร่องการใช้งานได้ และมีการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปปรับปรุงต้นแบบต่อไป และภาครัฐเองก็สามารถเรียนรู้ในรายละเอียดรูปแบบ และวิธีการที่เหมาะสมในการจัดทำข้อกำหนดและระเบียบข้อบังคับ ที่จะต้องทำได้ผ่าน Regulatory sandbox นี้ โดยการใช้เอกชนที่ร่วมทดสอบและนำร่องการใช้งาน มีการแชร์ผลการทดลองและข้อมูลที่เป็นกับทางภาครัฐ เป็นต้น ด้านมาตรฐานเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างความเชื่อมั่นให้กับตลาดในการใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรมใหม่ ยิ่งกว่านั้นการกำหนดมาตรฐานของเทคโนโลยีจะนำไปสู่การกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมด้วย ดังนั้น เพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับตลาดในระยะยาว และสร้างอุตสาหกรรมให้เข้มแข็ง ภาครัฐและภาคเอกชนที่มีบทบาทในการกำหนดมาตรฐานจะต้องเข้ามาสร้างมาตรฐานของเทคโนโลยีและผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจนในเวลาที่เหมาะสม

เป็นที่ทราบดีแล้วว่า การสื่อสาร 5G มีคุณลักษณะหนึ่งที่สำคัญ คือ การเชื่อมโยง (connectivity) การสื่อสารระหว่างเครื่องกล-เครื่องกล (machine-to-machine) เช่นเดียวกับที่ การสื่อสาร 4G ได้สร้างให้เกิด social network ระหว่างคน-คน เมื่อใดที่จำนวนรถยนต์ไร้คนขับมีความหนาแน่นต่อพื้นที่มากขึ้น เมื่อนั้น จำเป็นต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของโครงข่ายพื้นฐานให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มากขึ้นได้ ทั้งนี้ ไม่ว่าจะเป็นการติดตั้งจำนวน base station ที่ต้องเพิ่มขึ้น ขนาดของ core network ที่ใหญ่ขึ้น หรือ ย่านความถี่ที่มีแบนด์-วิดท์กว้างขึ้นหรือย่านความถี่ใหม่ นโยบาย กฎระเบียบข้อบังคับ และมาตรฐาน จำเป็นที่จะต้องปรับปรุงให้ทันสมัยและทันต่อความต้องการของการใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น

- ปรับสัดส่วนอัตราการใช้ส่งข้อมูล uplink/downlink (UL/DL) ควรปรับให้มีสัดส่วน uplink มากขึ้น/อิสระ เนื่องจากเป็นที่ทราบดีว่าปริมาณทราฟฟิก uplink ได้เพิ่มมากขึ้น ปัจจุบันสัดส่วน UL/DL เท่ากับ 2:7 ทั้งนี้อาจต้องมีการแก้ไขของ กสทช
- กระตุ้นหรือให้สิทธิพิเศษกับโอเปอเรเตอร์ในการติดตั้งโครงข่าย 5G ย่านความถี่ mmWave เนื่องจาก coverage ย่านนี้แคบ
- จัดหาย่านความถี่ใหม่ ๆ เช่น 3.5 GHz หรือ 5.9 GHz เพื่อรองรับจำนวนรถยนต์ไร้คนขับที่เพิ่มขึ้นหรือรองรับรถยนต์ไร้คนขับในระดับที่ 4 และ 5 ในอนาคต



- กำหนด Regulatory Sandbox ทางความถี่ ร่วมกับ Regulatory Sandbox ทางการขนส่ง เพื่อที่จะสามารถทำให้ผู้พัฒนาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ทั้งในและต่างประเทศ สามารถนำรถต้นแบบที่ใช้มาทดสอบและนำร่องการใช้งานได้ ตัวอย่าง เช่น อุปกรณ์บางย่านความถี่จะมีระบบนิเวศน์ที่ใหญ่กว่า แต่ยังไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้ย่านความถี่นั้นในประเทศไทย สามารถทดลองทดสอบใน Regulatory Sandbox ทางความถี่นี้ได้ ซึ่งจะทำให้ในอนาคตเราสามารถจัดหาอุปกรณ์สื่อสาร 5G ที่มีราคาถูกอันเป็นการส่งเสริมให้ประเทศไทยมีความสามารถในการแข่งขันในตลาดโลกด้านรถยนต์ไร้คนขับด้วยการสื่อสาร 5G

นอกจากนี้ บุคลากรที่ประจำใน Regulatory Sandbox ทางความถี่ จะมีองค์ความรู้ด้านการทดลองทดสอบ เทคโนโลยี ข้อกำหนด ระเบียบข้อบังคับ และข้อจำกัดต่าง ๆ ที่สามารถถ่ายทอดให้ผู้ประกอบการรถยนต์ไร้คนขับสามารถใช้เทคโนโลยี 5G ได้อย่างถูกต้อง ในทำนองเดียวกัน บุคลากรหรือผู้วิจัยประจำ Regulatory Sandbox ทางความถี่ จะได้สร้างองค์ความรู้เพื่อเตรียมความพร้อมของโครงข่ายสื่อสาร 5G ให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้ประกอบการรถยนต์ไร้คนขับเช่นกัน

และมีการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปปรับปรุงต้นแบบต่อไป และภาครัฐเองก็สามารถเรียนรู้ในรายละเอียดรูปแบบ และวิธีการที่เหมาะสมในการจัดทำข้อกำหนดและระเบียบข้อบังคับ ที่จะต้องทำได้ผ่าน Regulatory sandbox นี้ โดยการใช้เอกชนที่ร่วมทดสอบและนำร่องการใช้งาน มีการแชร์ผลการทดลองและข้อมูลที่จำเป็นกับทางภาครัฐ เป็นต้น ด้านมาตรฐานเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างความเชื่อมั่นให้กับตลาดในการใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรมใหม่ ยิ่งกว่านั้นการกำหนดมาตรฐานของเทคโนโลยีจะนำไปสู่การกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมด้วย ดังนั้น เพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับตลาดในระยะยาว และสร้างอุตสาหกรรมให้เข้มแข็ง ภาครัฐและภาคเอกชนที่มีบทบาทในการกำหนดมาตรฐานจะต้องเข้ามาสร้างมาตรฐานของเทคโนโลยีและผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจนในเวลาที่เหมาะสม

5.3.3 ด้านโครงสร้างพื้นฐาน

ควรมีการประเมินโครงสร้างพื้นฐานด้านถนน และระบบควบคุมจราจรต่างๆ ว่าสามารถใช้งานกับรถอัตโนมัติในระดับที่ 3 ได้หรือไม่ เช่น เส้นแบ่งช่องจราจร สัญลักษณ์บนถนนและป้าย การออกแบบถนนเหมาะสมกับรถอัตโนมัติหรือไม่ เป็นต้น และมีการจัดเตรียมแผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) ของเส้นทางที่สามารถรองรับการวิ่งของรถอัตโนมัติระดับที่ 3 ก่อน แล้วจึงขยายไปยังพื้นที่อื่นๆ ระบบโครงข่ายสื่อสารต้องสามารถรองรับปริมาณการรับส่งข้อมูลจำนวนมากและมีความหน่วงต่ำ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีรถอัตโนมัติจำนวนมากวิ่งบนถนน ทั้งด้านการดาวน์โหลดแผนที่ความละเอียดสูง การแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างรถและสรรพสิ่ง เป็นต้น คลื่นความถี่และแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ที่ใช้งานได้ควรเตรียมให้เพียงพอต่อความต้องการ

ควรกำหนดเฟสของการพัฒนารถยนต์ไร้คนขับ หรือแยกประเภทของรถยนต์ไร้คนขับให้ชัดเจน เช่น แยกตามระดับความเร็ว แยกตามความปลอดภัย/การดูแล หรือ แยกตามระดับการขับขี่อัตโนมัติ เพราะแต่ละ

ประเภทของรถยนต์ไร้คนขับต่อจำนวนรถ มีความต้องการการใช้แบนด์วิดท์ ความน่าเชื่อถือได้ของระบบ และเวลาแฝง ในการสื่อสารที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะได้ออกแบบ หรือแบ่งปันทรัพยากร (resource) ด้านการสื่อสารให้เหมาะสม

5.3.4 ด้านการยอมรับของผู้บริโภค

การสร้างความตระหนักรู้ของการสื่อสาร 5G ที่ถูกต้องเป็นสิ่งสำคัญ รวมทั้งการบ่งชี้ถึงความสำคัญและความจำเป็นของเทคโนโลยี 5G ต่อรถยนต์ไร้คนขับ แก่ผู้บริโภค ผู้กำหนดนโยบาย และผู้นำไปใช้งาน จะทำให้ C-V2X เพิ่มความปลอดภัยบนท้องถนน การเพิ่มความสะดวกรสบายในการเดินทาง เพิ่มคุณภาพชีวิตให้แก่สังคม และสร้างโอกาสทางธุรกิจใหม่ ๆ ทั้งนี้ อาจสร้าง/ประกอบรถยนต์ไร้คนขับที่มีระดับการขับขี่อัตโนมัติอย่างง่ายก่อน จากนั้นทำการประชาสัมพันธ์ และทำการผลิตในเชิงพาณิชย์ โดยอาจทำบนแพลตฟอร์ม EV รถดัดแปลงก่อน ซึ่งจะเป็นการสร้างมูลค่าให้กับอุตสาหกรรมสองอุตสาหกรรมไปพร้อมกัน ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายในการประกอบจะมีราคาถูกลงและสามารถแข่งขันในเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งจะทำให้ประชาชนให้ความสนใจ ยอมรับ และสนับสนุนเทคโนโลยีรถยนต์ไร้คนขับต่อไป

ควรมีการจัดให้มีการสื่อสารข้อมูลที่ถูกต้องและครบถ้วนเกี่ยวกับรถอัตโนมัติ และเชื่อมต่อ (CAV) แก่ผู้บริโภค เพื่อให้ทราบถึงความสามารถ ข้อจำกัด และประโยชน์ที่จะได้รับจากการนำเทคโนโลยี CAV มาใช้ ทั้งในด้านเพิ่มความปลอดภัยบนท้องถนน การเพิ่มความสะดวกรสบายในการเดินทางซึ่งเป็นการเพิ่มคุณภาพชีวิตให้แก่สังคม และทำให้เกิดโอกาสทางธุรกิจใหม่ๆซึ่งสามารถเป็นหนึ่งในตัวขับเคลื่อนทางเศรษฐกิจของประเทศได้ต่อไปในอนาคต และเพื่อให้เกิดประสบการณ์ตรงในการใช้งานรถอัตโนมัติ การจัดให้มีการนำร่องการใช้งานรถอัตโนมัติรับส่งผู้โดยสารในเส้นทางเฉพาะและมีความเร็วต่ำ (Low Speed Autonomous Shuttle in predefined route) ก่อนเป็นอันดับแรก เพราะมีความปลอดภัยและยังไม่ติดในข้อกำหนดต่างๆเท่ากับรถที่วิ่งบนถนนสาธารณะ และมีโอกาสทางธุรกิจมากกว่า สามารถดำเนินการในพื้นที่ปิดต่างๆ เช่น พื้นที่พักอาศัย มหาวิทยาลัย นิคมอุตสาหกรรม พื้นที่พิเศษทางเศรษฐกิจหรือด้านวิจัยพัฒนา อาทิ EECi พื้นที่ของหน่วยงานรัฐ เช่น ศูนย์ราชการ เป็นต้น และมีการเก็บข้อมูลการนำร่องการใช้งาน ทั้งในส่วนของข้อมูลการวิ่งและทำงานของรถอัตโนมัติ และข้อมูล Feedback จากผู้โดยสาร เพื่อนำมาปรับปรุงการให้บริการ และพัฒนาระบบให้มีความสามารถ และตอบสนองกับผู้บริโภคได้มากขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- 3GPP. (2022-03). 3GPP TS 38.215 V16.5.0 NR; Physical layer measurements. Technical Specification. Retrieved April 1, 2022, from **Error! Hyperlink reference not valid.**
- 3GPP. (2021-06). 3GPP TS 38.521-3 V16.8.0 NR; User equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception. Technical Specification. Retrieved August 1, 2021, from https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.521-3/38521-3-g80.zip
- FCC. (2020). FCC Modernizes 5.9 GHz Band for WI-FI and Auto Safety. FCC News. Retrieved July 1, 2022, from <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-368228A1.pdf>
- University of Michigan (2020). Connected and Automated Research. University of Michigan transportation Research Institute, MI 48109 USA. Retrieved July 1, 2022, from <https://www.umtri.umich.edu/research/expertise/connected-and-automated-research-excellence-at-umtri/>
- University of Michigan (2021). Mcity among partners bringing free, on-demand, autonomous vehicle shuttle service to Ann Arbor. Michigan Engineering University of Michigan. Retrieved July 1, 2022, from <https://mcity.umich.edu/mcity-helps-bring-a2go-autonomous-vehicle-shuttle-service-to-ann-arbor/>
- 5G Barcelona (2019). Telefónica and Seat will demonstrate several 5G-connected car use cases in a city environment for safer driving at MWC19 Barcelona. 5G Barcelona News. Retrieved July 1, 2022, from <https://5gbarcelona.org/news/telefonica-and-seat-will-demonstrate-several-5-g-connected-car-use-cases-in-a-city-environment-for-safer-driving-at-mwc19-barcelona/>
- Business Wire (2020). Synacor and Qumu Agree to Merger, Creating Global Leader in SaaS-Based Collaboration Software. Business Wire. Retrieved July 1, 2022, from <https://www.businesswire.com/news/home/20200211005527/en/SEAT-and-City-of-Barcelona-to-Promote-5G-Connected-Car-Technology>
- 5G-Carmen (2022). 5G-Carmen Newsletter #7. Retrieved July 1, 2022, from <https://5gcarmen.eu/wp-content/uploads/2022/10/5G-CARMEN-NL7.pdf>



- Telecom Review (2018). Japan to host Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) trials. Telecom Review. Retrieved July 1, 2022, from <https://www.telecomreviewasia.com/index.php/news/technology-news/876-japan-to-host-cellular-vehicle-to-everything-c-v2x-trials>
- Jung C, Lee D, Lee S, Shim DH. V2X-Communication-Aided Autonomous Driving: System Design and Experimental Validation. Sensors. 2020; 20(10):2903. <https://doi.org/10.3390/s20102903>
- Eric Walz (2021). China's Baidu Announces 'Apollo Air' Which Supports Self-driving Vehicles Using Real-time Data From 5G-Connected Roadside Units. Future Car. Retrieved July 1, 2022, from <https://www.futurecar.com/4617/Chinas-Baidu-Announces-Apollo-Air-Which-Supports-Self-driving-Vehicles-Using-Real-time-Data-From-5G-Connected-Roadside-Units>
- STEINLAW (2019). THE RISE OF AUTONOMOUS VEHICLES. from <https://www.steinlaw.com/resources/studies/the-rise-of-autonomous-vehicles/>
- Parra L., (2016). Cooperative UAH Car. from <https://invett.aut.uah.es/nacho/projects/cuahc/index.html>
- Jason M. (2018). How to ensure the safety of Self-Driving Cars: Part 2/5. from https://medium.com/@olley_io/how-to-ensure-the-safety-of-self-driving-cars-part-2-5-b4eafb067534
- Gilbert S. (2017). Humans Are More Reasonable Drivers than Self-Driving Autonomous Tech. from <https://www.autoconnectedcar.com/2017/08/humans-are-more-reasonable-drivers-than-self-driving-autonomous-tech/>
- GrayB. (2021). Top 30 Self Driving Technology and Car Companies. from <https://www.greyb.com/autonomous-cars/>
- Alex D. (2017). Detroit Is Stomping Silicon Valley in the Self-Driving Car Race. from <https://www.wired.com/2017/04/detroit-stomping-silicon-valley-self-driving-car-race/>
- Trevor M. (2017). Driverless buses arrive in Paris. from <https://www.digitaltrends.com/cars/paris-driverless-buses/>

- Tajitsu N. (2018). With Easy Ride trial, Nissan takes new step towards being Uber competitor. from <https://www.thestar.com.my/tech/tech-news/2018/02/23/with-easy-ride-trial-nissan-takes-new-step-towards-being-uber-competitor/>
- FutureBridge. (2020). Future Outlook of Autonomous Delivery Vehicles. from <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-mobility/future-outlook-of-autonomous-delivery-vehicles/>
- R. Vannithamby and A.C.K. Soong, 5G Verticals: Customizing Applications, Technologies and Deployment Techniques. Wiley and IEEE Press, 2020.
- TE CONNECTIVITY. (Unknown Date). from <https://www.te.com/global-en/industries/automotive/insights/connected-car>
- Robert Day ARM. (2019). Accelerating Autonomous Vehicle Technology, IEEE Spectrum <https://spectrum.ieee.org/transportation/self-driving/accelerating-autonomous-vehicle-technology>
- C. R. Stork and F. Duarte-Figueiredo, “A Survey of 5G Technology Evolution, Standards, and Infrastructure Associated with Vehicle-to-Everything Communications by Internet of Vehicles,” IEEE Access, vol. 8, pp. 117593- 117614, July 2020.
- U. K. Tiwari, 5G New Radio Interface: CP-OFDM Scenario in eMBB, 2018. Retrieved April 20, 2020, from <https://www.netmanias.com/en/post/blog/13237/5g-new-radio/5g-new-radio-interface-cp-ofmd-scenario-in-embb>
- J. Springer (5GAA), 5G Automotive Association, Pioneering Digital Transformation in the Automotive Industry, C-V2X ITU Meeting, March 2019.
- Qualcomm Technologies, 5G NR based C-V2X, 2018.
- J. Springer (5GAA), Connectivity Standards in the Automotive Industry, C-V2X ITU Meeting, October 2019.
- Hsu, Y.-W.; Chen, Y.-W.; Perng, J.-W. Estimation of the Number of Passengers in a Bus Using Deep Learning. Sensors 2020, 20, 2178. <https://doi.org/10.3390/s20082178>



- ASIRT. (2023). "Annual Global Road Crash Statistics" can be accessed at <https://www.asirt.org/safe-travel/road-safety-facts/>
- ThaiRSC. (2023). "Thailand Road Crash Statistics" can be accessed at <http://www.thairsc.com>
- Lyu, Feng, Minglu Li, and Xuemin Shen. (2020). "Vehicular Networking Techniques for Road-Safety Applications." Vehicular Networking for Road Safety. Springer, Cham, 2020. 11-23.
- ETSI. (2023). "Mobile technologies - 5G, 5G specifications article" can be accessed at <https://www.etsi.org/technologies/5G>
- H. Zhao, H. Yu, D. Li, T. Mao and H. Zhu. (2019). "Vehicle Accident Risk Prediction Based on AdaBoost-SO in VANETs," in IEEE Access, vol. 7, pp. 14549-14557, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2894176
- Zadobrischi, E., and M. Dimian. (2021) "Vehicular Communications Utility in Road Safety Applications: A Step toward Self-Aware Intelligent Traffic Systems. Symmetry 2021, 13, 438."
- Li, Wenfeng, et al. (2020) "Reliable congestion control mechanism for safety applications in urban VANETs." Ad Hoc Networks 98 (2020): 102033.
- Maior, Caio Bezerra Souto, et al. (2020). "Real-time classification for autonomous drowsiness detection using eye aspect ratio." Expert Systems with Applications 158 (2020): 113505
- NTT Docomo. (2023). "DOCOMO's R&D for 5G article" can be accessed at <https://www.nttdocomo.co.jp/english/corporate/technology/rd/docomo5g/>
- Nokia. (2023). "Nokia's 5G network article" can be accessed at <https://www.nokia.com/networks/5g/>
- CNBC. (2020). "General Motors' Connected vehicle article" can be accessed at <https://www.cnbc.com/2020/08/19/gm-to-launch-5g-connected-vehicles-in-china-starting-in-2022.html>
- Huawei. (2023). "Huawei's 5G success stories article" can be accessed at <https://carrier.huawei.com/en/success-stories/Industries-5G/chengdu>



- Padmavathy Subramanian. (2021). “A Trusted Companion: AI Software Keeps Drivers Safe and Focused on the Road Ahead”, can be accessed at <https://blogs.nvidia.com/blog/2021/01/19/drive-ix-ai-software-drivers-safe/>
- DeepStream. (2023). “NVIDIA DeepStream SDK” can be accessed at <https://developer.nvidia.com/deepstream-sdk>
- YOLOv5. (2020). Ultralytics. “Ultralytics/yolov5: Yolov5 🚀 in PyTorch, ONNX, CoreML, TFLite.” GitHub, can be accessed at <https://github.com/ultralytics/yolov5>.
- Maindola. (2021) <https://machinelearningknowledge.ai/introduction-to-yolov5-object-detection-with-tutorial/>
- Raut, P. (2014). Sachdev, V. Car accident notification system based on Internet of Things. Int. J. Comput. Appl. 2014, 107, 29–31.
- Dashora, C.; Sudhagar, P.E.; Marietta, J. (2020). IoT based framework for the detection of vehicle accident. Clust. Comput. 2020, 23, 1235–1250.
- Balfaqih, M.; Alharbi, S.A.; Alzain, M.; Alqurashi, F.; Almilad, S. (2022). An Accident Detection and Classification System Using Internet of Things and Machine Learning towards Smart City. Sustainability 2022, 14, 210.
- Y. Qi, K. Zhang and D. Yang. (2021). "Research on Crowd Target Counting Method based on YOLOv5 Algorithm," ICMLCA 2021; 2nd International Conference on Machine Learning and Computer Application, Shenyang, China, 2021, pp. 1-5.
- Ren, Peiming & Wang, Lin & Fang, Wei & Song, Shulin & Djahel, Soufiene. (2020). A novel squeeze YOLO-based real-time people counting approach. International Journal of Bio-Inspired Computation.
- Traci Ruether. (2022), “Streaming Protocols: Everything You Need to Know (Update)”, can be accessed at <https://www.wowza.com/blog/streaming-protocols>
- Ngamlap, Supawan. (2017). “ทำความรู้จักกับ Grafana Dashboard.” Medium. Ascend Developers, September 18, 2017. <https://developers.ascendcorp.com/ทำความรู้จักกับ-grafana-dashboard-1a5efe6d170a>

Grafana. (2023). can be accessed at <https://grafana.com/>

InfluxDB. (2023). can be accessed at <https://www.influxdata.com>

Elasticsearch. (2023). can be accessed at <https://www.elastic.co>

Tableau. (2023). can be accessed at <https://www.tableau.com/learn/get-started/dashboards>

Kalyani, K. (2021). BLER: A critical parameter in cellular receiver performance. 5G Technology World. Retrieved from <https://www.5gtechnologyworld.com/bler-a-critical-parameter-in-cellular-receiver-performance/>



ภาคผนวก

