

การออกแบบและพัฒนารถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้  
สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ

DESIGN AND DEVELOPMENT OF REMOVABLE PAVEMENT EDGE CLIMBING  
ELECTRIC WHEELCHAIR FOR ELDERLY AND DISABLED PEOPLE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2565  
KMITL-2022-EN-D-018-078

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND DEVELOPMENT OF REMOVABLE PAVEMENT EDGE CLIMBING  
ELECTRIC WHEELCHAIR FOR ELDERLY AND DISABLED PEOPLE



NATTHANON PHANNIL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2022  
KMITL-2022-EN-D-018-078

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและพัฒนารถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับสำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ
นักศึกษา	นายณัฐนนท์ พันธุ์นิล
รหัสประจำตัว	61601179
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ชัชยันต์ เจตนาเสน

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการออกแบบรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ ออกแบบตั้งแต่โครงสร้าง การรับน้ำหนักบรรทุก รูปแบบการใช้งาน การทดสอบการใช้งาน และระบบเซ็นเซอร์ที่ประกอบการทำงานของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ การพัฒนาอุปกรณ์เสริมสำหรับป็นพื้นต่างระดับที่มีขนาดและน้ำหนักที่เหมาะสม สามารถติดตั้งในรถเข็นไฟฟ้าทั่วไปได้จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ ล้อสายพานถูกออกแบบให้เป็นอุปกรณ์เสริมที่สามารถติดตั้งกับรถเข็นไฟฟ้าได้ในหลากหลายรูปแบบสำหรับเพิ่มรูปแบบการทำงานให้สามารถป็นพื้นต่างระดับหรือบันไดได้ ความสามารถในการป็นพื้นต่างระดับนี้จะช่วยให้ผู้ใช้สามารถขยายขอบเขตการเดินทาง เพิ่มความสะดวกในการใช้งาน และประหยัดเวลาในการเดินทางในพื้นที่เมืองเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในหลากหลายรูปแบบ ลดขั้นตอนการดัดแปลง และอำนวยความสะดวกในการเคลื่อนที่ รถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ถูกจำลองในโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ โครงสร้างได้รับการทดสอบโดยใช้การวิเคราะห์แบบคงที่ เพื่อพิจารณาความสามารถรับน้ำหนักบรรทุก การวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบพลวัตของโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ถูกใช้เพื่อตรวจสอบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงมุมที่นั้ง น้ำหนักบรรทุก ความเร็วของมอเตอร์ และความสูงของพื้นต่างระดับ ที่มีต่อ กำลังและแรงบิดของมอเตอร์ขับเคลื่อน ความเร็วในการเคลื่อนที่ มุมของล้อสายพาน และแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ ในขณะที่ระบบควบคุมและระบบเซ็นเซอร์ถูกออกแบบให้ทำงานได้ตลอดเวลา สามารถควบคุมการทำงานแบบไร้สายได้ เก็บข้อมูลการเดินทางและสภาพแวดล้อมได้อย่างต่อเนื่อง ช่วยลดภาระของผู้ดูแล เพิ่มความปลอดภัยในการเดินทาง ตอบสนองต่อความต้องการ และปรับปรุงคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุและผู้พิการให้เข้ากับสังคมเมืองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

<b>Thesis</b>	DESIGN AND DEVELOPMENT OF REMOVABLE PAVEMENT EDGE CLIMBING ELECTRIC WHEELCHAIR FOR ELDERLY AND DISABLED PEOPLE
<b>Student</b>	Mr. Natthanon Phannil
<b>Student ID.</b>	61601179
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2022
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Chaiyan Jettanasen

## ABSTRACT

This thesis proposes the design of a removable pavement edge climbing electric wheelchair. The design considers structure, loading, usage pattern, functional test, and sensor system that assembles the work of the removable pavement edge climbing electric wheelchair. Development of the pavement edge climbing accessories of suitable size and weight that can be installed in general electric wheelchairs, so it's an interesting option. The belt wheel is designed as an accessory that can be attached to a variety of electric wheelchairs to increase the functionality of climbing pavements or stairs. This ability to climb will allow users to expand their travel range, increase ease of use, and save time traveling in urban areas to be suitable for use in a variety of formats, reduce the conversion process, and facilitate movement. The disassembly of the electric wheelchair was simulated in a computer program. The structure was tested using static analysis to consider the load carrying capacity. A computational program dynamics analysis was used to examine the effect of seat angle changes, payload, motor speed, and the height of the pavement in relation to the power and torque of the drive motor, movement speed, angle of the belt wheel, and the force. While the control system and sensor system are designed to work all the time. It can be controlled wirelessly, consistently collecting travel and environmental data, reduces the burden of caregivers, increase travel safety, respond to demand and effectively improve the quality of life of the elderly and disabled to fit into the urban society.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชัยยันต์ เจตนาเสน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อรรถพล เก่าพิทักษ์กุล และ ดร.สันฐิติ อยู่มาก ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ

ขอขอบคุณ นาย สันติพันธ์ อนันต์วัฒนาวร และ นาย ปณพงค์ ส่งสุขฉวัลย์ ที่สนับสนุนและช่วยเหลือในการจัดเตรียมงานวิจัย

สุดท้ายต้องขอขอบคุณบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ณัฐนนท์ พันธุ์นิล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	8
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	8
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	8
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	9
1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	10
1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา.....	10
1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	10
บทที่ 2 การออกแบบรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับ.....	11
2.1 การออกแบบรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับด้วยการจำลองแบบคงที่.....	11
2.1.1 การคำนวณการออกแบบล้อสายพาน.....	14
2.1.2 การจำลองแบบสถิตของโครงล้อสายพาน.....	15
2.1.3 การคำนวณกำลังมอเตอร์ของล้อสายพาน.....	19
2.2 การออกแบบรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับด้วยการจำลองแบบไดนามิก.....	20
2.2.1 การเปรียบเทียบผลของมุมที่นิ่ง.....	22
2.2.2 การเปรียบเทียบผลของน้ำหนักบรรทุก.....	25
2.2.3 การเปรียบเทียบผลของความเร็วมอเตอร์.....	29
2.2.4 การเปรียบเทียบผลของความสูงพื้นต่างระดับ.....	40
2.3 การออกแบบและทดสอบล้อรองรับ.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 3 ชุดทดลองรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับ.....	56
3.1 การประกอบชุดทดลองรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้.....	56
3.2 ชุดทดลองรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้.....	58
3.3 การออกแบบระบบขับเคลื่อนรถเข็นและล้อสายพาน.....	60
3.3.1 การออกแบบระบบขับเคลื่อนรถเข็นและล้อสายพานด้วยบอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	61
3.3.2 การออกแบบระบบขับเคลื่อนรถเข็นและล้อสายพานด้วย คอมพิวเตอรืขนาดเล็ก.....	65
บทที่ 4 การออกแบบระบบอินเตอร์เน็ตผสมผสานสรรพสิ่ง.....	67
4.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบอินเตอร์เน็ตผสมผสานสรรพสิ่ง....	67
4.2 การออกแบบระบบเซ็นเซอร์.....	70
4.3 การออกแบบระบบตรวจจับสถานะรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับ.....	72
4.4 การออกแบบระบบตรวจจับคุณภาพอากาศ.....	75
4.5 การออกแบบระบบส่งข้อมูล.....	77
4.6 ผลการทดสอบระบบอินเตอร์เน็ตผสมผสานสรรพสิ่ง.....	78
4.6.1 การแสดงผลบนหน้าจอแอปพลิเคชัน.....	79
4.6.2 ผลการวัดคุณภาพอากาศ.....	79
4.6.3 ผลการติดตั้งระบบระบุตำแหน่ง.....	81
บทที่ 5 บทสรุป.....	85
5.1 การวิจารณ์หรืออภิปรายผล.....	85
5.2 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
บรรณานุกรมหรือเอกสารอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก.....	98
ภาคผนวก ข.....	121
ภาคผนวก ค.....	151
ประวัติผู้เขียน.....	188

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การเปรียบเทียบหลักการทำงานของรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแต่ละประเภท.....	3
1.2 การเปรียบเทียบรถเข็นไฟฟ้าที่นำเสนอและรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับของงานวิจัย ก่อนหน้า.....	6
2.1 ข้อมูลจำเพาะของรถเข็นไฟฟ้าเชิงพาณิชย์.....	12
2.2 ข้อมูลจำเพาะของโครงล้อสายพาน.....	16
2.3 ผลลัพธ์พารามิเตอร์ของการจำลองแบบคงที่.....	17
2.4 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณกำลังของมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อสายพาน.....	20
2.5 ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ในแต่ละกรณีของการเปลี่ยนแปลงมุมที่นั่ง.....	25
2.6 ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ในแต่ละกรณีของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุก.....	29
2.7 ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ในแต่ละกรณีของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์.....	40
2.8 ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ในแต่ละกรณีของการเปลี่ยนแปลงความสูงพื้นต่างระดับ.....	51
2.9 ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ในผลการทดสอบขณะมีและไม่มีล้อช่วยพยุง.....	54
4.1 ค่าตำแหน่งจากจุดวัดทั้งห้าจุด.....	83
4.2 ระยะเวลาระหว่างสถานีอัดประจุและจุดตรวจวัด.....	84
5.1 การเปรียบเทียบระหว่างรถเข็นไฟฟ้าที่นำเสนอกับรถเข็นไฟฟ้าอื่น.....	85

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 สิ่งกีดขวางในการเดินทางกลางแจ้งสำหรับผู้ใช้รถเข็น.....	1
1.2 โมเดลการทำงานของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ.....	2
2.1 รถเข็นไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ทั่วไป.....	11
2.2 แบบจำลองล้อสายพานของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้.....	13
2.3 แบบจำลองรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้.....	13
2.4 การคำนวณโครงสร้างล้อสายพาน.....	14
2.5 ตำแหน่งของล้อสายพาน.....	15
2.6 การจำลองแบบคกที่ของโครงล้อสายพาน.....	17
2.7 พารามิเตอร์ของการจำลองการเคลื่อนที่แบบพลวัต.....	21
2.8 การจำลองการเคลื่อนที่แบบพลวัตในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	22
2.9 การเปลี่ยนแปลงกำลังมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขมุมที่นั่งต่าง ๆ.....	23
2.10 การเปลี่ยนแปลงทอร์กมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขมุมที่นั่งต่าง ๆ.....	23
2.11 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขมุมที่นั่งต่าง ๆ.....	24
2.12 การเปลี่ยนแปลงมุมล้อสายพานภายใต้เงื่อนไขมุมที่นั่งต่าง ๆ.....	24
2.13 การเปลี่ยนแปลงแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับภายใต้เงื่อนไขมุมที่นั่งต่าง ๆ.....	25
2.14 การเปลี่ยนแปลงกำลังมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ.....	26
2.15 การเปลี่ยนแปลงทอร์กมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ.....	27
2.16 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ.....	27
2.17 การเปลี่ยนแปลงมุมล้อสายพานภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ.....	28
2.18 การเปลี่ยนแปลงแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ.....	28
2.19 การเปลี่ยนแปลงกำลังมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขความเร็วมอเตอร์ต่าง ๆ.....	30
2.20 การเปลี่ยนแปลงทอร์กมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขความเร็วมอเตอร์ต่าง ๆ.....	32
2.21 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขความเร็วมอเตอร์ต่าง ๆ.....	34
2.22 การเปลี่ยนแปลงมุมล้อสายพานภายใต้เงื่อนไขความเร็วมอเตอร์ต่าง ๆ.....	36
2.23 การเปลี่ยนแปลงแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับภายใต้เงื่อนไขความเร็วมอเตอร์ต่าง ๆ.....	38
2.24 การเปลี่ยนแปลงกำลังมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขความสูงพื้นต่างระดับต่าง ๆ.....	41
2.25 การเปลี่ยนแปลงทอร์กมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขความสูงพื้นต่างระดับต่าง ๆ.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.26 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขความสูงพื้นต่างๆ.....	45
2.27 การเปลี่ยนแปลงมุมล้อยายพานภายใต้เงื่อนไขความสูงพื้นต่างระดับต่าง ๆ.....	47
2.28 การเปลี่ยนแปลงแรงที่ตัวขับเชิงเส้นได้รับภายใต้เงื่อนไขความสูงพื้นต่าง ๆ.....	49
2.29 รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบแบบถอดประกอบได้ที่ติดตั้งล้อช่วยพยุง.....	52
2.30 การจำลองการเคลื่อนที่แบบพลาวัตในช่วงเวลาต่าง ๆ ขณะติดตั้งล้อช่วยพยุง.....	52
2.31 กำลังมอเตอร์ในการทดสอบขณะมีและไม่มีล้อช่วยพยุง.....	53
2.32 ทอร์กมอเตอร์ในการทดสอบขณะมีและไม่มีล้อช่วยพยุง.....	53
2.33 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในการทดสอบขณะมีและไม่มีล้อช่วยพยุง.....	54
2.34 มุมล้อยายพานในการทดสอบขณะมีและไม่มีล้อช่วยพยุง.....	54
3.1 การประกอบล้อยายพาน.....	57
3.2 รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ที่.....	58
3.3 ระบบควบคุมรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ที่.....	60
3.4 ผังการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	62
3.5 ผังการทำงานของคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กควบคุมโปรแกรม Node-red.....	65
4.1 ระบบแสดงผลและแจ้งเตือนสถานะรถเข็นไฟฟ้า.....	71
4.2 ระบบแจ้งเตือนสถานะรถเข็นไฟฟ้า.....	73
4.3 ระบบตรวจจับคุณภาพอากาศ.....	76
4.4 ระบบการรับส่งข้อมูล.....	78
4.5 ส่วนแสดงสถานะบอร์ดและรถเข็นไฟฟ้าในแอปพลิเคชัน Blynk.....	79
4.6 ส่วนแสดงผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศและกราฟข้อมูลในแอปพลิเคชัน Blynk.....	80
4.7 ดัชนีคุณภาพอากาศค่าฝุ่นละอองขนาด 2.5 ไมโครเมตร.....	81
4.8 แผนที่ของแอปพลิเคชัน Blynk.....	82
4.9 การกำหนดสถานีชาร์จและจุดตรวจวัด.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (STATEMENT AND SIGNIFICANCE OF THE PROBLEMS)

ปัจจุบันประชากรโลกกำลังสูงวัยขึ้นเรื่อย ๆ และเรากำลังก้าวเข้าสู่ยุคของสังคมผู้สูงอายุ ทุกประเทศต้องเตรียมพร้อมรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากอัตราส่วนประชากรสูงอายุที่เพิ่มขึ้น ผู้สูงอายุส่วนใหญ่ประสบปัญหาเรื่องความสามารถในการเคลื่อนไหวร่างกาย ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นความทุพพลภาพรูปแบบหนึ่ง การดูแลผู้สูงอายุจึงมีความจำเป็นที่จะต้องได้รับการดูแลอย่างใกล้ชิด ปัญหาเรื่องความสามารถในการเคลื่อนไหวร่างกายเป็นปัญหาสำคัญที่ผู้สูงอายุและผู้พิการต้องเผชิญ ปัจจุบันผู้สูงอายุและผู้พิการจำนวนมากต้องอาศัยรถเข็นเป็นพาหนะสำหรับการเดินทางในชีวิตประจำวัน ในขณะที่โครงสร้างพื้นฐานและสิ่งอำนวยความสะดวกของประเทศไทยไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับผู้ใช้รถเข็นอย่างเต็มที่ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1.1 อาทิเช่น ทางเท้าเป็นหลุมเป็นบ่อ ทางลาดชันมากเกินไป ทางลาดไม่ต่อเนื่อง และสิ่งกีดขวางทางเท้า เป็นต้น ภาพเหล่านี้ถูกมองเป็นเรื่องปกติในพื้นที่เขตเมืองของประเทศไทย ซึ่งในความเป็นจริงแล้วปัญหาเหล่านี้เป็นอุปสรรคอย่างมากต่อการใช้รถเข็นของผู้สูงอายุและผู้พิการ เนื่องจากการกีดขวางการเคลื่อนที่และจำกัดความสามารถในการเดินทาง นอกจากนี้ยังมีปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความสูงของขอบทางเท้าที่มากเกินไปและจำนวนทางลาดของทางเท้าที่ไม่เพียงพอ ผู้ใช้รถเข็นไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อเนื่องไปตามทางเท้าได้ ดังนั้นผู้ใช้หลายคนจึงต้องย้ายไปเดินทางบนพื้นผิวถนนเป็นระยะทางไกลแทน ส่งผลให้ทั้งผู้ใช้รถเข็นและผู้ใช้ถนนรายอื่น ๆ เสี่ยงอันตรายตามไปด้วย



รูปที่ 1.1 สิ่งกีดขวางในการเดินทางกลางแจ้งสำหรับผู้ใช้รถเข็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยสาขาต่าง ๆ นักวิจัยได้ตรวจสอบ ประดิษฐ์ และพัฒนารถเข็นไฟฟ้าขึ้นพื้นต่างระดับ (Stair-climbing electric wheelchair: SCEW) [1] ในหลายงานวิจัย ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ได้เพิ่มความสามารถในการเดินทางของผู้ใช้รถเข็น ลดภาระของผู้ดูแลผู้สูงอายุและผู้พิการ และสร้างรูปแบบการเดินทางใหม่ ทั้งนี้รถเข็นไฟฟ้าขึ้นพื้นต่างระดับได้รับการพัฒนาทั้งในเชิงงานวิจัยและเชิงพาณิชย์ หลักการทำงานของรถเข็นไฟฟ้าขึ้นพื้นต่างระดับสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ [2]–[4] ดังแสดงในรูปที่ 1.2 และตารางที่ 1.1 ได้แก่ กลไกการขึ้นแบบล้อสายพาน [4]–[7] กลไกการขึ้นแบบกลุ่มล้อ [8]–[15] กลไกการขึ้นแบบขา [16]–[20] และกลไกการขึ้นแบบผสม [21]–[29]



รูปที่ 1.2 โมเดลการทำงานของรถเข็นไฟฟ้าขึ้นพื้นต่างระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบหลักการทำงานของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแต่ละประเภท [2]

รูปแบบการป็นพื้นต่างระดับ	ความซับซ้อนระบบควบคุม	ต้นทุนการผลิต	การใช้พลังงาน	การปรับความสูงการป็น
กลไกการป็นแบบล้อสายพาน	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง	สูงมาก
กลไกการป็นแบบกลุ่มล้อ	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ	ปานกลาง
กลไกการป็นแบบขาป็น	สูงมาก	สูงมาก	สูงมาก	สูง
กลไกการป็นแบบผสม	สูง	สูง	ปานกลาง	ต่ำ

การป็นพื้นต่างระดับแบบล้อสายพานเป็นกลไกที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากกลไกนี้สามารถป็นพื้นต่างระดับได้ด้วยความเร็วคงที่และสลับการทำงานระหว่างกลไกการป็นและการเคลื่อนที่แนวราบได้อย่างรวดเร็ว แม้กลไกการป็นแบบล้อสายพานนั้นจะมีราคาแพง ขนาดที่เทอะทะ และโครงสร้างที่ซับซ้อน แต่ก็มีประสิทธิภาพการป็นบันไดที่ดีมากด้วย ในงานวิจัยของ Jongseok Lee [6] ได้ทำการออกแบบกลไกการป็นพื้นต่างระดับแบบล้อสายพานใหม่ที่ใช้ออเตอร์ตัวเดียวในการขับเคลื่อนทั้งล้อหลักและล้อสายพานผ่านระบบส่งกำลัง รถเข็นไฟฟ้านี้มีน้ำหนักประมาณ 65 กิโลกรัม และรองรับน้ำหนักผู้ใช้ได้ประมาณ 100 กิโลกรัม ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ ความเร็วในการทำงานอยู่ที่ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในโหมดการเคลื่อนที่บนพื้นราบ และ 1 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในโหมดการป็นพื้นต่างระดับ นอกจากนี้ A.A. Jorge และคณะ [7] ได้นำเสนอแบบจำลองของรถเข็นป็นพื้นต่างระดับแบบล้อสายพาน สูตรของแบบจำลองจลนศาสตร์ทั้งแบบคงที่และพลวัตถูกพิจารณาจากผลกระทบของแรงโน้มถ่วงและการเสียดสีจากการวิ่งบนพื้นผิวเรียบและเอียง ผลการวิจัยพบว่า เทคนิคการใช้ฟังก์ชันยาปูนอฟ (Lyapunov) เป็นตัวควบคุมที่ดีที่สุดในระบบนำทางที่มีประสิทธิภาพ

กลไกการป็นพื้นต่างระดับแบบกลุ่มล้อ เป็นกลไกที่ค่อนข้างกะทัดรัด มีโครงสร้างที่เรียบง่าย มีต้นทุนต่ำ ใช้พลังงานน้อย และเปลี่ยนโหมดการเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว แต่ความเร็วในการเคลื่อนที่จะผันผวนไม่คงที่ เนื่องจากความเร็วการหมุนของกลุ่มล้อไม่คงที่ ซึ่งทำให้ผู้ใช้รู้สึกไม่ปลอดภัย ในงานวิจัยของ Prajapat [12] ได้พัฒนาอุปกรณ์เสริมสำหรับการป็นบันได โดยให้ยกรถเข็นขึ้นเหนือพื้นต่างระดับด้วยกลไกกลุ่มล้อแบบหกล้อ ซึ่งพัฒนาจากการออกแบบกลุ่มล้อแบบสามล้อ ผลของการผสมผสานกลไกกลุ่มล้อแบบหกล้อและการสั่งงานทำให้เกิดแรงที่ช่วยเหลือผู้ใช้รถเข็นให้สามารถยกรถเข็นขึ้นเหนือพื้นต่างระดับได้อย่างสะดวก ต้นแบบได้รับการทดสอบด้วยการป็นบันไดสองชั้น ส่วนงานวิจัยของ Anchivilca และคณะ [14] ได้ออกแบบรถเข็นไฟฟ้ารุ่นใหม่ที่ควบคุมโดยคนไม่มีแขนหรือมือ โดยใช้เซ็นเซอร์เฉื่อยเพื่อแปลงมุมเอียงของตัวผู้ใช้เป็นความเร็วและทิศทางของรถเข็น กลไกกลุ่มล้อแบบสามล้อได้รับการออกแบบตามข้อกำหนดและข้อจำกัดเหล่านี้ ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ เซ็นเซอร์เฉื่อย (MPU6050) ได้รับการปรับสภาพให้อ่านข้อมูลผ่านการสื่อสารข้อมูลความเร็วต่ำ (Inter-Integrated Circuit Protocol: I<sup>2</sup>C Protocol) ร่วมกับเซ็นเซอร์ความเร่งสามแกน เชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์แล็บวิว (LabView) และไวไฟ (Wi-Fi) แม้ว่างานวิจัยนี้จะไม่เสร็จสิ้นการนำต้นแบบไปใช้ แต่ก็ได้รับการยืนยันว่ากลไกสามล้อที่เสนอและการรวมเข้ากับแชสซีนั้นเพียงพอเพราะ รถเข็นสามารถขึ้นและลงบันไดได้โดยไม่มีกรรบกวนใด ๆ

กลไกการปีนพื้นต่างระดับแบบขาที่เลียนแบบการเคลื่อนไหวของขาและเท้ามนุษย์ มีการใช้ข้อต่อขามอเตอร์ และการควบคุมการตอบสนองหลายอย่าง เพื่อให้การเดินและการปีนพื้นต่างระดับมีความมั่นคง ดังนั้นกลไกการปีนพื้นต่างระดับแบบขาจึงมีความซับซ้อน มีราคาแพง และมีรูปลักษณะที่แตกต่างออกไป รถเข็นปีนพื้นต่างระดับแบบขาได้รับการออกแบบให้เป็นเทคโนโลยีใหม่ [19] ประกอบด้วยขา 2 ขาพร้อมส่วนรองรับขาล่างและขาบน และก้าวข้ามพื้นต่างระดับอย่างอิสระและปลอดภัย นอกจากนี้ กลไกที่ฐานขายังได้รับการเสนอเพื่อการปีนที่ปลอดภัยและปรับเปลี่ยนระดับความสูงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลไกนี้มีน้ำหนักเบาและเป็นการทดสอบแบบพลวัต ในขณะที่ Yoshikaza Mori และคณะ [20] ได้พัฒนาชุดอุปกรณ์ปีนพื้นต่างระดับแบบขาคู่หนึ่งที่ตั้งตั้งบนรถเข็นธรรมดา โดยมีเป้าหมายการใช้งานคือสามารถยกล้อรถเข็นด้านหน้าได้อย่างอิสระ โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญคือตัวขับเคลื่อนสองตัวที่มีความอิสระสองระดับ ได้แก่ การเคลื่อนที่แบบเทเลสโคปิก (Telescopic) และการเคลื่อนที่แบบหมุน ระบบนี้สามารถไต่พื้นต่างระดับได้สูง 30 เซนติเมตร จึงถือเป็นการยืนยันประสิทธิภาพของการออกแบบ

สุดท้ายนี้ กลไกการปีนพื้นต่างระดับแบบผสมสามารถปรับให้เข้ากับพื้นต่างระดับแบบต่าง ๆ ได้โดยใช้กลไกการส่งกำลังแบบพิเศษและกลไกการเคลื่อนตัวแบบมีล้อ ตำแหน่งของล้อสามารถปรับได้เพื่อรักษาหน้าสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างล้อกับพื้น ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถชดเชยความโน้มถ่วงไม่เชิงเส้นได้อย่างไรก็ตามกลไกการปีนพื้นต่างระดับแบบผสมส่วนใหญ่จะมีขนาดใหญ่และซับซ้อน รถเข็นไฟฟ้ารูปแบบใหม่ในงานวิจัย [25] ถูกออกแบบเพื่อปีนข้ามสิ่งกีดขวางหรือพื้นต่างระดับด้วยโครงสร้างกลุ่มล้อแบบสามล้อและในงานวิจัย [26] กลไกการปีนแบบผสมประกอบด้วยอุปกรณ์ช่วยการเคลื่อนที่สองส่วน ได้แก่ กลไกการปีนแบบกลุ่มล้อและการปีนแบบล้อสายพาน โครงสร้างที่เสนอเป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบหลายประการ เช่น ขนาดที่เล็ก น้ำหนักเบา และวิธีการปีนเขาคง การปีนของรถเข็นได้รับการทดสอบโดยใช้การจำลองหลายตัว คุณสมบัติพลวัตอัจฉริยะบางอย่างของรถเข็นได้รับการพิสูจน์แล้วเช่นกัน การปรับปรุงความเสถียรระหว่างการปีนพื้นต่างระดับเป็นข้อได้เปรียบประการแรกของสถาปัตยกรรมใหม่นี้ ซึ่งจำเป็นต่อการปฏิบัติตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ISO 7176-28:2012 “ข้อกำหนดและวิธีการทดสอบสำหรับอุปกรณ์ปีนบันได” ว่า “รถเข็นจะถือว่ามีเสถียรภาพหากสามารถรักษารูปแบบการทำงานใด ๆ ได้โดยไม่ลื่นไถล แม้ว่าบันไดจะเอียงไปข้างหน้า”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับในแต่ละรูปแบบสามารถสรุปไว้ในตารางที่ 1.1 และ 1.2 กลไกการปีนพื้นต่างระดับแบบขาและแบบผสมนั้นมีความซับซ้อน ใช้งานยาก และมีราคาแพงมาก จึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานในชีวิตประจำวันและการพัฒนาเชิงพาณิชย์ ในทางกลับกัน กลไกการปีนพื้นต่างระดับแบบล้อสายพานและแบบกลุ่มล้อนั้นค่อนข้างมีต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย และใช้งานได้หลากหลาย ทั้งกลไกแบบล้อสายพานและแบบกลุ่มล้อเหมาะสำหรับการใช้งานประจำวันมากกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากน้ำหนักบรรทุกและความมั่นคงในการปีน กลไกการปีนพื้นต่างระดับแบบล้อสายพานจะตอบสนองได้ดีกว่ากลไกการปีนพื้นต่างระดับแบบกลุ่มล้อ

จากการเปรียบเทียบระหว่างรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ (Removable Pavement-edge Climbing Electric Wheelchair: RPCEW) กับรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับทั่วไป (Stair-climbing electric wheelchair: SCEW) จากการวิจัยที่ผ่านมาที่นำเสนอในตารางที่ 1.2 รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับทั่วไปได้รับการตรวจสอบในหลายประเภท เกือบทั้งหมดมีพื้นฐานมาจากการพัฒนารถเข็นรูปแบบใหม่ที่ไม่สามารถปรับให้เข้ากับรถเข็นไฟฟ้าทั่วไปที่มีอยู่ได้ ดังนั้นราคาขายของรถเข็นนี้จึงสูงและไม่เป็นที่แพร่หลายมาก ในขณะที่การพัฒนาอุปกรณ์เสริมสำหรับฟังก์ชันการปีนพื้นต่างระดับที่ติดตั้งกับรถเข็นไฟฟ้าทั่วไปนั้นมีน้อยมาก และอุปกรณ์บางอย่างก็มีขนาดใหญ่มาก จนไม่สามารถนำมาใช้ในชีวิตประจำวันได้ [12] ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์เสริมสำหรับปีนพื้นต่างระดับที่มีขนาดและน้ำหนักที่เหมาะสม สามารถติดตั้งในรถเข็นไฟฟ้าทั่วไปได้ จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในอนาคต

ในการศึกษานี้รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ได้รับการออกแบบโดยการรวมรถเข็นไฟฟ้าทั่วไปและอุปกรณ์เสริมแบบล้อสายพานที่สามารถถอด/ประกอบได้ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในหลากหลายรูปแบบ ลดขั้นตอนการดัดแปลง และอำนวยความสะดวกในการเคลื่อนที่ รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ถูกจำลองในโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ (SolidWorks) โดยกำหนดค่าขนาดและวัสดุตามจริง โครงสร้างได้รับการทดสอบโดยใช้การวิเคราะห์แบบคงที่ในด้านของความเค้น ความเครียด และการยุบตัว เพื่อพิจารณาความสามารถในการทนต่อน้ำหนักบรรทุก การวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบพลวัตของโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ถูกใช้เพื่อตรวจสอบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงมุมที่นั่ง น้ำหนักบรรทุก ความเร็วของมอเตอร์ และความสูงของพื้นต่างระดับ ที่มีต่อ กำลังและแรงบิดของมอเตอร์ขับเคลื่อน ความเร็วในการเคลื่อนที่ มุมของล้อสายพาน และแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ ผลลัพธ์ของการทดสอบนี้ได้รับการวิเคราะห์เพื่อกำหนดขนาดมอเตอร์และตัวขับเคลื่อนที่เหมาะสมสำหรับการสร้างชุดทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยชุดทดลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้จริงตามรูปแบบการใช้งานที่กำหนดและตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาระบบเซ็นเซอร์ที่สามารถเก็บและประมวลผลข้อมูลการใช้งานและสภาพแวดล้อมของรถเข็นไฟฟ้า เพื่อเป็นข้อมูลเชิงสุขภาพของผู้ใช้และประกอบการพัฒนารถเข็นไฟฟ้าในอนาคตอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 การเปรียบเทียบรถเข็นไฟฟ้าที่นำเสนอและรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับของงานวิจัยก่อนหน้า

อ้างอิง	รูปแบบการปีน	ต้นแบบ	ช่วงเวลา	ระบบควบคุม	น้ำหนัก	ราคา	ถอด/ ประกอบ
งานที่เสนอ	รูปแบบล้อสายพาน	RPCEW	2022	ระบบสมองกลฝังตัว และอินเตอร์เน็ต ประสานสรรพสิ่ง	ปานกลาง	ปานกลาง	ได้
[4]	รูปแบบล้อสายพาน	TopChair-S	2013	ระบบสมองกลฝังตัว	สูง	ปานกลาง	ไม่ได้
[5]	รูปแบบล้อสายพาน	TGR Explorer	2016	ระบบสมองกลฝังตัว	สูง	ปานกลาง	ไม่ได้
[6]	รูปแบบล้อสายพาน	Non-wheelchair	2021	ระบบทางกล	ปานกลาง	ต่ำ	ไม่ระบุ
[7]	รูปแบบล้อสายพาน	MWHLs	2021	ระบบอิเล็กทรอนิกส์	สูง	สูง	ไม่ได้
[11]	รูปแบบกลุ่มล้อ	Non-wheelchair	2018	ระบบสมองกลฝังตัว	ต่ำ	ต่ำ	ไม่ระบุ
[12]	รูปแบบกลุ่มล้อ	Stair climbing add-on device	2020	ระบบทางกล	ปานกลาง	ต่ำ	ได้
[14]	รูปแบบกลุ่มล้อ	Non-wheelchair	2020	ระบบสมองกลฝังตัว	ปานกลาง	ปานกลาง	ไม่ระบุ

อ้างอิง	รูปแบบการปีน	ต้นแบบ	ช่วงเวลา	ระบบควบคุม	น้ำหนัก	ราคา	ถอด/ ประกอบ
[16]	รูปแบบขา	Compact stair climbing wheelchair	2016	ระบบสมองกลฝังตัว	สูง	สูง	ไม่ได้
[17]	รูปแบบขา	TBW-1 Matsushima	2010	ระบบอิเล็กทรอนิกส์ และทางกล	สูง	สูง	ไม่ได้
[18]	รูปแบบขา	Non-wheelchair	2018	ระบบอิเล็กทรอนิกส์ และทางกล	สูง	ปานกลาง	ไม่ระบุ
[19]	รูปแบบขา	Autonomous stair climbing wheelchair	2017	ระบบสมองกลฝังตัว	ปานกลาง	ปานกลาง	ไม่ได้
[21]	รูปแบบผสม	Different Terrains climbing wheelchair	2020	ระบบสมองกลฝังตัว	ปานกลาง	ปานกลาง	ไม่ได้
[22]	รูปแบบผสม	Multifunctional wheelchair	2021	ระบบสมองกลฝังตัว	ปานกลาง	ปานกลาง	ไม่ได้
[23]	รูปแบบผสม	SCMSs	2017	ระบบสมองกลฝังตัว	สูง	สูง	ไม่ได้
[29]	รูปแบบผสม	RT-Mover PType WA Mk-II	2020	ระบบสมองกลฝังตัว	สูง	สูง	ไม่ได้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา (GOAL AND OBJECTIVE)

- 1.2.1 ออกแบบและพัฒนารถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับที่สามารถถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ
- 1.2.2 สร้างและทดสอบต้นแบบรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับที่สามารถถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ
- 1.2.3 ออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับที่สามารถถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ
- 1.2.4 ออกแบบและพัฒนาระบบอินเตอร์เน็ตประสานสรรพสิ่งของรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับที่สามารถถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ

## 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา (HYPOTHESIS TO BE TESTED)

รถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ถูกออกแบบให้สามารถปั่นพื้นต่างระดับได้ 20 เซนติเมตร ขณะที่มีน้ำหนักบรรทุกรวม 2,000 นิวตัน โดยการขับเคลื่อนต้องมีความปลอดภัยและตอบสนองความต้องการในการเดินทางของผู้ใช้ได้ ระบบเซ็นเซอร์ ระบบตรวจสอบสถานะรถเข็น และระบบตรวจจับคุณภาพอากาศถูกออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูแลผู้สูงอายุ ระบบเซ็นเซอร์รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่างๆ และส่งข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์คลาวด์ เพื่อสร้างฐานข้อมูลขนาดใหญ่สำหรับบริการด้านสุขภาพผู้สูงอายุ มีการแสดงสถานะรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับ ค่าคุณภาพอากาศ และการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพแบบเรียลไทม์ผ่านโทรศัพท์มือถือของผู้สูงอายุ ผู้ดูแล และครอบครัวผู้สูงอายุ มีระบบแจ้งเตือนเหตุฉุกเฉิน บอกรหัสรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับและผู้สูงอายุได้ นอกจากนี้ ระบบค้นหาสถานีชาร์จที่ใกล้ที่สุดเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้มากเมื่อแบตเตอรี่เหลือน้อย และช่วยจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ผู้ใช้สามารถค้นหาสถานีชาร์จที่ใกล้ที่สุดได้ และประเมินความสามารถในการไปที่สถานีชาร์จที่ใกล้ได้ด้วยตนเอง

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา (SCOPE OR LIMITATION OF THE STUDY)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและพัฒนารถเข็นไฟฟ้าทั่วไปให้เป็นรถเข็นไฟฟ้าที่สามารถปั่นพื้นต่างระดับที่ทันสมัยและสามารถตอบสนองการใช้งานในชีวิตประจำวันของผู้สูงอายุและผู้พิการได้ การพัฒนานี้เริ่มจากการออกแบบและทดสอบโครงสร้างรถเข็นและล้อสายพานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (SolidWork) เพื่อหารูปแบบโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการปั่นและขนาดของอุปกรณ์ประกอบต่างๆ โมเดลต้นแบบที่ผ่านการทดสอบจะถูกสร้างเป็นชุดทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ สำหรับทดสอบการใช้งานในสภาวะต่างๆ นอกจากนั้นยังมีระบบควบคุมแบบไร้สายและระบบเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ที่จะช่วยให้รถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับนี้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้สูงอายุได้อย่างเต็มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

- ออกแบบอุปกรณ์เสริมสำหรับติดตั้งบนรถเข็นทั่วไป โดยเปลี่ยนรถเข็นทั่วไปให้เป็นรถเข็นไฟฟ้าสำหรับปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ เพิ่มฟังก์ชันการใช้งานใหม่โดยคงฟังก์ชันการใช้งานเดิมไว้
- ความแข็งแรงของโครงสร้างที่ออกแบบได้รับการทดสอบในแง่ของความเค้น ความเครียด และการยุบตัว เพื่อพิจารณาความสามารถในการทนต่อน้ำหนักบรรทุกจริง
- วิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนมุมที่นั่ง น้ำหนักบรรทุก ความเร็วของมอเตอร์ และความสูงของพื้นต่างระดับ ต่อ กำลังและแรงบิดของมอเตอร์ขับเคลื่อน ความเร็วในการเคลื่อนที่ มุมของล้อสายพาน และแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ เพื่อกำหนดขนาดมอเตอร์และตัวขับเคลื่อนที่เหมาะสม

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา (PROCESS OF THE STUDY)

ในงานวิจัยการออกแบบและพัฒนารถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการถูกดำเนินการโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาหลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับ
- 2) ศึกษาหลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับ
- 3) ศึกษาหลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบอินเตอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง
- 4) ออกแบบรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์
- 5) ทดสอบโครงสร้างด้วยการวิเคราะห์แบบคงที่ของโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในแง่ของความเค้น ความเครียด และการยุบตัว เพื่อพิจารณาความสามารถในการทนต่อน้ำหนักบรรทุก
- 6) ทดสอบการใช้งานขณะเคลื่อนที่ด้วยการวิเคราะห์แบบพลวัตของโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ โดยตรวจสอบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงมุมที่นั่ง น้ำหนักบรรทุก ความเร็วของมอเตอร์ และความสูงของพื้นต่างระดับ ที่มีต่อ กำลังและแรงบิดของมอเตอร์ขับเคลื่อน ความเร็วในการเคลื่อนที่ มุมของล้อสายพาน และแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ เพื่อพิจารณาขนาดมอเตอร์และตัวขับเคลื่อนที่เหมาะสมสำหรับสร้างชุดทดลอง
- 7) ประกอบชุดทดลองรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ
- 8) ออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้
- 9) ทดสอบการใช้งานในเงื่อนไขต่าง ๆ ของชุดทดลอง
- 10) ออกแบบระบบอินเตอร์เน็ตประสานสรรพสิ่งของชุดทดลอง
- 11) ทดสอบและประเมินการทำงานของระบบอินเตอร์เน็ตประสานสรรพสิ่งของชุดทดลอง
- 12) รวบรวมข้อมูลสำหรับตีพิมพ์วารสารวิชาการ
- 13) จัดทำรายงานสรุปงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ข้อตกลงเบื้องต้น (ASSUMPTION)

ในการศึกษานี้รถเข็นไฟฟ้าทั่วไปถูกพัฒนาให้เป็นรถเข็นไฟฟ้าที่สามารถป็นพื้นต่างระดับได้ ซึ่งสามารถตอบสนองการใช้งานในชีวิตประจำวันของผู้สูงอายุและผู้พิการได้ การพัฒนานี้เริ่มจากการออกแบบโครงสร้าง ล้อสายพานและทดสอบการใช้งานแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหารูปแบบโครงสร้างที่เหมาะสม สำหรับการป็นพื้นต่างระดับและขนาดของอุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ ต้นแบบที่ผ่านการทดสอบจะถูกสร้างเป็นชุดทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ สำหรับทดสอบการใช้งานในสภาวะต่าง ๆ นอกจากนั้นยังมีระบบควบคุมแบบไร้สายและระบบเซ็นเซอร์ต่างๆที่จะช่วยให้รถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้นี้สามารถตอบสนองความต้องการในการใช้งานของผู้สูงอายุได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา (LIMITATION OF THE STUDY)

ในการศึกษานี้เน้นการออกแบบล้อสายพานที่สามารถประกอบกับรถเข็นไฟฟ้าทั่วไป เพื่อพัฒนาเป็นรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ ในการพัฒนาได้ดำเนินการศึกษาตั้งแต่การออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการเคลื่อนที่ พบว่าล้อสายพานที่ออกแบบสามารถตอบสนองการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ในการสร้างชุดทดลอง จำเป็นต้องมีการปรับแต่งโครงสร้างบางส่วนเพื่อให้สามารถเชื่อมและประกอบชุดทดลองจริงได้ ในการทดสอบชุดทดลอง มีการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบตามการทดสอบแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่อย่างไรก็ตาม การทดสอบชุดทดลองจะมีตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีผลต่อการทดสอบบ้าง อาทิเช่น ความเสียดทานของพื้นกับล้อ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ น้ำหนักบรรทุก ผู้ทดสอบ และอื่น ๆ ทำให้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้บ้างเล็กน้อย

## 1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ การนำเสนอแบ่งเป็น 5 บทดังต่อไปนี้ บทที่ 2 ล้อสายพานและล้อรองรับได้รับการออกแบบตามหลักวิศวกรรมศาสตร์ โครงสร้างล้อสายพานได้รับการทดสอบโดยใช้การวิเคราะห์แบบคงที่ และการเคลื่อนที่ของล้อสายพานถูกพิจารณาตามเงื่อนไขการใช้งานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์หาขนาดมอเตอร์และตัวขับเคลื่อนที่เหมาะสม บทที่ 3 นำเสนอการประกอบชุดทดลองตามทีออกแบบ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ถูกรออกแบบให้สามารถควบคุมแบบไร้สายและประมวลผลการขับเคลื่อนด้วยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กและบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ระบบเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ถูกออกแบบในบทที่ 4 ให้สามารถตรวจวัดสถานะรถเข็นไฟฟ้าสภาพอากาศ และตำแหน่งการใช้งาน เพื่อให้ผู้ดูแลสามารถติดตามการใช้งานได้อย่างใกล้ชิด รวมถึงสามารถแจ้งเตือนเมื่อเกิดอุบัติเหตุได้ สุดท้าย ชุดทดลองต้นแบบนี้ถูกเปรียบเทียบกับรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับที่มีขายทั่วไป เพื่อพิจารณาความคุ้มค่าและโอกาสในการพัฒนาเชิงพาณิชย์ในอนาคต รวมถึงบทสรุปงานวิจัยถูกแสดงในบทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# การออกแบบรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับ

### 2.1 การออกแบบรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับด้วยการจำลองแบบคงที่

โดยทั่วไปรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับจะมีน้ำหนักมากและมีราคาแพง รถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับมีราคาตั้งแต่ 100,000 ถึง 2,000,000 บาท ซึ่งทำให้ไม่สามารถใช้งานอย่างแพร่หลายได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากผู้ใช้ส่วนใหญ่มีรถเข็นหรือรถเข็นไฟฟ้าอยู่แล้ว จึงเป็นการยากที่จะกระจายการจำหน่ายรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับรูปแบบใหม่ ดังนั้น รถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาให้มน้ำหนักและราคาที่เหมาะสม ส่วนประกอบเพิ่มเติมสำหรับการปั่นพื้นต่างระดับสามารถติดตั้งในรถเข็นไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ทั่วไปได้ในรูปแบบของล้อสายพาน

รถเข็นไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ที่ได้รับเลือกให้เป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาถูกแสดงในรูปที่ 2.1 และข้อมูลจำเพาะแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 รถเข็นไฟฟ้ามีโครงสร้างประกอบด้วยท่ออลูมิเนียมทรงกลมและมีน้ำหนัก 45 กิโลกรัม ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เกียร์สองตัว ตัวละ 250 วัตต์ เชื่อมต่อโดยตรงกับล้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 นิ้ว ทิศทางถูกควบคุมโดยใช้คันโยก (Joystick) พร้อมชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ อุปกรณ์ทั้งหมดใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนขนาด 24 โวลต์ 20 แอมป์-ชั่วโมง ซึ่งเพียงพอสำหรับการทำงาน 4.98 ชั่วโมง ในระยะทาง 24.92 กิโลเมตร ซึ่งเป็นระยะทางที่เพียงพอต่อการเดินทางปกติของผู้สูงอายุและผู้พิการในแต่ละวัน

คันโยกบังคับ



มอเตอร์เกียร์

(ก) รถเข็นไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ทั่วไป

(ข) แบบจำลองรถเข็นไฟฟ้าเชิงพาณิชย์

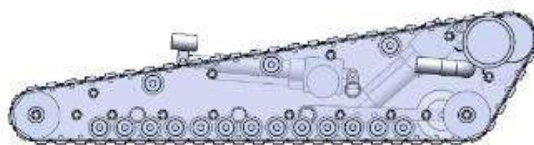
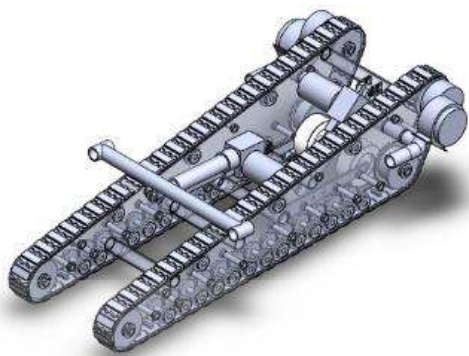
รูปที่ 2.1 รถเข็นไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ทั่วไป

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลจำเพาะของรถเข็นไฟฟ้าเชิงพาณิชย์

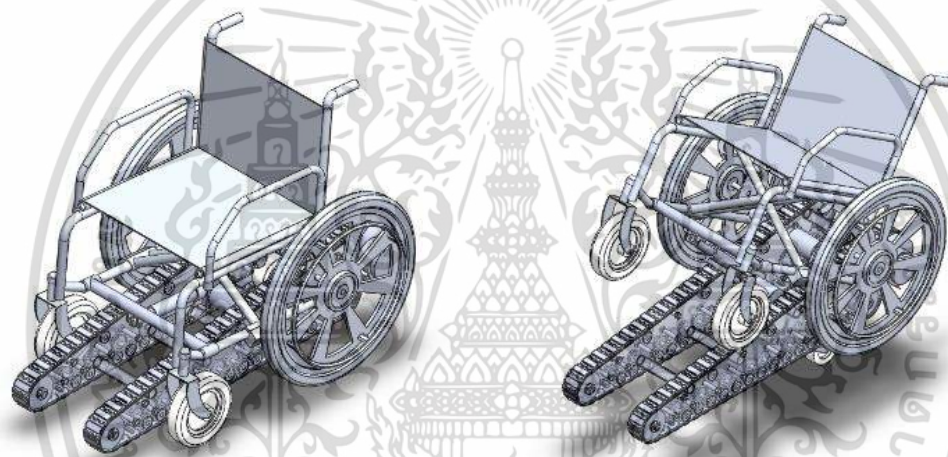
รายการ	ข้อมูลจำเพาะ
มอเตอร์	มอเตอร์เกียร์ 2 ตัว ตัวละ 250 วัตต์
แบตเตอรี่	แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 24 โวลต์ 20 แอมป์ชั่วโมง
ระยะเวลาชาร์จ	7.41 ชั่วโมง
โครงสร้าง	อลูมิเนียม
น้ำหนักรถเข็นไฟฟ้า	45 กิโลกรัม
น้ำหนักบรรทุก	150 กิโลกรัม
ความเร็วสูงสุด	5 กิโลเมตร/ชั่วโมง
เวลาการใช้งาน	4.98 ชั่วโมง
ระยะทางการใช้งาน	24.92 กิโลเมตร
ราคา	25,000 บาท

รถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการถูกจำลองโดยใช้โปรแกรมโซลิเวิร์ค (SolidWorks Program) เพื่อออกแบบโครงสร้างและระบบขับเคลื่อน โมเดลจำลองได้รับการออกแบบตามอัตราส่วนจริง และตั้งค่าวัสดุเป็นอลูมิเนียม เพื่อให้เกิดการคำนวณน้ำหนักและหน้าสัมผัสที่ถูกต้อง การทดสอบสามารถจำลองการใช้งานเสมือนจริงได้ ล้อสายพานถูกออกแบบให้มีร่องภายนอกเพื่อให้เกิดการยึดเกาะที่ขอบพื้นต่างระดับ รูปทรงของล้อสายพานแสดงในรูปที่ 2.2 และกำหนดไว้สำหรับการปั่นพื้นต่างระดับที่ขนาดต่าง ๆ อีกทั้งยังออกแบบการติดตั้งให้พอดีกับพื้นที่ว่างภายใต้รถเข็นไฟฟ้าอีกด้วย ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3

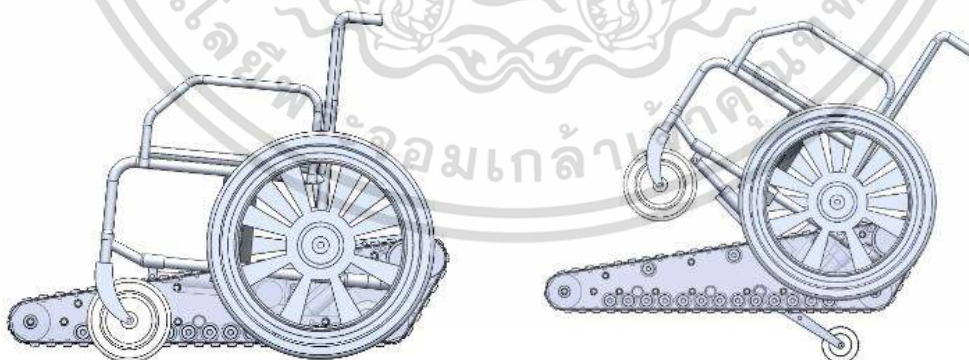
นอกจากนี้รถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการยังได้รับการศึกษาในสามด้าน ได้แก่ การออกแบบโครงสร้าง การจำลองแบบสถิต และการจำลองแบบพลวัต โครงสร้างรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ถูกออกแบบให้เชื่อมต่อแต่ละอุปกรณ์ เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถออกแบบและสร้างได้ในทางปฏิบัติ การจำลองแบบสถิตของโครงสร้างล้อสายพานได้รับการทดสอบโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์แบบสถิตในโปรแกรมโซลิเวิร์ค รายละเอียดเพิ่มเติมถูกแสดงในหัวข้อถัดไป ส่วนการวิเคราะห์แบบพลวัตจะใช้เพื่อศึกษาลักษณะของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลภายใต้สภาวะการเคลื่อนที่แต่ละเงื่อนไข



(ก) มุมมองสามมิติของแบบจำลองล้อสายพาน (ข) มุมมองด้านข้างของแบบจำลองล้อสายพาน  
รูปที่ 2.2 แบบจำลองล้อสายพานของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้



(ก) มุมมองสามมิติของแบบจำลองรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้

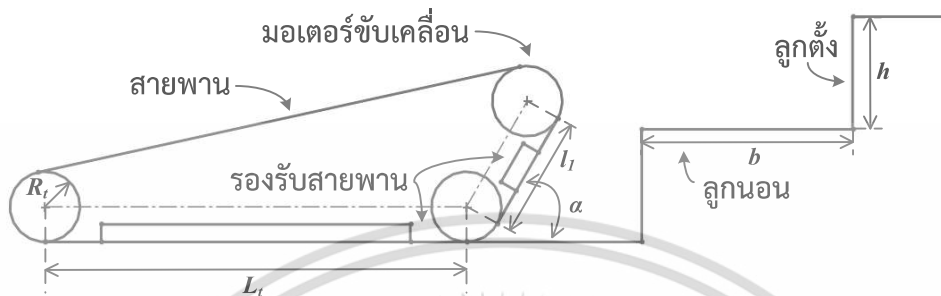


(ข) มุมมองด้านข้างของแบบจำลองรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้  
รูปที่ 2.3 แบบจำลองรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1. การคำนวณการออกแบบล้อยายพาน

ชุดล้อยายพานประกอบด้วยล้อยายพานสองล้อที่อยู่ทั้ง 2 ข้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ล้อแต่ละข้างในรูปที่ 2.4 และ 2.5 ติดตั้งเพลลาขับเคลื่อน 1 เพลลา ลูกกลิ้งติดตาม 2 ตัว ลูกกลิ้งรองรับ 16 ตัว และโครงล้อยายพาน



รูปที่ 2.4 การคำนวณโครงสร้างล้อยายพาน

ล้อยายพานได้รับการออกแบบมาเพื่อให้สามารถป็นพื้นต่างระดับได้ง่าย ดังนั้นสายพานจะต้องถูกยึดไว้อย่างสมบูรณ์ที่ขอบพื้นต่างระดับ ศูนย์กลางของเพลลาขับเคลื่อนควรสูงกว่าขอบบนของพื้นต่างระดับ ดังแสดงในสมการที่ 1 [30]

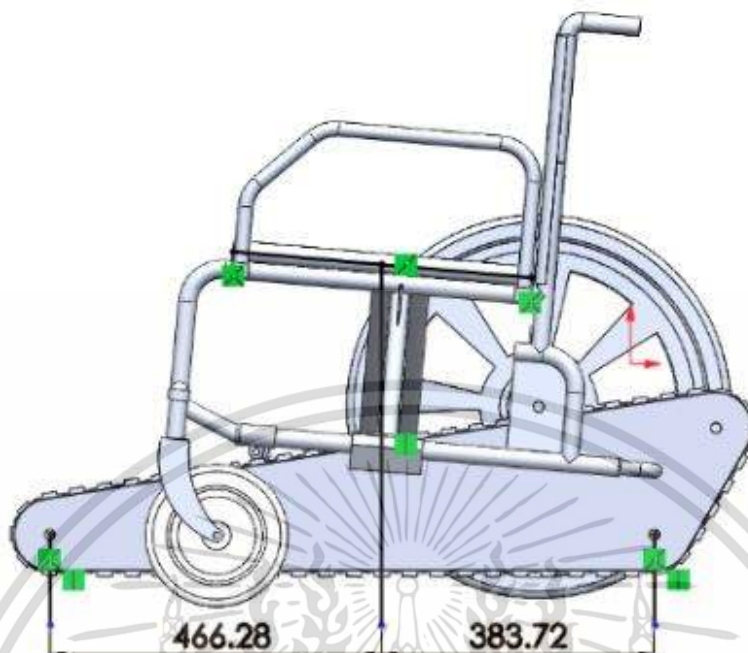
$$l_1 \sin \alpha + R_t \geq h \quad (1)$$

ล้อยายพานจะต้องสามารถเคลื่อนที่บนขอบขั้นพื้นต่างระดับได้ และด้านล่างของล้อต้องสัมผัสกับขอบของพื้นต่างระดับทั้งสองข้างตลอดเวลา ดังนั้น ความยาวล้อยายพาน ( $L_t$ ) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2 [30]

$$L_t \geq 2\sqrt{b^2 + h^2} \quad (2)$$

โดยที่	$L_t$	หมายถึง	ความยาวของขอบล่างของล้อยายพาน
	$l_1$	หมายถึง	ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเพลลาขับเคลื่อนและลูกกลิ้งติดตามด้านหน้า
	$R_t$	หมายถึง	รัศมีของเพลลาและลูกกลิ้งติดตาม
	$\alpha$	หมายถึง	มุมระหว่างหน้าล้อและแกนนอน
	$h$	หมายถึง	ลูกตั้งของพื้นต่างระดับ
	$b$	หมายถึง	ลูกนอนของพื้นต่างระดับ

นอกจากนี้ ตำแหน่งของศูนย์กลางมวลของเบาะนั่งควรอยู่ในแนวเดียวกับศูนย์กลางมวลของล้อยายพาน และเอียงไปทางด้านหลังของล้อยายพาน เพื่อให้รถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับสามารถไต่พื้นต่างระดับได้อย่างมั่นคงโดยไม่พลิกคว่ำดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งของล้อสายพาน

#### 2.1.2. การจำลองแบบสถิตของโครงล้อสายพาน

ล้อสายพานถูกจำลองโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์แบบสถิตในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (SolidWorks) เพื่อประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างล้อสายพาน โครงสร้างล้อสายพานที่ใช้แสดงในรูปที่ 2.6 (ก) ซึ่งจำลองโดยใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 เพื่อให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบา พารามิเตอร์ทางกลของโครงล้อสายพานแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักบรรทุกได้ถึง 2000 นิวตัน โดยมีน้ำหนักโครงสร้างเพียง 4.89 กิโลกรัม

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลจำเพาะของโครงล้อยายพาน

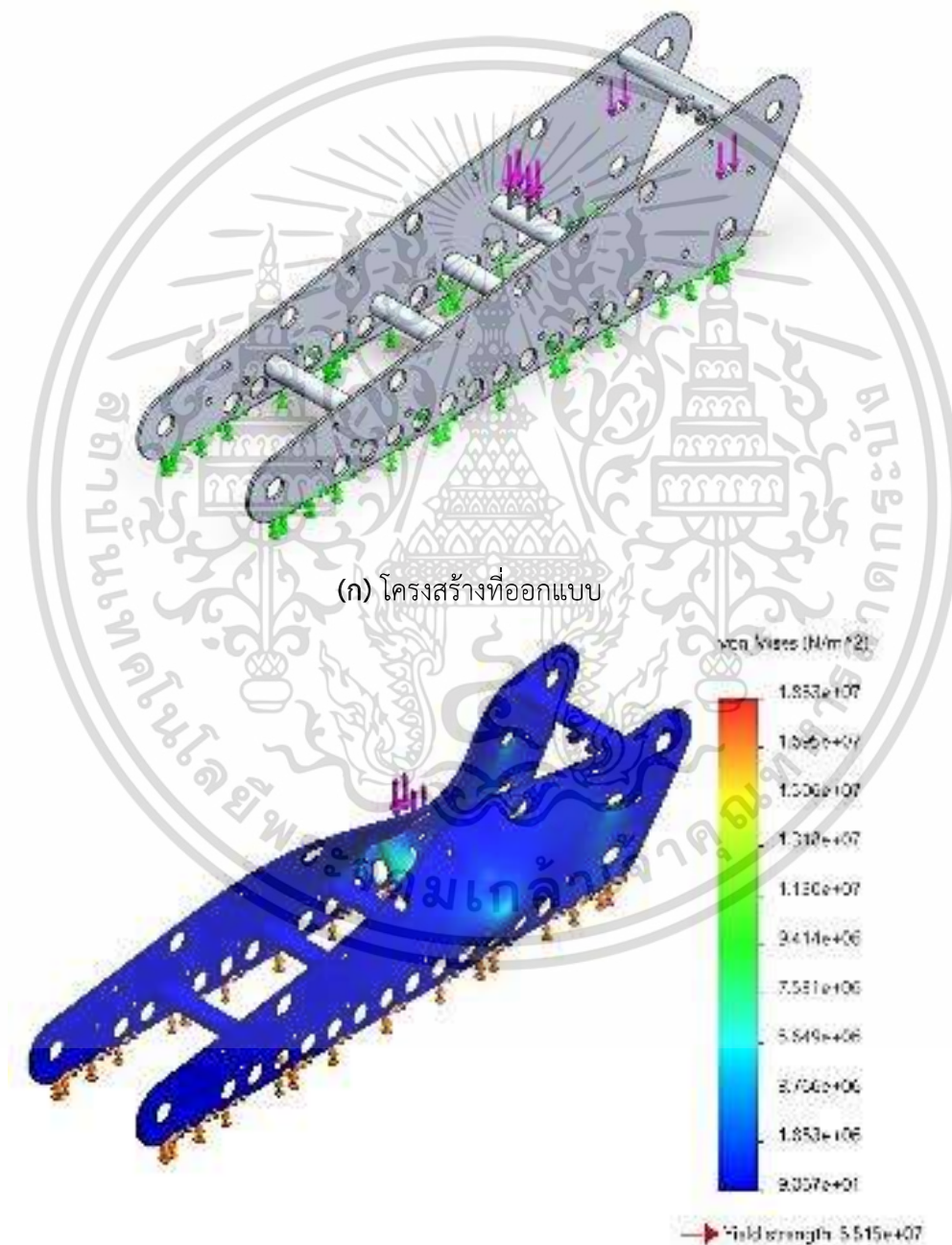
โมเดล :	โครงล้อยายพานแบบถอดประกอบได้	
วัสดุ :	อลูมิเนียมอัลลอย 6061	
มวล :	4.89007	กิโลกรัม
ปริมาตร :	0.00181114	ลูกบาศก์เมตร
น้ำหนัก :	47.9226	นิวตัน
ความแข็งแรงวัสดุ (Yield strength) :	$5.51485 \times 10^7$	นิวตัน/ตารางเมตร
ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) :	$1.24084 \times 10^8$	นิวตัน/ตารางเมตร
โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) :	$6.9 \times 10^{10}$	นิวตัน/ตารางเมตร
อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) :	0.33	
ความหนาแน่นของมวล (Mass density) :	2,700	กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
โมดูลัสแรงเฉือน (Shear modulus) :	$2.6 \times 10^{10}$	นิวตัน/ตารางเมตร

การวิเคราะห์แบบสถิตของโครงสร้างล้อยายพานเริ่มต้นด้วยการสร้างแบบจำลองและกำหนดเงื่อนไขการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (SolidWorks) ซึ่งรวมถึงวัสดุ จุดยึด และจุดรับน้ำหนัก โครงสร้างนี้ใช้โลหะผสมอลูมิเนียม 6061 เป็นวัสดุและกำหนดจุดยึดได้วงล้อ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) จุดรับน้ำหนัก 4 จุดถูกกำหนดให้รับน้ำหนักรวม 2,000 นิวตัน การคำนวณดำเนินการโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์แบบสถิต ในแง่ของความเค้น ความเครียด และการยุบตัว ดังนั้น ค่าสูงสุดและต่ำสุดสำหรับแต่ละพารามิเตอร์จะแสดงในตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.6 (ข)–(ง) ตามลำดับ ความเค้นของโครงอยู่ระหว่าง  $90.67$  ถึง  $1.883 \times 10^7$  นิวตันต่อตารางเมตร ความเครียดสูงสุดกระทำบนท่อที่เชื่อมต่อกับตัวขับเคลื่อนเพื่อผลักรถเข็นไฟฟ้า และไม่เกินค่ากำลังครากของวัสดุ ( $5.515 \times 10^7$  นิวตันต่อตารางเมตร) ดังนั้น โครงสร้างนี้จะไม่เสียรูประหว่างการใช้งาน ความเครียดของเฟรมมีค่าระหว่าง  $6.900 \times 10^{-10}$  และ  $1.643 \times 10^{-4}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ค) ความเครียดสูงสุดยังคงอยู่บนท่อที่เชื่อมต่อกับตัวขับเคลื่อน เพราะเป็นจุดรองรับน้ำหนักมากที่สุด สุดท้าย การยุบตัวแสดงในรูปที่ 2.6 (ง) ซึ่งแสดงถึงจุดยุบของโครงล้อยายพาน การยุบตัวของโครงน้อยกว่า 0.05 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้และไม่เป็นอันตรายต่อการใช้งาน ดังนั้นโครงสร้างที่ออกแบบโดยรวมจึงแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งานและมีน้ำหนักโครงสร้างที่ยอมรับได้

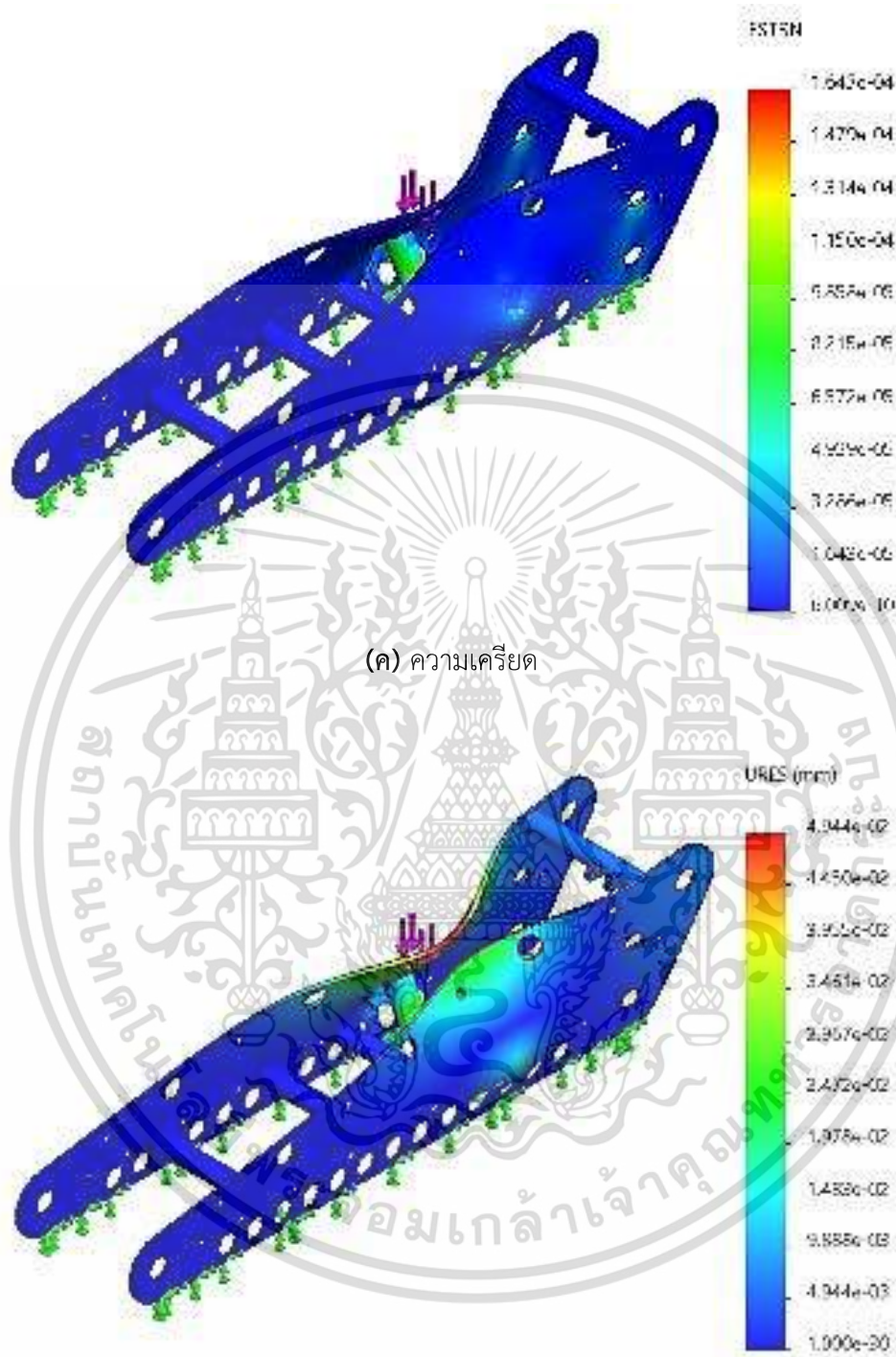
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ผลลัพธ์พารามิเตอร์ของการจำลองแบบคงที่

พารามิเตอร์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	หน่วย
ความเค้น	90.67	$1.883 \times 10^7$	นิวตัน/ตารางเมตร
ความเครียด	$6.009 \times 10^{-10}$	$1.643 \times 10^{-4}$	
การยุบตัว	0.00	0.05	มิลลิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การจำลองแบบคงที่ของโครงล้อยายพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3. การคำนวณกำลังมอเตอร์ของล้อสายพาน

การขับเคลื่อนของล้อสายพานเป็นไปตามหลักการของการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล กำลังขับเคลื่อน ( $P$ ) เป็นผลคูณของแรงฉุดลากรวม ( $F_t$ ) และความเร็วการเคลื่อนที่ ( $V$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3 แรงฉุดลากทั้งหมด ( $F_t$ ) คือ ผลรวมของแรงเนื่องจากความเร่งและผลรวมของแรงต้าน ( $\Sigma F_r$ ) ดังแสดงในสมการที่ 4 [31]

$$P = F_t V, \quad (3)$$

$$F_t = f_m M \alpha + \Sigma F_r \quad (4)$$

ดังนั้น ผลรวมของแรงต้านทาน ( $\Sigma F_r$ ) คือ ผลรวมของแรงต้านทานการหมุน แรงต้านกระแสลม และแรงที่กระทำเพื่อขึ้นทางลาด ดังแสดงในสมการที่ 5 [31]

$$\Sigma F_r = Mg C_{rr} V \cos \theta + \frac{1}{2} \rho A C_d V (V - V_w)^2 + Mg V \sin \theta \quad (5)$$

ดังนั้น กำลังขับของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับจึงแสดงไว้ในสมการที่ 6 [31] ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อกำลังขับเคลื่อนในตารางที่ 2.4 ได้แก่ น้ำหนักรวม ความเร็วเคลื่อนที่ และพื้นผิวถนน เนื่องจากพารามิเตอร์เหล่านี้เปลี่ยนแปลงได้ง่ายระหว่างการใช้งาน

$$P = f_m M \alpha V + Mg C_{rr} V \cos \theta + \frac{1}{2} \rho A C_d V (V - V_w)^2 + Mg V \sin \theta \quad (6)$$

โดยที่	$P$	หมายถึง	กำลังขับเคลื่อนของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ
	$F_t$	หมายถึง	แรงฉุดลากรวม
	$F_r$	หมายถึง	แรงต้านทาน
	$M$	หมายถึง	มวลรวมของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ
	$f_m$	หมายถึง	ตัวประกอบมวลของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ
	$\alpha_a$	หมายถึง	ความเร่งของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ
	$V$	หมายถึง	ความเร็วของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ
	$C_{rr}$	หมายถึง	สัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน
	$g$	หมายถึง	แรงโน้มถ่วง
	$\rho$	หมายถึง	ความหนาแน่นของอากาศ
	$A$	หมายถึง	พื้นที่ด้านหน้าของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ
	$C_d$	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์การลากตามหลักอากาศพลศาสตร์
	$V_w$	หมายถึง	ความเร็วลม
	$\theta$	หมายถึง	มุมความลาดชันของถนน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณกำลังของมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อสายพาน

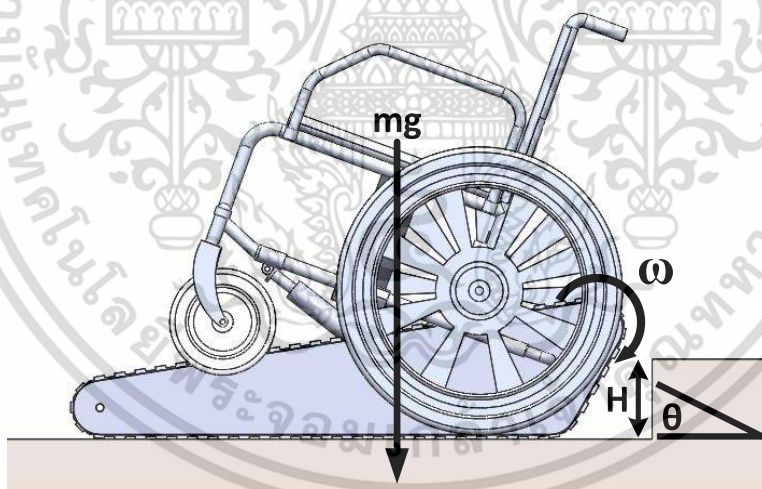
พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
มวลรวมของรถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับ (M)	0-200	กิโลกรัม
ตัวประกอบมวลของรถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับ ( $f_m$ )	1	-
ความเร่งของรถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับ ( $\alpha$ )	1	เมตร/วินาที <sup>2</sup>
ความเร็วของรถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับ (V)	0-2	เมตร/วินาที
ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน ( $C_r$ )	0.012	-
ความโน้มถ่วง (g)	9.8	เมตร/วินาที <sup>2</sup>
ความหนาแน่นของอากาศ ( $\rho$ )	1.225	กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
พื้นที่หน้ารถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับ (A)	1	ตารางเมตร
ค่าสัมประสิทธิ์ตามหลักอากาศพลศาสตร์ ( $C_d$ )	0.5	-
ความเร็วลม ( $V_w$ )	0	เมตร/วินาที
มุมลาดของถนน ( $\theta$ )	0-90	องศา

## 2.2 การออกแบบรถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับด้วยการจำลองแบบพลวัต

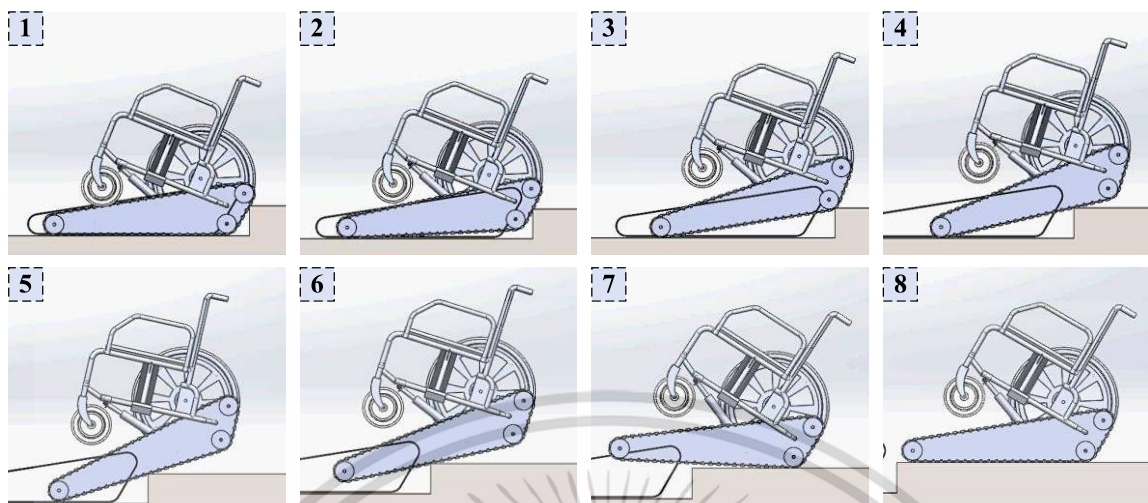
การจำลองการเคลื่อนไหวยของรถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (SolidWorks) เริ่มต้นด้วยการประกอบชิ้นส่วนแบบจำลองตามสภาพแวดล้อมจริง และการตั้งค่าการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ วัสดุที่ใช้ประกอบโครงสร้างถูกกำหนดให้เป็นโลหะผสมอลูมิเนียม 6061 เพื่อกำหนดคุณสมบัติทางกล การจำลองดำเนินการโดยใช้การวิเคราะห์การเคลื่อนไหวย แรงโน้มถ่วงถูกกำหนดตามแกนตั้งที่ 9.81 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> เพลาขับเคลื่อนถูกกำหนดให้เป็นมอเตอร์แบบหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ตามเงื่อนไขการทดสอบ ในขณะที่มอเตอร์แนวราบถูกกำหนดไว้ที่ตัวขับเคลื่อนเชิงเส้น ซึ่งสามารถปรับความยาวได้ตามมุมที่นิ่งด้วยความเร็วการยึดของตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นที่ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที นอกจากนี้ หน้าพื้นผิวสัมผัสของแต่ละอุปกรณ์ยังถูกกำหนดตามประเภทของวัสดุ เพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นส่วนของรถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับจะไม่ทับซ้อนกันขณะจำลองการเคลื่อนที่และเป็นการลดกระบวนการคำนวณของคอมพิวเตอร์ พื้นผิวสัมผัสถูกกำหนดตามคุณสมบัติของวัสดุ โดยสายพาน โครงล้อ เพลาขับเคลื่อน และลูกกลิ้ง ถูกกำหนดเป็นวัสดุอะลูมิเนียม ในขณะที่พื้นถูกกำหนดเป็นวัสดุคอนกรีต สุดท้ายนี้ โปรแกรมจะประเมินการเคลื่อนที่ของรถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับโดยคำนึงถึงผลกระทบของการเปลี่ยนมุมที่นิ่ง น้ำหนักบรรทุก ความเร็วของมอเตอร์ และความสูงของพื้นต่างระดับ ต่อ กำลังและแรงบิดของมอเตอร์ขับเคลื่อน ความเร็วในการเคลื่อนที่ มุมของล้อสายพาน และแรงที่ตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นได้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการเคลื่อนไหวในรูปที่ 2.8 แสดงการทำงานของล้อสายพานในแต่ละขั้นตอน อย่างไรก็ตาม การทดสอบนี้กำหนดให้ล้อสายพานเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้น ผลการทดสอบจึงแสดงให้เห็นจุดอันตรายของการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับ การทดสอบเริ่มต้นโดยให้ล้อสายพานเคลื่อนที่ในแนวนอนเพื่อชนกับพื้นยก (รูปที่ 2.8 (1)) ในรูปที่ 2.9 ขณะที่เกิดการชน ยอดแหลมเกิดขึ้นบนกราฟของผลการทดสอบต่าง ๆ ยอดแหลมเหล่านี้สามารถบรรเทาได้โดยการลดความเร็วการชนของรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับ จากนั้นใช้หน้าล้อในการปั่นพื้นต่างระดับดังแสดงในรูปที่ 2.8 (2) หน้าล้อที่ใช้ปั่นพื้นต่างระดับจะชันมาก ดังนั้น ค่ากำลังและแรงบิดของมอเตอร์จึงสูงที่สุดในช่วงนี้ หลังจากทีหน้าล้อได้ชันได้สำเร็จ (รูปที่ 2.8 (3)) รถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับได้ปรับโหมดเพื่อใช้ทางล้อในการปั่นดังแสดงในรูปที่ 2.8 (4)–(6) ตามสมการการคำนวณกำลังของมอเตอร์ ความชันของการปั่นจะน้อยกว่าการใช้หน้าล้อและจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น เมื่อรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับ ใช้ทางล้อปั่นขึ้นไปในระดับหนึ่ง ซึ่งเวกเตอร์น้ำหนักข้ามพื้นขอบพื้นต่างระดับ ล้อสายพานจะหมุนและส่งให้รถเข็นไฟฟ้าปั่นขึ้นไปอยู่ในระดับที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.8 (7) การหมุนนี้ส่งผลให้เกิดการสั่นของกราฟผลการทดสอบต่าง ๆ การสั่นเหล่านี้สามารถลดลงได้โดยใช้ล้อรองรับ ซึ่งจะกล่าวถึงและทดสอบในหัวข้อถัดไป จากนั้นรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับจะถูกปรับให้เคลื่อนที่ด้วยล้อสายพานในตำแหน่งแนวนอน (รูปที่ 2.8 (8)) และปรับเป็นการเคลื่อนที่ปกติในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2.7 พารามิเตอร์ของการจำลองการเคลื่อนที่แบบพลวัต



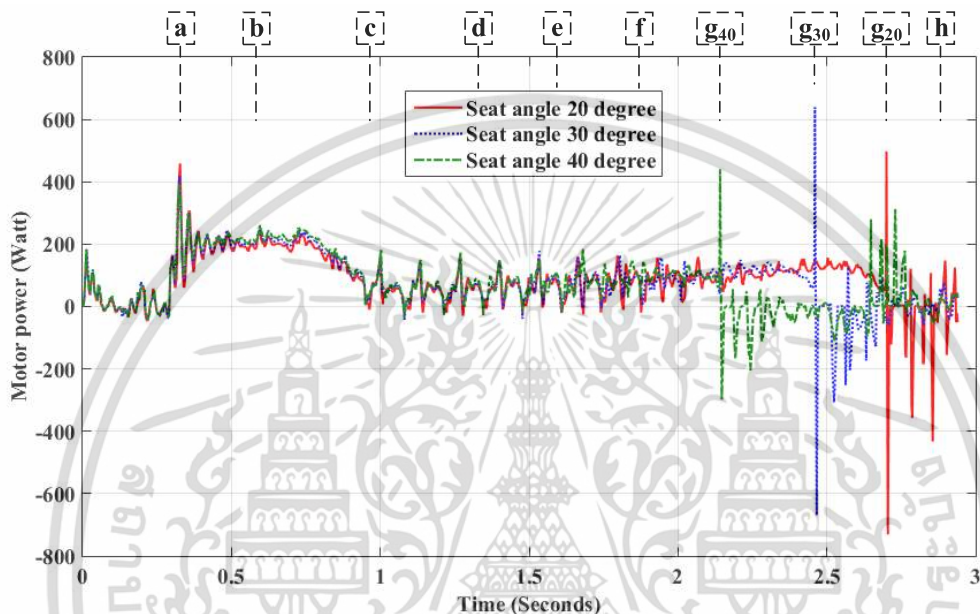
รูปที่ 2.8 การจำลองการเคลื่อนที่แบบพลวัตในช่วงเวลาต่าง ๆ

### 2.2.1 การเปรียบเทียบผลของมุมที่นั่ง

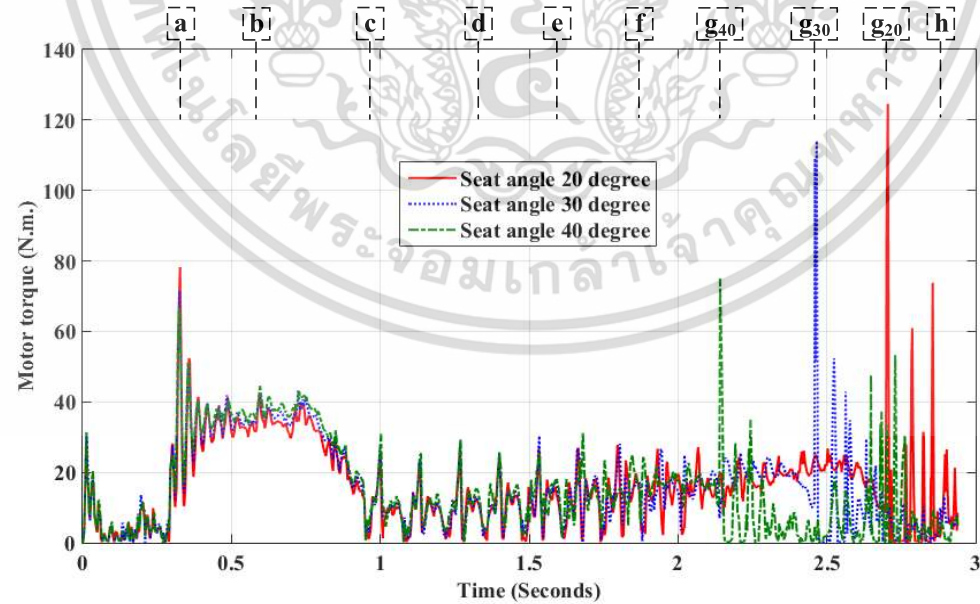
มุมที่นั่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ความมั่นคงในการปีนพื้นต่างระดับ หากมุมที่นั่งต่ำหรือสูงเกินไปจะทำให้เกิดการพลิกคว่ำระหว่างการปีนพื้นต่างระดับ นอกจากนี้ มุมที่นั่งยังส่งผลโดยตรงต่อทิศทางของเวกเตอร์น้ำหนักบรรทุก ซึ่งส่งผลต่อเวลาการทำงานและแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ พารามิเตอร์ของการจำลองการเคลื่อนที่ที่กำหนดที่ความเร็วมอเตอร์คงที่ 56 รอบต่อนาที (1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) น้ำหนักบรรทุก 1,500 นิวตัน และความสูงของชั้นบันได 15 เซนติเมตร การเปลี่ยนแปลงในมุมเบาะนั่งถูกกำหนดไว้ที่ 20 30 และ 40 องศา สัมพันธ์กับล้อยางพาน ผลการจำลองถูกนำเสนอในการเปรียบเทียบกำลังของมอเตอร์ แรงบิดของมอเตอร์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ มุมล้อยางพาน และแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ การสั้นของกราฟขณะที่รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับชนกับพื้นต่างระดับในตอนเริ่มต้นและขณะที่รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับหมุนกระแทกพื้นเมื่อสิ้นสุดการปีนส่งผลกระทบต่อผลการทดสอบทั้งหมดที่จุด a และ g ในรูปที่ 2.9 ดังนั้น การวิเคราะห์ผลลัพธ์ทั้งหมดจึงไม่พิจารณาการสั้นของกราฟทั้ง 2 จุดนี้ เพื่อเน้นถึงผลกระทบที่แท้จริงของแต่ละพารามิเตอร์

ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของมุมที่นั่งไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังของมอเตอร์ แรงบิดของมอเตอร์ และความเร็วในการเคลื่อนที่ ที่น่าสนใจคือ มุมที่นั่งที่มากขึ้นทำให้สามารถปีนพื้นต่างระดับได้เร็วขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.9 - 2.11 กำลังและแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ในระหว่างการปีนด้วยน้ำหนักระหว่างจุด b และ c ในรูปที่ 2.9 และ 2.10 คือ 261.32 วัตต์ และ 44.56 นิวตันเมตร ตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.5 สำหรับความเร็วในการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ที่ช้าลงเมื่อใช้หน้าล้อสายพานปีน แต่เมื่อใช้หางล้อสายพานปีน ความเร็วในการเคลื่อนที่กลับเป็นค่าเดิมและค่อนข้างคงที่ ส่วนเวลาทำงาน ถ้ามุมที่นั่งมีค่าสูง ตำแหน่งของเวกเตอร์น้ำหนักบรรทุก จะถูกเบี่ยงไปทางด้านหลังของล้อสายพานมากขึ้น และรถเข็นไฟฟ้าปีน

พื้นต่างระดับจะถูกส่งไปยังระดับที่สูงขึ้นได้เร็วขึ้น มุมสูงสุดของล้อสายพานจะลดลงตามที่แสดงในรูปที่ 2.12 ตามการวิเคราะห์ที่ตัวขับเคลื่อนได้รับที่แสดงในรูปที่ 2.13 มุมที่นั่งที่สูงขึ้นส่งผลให้แรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับลดลง เนื่องจากมุมของตัวขับเคลื่อนอยู่ใกล้กับเวกเตอร์น้ำหนักบรรทุก ดังนั้น โดยสรุป การเปลี่ยนแปลงมุมที่นั่งไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังของมอเตอร์ แรงบิดของมอเตอร์ และความเร็วในการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตาม จะส่งผลโดยตรงต่อเวลาการทำงาน มุมของล้อสายพาน และแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ

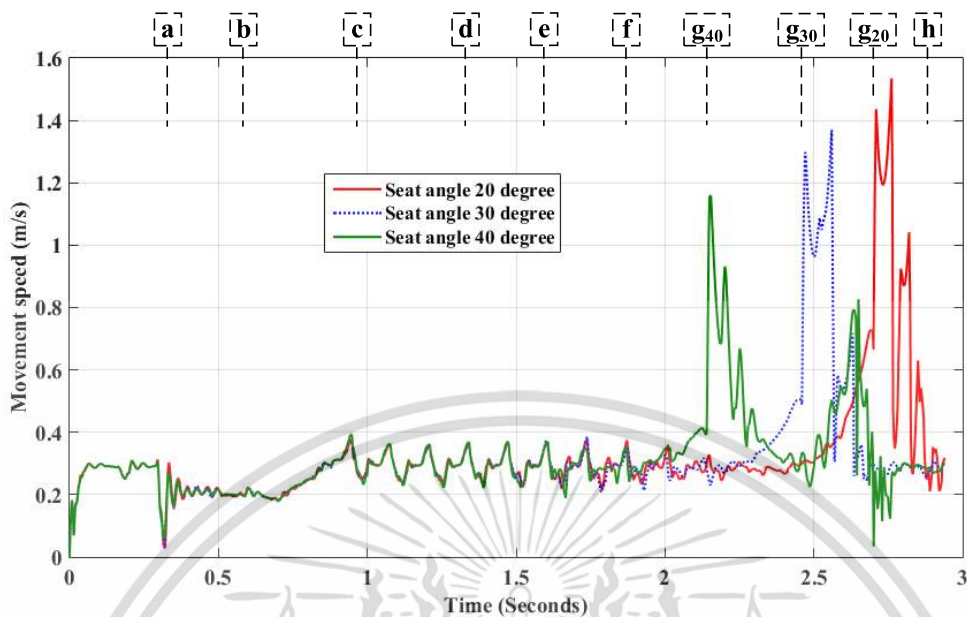


รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงกำลังมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขมุมที่นั่งต่าง ๆ

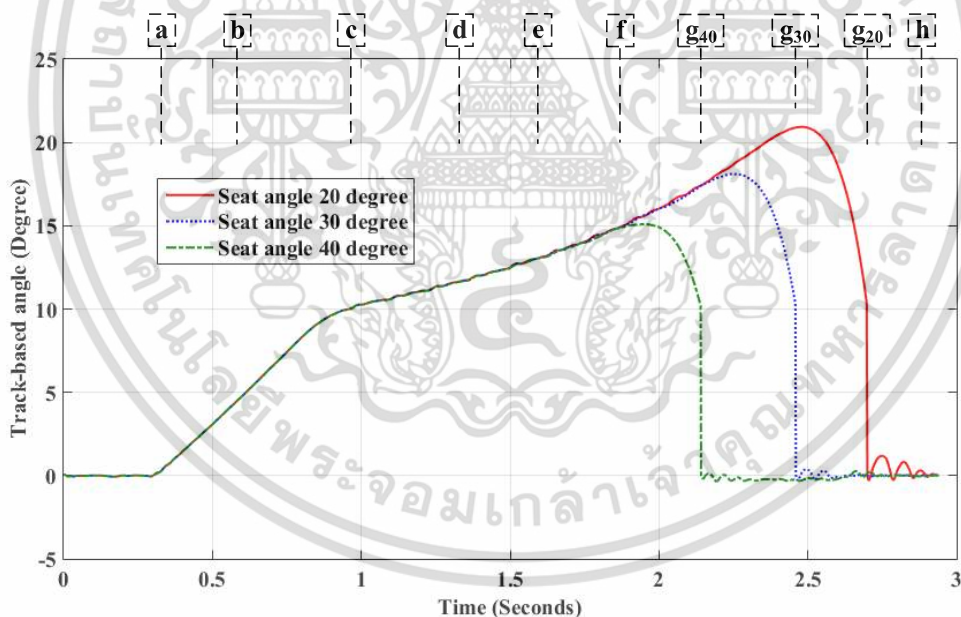


รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงแรงบิดของมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขมุมที่นั่งต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

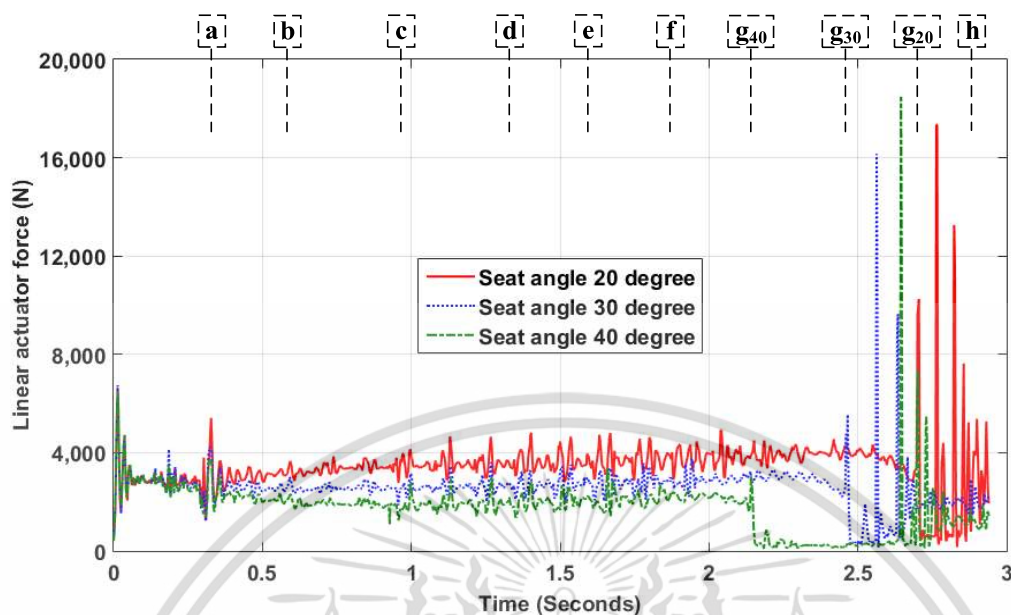


รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขมุมที่นั่งต่าง ๆ



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงมุมล้อสายพานภายใต้เงื่อนไขมุมที่นั่งต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงแรงที่ตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นได้รับภายใต้เงื่อนไขมุมที่นั่งต่าง ๆ

ตารางที่ 2.5 ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ในแต่ละกรณีของการเปลี่ยนแปลงมุมที่นั่ง

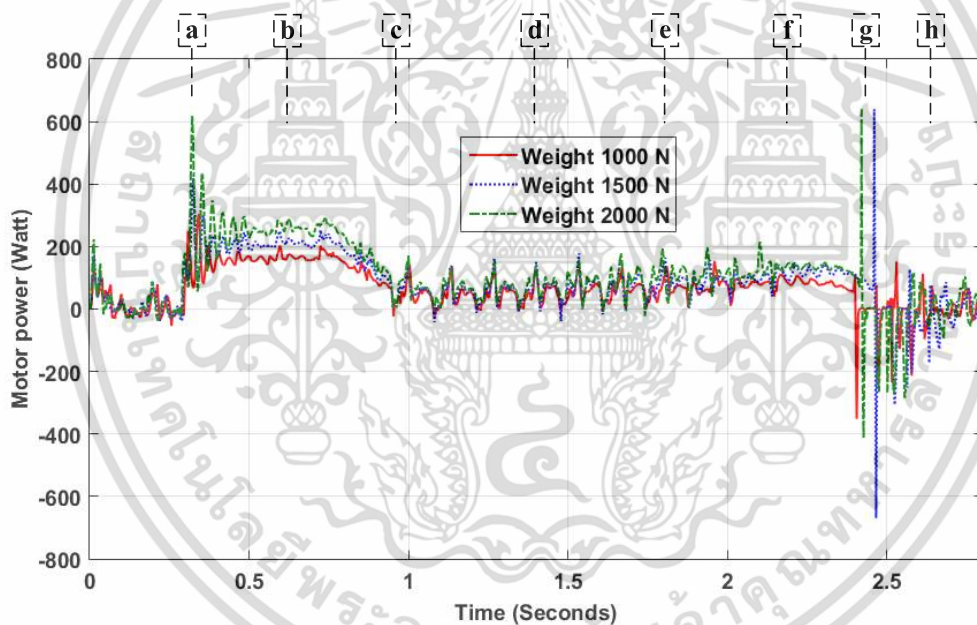
มุมที่นั่ง (องศา)	20	30	40	หน่วย
กำลังมอเตอร์	244.06	253.19	261.32	วัตต์
แรงบิดของมอเตอร์	41.62	43.17	44.56	นิวตันเมตร
ความเร็วในการเคลื่อนที่	0.38	0.39	0.39	เมตร/วินาที
มุมล้อสายพาน	20.94	18.10	15.10	องศา
แรงที่ตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นได้รับ	4928.60	3753.69	3373.85	นิวตัน

### 2.2.2 การเปรียบเทียบผลของน้ำหนักบรรทุก

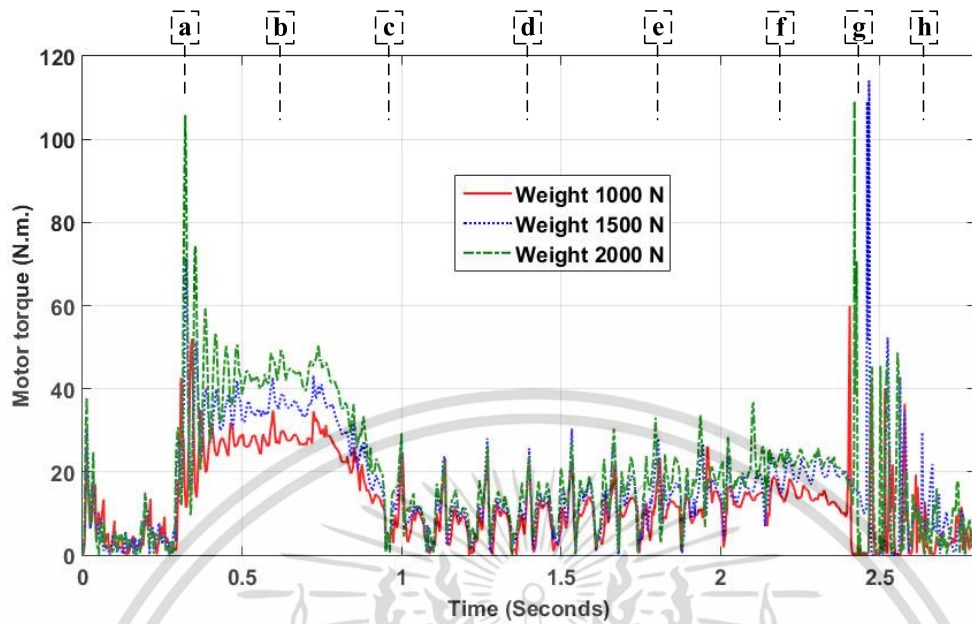
น้ำหนักบรรทุกคือผลรวมของน้ำหนักรถเข็นไฟฟ้าบนพื้นต่างระดับและน้ำหนักผู้โดยสาร น้ำหนักบรรทุกถูกกำหนดในทิศทางเดียวกับความเร่งโน้มถ่วง ซึ่งในการใช้งานจริงอยู่ในช่วง 1,000–2,000 นิวตัน ในการศึกษา น้ำหนักบรรทุกถูกกำหนดให้มีการทดสอบ 3 ค่า ได้แก่ 1,000 1,500 และ 2,000 นิวตัน การจำลองกำหนดความเร็วมอเตอร์คงที่ 56 รอบต่อนาที (1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) มุมที่นั่ง 30 องศา และความสูงพื้นต่างระดับที่ 15 เซนติเมตร

ผลการจำลองถูกนำเสนอในการเปรียบเทียบกำลังของมอเตอร์ แรงบิดของมอเตอร์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ มุมของล้อสายพาน และแรงที่ตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นได้รับ ในการจำลองแบบพลวัต กำลังและแรงบิดของมอเตอร์ที่บรรทุกน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดมีความคล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตาม ในขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นพื้นต่างระดับ

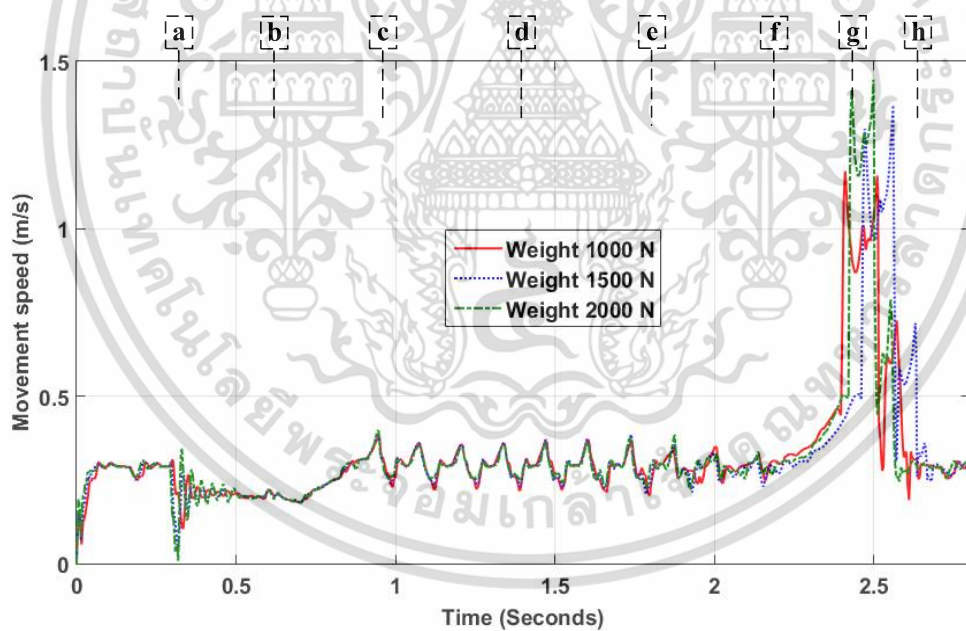
กำลังและแรงบิดของมอเตอร์มีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาจากน้ำหนักบรรทุกที่ 2000 นิวตัน ในตารางที่ 2.6 ซึ่งเป็นน้ำหนักบรรทุกที่มากที่สุดในทางปฏิบัติ กำลังและแรงบิดของมอเตอร์สูงถึง 295.35 วัตต์ และ 50.36 นิวตันเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ใช้น้ำล้อป็นดั่งที่แสดงระหว่างจุด b และ c ในรูป 2.14 และ 2.15 ความเร็วในการเคลื่อนที่ เวลาการทำงาน และมุมของล้อสายพานในรูปที่ 2.16 และ 2.17 ไม่แสดง การเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุก แรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักบรรทุกและมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยในระหว่างระยะเวลาการทำงานในรูปที่ 2.18 และตารางที่ 2.6 แรงสูงสุดของตัวขับเคลื่อนคือ 4721.86 นิวตัน โดยมีน้ำหนักบรรทุก 2,000 นิวตัน โดยสรุป การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกส่งผลกระทบต่อกำลังและแรงบิดของมอเตอร์ และแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ แต่อย่างไรก็ตามจะไม่ส่งผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ เวลาการทำงาน และมุมของล้อสายพาน



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงกำลังมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ

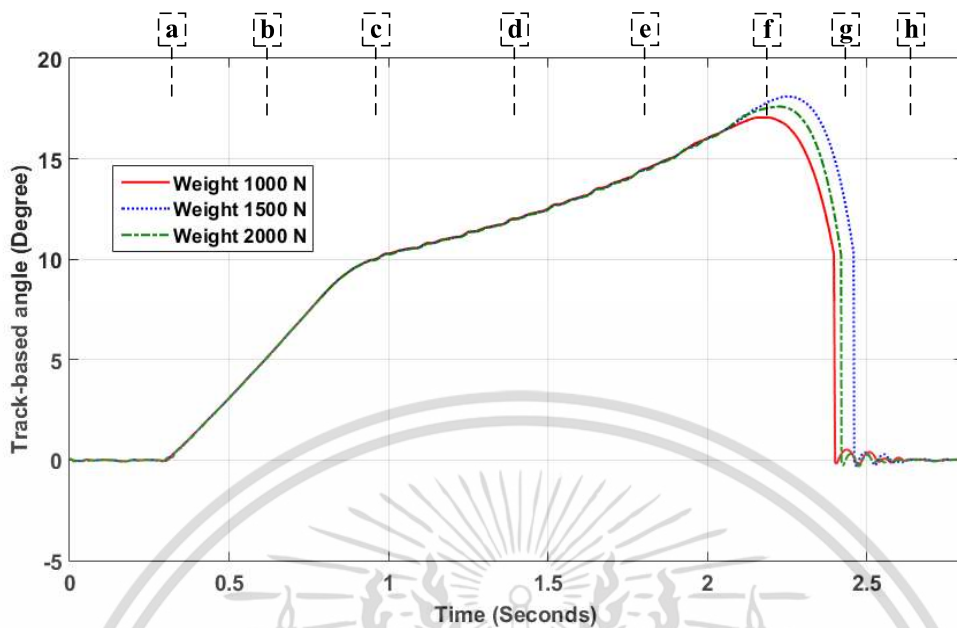


รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงแรงบิดของมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกต่างๆ

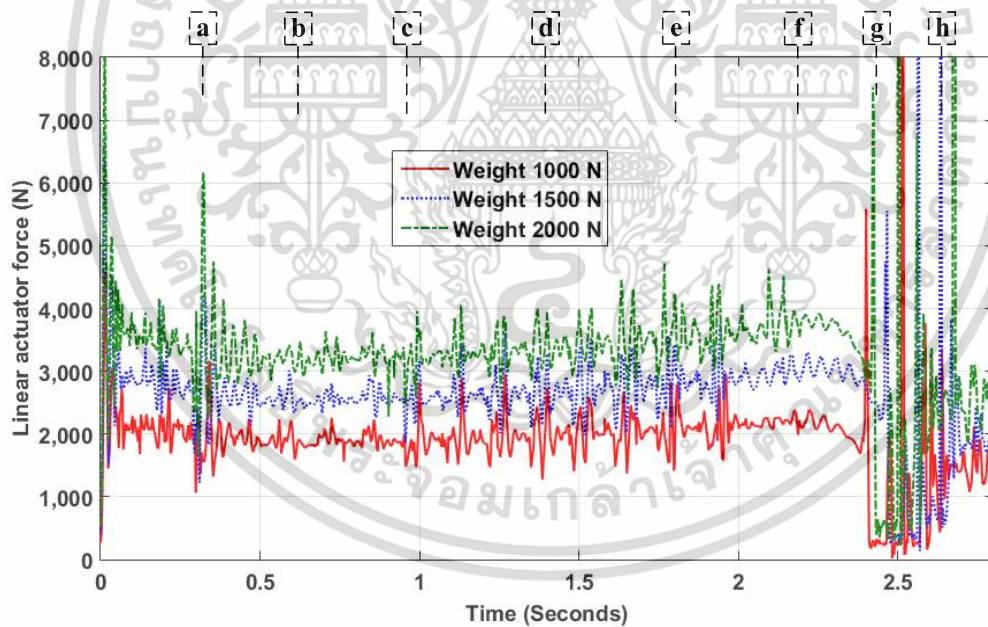


รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การเปลี่ยนแปลงมุมล้อยสายพานภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกต่างๆ



รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงแรงที่ตัวขับเคลื่อนเส้นได้รับภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักบรรทุกต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ในแต่ละกรณีของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุก

น้ำหนักบรรทุก (นิวตัน)	1000	1500	2000	หน่วย
กำลังมอเตอร์	204.06	253.19	295.35	วัตต์
แรงบิดของมอเตอร์	34.80	43.17	50.36	นิวตัน เมตร
ความเร็วในการเคลื่อนที่	0.38	0.39	0.40	เมตร/วินาที
มุมล้อยายพาน	17.06	18.10	17.60	องศา
แรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ	2967.49	3753.68	4721.86	นิวตัน

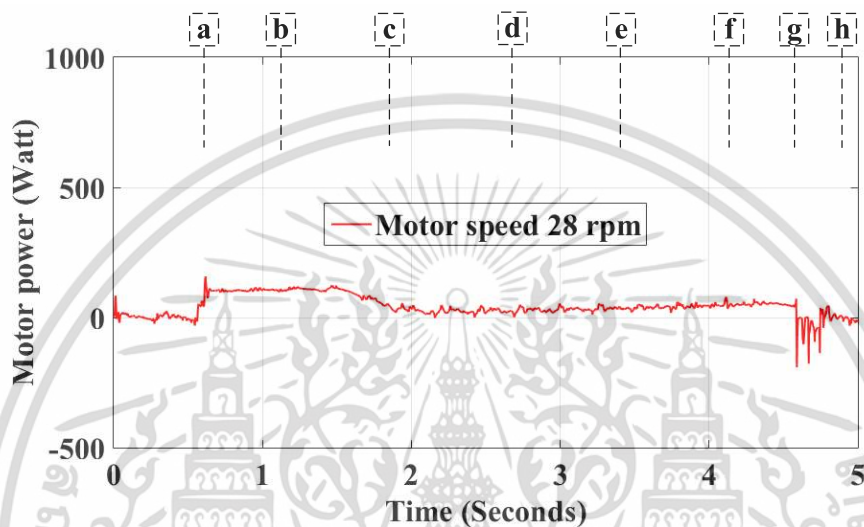
### 2.2.3 การเปรียบเทียบผลของความเร็วมอเตอร์

ความเร็วมอเตอร์หมายถึงความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อสายพานในหน่วยรอบต่อนาที ความเร็วมอเตอร์อ้างอิงจากความเร็วการเดินทางของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับจากการวิจัยก่อนหน้านี้ [2]–[7] ซึ่งมีความเร็วในการเดินทางอยู่ในช่วง 0-2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความเร็วการเดินทางถูกแปลงจากความเร็วการเดินทางของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับในเชิงเส้นไปเป็นความเร็วเชิงมุม เพื่อกำหนดความเร็วคงที่สำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนตามสมการที่ 7 ในการจำลองนี้ รัศมีของเพลาขับเคลื่อนที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ขับเคลื่อนคือ 47 มิลลิเมตร ดังนั้น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของการจำลองนี้จึงถูกตั้งไว้ที่ 0.5 1 1.5 และ 2 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งถูกแปลงเป็นความเร็วมอเตอร์ที่สอดคล้องกันที่ 28 56 84 และ 112 รอบต่อนาที ตามลำดับ การจำลองกำหนดน้ำหนักบรรทุก 1,500 นิวตัน มุมที่นิ่ง 30 องศา และความสูงของพื้นต่างระดับ 15 เซนติเมตร

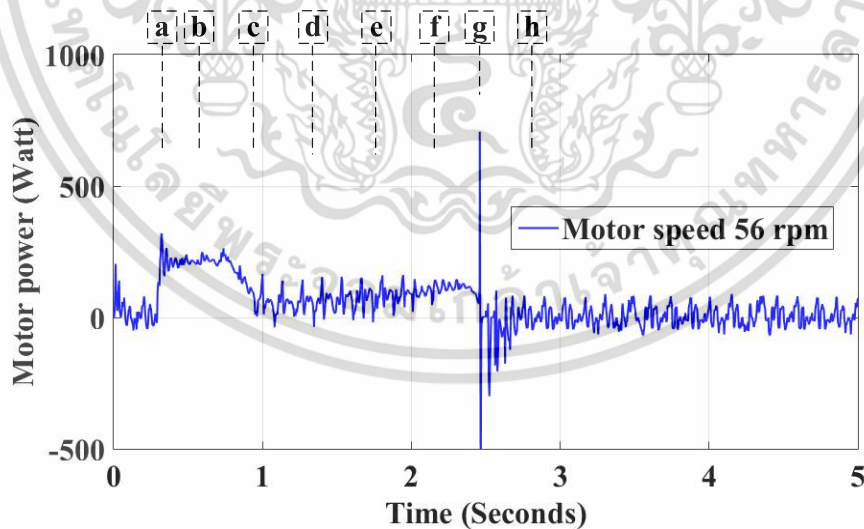
$$\text{Motor speed} = \text{Travel speed} \times \left(\frac{5}{18}\right) \times \left(\frac{60}{2\pi r}\right) \quad (7)$$

ผลการจำลองระบุว่า การเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังของมอเตอร์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ และเวลาการทำงาน อย่างไรก็ตาม จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดของมอเตอร์ มุมของล้อสายพาน และแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และ 2.20 กำลังของมอเตอร์เป็นผลคูณของแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ หากความเร็วของมอเตอร์เพิ่มขึ้นในขณะที่แรงบิดของมอเตอร์คงที่ กำลังของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ ความเร็วของมอเตอร์ที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับและความผันผวนของพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งส่งผลให้สภาพการใช้งานไม่ปลอดภัย ผลการจำลองในตารางที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าความเร็วมอเตอร์ในช่วง 0–56 รอบต่อนาที (0-1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) เหมาะสมที่สุดสำหรับการป็นพื้นต่างระดับ เนื่องจากการสั่นสะเทือนและกำลังของมอเตอร์ที่ความเร็วมีค่าน้อย ค่ากำลังมอเตอร์สูงสุดที่ได้จากการจำลองนี้คือ 123.88 263.21 426.04 และ 648.74 วัตต์ ที่ความเร็วมอเตอร์ 28 56 84 และ 112 รอบต่อนาทีตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน

แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์คือ 42.25 44.88 48.43 และ 55.31 นิวตันเมตร และแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับสูงสุดคือ 3550.25 3668.95 4354.02 และ 5950.91 นิวตัน โดยรวมแล้ว ยิ่งความเร็วของมอเตอร์สูงขึ้น เวลาทำงานก็จะยิ่งลดลง เวลาการทำงานคือ 4.5 2.5 1.7 และ 1.45 วินาที ตามลำดับ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการสั่นที่เกิดขึ้นเมื่อเสร็จสิ้นงานที่จุด g

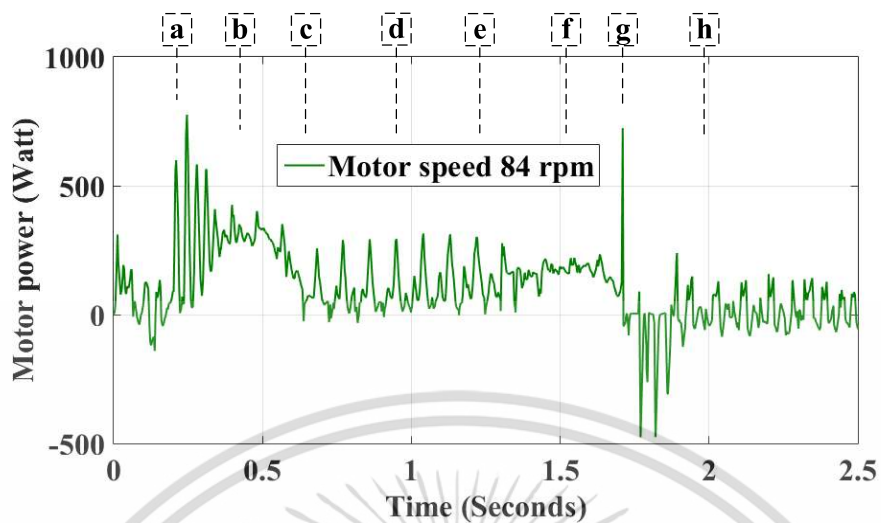


(ก) ความเร็ว 28 รอบต่อนาที

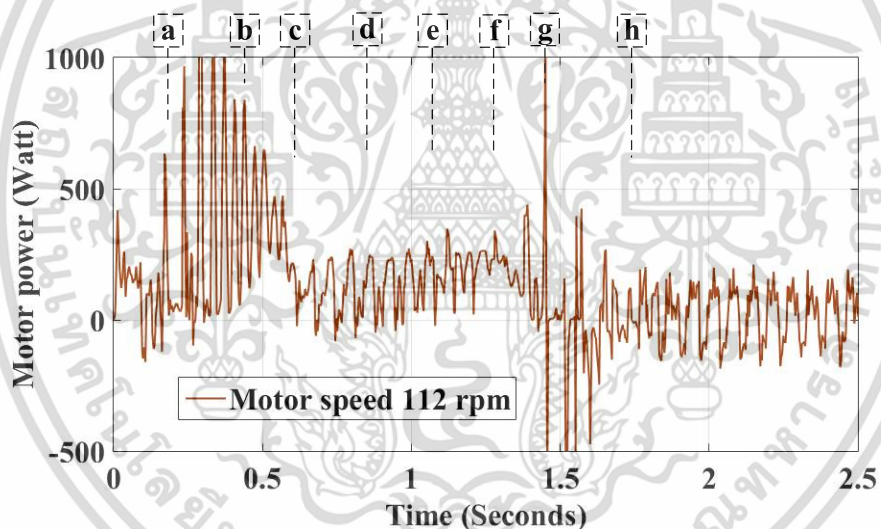


(ข) ความเร็ว 56 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



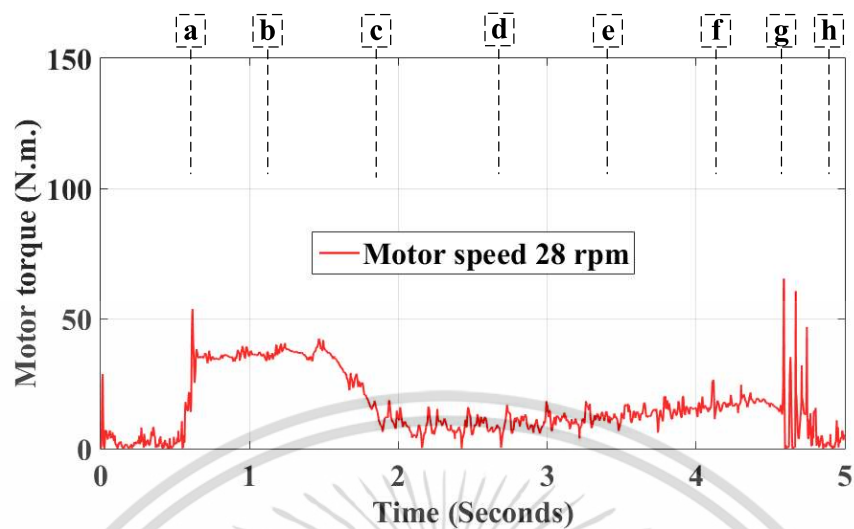
(ค) ความเร็ว 84 รอบต่อนาที



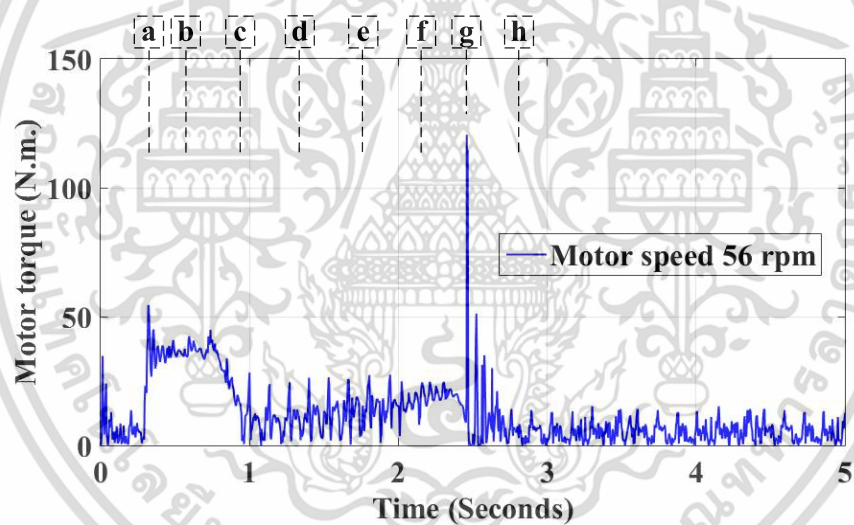
(ง) ความเร็ว 112 รอบต่อนาที

รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงกำลังมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขความเร็วมอเตอร์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

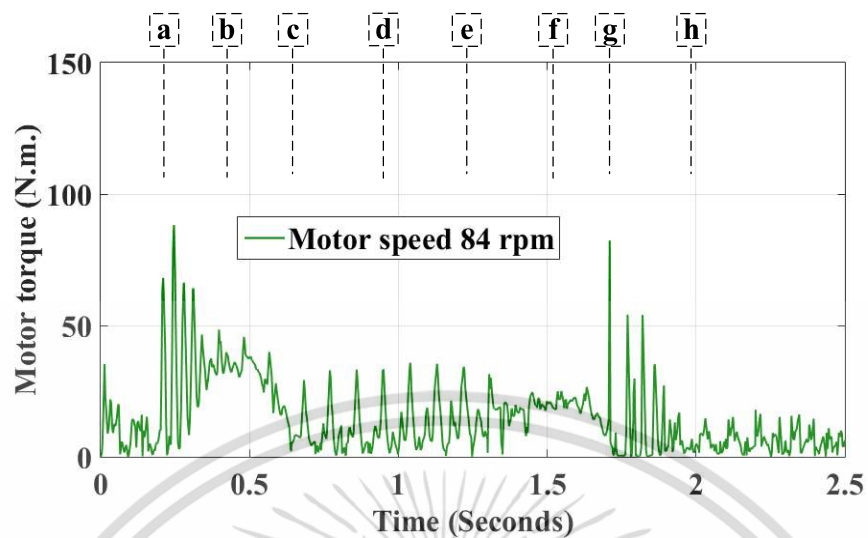


(ก) ความเร็ว 28 รอบต่อนาที

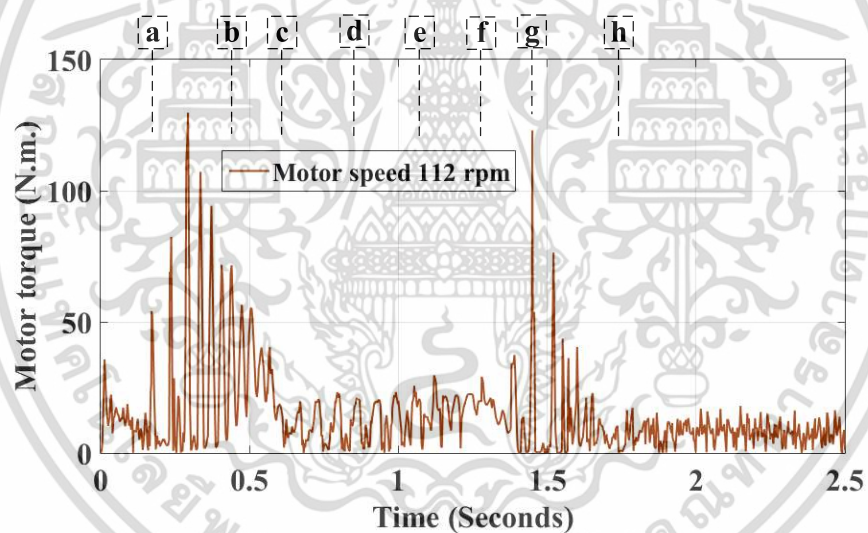


(ข) ความเร็ว 56 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



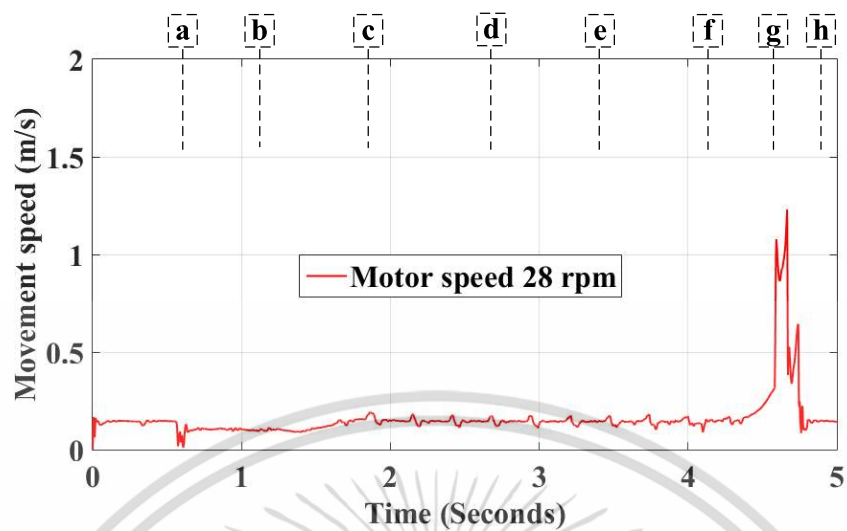
(ค) ความเร็ว 84 รอบต่อนาที



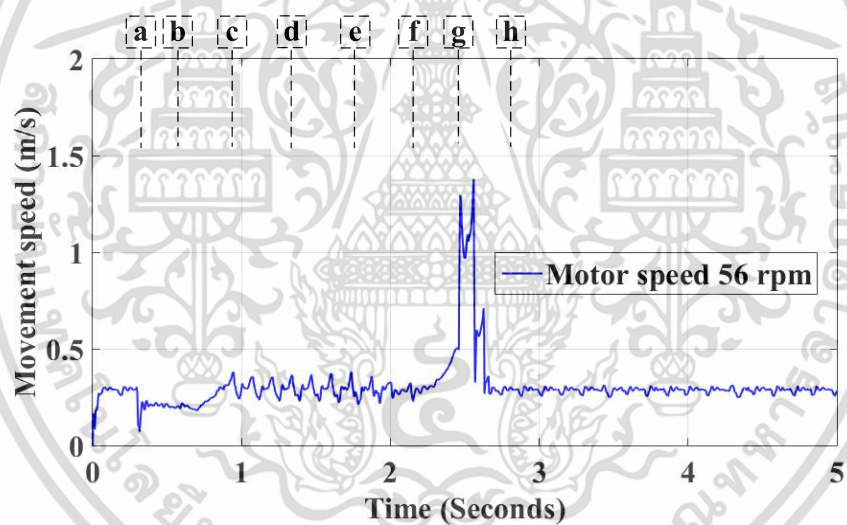
(ง) ความเร็ว 112 รอบต่อนาที

รูปที่ 2.20 การเปลี่ยนแปลงแรงบิดของมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขความเร็วมอเตอร์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

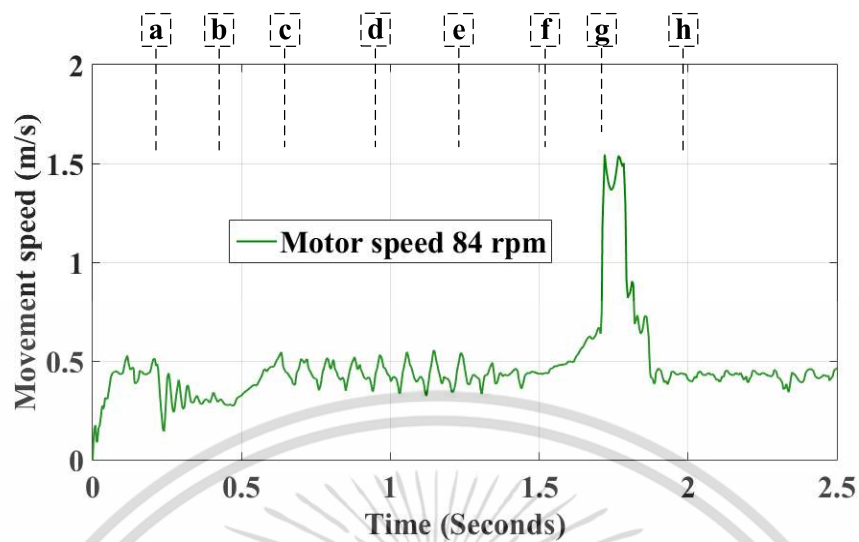


(ก) ความเร็ว 28 รอบต่อนาที

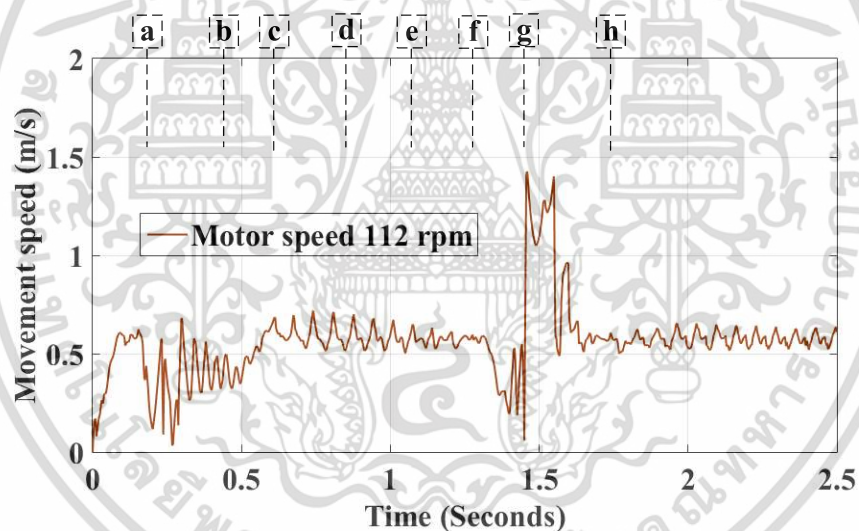


(ข) ความเร็ว 56 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



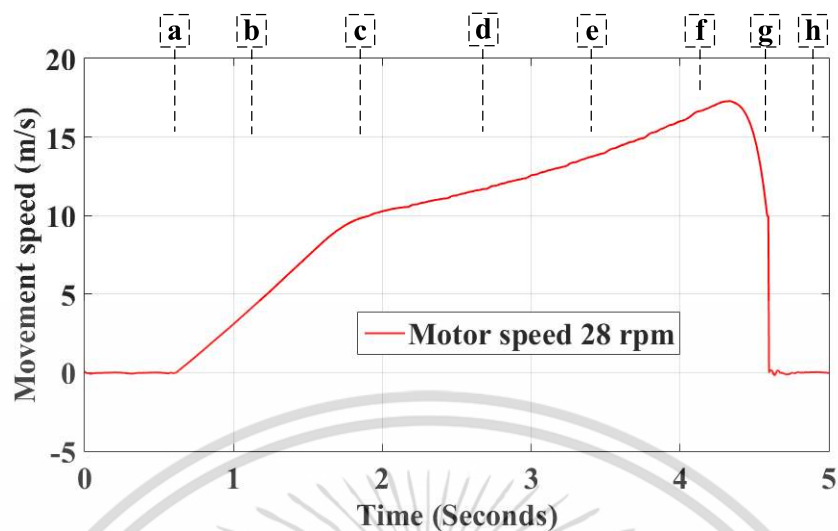
(ค) ความเร็ว 84 รอบต่อนาที



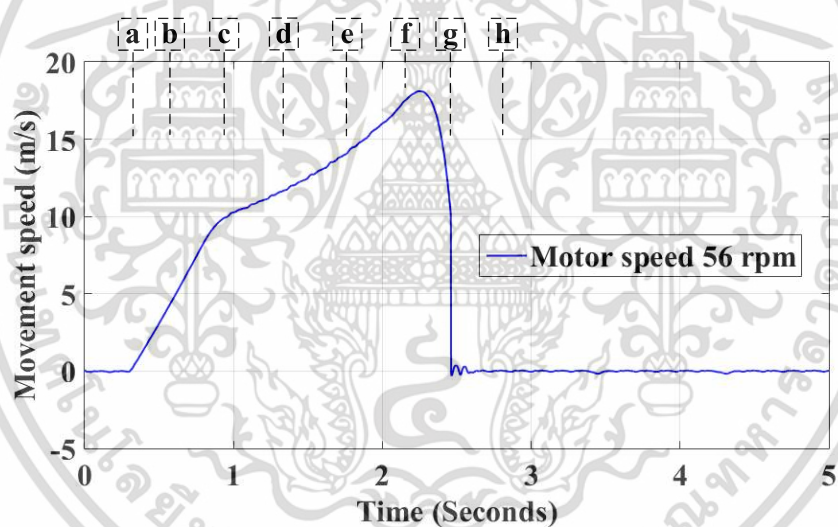
(ง) ความเร็ว 112 รอบต่อนาที

รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขความเร็วมอเตอร์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

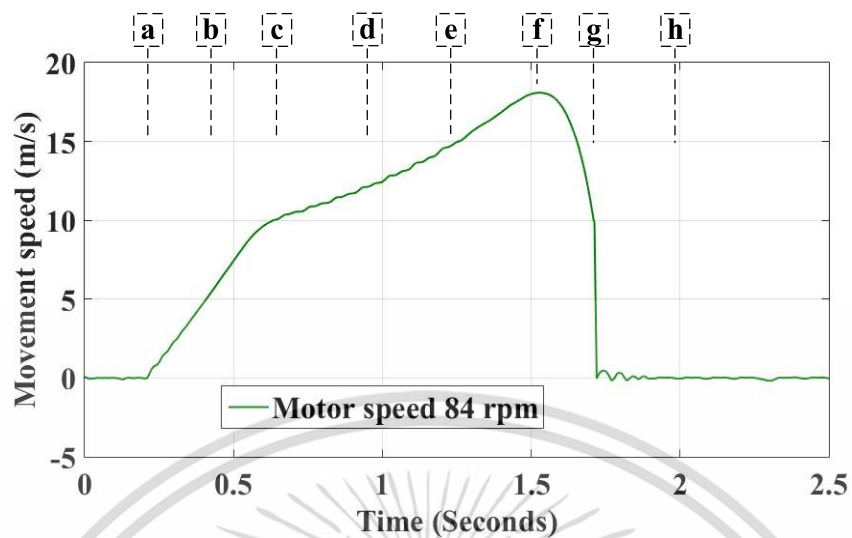


(ก) ความเร็ว 28 รอบต่อนาที

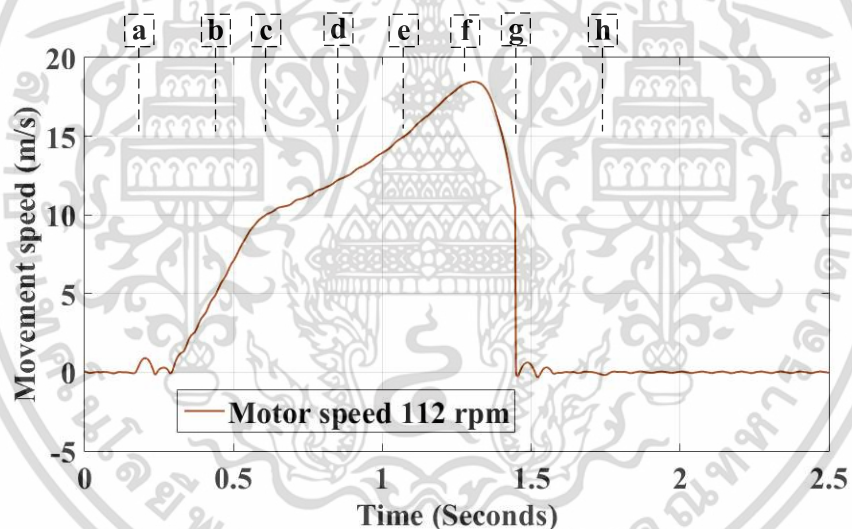


(ข) ความเร็ว 56 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



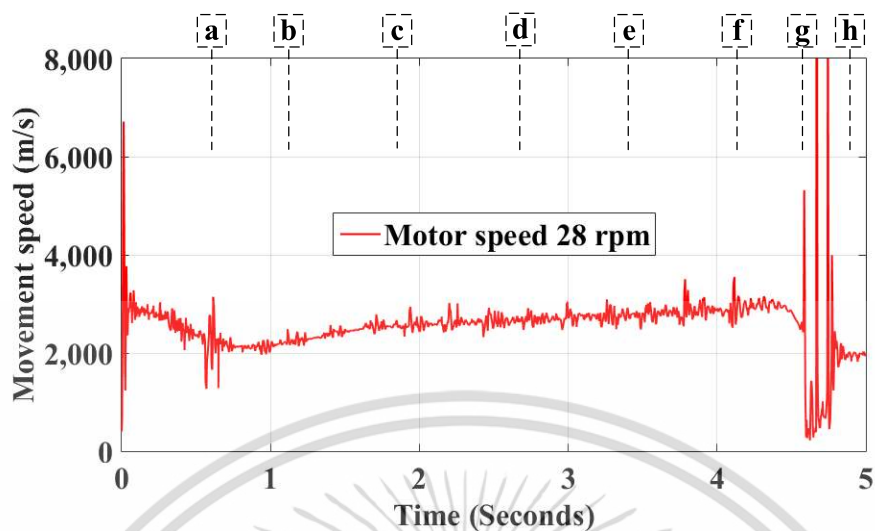
(ค) ความเร็ว 84 รอบต่อนาที



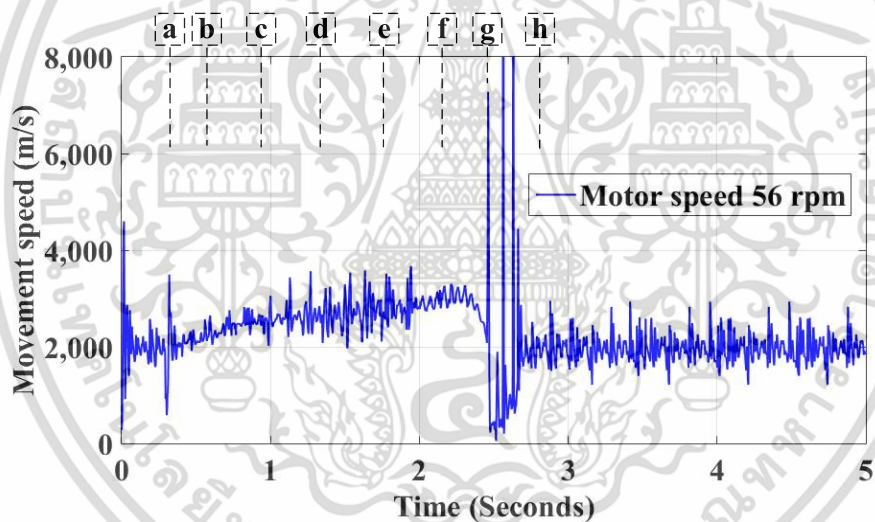
(ง) ความเร็ว 112 รอบต่อนาที

รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงมุมล้อสายพานภายใต้เงื่อนไขความเร็วมอเตอร์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

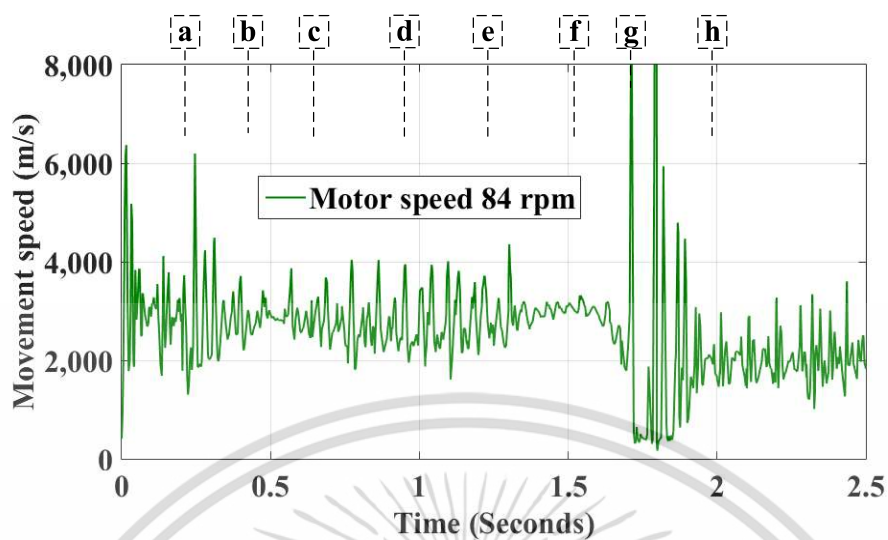


(ก) ความเร็ว 28 รอบต่อนาที

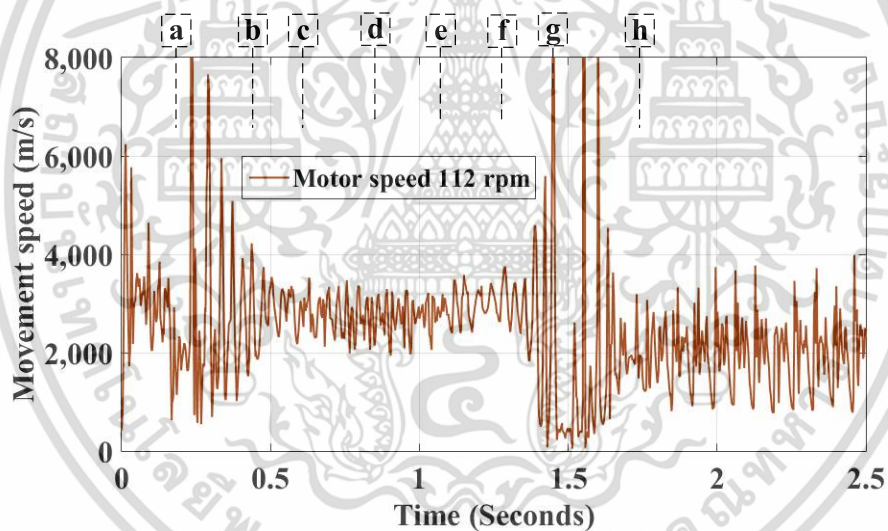


(ข) ความเร็ว 56 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ความเร็ว 84 รอบต่อนาที



(ง) ความเร็ว 112 รอบต่อนาที

รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงแรงที่ตัวขับเชิงเส้นได้รับภายใต้เงื่อนไขความเร็วมอเตอร์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ในแต่ละกรณีของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์

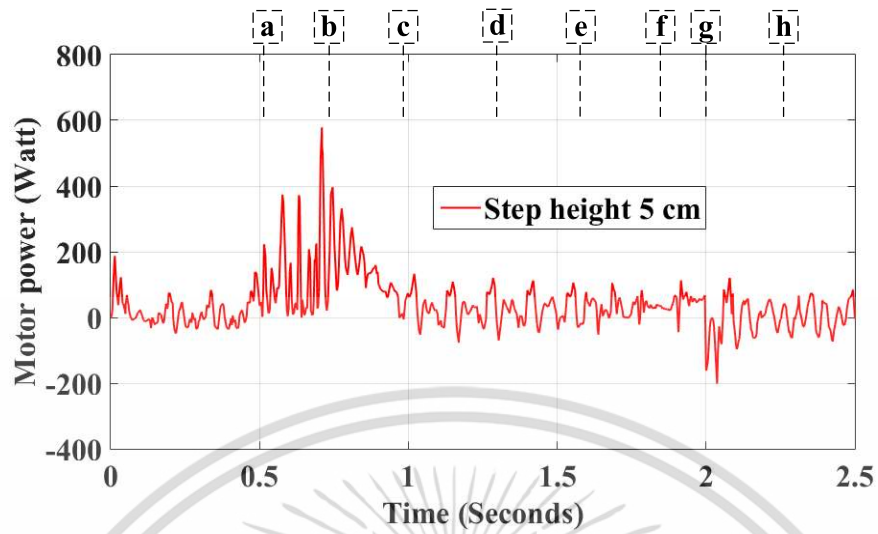
ความเร็วของมอเตอร์ (รอบต่อนาที)	28	56	84	112	หน่วย
กำลังมอเตอร์	123.88	263.21	426.04	648.74	วัตต์
แรงบิดของมอเตอร์	42.25	44.88	48.43	55.31	นิวตัน เมตร
ความเร็วในการเคลื่อนที่	0.19	0.38	0.55	0.72	เมตร/วินาที
มุมล้อสายพาน	17.28	18.10	18.09	18.47	องศา
แรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ	3550.25	3668.95	4354.02	5950.91	นิวตัน

#### 2.2.4 การเปรียบเทียบผลของความสูงพื้นต่างระดับ

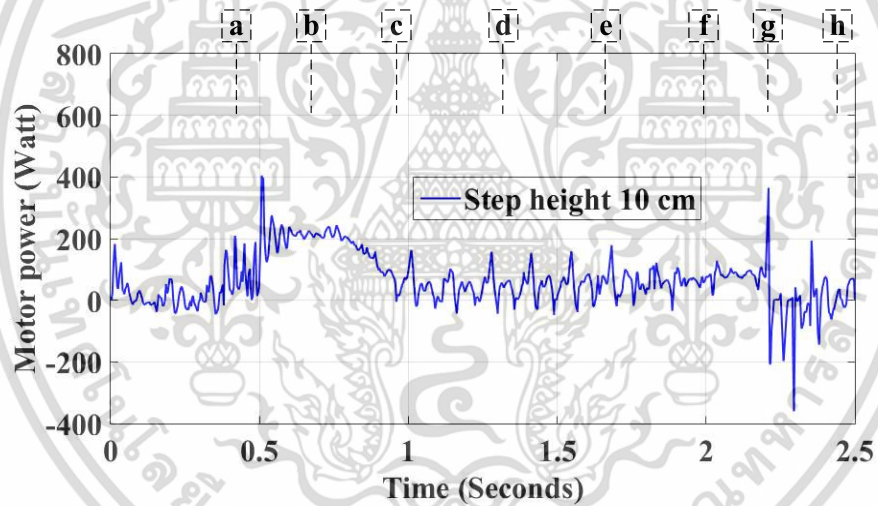
รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับออกแบบมาเพื่อปีนขอบพื้นต่างระดับหรือบันไดสำหรับการเดินทางประจำวัน โดยทั่วไปการออกแบบบันไดจะถูกกำหนดโดยกฎกระทรวงฉบับที่ 55 (พ.ศ. 2543) ออกตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2543 พ.ศ. 2522 ตอนที่ 2 ภาค 3 ว่า “ความกว้างของบันไดต้องไม่น้อยกว่า 80 เซนติเมตร ช่วงหนึ่งสูงไม่เกิน 3 เมตร ลูกตั้งไม่ควรสูงเกิน 20 เซนติเมตร และลูกนอนไม่ต่ำกว่า 22 เซนติเมตร” แต่ความสูงของขอบทางเท้าไม่มีคำจำกัดความที่ชัดเจน อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไป ความสูงจะอยู่ในช่วง 0–20 เซนติเมตร ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงกำหนดลูกตั้งพื้นต่างระดับที่มีความสูง 5–20 เซนติเมตร สำหรับการทดสอบการปีนพื้นต่างระดับของรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับ ดังนั้น การทดสอบลูกตั้งค่าไว้ที่ 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร ในแต่ละการจำลอง และพารามิเตอร์อื่นๆ ถูกกำหนดดังนี้ ความเร็วมอเตอร์คงที่ 56 รอบต่อนาที (1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) น้ำหนักบรรทุก 1,500 นิวตัน และมุมที่นิ่ง 30 องศา

การเปลี่ยนแปลงความสูงของพื้นต่างระดับจะส่งผลโดยตรงต่อเวลาการทำงานและมุมของล้อสายพาน ในรูปที่ 2.24 และ 2.25 ยิ่งความสูงของพื้นต่างระดับลดลง เวลาในการทำงานก็จะยิ่งลดลง อย่างไรก็ตาม กำลังและแรงบิดของมอเตอร์ยังคงเหมือนเดิม ในขั้นต้น สำหรับมุมของล้อสายพานขณะปีนพื้นต่างระดับ หน้าล้อจะติดกับขอบของพื้นต่างระดับ ในตารางที่ 2.8 มุมของล้อสายพานสูงสุดขณะใช้หน้าล้อปีนคือ 3.37 6.76 10.16 และ 13.61 องศา ตามลำดับ จากนั้นระบบจะปรับไปที่โหมดการใช้หางล้อปีน และมุมของล้อสายพานสูงสุดขณะใช้หางล้อปีนคือ 4.64 10.56 18.10 และ 31.79 ตามลำดับ แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของมุมล้อสายพานนั้นคล้ายกับแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความสูงพื้นต่างระดับ อย่างไรก็ตาม ค่ามุมล้อสายพานสูงสุดจะขึ้นอยู่กับความสูงของพื้นต่างระดับและมุมที่นิ่ง ดังนั้น หากความสูงของพื้นต่างระดับและมุมที่นิ่งมีความสมดุลจะทำให้มุมล้อสายพานต่ำสุด ช่วยป้องกันการพลิกคว่ำ และปรับให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.26 สุดท้าย ยิ่งพื้นต่างระดับสูงเท่าใด แรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น เนื่องจากมุมของแรงนี้อยู่ห่างจากแนวตั้งมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

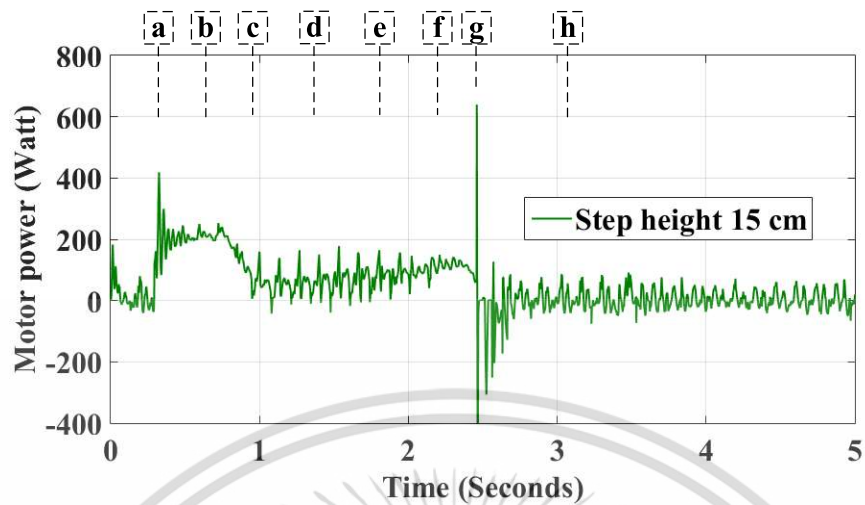


(ก) พื้นต่างระดับสูง 5 เซนติเมตร

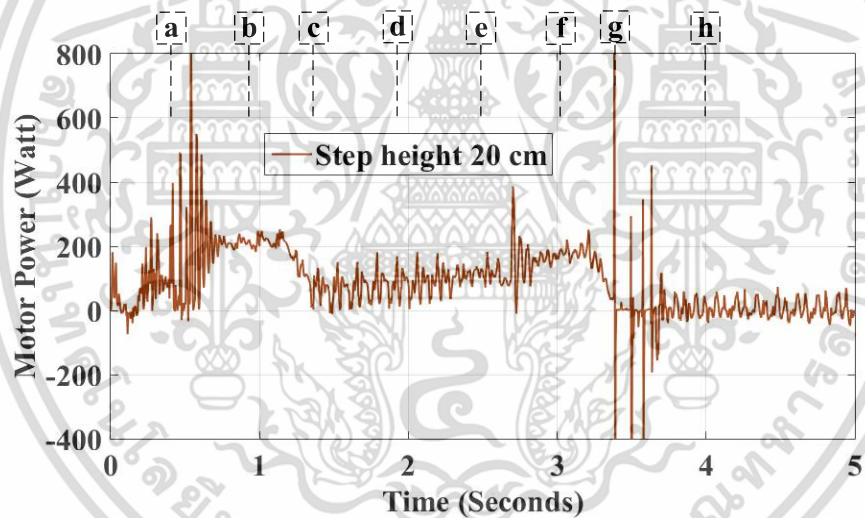


(ข) พื้นต่างระดับสูง 10 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

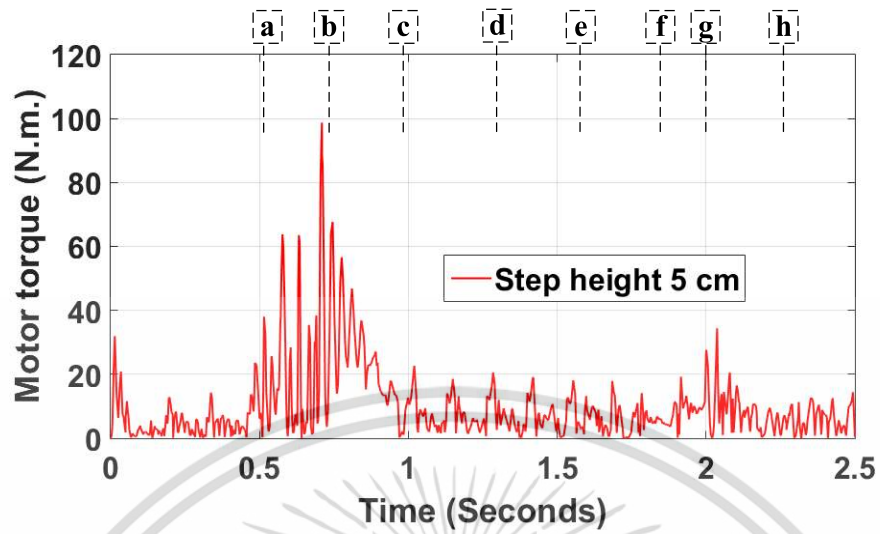


(ค) พื้นต่างระดับสูง 15 เซนติเมตร

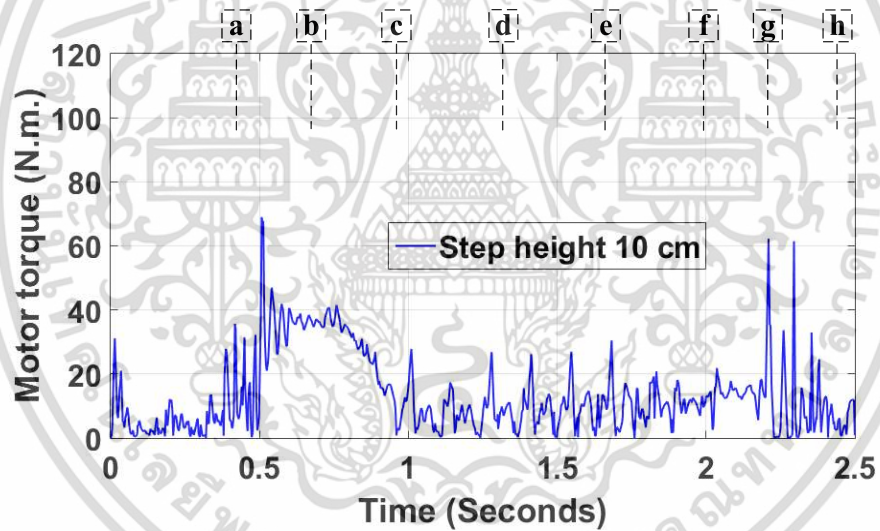


(ง) พื้นต่างระดับสูง 20 เซนติเมตร

รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงกำลังมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขความสูงพื้นต่างระดับต่าง ๆ

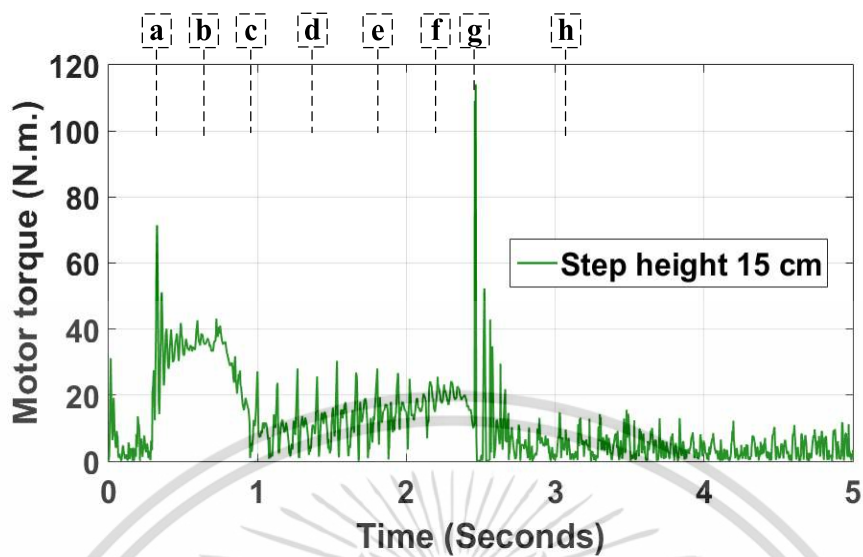


(ก) พื้นต่างระดับสูง 5 เซนติเมตร

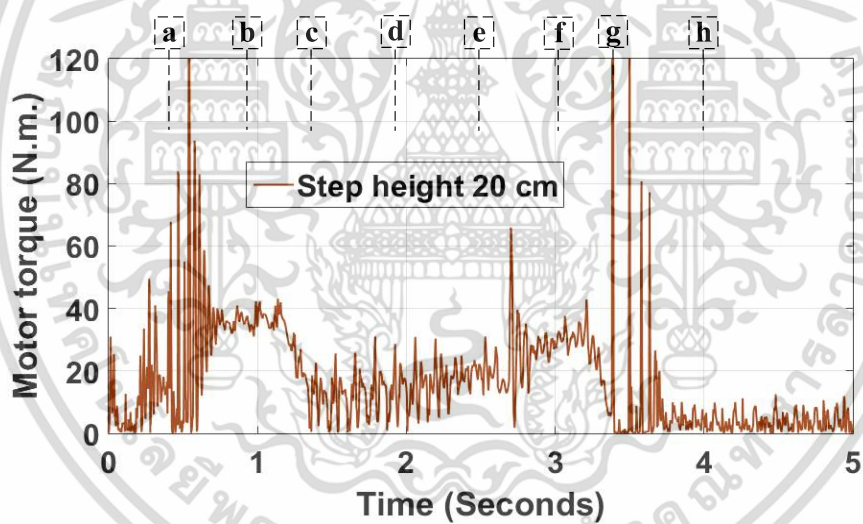


(ข) พื้นต่างระดับสูง 10 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



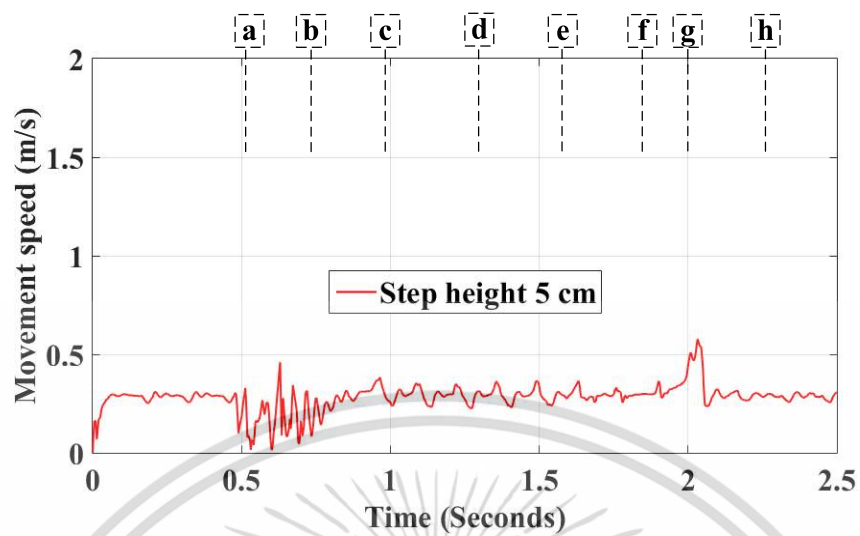
(ค) พื้นต่างระดับสูง 15 เซนติเมตร



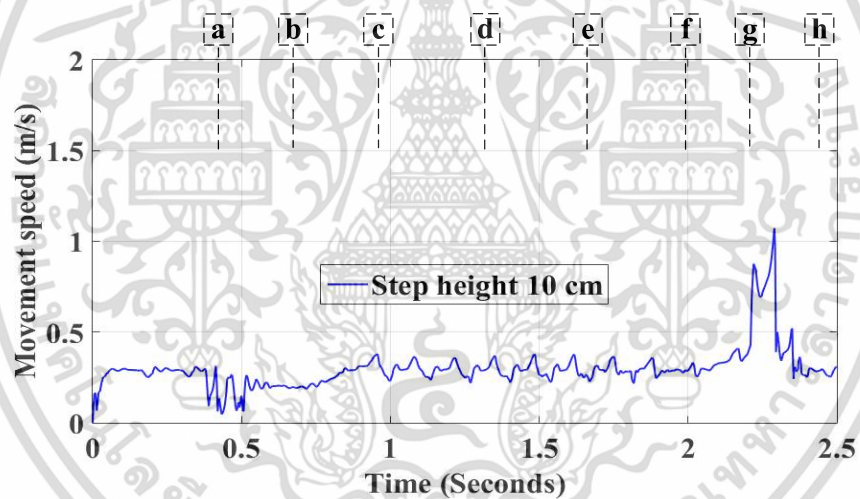
(ง) พื้นต่างระดับสูง 20 เซนติเมตร

รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงแรงบิดของมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขความสูงพื้นต่างระดับต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

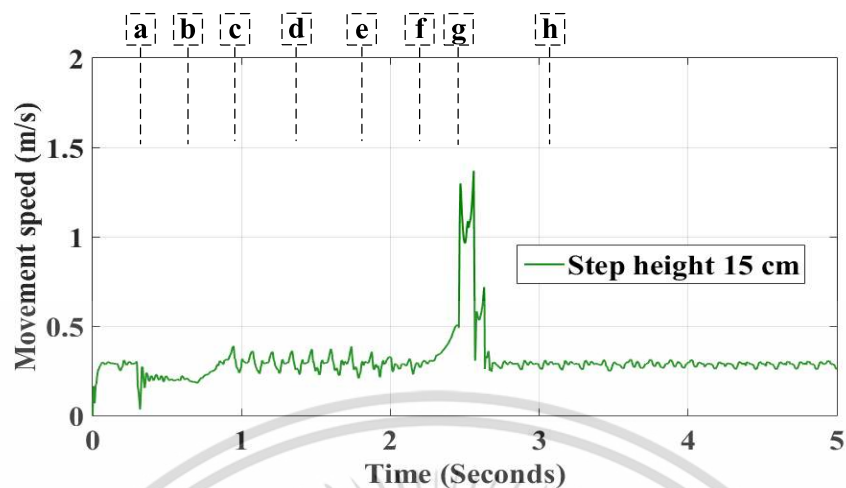


(ก) พื้นต่างระดับสูง 5 เซนติเมตร

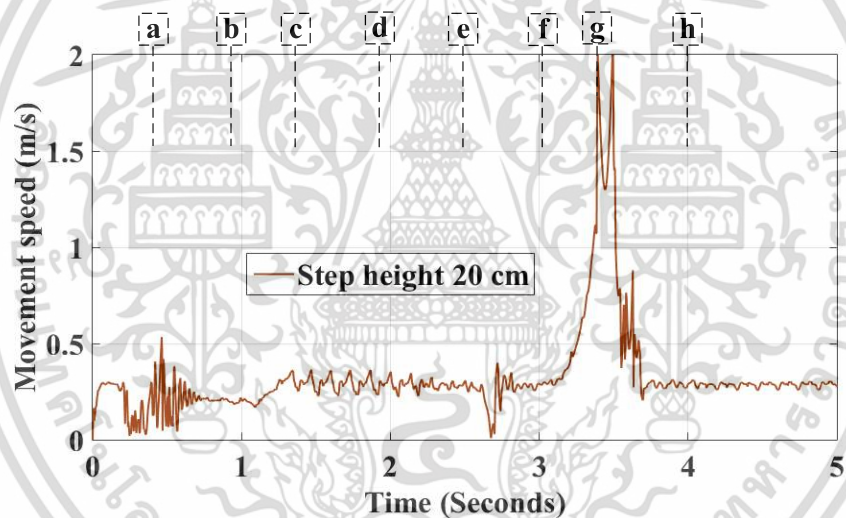


(ข) พื้นต่างระดับสูง 10 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



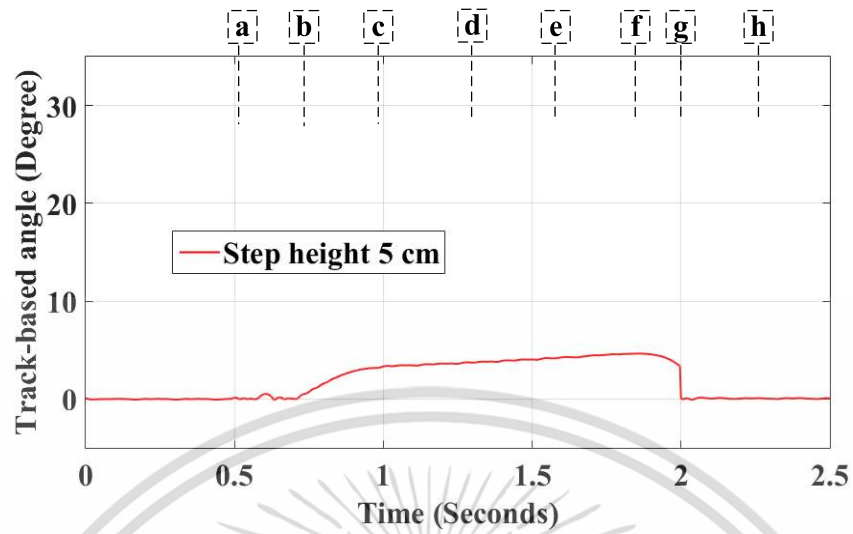
(ค) พื้นต่างระดับสูง 15 เซนติเมตร



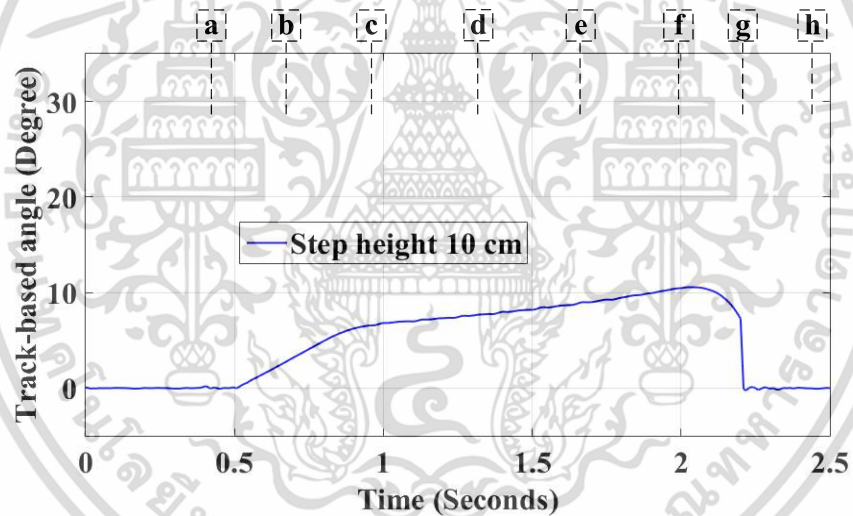
(ง) พื้นต่างระดับสูง 20 เซนติเมตร

รูปที่ 2.26 การเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขความสูงพื้นต่างระดับต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

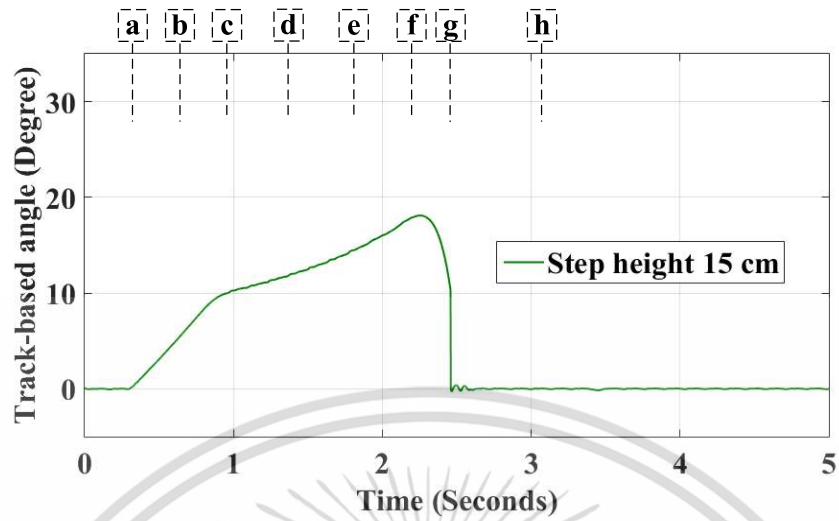


(ก) พื้นต่างระดับสูง 5 เซนติเมตร

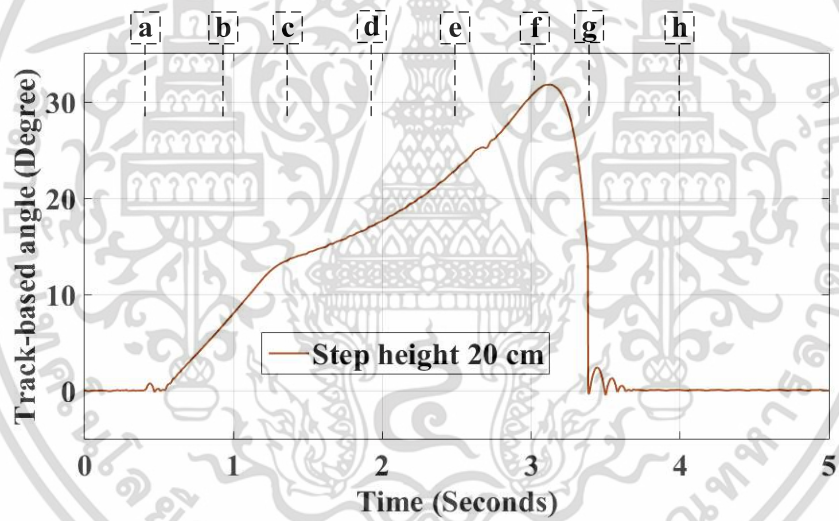


(ข) พื้นต่างระดับสูง 10 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

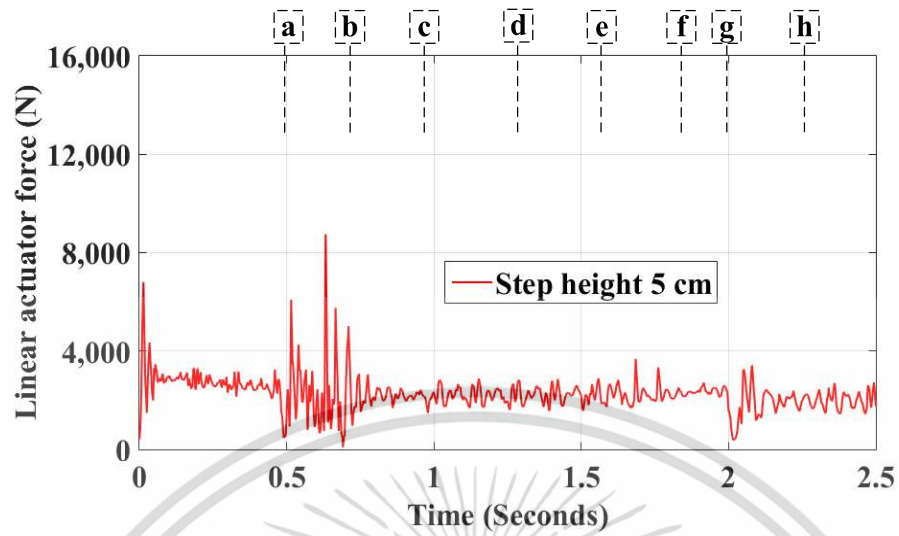


(ค) พื้นต่างระดับสูง 15 เซนติเมตร

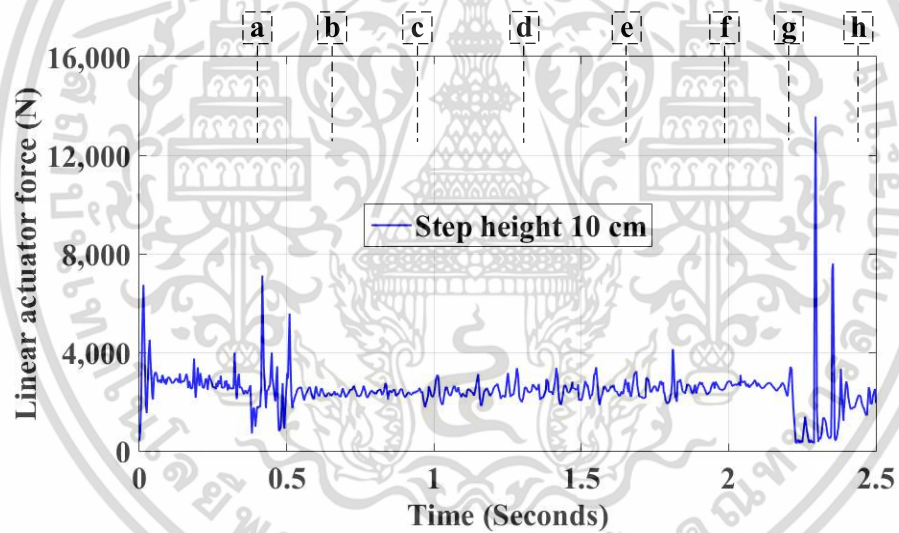


(ง) พื้นต่างระดับสูง 20 เซนติเมตร

รูปที่ 2.27 การเปลี่ยนแปลงมุมล้อสายพานภายใต้เงื่อนไขความสูงพื้นต่างระดับต่าง ๆ

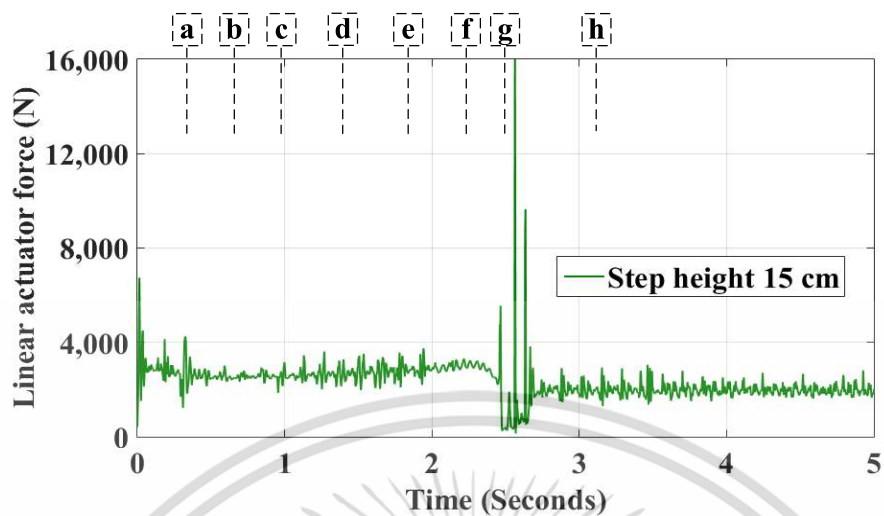


(ก) พื้นต่างระดับสูง 5 เซนติเมตร

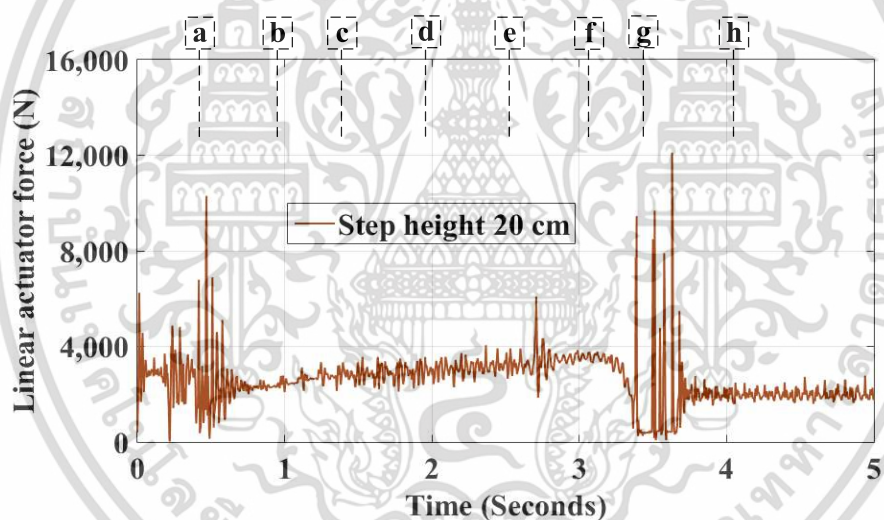


(ข) พื้นต่างระดับสูง 10 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) พื้นต่างระดับสูง 15 เซนติเมตร



(ง) พื้นต่างระดับสูง 20 เซนติเมตร

รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนแปลงแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับภายใต้เงื่อนไขความสูงพื้นต่างระดับต่าง ๆ

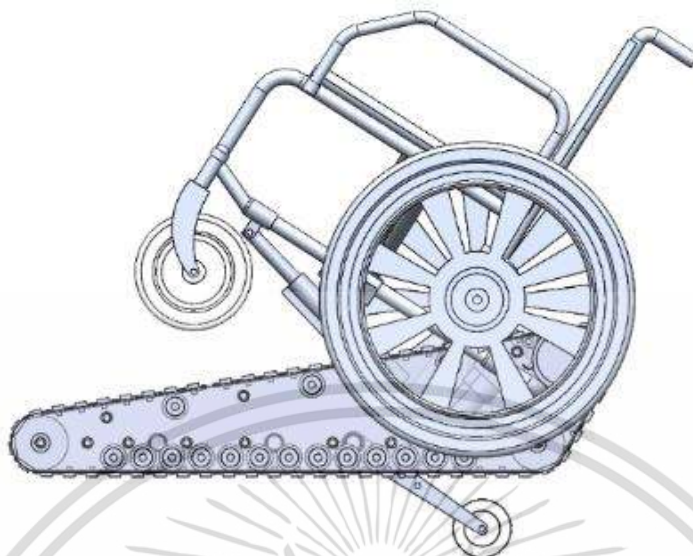
ตารางที่ 2.8 ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ในแต่ละกรณีของการเปลี่ยนแปลงความสูงพื้นต่างระดับ

ความสูงพื้นต่างระดับ (เซ็นติเมตร)	5	10	15	20	หน่วย
กำลังมอเตอร์	274.63	243.67	253.19	252.96	วัตต์
แรงบิดของมอเตอร์	46.83	41.55	43.17	43.14	นิวตัน เมตร
ความเร็วในการเคลื่อนที่	0.38	0.38	0.39	0.40	เมตร/วินาที
มุมล้อสายพาน	4.64	10.56	18.10	31.79	องศา
แรงที่ตัวขับเชิงเส้นได้รับ	3685.12	4126.55	3753.69	3897.99	นิวตัน

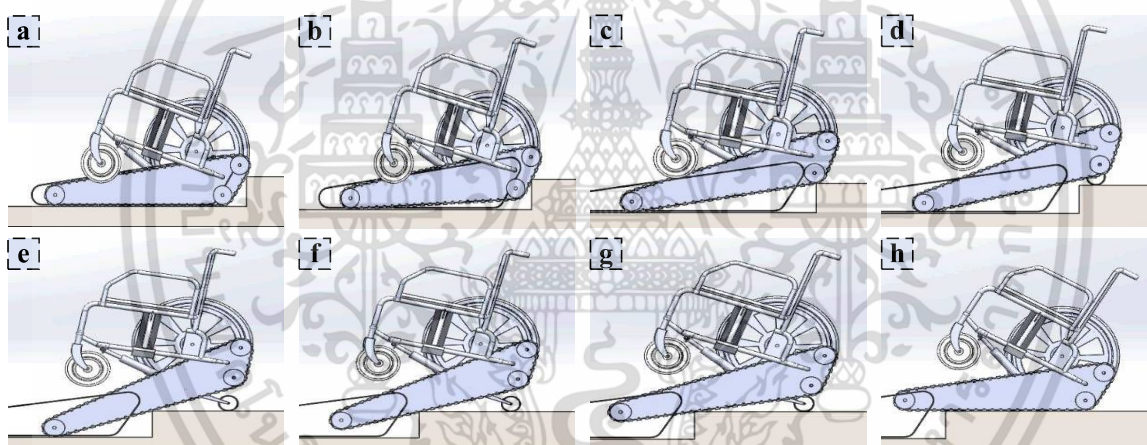
การศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองในแต่ละเงื่อนไขพบว่าความสูงของพื้นต่างระดับและมุมที่ติดตั้งเหมาะสมและสัมพันธ์กัน เพื่อลดโอกาสที่รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับจะพลิกคว่ำ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกและความเร็วของมอเตอร์แสดงให้เห็นขนาดที่เหมาะสมของมอเตอร์ในแง่ของกำลังและแรงบิดของมอเตอร์ อย่างไรก็ตามเมื่อสิ้นสุดการปีน ล้อสายพานจะหมุนและตกกระทบบนพื้นเพื่อยกตำแหน่งรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับให้สูงขึ้นไปอีกระดับ การกระทบบนพื้นส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงในทุกพารามิเตอร์ ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ใช้อย่างยิ่ง ดังนั้น การออกแบบล้อรองรับที่นำเสนอในหัวข้อถัดไปจะลดการกระทบบนพื้นและป้องกันการล้มของรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับพลิกคว่ำ

### 2.3 การออกแบบและทดสอบล้อรองรับ

การจำลองก่อนหน้านี้ ล้อสายพานจะหมุนและกระทบบนพื้นหลังจากที่มุมล้อสายพานมีค่าสูงสุด ในส่วนนี้ล้อรองรับจะถูกออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหาและเพิ่มความมั่นคงในการปีน ดังนั้น ล้อรองรับจะต้องสามารถยกมุมล้อสายพานให้สูงขึ้นจากกรณีการเคลื่อนที่อิสระในหัวข้อที่ 2.2 เพื่อป้องกันการลื่นไถลของล้อรองรับ การทำงานของรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับคล้ายกับที่แสดงในรูปที่ 2.29 และ 2.30 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มล้อรองรับเพื่อลดการกระทบบนพื้น การจำลองการเคลื่อนที่ไถลจะตั้งค่าล้อรองรับให้เริ่มทำงานเมื่อน้ำล้อไถลได้สำเร็จ ต่อจากนั้น ความสูงของวงล้อรองรับจะเป็นตัวกำหนดมุมล้อสายพาน เมื่่อมุมล้อสายพานสามารถปีนขึ้นไปได้ระดับที่สูงกว่า ล้อรองรับจะถูกเก็บและยกรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับขึ้นสู่ระดับพื้นที่สูงขึ้น แล้วกลับเข้าสู่โหมดการเคลื่อนที่ในแนวราบ



รูปที่ 2.29 รถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบแบบถอดประกอบได้ที่ติดตั้งล้อรองรับ

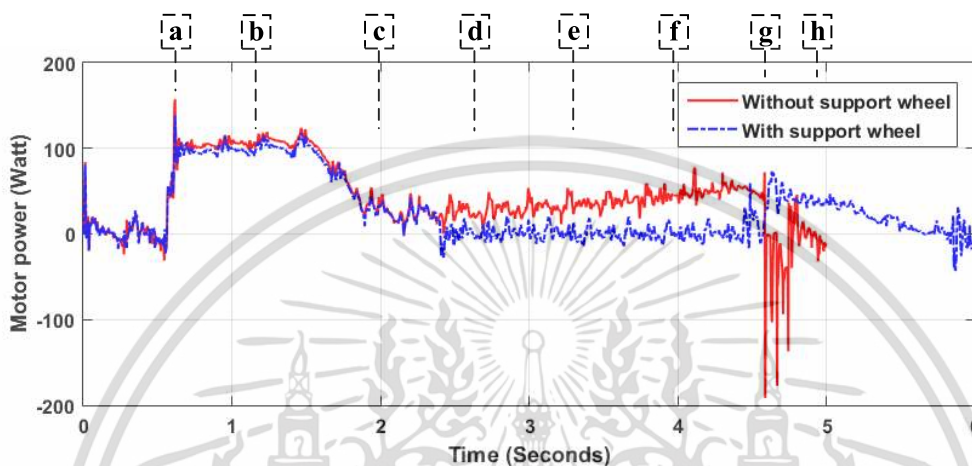


รูปที่ 2.30 การจำลองการเคลื่อนที่แบบพลวัตในช่วงเวลาต่าง ๆ ขณะติดตั้งล้อรองรับ

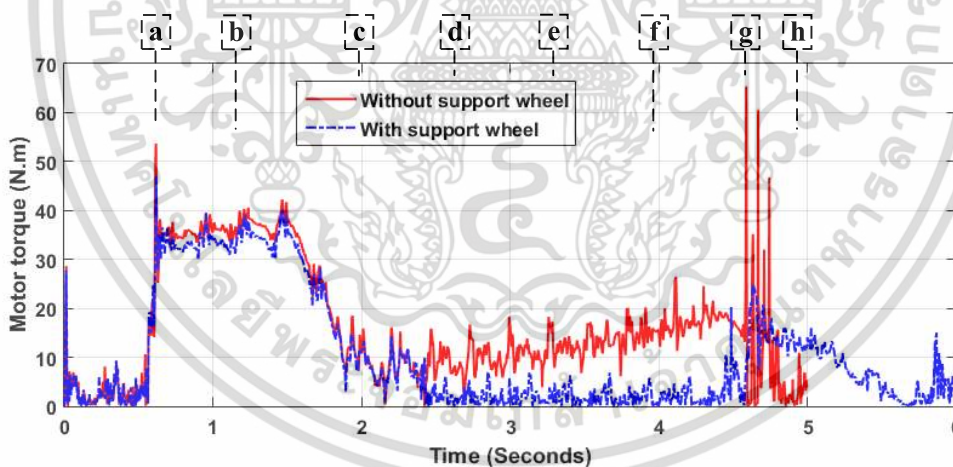
ประสิทธิภาพของล้อรองรับถูกจำลองและทดสอบที่ความสูงพื้นต่างระดับ 15 เซนติเมตร ความเร็วมอเตอร์คงที่ที่ 28 รอบต่อนาที (0.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) น้ำหนักบรรทุก 1,500 นิวตัน และมุมที่นิ่ง 30 องศา ผลการทดสอบถูกเปรียบเทียบสำหรับกำลังและแรงบิดของมอเตอร์ ความเร็วการเคลื่อนที่ มุมของล้อสายพาน และแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ ระหว่างรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับที่มีและไม่มีล้อรองรับดังแสดงในตารางที่ 2.9 ล้อรองรับสามารถลดกำลังและแรงบิดของมอเตอร์ในระหว่างการใช้ทางล้อปั่นและลดการสั่นแกว่งของค่าทั้งสอง ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น แรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับและความเร็วในการเคลื่อนที่ค่อนข้างคงที่ ยิ่งไปกว่านั้น การลดความเร็วของมอเตอร์ยังช่วยลดการสั่นแกว่งที่เกิดจากการชนของหน้าล้อกับขอบพื้นต่างระดับอีกด้วยดังแสดงที่จุด a ในรูปที่ 2.31 ในแง่ของการลดการกระแทกของรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับ แม้ว่าการติดตั้งล้อรองรับจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการตกกระแทกของรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับได้ (ที่จุด g ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.31) แต่มุมล้อยายพานที่มีล้อรองรับจะสูงกว่ามุมล้อยายพานสูงสุดเสมอ เพื่อป้องกันการลยตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ในบทต่อไป ระบบควบคุมมอเตอร์และอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) [32]–[35] จะถูกติดตั้งเพื่อลดผลกระทบจากการสั่น ปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน และรักษาความปลอดภัยในขณะใช้งานด้วย

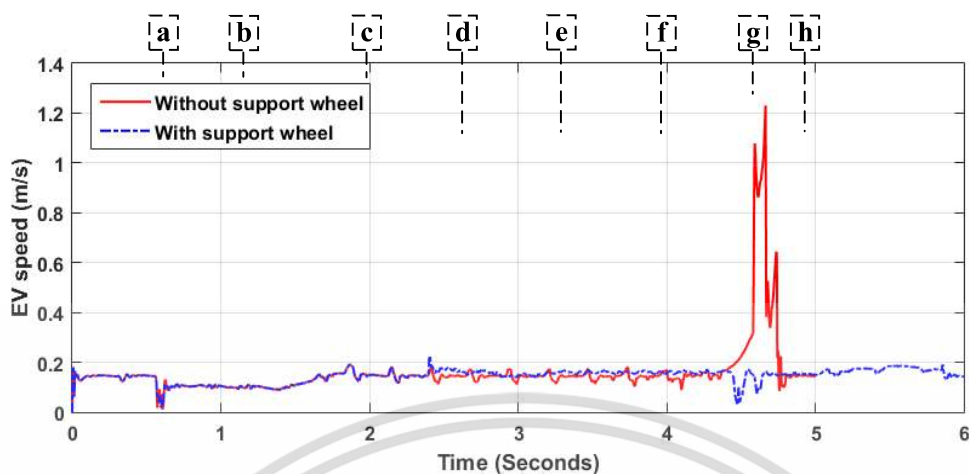


รูปที่ 2.31 กำลังมอเตอร์ในการทดสอบขณะมีและไม่มีล้อช่วยพยุง

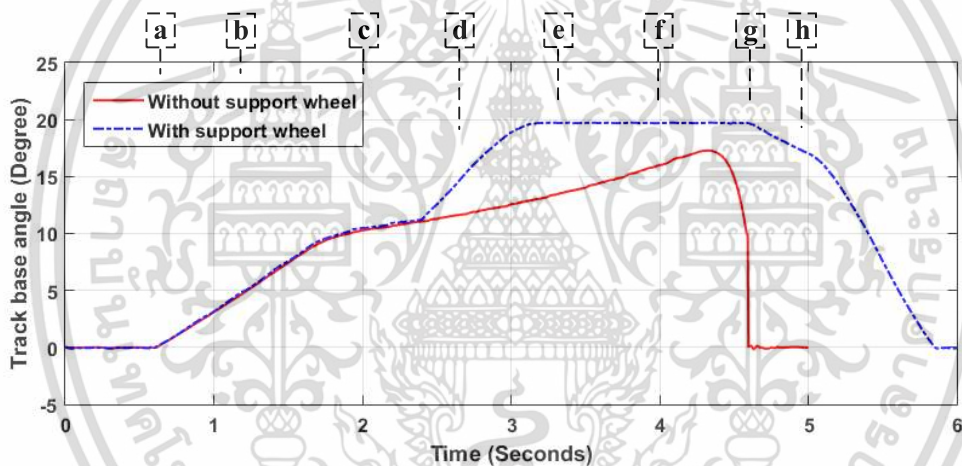


รูปที่ 2.32 แรงบิดของมอเตอร์ในการทดสอบขณะมีและไม่มีล้อช่วยพยุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 ความเร็วในการเคลื่อนที่ในการทดสอบขณะมีและไม่มีล้อช่วยพยุง



รูปที่ 2.34 มุมล้อสายพานในการทดสอบขณะมีและไม่มีล้อช่วยพยุง

ตารางที่ 2.9 ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ในผลการทดสอบขณะมีและไม่มีล้อช่วยพยุง

ล้อช่วยพยุง	ไม่มี	มี	หน่วย
กำลังมอเตอร์	123.88	117.85	วัตต์
แรงบิดของมอเตอร์	42.25	40.19	นิวตัน เมตร
ความเร็วในการเคลื่อนที่	0.19	0.22	เมตร/วินาที
มุมล้อสายพาน	17.28	19.73	องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์และตัวขับเคลื่อนที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนล้อสายพานควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ กำลังมอเตอร์สูงสุดที่จะช่วยให้รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับปีนพื้นต่างระดับโดยมีน้ำหนักบรรทุก 2,000 นิวตัน ต้องใช้กำลังมอเตอร์ 295.35 วัตต์ ดังนั้น กำลังมอเตอร์ขั้นต่ำควรเป็น 350 วัตต์ แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ที่ใช้สูงสุดคือ 50.36 นิวตันเมตร แต่รัศมีของเพลาล้อสายพานคือ 47 มิลลิเมตร ในขณะที่รัศมีเพลามอเตอร์ทั่วไปคือ 5 มิลลิเมตร แรงบิดของมอเตอร์ทั่วไปจึงสามารถคำนวณได้เป็น 5.36 นิวตันเมตร ดังนั้นแรงบิดมอเตอร์ที่ใช้ขั้นต่ำที่ควรเป็น 7 นิวตันเมตร หรือ 71.38 กิโลกรัมเซนติเมตร แรงสูงสุดที่ตัวขับเคลื่อนได้รับเมื่อรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับปีนพื้นต่างระดับขณะที่มีน้ำหนักบรรทุก 2,000 นิวตัน มีค่า 4721.86 นิวตัน ดังนั้น แรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับต่ำสุดที่ควรใช้คือ 5,000 นิวตัน จากข้อมูลการออกแบบเบื้องต้นจะช่วยให้รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับนี้สามารถปีนพื้นต่างระดับที่ความสูง 20 เซนติเมตร ด้วยความเร็วที่เหมาะสมที่ 0-1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และบรรทุกได้สูงสุด 2,000 นิวตัน

## บทที่ 3

# ชุดทดลองรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ

รถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ตามที่ออกแบบในบทที่ 2 ถูกประกอบขึ้นเป็นชุดทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษารูปแบบและผลของการใช้งานจริง ในการพัฒนาชุดทดลองรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้นี้เน้นการออกแบบและสร้างล้อสายพานให้สามารถประกอบกับรถเข็นไฟฟ้าทั่วไปได้โดยไม่ทำลายโครงสร้างเดิมของรถเข็นไฟฟ้า เพื่อให้ล้อสายพานที่ออกแบบเป็นเหมือนอุปกรณ์เสริมที่สามารถนำไปติดตั้งกับรถเข็นไฟฟ้าที่มีอยู่แล้วและพัฒนาเป็นรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ ถือเป็น การเพิ่มรูปแบบการใช้งานให้มีความหลากหลายมากขึ้นและเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ใช้ด้วยระบบเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ที่คอยติดตามการใช้งานและแจ้งเตือนไปยังผู้ดูแล

### 3.1 การประกอบชุดทดลองรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้

โครงล้อสายพานของรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ถูกประกอบขึ้นในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยเน้นการใช้น็อตยึดโครงสร้างส่วนใหญ่แทนการเชื่อมด้วยความร้อน เนื่องจากโลหะที่ใช้มีความหนาค่อนข้างน้อย (น้ำหนักเบา แต่ยังคงความสามารถในการรับแรง) ความร้อนจึงมีผลต่อความแข็งแรงของโลหะ การใช้น็อตยึดโครงสร้างนั้นทำให้สามารถขนส่งและถอดประกอบได้ง่าย ซึ่งสามารถกระจายการใช้งานได้ในอนาคต

ล้อสายพานที่ออกแบบแต่ละข้างจะมีเพลลาขับ 1 เพลลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ซึ่งเชื่อมต่อกับแกนมอเตอร์ขับเคลื่อนดังรูปที่ 3.1 (ก) เพื่อใช้ขับโซ่สายพานไปตามราง มีเพลลารองรับขนาดใหญ่ 2 เพลลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ถูกติดตั้งบริเวณมุมฐานล้อทั้งหน้าและหลัง เพื่อรองรับโซ่สายพานให้อยู่ในแนวรางและรับแรงกดอันเกิดจากน้ำหนักบรรทุก และเพลลารองรับขนาดเล็ก 10 เพลลา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ถูกกระจายตลอดแนวของโซ่สายพาน เพื่อรองรับการเคลื่อนที่ของโซ่สายพาน และรักษาแนวไม่ให้โซ่สายพานหลุดออกจากล้อ โดยโซ่สายพานที่ใช้มีความกว้างประมาณ 5 เซนติเมตร และยาวประมาณ 2.6 เมตร

มอเตอร์ขับเคลื่อนเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 350 วัตต์ 24 โวลต์ สามารถหมุนกลับทิศได้ ถูกติดตั้งข้างล้อสายพาน เพื่อส่งแรงผ่านเพลลาขับไปขับโซ่สายพาน มอเตอร์ขับเคลื่อนถูกควบคุมด้วยวงจรขับมอเตอร์ที่รองรับการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ 18 แอมป์



(ก) ตำแหน่งการเชื่อมต่อและจัดวางล้อสายพาน



(ข) การประกอบโครงล้อและสายพาน



(ค) ตำแหน่งการจัดวางล้อสายพาน

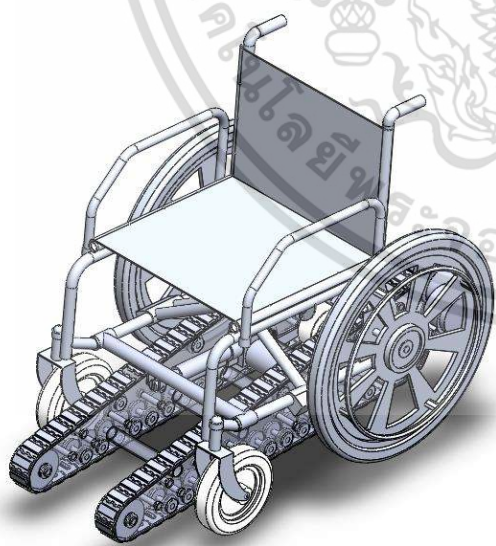
### รูปที่ 3.1 การประกอบล้อสายพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ชุดทดลองรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้

ล้อสายพานถูกติดตั้งใต้ที่นั่งของรถเข็นไฟฟ้าดังรูปที่ 3.2 โดยการติดตั้งจะไม่ทำลายโครงสร้างและรูปแบบการใช้งานเดิมของรถเข็นไฟฟ้า เน้นการเพิ่มการยึดจับอุปกรณ์ในส่วนสำคัญ ได้แก่ โครงใต้ที่นั่ง และแกนล้อช่วยพยุง รถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้นั้นสามารถใช้งานได้ทั้งการเคลื่อนที่แนวราบเหมือนรถเข็นไฟฟ้าทั่วไปและการป็นพื้นต่างระดับ การเคลื่อนที่ในแต่ละรูปแบบจะมีการจัดวางโครงสร้างตัวรถที่แตกต่างกันดังรูปที่ 3.2 (ก)-(ง) ขณะการเคลื่อนที่แนวราบ ล้อสายพานจะถูกยกขึ้นเหนือพื้นและเก็บใต้ที่นั่ง เพื่อให้ล้อของรถเข็นไฟฟ้าสามารถใช้ในการขับเคลื่อนได้ผ่านการควบคุมด้วยด้วยแผงมือควบคุม (จอยสติ๊ก) รูปแบบการใช้งานยังคงเป็นเหมือนรถเข็นไฟฟ้าทั่วไป ในขณะที่การป็นพื้นต่างระดับ ล้อสายพานจะถูกดันให้สัมผัสกับพื้นและยกโครงรถเข็นไฟฟ้าลอยขึ้นเหนือพื้นทั้งหมดด้วยตัวขับเคลื่อนเส้น น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดถูกถ่ายโอนมายังล้อสายพานเพื่อเพิ่มแรงเสียดทานในการยึดเกาะพื้น มุมที่นั่งจะถูกดันให้เอียงเงยหน้าขึ้นเล็กน้อยเพื่อป้องกันไม่ให้ผู้ใช้ตกขณะป็น ขณะป็นพื้นต่างระดับ ล้อสายพานและล้อรองรับจะมีลำดับการทำงานตามการออกแบบและจำลองในบทที่ 2 ซึ่งมีความสูงของพื้นต่างระดับไม่เกิน 20 เซนติเมตร น้ำหนักบรรทุกไม่เกิน 2000 นิวตัน และความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เกิน 1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ในการใช้งานรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ในชีวิตประจำวันนั้น ผู้ใช้สามารถเลือกถอดหรือประกอบล้อสายพานได้โดยขั้นตอนเพียง 3 ตำแหน่ง คือ ที่ตัวขับเคลื่อนใต้ที่นั่ง 1 ตำแหน่ง และแกนล้อช่วยพยุง 2 ตำแหน่ง จึงทำให้ล้อสายพานแบบถอดประกอบได้มีความง่ายและสะดวกสบายในการติดตั้งดังรูปที่ 3.2 (จ)-(ฉ)

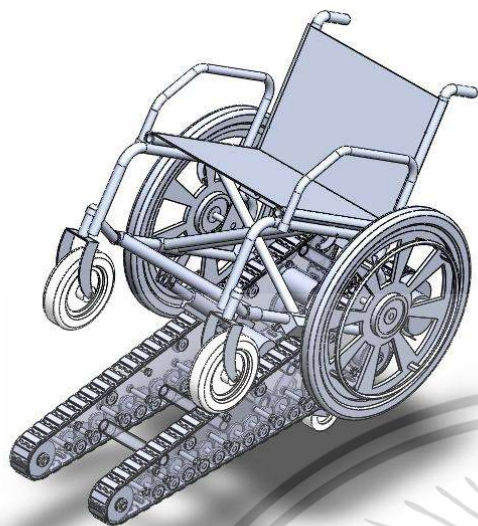


(ก) แบบจำลองขณะวิ่งแนวราบ



(ข) ชุดทดลองขณะวิ่งแนวราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) แบบจำลองขณะปีนพื้นต่างระดับ



(ง) ชุดทดลองขณะปีนพื้นต่างระดับ



(จ) ชุดทดลองรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับขณะการประกอบ



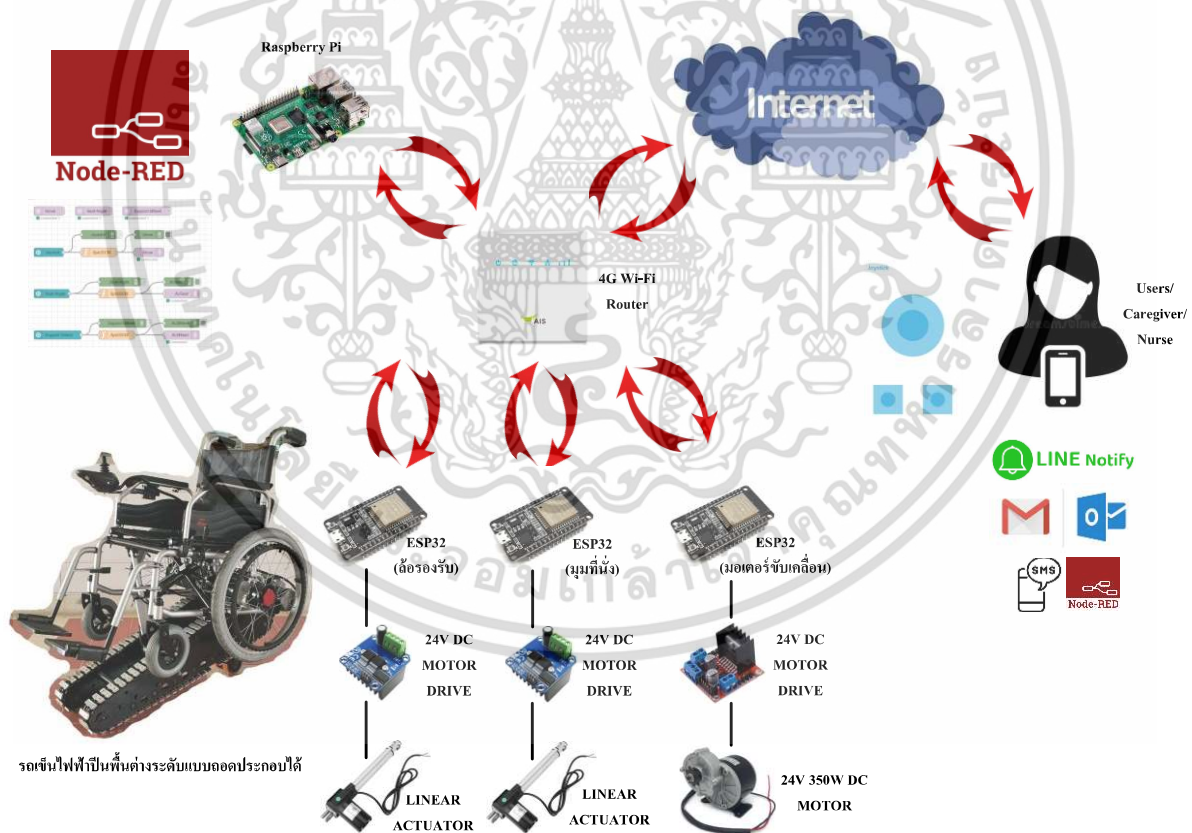
(ฉ) ชุดล้อสายพาน

รูปที่ 3.2 รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบระบบขับเคลื่อนรถเข็นและล้อสายพาน

การควบคุมการทำงานของล้อสายพานถูกออกแบบให้ควบคุมด้วยระบบเซ็นเซอร์และการส่งข้อมูลแบบไร้สายเพื่อเพิ่มศักยภาพการทำงานและสามารถส่งการผ่านโทรศัพท์มือถือระยะไกลได้ เซ็นเซอร์และอุปกรณ์ต่าง ๆ จะถูกติดตั้งที่ล้อสายพานเพื่อเก็บข้อมูลและสั่งการทำงานขณะใช้งานล้อสายพานดังรูปที่ 3.3 ข้อมูลจากเซ็นเซอร์จะถูกส่งมายังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (ESP32) เพื่อคำนวณค่าข้อมูล จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Raspberry Pi) เพื่อประมวลผลข้อมูลและสั่งการทำงานไปยังระบบขับเคลื่อน อีกทั้งคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กยังมีโปรแกรมสำหรับการควบคุมล้อสายพานแบบไร้สายผ่านคอมพิวเตอร์และโทรศัพท์มือถืออีกด้วย เมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์และสั่งการควบคุมมายังระบบขับเคลื่อนล้อสายพานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนและตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นก็จะสั่งการทำงานไปยังมอเตอร์ทั้ง 2 ชนิดให้ตอบสนองการทำงานตามระบบ นอกจากนี้โปรแกรมของคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กยังมีระบบเก็บข้อมูลและแจ้งเตือนการทำงานไปยังผู้ดูแลและบุคลากรทางการแพทย์ เพื่อเฝ้าติดตามการใช้งานและเป็นข้อมูลประกอบทางการแพทย์อีกด้วย



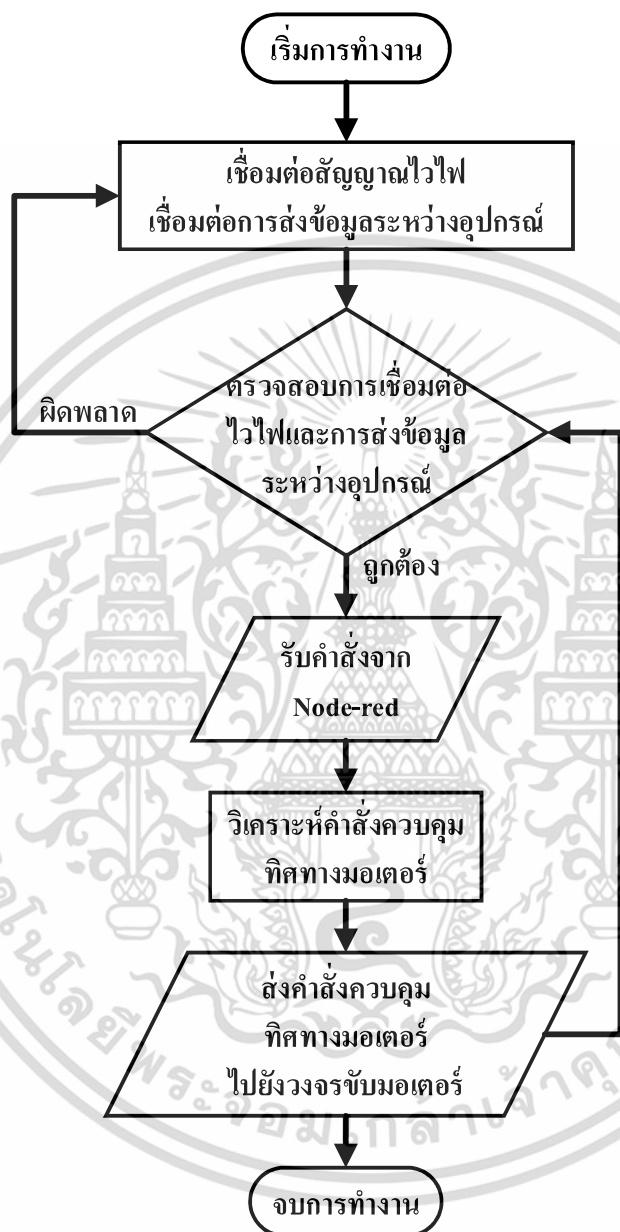
รูปที่ 3.3 ระบบควบคุมรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 การออกแบบระบบขับเคลื่อนรถเข็นและล้อสายพานด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

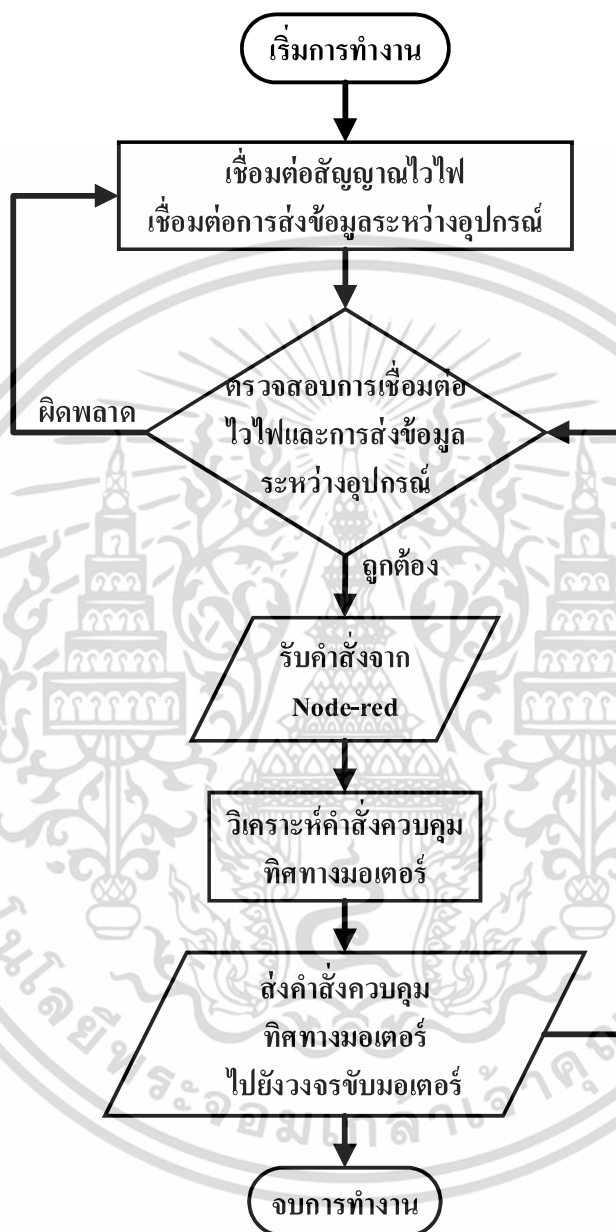
ระบบขับเคลื่อนถูกออกแบบโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จำนวน 3 บอร์ดในการควบคุม มีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับขับตัวขับเคลื่อนเส้นใช้สำหรับควบคุมล้อรองรับ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับขับตัวขับเคลื่อนเส้นใช้สำหรับควบคุมมุมที่นั่ง และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้สำหรับขับมอเตอร์ขับเคลื่อน บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับขับตัวขับเคลื่อนเส้นใช้สำหรับควบคุมล้อรองรับและมุมที่นั่งมีผังการทำงานดังรูปที่ 3.4 เมื่อเริ่มการทำงาน บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเชื่อมต่อสัญญาณไวไฟและการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ จากนั้นทำการตรวจสอบการเชื่อมต่อ ในกรณีที่การเชื่อมต่อผิดพลาด บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการเชื่อมต่อสัญญาณไวไฟและการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ใหม่ทั้งหมด แต่ในกรณีที่การเชื่อมต่อสมบูรณ์ บอร์ดจะรับค่าคำสั่งจากโปรแกรม Node-red ของคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กผ่านระบบสื่อสารไร้สาย คำสั่งที่ได้จะควบคุมการทำงานและสั่งการของบอร์ดให้ควบคุมวงจรมอเตอร์ โดยคำสั่งนี้ประกอบด้วยคำสั่งด้านทิศทางและความเร็วในการขับเคลื่อนแต่ละตัว บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะแปลงคำสั่งเป็นสัญญาณดิจิทัลและสัญญาณพัลส์ (Pulse Width Modulation; PWM) ส่งไปยังวงจรมอเตอร์ วงจรมอเตอร์จะควบคุมการจ่ายกระแสจากแบตเตอรี่ไปยังมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อสายพาน

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์  
(ล้อรองรับ)



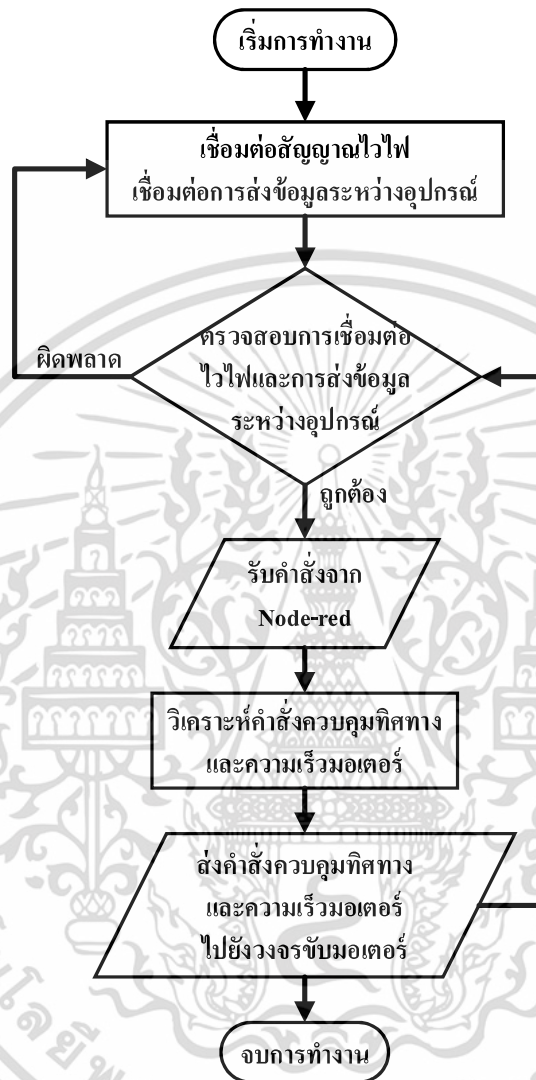
(ก) ผังการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมตัวขับเคลื่อนของล้อรองรับ

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์  
(มুমที่นั้ง)



(ข) ผังการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมตัวขับเคลื่อนของมูมที่นั้ง

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์  
(มอเตอร์ขับเคลื่อน)

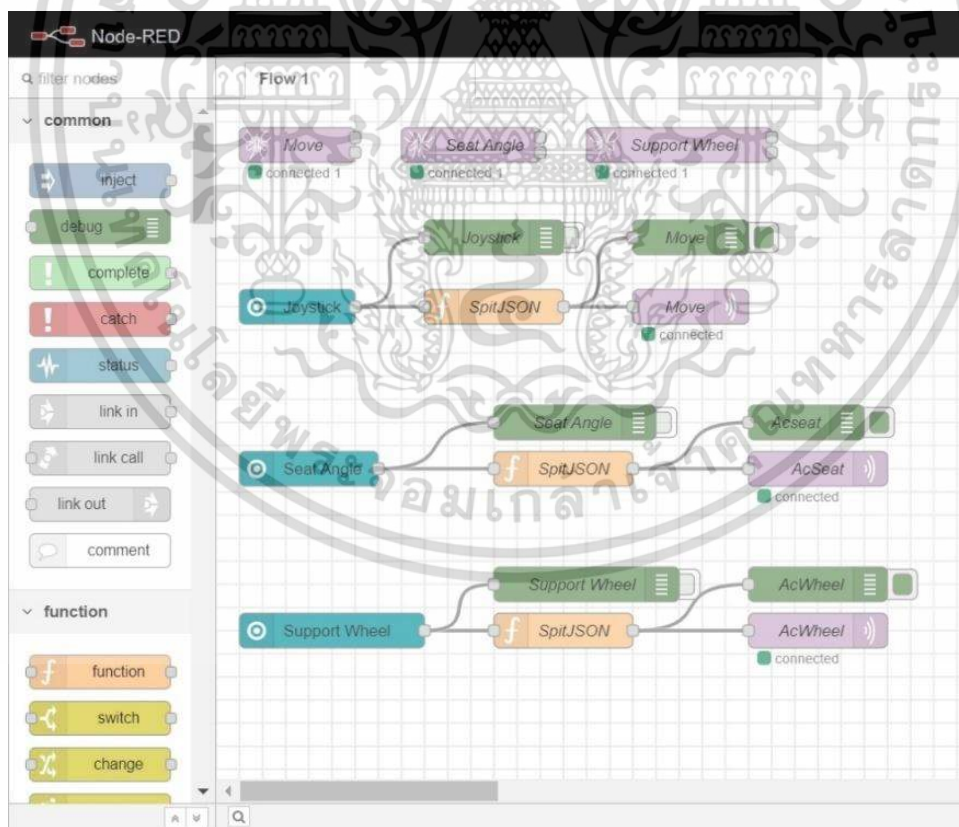


(ค) ผังการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน

รูปที่ 3.4 ผังการทำงานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

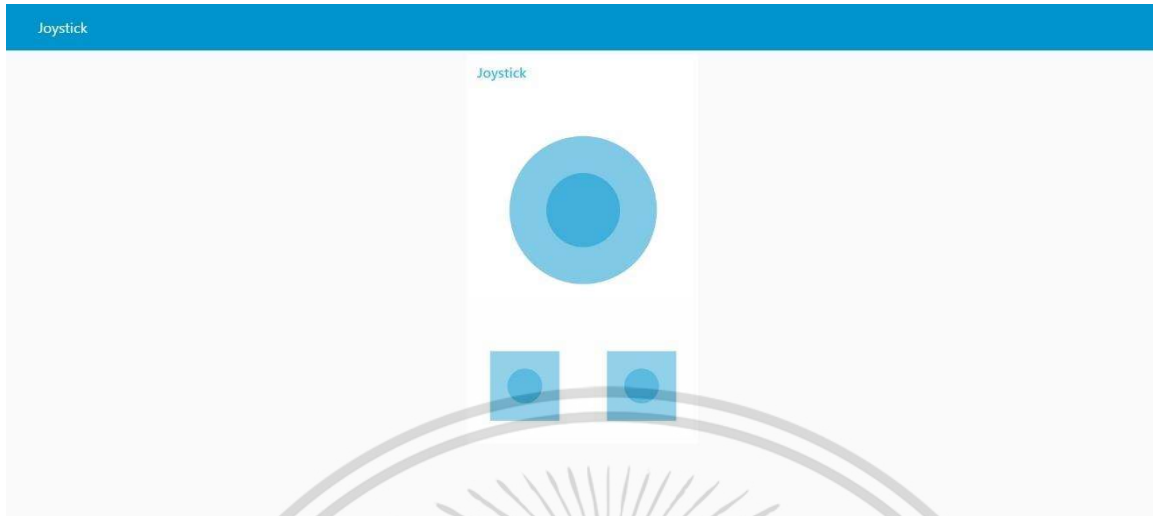
### 3.3.2 การออกแบบระบบขับเคลื่อนรถเข็นและล้อสายพานด้วยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก

คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Raspberry PI 4 Model B) ถูกใช้เป็นหน่วยประมวลผลและสั่งการทำงานของชุดทดลองรถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้ โปรแกรม Node-red ในคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ถูกกำหนดให้เป็นโปรแกรมในการควบคุมหลักของชุดทดลองตามผังการทำงานในรูปที่ 3.5 เมื่อเริ่มการทำงาน โปรแกรมจะรับข้อมูลจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมระบบเซ็นเซอร์มาประมวลผล โดยข้อมูลที่รับถูกจัดรูปแบบตาม JSON format อีกครั้งและแยกข้อมูลตามหัวข้อเพื่อนำไปประมวลผล ค่าตำแหน่ง มุมที่นั่ง และความเร่งแต่ละแกน จะถูกคำนวณและประมวลผลเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมในการปรับตำแหน่งมุมที่นั่งให้ถูกต้อง จากนั้นจึงส่งคำสั่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุมตัวขับเคลื่อน ส่วนค่าระยะห่างแต่ละจุด ถูกคำนวณและเปรียบเทียบกับค่าระยะห่างที่ยอมรับได้ เพื่อกำหนดเงื่อนไขในการขับเคลื่อนและป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดกับผู้ใช้ นอกจากนี้การควบคุมระบบขับเคลื่อนจะควบคุมผ่านหน้าจอแสดงผลของโปรแกรม Node-red ซึ่งมีวิดิเจ็ตในการรับการสั่งการควบคุมโดยผู้ใช้ผ่านมือถือหรือคอมพิวเตอร์ ซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กผ่านการสื่อสารไร้สาย เมื่อผู้ใช้สั่งการทำงานในวิดิเจ็ต โปรแกรม Node-red จะประมวลคำสั่งส่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของชุดทดลองรถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้

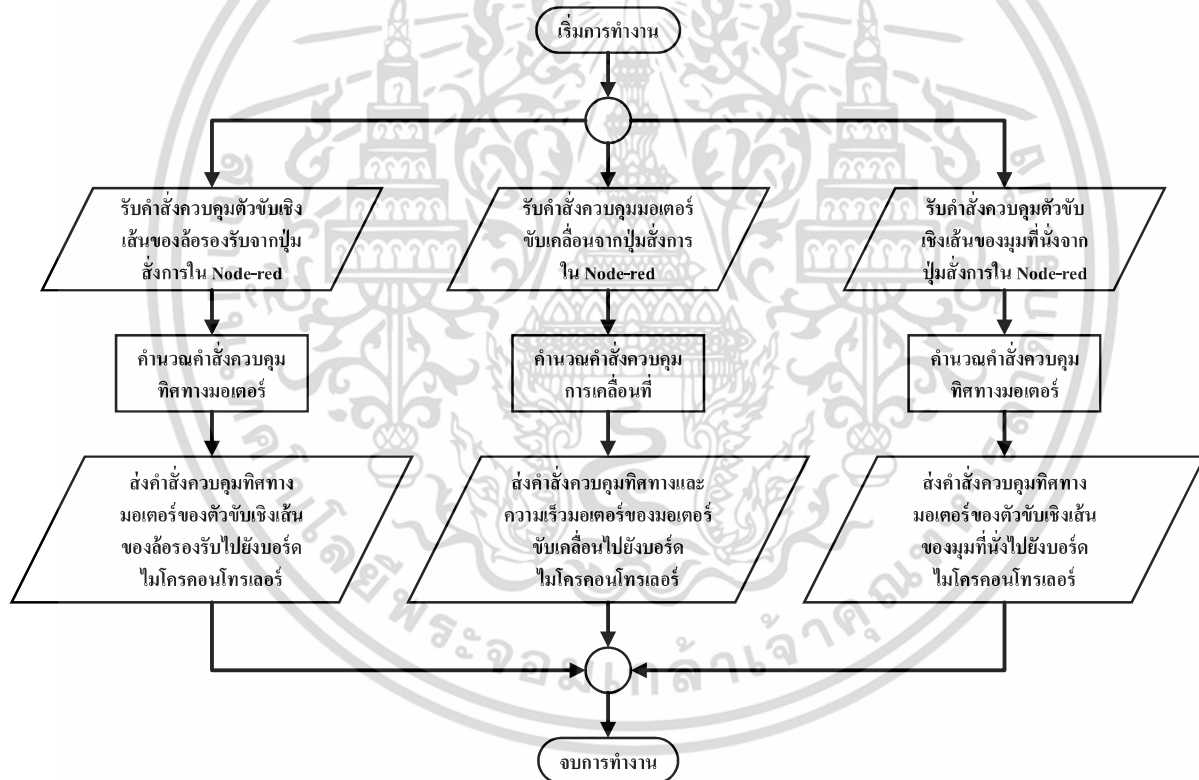


(ก) การเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยโปรแกรม Node-red

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) จอควบคุมด้วยโปรแกรม Node-red



(ค) ผังการทำงานของคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กควบคุมโปรแกรม Node-red

### รูปที่ 3.5 คอมพิวเตอร์ขนาดเล็กควบคุมโปรแกรม Node-red

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การออกแบบระบบอินเทอร์เน็ตผลसानสรรพสิ่ง

### 4.1 วรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบอินเทอร์เน็ตผลसानสรรพสิ่ง

หลายประเทศทั่วโลกกำลังเผชิญกับการเติบโตอย่างรวดเร็วของจำนวนประชากรสูงอายุ เนื่องจากอัตราการเกิดต่ำและอายุขัยที่ยืนยาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่พัฒนาแล้ว จากข้อมูลขององค์การอนามัยโลก [36] ประชากรกลุ่มอายุ 60 ปีขึ้นไปคาดว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 3% ต่อปี ในปี พ.ศ. 2560 ประชากรอายุเกิน 60 ปี ทั่วโลกมี 963 ล้านคน ซึ่งคิดเป็น 13% ของประชากรทั้งหมด สัดส่วนของผู้ที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไปในเอเชีย คาดว่าจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก และคาดว่าจะมีสัดส่วนที่สูงที่สุดในโลก ตามดัชนี Global Age Watch [37-38] ญี่ปุ่นมีประชากรสูงอายุมากที่สุดและจะเป็นประเทศแรกในโลกที่จะกลายเป็นสังคมสูงอายุ ซึ่งหมายความว่ามากกว่า 20% ของประชากรทั้งหมดของพวกเขาจะมีอายุ 65 ปีขึ้นไป เกาหลีใต้กำลังเผชิญกับสถานการณ์ที่คล้ายกับของญี่ปุ่น คาดว่าประชากรสูงอายุจะอยู่ที่ 31.4% ในปี พ.ศ. 2573 ซึ่งจะเป็นประชากรสูงอายุที่ใหญ่เป็นอันดับสองในเอเชีย นอกจากนี้ จีนกำลังเผชิญกับปัญหานโยบายเด็กที่จะส่งผลให้จำนวนประชากรลดลง จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างวัยสูงอายุ และจะทำให้กำลังแรงงานหดตัวลง ประชากรผู้สูงอายุของจีนจะเพิ่มขึ้นจาก 15.2% ในปี พ.ศ. 2558 เป็น 25.3% ในปี พ.ศ. 2573

สถานการณ์ด้านประชากรศาสตร์ทั่วโลกได้ก้าวเข้าสู่ยุคของการวางแผนและดำเนินการเมืองอัจฉริยะ หนึ่งในความท้าทายที่สำคัญคือการตอบสนองความต้องการของประชากรสูงอายุที่เพิ่มขึ้น ในด้านต่าง ๆ เช่น การเคลื่อนย้าย การดูแลสุขภาพ และการบริการชุมชน นวัตกรรมทางเทคโนโลยีจะมีบทบาทสำคัญในการยกระดับบ้านเรือนและสภาพแวดล้อมในเมืองที่ประชากรสูงอายุเพิ่มขึ้น องค์การอนามัยโลกจึงได้จัดทำคู่มือ Global Age-Friendly Cities [39-40] อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าหลายรายการในคู่มือยังช่วยปรับปรุงชีวิตในเมืองสำหรับประชากรทั่วไปอีกด้วย วิธีการที่แตกต่างกันไปตั้งแต่แบบทันสมัยไปจนถึงแบบเรียบง่ายมักเป็นการผสมผสานที่ชาญฉลาด รัฐบาลทั่วโลกเริ่มนำกฎระเบียบการวางแผนที่เข้มงวดขึ้นมาใช้ หลายเมืองเปิดรับแนวคิดของเมืองอัจฉริยะ โดยเสนอโอกาสผ่านเงินอุดหนุน การริเริ่มโครงการ และกลุ่มสนทนาที่สามารถช่วยในการวางแผน ดำเนินการ และทดลองใช้แนวคิดใหม่ นอกเหนือจากมาตรการทางกายภาพแล้ว หลายเมือง เช่น ไทเป บาร์เซโลนา มัลโม และเม็กซิโก ได้มุ่งเน้นที่การลดการแบ่งแยกเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (ICT) ที่สามารถสนับสนุนผู้สูงอายุให้เข้าถึงวิธีการอัจฉริยะ โดยการพัฒนาความรู้ดิจิทัลที่มุ่งเป้าไปที่ผู้สูงอายุ สำหรับความคล่องตัวและการเข้าถึงแผนดังกล่าวสามารถช่วยให้ผู้สูงอายุมีทักษะการใช้คอมพิวเตอร์อย่างง่าย เปิดสายใหม่ในการสื่อสารกับผู้คนที่แตกต่างกัน

ผลงานที่สำคัญอีกประการหนึ่งสำหรับสุขภาพจิตและร่างกายคือความสามารถในการเดินทางในเมืองอย่างอิสระ ไม่ว่าจะการวางแผนเมืองจะทำได้ดีเพียงใด นี่เป็นความท้าทายสำหรับผู้ที่มีความคล่องตัวจำกัด คำเตือนคุณภาพอากาศที่แปลเป็นภาษาท้องถิ่นจากระบบอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง [41-42] เช่น เสาไฟอัจฉริยะ [41] หรือม้านั่งอัจฉริยะ [42] อาจถูกรวมไว้ เพื่อช่วยให้ผู้สูงอายุหลีกเลี่ยงการเดินทางในวันที่มีหมอกควันมาก โดยเฉพาะแอปพลิเคชันต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้นสำหรับผู้ที่มีปัญหาทางสายตาสามารถให้บริการผู้สูงอายุได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น BlindSquare [43-45] เป็นแอปที่ออกแบบมาเพื่อช่วยผู้พิการทางสายตาค้นหาทางเมืองต่าง ๆ โดยการอธิบายสภาพแวดล้อม คำเตือนของทางแยก การบอกทาง และแนะนำสถานที่ที่น่าสนใจ ซึ่งเป็นบริการที่พิสูจน์แล้วว่ามีความจำเป็นสำหรับผู้สูงอายุ ยานพาหนะ [46-49] เป็นตัวเลือกที่จำเป็นในการอำนวยความสะดวกช่วงการเดินทางที่เพิ่มขึ้นสำหรับผู้สูงอายุและเพิ่มความปลอดภัย ในขณะที่ยานพาหนะมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้การเดินทางสัญจรที่ราบรื่นและรวดเร็ว อาจช่วยในงานต่าง ๆ เช่น การซื้อของชำเร่ร่อนโดยไม่ต้องคำนึงถึงน้ำหนักของสิ่งของที่พกพาระหว่างเดินกลับบ้าน หรือเพื่อให้สามารถจัดการเรื่องเล็ก ๆ น้อย ๆ ในช่วงสุดสัปดาห์ได้ โดยไม่ต้องพึ่งแท็กซี่ในการเดินทางระยะสั้น สิ่งนี้สามารถช่วยให้ผู้สูงอายุได้มีส่วนร่วมกับกิจกรรมของชุมชนที่จะเกิดขึ้น และเพิ่มความมั่นใจในการนำทางในสถานที่ใหม่ ๆ เป็นที่ชัดเจนว่าในขณะที่ประชากรในหลายประเทศเปลี่ยนไปสู่สังคมสูงวัย ความก้าวหน้าในเทคโนโลยีต่าง ๆ จะเป็นส่วนสำคัญในการปรับชีวิตในเมืองให้เข้ากับความต้องการของผู้สูงอายุ

ในประเทศไทย จำนวนผู้สูงอายุเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อายุยืนยาวขึ้น และอัตราการเกิดลดลง ตามที่ระบุไว้ในรายงานของกรมผู้สูงอายุกระทรวงการพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์ในปี พ.ศ. 2562 [50] ประเทศไทยมีประชากรสูงอายุที่ค่อนข้างสูง (อายุ 60 ปีขึ้นไป) มากถึง 19% ของประชากรในประเทศ อายุเฉลี่ยของประชากรกลุ่มนี้คือ 61 ปีในปี พ.ศ. 2015 แต่ในปี พ.ศ. 2564 อายุเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 76 ปี เนื่องจากความก้าวหน้าทางการแพทย์ สัดส่วนประชากรสูงอายุในประเทศไทยจะเพิ่มขึ้นเป็น 19.8% ในปี พ.ศ. 2565 สำนักงานมูลนิธิสร้างเสริมสุขภาพไทยได้ประมาณการประชากรผู้สูงอายุ (อายุ 60 ปีขึ้นไป) และพบว่าภายในปี พ.ศ. 2579 ประชากรผู้สูงอายุของประเทศไทย จะประกอบด้วย 33% ของประชากรทั้งหมด ผู้สูงอายุจำนวนมากมีความพิการทางร่างกาย ดังนั้น ปัญหาสังคมสูงวัยจึงมีความเกี่ยวข้องและต้องการแนวทางแก้ไขอย่างจริงจัง แม้ว่าสังคมไทยจะสูงวัย แต่ก็มีการศึกษาเกี่ยวกับการสนับสนุนสังคมสูงวัยเพียงเล็กน้อย โดยเฉพาะในด้านการเดินทางของผู้สูงอายุ ผู้สูงอายุส่วนใหญ่ไม่สามารถใช้รถเพื่อการพาณิชย์เพื่อการเดินทางในแต่ละวันได้ เนื่องจากพวกเขาไม่สามารถควบคุมรถได้ ยานพาหนะเพื่อการพาณิชย์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมีขนาดใหญ่ และควบคุมและเคลื่อนย้ายได้ยาก ในขณะที่ผู้สูงอายุมักเดินทางในระยะทางสั้น ๆ ภายในเขตที่อยู่อาศัย ดังนั้น การใช้ยานพาหนะพิเศษที่วิ่งด้วยความเร็วต่ำ ขนาดเล็ก และที่ออกแบบโดยผู้สูงอายุจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม หนึ่งในประเภทที่น่าสนใจของยานพาหนะพิเศษคือความคล่องตัว ซึ่งประกอบด้วยยานพาหนะขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ทำงานด้วยความเร็วต่ำกว่าปกติ ซึ่งขับเคลื่อนโดยผู้ใช้งาน อุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ขนาดเล็ก ได้แก่ จักรยาน จักรยานไฟฟ้า สกู๊ตเตอร์ไฟฟ้า สเกตบอร์ดไฟฟ้า จักรยานที่ใช้ร่วมกัน และ จักรยานแบบใช้แป้นเหยียบไฟฟ้า การพัฒนายานยนต์ขนาดเล็กที่เคลื่อนที่ได้ ซึ่งสามารถเดินทางได้ไกลขึ้นโดย มีน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น และตอบสนองต่อความต้องการของผู้สูงอายุได้มากขึ้น จึงเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนา ในทศวรรษนี้ เพื่อรองรับวิถีชีวิตของผู้สูงอายุ เช่น การเดินทางในย่านที่อยู่อาศัยและซื้อของใช้ ความคล่องตัว ได้รับการออกแบบมาเป็นหลักสำหรับการขนส่งผู้คน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาในด้านการสื่อสารหรือการถ่ายโอน ข้อมูลด้วย การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่งและระบบข้อมูลมีผลอย่างมากต่อการ เลือกลงใช้งาน นอกจากนี้ รถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ [51-52] ยังได้รับการพัฒนาซึ่งต้องใช้เซ็นเซอร์ การ ประมวลผล และระบบสื่อสาร ส่งผลให้แนวคิดการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่งและระบบ สารสนเทศมาใช้ร่วมกับยานยนต์ขนาดเล็กในประเทศไทยสำหรับผู้สูงอายุควรได้รับการสนับสนุน

ระบบอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่งที่พัฒนาแล้วส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การดูแลสุขภาพสำหรับผู้สูงอายุ ลดภาระของผู้ดูแล และป้องกันอุบัติเหตุ นักวิจัยหลายคนได้พัฒนาระบบเฝ้าติดตาม [53-58] เพื่อตอบสนอง ความต้องการเหล่านี้ ซึ่งประกอบด้วย ระบบการวัดข้อมูลด้านสุขภาพ [53-55] และอุปกรณ์ช่วยเหลือเคลื่อนที่ [56-58] Buthelezi และคณะ [54] ออกแบบระบบติดตามสุขภาพ (Healthcare Monitoring Systems: HMs) โดยใช้ Zigbee เพื่อตรวจหาโรคหัวใจ ความดันโลหิตสูง และโรคหลอดเลือดหัวใจอื่น ๆ Wang และ คณะ [55] ได้ออกแบบระบบตรวจสอบสุขภาพของมนุษย์โดยใช้ Narrowband IoT (NB-IoT) เพื่อส่งข้อมูล การเต้นของหัวใจ อุณหภูมิของร่างกาย และตำแหน่งไปยังผู้ดูแลและครอบครัวในกรณีฉุกเฉิน Yang และคณะ [56] ออกแบบไม้ค้ำยันอัจฉริยะสำหรับผู้สูงอายุ เพื่อตรวจสอบการล้ม อัตราการเต้นของหัวใจ และสถานที่ แบบเวลาจริง (real-time) เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่งไม่เพียงแต่ใช้ในการวัดข้อมูลด้านสุขภาพ แต่ยังมีประโยชน์สำหรับการตรวจสอบมลพิษที่เป็นอันตรายในสภาพแวดล้อมโดยรอบ นักวิจัยหลายคนได้ พัฒนาระบบตรวจจับมลพิษทางอากาศ [59-67] ที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อผู้สูงอายุเนื่องจากได้รับผลกระทบ จากมลภาวะมาก ดังนั้น การพัฒนาระบบตรวจจับมลพิษทางอากาศจึงไม่เพียงช่วยให้ผู้สูงอายุประเมินความ เสี่ยงของตนเองได้ แต่ยังสร้างแผนที่มลพิษทางอากาศสำหรับแต่ละพื้นที่ เพื่อนำไปสู่แนวทางแก้ไขในอนาคต แพลตฟอร์มตรวจจับฝูงชน [59] นำเสนอชุดบริการแก่ประชาชนโดยใช้ประโยชน์จากเครือข่ายจักรยาน ตาม การสำรวจที่จัดทำขึ้นเพื่อระบุบริการที่เปิดใช้งานจักรยานที่น่าสนใจที่สุด แพลตฟอร์ม Smart Bike ให้ข้อมูล ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ระยะไกลแบบเวลาจริงสำหรับจักรยานของผู้ใช้บริการ ป้องกันการโจรกรรม ข้อมูล เกี่ยวกับเส้นทางเดินทาง และการตรวจสอบมลพิษทางอากาศ [60-63] ระบบตรวจสอบสภาพอากาศในเมืองแยกเดี่ยว หลายพารามิเตอร์ได้รับการพัฒนาสำหรับการวิเคราะห์มลพิษทางอากาศที่สำคัญในบรรยากาศ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่งและคลาวด์คอมพิวเตอร์ โดยใช้บอร์ด Arduino Uno ในขณะที่ Mahammad และคณะ [64] ออกแบบระบบตรวจสอบอากาศโดยใช้บอร์ดสมองกลฝังตัว เซ็นเซอร์วัดฝุ่น แบบออปติคัล และแอปพลิเคชัน Blink เป็นแพลตฟอร์มคลาวด์ในการตรวจสอบ ดังนั้น ยานยนต์สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

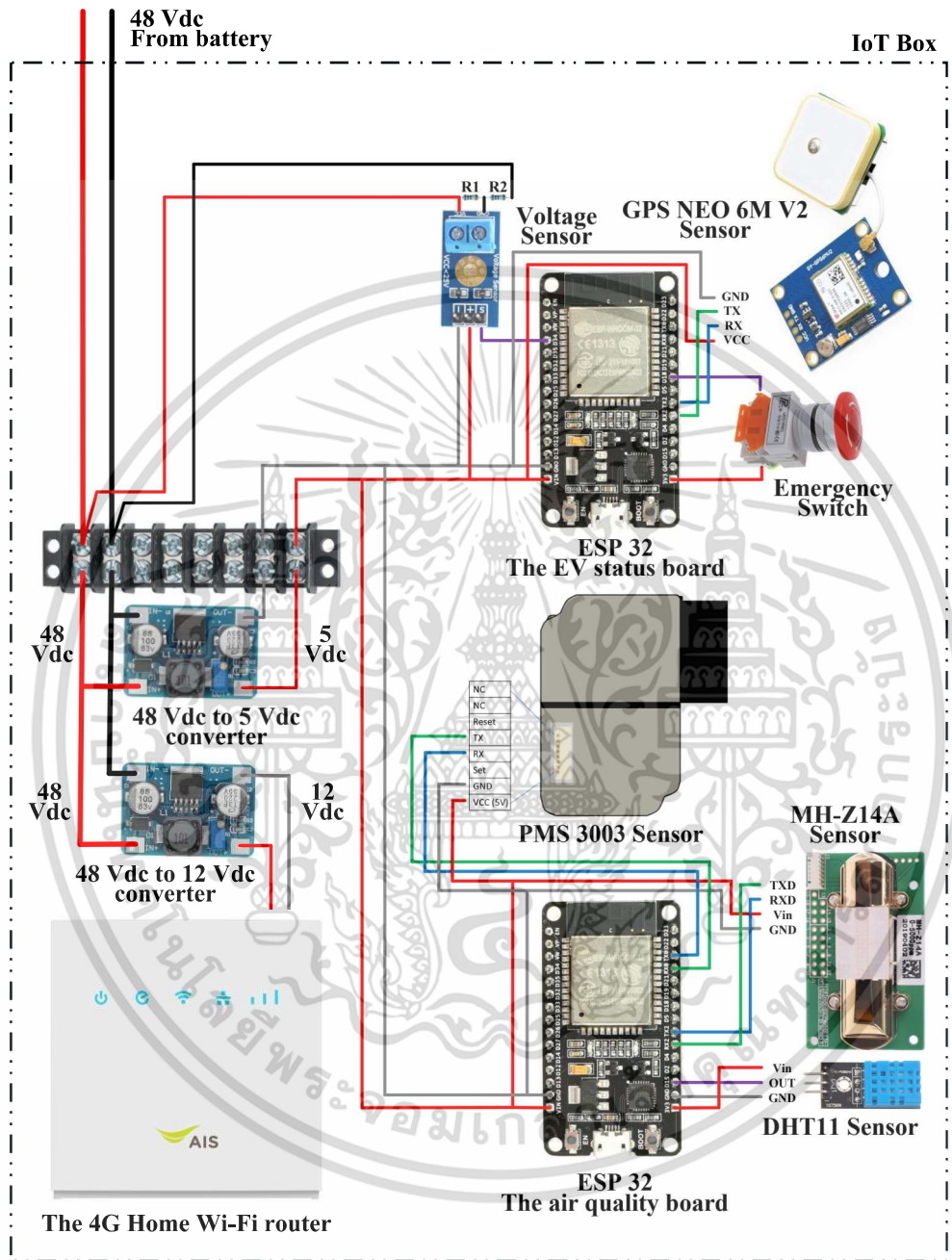
ผู้สูงอายุจำเป็นต้องมีการพัฒนาฟังก์ชันเพื่อตอบสนองความต้องการและลดภาระของผู้ดูแล ส่งผลให้มีเสถียรภาพและความปลอดภัยมากขึ้น แม้ว่าการพัฒนาอุปกรณ์ติดตามสุขภาพผู้สูงอายุ [53-58] และการประเมินคุณภาพอากาศ [59-67] จะได้รับการพัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่ง ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มักจะติดตั้งถาวรและไม่สามารถติดตามกิจกรรมกลางแจ้งของผู้สูงอายุได้ ดังนั้น การพัฒนายานยนต์ขนาดเล็กด้วยระบบเซ็นเซอร์และเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่งที่สามารถส่งข้อมูล การประเมินคุณภาพอากาศโดยรอบ และการแจ้งเตือนฉุกเฉิน จึงเป็นแนวคิดที่น่าสนใจสำหรับการสร้างเมืองที่เป็นมิตรต่อผู้สูงอายุในอนาคต

การศึกษานี้พัฒนาอุปกรณ์เคลื่อนที่ส่วนบุคคลของผู้สูงอายุด้วยระบบเซ็นเซอร์ เพื่อแสดงและแจ้งเตือนสถานะยานยนต์ไฟฟ้า และการตรวจจับคุณภาพอากาศผ่านเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่ง ระบบเซ็นเซอร์ได้รับการออกแบบมาเพื่อตรวจสอบสถานะยานยนต์ไฟฟ้า และการตรวจจับคุณภาพอากาศเพื่อประสิทธิภาพการดูแลผู้สูงอายุ ระบบเซ็นเซอร์รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ และส่งไปยังเซิร์ฟเวอร์คลาวด์ เพื่อสร้างฐานข้อมูลขนาดใหญ่สำหรับการพัฒนาบริการสุขภาพผู้สูงอายุ แผนที่คุณภาพอากาศพร้อมสถานีตรวจวัด การกระจาย และระบบตรวจสอบสถานีชาร์จในอนาคต

## 4.2 การออกแบบระบบเซ็นเซอร์

ระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนประกอบด้วยอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่ช่วยลดภาระของผู้ดูแลและผู้สูงอายุ รวมทั้งเพิ่มความสามารถและความมั่นใจของผู้ใช้รถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ ระบบเซ็นเซอร์ได้รับการออกแบบและประกอบในกล่องควบคุม ซึ่งใช้เพื่อแสดงผลและแจ้งสถานะรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ ตำแหน่ง (Global Positioning System : GPS) และคุณภาพอากาศ ระบบนี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อรองรับการทำงานแบบเวลาจริง (Real time) ที่อัปเดตทุกนาที มีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูง นอกจากนี้ ยังมีเราเตอร์อินเทอร์เน็ต (4G Wi-Fi Router) ที่ใช้สำหรับถ่ายโอนข้อมูลสถานะรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับและการตรวจจับคุณภาพอากาศไปยังผู้ใช้ผ่านการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตดังแสดงในรูปที่ 4.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจ่ายไฟไปยังกล่องควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ (ESP32 ของ Espressif ประเทศจีน) และเราเตอร์อินเทอร์เน็ตผ่านตัวแปลงสเต็ปดาวน์ (LM2596HV) ตัวแปลงแรงลดแรงดันไฟฟ้าจาก 24 โวลต์ เป็น 5 โวลต์ และส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ รวมถึงบอร์ดสถานะรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ และบอร์ดคุณภาพอากาศ ตัวแปลงอีกอันใช้เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 24 โวลต์ เป็น 12 โวลต์ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับเราเตอร์อินเทอร์เน็ต (4G Wi-Fi Router) เซ็นเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า เซ็นเซอร์ตำแหน่ง (GPS) และสวิตช์ฉุกเฉินในแผงสถานะรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ ใช้เพื่อรวบรวมข้อมูลแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ตำแหน่งของผู้สูงอายุ ตำแหน่งรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ และสถานะฉุกเฉินตามลำดับ สำหรับบอร์ดแสดงสถานะคุณภาพอากาศ

จะใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับฝุ่นละออง คาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้น และอุณหภูมิ รอบ ๆ รถเซ็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับ



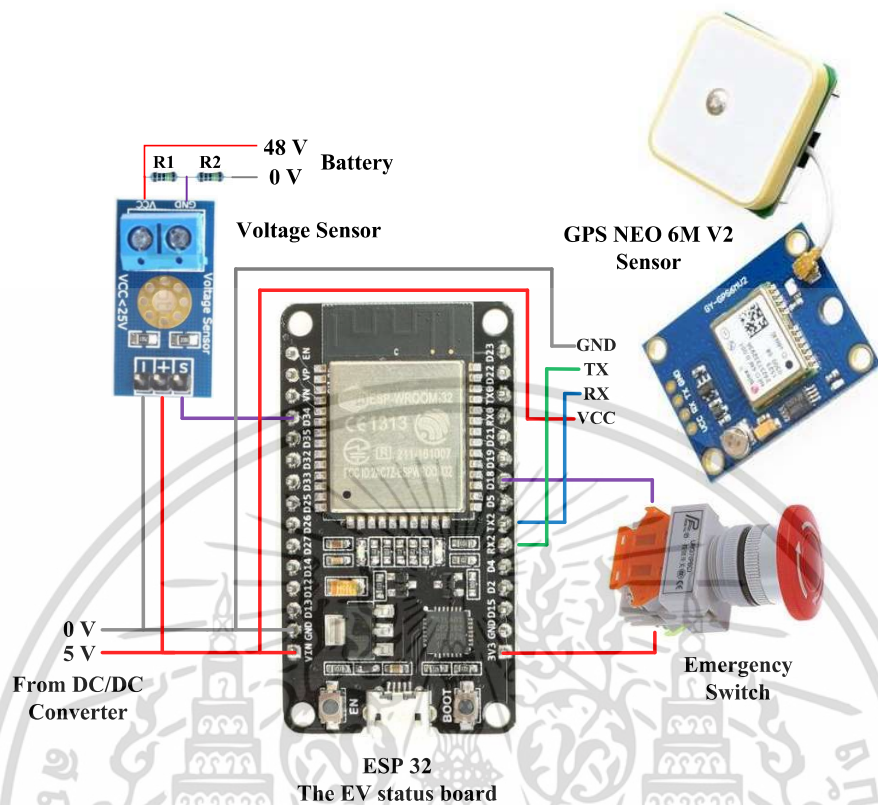
รูปที่ 4.1 ระบบแสดงผลและแจ้งเตือนสถานะรถเซ็นไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การออกแบบระบบตรวจจับสถานะรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ

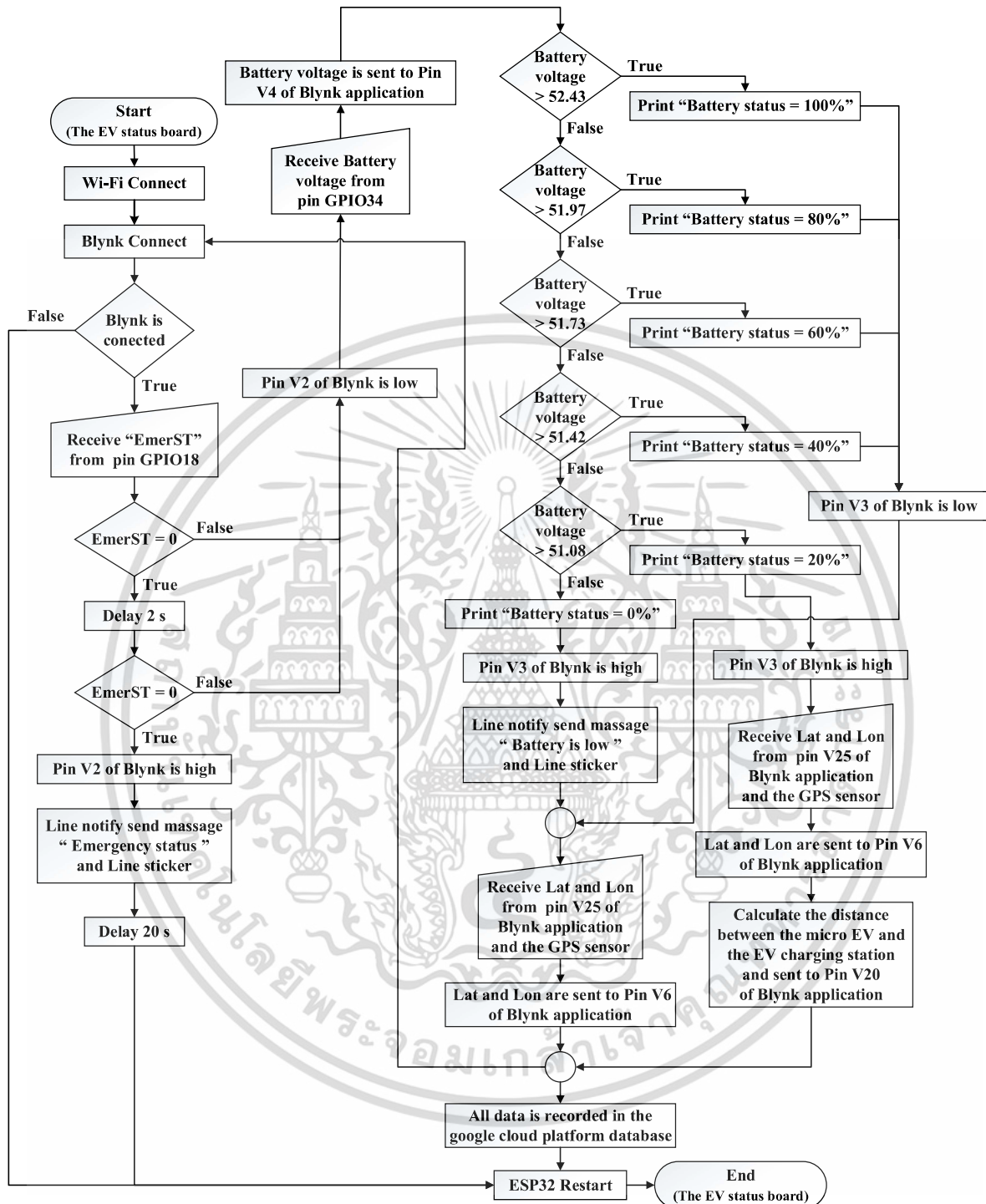
ระบบแสดงสถานะรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับมีความสำคัญสำหรับการติดตามสถานะการใช้งานรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ การแจ้งเตือนเหตุการณ์ฉุกเฉิน และการค้นหาผู้สูงอายุและรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ ตามการใช้เซ็นเซอร์ต่าง ๆ เช่น สวิตช์ฉุกเฉิน เซ็นเซอร์แรงดันไฟฟ้า และเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) เมื่อพิจารณาขั้นตอนการทำงานในรูปที่ 4.2 (ข) การทำงานของระบบจะถูกนำไปใช้เมื่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ แอปพลิเคชัน Blynk และอินเทอร์เน็ตเชื่อมต่อกัน ในขั้นตอนต่อไป ระบบจะตรวจสอบสถานะของสวิตช์ฉุกเฉินจะทำงาน หากสวิตช์ฉุกเฉินถูกกด ระบบจะแจ้งสถานะฉุกเฉินให้ผู้ดูแลทราบผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และ Line ระบบจะค้างสถานะฉุกเฉินเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นระบบจะรีเซ็ตาร์ท ในทางกลับกัน หากไม่ได้กดสวิตช์ฉุกเฉิน สถานะฉุกเฉินจะเป็นปกติและข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป แรงดันขั้วแบตเตอรี่วัดโดยเซ็นเซอร์แรงดันไฟเพื่อประเมินความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ เมื่อความจุแบตเตอรี่เหลือน้อยกว่า 20% ระบบจะแจ้งเตือนผ่านผู้ใช้รถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับและผู้ดูแลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และ Line ในทำนองเดียวกันตำแหน่งของรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับถูกใช้เพื่อคำนวณระยะห่างระหว่างรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับกับสถานีชาร์จที่ใกล้ที่สุด [70] ระบบจะแสดงรายการสถานีชาร์จที่มีอยู่รอบพื้นที่ เพื่อรองรับการตัดสินใจของผู้สูงอายุในสถานการณ์ที่ไม่คาดคิดที่เกิดจากแบตเตอรี่หมดระหว่างการใช้

ตำแหน่งของผู้สูงอายุและรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับจะแสดงในแอปพลิเคชัน Blynk สำหรับตำแหน่งของผู้สูงอายุ แอปพลิเคชัน Blynk จะได้รับข้อมูลละติจูดและลองจิจูดจากโทรศัพท์มือถือของผู้สูงอายุ ซึ่งจะถูกส่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทุก ๆ 30 วินาที สำหรับตำแหน่งรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะอ่านข้อมูลละติจูดและลองจิจูดจากเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง (GPS NEO-6M V2) ที่ติดตั้งในรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ ข้อมูลตำแหน่งจะแสดงในวิดเจ็ตแผนที่ของในแอปพลิเคชัน Blynk ข้อมูลที่สะสม (สถานะฉุกเฉิน แรงดันแบตเตอรี่ ตำแหน่งผู้สูงอายุ และตำแหน่งรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ) จะถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูลแพลตฟอร์ม Google Cloud ในส่วนสเปิร์ดชีต ข้อมูลนี้จะถูกบันทึกโดยอัตโนมัติทุกนาทีเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการพัฒนารถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับต่อไปในอนาคต



(ก) ไดอะแกรมระบบแจ้งเตือนสถานะรถเช่าไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



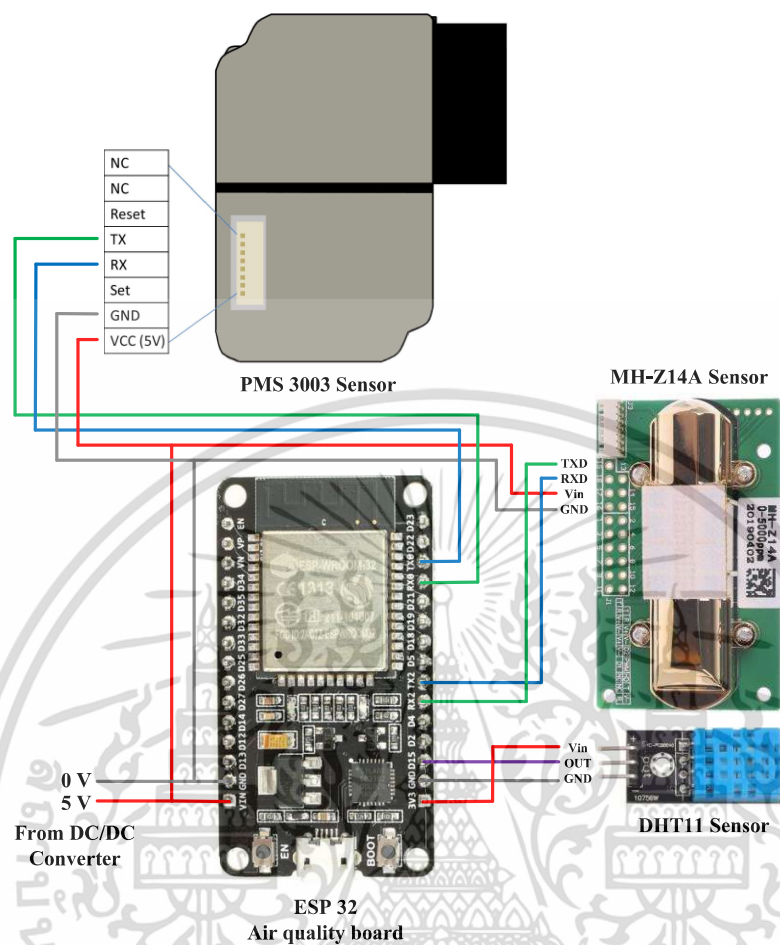
(ข) ผังการทำงานของระบบแจ้งเตือนสถานะรถเข็นไฟฟ้า

รูปที่ 4.2 ระบบแจ้งเตือนสถานะรถเข็นไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

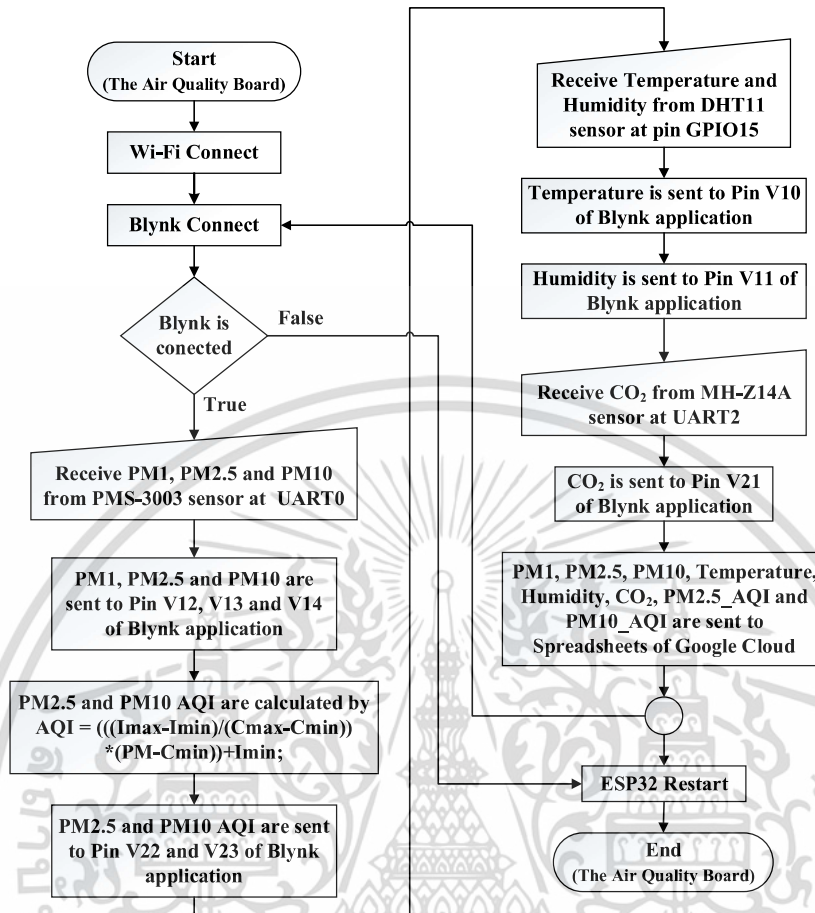
#### 4.4 การออกแบบระบบตรวจจับคุณภาพอากาศ

ระบบตรวจจับคุณภาพอากาศใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PMS 3003 Sensor, Plantower Technology, ประเทศจีน) เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นและอุณหภูมิแบบดิจิทัล (DHT11 Sensor, Aosong Electronics Co., ประเทศจีน) และเซ็นเซอร์ตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์ (MH-Z14A Sensor, Winsen Electronics Technology Co., ประเทศจีน) เพื่อตรวจจับฝุ่นละอองขนาดเล็ก อุณหภูมิ ความชื้น และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) เมื่อพิจารณาผังการทำงานในรูปที่ 4.3 (ข) ระบบตรวจจับคุณภาพอากาศจะเริ่มต้นทำงานด้วยการตรวจจับการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต และแอปพลิเคชัน Blynk ถัดไป บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รับข้อมูลค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กจากเซ็นเซอร์ PMS 3003 จากนั้นจึงแยกข้อมูลตามเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นละอองเป็น PM1 ที่ขนาด 0.3–1.0 ไมโครเมตร PM2.5 ที่ขนาด 1.0–2.5 ไมโครเมตร และ PM10 ที่ขนาด 2.5–10 ไมโครเมตร ข้อมูลที่ได้รับถูกเก็บรวบรวมเป็นหน่วยไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) แล้วแปลงเป็นดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) [61] และส่งไปยังแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อประเมินความเสี่ยงของผลกระทบต่อสุขภาพผู้สูงอายุตามคุณภาพอากาศในพื้นที่ อุณหภูมิและความชื้นในอากาศวัดโดยเซ็นเซอร์ DHT11 แปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและส่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ระบบจะส่งค่าอุณหภูมิและความชื้นไปยังแอปพลิเคชัน Blynk ความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์วัดโดยเซ็นเซอร์ MH-Z14A ซึ่งให้ค่าในส่วนต่อล้าน (ppm) ค่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกส่งไปยังแอปพลิเคชัน Blynk และเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) [72] สำหรับการประเมินผลกระทบด้านสุขภาพผู้สูงอายุ สุดท้าย ข้อมูลฝุ่นละอองขนาดเล็ก, ดัชนีคุณภาพอากาศ, อุณหภูมิ, ความชื้น และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกบันทึกโดยอัตโนมัติในฐานข้อมูลบนแพลตฟอร์ม Google Cloud ในสเปรดชีต ซึ่งใช้เป็นข้อมูลคุณภาพอากาศสำหรับพื้นที่ที่กำหนด



(ก) ไดอะแกรมระบบตรวจจับคุณภาพอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



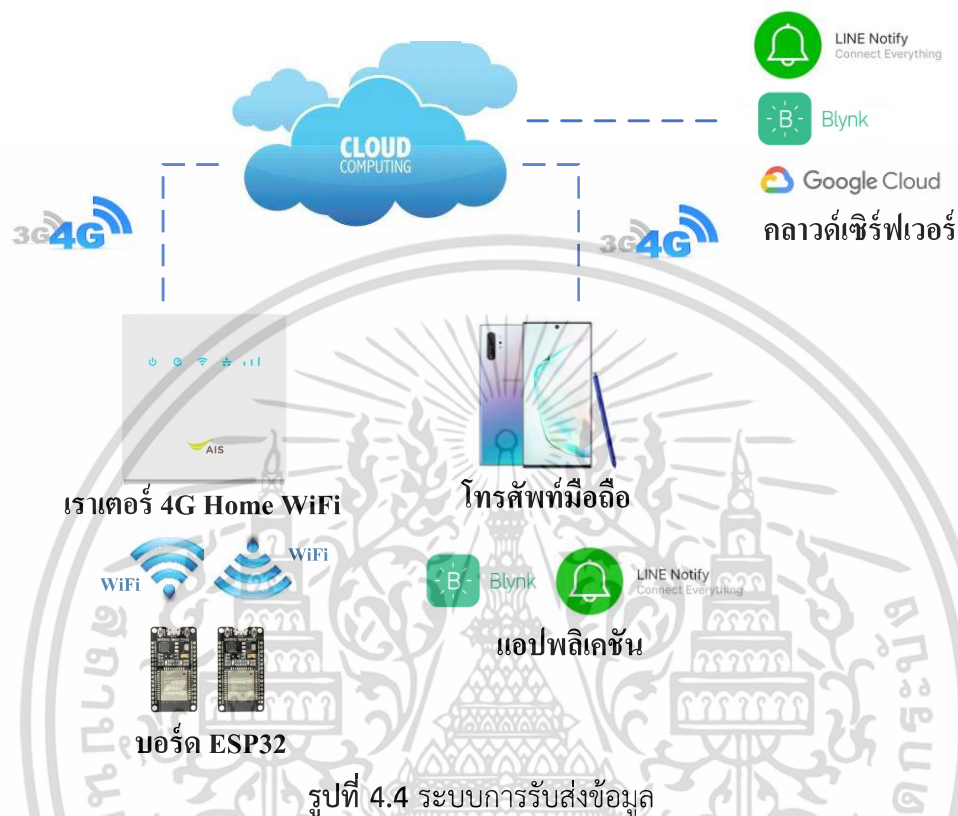
(b) ผังการทำงานของระบบตรวจจับคุณภาพอากาศ

รูปที่ 4.3 ระบบตรวจจับคุณภาพอากาศ

#### 4.5 การออกแบบระบบส่งข้อมูล

ระบบอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่งที่เสนอและใช้กับรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ซึ่งประกอบด้วยระบบตรวจสอบสถานะรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ และระบบตรวจจับคุณภาพอากาศ ระบบทั้งสองรับและประมวลผลข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งในรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ ต่อจากนั้นข้อมูลที่ประมวลผลจะถูกส่งไปยังเราเตอร์อินเทอร์เน็ต ซึ่งเชื่อมต่อโดยใช้คลาวด์คอมพิวเตอร์ผ่านระบบสื่อสารไร้สาย สิ่งนี้มีประโยชน์อย่างมากสำหรับระบบเซ็นเซอร์ การถ่ายโอนข้อมูล และการพัฒนารถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับในอนาคต ข้อมูลจะถูกบันทึกไว้ในสามแอปพลิเคชันบนเซิร์ฟเวอร์คลาวด์ ได้แก่ แอปพลิเคชัน Blynk แอปพลิเคชัน LINE Notify และแอปพลิเคชัน Google Cloud ผลลัพธ์จะแสดงผ่านอินเทอร์เน็ตเฟซของแอปพลิเคชัน ดังนั้นผู้ใช้อินเทอร์เน็ตเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับและผู้ดูแลจึงสามารถสังเกตข้อมูลและการแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ และข้อมูลย้อนหลังผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์การใช้งาน

จากฐานข้อมูลในเซิร์ฟเวอร์คลาวด์ ซึ่งสะดวกต่อการตรวจสอบสถานะรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นที่ต่างระดับ และการประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพสำหรับการดูแลผู้สูงอายุที่มีประสิทธิภาพสูง



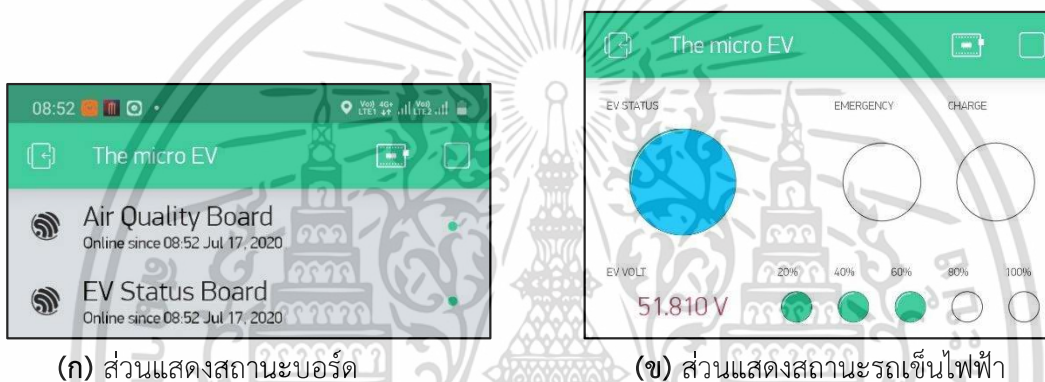
#### 4.6 ผลการทดสอบระบบอินเทอร์เน็ตผลสานสรรพลิ่ง

ระบบเซ็นเซอร์ออกแบบมาเพื่อตรวจสอบสถานะรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นที่ต่างระดับ คุณภาพอากาศ ตำแหน่งผู้สูงอายุ และตำแหน่งรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นที่ต่างระดับ ข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งไปยังแอปพลิเคชันบน โทรศัพท์มือถือของผู้ใช้ ผู้ดูแล และครอบครัวผู้สูงอายุ แอปพลิเคชัน LINE Notify แอปพลิเคชัน Google Cloud และแอปพลิเคชัน Blynk ถูกใช้เป็นเซิร์ฟเวอร์จัดเก็บข้อมูลของระบบ แอปพลิเคชัน LINE Notify ใช้สำหรับแจ้งเตือนเหตุฉุกเฉิน แอปพลิเคชัน Google Cloud ใช้รวบรวมข้อมูลทั้งหมดเป็นฐานข้อมูล ในแง่ของตัวบันทึกข้อมูลสำหรับการพัฒนาระบบในอนาคต แอปพลิเคชัน Blynk คือส่วนประสานระหว่างระบบกับผู้ใช้ที่สามารถเข้าถึงได้จากผู้ใช้หลายคน และตอบสนองต่อการทำงานแบบเรียลไทม์ ข้อมูลที่สะสมสามารถนำไปใช้พัฒนารถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นที่ต่างระดับสำหรับผู้สูงอายุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.1 การแสดงผลบนหน้าจอแอปพลิเคชัน

การแสดงผลบนหน้าจอจะแสดงในแอปพลิเคชัน Blynk และแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ สถานะของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ สถานะรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ การตรวจจับคุณภาพอากาศ กราฟแสดงข้อมูลย้อนหลัง และการระบุตำแหน่ง ชั้นแรก สถานะของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นส่วนที่ซ่อนอยู่ของจอแสดงผลปกติตั้งแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) และมีหน้าที่ในการแสดงการเชื่อมต่อของบอร์ดแต่ละตัวกับแอปพลิเคชัน Blynk ส่วนนี้ประกอบด้วยบอร์ดแสดงสถานะรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ และบอร์ดตรวจจับคุณภาพอากาศ ซึ่งแสดงรายละเอียดของบอร์ดในสถานะปัจจุบัน ถัดไป ส่วนสถานะรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ เพื่อแสดงสถานะรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับ สัญญาณแจ้งเตือนเหตุฉุกเฉิน สัญญาณแจ้งเตือนการชาร์จ และระดับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข)



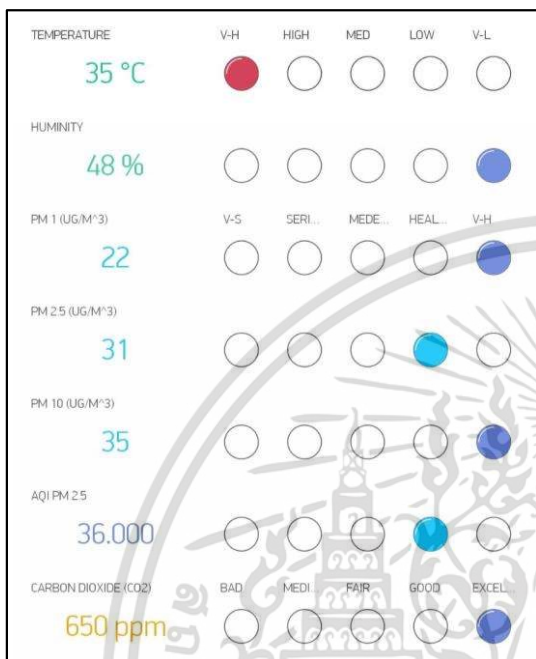
(ก) ส่วนแสดงสถานะบอร์ด

(ข) ส่วนแสดงสถานะรถเซ็นไฟฟ้า

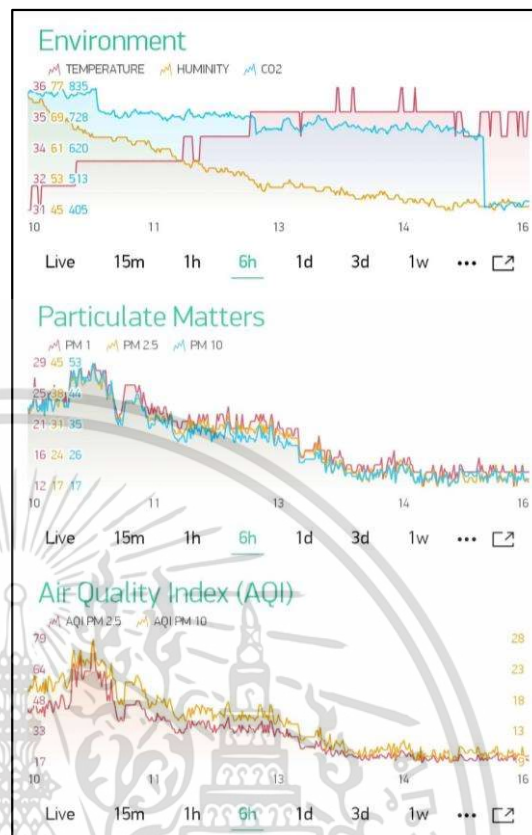
รูปที่ 4.5 ส่วนแสดงสถานะบอร์ดและรถเซ็นไฟฟ้าในแอปพลิเคชัน Blynk

#### 4.6.2 ผลการวัดคุณภาพอากาศ

การตรวจจับคุณภาพอากาศที่แสดงในรูปที่ 4.6 (ก) พารามิเตอร์แบบเรียลไทม์ของระบบตรวจจับคุณภาพอากาศจะแสดงในแง่ของค่าอนุหภูมิ ค่าความชื้น ค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM1, PM2.5, PM10) ค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) และค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ถูกคำนวณเป็นค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) ซึ่งใช้พิจารณาผลกระทบต่อสุขภาพตามเกณฑ์ดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย สำหรับค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะใช้มาตรฐาน ASHRAE 62.1-2013 [37] [23] ของสหรัฐอเมริกา เพื่อประเมินค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปที่ 4.6 (ข) ส่วนกราฟข้อมูลย้อนหลังจะแสดงผลที่บันทึกไว้ของพารามิเตอร์ทั้งหมด และสามารถดึงค่าในอดีตเป็นเวลา 15 นาที 1 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน และ 1 สัปดาห์ได้ ส่วนนี้สามารถใช้วิเคราะห์ความเหมาะสมของกิจกรรมกลางแจ้งของผู้สูงอายุและส่งข้อมูลกราฟไปยังอีเมลล์ของผู้ใช้เพื่อแสดงค่าโดยละเอียดได้



(ก) ส่วนแสดงผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศ

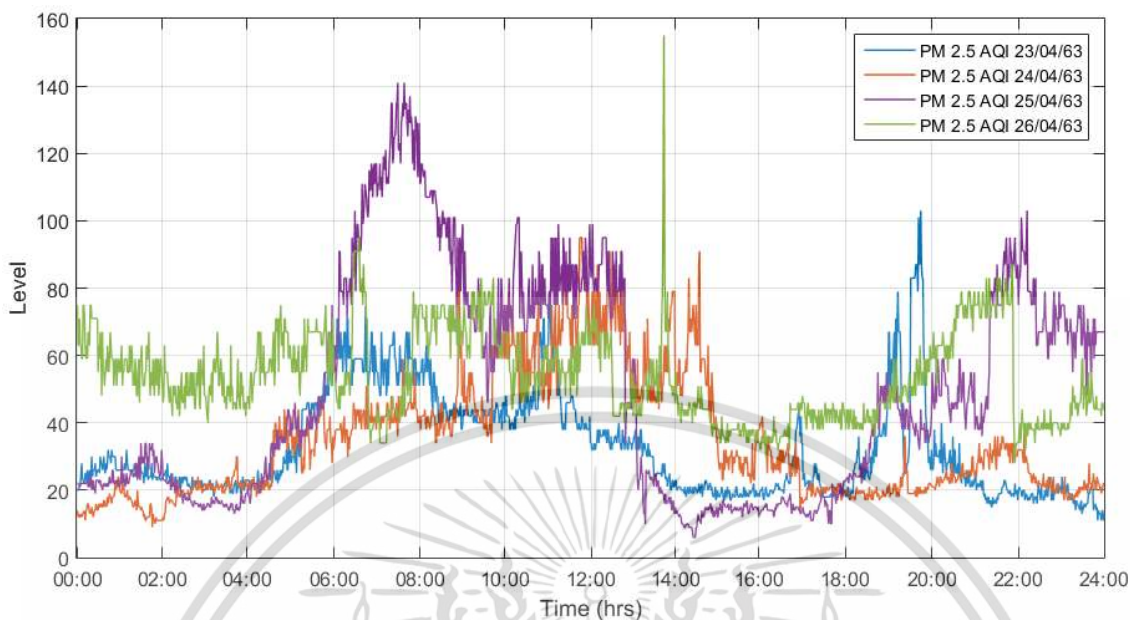


(ข) ส่วนกราฟข้อมูล

รูปที่ 4.6 ส่วนแสดงผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศและกราฟข้อมูลในแอปพลิเคชัน Blynk

ในงานวิจัยนี้ พารามิเตอร์ตรวจวัดคุณภาพอากาศวัดที่ใช้ในระบบตรวจจับคุณภาพอากาศทำการบันทึกทุกนาทีและบันทึกไว้ในเซิร์ฟเวอร์ของแอปพลิเคชัน Google Cloud และแอปพลิเคชัน Blynk ระหว่างวันที่ 22 - 27 เมษายน 2563 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 โดยพิจารณาจากผลลัพธ์ที่ได้ ค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กประกอบด้วย PM1, PM2.5 และ PM10 ซึ่งมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันในแต่ละวัน การประเมินค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กในอากาศใช้การคำนวณเป็นค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อสุขภาพผู้สูงอายุดังรูปที่ 4.7 พบว่าค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) สูงมากในตอนเช้า (ช่วงเวลา 6:00 - 13:00 นาฬิกา) ผู้สูงอายุควรงดกิจกรรมกลางแจ้ง เพราะอาจทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อดวงตาและระบบทางเดินหายใจได้ ค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) จะลดลงในช่วงบ่ายและเย็น (ช่วงเวลา 13:00 - 19:00 นาฬิกา) และเพิ่มขึ้นอีกครั้งในเวลากลางคืน ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกิจกรรมกลางแจ้งคือช่วงบ่ายและเย็น (ช่วงเวลา 13:00 - 19:00 นาฬิกา) ลักษณะของค่าดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) ไม่เหมือนกันทุกวันและมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละเดือน ดังนั้นระบบตรวจจับคุณภาพอากาศจึงมีความจำเป็นสำหรับผู้สูงอายุในการประเมินความเสี่ยงด้านคุณภาพอากาศด้วยตนเอง

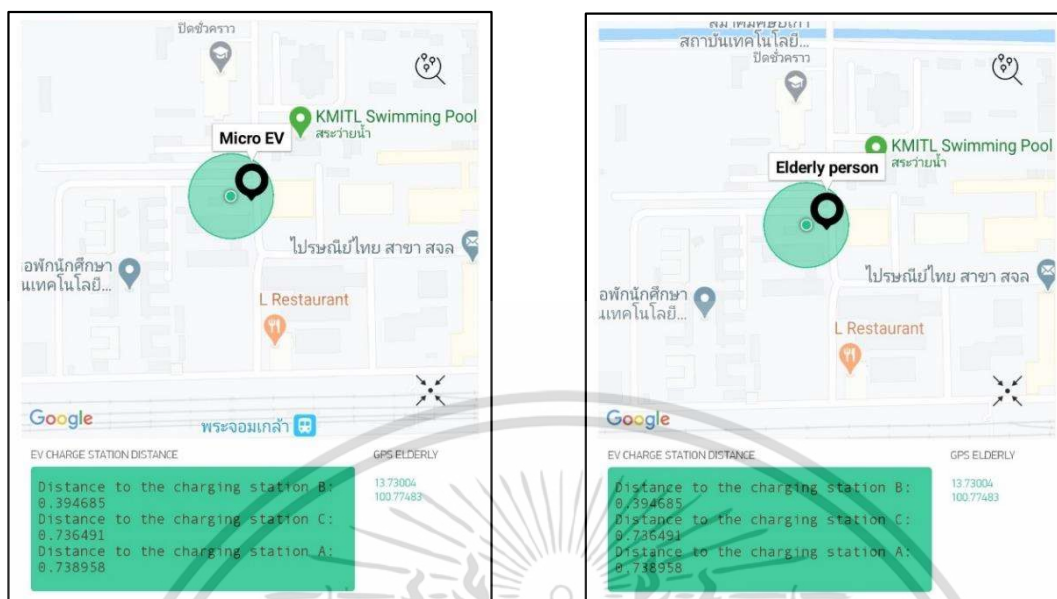
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ดัชนีคุณภาพอากาศค่าฝุ่นละอองขนาด 2.5 ไมโครเมตร ในระหว่างวันที่ 22 - 27 เมษายน 2563

#### 4.6.3 ผลการติดตั้งระบบระบุตำแหน่ง

ส่วนระบบระบุตำแหน่ง (GPS) ได้รับการออกแบบเพื่อแจ้งให้ผู้ดูแลและครอบครัวผู้สูงอายุทราบในระหว่างการใช้งานปกติและอุบัติเหตุ ข้อมูลตำแหน่ง (GPS) ของผู้สูงอายุถูกดึงออกมาโดยแอปพลิเคชัน Blynk บนโทรศัพท์มือถือของผู้สูงอายุ ในขณะที่ข้อมูลตำแหน่งของรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับจะถูกดึงออกมาโดยเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง (GPS) ที่ติดตั้งในตัวรถ จุดข้อมูลตำแหน่ง (GPS) ทั้งสองจุดจะถูกส่งไปยังบอร์ดสถานะรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับ ต่อมา บอร์ดจะส่งข้อมูลตำแหน่งไปยังวิดเจ็ตแผนที่ของแอปพลิเคชัน Blynk ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ผลการวิจัยพบว่าข้อมูลตำแหน่งมีความแม่นยำมากเมื่อได้รับจากภายนอกอาคาร โดยไม่มีสิ่งปลูกสร้างบดบัง

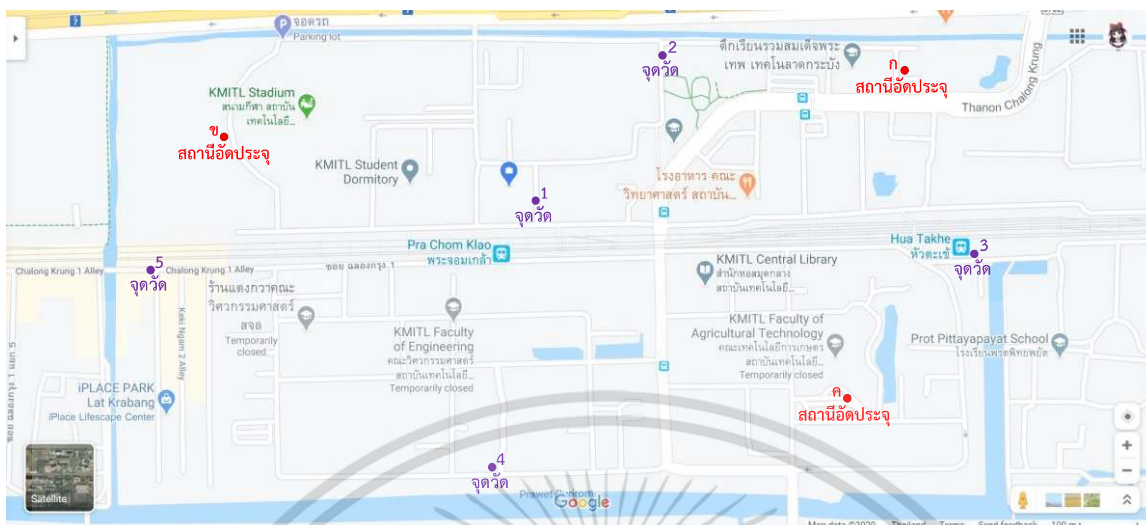


(ก) ตำแหน่งรถเซ็นไฟฟ้า

(ข) ตำแหน่งผู้สูงอายุ

รูปที่ 4.8 แผนที่ของแอปพลิเคชัน Blynk

เมื่อพิจารณาความเบี่ยงเบนของเซ็นเซอร์ระบุตำแหน่ง (GPS) เซ็นเซอร์ระบุตำแหน่งได้รับการทดสอบโดยการวัดจุดทดสอบ 5 จุดภายในสถาบัน เปรียบเทียบผลการระบุตำแหน่งสำหรับผู้สูงอายุกับรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแสดงว่าข้อมูลตำแหน่งของผู้สูงอายุมีความถูกต้องเพราะดึงข้อมูลโดยตรงจากโทรศัพท์มือถือของผู้สูงอายุ แต่มีการตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวช้า ในขณะที่เซ็นเซอร์ระบุตำแหน่งของรถเซ็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับสามารถตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวได้ดีกว่า แต่ให้ความแม่นยำที่น้อยกว่า โดยเบี่ยงเบนประมาณ 1-2 เมตร ตารางที่ 4.1 แสดงละเอียดจุดและลองจิจูดของจุดทดสอบทั้ง 5 จุด เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการวัดของข้อมูลตำแหน่งทั้งสองประเภทและคำนวณระยะห่างระหว่างผลการวัดเป็นส่วนเบี่ยงเบน ส่วนเบี่ยงเบนของค่าตำแหน่งทั้งสองค่า พบว่าค่าเบี่ยงเบนสูงสุดมีค่า 2.484 เมตรและค่าเบี่ยงเบนต่ำสุดคือ 1.013 เมตร



รูปที่ 4.9 การกำหนดสถานีชาร์จและจุดตรวจวัด

ตารางที่ 4.1 ค่าตำแหน่งจากจุดวัดทั้งห้าจุด

จุดวัด	ตำแหน่งผู้สูงอายุ (ละติจูด, ลองจิจูด)	ตำแหน่งรถเข็นไฟฟ้า (ละติจูด, ลองจิจูด)	ค่าเบี่ยงเบน (เมตร)
1	13.72897, 100.77602	13.72898, 100.77600	2.195
2	13.73134, 100.77807	13.73133, 100.77808	1.013
3	13.72817, 100.78305	13.72818, 100.78304	1.965
4	13.72476, 100.77538	13.72475, 100.77538	1.052
5	13.72789, 100.76984	13.72787, 100.76984	2.484

เมื่อพิจารณาจากการค้นหาสถานีชาร์จที่ใกล้ที่สุด ระบบเซ็นเซอร์ได้รับการทดสอบเพื่อคำนวณระยะห่างระหว่างรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับกับสถานีชาร์จ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากต่อผู้สูงอายุเมื่อแบตเตอรี่รถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับเหลือน้อย ผู้สูงอายุสามารถค้นหาสถานีที่ใกล้ที่สุดและประเมินความสามารถในการไปถึงสถานีชาร์จได้ ในการวิจัยนี้มีการกำหนดสถานีชาร์จ 3 แห่ง คือ ที่พิกัด 13.731004 , 100.781921 เป็นสถานีชาร์จ ก ที่พิกัด 13.729856 , 100.771049 เป็นสถานีชาร์จ ข และที่พิกัด 13.725866 , 100.781105 เป็นสถานีชาร์จ ค จุดทดสอบ 5 จุดถูกแจกจ่ายภายในสถาบันดังแสดงในรูปที่ 4.9 ระยะทางระหว่างจุดทดสอบทั้งหมดไปยังสถานีชาร์จทั้ง 3 แห่งคำนวณโดยใช้กฎทรงกลมของวิธีโคไซน์ที่กำหนดโดยสมการ (2) และ (3) [70] ตามตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าที่คำนวณได้นั้นใกล้เคียงกับระยะทางจริงมาก โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.85 เมตร และค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด 0.23 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_c = \cos^{-1}[\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 + \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 \cdot \cos \Delta\lambda] \quad (2)$$

$$d = 2\pi R \cdot \frac{\alpha_c}{360} \quad (3)$$

ตารางที่ 4.2 ระยะทางระหว่างสถานีอัดประจุและจุดตรวจวัด

จุดวัด	ระยะทางจริงจากจุดวัด			ระยะทางทดสอบจากจุดวัด			ค่าเบี่ยงเบน (เมตร)
	ไปยังสถานีอัดประจุ (เมตร)			ไปยังสถานีอัดประจุ (เมตร)			
	สถานี ก	สถานี ข	สถานี ค	สถานี ก	สถานี ข	สถานี ค	
1	678.0	543.8	650.9	678.3	543.9	651.1	0.28
2	416.9	776.6	690.4	417.1	776.9	690.6	0.23
3	336.3	1308.0	331.2	336.4	1308.5	331.3	0.54
4	991.1	735.8	630.4	991.4	736.1	630.6	0.35
5	1350.0	256.5	1237.0	1350.8	256.6	1237.1	0.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 การวิจารณ์หรืออภิปรายผล (DISCUSSION)

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้โดยเน้นการออกแบบล้อสายพานที่ทำให้รถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับสามารถใช้งานได้ทั้งรูปแบบรถเข็นแบบธรรมดาและการปีนพื้นต่างระดับในราคาที่ต่ำกว่ารถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับเชิงพาณิชย์ทั่วไป การทดสอบมุ่งเน้นไปที่การพิจารณาตัวแปรที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน เพื่อรองรับการออกแบบและลดอันตรายของผู้ใช้ ล้อสายพานที่พัฒนาแล้วสามารถถอดประกอบได้ง่ายตามความต้องการของผู้ใช้ ซึ่งจะช่วยอำนวยความสะดวกในการกระจายการใช้งานล้อสายพานนี้ เนื่องจากผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องซื้อรถเข็นใหม่ แต่ซื้ออุปกรณ์เสริมที่มีราคาถูกกว่า

เมื่อเปรียบเทียบรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้กับรถเข็นรุ่นอื่น ๆ ตามตารางที่ 5.1 เช่น รถเข็นไฟฟ้า (Electric Wheelchair: EW) รถเข็นไฟฟ้าปีนบันได (Stair Climbing Electric Wheelchair: SCEW) และอุปกรณ์ปีนบันไดแบบถอดได้ (Removable Stair Climbing Device) พบว่ารถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้มีราคาต่ำ น้ำหนักเบา และมีขนาดเล็ก สามารถติดตั้งกับรถเข็นไฟฟ้าทั่วไปเพื่อพัฒนาฟังก์ชันการปีนพื้นต่างระดับ ฟังก์ชันนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเดินทางของผู้สูงอายุและผู้พิการได้อย่างมากโดยเฉพาะในประเทศไทย

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบระหว่างรถเข็นไฟฟ้าที่นำเสนอกับรถเข็นไฟฟ้าอื่น



ชนิด	Removable Pavement Edge Climbing Electric Wheelchair (RPCEW)	Electric Wheelchair (EW)
ราคา	65,300 บาท (รวมรถเข็นไฟฟ้า)	28,400 บาท
น้ำหนัก	90 กิโลกรัม (รวมรถเข็นไฟฟ้า)	45 กิโลกรัม
ขนาด	91 x 120 x 67 เซ็นติเมตร	91 x 108 x 67 เซ็นติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชนิด	Stair Climbing Electric Wheelchair (SCEW)	Removable Stair Climbing Device
ราคา	697,000 บาท	195,400 บาท (รวมรถเข็นไฟฟ้า)
น้ำหนัก	115 กิโลกรัม	85 กิโลกรัม (รวมรถเข็นไฟฟ้า)
ขนาด	79 x 140 x 65 เซ็นติเมตร	97 x 138 x 97 เซ็นติเมตร

อย่างไรก็ตาม รถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้นี้อยู่ในขั้นตอนการพัฒนาต้นแบบให้สามารถใช้งานได้กับความต้องการของผู้สูงอายุและผู้พิการ ระบบปฏิบัติการจะเป็นระบบเซ็นเซอร์ไร้สายและระบบควบคุมการขับเคลื่อนผ่านสัญญาณ 4G และ 5G เพื่อรองรับการใช้งานในอนาคต

## 5.2 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ (CONCLUSION AND SUGGESTION)

การศึกษานี้ศึกษาการออกแบบรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ ซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างรถเข็นไฟฟ้าเชิงพาณิชย์และล้อสายพานแบบถอดประกอบได้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (SolidWorks) ถูกใช้ในการออกแบบและจำลองการทำงานของรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับเพื่อวิเคราะห์แบบสถิตและแบบพลวัต ซึ่งจะนำไปสู่การสร้างชุดต้นแบบรถเข็นไฟฟ้าปีนพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการ

ในการวิเคราะห์แบบสถิต โครงสร้างล้อสายพานได้รับการวิเคราะห์ในแง่ของความเค้น ความเครียด และการยุบตัว เพื่อป้องกันการเปลี่ยนรูปและลดความน่าจะเป็นที่จะเกิดอุบัติเหตุ เฟรมนี้ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 เป็นวัสดุและสามารถรับน้ำหนักรวมได้ 2,000 นิวตัน ความเค้นและความเครียดสูงสุดอยู่ที่ท่อที่เชื่อมต่อกับตัวขับเคลื่อน ซึ่งจากการทดสอบมีค่าไม่เกินกำลังครากของวัสดุ ( $5.515 \times 10^7$  นิวตันต่อตารางเมตร) ดังนั้นโครงล้อสายพานนี้จะไม่เสียรูปขณะใช้งาน การยุบตัวของโครงล้อสายพานมีค่าน้อยกว่า 0.05 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่ายังยอมรับได้และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อการใช้งาน ดังนั้นโครงสร้างที่ออกแบบจึงแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งานจริงและมีน้ำหนักเบา

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงมุมที่นั่ง น้ำหนักบรรทุก ความเร็วของมอเตอร์ และความสูงของพื้นต่างระดับ ต่อ กำลังและแรงบิดของมอเตอร์ขับเคลื่อน ความเร็วใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ มุมของล้อสายพาน และแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ พารามิเตอร์ทางกลและไฟฟ้าถูกบันทึกในโปรแกรมและได้รับการพิจารณาเพื่อกำหนดความเหมาะสมของขั้นตอนการปั่นพื้นต่างระดับ เห็นได้ชัดว่าการเปลี่ยนมุมที่ส่งผลต่อมุมฐานล้อสายพานและแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ อย่างไรก็ตาม ต้องกำหนดมุมที่นิ่งที่เหมาะสมตามความสูงของพื้นต่างระดับ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกส่งผลกระทบต่อตรงต่อกำลังและแรงบิดของมอเตอร์ รวมถึงแรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับ เนื่องจากมอเตอร์ต้องมีแรงเพียงพอในการยกน้ำหนักของรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับและผู้ใช้ อย่างไรก็ตาม มันส่งผลกระทบน้อยต่อเวลาการทำงาน ความเร็วในการเคลื่อนที่ และมุมฐานล้อสายพาน ส่วนการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ส่งผลโดยตรงต่อเวลาการทำงานและกำลังของมอเตอร์ อย่างไรก็ตาม มันมีผลเพียงเล็กน้อยต่อแรงบิดของมอเตอร์และมุมฐานล้อสายพาน สุดท้าย ความสูงของพื้นต่างระดับที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มเวลาการทำงานและมุมฐานล้อสายพานด้วย

มอเตอร์และตัวขับเคลื่อนที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนล้อสายพานที่ถูกออกแบบควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- กำลังของมอเตอร์สูงสุดเกิดขึ้นเมื่อรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับโดยมีน้ำหนักบรรทุก 2,000 นิวตัน ซึ่งมีกำลังมอเตอร์ที่ 295.35 วัตต์ ดังนั้น กำลังมอเตอร์ขั้นต่ำควรเป็น 350 วัตต์
- แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์เกิดขึ้นเมื่อรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับโดยมีน้ำหนักบรรทุก 2,000 นิวตัน ซึ่งมีแรงบิดมอเตอร์ที่ 50.36 นิวตันเมตร แต่รัศมีของเพลาลำดับคือ 47 มิลลิเมตร ในขณะที่รัศมีเพลามอเตอร์ทั่วไปคือ 5 มิลลิเมตร ดังนั้น แรงบิดของมอเตอร์ทั่วไปจึงสามารถคำนวณได้เป็น 5.36 นิวตันเมตร ดังนั้น แรงบิดมอเตอร์ขั้นต่ำที่ควรใช้คือ 7 นิวตันเมตร หรือ 71.38 กิโลกรัมเซ็นติเมตร
- แรงที่ตัวขับเคลื่อนได้รับสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับขณะที่มีน้ำหนักบรรทุก 2,000 นิวตัน ซึ่งมีค่า 4,721.86 นิวตัน ดังนั้น ตัวขับเคลื่อนต้องสามารถทนแรงขั้นต่ำที่สุดคือ 5,000 นิวตัน

จากการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการนี้สามารถปั่นพื้นต่างระดับที่ความสูง 20 เซ็นติเมตร ด้วยความเร็วไม่เกิน 1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และมีน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 2,000 นิวตัน

สำหรับระบบเซ็นเซอร์ ระบบตรวจสอบสถานะรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับและระบบตรวจจับคุณภาพอากาศได้รับการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูแลผู้สูงอายุ ระบบเซ็นเซอร์รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ และส่งข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์คลาวด์ เพื่อสร้างฐานข้อมูลขนาดใหญ่สำหรับบริการด้านสุขภาพผู้สูงอายุ ข้อมูลจะแสดงผ่านแอปพลิเคชันอินเทอร์เน็ตและรวบรวมโดยใช้เซิร์ฟเวอร์ของแอปพลิเคชันต่าง ๆ ได้แก่ แอปพลิเคชัน Blynk แอปพลิเคชัน LINE Notify และแอปพลิเคชัน Google Cloud สถานะรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับ ค่าคุณภาพอากาศ และการประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจะแสดงในหน้าจอแสดงผลของแอปพลิเคชัน Blynk แบบเรียลไทม์ผ่านโทรศัพท์มือถือของผู้สูงอายุ ผู้ดูแล และครอบครัวผู้สูงอายุ มีการสร้างการแจ้งเตือนสำหรับเหตุฉุกเฉิน ตำแหน่งรถเข็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับและผู้สูงอายุ รวมถึงค่าคุณภาพอากาศจะถูกบันทึกไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในฐานะข้อมูลในเซิร์ฟเวอร์ Google Cloud เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพอากาศในพื้นที่ คาดการณ์คุณภาพอากาศ และประเมินดัชนีคุณภาพอากาศ เพื่อแสดงให้เห็นว่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับกิจกรรมกลางแจ้ง อย่างไรก็ตามในแต่ละวันหรือแต่ละพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอากาศที่ต่างกัน ดังนั้นการประเมินความเสี่ยงด้านคุณภาพอากาศโดยใช้ระบบเซ็นเซอร์นี้จึงเป็นตัวเลือกที่ดีและมีประโยชน์มาก สุดท้ายระบบค้นหาสถานีชาร์จที่ใกล้ที่สุดเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้มากเมื่อแบตเตอรี่เหลือน้อย และช่วยจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ผู้ใช้สามารถค้นหาสถานีชาร์จที่ใกล้ที่สุดได้จากจอแสดงผลของแอปพลิเคชัน Blynk และประเมินความสามารถในการไปที่สถานีชาร์จที่ใกล้ได้ด้วยตนเอง

รถเซ็นไฟฟ้าปั่นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้สำหรับผู้สูงอายุและผู้พิการที่เสถียรสามารถพัฒนาได้ในการวิจัยในอนาคตในแง่ของระบบหลักเลี้ยวหลุมบนถนนอย่างอิสระ การเรียนรู้ของเครื่องจะถูกนำมาใช้เพื่อหลีกเลี่ยงอุปสรรคและตีความข้อมูลจากอินเทอร์เน็ตผู้ใช้เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นขณะเดินทาง นอกจากนี้ จะพัฒนาระบบคำนวณระยะห่างและค้นหาเส้นทางไปยังสถานีชาร์จ เพื่อกำหนดเส้นทางการเดินทางไปยังสถานีชาร์จที่ดีที่สุด

## บรรณานุกรมหรือเอกสารอ้างอิง

- [1] Yi An, Tianqi Han, Hongyu Zhao, and Sen Qiu. 2021. "Simulation analysis on motion stability of smart wheelchair." **Journal of Physics: Conference Series**. 1873 : 1-7.
- [2] S. Andrea Sundaram, Hongwu Wang, Dan Ding, and Rory A. Cooper. 2017. "Step-Climbing Power Wheelchairs: A Literature Review." **Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation**. 23(2) : 98–109.
- [3] Babar Omkar, Godse Dhananjay, Kadate Suraj, Zalte Harshal, and Patil Rahul. 2019. "A Review on Design and Manufacturing of Manually Operated Stair Climbing Mechanism." **International Journal of Research in Engineering, Science and Management**. 2(12) : 137-141.
- [4] Tao Weijun, Xu Junyi, and Liu Tao. 2017. "Electric-powered wheelchair with stair-climbing ability." **International Journal of Advanced Robotic Systems**. 14(4).
- [5] Pavel Svitok, Zuzana Husková, Lenka Červenková, Soňa Kikerlová, Zdenka Vaňourková, Lenka Sedláková, Šárka Vacková, Hana Šutovska, Michal Zeman, and Libor Kopkan. 2018. "The exaggerated salt-sensitive response in hypertensive transgenic rats (TGR mRen-2) fostered by a normotensive female." **Hypertension Research**. 42 : 459–468.
- [6] Lee Jongseok, Wonhyeong Jeong, Jaeoh Han, Taesu Kim, and Sehoon Oh. 2021. "Barrier-Free Wheelchair with a Mechanical Transmission." **Applied Sciences**. 11(11).
- [7] A. A. Jorge, L. A. M. Riascos, and P. E. Miyagi. 2021. "Modelling and control strategies for a motorized wheelchair with hybrid locomotion systems." **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. 43(1) : 1-15.
- [8] Hern Antono, Lutfi Maula Robbi, Endah Suryawati Ningrum, and Didik Setyo Purnomo. 2017. "Design, stress analysis and determination of center of gravity on stair climber wheelchair." **International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA)**. 2017 : 118-122.
- [9] Giuseppe Quaglia, Walter Franco, and Riccardo Oderio. 2011. "Wheelchair.q, a motorized wheelchair with stair climbing ability." **Mechanism and Machine Theory**. 46(11) : 1601-1609.

- [10] Kasi V Rao Pothamsetty. 2018. "Design of Stair-Climbing Wheelchair Using Tri-Wheel Mechanism." **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)**. 8(4) : 717-726.
- [11] B. G. Sivakumar and K. Sudhagar. 2018. "An independent situating and navigation system for stair climbing robotic wheelchair." **Swansea Printing Technology Ltd, Taga Journal**. 14 : 2771- 2784.
- [12] Prajapat Manish, Sikchi Vishwajeet, Shaikh-Mohammed Javeed, and S. Sujatha. 2020. "Proof-of-concept of a stair-climbing add-on device for wheelchairs." **Medical Engineering & Physics**. 85 : 75-86.
- [13] Mani Kota Rajasekhar Tumula and M Sugadev. 2018. "Arduino Controlled Special Stair Climbing Wheelchair Bot," **Indian Journal of Pure and Applied Mathematics**. 118(24) : 1-12.
- [14] Alex Anchivilca Baltazar, Manuel Humberto Luque Casanave, Emerzon Reyes Reyes, and Alan Andrés Pesantes Marcos. 2020. "Development of an Electric Wheelchair Designed to Climb Steps and to be Controlled by the Body Movement." **International Journal of Applied Biomedical Engineering**. 13(1) : 23-30.
- [15] K. Sasaki and K. Suzuki. 2018. "Active Rotary-Legs Mechanism for Stair-Climbing Mobility Vehicle." in **IEEE Robotics and Automation Letters**. 3(3) : 2237-2244.
- [16] Chang-Hyuk Lee, Kyung-min Lee, Jehong Yoo, In-su Kim, and Young-bong Bang. 2016. "A compact stair-climbing wheelchair with two 3-DOF legs and a 1-DOF base." **Industrial Robot**. 43(2) : 181-192.
- [17] Yusuke Sugahara, Naoaki Yonezawa, and Kazuhiro Kosuge. 2010. "A novel stair-climbing wheelchair with transformable wheeled four-bar linkages." **2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan**. 3333-3339.
- [18] P. K. Behera and A. Gupta. 2018. "Novel design of stair climbing wheelchair." **Journal of Mechanical Science and Technology**. 32(10) : 4903-4908.
- [19] Michael Hinderer, Petra Friedrich, and Bernhard Wolf. 2017. "An autonomous stair-climbing wheelchair." **Robotics and Autonomous Systems**. 94 : 219-225.

- [20] Yoshikazu Mori, Kaoru Katsumura, and Katsuya Nagase. 2017. “A pair of step-climbing units for a manual wheelchair user: Passing over several steps using a pair of portable slopes.” **Advances in Mechanical Engineering**. 9(3).
- [21] Pham Quoc Thai, Van Cong Tai, and Le Minh Tien. 2020. “Design and Implementation of an Electric Wheelchair Operating in Different Terrains.” **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**. 9(6) : 797-802.
- [22] Meng Ning, Ke Yu, Chuanzhong Zhang, Zhi Wu, and Yanquan Wang. 2021. “Wheelchair design with variable posture adjustment and obstacle-overcoming ability.” **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. 43(197).
- [23] Jose Abel Chocoteco, Rafael Morales, and Vicente Feliu-Batlle. 2017. “Enhancing the Trajectory Generation of a Stair-Climbing Mobility System.” **Sensors**. 17(11).
- [24] Nor Maniha Ghani and Mohammad Osman Tokhi. 2013. “A Dwi-Phase Fuzzy Control Structure for an Auto-mode Stair Climbing Wheelchair.” **2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, UK**. 4694-4699.
- [25] Giuseppe Quaglia and Matteo Nisi. 2017. “Design of a self-leveling cam mechanism for a stair climbing wheelchair.” **Mechanism and Machine Theory**. 112 : 84-104.
- [26] Giuseppe Quaglia, Matteo Nisi, Walter Franco, and Luca Bruzzone. 2017. “Dynamic Simulation of an Electric Stair-Climbing Wheelchair.” **International Journal of Automation Technology**. 11(3) : 472-480.
- [27] Hidetoshi Ikeda, Takafumi Toyama, Daisuke Maki, Keisuke Sato, and Eiji Nakano. 2021. “Cooperative step-climbing strategy using an autonomous wheelchair and a robot.” **Robotics and Autonomous Systems**. 135.
- [28] Yatin S, Srivatsa Nadiger, Siddarth S Motagi, Manoj Kumar M. M., T. Madhusudhan. 2019. “Stair Climbing Wheelchair.” **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**. 8(8).
- [29] Shuro Nakajima. 2020. “Stair-climbing gait for a four-wheeled vehicle.” **Robomech Journal**. 7(20) : 1-8.
- [30] Tao Weijun, Jia Yongxiang, Liu Tao, Yi Jingang, Wang Hesheng, and Inoue Yoshio. 2016. “A novel wheel-track hybrid electric powered wheelchair for stairs climbing.” **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing**. 10(4).

- [31] Natthanon Phannil and Chaiyan Jattanasen. 2021. “Design of a Personal Mobility Device for Elderly Users.” *Journal of Healthcare Engineering*. 2021.
- [32] Zhichen Li, Hao Zhang, Huaicheng Yan, Hak-Keung Lam, and Congzhi Huang. 2021. “Aperiodic Sampled-Data Takagi-Sugeno Fuzzy Extended State Observer for A Class of Uncertain Nonlinear Systems with External Disturbance and Unmodeled Dynamics.” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Early Access*. 1-12.
- [33] Zhichen Li, Huaicheng Yan, Hao Zhang, Hak-Keung Lam, and Meng Wang. 2021. “Aperiodic Sampled-Data-Based Control for Interval Type-2 Fuzzy Systems via Refined Adaptive Event-Triggered Communication Scheme.” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 29(2) : 310-321.
- [34] Zhichen Li, Huaicheng Yan, Hao Zhang, Xisheng Zhan, and Congzhi Huang. 2019. “Improved inequality-based functions approach for stability analysis of time delay system.” *Automatica*. 108.
- [35] Zhichen Li, Huaicheng Yan, Hao Zhang, Yan Peng, Ju Park, and Yong He. 2019. “Stability analysis of linear systems with time-varying delay via intermediate polynomial-based functions.” *Automatica*. 113.
- [36] Ewa Rudnicka, Paulina Napierała, Agnieszka Podfigurna, Błażej Męczekalski, Roman Smolarczyk and Monika Grymowicz. 2020. “The World Health Organization (WHO) approach to healthy ageing.” *Maturitas*. 139 : 6-11.
- [37] J. Woo, R. Yu, K. Cheung, et al., 2020. “How Much Money Is Enough? Poverty and Health in Older People.” *J Nutr Health Aging*. 2020.
- [38] J. Pertanika. 2020. “Wellbeing of Older People in Iran: An Application of the Global AgeWatch Index.” *Social Sciences & Humanities*. 28(1) : 409–424.
- [39] J. Dikken, R.F. van den Hoven, W.H. van Staalduinen, L.M. Hulsebosch-Janssen and J. van Hoof. 2020. “How Older People Experience the Age-Friendliness of Their City: Development of the Age-Friendly Cities and Communities Questionnaire.” *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 17.
- [40] Chris Phillipson and Tine Buffel. 2020. “Developing Age-friendly Cities: Policy Opportunities and Challenges.” *Journal of Elder Policy*. 1(1) : 137-154.

- [41] Francesca Pilo and Rivke Jaffe. 2020. “Introduction: The Political Materiality of Cities.” **City & Society**. 32(1) : 8-22.
- [42] M. Eisenbarth et al., 2020. “Toward Smart Vehicle-to-Everything Connected Powertrains: Driving real component test benches in a fully interactive virtual smart city.” in **IEEE Vehicular Technology Magazine**. 2020.
- [43] Julia Richter, Jeanine Lorenz, Maria Costantino et al., 2020. “Dynamic indoor navigation and orientation system for people with impairments.” In **Proceedings of the Conference on Mensch und Computer (MuC '20)**. 473–477.
- [44] Sooyeon Lee, Madison Reddie, Chun-Hua Tsai et al., 2020. “The Emerging Professional Practice of Remote Sighted Assistance for People with Visual Impairments,” In **Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20)**. 1–12.
- [45] Huang J, Kinateder M, Dunn MJ, Jarosz W, Yang X-D and Cooper EA. 2019. “An augmented reality sign-reading assistant for users with reduced vision” **PLoS ONE**. 14(1).
- [46] S. SHIRAI and Y. TAKAHASHI. 2018. “Personal Mobility Vehicle User’s Psychological Reaction to Surrounding People” **2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Daegwallyeong**. 1730-1735.
- [47] Corey D. Harper, Chris T. Hendrickson, Sonia Mangones and Constantine Samaras. 2016. “Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions.” **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. 72 : 1-9.
- [48] N. Maehara, M. Shavandi and Y. Takahashi. 2017. “Concept design of personal mobility vehicle,” **2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Jeju**. 1525-1530.
- [49] R.C.P. Wong, W.Y. Szeto, Linchuan Yang, Y.C. Li and S.C. Wong. 2018. “Public transport policy measures for improving elderly mobility.” **Transport Policy**. 63 : 73-79.
- [50] Varatchaya Sirivat. 2019. “A New Era of Thai Public Sector toward ASEAN Community : A Comparative Study between the Ministry of Labour and the Ministry of Social Development and Human Security.” **2019 Kasem Bundit Journal**. 20.

- [51] A. Tsoukanelis, E. Genitsaris, D. Nalmpantis and A. Naniopoulos. 2019. “Conjoint Analysis for the Optimization of a Potential Flexible Transport Service (FTS) in the Region of Zagori, Greece.” In: **E. Nathanail, I. Karakikes (eds) Data Analytics: Paving the Way to Sustainable Urban Mobility. CSUM 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham. 879.**
- [52] Georgia Papadima, Evangelos Genitsaris, Ioannis Karagiotas, Aristotelis Naniopoulos, Dimitrios Nalmpantis. 2020. “Investigation of acceptance of driverless buses in the city of Trikala and optimization of the service using Conjoint Analysis.” **Utilities Policy. 62.**
- [53] T.H. Tran, T.T. Nguyen, Z.M. Yuldashev, E.V. Sadykova and M.T. Nguyen. 2019. “The Method of Smart Monitoring and Detection of Sleep Apnea of the Patient out of the Medical Institution.” **Procedia Computer Science. 150 : 397-402.**
- [54] Buthelezi Bongisizwe, Mphahlele Maredi, Duplessis Deon, Maswikaneng Solly and Mathonsi Topside. 2019. “ZigBee Healthcare Monitoring System for Ambient Assisted Living Environments,” **International Journal of Communication Networks and Information Security. 11 : 85 – 92.**
- [55] Wang Zhipeng, Wang Fuhao, Liu Hao, Qian Zhiqin and Bi Zhuming. 2019. “Design of Human Health Monitoring System Based on NB-IoT.” **2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). 6-9.**
- [56] J. Yang et al., 2019. “Assistive and Monitoring Multifunctional Smart Crutch for Elderly,” **2019 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCCom/CyberSciTech), Fukuoka, Japan. 397-401.**
- [57] Cui Jining, Song Peipei, Li Wenyu, Han Shun, Li Liang, Liu, Zhenqiang, Soo Yew, Zhu Chi and Duan Feng. 2016. “Design of a health care platform for the elderly.” **2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 661-666.**
- [58] J. Kulsiruangyos, V. Rattanawutikul, P. Sangsartra and D. Wongsawang. 2016. “Home Security System for Alone Elderly People,” **2016 Fifth ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC), Nakhon Pathom. 65-68.**

- [59] Corno Fulvio, Montanaro Teodoro, Migliore Carmelo and Castrogiovanni Pino. 2017. “SmartBike: an IoT Crowd Sensing Platform for Monitoring City Air Pollution.” **International Journal of Electrical and Computer Engineering**. 7.
- [60] G. B. Fioccola, R. Sommesse, I. Tufano, R. Canonico and G. Ventre. 2016. “Polluino: An efficient cloud-based management of IoT devices for air quality monitoring.” **2016 IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)**, Bologna. 1-6.
- [61] Somansh Kumar and Ashish Jasuja. 2017. “Urban Climate Monitoring System Based on IoT using Arduino Uno.” **Advances in Computer Science and Information Technology (ACSIT)**. 4 : 118-121.
- [62] Ashwini Doni, Chidananda Murthy.M.V and Dr MZ Kurian. 2018. “Survey on Multi Sensor Based Air and Water Quality Monitoring Using IoT.” **Indian J.Sci.Res.** 17(2) : 147-153.
- [63] Kennedy Okokpujie, Etinosa Noma-Osaghae, Odusami Modupe, Samuel John and Oluga Oluwatosin. 2018. “A SMART AIR POLLUTION MONITORING SYSTEM.” **International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)**. 9(9) : 799–809.
- [64] Mahammad D.V. 2019. “Design and Implementation of IoT based Portable Outdoor Dust Density Monitoring System.” **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**. 6(12).
- [65] R. Firdaus, M. A. Murti and I. Alinursafa. 2019. “Air Quality Monitoring System Based Internet of Things (IoT) Using LPWAN LoRa.” **2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoTaIS)**, BALI, Indonesia. 195-200.
- [66] V. Choudhary, J. H. Teh, V. Beltran and H. B. Lim. 2020. “AirQ: A Smart IoT Platform for Air Quality Monitoring.” **2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)**, Las Vegas, NV, USA. 1-2.
- [67] Nurul Azma Zakaria, Zaheera Zainal Abidin and Norharyati Harum. 2018. “Wireless Internet of Things-based Air Quality Device for Smart Pollution Monitoring.” **International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)**. 9(11).
- [68] George Komandi. 1999. “An evaluation of the concept of rolling resistance.” **Journal of Terramechanics**. 36(3) : 159-166.

- [69] G. Descornet, W. Meyer and J. Reichert. 1990. "Road-Surface Influence on Tire Rolling Resistance." In **STP1031-EB Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies**, West Conshohocken, PA: ASTM International. 401-415.
- [70] Kilavo Hassan, Anael Sam and Dina Machuve. 2013. "Algorithm to Identify Location of Incidents in Public Buses and Respective Nearest Authority Using Spherical Cosine Rule." **International Journal of Technology Enhancements and Emerging Engineering Research**. 1(2).
- [71] Viney P Aneja, A Agarwal, Paul A Roelle et al., 2001. "Measurements and analysis of criteria pollutants in New Delhi, India." **Environment International**. 27(1) : 35-42.
- [72] Marwa Zaatar, Atila Novoselac and Jeffrey Siegel. 2016. "Impact of ventilation and filtration strategies on energy consumption and exposures in retail stores." **Building and Environment**. 100 : 186-196.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. ระบบควบคุมตัวขับเคลื่อนของล้อรองรับ

```

#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <Wire.h>
#include <ArduinoJson.h>
const char* ssid = "PWFaun24";
const char* password = "PWFaun24";
/* this is the IP of PC/raspberry where you installed MQTT Server
on Wins use "ipconfig"
on Linux use "ifconfig" to get its IP address */
const char* mqtt_server = "192.168.0.130";
const char* serverHostname = "192.168.0.130";
const String serverUsername = "admin";
const String serverPassword = "admin";
#define ONBOARD_LED 2;
int now = 0;
int mqttRetryAttempt = 0;
int wifiRetryAttempt = 0;
const char led = ONBOARD_LED;
int k=20;
int Direct=0;
#define AcWheel_TOPIC "/AcWheel"
long lastMsg = 0;
char msg[20];
/* create an instance of PubSubClient client */
WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void receivedCallback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
  Serial.print("Message received: ");
  Serial.println(topic);
  Serial.print("payload: ");
  for (int i = 0; i < length; i++) {
    Serial.print((char)payload[i]);
    if ((char)payload[i] == 'U'){
      Direct = 1;
    } else if ((char)payload[i] == 'D'){
      Direct = 2;
    } else {
      Direct = 0;
    }
  }
  Serial.println();
}

void mqttconnect() {
  /* Loop until reconnected */
  while (!client.connected()) {
    Serial.print("MQTT connecting ...");
    /* client ID */
    String clientId = "ESP32Client";
    /* connect now */
    if (client.connect(clientId.c_str(), serverUsername.c_str(), serverPassword.c_str())) {
      Serial.println("connected");
      /* subscribe topic with default QoS 0*/
      client.subscribe(AcWheel_TOPIC);
    } else {
      Serial.print("failed, status code =");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Serial.print(client.state());
Serial.println("try again in 5 seconds");
/* Wait 5 seconds before retrying */
delay(500);
mqttRetryAttempt++;
if (mqttRetryAttempt > 5) {
Serial.println("Restarting!");
ESP.restart();
}
}
}
}

void interuptReboot() {
Serial.println("Rebooting");
//esp_restart();
ESP.restart();
}

void setup()
{
Serial.begin(115200);
// We start by connecting to a WiFi network
Serial.println();
Serial.print("Connecting to ");
Serial.println(ssid);
WiFi.begin(ssid, password);
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
delay(500);
Serial.print(".");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

wifiRetryAttempt++;
if (wifiRetryAttempt > 5) {
  Serial.println("Restarting!");
  interuptReboot();
}
}
Serial.println("");
Serial.println("WiFi connected");
Serial.println("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
pinMode(2, OUTPUT);
pinMode(13, OUTPUT);
pinMode(12, OUTPUT);
pinMode(14, OUTPUT);
pinMode(27, OUTPUT);
/* configure the MQTT server with IPaddress and port */
client.setServer(mqtt_server, 1881);
/* this receivedCallback function will be invoked
when client received subscribed topic */
client.setCallback(receivedCallback);
/*start SHT31 */
delay(500);
}

void loop(){
  /* if client was disconnected then try to reconnect again */
  if (!client.connected()) {
    mqttconnect();
  }
  /* this function will listen for incomming

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

subscribed topic-process-invoke receivedCallback */
client.loop();
/* we increase counter every 3 secs
we count until 3 secs reached to avoid blocking program if using delay()*/
float AcWheel;
client.subscribe("/AcWheel", AcWheel);
if (Direct == 1) {
    for (int i=0; i<k; i++) {
        digitalWrite(12, HIGH);
        digitalWrite(13, HIGH);
        digitalWrite(14, HIGH);
        digitalWrite(27, LOW);
        delayMicroseconds(150); // Approximately 20% duty cycle @ 1KHz
        digitalWrite(14, LOW);
        digitalWrite(27, LOW);
        delayMicroseconds(350);
    }
} else if (Direct == 2) {
    for (int j=0; j<k; j++) {
        digitalWrite(12, HIGH);
        digitalWrite(13, HIGH);
        digitalWrite(14, LOW);
        digitalWrite(27, HIGH);
        delayMicroseconds(150); // Approximately 20% duty cycle @ 1KHz
        digitalWrite(14, LOW);
        digitalWrite(27, LOW);
        delayMicroseconds(350);
    }
} else {
    for (int n=0; n<k; n++) {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    digitalWrite(12, LOW);
    digitalWrite(13, LOW);
    digitalWrite(14, HIGH);
    digitalWrite(27, HIGH);
    delayMicroseconds(150); // Approximately 20% duty cycle @ 1KHz
    digitalWrite(14, LOW);
    digitalWrite(27, LOW);
    delayMicroseconds(350);
  }
}
//delay (500);
}

```

## 2. ระบบควบคุมตัวขับเคลื่อนของมอเตอร์

```

#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <Wire.h>
#include <ArduinoJson.h>
const char* ssid = "PWFaun24";
const char* password = "PWFaun24";
/* this is the IP of PC/raspberry where you installed MQTT Server
on Wins use "ipconfig"
on Linux use "ifconfig" to get its IP address */
const char* mqtt_server = "192.168.0.130";
const char* serverHostname = "192.168.0.130";
const String serverUsername = "admin";
const String serverPassword = "admin";
#define ONBOARD_LED 2;
int now = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int mqttRetryAttempt = 0;
int wifiRetryAttempt = 0;
const char led = ONBOARD_LED;
int k=20;
int Direct=0;
#define AcSeat_TOPIC "/AcSeat"
long lastMsg = 0;
char msg[20];
/* create an instance of PubSubClient client */
WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

void receivedCallback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
  Serial.print("Message received: ");
  Serial.println(topic);
  Serial.print("payload: ");
  for (int i = 0; i < length; i++) {
    Serial.print((char)payload[i]);
    if ((char)payload[i]== 'U') {
      Direct = 1;
    } else if ((char)payload[i]== 'D') {
      Direct = 2;
    } else {
      Direct = 0;
    }
  }
  Serial.println();
}

void mqttconnect() {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/* Loop until reconnected */
while (!client.connected()) {
    Serial.print("MQTT connecting ...");
    /* client ID */
    String clientId = "ESP32Client";
    /* connect now */
    if (client.connect(clientId.c_str(), serverUsername.c_str(), serverPassword.c_str())) {
        Serial.println("connected");
        /* subscribe topic with default QoS 0*/
        client.subscribe(AcSeat_TOPIC);
    } else {
        Serial.print("failed, status code =");
        Serial.print(client.state());
        Serial.println("try again in 5 seconds");
        /* Wait 5 seconds before retrying */
        delay(500);
        mqttRetryAttempt++;
        if (mqttRetryAttempt > 5) {
            Serial.println("Restarting!");
            ESP.restart();
        }
    }
}
}

void interruptReboot() {
    Serial.println("Rebooting");
    //esp_restart();
    ESP.restart();
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  // We start by connecting to a WiFi network
  Serial.println();
  Serial.print("Connecting to ");
  Serial.println(ssid);
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
    wifiRetryAttempt++;
    if (wifiRetryAttempt > 5) {
      Serial.println("Restarting!");
      interuptReboot();
    }
  }
  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi connected");
  Serial.println("IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
  pinMode(14, OUTPUT);
  pinMode(27, OUTPUT);
  /* configure the MQTT server with IPAddress and port */
  client.setServer(mqtt_server, 1882);
  /* this receivedCallback function will be invoked
  when client received subscribed topic */
  client.setCallback(receivedCallback);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*start SHT31 */
delay(500);
}

void loop(){
  /* if client was disconnected then try to reconnect again */
  if (!client.connected()) {
    mqttconnect();
  }
  /* this function will listen for incoming
  subscribed topic-process-invoke receivedCallback */
  client.loop();
  /* we increase counter every 3 secs
  we count until 3 secs reached to avoid blocking program if using delay()*/
  float AcSeat;
  client.subscribe("/AcSeat", AcSeat);
  if (Direct == 1) {
    for (int i=0; i<k; i++) {
      digitalWrite(12, HIGH);
      digitalWrite(13, HIGH);
      digitalWrite(14, HIGH);
      digitalWrite(27, LOW);
      delayMicroseconds(150); // Approximately 20% duty cycle @ 1KHz
      digitalWrite(14, LOW);
      digitalWrite(27, LOW);
      delayMicroseconds(350);
    }
  }
  } else if (Direct == 2) {
    for (int j=0; j<k; j++) {
      digitalWrite(12, HIGH);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

digitalWrite(13, HIGH);
digitalWrite(14, LOW);
digitalWrite(27, HIGH);
delayMicroseconds(150); // Approximately 20% duty cycle @ 1KHz
digitalWrite(14, LOW);
digitalWrite(27, LOW);
delayMicroseconds(350);
}
} else {
for (int n=0; n<k; n++) {
digitalWrite(12, LOW);
digitalWrite(13, LOW);
digitalWrite(14, HIGH);
digitalWrite(27, HIGH);
delayMicroseconds(150); // Approximately 20% duty cycle @ 1KHz
digitalWrite(14, LOW);
digitalWrite(27, LOW);
delayMicroseconds(350);
}
}
//delay (500);
}

```

### 3. ระบบควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน

```

#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <Wire.h>
#include <ArduinoJson.h>
const char* ssid = "PWFaun24";

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

const char* password = "PWFaun24";
/* this is the IP of PC/raspberry where you installed MQTT Server
on Wins use "ipconfig"
on Linux use "ifconfig" to get its IP address */
const char* mqtt_server = "192.168.0.130";
const char* serverHostname = "192.168.0.130";
const String serverUsername = "admin";
const String serverPassword = "admin";
#define ONBOARD_LED 2;
int now = 0;
int mqttRetryAttempt = 0;
int wifiRetryAttempt = 0;
const char led = ONBOARD_LED;
int k=20;
int Direct=0;
#define Move_TOPIC "Move"
long lastMsg = 0;
char msg[20];
/* create an instance of PubSubClient client */
WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

void receivedCallback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
    //Serial.print("Message received: ");
    //Serial.println(topic);
    //Serial.print("payload: ");
    for (int i = 0; i < length; i++) {
        //Serial.print((char)payload[i]);
        if ((char)payload[i] == 'U'){
            Direct = 1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    } else if ((char)payload[0]== 'D'){
        Direct = 2;
    } else if ((char)payload[0]== 'L'){
        Direct = 3;
    } else if ((char)payload[0]== 'R'){
        Direct = 4;
    } else {
        Direct = 0;
    }
}
Serial.println();
}

void mqttconnect() {
    /* Loop until reconnected */
    while (!client.connected()) {
        Serial.print("MQTT connecting ...");
        /* client ID */
        String clientId = "ESP32Client";
        /* connect now */
        if (client.connect(clientId.c_str(), serverUsername.c_str(), serverPassword.c_str())) {
            Serial.println("connected");
            /* subscribe topic with default QoS 0*/
            client.subscribe(Move_TOPIC);
        } else {
            Serial.print("failed, status code =");
            Serial.print(client.state());
            Serial.println("try again in 5 seconds");
            /* Wait 5 seconds before retrying */
            delay(500);
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    mqttRetryAttempt++;
    if (mqttRetryAttempt > 5) {
        Serial.println("Restarting!");
        ESP.restart();
    }
}

}

void interuptReboot() {
    Serial.println("Rebooting");
    //esp_restart();
    ESP.restart();
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    // We start by connecting to a WiFi network
    Serial.println();
    Serial.print("Connecting to ");
    Serial.println(ssid);
    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
        wifiRetryAttempt++;
        if (wifiRetryAttempt > 5) {
            Serial.println("Restarting!");
            interuptReboot();
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
Serial.println("");
Serial.println("WiFi connected");
Serial.println("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
pinMode(15, OUTPUT);
pinMode(2, OUTPUT);
pinMode(4, OUTPUT);
pinMode(13, OUTPUT);
pinMode(12, OUTPUT);
pinMode(14, OUTPUT);
pinMode(26, INPUT);
pinMode(25, INPUT);
pinMode(33, INPUT);
pinMode(32, INPUT);
/* configure the MQTT server with IPaddress and port */
client.setServer(mqtt_server, 1883);
/* this receivedCallback function will be invoked
when client received subscribed topic */
client.setCallback(receivedCallback);
/*start SHT31 */
delay(500);
}

void loop() {
  /* if client was disconnected then try to reconnect again */
  if (!client.connected()) {
    mqttconnect();
  }
  /* this function will listen for incoming

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

subscribed topic-process-invoke receivedCallback */
client.loop();
/* we increase counter every 3 secs
we count until 3 secs reached to avoid blocking program if using delay()*/
float Move;
client.subscribe("/Move", Move);
if (Direct == 1) {
    for (int i=0; i<k; i++) {
        digitalWrite(2, HIGH);
        digitalWrite(4, LOW);
        digitalWrite(12, HIGH);
        digitalWrite(14, LOW);
        digitalWrite(15, HIGH);
        digitalWrite(13, HIGH);
        delayMicroseconds(150); // Approximately 20% duty cycle @ 1KHz
        digitalWrite(15, LOW);
        digitalWrite(13, LOW);
        delayMicroseconds(350);
    }
} else if (Direct == 2) {
    for (int j=0; j<k; j++) {
        digitalWrite(2, LOW);
        digitalWrite(4, HIGH);
        digitalWrite(12, LOW);
        digitalWrite(14, HIGH);
        digitalWrite(15, HIGH);
        digitalWrite(13, HIGH);
        delayMicroseconds(150); // Approximately 20% duty cycle @ 1KHz
        digitalWrite(15, LOW);
        digitalWrite(13, LOW);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        delayMicroseconds(350);
    }
} else if (Direct == 3) {
    for (int m=0; m<k; m++) {
        digitalWrite(2, HIGH);
        digitalWrite(4, LOW);
        digitalWrite(12, LOW);
        digitalWrite(14, HIGH);
        digitalWrite(15, HIGH);
        digitalWrite(13, HIGH);
        delayMicroseconds(150); // Approximately 20% duty cycle @ 1KHz
        digitalWrite(15, LOW);
        digitalWrite(13, LOW);
        delayMicroseconds(350);
    }
} else if (Direct == 4) {
    for (int n=0; n<k; n++) {
        digitalWrite(2, LOW);
        digitalWrite(4, HIGH);
        digitalWrite(12, HIGH);
        digitalWrite(14, LOW);
        digitalWrite(15, HIGH);
        digitalWrite(13, HIGH);
        delayMicroseconds(150); // Approximately 20% duty cycle @ 1KHz
        digitalWrite(15, LOW);
        digitalWrite(13, LOW);
        delayMicroseconds(350);
    }
} else {
    for (int n=0; n<k; n++) {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

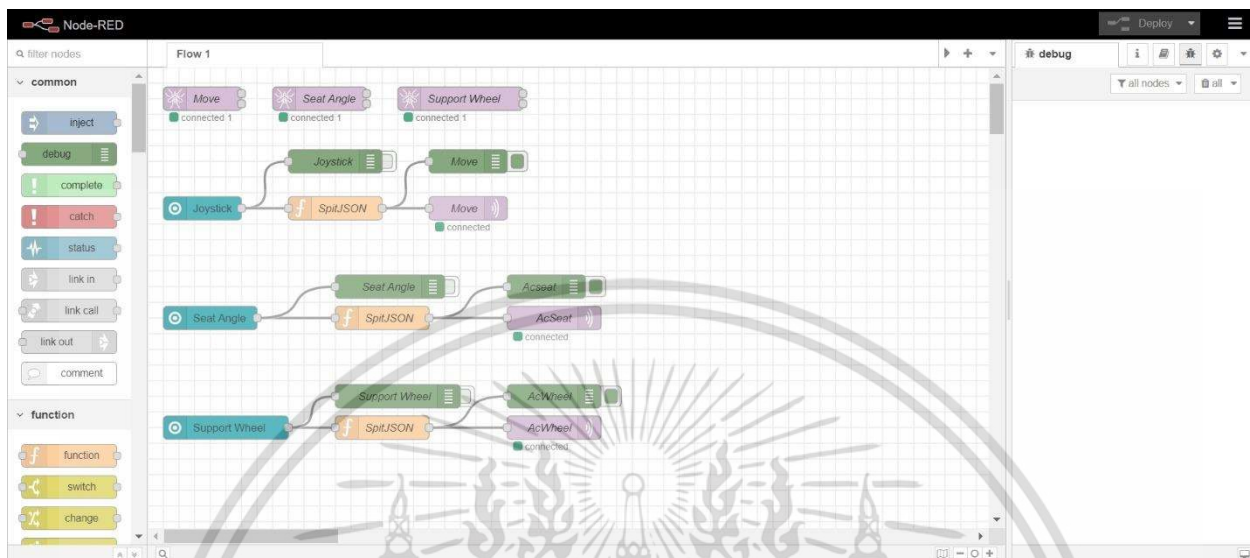
digitalWrite(2, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(12, LOW);
digitalWrite(14, LOW);
digitalWrite(15, HIGH);
digitalWrite(13, HIGH);
delayMicroseconds(150); // Approximately 20% duty cycle @ 1KHz
digitalWrite(15, LOW);
digitalWrite(13, LOW);
delayMicroseconds(350);
}
}
//delay (500);
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ระบบควบคุมคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก



รูปที่ ก.1 โปรแกรมควบคุมการทำงานในคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก



รูปที่ ก.2 แผงจอยควบคุมการทำงานในคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Edit aedes broker node**

Delete Cancel Done

**Properties**

Name: Support Wheel

Connection Security

MQTT port: 1881

WS bind: port

WS port: Enter Websocket port. Leave blank to disable Websocket support

Enable secure (SSL/TLS) connection

DB Uri: mongodb://localhost:27017/mqtt

Enabled

(a) Aedes broker node

**Edit joystick node**

Delete Cancel Done

**Properties**

Name: Support Wheel

Group: [Joystick] Joystick

Size: 3 x 3

Interval: 200 MilliSec

Directions: Only vertical

Shape: Square

Threshold: 0.1

Use the Node-RED theme base color

Move joystick to its center when released

Enabled

(b) Joystick node

**Edit function node**

Delete Cancel Done

**Properties**

Name: SpitJSON

Setup On Start On Message On Stop

```

1 if (msg.payload.direction.angle=="up"){
2   msg.topic = "up";
3   msg.payload = ("U");
4 } else if (msg.payload.direction.angle == "down") {
5   msg.topic = "down";
6   msg.payload = ("D");
7 }
8 return [msg];

```

Enabled

(c) Function node

**Edit mqtt out node**

Delete Cancel Done

**Properties**

Server: localhost:1881

Topic: /AcWheel

QoS: 2 Retain

Name: AcWheel

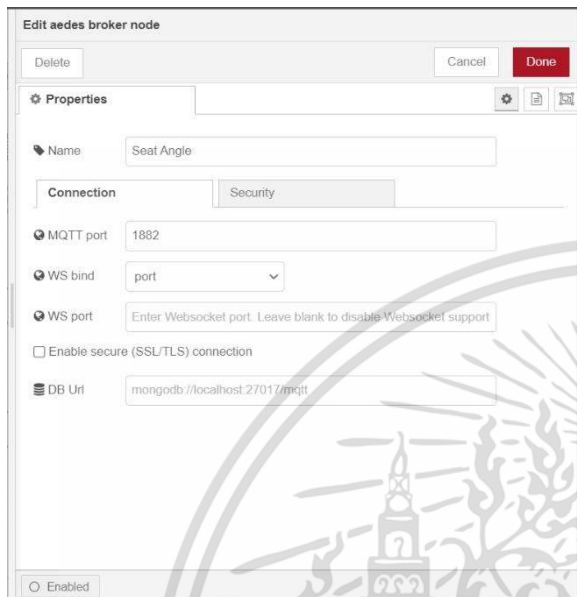
Tip: Leave topic, qos or retain blank if you want to set them via msg properties.

Enabled

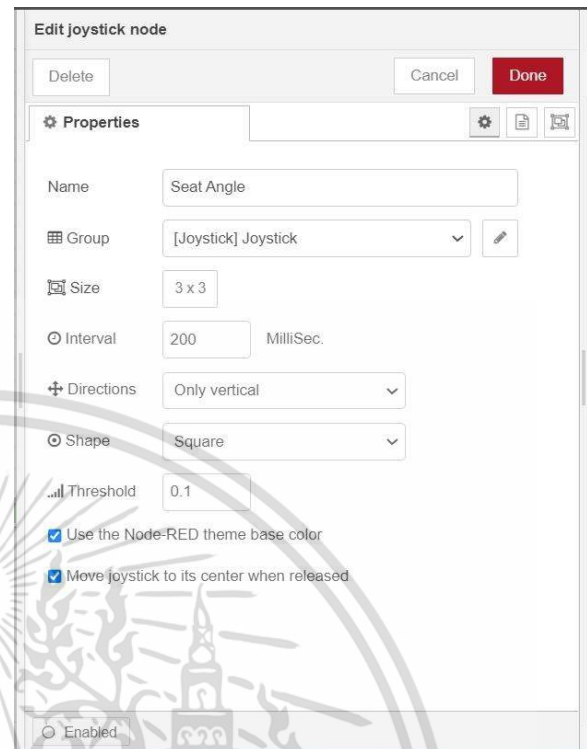
(d) MQTT out node

รูปที่ ก.3 ระบบควบคุมการทำงานของตัวขับเคลื่อนของล้อรองรับในคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Aedes broker node



(b) Joystick node



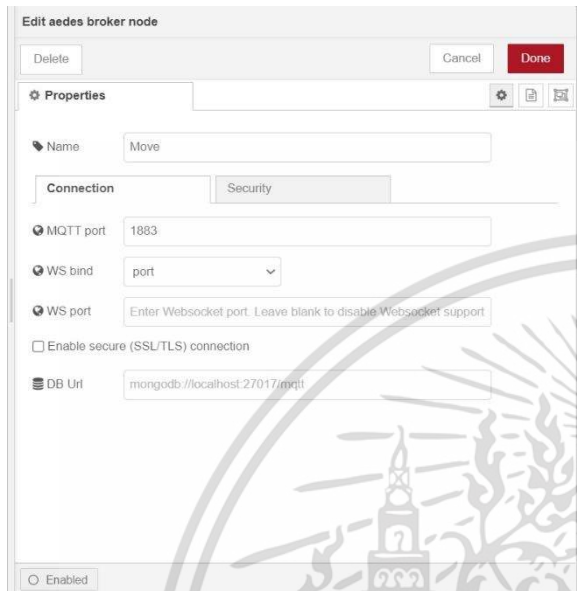
(c) Function node



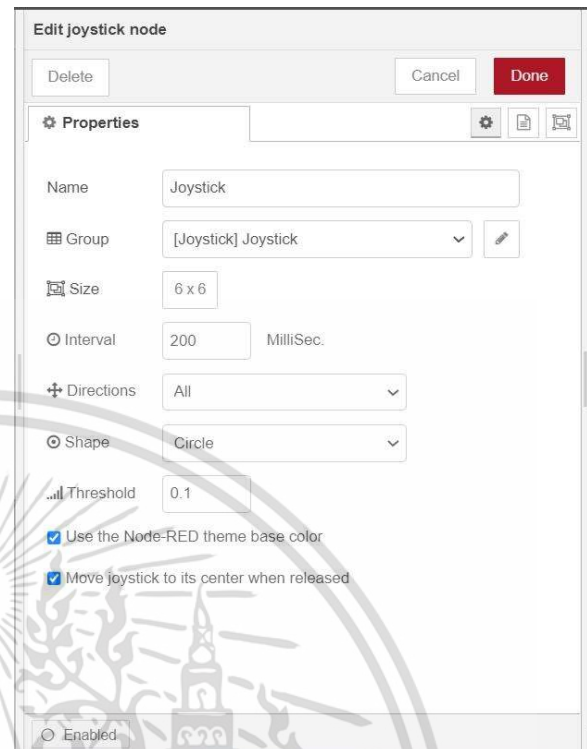
(d) MQTT out node

#### รูปที่ ก.4 ระบบควบคุมการทำงานของตัวขับเคลื่อนเส้นของมูมที่หนึ่งในคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก

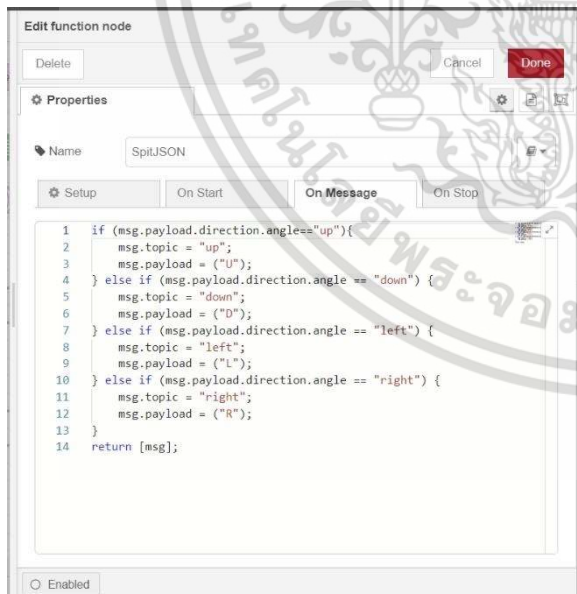
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Aedes broker node



(b) Joystick node



(c) Function node



(d) MQTT out node

### รูปที่ ก.5 ระบบควบคุมการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนในคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. ระบบตรวจสอบสถานะรถเข็นไฟฟ้าเป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้

```

#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <SimpleDHT.h> //โหลดไลบรารี DHT11
##### CONFIGURATION : MODIFY HERE #####
char auth[] = "RkOe7-PkOWFzbGoWNerdKD5xpQv4g-xM";
char ssid[] = "PWFaun24";
char pass[] = " PWFaun24";
#####
int DHTSENSOR = 15; //GPIO15 (ADC2_CH3)
const float Analog_channel_pin = 34;
float VDC_VALUE = 0;
float DCvoltd = 0;
float DCvolt = 0;
WidgetLED led1(V13);
SimpleDHT11 dht11; //ระบุรุ่นเซ็นเซอร์รุ่น DHT11
BlynkTimer timer;

void sendSensor() {
  // Batt voltage status from volttagge divider 25 V
  VDC_VALUE = analogRead(Analog_channel_pin);
  DCvoltd = ((VDC_VALUE*19.963125)/4095);
  DCvolt = (DCvoltd*12.5641);
  Serial.println(VDC_VALUE);
  Serial.println(DCvoltd);
  Serial.print("Battery voltage = ");
  Serial.println(DCvolt);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (DCvolt > 40) {
    Serial.println("EV status turn on ");
    led1.on();
} else {
    Serial.println("EV status turn off ");
    led1.off();
}

// Batt temerature and huminity status
byte temperature = 0; //กำหนดตัวแปรเก็บค่าอุณหภูมิ
byte humidity = 0; //กำหนดตัวแปรเก็บค่าความชื้นสัมพัทธ์
dht11.read(DHTSENSOR, &temperature, &humidity, NULL); //อ่านค่าจากเซ็นเซอร์
while (temperature == 0) {
    dht11.read(DHTSENSOR, &temperature, &humidity, NULL); //อ่านค่าจากเซ็นเซอร์
    Serial.println("DHT11 get failed");
}
Blynk.virtualWrite(V21, humidity); //ส่งค่า humidity V1 ไปยัง blynk server
Blynk.virtualWrite(V22, temperature); //ส่งค่า humitemperature V2 ไปยัง blynk server
Serial.print("Humidity: ");
Serial.print(humidity);
Serial.print("% | ");
Serial.print("Temperature: ");
Serial.print(temperature);
Serial.println("C");
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Blynk.begin(auth, ssid, pass, IPAddress(128,199,204,127), 8080);
    timer.setInterval(5000L, sendSensor);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
void loop() {
    Blynk.run();
    timer.run();
}
```

## 2. ระบบตรวจสอบสถานะแบตเตอรี่

```
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
//##### CONFIGURATION : MODIFY HERE #####
char auth[] = "RkOe7-PkOWFzbGoWNerdKD5xpQv4g-xM";
char ssid[] = "PWFaun24";
char pass[] = " PWFaun24";
String txt1 = "Battery is low"; //ข้อความที่จะแสดงใน Line
String txt2 = "Battery over heat"; //ข้อความที่จะแสดงใน Line
#define TokenLine "DgaZkl8W1jJdMO9iXaD3nGQSiXS7oGV25RRXzemi7PV" //รหัสเชื่อมต่อ Line
//#####
int R_LEDPIN = 18;
int G_LEDPIN = 21;
int B_LEDPIN = 23;
int DHTSENSOR = 15;
const float Analog_channel_pin = 34;
float VDC_VALUE = 0;
float VDC_VALUE1 = 0;
float VDC_VALUE2 = 0;
float VDC_VALUE3 = 0;
float VDC_VALUE4 = 0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float VDC_VALUE5 = 0;
float DCvolt = 0;
float EVstatus = 0;
boolean oldState;
boolean data;
WidgetLED led1(V3);
WidgetLED led2(V6);
WidgetLED led3(V13);
BlynkTimer timer;

void sendSensor() {
  // Batt voltage status from volttage divider 25 V
  VDC_VALUE1 = analogRead(Analog_channel_pin);
  delay (2000);
  VDC_VALUE2 = analogRead(Analog_channel_pin);
  delay (2000);
  VDC_VALUE3 = analogRead(Analog_channel_pin);
  delay (2000);
  VDC_VALUE4 = analogRead(Analog_channel_pin);
  delay (2000);
  VDC_VALUE5 = analogRead(Analog_channel_pin);
  delay (2000);
  VDC_VALUE = (VDC_VALUE1 + VDC_VALUE2 + VDC_VALUE3 + VDC_VALUE4 +
  VDC_VALUE5)/5;
  DCvolt = ((VDC_VALUE*50)/4095)*1.57;
  Serial.print("Battery voltage = ");
  Serial.println(DCvolt);
  Blynk.virtualWrite(V4, DCvolt);
  delay(500);
  if (DCvolt > 48.571428) {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Serial.println("Battery status = 100 % ");
digitalWrite(R_LEDPIN, LOW);
led1.off();
Serial.println("EV status turn on ");
led3.on();
digitalWrite(G_LEDPIN, HIGH);
} else if (DCvolt > 48){
  Serial.println("Battery status = 75 % ");
  digitalWrite(R_LEDPIN, LOW);
  led1.off();
  Serial.println("EV status turn on ");
  led3.on();
  digitalWrite(G_LEDPIN, HIGH);
} else if (DCvolt > 47.142856){
  Serial.println("Battery status = 50 % ");
  digitalWrite(R_LEDPIN, LOW);
  led1.off();
  Serial.println("EV status turn on ");
  led3.on();
  digitalWrite(G_LEDPIN, HIGH);
} else if (DCvolt > 45.142856){
  Serial.println("Battery status = 25 % ");
  digitalWrite(R_LEDPIN, HIGH);
  led1.on();
  Serial.println("EV status turn on ");
  led3.on();
  digitalWrite(G_LEDPIN, HIGH);
} else {
  Serial.println("Battery status = 0 % ");
  Serial.println("EV status turn off ");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

led3.off();
digitalWrite(G_LEDPIN, LOW);
//charge alarm line notify*****
Serial.println(txt1);
NotifyLine(txt1);
//*****

digitalWrite(R_LEDPIN, HIGH);
led1.on();
delay(2000);
}
delay(1000);
Serial.println(".");
Serial.println(".");
Serial.println(".");
Serial.println(".");
Serial.println(".");
}

void NotifyLine(String t) {
  WiFiClientSecure client;

  if (!client.connect("notify-api.line.me", 443)) {
    Serial.println("Connection failed");
    return;
  }

  String req = "";
  req += "POST /api/notify HTTP/1.1\r\n";
  req += "Host: notify-api.line.me\r\n";
  req += "Authorization: Bearer " + String(TokenLine) + "\r\n";
  req += "Cache-Control: no-cache\r\n";

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

req += "User-Agent: ESP32\r\n";
req += "Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\r\n";
req += "Content-Length: " + String(String("message=" + t).length()) + "\r\n";
req += "\r\n";
req += "message=" + t;
Serial.println(req);
client.print(req);
delay(20);
Serial.println("-----");
while(client.connected()) {
  String line = client.readStringUntil('\n');
  if (line == "\r") {
    break;
  }
}
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Blynk.begin(auth, ssid, pass, IPAddress(128,199,204,127), 8080);
  timer.setInterval(5000L, sendSensor);
  pinMode(G_LEDPIN, OUTPUT); //กำหนดขา G_LEDPIN เป็นขาออกที่เชื่อมต่อ LED GREEN
  pinMode(R_LEDPIN, OUTPUT); //กำหนดขา R_LEDPIN เป็นขาออกที่เชื่อมต่อ LED GREEN
  pinMode(B_LEDPIN, OUTPUT); //กำหนดขา B_LEDPIN เป็นขาออกที่เชื่อมต่อ LED GREEN
}

void loop() {
  Blynk.run();
  timer.run();
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ระบบตรวจสอบสถานะการแจ้งเหตุฉุกเฉิน

```

#define BLYNK_PRINT Serial
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <SimpleDHT.h> //ไลบรารี DHT11
//##### CONFIGURATION : MODIFY HERE #####
char auth[] = "RkOe7-PkOWFzbGoWNerdKD5xpQv4g-xM";
char ssid[] = "PWFaun24";
char pass[] = "PWFaun24";
String txt = "HELP HELP !!! Emergency status !"; //ข้อความที่จะแสดงใน Line
#define TokenLine "DgaZkl8W1jJdMO9iXaD3nGQSiXS7oGV25RRXzemi7PV" //รหัสเชื่อมต่อ Line
//#####
int EmerPIN = 18;
int R_LEDPIN = 21;
boolean oldState;
boolean data;
int DHTSENSOR2 = 15;
WidgetLED led1(V8);
SimpleDHT11 dht11; //ระบุรุ่นเซ็นเซอร์รุ่น DHT11
BlynkTimer timer;

void loop() {
  data = digitalRead(EmerPIN);
  Serial.println(data);
  if (data == 1) {
    delay (100);
    data = digitalRead(EmerPIN);
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (data == 1) {
    delay (100);
    led1.on();
    digitalWrite(R_LEDPIN, HIGH);
    Serial.println(txt);
    NotifyLine(txt);
    led1.on();
} else {
    led1.off();
    digitalWrite(R_LEDPIN, LOW);
    led1.off();
}
delay(2000);
// environment temerature and huminity status
byte temperature2 = 0; //กำหนดตัวแปรเก็บค่าอุณหภูมิ
byte humidity2 = 0; //กำหนดตัวแปรเก็บค่าความชื้นสัมพัทธ์
dht11.read(DHTSENSOR2, &temperature2, &humidity2, NULL); //อ่านค่าจากเซ็นเซอร์
while (temperature2 == 0) {
    dht11.read(DHTSENSOR2, &temperature2, &humidity2, NULL); //อ่านค่าจากเซ็นเซอร์
    Serial.println("DHT11_2 get failed");
    delay(2000);
}
Blynk.virtualWrite(V21, humidity2); //ส่งค่า humidity V1 ไปยัง blynk server
Blynk.virtualWrite(V22, temperature2); //ส่งค่า humitemperature V2 ไปยัง blynk server
Serial.print("Humidity2: ");
Serial.print(humidity2);
Serial.print("% | ");
Serial.print("Temperature2: ");
Serial.print(temperature2);
Serial.println("C");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    delay(1000);
}

void NotifyLine(String t) {
    WiFiClientSecure client;
    if (!client.connect("notify-api.line.me", 443)) {
        Serial.println("Connection failed");
        return;
    }
    String req = "";
    req += "POST /api/notify HTTP/1.1\r\n";
    req += "Host: notify-api.line.me\r\n";
    req += "Authorization: Bearer " + String(TokenLine) + "\r\n";
    req += "Cache-Control: no-cache\r\n";
    req += "User-Agent: ESP8266\r\n";
    req += "Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\r\n";
    req += "Content-Length: " + String(String("message=" + t).length()) + "\r\n";
    req += "\r\n";
    req += "message=" + t;
    Serial.println(req);
    client.print(req);
    delay(20);
    Serial.println("-----");
    while(client.connected()) {
        String line = client.readStringUntil('\n');
        if (line == "\r") {
            break;
        }
    }
}
delay(5000);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Blynk.begin(auth, ssid, pass, IPAddress(128,199,204,127), 8080);
  pinMode(R_LEDPIN, OUTPUT);          //กำหนดขา G_LEDPIN เป็นขาออกที่เชื่อมต่อ LED GREEN
  pinMode(EmerPIN, INPUT);           //กำหนดขา R_LEDPIN เป็นขาออกที่เชื่อมต่อ LED GREEN
  //ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อสายไฟ ถ้าไม่สำเร็จให้แสดง "." ในคอนโซลจนกว่าจะเชื่อมต่อได้
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    Serial.print(".");
    delay(500);
  }
  //แสดงสถานะการวางสายไฟเชื่อมต่อแล้ว และแสดงหมายเลขไอพีที่ได้รับในคอนโซล
  Serial.println();
  Serial.print("connected: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}

```

#### 4. ระบบตรวจสอบสถานะคุณภาพอากาศ

```

#include "PMS.h"
PMS pms(Serial);
PMS::DATA data;
int scale_bar;

```

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println();
  Serial.println();
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void loop(){
  pms.requestRead();
  if (pms.readUntil(data)){
    Serial.print("PM 1.0 (ug/m3): ");
    Serial.println(String(data.PM_AE_UG_1_0));
    Serial.print("PM 2.5 (ug/m3): ");
    Serial.println(String(data.PM_AE_UG_2_5));
    Serial.print("PM 10.0 (ug/m3): ");
    Serial.println(String(data.PM_AE_UG_10_0));
  } else {
    Serial.println("No data.");
  }
  Serial.println();
  Serial.println();
}

```

##### 5. ระบบตรวจสอบการชนด้วยอัลตราโซนิก

```

const int trigPin = 12;
const int echoPin = 14;
const int Relay1 = 32;
const int Relay2 = 33;
const int LED = 18;
const int buzzer = 23;
const int push = 34;
long duration;
int distance;
int buttom;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void setup() {
    pinMode(trigPin, OUTPUT); // Sets the trigPin as an Output
    pinMode(echoPin, INPUT); // Sets the echoPin as an Input
    pinMode(buzzer, OUTPUT); // Sets the trigPin as an Output
    pinMode(Relay1, OUTPUT); // Sets the trigPin as an Output
    pinMode(Relay2, OUTPUT); // Sets the trigPin as an Output
    pinMode(LED, OUTPUT); // Sets the trigPin as an Output
    pinMode(push, INPUT); // Sets the echoPin as an Input
    Serial.begin(115200); // Starts the serial communication
}

void loop() {
    // Clears the trigPin
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    // Sets the trigPin on HIGH state for 10 micro seconds
    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    // Reads the echoPin, returns the sound wave travel time in microseconds
    duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
    // Calculating the distance
    distance= duration*0.034/2;
    // Prints the distance on the Serial Monitor
    Serial.print("Distance: ");
    Serial.print(distance);
    Serial.println(" cm");
    if (distance < 10) {
        digitalWrite(buzzer, HIGH);
        digitalWrite(LED, HIGH);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

button = digitalRead(push);
if (button == 1){
    digitalWrite(Relay1, LOW);
} else {
    digitalWrite(Relay1, HIGH);
}
} else if (distance < 20){
    digitalWrite(buzzer, HIGH);
    digitalWrite(LED, HIGH);
    delay (50);
    digitalWrite(buzzer, LOW);
    digitalWrite(LED, LOW);
    delay (50);
    digitalWrite(Relay1, LOW);
} else if (distance < 30){
    digitalWrite(buzzer, HIGH);
    digitalWrite(LED, HIGH);
    delay (200);
    digitalWrite(buzzer, LOW);
    digitalWrite(LED, LOW);
    delay (200);
    digitalWrite(Relay1, LOW);
} else if (distance < 40){
    digitalWrite(buzzer, HIGH);
    digitalWrite(LED, HIGH);
    delay (500);
    digitalWrite(buzzer, LOW);
    digitalWrite(LED, LOW);
    delay (500);
    digitalWrite(Relay1, LOW);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

} else {
    digitalWrite(buzzer, LOW);
    digitalWrite(Relay1, LOW);
    digitalWrite(Relay2, LOW);
    digitalWrite(LED, LOW);
}
}

```

## 6. ระบบกล้องภายในรถ

\*\*\*\*\*

Download latest Blynk library here:

<https://github.com/blynkkk/blynk-library/releases/latest>

Blynk is a platform with iOS and Android apps to control Arduino, Raspberry Pi and the likes over the Internet.

You can easily build graphic interfaces for all your projects by simply dragging and dropping widgets.

Downloads, docs, tutorials: <http://www.blynk.cc>

Sketch generator: <http://examples.blynk.cc>

Blynk community: <http://community.blynk.cc>

Follow us: <http://www.fb.com/blynkapp>

[http://twitter.com/blynk\\_app](http://twitter.com/blynk_app)

Blynk library is licensed under MIT license

This example code is in public domain.

\*\*\*\*\*

This example runs directly on ESP32 chip.

Note: This requires ESP32 support package:

<https://github.com/espressif/arduino-esp32>

Please be sure to select the right ESP32 module

in the Tools -> Board menu!

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Change WiFi ssid, pass, and Blynk auth token to run :)

Feel free to apply it to any other example. It's simple!

```

*****/

/* Comment this out to disable prints and save space */
#define BLYNK_PRINT Serial
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include "esp_camera.h"
#include "esp_system.h"
hw_timer_t *timer = NULL;

void IRAM_ATTR resetModule(){
    ets_printf("reboot\n");
    esp_restart();
}

// You should get Auth Token in the Blynk App.
// Go to the Project Settings (nut icon).
//value from pin V27:CAM V28:Sensor V29:LED Flash
char auth[] = "RkOe7-PkOWFzbGoWNerdKD5xpQv4g-xM";
#include <TridentTD_LineNotify.h>
#define SSID "PWFaun24"
#define PASSWORD "PWFaun24"
#define LINE_TOKEN "DgaZki8W1jJdMO9iXaD3nGQSiXS7oGV25RRXzemi7PV"
// Pin definition for CAMERA_MODEL_AI_THINKER
#define PWDN_GPIO_NUM 32
#define RESET_GPIO_NUM -1
#define XCLK_GPIO_NUM 0
#define SIOD_GPIO_NUM 26

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#define SIOC_GPIO_NUM 27
#define Y9_GPIO_NUM 35
#define Y8_GPIO_NUM 34
#define Y7_GPIO_NUM 39
#define Y6_GPIO_NUM 36
#define Y5_GPIO_NUM 21
#define Y4_GPIO_NUM 19
#define Y3_GPIO_NUM 18
#define Y2_GPIO_NUM 5
#define VSYNC_GPIO_NUM 25
#define HREF_GPIO_NUM 23
#define PCLK_GPIO_NUM 22
const int Led_Flash = 4;
const int Led_run = 13;
int PIR_Sensor = 12;
int pinSensor = 0 ,pinFlash = 0 ,Cam_capture = 0 ,time_capture=0;
boolean startTimer = false;
unsigned long time_now=0;
// This function will be called every time Slider Widget
// in Blynk app writes values to the Virtual Pin V1

BLYNK_WRITE(V27){
    Cam_capture = param.asInt();
    // assigning incoming value from pin V1 to a variable
    // process received value
}

BLYNK_WRITE(V28){
    pinSensor = param.asInt();
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

BLYNK_WRITE(V29){
    pinFlash = param.asInt();
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    while (!Serial) { ; }
    pinMode(Led_Flash, OUTPUT);
    pinMode(Led_run, OUTPUT);
    WiFi.begin(SSID, PASSWORD);
    Serial.printf("WiFi connecting to %s\n", SSID);
    while(WiFi.status() != WL_CONNECTED) { Serial.print("."); delay(400); }
    Serial.printf("\nWiFi connected\nIP : ");
    Serial.println(WiFi.localIP());
    LINE.setToken(LINE_TOKEN);
    //Blynk.begin(auth,SSID, PASSWORD);
    Blynk.begin(auth,SSID,PASSWORD, IPAddress(128,199,204,127), 8080);
    timer = timerBegin(0, 80, true); //timer 0, div 80Mhz
    timerAttachInterrupt(timer, &resetModule, true);
    timerAlarmWrite(timer, 20000000, false); //set time in us 15s
    timerAlarmEnable(timer); //enable interrupt
    camera_config_t config;
    config.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0;
    config.ledc_timer = LEDC_TIMER_0;
    config.pin_d0 = Y2_GPIO_NUM;
    config.pin_d1 = Y3_GPIO_NUM;
    config.pin_d2 = Y4_GPIO_NUM;
    config.pin_d3 = Y5_GPIO_NUM;
    config.pin_d4 = Y6_GPIO_NUM;
    config.pin_d5 = Y7_GPIO_NUM;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

config.pin_d6 = Y8_GPIO_NUM;
config.pin_d7 = Y9_GPIO_NUM;
config.pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM;
config.pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM;
config.pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM;
config.pin_href = HREF_GPIO_NUM;
config.pin_sscb_sda = SIOD_GPIO_NUM;
config.pin_sscb_scl = SIOC_GPIO_NUM;
config.pin_pwdn = PWDN_GPIO_NUM;
config.pin_reset = RESET_GPIO_NUM;
config.xclk_freq_hz = 20000000;
config.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG;
if(psramFound()){
    // FRAMESIZE_ +
    //QQVGA/160x120//QQVGA2/128x160//QCIF/176x144//HQVGA/240x176
    //QVGA/320x240//CIF/400x296//VGA/640x480//SVGA/800x600//XGA/1024x768
    //SXGA/1280x1024//UXGA/1600x1200//QXGA/2048*1536
    config.frame_size = FRAMESIZE_VGA;
    config.jpeg_quality = 10;
    config.fb_count = 2;
} else {
    config.frame_size = FRAMESIZE_QQVGA;
    config.jpeg_quality = 12;
    config.fb_count = 1;
}
// Init Camera
esp_err_t err = esp_camera_init(&config);
if (err != ESP_OK) {
    Serial.printf("Camera init failed with error 0x%x", err);
    return;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
}

void loop() {
  Blynk.run();
  timerWrite(timer, 0); //reset timer (feed watchdog)
  long tme = millis();
  if(Cam_capture == 1)
  Camera_capture();
  if(digitalRead(PIR_Sensor) == 1 && startTimer != true && pinSensor == 1){
    Camera_capture();
    startTimer = true;
  }else if(digitalRead(PIR_Sensor) == 0){
    startTimer = false;
    time_capture=0;
  }
  if(millis() > time_now + 1000) {
    time_now = millis();
    digitalWrite(Led_run, HIGH);
    delay(20);
    digitalWrite(Led_run, LOW);
  }
  tme = millis() - tme;
  if(digitalRead(PIR_Sensor) == 1){
    if(++time_capture > 60){
      time_capture=0;
      Camera_capture();
      Serial.println("Over Time");
    }
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//Serial.println(digitalRead(PIR_Sensor));
delay(200);
}

void Camera_capture() {
  if(pinFlash == 1){
    digitalWrite(Led_Flash, HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(Led_Flash, LOW);
    delay(100);
    digitalWrite(Led_Flash, HIGH);
  }
  camera_fb_t * fb = NULL;
  delay(200);
  // Take Picture with Camera
  fb = esp_camera_fb_get();
  if(!fb) {
    Serial.println("Camera capture failed");
    return;
  }
  digitalWrite(Led_Flash, LOW);
  Send_line(fb->buf,fb->len);
  esp_camera_fb_return(fb);
  Serial.println("OK");
  // Serial.println("Going to sleep now");
  // esp_deep_sleep_start();
  // Serial.println("This will never be printed");
}

```

```

void Send_line (uint8_t *image_data,size_t image_size) {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
LINE.notifyPicture("Inside of micro EV ",image_data, image_size);
}
```

## 7. ระบบกล้องหน้ารถ

```
/******
```

Download latest Blynk library here:

<https://github.com/blynkkk/blynk-library/releases/latest>

Blynk is a platform with iOS and Android apps to control Arduino, Raspberry Pi and the likes over the Internet.

You can easily build graphic interfaces for all your projects by simply dragging and dropping widgets.

Downloads, docs, tutorials: <http://www.blynk.cc>

Sketch generator: <http://examples.blynk.cc>

Blynk community: <http://community.blynk.cc>

Follow us: <http://www.fb.com/blynkapp>

[http://twitter.com/blynk\\_app](http://twitter.com/blynk_app)

Blynk library is licensed under MIT license

This example code is in public domain.

```
*****
```

This example runs directly on ESP32 chip.

Note: This requires ESP32 support package:

<https://github.com/espressif/arduino-esp32>

Please be sure to select the right ESP32 module

in the Tools -> Board menu!

Change WiFi ssid, pass, and Blynk auth token to run :)

Feel free to apply it to any other example. It's simple!

```
*****/
```

```
/* Comment this out to disable prints and save space */
```

```
// Santi&be Youtube
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//https://youtu.be/YYDL54F-nks
#define BLYNK_PRINT Serial
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include "esp_camera.h"
#include "esp_system.h"
hw_timer_t *timer = NULL;

void IRAM_ATTR resetModule(){
  ets_printf("reboot\n");
  esp_restart();
}

// You should get Auth Token in the Blynk App.
// Go to the Project Settings (nut icon).
//value from pin V3=15:CAM V31:Sensor V32:LED Flash
char auth[] = "MeZG0q9PxLHQc2vYbu55kr5FM8of7CPV";
#include <TridentTD_LineNotify.h>
#define SSID "PWFaun24"
#define PASSWORD "PWFaun24"
#define LINE_TOKEN "DgaZkl8W1jJdMO9iXaD3nGQSiXS7oGV25RRXzemi7PV"
// Pin definition for CAMERA_MODEL_AI_THINKER
#define PWDN_GPIO_NUM 32
#define RESET_GPIO_NUM -1
#define XCLK_GPIO_NUM 0
#define SIOD_GPIO_NUM 26
#define SIOC_GPIO_NUM 27
#define Y9_GPIO_NUM 35
#define Y8_GPIO_NUM 34

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#define Y7_GPIO_NUM    39
#define Y6_GPIO_NUM    36
#define Y5_GPIO_NUM    21
#define Y4_GPIO_NUM    19
#define Y3_GPIO_NUM    18
#define Y2_GPIO_NUM    5
#define VSYNC_GPIO_NUM 25
#define HREF_GPIO_NUM  23
#define PCLK_GPIO_NUM  22
const int Led_Flash = 4;
const int Led_run = 13;
int PIR_Sensor = 12;
int pinSensor = 0 ,pinFlash = 0 ,Cam_capture = 0 ,time_capture=0;
boolean startTimer = false;
unsigned long time_now=0;
WidgetLED led1(V16);
// This function will be called every time Slider Widget
// in Blynk app writes values to the Virtual Pin V1

BLYNK_WRITE(V15){
    Cam_capture = param.asInt();
    // assigning incoming value from pin V1 to a variable
    // process received value
}

BLYNK_WRITE(V31){
    pinSensor = param.asInt();
}

BLYNK_WRITE(V32){

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    pinFlash = param.asInt();
}

void setup () {
    Serial.begin(115200);
    while (!Serial) { ; }
    pinMode(Led_Flash, OUTPUT);
    pinMode(Led_run, OUTPUT);
    WiFi.begin(SSID, PASSWORD);
    Serial.printf("WiFi connecting to %s\n", SSID);
    while(WiFi.status() != WL_CONNECTED) { Serial.print("."); delay(400); }
    Serial.printf("\nWiFi connected\nIP : ");
    Serial.println(WiFi.localIP());
    LINE.setToken(LINE_TOKEN);
    //Blynk.begin(auth,SSID, PASSWORD);
    Blynk.begin(auth,SSID,PASSWORD, IPAddress(128,199,204,127), 8080);
    timer = timerBegin(0, 80, true); //timer 0, div 80Mhz
    timerAttachInterrupt(timer, &resetModule, true);
    timerAlarmWrite(timer, 20000000, false); //set time in us 15s
    timerAlarmEnable(timer); //enable interrupt
    camera_config_t config;
    config.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0;
    config.ledc_timer = LEDC_TIMER_0;
    config.pin_d0 = Y2_GPIO_NUM;
    config.pin_d1 = Y3_GPIO_NUM;
    config.pin_d2 = Y4_GPIO_NUM;
    config.pin_d3 = Y5_GPIO_NUM;
    config.pin_d4 = Y6_GPIO_NUM;
    config.pin_d5 = Y7_GPIO_NUM;
    config.pin_d6 = Y8_GPIO_NUM;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

config.pin_d7 = Y9_GPIO_NUM;
config.pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM;
config.pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM;
config.pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM;
config.pin_href = HREF_GPIO_NUM;
config.pin_sscb_sda = SIOD_GPIO_NUM;
config.pin_sscb_scl = SIOC_GPIO_NUM;
config.pin_pwdn = PWDN_GPIO_NUM;
config.pin_reset = RESET_GPIO_NUM;
config.xclk_freq_hz = 20000000;
config.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG;

if(psramFound()){
    // FRAMESIZE_ +
    //QQVGA/160x120//QQVGA2/128x160//QCIF/176x144//HQVGA/240x176
    //QVGA/320x240//CIF/400x296//VGA/640x480//SVGA/800x600//XGA/1024x768
    //SXGA/1280x1024//UXGA/1600x1200//QXGA/2048*1536
    config.frame_size = FRAMESIZE_VGA;
    config.jpeg_quality = 10;
    config.fb_count = 2;
} else {
    config.frame_size = FRAMESIZE_QQVGA;
    config.jpeg_quality = 12;
    config.fb_count = 1;
}

// Init Camera
esp_err_t err = esp_camera_init(&config);
if (err != ESP_OK) {
    Serial.printf("Camera init failed with error 0x%x", err);
    return;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
}

void loop () {
  Blynk.run();
  timerWrite(timer, 0); //reset timer (feed watchdog)
  long tme = millis();
  if (Cam_capture == 1) {
    led1.on();
    Camera_capture();
  }
  if (digitalRead(PIR_Sensor) == 1 && startTimer != true && pinSensor == 1) {
    Camera_capture();
    startTimer = true;
  } else if (digitalRead(PIR_Sensor) == 0) {
    startTimer = false;
    time_capture=0;
  }
  if(millis() > time_now + 1000) {
    time_now = millis();
    digitalWrite(Led_run, HIGH);
    delay(20);
    digitalWrite(Led_run, LOW);
  }
  tme = millis() - tme;
  if(digitalRead(PIR_Sensor) == 1){
    if(++time_capture > 60){
      time_capture=0;
      Camera_capture();
      Serial.println("Over Time");
    }
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
}
//Serial.println(digitalRead(PIR_Sensor));
delay(200);
}

void Camera_capture() {
  if (pinFlash == 1) {
    digitalWrite(Led_Flash, HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(Led_Flash, LOW);
    delay(100);
    digitalWrite(Led_Flash, HIGH);
  }
  camera_fb_t * fb = NULL;
  delay(200);
  // Take Picture with Camera
  fb = esp_camera_fb_get();
  if(!fb) {
    Serial.println("Camera capture failed");
    return;
  }
  digitalWrite(Led_Flash, LOW);
  Send_line(fb->buf,fb->len);
  esp_camera_fb_return(fb);
  Serial.println("OK");
  // Serial.println("Going to sleep now");
  // esp_deep_sleep_start();
  // Serial.println("This will never be printed");
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void Send_line (uint8_t *image_data,size_t image_size) {
    LINE.notifyPicture("Front of micro EV ",image_data, image_size);
    led1.off ();
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Research Article

# Design of a Personal Mobility Device for Elderly Users

Natthanon Phannil  and Chaiyan Jettanasen 

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Correspondence should be addressed to Chaiyan Jettanasen; [chaiyan.je@kmitl.ac.th](mailto:chaiyan.je@kmitl.ac.th)

Received 28 September 2020; Revised 12 January 2021; Accepted 2 February 2021; Published 13 February 2021

Academic Editor: Ilias Maglogiannis

Copyright © 2021 Natthanon Phannil and Chaiyan Jettanasen. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The ageing society has resulted in imbalances in the population age ratio. The ratio of working-age people was less than that of elderly people resulting in a shortage of elderly caregivers and increased healthcare costs. Although the lifestyle the elderly remains the same, their physical abilities are reduced, requiring them to rely on special equipment when traveling in order to gain more control and safety. Therefore, the Elderly Personal Mobility Device (EPMD) is developed using Internet of Things (IoT) technology to reduce the burden of caregivers, provide freedom and safety for elderly travelers, assess air pollution risks, and alert the occurrence of emergency events. The EPMD is designed in terms of structure, electrical equipment, and sensor systems. First, the shapes, sizes, and thicknesses of the carbon steel used for construction of the EPMD structure are calculated by using SolidWorks software. Next, the electric equipment is carefully selected to meet the requirements of actual use. Finally, the sensor system is designed to monitor the EPMD status and air quality using IoT devices to create a data interface and big data for elderly health service development, as well as an air quality map with distributed measuring stations and a charging station detection system for future use.

## 1. Introduction

Many countries around the world are currently facing rapid growth in the number of ageing citizens due to low birth rates, longer life expectancies, and ageing of the baby boomers, especially in developed countries. According to the World Health Organization [1], the segment of the population aged 60 years or older is expected to increase by at least 3% per year. In 2017, the 60+ population around the world was 963 million, which was 13% of the overall population.

The proportion of people aged 60 and above in Asia is projected to increase dramatically and is expected to be the highest proportion of 60+ people in the world. According to the Global AgeWatch Index [2, 3], Japan has the largest senior population and will be the first country in the world to become a super-aged society, which means that more than 20% of their total population will be aged 65 years and older. South Korea is also facing a situation similar to that of Japan; the elderly population is expected to be 31.4% in 2030, which will be the second largest senior population in Asia.

Moreover, China is facing the problem of a child policy that will result in a decline of the population, will create a huge ageing gap, and will shrink the labour force. The elderly population of China will increase from 15.2% in 2015 to 25.3% in 2030.

The demographic situation around the world has moved into the era of smart city planning and implementation. One of the major challenges is to meet the needs of an increasingly ageing population. In areas such as mobility, healthcare, and community services, technological innovation will play a pivotal role in upgrading homes and the urban environments in which an increasing elderly population will live. The World Health Organization has created the Global Age-Friendly Cities guide [4, 5]; however, it is worth noting that many of the items on the wish list also improve urban life for the general population.

Solutions vary from high tech to simple and often an ingenious combination. Globally, governments around the world are beginning to adopt stricter planning regulations. Many cities are embracing the notion of the smart city, offering opportunities via subsidies, initiative schemes, and focus

groups that can assist in planning, implementation, and trials of new ideas. Aside from physical measures, several cities, such as Taipei, Barcelona, Malmö, and Mexico City, have focussed on reducing the Information and Communication Technology (ICT) divide that can prevent senior citizens from accessing smart solutions by developing digital literacy plans aimed at the elderly. For mobility and accessibility, such plans can help senior citizens to master simple computer skills that increase their independence, opening up new lines of communication to people that may otherwise be isolated.

Another vital contribution to mental and physical health is the ability to navigate a city independently. No matter how well city planning has been carried out, this is a constant challenge for those with limited mobility. Localised air quality warnings from Internet of Things (IoT) systems, [6, 7] such as smart lampposts [6] or smart benches [7], could also be incorporated to help the elderly avoid venturing out on particularly smoggy days. Various applications developed for those with limited vision can also serve the elderly. For example, BlindSquare [8–10] is an app that is designed to help the visually impaired navigate cities by describing the environment, warning of intersections, providing directions, and recommending possible places of interest—services that prove useful for the elderly.

A mobility vehicle [11–14] is an essential option to facilitate an expanded travel range for elderly people and to increase safety. While the vehicle is aimed at providing seamless and rapid commuter travel, it may allow tasks such as grocery shopping to be completed without needing to consider the weight of groceries on the walk home or to provide the ability to manage a small case for a weekend away without having to resort to using a taxi for short trips. This can help to keep the elderly in the loop with upcoming community events and to increase their confidence in navigating new spaces and venues, knowing that their needs will be served. It is clear that, as the populations of many countries shift towards an ageing society, advances in AI, IoT, and other technologies will be integral for adapting urban life to the needs of the elderly.

In Thailand, the number of elderly people is steadily increasing, they are living longer, and there is a decline in the birth rate. As indicated in the report of the Department of Older Persons of The Ministry of Social Development and Human Security in 2019 [15], Thailand has a relatively high older population (aged 60 years and over), up to 19% of the country's population. The average age of this population was 61 years in 1972, but in 2019, the average age had increased to 76 years due to medical advancement. The proportion of the elderly population in Thailand will increase to 19.8% in 2022. The Office of the Thai Health Promotion Foundation has estimated the elderly population (aged 60 years and over), and it was found that by 2036, the elderly population of Thailand will consist of 33% of the total population. Many elderly people have physical disabilities, so that the problems of the ageing society are relevant and require serious solutions.

Although the society of Thailand is ageing, there are few studies on ageing society support, especially in the field of elderly travel. Most elderly people cannot use a commercial vehicle for daily travel because of their reduced ability to

control the vehicle. Commercial vehicles move at high speeds, are large, and are difficult to control and move, while elderly people often travel short distances within residential areas. Therefore, the use of special vehicles operating at low speeds, that are small, and that are designed of use by the elderly represent a viable solution. One of the interesting classes of special vehicles is micromobility, which consists of small, lightweight vehicles operating at speeds typically below 25 km/h that are driven by users personally. Micromobility devices include bicycles, e-bikes, electric scooters, electric skateboards, shared bicycles, and electric pedal-assisted (pedelec) bicycles. A micromobility device should have a gross vehicle weight of less than 500 kg (1,100 lb).

Generally, most micromobility is used in the form of a small scooter, which is lightweight and portable, and has a speed of 5–10 km/h with a distance of 10–15 km/charge. These micromobility devices are suitable for short trips where the user must have great physical ability and mobility; thus, they are not suitable for the elderly. More recently, larger micromobility vehicles, that can travel longer distances, with more carrier weight, have been developed, which are more responsive to the needs of the elderly.

The speed of these vehicles does not exceed 25 km/h with a distance of 20–30 km/charge, which supports the lifestyle of the elderly, such as residential area travel and shopping. Micromobility is mainly designed for transporting people, so there has been little development in communication or data transfer. Recently, the applications of IoT technology and information systems have had a great effect on the user's choice of micromobility. In addition, autonomous vehicles [16, 17] have been developed that require sensors, processing, and communication systems. This has resulted in the concept of using IoT technology and information systems in conjunction with micromobility for use in Thailand. Micromobility for the elderly should be designed according to the elderly lifestyle.

Most of the developed IoT systems focus on healthcare for the elderly, reducing the burden of caregivers, and preventing accidents. Many researchers have developed monitoring systems [18–23] to meet these needs, which consist of health data measurement systems [18–20] and mobile assistive devices [21–23]. Bongisizwe et al. [19] designed Healthcare Monitoring Systems (HMSs) using Zigbee to detect heart disease, high blood pressure, and other cardiovascular diseases. Wang et al. [20] designed a human health monitoring system using Narrowband IoT (NB-IoT) to send data of heartbeats, body temperature, and location to caregivers and family in emergencies. Yang et al. [21] designed a smart crutch for elderly people for real-time monitoring of falling, heart rate, and location.

Not only is IoT technology used for measuring health data, it is also useful for monitoring harmful pollution in the surrounding environment. Many researchers have developed air pollution detection systems [24–32] that directly affect the elderly because they are more adversely affected by pollution. Therefore, the development of air pollution detection systems not only helps the elderly to assess their own risk but also creates an air pollution map for each area, leading to future solutions. An IoT crowd sensing platform [24] offers a set of

services to citizens by exploiting a network of bicycles as IoT probes based on a survey conducted to identify the most interesting bike-enabled services. The Smart Bike platform provides real-time remote geolocation of users' bikes, anti-theft services, information about travel routes, and air pollution monitoring. In [25–28], a cost effective, stand-alone, multiparameter, the urban climate monitoring system is developed for analysis of major air pollutants in the atmosphere based on IoT and cloud computing using the Arduino Uno board. Mahammad [29] designed an air monitoring system using a node MCU module, an optical dust sensor, and a Blink application as a cloud platform.

Micromobility development has focused on the design of the structure, the control system, the charging system, and the motor, but there have not been significant improvements in micromobility for the elderly. Micromobility for the elderly requires functional development to meet their needs and to reduce the burden of caregivers, resulting in greater stability and safety. Although the development of devices to monitor elderly health [18–23] and to assess air quality [24–32] will be developed using IoT technology, in which these devices are often permanently installed and unable to track the outdoor activities of the elderly. Therefore, the development of micromobility with sensor systems and IoT technology that can transmit data, ambient air quality assessment, and emergency alerts is an interesting idea for building age-friendly cities in the future.

This study describes the development of an Elderly Personal Mobility Device (EPMD) with a sensor system to display and notify the EPMD status and air quality detection via IoT technology. The EPMD design includes the structure, electrical equipment, and sensor system to ensure the safety of the elderly and reduce the burden of caregivers. The EPMD structure is considered in terms of the shape, size, and thickness of carbon steel and is analysed using the SolidWorks program to consider the values of weight, strain, stress, displacement, and cost. Next, the propulsion power is calculated by the dynamic equation and used to select the electric equipment. Finally, the sensor system is designed to monitor the EPMD status and air quality detection for elderly care efficiency. The sensor system receives data from various sensors and sends it to cloud servers to create big data for elderly health service development, air quality maps with distribution measuring stations, and charging station detection systems in the future.

The contributions of this paper are summarised as follows:

- (i) The design of the EPMD is presented in terms of the structure, the electric system, and the sensor system to support usage by the elderly
- (ii) The operation of the EPMD for different road surfaces, speeds, and weights is studied and analysed through a real driving test
- (iii) The operation of the EPMD system and the air quality detection in the sensor system is presented to display the EPMD status, reduce the caregiver workload, assess the risks of low air quality, and develop the charging station detection system

This research is presented in four sections. In Section 2, the EPMD design is presented in terms of the EPMD structure, the calculation of driving power, the electric equipment, the sensor system, and the overall EPMD. In Section 3, the EPMD is tested by driving on real roads for comparison of different road surfaces, speeds, and total weight. Next, the results of the sensor system are presented to consider the importance of the EPMD status system and the air quality detection system to assess the outdoor activity risks of the elderly. Finally, a summary is presented in Section 4.

## 2. Design of Elderly Personal Mobility Device

The design of the EPMD, a tricycle mobility aid for elderly people in residential areas, is divided into five parts: the structural design, the calculation of propulsion power, the electrical equipment, the design of the sensor system, and the overall EPMD. For the structural design, SolidWorks software was used to simulate the steel chassis. Moreover, the effect of the total weight on the structure, in terms of strain, stress, and displacement, was studied to prevent structural damage caused by carrying the total weight. For the drive power calculation, the total weight obtained from the structural design was used to calculate the motor capacity, while the electric equipment of the EPMD was carefully considered to be compatible with the battery size. Finally, the sensor systems were designed to increase the function and efficiency of the EPMD.

**2.1. Structural Design.** Various carbon steel shapes, dimensions, and thicknesses were simulated using SolidWorks software in order to design the frame of the EPMD, which must be small and lightweight. The dimensions of the square pipe and rectangular pipe, including the dimensions of the carbon steel, are shown in Table 1 and Figure 1. By considering the shape of the carbon steel pipes in Table 1 and Figure 1(a), it was observed that the case study consisted of  $25 \times 25 \text{ mm}^2$  carbon steel square pipe,  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  carbon steel square pipe,  $25 \times 50 \text{ mm}^2$  carbon steel rectangular pipe, and  $50 \times 25 \text{ mm}^2$  carbon steel rectangular pipe, which were compared in terms of mass, weight, volume, strain, stress, and displacement in order to develop the frame of the vehicle.

By considering the mass, weight, and volume in Table 1, it was found that the  $25 \times 25 \text{ mm}^2$  carbon steel square pipe was better than the other type of carbon steel pipe, while the  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  carbon steel square pipe was the worst because these parameters correlated with the cross-sectional area. For the next step, the strain displayed in Table 1 and Figure 1(b) was simulated, the specimens were fixed on one end as the fixation point, and the other end was the pressed point at which the force was applied to test the strain on the carbon steel. The results showed that the  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  carbon steel square pipe had the best strain, which has less deformation compared with the other shapes, while the  $25 \times 25 \text{ mm}^2$  carbon steel square pipe had the worst strain, especially near the fixation point. After simulating the strain,

TABLE 1: Steel shape comparison results for the carbon steel pipes.

Parameters	Shape of the carbon steel pipes (mm <sup>2</sup> )			
	25 × 25	50 × 50	25 × 50	50 × 25
Mass (kg)	1.466	3.037	2.251	2.251
Weight (N)	14.362	29.764	22.063	22.063
Volume (m <sup>3</sup> )	1.865 × 10 <sup>-4</sup>	3.865 × 10 <sup>-4</sup>	2.865 × 10 <sup>-4</sup>	2.865 × 10 <sup>-4</sup>
Strain (N/m <sup>2</sup> )	2.995 × 10 <sup>-3</sup>	7.406 × 10 <sup>-4</sup>	1.834 × 10 <sup>-3</sup>	1.144 × 10 <sup>-3</sup>
Stress (N/m <sup>2</sup> )	8.423 × 10 <sup>8</sup>	2.041 × 10 <sup>8</sup>	4.972 × 10 <sup>8</sup>	3.023 × 10 <sup>8</sup>
Displacement (mm)	95.400	10.900	54.040	17.430

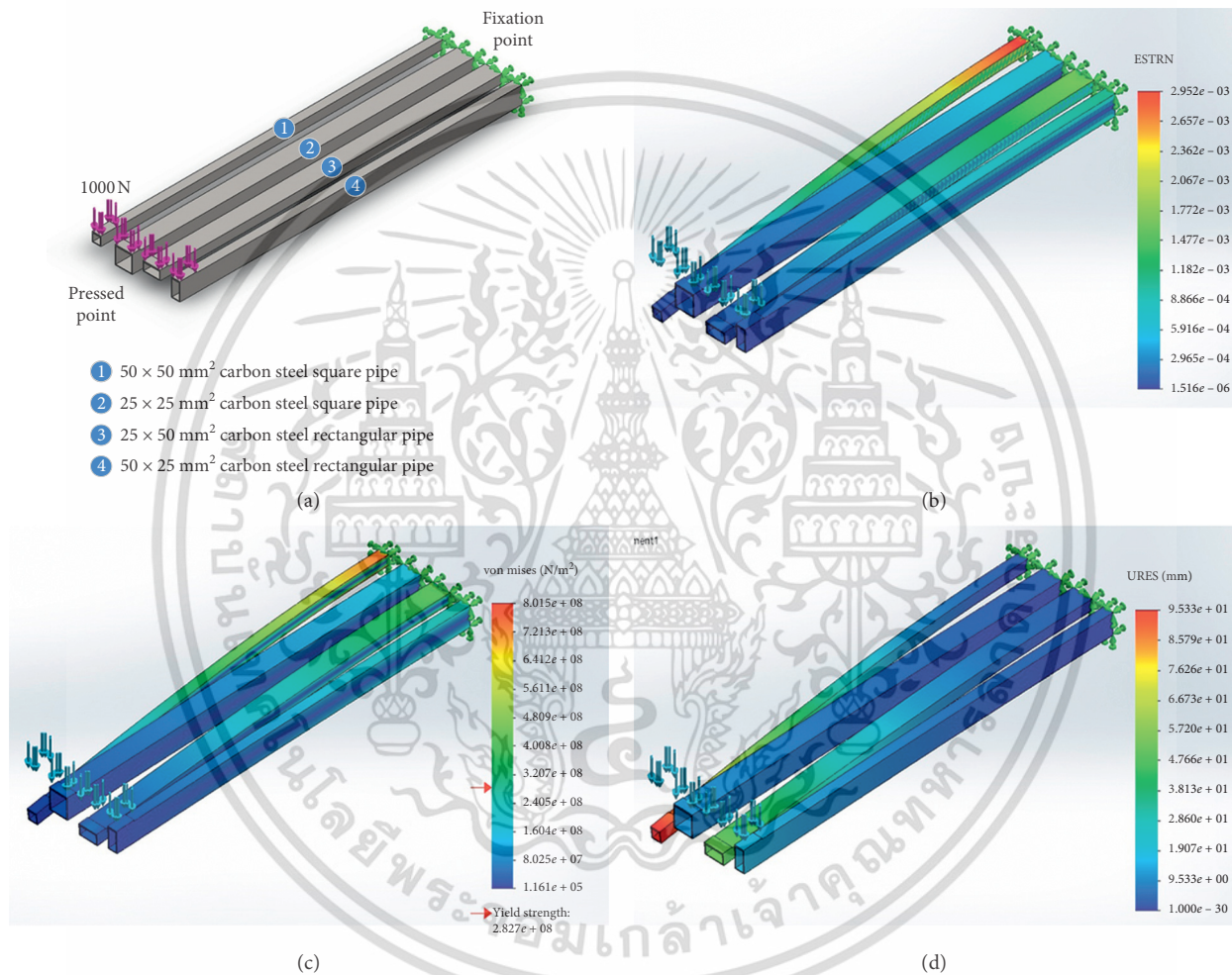


FIGURE 1: Steel shape comparison results in terms of strain, stress, and displacement. (a) Steel shape comparison of carbon steel pipe. (b) Strain results for the carbon steel pipe. (c) Stress results for the carbon steel pipe. (d) Displacement results for the carbon steel pipe.

the stress and displacement can be achieved at the same time. The obtained results have a similar trend to that of the strain characteristic, as shown in Figure 1(c), Figure 1(d), and Table 1. Further analysis of Table 1 shows that the 25 × 25 mm<sup>2</sup> carbon steel square pipe has the best mass, weight, and volume but has the worst strain, stress, and displacement. This indicates that the 25 × 25 mm<sup>2</sup> carbon steel square pipe is unsuitable for the frame because it cannot support the carried weight. On the other hand, the 50 × 50 mm<sup>2</sup> carbon steel square pipe is also not suitable for designing the vehicle frame due to the weight of the

structure, which hinders its usage. Based on a further analysis of Table 1, when considering the mass, weight, and volume, the 25 × 50 mm<sup>2</sup> and 50 × 25 mm<sup>2</sup> carbon steel rectangular pipes have the same values but, by considering the strain, stress, and displacement, the 50 × 25 mm<sup>2</sup> carbon steel rectangular pipe has better characteristics than the other types. This indicates that the 50 × 25 mm<sup>2</sup> carbon steel rectangular pipe is adequate for the vehicle frame.

Based on the previous analysis, the 50 × 25 mm<sup>2</sup> carbon steel rectangular pipe, having adequate mechanical characteristics and low structural weight, was chosen for the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

vehicle frame. The next step is to determine the thickness of carbon steel in terms of mechanical properties and cost analysis. Various thicknesses of the  $50 \times 25 \text{ mm}^2$  carbon steel rectangular pipe were simulated, and the obtained results are shown in Table 2 and Figure 2. By considering the thicknesses in Table 2 and Figure 2(a), it was observed that the case study consisted of 1.6, 2.3, and 3.2 mm thicknesses, which were compared in terms of mass, weight, volume, strain, stress, displacement, and total frame price. In addition, the yield strength was also considered when the carbon steel was assembled into a structure, in order to select the frame of the EPMD.

By considering the mass, weight, and volume data in Table 2, it was found that the 1.6 mm thickness was better than the other thicknesses, while the 3.2 mm thickness was the worst, due to the larger cross-sectional areas that result in a high mass and volume, which have an adverse impact on the EPMD weight. By considering the strain results obtained from the simulation in Table 2 and Figure 2(b), the frame was fixed on three points as fixation points, i.e., one point at the front axle and two points at rear axle. In addition, three pressed planes, the footrest and the seat of the main frame, and the rear axle support were determined to be testing areas for the mechanical properties of the designed structure. By considering Figure 2(b), the testing force on each plane was set to have weights of 500 N, 1000 N, and 500 N for the footrest, the seat of the main frame, and the rear axle support, respectively. By observing the strain values in Table 2, the 3.2 mm thickness presented better strain values than the other thicknesses because the higher the thickness, the better the strength, which leads to carbon steel that can withstand the deformations.

The obtained characteristics of stress and displacement are similar to the strain characteristics, as shown in Figure 2(c), Figure 2(d), and Table 2. By considering the yield strength in Figure 2(c), the frame was made of carbon steel, which has a yield strength value of  $2.82685 \times 108 \text{ N/m}^2$ . If the stress value is higher than the yield strength value, permanent deformation will occur in the vehicle frame. All carbon steel thicknesses illustrate that their yield strength values were within the acceptable range. For this reason, they can be utilised for a vehicle frame. By considering the displacement in Table 2 and Figure 2(d), the displacement value is dependent on the strain and stress values, so that the 3.2 mm thickness was better than that of the other thickness. The total frame prices are displayed in the bottom row of Table 2. It is observed that the total frame correlates to the volume of the carbon steel; the 1.6 mm thickness has the most reasonable price of US\$18 per frame, while the 2.3 mm and 3.2 mm thicknesses have prices of \$24 and \$32 per frame, respectively. Based on a further analysis of Table 2, when considering the mass, weight, volume, and total frame price, the 1.6 mm thickness has the best value. Moreover, all thicknesses do not exceed the yield strength limit of the carbon steel rectangular pipe. This indicates that a 1.6 mm thickness is useful for the vehicle frame in terms of mechanical properties and economic aspects, although the strain and displacement of the 1.6 mm thickness are less than those of the other thicknesses.

**2.2. Calculation of Propulsion Power.** Generally, the duration of use and the distance depend on the battery size and the driving power; thus, in this section, the propulsion power is discussed. The propulsion power is a system that converts electrical energy into mechanical energy, which is related to the driving force and the speed of the EPMD. The propulsion power can be calculated from equation (1) [19, 20, 33, 34], where equation (1) is used to calculate the EPMD propulsion power, as summarised in Table 3:

$$P = F_t V = f_m M \alpha_a V + M g C_{rr} V \cos \theta + \frac{1}{2} \rho A C_d V (V - V_w)^2 + M g V \sin \theta \quad (1)$$

By calculating the size of the motor according to equation (1) and Table 3, the result showed that the required power for the driving force was 448.87 W; thus, a 500 W Brushless Direct-Current (BLDC) motor was selected for the EPMD, which provides high torque and speed, resulting in smooth and fast acceleration.

**2.3. Electrical Equipment.** The electrical parameters and positions of the electrical equipment are illustrated in Figure 3 and Table 4. Figure 3(a) shows that the electrical equipment of the proposed EPMD consists of a lithium-ion battery, an EV controller, a headlight, throttles, electric brakes, a forward and reverse switch, a BLDC motor, a monitor display, and an IoT box. As shown in Figure 3(b), the EPMD utilises a lithium-ion battery to supply the electric power for the EV controller, which was installed under the driver's seat, and a BLDC motor, which was installed in the middle of the motor support frame. The EV controller supplies a direct voltage of 48 V to the headlight, BLDC motor, and monitor display, and a direct voltage of 5 V to the throttles, electric brakes, and forward and reverse switches. The total power consumption of all electric equipment in the EPMD was the main factor used to select the lithium-ion battery. The mass of the equipment, including the lithium-ion battery, impacts the weight of the EPMD design. In addition, the economic feasibility of the vehicle can be determined by the price of each individual component. The specifications of the electric equipment installed in the EPMD in terms of position, voltage, current, power, mass, and price are summarised in Table 4.

As shown in Table 4, a large proportion of power consumption is attributed to the BLDC motor, which heavily influenced the sizing of the battery. Normally, the BLDC motor does not operate at the rated power, and the operating time for an elderly person is approximately 1-2 hours per day, which is limited to small residential areas. The lithium-ion battery was designed to store energy for use in driving the EPMD. The battery size was calculated based on the total load power consumption for use within one day, oversized by 20% to account for battery losses and to avoid the depth of discharge, which causes a decrease in the battery's lifetime. Therefore, the battery capacity required for the proposed EPMD is approximately 624 Wh. Hence, a 48-V 13-Ah lithium-ion battery was chosen.

TABLE 2: EPMD structural simulation results.

Parameters	Thickness (mm)		
	1.6	2.3	3.2
Mass (kg)	19.752	27.204	36.466
Weight (N)	193.572	266.602	357.365
Volume (m <sup>3</sup> )	$2.514 \times 10^{-3}$	$3.462 \times 10^{-3}$	$4.641 \times 10^{-3}$
Strain (N/m <sup>2</sup> )	$1.378 \times 10^{-4}$	$1.202 \times 10^{-4}$	$1.343 \times 10^{-4}$
Stress (N/m <sup>2</sup> )	$1.267 \times 10^8$	$1.109 \times 10^8$	$8.709 \times 10^7$
Displacement (mm)	0.297	0.221	0.168
Total frame price (USD)	18	24	32

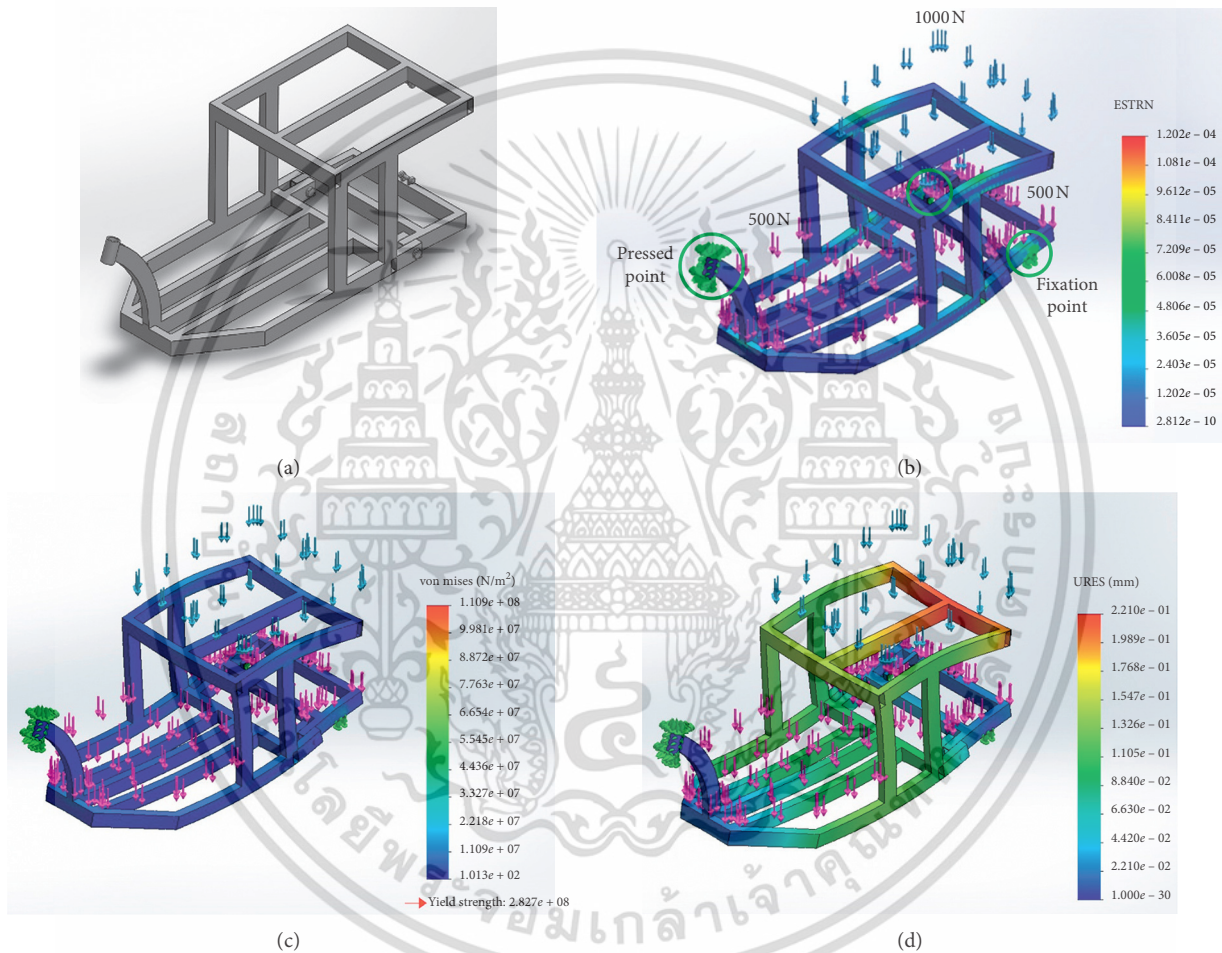


FIGURE 2: Simulation results with thickness of 2.3 mm in terms of strain, stress, and displacement. (a) EPMD frame. (b) Strain results for the EPMD frame. (c) Stress results for the EPMD frame. (d) Displacement results for the EPMD frame.

TABLE 3: The parameters of EPMD propulsion power calculation.

The propulsion power calculation parameter		
Total mass ( $M$ )	200	kg
Mass factor ( $f_m$ )	1	—
Acceleration ( $\alpha$ )	1	m/s <sup>2</sup>
Speed ( $V$ )	2	m/s
Coefficient of rolling resistance ( $C_{rr}$ )	0.012	—
Gravity ( $g$ )	9.8	m/s <sup>2</sup>
Air density ( $\rho$ )	1.225	kg/m <sup>3</sup>
Vehicle frontal area ( $A$ )	0.7475	m <sup>2</sup>
Aerodynamic drag coefficient ( $C_d$ )	0.5	—
Wind speed ( $V_w$ )	0	m/s
Road slope angle ( $\theta$ )	0	deg.
Propulsion power ( $P$ )	448.87	W

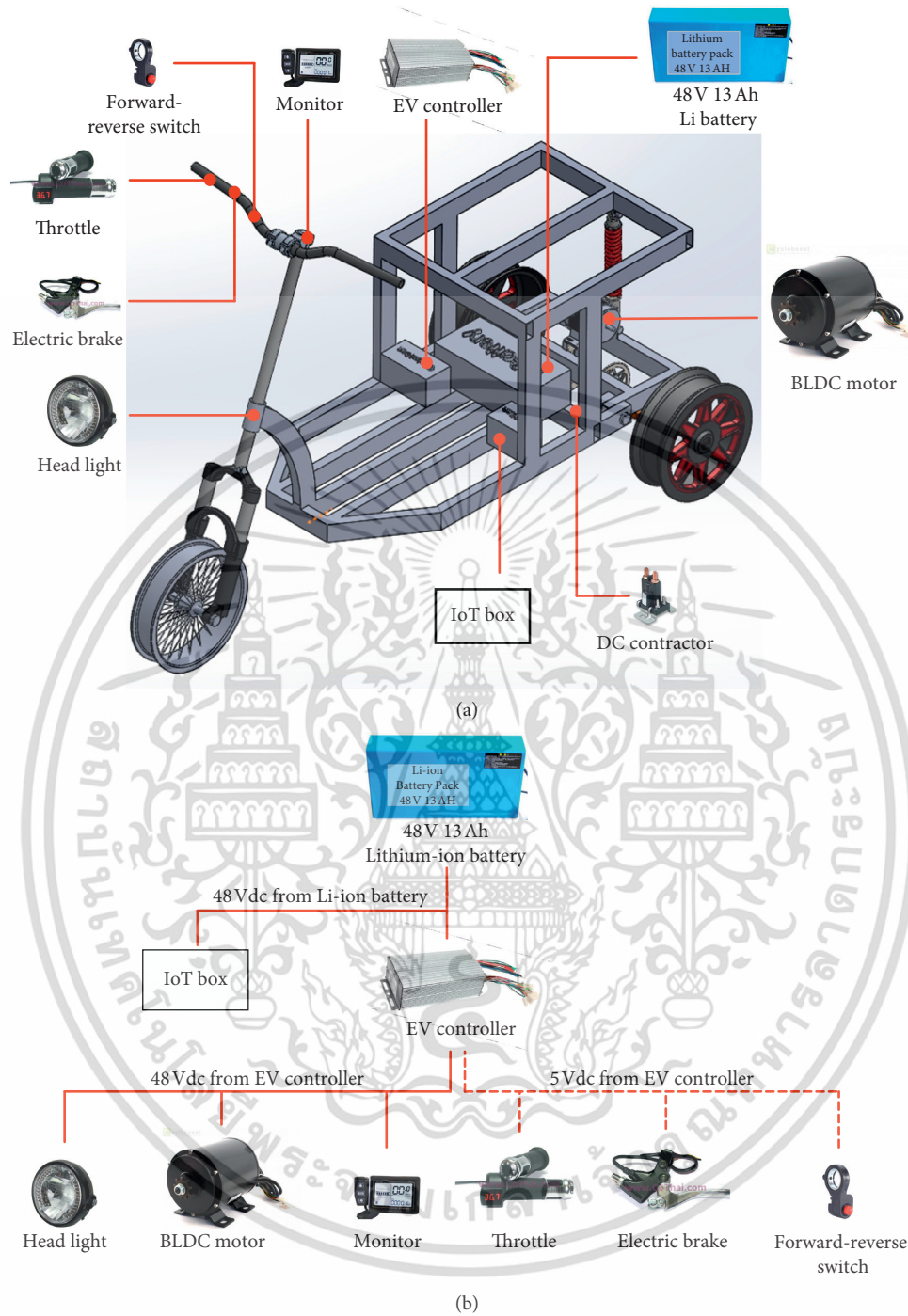


FIGURE 3: Electrical equipment in the EPMD. (a) Position of electrical equipment. (b) Schematic diagram of electrical equipment.

Generally, most EVs are standalone devices, which do not communicate or transmit information between other units. Thus, they usually do not have the ability to connect the Internet. However, the proposed EPMD, consisting of the monitoring and notification system, was created to connect among the EPMD, elderly people, caregivers, and elderly families. All users can check the EPMD status, assess the air quality risk, and assist elderly people in emergencies. Therefore, the proposed EPMD will have an IoT box, which is discussed in the next part.

**2.4. Design of the Sensor System.** Monitoring and notification systems consisting of sensor devices are necessary to reduce the burden of caregivers and to monitor the elderly, as well as to increase the ability and confidence of the EPMD user. The sensor system is designed and assembled in the IoT box, which is used to display and notify the EPMD status, global positioning system (GPS) information, and the air quality status for the EPMD user and caregiver. This system is designed to support real-time operation that is updated every minute and has high accuracy and reliability. In

TABLE 4: Electrical equipment in the EPMD.

Electric equipment	Position	Electrical parameters			Mass (kg)	Cost (USD)
		Voltage (V)	Current (A)	Power (W)		
Head light	Fork frame	48	0.50	24	0.18	18.40
Electric brake	Handle stank	5	0.08	0.4	0.35	20.00
Forward reverse switch	Handle stank	5	0.08	0.4	0.15	6.80
Monitor	Handle connecting	48	0.02	0.96	0.30	25.00
Throttle	Handle stank	5	0.12	0.6	0.35	16.70
EV controller	Main EV frame	48	0.02	0.96	0.55	83.40
BLDC motor	Rear axle support	48	10.42	500	5.08	126.70
IoT box	Main EV frame	48	0.02	0.96	0.32	183.40
Total load		48	11.01	528.28	7.28	480.40
Lithium-ion battery	Main EV frame	48	13	624	7.00	400.00

addition, the system also contains the 4G Wi-Fi router used for transferring the data of the EPMD status and the air quality detection to the user via an Internet connection, as shown in Figure 4. A lithium-ion battery is used to supply power to the IoT box, ESP32 microcontrollers (Espressif Systems, China), and 4G Wi-Fi router, through LM2596HV step-down converters. The first converter steps down the voltage from 48 V to 5 V and sends it to the ESP32 microcontrollers, including the EPMD status board and the air quality board. Another converter is used to step down the voltage level from 48 V to 12 V for supplying power to the 4G Wi-Fi router. The voltage sensor, GPS sensor, and emergency switch in the EPMD status board are used to collect data of the battery voltage, locations of elderly people, EPMD locations, and emergency status, respectively. For the air quality status board, particulate matter (PM), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and humidity and temperature sensors are utilised to detect the PM in air, CO<sub>2</sub>, humidity, and temperature around the EPMD.

**2.4.1. EPMD Status System.** The EPMD status system is important for tracking the EPMD usage status, notifying emergency events, and locating elderly people, and the EPMD based on using different sensors, emergency switches, voltage sensors, and GPS sensors, as shown in Figure 5(a). By considering the operation flow in Figure 5(b), the system operation was implemented when the Blynk and Wi-Fi were properly connected to the ESP32 board. In the next step, the system checks the status of the emergency switch. If the emergency switch is pressed, the system will notify the emergency status to the caregiver via the Blynk and Line applications. The system will hold the emergency state for 20 s and then restart the system. On the other hand, if the emergency switch is not pressed, the emergency status is normal and skips to the next step. The battery terminal voltage is measured by a voltage sensor to evaluate the remaining battery capacity. When the remaining battery capacity is less than 20%, the system will alert via the EPMD user and caregiver via the Blynk and Line applications. Likewise, the GPS of the EPMD is used to calculate the distance between the EPMD and the nearest charging station [35]. The system will show a list of the available charging stations around the EPMD areas to support elderly decisions

in unexpected situations caused by an out-of-charge battery during the use of the EPMD.

The location of the elderly people and the EPMD are shown in the Blynk application. For the location of the elderly people, the Blynk application receives latitude and longitude data from an elderly person's smartphone, which is sent to the ESP32 board every 30 s. For the EPMD location, the board reads the latitude and longitude data from a NEO-6M V2 GPS sensor installed in the EPMD. Next, the location data are shown in the Google map widget in the Blynk application. The accumulated data (emergency status, battery voltage, elderly position, and EPMD position) are recorded in the Google Cloud platform database in the spreadsheet section. This data are automatically recorded every minute, to be used as a database for further development of the EPMD in the future.

**2.4.2. Air Quality Detection System.** The air quality detection system utilises a particulate matter sensor (PMS 3003, Plantower Technology, China), a digital humidity and temperature sensor (DHT11, Aosong Electronics Co., China), and an intelligent infrared carbon dioxide module (MH-Z14A, Winsen Electronics Technology Co., China) to detect PM, temperature, humidity, and CO<sub>2</sub>, as shown in Figure 6(a). By considering the operation flowchart in Figure 6(b), the air quality detection system starts by detecting the Blynk and Wi-Fi connection. Next, the ESP32 board receives the PM data from the PMS 3003 sensor and then separates the data according to the PM diameters: 0.3–1.0  $\mu\text{m}$  (PM1), 1.0–2.5  $\mu\text{m}$  (PM2.5), and 2.5–10  $\mu\text{m}$  (PM10). The obtained data were collected in units of micrograms per cubic metre ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), then converted into the Air Quality Index (AQI) [26], and sent to the Blynk application to assess the risk of elderly health impact based on the air quality in the area. The temperature and humidity in the air were measured by the DHT11 sensor, converted into digital signals, and sent to the ESP32 board. The system sends temperature and humidity values to the Blynk application. The CO<sub>2</sub> density is measured by the MH-Z14A sensor, which gives a value in parts-per-million (ppm). The CO<sub>2</sub> value is sent to the Blynk application and compared to the standard of the American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) [36] for

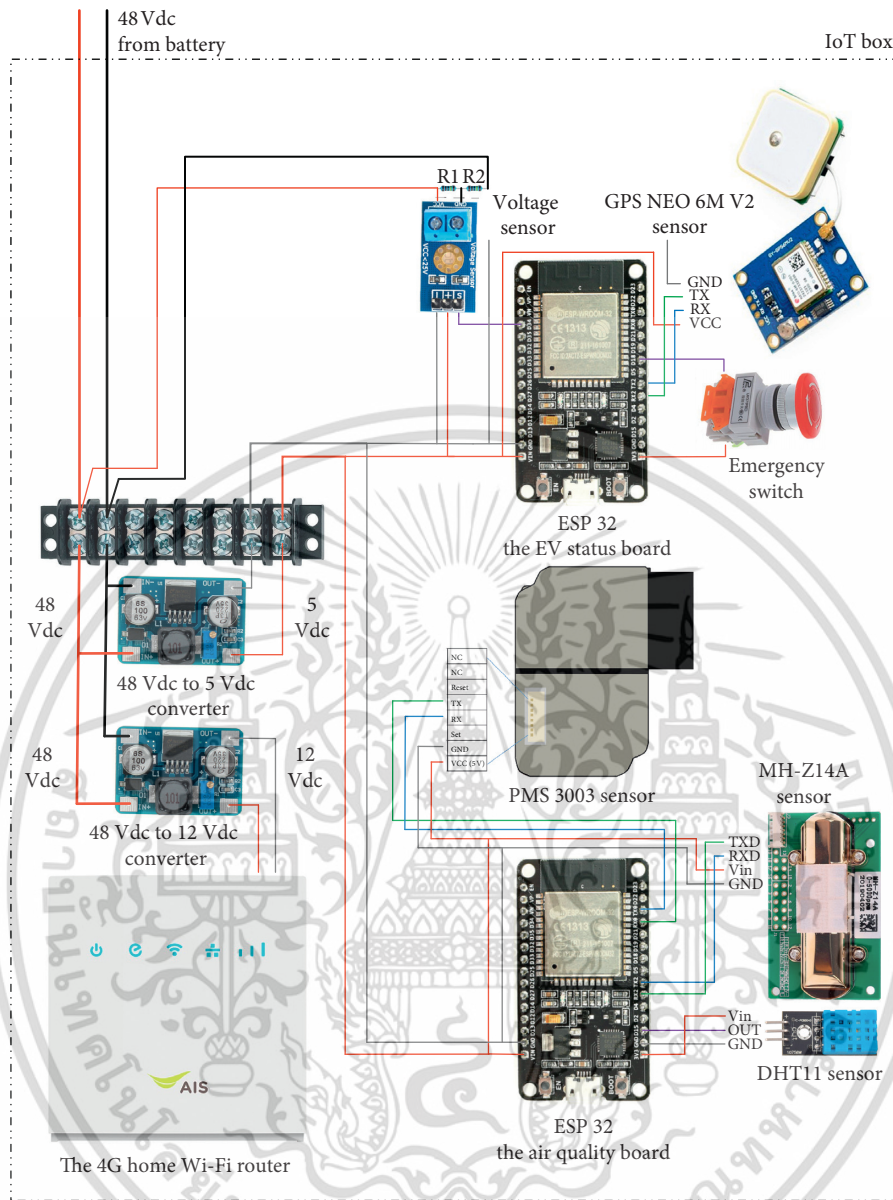


FIGURE 4: Monitoring and notification systems in the IoT box.

elderly health impact evaluation. Finally, the PM, AQI, temperature, humidity, and CO<sub>2</sub> data are automatically recorded in the database on the Google Cloud platform in spreadsheets, which is used as air quality data for a given area.

**2.4.3. Data Transmission System.** The overall proposed IoT system used in the EPMD is depicted in Figure 7, which consists of the EPMD status board and the air quality board. Both boards receive and process data from various sensors installed in the EPMD. Subsequently, the processed data are sent to the 4G Wi-Fi router, which is connected using cloud computing via the 4G wireless communication system. This has great benefits for sensor systems, data transfer, and EPMD development in the future. The data are recorded in the three applications on cloud servers, including Blynk,

LINE Notify, and Google Cloud, and the results are shown via application interfaces. Therefore, the EPMD user and caregivers can observe real-time information, notification, and historical data via smartphone applications. In addition, they can also analyse the usage from the database in the cloud server, which is convenient for monitoring the EPMD status and health risk assessment for highly effective elderly care.

**2.5. Overall Specifications of the EPMD.** As shown in Figures 8(a) and 8(b), the designed dimensions of the EPMD are 140 × 65 × 115 cm<sup>3</sup> (length × width × height), which is suitable for comfort, safety, ease of ingress and egress, and ease of propulsion. As shown in Figure 8(c), a handle stank, a fork frame, and a front wheel rim (indicated by numbers 1, 2, 3, and 4) are utilised to support

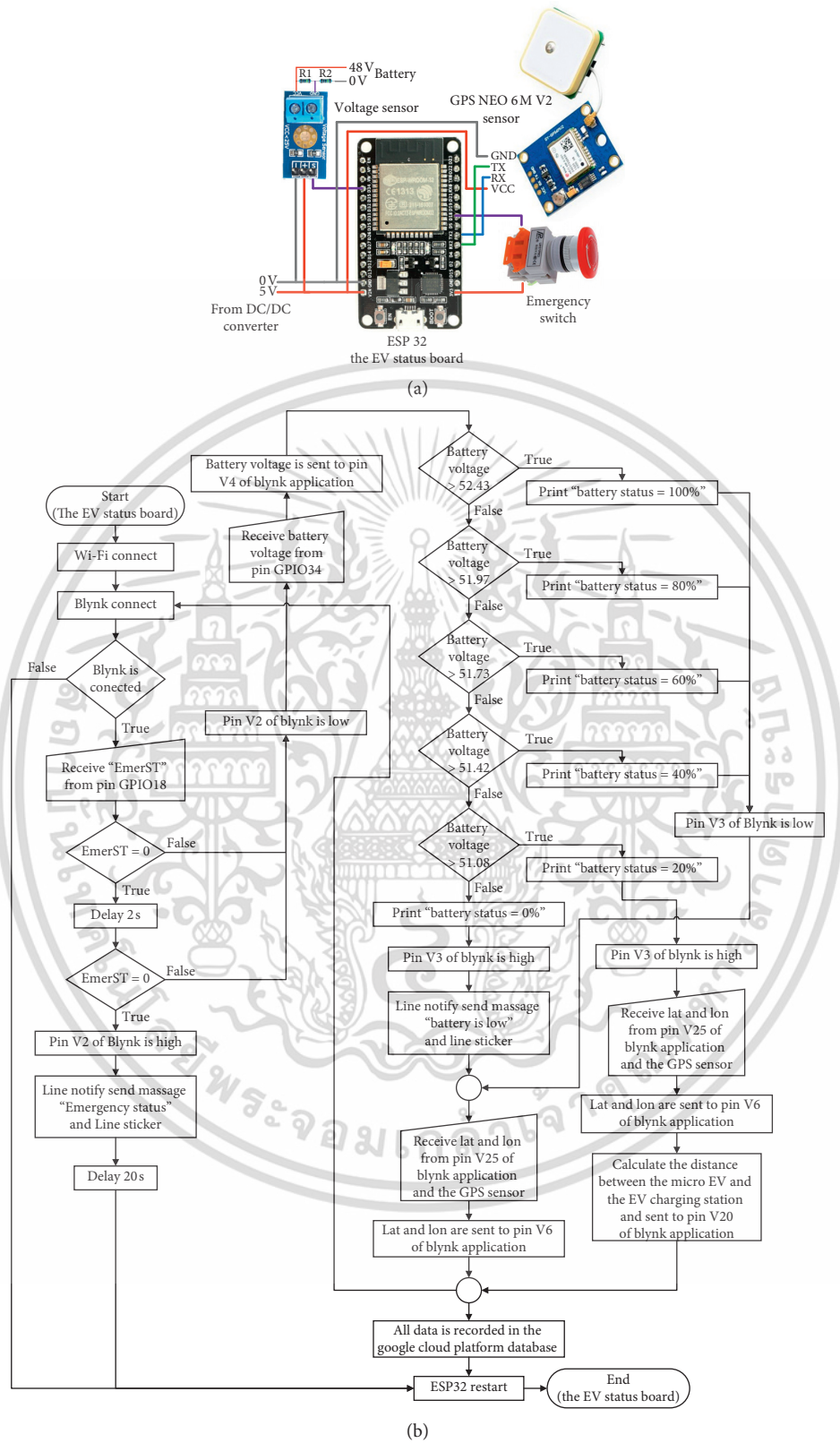


FIGURE 5: EPMD status system. (a) EPMD status system diagram. (b) Operating flowchart of EPMD status system.

the weight of the front and control the direction of the EPMD's movement. A carbon steel rectangular pipe is used as the main structure (indicated by number 5) and the rear

axle support (indicated by number 6), which can support a force up to 2000 N and consists of the structure, electric and electronic equipment, BLDC motors, batteries, and loading

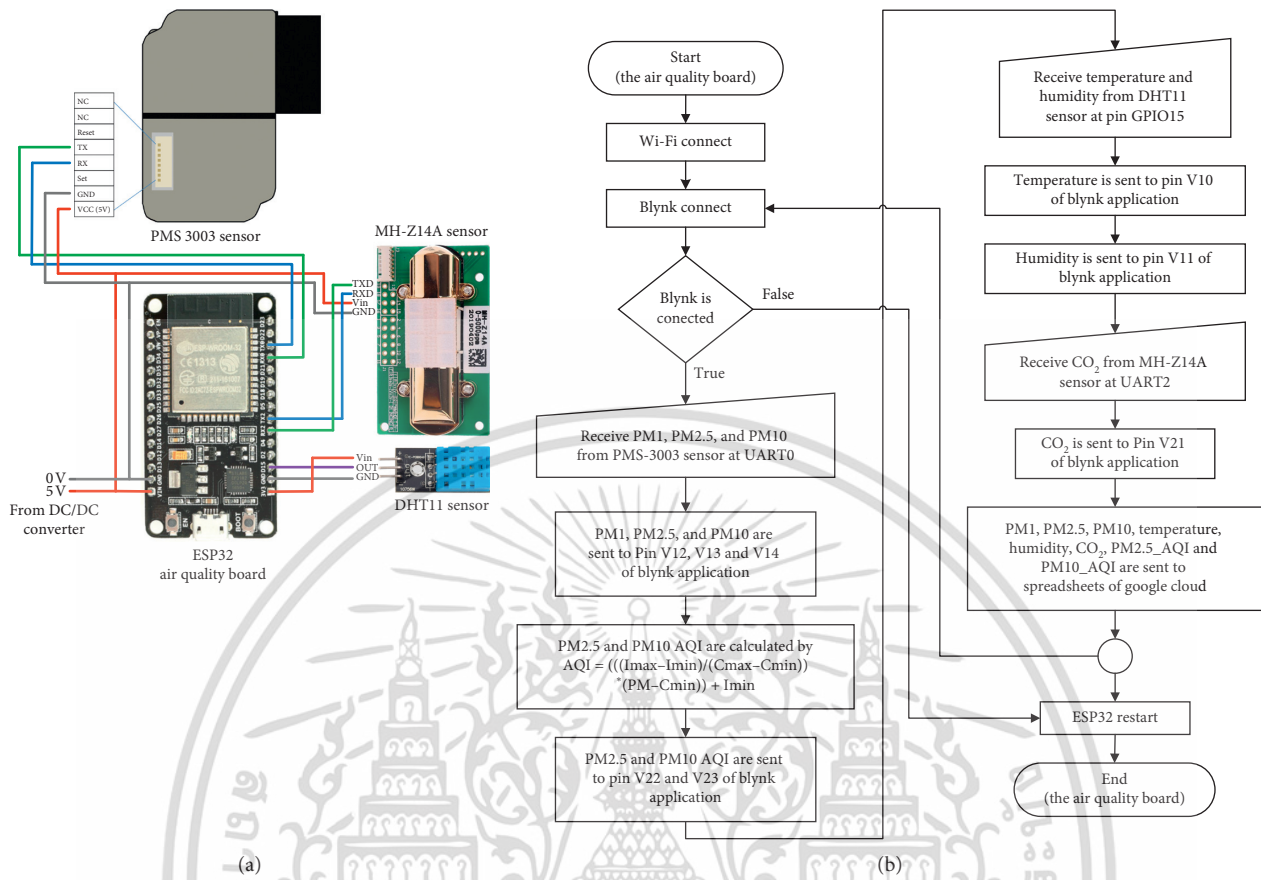


FIGURE 6: Air quality detection system. (a) Air quality detection diagram. (b) Operating flowchart for air quality detection system.

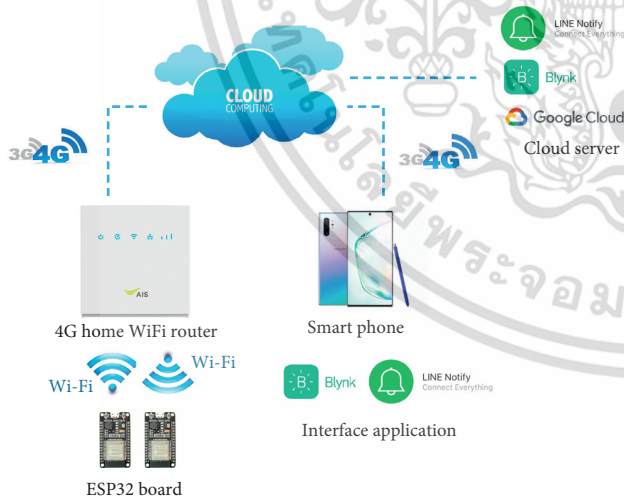


FIGURE 7: Data transmission system.

weights (driver and carried weights). In addition, to improve the ride quality and vehicle handling for elderly people during driving, a 330-mm shock absorber (indicated by number 7) is used to absorb the vibration. The rear axle and rear wheel (indicated by numbers 8 and 9) are attached to the rear axle support with a pedestal bearing (indicated by number 10) as the main part of the electric vehicle driving. For the drive system, a BLDC motor (indicated by number

11) is used as a central motor to spin the chain, which transmits the force to the chain gear (indicated by number 12) mounted on the rear axle to drive the EPMD. The BLDC motor is powered by a lithium-ion battery (indicated by number 13) via the EV controller (indicated by number 14), which is used to adjust the speed of the EPMD depending on the driving needs. For the EPMD brake, the electric brake is connected to the control box to cut off the power of the motor, while the oil brake is connected to the disc brake (indicated by number 15), which is mounted on the rear axle, to slow down the EPMD. Finally, the IoT box (indicated by number 16), comprising the monitor and notification systems, is designed to increase the efficiency and usability of the EPMD.

The EPMD was built according to the above design as a three-wheel EV powered by the BLDC motor, as shown in Figure 9. The EPMD can actually run on the roads of a university, which has several road conditions: smooth roads, rough roads, steep slopes, etc. The speed range can be between 0 and 30 km/h, and the designed structure can bear a weight up to 2000 N. In addition, the vehicle's sensor system is able to effectively respond to the proposed functions of monitoring and notifying.

The results of the EPMD test are presented in the next section based on the differences in road conditions, velocities, and total weights. In order to analyse the EPMD performance, the parameters of battery voltage and total

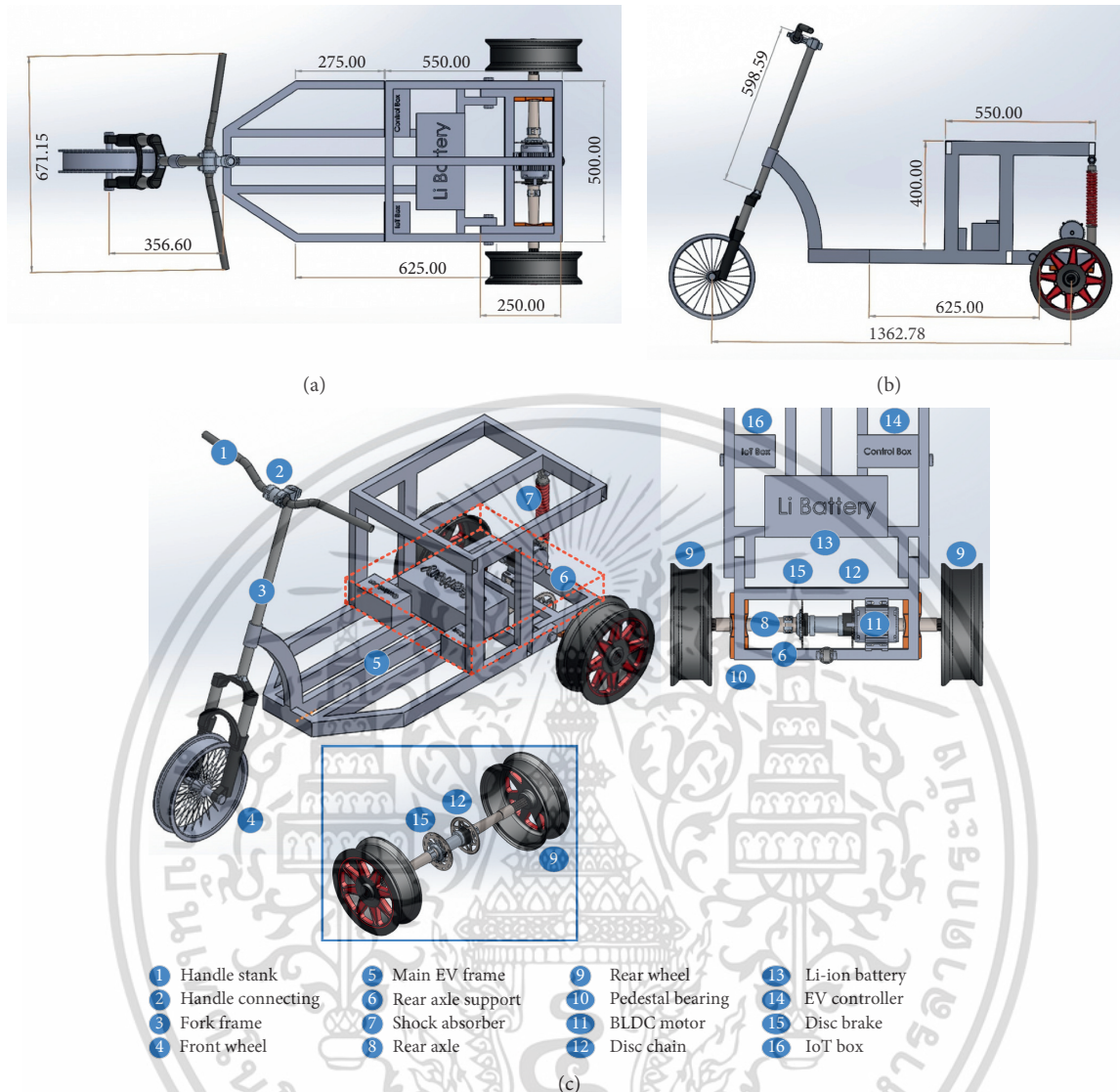


FIGURE 8: EPMD dimensions and structure. (a) Top view dimensions. (b) Side view dimensions. (c) EPMD structure.

operating time were used. In addition, the monitor and notification of the sensor system are detailed in Section 3 to describe screen patterns, notification format, and interaction with the obtained results.

### 3. Test Results of the Elderly Personal Mobility Device

The EPMD was built and tested at a university with a wide variety of testing conditions and measurement tools. By considering equation (1) in Section 2, it was observed that the important variables that affect the propulsion power are total weight, speed, acceleration, and road surface. In this case study, the EPMD test was set to have 12 cases, which reflect the differences of the road surfaces, speeds, and weights, as shown in Table 5. For the differences between road surfaces, i.e., smooth (cement road type) and rough (gravel road type), road surfaces were studied to observe the battery voltage level and total operating time of the EPMD with various total weights.

The total weight is the sum of the EPMD's weight, which is approximately 70 kg, and the driver's weights, which are 50, 70, and 90 kg. The obtained results are explained in Section 3.1. Speeds of 5, 15, and 25 km/h with various total weights were tested on the smooth road surface; the obtained results are explained in Section 3.2. Next, the EPMD was compared with a commercial elderly EV to determine the performance of applications that could meet the needs of the elderly. The performance was determined while operating and charging the battery, as explained in Section 3.3. Finally, the design and test results of the proposed sensor system for supporting travel, monitoring the EPMD status and air quality, locating the elderly people, and notifying in emergencies are described in Section 3.4.

*3.1. Comparison of the EPMD Driving Effects on Different Road Surfaces.* The EPMD was tested using smooth and rough road surfaces to study the effects of the battery voltage and

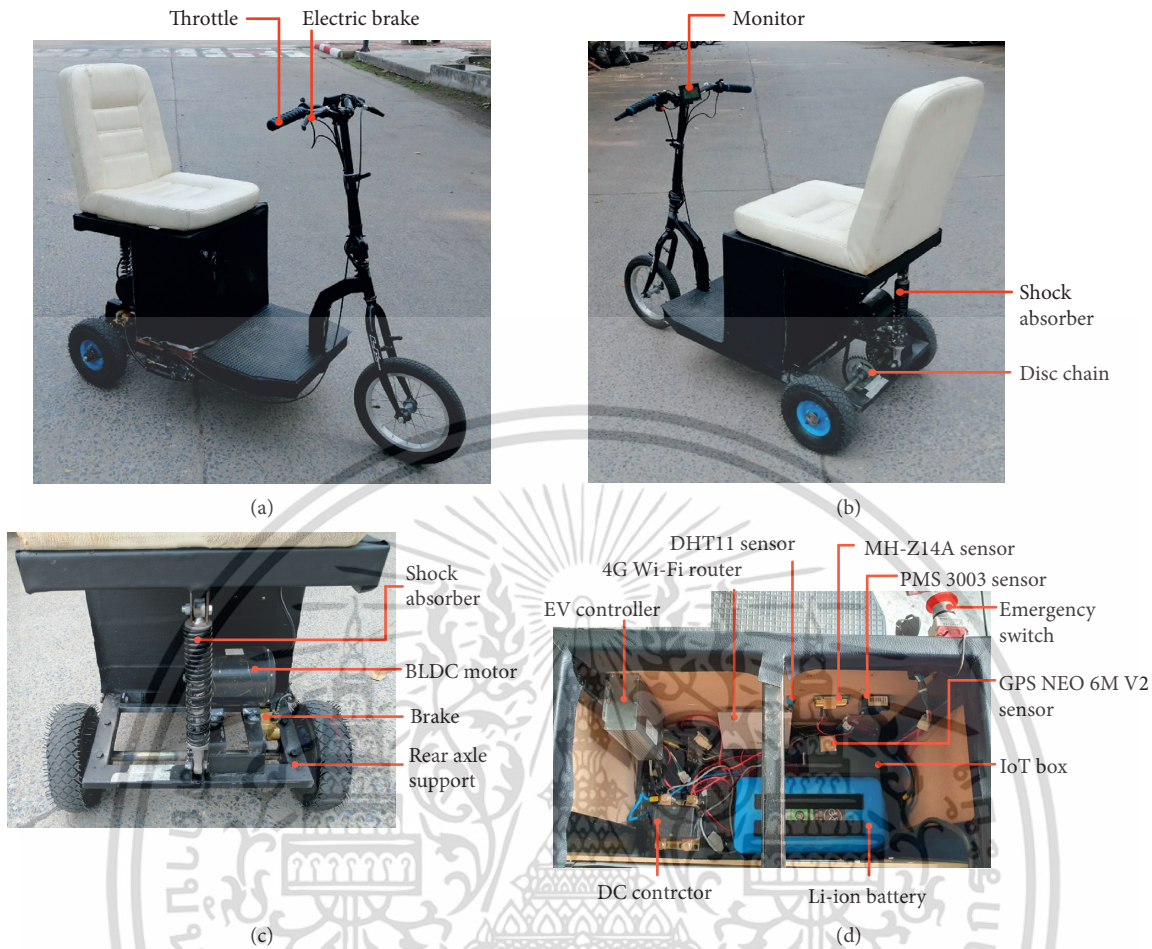


FIGURE 9: EPMD components. (a) The frontward isometric view. (b) The backward isometric view. (c) EPMD rear axle support structure. (d) Electrical equipment of the EPMD.

TABLE 5: EPMD test cases.

Case	Road surface	Total weight (kg)	Speed (km/h)
1	Smooth	120	5
2	Smooth	120	15
3	Smooth	120	25
4	Smooth	140	5
5	Smooth	140	15
6	Smooth	140	25
7	Smooth	160	5
8	Smooth	160	15
9	Smooth	160	25
10	Rough	120	5
11	Rough	140	5
12	Rough	160	5

total operating time, as shown in Figure 10. Due to the driving speed limitation in residential areas and the safety of the users while driving on both road surface conditions, the tested speed was set to 5 km/h. For total weights of 120, 140, and 160 kg, results were obtained using a Fluke 435-II Power Quality and Energy Analyzer. The obtained results of the battery voltage and total operating time for both road surfaces are presented in Figure 11.

The case of a total weight of 120 kg is presented in Figure 11(a). The results show that the battery voltages of both road surfaces constantly decrease according to the period of use. However, the reduction rate of the battery voltage on the rough road is higher than that on the smooth road with a low battery. In addition, on the rough road surface, the EPMD needs more propulsion power to drive, which results in a greater consumption of current and voltage, causing voltage fluctuations. The result, described in the form of equation (1) as the rolling resistance coefficient, directly affects the propulsion power; for the smooth road surface and the rough road surface, the rolling resistance coefficients are 0.012 and 0.020, respectively. By considering the total operating time, the case of a smooth road surface is 242 min with a distance of 20.17 km, while the case of a rough road surface is 214 min with a distance of 17.83 km. Results for the cases of total weights of 140 and 160 kg are shown in Figures 11(b) and 11(c), respectively. By considering only the road surfaces, the behaviour of the battery voltage and total operating time are similar for the case of 120 kg; however, when the weight increases, the total operating time tends to decrease.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



FIGURE 10: Road surface conditions used in case studies. (a) Smooth road (cement road type). (b) Rough road (gravel road type).

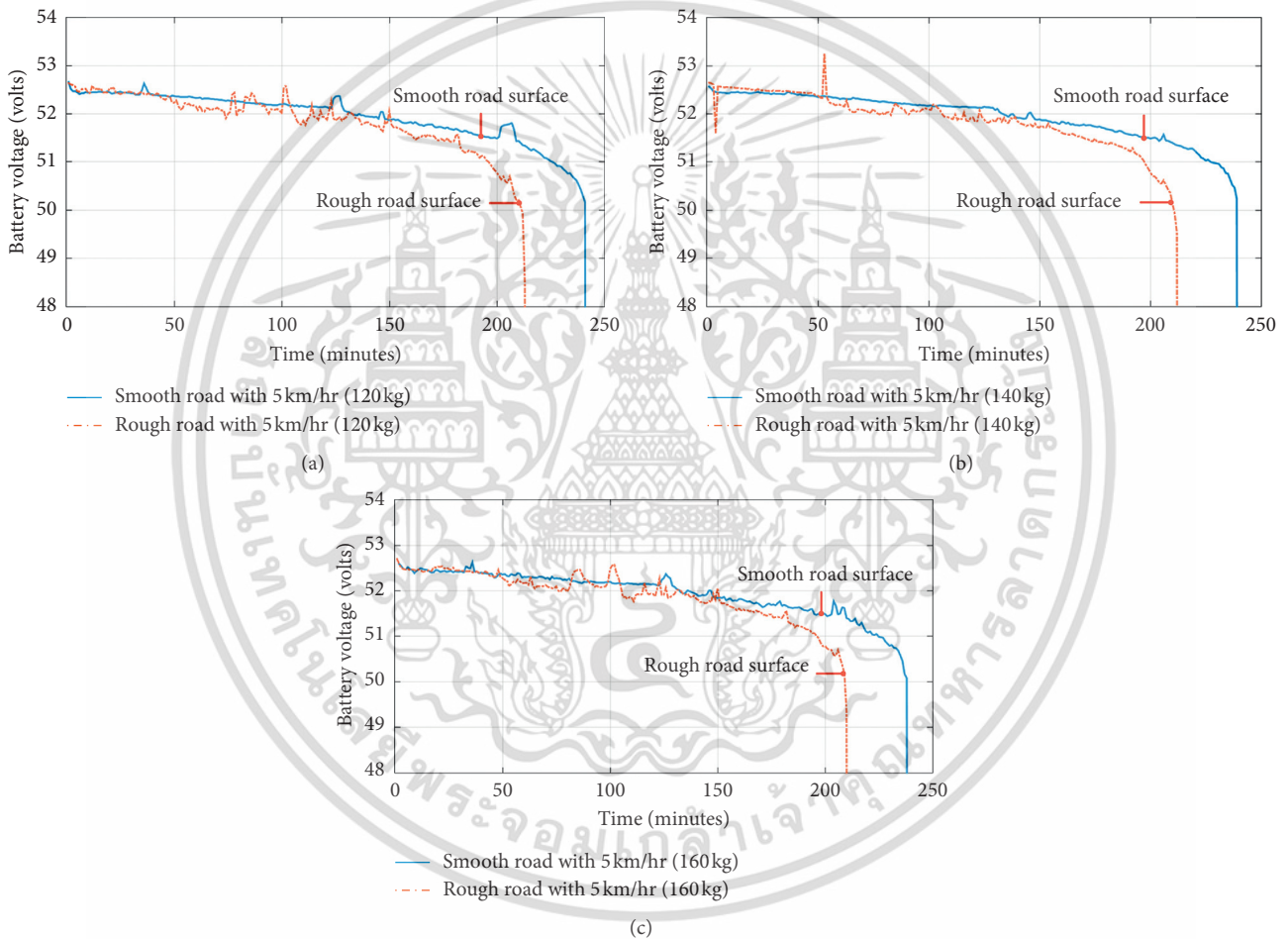


FIGURE 11: The obtained results of the different road surfaces with each total weight. (a) 120 kg. (b) 140 kg. (c) 160 kg.

By increasing the weight and not changing the road surfaces, the EPMD requires more propulsion power, which results in reduced operating time. For this reason, the total weight of the propulsion power in equation (1) is taken into consideration. The total operating time for the smooth road surface in cases with total weights of 140 and 160 kg is 240 and 239 min, which correspond to distances of 20 and 19.92 km, respectively, while the rough road surface results in total operating times of 213 and 211 min, which correspond to distances of 17.75 and 17.58 km, respectively.

In summary, by changing the road surfaces and not the speed, the case of the rough road surface with all total weights provides higher voltage fluctuations and lower total operating time compared with the smooth road surface. The obtained distances for the smooth road surface are higher than for the rough road surface by approximately 11.57%. This indicates that an estimation of the distance of EPMD operation can benefit from an analysis of the road surface. By changing the total weight and not the speed, the operating time tends to decrease when the total weight is increased.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.2. Comparison of EPMD Driving at Different Speeds.** It has been shown that the EPMD can be driven on both smooth and rough road surfaces. The distance is approximately 20 km/charge, which is suitable for use in residential areas. Most residential areas have a smooth road and shared road users, so that speed is another factor affecting driver safety. Generally, in residential areas, the speed is in the range of 15–25 km/h; thus, in this test, the EPMD was tested with various speed adjustments. The EPMD was tested at speeds of 5, 15, and 25 km/h with various total weights. The results of the battery voltage and total operating time for each total weight are shown in Figure 12.

In Figure 12(a), the EPMD with a total weight of 120 kg is considered, and the battery voltage decreases with respect to the period of use. When the EPMD is driven at high speed, it requires more propulsion power, resulting in greater consumption of current and voltage and causing voltage fluctuations and low operating times. For speeds of 5, 15, and 25 km/h, the total operating times are 242, 118, and 73 min, which correspond to distances of 20.17, 29.50, and 30.42 km, respectively.

As shown in Figures 12(b) and 12(c), the total weights of 140 and 160 kg have battery voltage reductions and total operating times similar to those for a total weight of 120 kg when the testing speed is varied. However, according to equation (1), the total weight of the EPMD has a direct effect on the total operating time. A total weight of 160 kg results in the lowest operating time when compared to the other weights at the same speed. For a total weight of 140 kg at speeds of 5, 15, and 25 km/h, the total operating times are 240, 117, and 70 min, corresponding to distances of 20, 29.25, and 29.17 km, respectively. For a total weight of 160 kg, at speeds of 5, 15, and 25 km/h, the total operating times are 239, 115, and 68 min, with corresponding distances of 19.92, 28.75, and 28.33 km.

Next, the distances obtained at the tested speeds are considered. Although the lowest speed offers the best total operating time, it does not provide the longest distance. For example, the EPMD weight of 120 kg tested at a speed of 5 km/h has the best total operating time, while the distance is approximately 20 km. Speeds of 15 and 25 km/h result in lower total operating times but result in a distance of approximately 30 km, which is greater than that obtained for a speed of 5 km/h.

**3.3. Comparison of the EPMD with a Commercial Elderly EV.** It has been shown that the EPMD can be driven on several road surfaces at various speeds and weights, which provide a range of distances that cover the daily use of elderly people. By considering the efficiency of the EPMD in response to its use by elderly people, the EPMD is compared with a commercial elderly EV, as shown in Figure 13. For this comparison, the motor size and battery capacity of the commercial elderly EV, which are close to those of the EPMD, were selected to be able to directly compare their operation, as shown in Table 6. The commercial elderly EV uses two 250-W gear motors to drive the left and right wheels separately. The motors efficiently transmit power to

the wheels directly, but they create a strong jolt while starting. A 480-Wh lithium-ion battery is used, which is sufficient to power the motor. In addition, a common charger is used, which has a charging time of up to 7.41 h. For the EPMD, the 500-W BLDC motor is used to transmit power through the chain to spin the rear axle, which can reduce the jolt while starting. A 625 Wh lithium-ion battery and a fast charger are used, which can shorten the charging time to 2.89 h. Although the battery capacity of the EPMD is higher than that of the commercial elderly EV, the charging time of the EPMD is lower, because the EPMD uses a fast charger that supplies dc power of 48 V, 5 Ah, 240 Wh; while the commercial elderly EV uses a 24-V 3-Ah 72-Wh charger. In addition, the commercial elderly EV has a lower weight than the EPMD because the commercial elderly EV has a lightweight aluminium frame. However, the aluminium frame has a limitation in the carry load of no more than 100 kg. On the other hand, the EPMD is made has a carbon steel frame, which provides great strength but is relatively heavy. The EPMD frame can support outdoor use and a load of up to 200 kg.

Next, the speed, operating time, and distance are compared. The commercial elderly EV has a maximum speed of 5 km/h with a distance of 24.92 km/charge, which is not suitable for outdoor use, while the proposed EPMD has a maximum speed of 25 km/h with a distance of 30.42 km/charge (the distance is 19.92 km/charge for a speed of 5 km/h), which is a controllable speed for elderly people and is suitable for use within residential areas. If both EPMD and commercial elderly EV are driven at a speed of 5 km/h, the distance of the EPMD is less than that of the commercial elderly EV because the BLDC motor efficiency decreases when the EPMD speed decreases, and the EV weight of the EPMD is greater than that of the commercial elderly EV of 25 kg. In terms of cost, it was determined that the cost of the EPMD is higher than that of the commercial elderly EVs because it is still a prototype. If it is developed on a larger scale, the production costs will be reduced. In addition, the EPMD can also be driven at higher speeds, achieve greater distances, and charge faster. Although the EPMD has a higher weight, it can support a 200 kg payload and has a sensor system that is not available in the commercial elderly EV. The sensor system can help the elderly to assess travel health risks and alert caregivers in the event of an emergency. Therefore, the EPMD is more cost-effective and able to meet the needs of elderly people, caregivers, and elderly families.

**3.4. Results for the Sensor System.** The sensor system is designed to monitor the EPMD status, air quality, elderly people, and EPMD location. All information is sent to the mobile application on the smartphones of the users, caregivers, and elderly families. LINE Notify, Google Cloud, and Blynk servers were used as the data storage servers of the system. LINE Notify is used to alert the occurrence of an emergency. Google Cloud accumulates all information as a database in terms of the data logger for information system

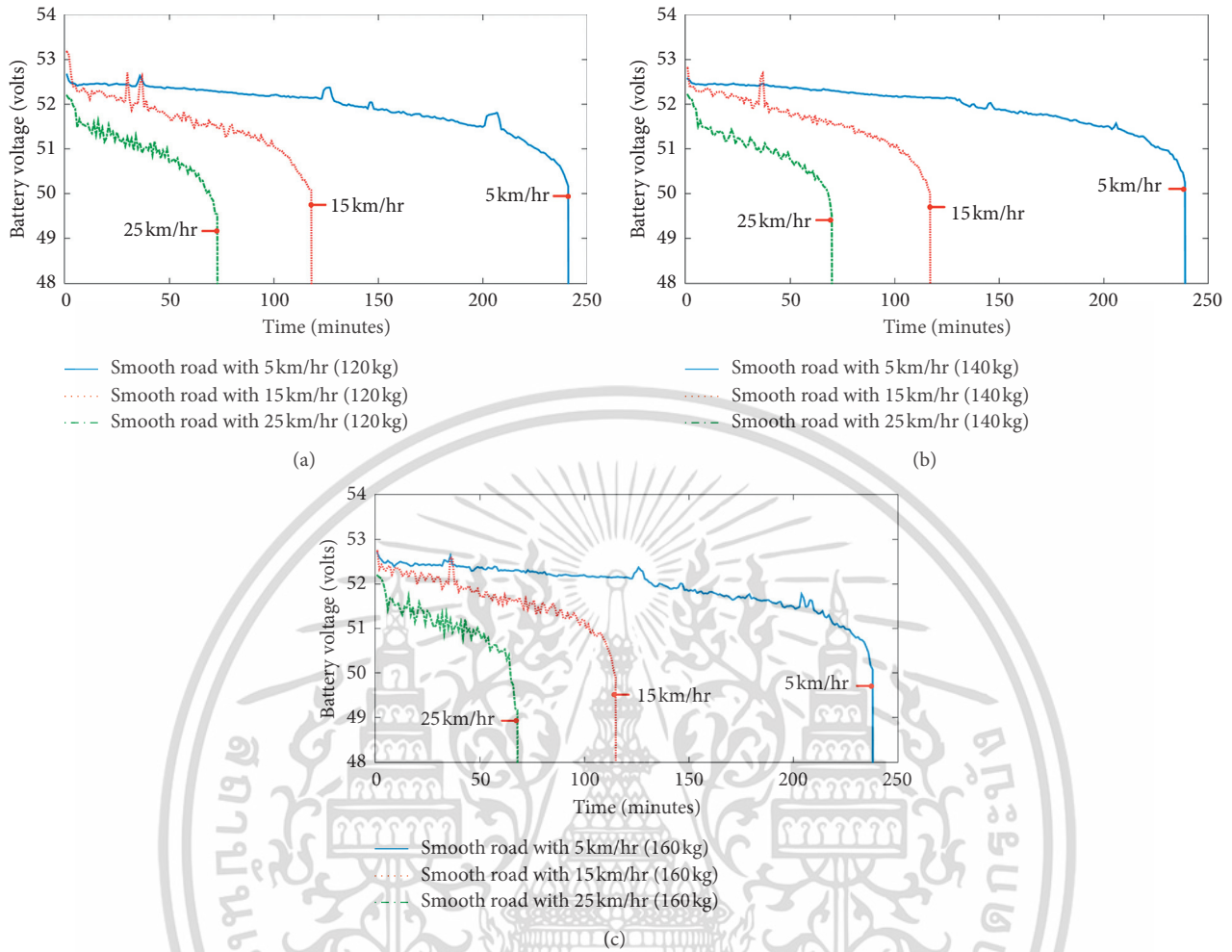


FIGURE 12: The obtained results at different speeds with each total weight. (a) 120 kg. (b) 140 kg. (c) 160 kg.

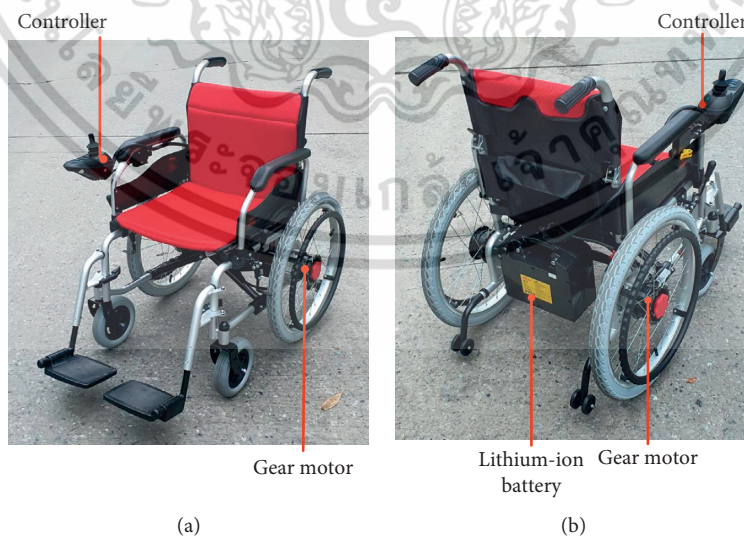


FIGURE 13: The commercial elderly EV. (a) Frontward isometric view. (b) Backward isometric view.

development. Blynk is a system-user interface that can be accessed with multiple users and is responsive to work in real time. The accumulated data can be used to develop the

EPMD for elderly people, distribute the air quality detection system, and indicate the location of the elderly people and the EPMD. ไม่นานมานี้ให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 6: Comparison of a commercial elderly EV and the EPMD.

Condition	The commercial EV	The EPMD
Motor	Gear motor 2 × 250 W	BLDC motor 500 W
Battery	Li-ion battery 24 V, 20 Ah, 480 Wh	Li-ion battery 48 V, 13 Ah, 624 Wh
Charge time	7.41 hr	2.89 hr
Structural material	Aluminum	Carbon steel
EV weight	45 kg	70 kg
Maximum carry weight	100 kg	200 kg
Maximum speed	5 km/hr	25 km/hr
Usable time (5 km/hr)	4.98 hr	3.98 hr
Usable distance (5 km/hr)	24.92 km	19.92 km
Sensor system	No	Yes
EV cost	770 USD	880.4 USD

The interface display is shown in the Blynk application and is divided into five parts: board status, EPMD status, air quality detection, history graph, and GPS. First, the board status is a hidden part of the normal display, as shown in Figure 14(a), and is responsible for showing the connection of each board. This part consists of the EPMD status board and the air quality detection board, which shows the details of the board in the current status. Next, the EPMD status part is used to show the EPMD status, the emergency alarm, the charging alarm, and the battery voltage level, as shown in Figure 14(b).

In the air quality detection part, shown in Figure 15(a), the real-time parameters of the air quality detection system are shown in terms of temperature, humidity, particulate matter (PM1, PM2.5, PM10), AQI, and CO<sub>2</sub>. PM2.5 is calculated as the AQI, which is used to consider the health effects according to the AQI criteria of Thailand. For CO<sub>2</sub>, the ASHRAE 62.1-2013 standard [23, 36] of the United States is used to estimate the CO<sub>2</sub> value. In Figure 15(b), the history graph part shows the recorded results of all parameters. Historical values can be retrieved for 15 min, 1 h, 6 h, 1 day, 3 days, and 1 week. This part can be used to analyse the suitability of outdoor activities of elderly people and to send the data of the graph to the user's e-mail to show the detailed values in terms of the CSV file.

In this research, the air quality parameters were measured by the air quality detection system every minute and recorded on the Google Cloud and Blynk servers between 22 and 27 April 2020. The obtained results are shown in Figure 16. By considering the obtained results, the PMs consist of PM1, PM2.5, and PM10, which change similarly each day of each season. The evaluation of PMs in ambient air is calculated as the AQI to compare the effects on elderly health. The AQI result of PM2.5 is analysed daily, as shown in Figure 16. It is found that the AQI is very high in the morning (6:00 a.m. to 1:00 p.m.). Elderly people should refrain from outdoor activities because they can cause

irritation of the eyes and respiratory system. The AQI decreases in the afternoon and evening (1:00–7:00 p.m.) and increases again at night. Therefore, the most suitable time for outdoor activities is in the afternoon and evening (1:00–7:00 p.m.). The characteristic of PM2.5 is not the same every day, and there are unequal values in each month; thus, the air quality detection system is necessary for elderly people to assess the air quality risk by themselves.

The GPS part was designed to inform caregivers and elderly families during normal and accident usage. The GPS data are extracted by the Blynk application on a smartphone, while the EPMD GPS data are extracted by the GPS sensor installed in the EPMD. Both GPS datasets are sent to the EPMD status board. Next, the board sends the GPS data to the Google map widget of the Blynk application, as shown in Figure 17. The results show that GPS data are very accurate when obtained outdoors without an obscuring building.

By considering the deviation of the GPS sensor, the GPS was tested by measuring five test points within the university. The GPS results for the elderly people and the EPMD are compared in Figure 18 and Table 7. The test results show that the GPS data of elderly people are accurate because the data was pulled directly from the smartphone but had a slow response to movement. The GPS of the EPMD was better able to respond to movement but gave a slightly distorted accuracy of approximately 1–2 m. Table 7 shows the latitudes and longitudes of the five test points to compare the measurement capabilities of both types of GPS data, and the distance between the measurement results was calculated as a deviation. The deviation of both GPS values found that the maximum deviation was 2.484 m, and the lowest deviation was 1.013 m, which are considered to be acceptable distances.

By considering the findings for the nearest charging station, the sensor system was tested to calculate the distance between the EPMD and the charging station, which is very beneficial to elderly people when the EPMD battery is low. Elderly people can look for the nearest station and assess their ability to get to the station. In this research, three charging stations were defined: at coordinates 13.731004 and 100.781921 (charging station A), at coordinates 13.729856 and 100.771049 (charging station B), and at coordinates 13.725866 and 100.781105 (charging station C). The five test points were distributed within the university, as shown in Figure 18. The distances between all test points to the three charging stations were calculated using the spherical law of cosines method given by equations (2) and (3) [35], as listed in Table 8. The obtained results show that the calculated values are very close to the actual distances, with a maximum deviation of 0.85 m and a minimum deviation of 0.23 m, which are considered to be acceptable distances:

$$\alpha_c = \cos^{-1} [\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 + \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 \cdot \cos \Delta \lambda], \quad (2)$$

$$d = 2\pi R \cdot \frac{\alpha_c}{360}. \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

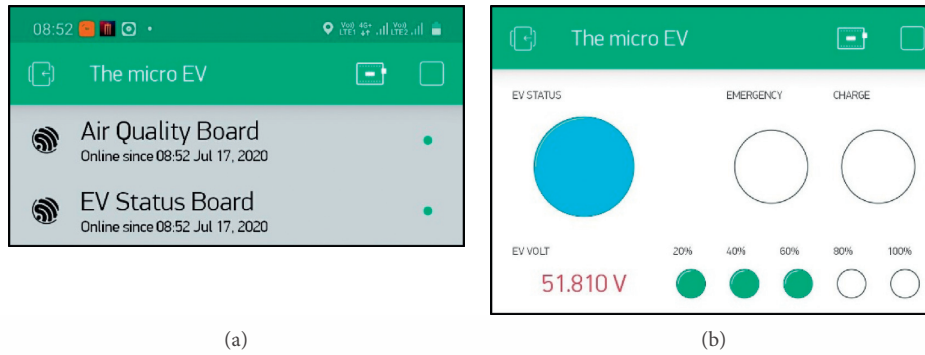


FIGURE 14: The board status part and the EV status part in the Blynk application. (a) Board status part. (b) EPMD status part.

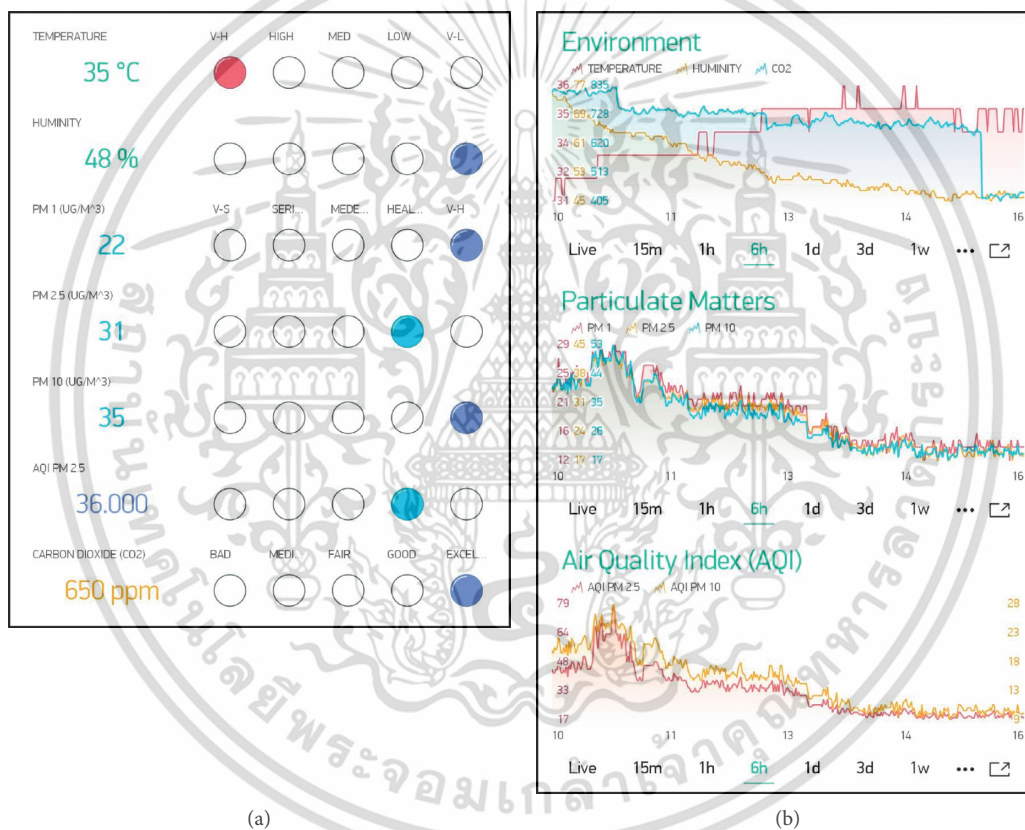


FIGURE 15: The air quality detection part and the history graph part in the Blynk application. (a) Air quality detection part. (b) History graph part.

3.5. Actual Market of EPMD. EPMD was designed as vehicle for elderly people for traveling indoor and outdoor in daily life. The design was considered from the structural system, selection of materials, and functionalities which were suitable for the elderly people. For commercial development of the EPMD, the chassis should be developed as either aluminum or carbon fiber to have a lighter frame weight, but it must be able to support the same payload. The electric equipment was suitable for use in the village or countryside.

For the sensor system, it was developed in accordance with personal health information for users and can connect EPMD, elderly person, and caregivers together through a mobile application which reduces the burden of the caretaker, increases the safety and freedom of traveling for the elderly person, and creates a distribution of air quality monitoring stations in many areas. When developing into the commercialization, the sensors system must be modified the transmission pattern using a GSM board instead of the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

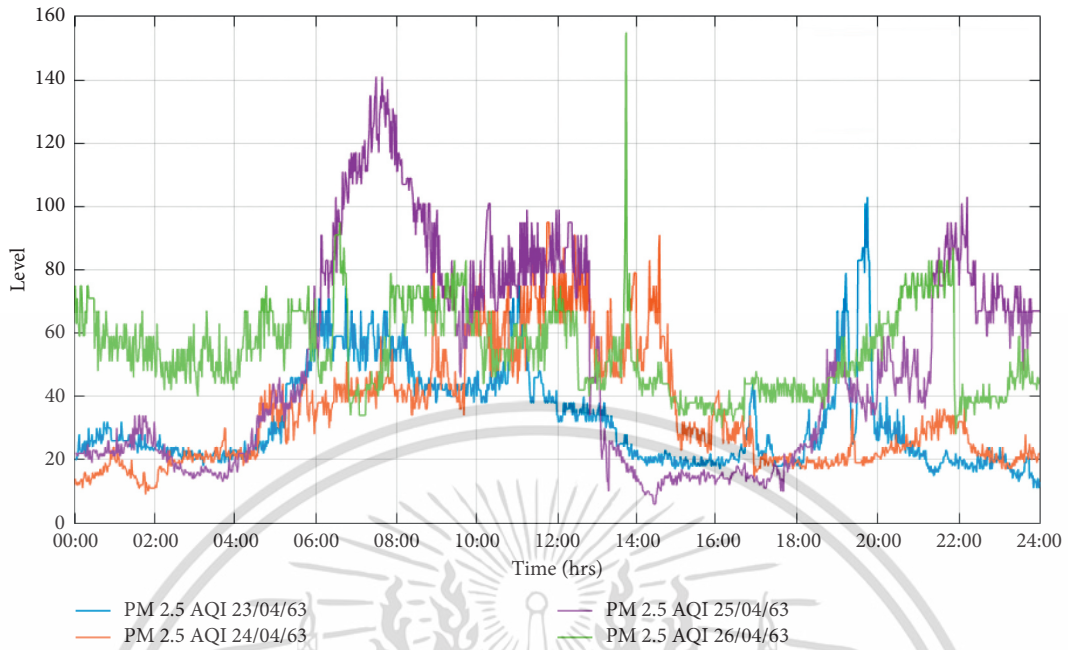


FIGURE 16: Air quality index for PM 2.5 for 22–27 April 2020.

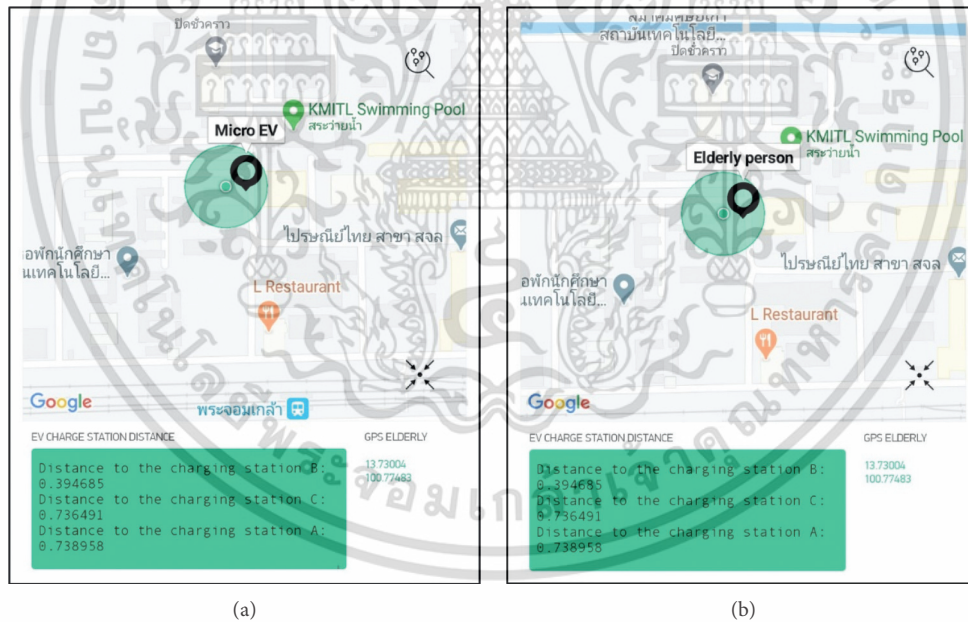


FIGURE 17: Google map widget of the Blynk application. (a) EPMD GPS. (b) Elderly GPS.

4G Wi-Fi router to reduce the cost and power consumption. In addition, in mass production, it is possible to reduce the cost of EPMD.

For the actual market of Micro Electric Vehicle (MEV), according to the statistics of the Department of Land Transport during the year 2015–2019, the use of Battery Electric Vehicle (Bev) is 2854 in which the 60% were

microelectric vehicles. A forecast by the Next-Generation Automotive Center of the Thailand Automotive Institute estimates that the growth of the MEV market has been still increasing by 56%, which is a great opportunity for the commercial development of EPMD in its early stages. This is the beginning of the electric vehicle market in Thailand and globally to be significantly developed in the near future.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

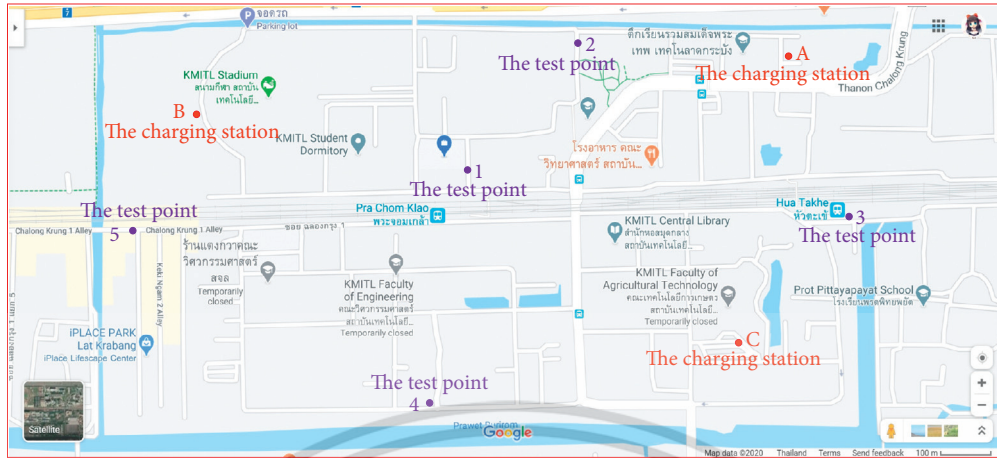


FIGURE 18: Determination of the charging station and measuring point.

TABLE 7: GPS results from five measuring points.

The test points	GPS of the elderly person	GPS of the EPMD	Deviation (m)
1	13.72897, 100.77602	13.72898, 100.77600	2.195
2	13.73134, 100.77807	13.73133, 100.77808	1.013
3	13.72817, 100.78305	13.72818, 100.78304	1.965
4	13.72476, 100.77538	13.72475, 100.77538	1.052
5	13.72789, 100.76984	13.72787, 100.76984	2.484

TABLE 8: Distances between the charging stations and the measuring points.

Test points	Real distance to the charging station (m)			Test distance to the charging station (m)			Maximum deviation (m)
	Station A	Station B	Station C	Station A	Station B	Station C	
1	678.0	543.8	650.9	678.3	543.9	651.1	0.28
2	416.9	776.6	690.4	417.1	776.9	690.6	0.23
3	336.3	1308.0	331.2	336.4	1308.5	331.3	0.54
4	991.1	735.8	630.4	991.4	736.1	630.6	0.35
5	1350.0	256.5	1237.0	1350.8	256.6	1237.1	0.85

**4. Conclusion**

The EPMD was developed as an elderly micromobility vehicle to support travel by the elderly in residential areas at speeds of up to 25 km/h and at distances of 20–30 km/charge. The EPMD structure was designed by optimising shapes, sizes, and thicknesses using SolidWorks software to consider weight, strain, stress, displacement, and cost. The simulation results showed that a 50 × 25 mm<sup>2</sup> carbon steel rectangular pipe with a thickness of 1.6 mm is appropriate for the structure of the EPMD and can support a total weight of 200 kg. The propulsion power was calculated by the dynamic equation to estimate the BLDC motor size and lithium-ion battery capacity. A 48-V 500-W BLDC motor powered by a 48-V 13-Ah 625-Wh lithium-ion battery was used to drive the rear axle via a chain.

The EPMD was tested at various speeds and weights on several road surfaces. By changing the road surfaces and not the speed, the case of the rough road surface with all total weights provided higher voltage fluctuations and lower total operating time compared with the smooth road surface. The obtained distances of the rough road surface

were lower than for the smooth road surface by approximately 11.57%. By changing the total weight and not the speed, the operating time tended to decrease when the total weight was increased. The battery voltage was decreased with respect to the period of use. When the EPMD was driven at high speeds (15–25 km/hr), it required more propulsion power, resulting in greater consumption of current and voltage and causing voltage fluctuations and low operating times. By considering the distance obtained using several speeds, although the lowest speed offered the best total operating times, it did not provide the longest distance, because the power loss ratio in the system is high. Later, when comparing the EPMD to a commercial elderly EV with a motor and battery having similar sizes, it was found that the EPMD provides a similar distance value, but the EPMD can drive at a higher speed, which is suitable for both indoor and outdoor use. In addition, the EPMD has a sensor system that increases the safety of the user and reduces the burden on caregivers, providing flexibility to elderly users.

For the sensor system, the EPMD status and air quality detection systems have been designed to increase elderly

care efficiency. The sensor system receives data from various sensors and sends data to cloud servers to create big data for elderly health services. The data are shown via the interface applications and are collected using various servers, including Blynk, LINE Notify, and Google Cloud. The EPMD status, air quality parameters, and health impacts are shown in the real-time Blynk interface via the smartphone applications of elderly people, caregivers, and elderly families. The EPMD status is displayed, the risks of outdoor activities are assessed, the best times for outdoor activities are considered, and alerts for emergencies are produced. The location and air quality are recorded in a database in the Google Cloud server to analyse the changes in air quality in the area and to make air quality predictions. The AQI evaluation shows that a suitable time for outdoor activities is between 1:00 p.m. and 7:00 p.m., because this time interval has the lowest AQI of the day. However, each day or area has a different air quality change, so an assessment of air quality risks using the EPMD status and air quality monitoring system is a good and very useful option. Finally, the system for finding the nearest charging station is beneficial to the user when the battery is low and helps to manage energy efficiently and safety. Users can find the nearest charging station from the Blynk interface and assess their ability to get to the station.

The proposed EPMD can be developed in the future research in aspect of an autonomous pit road avoiding system. Machine learning will be applied to avoid obstacles and interpret data from the user interface to prevent dangers that may occur while driving. In addition, a charging station distance system will be developed to determine the best route of travel to the charging station.

## Abbreviations

P:	Propulsion power
$F_t$ :	Total traction force
$F_r$ :	Resistance force
M:	Total mass
$f_m$ :	Mass factor
$\alpha_a$ :	Acceleration
V:	Speed
$C_{rr}$ :	Coefficient of rolling resistance
g:	Gravity
$\rho$ :	Air density
A:	Vehicle frontal area
$C_d$ :	Aerodynamic drag coefficient
$V_w$ :	Wind speed
$\theta$ :	Road slope angle
$\varphi_1$ :	Latitude of first position
$\varphi_2$ :	Latitude of second location
$\Delta\lambda$ :	Longitude difference of both positions
d:	Distance on the earth surface
R:	World radius (6371 km)
$\alpha_c$ :	Central subtended angle.

## Data Availability

No data were used to support this study.

## Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

## Acknowledgments

This work was supported by the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

## References

- [1] E. Rudnicka, P. Napierała, A. Podfigurna et al., "The World Health Organization (WHO) approach to healthy ageing," *Maturitas*, vol. 139, pp. 6–11, 2020.
- [2] J. Woo, R. Yu, K. Cheung et al., "How much money is enough? Poverty and health in older people," *The Journal of Nutrition, Health and Aging*, vol. 24, pp. 1111–1115, 2020.
- [3] J. Pertanika, "Wellbeing of older people in iran: an application of the global agewatch index," *Pertanika Journal of Social Science and Humanities*, vol. 28, no. 1, pp. 409–424, 2020.
- [4] J. Dikken, R. F. van den Hoven, W. H. van Staalduijn, L. M. Hulsebosch-Janssen, and J. van Hoof, "How older people experience the age-friendliness of their city: development of the age-friendly cities and communities questionnaire," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, 2020.
- [5] C. Phillipson and T. Buffel, "Developing age-friendly cities: policy opportunities and challenges," *Journal of Elder Policy*, vol. 1, no. 1, pp. 137–154, 2020.
- [6] F. Pilo and R. Jaffe, "Introduction: the political materiality of cities," *City & Society*, vol. 32, no. 1, pp. 8–22, 2020.
- [7] M. Eisenbarth, M. Wegener, R. Scheer et al., "Toward smart vehicle-to-everything connected powertrains: driving real component test benches in a fully interactive virtual smart city," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2020.
- [8] J. Richter, J. Lorenz, M. Costantino et al., "Dynamic indoor navigation and orientation system for people with impairments," in *Proceedings of the Conference on Mensch und Computer (MuC '20)*, pp. 473–477, Germany, September 2020.
- [9] S. Lee, M. Reddie, C.-H. Tsai et al., "The emerging professional practice of remote sighted assistance for people with visual impairments," in *Proceedings of the 2020 Chi Conference on Human Factors in Computing Systems (Chi '20)*, pp. 1–12, Honolulu, HI, USA, April 2020.
- [10] J. Huang, M. Kinatader, M. J. Dunn, W. Jarosz, X.-D. Yang, and E. A. Cooper, "An augmented reality sign-reading assistant for users with reduced vision," *PLoS One*, vol. 14, no. 1, 2019.
- [11] S. Shirai and Y. Takahashi, "Personal mobility vehicle user's psychological reaction to surrounding people," in *Proceedings of the 2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 1730–1735, Daegwallyeong, October 2018.
- [12] C. D. Harper, C. T. Hendrickson, S. Mangones, and C. Samaras, "Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 72, pp. 1–9, 2016.
- [13] N. Maehara, M. Shavandi, and Y. Takahashi, "Concept design of personal mobility vehicle," in *Proceedings of the 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 1525–1530, Jeju-do, South Korea, October 2017.

- [14] R. C. P. Wong, W. Y. Szeto, L. Yang, Y. C. Li, and S. C. Wong, "Public transport policy measures for improving elderly mobility," *Transport Policy*, vol. 63, pp. 73–79, 2018.
- [15] V. Sirivat, "A new era of Thai public sector toward asean community: a comparative study between the Ministry of labour and the Ministry of social development and human security," *Kasem Bundit Journal*, vol. 20, 2019.
- [16] A. Tsoukanelis, E. Genitsaris, D. Nalmpantis, and A. Naniopoulos, "Conjoint analysis for the optimization of a potential flexible transport service (FTS) in the region of zagori, Greece," in *Data Analytics: Paving the Way to Sustainable Urban Mobility*, E. Nathanail and I. Karakikes, Eds., Vol. 879, Springer, Berlin, Germany, 2019.
- [17] G. Papadima, E. Genitsaris, I. Karagiotas, A. Naniopoulos, and D. Nalmpantis, "Investigation of acceptance of driverless buses in the city of Trikala and optimization of the service using Conjoint Analysis," *Utilities Policy*, vol. 62, 2020.
- [18] T. H. Tran, T. T. Nguyen, Z. M. Yuldashev, E. V. Sadykova, and M. T. Nguyen, "The method of smart monitoring and detection of sleep apnea of the patient out of the medical institution," *Procedia Computer Science*, vol. 150, pp. 397–402, 2019.
- [19] B. Bongisizwe, M. Maredi, D. Deon, M. Solly, and M. Topside, "ZigBee healthcare monitoring system for ambient assisted living environments," *International Journal of Communication Networks and Information Security*, vol. 11, pp. 85–92, 2019.
- [20] Z. Wang, F. Wang, H. Liu, Z. Qian, and Z. Bi, "Design of human health monitoring system based on NB-IoT," in *Proceedings of the 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, pp. 6–9, Chongqing, China, October 2019.
- [21] J. Yang, Y. Liu et al., "Assistive and monitoring multifunctional smart crutch for elderly," in *Proceedings of the 2019 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCOM/CyberSciTech)*, pp. 397–401, Fukuoka, Japan, August 2019.
- [22] J. Cui, P. Song, W. Li et al., "Design of a health care platform for the elderly," in *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 661–666, Qingdao, China, December 2016.
- [23] J. Kulsiriruangyos, V. Rattanawutikul, P. Sangsartra, and D. Wongsawang, "Home security system for alone elderly people," in *Proceedings of the 2016 Fifth ICT International Student Project Conference (ICT-ISPC)*, pp. 65–68, Nakhon Pathom, Thailand, May 2016.
- [24] C. Fulvio, M. Teodoro, M. Carmelo, and C. Pino, "SmartBike: an IoT crowd sensing platform for monitoring city air pollution," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 7, 2017.
- [25] G. B. Fioccola, R. Sommese, I. Tufano, R. Canonico, and G. Ventre, "Polluino: an efficient cloud-based management of IoT devices for air quality monitoring," in *Proceedings of the 2016 IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)*, pp. 1–6, Bologna, Italy, 2016.
- [26] S. Kumar and A. Jasuja, "Urban climate monitoring system based on IoT using Arduino Uno," *Advances in Computer Science and Information Technology (ACSIT)*, vol. 4, pp. 118–121, 2017.
- [27] A. Doni, M. V. Chidananda Murthy, and Dr M. Z. Kurian, "Survey on multi sensor based air and water quality monitoring using IoT," *Indian Journal of Scientific Research*, vol. 17, no. 2, pp. 147–153, 2018.
- [28] O. Kennedy, E. Noma-Osaghae, O. Modupe, S. John, and O. Oluwatosin, "A. Smart air pollution monitoring system," *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, vol. 9, no. 9, pp. 799–809, 2018.
- [29] D. V. Mahammad, "Design and implementation of IoT based portable outdoor dust density monitoring system," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 612 pages, 2019.
- [30] R. Firdaus, M. A. Murti, and I. Alinursafa, "Air quality monitoring system based internet of things (IoT) using LPWAN LoRa," in *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoTaIS)*, pp. 195–200, Bali, Indonesia, November 2019.
- [31] V. Choudhary, J. H. Teh, V. Beltran, and H. B. Lim, "AirQ: a smart IoT platform for air quality monitoring," in *Proceedings of the 2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, pp. 1–2, Las Vegas, NV, USA, January 2020.
- [32] N. A. Zakaria, Z. Zainal Abidin, and N. Harum, "Wireless Internet of things-based air quality device for smart pollution monitoring," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 9, no. 11, 2018.
- [33] K. George, "An evaluation of the concept of rolling resistance," *Journal of Terramechanics*, vol. 36, no. 3, pp. 159–166, 1999.
- [34] G. Descornet, W. Meyer, and J. Reichert, "Road-surface influence on tire rolling resistance," in *STP1031-EB Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*, pp. 401–415, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1990.
- [35] K. Hassan, A. Sam, and D. Machuve, "Algorithm to identify location of incidents in public buses and respective nearest authority using spherical cosine rule," *International Journal of Technology Enhancements and Emerging Engineering Research*, vol. 1, no. 2, 2013.
- [36] M. Zaatari, A. Novoselac, and J. Siegel, "Impact of ventilation and filtration strategies on energy consumption and exposures in retail stores," *Building and Environment*, vol. 100, pp. 186–196, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Design and Simulation of Removable Pavement Edge Climbing Electric Wheelchair for Elderly and Disabled Users

Natthanon Phannil and Chaiyan Jettanasen\*

**Abstract:** In the urban areas of Thailand, those who travel in wheelchairs face a major hurdle owing to infrastructure construction that is not conducive to the use of wheelchairs. Specifically, such construction has a non-conductive design for practical use and long distances; it exposes wheelchair users to the burden of neglect. Furthermore, it is difficult to adjust finished buildings to satisfy the needs of wheelchair users, because this process is time consuming and costly. Therefore, numerous studies have proposed the development of wheelchairs that can be used in various environments as an alternative approach. However, most wheelchair users already have their personal wheelchairs, thus making it difficult to consider purchasing a new special wheelchair. Considering such problems and limitations, this study focuses on the design concept of an accessory (a track-based wheel) for retrofitting a standard wheelchair to enable the pavement edge-climbing function. The combination of a standard wheelchair and an accessory is termed as a removable pavement edge-climbing electric wheelchair. This development involved the design of the track-based wheel structure, static simulations, and dynamic simulations. Moreover, the effects of changing the seat angle, payload, motor speed, and step height on the power and torque of the drive motor, movement speed, angle of the track-based wheel, and linear actuator force were studied to determine the suitable specifications of the motors and linear actuators for the future track-based wheel prototype.

**Keywords:** Removable Pavement Edge Climbing Electric Wheelchair (RPCEW), Electric Wheelchair (EW), Stair Climbing Electric Wheelchair (SCEW), Track-Based Wheel, Static Analysis, Motion Analysis.

## 1. INTRODUCTION

The global population is aging, and we are entering an era of an aging society. Thus, all countries must prepare for the changes caused by this growing elderly population. Most elderly people face problems with their ability to move, which may be considered a form of disability. Consequently, caring for the elderly is necessary, and it involves close supervision. Mobility issues constitute a critical issue faced by the elderly and disabled. Currently, many elderly and disabled people require wheelchairs as a means of transportation in their daily lives. However, infrastructures and facilities of Thailand are not designed to accommodate wheelchair users. For example, as shown in Fig. 1, bumpy pavements, excessive steep ramps, non-continuous pavement ramps, and pavement obstacles are common throughout the urban areas of Thailand. These problems make the use of wheelchairs by the elderly and disabled difficult, because they obstruct their displacements and limit their traveling ability. Additionally, there are problems associated with the

height of the pavement edge and an insufficient number of pavement ramps. Wheelchair users cannot move continuously along pavements. Therefore, they must travel on the road when traversing long distances, resulting in a risk to both wheelchair users and other road users.



Fig. 1. Outdoor obstacles for electric wheelchair users.

In various fields, researchers have investigated, invented, and developed stair-climbing electric wheelchairs (SCEWs) [1], which increase the traveling

Manuscript received January 10, 2021; revised March 10, 2021; accepted May 10, 2021. Recommended by Associate Editor Soon-Shin Lee under the direction of Editor Milton John. This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

Natthanon Phannil and Chaiyan Jettanasen are with the School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

(e-mail: 61601179@kmitl.ac.th, chaiyan.je@kmitl.ac.th).

\* Corresponding author.

ability of users, reduce the burden on caregivers and create new travel patterns. SCEWs have been developed in various research and commerce departments. The operating principle of the SCEW can be divided into four forms [2]–[4], as shown in Fig. 2 and Table 1: a track-based stair climbing mechanism [4]–[7], wheel-cluster-based stair climbing mechanism [8]–[15], leg-based stair climbing mechanism [16]–[20], and hybrid stair climbing mechanism [21]–[29].

Track-based stair-climbing is the most widely used mechanism. This mechanism can climb stairs at a constant speed and switch between climbing and wheeling. However, track-based stair-climbing mechanisms are expensive and bulky. Nevertheless, they exhibit good performance with complicated structures. Jongseok Lee [6] designed a new track-based wheel. It uses a single motor to drive both the wheel and the caterpillar through the transmission system. In this previous study, the wheelchair weighed approximately 65 kg, and the user weighed approximately 100 kg. Under these conditions, operating speeds of 5 km/h in the flat surface driving mode and 1 km/h in the climbing mode were achieved. Moreover, A.A. Jorge et al. [7] presented the modeling of a motorized wheelchair with a hybrid locomotion system (MWHLS). Formulations of the kinematic and dynamic models were considered based on the effects of gravitational forces and rolling friction on flat and inclined surfaces. The authors showed that the Lyapunov function technique exhibited the best control for more efficient navigation with a locomotion system.

The wheel cluster-based stair-climbing mechanism was quite compact with a relatively simple structure, low cost, low energy consumption, and the ability to change movement modes quickly; however, the movement speed fluctuates, causing discomfort for the user. Prajapat [12] designed a stair-climbing add-on device to lift a wheelchair over stairs while applying forces in a comfortable range. The hex-wheel mechanism was conceived by improving the Y-wheel design to eliminate its drawbacks. The combination of the ex-wheel and actuation mechanism resulted in forces that could be comfortably applied by a person assisting the wheelchair user. The prototype was tested on two staircases by considering the force required to pull the device in three steps. Anchivilca et al. [14] designed a novel electric wheelchair that was controlled by people without arms or hands. It used inertial sensors to convert the inclination angle of the user's body into the velocity and direction of the wheelchair. Additionally, triple-delta and triple-star wheel mechanisms were designed based on these requirements and restrictions. In the electronic design, the inertial sensors (MPU6050) were conditioned to read data through the I2C protocol, combined with 3-axis accelerometers and 3-axis gyroscopes, and interfaced with the LabView software and Wi-Fi. Despite not completing the implementation of the prototype, the research verified that the proposed triple-wheel mechanism and its union to the chassis were sufficient because the chair managed to move up and down stairs without any interference.

The leg-based stair-climbing mechanism imitates the movement of a human leg and foot. Several joints, legs, motors, and feedback controls were utilized to accomplish stable walking and stair climbing. Therefore, leg-based

stair-climbing mechanisms are complex and expensive, and they have a distinct appearance. An autonomous stair-climbing wheelchair based on a leg mechanism was designed as a novel technology [19]. It comprised two legs with lower and upper leg supports, and overcame stairs independently and safely. Moreover, the leg-based mechanism was proposed for secure and adaptable climbing; notably, this mechanism is lightweight and dynamic. Yoshikaza Mori et al. [20] developed a pair of step-climbing units installed on a standard manual wheelchair. The target users were those who could independently lift a front wheelchair caster. Each unit comprised two actuators with two degrees of freedom: telescopic motion and rotational motion. The system could climb a step height of 30 cm, thus confirming the efficacy of the design.

Finally, the hybrid stair climbing mechanism can be adapted to universal stairs using the special transmission mechanism and wheeled moving mechanism. The position of the wheel can be adjusted to maintain appropriate contact between the wheel and the ground. The system adopts a feedback control and nonlinear gravitational compensation. However, most hybrid stair-climbing mechanisms are bulky and complex. A novel version of Wheelchair.q was presented in [25] to climb a single obstacle or staircase with a triple-wheel cluster architecture. A hybrid mechanism consisting of two locomotion units based on a rotating leg system and an idle track was proposed in [26]. The proposed structure satisfied many design requirements, such as small size, low weight, and stable climbing trajectory. The climbing behavior of the wheelchair was tested using a multibody simulation. Certain smart dynamic features of the wheelchair have also been proven. The improvement in static stability during the stair climbing operation is the first advantage of this novel architecture, which is necessary to satisfy the requirements stated in ISO 7176-28:2012, "Requirements and test methods for stair-climbing devices." In accordance with the proposed standard, the wheelchair is deemed stable if it can maintain any working configuration without slipping, even if the staircase is tilted forward.

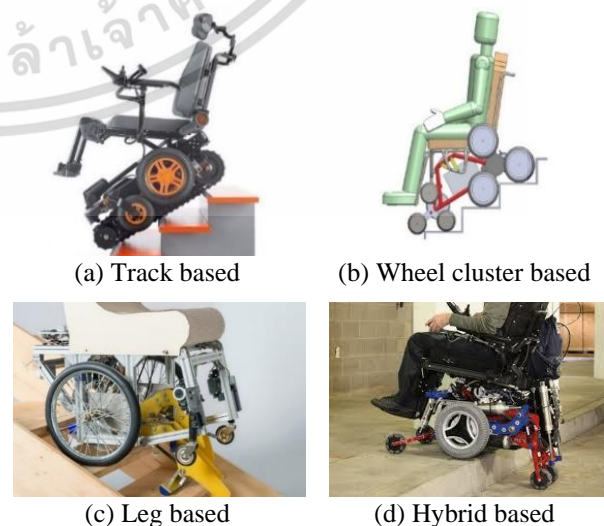


Fig. 2. Models of stair-climbing electric wheelchairs.

The characteristics of the SCEWs in each form are summarized in Tables 1 and 2. On the one hand, leg-and hybrid-based stair climbing mechanisms are complicated, difficult to use, and very expensive. Therefore, they are unsuitable for use in daily life and commercial development. On the other hand, track-based and wheel cluster-based stair-climbing mechanisms are relatively low-cost, simple to use, and versatile. Both track-based and wheel cluster-based mechanisms are more suitable for daily use. However, considering the payload and climbing stability, the track-based stair climbing mechanism is more responsive than the wheel cluster-based stair climbing mechanism.

Based on the comparison between removable pavement edge climbing electric wheelchair (RPCEW) and SCEWs from previous research, presented in Table 2, SCEWs have been investigated in many categories. Almost all of them are based on developing a new type of wheelchair that cannot be adapted to the existing wheelchair; therefore, the selling price of the wheelchair is high and it is not widely used. The development of an accessory for the stair-climbing function installed with general wheelchairs has been minimal, and some devices are so bulky that they cannot be used in everyday life [12]. Therefore, the development of a stair-climbing accessory with an appropriate size and weight, such that it can be installed in a general wheelchair, would be an interesting option in the future.

In this study, the RPCEW is designed by combining a general electric wheelchair and an accessory (a track-based wheel). A track-based wheel can be assembled or removed from the wheelchair to make it suitable for use in a variety of ways, reduce the conversion process, and facilitate ease of transport. The RPCEW model was simulated in SolidWorks using the actual size and material. The frame structure was tested using static analysis in terms of stress, strain, and displacement to consider its ability to withstand payloads. The motion analysis tool of SolidWorks was used to investigate the effects of changing the seat angle, payload, motor speed, and step height on the power and torque of the drive motor, movement speed, angle of the track-based wheel, and linear actuator force. The significance of the support wheel was also considered in this stage. The results of this test were analyzed to determine the optimal motor and linear actuator sizes for future experimental setups. Therefore, the design of the RPCEW will provide critical information to design an experimental setup that can solve problems and respond to the requirements of elderly and disabled people, thus improving their quality of life.

The contributions of this research can be summarized as follows:

- Design an accessory for installation on general wheelchairs, transforming general wheelchairs into

removable pavement edge-climbing electric wheelchairs. This accessory can be assembled and removed according to the wheelchair usage style. This adds new functionality, while retaining the original function.

- The strength of the designed structure was tested in terms of stress, strain, and displacement to consider the ability to withstand actual payloads.

- Analyze the effect of changing the seat angle, payload, motor speed, and step height on the power and torque of the drive motor, movement speed, angle of the track-based wheel, and linear actuator force to determine the optimal motor and linear actuator sizes for the actual removable pavement edge-climbing electric wheelchair.

The remainder of this study is organized as follows: In Section 2, the track-based wheel is designed, and the RPCEW frame structure is tested using static analysis. In Section 3, motion analysis is employed to simulate the RPCEW operating in each condition to analyze the effect of the condition on the electrical and mechanical parameters. The design and simulation of the support wheel is presented in Section 4 to prevent impingement, reduce the probability of accidents, and determine the right pattern to climb. Finally, in Section 5, the results are analyzed and summarized to determine the suitable size of the motors and linear actuators for future construction of the experimental setup.

## 2. DESIGN OF TRACK-BASED WHEEL

Generally, SCEWs are extremely heavy and expensive. The cost of SCEWs can range from a thousand to fifty thousand U.S. dollars, which prevents them from being used commercially. The RPCEW with appropriate weight and price was developed to solve the problem. However, since most users own electric wheelchairs, it is difficult to promote and distribute a new type of electric wheelchair. Therefore, this research developed an additional component to climb pavement edges, which can be installed in a commercial electric wheelchair. The additional part is created in the form of a track-based wheel.

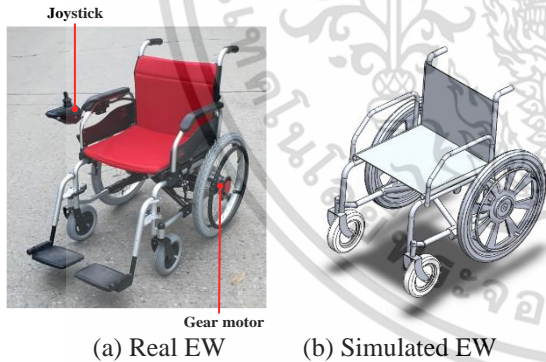
The commercial electric wheelchair chosen as a prototype for development is shown in Fig. 3, and its specifications are listed in Table 3. The electric wheelchair is driven by two gear motors of 250 W each, directly connected to 22-inch-diameter wheels. The direction was controlled using a joystick with a motor-drive unit. The entire device was powered by a 24 V, 20 Ah lithium-ion battery, which was sufficient for 4.98 h of operation over a distance of 24.92 km. This distance is deemed sufficient, considering the usual daily travel distance of the elderly. The structural frame is composed of round aluminum tubes and weighs 45 kg.

Table 1. Comparison of SCEWs in each category [2].

Category	Control complexity	Production cost	Power consumption	Adaptation to different steps
Track based	Low	Medium	Medium	Very high
Wheel cluster based	Medium	Low	Low	Medium
Leg based	Very high	Very high	Very high	High
Hybrid based	High	High	Medium	Low

**Table 2.** Comparison of RPCEW and SCEW of previous research.

Reference	Category	Prototype	Period	Control	Weight	Price	Removable
Proposed	Track based	RPCEW	2022	Embedded and IoT system	Moderate	Moderate	Yes
[4]	Track based	TopChair-S	2013	Embedded system	Heavy	Moderate	No
[5]	Track based	TGR Explorer	2016	Embedded system	Heavy	Moderate	No
[6]	Track based	Non-wheelchair	2021	Machanism	Moderate	Low	-
[7]	Track based	MWHLs	2021	Electronic	Heavy	High	No
[11]	Wheel cluster based	Non-wheelchair	2018	Embedded system	Low	Low	-
[12]	Wheel cluster based	Stair climbing add-on device	2020	Machanism	Moderate	Low	Yes
[14]	Wheel cluster based	Non-wheelchair	2020	Embedded system	Moderate	Moderate	-
[16]	Leg based	Compact stair climbing wheelchair	2016	Embedded system	Heavy	High	No
[17]	Leg based	TBW-1 Matsushima	2010	Electronic and machanism	Heavy	High	No
[18]	Leg based	Non-wheelchair	2018	Electronic and machanism	Heavy	Moderate	-
[19]	Leg based	Autonomous stair climbing wheelchair	2017	Embedded system	Moderate	Moderate	No
[21]	Hybrid based	Different Terrains climbing wheelchair	2020	Embedded system	Moderate	Moderate	No
[22]	Hybrid based	Multifunctional wheelchair	2021	Embedded system	Moderate	Moderate	No
[23]	Hybrid based	SCMSs	2017	Embedded system	Heavy	High	No
[29]	Hybrid based	RT-Mover PType WA Mk-II	2020	Embedded system	Heavy	High	No

**Fig. 3.** Commercial electric wheelchair (EW).**Table 3.** Specifications of the commercial electric wheelchair.

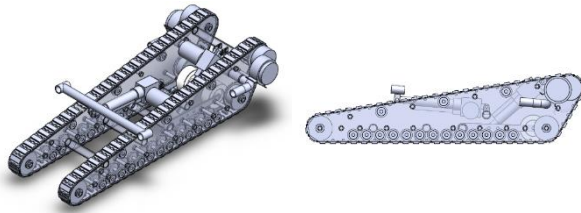
Condition	Specification information
Motor	2 gear motors, 250 W each
Battery	24V 20Ah Lithium-ion battery
Charge time	7.41 h
Structure	Aluminium
Wheelchair weight	45 kg
Load weight	150 kg
Max speed	5 km/h
Operate time	4.98 h
Operate distance	24.92 km
Price	770 USD

The RPCEW was simulated using SolidWorks to design structural and propulsion systems. The simulation model was designed according to the actual aspect ratio, and aluminum material was adopted to ensure that it is lightweight and can be tested for virtual use. A belt connects the drive roller and two follow rollers to drive the track-based wheels. The belt was designed with external grooves to provide traction on the pavement edge. The shape of the track-based wheel in Fig. 4 was determined for climbing different step diameters and perfectly fit in the empty space under the electric wheelchair, as illustrated in Fig. 5.

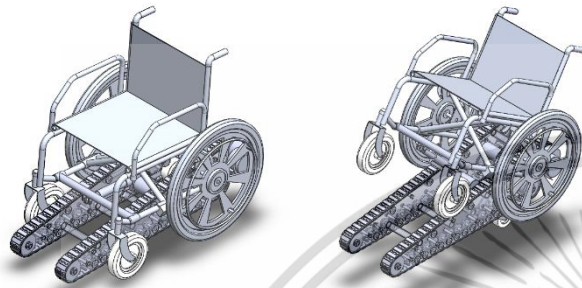
Furthermore, the RPCEW was studied on three aspects: structure design, static simulation, and dynamic simulation. The RPCEW structure was designed based on the shape and connection pattern of each device to ensure that it could be designed and built in practice. Subsequently, the static simulation of the track-based frame was tested using the static analysis tool in SolidWorks; additional details are provided in the next subsection. Subsequently, dynamic analysis is used to study the characteristics of the electrical and mechanical parameters under each operating condition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

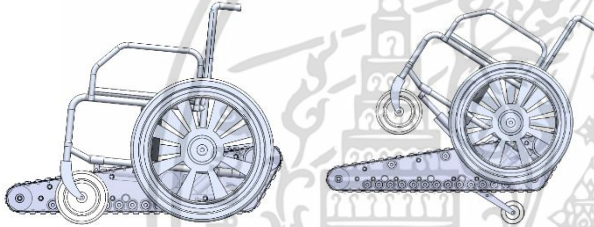
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Isometric front view of track-based wheel (b) Side view of track-based wheel  
 Fig. 4. Track-based wheel of the RPCEW.



(a) Isometric front view of the RPCEW



(b) Side view of the RPCEW

Fig. 5. The RPCEW modelled by the SolidWorks program

2.1. Track-based wheel design calculation

The track-based wheel comprises two wheel units located on either side, as shown in Fig. 6. Each wheel unit in Fig. 5 and 6 is equipped with a drive roller, two follow rollers, belt, 16 support rollers, and the track-based frame.

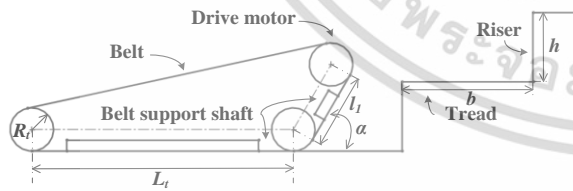


Fig. 6. Calculation of the wheel unit.

A track-based wheel was designed to facilitate easy climbing ability. Accordingly, the belt must be held perfectly at the edge of the step. The center of the drive roller should be higher than the edge of the step, as described in Equation 1 [30].

$$l_1 \sin \alpha + R_t \geq h \tag{1}$$

The track-based wheel must be able to move on the edge of the step, and the bottom of the wheel must be in contact with the edges of the two steps at all times. Therefore, wheel length ( $L_t$ ) can be calculated using Equation 2 [30]:

$$L_t \geq 2\sqrt{b^2 + h^2} \tag{2}$$

Where  $L_t$  denotes the length of the bottom of the track-based wheel  
 $l_1$  represents the distance between the center of drive roller and front follow roller  
 $R_t$  denotes the radius of the roller  
 $\alpha$  denotes the angle between the front track-based wheel and the horizontal axis.  
 $h$  corresponds to the riser (vertical) of the step  
 $b$  denotes the tread (horizontal) of the step

Moreover, the position of the seat center should be in line with the center and indented toward the rear of the track-based wheel to enable the RPCEW to climb steps stably without overturning, as depicted in Fig. 7.

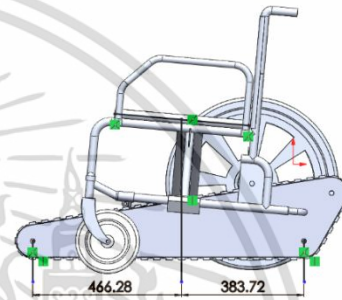


Fig. 7. Position of the track-based wheel.

2.2. Static simulation of the track-based wheel

A track-based wheel was simulated using the static analysis tool in SolidWorks to assess the structural load-bearing capacity of the frame. The track-based wheel frame in Fig. 8 (a) was modeled using a 6061-aluminum alloy to satisfy the lightweight condition; as presented in Table 4, its strength was sufficient to withstand the payload. The mass of the frame was 4.89 kg.

Table 4. Specifications of the track-base wheel frame

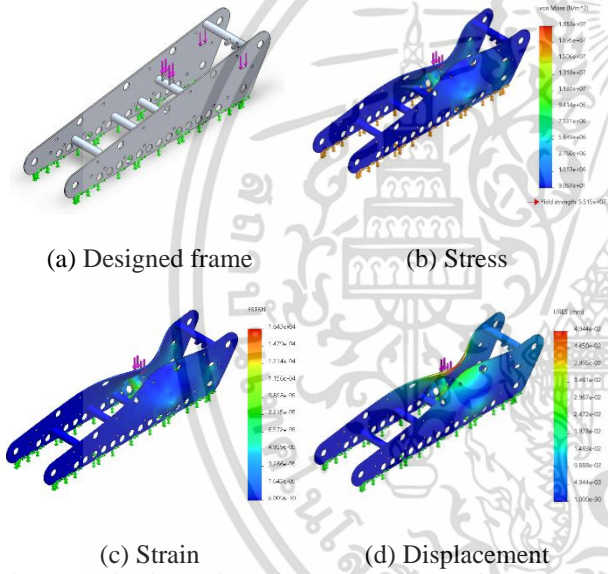
<b>Model:</b>	Track-base wheel frame	
<b>Material:</b>	Aluminium Alloy 6061	
<b>Mass:</b>	4.89007	kg
<b>Volume:</b>	0.00181114	m <sup>3</sup>
<b>Weight:</b>	47.9226	N
<b>Yield strength:</b>	5.51485 × 10 <sup>7</sup>	N/m <sup>2</sup>
<b>Tensile strength:</b>	1.24084 × 10 <sup>8</sup>	N/m <sup>2</sup>
<b>Elastic modulus:</b>	6.9 × 10 <sup>10</sup>	N/m <sup>2</sup>
<b>Poisson's ratio:</b>	0.33	
<b>Mass density:</b>	2,700	kg/m <sup>3</sup>
<b>Shear modulus:</b>	2.6 × 10 <sup>10</sup>	N/m <sup>2</sup>

The static analysis of the track-based wheel frame begins with modeling and defining the simulation conditions, including the material, fixpoints, and load points. This frame uses a 6061-aluminum alloy as the material and sets the fixpoints below the wheel. As shown in Fig. 8 (a), four load points were defined with a total weight of 2000 N. The calculations were performed using the static analysis tool in SolidWorks in terms of the stress, strain, and displacement. Accordingly, the maximum and minimum values for each parameter are presented in Table 5 and Fig. 8 (b)–(d), respectively. The stress of the

frame ranged from 90.67 to  $1.883 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>. The maximum stress was exerted on the bar connected to the linear actuator to push the electric wheelchair and did not exceed the yield strength ( $5.515 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>) of the material; thus, this frame will not deform during use. The strain of the frame had a value between  $6.900 \times 10^{-10}$  and  $1.643 \times 10^{-4}$ , as shown in Fig. 8 (c). The maximum strain was still on the bar connected to the linear actuator to push the electric wheelchair because it received the most weight. Lastly, the displacement is shown in Fig. 8 (d), representing the point of collapse of the frame structure. The displacement of the structure is less than 0.05 mm, which is an acceptable value and not a danger to its use. Therefore, the overall designed structure was sufficiently strong for use and had an acceptable weight.

**Table 5.** Results of simulation parameters

Name	Minimum	Maximum	Unit
Stress	90.67	$1.883 \times 10^7$	N/m <sup>2</sup>
Strain	$6.009 \times 10^{-10}$	$1.643 \times 10^{-4}$	
Displacement	0.00	0.05	mm



**Fig. 8.** Static simulation of track-base wheel frame.

### 2.3. Motor power calculation of the track-based wheel

The drive of the track-based wheel was based on the principle of converting electrical energy into mechanical energy. The propulsion power ( $P$ ) is the product of the total traction force ( $F_t$ ) and the movement speed ( $V$ ), which can be calculated using Equation 3. The total traction force ( $F_t$ ) is the sum of the acceleration and resistance forces ( $\Sigma F_r$ ), as expressed in Equation 4 [31]:

$$P = F_t V, \quad (3)$$

$$F_t = f_m M \alpha + \Sigma F_r \quad (4)$$

Thus, the sum of the resistance forces ( $\Sigma F_r$ ) is the sum of the rolling resistance force, airflow resistance force, and force exerted to ascend the slope, as expressed in Equation 5 [31].

$$\Sigma F_r = MgC_{rr}V\cos\theta + \frac{1}{2}\rho AC_d V(V - V_w)^2 + MgV\sin\theta \quad (5)$$

Therefore, the propulsion power of the RPCEW is expressed in Equation 6 [31]. The critical variables

affecting the propulsion power in Table 6 include the gross weight, movement speed, and road surface, mainly because these parameters easily vary during use.

$$P = f_m M \alpha V + MgC_{rr}V\cos\theta + \frac{1}{2}\rho AC_d V(V - V_w)^2 + MgV\sin\theta. \quad (6)$$

Where	$P$	denotes propulsion power
	$F_t$	corresponds to the total traction force
	$F_r$	indicates resistance force
	$M$	symbolizes the total mass
	$f_m$	denotes mass factor
	$\alpha_a$	signifies acceleration
	$V$	denotes the speed
	$C_{rr}$	indicates coefficient of rolling resistance
	$g$	stands for gravity
	$\rho$	denotes air density
	$A$	indicates vehicle frontal area
	$C_d$	corresponds to the aerodynamic drag coefficient
	$V_w$	denotes wind speed
	$\theta$	symbolizes the road slope angle

**Table 6.** Parameters of the propulsion power calculation.

Parameters of the propulsion power calculation		
Total mass ( $M$ )	0–200	kg
Mass factor ( $f_m$ )	1	-
Acceleration ( $\alpha$ )	1	m/s <sup>2</sup>
Speed ( $V$ )	0–2	m/s
Coefficient of rolling resistance ( $C_{rr}$ )	0.012	-
Gravity ( $g$ )	9.8	m/s <sup>2</sup>
Air density ( $\rho$ )	1.225	kg/m <sup>3</sup>
Vehicle frontal area ( $A$ )	1	m <sup>2</sup>
Aerodynamic drag coefficient ( $C_d$ )	0.5	-
Wind speed ( $V_w$ )	0	m/s
Road slope angle ( $\theta$ )	0–90	deg.

### 3. MOTION SIMULATION OF RPCEW

The motion simulation of the RPCEW in SolidWorks begins by assembling the model parts in the SolidWorks assembly environment and connection settings of various devices. The RPCEW-free material was set as a 6061-aluminum alloy to realistically determine its mechanical properties. The simulation was performed using motion analysis. Gravity was set along the Y-axis at 9.81 m/s<sup>2</sup>. The drive roller was assigned as a rotary motor with a constant angular velocity (motor speed) according to the test condition, while the linear motor was defined at the linear actuator, which could adjust the length according to the seat angle with a stretching speed of 5 mm/s. Moreover, the surface contact of the equipment was determined in solid bodies of the contact type to ensure that the RPCEW does not overlap while moving and reduces the computation process of the computer. The surface contact is determined according to its practical properties: the belt, wheel frame and rollers, and floor are composed of rubber, aluminum, and concrete, respectively. Lastly, SolidWorks was used for evaluating the movement of the RPCEW to

account for the effect of changing the seat angle, payload, motor speed, and step height on the power and torque of the drive motor, movement speed, angle of the track-based wheel, and linear actuator force, as shown in Fig. 9.

The motion simulation in Fig. 10 illustrates the operation of the track-based wheel in each step. However, the initial test allowed the track-based wheel to move freely, so that the test results showed dangerous points of use. The test was initiated using a horizontally moving track-based wheel to collide with the riser ground in Fig. 10 (a). As shown in Fig. 11, at the moment of a collision, spikes occur on the graphs of various test results. These spikes can be mitigated by reducing the crash speed of the RPCEW. The front wheel was then used to climb, as shown in Fig. 10 (b). The front wheel used for climbing was very steep; therefore, the motor power and torque values were the highest in this range. After the front wheel climbed up successfully in Fig. 10 (c), the RPCEW adjusted the mode to use the tail wheel to climb, as shown in Fig. 10 (d)–(f). According to the motor power calculation equation, the slope of climbing is less than when using the front wheel, and will gradually increase in value. When the RPCEW uses the tail wheel to climb to a certain extent such that the payload vector crosses over the step edge, the track-based wheel rotates and sends the RPCEW to a higher level, as shown in Fig. 10 (g). The rotation resulted in spikes in the various test results. These spikes can be reduced using a support wheel, which is discussed and tested in the next section. The RPCEW is then adjusted to move with the track-based wheel in a horizontal position in Fig. 10 (h), and it adjusts to normal motion in the next step.

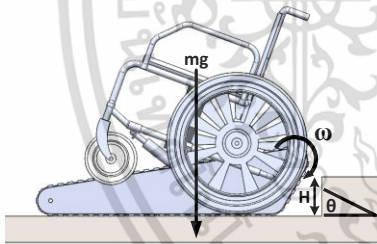


Fig. 9. Motion simulation in SolidWorks.

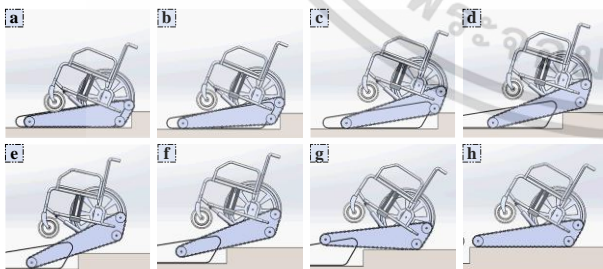


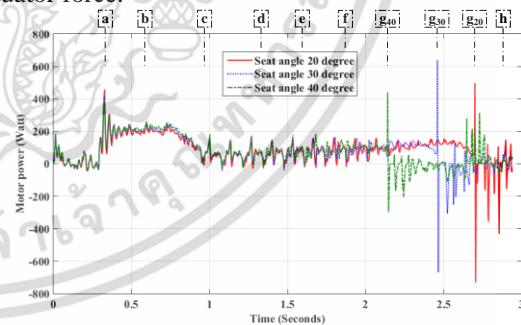
Fig. 10. Motion simulation of the RPCEW without the support wheel.

### 3.1. Comparison of the effect of change in seat angle

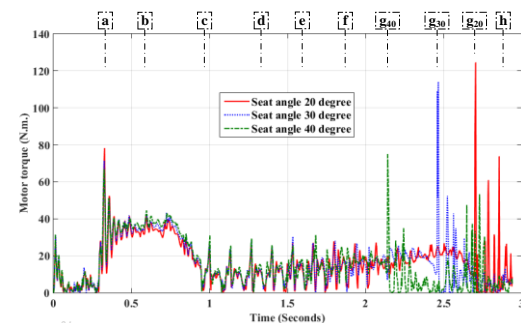
The seat angle is a critical parameter in the analysis of step-climbing stability. If the seat angle is either too low or too high, overturning occurs during climbing. Moreover, the seat angle also has a direct effect on the direction of the payload vector, which affects the operating time and linear actuator force. The parameters of the motion simulation were determined at a constant

motor speed of 56 rpm (1 km/h), payload of 1500 N, and step height of 15 cm. The changes in the seat angle were set at 20°, 30°, and 40° relative to the track-based wheel. The simulation results are presented in the comparison of motor power, motor torque, movement speed, track-based angle, and linear actuator force. As mentioned earlier, the spikes of the collision at the start and end of the climb affected the test results for all variables (at points a and g in Fig. 10 and 11). The solution was tested and will be discussed in the next section. Thus, the analyses of the results in all the subsections of this section do not consider the spikes to highlight the real effect of each parameter.

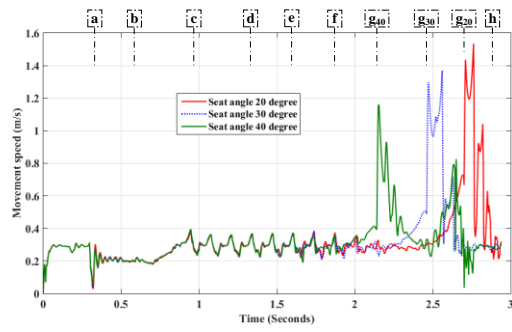
The simulation results show that the change in the seat angle does not affect the change in the motor power, motor torque, and movement speed; interestingly, a greater seat angle makes it possible to climb faster, as shown in Fig. 11 (a), (b), and (c). The maximum power and torque of motors during the front-wheel climb between points b and c in Fig. 11 (a) and (b) are 261.32 W and 44.56 N m, as listed in Table 7. With respect to the movement speed, the movement was slower when the front wheel was used. When the tail wheel was used, the movement speed returned to the same value and was relatively stable. Regarding the operating time, if the seat angle is high, the position of the payload weight vector will be deflected more toward the rear of the electric wheelchair and the RPCEW will be sent to a higher level faster; the maximum angle of the track-based wheel will also be reduced, as illustrated in Fig. 11 (d). Based on the analysis of the linear actuator force, illustrated in Fig. 11 (e), a higher seat angle results in a lower linear actuator force because the angle of the linear actuator is closer to the payload vector. Therefore, in summary, a change in the seat angle does not affect the change in the motor power, motor torque, and movement speed; however, it directly affects the operating time, angle of the track-based wheel, and linear actuator force.



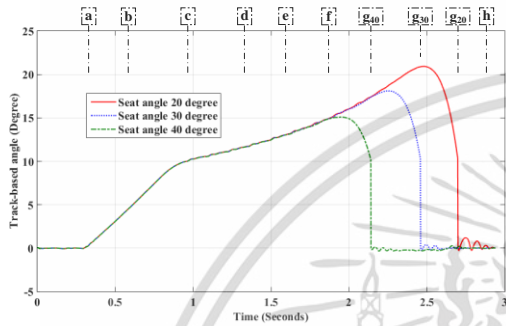
(a) Comparison of motor power under different seat angles



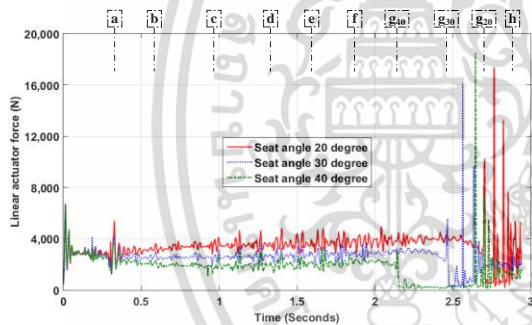
(b) Comparison of motor torque under different seat angles



(c) Comparison of movement speeds under different seat angles



(d) Comparison of angle of the track-based wheel under different seat angles



(e) Comparison of linear actuator forces under different seat angles

Fig. 11. Comparisons of the effect of change in seat angle.

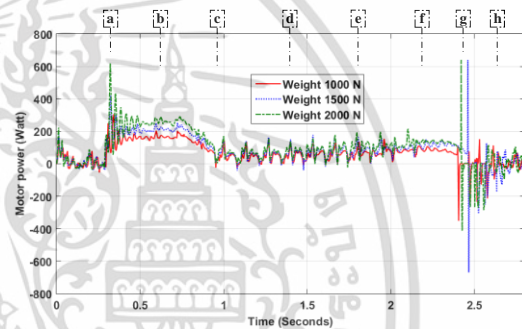
Table 7. Maximum parameters of each seat angle.

Seat angle (degree)	20	30	40	Unit
Motor power	244.06	253.19	261.32	W
Motor torque	41.62	43.17	44.56	N.m.
Movement speed	0.38	0.39	0.39	m/s
Angle of the wheel	20.94	18.10	15.10	degree
Linear actuator force	4928.60	3753.69	3373.85	N

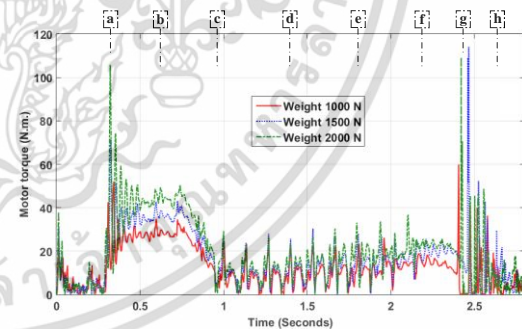
### 3.2. Comparison of the effect of change in payload

The payload is the sum of the RPCEW weight and passenger weight. The payload was set in the same direction as the gravitational acceleration, which, in actual use, is in the range of 1000–2000 N. In this study, the payloads were varied in five values: 1000, 1500, and 2000 N. All models represent the weight of the RPCEW, a passenger, and baggage. The simulation model had a fixed motor speed of 56 rpm (1 km/h), seat angle of 30°, and step height of 15 cm.

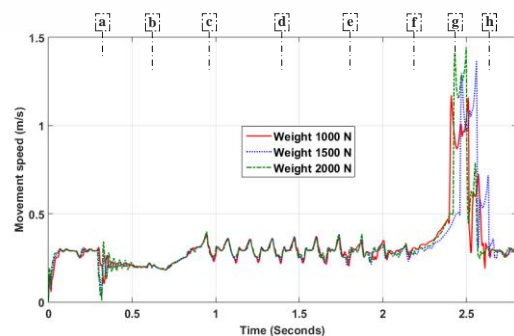
The simulation results are presented in the comparisons of motor power, motor torque, movement speed, angle of the track-based wheel, and linear actuator force. In the dynamic simulation, the power and torque of all payloads were similar. However, while moving up the step, they were clearly different. When considering the 2000 N model in Table 8, which is the largest payload in practice, the motor power and torque reach up to 295.35 W and 50.36 N m, respectively, while using the front wheel, as shown between points b and c in Fig. 12 (a) and (b). The movement speed, operating time, and angle of the track-based wheel in Fig. 12 (c) and (d) do not exhibit significant changes as a result of the change in the payload. The linear actuator force was directly proportional to the payload and exhibited relatively little change during the working period. In Fig. 12 (e) and Table 8, the maximum force of the linear actuator is 4721.86 N with a payload of 2000 N. In summary, a change in the payload directly affects the power and torque of the motor and the linear actuator force. However, it does not affect the movement speed, operating time, and angle of the track-based wheel.



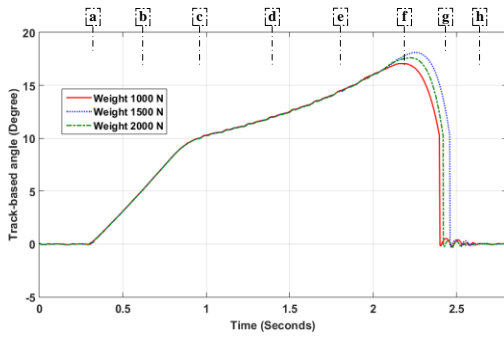
(a) Comparison of motor power under different payloads



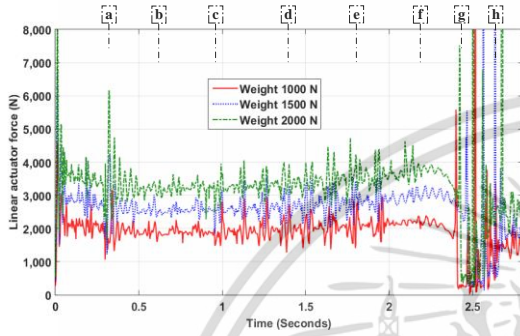
(b) Comparison of motor torque under different payloads



(c) Comparison of movement speeds under different payloads



(d) Comparison of the angle of the track-based wheel under different payloads



(e) Comparison of linear actuator forces under different payloads

Fig. 12. Comparisons of the effect of change in payload.

Table 8. Maximum parameters of each payload.

Payload (N)	1000	1500	2000	Unit
Motor power	204.06	253.19	295.35	W
Motor torque	34.80	43.17	50.36	N.m
Movement speed	0.38	0.39	0.40	m/s
Angle of the wheel	17.06	18.10	17.60	degree
Linear actuator force	2967.49	3753.68	4721.86	N

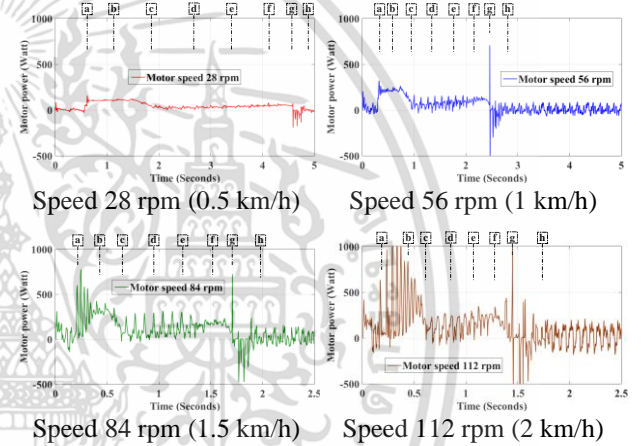
### 3.3. Comparison of the effect of change in motor speed

The motor speed refers to the rotational speed of the track-based wheel drive motor in revolutions per minute (rpm). The motor speed was referenced from the travel speed of the SCEWs. According to previous research [2]–[7], travel speeds are in the range of 0–2 km/h. The travel speed was converted from the travel speed of the RPCEW to the angular velocity of the motor speed to set a constant speed for the drive motor according to Equation 7. In this simulation, the radius of the drive roller connected to the drive motor was 47 mm. Accordingly, the simulation travel speeds were set at 0.5, 1, 1.5, and 2 km/h, which were converted to the corresponding motor speeds of 28, 56, 84, and 112 rpm, respectively. The simulation model determined a payload of 1500 N, a seat angle of 30°, and a step height of 15 cm.

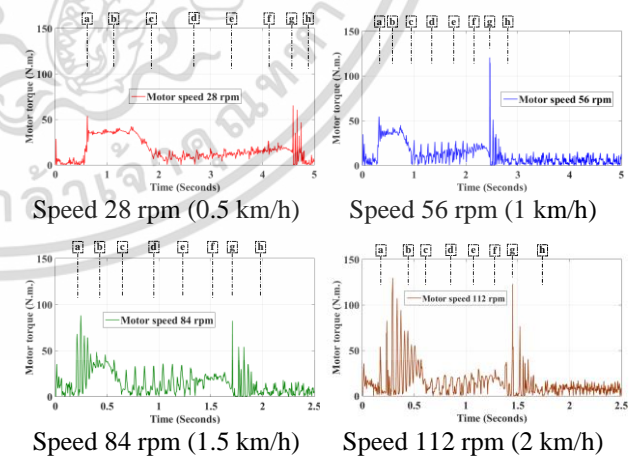
$$\text{Motor speed} = \text{Travel speed} \times \left(\frac{5}{18}\right) \times \left(\frac{60}{2\pi r}\right) \quad (7)$$

The simulation results indicate that the changing motor speed directly affects the change in the motor power, movement speed, and operating time. However, it does not affect the change in the motor torque, angle of the track-based wheel, and linear actuator force, as shown in Fig. 13. In Fig. 13 (a) and (b), the motor power is given by

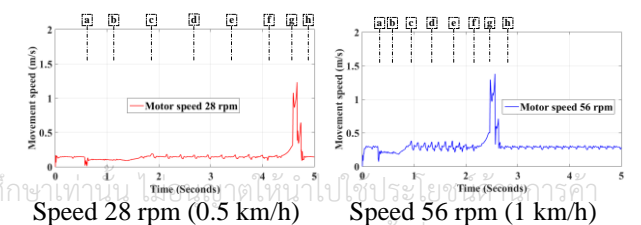
the product of the motor torque and speed. If the motor speed increases while the motor torque remains constant, the motor power increases accordingly. Moreover, an excessive motor speed results in the vibration of the RPCEW and fluctuations in various parameters, which, in turn, result in unsafe conditions for use. The simulation results in Table 9 show that a motor speed in the range of 0–56 rpm (0–1 km/h) is the most suitable for climbing applications, owing to the acceptable vibrations and motor power at these speeds. The maximum motor power values obtained from this simulation were 123.88, 263.21, 426.04, and 648.74 W at motor speeds of 28, 56, 84, and 112 rpm, respectively; correspondingly, the maximum motor torques were 42.25, 44.88, 48.43, and 55.31 Nm, and the maximum linear actuator forces were 3550.25, 3668.95, 4354.02, and 5950.91 N. Overall, the higher the motor speed, the lower is the operating time. The operating times of the 28, 56, 84, and 112 rpm models were 4.5, 2.5, 1.7, and 1.45 s, respectively, which can be observed from the spire formed upon the completion of the task at point g.



(a) Comparison of motor power under different motor speeds



(b) Comparison of motor torque under different motor speeds



Speed 28 rpm (0.5 km/h) Speed 56 rpm (1 km/h)

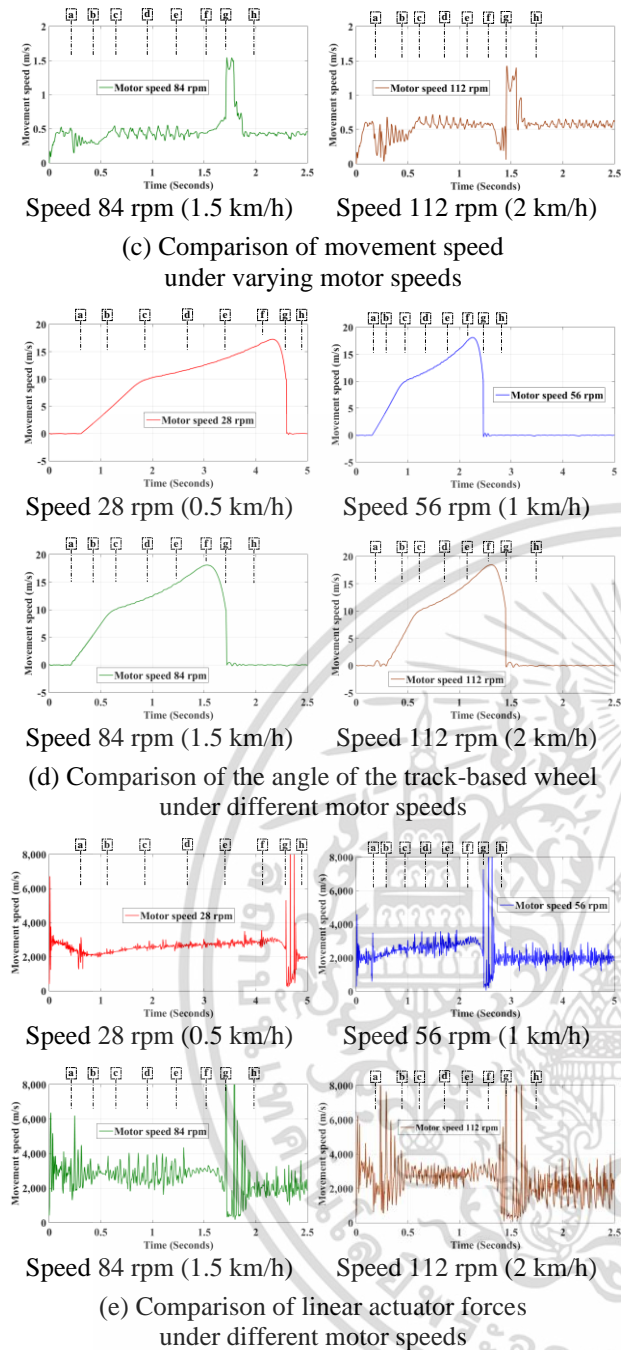


Fig. 13. Comparisons of the effect of change in motor speed.

Table 9. Maximum parameters of each motor speed.

Motor speed (rpm)	28	56	84	112	Unit
Motor power	123.88	263.21	426.04	648.74	W
Motor torque	42.25	44.88	48.43	55.31	N.m.
Movement speed	0.19	0.38	0.55	0.72	m/s
Angle of the wheel	17.28	18.10	18.09	18.47	degree
Linear actuator force	3550.25	3668.95	4354.02	5950.91	N

### 3.4 Comparison of the effect of change in step height

The RPCEW is designed to climb pavements or stairs for daily travel. Generally, the design of a stair is determined by Ministerial Regulation No. 55 (B.E. 2543) issued under the Building Control Act, B.E. 2522, Chapter 2, Part 3, according to which "The width of the stairs is not less than 80 cm. One span is not more than 3 m high. The riser should not be higher than 20 centimetres and the tread is not less than 22 centimetres." The height of the pavement edge does not have a clear definition; however, generally, the height is in the range of 0–20 cm. Therefore, this research determined a riser with a height of 5–20 cm for the pavement climbing test of the RPCEW. Accordingly, the riser was set at 5, 10, 15, and 20 cm in each simulation, and the other parameters were defined as follows: constant motor speed of 56 rpm (1 km/h), payload of 1500 N, and seat angle of 30° were maintained.

Changing the step height directly affects the operating time and angle of the track-based wheel. In Fig. 14 (a) and (b), the lower the step height, the lower the operating time; however, the power and torque remain the same. Initially, for the angle of the track-based wheel while climbing, the front of the track-based wheel is attached to the edge of the step. In Table 10, the maximum angles while using the front wheel to climb are 3.37°, 6.76°, 10.16°, and 13.61° at each height, respectively. It then goes to the tail wheel mode, and the maximum angles are 4.64°, 10.56°, 18.10°, and 31.79°, respectively. The trends of the track-based angle were similar for all step heights. However, the maximum angle value is dependent on the step height and seat angle. Therefore, if the step height and seat angle are balanced, this maintains the minimum angle of the track-based wheel, preventing overturning, and significantly improving stability, as shown in Fig. 14 (d). Lastly, the higher the step height, the greater the linear actuator force, primarily because the angle of this force is further away from the vertical, as shown in Fig. 14 (e).

Table 10. Maximum parameters of each step height.

Step height (cm)	5	10	15	20	Unit
Motor power	274.63	243.67	253.19	252.96	W
Motor torque	46.83	41.55	43.17	43.14	N.m.
Movement speed	0.38	0.38	0.39	0.40	m/s
Angle of the wheel	4.64	10.56	18.10	31.79	degree
Linear actuator force	3685.12	4126.55	3753.69	3897.99	N

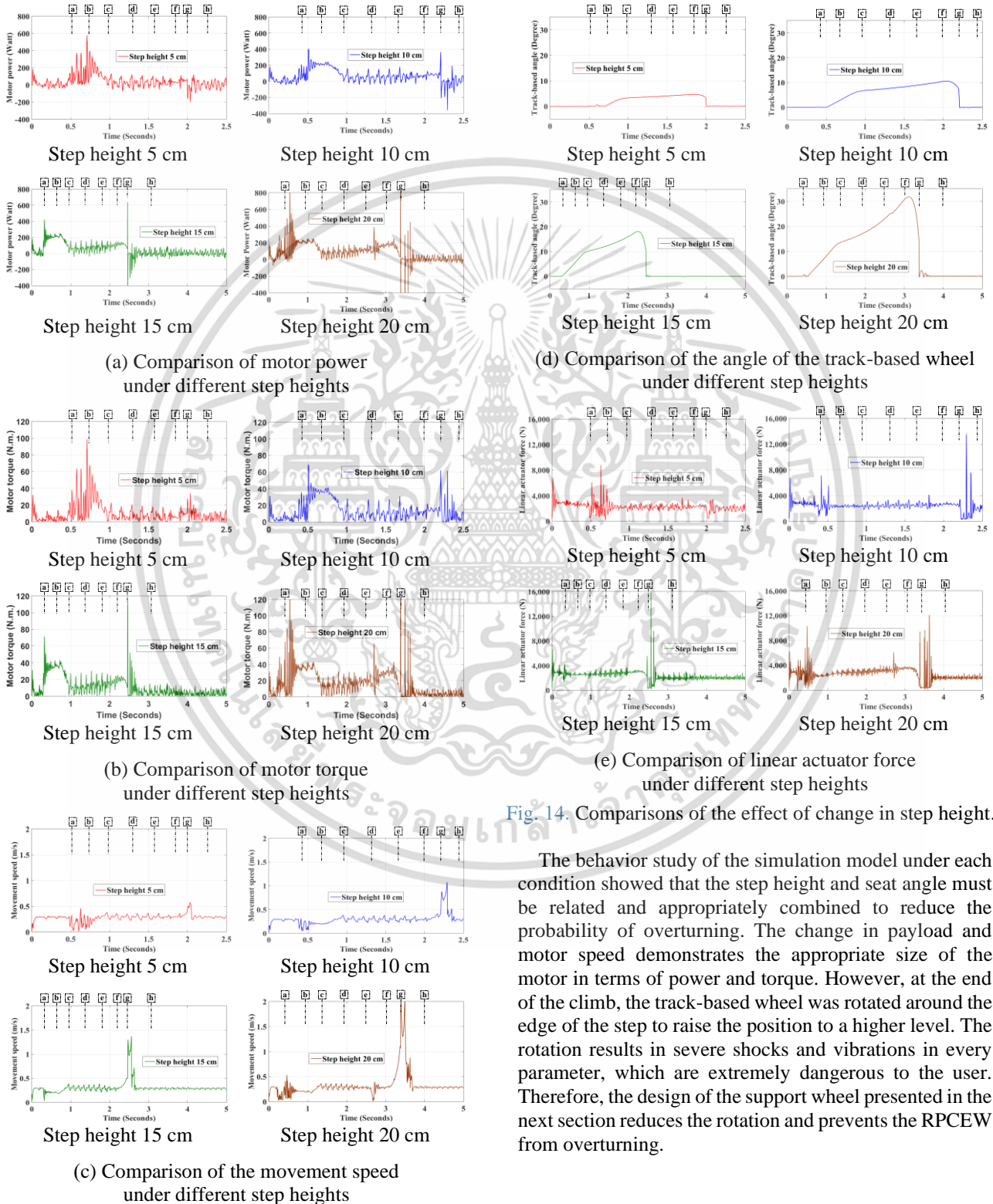


Fig. 14. Comparisons of the effect of change in step height.

The behavior study of the simulation model under each condition showed that the step height and seat angle must be related and appropriately combined to reduce the probability of overturning. The change in payload and motor speed demonstrates the appropriate size of the motor in terms of power and torque. However, at the end of the climb, the track-based wheel was rotated around the edge of the step to raise the position to a higher level. The rotation results in severe shocks and vibrations in every parameter, which are extremely dangerous to the user. Therefore, the design of the support wheel presented in the next section reduces the rotation and prevents the RPCEW from overturning.

#### 4. SIMULATION OF SUPPORT WHEEL

Based on the simulation in Section 3, the track-based wheel rotates and falls to the ground after the track-based angle reaches a maximum value. In this section, a support wheel is designed to solve this problem and increase climbing stability, as shown in Fig. 15. Accordingly, the support wheel must be able to raise the track-based angle above the normal case in Section 3 to prevent buoyancy of the support wheel. The operation of the RPCEW is similar to that depicted in Fig. 10; however, a support wheel is added to reduce the bumping upon completing the work. As illustrated in Fig. 16 (d), the motion simulation sets the support wheel to start working when the front wheel successfully climbs. Subsequently, the height of the support wheel determines the angle of the track-based wheel. As shown in Fig. 16 (g) and (h), when the track-based wheel can climb a higher level, the support wheel is collected, and the track-based wheel is lifted to return to the horizontal running mode.

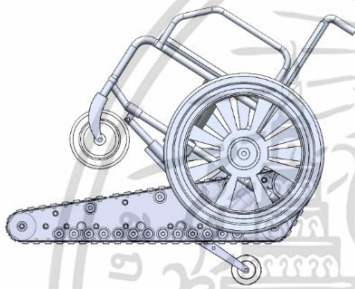


Fig. 15. The RPCEW with the support wheel.

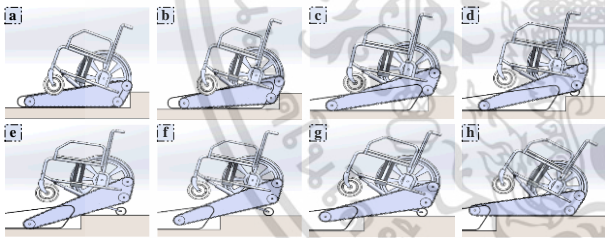
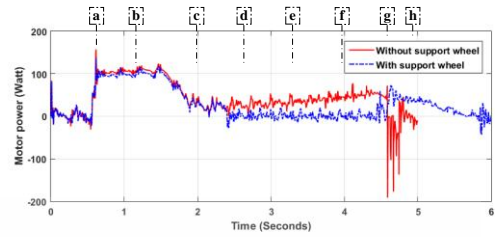


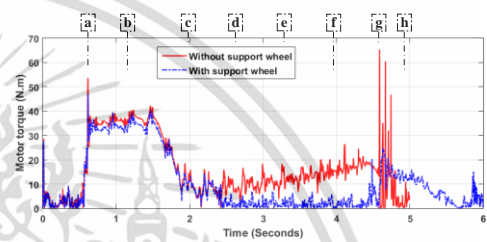
Fig. 16. Motion simulation of the RPCEW with the support wheel.

The support-wheel performance was simulated and tested for a 15 cm step height, constant motor speed of 28 rpm (0.5 km/h), 1500 N payload, and seat angle of 30°. The test results were compared for the motor power and torque, movement speed, angle of the track-based wheel, and linear actuator force between the RPCEW with and without the support wheel, as shown in Fig. 17. As shown in Fig. 17 and Table 11, the support wheel can reduce the power and torque of the motor during tailwheel climbing and decrease the oscillation of both values, resulting in a more stable system. The system maintained a relatively constant linear actuator force and movement speed. Moreover, reducing the motor speed also reduces the spire caused by the front-wheel collision, as shown at point a in Fig. 17. In terms of reducing the shock during the finishing operation, although the installation of the support wheel solves the problem of falling and bumping (at point g in Fig. 17), the track-based angle with the

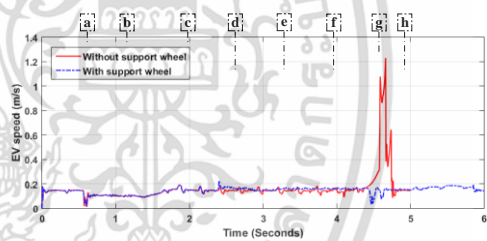
support wheel is always higher than the maximum track-based angle without it to prevent its buoyancy, as shown in Fig. 17 (d). In the future, motor control and Internet of Things (IoT) systems [32]–[35] will be installed in the RPCEW experimental setup to reduce the spire effect and improve the efficiency of security in use.



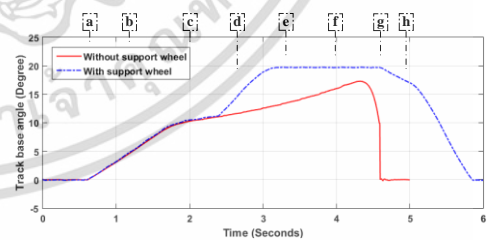
(a) Comparison of motor power for the RPCEW with and without a support wheel.



(b) Comparison of motor torque for the RPCEW with and without a support wheel.



(c) Comparison of movement speed for the RPCEW with and without a support wheel.



(d) Comparison of angles of the track-based wheel for the RPCEW with and without a support wheel

Fig. 17. Comparison of the RPCEW with and without support wheel.

Table 11. Maximum parameters while with and without support wheel

Support wheel	Without	With	Unit
Motor power	123.88	117.85	W
Motor torque	42.25	40.19	N.m.
Movement speed	0.19	0.22	m/s
Angle of the wheel	17.28	19.73	degree

## 5. CONCLUSION

This study investigated the design of the RPCEW for the elderly and disabled. The RPCEW is a combination of a commercial electric wheelchair and the proposed track-based wheel. SolidWorks was employed to design and simulate the usability of the RPCEW for the static and motion analyses, leading to the creation of a future experimental setup.

In the static analysis, a track-based wheel frame was analyzed in terms of the stress, strain, and displacement of the frame to prevent deformation and reduce the probability of accidents. This frame uses a 6061-aluminum alloy as a material and can carry a total weight of 2000 N. The maximum stress and strain are on the bar that connects the linear actuator and does not exceed the yield strength ( $5.515 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ ) of the material. Thus, this frame will not be deformed while it is in use. The displacement of the structure is less than 0.05 mm, which is still considered acceptable and does not pose a significant risk to its use. Therefore, the overall designed structure was sufficiently strong for practical use and had an acceptable weight.

In the motion analysis, the effects of changing the seat angle, payload, motor speed, and step height on the power and torque of the drive motor, movement speed, angle of the track-based wheel, and the linear actuator force were studied. The application patterns and parameters were considered to determine the suitability of climbing steps. Evidently, changing the seat angle had an effect on the angle of the track-based wheel and the linear actuator force; however, the optimal seat angle must be determined according to the step height. A change in the payload directly affects the power and torque of the motor and the linear actuator force, primarily because the motor must have sufficient force to lift the weight of the RPCEW and its user. However, it had little effect on the operating time, movement speed, and angle of the track-based wheel. The change in the motor speed directly affects the operating time and motor power. However, it has little effect on the motor torque and angle of the track-based wheel. Lastly, the increment in the step height increases the operating time and angle of the track-based wheel.

Suitable motors and linear actuators to drive this track-based wheel should have the following properties.

- The maximum motor power is achieved when the RPCEW climbs a step with a payload of 2000 N, which has a motor power of 295.35 W. Therefore, the minimum motor power should be 350 W.

- The maximum motor torque is achieved when the RPCEW climbs a step with a payload of 2000 N, which has a motor torque of 50.36 Nm. The radius of the track-based roller is 47 mm, while the general motor shaft radius is 5 mm, so the general motor torque can be calculated as 5.36 Nm. Therefore, the minimum motor torque that should be used is 7 Nm or 71.38 kg cm.

- The maximum force of the linear actuator when the RPCEW climbs a step with a payload of 2000 N has a value of 4721.86 N. Therefore, the minimum force that should be used is 5000 N.

This RPCEW can climb a height of 20 cm at a reasonable speed of up to 1 km/h and a maximum payload of 2000 N.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no competing financial interest or personal relationship that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## REFERENCES

- [1] Yi An, Tianqi Han, Hongyu Zhao, and Sen Qiu, "Simulation analysis on motion stability of smart wheelchair," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1873, pp. 1-7, 2021.
- [2] S. Andrea Sundaram, Hongwu Wang, Dan Ding, and Rory A. Cooper, "Step-Climbing Power Wheelchairs: A Literature Review," *Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation*, vol. 23, no. 2, pp. 98-109, 2017.
- [3] Babar Omkar, Godse Dhananjay, Kadate Suraj, Zalte Harshal, and Patil Rahul, "A Review on Design and Manufacturing of Manually Operated Stair Climbing Mechanism," *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, vol. 2, no. 12, pp. 137-141, 2019.
- [4] Tao Weijun, Xu Junyi, and Liu Tao, "Electric-powered wheelchair with stair-climbing ability," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 14, no. 4, 2017.
- [5] Pavel Svitok, Zuzana Husková, Lenka Červenková, Soňa Kikerlová, Zdenka Vaňourková, Lenka Sedláková, Šárka Vacková, Hana Šutovska, Michal Zeman, and Libor Kopkan, "The exaggerated salt-sensitive response in hypertensive transgenic rats (TGR mRen-2) fostered by a normotensive female," *Hypertension Research*, vol. 42, pp. 459-468, 2018.
- [6] Lee Jongseok, Wonhyeong Jeong, Jaeh Han, Taesu Kim, and Schoon Oh, "Barrier-Free Wheelchair with a Mechanical Transmission," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, 2021.
- [7] A. A. Jorge, L. A. M. Riascos, and P. E. Miyagi, "Modelling and control strategies for a motorized wheelchair with hybrid locomotion systems," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 1, pp. 1-15, 2021.
- [8] Hern Antono, Lutfi Maula Robbi, Endah Suryawati Ningrum, and Didik Setyo Purnomo, "Design, stress analysis and determination of center of gravity on stair climber wheelchair," *International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA)*, pp. 118-122, 2017.
- [9] Giuseppe Quaglia, Walter Franco, and Riccardo Oderio, "Wheelchair.q, a motorized wheelchair with stair climbing ability," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 46, no. 11, pp. 1601-1609, 2011.
- [10] Kasi V Rao Pothamsetty, "Design of Stair-Climbing Wheelchair Using Tri-Wheel Mechanism," *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, vol. 8, no. 4, pp. 717-726, 2018.
- [11] B. G. Sivakumar and K. Sudhagar, "An independent situating and navigation system for stair climbing robotic wheelchair," *Swansea Printing Technology Ltd, Taga Journal*, vol. 14, pp. 2771-2784, 2018.

- [12] Prajapat Manish, Sikchi Vishwajeet, Shaikh-Mohammed Javeed, and S. Sujatha, "Proof-of-concept of a stair-climbing add-on device for wheelchairs," *Medical Engineering & Physics*, vol. 85, pp. 75-86, November 2020.
- [13] Mani Kota Rajasekhar Tumula and M Sugadev, "Arduino Controlled Special Stair Climbing Wheelchair Bot," *Indian Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 118, no. 24, pp. 1-12, 2018.
- [14] Alex Anchivilca Baltazar, Manuel Humberto Luque Casanave, Emerzon Reyes Reyes, and Alan Andrés Pesantes Marcos, "Development of an Electric Wheelchair Designed to Climb Steps and to be Controlled by the Body Movement," *International Journal of Applied Biomedical Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 23-30, 2020.
- [15] K. Sasaki and K. Suzuki, "Active Rotary-Legs Mechanism for Stair-Climbing Mobility Vehicle," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 2237-2244, 2018.
- [16] Chang-Hyuk Lee, Kyung-min Lee, Jehong Yoo, In-su Kim, and Young-bong Bang, "A compact stair-climbing wheelchair with two 3-DOF legs and a 1-DOF base," *Industrial Robot*, vol. 43, no. 2, pp. 181-192, 2016.
- [17] Yusuke Sugahara, Naoaki Yonezawa, and Kazuhiro Kosuge, "A novel stair-climbing wheelchair with transformable wheeled four-bar linkages," *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan*, pp. 3333-3339, 2010.
- [18] P. K. Behera and A. Gupta, "Novel design of stair climbing wheelchair," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 32, no. 10, pp. 4903-4908, 2018.
- [19] Michael Hinderer, Petra Friedrich, and Bernhard Wolf, "An autonomous stair-climbing wheelchair," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 94, pp. 219-225, 2017.
- [20] Yoshikazu Mori, Kaoru Katsumura, and Katsuya Nagase, "A pair of step-climbing units for a manual wheelchair user: Passing over several steps using a pair of portable slopes," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 3, 2017.
- [21] Pham Quoc Thai, Van Cong Tai, and Le Minh Tien, "Design and Implementation of an Electric Wheelchair Operating in Different Terrains," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 9, no. 6, pp. 797-802, 2020.
- [22] Meng Ning, Ke Yu, Chuanzhong Zhang, Zhi Wu, and Yanquan Wang, "Wheelchair design with variable posture adjustment and obstacle-overcoming ability," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 197, 2021.
- [23] Jose Abel Chocoteco, Rafael Morales, and Vicente Felu-Battle, "Enhancing the Trajectory Generation of a Stair-Climbing Mobility System," *Sensors*, vol. 17, no. 11, 2017.
- [24] Nor Maniha Ghani and Mohammad Osman Tokhi, "ADwi-Phase Fuzzy Control Structure for an Auto-mode Stair Climbing Wheelchair," *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, UK, pp. 4694-4699, 2013.
- [25] Giuseppe Quaglia and Matteo Nisi, "Design of a self-leveling cam mechanism for a stair climbing wheelchair," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 112, pp. 84-104, 2017.
- [26] Giuseppe Quaglia, Matteo Nisi, Walter Franco, and Luca Bruzzone, "Dynamic Simulation of an Electric Stair-Climbing Wheelchair," *International Journal of Automation Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 472-480, 2017.
- [27] Hidetoshi Ikeda, Takafumi Toyama, Daisuke Maki, Keisuke Sato, and Eiji Nakano, "Cooperative step-climbing strategy using an autonomous wheelchair and a robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 135, 2021.
- [28] Yatin S, Srivatsa Nadiger, Siddharth S Motagi, Manoj Kumar M. M., T. Madhusudhan, "Stair Climbing Wheelchair," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 8, no. 8, 2019.
- [29] Shuro Nakajima, "Stair-climbing gait for a four-wheeled vehicle," *Robomech Journal*, vol. 7, no. 20, pp. 1-8, 2020.
- [30] Tao Weijun, Jia Yongxiang, Liu Tao, Yi Jingang, Wang Hesheng, and Inoue Yoshio, "A novel wheel-track hybrid electric powered wheelchair for stairs climbing," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 10, no. 4, 2016.
- [31] Natthanon Phannil and Chaian Jattanasen, "Design of a Personal Mobility Device for Elderly Users," *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2021, 2021.
- [32] Zhichen Li, Hao Zhang, Huaicheng Yan, Hak-Keung Lam, and Congzhi Huang, "Aperiodic Sampled-Data Takagi-Sugeno Fuzzy Extended State Observer for A Class of Uncertain Nonlinear Systems with External Disturbance and Unmodeled Dynamics," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Early Access, pp. 1-12, 2021.
- [33] Zhichen Li, Huaicheng Yan, Hao Zhang, Hak-Keung Lam, and Meng Wang, "Aperiodic Sampled-Data-Based Control for Interval Type-2 Fuzzy Systems via Refined Adaptive Event-Triggered Communication Scheme," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 29, no. 2, pp. 310-321, 2021.
- [34] Zhichen Li, Huaicheng Yan, Hao Zhang, Xisheng Zhan, and Congzhi Huang, "Improved inequality-based functions approach for stability analysis of time delay system," *Automatica*, vol. 108, 2019.
- [35] Zhichen Li, Huaicheng Yan, Hao Zhang, Yan Peng, Ju Park, and Yong He, "Stability analysis of linear systems with time-varying delay via intermediate polynomial-based functions," *Automatica*, vol. 113, 2019.



**Natthanon Phannil** received the B.E. and M.E. degrees in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, in 2018. He is currently a Ph.D. student at the department of electrical engineering, the School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. His research

interests are on electromagnetic interferences, electric vehicle, internet of thing, embedded system, power quality, and microgrid system.



**Chaian Jettons** received the B.E. and M.E. degrees in electrical engineering from Institute National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France, in 2005 and the Ph.D. degree in electrical engineering from Ecole Centrale de Lyon, France, in 2008. He is currently an assistant professor at the department of electrical engineering, the

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. His research interests are on the electromagnetic interference for converters and inverters, power quality, and microgrid system.

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย ณัฐนนท์ พันธุ์นิล
วัน เดือน ปีเกิด	24 สิงหาคม 2535
ที่อยู่	เลขที่ 9 หมู่ 8 ตำบลน้ำน้อย อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110
โทรศัพท์	092-717-5998
อีเมล	aun_2535_006@hotmail.com, 61601179@kmitl.ac.th
ประวัติการศึกษา	2561 - ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วศ.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2558 - 2561 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2554 - 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ระบบส่งและจำหน่ายไฟฟ้า (Transmission and distribution system) 2.) วงจรกรองสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI filter) 3.) ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric vehicle) 4.) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic system) 5.) ระบบเซ็นเซอร์ (Sensor system) 6.) บอร์ดสมองกลฝังตัว (Embedded board) 7.) ระบบอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง (Internet of Thing : IoT) 8.) การออกแบบระบบไฟฟ้าภายในอาคาร (Indoor electrical design)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ.2562 - ปัจจุบัน ตำแหน่งนักวิจัย ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- ผลงานการออกแบบชุดทดลองระบบสายส่งและจำหน่ายไฟฟ้า
- ผลงานการออกแบบชุดทดลองระบบไฟฟ้าสามเฟส
- ผู้ร่วมวิจัย ทุนสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
- ผู้ร่วมวิจัย ทุนคณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.
- นักศึกษา ทุน KMUTL Doctoral Scholarships

พ.ศ.2559 - ปัจจุบัน ตำแหน่งที่ปรึกษาเทคโนโลยี (Innovation Technology Assistance : ITA) ที่ โปรแกรมสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย เครือข่าย สจล. ในสังกัดสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) (Innovation Technology Assistance Program : iTAP)

1. ดูแลโครงการการพัฒนาต้นแบบกระบวนการผลิตเยลลี่ 0 แคลอรีผสมวุ้นมะพร้าว ของห้างหุ้นส่วนสามัญมี  
รหัสโครงการ : CU-2560-1262 / PI-60-1204
2. ดูแลโครงการโครงการให้คำปรึกษาในการปรับปรุง Boiler เชื้อเพลิงแข็งขนาด 8 Ton/h ให้เป็น SMART Boiler ของบริษัท อำพลฟูดส์ โพรเซสซิ่ง จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2562-1101 / PI-62-1042
3. ดูแลโครงการให้คำปรึกษาเพื่อจัดทำระบบ IATF 16949 : 2016 ของบริษัท ซีเทค ออโต้ พาร์ทจำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2562-1748 / PI-62-1370
4. ดูแลโครงการให้คำปรึกษาเพื่อจัดทำ หลักเกณฑ์วิธีการที่ดีในการผลิต (GMP CODEX) ของห้างหุ้นส่วนจำกัด พงษ์พันธ์ เทรดตั้ง  
รหัสโครงการ : CU-2562-1762 / PI-62-1415
5. ดูแลโครงการการให้คำปรึกษาในการพัฒนากระบวนการหมักผักกาดเขียวปลีในถังหมัก ของบริษัทโรซ่าเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2562-1870 / PI-62-1416

6. คู่มือโครงการการให้คำปรึกษาในการจัดทำระบบมาตรฐาน BRC PPM Issue 6  
ของ บริษัท พี จี พลาสติก(2001) จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2562-1774 / PI-62-1475
7. คู่มือโครงการการพัฒนาระบบติดตามและตรวจสอบคุณภาพการผลิตเมล็ดพันธุ์ผ่าน Mobile Application  
ของ บริษัท เอ.จี.ยูนิเวอร์แซล จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2563-0238 / PI-63-0221
8. คู่มือโครงการให้คำปรึกษาสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ Guascor HGM 560  
ของ บริษัท สู่เพิร์บ พาวเวอร์ จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2562-2067 / PI-63-0223
9. คู่มือโครงการให้คำปรึกษาในการสร้างและทดสอบเตาเผาขยะประสิทธิภาพสูงร่วมกับระบบกักเก็บความร้อน  
ของ บริษัท โซติแอกซ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2562-2349 / PI-63-0222
10. คู่มือโครงการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องกลั่นน้ำส้มควันไม้ประสิทธิภาพสูง  
ของ บริษัท โพรเอส โกลเด้น แบบมู จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2563-2270 / PI-64-0048
11. คู่มือโครงการให้คำปรึกษาเพื่อจัดทำระบบ IATF 16949 : 2016  
ของ บริษัท ธนบุรี เอ็นเนอร์ยี สตอเรจ แมนูแฟคเจอริ่ง จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2563-0326 / PI-63-0393
12. คู่มือโครงการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ Sim Box (FRTU Simulation Box) สำหรับทดสอบ FRTU ในระบบจำหน่ายไฟของการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าภูมิภาค  
ของ บริษัท คล่องเทคโนโลยี จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2563-0483 / PI-63-0521
13. คู่มือโครงการให้คำปรึกษาเพื่อจัดทำหลักเกณฑ์วิธีการที่ดีในการผลิต (GMP CODEX)  
ของ บริษัท อริยะเอฟแอนด์บี จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2562-2026 / PI-63-0727

14. คู่มือโครงการพัฒนาระบบการเลี้ยงปลาร่วมกับการปลูกผักในพื้นที่จำกัด  
ของ บริษัท ทรีโอวู้ด แอนด์ ซัพพลาย จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2563-1702 / PI-63-1214
15. คู่มือโครงการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องกลั่นน้ำส้มควั่นไม้ประสิทธิภาพสูง  
ของ บริษัท โฟร์เอส โกลเด้น แบบนู จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2563-2270 / PI-64-0048
16. คู่มือโครงการพัฒนาการจัดการเลี้ยงสุกรและเกรดคุณภาพซากเพื่อผลิตเนื้อสุกรเสริมโอเมก้า3  
ของ บริษัท คาร์กิลล์สยาม จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2564-0080 / PI-64-0195
17. คู่มือโครงการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยท่อความร้อน  
ของ บริษัท ตองแปด เอ็ม แอนด์ อี จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2564-0358 / PI-64-0271
18. คู่มือโครงการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศในองค์กร (ERP)  
ของ บริษัท ครีเอทีฟ อินโนเวชั่น จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2564-0773 / PI-64-0646
19. คู่มือโครงการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศในองค์กร (ERP)  
ของ บริษัท ครีเอทีฟ โพลีเมอร์ส จำกัด  
รหัสโครงการ : CU-2564-0950 / PI-64-0787

พ.ศ.2558 - ปัจจุบัน ตำแหน่งวิศวกรออกแบบระบบไฟฟ้า อาชีพอิสระ

- ผลงานการออกแบบระบบไฟฟ้าของบ้านโครงการบริษัท Land & Houses
- ผลงานการออกแบบระบบไฟฟ้าของศูนย์แว่นตา Chavalit Optic
- ผลงานการออกแบบระบบไฟฟ้าของบ้านลัดดารมย์
- ผลงานการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสนามบินสุวรรณภูมิ

พ.ศ.2562 - 2563 ตำแหน่งอาจารย์พิเศษ ที่มหาวิทยาลัยเซนต์จอร์จส์

- สอนวิชาระบบไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Engineering)
- สอนวิชาระบบควบคุม (Control System Engineering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานวิจัย

### Conferences

- [1] N. Phannil, C. Jettanasen and A. Ngaopitakkul, "Power quality analysis of grid connected solar power inverter," 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEEC 2017 - ECCE Asia), Kaohsiung, **2017**, pp. 1508-1513.
- [2] N. Phannil, and C. Jettanasen, "Analysis and Reduction of Conducted and Radiated Electromagnetic Interferences Generated in a Solar Power System," 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF 2017), Lodz, Poland, September 14-16, **2017**.
- [3] Pathomthat Chiradeja, Chaichan Pothisarn, Panu Srisuksai, Suntiti Yoomak, Atthapol Ngaopitakkul, and Natthanon Phannil, "Study on Installation of Neutral Ground Resistance in Very Small Power Plant Transformer," IAS Annual Meeting 2022, Detroit, Michigan, USA, October 9-13, **2022**

### Journal

- [1] N. Phannil, C. Jettanasen and A. Ngaopitakkul, "Harmonics and Reduction of Energy Consumption in Lighting Systems by Using LED Lamps," *Energies* **2018**, Vol. 11, <https://doi.org/10.3390/en11113169>.
- [2] N. Phannil and C. Jettanasen, "Design of a Personal Mobility Device for Elderly Users," *Journal of Healthcare Engineering* **2021**, Vol. 2021, pp. 1-22, <https://doi.org/10.1155/2021/8817115>.
- [3] P. Chiradeja, C. Pothisarn, N. Phannil, S. Ananwattananporn, M. Leelajindakraierk, A. Ngaopitakkul, S. Thongsuk, V. Pornpojratanakul, S. Bunjongjit, S. Yoomak, "Application of Probabilistic Neural Networks Using High-Frequency Components' Differential Current for Transformer Protection Schemes to Discriminate between External Faults and Internal Winding Faults in Power Transformers," *Appl. Sci.* **2021**, Vol. 11, <https://doi.org/10.3390/app112210619>.
- [4] Natthanon Phannil and Chaiyan Jettanasen, "Design and Simulation of Removable Pavement Edge Climbing Electric Wheelchair for Elderly and Disabled Users," *International Journal of Control, Automation, and Systems (IJCAS)* **2023**, Vol. 169.

[5] Chaichan Pothisarn, Atthapol Ngaopitakkul, Monthon Leelajindakraierk, Natthanon Phannil, Sulee Bunjongjit, Surakit Thongsuk, and Bancha Sreewirote, “Effects of Conditional Changes on High-Voltage Direct Current Transmission Line Characteristic,” *Journal of Electrical and Computer Engineering* **2023**, Vol. xxx.

## สิทธิบัตร

### สิทธิบัตรการประดิษฐ์

1. ชื่อสิ่งประดิษฐ์ : เครื่องตรวจจับความผิดปกติของภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยใช้เทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบไร้สาย

### สิทธิบัตรการออกแบบ

1. ชื่องานออกแบบ : ล้อโซ่สายพานสำหรับรถเข็นไฟฟ้าป็นพื้นต่างระดับแบบถอดประกอบได้  
เลขที่สิทธิบัตร : 2202004751 (มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ)

### ลิขสิทธิ์

1. ชื่อลิขสิทธิ์ : โปรแกรมวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงฝังแรงดันไฟฟ้าต่ำ (ปี 2565)  
เลขที่ลิขสิทธิ์ : 423812 (สำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง สจล.)
2. ชื่อลิขสิทธิ์ : โปรแกรมวงจรตรวจวัดกระแสไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงฝังแรงดันไฟฟ้าสูง (ปี 2565)  
เลขที่ลิขสิทธิ์ : 423813 (สำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง สจล.)
3. ชื่อลิขสิทธิ์ : โปรแกรมวงจรควบคุมการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า (ปี 2565)  
เลขที่ลิขสิทธิ์ : 423811 (สำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง สจล.)
4. ชื่อลิขสิทธิ์ : โปรแกรมตรวจจับความผิดปกติของภายในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (ปี 2565)  
เลขที่ลิขสิทธิ์ : 423783 (สำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง สจล.)
5. ชื่อลิขสิทธิ์ : โปรแกรมคำนวณผลต่างเวลาการวัดค่าสัญญาณด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ (ปี 2565)  
เลขที่ลิขสิทธิ์ : 423782 (สำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง สจล.)
6. ชื่อลิขสิทธิ์ : โปรแกรมคำนวณผลต่างกระแสไฟฟ้าเฟสด้วยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (ปี 2565)  
เลขที่ลิขสิทธิ์ : 423781 (สำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง สจล.)
7. ชื่อลิขสิทธิ์ : โปรแกรมคำนวณผลต่างกระแสไฟฟ้าเฟสด้วยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (ปี 2565)  
เลขที่ลิขสิทธิ์ : 423780 (สำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง สจล.)
8. ชื่อลิขสิทธิ์ : โปรแกรมคำนวณผลต่างกระแสไฟฟ้าเฟสด้วยคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (ปี 2565)  
เลขที่ลิขสิทธิ์ : 423779 (สำนักบริหารงานวิจัยและนวัตกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง สจล.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้