

การพัฒนาระบบรถขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับระบบอัตโนมัติ
ที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงานและโลจิสติกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC CASSAVA STARCH
TRANSPORTATION SYSTEM USING ELECTRIC VEHICLE
TECHNOLOGY



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Energy and Logistics Management Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

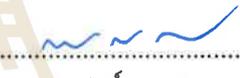
การพัฒนาระบบรถขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับหลังแบบอัตโนมัติที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทฉบับนี้

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....
(อ. ดร.กฤษดา มงคลดี)
ประธานกรรมการ


.....
(ผศ. ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


.....
(ผศ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)
กรรมการ


.....
(ผศ. ดร.กীরติ สุกข์เกษม)
กรรมการ


.....
(ผศ. ดร.สุรเดช ตัญตริยรัตน์)
กรรมการ


.....
(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ


.....
(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศุภชัย แก้วพวง : การพัฒนาระบบรถขนส่งแป้งมันสำปะหลังแบบอัตโนมัติที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า (DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC CASSAVA STARCH TRANSPORTATION SYSTEM USING ELECTRIC VEHICLE TECHNOLOGY)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย, 287 หน้า.

คำสำคัญ : แป้งมันสำปะหลัง, โรงงานอุตสาหกรรม, ยานยนต์ไฟฟ้า, ระบบนำทางอัตโนมัติ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบขนส่งแป้งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถขนส่งอัตโนมัติที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อทดแทนการขนส่งแป้งมันสำปะหลังแบบดั้งเดิม ที่ใช้รถบรรทุกระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้ง โดยมีลำดับขั้นตอนของการพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติ แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ การพัฒนาโครงสร้าง การพัฒนาระบบขับเคลื่อน การพัฒนาระบบบังคับเลี้ยว การพัฒนาระบบตรวจสอบน้ำหนัก และการพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติ และระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง เพื่อทดสอบสมรรถนะของรถขนส่งอัตโนมัติในการวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังที่มีพิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg มีระบบตรวจสอบน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังที่บรรทุกโดยใช้โหลดเซลล์ก่อนทำการวิ่งขนส่ง และวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้ง ซึ่งมีระยะทางรวมทั้งขาไปและขากลับ 400 m ด้วยการนำทางแบบอัตโนมัติโดยใช้กล้องในรูปแบบ Line Following ระหว่างวิ่งนำทางอัตโนมัติมีระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางโดยใช้เลเซอร์ในการตรวจจับในการทดสอบวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังด้วยรถขนส่งอัตโนมัติที่ระยะทางรวม 400 m พบว่าค่ากำลังไฟฟ้ารวม P_e (W) และพลังงานไฟฟ้ารวม E_T (kWh) จากการคำนวณและทดสอบวิ่งใช้งานจริงมีความคลาดเคลื่อน 2.29% และ 1.63% ตามลำดับ รวมทั้งเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการขนส่งแป้งมันสำปะหลังระหว่างรถบรรทุกและรถขนส่งอัตโนมัติ โดยทดสอบการใช้รถขนส่งอัตโนมัติบรรทุกแป้งมันสำปะหลังพิกัด 4,800 kg ต่อรอบ และการใช้รถบรรทุกแป้งมันสำปะหลังพิกัด 28,800 kg ต่อรอบ พบว่าการใช้รถขนส่งอัตโนมัติวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเฉลี่ย 870.83 บาทต่อวัน ซึ่งคิดต่อปี สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเฉลี่ย 317,852.95 บาทต่อปี รวมทั้งวิเคราะห์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกระหว่างการใช้อัตโนมัติและรถขนส่งอัตโนมัติในการวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลัง พบว่าการใช้รถขนส่งอัตโนมัติทดแทนการวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังด้วยรถบรรทุกสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ย 77.22 kg.Co₂ ต่อวัน และคิดต่อปี สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ย ได้ถึง 28,185.30 kg.Co₂ ต่อปี ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 95.48% ดังนั้น งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการปรับเปลี่ยนมาใช้รูปแบบระบบขนส่งด้วยเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศได้เป็นอย่างดี

สาขาวิชา วิศวกรรมการจัดการพลังงานและโลจิสติกส์
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา.....ศุภชัย แก้วพวง
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย

SUPACHAI KAEWPOUNG : DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC CASSAVA STARCH
TRANSPORTATION SYSTEM USING ELECTRIC VEHICLE TECHNOLOGY.
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. TOSAPHOL RATNIYOMCHAI, 287 PP.

Keywords: Cassava starch, Industrial plants, EV, Automatic navigation system

In this study, an autonomous transport vehicle equipped with EV technology is used to develop an industrial system for the transportation of cassava starch. The primary goal is to do away with the current method of moving cassava starch, which involves using trucks to move it from production lines to flour warehouses. The development of autonomous transportation vehicles involves five stages, including the development of the drive system and the structure. development of automated navigation and obstacle detection systems, steering mechanisms, and weight monitoring systems. To evaluate the efficiency of automated transport trucks carrying a maximum 4,800 kg load capacity when moving cassava starch. A system is in place to weigh the cassava starch that has been loaded using load cells prior to shipping, and the cassava starch is transported 400 meters total between the production line and the flour warehouse. The automatic navigation system has an obstacle detection system that uses LIDAR to detect obstacles during the run. In the 400 m cassava starch test run with an autonomous transport vehicle, the total power P_e (W) and the total energy E_T (kWh) from the calculation and test run were found to be, respectively, 2.29% and 1.63%. Additionally, a comparison of the energy costs for transporting cassava starch using automated versus truck-based vehicles is provided. Two automated transport trucks, one with a 4,800 kg capacity and the other with a 28,800 kg capacity, were used for the test. It was found that using automated transport trucks to move cassava starch saved an average of 870.83 baht per day, or 317,852.95 baht per year, in energy costs. In order to transport cassava starch, it also examines the greenhouse gas emissions between trucks and autonomous transport trucks. Researchers discovered that using automated transportation trucks instead of trucks to transport cassava starch can reduce greenhouse gas emissions by an average of 77.22 kg.Co₂ per day and 28,185.30 kg.Co₂ annually, or 95.48% of the total. Therefore, when implementing EV technology in transportation systems, the cassava starch industry and other associated industries, both nationally and internationally, can utilize this research as a guide.

School of Energy and Logistics Management Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature...
Advisor's Signature...

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำวิธีการทำงานและแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน ให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ บัตรสูงเนิน ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ด้านวิชาการ ที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งเป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาดำเนินงาน

ขอขอบคุณคณะกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์คณาจารย์บัณฑิตทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำ และองค์ความรู้เพิ่มเติมอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุน OROG) สถาบันมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายด้านทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัย ตลอดจนสำเร็จการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

ขอขอบคุณ คุณชัชชัย ประยูรวิทย์ ผู้จัดการแผนกวิศวกรรมไฟฟ้า รวมทั้งทีมบริหาร บริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด ที่สนับสนุนงบประมาณในการพัฒนาต้นแบบ และให้การสัมภาษณ์ข้อมูล อันเกิดประโยชน์ พร้อมสถานที่ดำเนินงานเพื่อใช้ในการทดสอบประกอบการทำวิจัยตลอดจนสำเร็จ

ขอขอบคุณกลุ่มนักศึกษาโปรเจกต์ระดับปริญญาตรีและปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรม เมคคาทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยดำเนินงาน ด้านการพัฒนาและการทดสอบของงานวิจัยนี้ ให้กับผู้วิจัยตลอดจนสำเร็จ

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ของสถาบันมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารีและต่างสถาบัน ที่ให้กำลังใจในการดำเนินงานวิจัยและการดำรงชีวิตมาโดยตลอดจนสำเร็จ

ขอขอบคุณ นางสาวณิชาธิ์ สมศรี ที่คอยเป็นกำลังใจอยู่เคียงข้างในระหว่างการทำงานวิจัยให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด นับตั้งแต่แรกเข้าจนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการและเป็นแบบอย่างในการดำรงชีวิตทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำเนิด รวมทั้งญาติมิตร ที่คอยให้กำลังใจและดูแลส่งเสริมทางด้านการศึกษา อย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

นายศุภชัย แก้วพวง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 ลักษณะธุรกิจของบริษัทที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน.....	1
1.1.2 ความต้องการของบริษัทเพื่อนำไปสู่งานวิจัย.....	4
1.1.3 ข้อสรุปในที่ประชุม.....	6
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	6
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	6
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	7
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	7
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	8
2 ปรัชมนวัตกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 ปรัชมนวัตกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.3 สรุป.....	20
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	21
3.1 บทนำ.....	21
3.2 มอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า.....	21
3.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ.....	22
3.2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร.....	23
3.2.3 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์.....	25
3.2.4 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์.....	27
3.2.5 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร.....	28

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.6	การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	30
3.3	แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	34
3.3.1	แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด	35
3.3.2	แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์	36
3.3.3	แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลแคดเมียม	36
3.3.4	แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	37
3.3.5	แบตเตอรี่ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า	38
3.3.6	แบตเตอรี่ชนิดโซลิตสเตต	39
3.3.7	แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน	40
3.3.8	การคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	41
3.4	ระบบบังคับเลี้ยวของยานยนต์	42
3.4.1	ระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิก	44
3.4.2	ระบบบังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้า	45
3.4.3	การคำนวณขนาดมอเตอร์บังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้า	45
3.5	ระบบนำทางอัตโนมัติ	47
3.5.1	การนำทางด้วยแม่เหล็ก	48
3.5.2	การนำทางด้วยเลเซอร์	48
3.5.3	การนำทางด้วย RFID	49
3.5.4	การนำทางแบบระบุพิกัด	50
3.5.5	การนำทางด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า	50
3.5.6	การนำทางด้วยแสง	51
3.5.7	การนำทางเฉื่อย	52
3.5.8	การนำทางด้วยการจดจำรูปภาพ	52
3.5.9	การนำทางด้วยจีพีเอส	53
3.6	ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง	54
3.6.1	เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ	54
3.6.2	เซ็นเซอร์ตรวจจับด้วยภาพ	55
3.6.3	เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุโดยใช้แสง	56
3.6.4	เซ็นเซอร์วัดระยะทาง	57
3.6.5	เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก	58
3.6.6	เซ็นเซอร์ไลดาร์	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7	ระบบตรวจสอบน้ำหนัก	59
3.7.1	โหลตเซลล์แบบ Single End Shear Beam	61
3.7.2	โหลตเซลล์แบบ Double End Shear Beam	62
3.7.3	โหลตเซลล์แบบ Single Point.....	62
3.7.4	โหลตเซลล์แบบ Bending Beam	63
3.7.5	โหลตเซลล์แบบ Pancake	63
3.7.6	โหลตเซลล์แบบ Canister.....	64
3.7.7	โหลตเซลล์แบบ S-Beam	64
3.7.8	การคำนวณน้ำหนักใช้งานโหลตเซลล์	65
3.8	ระบบควบคุมในภาคอุตสาหกรรม	65
3.8.1	รูปแบบพีแอลซี (PLCs)	67
3.8.2	รูปแบบพีเอซี (PACs)	68
3.8.3	รูปแบบดีซีเอส (DCS)	68
3.8.4	รูปแบบสกาด้า (SCADA)	69
3.8.5	รูปแบบไออีดี (IEDs)	70
3.9	โพรโตคอลการสื่อสารในภาคอุตสาหกรรม	70
3.9.1	ระดับ Classical Fieldbus System.....	71
3.9.2	ระดับ Industrial Ethernet.....	72
3.9.3	ระดับ Wireless Networks in Automation.....	73
3.10	การสื่อสารด้วยโพรโตคอล Modbus.....	74
3.11	Node-RED	76
3.12	Python	78
3.12.1	รูปแบบ Line Following.....	80
3.12.2	รูปแบบ Hough Line Transform	83
3.13	สรุป	84
4	การออกแบบระบบขนส่งแบ่งมันสำปะหลังด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ	85
4.1	บทนำ.....	85
4.2	ข้อกำหนดของการออกแบบและพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติ	86
4.3	การออกแบบโครงสร้างของรถขนส่งอัตโนมัติ	87
4.4	การออกแบบหาขนาดมอเตอร์ของรถขนส่งอัตโนมัติ	91
4.5	การออกแบบหาขนาดมอเตอร์บังคับเลี้ยวของรถขนส่งอัตโนมัติ	104

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6	การออกแบบหาขนาดแบตเตอรี่ของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 111
4.7	การออกแบบระบบนำทางและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง..... 119
4.8	การออกแบบระบบตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 128
4.9	การออกแบบระบบควบคุมของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 131
4.9.1	ระบบขับเคลื่อน..... 132
4.9.2	ระบบบังคับเลี้ยว..... 134
4.9.3	ระบบตรวจสอบน้ำหนัก..... 135
4.9.4	ระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง..... 137
4.9.5	อัลกอริทึมของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 138
4.10	สรุป..... 145
5	การพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง..... 146
5.1	บทนำ..... 146
5.2	การพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง..... 146
5.2.1	การพัฒนาโครงสร้างของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 147
5.2.2	พัฒนาระบบขับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 154
5.2.3	พัฒนาระบบบังคับเลี้ยวของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 167
5.2.4	พัฒนาระบบตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 183
5.2.5	พัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง..... 188
5.3	การทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติที่พิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg..... 219
5.3.1	การทดสอบและผลการทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติในกรณีวิ่งเดินทาง..... 223
5.3.2	การทดสอบและผลการทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติในกรณีวิ่งถอยหลัง..... 232
5.3.3	สรุปผลทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติในกรณีวิ่งเดินทางและวิ่งถอยหลัง..... 238
5.4	การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานของรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ..... 240
5.5	การวิเคราะห์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ..... 244
5.6	สรุป..... 245
6	สรุปและข้อเสนอแนะ..... 246
6.1	สรุปผลการดำเนินงาน..... 246
6.2	ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต..... 247

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในส่วนของการลงทุนที่เกี่ยวข้องกับระบบขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับหลัง.....	5
2.1	การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
3.1	คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวน 23	23
3.2	คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร.....	25
3.3	คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ 26	26
3.4	คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ 28	28
3.5	คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร.....	30
3.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นอากาศกับอุณหภูมิที่ 1 atm หรือ 101.325 kPa.....	32
3.7	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานล้อกับพื้น 33	33
3.8	ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรถแต่ละชนิด.....	34
3.9	ชนิดข้อมูล Function Name และ Function Code.....	76
4.1	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณหาแรงบิดและกำลังขับของมอเตอร์.....	93
4.2	ผลการคำนวณหาแรงดูดลาก แรงบิด และกำลังขับมอเตอร์.....	98
4.3	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ Induction Motor ขนาด 5 kW.....	100
4.4	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ เกียร์ทดรอบ ชนิด Cast Iron NMRV130.....	101
4.5	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ 5 kW 48 V Controller Model MC3528.....	103
4.6	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ แร็คแอนดพิเนียน ยี่ห้อ Polaris RZR S 900.....	106
4.7	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณหาแรงดูดที่ใช้เคลื่อนที่และแรงบิดของแร็คแอนดพิเนียน.....	107
4.8	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ เซอร์โวมอเตอร์ Model CM3-23L50A.....	108
4.9	ค่าพารามิเตอร์ระยะทาง ความเร็ว และกำลังไฟฟ้ามอเตอร์.....	112
4.10	ค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพมอเตอร์ อินเวอเตอร์ และการคายประจุของแบตเตอรี่.....	112
4.11	ผลการคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าของแต่ละช่วงความเร็ว.....	115
4.12	ผลการคำนวณหาพลังงานไฟฟ้ารวมของขาไป ขากลับ และที่ใช้ทั้งหมด ต่อ รอบ.....	116
4.13	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ Lithium-ion Battery 48 Vdc, 130 Ah.....	117
4.14	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของชุดชาร์จประจุแบตเตอรี่อัจฉริยะ 48 Vdc, 30 A.....	118
4.15	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของกล้อง HIKVISION รุ่น DS-2CD2625FWD-IZS.....	121
4.16	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ LIDAR SLAMTEC รุ่น RPLIDAR A3.....	123
4.17	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ GK3 Mini PC CPU Intel N5105/N100.....	123
4.18	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ Wecon New Style 7-inch HMI PI3070ie.....	125

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.19	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมพีแอลซี TM221CE16R Schneider Electric M221..... 126
4.20	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ Switching Hub 8 Port TP-LINK TL-SF1008D..... 127
4.21	รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 130
4.22	อุปกรณ์สำหรับออกแบบระบบควบคุมของรถขนส่งอัตโนมัติ 132
4.23	ซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบระบบควบคุมของรถขนส่งอัตโนมัติ 132
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความเร็วรอบ 133
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวและตำแหน่งในซอฟต์แวร์ 135
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเบี่ยงน้ำหนักสำหรับล้อกับสัญญาณนาฬิกาอินพุทของพีแอลซี..... 136
4.27	กำหนด IP Address ของแต่ละอุปกรณ์..... 138
4.28	กำหนดรหัสสี 4 ช่วง ขอบเขตต่ำสุด (Lower) และสูงสุด (Upper) 142
4.29	ความสัมพันธ์ Find Contours and Center และระบบบังคับเลี้ยว กรณีวิ่งเดินหน้า 142
4.30	ความสัมพันธ์ Find Contours and Center และระบบบังคับเลี้ยว กรณีวิ่งถอยหลัง..... 142
5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความเร็วรอบ 156
5.2	การกำหนดพารามิเตอร์ควบคุมความเร็ว วิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และเบรก 157
5.3	การควบคุมแบบ I/O Cable เซอร์โวมอเตอร์ของเงื่อนไข 7 คำสั่ง ในการบังคับเลี้ยว..... 169
5.4	การกำหนดพารามิเตอร์ควบคุมความเร็ว วิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และเบรก 169
5.5	การควบคุมแบบ I/O Cable เซอร์โวมอเตอร์ของเงื่อนไข 7 คำสั่ง ในการบังคับเลี้ยว..... 169
5.6	กำหนดรหัสสี 4 ช่วง ขอบเขตต่ำสุด (Lower) และสูงสุด (Upper) ในกรณีวิ่งเดินหน้า 191
5.7	เงื่อนไขสำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์รูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งเดินหน้า 194
5.8	เงื่อนไขสำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์รูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งถอยหลัง..... 195
5.9	เงื่อนไขทดสอบวิ่งนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งเดินหน้า 224
5.10	กำหนดขอบเขตรหัสสีต่ำสุด (Lower) และสูงสุด (Upper) 4 ช่วง ในกรณีวิ่งเดินหน้า..... 225
5.11	เงื่อนไขทดสอบวิ่งนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งถอยหลัง 233
5.12	เปรียบเทียบ % ความคลาดเคลื่อนผลที่ได้จากการคำนวณและผลทดสอบใช้งานจริง 239
5.13	ผลทดสอบการใช้รถขนส่งอัตโนมัติขนส่งเบี่ยงน้ำหนักจำนวน 10 รอบ 242
5.14	เปรียบเทียบผลทดสอบขนส่งเบี่ยงน้ำหนักสำหรับล้อระหว่างรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ 243
5.15	เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายพลังงานระหว่างรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ 243
5.16	ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor : EF)..... 244
5.17	เปรียบเทียบคาร์บอนเครดิตระหว่างรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ..... 244

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	กราฟแสดงปริมาณเนื้อที่เพาะปลูกมันสำปะหลังของแต่ละภาคในประเทศไทย	2
1.2	ผลผลิตมันสำปะหลังและการนำเข้าสู่ส่งออกทั่วโลก	3
1.3	รถบรรทุกที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงมีพิกัดบรรทุก 30,000 kg ยี่ห้อ อีซูซุ	4
1.4	ระยะทางขนส่งแบ่งมันสำปะหลังจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแบ่ง 200 m	5
3.1	มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ Curtis HPEVS AC-51	22
3.2	มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ DANA ASY-120 series	22
3.3	มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ DANA ASY-200 series	23
3.4	มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร DANA TM4 IPM-200 series	24
3.5	มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร MV-275 series	24
3.6	มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร ME1616/Sevcon Gen4	24
3.7	มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแทนซ์ DANA TM4 SYR-200 series	26
3.8	มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแทนซ์ DANA TM4 SYR-260 series	26
3.9	มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแทนซ์ HDSRM 150 series	27
3.10	มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแทนซ์ HDSRM 300 series	28
3.11	มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแทนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร ISCAD V50	29
3.12	มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแทนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร SRI-200 series	29
3.13	มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแทนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร SRI-300 series	30
3.14	พิจารณากรณีไม่มีทางชั้นและมีทางชั้น	31
3.15	การคำนวณหาแรงฉุดลากของตัวรถแบบไม่มีทางชั้น	31
3.16	รถยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรด คือ Tesla Model 3	35
3.17	รถยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ คือ Toyota Prius 2004	36
3.18	เซลล์ของแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลแคดเมียม	37
3.19	รถยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน คือ Porsche Taycan	38
3.20	รถยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า คือ Lamborghini Sian FKP 37	39
3.21	รถยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดโซลิตสแตต คือ Toyota Concept-i Ride	40
3.22	รถยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่โซเดียมไอออน คือ BYD รุ่น Seagull	41
3.23	ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถในแต่ละช่วง	42
3.24	ระบบพวงมาลัยแบบกระปุก	43
3.25	ระบบพวงมาลัยแบบแร็คแอนด์พินเนียน	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.26	รูปแบบระบบบังคับลิ้วแบบไฮดรอลิก 44
3.27	รูปแบบระบบบังคับลิ้วแบบไฟฟ้า 45
3.28	รูปแบบระบบบังคับลิ้วของแร็คแอนด์พีนีเยนที่ใช้เซอร์โวมอเตอร์ 46
3.29	การกระจายน้ำหนักที่แบกรับของตัวโครงสร้างรถที่กระทำบนชุดล้อหน้าและชุดล้อหลัง 47
3.30	ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วยแม่เหล็ก 48
3.31	ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วยเลเซอร์ 49
3.32	ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วย RFID 49
3.33	ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางแบบระบุพิกัด 50
3.34	ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า 51
3.35	ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วยแสง 51
3.36	ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางเฉื่อย 52
3.37	ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วยการจดจำรูปภาพ 53
3.38	ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วยจีพีเอส 53
3.39	เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุชนิดเหนี่ยวนำ 54
3.40	เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุชนิดเก็บประจุ 55
3.41	เซ็นเซอร์ตรวจจับด้วยภาพที่ใช้ตรวจจับขูดยาทางการแพทย์ 55
3.42	เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุโดยใช้แสง 56
3.43	เซ็นเซอร์วัดระยะทางในงานตรวจเช็คตำแหน่งในแนวตั้ง 57
3.44	เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก 58
3.45	เซ็นเซอร์ดาร์ใ้ในยานยนต์ 59
3.46	รูปแบบโหลดเซลล์สเตรนเกจ 60
3.47	รูปแบบโหลดเซลล์ไฮดรอลิก 60
3.48	โหลดเซลล์แบบ Single End Shear Beam 61
3.49	โหลดเซลล์แบบ Double End Shear Beam 62
3.50	โหลดเซลล์แบบ Single Point 62
3.51	โหลดเซลล์แบบ Bending Beam 63
3.52	โหลดเซลล์แบบ Pancake 63
3.53	โหลดเซลล์แบบ Canister 64
3.54	โหลดเซลล์แบบ S-Beam 64
3.55	การประยุกต์ใช้งานรูปแบบพีแอลซี 67
3.56	การประยุกต์ใช้งานรูปแบบพีเอซี 68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.57	การประยุกต์ใช้งานรูปแบบดีซีเอส	69
3.58	การประยุกต์ใช้งานรูปแบบสกาต้า	69
3.59	การประยุกต์ใช้งานรูปแบบไออีดี	70
3.60	Automation Pyramid หรือ Automation Hierarchy	71
3.61	รายละเอียดระดับ Industrial Ethernet ของโปรโตคอลต่าง ๆ.....	72
3.62	รูปแบบเทคโนโลยีไร้สายของระบบอัตโนมัติในระดับอุตสาหกรรม	73
3.63	รูปแบบการสื่อสาร Master กับ Slave โปรโตคอล Modbus TCP/IP.....	74
3.64	รูปแบบ Construction of a Modbus TCP/IP Data Packet	75
3.65	การประยุกต์ใช้งานระหว่าง Node-RED กับโปรโตคอล Modbus TCP/IP	77
3.66	พิมพ์คำสั่ง node-red บน Command Prompt.....	77
3.67	หน้าเริ่มต้นใช้งาน Node-RED	78
3.68	รูปแบบฟังก์ชันการใช้งานของ Python	79
3.69	หน้าเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม Visual Studio Code.....	79
3.70	หน้าเริ่มต้นใช้งาน Python บนโปรแกรม Visual Studio Code	80
3.71	การโฟกัสไปยังพื้นที่ที่สนใจด้วยการค้นหาจุดศูนย์กลางของภาพ.....	81
3.72	การ Threshold ประมาณผลภาพสีแปลงเป็นภาพขาวดำ	82
3.73	การ Find Contours and Center ของภาพ	83
3.74	กราฟสมการเชิงเส้นรูปแบบ Hough Line Transform	84
4.1	หลักการออกแบบระบบขนส่งแบริ่งสำหรับรถขนส่งอัตโนมัติ	85
4.2	ระบบขนส่งแบริ่งสำหรับรถขนส่งในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ	86
4.3	Body Frame รถขนส่งอัตโนมัติ	87
4.4	ภาพรวมของโครงสร้างรถขนส่งอัตโนมัติ	88
4.5	Body Light and Sensor ของรถขนส่งอัตโนมัติ.....	88
4.6	มุมมองด้านหน้าโครงสร้างรองรับการยึดกับ Cover ของรถขนส่งอัตโนมัติ.....	89
4.7	มุมมองด้านข้างโครงสร้างรองรับการยึดกับ Cover ของรถขนส่งอัตโนมัติ.....	89
4.8	สเปคของล้อรถโฟล์คคลิฟท์ที่ใช้สำหรับออกแบบในส่วนโครงสร้างรถขนส่งอัตโนมัติ	90
4.9	ข้อกำหนดรถเคลื่อนที่จากจุดหยุดนิ่งเพื่อใช้คำนวณหาอัตราเร่ง	91
4.10	กราฟประสิทธิภาพมอเตอร์ตามมาตรฐาน IE Classes-4 pole.....	99
4.11	Induction Motor ขนาด 5 kW ของ Foshan Uni Technology Co., Ltd.	99
4.12	เลือกใช้เกียร์ทดรอบ ชนิด Cast Iron NMRV130 อัตราทดรอบ 40:1	100
4.13	เกียร์ทดรอบ ชนิด Cast Iron NMRV130 อัตราทดรอบ 40:1	101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14	5 kW 48 V Controller Model MC3528 ของ Foshan Uni Technology Co., Ltd. 102
4.15	Wiring Diagram 5 kW 48 V Controller Model MC3528 103
4.16	การรองรับน้ำหนักระหว่างชุดล้อหน้าและชุดล้อหลังของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 105
4.17	แบริคแอนด์พีเนี่ยน ยี่ห้อ Polaris RZR S 900 105
4.18	เซอร์โวมอเตอร์ Model CM3-23L50A ยี่ห้อ Muscle Corporation..... 107
4.19	Gearbox AE Series Model AE070 Ratio = 60 108
4.20	เปลือกอัตราทดรอบ Gearbox AE Series Model AE070 Ratio = 60 109
4.21	การเชื่อมต่อสายไฟสำหรับควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ในรูปแบบควบคุมผ่าน I/O..... 110
4.22	พอร์ตการเชื่อมต่อสายไฟสำหรับควบคุมในส่วนที่ 1 (เซอร์โวมอเตอร์) 110
4.23	พอร์ตการเชื่อมต่อสายไฟสำหรับควบคุมในส่วนที่ 2 (I/O) 110
4.24	พอร์ตการเชื่อมต่อสายไฟสำหรับควบคุมในส่วนที่ 3 (แหล่งจ่ายไฟฟ้า) 111
4.25	พอร์ตการเชื่อมต่อสายไฟสำหรับควบคุมในส่วนที่ 4 (Setting) 111
4.26	ลักษณะการเคลื่อนที่ของระยะทางทั้งขาไปและขากลับ 112
4.27	Lithium-ion Battery 48 Vdc, 130 Ah (Shenzhen Himax Electronics Co., Ltd.) 116
4.28	ชุดชาร์จประจุแบตเตอรี่อัจฉริยะ 48 Vdc, 30 A 118
4.29	ระยะทางขนส่งแบ่งมันสำปะหลังระหว่างอาคาร 200 m รวมขาไปและขากลับ 400 m 119
4.30	สภาพพื้นที่เส้นทางขนส่งแบ่งมันสำปะหลังของบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด 120
4.31	สีเทอร์โมพลาสติกสำหรับทำเครื่องหมายบนผิวทาง ของบริษัท สยามทราฟฟิค จำกัด 120
4.32	กล้อง HIKVISION รุ่น DS-2CD2625FWD-IZS 122
4.33	LIDAR SLAMTEC รุ่น RPLIDAR A3 122
4.34	GK3 Mini PC CPU Intel N5105/N100 123
4.35	จอทัสกรีน Wecon New Style 7-inch HMI PI3070ie 124
4.36	พีแอลซี TM221CE16R Schneider Electric M221 126
4.37	Switching Hub 8 Port TP-LINK TL-SF1008D 127
4.38	จุดติดตั้งโหนดเซลล์จำนวน 4 จุด บน Body Frame 128
4.39	อุปกรณ์ที่เลือกใช้ตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติ 130
4.40	การเชื่อมต่อโปรโตคอลการสื่อสารของอุปกรณ์ 131
4.41	การเชื่อมต่อของระบบขับเคลื่อน 134
4.42	การเชื่อมต่อของระบบบังคับเลี้ยว 135
4.43	การเชื่อมต่อของระบบตรวจสอบน้ำหนัก 136
4.44	การเชื่อมต่อของระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง 137

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45	อัลกอริทึมของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 139
4.46	Dashboard จอทัสกรีนควบคุมการทำงานของรถขนส่งอัตโนมัติ 140
4.47	ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของรถขนส่งอัตโนมัติในซอฟต์แวร์ Node-RED 141
4.48	ขั้นตอนการทำงานของประมวลผลหาเส้นทางในการนำทางอัตโนมัติ 143
4.49	เงื่อนไขสำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางกรณีวิ่งเดินหน้า 144
4.50	เงื่อนไขสำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางกรณีวิ่งถอยหลัง..... 145
5.1	การพัฒนาโครงสร้างในส่วนของเฟรมรถโดยภาพรวม 147
5.2	การพัฒนาโครงสร้างในส่วนระบบขับเคลื่อน 148
5.3	การพัฒนาโครงสร้างในส่วนระบบบังคับเลี้ยว 148
5.4	การปั้นดินเหนียวที่ใช้เป็นแบบในการหล่อโมล 149
5.5	การปิวส์และขัดผิวที่ใช้เป็นแบบในการหล่อโมล..... 149
5.6	การหล่อโมลส่วนด้านหน้ารถ 150
5.7	การหล่อโมลส่วนด้านข้างซ้ายรถ..... 150
5.8	การหล่อโมลส่วนด้านข้างขวารถ 151
5.9	การหล่อโมลส่วนด้านหลังรถ..... 151
5.10	การสร้าง Cover ของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 152
5.11	การปิวส์และขัดผิวให้เรียบเนียนตัว Cover ของรถขนส่งอัตโนมัติ 152
5.12	การทำสีจริงตัว Cover ของรถขนส่งอัตโนมัติ 153
5.13	การประกอบตัว Cover เข้ากับชุดโครงสร้างหลักของรถขนส่งอัตโนมัติ 153
5.14	การตกแต่งความสวยงามรอบคันเพิ่มเติมของรถขนส่งอัตโนมัติ..... 154
5.15	การเชื่อมต่อสายไฟจากแบตเตอรี่ไปยังชุดควบคุมมอเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้า 155
5.16	การตั้งค่าใช้งานมูล TM3AQ4 ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expret-Basic 155
5.17	การเชื่อมต่อสายสัญญาณอนาล็อกเอาต์พุต 0-10 Vdc ไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ 156
5.18	การเชื่อมต่อสายสัญญาณดิจิทัลเอาต์พุตผ่านรีเลย์ไปยังชุดควบคุมมอเตอร์..... 157
5.19	ซอฟต์แวร์สำหรับควบคุมความเร็วในกรณีวิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และเบรก..... 158
5.20	การทดสอบเงื่อนไขทำงานในโปรแกรมพีแอลซีกรณีวิ่งเดินหน้า..... 159
5.21	การทดสอบเงื่อนไขทำงานในโปรแกรมพีแอลซีกรณีวิ่งถอยหลัง 159
5.22	การทดสอบเงื่อนไขทำงานในโปรแกรมพีแอลซีกรณีเบรก 160
5.23	การทดสอบวิ่งใช้งานจริงเบื้องต้นในกรณีวิ่งเดินหน้า 160
5.24	การใช้จอทัสกรีนเชื่อมต่อสื่อสารกับพีแอลซีสำหรับควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อน.... 161
5.25	การตั้งค่า IP Address ของจอทัสกรีนบนโปรแกรม PISudio..... 162

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26	การตั้งค่าเชื่อมต่อสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP ระหว่างจอทัสกรีนกับพีแอลซี..... 162
5.27	การตั้งค่า IP Address ของพีแอลซีบนโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic..... 163
5.28	Dashboard จอทัสกรีนของระบบ Manual ควบคุมในการวิ่งรถ 164
5.29	กำหนด Register Address ระบบขับเคลื่อนในโปรแกรมจอทัสกรีนบนหน้าต่าง Script..... 164
5.30	กำหนด Register Address ของพารามิเตอร์ควบคุมความเร็วที่ Dashboard จอทัสกรีน..... 165
5.31	กำหนด Register Address ของพารามิเตอร์วิ่งเดินหน้าที่ Dashboard จอทัสกรีน..... 165
5.32	กำหนด Register Address ของพารามิเตอร์วิ่งถอยหลังที่ Dashboard จอทัสกรีน 166
5.33	กำหนด Register Address ของพารามิเตอร์เบรกที่ Dashboard จอทัสกรีน..... 166
5.34	การทดสอบวิ่งใช้งานระบบขับเคลื่อนในกรณีวิ่งเดินหน้าควบคุมโดยใช้จอทัสกรีน 167
5.35	การตั้งค่าใช้งานโมดูล TM3DQ8R ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic 168
5.36	การเชื่อมต่อสายสัญญาณดิจิทัลเอาต์พุตโมดูล TM3DQ8R ไปยังเซอร์โวมอเตอร์ 168
5.37	ซอฟต์แวร์ของพีแอลซีสำหรับควบคุมเงื่อนไขการบังคับเลี้ยวทั้ง 7 คำสั่ง 170
5.38	ซอฟต์แวร์ของพีแอลซีควบคุมของทั้ง 7 คำสั่ง กับ %Q2.0, %Q2.1 และ %Q2.2 170
5.39	การทดสอบเงื่อนไขเลี้ยวซ้าย 30 องศา โดยให้ %Q2.0 ทำงาน 171
5.40	การทดสอบเงื่อนไขเลี้ยวซ้าย 20 องศา โดยให้ %Q2.1 ทำงาน 172
5.41	การทดสอบเงื่อนไขเลี้ยวซ้าย 10 องศา โดยให้ %Q2.2 ทำงาน 173
5.42	การทดสอบเงื่อนไขคั่นล้อตรงกลาง 0 องศา โดยให้ %Q2.0 และ %Q2.1 ทำงาน..... 174
5.43	การทดสอบเงื่อนไขเลี้ยวขวา 10 องศา โดยให้ %Q2.0 และ %Q2.2 ทำงาน 175
5.44	การทดสอบเงื่อนไขเลี้ยวขวา 20 องศา โดยให้ %Q2.1 และ %Q2.2 ทำงาน 176
5.45	การทดสอบเงื่อนไขเลี้ยวขวา 30 องศา โดยให้ %Q2.0, %Q2.1 และ %Q2.2 ทำงาน 177
5.46	การทดสอบระบบบังคับเลี้ยวด้วยพีแอลซีสำหรับเลี้ยวซ้าย 30 องศา 178
5.47	การใช้จอทัสกรีนเชื่อมต่อสื่อสารกับพีแอลซีสำหรับควบคุมการทำงานระบบบังคับเลี้ยว..... 179
5.48	กำหนด Register Address ระบบบังคับเลี้ยวในโปรแกรมจอทัสกรีนบนหน้าต่าง Script..... 180
5.49	กำหนด Register Address พารามิเตอร์เลี้ยวซ้าย 30 องศา ที่ Dashboard จอทัสกรีน..... 180
5.50	กำหนด Register Address พารามิเตอร์เลี้ยวขวา 30 องศา ที่ Dashboard จอทัสกรีน..... 181
5.51	กำหนด Register Address พารามิเตอร์คั่นล้อ 0 องศา ที่ Dashboard จอทัสกรีน..... 181
5.52	พัฒนาซอฟต์แวร์การควบคุมจาก Dashboard ไปยังหน้าต่าง Script สำหรับการบังคับเลี้ยว.... 182
5.53	การทดสอบวิ่งใช้งานระบบบังคับเลี้ยวในกรณีเลี้ยวขวา 30 องศา ควบคุมโดยใช้จอทัสกรีน.... 182
5.54	การตั้งค่าใช้งาน Analog Input ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic 183
5.55	การเชื่อมต่อสายสัญญาณอนาล็อกอินพุทของพีแอลซีไปยังชุดควบคุมโหลดเซลล์..... 184
5.56	ซอฟต์แวร์ของพีแอลซีสำหรับตรวจสอบน้ำหนักด้วยโหลดเซลล์ 184

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.57	การทดสอบอ่านค่าน้ำหนักด้วยโพลดเซลล์ของถังน้ำจำนวน 2 ถัง ในโปรแกรมพีแอลซี..... 184
5.58	การทดสอบอ่านค่าน้ำหนักด้วยโพลดเซลล์ของถังน้ำจำนวน 2 ถัง เติมน้ำถังละ 500 L 185
5.59	พัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อเป็นเงื่อนไขตรวจสอบน้ำหนักของระบบขับเคลื่อนเพิ่มเติม 185
5.60	พัฒนา Dashboard เพื่อเป็นเงื่อนไขตรวจสอบน้ำหนักของระบบขับเคลื่อนเพิ่มเติม..... 186
5.61	กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Check Weight ที่ Dashboard จอทัสกรีน..... 187
5.62	การใช้จอทัสกรีนเชื่อมต่อสื่อสารกับพีแอลซีสำหรับอ่านค่าน้ำหนักที่วัดได้ด้วยโพลดเซลล์ 187
5.63	การทดสอบอ่านค่าน้ำหนักแ่งมันสำปะหลังที่บรรจุทุกจำนวน 4 กระสอบ ที่หน้าจอทัสกรีน 188
5.64	การเชื่อมต่อสายแลนจากมินิพีซีผ่านสวิทช์ฮับไปยังกล่องสำหรับวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง 189
5.65	การตั้งค่า IP Address เท่ากับ 192.168.1.12 ของมินิพีซี..... 189
5.66	พิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานไลบรารี Open CV และคำสั่งเรียกใช้งานกล่องในกรณีวิ่งเดินหน้า 190
5.67	พิมพ์คำสั่งสำหรับ ROI เพื่อกำหนดขอบเขตเป้าหมายของเฟรมกล้อง ในกรณีวิ่งเดินหน้า 191
5.68	พิมพ์คำสั่งสำหรับ Threshold เพื่อกำหนดขอบเขตสีเส้นนำทางในกรณีวิ่งเดินหน้า 191
5.69	พิมพ์คำสั่งสำหรับเริ่มต้น Find Contours and Center ในกรณีวิ่งเดินหน้า 192
5.70	พิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center ช่วงที่ 1 ถึง 5 ในกรณีวิ่งเดินหน้า..... 192
5.71	พิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center ช่วงที่ 6 ถึง 7 ในกรณีวิ่งเดินหน้า..... 193
5.72	พิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center หลุดเส้นนำทางในกรณีวิ่งเดินหน้า..... 193
5.73	พิมพ์คำสั่งสำหรับหยุดการทำงาน Find Contours and Center ในกรณีวิ่งเดินหน้า..... 193
5.74	พิมพ์คำสั่งสำหรับหยุดการทำงานที่ใช้กล่องนำทางอัตโนมัติในกรณีวิ่งเดินหน้า 193
5.75	พิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานไลบรารี Open CV และคำสั่งเรียกใช้งานกล่องในกรณีวิ่งถอยหลัง 195
5.76	พิมพ์คำสั่งสำหรับ ROI เพื่อกำหนดขอบเขตเป้าหมายของเฟรมกล้อง ในกรณีวิ่งถอยหลัง..... 195
5.77	พิมพ์คำสั่งสำหรับ Threshold เพื่อกำหนดขอบเขตสีเส้นนำทางในกรณีวิ่งถอยหลัง 195
5.78	พิมพ์คำสั่งสำหรับเริ่มต้น Find Contours and Center ในกรณีวิ่งถอยหลัง 196
5.79	พิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center ช่วงที่ 1 ถึง 3 ในกรณีวิ่งถอยหลัง 196
5.80	พิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center ช่วงที่ 4 ถึง 7 ในกรณีวิ่งถอยหลัง 197
5.81	พิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center หลุดเส้นนำทางในกรณีวิ่งถอยหลัง 197
5.82	พิมพ์คำสั่งสำหรับหยุดการทำงาน Find Contours and Center ในกรณีวิ่งถอยหลัง 197
5.83	พิมพ์คำสั่งสำหรับหยุดการทำงานที่ใช้กล่องนำทางอัตโนมัติในกรณีวิ่งถอยหลัง..... 198
5.84	พิมพ์คำสั่งสำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางด้วยไลดาร์ในกรณีวิ่งเดินหน้า..... 199
5.85	พิมพ์คำสั่งสำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางด้วยไลดาร์ในกรณีวิ่งถอยหลัง 199
5.86	การเชื่อมต่อระบบความหลักสำหรับควบคุมการทำงานของรถขนส่งอัตโนมัติ 200
5.87	การแทรกคำสั่งสำหรับเชื่อมต่อโปรโตคอล Modbus TCP/IP ในกรณีวิ่งเดินหน้า 201

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.88	การแทรกคำสั่งส่งค่าพารามิเตอร์ drive และ servo ไปยังจอตัสกรีนในกรณีวิ่งเดินหน้า 201
5.89	การแทรกคำสั่งสำหรับเชื่อมต่อโปรโตคอล Modbus TCP/IP ในกรณีวิ่งถอยหลัง..... 202
5.90	การแทรกคำสั่งส่งค่าพารามิเตอร์ Drive ไปยังจอตัสกรีนในกรณีวิ่งเดินหน้า 202
5.91	การแทรกคำสั่งส่งค่าพารามิเตอร์ Drive ไปยังจอตัสกรีนในกรณีวิ่งถอยหลัง..... 203
5.92	Dashboard ควบคุมในโหมด Auto ของรถขนส่งอัตโนมัติ 204
5.93	การแทรกคำสั่ง Script ควบคุมการทำงานในโหมด Manual ในโปรแกรม PIStudio..... 205
5.94	การแทรกคำสั่ง Script ควบคุมการทำงานในโหมด Auto ในโปรแกรม PIStudio 206
5.95	กำหนด Register Address พารามิเตอร์สวิตช์โหมดที่ Dashboard Auto Mode 207
5.96	กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Forward ที่ Dashboard Auto Mode..... 207
5.97	กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Reverse ที่ Dashboard Auto Mode 208
5.98	กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Stop ที่ Dashboard Auto Mode 208
5.99	กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Speed ที่ Dashboard Auto Mode 209
5.100	กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Mileage Speed ที่ Dashboard Auto Mode 209
5.101	กำหนด Register Address พารามิเตอร์มุมเลี้ยว Step1-7 ที่ Dashboard Auto Mode..... 210
5.102	กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Lidar Detect ที่ Dashboard Auto Mode 210
5.103	กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Load (kg) ที่ Dashboard Auto Mode 211
5.104	กำหนด Register Address พารามิเตอร์ % SOC ที่ Dashboard Auto Mode 211
5.105	แทรกคำสั่งหยุดการทำงานของกล้องในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง 212
5.106	แทรกคำสั่งหยุดการทำงานของไลดาร์ในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง 212
5.107	รูปแบบการควบคุมไฟล์ Python ที่ใช้จอตัสกรีนผ่านซอฟต์แวร์ Node-RED 213
5.108	การพัฒนาซอฟต์แวร์ Node-RED ที่ใช้ในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง..... 214
5.109	กำหนดพารามิเตอร์ใน tool modbus tcp ที่ใช้ในกรณีวิ่งเดินหน้า 214
5.110	การสร้างเงื่อนไขใน tool function ที่ใช้ในกรณีวิ่งเดินหน้า..... 215
5.111	กำหนดพารามิเตอร์ใน tool trigger & block ที่ใช้ในกรณีวิ่งเดินหน้า..... 215
5.112	การเรียกไฟล์ Python ชื่อไฟล์ Detect Obstacles Forward ที่ใช้ในกรณีวิ่งเดินหน้า 216
5.113	การเรียกไฟล์ Python ชื่อไฟล์ Forward Camera ที่ใช้ในกรณีวิ่งเดินหน้า 216
5.114	กำหนดพารามิเตอร์ใน tool modbus tcp ที่ใช้ในกรณีวิ่งถอยหลัง..... 217
5.115	การเรียกไฟล์ Python ชื่อไฟล์ Detect Obstacles Reverse ที่ใช้ในกรณีวิ่งถอยหลัง 218
5.116	การเรียกไฟล์ Python ชื่อไฟล์ Reverse Camera ที่ใช้ในกรณีวิ่งถอยหลัง 218
5.117	การทดสอบวิ่งขนส่งแบงก์น้ำมันสำปะหลังเบื้องต้นโดยใช้ระบบนำทางอัตโนมัติ 219
5.118	การต่ออุปกรณ์ Circuit Breaker, Key Switch, Emergency Switch และ LED Lamp 220

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.119	Flow chart ลำดับขั้นตอนการวิ่งชนส่งแป้งมันสำปะหลังจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้ง..... 221
5.120	รูปแบบการวิ่งชนส่งแป้งมันสำปะหลังจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้งด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ..... 221
5.121	Flow chart ลำดับขั้นตอนการวิ่งรถเปล่าจากโกดังเก็บแป้งกลับมายังไลน์ผลิต..... 222
5.122	รูปแบบการวิ่งรถเปล่าจากโกดังเก็บแป้งกลับมายังไลน์ผลิตด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ 222
5.123	ผลการทดสอบใช้รถโฟล์คคลิฟท์ตักพาเลทขึ้นไปวางบนรถขนส่งอัตโนมัติทั้ง 2 พาเลท..... 223
5.124	ผลการทดสอบตรวจสอบน้ำหนักที่บรรทุก (Load : 4,799 kg) ก่อนทำการวิ่งชนส่ง..... 224
5.125	ผลการทดสอบวิ่งชนส่งนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งเดินหน้า 225
5.126	ผลการทดสอบรถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งเมื่อไลดาร์ตรวจพบว่ามีสิ่งกีดขวางในระยะ 3 m..... 226
5.127	ผลการทดสอบหยุดวิ่งชนส่งนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งเดินหน้า 226
5.128	ผลการทดสอบใช้รถโฟล์คคลิฟท์ตักพาเลทลงจากรถขนส่งอัตโนมัติทั้ง 2 พาเลท..... 227
5.129	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเปรียบเทียบกับระยะทางในกรณีวิ่งเดินหน้า 228
5.130	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งเดินหน้า..... 228
5.131	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งเดินหน้า 230
5.132	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งเดินหน้า..... 230
5.133	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งเดินหน้า 231
5.134	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Cx เปรียบเทียบกับระยะทางในกรณีวิ่งเดินหน้า 231
5.135	ผลการทดสอบตรวจสอบน้ำหนักรถเปล่า (Load : 0 kg) ก่อนทำการวิ่งถอยหลัง..... 232
5.136	ผลการทดสอบวิ่งนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งถอยหลัง..... 234
5.137	ผลการทดสอบรถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งเมื่อไลดาร์ตรวจพบว่ามีสิ่งกีดขวางในระยะ 6 m..... 234
5.138	ผลการทดสอบหยุดวิ่งนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งถอยหลัง 235
5.139	กราฟแสดงความสัมพันธ์ Cx, ความเร็ว และระยะทางในกรณีวิ่งถอยหลัง..... 235
5.140	กราฟแสดงความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้า ความเร็ว และเวลาในกรณีวิ่งถอยหลัง..... 236
5.141	กราฟแสดงความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้า ความเร็ว และเวลาในกรณีวิ่งถอยหลัง..... 236
5.142	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งถอยหลัง..... 237
5.143	รถบรรทุกที่ใช้ทดสอบขนส่งแป้งมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้ง..... 240
5.144	รูปแบบการวิ่งชนส่งแป้งมันสำปะหลังจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้งด้วยรถบรรทุก..... 241
5.145	รูปแบบการวิ่งชนส่งแป้งมันสำปะหลังจากโกดังเก็บแป้งกลับมายังไลน์ผลิตด้วยรถบรรทุก..... 241

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

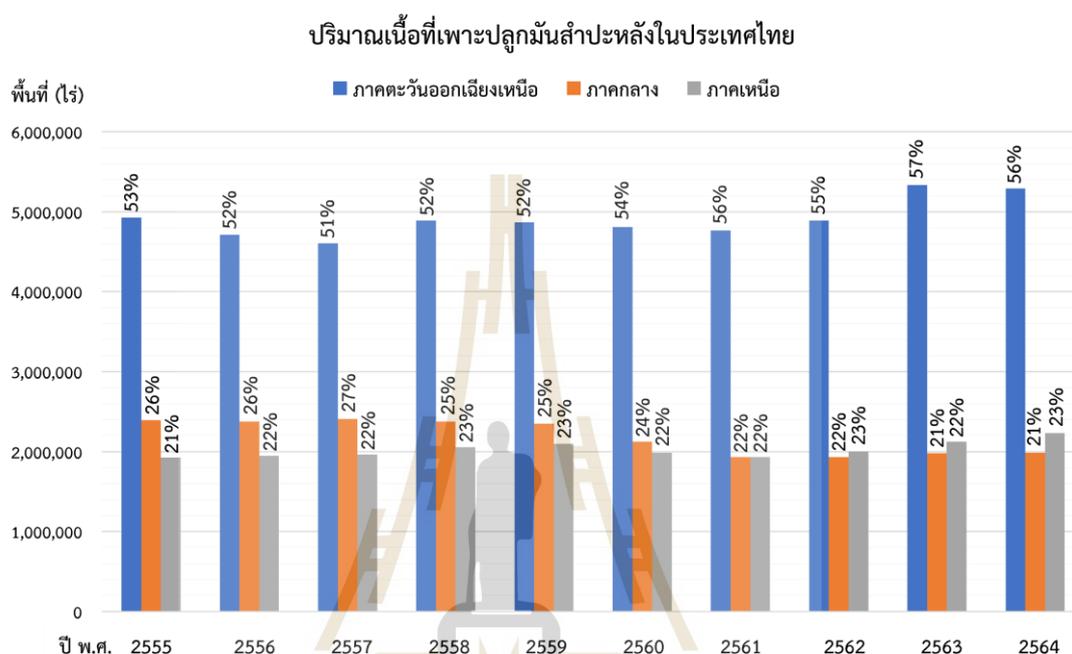
ในการศึกษาพื้นฐานสำคัญของงานวิจัยมี 3 ปัจจัยหลัก จำเป็นอย่างมากที่ต้องทราบถึงต้นตอของปัญหาและประวัติความเป็นมาพอสังเขปเพื่อนำไปสู่การพัฒนางานวิจัย ปัจจัยแรก คือ ลักษณะธุรกิจของบริษัทที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน เพื่อชี้ให้เห็นถึงความสำคัญที่มีผลกระทบต่อภาวะเศรษฐกิจทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งธุรกิจของบริษัทที่ดำเนินการอยู่ คือ ผลิตภัณฑ์แปรรูปสัตว์น้ำสำหรับประเทศไทย ปัจจัยที่สอง คือ ความต้องการของบริษัทเพื่อนำไปสู่งานวิจัย ซึ่งทางบริษัทได้มีการประชุมกลุ่มคณะผู้บริหารช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2564 และในที่ประชุมได้เล็งเห็นปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน เกี่ยวกับระบบขนส่งภายในโรงงาน จึงมีมติประชุมเห็นพร้อมให้กำหนดนโยบายเพื่อหาวิธีแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นเพื่อวางแผนพัฒนางานวิจัยให้บรรลุตามเป้าหมายของทางบริษัทที่ตั้งไว้และปัจจัยสุดท้าย คือ ข้อสรุปในที่ประชุม ซึ่งทางบริษัทได้กำหนดขอบเขตงานวิจัยที่บริษัทต้องการโดยตั้งเป้าหมายของงานวิจัยที่จะต้องดำเนินการให้เกิดผลสำเร็จ คือ การพัฒนาระบบขนส่งสัตว์น้ำสำหรับระหว่างอาคารภายในโรงงานให้มีประสิทธิภาพและมีความทันสมัยทางเทคโนโลยีมากขึ้นด้วยเหตุนี้ ทั้ง 3 ปัจจัยหลัก ที่ได้กล่าวในข้างต้นทำให้ทราบถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาของการพัฒนางานวิจัยในครั้งนี้ พร้อมทั้งอธิบายรายละเอียดต่าง ๆ ของแต่ละปัจจัยในเชิงลึก ดังนี้

1.1.1 ลักษณะธุรกิจของบริษัทที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน

ปัจจุบันบริษัท เยนเนิร์ล สตาร์ช จำกัด เป็นอีกหนึ่งบริษัทผู้นำในด้านธุรกิจผลิตภัณฑ์แปรรูปสัตว์น้ำสำหรับประเทศไทย ที่ดำเนินธุรกิจมายาวนานกว่า 24 ปี ซึ่งตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาในการดำเนินธุรกิจ ระยะเวลาได้พิสูจน์ถึงความมุ่งมั่นและทุ่มเทของบริษัทที่มีเป้าหมายในการพัฒนาและสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด เพื่อส่งมอบให้กับลูกค้าทั่วโลก ได้แก่ ทวีปอเมริกาเหนือ ทวีปอเมริกากลาง ทวีปยุโรป ทวีปเอเชีย ทวีปแอฟริกา และทวีปแปซิฟิก เป็นต้น นอกจากนี้ทางบริษัทยังคงไม่หยุดแนวคิดในการพัฒนาธุรกิจควบคู่ไปกับการสร้างสรรค์สังคมและสิ่งแวดล้อมให้เติบโตอย่างยั่งยืน เพื่อแสดงถึงความโดดเด่นในด้านเทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัยและความใส่ใจรายละเอียดในทุกขั้นตอนการผลิต ดังนั้นจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของบริษัทพัฒนาไปสู่ความเชี่ยวชาญด้านธุรกิจอุตสาหกรรมแปรรูปสัตว์น้ำสำหรับและได้รับความไว้วางใจจากลูกค้าทั้งในประเทศและต่างประเทศ (GSL, 2022)

สาเหตุหลักที่มีผลกระทบต่อภาวะเศรษฐกิจในอุตสาหกรรมแปรรูปสัตว์น้ำสำหรับประเทศไทย นั่นก็คือ ความได้เปรียบทางภูมิศาสตร์ที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณเนื้อที่เพาะปลูกและผลผลิตจากการเก็บเกี่ยวของสัตว์น้ำสำหรับเพียงพอ หรือ ขาดแคลนต่อความต้องการของตลาดในประเทศหรือไม่ โดยมีการกล่าวไว้ในข้างต้นแล้วว่าบริษัทที่ตั้งอยู่ในเขต อำเภอ นครบุรี จังหวัด นครราชสีมา และอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของบริษัท

เป็นอย่างมากเพราะจากการสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับเนื้อที่เพาะปลูกมันสำปะหลังของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรใน 10 ปีย้อนหลัง นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555 จนถึงปี พ.ศ. 2564 พบว่า ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีเนื้อที่เพาะปลูกมากที่สุด เมื่อเทียบกับภาคกลางและภาคเหนือ (ยกเว้นภาคใต้) แสดงข้อมูลเป็นกราฟ ดังรูปที่ 1.1

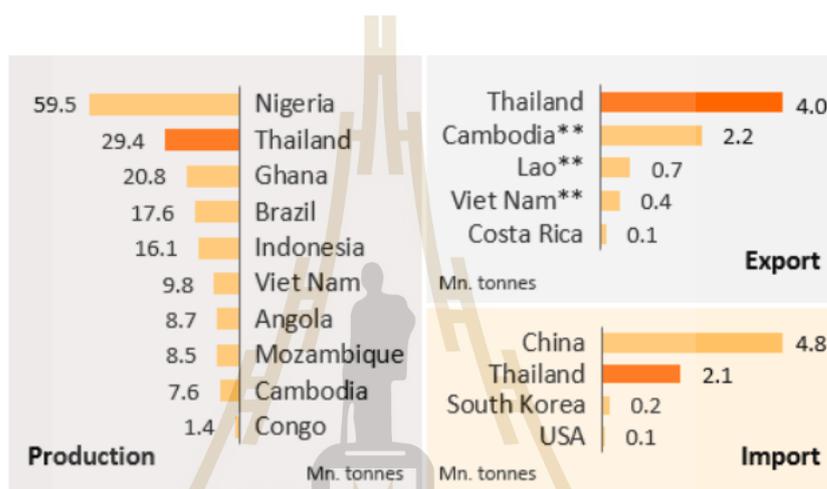


รูปที่ 1.1 กราฟแสดงปริมาณเนื้อที่เพาะปลูกมันสำปะหลังของแต่ละภาคในประเทศไทย

จากกราฟในรูปที่ 1.1 เป็นการนำข้อมูลในปี พ.ศ. 2564 มายกตัวอย่าง เพื่อชี้ให้เห็นถึงอัตราเนื้อที่เพาะปลูกมันสำปะหลังจากมากไปหาน้อยตามลำดับ อันดับหนึ่ง คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีเนื้อที่เพาะปลูก 5,292,168 ไร่ (คิดเป็น 56% ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมดในประเทศไทย) รองลงมา คือ ภาคเหนือมีเนื้อที่เพาะปลูก 2,230,924 ไร่ (คิดเป็น 23% ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมดในประเทศไทย) และอันดับท้าย คือ ภาคกลางมีเนื้อที่เพาะปลูก 1,983,915 ไร่ (คิดเป็น 21% ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมดในประเทศไทย) นอกจากนี้จังหวัดนครราชสีมายังเป็นพื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังมากที่สุดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและในประเทศไทย โดยการสำรวจข้อมูลในปี พ.ศ. 2564 พบว่าจังหวัดนครราชสีมานี้มีพื้นที่เพาะปลูก 1,503,769 ไร่ (คิดเป็น 28% ของพื้นที่เพาะปลูกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และคิดเป็น 16% ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมดในประเทศไทย) ด้วยเหตุนี้พื้นที่ตั้งของบริษัท ซึ่งตั้งอยู่ในจังหวัดนครราชสีมาทำให้ได้เปรียบทางภูมิศาสตร์ เพราะอยู่ในพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังมากที่สุดในประเทศและส่งผลให้ได้ผลผลิตจากการเก็บเกี่ยวของมันสำปะหลังมากที่สุดในประเทศตามมาอีกด้วย (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2564)

เมื่อบริษัทมีความได้เปรียบทางภูมิศาสตร์และยังเป็นในหนึ่งผู้นำในด้านธุรกิจผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลังแปรรูปในประเทศไทย ซึ่งปัจจุบันมีการจำแนกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง

ที่ผลิตในประเทศไทยได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังตากแห้ง (Dried Cassava) และผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลังแปรรูป (Native Starch) โดยทั้ง 2 ประเภทนี้ มีความสำคัญที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างน้อย 4 ด้าน ได้แก่ อาหารสำหรับมนุษย์ (Food) อาหารเลี้ยงสัตว์ (Feed) วัตถุดิบในการผลิตเอทานอลเพื่อใช้เป็นพลังงานชีวภาพ (Fuel) และ ภาคอุตสาหกรรม (Factory) ยกตัวอย่าง เช่น แอลกอฮอล์ กรดมะนาว เครื่องนึ่งห่ม ยา กระดาษ และ เคมีภัณฑ์ เป็นต้น ตลอดช่วงหลายปีที่ผ่านมาความต้องการมันสำปะหลังในตลาดโลกเติบโตอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มันสำปะหลังเป็นพืชอาหารที่มีความสำคัญเป็นอันดับ 5 ของโลกรองจากข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวเจ้า และมันฝรั่ง ตามลำดับ



รูปที่ 1.2 ผลผลิตมันสำปะหลังและการนำเข้าส่งออกทั่วโลก

(ที่มา: https://www.krungsri.com/getmedia/77276c04-9b07-42e0-853c-961f17603357/IO_Cassava_200511_TH_EX.pdf.aspx)

นอกจากนี้ในการสำรวจตลาดโลกในปี พ.ศ. 2561 จนถึงปัจจุบัน พบว่าผลผลิตมันสำปะหลังทั่วโลกเฉลี่ยในแต่ละปีประมาณ 275 ล้านตัน อันดับหนึ่ง คือ ทวีปแอฟริกาเป็นแหล่งผลิตใหญ่ที่สุดของโลก (คิดเป็น 61.1% ของผลผลิตทั่วโลก) รองลงมา คือ ทวีปเอเชีย (คิดเป็น 29.0% ของผลผลิตทั่วโลก) ทวีปยุโรป (คิดเป็น 9.8% ของผลผลิตทั่วโลก) และทวีปอื่น ๆ (คิดเป็น 0.1% ของผลผลิตทั่วโลก) ตามลำดับ ถ้าหากพิจารณาเป็นรายประเทศโดยกล่าวถึงแค่ 5 อันดับแรกเท่านั้น จากข้อมูลในรูปที่ 1.2 ไนจีเรียจึงเป็นประเทศที่มีผลผลิตอันดับ 1 ของโลก 59.5 ล้านตัน (คิดเป็น 21.6% ของผลผลิตทั่วโลก) รองลงมา คือ ประเทศไทย 29.4 ล้านตัน (คิดเป็น 10.7% ของผลผลิตทั่วโลก) ประเทศกานา 20.8 ล้านตัน (คิดเป็น 7.6% ของผลผลิตทั่วโลก) ประเทศบราซิล 17.6 ล้านตัน (คิดเป็น 6.4% ของผลผลิตทั่วโลก) และประเทศอินโดนีเซีย 16.1 ล้านตัน (คิดเป็น 5.9% ของผลผลิตทั่วโลก) ตามลำดับ แต่ถ้าดูข้อมูลในเรื่องของการส่งออกผลผลิตมันสำปะหลังพบว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการส่งออกมากที่สุดในโลกเฉลี่ย 4 ล้านตันต่อปี โดยมีการส่งออกไปที่ประเทศจีนเป็นหลัก และยังพบว่าประเทศจีนมีการนำเข้าผลผลิตมันสำปะหลังมากที่สุดในโลกเฉลี่ย 4.8 ล้านตัน

ต่อไป ทำให้ประเทศจีนเป็นตัวแปรในการกำหนดทิศทางหดตัวแปรผันตามความต้องการของตลาดโลก โดยมีแนวโน้มของการตลาดในปัจจุบันและอนาคตของการนำเข้าที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ด้วยเหตุนี้ส่งผลให้ประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศที่มีการส่งออกผลผลิตมันสำปะหลังมากที่สุดในโลก มีโอกาสในการขยายขยายธุรกิจทางด้านอุตสาหกรรมมันสำปะหลังเพื่อรองรับตามความต้องการนำเข้าของประเทศจีนและตลาดทั่วโลกเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน (ชัยวิช โขวเจริญสุข, 2563)

1.1.2 ความต้องการของบริษัทเพื่อนำไปสู่งานวิจัย

เมื่อทางบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด ได้มีการประชุมกลุ่มคณะผู้บริหารช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2564 ซึ่งในที่ประชุมได้พูดถึงเรื่องการพัฒนาเทคโนโลยีให้ทันสมัยยิ่งขึ้น เพื่อเป็นจุดเด่นในการแข่งขันทางการตลาดของอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังในอนาคต และตอบสนองในความต้องการที่จะขยายธุรกิจของบริษัทให้เติบโตยิ่งกว่าเดิม กลุ่มคณะผู้บริหารต่างให้ความสำคัญและเล็งเห็นปัญหาในเรื่องของระบบขนส่งแป้งมันสำปะหลังระหว่างอาคาร ที่ยังไม่มีการพัฒนาในเรื่องของเทคโนโลยีที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพราะอาจส่งผลต่อภาพลักษณ์บริษัทที่กระทบกับลูกค้าในมุมมองเรื่องการพัฒนาเทคโนโลยีระบบขนส่งแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งอาจเป็นจุดสำคัญประการหนึ่งในการแข่งขันทางการตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ สำหรับระบบขนส่งเดิมที่บริษัทใช้อยู่ในปัจจุบันมีการขนส่งแป้งมันสำปะหลังในปริมาณเฉลี่ย 480,000 kg ต่อวัน ในการขนส่งใช้เป็นรถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงมีพิกัดบรรทุกสูงสุด 28,800 kg ยี่ห้อ อีซูซุ (ISUZU) โดยการยกกระสอบแป้งมันสำปะหลังขึ้นจัดเรียงบนรถบรรทุกใช้เป็นรถโฟล์คลิฟท์ ดังรูปที่ 1.3 เมื่อคำนวณเฉลี่ยแล้วต้องขนส่งจำนวน 17 รอบต่อวัน ในการขนส่งมีระยะทางจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้งเฉลี่ย 200 m รวมระยะทางทั้งขาไปและขากลับเฉลี่ย 400 m ต่อรอบ ดังรูปที่ 1.4 คิดเป็นระยะทางรวมที่ใช้ขนส่งเฉลี่ย 6,800 m ต่อวัน ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของระบบขนส่งเดิมของทางบริษัทใช้อยู่ในปัจจุบัน พบว่าค่าใช้จ่ายทั้งหมดในส่วนของการลงทุนที่เกี่ยวข้องกับระบบขนส่งแป้งมันสำปะหลัง มีรายละเอียด ดังตารางที่ 1.1



รูปที่ 1.3 รถบรรทุกที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงมีพิกัดบรรทุก 30,000 kg ยี่ห้อ อีซูซุ



รูปที่ 1.4 ระยะทางขนส่งแ่งมันสำปะหลังจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแ่ง 200 m
(ที่มา: <https://www.google.com/maps/@14.5777649,102.1897865,1119m/data=!3m1!1e3>)

ตารางที่ 1.1 ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในส่วนของการลงทุนที่เกี่ยวข้องกับระบบขนส่งแ่งมันสำปะหลัง

ลำดับ	รายละเอียด	จำนวน	หน่วย	ราคารวม	หน่วย
1	ราคารถบรรทุก (5,392,242 บาท/30 ปี)	2	คัน	179,741	บาท
2	ค่าแรงพนักงานเฉลี่ย (รวมโอที)	12	คน	1,789,008	บาท/ปี
3	ค่าเชื้อเพลิงเฉลี่ย (รถบรรทุก)	2	คัน	475,848	บาท/ปี
4	ค่าซ่อมบำรุงเฉลี่ย (รถบรรทุก)	2	คัน	66,984	บาท/ปี
รวมทั้งหมด				2,511,581	บาท/ปี

*หมายเหตุ : ข้อมูลในตารางเป็นข้อมูลของบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด เท่านั้น

จากตารางที่ 1.1 สาเหตุที่จำเป็นต้องใช้รถบรรทุกในการขนส่งจำนวน 2 คัน จึงทำให้มีต้นทุนของราคารถบรรทุก ค่าแรงของพนักงาน ค่าเชื้อเพลิง และค่าซ่อมบำรุง ในอัตราเฉลี่ยที่สูงขึ้นเป็นสองเท่าประมาณ 2,511,581 บาท ต่อ ปี (เมื่อเทียบกับรถบรรทุก 1 คัน จะมีค่าใช้จ่ายเพียงแค่ครั้งหนึ่งประมาณ 1,255,790 บาท ต่อ ปี) เนื่องจากการขนส่งต่อรอบใช้เวลาเฉลี่ย 80 นาที หรือ 1 ชั่วโมง 20 นาที แสดงว่าในหนึ่งวันมีช่วงเวลาทำงานเพียงแค่ 1,360 นาที หรือ 22 ชั่วโมง 40 นาที จึงทำให้การขนส่งของรถบรรทุก 1 คัน มีขีดจำกัดเมื่อคิดจากช่วงเวลาทำงาน 22 ชั่วโมง 40 นาที สามารถขนส่งได้เพียง 17 รอบ ต่อ วัน อย่างไรก็ตามเมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายการใช้งานรถบรรทุกขนส่งแ่งมันสำปะหลัง ต่อ วัน พบว่ามีค่าใช้จ่ายโดยคิดเป็นตัวเลขที่สูงพอสมควร ด้วยเหตุนี้จึงมีมติประชุมเห็นพร้อมให้กำหนดนโยบายเพื่อหาวิธีแก้ไขปัญหาในเรื่องของคุ่มค่าและลดค่าใช้จ่ายที่เกินความจำเป็นให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และนำไปสู่กระบวนการวางแผนพัฒนางานวิจัยให้บรรลุตามเป้าหมายของทางบริษัทที่ตั้งไว้

1.1.3 ข้อสรุปในที่ประชุม

ทางบริษัทต้องการพัฒนาระบบขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับห้องระหว่างอาคาร (จากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแบริ่ง) เพื่อให้มีประสิทธิภาพของระบบขนส่งมากขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีที่มีหลากหลายรูปแบบในปัจจุบัน และต้องการนำเทคโนโลยีที่เป็นไปได้มากที่สุดมาพัฒนาเพื่อให้ตอบสนองความต้องการ แต่ต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นหลัก เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อบริษัท โดยในที่ประชุมได้กำหนดขอบเขตงานวิจัยและพัฒนาตามที่บริษัทต้องการ โดยตั้งเป้าหมายของงานวิจัยที่จะต้องดำเนินการให้เกิดผลสำเร็จ คือ การพัฒนาระบบขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับห้องระหว่างอาคารภายในโรงงานด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ และมีข้อกำหนดรายละเอียดต่าง ๆ ที่แสดงถึงความต้องการโดยมีขอบเขตทั้ง 8 ข้อ ดังนี้

- 1) พัฒนารถขนส่งโดยใช้เทคโนโลยีเป็นยานยนต์ไฟฟ้าทั้งคันมีพิกัดบรรทุกได้สูงสุด 4,800 kg
- 2) ใช้เทคโนโลยีนำทางระหว่างอาคารเป็นแบบอัตโนมัติ
- 3) ใช้เทคโนโลยีตรวจจับสิ่งกีดขวางที่แม่นยำเพื่อความปลอดภัยเป็นหลัก
- 4) ขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับขนาด 480,000 kg หรือ 100 รอบ ภายใน 1 วัน
- 5) ขนส่งจากจุดเริ่มต้น (ไลน์ผลิต) ไปยังจุดสิ้นสุด (โกดังเก็บแบริ่ง) โดยมีระยะทาง 200 m
- 6) ในแต่ละรอบต้องมีพิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg ต่อ รอบ
- 7) ใช้เวลาในการขนส่งแต่ละรอบทั้งขาไปและขากลับไม่เกิน 15 นาที (Minute)
- 8) กำหนดความเร็วสูงสุดในการขับเคลื่อนต้องอยู่ในช่วง 0 ถึง 3 m/s

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการออกแบบหาขนาดมอเตอร์ขับเคลื่อน มอเตอร์บังคับความเร็ว แบตเตอรี่ และระบบควบคุม เพื่อนำไปพัฒนาต้นแบบรถขนส่งอัตโนมัติ

1.2.2 ศึกษาเทคโนโลยีระบบนำทางอัตโนมัติ ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง และระบบตรวจสอบน้ำหนัก เพื่อใช้เป็นหลักการพัฒนาอัลกอริทึมของรถขนส่งอัตโนมัติ

1.2.3 เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับห้องระหว่างอาคารภายในโรงงานด้วยรถขนส่งอัตโนมัติที่มีพิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ออกแบบและพัฒนาต้นแบบรถขนส่งอัตโนมัติโดยใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าทั้งคัน

1.3.2 พัฒนาต้นแบบรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับห้องระหว่างอาคารจำนวน 1 คัน

1.3.3 รถขนส่งอัตโนมัติสามารถบรรทุกแบริ่งน้ำมันสำหรับพิกัดสูงสุด 4,800 kg

1.3.4 ความเร็วรถขนส่งอัตโนมัติที่ใช้ในช่วง 0 ถึง 3 m/s เท่านั้น

1.3.5 รูปแบบการนำทางใช้เทคโนโลยีกล้อง (Camera) นำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following และวัดระยะความปลอดภัยสำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางด้วยไลดาร์ (Lidar)

1.3.6 รูปแบบการตรวจสอบน้ำหนักใช้โหลดเซลล์ตรวจสอบน้ำหนักแบริ่งน้ำมันสำหรับห้องที่บรรจุก่อนทำการวิ่งขนส่งระหว่างอาคาร

1.3.7 พื้นที่ในการทดสอบเป็นพื้นที่ที่ไม่มีทางชันและเป็นพื้นที่ภายในบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด เท่านั้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการขนส่งแ่งมันสำปะหลังของบริษัทในรูปแบบดั้งเดิม
- 1.4.2 ศึกษาหลักการออกแบบรถขนส่งอัตโนมัติโดยอาศัยเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ไฟฟ้า
- 1.4.3 ศึกษาเทคโนโลยีที่เหมาะสมต่อสภาพแวดล้อมใช้งานจริงของบริษัทสำหรับการนำทางอัตโนมัติของรถขนส่งอัตโนมัติ
- 1.4.4 ศึกษาเทคโนโลยีการตรวจจับสิ่งกีดขวางที่มีการตอบสนองที่แม่นยำเพื่อความปลอดภัย
- 1.4.5 ศึกษาเทคโนโลยีการตรวจสอบน้ำหนักของแ่งมันสำปะหลังที่บรรทุกบนรถขนส่งอัตโนมัติ
- 1.4.6 ออกแบบหาพิกัดมอเตอร์และขนาดแบตเตอรี่ให้รองรับการขับเคลื่อนที่มีขนาดบรรทุกพิกัดสูงสุด 4,800 kg
- 1.4.7 ออกแบบหาขนาดมอเตอร์บังคับเคลื่อนที่ใช้ชุดบังคับเคลื่อนระบบแร็คแอนด์พิเนียนสำหรับรถขนส่งอัตโนมัติ
- 1.4.8 ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของรถขนส่งอัตโนมัติที่มีระบบตรวจสอบน้ำหนักระบบนำทางอัตโนมัติ และระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง
- 1.4.9 พัฒนาค้นแบบรถขนส่งอัตโนมัติที่ใช้ขนส่งแ่งมันสำปะหลังระหว่างอาคาร โดยใช้เทคโนโลยีกล้องนำทางอัตโนมัติในรูปแบบ Line Following และวัดระยะความปลอดภัยสำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางด้วยไลดาร์ รวมทั้งระบบตรวจสอบน้ำหนักที่ใช้โหลดเซลล์ก่อนทำการวิ่งขนส่ง
- 1.4.10 ทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติด้วยการบรรทุกแ่งมันสำปะหลัง จำนวน 4 กระสอบ แต่ละกระสอบบรรจุแ่ง 1,200 kg ที่วางทับกันอยู่บนพาเลท และมีพิกัดบรรทุกรวมสูงสุด 4,800 kg
- 1.4.11 วิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานของรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติสำหรับเป้าหมายในการขนส่งแ่งมันสำปะหลังระหว่างอาคารขนาดรวมทั้งหมด 480,000 kg ใน 1 วัน
- 1.4.12 วิเคราะห์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงานของรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติในแบบรายวันและรายปี

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.5.1 ได้ต้นแบบระบบขนส่งแ่งมันสำปะหลังระหว่างอาคารภายในโรงงานด้วยรถขนส่งอัตโนมัติที่มีพิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg
- 1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจหลักการออกแบบหาขนาดมอเตอร์ขับเคลื่อน มอเตอร์บังคับเคลื่อน แบตเตอรี่ และระบบควบคุม ทางด้านยานยนต์ไฟฟ้าให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม
- 1.5.3 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติ ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง และระบบตรวจสอบน้ำหนัก ให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของการใช้งาน

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 2 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัย ตลอดจนกำหนดขอบเขตและประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจและสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยนำผลจากการสำรวจและสืบค้นใช้เป็นแนวทางสำหรับประยุกต์ใช้และพัฒนาเข้ากับวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ มอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ระบบบังคับเลี้ยวของยานยนต์ ระบบนำทางอัตโนมัติ ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ระบบตรวจสอบน้ำหนัก ระบบควบคุมในภาคอุตสาหกรรม โปรโตคอลการสื่อสารในภาคอุตสาหกรรม การสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus, Node-RED และ Python เพื่อเป็นประโยชน์และแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัย

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบระบบขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า ในลำดับขั้นตอนการออกแบบ ได้แก่ ออกแบบโครงสร้าง ออกแบบหาขนาดมอเตอร์ขับเคลื่อน ออกแบบหาขนาดมอเตอร์บังคับเลี้ยว ออกแบบหาขนาดแบตเตอรี่ ออกแบบระบบนำทางและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ออกแบบระบบตรวจสอบน้ำหนัก และออกแบบระบบควบคุม เพื่อนำไปพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติใช้ทดสอบวิ่งขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

บทที่ 5 กล่าวถึงการพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแบริ่งน้ำมันสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อนำเอาหลักการที่ออกแบบไว้ในบทที่ 4 มาพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติ และมีลำดับขั้นตอนของการพัฒนา 5 ขั้นตอน ได้แก่ การพัฒนาโครงสร้างของรถขนส่งอัตโนมัติ การพัฒนาระบบขับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติ การพัฒนาระบบบังคับเลี้ยวของรถขนส่งอัตโนมัติ การพัฒนาระบบตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติ และการพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง เพื่อนำรถขนส่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมาใช้ทดสอบสมรรถนะในการวิ่งขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่มีพิสัยบรรทุกสูงสุด 4,800 kg และเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของรถขนส่งอัตโนมัติระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากทดสอบวิ่งใช้งานจริง รวมทั้งวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของรถบรรทุกและรถขนส่งอัตโนมัติในการวิ่งขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อนำไปสู่เป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้โดยสรุปรายละเอียดทั้งหมดในบทถัดไป

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะพร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อไปในอนาคต

ภาคผนวก ก. เป็นการตั้งค่าในซอฟต์แวร์ Enpower Parameter Calibrator สำหรับระบบขับเคลื่อน และตั้งค่าในซอฟต์แวร์ COOL WORKS QUICK V1.0.0 สำหรับระบบบังคับเลี้ยว

ภาคผนวก ข. เป็นการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ในระหว่างดำเนินการศึกษา

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 เมื่อทราบถึงวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาระบบขนส่งแ่งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ โดยเลือกใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าเป็นหลักการออกแบบและพัฒนา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ฐานข้อมูลจาก IEEE IEE และ ScienceDirect เป็นต้น งานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ที่จะดำเนินการต่อไป ซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

2.2 ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อพัฒนาระบบขนส่งแ่งมันสำปะหลังอัตโนมัติระหว่างอาคารภายในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งในการสำรวจและสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางและมีการจัดลำดับการเรียบเรียงจากผู้วิจัยมากก่อนไปสู่งานวิจัยที่ใหม่กว่า ซึ่งเรียงลำดับจากปี ค.ศ. จากน้อยไปหามาก ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2005	Y. Cheng และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับหลักการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าของระบบยานยนต์ไฟฟ้า รวมทั้งวิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์แรงบิดและกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อใช้เลือกขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าให้เหมาะสม จากนั้นวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อใช้คำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่และออกแบบระบบสถานีชาร์จ
2009	Z. Yu และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับหลักการพัฒนาระบบสถานีชาร์จแบตเตอรี่และการออกแบบวงจรควบคุมของโมดูลการสื่อสาร CAN bus สำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2010	W. Ye และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการตรวจจับเลนที่เป็นส่วนสำคัญในระบบยานพาหนะ โดยเสนอการใช้อัลกอริทึมการตรวจจับเลน Hough Line Transform และการนำอัลกอริทึมไปใช้กับฟังก์ชัน Open CV
2012	P. Liljebäck และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับรูปแบบการควบคุมหุ่นยนต์ที่วิ่งตามเส้นทางเริ่มต้นแบบคดเคี้ยวไปสู่การวิ่งแบบเส้นทางตรง โดยใช้ตัวควบคุมการวิ่งตามเส้นทางด้วยคุณสมบัติ K-Exponential Stability
2012	S. Vonolfen และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ โดยเสนอแนวทางการปรับปรุงคลังสินค้าที่ต้องการเคลื่อนย้ายแบบจัดกลุ่มที่นำไปสู่การขนส่งที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อใช้กำหนดปัญหาในแบบผสมผสานกัน
2013	J. Du และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าที่ถูกเลือกเป็นยุทธศาสตร์แห่งชาติ เพื่อแก้ไขปัญหาความมั่นคงทางด้านพลังงานและมลพิษทางอากาศภายในเมืองของประเทศจีน โดยเสนอวิธีการขนส่งที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในอนาคตของประเทศจีน รวมถึงแผนการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานไฟฟ้า และกลยุทธ์อุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า
2014	S. Lopez และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้าที่มีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหาการใช้เชื้อเพลิงของรถบรรทุกและรถโพล์คลิฟท์ โดยเสนอแนวทางการนำเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ไฟฟ้ามาใช้แก้ไขปัญหา
2015	S. Tamboli และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับรูปแบบการสื่อสารและการควบคุมระยะไกล ที่ใช้กลยุทธ์การควบคุมทันสมัย โดยควบคุมระบบที่กระจายตัว (Distributed Control System) ด้วยอุปกรณ์ พีแอลซี ที่มีโปรโตคอลการสื่อสารเป็นแบบมาตรฐานนิยมใช้กัน เช่น Profinet, Profibus, EtherCAT, EtherNet/IP, Modbus RTU, Modbus TCP/IP และ CANbus เป็นต้น
2015	M. A. Markom และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการสร้างแผนที่ด้วยไลดาร์ราคาถูกที่พัฒนาโดย Robopeak โดยการนำไปใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ โดยการประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดตำแหน่ง การติดตามตำแหน่ง การนำทางอัตโนมัติ และการตรวจจับวัตถุ เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2016	L. Deng และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการผสมผสานระหว่างการพัฒนาาระบบควบคุมอัตโนมัติกับลักษณะงานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ใช้รูปแบบอีเธอร์เน็ต โดยใช้รูปแบบโปรโตคอลการสื่อสารแบบ Modbus TCP/IP
2017	B. Li และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับระบบการตรวจสอบและบริหารจัดการรถขนส่งแบบไร้สายที่ใช้โปรโตคอล Modbus TCP/IP โดยใช้อุปกรณ์ Cortex A8 และ WinCE6 รวมทั้งพัฒนาใช้กับแพลตฟอร์มตรวจสอบสถานะแบบเรียลไทม์ในการทำงานของรถขนส่ง เพื่อส่งข้อมูลพารามิเตอร์ในการสื่อสารไร้สายผ่านทาง GPS ของศูนย์กลางจัดการข้อมูลแบบระยะไกล
2017	T. Gayathri Devi และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการใช้เทคนิคประมวลผลภาพเพื่อช่วยลดงานที่ต้องทำด้วยมนุษย์สำหรับการจดจำ โดยใช้ในการนับจำนวนวัตถุแบบอัตโนมัติด้วยซอฟต์แวร์ Python ฟังก์ชัน Open CV
2019	V. Nhu. Thanh และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการพัฒนาหุ่นยนต์เสิร์ฟร้านอาหารด้วยเทคโนโลยีเซนเซอร์อินฟราเรด LED ติดตามเส้นทางร่วมกับ PID controller ที่ใช้ Matlab Simulink เพื่อควบคุมการปรับแต่งแรงดันพัลส์ไปยังมอเตอร์
2019	S. M. M. Rahman	อธิบายเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาการวางแผนระบบการผลิต ซึ่งมีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ โดยเสนอแนวทางแก้ไข 2 วิธี วิธีแรก คือ การปรับปรุงสายพานลำเลียงที่ออกจากชุดบรรจุให้มีระยะทางสั้นลง และวิธีที่สอง คือ การปรับเปลี่ยนเส้นทางการขนย้ายให้มีระยะทางที่สั้นลง
2019	X. Sun และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าที่ได้รับการส่งเสริมอย่างเร่งด่วนในหลายประเทศ โดยเฉพาะยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ ถือว่าเป็นทางออกในการแก้ไขวิกฤติพลังงานและลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้ โดยเสนอแนวทางแก้ไข คือ การใช้เทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มประสิทธิภาพการขนย้ายสินค้าภายในโรงงาน

ตารางที่ 2.1 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2019	C. Lin และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับระบบบริหารจัดการพลังงานรกรางที่ทันสมัยให้ประหยัดพลังงานมากขึ้น โดยการรวบรวมข้อมูลแบบเรียลไทม์ที่ใช้โปรแกรม Labview และโปรโตคอลการสื่อสารแบบ Modbus TCP/IP ซึ่งออกแบบและพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับจอทัสกรีนได้ และมีการสั่งการทำงานโดยมนุษย์กดปุ่มสัมผัส
2019	P. Nguyen-Hoang และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับแนวทางการพัฒนาระบบ Industrial IoT Gateway ในระบบปฏิบัติการ Linux เพื่อสร้างโซลูชันซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ที่เชื่อมต่อ Node-RED เพื่อช่วยให้สามารถปรับใช้แอปพลิเคชันได้อย่างรวดเร็วในอุตสาหกรรมต่าง ๆ และลดความซับซ้อนในการพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ร่วมกับซอฟต์แวร์ของอุปกรณ์ต่าง ๆ
2019	T. Bhattacharjee และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการใช้ Raspberry Pi ควบคุมพลังงานรีเลย์ รวมทั้งอ่านค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวัดพลังงาน Schneider Power Logic Ion 7650 และพัฒนาซอฟต์แวร์ในการรับส่งข้อมูลโดยใช้ภาษา Python ผ่านโปรโตคอล Modbus TCP/IP
2019	Ajay M. Tayde และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับวิธีการออกแบบกระปุกเกียร์ของ Rack & Pinion Steering เพื่อใช้เป็นระบบบังคับเลี้ยวให้มีอัตราทดของพวงมาลัยตามที่ต้องการ โดยวิเคราะห์องค์ประกอบของระบบบังคับเลี้ยวเพื่อให้ความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น และมีประสิทธิภาพสูงสุดของระบบบังคับเลี้ยว
2019	H. Benyezza และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการควบคุมโรงเรือนเกษตรกรรมโดยใช้ Internet of Things (IoT) เพื่อเพิ่มผลผลิตของพืชและจัดการระบบดูแลรักษา โดยใช้ Python พัฒนาซอฟต์แวร์ให้เชื่อมต่อกับเครื่องจักรผ่านจอทัสกรีนที่ใช้ Node-RED
2020	A. Nabi Akpolat และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการคำนวณขนาดแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้การทำงานสภาวะการขับขี่ในสภาพถนนต่าง ๆ เช่น ทางเรียบ ทางลงเนิน และทางขึ้นเนิน เพื่อวิเคราะห์และสามารถเลือกขนาดแบตเตอรี่อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 2.1 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2020	X. Tan และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับหลักการออกแบบโครงสร้างเฟรมรถโดยใช้ซอฟต์แวร์ CATIA 3D และวิเคราะห์สาเหตุการเสียรูปของโครงสร้างเฟรมรถที่ออกแบบ เมื่อทดสอบในสภาวะการขับขี่ที่แตกต่างกัน
2020	Y. Yeniydin และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับอัลกอริทึมการตรวจจับและติดตามช่องทางใหม่เพื่อตรวจจับเส้นที่ฝาสานเข้าด้วยกันตามลักษณะทางเรขาคณิตของเส้นทางจากคูเลนที่ดีที่สุด โดยใช้ Hough Line Transform เพื่อตรวจจับเส้นทาง จากนั้นรวมเส้นทางที่ตรวจพบใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยโมเดลเส้นทาง โดยใช้ตัวกรอง Kalman
2020	G. Yue	อธิบายเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดและควบคุมอุปกรณ์ที่มีจำนวนมาก โดยการนำระบบตรวจวัดด้วยเครือข่ายสองชั้นไปใช้ในโรงงาน สำนักงาน และที่อื่น ๆ สามารถทำให้การตรวจวัดได้ในรูปแบบการจัดการโหนดของอุปกรณ์จำนวนมากด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP
2020	O. N. Nyasore และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับโปรโตคอล Modbus TCP/IP ที่นิยมใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติในอุตสาหกรรม โดยสำรวจการใช้ระบบตรวจจับและป้องกันการเจาะข้อมูลเชิงลึกของ IDPS ที่มีความสามารถในการตรวจจับ DPI เพื่อหยุดการโจมตีของผู้ที่มีความเชี่ยวชาญในการสื่อสาร
2020	S. Fakhri และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการใช้ไลดาร์เป็นเครื่องมือในการตรวจจับวัตถุที่ได้รับความนิยมมากที่สุด ซึ่งความสามารถในการตรวจจับวัตถุของไลดาร์นั้นมีประสิทธิภาพมาก โดยเซนเซอร์ที่ใช้สามารถสแกนวัตถุได้ 360 องศา ในรอบทิศทาง
2020	A. Ma'arif และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการพัฒนาระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์วิ่งตามเส้นทางที่กำหนด โดยใช้ซอฟต์แวร์ Webots Simulator และใช้ Open CV บน Python สำหรับควบคุมระบบการวิ่งตามเส้นทางของหุ่นยนต์

ตารางที่ 2.1 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2021	J. A. Sanguesa และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยแหล่งพลังงานทดแทน เพื่อเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ในการแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมภูมิอากาศ และการส่งเสริมกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางด้านพลังงาน ซึ่งแนวโน้มปัจจุบันแสดงให้เห็นว่าการใช้รถยนต์สันดาปจะลดลง รวมทั้งวิเคราะห์คาดการณ์สถานการณ์ปัจจุบันในการเติบโตของอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าทั่วโลก
2021	A. S. Mohammed Shariff และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการใช้ไลบรารี Open CV ในภาษา Python เพื่อประมวลผลภาพที่ใช้ PyTesseract ของภาพ ซึ่งนำเข้ามาแปลงเป็นภาพขาวดำ และภาพที่ประมวลผลถูกรองผ่านตัวกรองเพื่อลบอักขระที่ไม่ต้องการออกไป
2021	M. Veneri และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับกลไกในการบังคับเลี้ยวแบบ Ackermann Steering และการบังคับเลี้ยวแบบ Parallel Steering รวมทั้งอภิปรายเกี่ยวกับความแตกต่างในการบังคับเลี้ยวของ Ackermann ที่ใช้เทคนิคการควบคุมที่เหมาะสมแบบไม่เชิงเส้นเพื่อประเมินประสิทธิภาพสูงสุดของรถ Formula SAE
2021	L. Y. Ma และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับวิธีการตรวจจับหลายช่องทางที่เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีหลักสำหรับการขับขี่อัจฉริยะขั้นสูง และเสนออัลกอริธึมการหาช่อง Ego-Lane จากนั้นใช้ตรวจจับหาช่องจราจรด้านข้างเพื่อช่วยให้สามารถตรวจจับช่องจราจรได้อีกหลายคู่เลน อีกทั้งแสดงให้เห็นว่าอัลกอริธึมที่นำมาใช้ในสภาพแวดล้อมถนนจริงนั้น มีความแม่นยำและมีผลการตรวจจับที่มีความเสถียร
2021	D. Okeke และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการพัฒนาและการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการตัดสินใจในอุตสาหกรรม Internet of Things (IoT) โดยพัฒนาแอปพลิเคชัน Node-RED Dashboards และใช้ Python Shell ใน Node-RED ประยุกต์ใช้ร่วมกับอัลกอริธึม Machine Learning (ML)
2022	W. Cao และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับหลักการออกแบบระบบควบคุมยานยนต์ไฟฟ้าขั้นสูง ที่พัฒนาโดยใช้เทคโนโลยี Advanced Driver Assistance System (ADAS) รวมทั้งแนะนำเทคนิคการควบคุมระบบยานยนต์ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ตารางที่ 2.1 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปี ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2022	G. Singh และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการใช้ระบบจดจำใบหน้าสำหรับการระบุตัวบุคคล ซึ่งขึ้นอยู่กับไลบรารีในการมองเห็นด้วยฟังก์ชัน Open CV ที่เขียนด้วยภาษา Python และใช้การคำนวณพฤติกรรมบนใบหน้าที่เป็นรูปทรงหลายมิติ
2022	A. Mughaid และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับระบบ SCADA ที่เป็นระบบควบคุมขั้นสูงที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมน้ำมันและก๊าซ การบำบัดน้ำพลังงานทางนิวเคลียร์ และการผลิตไฟฟ้า โดยเสนอเทคนิคการตรวจสอบความถูกต้องผ่านการโปรโตคอล Modbus TCP/IP เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในระบบ SCADA ของการสื่อสารข้อมูล
2022	M. -H. Lin และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยีกำหนดตำแหน่งและการเคลื่อนไหวของสินค้า โดยใช้แนวทางการกระจายน้ำหนักที่แม่นยำในการปรับแต่งเซนเซอร์ด้วยโพลิตเซลล์ จากนั้นประมวลผลการทดสอบเพื่อนำไปสร้างอัลกอริทึมแบบเชิงลึก อีกทั้งใช้ทดสอบระบบเพื่อค้นหาสภาพแวดล้อมการทำงานที่ดีที่สุด
2023	S. Mounitha และคณะ	อธิบายเกี่ยวกับการใช้ Raspberry Pi แทนพีแอลซี ยี่ห้อ Allen Bradley 5000 ซึ่งติดตั้งในอุตสาหกรรมอัตโนมัติเพื่อใช้ควบคุมเครื่องชั่งน้ำหนักที่เชื่อมต่อกับโพลิตเซลล์ อีกทั้งยังต้องการให้มีความยืดหยุ่นในระหว่างการใช้งาน ดังนั้น Raspberry Pi สามารถใช้งานแทนพีแอลซี Allen Bradley 5000 ในอุตสาหกรรมกระบวนการการผลิตแบบอัตโนมัติได้อย่างดี

จากวรรณกรรมและงานวิจัยที่ได้สรุปในตารางที่ 2.1 สามารถช่วยให้ผู้วิจัยได้นำไปดำเนินงานศึกษาหรือพัฒนาต่อยอดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้พอมองภาพออกอย่างกว้าง ๆ ว่ามีคณะวิจัยใดได้ศึกษาและดำเนินงานสิ่งใดไปแล้วบ้าง แต่ยังไม่สามารถแยกออกเป็นหมวดหมู่ตามวิธีการดำเนินงานศึกษาได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในส่วนการอธิบายถัดไปนี้ได้ทำการเรียบเรียงและคัดกรองงานวิจัยหลัก ๆ ที่สำคัญและมีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัดจากหลาย ๆ ผลงานวิจัยที่ได้สรุปไว้ โดยกล่าวถึงทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการพัฒนาระบบขนส่งแปรงมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถขนส่งอัตโนมัติที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า และยังมี การเสริมข้อมูลถึงผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนั้น ๆ โดยย่อ ดังนี้

เริ่มต้นจาก S. M. M. Rahman (2019) ได้กล่าวถึงการเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้วิธีการแก้ไขปัญหาวางแผนระบบการผลิต ซึ่งมีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ ซึ่งมีแนวทางแก้ไข 2 วิธี วิธีแรก คือ การปรับปรุงสายพานลำเลียง

ที่ออกจากชุดบรรจุให้มีระยะทางสั้นลง และวิธีที่สอง คือ การปรับเปลี่ยนเส้นทางการขนย้ายให้มีระยะทางที่สั้นลง ผลปรากฏว่าในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ภายในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี งานวิจัยของ S. Lopez และคณะ (2014) ได้กล่าวถึงเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าได้ก้าวเข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหการใช้เชื้อเพลิงของรถบรรทุกและรถโพล์คลิฟท์ โดยเสนอแนวทางแก้ไขปัญหาคือ การนำเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ไฟฟ้ามาพัฒนาในด้านระบบขนส่ง ผลปรากฏว่าในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวยานยนต์ไฟฟ้าช่วยให้ประหยัดการใช้พลังงานในระบบขนส่งได้มากกว่าการใช้รถบรรทุกและรถโพล์คลิฟท์ งานวิจัยของ J. A. Sanguesa และ คณะ (2021) กล่าวถึงการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยแหล่งพลังงานทดแทน แก้ไขปัญหาโดยเสนอเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ในการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศ และการส่งเสริมกระบวนการเปลี่ยนแปลงในการประหยัดพลังงาน ผลปรากฏว่าในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวการใช้เครื่องยนต์สันดาปมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จากการวิเคราะห์คาดการณ์สถานการณ์การเติบโตในปัจจุบันของอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าทั่วโลก รวมทั้งช่วยในเรื่องของการลดก๊าซเรือนกระจกจากการใช้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาป

ต่อมาเป็นการกล่าวถึงการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ไฟฟ้า คือ ต้องเข้าใจหลักการออกแบบหาขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่ เพื่อให้ตอบโจทย์กับความต้องการและนำไปใช้งานอย่างเหมาะสม อันดับแรกที่ต้องคำนึงถึง คือ น้ำหนักโหลตสูงสุดและความเร็วเฉลี่ยที่ใช้เป็นหลัก งานวิจัยของ Y. Cheng และ คณะ (2005) ได้แนะนำหลักการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าของระบบยานยนต์ไฟฟ้า รวมทั้งวิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์แรงบิดและกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อใช้เลือกขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าให้เหมาะสม หลังจากนั้นวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อใช้คำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่และออกแบบระบบสถานีชาร์จ ผลปรากฏว่าจากการออกแบบสามารถใช้เป็นหลักการในการเลือกหาขนาดมอเตอร์ที่เหมาะสมต่อกันใช้งาน รวมทั้งใช้ออกแบบหาแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้เป็นอย่างดี งานวิจัยของ A. Nabi Akpolat และ คณะ (2020) ได้เสนอการคำนวณขนาดแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้การทำงานสถานะการขับขี่ในสภาพถนนต่าง ๆ เช่น ทางเรียบ ทางลงเนิน และทางขึ้นเนิน เพื่อใช้วิเคราะห์ในการเลือกขนาดแบตเตอรี่ ผลปรากฏว่าจากการคำนวณสามารถใช้เลือกขนาดแบตเตอรี่ได้ถูกต้องและเหมาะสมต่อการใช้งาน งานวิจัยของ Z. Yu และคณะ (2009) ได้เสนอหลักการพัฒนาระบบสถานีชาร์จแบตเตอรี่และการออกแบบวงจรควบคุมของโมดูลการสื่อสาร CAN bus สำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า ผลปรากฏว่าการควบคุมการสื่อสารโดยใช้โมดูล CAN bus สามารถกำหนดเงื่อนไขเพื่อความปลอดภัยในการชาร์จประจุไฟฟ้าระหว่างเครื่องชาร์จและแบตเตอรี่ให้มีความเหมาะสมในการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้า

สำหรับการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้ายังมีการกล่าวถึง การออกแบบโครงสร้างของตัวรถ การออกแบบระบบควบคุมของรถ และเทคโนโลยีการนำทางของรถ ซึ่งทั้งหมดนี้จำเป็นต้องใช้เป็นแนวทางในการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์แบบ งานวิจัยของ X. Tan และคณะ (2020) ได้เสนอหลักการออกแบบโครงสร้างเฟรมรถโดยใช้ซอฟต์แวร์ CATIA 3D รวมทั้งวิเคราะห์การเสีรูปของโครงสร้างเฟรมรถภายใต้สถานะการขับขี่ที่แตกต่างกัน ผลปรากฏว่าในการออกแบบสามารถใช้เป็นหลักการออกแบบเฟรมโครงสร้างรถเพื่อรองรับน้ำหนักโหลตที่ต้องการได้ สำหรับการออกแบบระบบควบคุม งานวิจัยของ W. Cao และ คณะ (2022) ได้กล่าวถึงหลักการ

ออกแบบระบบควบคุมยานยนต์ไฟฟ้าขั้นสูงโดยใช้เทคโนโลยี Advanced Driver Assistance System (ADAS) รวมทั้งแนะนำเทคนิคการควบคุมระบบยานยนต์ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ผลปรากฏว่าในการใช้หลักการออกแบบนี้สามารถใช้เป็นระบบขับเคลื่อนแบบไร้คนขับสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า รวมทั้งใช้วิ่งบนถนนที่มีความซับซ้อนได้ดี จากนั้นในการศึกษาเทคโนโลยีนำทาง งานวิจัยของ Y. Yeniaydin และคณะ (2020) ได้เสนออัลกอริทึมการตรวจจับและติดตามช่องทางใหม่เพื่อตรวจจับเส้นที่ผสานเข้าด้วยกันตามลักษณะทางเรขาคณิตของเส้นทางจากคูเลนที่ดีที่สุด โดยใช้รูปแบบ Hough Line Transform เพื่อตรวจจับเส้นทาง ผลปรากฏว่าการตรวจจับเส้นทางในรูปแบบ Hough Line Transform สามารถรวมเส้นทางที่ตรวจพบโดยใช้การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยโมเดลเส้นทางตัวกรอง Kalman

ก่อนอื่นต้องเข้าใจก่อนว่าในปัจจุบันเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ได้รับการออกแบบโดยนักพัฒนา ในส่วนของระบบควบคุมการทำงานสามารถทำได้หลากหลายวิธีการ ซึ่งขึ้นอยู่กับการคัดเลือกอุปกรณ์และรูปแบบโปรโตคอลการสื่อสารของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับพัฒนาระบบ ในงานวิจัยของ S. Tamboli และ คณะ (2015) กล่าวถึงรูปแบบการสื่อสารและการควบคุมระยะไกลโดยใช้กลยุทธ์การควบคุมทันสมัย เพื่อใช้ควบคุมอุปกรณ์ในระบบที่กระจายตัว (Distributed Control System) ด้วยอุปกรณ์พีแอลซีที่มีโปรโตคอลการสื่อสารเป็นแบบมาตรฐานนิยมใช้กัน เช่น Profinet, Profibus, EtherCAT, EtherNet/IP, Modbus RTU, Modbus TCP/IP และ CANbus เป็นต้น ผลปรากฏว่าการใช้อุปกรณ์ที่ได้รับรองมาตรฐานในงานอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่มีโปรโตคอลการสื่อสารดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้งานงานอุตสาหกรรมผลิตได้อย่างหลากหลาย งานวิจัยของ C. Lin และคณะ (2019) กล่าวถึงระบบบริหารจัดการพลังงานรถรางที่ทันสมัยให้มีการประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้น โดยเสนอวิธีแก้ปัญหาด้วยการรวบรวมข้อมูลแบบเรียลไทม์ที่ใช้โปรแกรม Labview ด้วยโปรโตคอลการสื่อสาร Modbus TCP/IP เพื่อพัฒนาให้มีการเชื่อมต่อกับจอทัสกรีนและมีการสั่งการโดยมนุษย์กดปุ่มสัมผัส ผลปรากฏว่าการรวบรวมข้อมูลที่ใช้โปรโตคอลการสื่อสาร Modbus TCP/IP แบบเรียลไทม์ สามารถวิเคราะห์ข้อมูลและแก้ปัญหาได้แบบทันทีทันใด อีกทั้งยังสามารถใช้วางแผนประหยัดพลังงานในโรงงาน งานวิจัยของ B. Li และคณะ (2017) กล่าวถึงระบบการตรวจสอบและบริหารจัดการรถขนส่งแบบไร้สายด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP โดยใช้อุปกรณ์ Cortex A8 และ WinCE6 รวมทั้งพัฒนาใช้กับแพลตฟอร์มตรวจสอบสถานะแบบเรียลไทม์ในการทำงานของรถขนส่งเพื่อส่งข้อมูลพารามิเตอร์ในการสื่อสารไร้สายผ่านทาง GPS ของศูนย์กลางจัดการข้อมูลแบบระยะไกล ผลปรากฏว่าเมื่อรถขนส่งมีการเคลื่อนที่ออกห่างศูนย์กลางจัดการข้อมูลในระยะไกล ยังสามารถสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายผ่านทาง GPS ร่วมกับการสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP

หลังจากนั้นในการผสมผสานระหว่างการพัฒนาควบคุมอัตโนมัติกับลักษณะงานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ใช้รูปแบบอินเทอร์เน็ต โดยการนำอุปกรณ์และเซ็นเซอร์มาประยุกต์ใช้งานเพื่อตรวจสอบและควบคุมการทำงานจากระยะไกลได้ ซึ่งนิยมนำไปใช้ในระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรมระหว่างระบบ SCADA และตัวรับส่งสัญญาณผ่านเราเตอร์ที่มีโปรโตคอล IoT เช่น Node-RED หรือ CoAP เป็นต้น ในงานวิจัยของ P. Nguyen-Hoang และคณะ (2019) กล่าวถึงแนวทางสำหรับพัฒนาระบบ Industrial IoT Gateway ในระบบปฏิบัติการ Linux เพื่อสร้างโซลูชันซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ที่เชื่อมต่อกับ Node-RED ผลปรากฏว่าการพัฒนาระบบ Industrial IoT

Gateway ที่เชื่อมต่อกับ Node-RED สามารถลดความซับซ้อนในการพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ร่วมกับเฟรมเวิร์กของอุปกรณ์ต่าง ๆ อีกทั้งช่วยให้การปรับใช้แอปพลิเคชันได้อย่างรวดเร็วในงานอุตสาหกรรม งานวิจัยของ T. Bhattacharjee และคณะ (2019) กล่าวถึงวิธีการนำ Raspberry Pi ควบคุมสั่งงานรีเลย์ รวมทั้งอ่านค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า เสนอวิธีแก้ปัญหาโดยใช้เครื่องวัดพลังงาน Schneider Power Logic Ion 7650 และพัฒนาซอฟต์แวร์ในการรับส่งข้อมูลโดยใช้ภาษา Python ผ่านโปรโตคอลการสื่อสาร Modbus TCP/IP ผลปรากฏว่าการ Raspberry Pi สามารถควบคุมการสั่งงานรีเลย์และอ่านค่าพารามิเตอร์จากเครื่องวัดพลังงาน Schneider Power Logic Ion 7650 เพื่อนำไปวิเคราะห์วางแผนการใช้พลังงานไฟฟ้า แบบรายวัน รายเดือน และรายปี เป็นต้น

ลำดับถัดมาในส่วนของการพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ในปัจจุบันกล้อง (Camera) เริ่มมีบทบาทสำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบนำทางมากยิ่งขึ้น ในงานวิจัยของ A. S. Mohammed Shariff และคณะ (2021) กล่าวถึงการใช้ไลบรารีฟังก์ชัน Open CV เขียนด้วยภาษา Python เพื่อประมวลผลภาพโดยใช้ PyTesseract ซึ่งภาพที่ได้ถูกนำมาเข้ามาแปลงเป็นภาพขาวดำ ผลปรากฏว่าภาพที่ประมวลผลถูกกรองผ่านตัวกรองเพื่อลบอักขระที่ไม่ต้องการได้ โดยการพัฒนาซอฟต์แวร์ด้วยไลบรารีฟังก์ชัน Open CV ที่เขียนด้วยภาษา Python ในงานวิจัยของ W. Ye และคณะ (2010) กล่าวถึงการตรวจจับเส้นที่เป็นส่วนสำคัญในระบบยานพาหนะ โดยเสนอการใช้อัลกอริทึมการตรวจจับเส้น Hough Line Transform และการนำอัลกอริทึมไปใช้กับฟังก์ชัน Open CV ผลปรากฏว่าการพัฒนาอัลกอริทึม Hough Line Transform ที่ใช้ฟังก์ชัน Open CV สามารถนำมาตรวจจับเส้นถนนได้หลากหลายสภาพแวดล้อมของถนนที่แตกต่างกัน งานวิจัยของ L. Y. Ma และคณะ (2021) กล่าวถึงวิธีการตรวจจับหลายช่องทาง ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีหลักสำหรับการขับเคลื่อนอัตโนมัติขั้นสูง และยังพัฒนาอัลกอริทึมการหาช่อง Ego-Lane จากนั้นใช้การตรวจจับเพื่อหาช่องจราจรด้านข้าง ซึ่งช่วยให้สามารถตรวจจับช่องจราจรได้หลายคู่เลน ผลปรากฏว่าอัลกอริทึมที่พัฒนามาใช้ในสภาพแวดล้อมถนนจริงนั้นมีความแม่นยำและมีผลการตรวจจับที่มีความเสถียรภาพสูงพอสมควร และงานวิจัยของ A. Ma'arif และคณะ (2020) กล่าวถึงการพัฒนากระบวนการทำงานของหุ่นยนต์วิ่งตามเส้นทางที่กำหนด โดยใช้ซอฟต์แวร์ Webots Simulator และ Open CV บน Python สำหรับควบคุมระบบการวิ่งตามเส้นทางของหุ่นยนต์ ผลปรากฏว่าหุ่นยนต์สามารถวิ่งตามเส้นทางที่แตกต่างกัน เช่น เส้นทางแคบ เส้นทางแบบจุด และเส้นทางโค้ง ภายใต้การควบคุมซอฟต์แวร์พื้นฐานดังกล่าวในการวิ่งตามเส้นทาง

นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงการพัฒนาแบบบังคับเลี้ยว ซึ่งในงานวิจัยของ M. Veneri และคณะ (2021) กล่าวถึงกลไกในการบังคับเลี้ยวแบบ Ackermann Steering และการบังคับเลี้ยวแบบ Parallel Steering ผลปรากฏว่าบ่งบอกถึงความแตกต่างในการบังคับเลี้ยวของ Ackermann Steering โดยใช้เทคนิคการควบคุมที่เหมาะสมแบบไม่เชิงเส้นและประเมินประสิทธิภาพสูงสุดของรถรุ่น Formula SAE ในงานวิจัยของ Ajay M. Tayde และคณะ (2019) กล่าวถึงวิธีการออกแบบกระดูกเกียร์ของ Rack & Pinion Steering เพื่อใช้เป็นระบบบังคับเลี้ยวให้มีอัตราทดของพวงมาลัยตามที่ต้องการ ผลปรากฏว่าสามารถวิเคราะห์หองค์ประกอบของระบบบังคับเลี้ยวเพื่อให้ความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพของระบบบังคับเลี้ยวสูงที่สุด

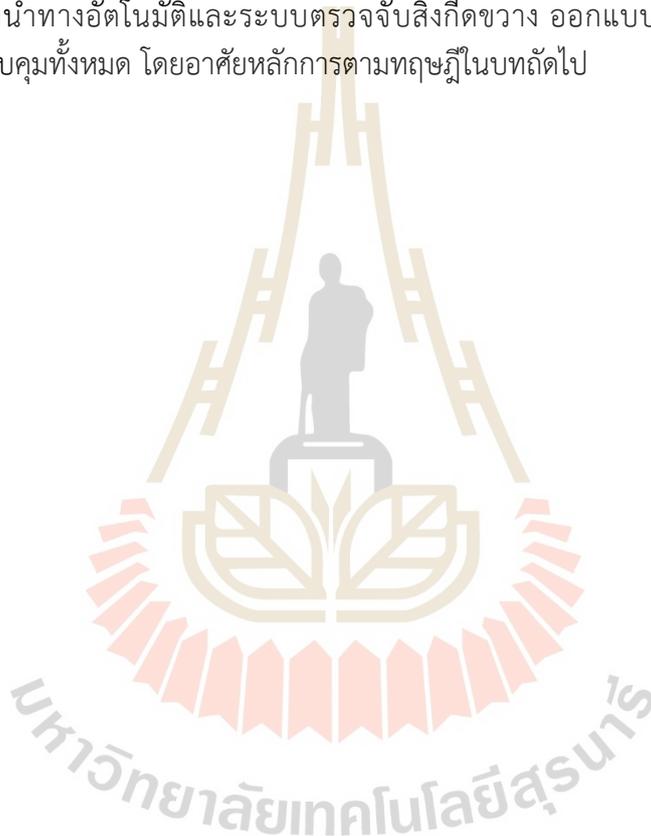
ทั้งนี้ในส่วนเพิ่มเติมของการพัฒนาระบบขนส่งแบริ่งมันสำปะหลังระหว่างอาคารแบบอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า ความปลอดภัยในระหว่างการใช้งานจึงมีความจำเป็นอย่างมากเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายตามมาในระหว่างทำการขนส่ง การนำเทคโนโลยีของการตรวจจับที่ทันสมัยมาใช้พัฒนาให้เหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยของ M. A. Markom และคณะ (2015) กล่าวถึงการสร้างแผนที่โดปใช้ไลดาร์แบบราคาถูกที่พัฒนาโดย Robopeak ซึ่งสามารถนำไปใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ ผลปรากฏว่าการประยุกต์ใช้ไลดาร์สามารถสร้างแผนที่ในสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดตำแหน่ง การติดตามตำแหน่ง การนำทางอัตโนมัติ และการตรวจจับวัตถุได้ งานวิจัยของ S. Fakhri และคณะ (2020) กล่าวถึงการนำไลดาร์เป็นเครื่องมือในการตรวจจับวัตถุในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ผลปรากฏว่าการใช้ไลดาร์สามารถตรวจจับวัตถุได้อย่างมีประสิทธิภาพมากและได้รับความนิยมมากที่สุด ซึ่งเซนเซอร์ที่ใช้สามารถสแกนวัตถุได้แบบ 360 องศา ในรอบทิศทาง

ในส่วนสุดท้ายนี้เป็นการกล่าวถึงความปลอดภัยในด้านของโครงสร้างตัวรถที่ออกแบบ ซึ่งในการออกแบบและพัฒนาได้มีการกำหนดเป้าหมายของโหลดที่ต้องการบรรทุกไว้ชัดเจน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการบรรทุกน้ำหนักเกินที่กำหนดไว้ การนำระบบตรวจสอบน้ำหนักเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายในตัวโครงสร้างรถและเพื่อความปลอดภัย รวมทั้งการพัฒนาตรวจสอบน้ำหนักในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในงานวิจัยของ M. -H. Lin และคณะ (2022) กล่าวถึงการนำเทคโนโลยีกำหนดตำแหน่งและการเคลื่อนไหวของสินค้าโดยใช้โหลดเซลล์ในการตรวจสอบ เพื่อเป็นแนวทางการกระจายน้ำหนักที่แม่นยำในการปรับแต่งเซนเซอร์ที่ใช้โหลดเซลล์ ผลปรากฏว่าในการทดสอบประมวลผลสามารถนำไปสร้างอัลกอริทึมแบบเชิงลึกควบคู่กับการใช้โหลดเซลล์ อีกทั้งยังสามารถใช้ทดสอบระบบในการค้นหาตำแหน่งสินค้าของสภาพแวดล้อมการทำงานที่ดีที่สุด งานวิจัยของ S. Mounitha และคณะ (2023) กล่าวถึงการประยุกต์ใช้ Raspberry Pi แทนพีแอลซี ยี่ห้อ Allen Bradley 5000 ที่ติดตั้งในอุตสาหกรรมอัตโนมัติ เพื่อใช้สำหรับการควบคุมเครื่องชั่งน้ำหนักที่เชื่อมต่อกับโหลดเซลล์ ผลปรากฏว่าการใช้ Raspberry Pi เข้ามาแทนที่พีแอลซี Allen Bradley 5000 ในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติได้เป็นอย่างดี อีกทั้งมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสำหรับนักพัฒนาซอฟต์แวร์

ในการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งหมดเห็นได้ว่ามีปริมาณงานวิจัยอยู่น้อยมากเมื่อเทียบกับการพัฒนาต่อยอดงานวิจัยกับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง สามารถต่อยอดงานวิจัยเพื่อใช้เป็นองค์ความรู้สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ในการพัฒนาระบบขนส่งแบริ่งมันสำปะหลังที่ทันสมัยโดยใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าเข้ามาช่วยดำเนินงาน โดยทั่วไปแล้วในระบบขนส่งแบริ่งมันสำปะหลังภายในโรงงาน ส่วนใหญ่ใช้รถบรรทุกและรถโฟล์คลิฟท์ ซึ่งเป็นการใช้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปอาจก่อให้เกิดมลพิษในอากาศมากกว่าการนำเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ไฟฟ้ามาพัฒนาเพื่อใช้เป็นรถขนส่งอัตโนมัติ อีกทั้งยังเป็นการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และนำไปสู่การปรับเปลี่ยนทางด้านเทคโนโลยีในระบบขนส่งในโรงงานในรูปแบบที่ทันสมัยมากขึ้น โดยการพัฒนาระบบขนส่งแบริ่งมันสำปะหลังภายในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถขนส่งอัตโนมัติที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าขึ้นมา เพื่อทดสอบสมรรถนะของรถขนส่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นทดแทนการใช้รถบรรทุกและรถโฟล์คลิฟท์

2.3 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ดำเนินงานในวิทยานิพนธ์นี้ จากฐานข้อมูล IEEE IEE ScienceDirect และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและระเบียบวิธีที่คณะวิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ผลการดำเนินงานรวมทั้งข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะวิจัยตั้งแต่อดีตตลอดจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาขึ้นเพื่อแสวงหาคำตอบ และนำไปสู่การปรับเปลี่ยนมาใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าในการขนส่งน้ำมันสำหรับใช้ในโรงงานจากเดิมที่ใช้รถบรรทุก โดยใช้หลักการเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ไฟฟ้าออกแบบเพื่อหาขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าและหาขนาดแบตเตอรี่ให้มีความเหมาะสมออกแบบระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ออกแบบระบบตรวจสอบน้ำหนักรวมทั้งระบบควบคุมทั้งหมด โดยอาศัยหลักการตามทฤษฎีในบทถัดไป



บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัยมีความสำคัญมากในการดำเนินงานวิจัย เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจของนักวิจัย ซึ่งในบทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ดำเนินการสืบค้นและทบทวนมาพอสังเขป เพื่อให้สามารถตีกรอบเป้าหมายหลักของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความกระชับและชัดเจนมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มากที่สุด ในส่วนนี้เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 11 หัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ มอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ระบบบังคับเลี้ยวของยานยนต์ ระบบนำทางอัตโนมัติ ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ระบบตรวจสอบน้ำหนัก ระบบควบคุมในภาคอุตสาหกรรม โปรโตคอลการสื่อสารในภาคอุตสาหกรรม การสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus, Node-RED และ Python สำหรับหัวข้อทั้งหมดนี้ได้คัดกรองเนื้อหาเฉพาะส่วนที่จำเป็น สำหรับการพัฒนาระบบขนส่ง แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถขนส่งอัตโนมัติที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นหัวข้องานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2 มอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

ในปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle) มีแนวโน้มใช้งานเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งในอนาคตอาจทดแทนและยานยนต์แบบดั้งเดิม คือ ยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปและใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง โดยหัวใจหลักที่สำคัญของยานยนต์ คือ ระบบขับเคลื่อนที่เป็นส่วนประกอบหลักของระบบ ทั้งนี้ยานยนต์ที่ใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานทำให้ระบบขับเคลื่อนมีลักษณะแตกต่างออกไปจากระบบเดิมที่ใช้เครื่องยนต์สันดาป สำหรับระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้ามีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ มอเตอร์ขับเคลื่อน หรือมอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Motor) โดยที่มอเตอร์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าซึ่งได้จากแบตเตอรี่ไปเป็นพลังงานทางกลในการหมุนล้อทำให้ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถวิ่งเคลื่อนที่ได้ทั้งวิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และการหยุดวิ่ง หรือการเบรก ในการเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูง ซึ่งสามารถทำงานในย่านความเร็วที่กว้าง ให้แรงบิดที่สูงเพื่อให้มีแรงฉุดในการเร่งออกตัว รวมทั้งมีความน่าเชื่อถือสูงในการทนทานต่อการทำงานที่ผิดปกติและมีต้นทุนการผลิตต่ำ นอกจากนี้มอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อใช้งานในแต่ละประเภทจำเป็นต้องมีการเลือกจุดเด่นในด้านต่าง ๆ อย่างเหมาะสมในแต่ละลักษณะของการนำไปใช้งาน สำหรับจุดเด่นและจุดด้อยของมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละชนิดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในยานยนต์ไฟฟ้า มีรายละเอียดย่อต่อไปนี้

3.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ

กล่าวถึงหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor) โดยใช้หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) ที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังขดลวดบนสเตเตอร์ (Stator) แล้วมีการแปลงผันทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) หมุนที่สเตเตอร์จึงเกิดการเหนี่ยวนำไปยังโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพราะมีจุดเด่นในเรื่องของอายุการใช้งานที่ยาวนานและโครงสร้างมีความแข็งแรงทนทาน และมอเตอร์ชนิดนี้ยังสามารถทำให้แกนโรเตอร์หมุนได้ด้วยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับได้โดยตรงไม่จำเป็นต้องประยุกต์ใช้กับชุดอุปกรณ์ควบคุม (Controller) หรือจะประยุกต์ใช้งานร่วมกับชุดควบคุมได้เช่นกัน สำหรับงานทางด้านอุตสาหกรรมนั้นมีลักษณะหน้าที่ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งอาจมีการใช้งานมอเตอร์ขึ้นอยู่กับความต้องการของงานนั้น ๆ ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาออกแบบหาวิธีควบคุมมอเตอร์ เพื่อสามารถใช้งานอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม และใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐาน (Benchmark) ในการประยุกต์ใช้กับมอเตอร์ชนิดอื่น ๆ และในส่วนของจุดด้อยของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ คือ มีประสิทธิภาพต่ำในสภาวะการทำงานที่ความเร็วต่ำ ทำให้มีแรงบิด (Torque) หรือ แรงจุดเริ่มต้นต่ำ และมีค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ไม่สูงมาก ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ใช้งานหมุนด้วยความเร็วมาก ๆ เกิดการเสียหายของแท่งอลูมิเนียมในแกนโรเตอร์เป็นต้น สำหรับมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำที่นำมาประยุกต์ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า Curtis HPEVS AC-51 ดังรูปที่ 3.1 ในส่วนของ DANA ASY-120 series และ DANA ASY-200 series ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ รวมทั้งคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ Curtis HPEVS AC-51



รูปที่ 3.2 มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ DANA ASY-120 series



รูปที่ 3.3 มอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ DANA ASY-200 series

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ

พารามิเตอร์ (Parameter)	Curtis HPEVS AC-51	DANA ASY-120 series	DANA ASY-200 series
Voltage Range (V)	108-155	24-48	24-96
Peak Torque (Nm)	146.4	5-30	30-200
Continuous Power (kW)	35	Up to 2	Up to 20
Peak Power (kW)	65.99	Up to 4	Up to 50
Rated Speed (rpm)	10,000	5,000	7,500

3.2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร

หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent-Magnet Synchronous Motor) ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ใช้หลักการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ โดยมีลักษณะโครงสร้างของสเตเตอร์คล้ายกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับให้กับขดลวดของสเตเตอร์ไม่จำเป็นต้องใช้ชุดอุปกรณ์ควบคุม หรือ จะใช้ชุดอุปกรณ์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ได้เช่นกัน และในส่วนที่แตกต่างกัน คือ โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ใช้แบบแม่เหล็กถาวรเพื่อช่วยสร้างแรงจากสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้เกิดความสูญเสียที่แกนโรเตอร์ลดลงทำให้สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ามีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นและมีแรงบิดสูงขึ้นตามด้วย เมื่อกล่าวถึงจุดเด่นของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร คือ มีน้ำหนักโครงสร้างเบาให้ประสิทธิภาพการทำงานสูง จึงทำให้ให้อัตราส่วนระหว่างแรงบิดต่อน้ำหนักโครงสร้างเพิ่มสูงขึ้นตามด้วยและมีแรงเฉื่อย (Inertia) ที่ต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับงานที่ต้องการการตอบสนองอย่างรวดเร็วแบบทันทีทันใด สำหรับจุดด้อยของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ คือ มีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างแพง เนื่องจากราคาของแม่เหล็กถาวรที่สูงเพราะมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ต้องการใช้แม่เหล็กที่มีคุณภาพสูง ทั้งนี้ในการเปลี่ยนแปลงของราคาแม่เหล็กในตลาดโลกอย่างรวดเร็วและไม่แน่นอน จึงเกิดความเสียหายที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนในการผลิตของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบโดยรวม อีกทั้งแม่เหล็กถาวรมีโอกาสน้อยเสียคุณสมบัติของแม่เหล็กที่ต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูงและเกิดการลัดวงจรไฟฟ้าขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยเหตุนี้ มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ปัจจุบันถูกนำไปประยุกต์ใช้งานและได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวรที่ใช้

ในงานยานยนต์ไฟฟ้า DANA TM4 IPM-200 series ดังรูปที่ 3.4 ในส่วนของ MV-275 series และ ME1616/Sevcon Gen4 ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ รวมทั้งคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวรที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.4 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร DANA TM4 IPM-200 series



รูปที่ 3.5 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร MV-275 series



รูปที่ 3.6 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร ME1616/Sevcon Gen4

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร

พารามิเตอร์ (Parameter)	DANA TM4 IPM-200 series	MV-275 series	ME1616/Sevcon Gen4
Voltage Range (V)	24-96	130-450	48-120
Peak Torque (Nm)	45-95	275	134
Continuous Power (kW)	3-18	100	20
Peak Power (kW)	5-35	205	20-55
Rated Speed (rpm)	6,750	15,000	6,000

3.2.3 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ (Synchronous Reluctance Motor) มีหลักการทำงานของสนามแม่เหล็กเป็นตัวหมุนที่โรเตอร์ ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของสเตเตอร์ คล้ายคลึงกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำและมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร โดยหลักการทำงานมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับที่สเตเตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ และสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับชุดอุปกรณ์ควบคุม หรือ ไม่ใช้ชุดอุปกรณ์ควบคุมได้เช่นเดียวกัน แต่มีความแตกต่างกันที่โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์จะไม่มีกระแสไหลในขดลวด แม่เหล็กเหนี่ยวนำ หรือแม่เหล็กถาวร ทำให้โรเตอร์ของมอเตอร์ชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์มีการออกแบบรูปร่างของตัวกันทางเดินสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Barrier) เพิ่มเติม เพื่อให้เกิดแรงรีลักแตนซ์ (Reluctance Force) ที่ทำให้มอเตอร์หมุน

เมื่อกล่าวถึงจุดเด่นของมอเตอร์ชนิดนี้ คือ มีประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ เช่นเดียวกับตัวประกอบกำลังมีค่าใกล้เคียง หรือดีกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแต่มีค่าต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร ในส่วนของต้นทุนการผลิตของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ ต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำและมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร เนื่องจากมีรูปแบบโครงสร้างที่ง่ายไม่ซับซ้อนและที่โรเตอร์ไม่มีส่วนประกอบของขดลวดและแม่เหล็กเหนี่ยวนำรวมทั้งแม่เหล็กถาวรเข้ามาเกี่ยวข้อง อีกทั้งจุดด้อยของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ คือ เมื่อมีการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าการกระเพื่อมของแรงบิด (Torque Ripples) มีค่าค่อนข้างสูง ส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างแรงบิดต่อน้ำหนักโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้มีค่าน้อยกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ที่ใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้า DANA TM4 SYR-200 series ดังรูปที่ 3.7 และมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ DANA TM4 SYR-260 series ดังรูปที่ 3.8 รวมทั้งคุณสมบัติเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ที่ใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้า ดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.7 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแทนซ์ DANA TM4 SYR-200 series



รูปที่ 3.8 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแทนซ์ DANA TM4 SYR-260 series

ตารางที่ 3.3 คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแทนซ์

พารามิเตอร์ (Parameter)	DANA TM4 SYR-200 series	DANA TM4 SYR-260 series
Voltage Range (V)	24-96	24-96
Peak Torque (Nm)	70-220	200-400
Continuous Power (kW)	6-20	12-35
Peak Power (kW)	2-50	19-70
Rated Speed (rpm)	6,000	6,000

3.2.4 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์

หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ (Switched Reluctance Motor) ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ไม่ใช้สนามแม่เหล็กหมุนเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด ก่อนหน้านี้ ที่กล่าวไว้ในข้างต้น โดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสเตเตอร์เพื่อเปลี่ยนเป็นการป้อนกระแสไฟฟ้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมในขดลวดของแต่ละเฟสตามตำแหน่งของโรเตอร์ ส่งผลให้โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้มีลักษณะการทำงานเรียบง่ายที่เป็นลักษณะแบบขั้วยื่น (Salient Pole) แต่ขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วที่ต้องการ เมื่อกล่าวถึงจุดเด่นของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ คือ มีต้นทุนการผลิตของมอเตอร์ไฟฟ้าต่ำกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ เนื่องจากไม่มีการใช้ขดลวด แม่เหล็กลูมิเนียม และแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ ทั้งนี้รูปร่างโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้มีความซับซ้อนน้อยกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ แต่มีความแข็งแรงทางกลมากกว่า จึงเหมาะสำหรับใช้งานที่ความรอบเร็วสูง และจุดด้อยของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ คือ ในระหว่างการทำงานทำให้มีแรงบิดกระเพื่อมและมีการสั่นสะเทือน (Vibration) รวมทั้งเสียงรบกวน (Acoustic Noise) ที่เกิดจากมอเตอร์ไฟฟ้านี้มีค่าสูงมากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ อีกทั้งรูปแบบโครงสร้างของระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้าแตกต่างจากมอเตอร์ไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด ก่อนหน้านี้ จึงไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกันได้ ส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ส่วนใหญ่ถูกนิยมใช้ในรถบรรทุกไฟฟ้าที่วิ่งระยะทางไกล ๆ สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้า HDSRM 150 series ดังรูปที่ 3.9 และมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ HDSRM 300 series ดังรูปที่ 3.10 รวมทั้งคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ที่ใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้า ดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.9 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ HDSRM 150 series



รูปที่ 3.10 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์ HDSRM 300 series

ตารางที่ 3.4 คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์

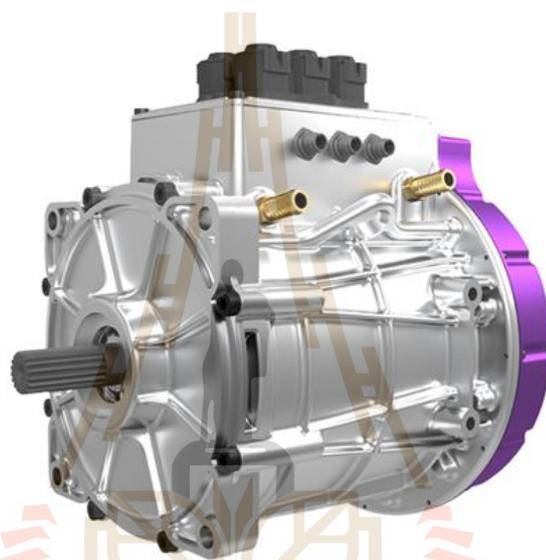
พารามิเตอร์ (Parameter)	HDSRM 150 series	HDSRM 300 series
Voltage Range (V)	700	700
Peak Torque (Nm)	90	380-520
Continuous Power (kW)	20-40	75
Peak Power (kW)	40	166-214
Rated Speed (rpm)	8,400	8,400

3.2.5 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent-magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor) ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้มีหลักการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนที่ใช้แรงบิดที่เกิดจากแรงรีลักแตนซ์เป็นหลัก และใช้แรงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรช่วยปรับปรุงให้ตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพการทำงานดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ ทั้งนี้จุดเด่นของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวรสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ได้ และจุดด้อย คือ มีต้นทุนการผลิตสูงขึ้นเนื่องจากการใช้แม่เหล็กถาวรที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์ และมีต้นทุนต่ำกว่า

เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร เนื่องจากใช้จำนวนแม่เหล็กถาวรที่น้อยกว่าและใช้แม่เหล็กที่มีคุณภาพไม่สูงมาก

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวรที่ใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้า ISCAD V50 ดังรูปที่ 3.11 ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวรที่ใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้า SRI-200 series และ SRI-300 series ดังรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ รวมทั้งคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวรที่ใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้า ดังตารางที่ 3.5 (ข้อมูลอ้างอิงหัวข้อที่ 3.2.1-3.2.5 ของฤเชาว์ ภูประดับ ศิลป์, 2022)



รูปที่ 3.11 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร ISCAD V50



รูปที่ 3.12 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร SRI-200 series



รูปที่ 3.13 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร SRI-300 series

ตารางที่ 3.5 คุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสรีลักแตนซ์แบบใช้แม่เหล็กถาวร

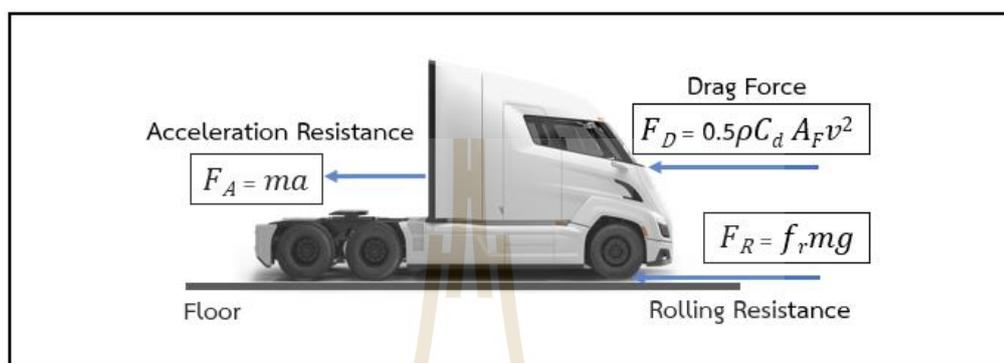
พารามิเตอร์ (Parameter)	ISCAD V50	SRI-200 series	SRI-300 series
Voltage Range (V)	48	48-144	48-144
Peak Torque (Nm)	210	100-250	300-700
Continuous Power (kW)	50	6-20	20-60
Peak Power (kW)	80	14-70	30-70
Rated Speed (rpm)	4,350	9,000	6,000

3.2.6 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

สำหรับการออกแบบหาขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้าจำเป็นอย่างมากที่ต้องศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบในครั้งนี้ สิ่งที่ต้องศึกษาเพื่อทำความเข้าใจ คือ การหาแรงฉุดลากของตัวรถในกรณีมีทางชันและไม่มีทางชัน โดยศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในกรณีของการคำนวณหาแรงฉุดลากของตัวรถแบบมีทางชันและไม่มีทางชัน นั้นหมายความว่ารถจะต้องวิ่งไต่ทางชัน โดยที่พื้นจะต้องทำมุมมากกว่า 0° หรือ 0 องศา กรณีนี้แสดงตัวอย่างมุม 5° หรือ 5 องศา ในกรณีมีทางชัน และรถจะต้องวิ่งในทางเรียบ โดยที่พื้นจะต้องทำมุมตลอดเส้นทาง 0° หรือ 0 องศา ในกรณีไม่มีทางชัน ดังในรูปที่ 3.14 และเมื่อมองเห็นภาพเพื่อเป็นแนวทางทำความเข้าใจในกรณีของพื้นที่ใช้ในการเดินรถของทั้งสองแบบ คือ แบบไม่มีทางชันและแบบมีทางชัน ในกรณีนี้จึงได้สรุปรูปแบบของการคำนวณหาแรงฉุดลากของตัวรถแบบไม่มีทางชันเท่านั้น ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 พิจารณากรณีไม่มีทางชันและมีทางชัน



รูปที่ 3.15 การคำนวณหาแรงฉุดลากของตัวรถแบบไม่มีทางชัน

การออกแบบหาขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีกฎข้อที่สองของนิวตัน เริ่มต้นจากการหาแรงฉุดลากของตัวรถเพื่อเป็นแนวทางในการหาขนาดต้นกำลัง ดังรูปที่ 3.15 เมื่อรถเคลื่อนที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้น จากกฎข้อที่สองของนิวตันเมื่อมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นผลลัพธ์ของแรงทั้งหมด คือ F_T ที่สามารถทำได้ ดังสมการที่ 3.1 ได้แก่ F_R คือ แรงเสียดทานล้อ (Rolling Resistance) F_D คือ แรงต้านอากาศ (Drag Force) และ F_A คือ แรงต้านพื้นตัวของมวลในขณะเร่งความเร็ว (Acceleration Resistance) แทนค่าสมการของแรงต่าง ๆ ดังสมการที่ 3.2 (Y. Cheng และคณะ, 2005)

$$F_T = F_A + F_R + F_D \quad (3.1)$$

$$F_T = ma + f_r mg + 0.5\rho C_d A_F v^2 \quad (3.2)$$

โดยที่	m	คือ น้ำหนักตัวรถรวมบรรทุกทุกโหลต (kg)
	a	คือ อัตราเร่งของรถ (m/s^2)
	g	คือ อัตราเร่งโน้มถ่วง (m/s^2)
	f_r	คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานล้อกับพื้น
	C_d	คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ
	A_F	คือ พื้นที่หน้าตัดหน้าตัวรถ (m^2)
	v	คือ ความเร็วรถ (m/s)
	ρ	คือ ความหนาแน่นอากาศ (kg/m^3)

จากสมการที่ 3.2 เนื่องด้วยมีตัวแปรพารามิเตอร์อัตราเร่งและความเร็วรถที่ใช้ในการคำนวณหาแรงฉุดลากของตัวรถ ซึ่งการคำนวณหาอัตราเร่งและความเร็วรถพิจารณาการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง หรือ แนวราบ คือ รถวิ่งไปข้างหน้าในแนวเส้นตรงโดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุเทียบกับเวลาที่ใช้ และเมื่อรถมีการเลี้ยวกลับทิศทางทำให้ทิศทางในการเคลื่อนที่ตรงข้ามกัน ดังนั้นการคำนวณหาอัตราเร่ง (a) ใช้การแทนค่ากลับในตัวแปรที่หาระยะทาง ดังสมการที่ 3.3 เมื่อคำนวณหาอัตราเสร็จแล้วใช้เป็นตัวแปรเพื่อคำนวณหาความเร็วรถ (v) ดังสมการที่ 3.4 (จิราภรณ์ ปุณยวัจน์พรกุล, 2561)

$$s = ut + 0.5at^2 \quad (3.3)$$

$$v = u + at \quad (3.4)$$

โดยที่ u คือ ความเร็วต้น (m/s)
 t คือ เวลา (s)
 s คือ ระยะทาง (m)

ตารางที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นอากาศกับอุณหภูมิที่ 1 atm หรือ 101.325 kPa

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m ³)
35	1.145
30	1.164
25	1.183
20	1.204
15	1.225
10	1.246
5	1.269
0	1.292
-5	1.316
-10	1.341
-15	1.367
-20	1.394
-25	1.422

(หมายเหตุ : ตารางที่ 3.6 อ้างอิงข้อมูลจาก https://hmong.in.th/wiki/Density_of_air)

นอกจากนี้ยังมีตัวพารามิเตอร์ที่ยังใช้ในการคำนวณหาแรงฉุดลาก คือ ความหนาแน่นอากาศ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานล้อกับพื้น ซึ่งตัวแปรพารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและลักษณะการใช้งาน ดังนั้นการหาความหนาแน่นอากาศโดยมีอุณหภูมิเป็นตัวกำหนดและอาศัยข้อมูลในการกำหนดค่าความหนาแน่นอากาศ ดังตารางที่ 3.6 ซึ่งเห็นได้ว่ายังมีอุณหภูมิที่ต่ำลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งอุณหภูมิติดลบทำให้มีค่าความหนาแน่นอากาศเพิ่มมากขึ้น ต่อมาการกำหนดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานล้อกับพื้น ซึ่งแน่นอนว่าขึ้นอยู่กับปัจจัยของพื้นถนนและชนิดของล้อรถที่วิ่งบนพื้นถนน สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณกำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานล้อกับพื้น ดังตารางที่ 3.7 และในส่วนของ การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศอาศัยข้อมูลในการกำหนดค่าของรถแต่ละชนิด ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานล้อกับพื้น

Rolling Resistance Coefficient (f_r)	Detail
0.001 - 0.002	Railroad Steel Wheels on Steel Rails
0.001	Bicycle Tire on Wooden Track
0.002 - 0.005	Low Resistance Tubeless Tires
0.002	Bicycle Tire on Concrete
0.004	Bicycle Tire on Asphalt Road
0.005	Dirty Tram Rails
0.006 - 0.01	Truck Tire on Asphalt
0.008	Bicycle Tire on Rough Paved Road
0.01 - 0.015	Ordinary Car Tires on Concrete, New Asphalt, Cobbles Small New
0.02	Car Tires on Tar or Asphalt
0.02	Car Tires on Gravel-Rolled New
0.03	Car Tires on Cobbles-Large Worn
0.04 - 0.08	Car Tire on Solid Sand, Gravel Loose Worn, Soil Medium Hard
0.2 - 0.4	Car Tire on Loose Sand

(หมายเหตุ : ตารางที่ 3.8 อ้างอิงข้อมูลจาก https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html)

ตารางที่ 3.8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรถแต่ละชนิด

Type of Bodt	Reference Area	C_d
Six-Car Passenger Train 	Front Area	1.8
Tractor-Trailer Truck 	Front Area	0.96
SUV 	Front Area	0.8
Sedan 	Front Area	0.45
Car (Minimum) 	Front Area	0.15

(หมายเหตุ : ตารางที่ 3.6 อ้างอิงข้อมูลจาก E. Aziz และคณะ, 2008)

นอกจากนี้เมื่อทราบแรงฉุดลากที่ได้จากการคำนวณยังต้องคำนึงถึงแรงที่ทำให้มอเตอร์หมุนในอุตสาหกรรมยานยนต์ เรียกว่า แรงเพลลาขับ หรือ แรงบิด เมื่อเกิดแรงบิดที่เพลลาขับ หมุนทำให้รถเคลื่อนที่ และเกิดกำลังงานที่ใช้ต่อเนื่อง เรียกว่า แรงม้า หรือ กำลังขับของมอเตอร์ ดังนั้นใช้ผลลัพธ์ของแรงทั้งหมด จากสมการที่ 3.2 คำนวณหาแรงบิด (T) ดังสมการที่ 3.5 จากนั้นใช้แรงบิดคำนวณหากำลังขับของมอเตอร์ (P_m) ดังสมการที่ 3.6 ซึ่งกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์แปรผันตามความเร็วเชิงมุม (ω) โดยใช้สูตรการคำนวณ ดังสมการที่ 3.7

$$T = F_T \times r \times R_f \quad (3.5)$$

$$P_m = T \times \omega \quad (3.6)$$

$$\omega = v/r \quad (3.7)$$

โดยที่ r คือ รัศมีล้อรถ (m)

R_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเพลากับลูกปืน

3.3 แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

เนื่องจากยานยนต์ไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบร้อยเปอร์เซ็นต์ ทำให้หัวใจหลักสำคัญของยานยนต์ไฟฟ้าคงเป็นอย่างอื่นไปไม่ได้ นอกจากการใช้แบตเตอรี่ (Battery) เป็นแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อน ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นขุมพลังในการจ่ายไฟฟ้าให้ระบบ โดยยานยนต์ไฟฟ้าสามารถทำงานและวิ่งต่อไปได้อย่างต่อเนื่องไม่มีสะดุด แต่มีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบในยานยนต์ไฟฟ้าขัดข้องในบางช่วงจังหวะคงเป็นเพราะแหล่งจ่ายพลังงานการวิ่งอันทำให้เกิดระบบในยานยนต์ไฟฟ้าขัดข้องในบางช่วงจังหวะคงเป็นเพราะแหล่งจ่ายพลังงาน

นั่นคือ แบตเตอรี่ที่ใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าที่เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญ ดังนั้นจำเป็นอย่างมากที่ต้องศึกษาเกี่ยวกับชนิดของแบตเตอรี่ที่นำมาใช้พัฒนายานยนต์ไฟฟ้า อันดับแรก คือ ต้องเข้าใจแบตเตอรี่ที่ใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าทุกชนิดที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้ได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากแบตเตอรี่แต่ละชนิดมีคุณสมบัติจำเพาะที่แตกต่างกันออกไป และแน่นอนว่าแบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าแตกต่างจากแบตเตอรี่ในรถยนต์เครื่องสันดาปอย่างสิ้นเชิง สำหรับการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ มีรายละเอียดปลีกย่อยของแต่ละชนิดดังนี้

3.3.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead Acid Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่ถูกใช้งานมายาวนาน โดยนับตั้งแต่ยุครถยนต์เครื่องสันดาปที่ใช้ น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งใช้แบตเตอรี่ในการสตาร์ทเครื่องยนต์ก่อนวิ่งใช้งาน รวมทั้งเป็นแหล่งสำรองไฟจ่ายกระแสไฟให้กับระบบควบคุมในตัวรถ เช่น แอร์ วิทยุ หรือ ไฟส่องสว่างห้องโดยสาร เป็นต้น ถัดมาในยุคของยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ชนิดนี้ ยังคงทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อสตาร์ทมอเตอร์ขับเคลื่อน ซึ่งแบตเตอรี่ที่ถูกนำมาใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ แบตเตอรี่น้ำ แบตเตอรี่แห้ง และแบตเตอรี่กึ่งแห้ง โดยมีข้อดี คือ มีต้นทุนราคาถูก มีความปลอดภัยสูง พกพา และยังมีประสิทธิภาพในการจ่ายกระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูง นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ แบตเตอรี่ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้เป็นแบตเตอรี่สำรองไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้าเท่านั้น ไม่เหมาะในการนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักของยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งหมายความว่าแบตเตอรี่มีอายุการใช้งานสั้นและมีความจุที่ต่ำ และมีประสิทธิภาพการใช้งานลดลงในสภาวะอุณหภูมิต่ำ จึงไม่เหมาะนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักของยานยนต์ไฟฟ้า รวมทั้งต้องมีการบำรุงรักษา (Maintenance) ที่ต่อเนื่องเป็นระยะเพื่อตรวจเช็คคอนข้างจุกจิก หากนำมาใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายภายในระบบและมีค่าใช้จ่ายสูงในการบำรุงรักษาในระยะยาว สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด ได้ถูกนำไปใช้กับรถยนต์ไฮบริด (Hybrid Electric Vehicle) หรือ รถยนต์ไฮบริดที่ชาร์จแบบยานยนต์ไฟฟ้า (Plug-In Hybrid Electric Vehicle) ในมีจำหน่ายท้องตลาดทุกรุ่น รวมไปถึงยานยนต์ไฟฟ้าแบบร้อยเปอร์เซ็นต์ หรือรถยนต์ไฟฟ้า (Battery Electric Vehicle) มียี่ห้อรถตัวอย่างที่ถูกใช้งาน คือ Tesla Model 3 ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 รถยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรด คือ Tesla Model 3

3.3.2 แบตเตอรี่ชนิดนิเกิลเมทัลไฮไดรด์

การพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนิเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Nickel-Metal Hydride Battery) ถูกคิดค้นในช่วงทศวรรษที่ 70 ซึ่งได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ช่วงต้นศตวรรษที่ 20 หรือ นับตั้งแต่ช่วง ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา ที่ใช้กับรถยนต์ไฮบริดและรถยนต์ไฮบริดที่ชาร์จแบบยานยนต์ไฟฟ้า โดยแบตเตอรี่ชนิดนี้เหมาะสำหรับรถยนต์ที่มีการใช้แหล่งจ่ายพลังงานทั้งสองแบบ คือ แบบพลังงานไฟฟ้าและแบบพลังงานที่ใช้เชื้อเพลิงน้ำมัน มีข้อดี คือ มีอายุการใช้งานที่นานกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-Ion Battery) และแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด รวมทั้งมีความทนทานในการใช้งานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศได้ดีกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อจำกัดของการนำไปใช้งาน เนื่องด้วยมีต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่ผลิตจากวัสดุโลหะจำพวกไทเทเนียม (Titanium) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาแพงพอสมควร แต่เมื่อเทียบน้ำหนัก ๆ ของแบตเตอรี่ พบว่ามีน้ำหนักใกล้เคียงกับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและความสามารถในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้น้อยกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน รวมทั้งมีอัตราการคายประจุสูง (ถึงแม้ไม่ได้มีการใช้งาน) และยังมีการปล่อยพลังงานความร้อนที่สูงด้วยเช่นกันในขณะที่ใช้งานแบตเตอรี่ สำหรับแบตเตอรี่ชนิดนิเกิลเมทัลไฮไดรด์นิยมนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ไฮบริด ยกตัวอย่าง Toyota Prius 2004 ดังรูปที่ 3.17 และยังถูกใช้กับรถยนต์อื่น เช่น Toyota Corolla Hybrid, Toyota Camry Hybrid และ Honda Accord Hybrid เป็นต้น



รูปที่ 3.17 รถยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดนิเกิลเมทัลไฮไดรด์ คือ Toyota Prius 2004

3.3.3 แบตเตอรี่ชนิดนิเกิลแคดเมียม

สำหรับแบตเตอรี่ชนิดนิเกิลแคดเมียม (Nickel-Cadmium Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ไฟฟ้าในช่วงศตวรรษที่ 90 โดยแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถนำมาอัดประจุไฟฟ้าซ้ำในการใช้งานใหม่ได้เมื่อมีการใช้งานในการคายประจุแบตเตอรี่จนหมดเกลี้ยง ซึ่ง

ส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้กับอุปกรณ์หลายชนิด เช่น โทรศัพท์มือถือ อุปกรณ์ไฟฟ้า และถ่านชาร์จแบบก๊อ เป็นต้น รวมทั้งสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้มากพอสมควรและมีรอบการชาร์จ (Charges Cycle) อยู่ที่ ประมาณ 500-1,000 ครั้ง นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อเสีย คือ เกิดปัญหาในเรื่องผลกระทบของ ชุดควบคุมการคายประจุไฟฟ้าซึ่งมีผลกับหน่วยความจำ (Memory Effect) ที่ทำให้ต้องตรวจเช็ค การใช้พลังงานหรือ คายประจุไฟฟ้าให้หมดก่อน จึงสามารถอัดประจุไฟฟ้าด้วยการชาร์จใหม่ได้ ใน ปัจจุบันแบตเตอรี่ชนิดนี้เกิดแคดเมียมถูกจัดอยู่ในประเภทแบตเตอรี่ต้องห้ามผลิตและจำหน่าย เนื่องจากมีผลกระทบร้ายแรงจากสารแคดเมียม (Cadmium) รั่วไหลระหว่างขั้นตอนการผลิตและ การใช้งาน ซึ่งสารแคดเมียมก่อให้เกิดโรคไตได้กับผู้ที่ได้รับในปริมาณที่มากเกินไป จึงถูกห้ามไม่ให้ มีการผลิตเพื่อใช้การยานยนต์ไฟฟ้าตั้งแต่นั้นไป จนกว่าจะมีการพัฒนาเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายและ ส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ในอนาคต ตัวอย่างเซลล์ของแบตเตอรี่ชนิดนี้เกิดแคดเมียม ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 เซลล์ของแบตเตอรี่ชนิดนิเกิลแคดเมียม

3.3.4 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

ที่มาของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนได้ถูกคิดค้นเริ่มพัฒนาในช่วงต้นศตวรรษที่ 90 ซึ่งเป็นเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่นิยมที่สุดในปัจจุบันนี้ โดยถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าและ เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ เช่น โทรศัพท์มือถือ กล้องดิจิทัล คอมพิวเตอร์และโน้ตบุ๊ก และยานยนต์ ไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถอัดประจุไฟฟ้าได้มากและยังมีอายุการใช้งานนานกว่าแบตเตอรี่ ชนิดอื่น ๆ สำหรับการอัดประจุไฟฟ้าด้วยเครื่องชาร์จยังสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และในปัจจุบัน มีการรองรับเทคโนโลยีชาร์จเร็ว (Fast Charge) เป็นที่เรียบร้อยแล้ว รวมทั้งยังมีระบบการจ่าย กระแสไฟฟ้าไฟได้เสถียรและคงที่ ส่งผลให้ระบบยานยนต์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพการใช้งานมากขึ้น

นอกจากนี้ข้อดีของแบตเตอรี่ชนิดนี้ คือ สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ (Reusable) และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก ในการชาร์จแบตเตอรี่ชนิดนี้ถึงแม้ชาร์จไม่เต็มแบบร้อยเปอร์เซ็นต์ ยังไม่ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการใช้งานซึ่งมีผลกับหน่วยความจำ เนื่องจากมีระบบควบคุมที่เรียกว่า ระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System) ส่งผลให้มีรอบการชาร์จอยู่ที่ประมาณ 500-10,000 ครั้ง ถ้าพูดถึงข้อจำกัดของแบตเตอรี่ชนิดนี้ คือ มีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ และประสิทธิภาพการใช้งานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่ใช้งาน ในขณะที่นั้นไม่ว่ากรณีอุณหภูมิต่ำเกินไป หรือ สูงเกินไป โดยช่วงอุณหภูมิที่สามารถทำงานได้เป็นปกติ และมีประสิทธิภาพมากที่สุดอยู่ในช่วง 20°C (องศาเซลเซียส) ถึง 60°C ยกตัวอย่าง เช่น หากอุณหภูมิลดลงจาก 25°C เหลือเพียง -15°C ความสามารถในการอัดประจุกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่อาจลดลงได้ถึง 23% ส่งผลให้แบตเตอรี่มีโอกาสสุกไหม้ หรือ ระเบิดได้ และถ้าหากหากอุณหภูมิสูงเกิน 500°C เนื่องจากแบตเตอรี่ได้รับความเสียหายจนเกิดความร้อนสะสม จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ความร้อนเกิน (Thermal Runaway) อย่างไรก็ตาม ผู้ผลิตรถยนต์ต้องติดตั้งระบบหล่อเย็น (Liquid Cooling) เพื่อช่วยลดความร้อนให้กับแบตเตอรี่เพื่อการใช้งานที่ต่อเนื่องและยาวนาน สำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้กับรถยนต์ Porsche Taycan ดังรูปที่ 3.19 และยังถูกใช้กับรถยนต์อื่น เช่น TESLA, ORA Good Cat, Toyota bZ4X, Nissan Leaf, MG ZS EV, MG EP, Hyundai IONIQ 5, Mini Cooper SE, BMW i3, BMW i4, BMW iX, BMW iX3 และ Audi e-tron เป็นต้น



รูปที่ 3.19 รถยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน คือ Porsche Taycan

3.3.5 แบตเตอรี่ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า

สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Supercapacitors) เป็นแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพการกักเก็บไฟฟ้าได้สูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอิเล็กโทรไลต์ มีความทนทานและอายุการใช้งานยาวนาน สามารถอัดประจุไฟฟ้าด้วยเครื่องชาร์จได้เร็วกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นที่ทดสอบเร็วกว่าถึง 1,000 เท่า และมีรอบการชาร์จที่มีประสิทธิภาพสูงมากพอสมควรอยู่ที่ประมาณ 100,000-1,000,000 ครั้ง นอกจากนี้ข้อจำกัดของแบตเตอรี่ชนิดนี้ คือ การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบยานยนต์ไฟฟ้า

ไม่เสถียร ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าลดลงเมื่อใช้งานต่อเนื่องไปนาน ๆ รวมทั้งมีการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนที่มีขนาดเดียวกัน เมื่อไม่มีการใช้งานแบตเตอรี่ในระยะเวลา 10-20 % ต่อ วัน การคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดนี้จะค่อย ๆ ลดลง จึงไม่เหมาะกับการใช้เป็นพลังงานหลัก สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าถูกนำมาใช้กับรถยนต์ Lamborghini Sian FKP 37 ดังรูปที่ 3.20 ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีการใช้แบตเตอรี่ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักในยานยนต์ไฟฟ้า แต่ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานเสริมเพื่อช่วยรีดอัตราเร่งตอนออกสตาร์ท หรือ ตอนเลี้ยวโค้งแบบรวดเร็ว และยังถูกใช้กับรถยี่ห้ออื่น คือ Lamborghini Aventador เป็นต้น



รูปที่ 3.20 รถยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า คือ Lamborghini Sian FKP 37

3.3.6 แบตเตอรี่ชนิดโซลิตสเตต

เป็นที่น่าสนใจเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้าที่มีการนำแบตเตอรี่ชนิดโซลิตสเตต (Solid State Battery) ที่ถูกคิดค้นวิจัยและพัฒนาตั้งแต่ต้นทศวรรษ 90 หลังจากนั้นมีการวิจัยเกี่ยวกับแบตเตอรี่ชนิดนี้ในช่วงปี ค.ศ. 2015 ปรากฏอีกครั้งจากคณะที่วิจัยในมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียเออร์ไวน์ คุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ชนิดแข็ง ซึ่งเป็นการพัฒนาที่เปลี่ยนอิเล็กโทรไลต์เหลวให้กลายเป็นอิเล็กโทรไลต์แข็งแทน มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานประสิทธิภาพสูงกว่าแบตเตอรี่ทุกชนิด และมีเปอร์เซ็นต์สูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนถึง 10 เท่า สำหรับการเกิดลูกใหม่ของแบตเตอรี่ชนิดนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากมีความสามารถในการจุดติดไฟต่ำที่ไม่มีอิเล็กโทรไลต์เป็นของเหลวซึ่งเป็นส่วนที่ติดไฟได้ และมีความเสถียรภาพสูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ส่งผลให้การชาร์จมีประสิทธิภาพการชาร์จได้เร็วขึ้น ในปัจจุบันได้เริ่มนำมาใช้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องกระตุ้นหัวใจ และนาฬิกาอัจฉริยะ (Smart Watch) เป็นต้น นอกจากนี้ข้อจำกัดของแบตเตอรี่

ชนิดนี้ คือ ในการผลิตมีต้นทุนที่สูงกว่าการผลิตแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนถึง 8 เท่า และในอนาคต ต้นทุนการผลิตอาจมีแนวโน้มลดลง หากมีผู้ผลิตแบตเตอรี่ชนิดนี้พัฒนาให้รองรับความต้องการ ของการใช้งานตามท้องตลาดมากขึ้นในอนาคต รวมทั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้ทำจากสสารภายในเซลล์ ที่เป็นของแข็ง เมื่อนำใช้งานจริงกับยานยนต์ไฟฟ้าบนท้องถนนที่มีหลุมขรุขระมาก ๆ อาจเสี่ยงได้รับความเสียหายจากแรงกระแทกและแตกหักได้ง่าย ซึ่งมีการคาดการณ์ว่าภายในปี ค.ศ. 2030 แบตเตอรี่ชนิดนี้จะถูกนำมาใช้งานอย่างจริงจังกับยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต สำหรับแบตเตอรี่ชนิด โซลิตสแตตถูกนำมาใช้กับรถยนต์ Toyota Concept-i Ride ดังรูปที่ 3.21 ในปัจจุบันยังไม่มี การนำแบตเตอรี่ชนิดนี้มาใช้งานจริง แต่ก็มีค่ายรถยนต์บางแบรนด์ที่กำลังวิจัยเทคโนโลยีแบตเตอรี่ชนิดนี้ อยู่ คือ Toyota และ BMW ที่ประกาศออกมาว่าพร้อมทดลองใช้งานแบตเตอรี่ชนิดนี้จริงกับยานยนต์ ไฟฟ้าภายในปี ค.ศ. 2025



รูปที่ 3.21 รถยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดโซลิตสแตต คือ Toyota Concept-i Ride

3.3.7 แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออน

แบตเตอรี่โซเดียมไอออน (Sodium Ion Battery) หรือ นิยมเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า “แบตเกลือ” ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้มีต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนประมาณ 3-4 เท่า เนื่องจากสามารถหาแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบได้ง่ายกว่าชนิดลิเธียม และยังสามารถอัดประจุ ไฟฟ้าได้สูงถึง 100 % ภายในเวลาเพียง 20 นาที รวมทั้งยังมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิ ร้อนสูงและหนาวจัดได้ดีกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน จึงไม่ต้องกังวลในเรื่องความร้อนที่อาจ เกิดขึ้นและส่งผลให้เกิดความเสียหายตามมาในระบบยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ชนิดนี้มีรอบการชาร์จ ประมาณ 8,000-10,000 ครั้ง นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการกักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพต่ำ

กว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ทำให้ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังวิ่งได้แค่นระยะทางที่สั้น รวมทั้งมีน้ำหนักมากกว่ายานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมอีกด้วยที่ขนาดแบตเตอรี่เท่ากัน และมีตัวอย่างรถที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมไอออนในปี ค.ศ. 2023 คือ BYD รุ่น Seagull ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 รถยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่โซเดียมไอออน คือ BYD รุ่น Seagull
(ที่มา: ข้อมูลอ้างอิงหัวข้อที่ 3.3.1-3.3.1 <https://www.laminafilms.com/th/article/EV-car-battery>)

3.3.8 การคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

การออกแบบหาขนาดแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าสามารถใช้กำลังขับของมอเตอร์ ดังสมการที่ 3.6 เพื่อนำมาวิเคราะห์ห้อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่แปรผันตามระยะทางและเวลา ทำให้มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งในกรณีวิ่งเดินทางและวิ่งถอยหลัง E_{FT} ดังสมการที่ 3.8 ซึ่งการคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดเส้นทางที่รถวิ่ง E_{FT} ดังสมการที่ 3.9 โดยใช้ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถ 4 ช่วง ในกรณีวิ่งเดินทาง ได้แก่ E_{F1} ช่วงเร่งออกตัว (Acceleration) E_{F2} ช่วงความเร็วคงที่ (Constant Speed) E_{F3} ช่วงปล่อยไหล (Coasting) และ E_{F4} ช่วงเบรก (Braking) ดังรูปที่ 3.23 ในทางกลับกันเมื่อรถมีการวิ่งถอยหลังลักษณะการเคลื่อนที่ของรถ 4 ช่วง ในกรณีวิ่งถอยหลัง ได้แก่ E_{R1} ช่วงเร่งออกตัว E_{R2} ช่วงความเร็วคงที่ E_{R3} ช่วงปล่อยไหล และ E_{R4} ช่วงเบรก ซึ่งสามารถใช้ลักษณะการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 3.23 ได้เช่นกัน โดยในการคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดเส้นทางที่รถวิ่ง E_{RT} ดังสมการที่ 3.10 รวมทั้งคำนวณหาการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงพิจารณาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของระยะทางทั้งหมดรวมทุกช่วงในกรณีวิ่งเดินทาง E_{Fi} และวิ่งถอยหลัง E_{Ri} ดังสมการที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 4 นอกจากนี้ทั้งการคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่เพื่อให้รองรับการใช้งานต่อเนื่องของการวิ่งทำให้อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าแปรผันตามจำนวนรอบ E_{batt} ดังสมการที่ 3.13 (Z. Yu และคณะ, 2009)

$$E_T = E_{FT} + E_{RT} \quad (3.8)$$

$$E_{FT} = E_{F1} + E_{F2} + E_{F3} + E_{F4} \quad (3.9)$$

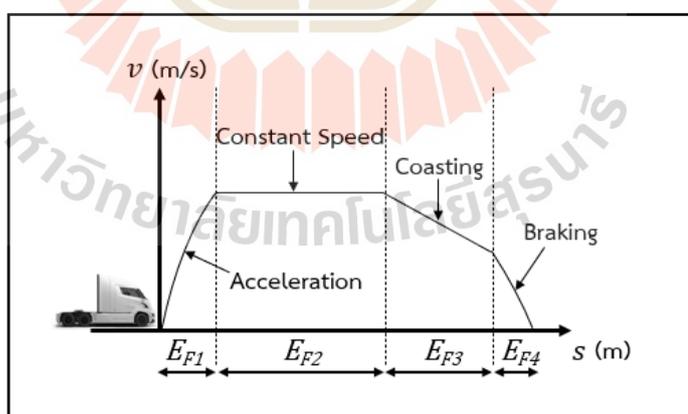
$$E_{RT} = E_{R1} + E_{R2} + E_{R3} + E_{R4} \quad (3.10)$$

$$E_{Fi} = (P_{Fi}/\eta_m \eta_{inv}) \times (S_{Fi}/3,600 DoD_{batt} v_{Fi}) \quad (3.11)$$

$$E_{Ri} = (P_{Ri}/\eta_m \eta_{inv}) \times (S_{Ri}/3,600 DoD_{batt} v_{Ri}) \quad (3.12)$$

$$E_{batt} = E_T \times N \quad (3.13)$$

โดยที่	P_{Fi}	คือ กำลังขับของมอเตอร์ (kW) ช่วงที่ i กรณีวิ่งเดินหน้า
	P_{Ri}	คือ กำลังขับของมอเตอร์ (kW) ช่วงที่ i กรณีวิ่งถอยหลัง
	S_{Fi}	คือ ระยะทาง (m) ช่วงที่ i กรณีวิ่งเดินหน้า
	S_{Ri}	คือ ระยะทาง (m) ช่วงที่ i กรณีวิ่งถอยหลัง
	v_{Fi}	คือ ความเร็ว (m/s) ช่วงที่ i กรณีวิ่งเดินหน้า
	v_{Ri}	คือ ความเร็ว (m/s) ช่วงที่ i กรณีวิ่งถอยหลัง
	η_m	คือ ประสิทธิภาพมอเตอร์
	η_{inv}	คือ ประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์
	DoD_{batt}	คือ ประสิทธิภาพการคายประจุของแบตเตอรี่
	N	คือ จำนวนรอบในการวิ่งรถ

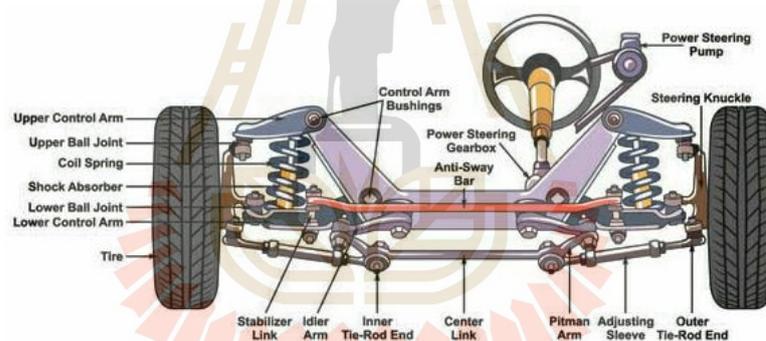


รูปที่ 3.23 ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถในแต่ละช่วง

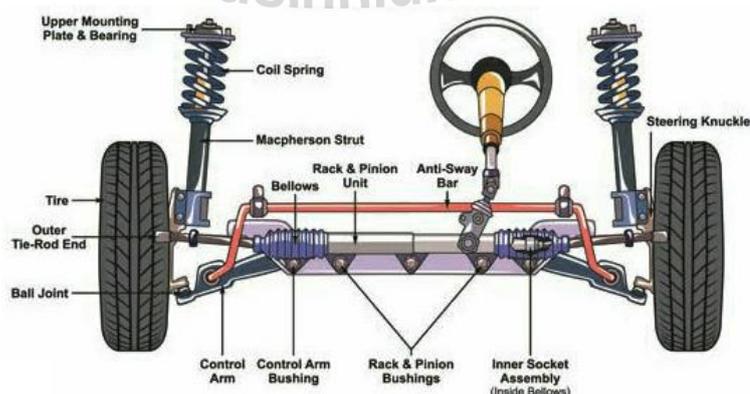
3.4 ระบบบังคับเลี้ยวของยานยนต์

การพัฒนาาระบบที่สามารถใช้ควบคุมการเลี้ยวของยานยนต์ผ่านระบบบังคับเลี้ยว (Steering System) ของมนุษย์โดยตรง เพื่อให้ล้อคู่หน้าทั้ง 2 ล้อ (Wheel) เกิดการหมุนให้เลี้ยวตามทิศทาง

ที่ต้องการ ได้แก่ การบังคับเลี้ยวซ้ายและเลี้ยวขวา ในการบังคับเลี้ยวที่ใช้ชุดเฟืองทด หรือกระปุกเกียร์ (Gearbox Steering) ที่อยู่ระหว่างแกนที่เชื่อมต่อกับพวงมาลัย (Wheel Steering) กับแกนส่งกำลัง เรียกว่า คอพวงมาลัย (Column Steering) ซึ่งช่วยในเรื่องของการผ่อนแรงจากผู้บังคับการเลี้ยว ทั้งนี้ เมื่อออกแรงหมุนที่พวงมาลัยทำให้เกิดแรงส่งกำลังไปยังกระปุกเกียร์ และส่งต่อไปที่แกนยึดกับล้อคู่หน้าทำให้ล้อหมุนตามทิศทางที่ต้องการการ สำหรับระบบบังคับเลี้ยวมีอยู่ 2 แบบ แบบแรก คือ ระบบพวงมาลัยแบบกระปุก (Linkage Steering) ซึ่งเป็นระบบบังคับเลี้ยวที่ใช้การส่งกำลังผ่านคันชักคันที่เชื่อมต่อระหว่างล้อคู่หน้า โดยส่งกำลังผ่านจุดเชื่อมต่อที่ใช้พิทแมนอาร์ม (Pitman-Arm) หรือภาษาช่างเรียกว่า “ขาไก่” เมื่อได้รับแรงบิดจากพวงมาลัยทำให้มีแรงส่งในการเปลี่ยนทิศทางมาจากกระปุกพวงมาลัยเพื่อบังคับพิทแมนอาร์มส่งต่อไปยังคันส่งเพื่อบังคับการเลี้ยว ดังรูปที่ 3.24 และแบบที่สองคือ ระบบพวงมาลัยแบบแร็คแอนด์พินเนียน (Rack & Pinion Steering) หรือ เรียกอีกแบบว่า แบบเฟืองสะพาน ซึ่งระบบพวงมาลัยแบบนี้ใช้การหมุนพวงมาลัยผ่านเฟืองขับและเฟืองสะพาน โดยไม่จำเป็นต้องออกแรงในการหมุนพวงมาลัยมาก รูปแบบการทำงานจึงไม่ซับซ้อน ปัจจุบันยานยนต์รุ่นใหม่ ๆ นิยมใช้ระบบแร็คแอนด์พินเนียนจึงเป็นที่มาของระบบพวงมาลัยเพาเวอร์ ดังรูปที่ 3.25 (อ้างอิงจาก <https://www.technicar.com/steering-systems/>)



รูปที่ 3.24 ระบบพวงมาลัยแบบกระปุก

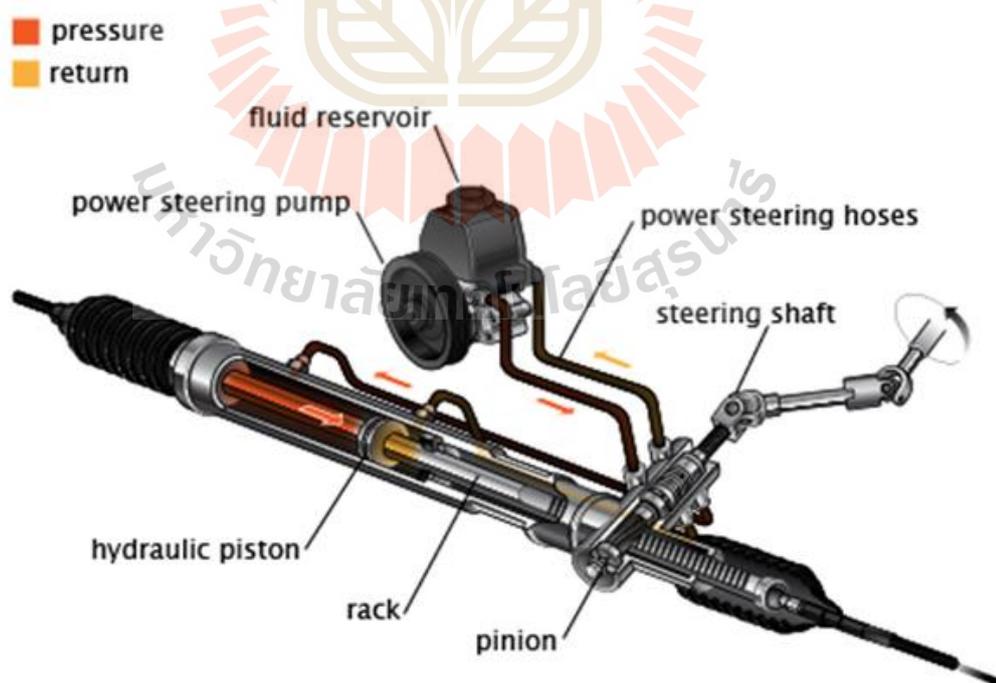


รูปที่ 3.25 ระบบพวงมาลัยแบบแร็คแอนด์พินเนียน

นอกจากนี้ระบบบังคับเลี้ยวของยานยนต์ยังเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้ผู้ขับขี่สามารถควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นไปตามลักษณะของวิธีประยุกต์ใช้งาน จากที่ได้กล่าวถึงระบบบังคับเลี้ยวทั้ง 2 แบบ ในข้างต้น การนำไปประยุกต์ใช้งานที่นิยมใช้กันในยานยนต์ไฟฟ้าถูกจำแนกออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ ระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิก (Hydraulic Power Steering) และระบบบังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้า (Electric Power Steering) โดยมีการอธิบายรายละเอียดย่อยของแต่ละประเภทดังต่อไปนี้ (อ้างอิงจาก <https://rabbitcare.com/how-a-steering-system-works.car-parts.car-guide>)

3.4.1 ระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิก

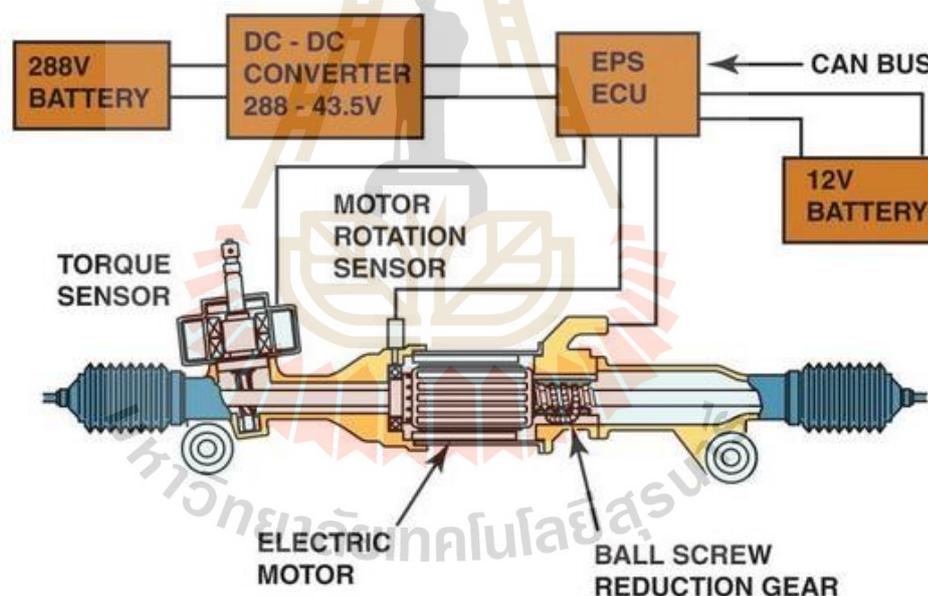
สำหรับระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิก คือ ระบบที่มีรูปแบบการทำงานโดยใช้น้ำมันไฮดรอลิก (Hydraulic Oil) เพื่อช่วยในการบังคับให้เคลื่อนที่ด้วยการหมุนพวงมาลัย ซึ่งมีกระบวนการทำงานโดยที่น้ำมันไฮดรอลิกถูกส่งไปยังกระบอกสูบ (Pump) ที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องยนต์ ถูกกดเข้าสู่กระบอกสูบด้วยแรงดันจากน้ำมันไฮดรอลิก จากนั้นเคลื่อนที่ไปยังกระบอกสูบที่อยู่ฝั่งตรงข้ามกับพวงมาลัย จึงทำให้กระบอกสูบบังคับให้พวงมาลัยหมุนไปในทิศทางที่ต้องการ เมื่อก้าวถึงข้อดีของระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิก อาทิ เช่น เป็นระบบที่มีความเป็นมาตรฐานสูงและมีความทนทานต่อการใช้งานที่ยาวนาน แต่ก็มีข้อเสียอยู่ด้วยเช่นกัน คือ มีความซับซ้อนในการติดตั้งและมีความค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับระบบบังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้า ซึ่งระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิกก็ยังคงถูกยกเลิกใช้ในอนาคตอันใกล้นี้ สำหรับรูปแบบระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิกที่ใช้ในยานยนต์ ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 รูปแบบระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิก

3.4.2 ระบบบังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้า

เมื่อก้าวถึงระบบบังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้าซึ่งในรูปแบบนี้เป็นระบบที่ใช้ไฟฟ้า ในการช่วยเหลือในการบังคับเลี้ยวของยานยนต์ โดยระบบนี้มีมอเตอร์ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับพวงมาลัย ทำให้ผู้ขับขี่สามารถบังคับเลี้ยวได้อย่างง่ายดายและนุ่มนวล เนื่องจากมีระบบไฟฟ้าช่วยในการควบคุมบังคับเลี้ยวที่ใช้โปรโตคอล (Protocol) การสื่อสาร CANbus ผ่าน ECU ซึ่งระบบนี้สามารถปรับความหน่วงของพวงมาลัยเพื่อให้เหมาะสมกับความเร็วของรถในขณะนั้นได้ นอกจากนี้ระบบบังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้ามียกข้อดี คือ ช่วยลดการใช้พลังงานของเครื่องยนต์และลดการสิ้นเปลืองของพวงมาลัยในขณะบังคับเลี้ยวอีกด้วย มากมาย แต่ก็มีข้อเสียอยู่บ้าง เช่น ระบบนี้จะมีความซับซ้อนและมีราคาที่สูงกว่าระบบบังคับเลี้ยวอื่น ๆ และมีข้อเสีย คือ เมื่อเกิดความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีทางไฟฟ้าของระบบบังคับเลี้ยว อาจมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมระบบที่สูงมาก เนื่องจากต้องเปลี่ยนอะไหล่ที่มีราคาแพงกว่าระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิก ซึ่งในอนาคต นวัตกรรมของยานยนต์ที่ต้องพึ่งระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก ดังนั้นระบบบังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้าจึงถูกนิยมนำไปใช้กับยานยนต์ชนิดไฮบริดและฟิวเซลล์ สำหรับรูปแบบระบบบังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้าที่ใช้ในยานยนต์ ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 รูปแบบระบบบังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้า

3.4.3 การคำนวณขนาดมอเตอร์บังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้า

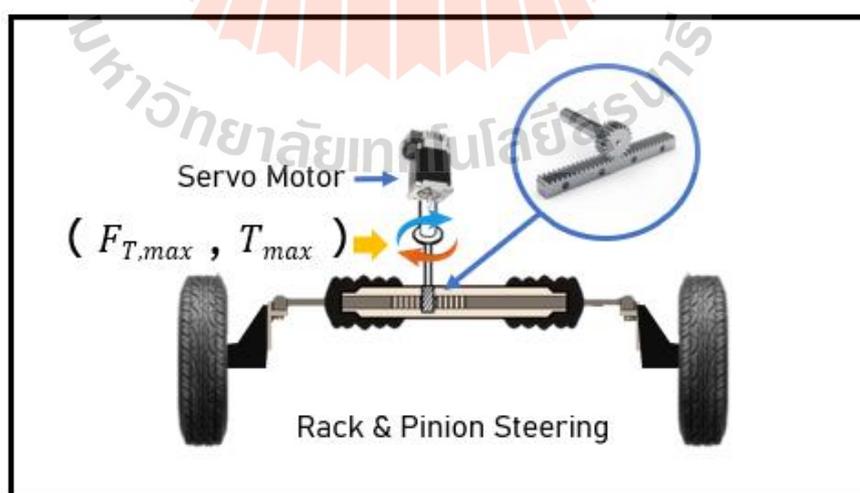
ในการคำนวณหาขนาดมอเตอร์บังคับเลี้ยวด้วยการใช้มอเตอร์ไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการทางารูปแบบบังคับเลี้ยวแบบไฟฟ้าที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4.2 ซึ่งเป็นรูปแบบการบังคับเลี้ยวที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันในการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้า แต่เนื่องด้วยในการออกแบบต้องมีการคำนวณหาขนาดมอเตอร์ก่อนและเกี่ยวข้องกับระบบพวงมาลัยแบบแร็คแอนด์พินเนียนด้วย จึงจำเป็นต้องคำนวณหาแรงส่งกำลังให้กับแร็คแอนด์พินเนียนที่พิจารณาน้ำหนักของยานยนต์ไฟฟ้ารวมทั้ง

น้ำหนักโหลดที่ต้องการบรรทุกในขณะวิ่งขับซี เพื่อให้สามารถบังคับเลี้ยวแทนการหมุนพวงมาลัยซ้ายและขวาได้ รวมทั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาแรงส่งกำลังของแร็คแอนด์พีนเนียน ($F_{T,max}$) มีสมการสำหรับคำนวณ ดังสมการที่ 3.14 จากนั้นใช้ค่าแรงส่งกำลังของแร็คแอนด์พีนเนียนที่คำนวณได้นำมาพิจารณาคำนวณหาค่าแรงบิดสูงสุด (T_{max}) ของมอเตอร์ที่ต้องการใช้บังคับเลี้ยว ดังสมการที่ 3.15 เพื่อใช้เลือกขนาดมอเตอร์บังคับเลี้ยวให้มีความเหมาะสมกับยานยนต์ไฟฟ้าที่ต้องการพัฒนา ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ดังรูปที่ 3.28 เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการควบคุมของการใช้งานได้หลากหลายรูปแบบและมีความแม่นยำสูงในการระบุตำแหน่งรอบของมอเตอร์ จึงเหมาะกับการนำไปใช้งาน อาทิ เช่น หุ่นยนต์ ลิฟต์ หรือ ยานยนต์ เป็นต้น (อ้างอิงจาก https://www.servotak.eu/sites/all/modules/servotak_calculator/doc/help_engineering_calculator_racknpinion.pdf)

$$F_{T,max} = (ma/\eta) + (\mu mg/\eta) \quad (3.14)$$

$$T_{max} = dF_{T,max}/2000 \quad (3.15)$$

โดยที่	m	คือ น้ำหนักลงชุดล้อหน้า หรือ น้ำหนักที่แบกรับของแร็คแอนด์พีนเนียน (kg)
	g	คือ อัตราเร่งโน้มถ่วง (m/s^2)
	μ	คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
	a	คือ อัตราเร่ง (m/s^2)
	r	คือ รัศมีล้อรถ (m)
	d	คือ ระยะ Pinion Pitch (mm)
	η	คือ ประสิทธิภาพของระบบ



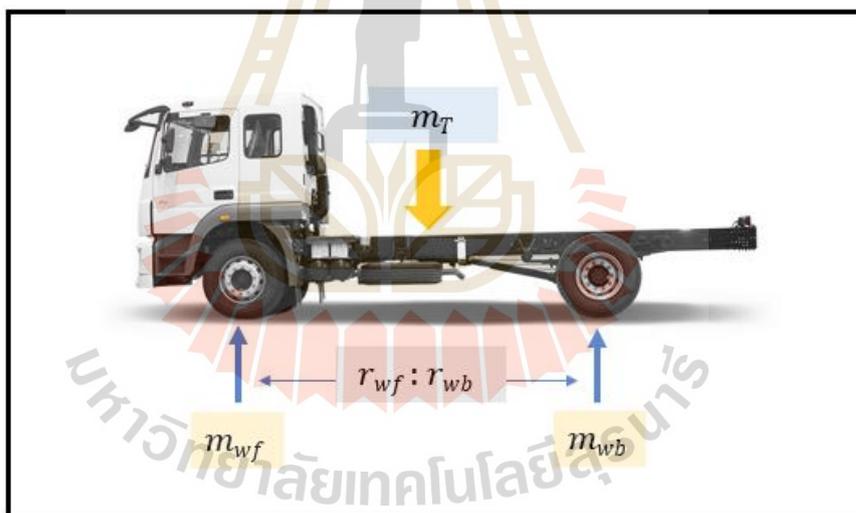
รูปที่ 3.28 รูปแบบระบบบังคับเลี้ยวของแร็คแอนด์พีนเนียนที่ใช้เซอร์โวมอเตอร์

นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์น้ำหนักที่แบกรับของแร็คแอนด์พีนีเยน จากสมการที่ 3.14 ในการออกแบบทางด้านยานยนต์นั้นจำเป็นต้องเข้าใจทฤษฎีการกระจายน้ำหนักที่แบกรับของตัวโครงสร้างรถ ซึ่งน้ำหนักที่กระจายผ่านโครงสร้างรถให้เป็นภาระการแบกรับน้ำหนักของชุดล้อหน้าและชุดล้อหลัง เพื่อให้ทราบถึงน้ำหนักที่ต้องการแบกรับจริง หรือ น้ำหนักที่ต้องการออกแบบในการบรรทุกโหลตหนัก ๆ สำหรับรูปแบบการกระจายน้ำหนัก ดังรูปที่ 3.29 โดยการคำนวณหาน้ำหนักที่กระทำบนชุดล้อหน้า (m_{wf}) ดังสมการที่ 3.16 และชุดล้อหลัง (m_{wb}) ดังสมการที่ 3.17 ตามลำดับ (อ้างอิงจาก http://www.pattayatech.ac.th/files/150511088485246_15110613130529.pdf)

$$m_{wf} = r_{wf} \times m_T \quad (3.16)$$

$$m_{wb} = r_{wb} \times m_T \quad (3.17)$$

โดยที่ m_T คือ น้ำหนักรวมทั้งหมด (kg)
 r_{wf} คือ อัตราส่วนการรองรับน้ำหนักของชุดล้อหน้า
 r_{wb} คือ อัตราส่วนการรองรับน้ำหนักของชุดล้อหลัง



รูปที่ 3.29 การกระจายน้ำหนักที่แบกรับของตัวโครงสร้างรถที่กระทำบนชุดล้อหน้าและชุดล้อหลัง

3.5 ระบบนำทางอัตโนมัติ

หัวใจหลักสำคัญในการขนส่งอัตโนมัติ คือ ระบบนำทางอัตโนมัติ (Automatic Navigation System) ซึ่งในปัจจุบันมีการประยุกต์เทคโนโลยีใช้งานหลากหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของพื้นที่การใช้งาน โดยมีการเปรียบเทียบลักษณะการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ โดยอ้างอิงรูปแบบระบบนำทางอัตโนมัติของเอจิวี (AGV : Automated Guided Vehicle) ที่นิยมนำรูปแบบระบบนำทางอัตโนมัติมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นระบบนำทาง

แบบอัตโนมัติของยานยนต์ไฟฟ้าสมัยใหม่ได้ รวมทั้งเป็นแนวทางในการต่อยอดทางเทคโนโลยีทางด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต โดยมีการเปรียบเทียบลักษณะการใช้งานในรูปแบบระบบนำทางอัตโนมัติต่าง ๆ ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันทั้งหมด 9 รูปแบบ มีรายละเอียดลักษณะการนำทางอัตโนมัติและบ่งบอกถึงข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

3.5.1 การนำทางด้วยแม่เหล็ก

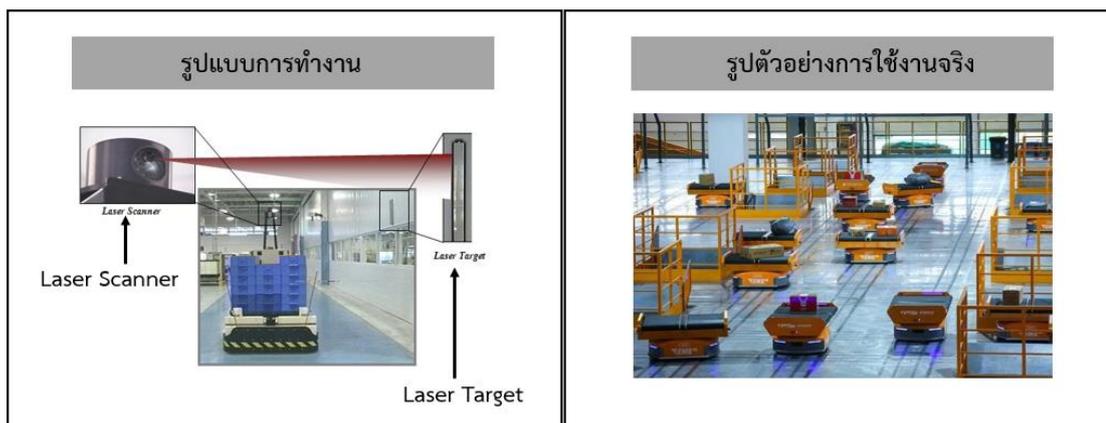
รูปแบบของการนำทางด้วยแม่เหล็ก (Magnet) คือ ใช้แถบแม่เหล็กบนถนนแทนการฝังสายโลหะไว้ใต้พื้นดิน และใช้เซ็นเซอร์อ่านแถบแม่เหล็กตรวจจับที่ติดกับตัวรถนำทางผ่านสัญญาณการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีภาพตัวอย่างของระบบที่ใช้งาน ดังรูปที่ 3.30 สำหรับระบบนี้มีข้อดีคือ สามารถเพิ่มหรือปรับเปลี่ยนเส้นทางใหม่ได้ง่าย แต่ข้อเสีย คือ เมื่อเกิดความเสียหายเนื่องจากมีโลหะและวัตถุแข็งกระแทกที่แถบแม่เหล็ก จึงส่งผลกระทบต่อบางอย่างในระหว่างการนำทางที่ผิดเพี้ยนไปจากปกติ



รูปที่ 3.30 ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วยแม่เหล็ก

3.5.2 การนำทางด้วยเลเซอร์

สำหรับรูปแบบของการนำทางด้วยเลเซอร์จะติดตั้งตัวสะท้อนแสงเลเซอร์ (Laser Target) ที่มีตำแหน่งแม่นยำสูงรอบ ๆ เส้นทาง โดยสามารถกำหนดตำแหน่งและทิศทางของปัจจุบันได้ด้วยการปล่อยลำแสงเลเซอร์สะท้อนจากตัวสะท้อนแสงในเวลาเดียวกันเพื่อให้เซ็นเซอร์สแกน (Laser Scanner) ที่ติดตั้งอยู่ตัวยานยนต์ได้รับรู้ แสดงระบบตัวอย่างที่ใช้งาน ดังรูปที่ 3.31 ซึ่งระบบนี้มีข้อดี คือ การวางตำแหน่งของยานยนต์ที่มีความแม่นยำสูงจึงไม่จำเป็นต้องมีสิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ ในการกำหนดตำแหน่งเพิ่มเติมบนพื้น ส่วนข้อเสีย คือ มีต้นทุนการผลิตสูงและมีข้อกำหนดทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ค่อนข้างมาก รวมทั้งผลกระทบจากแสงแดดจากภายนอกอาคารที่อาจส่งผลกระทบต่อความต้องการในการมองเห็นของเซ็นเซอร์



รูปที่ 3.31 ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วยเลเซอร์

3.5.3 การนำทางด้วย RFID

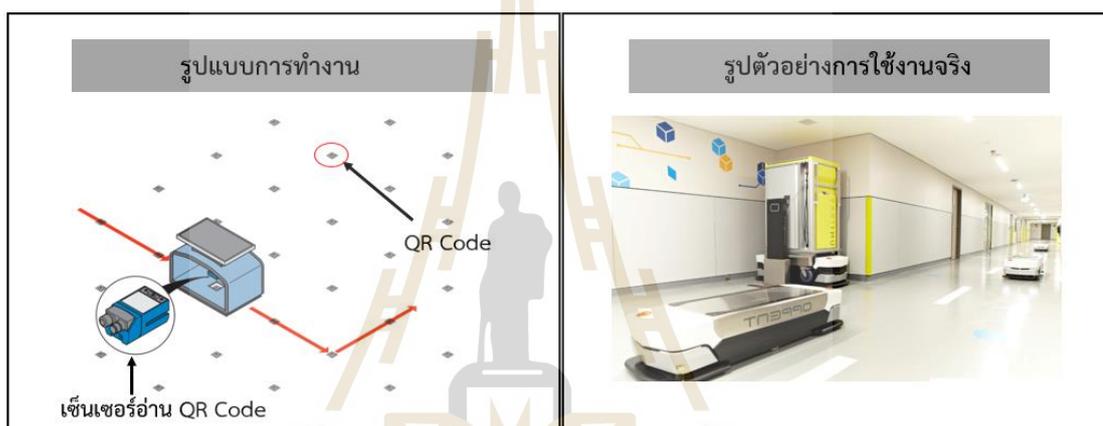
การนำทางของระบบนี้จะติดตั้งระบบเครื่องอ่านบัตร RFID (Radio Frequency Identification) ความถี่ต่ำ และตัวรับสัญญาณระยะไกลที่ส่วนหัวของยานยนต์ จากนั้นติดตั้ง RFID (ตัวรับ) ที่ไหนต่อเพื่อระบุหมายเลข ID ตามความต้องการ ซึ่งเป็นชุดอ่านเพื่อแปลความหมายของ RFID (ตัวส่ง) แต่ละชุด จึงทำให้ยานยนต์สามารถทำงานตามที่ระบุไว้ในหมายเลข ID แสดงระบบตัวอย่างที่ใช้งาน ดังรูปที่ 3.32 สำหรับระบบนี้มีข้อดี คือ มีต้นทุนการผลิตต่ำและสามารถเปลี่ยนเส้นทางได้ตามต้องการที่ง่ายต่อการใช้งาน รวมทั้งสามารถระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ จึงเป็นวิธีการนำทางที่นิยมใช้ในปัจจุบันและดีที่สุดขณะนี้ แต่มีข้อเสีย คือ มีข้อจำกัดทางด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware) สูงในการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์อื่น ๆ



รูปที่ 3.32 ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วย RFID

3.5.4 การนำทางแบบระบุพิกัด

ในการนำทางแบบระบุพิกัด (Direct Coordinate Navigation) ซึ่งเป็นการนำทางที่ใช้อุปกรณ์ประเภทโฟโตอิเล็กทริกชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อกำหนดตำแหน่งและแบ่งพื้นที่ในการขับขี่ของยานยนต์ โดยใช้ QR Code สามารถแบ่งพื้นที่ในการขับออกเป็นส่วนเล็กหลาย ๆ ส่วน และใช้เซ็นเซอร์อ่าน QR Code ตรวจจับทิศทาง การนำทางของยานยนต์ แสดงระบบตัวอย่างที่ใช้งาน ดังรูปที่ 3.33 มีข้อดี คือ สามารถแก้ไขเส้นทางได้ง่ายและไม่มีข้อกำหนดเพิ่มเติมในการนำทางของสภาพแวดล้อมต่าง ๆ แต่มีข้อเสีย คือ การติดตั้งมีความซับซ้อนมากพอสมควร และความแม่นยำในการระบุตำแหน่งมีความผิดพลาดมากจึงไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของเส้นทางที่มีความซับซ้อนได้



รูปที่ 3.33 ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางแบบระบุพิกัด

3.5.5 การนำทางด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

สำหรับการนำทางด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Navigation) เป็นวิธีหนึ่งที่มีการนำทางแบบดั้งเดิมที่นิยมใช้กันในอดีต ซึ่งยังคงมีบางอุตสาหกรรมที่มีการใช้วิธีต่อเนื่องตลอดจนถึงปัจจุบัน โดยการนำทางชนิดนี้เป็นการฝังเส้นโลหะบนเส้นทางการนำทางและโหลดความถี่นำทางบนเส้นลวดโลหะที่ตั้ง แสดงระบบตัวอย่างที่ใช้งาน ดังรูปที่ 3.34 มีข้อดี คือ ใช้งานง่ายมีความสะดวกและคงทน รวมทั้งโลหะที่ฝังบนเส้นนำทางเป็นไปได้ยากที่จะเกิดความเสียหายและมีการควบคุมการสื่อสารได้ง่ายโดยไม่มีสัญญาณรบกวน และยังมีต้นทุนการผลิตต่ำ ส่วนข้อเสีย คือ การเปลี่ยนแปลงเส้นทาง หรือ ขยายเส้นทางเพิ่มเติมทำได้ยาก และมีข้อจำกัดอย่างมากในเส้นทางที่มีความซับซ้อน



รูปที่ 3.34 ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

3.5.6 การนำทางด้วยแสง

การนำทางด้วยแสงเป็นวิธีการนำทางที่ใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์ติดตั้งบนยานยนต์ โดยใช้เซ็นเซอร์อ่านค่าเส้นทางด้วยการทาสี ติดตั้งแถบสี หรือ วางริบบิ้นบนเส้นทาง ซึ่งเป็นรูปแบบการนำทางที่เซ็นเซอร์อ่านสีประมวลผลสัญญาณภาพของสี ในปัจจุบันส่วนใหญ่เริ่มหันมาประยุกต์งานในการตรวจจับแถบริบบิ้นที่ถ่ายโดยใช้กล้อง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัยที่นิยมใช้กันในระบบนำทางอัตโนมัติของยานยนต์ แสดงระบบตัวอย่างที่ใช้งาน ดังรูปที่ 3.35 มีข้อดี คือ รูปแบบการนำทางนี้มีต้นทุนต่ำและมีความยืดหยุ่นในการกำหนดเส้นทางได้ง่ายและสะดวก รวมทั้งการเพิ่มเติมหรือขยายเส้นทาง แต่มีข้อเสีย คือ มีความไวในเรื่องของมลภาวะของสี และริบบิ้นที่มีการสึกหรอหรือเสื่อมสภาพตามการใช้งาน ทำให้เกิดความผิดพลาดในการนำทางเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่มีความสกปรกสูงที่เป็นข้อควรระวัง คำแนะนำ คือ ควรมีการรักษาความสะอาดของพื้นที่นำทางเป็นประจำเพื่อการใช้งานต่อเนื่องในระยะยาว



รูปที่ 3.35 ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วยแสง

3.5.7 การนำทางเฉื่อย

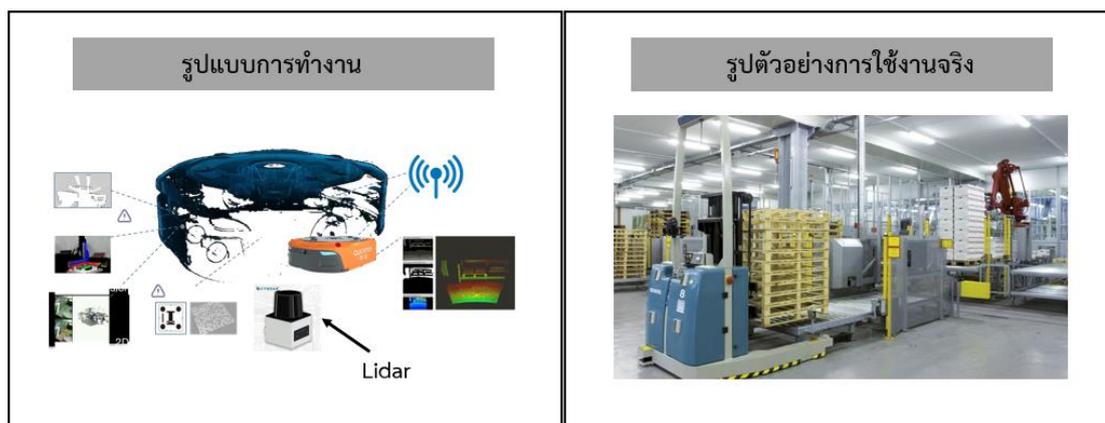
รูปแบบการนำทางเฉื่อยเป็นการติดตั้งไจโรสโคป (Gyroscope) บนยานยนต์ และติดตั้งบล็อกที่ใช้กำหนดตำแหน่งนำทางบนพื้น โดยรูปแบบการทำงานที่สามารถนำทางของยานยนต์ด้วยการกำหนดตำแหน่งไว้ จึงมีทิศทางนำทางโดยการคำนวณสัญญาณเบี่ยงเบนจากไจโรสโคปและรวบรวมสัญญาณบล็อกการกำหนดตำแหน่งบนพื้น แสดงระบบตัวอย่างที่ใช้งาน ดังรูปที่ 3.36 มีข้อดีคือ วิธีนี้เป็นเทคโนโลยีขั้นสูงจึงมีความแม่นยำในการระบุตำแหน่งสูง และมีความยืดหยุ่นที่คงทนรวมทั้งสามารถเชื่อมต่อเข้ากับแอปพลิเคชันต่าง ๆ ได้กว้างขวาง และมีการยอมรับการใช้งานผู้ผลิตในต่างประเทศหลายราย ส่วนข้อเสีย คือ วัสดุต้นทุนการผลิตสูงและความแม่นยำในการใช้งานขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของไจโรสโคป



รูปที่ 3.36 ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางเฉื่อย

3.5.8 การนำทางด้วยการจดจำรูปภาพ

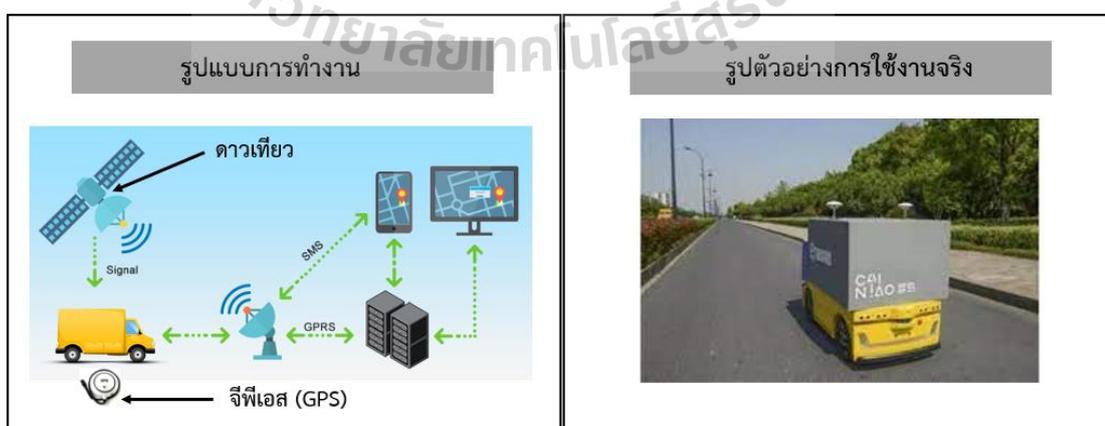
สำหรับการนำทางชนิดนี้ใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์ไลดาร์ (Lidar) ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์นำทางด้วยการจดจำรูปภาพที่ชาญฉลาดที่นิยมใช้กันในหุ่นยนต์และสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับอุตสาหกรรมทางด้านยานยนต์ได้ โดยการใช้ภาพในการรับรู้สภาพแวดล้อมในพื้นที่นำทางของยานยนต์ที่ต้องการขับ ปัจจุบันเริ่มนิยมนำมาใช้พัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติอย่างแพร่หลายและในอนาคตคาดว่าจะเป็นเทคโนโลยีที่ตอบโจทยมากที่สุดในระบบนำทางอัตโนมัติของยานยนต์ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีการนำทางที่มีศักยภาพสูงมากจึงถูกนำมาใช้ในกองทัพในไม่กี่ประเทศ แสดงระบบตัวอย่างที่ใช้งาน ดังรูปที่ 3.37 มีข้อดี คือ สามารถผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีจดจำรูปภาพและเทคโนโลยีการนำทางด้วยเลเซอร์ได้ ทำให้เกิดความความแม่นยำในการนำทางที่สูงพอสมควรและมีความน่าเชื่อถือ รวมทั้งมีความปลอดภัยในการนำทาง ส่วนข้อเสีย คือ วิธีการนี้นำไปประยุกต์ใช้งานเชิงพาณิชย์ได้ค่อนข้างยากเนื่องจากมีต้นทุนการผลิตสูง



รูปที่ 3.37 ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วยการจดจำรูปภาพ

3.5.9 การนำทางด้วยจีพีเอส

ในส่วนของการนำทางแบบจีพีเอส (Global Positioning System : GPS) เป็นเทคโนโลยีที่มีการติดตามและควบคุมการนำทางของยานยนต์บนถนนผ่านเทคโนโลยีเครือข่ายดาวเทียม ปัจจุบันระบบนำทางชนิดนี้ยังอยู่ระหว่างพัฒนาและปรับปรุงในสายงานวิจัยเพื่อทดสอบให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพในการนำทางมากยิ่งขึ้น แสดงระบบตัวอย่างที่ใช้งาน ดังรูปที่ 3.38 มีข้อดี คือ นิยมใช้สำหรับติดตามตำแหน่งของยานยนต์บนพื้นถนนในแบบกลางแจ้งได้ดีและติดตามได้ระยะทางแบบไกล โดยความแม่นยำขึ้นอยู่กับจำนวนเครือข่ายดาวเทียมที่ตรวจสอบสัญญาณในอากาศ รวมทั้งมีความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงหรือขยายเส้นทางได้ง่าย แต่มีข้อเสีย คือ มีต้นทุนการผลิตสูงและไม่เหมาะใช้งานในสภาพแวดล้อมในที่อับสัญญาณหรือในอาคาร จึงไม่เป็นที่ยอมรับในสายงานอุตสาหกรรมมากพอสมควร (หัวข้อที่ 3.5 อ้างอิงข้อมูลจาก <https://th.tzbotautomation.net/info/comparison-of-advantages-and-disadvantages-of-52924622.html>)



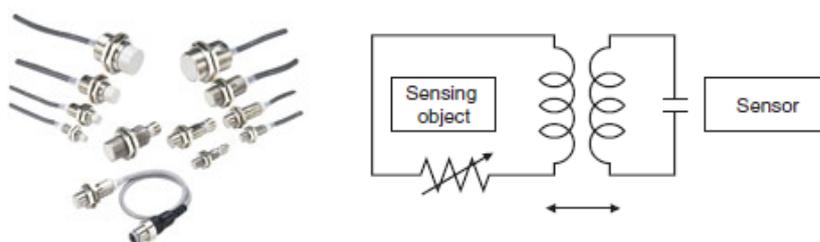
รูปที่ 3.38 ตัวอย่างระบบใช้งานการนำทางด้วยจีพีเอส

3.6 ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง

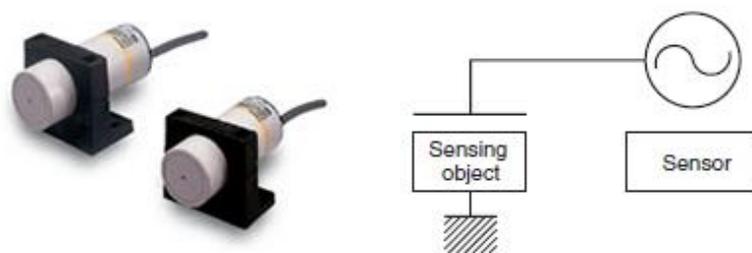
สำหรับระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางหรือนิยมเรียกอีกอย่างว่า ระบบตรวจจับวัตถุ ซึ่งเป็นการทำงานในการตรวจจับความเคลื่อนไหวของวัตถุได้หลากหลายชนิด โดยมีการประยุกต์ใช้เข้ากับเทคโนโลยีต่าง ๆ ในงานอุตสาหกรรมมากมายไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของการอำนวยความสะดวกและด้านความปลอดภัย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายตามมาการนำระบบตรวจจับมีความจำเป็นอย่างมากในการพัฒนาในสายการผลิตแบบอัตโนมัติ ที่ช่วยในเรื่องของการป้องกันการชนและกระแทกระหว่างวัตถุหรืออุปกรณ์ ปัจจุบันมีเทคโนโลยีมากมายที่ถูกนำมาใช้พัฒนาระบบสิ่งกีดขวาง โดยขึ้นอยู่กับขีดความสามารถของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่เลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะหน้างาน รวมทั้งปัจจัยในเรื่องของต้นทุนการผลิตที่นำไปสู่การตัดสินใจลงทุนกับระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางที่ต้องการพัฒนาขึ้นมา ทั้งนี้เป็นการกล่าวถึงอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันมี 6 ชนิด ซึ่งมีรายละเอียดอธิบายลักษณะการใช้งานของเซ็นเซอร์ดังนี้

3.6.1 เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ

เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ หรือพร็อกซิมีตี้เซ็นเซอร์ (Proximity Sensor) คือ เซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการตรวจจับวัตถุโดยไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับวัตถุโดยตรง จึงทำให้ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบไม่เกิดริ้วรอยและเกิดการชำรุดเสียหาย สำหรับการนำเซ็นเซอร์ไปประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม เช่น ตรวจจับชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์ ตรวจจับสิ่งของ ตรวจจับความเร็วรอบ ตรวจจับระดับน้ำในถังพลาสติก หรือ ตรวจจับกล่องเพื่อนับจำนวน เป็นต้น นอกจากนี้เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุชนิดนี้ที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานภาคอุตสาหกรรม มี 2 ชนิดหลัก ๆ คือ ชนิดเหนี่ยวนำ (Inductive) เป็นเซ็นเซอร์ที่ปล่อยสนามแม่เหล็กความถี่สูงออกมาหากมีวัสดุที่เป็นโลหะผ่านเข้ามาในบริเวณสนามแม่เหล็กส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงตามมา ทำให้ทราบถึงตำแหน่งของวัตถุและสามารถระบุได้ว่ามีวัตถุชนิดใดผ่านเข้ามาในตำแหน่งที่กำหนดไว้ แสดงภาพตัวอย่างเซ็นเซอร์ ดังรูปที่ 3.39 และอีกชนิด คือ ชนิดเก็บประจุ (Capacitive) เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุที่เป็นได้ทั้งโลหะและอโลหะ เมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่เข้ามาในระยะของเซ็นเซอร์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าจึงส่งผลให้วงจรไฟฟ้าภายในตัวเซ็นเซอร์รับรู้ได้ว่าในขณะนี้วัตถุอยู่ด้านหน้า โดยลักษณะการตรวจจับขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุและขนาดของวัตถุ แสดงภาพตัวอย่างเซ็นเซอร์ ดังรูปที่ 3.40 (อ้างอิงข้อมูลจาก <https://www.sumipol.com/knowledge/what-is-proximity-sensor/>)



รูปที่ 3.39 เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุชนิดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.40 เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุชนิดเก็บประจุ

3.6.2 เซ็นเซอร์ตรวจจับด้วยภาพ

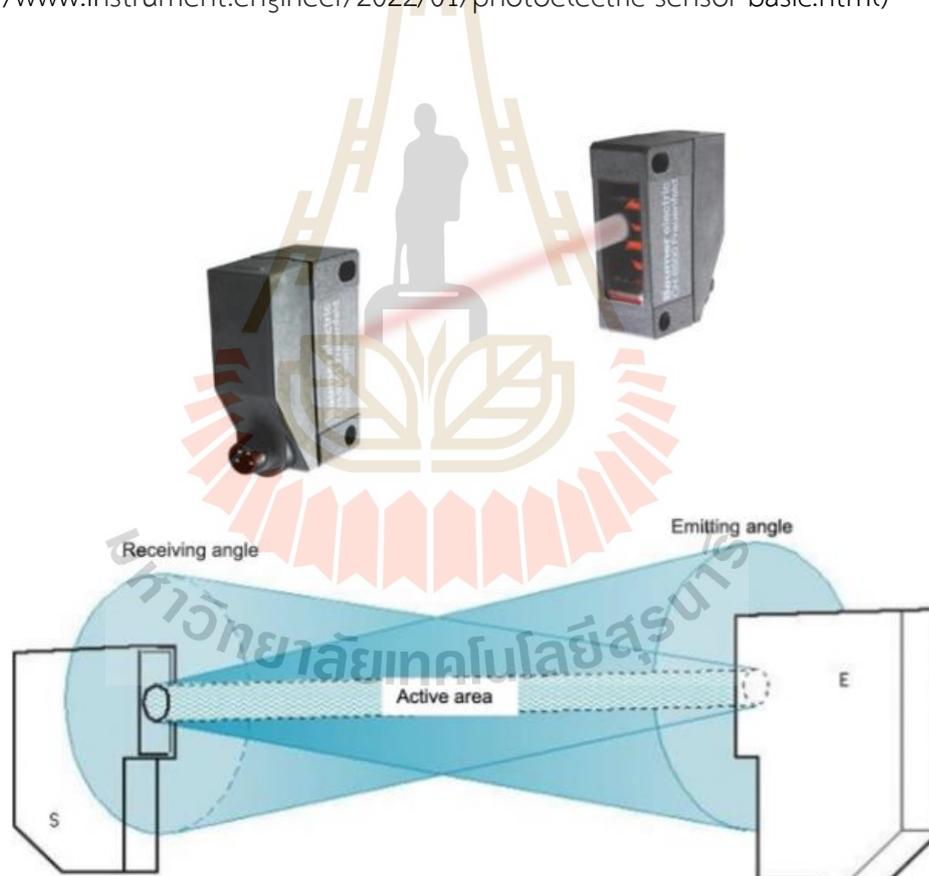
ในงานอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานที่มีความซับซ้อนด้วยการใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ตรวจจับด้วยภาพ (Vision Sensor) ซึ่งกล่าวอีกแบบ คือ เป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีระบบเครื่องจักรที่ใช้ประมวลผลภาพในกระบวนการตรวจสอบชิ้นงาน ซึ่งถูกใช้สำหรับคัดกรองชิ้นงานในส่วนของการควบคุมคุณภาพการผลิต สำหรับการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับด้วยภาพนี้ คือ การถ่ายภาพชิ้นงานด้วยกล้องดิจิทัลความเร็วสูง จากนั้นทำการประมวลผลภาพที่ได้กับภาพมาตรฐานว่ามีข้อแตกต่างกันอย่างไร เพื่อส่งสัญญาณควบคุมการทำงานไปยังคอนโทรลเลอร์ (Controller) โดยสามารถทำงานได้ดีในกระบวนการตรวจสอบแบบซ้ำ ๆ และยังช่วยเพิ่มความเร็วในการผลิตได้รวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเก็บข้อมูลชิ้นงานที่ได้จากการถ่ายเพื่อเป็นหลักฐานการตรวจสอบผ่านระบบฐานข้อมูลการผลิตได้อีกด้วย ทั้งหมดนี้เป็นรูปแบบการตรวจจับปัญหาในกระบวนการผลิตและสามารถทำงานได้เร็วกว่าการใช้พนักงานคอยตรวจจับสำหรับตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้ตรวจจับขวดยาทางการแพทย์ ซึ่งตัวอย่างเซ็นเซอร์ตรวจจับด้วยภาพดังรูปที่ 3.41 (อ้างอิงข้อมูล <https://mall.factomart.com/machine-vision/vision-sensor/>)



รูปที่ 3.41 เซ็นเซอร์ตรวจจับด้วยภาพที่ใช้ตรวจจับขวดยาทางการแพทย์

3.6.3 เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุโดยใช้แสง

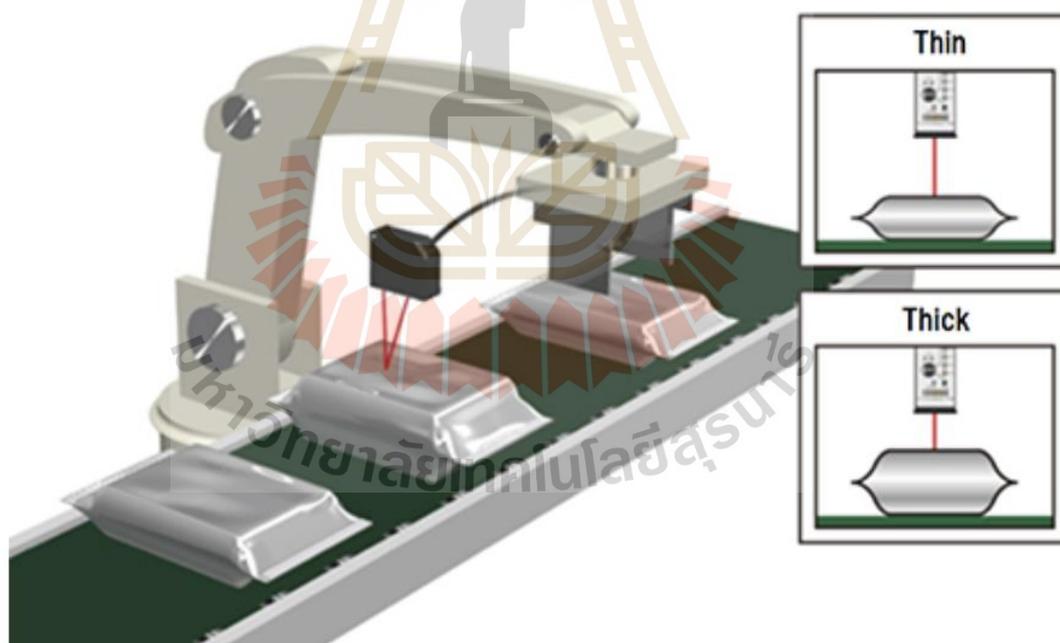
ในการตรวจจับชิ้นงานหรือวัตถุที่อยู่บนสายพานลำเลียงของกระบวนการการผลิต จำเป็นที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีของเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุโดยใช้แสง (Photoelectric Sensor) มาประยุกต์ใช้งานเพราะสามารถตรวจจับวัตถุโดยไม่ต้องมีการสัมผัส และมีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ในระหว่างการใช้งานเพื่อส่งสัญญาณไปที่ชุดควบคุมในการผลิต รวมทั้งมีระยะการตรวจจับได้ระยะไกล และสามารถตรวจจับได้หลากหลายชนิด สำหรับเซ็นเซอร์ตรวจจับชนิดนี้ใช้ลำแสงในการตรวจจับวัตถุ มีทั้งชนิดที่มองเห็นลำแสงและมองไม่เห็นลำแสง โดยอาศัยหลักการสะท้อนหรือการหักเหของแสงจากตัวส่งไปยังตัวรับ ซึ่งภายในโครงสร้างของตัวเซ็นเซอร์ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่เป็นภาคส่งสัญญาณ (Emitting) และภาครับสัญญาณ (Receiving) ลักษณะของการตรวจจับเกิดจากการที่ลำแสงจากตัวส่งแสงไปสะท้อนกับวัตถุที่ถูกขวางกั้น เพื่อเปลี่ยนแปลงสถานะของสัญญาณเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน ตัวอย่างเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุโดยใช้แสง ดังรูปที่ 3.42 (อ้างอิงข้อมูลจาก <https://www.instrument.engineer/2022/01/photoelectric-sensor-basic.html>)



รูปที่ 3.42 เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุโดยใช้แสง

3.6.4 เซ็นเซอร์วัดระยะทาง

เซ็นเซอร์วัดระยะทาง (Displacement Sensor) เป็นเซ็นเซอร์วัดระยะทาง เป้าหมายของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่และวัตถุที่หยุดนิ่ง ซึ่งหลักการใช้รูปแบบการเปลี่ยนระยะทางของภาพที่ตกลงบนเซนเซอร์รูปภาพ จากนั้นใช้เลนส์ทำหน้าที่รวมแสงเลเซอร์โดยจัดลำดับให้ชิดกันเพื่อปล่อยแสงเลเซอร์ไปยังวัตถุเป้าหมาย โดยเซนเซอร์รูปภาพรับแสงที่สะท้อนจากวัตถุผ่านเลนส์ สำหรับเซ็นเซอร์ชนิดนี้มีการนำมาใช้งานอยู่ 2 แบบ แบบแรก คือ แบบ Diffuse เมื่อลำแสงเลเซอร์ถูกปล่อยออกไปยังวัตถุเป้าหมายโดยทำมุมตั้งฉากกับพื้นและสะท้อนกลับมายังตัวรับข้อมูล ข้อดีคือสามารถวัดค่าระยะทางไกลได้ดี แต่มีข้อเสียคือ ไม่เหมาะกับชิ้นงานโปร่งใส หรือ วัตถุที่มันเงา เนื่องจากวัตถุเหล่านั้นสะท้อนแสงได้ดี ส่วนแบบที่สอง คือ แบบ Specular เมื่อลำแสงเลเซอร์ถูกปล่อยออกไปยังวัตถุเป้าหมายโดยทำมุมทแยงและสะท้อนกลับมายังตัวรับข้อมูล โดยมีค่ามุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนกลับ มีข้อดีคือ เหมาะกับชิ้นงานโปร่งใส หรือ วัตถุที่มันเงามากได้ดี แต่มีข้อเสียคือ ช่วงของการวัดนั้นมีขนาดเล็กกว่าแบบ Diffuse แต่มีความละเอียดมากกว่าแบบ Diffuse และตัวอย่างการนำเซ็นเซอร์วัดระยะทางไปใช้ในงานตรวจเช็คตำแหน่งในแนวตั้งเพื่อคอนโทรลความสูงให้แขนกล ดังรูปที่ 3.43 (อ้างอิงข้อมูลจาก <http://jwtech.co.th/activity/?p=1271>)



รูปที่ 3.43 เซ็นเซอร์วัดระยะทางในงานตรวจเช็คตำแหน่งในแนวตั้ง

3.6.5 เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก

เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic Sensor) คือ เซ็นเซอร์ที่ใช้สำหรับตรวจจับวัตถุต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการสะท้อนของคลื่นความถี่เสียง ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าระยะทางได้จากการเดินทางของคลื่นและนำมาเทียบกับเวลา ด้วยกลไกดังกล่าวทำให้เราสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ได้อย่างมากมาย เช่น งานวัดระดับน้ำ งานตรวจจับชิ้นงาน และงานตรวจจับความหนาของวัตถุ เป็นต้น สำหรับเซ็นเซอร์ชนิดนี้มีคลื่นความถี่ที่ใช้ในตัว คือ คลื่นความถี่เสียงในช่วง Ultrasound ซึ่งเป็นคลื่นความถี่เสียงที่มนุษย์ไม่สามารถได้ยินและมีย่านความถี่ตั้งแต่ 20 KHz ขึ้นไป มีข้อดี คือ การเดินทางของคลื่น Ultrasound ที่สามารถเดินทางผ่านตัวกลาง เช่น อากาศ ก๊าซ ของเหลว หรือของแข็งได้ ยกเว้นในสภาวะสุญญากาศ ทำให้สามารถใช้งานตรวจจับวัตถุหลากหลายชนิดในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี และตัวอย่างเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกที่มีจำหน่ายในท้องตลาดในปัจจุบัน ดังรูปที่ 3.44 (อ้างอิงจาก <https://mall.factomart.com/what-is-ultrasonic-sensor/>)

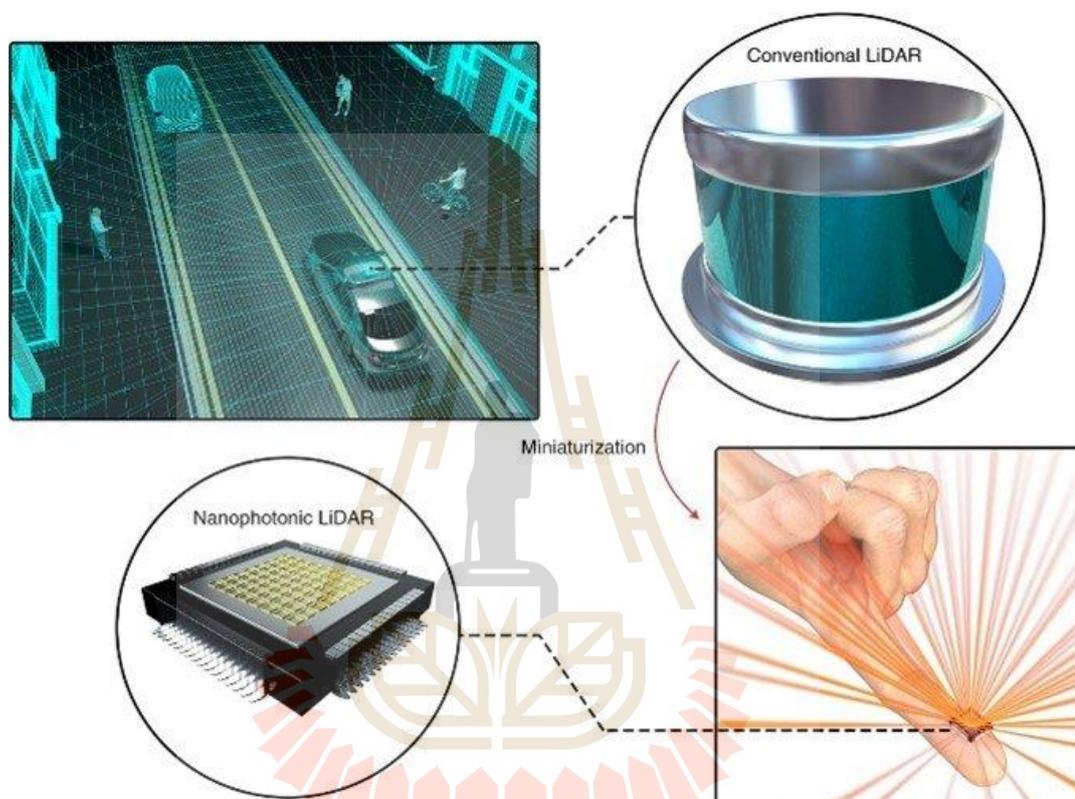


รูปที่ 3.44 เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก

3.6.6 เซ็นเซอร์ไลดาร์

เซ็นเซอร์ไลดาร์ (Lidar Sensor) ย่อมาจาก “Light Detection and Ranging” เป็นเซ็นเซอร์ที่ช่วยให้รับรู้ระยะทางหรือความลึกของวัตถุ ด้วยการวัดระยะเวลาที่แสงใช้ในการสะท้อนกลับมาจากวัตถุ และอาศัยข้อมูลความลึกระดับพิกเซลที่มีความละเอียดสูง เพื่อทำการวัดของสภาพแวดล้อมพื้นที่ที่ตรวจจับได้แล้วนำมาสร้างแผนผังในแนวลึกของฉาก เพื่อทำการคำนวณเวลาในการเดินทางของแสงตั้งแต่ถูกปล่อยออกจากอุปกรณ์จนสะท้อนกลับมาที่ตัวรับสัญญาณ นอกจากนี้ไลดาร์ยังสามารถคำนวณระยะทางที่แน่นอนไปยังวัตถุได้ โดยการปล่อยคลื่นหลายพันครั้งต่อวินาทีและวิเคราะห์ปริมาณพลังงานที่สะท้อนบนพื้นผิว แอมพลิจูด ความถี่ และเฟสของสเปกตรัมคลื่นสะท้อนของเป้าหมาย ในการรวบรวมการวัดระยะทางเหล่านี้ได้สร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อม

ได้ทั้งแบบ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ ขึ้นมาเรียกว่าคลาวด์จุด (Point Cloud) สำหรับเทคโนโลยีของไลดาร์นั้น ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ในปัจจุบัน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัยมากที่สุดและมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดระยะทางได้แม่นยำ ภาพตัวอย่างเซ็นเซอร์ไลดาร์ที่ใช้ในยานยนต์ ดังรูปที่ 3.45 (อ้างอิงข้อมูลจาก <http://th.chinagalvo.com/adas-lidar>)



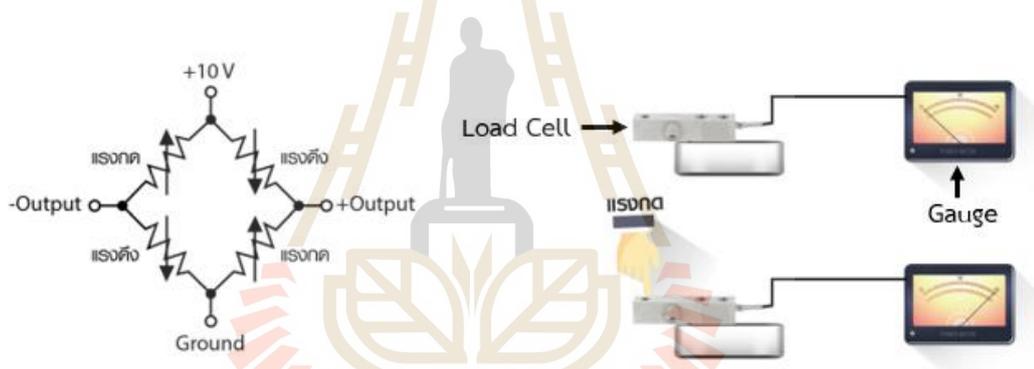
รูปที่ 3.45 เซ็นเซอร์ไลดาร์ใช้ในยานยนต์

3.7 ระบบตรวจสอบน้ำหนัก

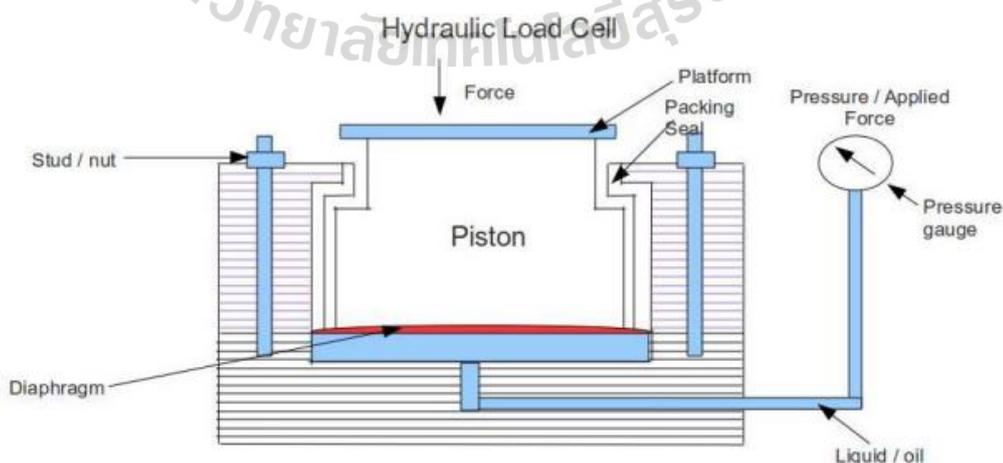
การตรวจสอบน้ำหนักของชิ้นงานหรือวัตถุเพื่อต้องการทราบถึงน้ำหนักที่แน่ชัดในอุตสาหกรรมการผลิตส่วนใหญ่นิยมนำโหลดเซลล์มา (Load Cell) พัฒนาระบบตรวจสอบน้ำหนัก (Weight Checking System) ซึ่งโหลดเซลล์เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในทางอุตสาหกรรม โดยเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดหรือชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดและแม่นยำสูงสำหรับความแม่นยำในการชั่งน้ำหนักขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีและวัสดุที่ใช้ผลิตโหลดเซลล์ด้วย ซึ่งประสิทธิภาพการใช้งานอาจแปรผันตามราคาของผู้ผลิตจัดจำหน่าย สำหรับโหลดเซลล์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนจากแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัวโหลดเซลล์เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สามารถนำสัญญาณทางไฟฟ้าไปแปลงเพื่อจ่ายข้อมูลเข้าจอแสดงผล (Indicator) เพื่อแสดงค่าน้ำหนักเป็นตัวเลข ถ้ามีโหลดเซลล์จำนวนหลายตัวที่ถูกติดตั้งในใช้งานพร้อมกันจำเป็นต้องมีอุปกรณ์รวมสัญญาณทางไฟฟ้า (Junction

Box) เพื่อรวมสัญญาณเป็นจุดเดียวและส่งสัญญาณต่อไปยังจอแสดงผล นอกจากนี้โหลดเซลล์ยังแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

โหลดเซลล์ประเภทแรก คือ โหลดเซลล์สเตรนเกจ (Strain Gauge Load Cell) ทำมาจากสเตรนเกจที่จัดเรียงวงจรในรูปแบบวงจรวิสต์อนบรีดจ์ (Wheatstone Bridge) และแปลงค่าแรงกดหรือแรงดึง ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งหลักการของโหลดเซลล์ประเภทนี้ คือ เมื่อมีน้ำหนักมากระทำที่ตัวโหลดเซลล์ ทำให้ความเครียด (Strain) เปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่กระทำและส่วนใหญ่ใช้เกจ (Gauge) วัดความเครียดจำนวน 4 ตัว ในการวัดโดยใช้เกจตัวต้านทานทั้ง 4 ตัว เป็นการเชื่อมต่อสัญญาณเข้าด้วยกันเพื่อใช้แปลงแรงที่กระทำในรูปแบบแรงกดหรือแรงดึงของการส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าจะมีหน่วยเป็น mV/V ซึ่งหมายความว่าถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้า 10 V ให้กับ Load cell ที่มีคุณสมบัติ (Specification) 2 mV/V ที่โหลดเต็มพิกัด (Full Load) ยกตัวอย่างถ้าน้ำหนักโหลดเต็มพิกัด 100 กิโลกรัม เมื่อมีแรงกระทำต่อโหลดเซลล์ที่น้ำหนัก 100 กิโลกรัม สัญญาณที่ได้รับเท่ากับ 20 mV รูปแบบตัวอย่างโหลดเซลล์สเตรนเกจ ดังรูปที่ 3.46



รูปที่ 3.46 รูปแบบโหลดเซลล์สเตรนเกจ



รูปที่ 3.47 รูปแบบโหลดเซลล์ไฮดรอลิก

โหลดเซลล์ประเภทที่สอง คือ โหลดเซลล์ไฮดรอลิก (Hydraulic Load Cell) ซึ่งโหลดเซลล์ประเภทนี้อาศัยหลักการทำงานของแรงดันน้ำมัน เมื่อมีน้ำหนักมากระทำจึงเกิดแรงดันภายในตัวน้ำมันและวัดแรงดัน โดยใช้เกจเพื่อเทียบออกมาเป็นน้ำหนักแรงกด โดยโหลดเซลล์ชนิดนี้ส่วนใหญ่ นิยมใช้กับงานชั่งน้ำหนักซึ่งถึงและไม่นิยมใช้โหลดเซลล์ชนิดนี้ในงานทั่ว ๆ ไป เนื่องจากมีความยุ่งยากในการติดตั้งและมีต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูงมาก รวมทั้งเหมาะกับการใช้งานในพื้นที่อันตราย และไม่ต้องใช้ไฟฟ้าในการดำเนินงาน (Operate) รูปแบบตัวอย่างโหลดเซลล์ไฮดรอลิก ดังรูปที่ 3.47

เมื่อทราบประเภทโหลดเซลล์ที่ต้องการนำไปใช้งานตามลักษณะงานที่ต้องการ ซึ่งแต่ละประเภทมีการออกแบบสำหรับการใช้งานแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเลือกประเภทของโหลดเซลล์ จึงมีความสำคัญ เพราะหากเลือกใช้งานผิดประเภทอาจทำให้ทั้งงานและอุปกรณ์โหลดเซลล์ เกิดความเสียหาย ในปัจจุบันทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจมากกว่าแบบไฮดรอลิก เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการวัดสูงกว่าและสามารถประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ควบคุมได้หลากหลาย ชนิด ทั้งนี้โหลดเซลล์ที่นิยมใช้กันในงานอุตสาหกรรม คือ โหลดเซลล์สเตรนเกจ ซึ่งยกตัวอย่างโหลดเซลล์สเตรนเกจเท่านั้นที่สามารถจำแนกประเภทย่อยที่นำมาพิจารณาเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกงานโหลดเซลล์แต่ละประเภทให้เหมาะสมกับงาน โดยพิจารณาจากทิศทางการรับแรงในแบบแรงดึงหรือแรงกด และพิกัดน้ำหนักสูงสุดที่สามารถแบกรับได้ของตัวโหลดเซลล์ มีรายละเอียดโหลดเซลล์แต่ละประเภทส่วนย่อยดังนี้

3.7.1 โหลดเซลล์แบบ Single End Shear Beam

สำหรับโหลดเซลล์แบบ Single End Shear Beam มีลักษณะใช้งานโดยยึดปลายด้านหนึ่งเข้ากับฐาน และนำถ่วงวางลงบนปลายอีกด้านหนึ่งเพื่อวัดแรงกด ซึ่งใช้จำนวน 4 ตัว ต่อ 1 ถึงนิยมใช้มากในการชั่งน้ำหนักในถัง เช่น การชั่งน้ำหนักหิน ทราาย หรือของเหลว เป็นต้น และมีความเที่ยงตรงในการวัดที่ระดับ 0.03% ในส่วนข้อดี คือ ในตัวโหลดเซลล์มีซิลป้องกันอย่างดีและมีย่านในการวัดน้ำหนักที่สูงตั้งแต่ 250 kg ถึง 10,000 kg แต่มีข้อเสีย คือ ไม่เหมาะกับงานที่มีน้ำหนักมาก ๆ อาจทำให้เกิดการวัดที่ผิดเพี้ยน แสดงตัวอย่างโหลดเซลล์ชนิดนี้ ดังรูปที่ 3.48



รูปที่ 3.48 โหลดเซลล์แบบ Single End Shear Beam

3.7.2 โหลดเซลล์แบบ Double End Shear Beam

สำหรับโหลดเซลล์แบบ Double End Shear Beam เป็นโหลดเซลล์ที่เหมือนกับนำโหลดเซลล์ Single End Shear Beam จำนวน 2 ตัว มารวมกัน ซึ่งทำให้มีจำนวนสเตรนเกจมากขึ้น ทำให้ได้ความละเอียดในการวัดมากขึ้นตาม ในการติดตั้งโดยยึดปลายทั้งสองข้างด้วยสกรูติดกับฐาน และนำถ่วงมาวางตรงกลางโดยมีลูกบอลกับเบ้ายึดกับถ่วง เพื่อให้ถ่วงสามารถขยับได้แต่ไม่หลุดหล่นไป นิยมใช้ในงานซึ่งที่มีน้ำหนักมาก ๆ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้ชั่งถังหรือไซโลที่มีขนาดใหญ่ และมีความเที่ยงตรงในการวัดที่ระดับ 0.02% ในส่วนข้อดี คือ มีย่านในการวัดควบคุมน้ำหนักได้สูงตั้งแต่ 10,000 kg ถึง 50,000 kg แต่มีข้อเสีย คือ มีขนาดใหญ่ทำให้มีความยากลำบากในการติดตั้งและต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง แสดงตัวอย่างโหลดเซลล์ชนิดนี้ ดังรูปที่ 3.49



รูปที่ 3.49 โหลดเซลล์แบบ Double End Shear Beam

3.7.3 โหลดเซลล์แบบ Single Point

สำหรับโหลดเซลล์แบบ Single Point เป็นโหลดเซลล์ที่ออกแบบมาเพื่อให้ใช้กับแพลตฟอร์ม (Platform) ขนาดเล็ก สำหรับงานซึ่งที่น้ำหนักน้อยกว่า 1,000 kg โดยใช้โหลดเซลล์เพียงตัวเดียว โดยยึดโหลดเซลล์เข้าที่จุดศูนย์กลางของแพลตฟอร์ม และมีความเที่ยงตรงในการวัดที่ระดับ 0.03% ในส่วนข้อดี คือ มีย่านในการวัดควบคุมน้ำหนักน้อย ๆ ตั้งแต่ 2 kg ถึง 800 kg เหมาะกับการวัดแบบละเอียด แต่มีข้อเสีย คือ มีความบอบบางและอาจเกิดความเสียหายได้ถ้าถูกกระแทกแรง ๆ แสดงตัวอย่างโหลดเซลล์ชนิดนี้ ดังรูปที่ 3.50



รูปที่ 3.50 โหลดเซลล์แบบ Single Point

3.7.4 โหลดเซลล์แบบ Bending Beam

สำหรับโหลดเซลล์แบบ Bending Beam เป็นโหลดเซลล์ที่ออกแบบมาโดยการแปลงแรงบิดที่กดที่ปลายด้านหนึ่งและอีกด้านยึดติดกับฐานและมีโครงสร้างคล้ายสปริง (Spring) และมีความเที่ยงตรงในการวัดที่ระดับ 0.02% ในส่วนข้อดี คือ มีต้นทุนการผลิตต่ำและติดตั้งใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน รวมทั้งมีย่านในการวัดควบคุมน้ำหนักน้อย ๆ ตั้งแต่ 25 kg ถึง 500 kg เหมาะกับการวัดแบบละเอียด แต่มีข้อเสีย คือ ต้องมีการดหน่วยความจำในการติดตั้งเพื่อป้องกันตัวโหลดเซลล์เกิดความเสียหาย แสดงตัวอย่างโหลดเซลล์ชนิดนี้ ดังรูปที่ 3.51



รูปที่ 3.51 โหลดเซลล์แบบ Bending Beam

3.7.5 โหลดเซลล์แบบ Pancake

สำหรับโหลดเซลล์แบบ Pancake หรือ “แพนเค้ก” เป็นโหลดเซลล์ที่มีรูปร่างคล้ายขนมแพนเค้ก สามารถใช้ได้ทั้งแรงกดและแรงดึงที่มีแม่นยำสูง มีค่าความเที่ยงตรง Linearity และ Hysteresis ในระดับ 0.05 % เนื่องจากมีจำนวนสเตรนเกจมากกว่าโหลดเซลล์ชนิดอื่น นิยมใช้สำหรับงานเครื่องทดสอบแรงกดหรือแรงดึง ในส่วนข้อดี คือ วัสดุทำจากสแตนเลสซึ่งมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนของสารเคมี และมีย่านในการวัดควบคุมน้ำหนักมาก ๆ ตั้งแต่ 500 kg ถึง 500,000 kg แต่มีข้อเสีย คือ มีต้นทุนการผลิตสูงพอสมควร แสดงตัวอย่างโหลดเซลล์ชนิดนี้ ดังรูปที่ 3.52



รูปที่ 3.52 โหลดเซลล์แบบ Pancake

3.7.6 โหลดเซลล์แบบ Canister

สำหรับโหลดเซลล์แบบ Canister เป็นโหลดเซลล์ที่รูปร่างเหมือนกระป๋องใช้สำหรับแรงกดเท่านั้น มีความเที่ยงตรงค่า Linearity และ Hysteresis ในระดับ 0.05% โดยนิยมใช้ทำเครื่องชั่งทั่วไปที่ต้องการความแม่นยำสูง รวมถึงเครื่องชั่งรถบรรทุก ในส่วนข้อดี คือ สามารถใช้กับงานที่มีการเคลื่อนไหวได้ดี และมีย่านในการวัดควบคุมน้ำหนักตั้งแต่ 200 kg ถึง 20,000 kg แต่มีข้อเสีย คือ ใช้งานติดตั้งแบบแนวนอนในลักษณะแรงดึงไม่ได้ แสดงตัวอย่างโหลดเซลล์ชนิดนี้ ดังรูปที่ 3.53



รูปที่ 3.53 โหลดเซลล์แบบ Canister

3.7.7 โหลดเซลล์แบบ S-Beam

สำหรับโหลดเซลล์แบบ S-Beam เป็นโหลดเซลล์ที่ใช้งานโดยยึดด้านบนกับโครงสร้าง โดยใช้ลูกปืนตาเหล็ก (Rod end) ส่วนด้านล่างใช้แขนงัดที่ต้องการชั่งซึ่งทำให้ถึงสามารถแกว่งตัวเล็กน้อยได้โดยที่ไม่มีผลกับการชั่ง และมีความเที่ยงตรงในการวัดที่ระดับ 0.03 % ในส่วนข้อดี คือ มีต้นทุนราคาถูก สามารถใช้งานได้ลักษณะแรงกดและแรงดึงและมีย่านในการวัดควบคุมน้ำหนักตั้งแต่ 2 kg ถึง 5,000 kg แต่มีข้อเสีย คือ ถ้านำไปติดตั้งไม่ถูกต้องกับลักษณะงานอาจเกิดความผิดเพี้ยนในการตรวจวัดน้ำหนัก แสดงตัวอย่างโหลดเซลล์ชนิดนี้ ดังรูปที่ 3.54



รูปที่ 3.54 โหลดเซลล์แบบ S-Beam

3.7.8 การคำนวณน้ำหนักใช้งานโหลดเซลล์

โหลดเซลล์แต่ละประเภทสามารถรองรับน้ำหนักในลักษณะแรงดึงหรือแรงกดได้แตกต่างกัน จำเป็นต้องใช้หลักการคำนวณหาพิกัดน้ำหนักที่แบกรับและจำนวนโหลดเซลล์ที่ต้องการใช้ ซึ่งการออกแบบและเลือกขนาดพิกัดของโหลดเซลล์ให้ถูกต้องและเหมาะสม มีความสำคัญอย่างยิ่งในการเลือกใช้โหลดเซลล์ โดยเฉพาะถ้าเลือกพิกัดน้อยเกินไปโอกาสที่น้ำหนักเกินและสร้างความเสียหายให้กับโหลดเซลล์ได้ แต่ถ้าเลือกพิกัดมากเกินไปทำให้ความละเอียดในการวัดมีประสิทธิภาพลดน้อยลงค่าน้ำหนักมีโอกาสผิดเพี้ยนมากขึ้น ดังนั้นในการออกแบบติดตั้งโหลดเซลล์ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมกับลักษณะของการใช้งานงานเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถคำนวณหาพิกัดของโหลดเซลล์ (M_{RL}) ดังสมการที่ 3.18 (หัวข้อที่ 3.7 อ้างอิงข้อมูลจาก <https://mall.factomart.com/wp-content/uploads/2018/06/Load-cell-manual.pdf>)

$$M_{RL} = 2(M_T + M_C) / N_L \quad (3.18)$$

โดยที่	M_T	คือ น้ำหนักโหลดสูงสุด (kg)
	M_C	คือ น้ำหนักภาชนะเปล่า (kg)
	N_L	คือ จำนวนโหลดเซลล์ที่ใช้

3.8 ระบบควบคุมในภาคอุตสาหกรรม

ปัจจุบันการทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรม (Industrial Control Systems : ICS) ที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในระบบอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นตัวบ่งบอกชี้วัดถึงคุณภาพที่ได้รับ รวมทั้งความแม่นยำและเสถียรภาพที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นแต่ละโรงงานควรมีการวางแผนระบบโรงงานด้วยการนำระบบอัตโนมัติเข้ามาประยุกต์ใช้ให้เหมาะกับโรงงาน แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของการนำระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมไปใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะงานในโรงงาน สำหรับระดับขั้นการใช้งานระบบอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่นั้นมีความก้าวหน้าและเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว ทำให้ผู้ที่ต้องการวางระบบโรงงานตัดสินใจเพื่อเลือกใช้ระบบอัตโนมัติให้เหมาะสม ดังนั้นระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมมาใช้มีระดับการทำงานหลัก ๆ ของระบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับสั่งการ ระดับควบคุม และระดับฟิลด์ มีรายละเอียดย่อยของแต่ละระดับดังนี้

ระดับแรก คือ ระดับสั่งการ ส่วนมากในระดับนี้ใช้พีซี (Personal Computer : PC) เป็นหลัก ซึ่งพีซีในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมเรียกอีกอย่างว่า Industrial Computer เป็นคอมพิวเตอร์เกรดอุตสาหกรรมที่ออกแบบมาใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะ ทำให้มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เช่น ที่ที่มีความชื้นสูง และความร้อนสูง จึงเหมาะสมกับการใช้งานที่มีความน่าเชื่อถือสูง ในการเชื่อมต่อรองรับพอร์ตการสื่อสารได้หลากหลาย ได้แก่ พอร์ตอนุกรม (Serial Port) พอร์ตแลน (LAN Port) หรือ พอร์ตอีเธอร์เน็ต (Ethernet Port) เป็นต้น โดยพีซีถูกติดตั้งให้เป็นระบบเครือข่าย Network Topology ซึ่งการออกแบบการติดตั้งนี้ช่วยให้มีความเหมาะสมกับ

ลักษณะของงาน เช่น การเชื่อมต่อระบบเครือข่ายแบบวงแหวนและเหมาะสำหรับโรงงานการผลิตที่ต้องการความต่อเนื่อง

ระดับที่สอง คือ ระดับควบคุม ในระดับนี้มีการควบคุมการทำงานของซอฟต์แวร์นี้ แบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่ ซอฟต์แวร์ระบบ (System Software) ซึ่งเป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ บนพีซี เช่น ฮาร์ดดิส เมนบอร์ด และแรม ให้มีความพร้อมในการรองรับระบบปฏิบัติการ (Operating System : OS) และซอฟต์แวร์ประยุกต์ (Application Software) เป็นระบบซอฟต์แวร์ที่ถูกออกแบบขึ้นมาโดยเฉพาะ เพื่อให้พีซีทำงานตามที่ต้องการของผู้ใช้งาน สำหรับซอฟต์แวร์ประยุกต์สามารถรองรับการติดตั้งซอฟต์แวร์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อย คือ 1.) ซอฟต์แวร์สำหรับงานเฉพาะด้าน ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ผู้ใช้งานสามารถปรับแต่งหรือเขียนขึ้นใหม่ เพื่อให้ใช้งานแบบเฉพาะเจาะจง โดยต้องมีความรู้ความเข้าใจในด้านภาษาของนักพัฒนาซอฟต์แวร์ เช่น ภาษา C#, C++, Java และ Python เป็นต้น และ 2.) ซอฟต์แวร์สำหรับงานทั่วไปส่วนใหญ่ผู้จัดทำสร้างซอฟต์แวร์นี้ไว้ให้ โดยที่ผู้ใช้งานไม่สามารถเข้าไปปรับแต่งหรือแก้ไขตัวซอฟต์แวร์เพิ่มเติมได้ แต่บางครั้งอาจพบเห็นในรูปแบบเป็นซอฟต์แวร์สำเร็จรูป ซึ่งผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องพัฒนาซอฟต์แวร์เองและไม่จำเป็นต้องเข้าใจภาษาของนักพัฒนาซอฟต์แวร์ก็สามารถใช้งานได้ นอกจากนี้ระดับควบคุมซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยให้ระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้ระบบควบคุมในความสามารถแสดงผลติดตามแบบเรียลไทม์ (Real Time) เพื่อแสดงผลการตอบสนองต่อคำสั่งที่ได้รับแบบทันทีทันใด ทำให้ประยุกต์ใช้งานควบคู่กับหน่วยควบคุมเงื่อนไขที่เป็นหัวใจหลักของกระบวนการทำงานและการประมวลผล เช่น พีแอลซี หรือ จอห์นสกรีน เป็นต้น

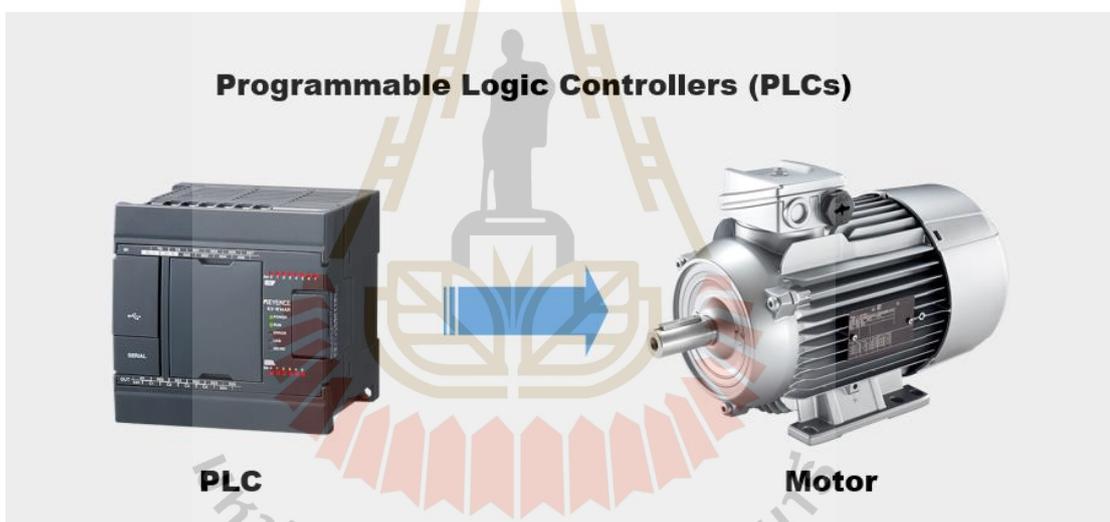
ระดับที่สาม คือ ระดับฟิลต์ มีความสำคัญอย่างยิ่งในการวางแผนระบบโรงงานให้มีประสิทธิภาพในระบบควบคุม โดยในระดับนี้มีอุปกรณ์การทำงานที่หลากหลายชนิด ได้แก่ เซนเซอร์ (Sensor) ตัวขับเคลื่อน (Actuator) อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ วาล์วควบคุม หรืออุปกรณ์ทำงานอื่น ๆ ซึ่งช่วยในการรับส่งข้อมูลได้ ยกตัวอย่าง เช่น เซนเซอร์ส่งสัญญาณไปให้อินพุท (Input) ของชุดควบคุมเงื่อนไขพีแอลซีได้รับทราบ นอกจากนี้ยังมีการใช้งานกับอุปกรณ์ควบคุม เช่น ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ โดยอาศัยการส่งพลังงานไฟฟ้าแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานทางกล ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ ความเร็ว ตำแหน่ง และแรงบิด จากพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับอุปกรณ์ในระดับฟิลต์นี้ มีค่อนข้างหลากหลาย โดยแต่ละอุปกรณ์มีการทำงานที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบระบบอัตโนมัติในโรงงาน อุปกรณ์เหล่านี้จึงเสมือนแขนขาที่คอยตอบสนองต่อความต้องการในการทำงาน เพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ต่าง ๆ หากอุปกรณ์ใดที่ทำงานผิดพลาดก็อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโรงงานคุณภาพที่ได้ก็อาจลดต่ำลง

จากที่ได้กล่าวถึงระดับการควบคุมของทั้ง 3 ระดับ ในข้างต้น ซึ่งสามารถกำหนดรูปแบบของระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมให้ชัดเจนมากขึ้น โดยรูปแบบของระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีหลากหลายรูปแบบนับตั้งแต่อุตสาหกรรม 1.0 จนถึงอุตสาหกรรม 4.0 ล้วนถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกลายมาเป็นระบบควบคุมที่ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมมีทั้งหมด 5 รูปแบบหลัก ได้แก่ รูปแบบพีแอลซี (Programmable Logic Controllers : PLCs) รูปแบบพีเอซี (Programmable Automation Controllers : PACs) รูปแบบดีซีเอส (Distributed Control Systems : DCS) รูปแบบสกาต้า (Supervisory Control and Data Acquisition :

SCADA) และรูปแบบไออีดี (Intelligent Electronic Devices : IEDs) ซึ่งอธิบายรายละเอียดย่อๆ แต่ละรูปแบบดังนี้

3.8.1 รูปแบบพีแอลซี (PLCs)

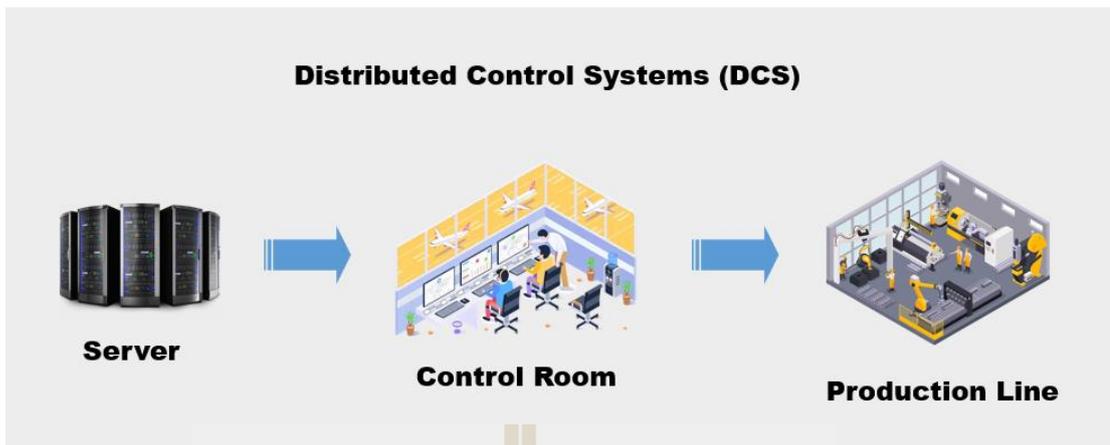
สำหรับการประยุกต์ใช้งานรูปแบบพีแอลซีในงานอุตสาหกรรม โดยใช้พีแอลซีเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบควบคุมการทำงานของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งอาศัยการสื่อสารด้วยโพรโตคอลได้หลากหลายชนิด เช่น Modbus RTU, Modbus TCP/IP, CC-link, CC-link IE, Profinet, Profibus, Devicenet, Ethernet/IP และอื่น ๆ และยังเป็นเครือข่ายที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลจากอุปกรณ์หนึ่งไปยังอุปกรณ์อื่น ๆ ภายในโรงงานอุตสาหกรรม รวมทั้งช่วยให้ระบบการทำงานราบรื่น มีเสถียรภาพและมีมาตรฐานด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล ทั้งนี้พีแอลซีใช้ชุดคำสั่งของมนุษย์ที่มีไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) ซึ่งเป็นตัวประมวลผลและสั่งการทำหน้าที่ตรวจสอบโดยกำหนดผลลัพธ์ตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ ยกตัวอย่าง เช่น การใช้โปรแกรมควบคุมทิศทางการทำงานของมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.55



รูปที่ 3.55 การประยุกต์ใช้งานรูปแบบพีแอลซี

3.8.2 รูปแบบพีเอซี (PACs)

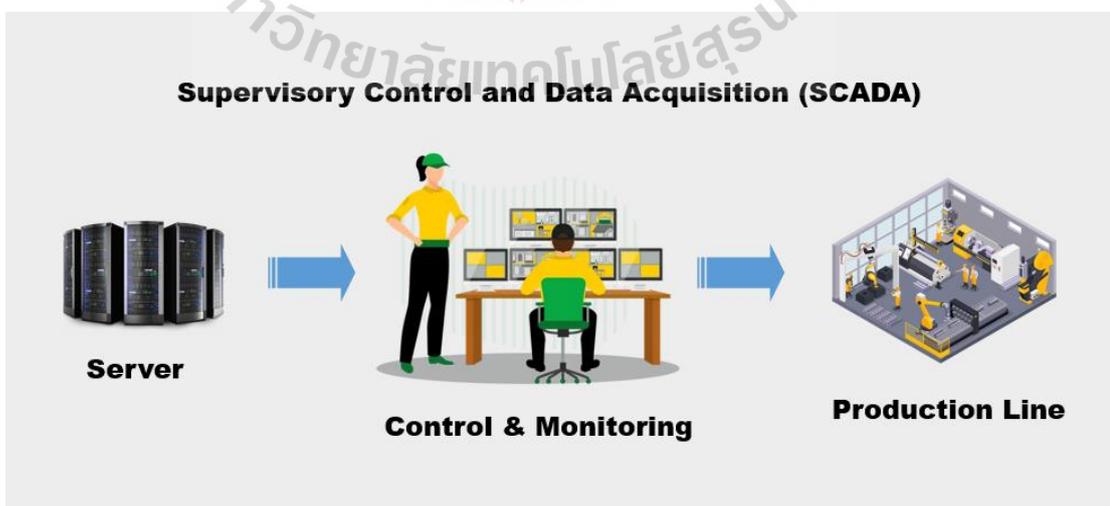
ระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมที่ถูกกล่าวถึงอยู่บ่อยครั้ง คือ ระบบควบคุมรูปแบบพีเอซี เนื่องรูปแบบนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการพัฒนาโปรแกรมที่สามารถติดตามผลการทำงานและควบคุมการทำงานระหว่างอาคารด้วยชุดเซิร์ฟเวอร์ (Server) ไปยังไลน์ผลิต (Production Line) ในโรงงาน รวมทั้งควบคุมในระยะทางได้ไกลได้ดี จึงทำให้การแสดงผลการทำงานได้ถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยส่วนใหญ่นิยมนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงกลั่นน้ำมันหรือโรงไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งมีการนำเอารูปแบบพีเอซีเข้ามาเสริมศักยภาพในการทำงานของระบบอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรม แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน ดังรูปที่ 3.56



รูปที่ 3.57 การประยุกต์ใช้งานรูปแบบดีซีเอส

3.8.4 รูปแบบสกาด้า (SCADA)

ในส่วนของรูปแบบการควบคุมที่นิยมใช้กันแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม ซึ่งก็คือการใช้รูปแบบสกาด้าเป็นระบบที่ใช้เก็บข้อมูล ตรวจสอบ และแสดงผลสถานะข้อมูล รวมถึงควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในโรงงาน โดยข้อมูลที่ได้รับสามารถนำมาวิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นเพื่อหาสาเหตุสิ่งผิดปกติได้แบบเรียลไทม์ในระยะใกล้หรือไกลได้ผ่านชุดควบคุมและแสดงผลติดตาม (Control & Monitoring) ระหว่างชุดเซิร์ฟเวอร์ไปยังไลน์ผลิต นอกจากนี้รูปแบบสกาด้ายังสามารถทำงานควบคู่ในระดับการประมวลผลและคำนวณการทำงานของอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุมได้ต่างหลายระดับที่รองลงมา คือ พีแอลซีและจอตัสกรีน อีกทั้งใช้เป็นระบบควบคุมได้หลากหลายอุตสาหกรรม เช่น การจัดการด้านพลังงาน การประปา การบำบัดน้ำเสีย และอุตสาหกรรมด้านยานยนต์ เป็นต้น แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน ดังรูปที่ 3.58



รูปที่ 3.58 การประยุกต์ใช้งานรูปแบบสกาด้า

3.8.5 รูปแบบไออีดี (IEDs)

สำหรับระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมรูปแบบไออีดี ซึ่งรูปแบบนี้เป็นการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะที่สามารถทำงานได้หลากหลายฟังก์ชัน มีโปรโตคอลใช้งาน เพื่อรองรับการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC 61850 สามารถควบคุมได้ทั้งผ่านสายแลนหรือแบบไร้สาย (Wireless) มีหลักการทำงานโดยใช้ชุดเซิร์ฟเวอร์เป็นตัวจัดการระบบทั้งรับและส่งข้อมูลระหว่างห้องควบคุมไปยังไลน์ผลิต ซึ่งรูปแบบนี้ทำงานได้ละเอียดและแม่นยำมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ ด้วยการเพิ่มส่วนของระบบไมโครโพรเซสเซอร์เข้าไปในระบบ ซึ่งเปรียบเสมือนสมองสั่งการทำงานของระบบ นอกจากนี้รูปแบบไออีดียังครอบคลุมการสื่อสารโปรโตคอลได้หลากหลายชนิดมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงถูกใช้งานภายในโรงงานและใช้ติดต่อสื่อสารเพื่อรายงานสถานะต่าง ๆ ไปยังโปรโตคอลหลักของโรงงานผ่านการประยุกต์ใช้งานร่วมกับรูปแบบสกาต้าได้ แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน ดังรูปที่ 3.59 (หัวข้อที่ 3.8 อ้างอิงข้อมูลจาก <https://th.cc-link.org/th/cclink/article/Industrial-Control-Systems>)



รูปที่ 3.59 การประยุกต์ใช้งานรูปแบบไออีดี

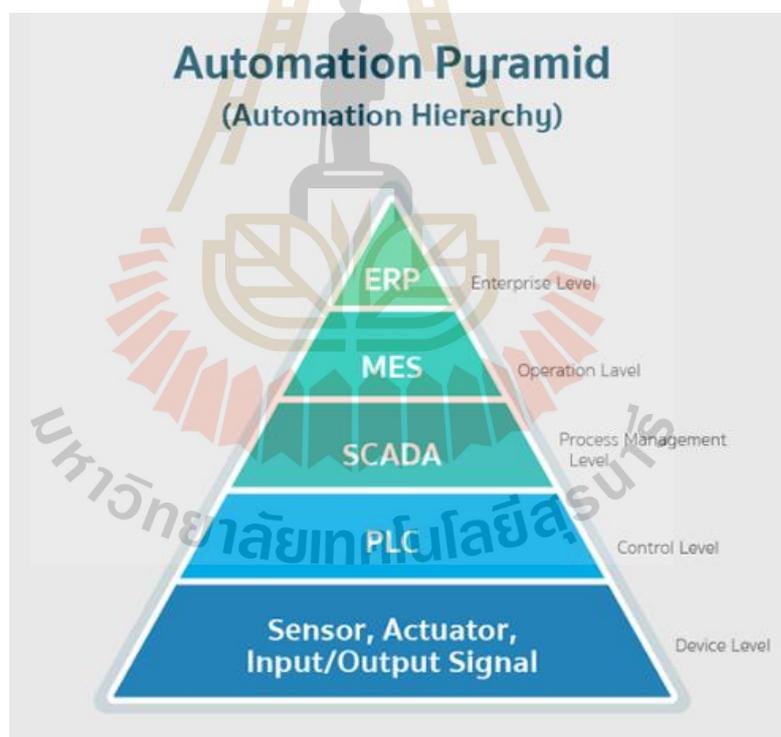
3.9 โปรโตคอลการสื่อสารในภาคอุตสาหกรรม

กล่าวถึงรูปแบบการสื่อสารรับส่งข้อมูลในระบบอัตโนมัติระดับอุตสาหกรรม เพื่อใช้ทำหน้าที่เชื่อมโยงอุปกรณ์ต่าง ๆ ประกอบด้วย เครื่องจักรกล อิเล็กทรอนิกส์ เซนเซอร์ ตัวขับเร็ว และคอมพิวเตอร์ที่ถูกออกแบบเพื่อลดหรือหลีกเลี่ยงการสั่งงานจากมนุษย์ และสามารถทำงานได้หลากหลายตามที่ต้องการได้ เพื่อให้เกิดประโยชน์ในด้านการลดค่าใช้จ่าย มีคุณภาพเพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพโดยรวมมากขึ้น ตลอดจนมีความปลอดภัยในการทำงาน การสื่อสารในระดับอุตสาหกรรมเป็นระบบสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบอัตโนมัติมีส่วนสำคัญมากในการพัฒนาระบบอัตโนมัติระดับอุตสาหกรรมให้มีความทันสมัย ซึ่งการสื่อสารในระดับอุตสาหกรรมที่มีโปรโตคอลที่ใช้แพร่หลาย เช่น PROFINET, PROFIBUS, EtherCAT, EtherNet/IP, Modbus RTU, Modbus TCP/IP และ CAN bus เป็นต้น สำหรับการพัฒนาระบบสื่อสารในระดับอุตสาหกรรมระบบสื่อสาร

ในอุตสาหกรรมแบ่งการพัฒนาที่สำคัญออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับ Classical Fieldbus System ระดับ Industrial Ethernet และระดับ Wireless Networks in Automation มีรายละเอียดของแต่ละช่วงโดยย่อ ดังนี้ (ธงชัย ชงวิจิตรมณี, 2019)

3.9.1 ระดับ Classical Fieldbus System

การสื่อสารในอุตสาหกรรมในยุคเริ่มแรก คือ Fieldbus System ถูกใช้มาจนถึงปัจจุบัน และเป็นมาตรฐาน International Electrotechnical Commission (IEC) 61158 และ Fieldbus ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทดแทนการเชื่อมต่อสายสัญญาณแบบ Star ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อสายสัญญาณจุดต่อจุดระหว่างขาเข้าและขาออกของอุปกรณ์ดิจิทัลหรืออนาล็อกกับอุปกรณ์ควบคุมศูนย์กลาง โดยเชื่อมต่อสายสัญญาณเป็นแบบ Line หรือ Bus ด้วยสายสัญญาณเส้นเดียวและมีหัวต่อปลายทางแบบ DB 9 Pins ในรูปแบบ RS232 หรือ RS485 สำหรับระบบการสื่อสารแบบ Fieldbus ถูกให้ความสำคัญจากแนวคิดเรื่อง Automation Pyramid หรือ Automation Hierarchy ดังรูปที่ 3.60 ซึ่งมีรายละเอียดใน The International Society of Automation (ISA) ในมาตรฐานเลขที่ 95 หรือ ISA-95



รูปที่ 3.60 Automation Pyramid หรือ Automation Hierarchy

3.9.2 ระดับ Industrial Ethernet

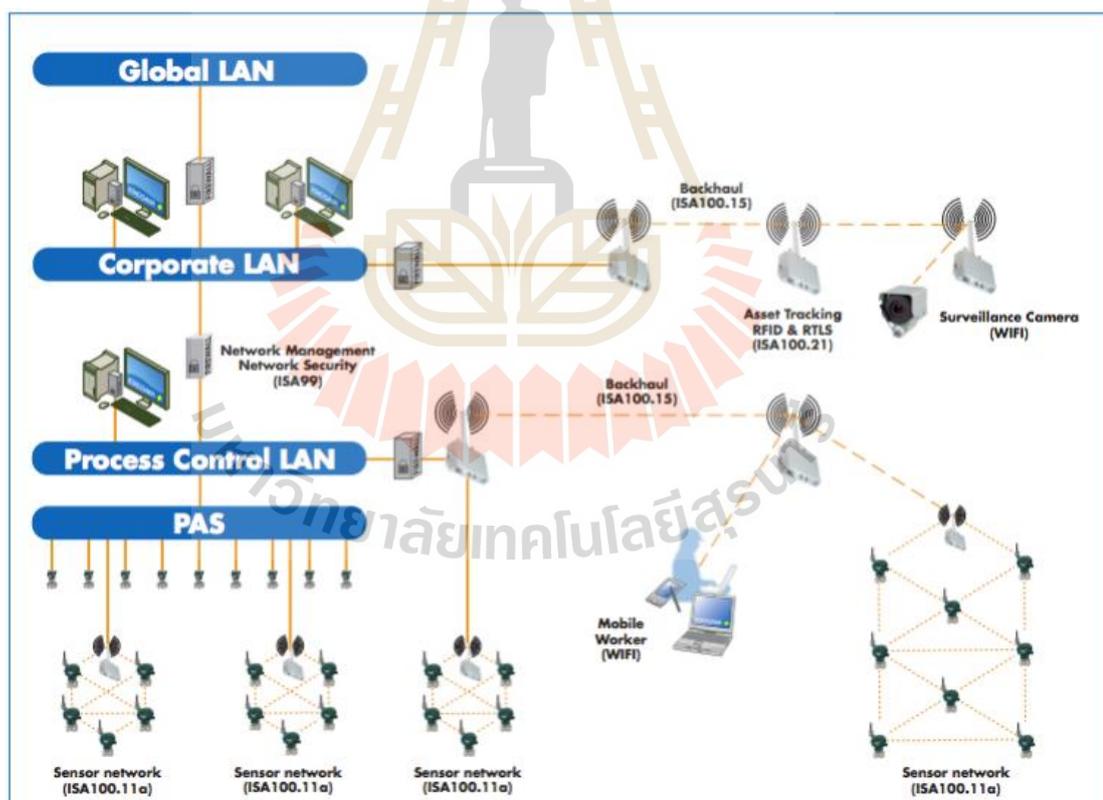
ระบบสื่อสารในโครงข่ายคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่อาศัยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ต ซึ่งปัจจุบันได้พัฒนาให้ทันสมัยมากในการรับส่งข้อมูล ให้มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลได้เร็วมาก ในช่วง Gigabit ต่อวินาที ตลอดจนความสามารถของ Application Specific IC (ASIC) ในการประมวลผลได้เพิ่มขึ้น รวมทั้งรวดเร็วขึ้นและมีขนาดเล็กกลง ทำให้ติดตั้งลงในอุปกรณ์เคลื่อนที่ไร้สายได้ นอกจากนี้ราคาของอุปกรณ์ในระบบอินเทอร์เน็ตก็ถูกลงมาก สามารถพบเห็นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป เมื่อเปรียบเทียบการสื่อสารระหว่างอินเทอร์เน็ตกับ Fieldbus เห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันในด้านประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก จึงมีผลให้มีความต้องการในการใช้การสื่อสารแบบอินเทอร์เน็ตเข้าแทนที่การสื่อสารแบบ Fieldbus ในปัจจุบันมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยพื้นฐานแล้วการสื่อสารแบบอินเทอร์เน็ตไม่สามารถประยุกต์ใช้โดยตรงบนระบบอัตโนมัติอุตสาหกรรม เนื่องจากอินเทอร์เน็ตเป็นการสื่อสารแบบ Nondeterministic ทำให้ต้องพัฒนาโปรโตคอลใหม่ ที่มีความสามารถนี้ขึ้นมา เพื่อใช้ควบคุมในแบบเรียลไทม์ได้ สำหรับโปรโตคอลในระดับ Industrial Ethernet ที่นิยมใช้กัน ได้แก่ EtherNet/IP, PROFINET, EtherCAT, Modbus TCP/IP และ CC-Link IE โดยมีรายละเอียดของผู้พัฒนาและองค์กรที่ดูแล ดังรูปที่ 3.61

Industrial Ethernet Protocols	พัฒนาโดย	องค์กรที่ดูแล
Ethernet/IP	Rockwell	Open DeviceNet Vendors Association (ODVA)
PROFINET	Siemens	PROFIBUS & PROFINET International (PI)
EtherCAT	Beckhoff	The EtherCAT Technology Group (ETG)
Modbus TCP	Modicon (now Schneider Electric)	The Modbus Organization
POWERLINK	B&R	The Ethernet POWERLINK Standardization Group (EPSG)
Sercos III	ABB, AEG, AMK, Robert Bosch, Indramat, Siemens	Sercos International e.V
CC-Link IE	Mitsubishi Electric Corporation	CC-Link Partner Association (CLPA)

รูปที่ 3.61 รายละเอียดระดับ Industrial Ethernet ของโปรโตคอลต่าง ๆ

3.9.3 ระดับ Wireless Networks in Automation

การนำเทคโนโลยีไร้สายสามารถช่วยในการใช้งานระบบอัตโนมัติในระดับอุตสาหกรรม สิ่งสำคัญ คือ การชี้แจงความหมายของคำว่า “ไร้สาย” โดยพื้นฐานระบบไร้สายสามารถทำงาน 4 ระดับ ภายในโรงงาน ดังรูปที่ 3.62 ซึ่งระดับแรก คือ RFID เป็นระดับที่ง่ายที่สุด เป็นการระบุด้วยคลื่นความถี่วิทยุสามารถช่วยในการตรวจสอบและติดตามเพื่อความปลอดภัย ระดับที่สอง คือ เซ็นเซอร์ไร้สาย ได้รับความนิยมมากที่สุดในขณะนี้ นำไปใช้ในการตรวจสอบสภาพ เครื่องมือไร้สาย และมาตรฐานการวัดระดับที่สาม คือ สายแลนแบบไร้สาย สามารถครอบคลุมพื้นที่ต่าง ๆ เช่น จุดเชื่อมต่อผู้ให้บริการสัญญาณโทรศัพท์ การบันทึกข้อมูล ความปลอดภัย การบำรุงรักษา และทางด้านไอที ระดับที่สี่ คือ WAN แบบไร้สาย สามารถเชื่อมต่อข้อมูลในโรงงานและเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ทำให้ได้ข้อมูลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น พร้อมการควบคุมแบบกระจายและการจัดการอุปกรณ์ เซ็นเซอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมให้รองรับสัญญาณกระจายไปทั่วทั้งโรงงาน (หัวข้อที่ 3.9 อ้างอิงข้อมูลจาก <https://www.nectec.or.th/news/news-public-document/industrial-communication-protocols.html>)

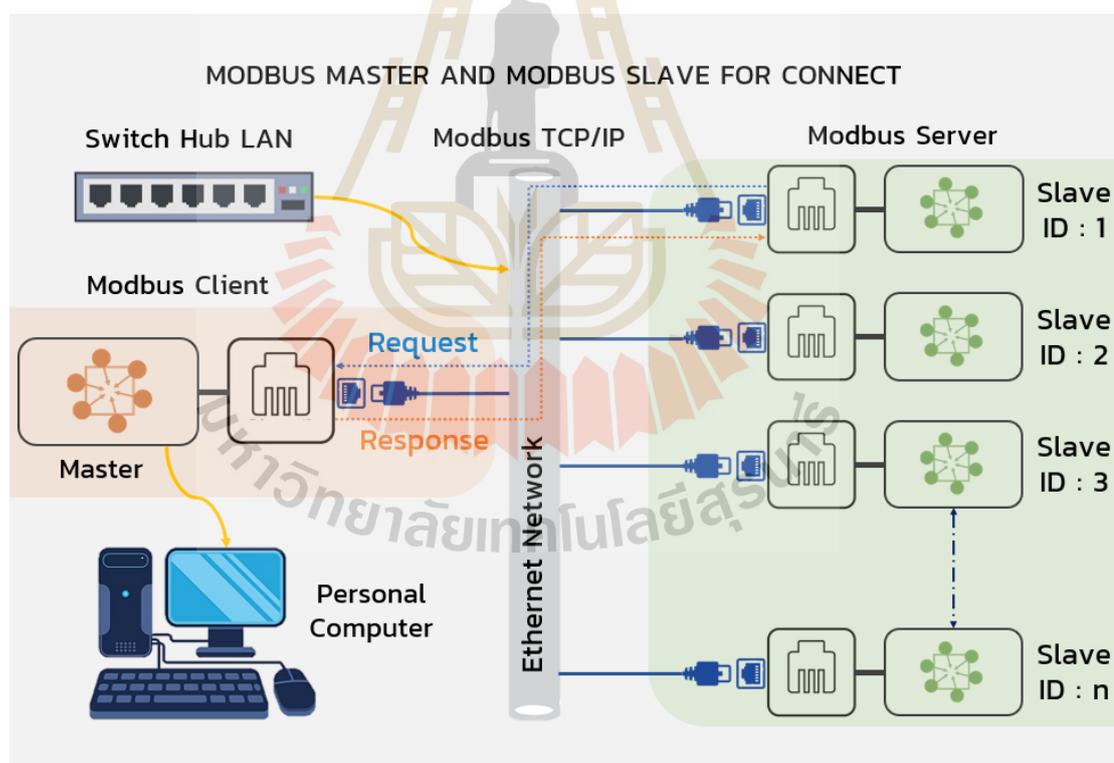


รูปที่ 3.62 รูปแบบเทคโนโลยีไร้สายของระบบอัตโนมัติในระดับอุตสาหกรรม

3.10 การสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus

โปรโตคอลที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมต่าง ๆ คือ โปรโตคอล Modbus ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิด Modbus RTU และชนิด Modbus TCP/IP แต่ในปัจจุบันก็มีโปรโตคอลชนิดอื่น ๆ ที่มีสมรรถนะที่ดีกว่าชนิด Modbus อีกมากมาย อย่างไรก็ตาม ชนิด Modbus ก็ยังเป็นโปรโตคอลคลาสสิกและได้รับความนิยมจนถึงปัจจุบัน สำหรับโปรโตคอล Modbus ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1979 โดย Modicon Incorporated เพื่อใช้พัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของวงการอุตสาหกรรม และยังเป็นวิธีการมาตรฐานในอุตสาหกรรมสำหรับเชื่อมต่อสื่อสารรับส่งข้อมูลแบบดิจิทัล (Digital) และอนาล็อก (Analog) จนถึงปัจจุบัน

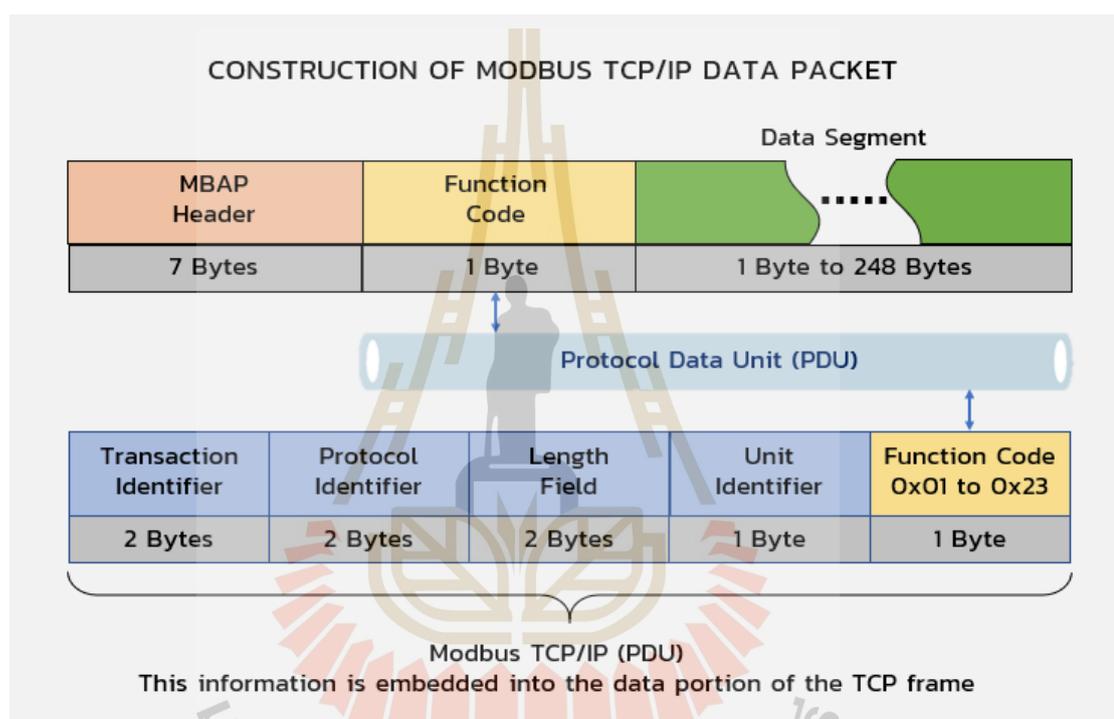
สำหรับอุปกรณ์ที่สื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP ใช้วิธีการ Master-Slave หรือ Client-Server โดยมีอุปกรณ์เพียงตัวเดียวที่เป็น Master หรือ Client และอุปกรณ์ตัวอื่น ๆ ทำหน้าที่เป็น Slave หรือ Server โดย Slave อาจเป็นอุปกรณ์ต่อพ่วงหลากหลายชนิด เช่น I/O transducer, PLC, วาล์ว, Inverter หรือ อุปกรณ์เครื่องมือวัดอื่น ๆ เป็นต้น ซึ่ง Slave แต่ละอุปกรณ์ต้องกำหนด ID ไม่ซ้ำกัน เพื่อประมวลผลและส่งข้อมูลไปยัง Master ดังรูปที่ 3.63



รูปที่ 3.63 รูปแบบการสื่อสาร Master กับ Slave โปรโตคอล Modbus TCP/IP

ในส่วนของรูปแบบ Construction of Modbus TCP/IP (ADU) เป็นรูปแบบที่ใช้การสื่อสารแบบ Ethernet-Based Protocol ด้วยรูปแบบ TCP/IP (Transmission Control Protocol) ที่ Port

502 และเป็นการสื่อสารแบบอนุกรมโดยมี Construction ดังรูปที่ 3.64 โดยเริ่มต้นในส่วนของชุดข้อมูลด้วย Modbus Application Protocol (MBAP) Header ซึ่งประกอบด้วย Transaction Identifier, Protocol Identifier, Length Field และ Unit Identifier ใน ส่วน ของชุดข้อมูล Function Code (0x01 to 0x23) คือ Protocol Data Unit (ADU) พัฒนาขึ้นจาก Modbus RTU เพื่อเปลี่ยนไปใช้รูปแบบของอีเทอร์เน็ต สำหรับ Data Segment โดยใช้อุปกรณ์ที่สามารถสร้างการสื่อสารผ่าน Local Area Network (LAN) หรือ การเชื่อมต่อแบบ Wireless ที่มีอุปกรณ์กระจายสัญญาณไร้เตอร์ หรือ Access Point เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อ (O. N. Nyasore, 2020)



รูปที่ 3.64 รูปแบบ Construction of a Modbus TCP/IP Data Packet

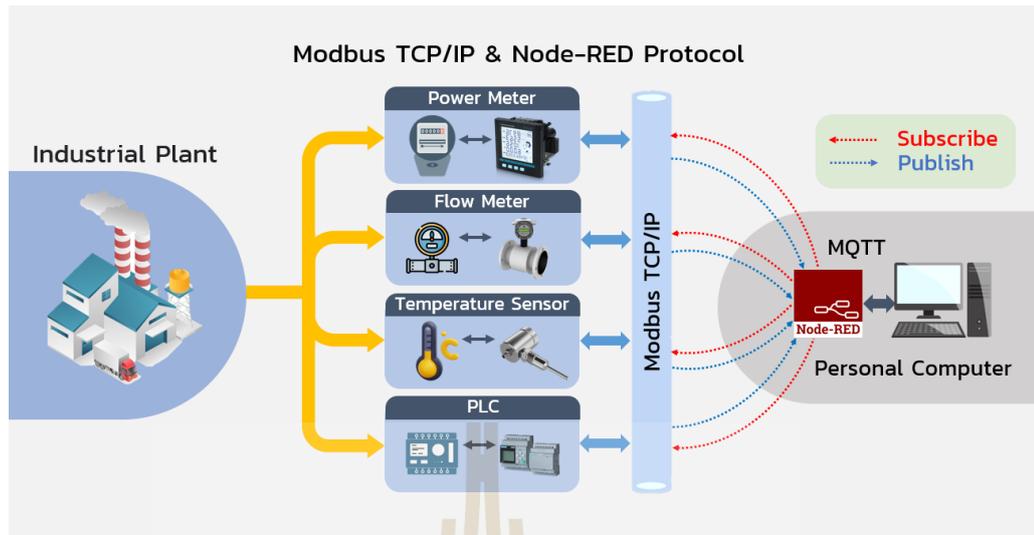
นอกจากนี้โปรโตคอล Modbus TCP/IP ที่พัฒนารูปแบบการเชื่อมต่อของสายสัญญาณ Rx, Tx ของโปรโตคอล Modbus RTU ให้เป็นการเชื่อมต่อด้วยอินเทอร์เน็ต โดยที่โครงสร้าง Message ของ Modbus คือ Application Protocol ที่ถูกส่งผ่านไปพร้อมกับ Transmission Control Protocol และ Internet Protocol ซึ่งเป็นตัวกลางที่ใช้ในการส่ง Message ของ Modbus TCP/IP สำหรับตารางที่ 3.9 แสดงชนิดของข้อมูล Function Name และ Function Code โดยใช้กับโปรโตคอล Modbus RTU ซึ่งถูกใช้งานรูปแบบเดียวกันกับโปรโตคอล Modbus TCP/IP

ตารางที่ 3.9 ชนิดข้อมูล Function Name และ Function Code

Function Name	Function Code
Read Discrete Input	Fx02
Read Coils	Fx01
Write Single Coil	Fx05
Write Multiple Coils	Fx15
Read Input Registers	Fx04
Read Multiple Holding Registers	Fx03
Write Single Holding Register	Fx06
Write Multiple Holding Registers	Fx16
Read/Write Multiple Registers	Fx23

3.11 Node-RED

ปัจจุบันเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) สามารถเชื่อมต่อสื่อสารในรูปแบบอินเทอร์เน็ตกับอุปกรณ์ หรือ เซ็นเซอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น Power Meter, Flow Meter, Temperature Sensor หรือ PLC เป็นต้น ดังนั้น Node-RED เรียกอีกอย่าง คือ Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) ออกแบบมาสำหรับเชื่อมต่อแบบ Machine-to-Machine (M2M) คือ การเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งทำให้นักพัฒนาหลากหลายกลุ่มสามารถควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ในระยะไกล ทั้งในรูปแบบระบบปฏิบัติการ Windows และ Linux โดยหลักการทำงานมีส่วนประกอบ 3 อย่าง คือ Publish, Subscribe และ Node-RED โดยที่ Subscribe หรือ Publish สามารถใช้อุปกรณ์ได้หลากหลายชนิด แต่ต้องมีแอปพลิเคชัน หรือ โปรแกรมที่รองรับ Node-RED หรือ MQTT นอกจากนี้ Node-RED ยังสามารถรองรับการติดตั้งไลบรารี (Library) เครื่องมือเสริมต่าง ๆ เช่น Python, Modbus TCP/IP และ Cloud Server เป็นต้น เพื่อสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม และมีการประยุกต์ใช้งานระหว่าง Node-RED กับโปรโตคอล Modbus TCP/IP ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.65 สำหรับรายละเอียดการติดตั้งใช้งาน Node-RED ในระบบปฏิบัติการ Windows (อ้างอิงใน <https://nodered.org/docs/getting-started/windows>) และรายละเอียดการติดตั้งใช้งาน Node-RED ในระบบปฏิบัติการ Linux (อ้างอิงใน <https://nodered.org/docs/getting-started/raspberrypi>) จากรายการอ้างอิงสามารถศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการติดตั้งใช้งาน Node-RED สำหรับนักพัฒนาซอฟต์แวร์



รูปที่ 3.65 การประยุกต์ใช้งานระหว่าง Node-RED กับโปรโตคอล Modbus TCP/IP

สำหรับตัวอย่างการเข้าใช้งาน Node-RED สรุบบ่อยเมื่อทำการติดตั้ง Node-RED เสร็จสิ้น เริ่มต้นให้เปิดหน้าต่าง Command Prompt แล้วพิมพ์คำสั่ง `node-red` (ในกรอบสีแดง) แล้วกด Enter ผลลัพธ์ปรากฏ ดังรูปที่ 3.66 จากนั้นเปิดหน้าต่างของ Google Chrome แล้วให้พิมพ์ `http://localhost:1880/` ที่แถบค้นหา (ในกรอบสีแดง) ซึ่งได้หน้าเริ่มต้นใช้งาน Node-RED ผลลัพธ์ปรากฏ ดังรูปที่ 3.67 เพื่อนำไปใช้พัฒนาซอฟต์แวร์และสร้างอัลกอริทึมให้ตอบโจทย์กับลักษณะตามที่ต้องการของนักพัฒนา และในส่วนของ การปิดใช้งาน Node-RED ให้เปิดหน้าต่าง Command Prompt แล้วกดปุ่ม `Ctrl+C` พร้อมกัน Node-RED ก็ถูกปิดใช้งานทันที

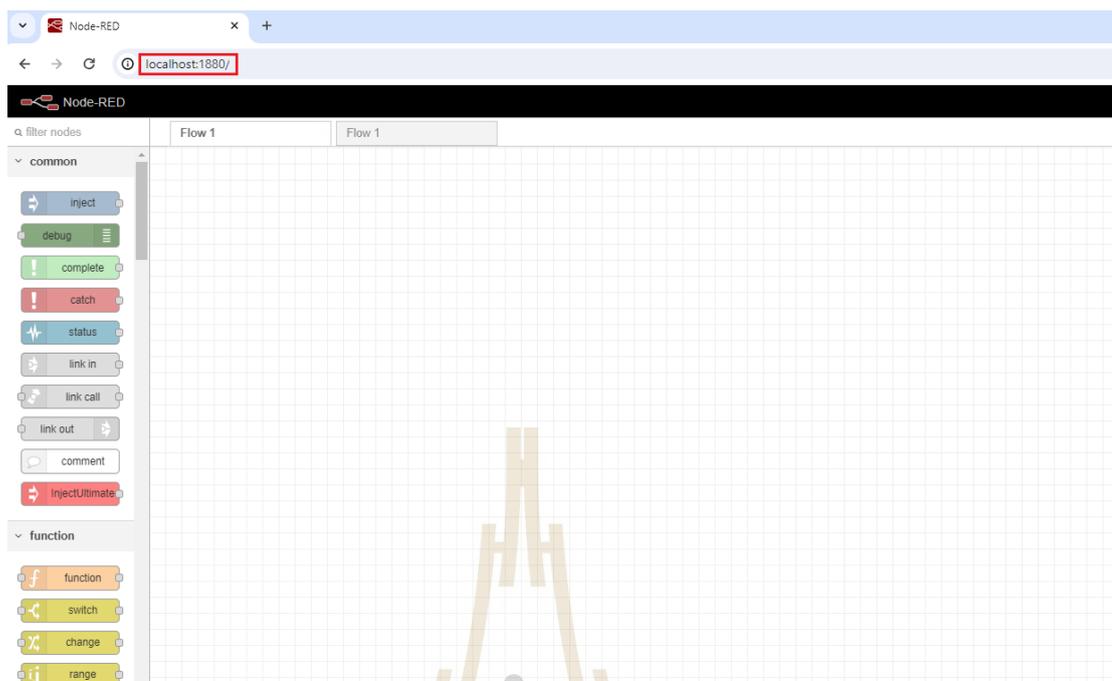
```

node-red
Microsoft Windows [Version 10.0.19045.3930]
(c) Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\ADMIN>node-red
15 Jan 17:34:48 - [info]
Welcome to Node-RED
=====
15 Jan 17:34:48 - [info] Node-RED version: v2.2.2
15 Jan 17:34:48 - [info] Node.js version: v16.4.2
15 Jan 17:34:48 - [info] Windows_NT 10.0.19045 x64 LE
15 Jan 17:34:49 - [info] Loading palette nodes
15 Jan 17:34:54 - [info] Worldmap version 2.28.3
15 Jan 17:34:54 - [info] Dashboard version 3.1.7 started at /ui
15 Jan 17:34:54 - [warn] -----
15 Jan 17:34:54 - [warn] [node-red-contrib-firebase-admin/flow-to-rtdb] Error: Cannot find module 'node-red'
Require stack:
- C:\Users\ADMIN\.node-red\node_modules\node-red-contrib-firebase-admin\rtdb\flow-to-rtdb.js
- C:\Users\ADMIN\AppData\Roaming\npm\node_modules\node-red\node_modules\node-red\registry\lib\loader.js
- C:\Users\ADMIN\AppData\Roaming\npm\node_modules\node-red\node_modules\node-red\registry\lib\index.js
- C:\Users\ADMIN\AppData\Roaming\npm\node_modules\node-red\node_modules\node-red\runtime\lib\nodes\index.js
- C:\Users\ADMIN\AppData\Roaming\npm\node_modules\node-red\node_modules\node-red\runtime\lib\index.js
- C:\Users\ADMIN\AppData\Roaming\npm\node_modules\node-red\lib\red.js
- C:\Users\ADMIN\AppData\Roaming\npm\node_modules\node-red\red.js

```

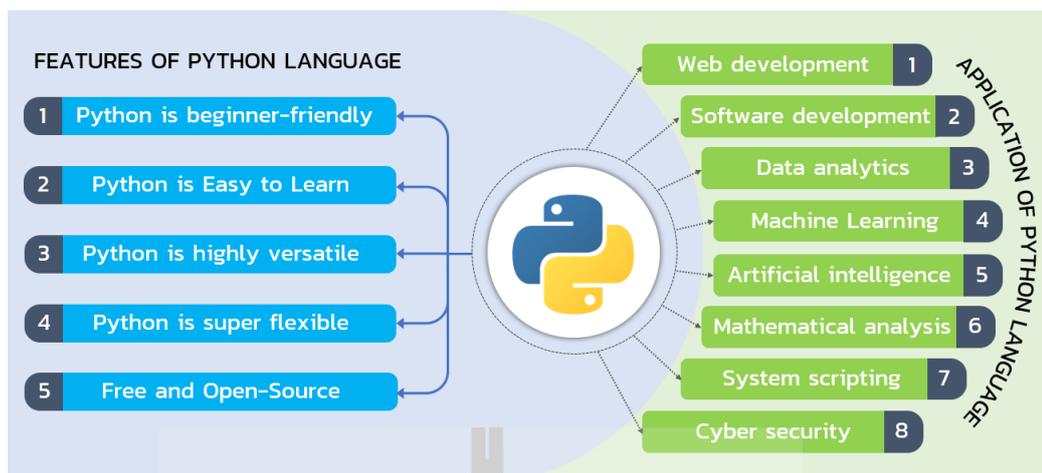
รูปที่ 3.66 พิมพ์คำสั่ง node-red บน Command Prompt



รูปที่ 3.67 หน้าเริ่มต้นใช้งาน Node-RED

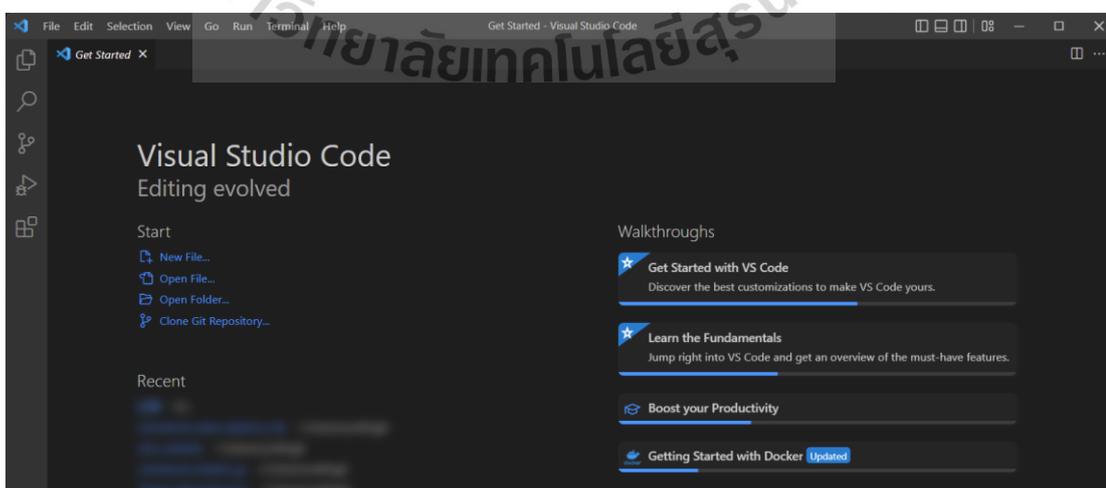
3.12 Python

สำหรับ Python หรือ Python Language คือ ภาษาที่ใช้โปรแกรมแบบอินเทอร์พรีเตอร์ ถูกพัฒนาขึ้นโดย นักพัฒนา ชื่อ Guido van Rossum ในปี ค.ศ. 1990 ปัจจุบันได้รับการดูแลโดย มูลนิธิซอฟต์แวร์ไพทอน ซึ่งมีจุดเด่น คือ ภาษาไพทอนที่เป็นภาษาสคริปต์ ทำให้ใช้เวลาในการเขียนและคอมไพล์ที่รวดเร็ว จึงเหมาะกับการดูแล Administration System และที่สำคัญมีการสนับสนุนภาษาไพทอนซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบปฏิบัติการ Windows และ Linux เพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรมในภาษาไพทอนโดยใช้ไลบรารีต่าง ๆ ทั้งนี้ Python ได้ถูกนำมาพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งในรูปแบบ Application of Python Language อย่างแพร่หลาย ซึ่งมีการใช้งาน Framework ต่าง ๆ ที่ได้รับความนิยมอย่างมาก 8 ข้อ ได้แก่ Web Development, Software Development, Data Analytics, Machine Learning, Artificial Intelligence, Mathematical Analysis, System Scripting และ Cyber Security อีกทั้งยังมี Features of Python Language สำหรับนักพัฒนาซอฟต์แวร์ได้ทั้ง 5 ข้อ ได้แก่ Python is Beginner-Friendly, Python is Easy to Learn, Python is Highly Versatile, Python is Super Flexible และ Free and Open-Source มีรูปแบบฟังก์ชันการใช้งานของ Python ระหว่าง Application of Python Language และ Features of Python Language ดังรูปที่ 3.68 (อ้างอิงข้อมูลจาก <https://www.javatpoint.com/python-tutorial>)

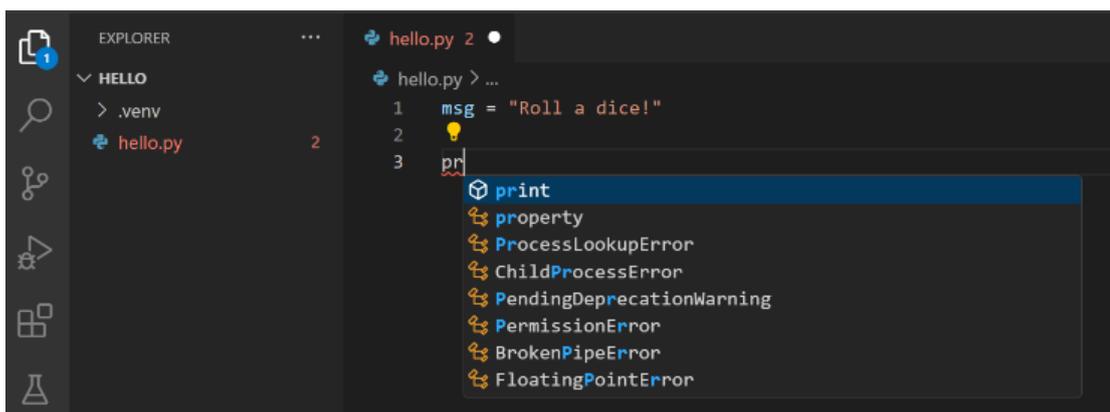


รูปที่ 3.68 รูปแบบฟังก์ชันการใช้งานของ Python

นอกจากนี้การใช้ไลบรารีต่าง ๆ ด้วย Python ยังเป็นการลดภาระของนักพัฒนาซอฟต์แวร์ได้เป็นอย่างดี และไม่ต้องเสียเวลากับการเขียนคำสั่งที่ซ้ำ ๆ เช่นการแสดงผลข้อมูลออกสู่หน้าจอ หรือการรับส่งค่าต่าง ๆ เป็นต้น โดยการใช้ Python ที่มีคุณสมบัติเป็นภาษาเขียนโปรแกรมไดนามิกส์ ซึ่งมีการจัดการประมวลผลโดยใช้โปรแกรม Visual Studio Code (VS Code) สำหรับรายละเอียดการติดตั้งใช้งานโปรแกรม Visual Studio Code ในระบบปฏิบัติการ Windows ในพีซี (อ้างอิงใน <https://dev.classmethod.jp/articles/how-to-install-visual-studio-code-on-windows10-11-2022/>) ซึ่งแสดงตัวอย่างการหน้าเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม Visual Studio Code ดังรูปที่ 3.69 สำหรับวิธีการติดตั้งเพื่อรองรับใช้งาน Python บนโปรแกรม Visual Studio Code (อ้างอิงใน <https://code.visualstudio.com/docs/python/python-tutorial>) โดยแสดงหน้าเริ่มต้นใช้งาน Python ในโปรแกรม Visual Studio Code ดังรูปที่ 3.70



รูปที่ 3.69 หน้าเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม Visual Studio Code



รูปที่ 3.70 หน้าเริ่มต้นใช้งาน Python บนโปรแกรม Visual Studio Code

อีกหนึ่งหัวใจหลักของ Python เป็นการสนับสนุนการเขียนโปรแกรมหลากหลายรูปแบบที่ประกอบไปด้วยการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (Imperative) การเขียนโปรแกรมแบบฟังก์ชันและการเขียนโปรแกรมที่มีขั้นตอนมีไลบรารีครอบคลุมการทำงาน เช่น Open Source Library ที่กำลังเป็นที่นิยมสำหรับการพัฒนาโปรแกรมทาง Computer Vision ที่มีไลบรารีต่าง ๆ ที่สามารถสร้างโปรแกรมประยุกต์ใช้โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเป้าไปที่การแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์แบบเรียลไทม์ที่พัฒนาขึ้นโดย Intel เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลายรูปแบบของนักพัฒนาซอฟต์แวร์

ทั้งนี้ Python ถูกนำมาเป็นเครื่องมือสำหรับนักพัฒนาซอฟต์แวร์และนักวิจัยที่ใช้ในการศึกษาเป็นจำนวนมาก เพื่อใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลสำหรับสิ่งที่ต้องการพัฒนาขึ้นมา ยกตัวอย่างเช่นการใช้ไลบรารี Open CV ใน Python ที่สามารถสร้างโปรแกรมประยุกต์ใช้โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเป้าไปที่การแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์แบบเรียลไทม์ผ่านการเชื่อมต่อกล้อง ซึ่งสามารถใช้ไลบรารี Open CV ใน Python ประยุกต์ใช้งานหลากหลายด้านมาก ไม่ว่าจะเป็นใช้นับจำนวนมนุษย์ที่เดินผ่านหน้าประตูหรือการติดตามขอบเลนถนนของเส้นทางในการขับขี่ รวมทั้งใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของมนุษย์และสัตว์ และยังมีส่วนนำไปใช้กับงานอื่น ๆ อีกมากมาย อีกทั้ง Open CV ยังเป็นไลบรารีแบบ Cross-Platform และใช้งานได้ฟรีภายใต้ลิขสิทธิ์ของ BSD แบบ Open-Source BSD License ถัดมาเป็นการกล่าวถึงเฉพาะส่วนสำคัญการใช้ไลบรารี Open CV ใน Python สำหรับรูปแบบประยุกต์ใช้กับระบบการนำทางอัตโนมัติสำหรับยานยนต์ หรือ หุ่นยนต์ เป็นต้น โดยแสดงรายละเอียดรูปแบบ Line Following และ Hough Line Transform ซึ่งเป็นรูปแบบที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน และมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.12.1 และ 3.12.2 ตามลำดับ ดังนี้

3.12.1 รูปแบบ Line Following

เทคโนโลยีการติดตามหรือนำทางส่วนใหญ่มักใช้รูปแบบการติดตามเส้น ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้พัฒนาระบบนำทางและติดตามเส้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยส่วนใหญ่ประยุกต์ควบคู่กับกล้อง จึงทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของกล้องที่นำมาใช้และคุณสมบัติเฉพาะด้วย รวมทั้งปัจจัยในเรื่องวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตตัวกล้องขึ้นมาและส่งผลในเรื่องของต้นทุนการผลิตตามมา สำหรับรูปแบบ Line Following ได้ถูกนำมาใช้สำหรับนักพัฒนาเพื่อให้

สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับลักษณะงานที่ต้องการได้ ซึ่งรูปแบบนี้เป็นรูปแบบที่ใช้วิธีเดินตามเส้นสีดำหรือสีอื่น ๆ ที่กำหนดไว้บนเส้นทาง จากนั้นใช้กล้องตรวจจับสีบนเส้นทางเพื่อนำทางไปยังเป้าหมายที่กำหนด โดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานในรูปแบบ Line Following ดังนี้

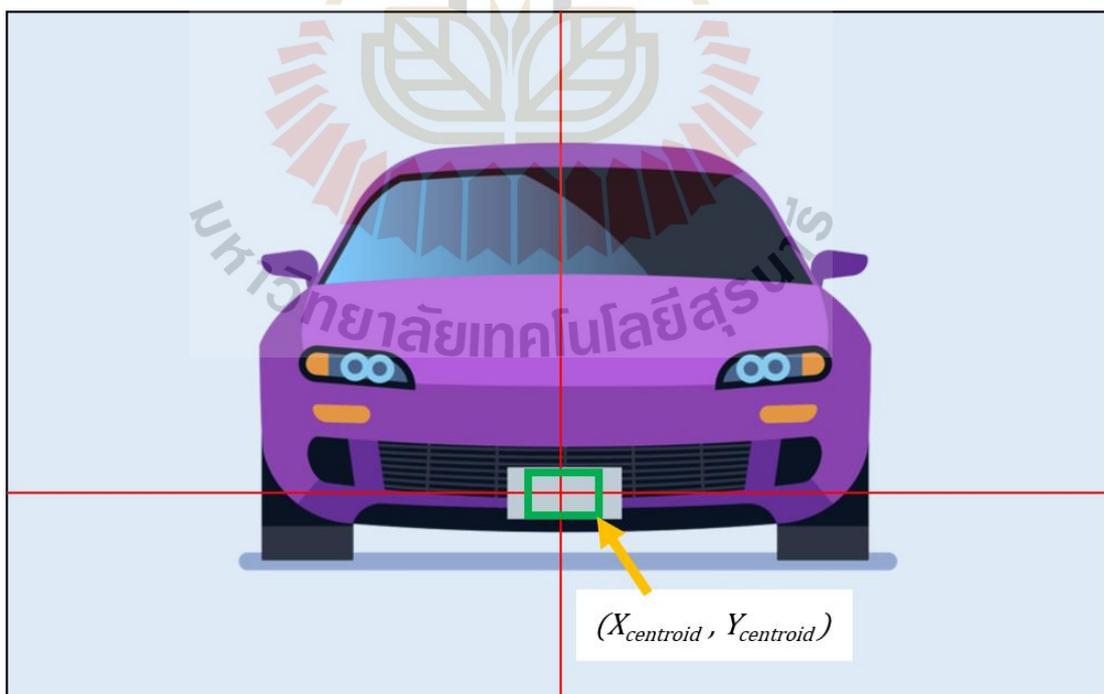
1) ROI (Region of Interest) คือ การแยกพื้นที่โดยใช้วิธีการรวมจุดที่สนใจ ซึ่งวิธีการทำงานของ ROI กับ Open CV ใน Python ต้องมีการระบุพื้นที่เป้าหมายก่อน จากนั้นสามารถโฟกัสไปยังพื้นที่ที่สนใจด้วยการค้นหาจุดศูนย์กลางของภาพจากกล้อง ดังรูปที่ 3.71 เมื่อค้นพบจุดศูนย์กลางของภาพจึงมีการสร้างกรอบที่เป็นขอบเขตของพื้นที่ที่สนใจ เพื่อให้ง่ายต่อการมองเห็นในจุดเป้าหมายของภาพจากกล้อง โดยการคำนวณหาจุดศูนย์กลางของภาพ ($X_{centroid}$, $Y_{centroid}$) ในแนวแกน X ดังสมการที่ 3.19 และจุดศูนย์กลางของภาพในแนวแกน Y ดังสมการที่ 3.20 (อ้างอิงข้อมูลจาก <https://medium.com/data-and-beyond/area-extraction-using-region-of-interest-roi-6d58653c5847>)

$$X_{centroid} = Image\ Width / 2 \quad (3.19)$$

$$Y_{centroid} = Image\ Height / 2 \quad (3.20)$$

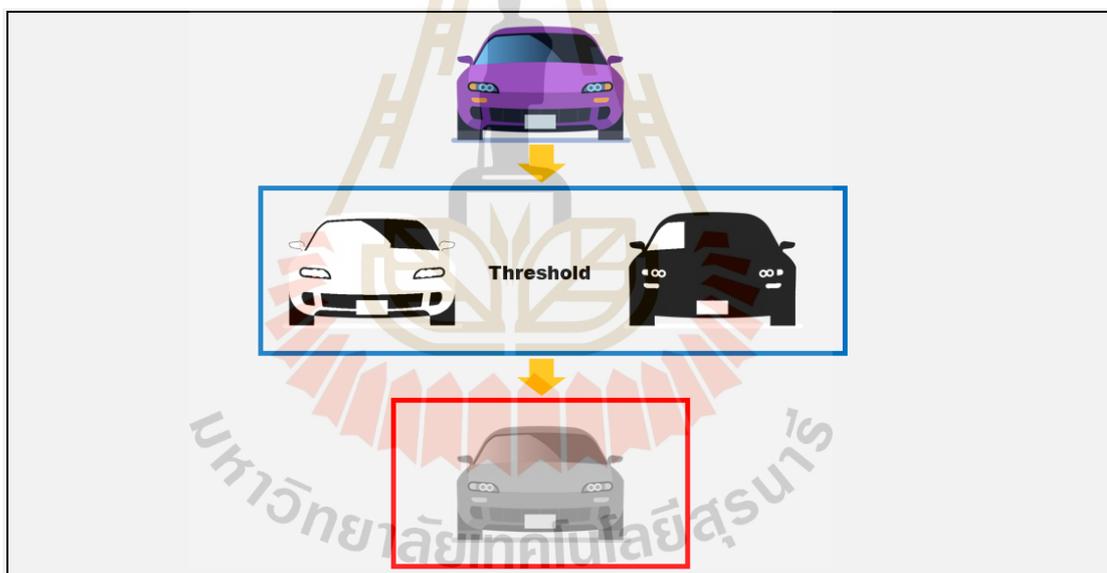
โดยที่ $Image\ Width$ คือ ความกว้างของภาพในแนวแกน X

$Image\ Height$ คือ ความยาวของภาพในแนวแกน Y



รูปที่ 3.71 การโฟกัสไปยังพื้นที่ที่สนใจด้วยการค้นหาจุดศูนย์กลางของภาพ

2) Threshold คือ การกำหนดเกณฑ์เป็นเทคนิคชนิดหนึ่งใน Open CV ซึ่งเป็นการกำหนดค่าพิกเซล (Pixel) โดยสัมพันธ์กับค่าเกณฑ์ที่ระบุ ในการกำหนดขีดจำกัดค่าพิกเซลแต่ละค่านั้น ถูกเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัด หากค่าพิกเซลน้อยกว่าเกณฑ์ให้ตั้งค่าเป็น 0 เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสุ่มค่าเป็นค่าสูงสุด คือ 255 สำหรับการ Threshold เป็นเทคนิคการที่ได้รับความนิยมมากที่ใช้ในการแยกวัตถุส่วนที่เป็นพื้นหน้าออกจากพื้นหลัง ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ซึ่งพัฒนาให้รองรับการ Threshold เพื่อใช้เป็นเทคนิคการกำหนดขีดจำกัดของภาพในระดับสีเทา จากการประมวลผลภาพสีมาแปลงเป็นภาพขาวดำ และตัวอย่างการ Threshold ดังรูปที่ 3.72 นอกจากนี้การ Threshold เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับรูปแบบสี HSV (Hue, Saturation, Value) ที่เป็นตัวแทนทางเลือกของรูปแบบสี RGB (Red, Green, Blue) ซึ่งออกแบบให้สอดคล้องกับวิสัยทัศน์ของมนุษย์มากขึ้นในการรับรู้คุณลักษณะของสี ซึ่งอธิบาย RGB มีพิกเซลแสดงด้วยพารามิเตอร์ 3 สี ได้แก่ สีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง โดยพารามิเตอร์แต่ละตัวมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 255 หรือ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง FF ในเลขฐานสิบหก (อ้างอิงจาก <https://www.geeksforgeeks.org/python-thresholding-techniques-using-opencv-set-1-simple-thresholding/>)



รูปที่ 3.72 การ Threshold ประมวลผลภาพสีแปลงเป็นภาพขาวดำ

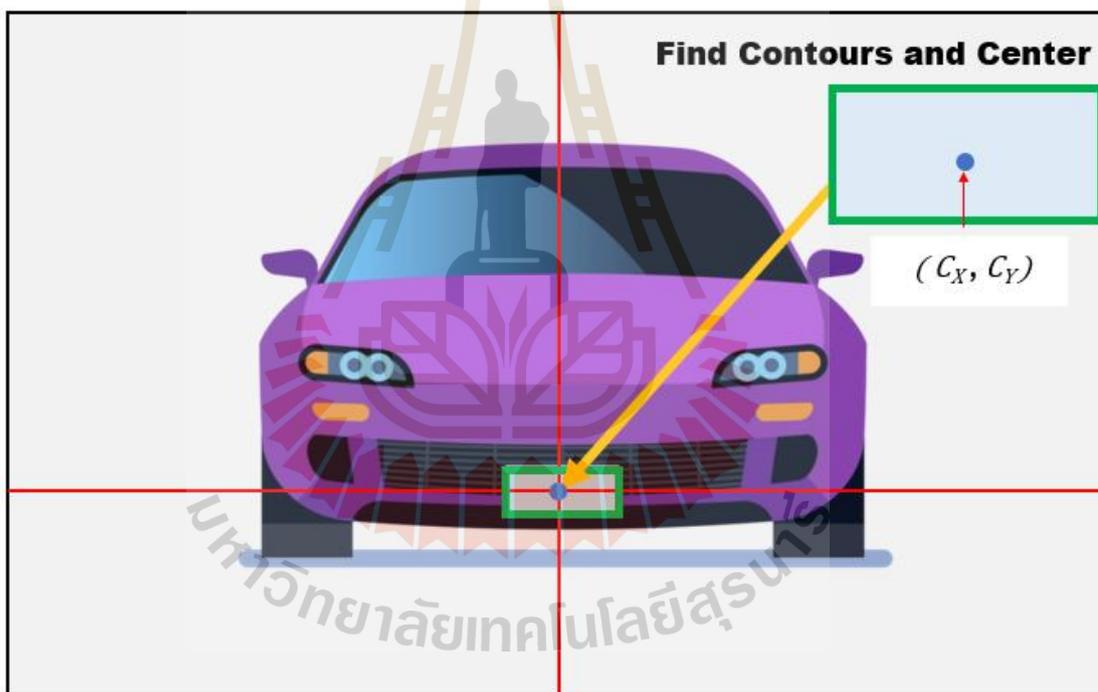
3) Find Contours and Center คือ การค้นหาจุดศูนย์กลางของเป้าหมายการกำหนดกรอบอย่างชัดเจน โดยใช้ Open CV จากการ ROI และ Threshold ก่อนหน้านี้ คำนวณหาช่วงเวลาของภาพด้วยการ Image Moment ซึ่งการ Image Moment คือ ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของความเข้มของพิกเซลของภาพ ซึ่งช่วยให้ค้นหาคุณสมบัติเฉพาะบางอย่างของรูปภาพได้ เช่น รัศมีพื้นที่ หรือ จุดศูนย์กลาง เป็นต้น ในการค้นหาจุดศูนย์กลางของรูปภาพโดยทั่วไปใช้วิธีแปลงเป็นรูปแบบไบนารี (Binary) เพื่อหาจุดศูนย์กลางภาพ (C_x , C_y) ดังสมการที่ 3.21 และ 3.22 ตามลำดับ

และมีตัวอย่าง Find Contours and Center ดังรูปที่ 3.73 (อ้างอิงจาก <https://learnopencv.com/find-center-of-blob-centroid-using-opencv-cpp-python/>)

$$C_X = M_{10} / M_{00} \quad (3.21)$$

$$C_Y = M_{01} / M_{00} \quad (3.22)$$

โดยที่ C_X คือ ค่าพิกัดช่วงเวลาในแนวแกน X ของภาพ
 C_Y คือ ค่าพิกัดช่วงเวลาในแนวแกน Y ของภาพ
 M_{10} คือ ช่วงเวลาในแนวแกน X ของภาพ
 M_{01} คือ ช่วงเวลาในแนวแกน Y ของภาพ
 M_{00} คือ ช่วงเวลาในขณะนั้นของภาพ



รูปที่ 3.73 การ Find Contours and Center ของภาพ

3.12.2 รูปแบบ Hough Line Transform

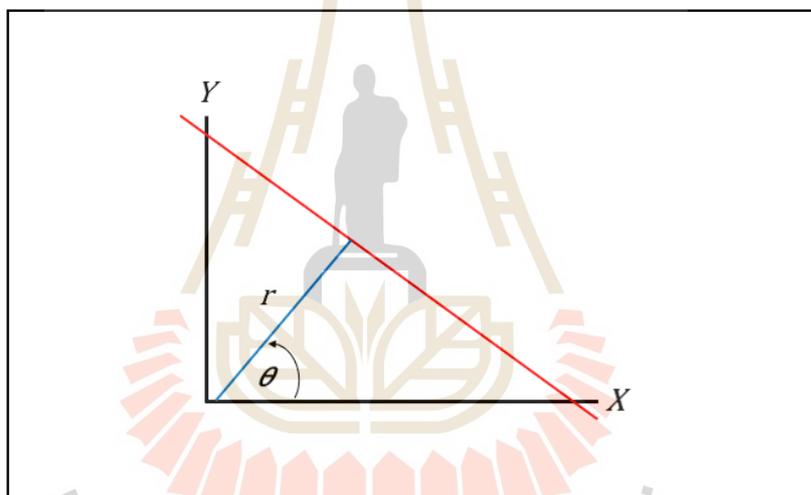
สำหรับรูปแบบ Hough Line Transform เป็นอีกวิธีที่ใช้ในการประมวลผลภาพ โดยสามารถใช้งานใน Python ได้ เพื่อใช้ตรวจจับภาพที่มีลักษณะรูปร่างต่าง ๆ ด้วยฟังก์ชัน Open CV ซึ่งหากรูปร่างนั้นสามารถแสดงในรูปแบบเรขาคณิตได้ ก็สามารถตรวจจับรูปร่างได้แม้จะแตกหักหรือบิดเบี้ยวเล็กน้อยก็ตาม สำหรับ Hough Line Transform ใช้ในการตรวจจับแบบเส้นโดยใช้วิธีการแปลงตามลักษณะของรูปภาพ โดยมีพื้นฐานของวิธีการคำนวณที่ใช้กราฟเชิงเส้นรูปแบบ

Hough Line Transform ดังรูปที่ 3.74 และจากรูปที่ 3.74 ด้วยความเป็นคุณสมบัติสมการเชิงเส้น จึงมีรูปแบบการคำนวณเพื่อประยุกต์ใช้งาน Hough Line Transform ดังสมการที่ 3.23 และ 3.24 (อ้างอิงจาก <https://www.geeksforgeeks.org/line-detection-python-opencv-houghline-method/>)

$$y = (-\cos \theta / \sin \theta) * x + (r / \sin \theta) \quad (3.23)$$

$$r = (x * \cos \theta) + (y * \sin \theta) \quad (3.24)$$

โดยที่ y คือ จุดพิกัดในแนวแกน Y
 x คือ จุดพิกัดในแนวแกน X
 r คือ ระยะตั้งฉากจากจุดกำเนิดถึงเส้น
 θ คือ มุมที่เกิดจากเส้นตั้งฉากและแกน X ที่วัดในทิศทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.74 กราฟสมการเชิงเส้นรูปแบบ Hough Line Transform

3.13 สรุป

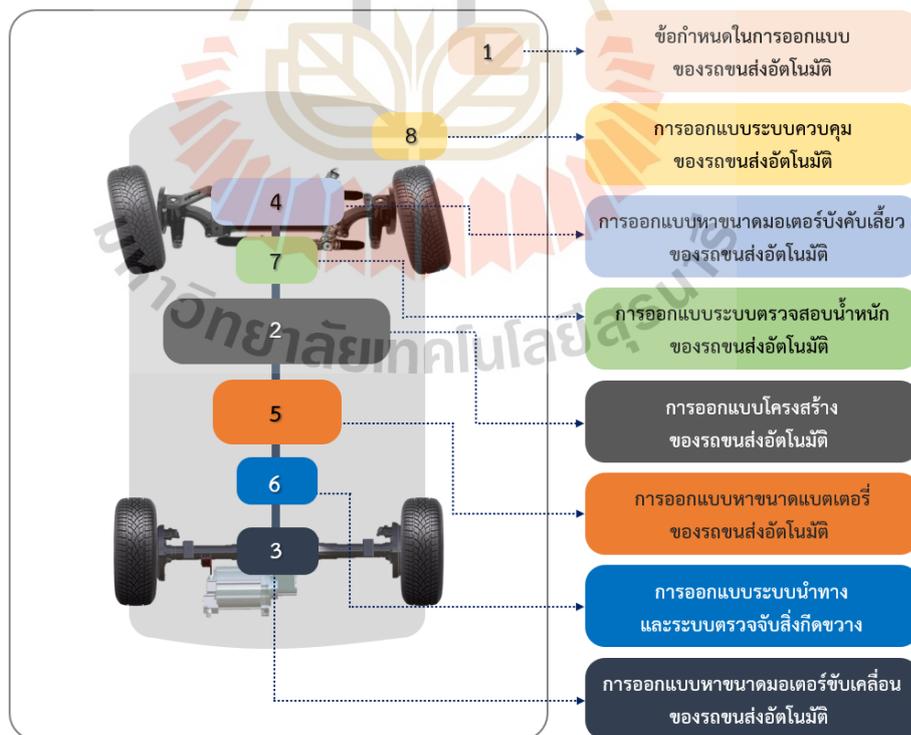
ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ การพัฒนาระบบขนส่งแบ่งปันสำหรับพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถขนส่งอัตโนมัติที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า โดยศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและเกิดประโยชน์สูงสุดแก่งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่ มอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ระบบบังคับเลี้ยวของยานยนต์ ระบบนำทางอัตโนมัติ ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ระบบตรวจสอบน้ำหนัก ระบบควบคุมในภาคอุตสาหกรรม โพรโตคอลการสื่อสารในภาคอุตสาหกรรม การสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus Node-RED และ Python ซึ่งจากการศึกษาค้นคว้าสามารถใช้เป็นทฤษฎีกล่าวอ้างในบทต่อ ๆ ไปได้ ทั้งนี้เพื่อประโยชน์และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้วิจัย

บทที่ 4

การออกแบบระบบขนส่งแป็งมันสำปะหลังด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ

4.1 บทนำ

การออกแบบระบบขนส่งแป็งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ โดยอาศัยหลักการด้านเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าในการดำเนินงานวิจัย เพื่อเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นในบทนี้กล่าวถึงหลักการออกแบบระบบขนส่งแป็งมันสำปะหลังอัตโนมัติ ซึ่งประกอบไปด้วย 8 หัวข้อหลัก ได้แก่ (1) ข้อกำหนดในการออกแบบของรถขนส่งอัตโนมัติ (2) การออกแบบโครงสร้างของรถขนส่งอัตโนมัติ (3) การออกแบบหาขนาดมอเตอร์ขับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติ (4) การออกแบบหาขนาดมอเตอร์บังคับเลี้ยวของรถขนส่งอัตโนมัติ (5) การออกแบบหาขนาดแบตเตอรี่ของรถขนส่งอัตโนมัติ (6) การออกแบบระบบนำทางและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง (7) การออกแบบระบบตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติ และ (8) การออกแบบระบบควบคุมของรถขนส่งอัตโนมัติ โดยชี้แจงรายละเอียดต่าง ๆ เป็นภาพประกอบ ดังรูปที่ 4.1 ทั้งนี้ยังกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์และเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ออกแบบในการดำเนินงานวิจัยเพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้



รูปที่ 4.1 หลักการออกแบบระบบขนส่งแป็งมันสำปะหลังอัตโนมัติ

4.2 ข้อกำหนดของการออกแบบและพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติ

ระบบขนส่งแ่งมันสำปะหลังที่ต้องการออกแบบเพื่อนำไปพัฒนาระบบขนส่งใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ให้มีการเพิ่มประสิทธิภาพด้านระบบขนส่งมากยิ่งขึ้น ซึ่งปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่มีหลากหลายรูปแบบ แต่บริษัทมีความต้องการที่จะนำเทคโนโลยีที่เป็นไปได้มากที่สุดมาใช้ออกแบบและพัฒนาเพื่อให้ตอบสนองความต้องการ แต่ต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นหลักและเกิดประโยชน์สูงสุดต่อบริษัท โดยในที่ประชุมได้ลงมติเป็นเอกฉันท์และกำหนดขอบเขตงานวิจัยและพัฒนาตามที่บริษัทต้องการ และตั้งเป้าหมายของงานวิจัยที่จะต้องดำเนินการให้เกิดผลสำเร็จ คือ การพัฒนาระบบขนส่งแ่งมันสำปะหลังในโรงงานด้วยรถขนส่งอัตโนมัติระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแ่งดังรูปที่ 4.2 และมีข้อกำหนดรายละเอียดต่าง ๆ ที่แสดงถึงความต้องการโดยมีขอบเขตทั้ง 8 ข้อ ดังนี้

- 4.2.1) พัฒนารถขนส่งโดยใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าทั้งคันมีพิกัดบรรทุกได้สูงสุด 4,800 kg
- 4.2.2) ใช้เทคโนโลยีนำทางระหว่างอาคารเป็นแบบอัตโนมัติ
- 4.2.3) ใช้เทคโนโลยีตรวจจับสิ่งกีดขวางที่แม่นยำเพื่อความปลอดภัยเป็นหลัก
- 4.2.4) ขนส่งแ่งมันสำปะหลังขนาด 480,000 kg หรือ 100 รอบ ภายใน 1 วัน
- 4.2.5) ขนส่งจากจุดเริ่มต้น (ไลน์ผลิต) ไปยังจุดสิ้นสุด (โกดังเก็บแ่ง) โดยมีระยะทาง 200 m
- 4.2.6) ในแต่ละรอบต้องบรรทุกพิกัดสูงสุด 4,800 kg ต่อ รอบ หรือ 2,400 kg ต่อ รอบ
- 4.2.7) ใช้เวลาในการขนส่งแต่ละรอบทั้งขาไปและขากลับไม่เกิน 15 นาที (Minute)
- 4.2.8) กำหนดความเร็วสูงสุดในการขับเคลื่อนต้องอยู่ในช่วง 0 ถึง 3 m/s



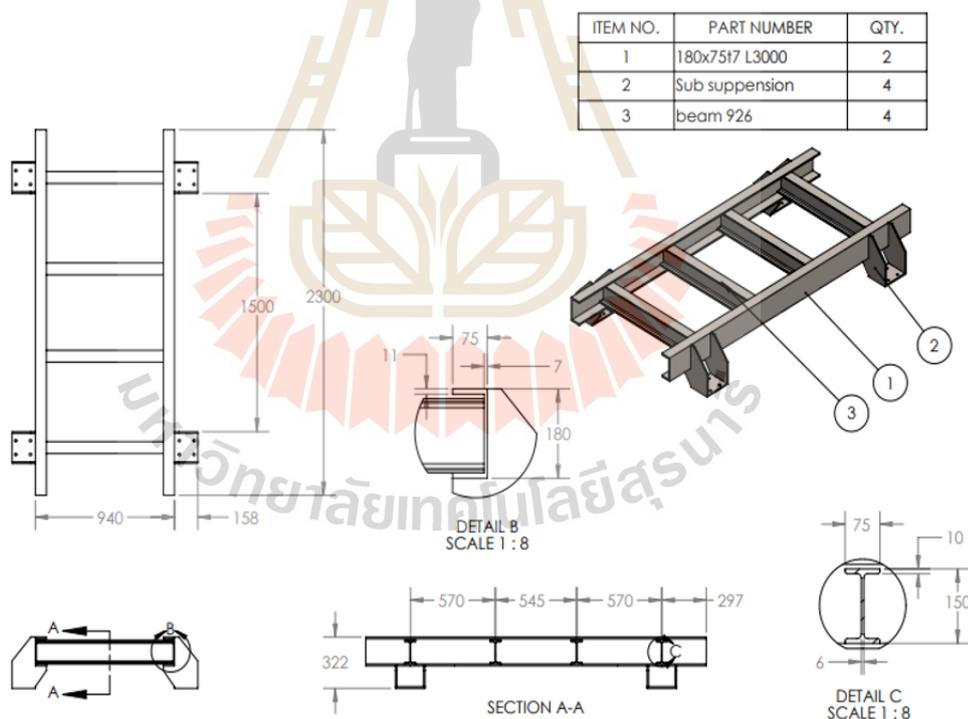
รูปที่ 4.2 ระบบขนส่งแ่งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ

จากรูปที่ 4.2 อธิบายถึงระบบที่ต้องการใช้ขนส่งแ่งมันสำปะหลังจากจุดเริ่มต้น หรือไลน์ผลิต (หมายเลข 1) ขนส่งแ่งมันสำปะหลังไปยังจุดสิ้นสุด หรือ โกดังเก็บแ่ง (หมายเลข 2) ในระยะทาง 200 m (หมายเลข 3) โดยต้องออกแบบและพัฒนาเป็นรถขนส่งอัตโนมัติ (หมายเลข 4) เพื่อใช้ขนส่งแ่งมันสำปะหลังของเส้นทางที่มีโกดัง หรือ เซ็นเซอร์นำทาง (หมายเลข 5) และมีสถานีชาร์จไฟ หรือจุดชาร์จไฟ (หมายเลข 6) เมื่อรถขนส่งอัตโนมัติพลังงานใกล้หมด รวมทั้งให้รถโฟล์คลิฟท์ (หมายเลข 7) ตักกระสอบแ่งมันสำปะหลัง (หมายเลข 8) ขึ้นรถขนส่งอัตโนมัติ

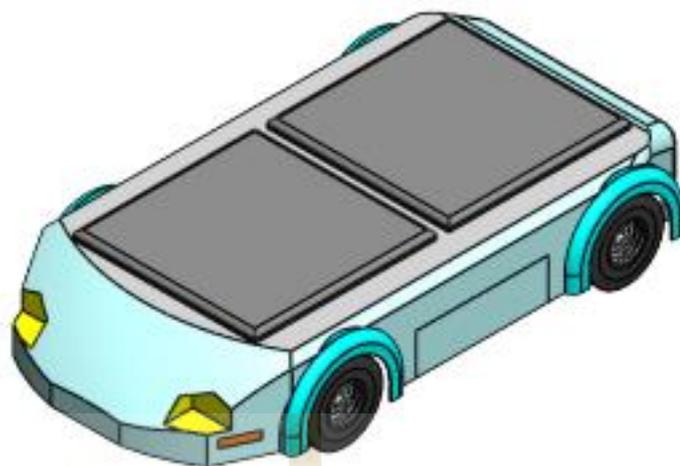
ที่จุดเริ่มต้นไปยังจุดสิ้นสุด จากนั้นให้รถโพล์คลิฟท์ทดสอบแบ่งมันสำปะหลังลงจากรถขนส่งอัตโนมัติ และให้รถขนส่งอัตโนมัติวิ่งถอยหลังกลับมายังจุดเริ่มต้น เมื่อถึงจุดเริ่มต้นให้เริ่มกระบวนการซ้ำ ๆ จนกระทั่งขนส่งแบ่งมันสำปะหลังได้ครบจำนวนตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ในแต่ละวัน

4.3 การออกแบบโครงสร้างของรถขนส่งอัตโนมัติ

การพัฒนาของรถขนส่งอัตโนมัติในปัจจุบันจำเป็นต้องกล่าวถึงในส่วนของการออกแบบโครงสร้างของตัวรถ เพื่อให้สามารถรองรับการบรรทุกน้ำหนัก หรือน้ำหนักแบ่งที่ต้องการบรรทุกต่อรอบ ให้ได้ตามเป้าหมายที่ต้องการ สำหรับแนวทางของการดำเนินงานวิจัยซึ่งจะมีส่วนที่เป็นการออกแบบทางด้านของโครงสร้างทางกล (หมายเหตุ : ยกเว้นรายละเอียดทางกลเชิงลึกสำหรับการออกแบบ) เนื่องจากได้รับการออกแบบโดยทางวิศวกรรมเครื่องกล หรือวิศวกรรมยานยนต์ ดังนั้นรูปแบบโครงสร้างทางกลของรถขนส่งอัตโนมัติที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid Work เบื้องต้นเริ่มต้นด้วยการออกแบบในส่วนของ Body Frame และภาพรวมของโครงสร้างรถขนส่งอัตโนมัติ ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



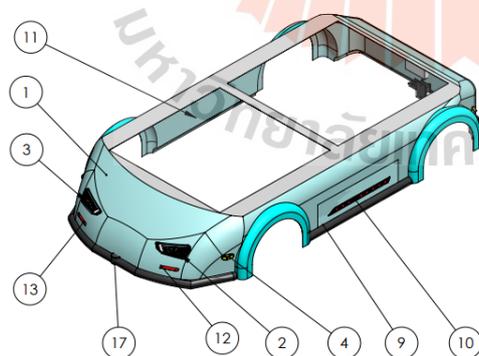
รูปที่ 4.3 Body Frame รถขนส่งอัตโนมัติ



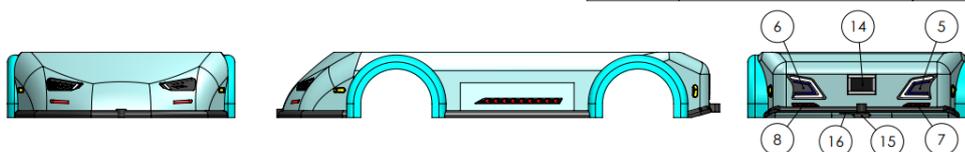
รูปที่ 4.4 ภาพรวมของโครงสร้างรถขนส่งอัตโนมัติ

จากนั้นออกแบบในส่วนของ Body Light and Sensor เพื่อใช้เป็น Cover ของรถขนส่งอัตโนมัติ ดังรูปที่ 4.5 (หมายเหตุ : รถที่พัฒนาขึ้นจริงอาจมีการเปลี่ยนแปลง Cover ในส่วนของสีรถที่ใช้และตำแหน่งของการติดตั้งเซ็นเซอร์ตามความเหมาะสม) รวมทั้งออกแบบโครงสร้างรองรับการยึดกับ Cover โดยแสดงรายละเอียดพร้อมกับขนาด (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) มุมมองด้านหน้าและด้านข้างของรถขนส่งอัตโนมัติ ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

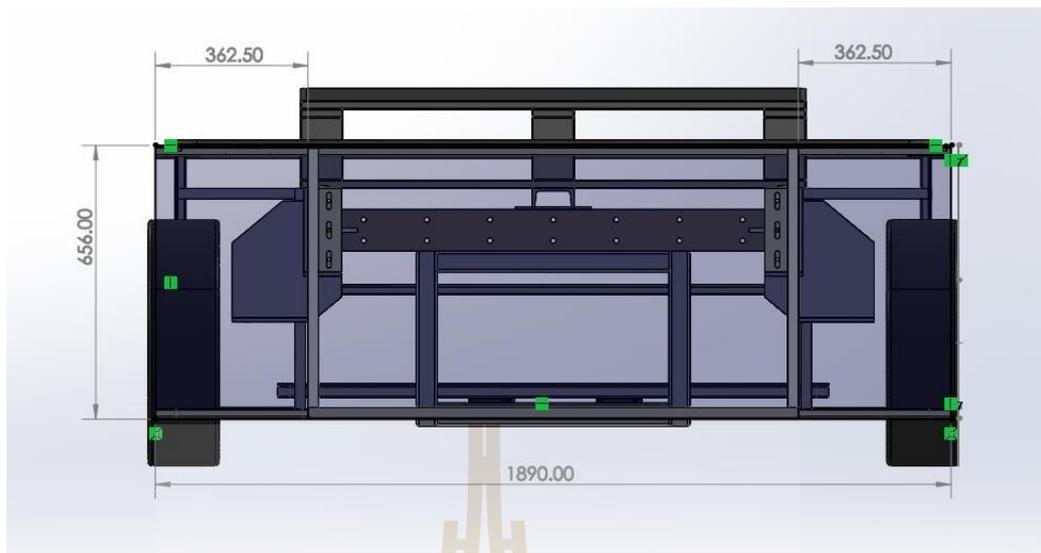
5.Body Light and Sensor



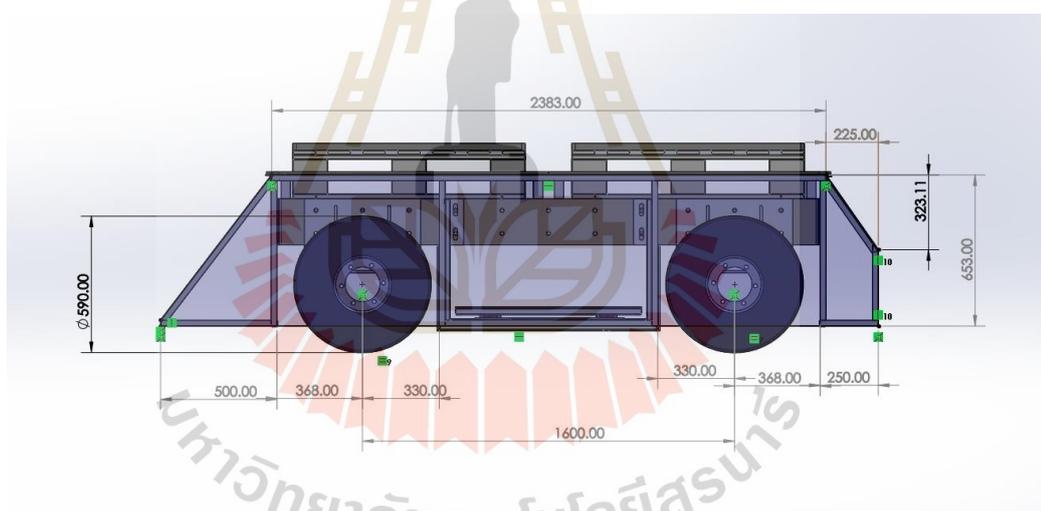
ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	body design1 for Light	1
2	Head Light to body	1
3	Head Light to body L	1
4	Turn Light	4
5	Rear Light	1
6	Rear Light L	1
7	Rear Light bottom	1
8	Rear Light bottom L	1
9	Body close	1
10	Side Light	1
11	Side Light L	1
12	Turn Light bottom	1
13	Turn Light bottom L	1
14	Device12 Monitor HMI 7in	1
15	Device5 Flow sensor FLW100	2
16	Device4 Charger RPKIT90-100	1
17	Device9 Scanning PBS-03JN	2



รูปที่ 4.5 Body Light and Sensor ของรถขนส่งอัตโนมัติ



รูปที่ 4.6 มุมมองด้านหน้าโครงสร้างรองรับการยึดกับ Cover ของรถขนส่งอัตโนมัติ



รูปที่ 4.7 มุมมองด้านข้างโครงสร้างรองรับการยึดกับ Cover ของรถขนส่งอัตโนมัติ

ในส่วนของการออกแบบล้อของรถขนส่งอัตโนมัติ ซึ่งใช้เป็นล้อยางที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในยานพาหนะขับเคลื่อนด้วยความเร็วต่ำที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกทุกมาก ๆ โดยใช้ล้อยางตัน (ไม่มีลมยาง) หรือสเปคของล้อรถโฟล์คคลิฟท์ ที่สามารถใช้งานบนพื้นผิวถนนขรุขระและเป็นที่ยอมรับใช้ในประเภทของงาน เช่น งานการทหาร งานก่อสร้าง งานในสนามบิน และงานในโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยเหตุนี้จากการออกแบบในส่วนของโครงสร้างรถที่ใช้โปรแกรม Solid Work เบื้องต้น สามารถออกแบบโดยเลือกใช้สเปคของล้อรถโฟล์คคลิฟท์ Tyre Size ที่ 6 เบอร์ 650-10 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อด้านนอกสุด 579 มิลลิเมตร (mm) หรือ 0.579 เมตร (m) รัศมี 0.28 m รายละเอียดดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นล้อยางตันเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งที่ใช้ยางเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตและมีสัดส่วน

ปริมาณการใช้ยางสูงกว่าล้อแบบเติมลม โดยมีจุดเด่น คือ ไม่มีปัญหายางระเบิดจึงทำให้ต้นทุนในการเปลี่ยนยางใหม่ลดลง และทนทานกว่าล้อแบบเติมลมจึงช่วยลดปริมาณของเสียจากล้อยางใช้แล้ว สำหรับโครงสร้างยางตัน แบ่งออกเป็น 2 ชั้น โดยยางตันชั้นที่ 1 คือ โครงสร้างชั้นในผลิตจากไฟเบอร์ชนิดพิเศษมีคุณสมบัติในการป้องกันการลื่นของกระทะล้อและใช้งานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่สะสมความร้อน และยางตันชั้นที่ 2 คือ โครงสร้างชั้นนอก หรือดอกยาง ด้วยสูตรยางที่มีคุณสมบัติพิเศษทำให้ดอกยางตันทนทานต่อการสึกหรอต่อแรงเสียดทานและแรงดึง รวมทั้งยึดเกาะพื้นผิวได้ดี ทำให้มีความนุ่มนวลในการขับขี่

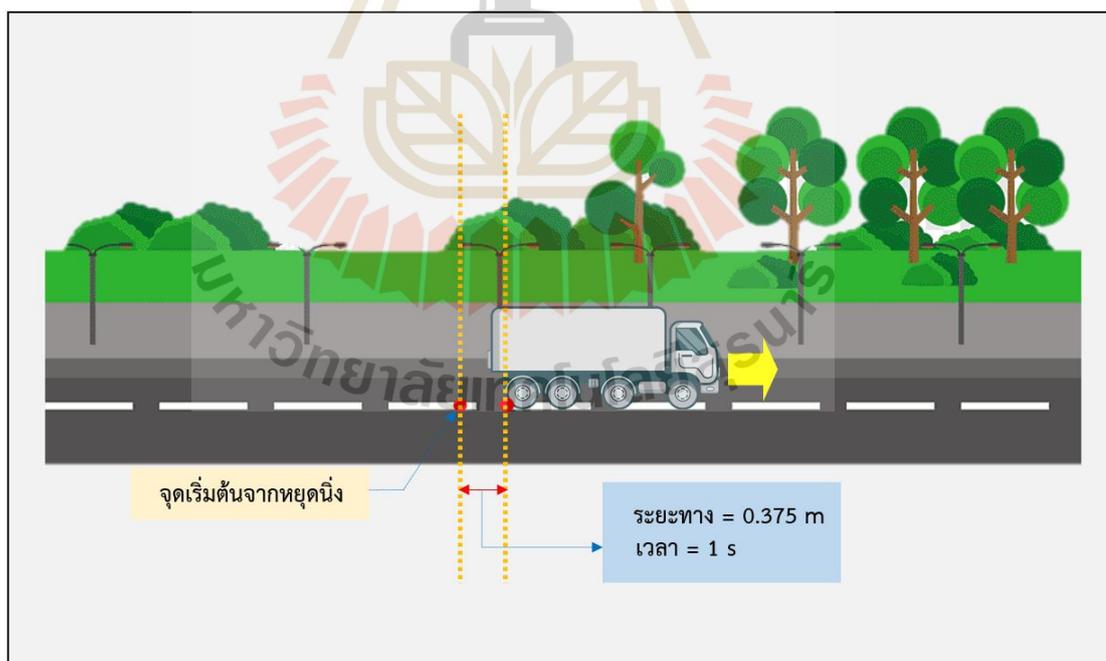
Tyre Size	Rim Size	Outside Diameter	Tyre Width	Tyre Weight	For Forklift Truck 25 Km/Hr	
		(mm)	(mm)	(kg)	Loading capacity (kg)	
1	300-4	2.00-4	254	75	3.3	200
2	350-5	3.00-5	300	90	6.3	350
3	400-8	3.00-8	405	100	11.5	1,390
4	500-8	3.00-8	461	127	16.5	1,390
5	600-9	4.00-9	533	156	27.5	1,840
6	650-10	5.00-10	579	176	36.5	2,310
7	700-12	5.00-12	666	189	49.8	2,920
8	550-15	4.50-15	666	159	38.4	2,195
9	600-15	4.50-15	685	140	43	2,195
10	700-15	5.50-15	700	170	60	2,200
11	750-15	5.50-15	755	200	73.5	3,880
12	815-15	7.00-15	706	221	63.5	2,750
13	28*9-15	7.00-15	706	221	63	2,750
14	250-15	7.00-15	706	221	63	2,750
15	825-15	6.50-15	838	217	98.1	4,750



รูปที่ 4.8 สเปคของล้อรถโฟล์คลิฟท์ที่ใช้สำหรับออกแบบในส่วน of โครงสร้างรถขนส่งอัตโนมัติ

4.4 การออกแบบหาขนาดมอเตอร์ของรถขนส่งอัตโนมัติ

ในการออกแบบเพื่อหาขนาดของมอเตอร์ ซึ่งคำนวณจากลักษณะการเคลื่อนที่ของรถขนส่งอัตโนมัติ โดยใช้เส้นกราฟความเร็วของการเคลื่อนที่อ้างอิงในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.2.6 ดังรูปที่ 3.14 พิจารณาเส้นทางรถวิ่งในกรณีไม่มีทางชันและไม่มีสิ่งกีดขวางเท่านั้น และไม่พิจารณาช่วงปล่อยไหล และช่วงเบรกเนื่องจากความเร็วที่รถวิ่งมีความเร็วต่ำ สำหรับกรณีที่ต้องการหยุดรถสามารถหยุดได้ทันที (มีระยะเบรคน้อยมาก) ด้วยเหตุนี้สมการที่นำมาใช้คำนวณโดยอาศัยหลักการกฎข้อที่สองของนิวตัน เมื่อมีแรงกระทำต่อวัตถุไม่สม่ำเสมอทำให้วัตถุนั้นเกิดอัตราเร่ง โดยขึ้นอยู่กับแรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุกับมวลของวัตถุ ซึ่งกฎข้อนี้สามารถคำนวณอัตราเร่งได้เมื่อมีแรงที่ทราบค่าได้มากระทำต่อวัตถุที่รู้ค่ามวลของวัตถุ และใช้คำนวณหาผลลัพธ์ของแรงจุดลากในขณะเร่งออกตัว (ช่วงเร่ง) และในขณะความเร็วของรถคงที่ (ช่วงความเร็วคงที่) ดังสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 (พิจารณากรณีไม่มีทางชันเท่านั้น) ซึ่งอัตราเร่งของรถที่ใช้คำนวณได้จาก สมการที่ 3.3 โดยมีข้อกำหนด คือ รถเคลื่อนที่จากจุดหยุดนิ่งในระยะทาง 0.375 m ใช้เวลา 1 วินาที (s) รายละเอียด ดังรูปที่ 4.9 จากนั้นใช้ผลลัพธ์ของแรงจุดลากคำนวณหาแรงบิดที่เพลลาของรถ เพื่อพิจารณาการเลือกใช้เกียร์ทดรอบมาช่วยมอเตอร์ในขณะเร่งออกตัวและความเร็วคงที่ที่กรณีรถบรรทุกไหลตสูงสุด ดังสมการที่ 3.5 จากนั้นผลลัพธ์ของแรงจุดลากคำนวณกำลังขับของมอเตอร์ในขณะเร่งออกตัวและความเร็วคงที่ เพื่อใช้พิจารณาเลือกขนาดมอเตอร์ที่เหมาะสม ดังสมการที่ 3.6



รูปที่ 4.9 ข้อกำหนดรถเคลื่อนที่จากจุดหยุดนิ่งเพื่อใช้คำนวณหาอัตราเร่ง

จากรูปที่ 4.9 เมื่อรถเริ่มเคลื่อนที่จากจุดหยุดนิ่ง (ความเร็วเป็นศูนย์) เคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นตรงด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น อัตราเร่งจะมีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ ถ้ารถเปลี่ยนทิศทาง

อัตราเร่งก็จะเปลี่ยนทิศทางตามไปด้วย จึงเรียกอัตรเร่งที่ไปตามทิศทางของรถนี้ว่า “อัตราเร่งที่เป็นเส้นตรง (Linear Acceleration)” สำหรับนิยาม อัตราเร่ง คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุในช่วงเวลาหนึ่ง ที่จุดใด ๆ บนกราฟความเร็วต่อเวลา อัตราเร่งจะเท่ากับความชันของเส้นสัมผัสจุดนั้น สำหรับการคำนวณหาอัตราเร่งและความเร็วของรถในขณะออกตัว (กรอบคำนวณที่ 4.1) นอกจากนี้ถ้าความเร็วของรถลดลงทิศทางของอัตราเร่งจะตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่มีค่าติดลบ เรียกว่า “อัตราหน่วง” โดยที่อัตราหน่วงจะไม่มีสมการเฉพาะแบบอัตราเร่ง แต่จะเปลี่ยนไปตามความเร็วเท่านั้น

พิจารณาการคำนวณหาอัตราเร่งและความเร็วของรถในขณะออกตัว

- กรณีรถวิ่งเดินทาง (ขาไป) และกรณีรถวิ่งถอยหลัง (ขากลับ)

กรอบคำนวณที่ 4.1
<p><u>การคำนวณอัตราเร่ง</u></p> <p>คำนวณหาอัตราเร่ง (สมการที่ 3.3) คือ $s = ut + 0.5at^2$</p> <p>กำหนดให้ $s = 0.375 \text{ m}$, $u = 0 \text{ m/s}$ และ $t = 1 \text{ s}$</p> <p>แทนค่าในสูตร $(0.375) = (0)(1) + (0.5)(a)(1^2)$</p> <p>ดังนั้น $a = (0.375)/(0.5) = 0.75 \text{ m/s}^2$ ***</p> <p><u>การคำนวณความเร็ว</u></p> <p>คำนวณหาความเร็ว (สมการที่ 3.4) คือ $v = u + at$</p> <p>กำหนดให้ $a = 0.75 \text{ m/s}^2$, $u = 0 \text{ m/s}$ และ $t = 1 \text{ s}$</p> <p>แทนค่าในสูตร $v = (0) + (0.75)(1)$</p> <p>ดังนั้น $v = 0.75 \text{ m/s}$ ***</p>

นอกจากนี้ในการคำนวณยังใช้วิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลทางเทคนิคของมอเตอร์และเกียร์ทดรอบที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต หรือตัวแทนจำหน่าย ซึ่งทำให้ประเมินค่าแรงบิดที่เพลลาของรถ หรือแรงที่สามารถทำให้รถออกตัวได้ และค่าประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานของระบบในการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์จ่ายให้กับมอเตอร์ ทั้งในกรณีรถวิ่งเดินทางและวิ่งถอยหลัง โดยรายละเอียดของค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณ ดังตารางที่ 4.1 สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบการคำนวณโครงสร้างของตัวรถขนส่งอัตโนมัติ อ้างอิงจากการออกแบบ ดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.8 ซึ่งมีน้ำหนักตัวรถเปล่า 1 ตัน (ton) หรือ 1,000 กิโลกรัม (kg) และขนาดของโครงสร้างรถขนส่งอัตโนมัติ โดยมีหน่วยเป็น mm มีขนาด (กว้างxยาวxสูง) เท่ากับ 1,890x3,108x915 mm หรือ 1.890x3.108x0.915 m รัศมีล้อรถมีขนาด 0.289 m และมีข้อกำหนดเบื้องต้นดังต่อไปนี้

ข้อกำหนดเบื้องต้น :

- ด้านหน้ารถขนส่งอัตโนมัติ มีพื้นที่หน้าตัด ($1.890 \times 0.915 = 1.729 \text{ m}^2$)
- ด้านหลังรถขนส่งอัตโนมัติ มีพื้นที่หน้าตัด ($1.890 \times 0.915 = 1.729 \text{ m}^2$)
- กระสอบแป้งที่บรรจุได้ มีพื้นที่หน้าตัดด้านข้าง ($1.0 \times 1.0 = 1 \text{ m}^2$)
- กระสอบแป้งวางทับกันเป็น 2 ชั้น มีพื้นที่หน้าตัดรวมด้านข้าง ($1.0 \times 2.0 = 2 \text{ m}^2$)
- มีพื้นที่หน้าตัดด้านหน้ารวมทั้งหมด ($1.729 + 2 = 3.729 \text{ m}^2$)
- มีพื้นที่หน้าตัดด้านหลังรวมทั้งหมด ($1.729 + 2 = 3.729 \text{ m}^2$)

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณหาแรงบิดและกำลังขับของมอเตอร์

พารามิเตอร์	ความหมาย	เท่ากับ	หน่วย
m	น้ำหนักตัวรถรวมบรรทุกโหลดสูงสุด	5,800	kg
g	อัตราเร่งโน้มถ่วง	9.81	m/s^2
f_r	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานล้อกับพื้น	0.01	-
α	ความชันของพื้น	0	องศา
ρ	ความหนาแน่นอากาศ (อุณหภูมิเฉลี่ย 30 องศาเซลเซียส)	1.164	kg/m^3
C_d	สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (ขาไป) บรรทุกโหลด	0.96	-
C_d	สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (ขากลับ) รถเปล่า	0.45	-
A_F	พื้นที่หน้าตัดรวมกระสอบแป้งวางทับกัน 2 ชั้น	3.729	m^2
A_F	พื้นที่หน้าตัดเฉพาะด้านหน้าและด้านหลังของตัวรถ	1.729	m^2
v	ความเร็วรถ (ช่วงเร่งออกตัว)	0.75	m/s
v	ความเร็วรถ (ช่วงความเร็วคงที่)	0.75	m/s
a	อัตราเร่งของรถ	0.75	m/s^2
r	รัศมีล้อรถ	0.289	m
R_f	แฟคเตอร์การเสียดทานระหว่างเพลากับลูกปืน	1.10	-

- *หมายเหตุ :
1. ค่าพารามิเตอร์ในตารางใช้คำนวณได้ทั้งกรณีวิ่งเดินหน้าและกรณีวิ่งถอยหลัง
 2. แป้งที่บรรจุในกระสอบมีขนาด 1,200 kg กรณีนี้พิจารณาบรรจุแป้งน้ำหนักสูงสุด
 3. โครงสร้างของรถขนส่งอัตโนมัติที่ออกแบบสามารถรองรับแป้งได้สูงสุด 4 กระสอบ
 4. สามารถวางกระสอบแป้งทับกันได้ 2 ชั้น หรือ 2 กระสอบ เท่านั้น

พิจารณาการคำนวณหาขนาดมอเตอร์ : กรณีรถวิ่งเดินทาง (ขาไป)

- การคำนวณแรงฉุดลาก แรงบิด และกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ ในช่วงที่รถเร่งเพื่อออกตัว (ช่วงเร่ง)

กรอบคำนวณที่ 4.2

การคำนวณแรงฉุดลาก

คำนวณหาแรงฉุดลาก (สมการที่ 3.2) คือ $F_T = ma + f_r mg + 0.5\rho C_d A_F v^2$

กำหนดให้ $a = 0.75 \text{ m/s}^2$, m (รวมบรรทุกโหลด) = 5,800 kg, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $f_r = 0.01$,
 $C_d = 0.96$, $A_F = 3.729 \text{ m}^2$, $v = 0.75 \text{ m/s}$ และ $\rho = 1.164 \text{ kg/m}^3$

แทนค่าในสูตร $F_T = (5,800)(0.75) + (0.01)(5,800)(9.81) + (0.5)(1.164)(0.96)(3.729)(0.75^2)$
 $= 4,350.00 + 568.98 + 1.17$

ดังนั้น $F_T = 4,920.15 \text{ N}^{***}$

การคำนวณแรงบิด

คำนวณหาแรงบิด (สมการที่ 3.5) คือ $T = F_T \times r \times R_f$

กำหนดให้ $F_T = 4,920.15 \text{ N}$, $r = 0.289 \text{ m}$ และ $R_f = 1.1$

แทนค่าในสูตร $T = (4,920.15)(0.289)(1.1)$

ดังนั้น $T = 1,564.12 \text{ Nm}^{***}$

การคำนวณกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์

คำนวณหากำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ (สมการที่ 3.6) คือ $P_m = T \times \omega$

คำนวณหาความเร็วเชิงมุม (สมการที่ 3.7) คือ $\omega = v/r$

กำหนดให้ $v = 0.75 \text{ m/s}$ และ $r = 0.289 \text{ m}$

ดังนั้น $\omega = (0.75)/(0.289) = 2.60 \text{ rad/s}$

กำหนดให้ $T = 1,564.12 \text{ Nm}$ และ $\omega = 2.60 \text{ rad/s}$

แทนค่าในสูตร $P_m = (1,564.12)(2.60)$

ดังนั้น $P_m = 4,059.13 \text{ W}^{***}$

สรุปการคำนวณ

สรุปผลการคำนวณ : แรงฉุดลาก $F_T = 4,920.15 \text{ N}$

แรงบิด $T = 1,564.12 \text{ Nm}$

กำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ $P_m = 4,059.13 \text{ W}$

พิจารณาการคำนวณหาขนาดมอเตอร์ : กรณีรถวิ่งเดินทาง (ขาไป)

- การคำนวณแรงฉุดลาก แรงบิด และกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ ในช่วงที่รถมีความเร็วคงที่ (ช่วงความเร็วคงที่)

กรอบคำนวณที่ 4.3

การคำนวณแรงฉุดลาก

คำนวณหาแรงฉุดลาก (สมการที่ 3.2) คือ $F_T = ma + f_r mg + 0.5\rho C_d A_F v^2$

กำหนดให้ $a = 0 \text{ m/s}^2$, m (รวมบรรทุกโหลด) = 5,800 kg , $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $f_r = 0.01$,
 $C_d = 0.96$, $A_F = 3.729 \text{ m}^2$, $v = 0.75 \text{ m/s}$ และ $\rho = 1.164 \text{ kg/m}^3$

แทนค่าในสูตร $F_T = (5,800)(0) + (0.01)(5,800)(9.81) + (0.5)(1.164)(0.96)(3.729)(0.75^2)$
 $= 0 + 568.98 + 1.17$

ดังนั้น $F_T = 570.15 \text{ N}^{***}$

การคำนวณแรงบิด

คำนวณหาแรงบิด (สมการที่ 3.5) คือ $T = F_T \times r \times R_f$

กำหนดให้ $F_T = 570.15 \text{ N}$, $r = 0.289 \text{ m}$ และ $R_f = 1.1$

แทนค่าในสูตร $T = (570.15)(0.289)(1.1)$

ดังนั้น $T = 181.25 \text{ Nm}^{***}$

การคำนวณกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์

คำนวณหากำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ (สมการที่ 3.6) คือ $P_m = T \times \omega$

คำนวณหาความเร็วเชิงมุม (สมการที่ 3.7) คือ $\omega = v/r$

กำหนดให้ $v = 0.75 \text{ m/s}$ และ $r = 0.289 \text{ m}$

ดังนั้น $\omega = (0.75)/(0.289) = 2.60 \text{ rad/s}$

กำหนดให้ $T = 181.25 \text{ Nm}$ และ $\omega = 2.60 \text{ rad/s}$

แทนค่าในสูตร $P_m = (181.25)(2.60)$

ดังนั้น $P_m = 470.38 \text{ W}^{***}$

สรุปการคำนวณ

สรุปผลการคำนวณ : แรงฉุดลาก $F_T = 570.15 \text{ N}$

แรงบิด $T = 181.25 \text{ Nm}$

กำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ $P_m = 470.38 \text{ W}$

พิจารณาการคำนวณหาขนาดมอเตอร์ : กรณีรถวิ่งถอยหลัง (ขากลับ)

- การคำนวณแรงฉุดลาก แรงบิด และกำลังขับเคลื่อน ในช่วงที่รถเร่งเพื่อออกตัว (ช่วงเร่ง)

กรอบคำนวณที่ 4.4

การคำนวณแรงฉุดลาก

คำนวณหาแรงฉุดลาก (สมการที่ 3.2) คือ $F_T = ma + f_r mg + 0.5\rho C_d A_F v^2$

กำหนดให้ $a = 0.75 \text{ m/s}^2$, m (รวมบรรทุกโหลด) = 1,000 kg, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $f_r = 0.01$,
 $C_d = 0.45$, $A_F = 1.729 \text{ m}^2$, $v = 0.75 \text{ m/s}$ และ $\rho = 1.164 \text{ kg/m}^3$

แทนค่าในสูตร $F_T = (1,000)(0.75) + (0.01)(1,000)(9.81) + (0.5)(1.164)(0.45)(1.729)(0.75^2)$
 $= 750.00 + 98.10 + 0.25$

ดังนั้น $F_T = 848.35 \text{ N}^{***}$

การคำนวณแรงบิด

คำนวณหาแรงบิด (สมการที่ 3.5) คือ $T = F_T \times r \times R_f$

กำหนดให้ $F_T = 848.35 \text{ N}$, $r = 0.289 \text{ m}$ และ $R_f = 1.1$

แทนค่าในสูตร $T = (848.35)(0.289)(1.1)$

ดังนั้น $T = 269.69 \text{ Nm}^{***}$

การคำนวณกำลังขับเคลื่อน

คำนวณหากำลังขับเคลื่อน (สมการที่ 3.6) คือ $P_m = T \times \omega$

คำนวณหาความเร็วเชิงมุม (สมการที่ 3.7) คือ $\omega = v/r$

กำหนดให้ $v = 0.75 \text{ m/s}$ และ $r = 0.289 \text{ m}$

ดังนั้น $\omega = (0.75)/(0.289) = 2.60 \text{ rad/s}$

กำหนดให้ $T = 269.69 \text{ Nm}$ และ $\omega = 2.60 \text{ rad/s}$

แทนค่าในสูตร $P_m = (269.69)(2.60)$

ดังนั้น $P_m = 699.89 \text{ W}^{***}$

สรุปการคำนวณ

สรุปผลการคำนวณ : แรงฉุดลาก $F_T = 848.35 \text{ N}$

แรงบิด $T = 269.69 \text{ Nm}$

กำลังขับเคลื่อน $P_m = 699.89 \text{ W}$

พิจารณาการคำนวณหาขนาดมอเตอร์ : กรณีรถวิ่งถอยหลัง (ขากลับ)

- การคำนวณแรงฉุดลาก แรงบิด และกำลังขับเคลื่อน ในช่วงที่รถมีความเร็วคงที่ (ช่วงความเร็วคงที่)

กรอบคำนวณที่ 4.5

การคำนวณแรงฉุดลาก

คำนวณหาแรงฉุดลาก (สมการที่ 3.2) คือ $F_T = ma + f_r mg + 0.5\rho C_d A_F v^2$

กำหนดให้ $a = 0 \text{ m/s}^2$, m (รวมบรรทุกโหลด) = 1,000 kg , $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $f_r = 0.01$,
 $C_d = 0.45$, $A_F = 1.729 \text{ m}^2$, $v = 0.75 \text{ m/s}$ และ $\rho = 1.164 \text{ kg/m}^3$

แทนค่าในสูตร $F_T = (1,000)(0) + (0.01)(1,000)(9.81) + (0.5)(1.164)(0.45)(1.729)(0.75^2)$
 $= 0 + 98.10 + 0.25$

ดังนั้น $F_T = 98.35 \text{ N}^{***}$

การคำนวณแรงบิด

คำนวณหาแรงบิด (สมการที่ 3.5) คือ $T = F_T \times r \times R_f$

กำหนดให้ $F_T = 98.35 \text{ N}$, $r = 0.289 \text{ m}$ และ $R_f = 1.1$

แทนค่าในสูตร $T = (98.35)(0.289)(1.1)$

ดังนั้น $T = 31.27 \text{ Nm}^{***}$

การคำนวณกำลังขับเคลื่อน

คำนวณหากำลังขับเคลื่อน (สมการที่ 3.6) คือ $P_m = T \times \omega$

คำนวณหาความเร็วเชิงมุม (สมการที่ 3.7) คือ $\omega = v/r$

กำหนดให้ $v = 0.75 \text{ m/s}$ และ $r = 0.289 \text{ m}$

ดังนั้น $\omega = (0.75)/(0.289) = 2.60 \text{ rad/s}$

กำหนดให้ $T = 31.27 \text{ Nm}$ และ $\omega = 2.60 \text{ rad/s}$

แทนค่าในสูตร $P_m = (31.27)(2.60)$

ดังนั้น $P_m = 81.14 \text{ W}^{***}$

สรุปการคำนวณ

สรุปผลการคำนวณ : แรงฉุดลาก $F_T = 98.35 \text{ N}$

แรงบิด $T = 31.27 \text{ Nm}$

กำลังขับเคลื่อน $P_m = 81.14 \text{ W}$

จากการคำนวณหาค่ากำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ในกรณีวิ่งเดินหน้า (ขาไป) และกรณีวิ่งถอยหลัง (ขากลับ) โดยพิจารณา 2 ช่วง คือ ช่วงเร่งออกตัวและช่วงความเร็วคงที่ ในกรณีไม่มีทางชันเท่านั้น (กรอบการคำนวณที่ 4.2 ถึง 4.5) เพื่อหาแรงฉุดลาก แรงบิด และกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งผลสรุปของการคำนวณ ดังตารางที่ 4.2 ทั้งนี้การเลือกขนาดมอเตอร์ โดยพิจารณาจากช่วงที่ใช้กำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ และแรงบิดสูงสุด คือ ช่วงเร่ง (ขาไป) ที่วิ่งเดินหน้าขณะเร่งเพื่อออกตัว (กรณีบรรทุกโหลดพิกัดสูงสุด) พบว่าแรงฉุดลาก $F_T = 4,920.15$ N แรงบิด $T = 1,564.12$ Nm และกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ $P_m = 4,059.13$ W หรือ 4.059 kW ดังนั้นมอเตอร์ที่เลือกใช้งานต้องมีกำลังขับเคลื่อนมากกว่า 4.059 kW จากนั้นนำกำลังขับเคลื่อนเปรียบเทียบกับกราฟประสิทธิภาพของมอเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 60034-30 (อ้างอิงรูปที่ 4.10)

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณหาแรงฉุดลาก แรงบิด และกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์

กรณี (ช่วงความเร็ว)	แรงฉุดลาก F_T (N)	แรงบิด T (Nm)	กำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ P_m (W)
ช่วงเร่ง (ขาไป)	4,920.15	1,564.12	4,059.13
ช่วงความเร็วคงที่ (ขาไป)	570.15	181.25	470.38
ช่วงเร่ง (ขากลับ)	848.35	269.69	699.89
ช่วงความเร็วคงที่ (ขากลับ)	98.35	31.27	81.14

ในกรณีนี้ใช้เป็น AC Motor หรือ Induction Motor เนื่องจากการทดสอบใช้งานมาเป็นระยะเวลาอย่างต่อเนื่องพอสมควรและได้รับการยอมรับจากลูกค้าหลายรายในปัจจุบัน พบว่า Induction Motor เป็นทางเลือกที่เหมาะสมและมีสมรรถนะในการขับเคลื่อนที่ดี สำหรับมอเตอร์ที่เลือกใช้มีประสิทธิภาพตามมาตรฐาน IEC 60034-30 Class IE1 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.10 พบว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ $\eta_m = 0.83$ จากนั้นคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ (กรอบการคำนวณที่ 4.6) $P_e = 4,890.51$ W หรือ 4.890 kW ดังนั้นมอเตอร์ที่เลือกใช้เป็นผลิตภัณฑ์ของ Foshan Uni Technology Co., Ltd. ชนิด Induction Motor ขนาด 5 kW ดังรูปที่ 4.11 และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.3

พิจารณาการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์

- กรณีวิ่งเดินหน้า (ขาไป) ช่วงเร่ง คือ ช่วงที่มีกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์สูงสุด (บรรทุกโหลดสูงสุด)

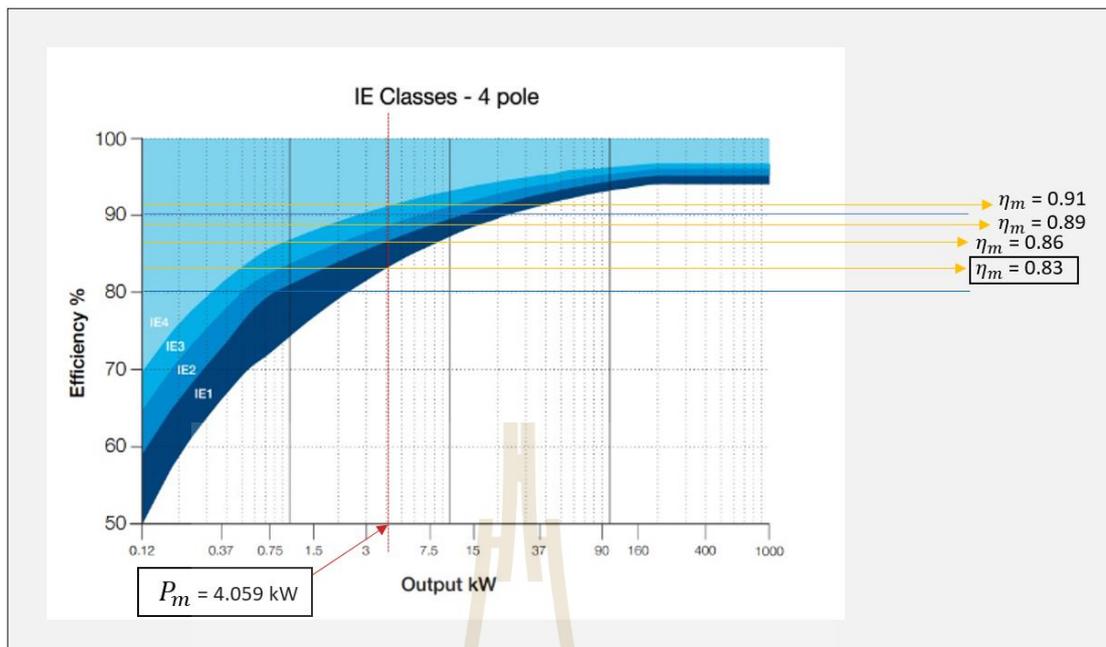
กรอบการคำนวณที่ 4.6

การคำนวณกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์

คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้ามอเตอร์ดังสมการ $P_e = P_m / \eta_m$

กำหนดให้ $P_m = 4,059.13$ W และ $\eta_m = 0.83$

แทนค่าในสูตร ดังนั้น $P_e = (4,059.13) / (0.83) = 4,890.51$ W หรือ 4.890 kW ***



รูปที่ 4.10 กราฟประสิทธิภาพมอเตอร์ตามมาตรฐาน IE Classes-4 pole



รูปที่ 4.11 Induction Motor ขนาด 5 kW ของ Foshan Uni Technology Co., Ltd.

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ Induction Motor ขนาด 5 kW

Item	detail
Brand Name	Foshan Uni Technology Co., Ltd.
Type	Ac Motor or Induction Motor
Phase	Three-phase
Rated Power	5 kW
Rated Voltage	48 V
Rated Speed	1400 ~ 3650 rpm
Protection Grade	IP 65
Max. Torque	80 Nm
Weight	35 kg
Efficiency	IE1
Application	Electric Car Vehicle or Boat

จากรายละเอียดคุณสมบัติของมอเตอร์ที่เลือกใช้ในตารางที่ 4.3 พบว่าค่าแรงบิดสูงสุด (Max. Torque) เท่ากับ 80 Nm ซึ่งมีค่าแรงบิดไม่เพียงพอในกรณีต้องการให้รถเร่งออกตัวขณะที่บรรทุกโหลดสูงสุด โดยค่าแรงบิดที่คำนวณได้ $T = 1,564.12 \text{ Nm}$ ที่กำลังไฟฟ้ามอเตอร์ $P_e = 4.890 \text{ kW}$ ดังนั้นเพื่อให้สามารถเร่งออกตัวในขณะบรรทุกโหลดสูงสุดได้ จำเป็นต้องเพิ่มอัตราทดรอบของมอเตอร์เพื่อให้มีแรงบิดเพิ่มมากขึ้น ในกรณีนี้เลือกใช้เกียร์ทดรอบ (Gearbox) ชนิด Cast Iron NMRV130 Right Angle Worm Gearbox โดยมีอัตราทดรอบ 40:1 ($i = 40$) และ Output Speed (n_2) = 35 rpm ซึ่งสามารถเพิ่มแรงบิดได้ $T = 1,596.00 \text{ Nm}$ ที่กำลังไฟฟ้ามอเตอร์ $P_e = 7.500 \text{ kW}$ ดังรูปที่ 4.12 แสดงภาพตัวอย่างเกียร์ทดรอบที่เลือกใช้ ดังรูปที่ 4.13 และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.4

input n1 = 1400 rev/min		Geared Motors				
i	output n2 = rev/min	Size	P1 (kW)	Motor Frame	M2 (Nm)	f.s.
7.5	186.7	EMAW130	9.2	132M4	428	1.8
10	140.0		9.2	132M4	559	1.5
15	93.3		9.2	132M4	819	1.1
20	70.0		9.2	132M4	1079	0.8
25	56.0		9.2	132M4	1318	0.7
30	46.7		7.5	132L4	1228	0.8
40	35.0		7.5	132L4	1596	0.7
50	28.0		4.8	112MS4	1228	0.8
60	23.3		4	112M4	1179	0.8
80	17.5		3	100LB4	1113	0.8
100	14.0	1.84	90LL4	803	0.9	

รูปที่ 4.12 เลือกใช้เกียร์ทดรอบ ชนิด Cast Iron NMRV130 อัตราทดรอบ 40:1



รูปที่ 4.13 เกียร์ทดรอบ ชนิด Cast Iron NMRV130 อัตราทดรอบ 40:1

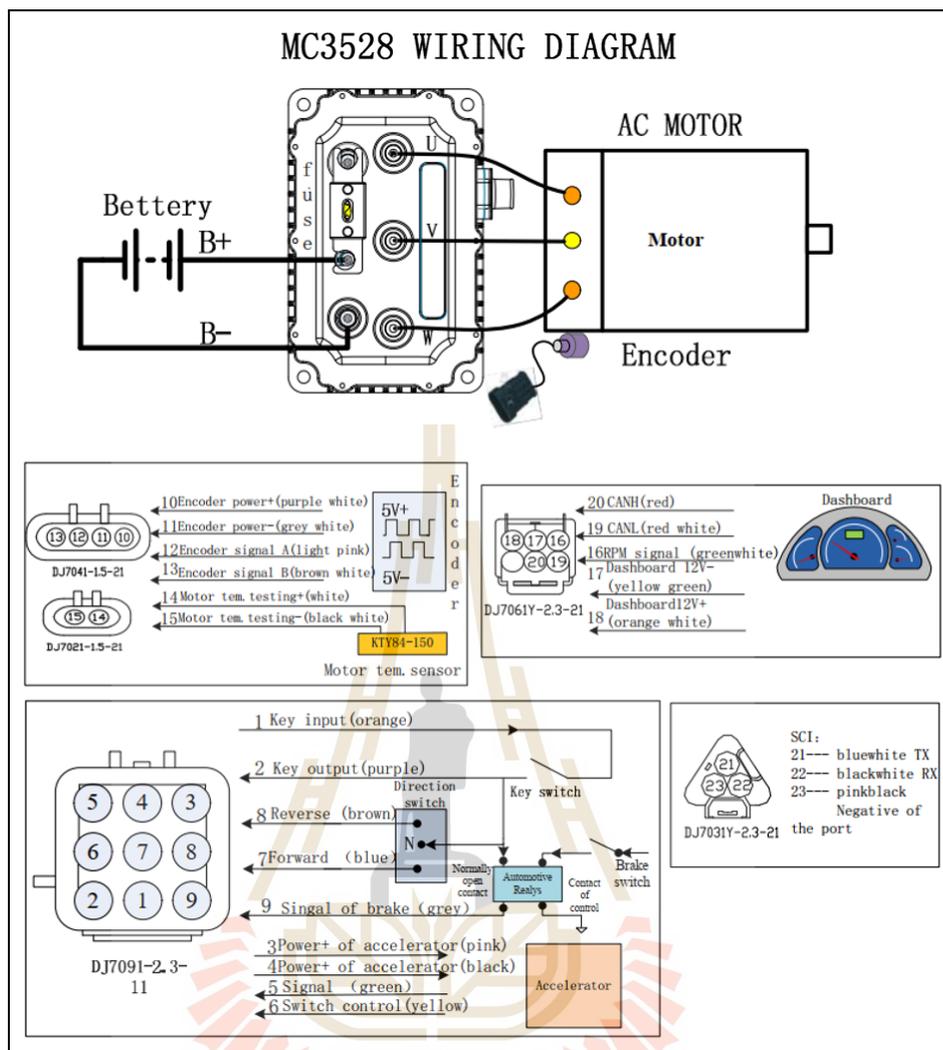
ตารางที่ 4.4 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ เกียร์ทดรอบ ชนิด Cast Iron NMRV130

Item	detail
MPN	EMAW130-40-D132-B5
Material	Cast Iron
Motor Input	7.5 kW
Torque	1596 Nm
Nominal Ratio	40:1 Ratio
Gearbox Size	NMRV130
Type	Right Angled Worm Gearbox
Bore (mm)	45mm Hollow Bore
PAM (Shaft Dia/Flange Dia)	PAM38/300

นอกจากนี้เมื่อทราบขนาดมอเตอร์และชนิดของมอเตอร์ที่เลือกใช้ คือ Induction Motor ขนาด 5 kW เป็นผลิตภัณฑ์ของ Foshan Uni Technology Co., Ltd. ชุดควบคุมมอเตอร์ก็เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องเลือกมาใช้งานควบคู่กับมอเตอร์ให้เหมาะสม ถ้าเป็นผลิตภัณฑ์เดียวกันของทาง Foshan Uni Technology Co., Ltd. ก็ทำให้ง่ายต่อการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และการต่อสายไฟสำหรับควบคุมมอเตอร์เพื่อใช้งาน ในกรณีนี้เลือกใช้เป็น 5 kW 48 V Controller Model MC3528 ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ Foshan Uni Technology Co., Ltd. เช่นเดียวกัน โดยมีรายละเอียดการต่อสายไฟเพื่อใช้งานของชุดควบคุมมอเตอร์เข้ากับมอเตอร์ แสดงเป็น Wiring Diagram ดังรูปที่ 4.15 และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.14 5 kW 48 V Controller Model MC3528 ของ Foshan Uni Technology Co., Ltd.



รูปที่ 4.15 Wiring Diagram 5 kW 48 V Controller Model MC3528

ตารางที่ 4.5 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ 5 kW 48 V Controller Model MC3528

Item	detail
Specification	48V (Rang Input 35V – 60V)
Start Voltage	40V
Output Current	120A
Signal Drive	0 to 5 Vdc
Adaptive Motor	AC motor or Induction Motor
Efficiency	97%
Cooling Mode	Self Cooling

4.5 การออกแบบหาขนาดมอเตอร์บังคับลิ้วของรถขนส่งอัตโนมัติ

สำหรับการออกแบบเพื่อหาขนาดของมอเตอร์บังคับลิ้วของชุดล้อหน้า โดยอาศัยหลักการกระจายน้ำหนักสมมติของรถที่บรรทุกโหลด ดังรูปที่ 3.29 และพิจารณาควบคุมกับขนาดโครงสร้างของรถที่ออกแบบในหัวข้อที่ 4.3 (รูปที่ 4.6 และ 4.7) ในกรณีนี้ระบบของชุดบังคับลิ้วของชุดล้อหน้าที่เลือกใช้จากรูปที่ 3.28 เป็นแบบแร็คแอนด์พินเนียน ดังนั้นการกระจายน้ำหนักในขณะที่น้ำหนักตัวรถเปล่า เท่ากับ 1,000 kg และน้ำหนักบรรทุกโหลดสูงสุด เท่ากับ 4,800 kg ทำให้มีน้ำหนักรวม เท่ากับ 5,800 kg เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนขนาดของโครงสร้างที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Solid Work มีอัตราส่วนการรองรับน้ำหนักระหว่างชุดล้อหน้าและชุดล้อหลัง เท่ากับ 50:50 (%) ตามลำดับ (รูปที่ 4.6 และ 4.7) ทำให้น้ำหนักที่กระจายของตัวรถ (กรอบคำนวณที่ 4.7) พบว่าชุดล้อหน้าสามารถรองรับน้ำหนักได้ เท่ากับ 2,900 kg และชุดล้อหลังสามารถรองรับน้ำหนักได้ เท่ากับ 2,900 kg ดังรูปที่ 4.16

พิจารณาการคำนวณการรองรับน้ำหนักของชุดล้อหน้าและชุดล้อหลัง

- กรณีน้ำหนักตัวรถเปล่ารวมกับบรรทุกโหลดสูงสุด

กรอบคำนวณที่ 4.7

การคำนวณการรองรับของชุดล้อหน้า

คำนวณหาการรองรับน้ำหนัก (สมการที่ 3.16) คือ $m_{wf} = r_{wf} \times m_T$

กำหนดให้ $m_T = 5,800.00$ kg และ $r_{wf} = 0.50$

แทนค่าในสูตร $m_{wf} = (0.50)(5,800.00)$

ดังนั้น $m_{wf} = 2,900.00$ kg ***

การคำนวณการรองรับของชุดล้อหลัง

คำนวณหาการรองรับน้ำหนัก (สมการที่ 3.17) คือ $m_{wb} = r_{wb} \times m_T$

กำหนดให้ $m_T = 5,800.00$ kg และ $r_{wb} = 0.50$

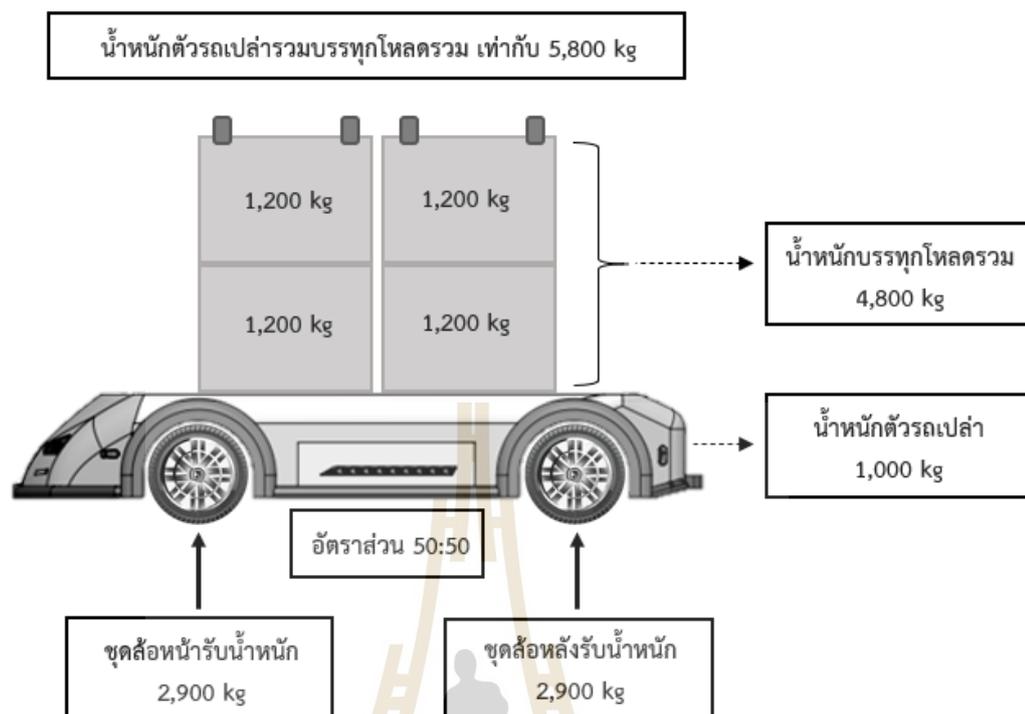
แทนค่าในสูตร $m_{wb} = (0.50)(5,800.00)$

ดังนั้น $m_{wb} = 2,900.00$ kg ***

สรุปการคำนวณ

สรุปผลการคำนวณ : การรองรับน้ำหนักชุดล้อหน้า $m_{wf} = 2,900.00$ kg

การรองรับน้ำหนักชุดล้อหลัง $m_{wb} = 2,900.00$ kg



รูปที่ 4.16 การรองรับน้ำหนักระหว่างชุดล้อหน้าและชุดล้อหลังของรถขนส่งอัตโนมัติ

เมื่อทราบน้ำหนักที่กระจายลงชุดล้อหน้าของรถ เท่ากับ 2,900 kg ซึ่งชุดล้อหน้าที่ออกแบบ คือ แร็คแอนดพินีเยน ในการออกแบบชุดบังคับเลี้ยว โดยชุดบังคับเลี้ยวที่เลือกใช้ระบบแร็คแอนดพินีเยน รุ่น Polaris RZR S 900 ดังรูปที่ 4.17 เป็นแร็คแอนดพินีเยนใช้สำหรับงานหนัก หรืองานบรรทุกโหลหนัก ๆ ของระบบบังคับเลี้ยวในงานอุตสาหกรรม และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.6 เนื่องจากจุดประสงค์หลักต้องการให้รถขนส่งอัตโนมัติสามารถบังคับเลี้ยวซ้ายขวาแบบอัตโนมัติด้วย ดังนั้นมอเตอร์ที่ใช้สำหรับประยุกต์เข้ากับแร็คแอนดพินีเยน เป็นชนิดเซอร์โวมอเตอร์ใช้ในการควบคุมบังคับเลี้ยว แต่ต้องมีการคำนวณหาแรงจุดที่ใช้เคลื่อนที่และแรงบิดในการออกตัวของแร็คแอนดพินีเยน เพื่อสามารถนำไปเลือกขนาดของเซอร์โวมอเตอร์ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งในการคำนวณโดยใช้หลักการอ้างอิงในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4.3 ซึ่งหาค่าแรงจุด (สมการที่ 3.14) และแรงบิด (สมการที่ 3.15) กรณีเคลื่อนที่ในแนวระนาบเท่านั้น สำหรับรายละเอียดของค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณ ดังตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.17 แร็คแอนดพินีเยน ยี่ห้อ Polaris RZR S 900

ตารางที่ 4.6 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของแร็คแอนด์พีนีเยน ยี่ห้อ Polaris RZR S 900

Item	detail
Model	Polaris RZR S 900
Material	Alloy Steel
Pinion Pitch Diameter	18.00 mm
Weight	4.53 kg
Manufacturer Part Number	HDRP-7-32-14-002-FPS
Mounting Type	Power Grip

พิจารณาการคำนวณหาขนาดมอเตอร์บังคับลิฟต์

- การคำนวณแรงจุด และแรงบิด ในแนวระนาบเท่านั้น

กรอบคำนวณที่ 4.8

การคำนวณแรงจุด

คำนวณหาแรงจุด (สมการที่ 3.14) คือ $F_{T,max} = (ma/\eta) + (\mu mg/\eta)$

กำหนดให้ $a = 1 \text{ m/s}^2$, $m = m_{wf} = 2,900 \text{ kg}$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $\mu = 0.1$

และ $\eta = 0.98$

แทนค่าในสูตร $F_{T,max} = (2,900)(1)/(0.98) + (0.1)(2,900)(9.81)/(0.98)$
 $= 2,959.18 + 2902.95$

ดังนั้น $F_{T,max} = 5,862.13 \text{ N}^{***}$

การคำนวณแรงบิด

คำนวณหาแรงบิด (สมการที่ 3.15) คือ $T_{max} = dF_{T,max}/2000$

กำหนดให้ $d = 18 \text{ mm}$ และ $F_{T,max} = 5,862.13 \text{ N}$

แทนค่าในสูตร $T_{max} = (18)(5,862.13)/(2000)$

ดังนั้น $T_{max} = 52.75 \text{ Nm}^{***}$

สรุปการคำนวณ

สรุปผลการคำนวณ : แรงจุด $F_{T,max} = 5,862.13 \text{ N}$

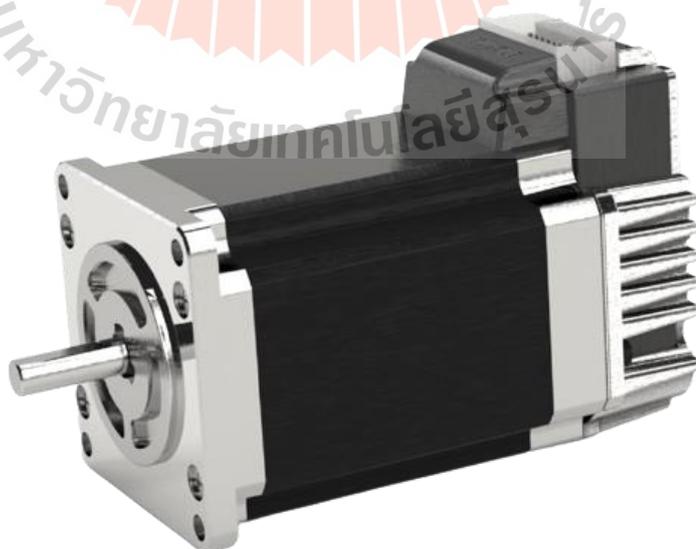
แรงบิด $T_{max} = 52.75 \text{ Nm}$

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณหาแรงจุดที่ใช้เคลื่อนที่และแรงบิดของแร็คแอนด์พีนเนียน

พารามิเตอร์	ความหมาย	เท่ากับ	หน่วย
m_{wf}	น้ำหนักลงชุดล้อหน้า	2,900	kg
m_{wb}	น้ำหนักลงชุดล้อหลัง	2,900	kg
g	อัตราเร่งโน้มถ่วง	9.81	m/s^2
μ	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.1	-
a	อัตราเร่ง	1	m/s^2
r	รัศมีล้อรถ	0.289	m
d	ระยะ Pinion Pitch	18.00	mm
η	ประสิทธิภาพของระบบ	0.98	-

*หมายเหตุ : 1. ค่าพารามิเตอร์ในตารางใช้คำนวณได้ทั้งกรณีต้องการเลีย่วซ้าย หรือ เลี้ยวขวา
2. ในการเคลื่อนที่พิจารณาในแนวระนาบเท่านั้น
3. ในกรณีนี้ออกแบบชุดบังคับเลีย่วล้อหน้าน้ำหนักที่ใช้คำนวณ คือ m_{wf} (kg)

สำหรับเซอร์โวมอเตอร์ที่เลือกใช้ในชุดบังคับเลีย่วของแร็คแอนด์พีนเนียน ยี่ห้อ Polaris RZR S 900 ในกรณีนี้ใช้เป็นเซอร์โวมอเตอร์ Model CM3-23L50A ยี่ห้อ Muscle Corporation ดังรูปที่ 4.18 เนื่องจากได้รับความนิยมน้อยกว่าหลายในการประยุกต์ใช้งานอุตสาหกรรมต่าง ๆ และได้รับการยอมรับในเรื่องของสมรรถนะและความคงทนของการทดสอบใช้งานในระยะเวลาดำเนินการยาวนาน ดังนั้นเซอร์โวมอเตอร์ Model CM3-23L50A จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับชุดบังคับเลีย่วของรถขนส่งอัตโนมัติ และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.18 เซอร์โวมอเตอร์ Model CM3-23L50A ยี่ห้อ Muscle Corporation

ตารางที่ 4.8 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของเซอร์โวมอเตอร์ Model CM3-23L50A

Item	detail
Input Supply Voltage	DC 24V
Rated Current/Peak Current	5A/6A
Motor Output	100W
Max. Speed	5,000 rpm
Max. Torque	1.50Nm
Encoder	High-precision magnetic rotation angle sensor
Resolution	From 300 ~ 12,000 ppr
I/O Control	Digital Input/Digital Output
Communication Port	RS-232C
Mass	1050g

จากตารางที่ 4.8 พบว่าค่าแรงบิดสูงสุดของเซอร์โวมอเตอร์ Model CM3-23L50A มีค่าเท่ากับ 1.50 Nm ไม่เพียงพอสำหรับใช้เป็นชุดบังคับเลี้ยวของรถขนส่งอัตโนมัติ ซึ่งในการคำนวณหาแรงจุดและแรงบิดในแนวระนาบเท่านั้นเพื่อหาขนาดของมอเตอร์บังคับเลี้ยว จึงจำเป็นต้องเพิ่มอัตราทดให้กับเซอร์โวมอเตอร์ โดยเกียร์ทดรอบที่ประยุกต์ใช้เข้ากับเซอร์โวมอเตอร์ คือ Gearbox AE Series Model AE070 ดังรูปที่ 4.19 โดยเลือกอัตราทดรอบ Ratio = 60 ทำให้มีแรงบิดเพิ่มขึ้นเป็น 55 Nm และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งมีความมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ (กรอบคำนวณที่ 4.8) พบว่าแรงจุด แรงจุด $F_{T,max} = 5,862.13$ N และแรงบิด $T_{max} = 52.75$ Nm ดังนั้น Gearbox AE Series Model AE070 ที่ Ratio = 60 เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้กับเซอร์โวมอเตอร์ Model CM3-23L50A



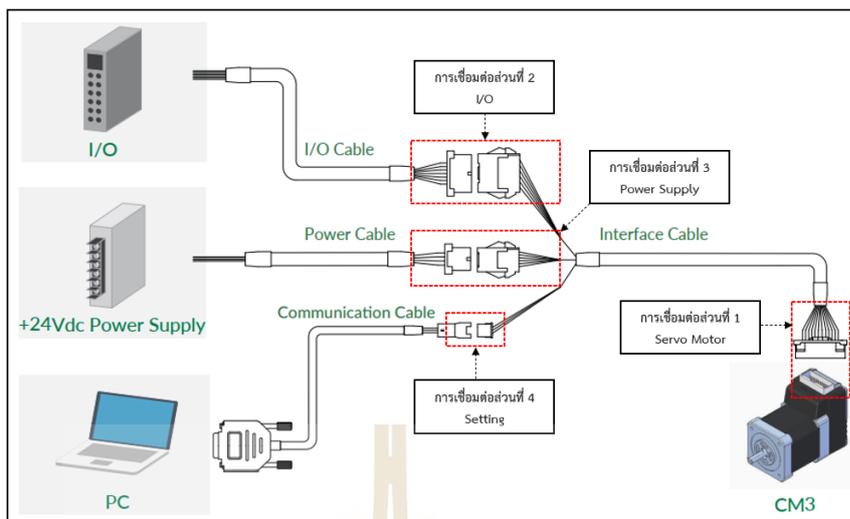
รูปที่ 4.19 Gearbox AE Series Model AE070 Ratio = 60

Gearbox Performance

Model No.	Stage	Ratio ^A	AE050	AE070	AE090	AE120	AE155	AE205	AE235	
Nominal output torque T _{2N}	1	3	20	55	130	208	342	588	1,140	
		4	19	50	140	290	542	1,050	1,700	
		5	22	60	160	330	650	1,200	2,000	
		6	20	55	150	310	600	1,100	1,900	
		7	19	50	140	300	550	1,100	1,800	
		8	17	45	120	260	500	1,000	1,600	
		9	14	40	100	230	450	900	1,500	
		10	14	40	100	230	450	900	1,500	
		2	15	20	55	130	208	342	588	1,140
			20	19	50	140	290	542	1,050	1,700
	25		22	60	160	330	650	1,200	2,000	
	30		20	55	150	310	600	1,100	1,900	
	35		19	50	140	300	550	1,100	1,800	
	40		17	45	120	260	500	1,000	1,600	
	45		14	40	100	230	450	900	1,500	
	50		22	60	160	330	650	1,200	2,000	
	60		20	55	150	310	600	1,100	1,900	
	70		19	50	140	300	550	1,100	1,800	
	80	17	45	120	260	500	1,000	1,600		
	90	14	40	100	230	450	900	1,500		
100	14	40	100	230	450	900	1,500			
Emergency Stop Torque T _{2MS} ^B	Nm	1,2	3~100	3 times of nominal output torque						
Nominal input speed n _{IN}	rpm	1,2	3~100	5,000	5,000	4,000	4,000	3,000	3,000	2,000
Max. input speed n _{IN}	rpm	1,2	3~100	10,000	10,000	8,000	8,000	6,000	6,000	4,000
Backlash	arcmin	1	3~10	≤8	≤8	≤8	≤8	≤8	≤8	≤8
		2	15~100	≤12	≤12	≤12	≤12	≤12	≤12	≤12
Torsional rigidity	Nm/arcmin	1,2	3~100	3	7	14	25	50	145	225
Max. Radial Load F _{2R} ^C	N	1,2	3~100	702	1,377	2,985	6,100	8,460	13,050	22,000
Max. Axial Load F _{2A} ^C	N	1,2	3~100	390	765	1,625	3,350	4,700	7,250	11,000
Max. Tilting Moment M _{2X}	Nm	1,2	3~100	20	60	170	470	840	1,500	3,100
Efficiency η	%	1	3~10	≥97%						
		2	15~100	≥94%						
Weight	kg	1	3~10	0.6	1.4	3.3	6.9	13	31	53
		2	15~100	0.9	1.6	4.7	8.7	17	35	66
Operating temp	°C	1,2	3~100	-10 °C ~ 90 °C						
Lubrication				Synthetic lubrication oils						
Degree of gearbox protection		1,2	3~100	IP65						
Mounting position		1,2	3~100	all directions						
Noise ^F	dB(A)	1,2	3~100	≤56	≤58	≤60	≤63	≤65	≤67	≤70

รูปที่ 4.20 เลือกอัตราทดรอบ Gearbox AE Series Model AE070 Ratio = 60

นอกจากนี้ชุดเซอร์โวมอเตอร์ที่เลือกใช้งาน คือ Model CM3-23L50A ยี่ห้อ Muscle ในการควบคุม ซึ่งเซอร์โวมอเตอร์ก็เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องเลือกรูปแบบการควบคุมให้มีความเหมาะสม โดยสามารถศึกษาข้อมูลจากคู่มือของเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานและการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ รวมทั้งการเชื่อมต่อสายไฟสำหรับควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ ในรูปแบบควบคุมผ่าน I/O (Input/Output) ดังรูปที่ 4.21 และจากรูปที่ 4.21 แบ่งการเชื่อมต่อเพื่อใช้งานออกเป็น 4 ส่วน ในส่วนแรก คือ ส่วนที่เป็นการเชื่อมต่อของเซอร์โวมอเตอร์โดยตรง มีรายละเอียดของพอร์ตการเชื่อมต่อเพิ่มเติม ดังรูปที่ 4.22 ส่วนที่สอง คือ ส่วนที่เป็นการเชื่อมต่อของ I/O เพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ มีรายละเอียดของพอร์ตการเชื่อมต่อเพิ่มเติม ดังรูปที่ 4.23 ส่วนที่สาม คือ ส่วนที่เป็นการเชื่อมต่อของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power Supply) เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำหรับเซอร์โวมอเตอร์ มีรายละเอียดของพอร์ตการเชื่อมต่อเพิ่มเติม ดังรูปที่ 4.24 และส่วนสุดท้าย คือ ส่วนที่เป็นการตั้งค่า (Setting) เพื่อตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ผ่านโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ หรือพีซี (PC) มีรายละเอียดของพอร์ตการเชื่อมต่อเพิ่มเติม ดังรูปที่ 4.25



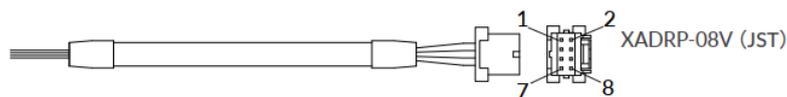
รูปที่ 4.21 การเชื่อมต่อสายไฟสำหรับควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ในรูปแบบควบคุมผ่าน I/O

No.	Name	Function	No.	Name	Function
2	D_GND	Digital Ground	1	FG	Frame Ground
4	ALARM	Alarm Output	3	D_GND	Digital Ground
6	OUT3	Output 3 / Z-phase	5	RXD0	RS232C Receive Data
8	OUT2	Output 2 / B-phase	7	TXD0	RS232C Transmit Data
10	OUT1	Output 1 / A-phase	9	STO_IN-	STO Input -
12	STO_IN+	STO Input +	11	IN6+	Start · Stop
14	IN6-	Start · Stop	13	IN5+	Limit Sensor
16	IN5-	Limit Sensor	15	IN_COM	IN1 to 4 Common
18	IN4	Select Motion Data	17	IN3	Select Motion Data
20	IN2	Select Motion Data	19	IN1	Origin/Limit Sensor
22	P-GND	Power Ground	21	P-GND	Power Ground
24	POWER	+24Vdc	23	POWER	+24Vdc

รูปที่ 4.22 พอร์ตการเชื่อมต่อสายไฟสำหรับควบคุมในส่วนที่ 1 (เซอร์โวมอเตอร์)

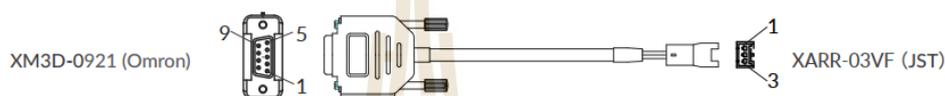
Color	Dot	No.	Name	Function	Color	Dot	No.	Name	Function
PPL	/	1	IN1	Origin/Limit Sensor	BLU	/	2	IN2	Select Motion Data
GRN	/	3	IN3	Select Motion Data	YLW	/	4	IN4	Select Motion Data
ORG	/	5	IN5 +	Limit Sensor	RED	/	6	IN5 -	Limit Sensor
BLK	/	7	IN6 +	Start · Stop	BRW	/	8	IN6 -	Start · Stop
WHT	/	9	IN_COM	Input 1 to 4 Common	GRY	/	10	OUT1	Output 1 / A-phase
WHT	-	11	OUT2	Output 2 / B-phase	WHT	--	12	OUT3	Output 3 / Z-phase
WHT	---	13	ALARM	Alarm Output	WHT	---	14	D_GND	Digital Ground

รูปที่ 4.23 พอร์ตการเชื่อมต่อสายไฟสำหรับควบคุมในส่วนที่ 2 (I/O)



Color	No.	Name	Function	Color	No.	Name	Function
RED	1	POWER	+24Vdc	GRN	2	POWER	+24Vdc
BLK	3	P-GND	Power Ground	WHT	4	P-GND	Power Ground
GRY	5	STO_IN+	STO Input +	BLU	6	STO_IN-	STO Input -
BRW	7	FG	Frame Ground	-	8	N/A	N/A

รูปที่ 4.24 พอร์ตการเชื่อมต่อสายไฟสำหรับควบคุมในส่วนที่ 3 (แหล่งจ่ายไฟฟ้า)

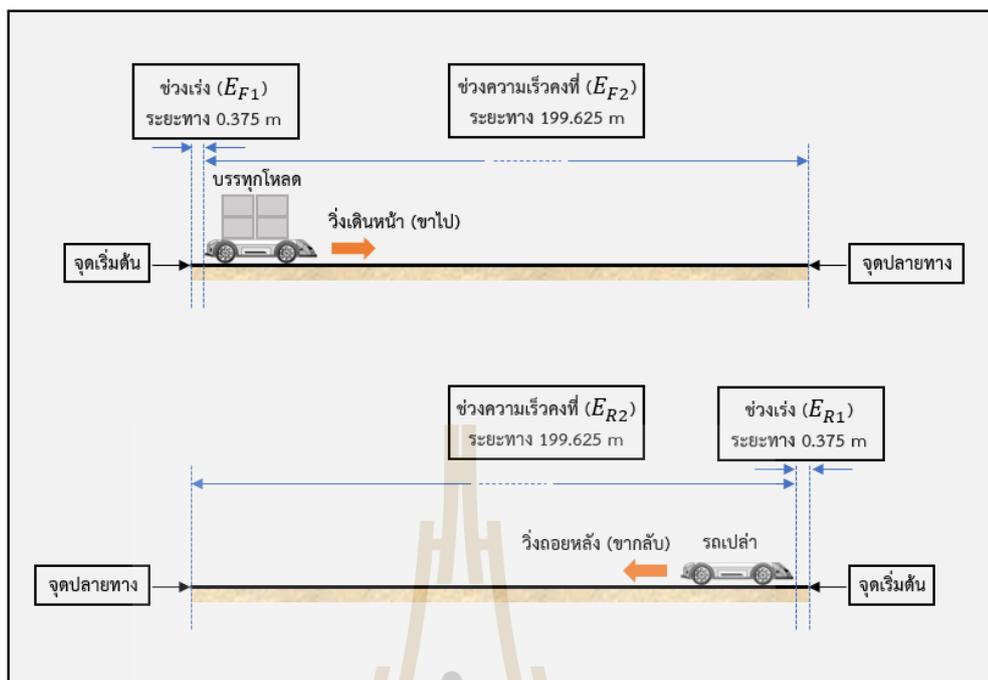


PC side				CM3 side			
Color	No.	Name	Function	Color	No.	Name	Function
GRY	2	TXD	RS232C Receive Data from PC	ORG	1	RXD	RS232C Receive Data from CM3
ORG	3	RXD	RS232C Transmit Data from PC	GRY	2	TXD	RS232C Transmit Data from CM3
WHT	5	D_GND	Digital Ground	WHT	3	D_GND	Digital Ground

รูปที่ 4.25 พอร์ตการเชื่อมต่อสายไฟสำหรับควบคุมในส่วนที่ 4 (Setting)

4.6 การออกแบบหาขนาดแบตเตอรี่ของรถขนส่งอัตโนมัติ

ในการคำนวณพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งหมดของรถขนส่งอัตโนมัติจากจุดที่ 1 (ไลน์ผลิต) ไปยังจุดที่ 2 (โกดัง) โดยมีระยะทาง 200 m (อ้างอิงหัวข้อที่ 4.2.5) เพื่อใช้ออกแบบหาขนาดแบตเตอรี่ของรถขนส่งอัตโนมัติ เมื่อคิดรวมระยะทางขาไปและขากลับรวมเป็น 400 เมตร ซึ่งการคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน เพื่อลดต้นทุนสำหรับการพัฒนาพลังงานไฟฟ้า โดยนำหลักการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.23 พิจารณาเส้นทางรถวิ่ง (ในกรณีไม่มีทางชันและไม่มีสิ่งกีดขวางเท่านั้น) โดยไม่พิจารณาช่วงปล่อยไหลและช่วงเบรก ($E_{F3} = 0$, $E_{F4} = 0$, $E_{R3} = 0$ และ $E_{R4} = 0$) เนื่องจากความเร็วที่รถวิ่งมีความเร็วต่ำ $v = 0.75$ m/s (อ้างอิงตารางที่ 4.1) ที่ใช้ในช่วงเร่งและช่วงความเร็วคงที่ ซึ่งกรณีที่ต้องการหยุดรถสามารถหยุดได้ทันที (ระยะเบรคน้อยมาก) ดังนั้นลักษณะในการเคลื่อนที่โดยกำหนดระยะทางรถวิ่งขาไป 200 m มีระยะทางช่วงเร่ง (E_{F1}) = 0.375 m และระยะทางช่วงความเร็วคงที่ (E_{F2}) = 199.625 m กำหนดระยะทางรถวิ่งขากลับ 200 m มีระยะทางช่วงเร่ง (E_{R1}) = 0.375 m และระยะทางช่วงความเร็วคงที่ (E_{R2}) = 199.625 m ดังรูปที่ 4.26 สำหรับการคำนวณหาพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งหมดที่ใช้ต่อรอบ ดังสมการที่ 3.8 โดยมีรายละเอียดของค่าพารามิเตอร์ระยะทาง ความเร็ว และกำลังไฟฟ้ามอเตอร์ เพื่อใช้ในการคำนวณพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งหมดของรถขนส่งอัตโนมัติของแต่ละช่วง ดังตารางที่ 4.9 รวมทั้งค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพมอเตอร์ ประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์ และประสิทธิภาพการคายประจุของแบตเตอรี่ ดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.26 ลักษณะการเคลื่อนที่ของระยะทางทั้งขาไปและขากลับ

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ระยะทาง ความเร็ว และกำลังไฟฟ้ามอเตอร์

กรณี (ช่วงความเร็ว)	ระยะทาง S (m)	ความเร็ว v (m/s)	กำลังไฟฟ้ามอเตอร์ P_m (kW)
ช่วงเร่ง (E_{F1})	0.375	0.75	4.059
ช่วงความเร็วคงที่ (E_{F2})	199.625	0.75	0.470
ช่วงเร่ง (E_{R1})	0.375	0.75	0.699
ช่วงความเร็วคงที่ (E_{R2})	199.625	0.75	0.081

*หมายเหตุ : ค่าพารามิเตอร์กำลังไฟฟ้ามอเตอร์ของแต่ละช่วง ซึ่งคำนวณกำลังขับเคลื่อนกับประสิทธิภาพมอเตอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว $\eta_m = 0.83$ (อ้างอิงกรอบการคำนวณที่ 4.6)

ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพมอเตอร์ อินเวอร์เตอร์ และการคายประจุของแบตเตอรี่

พารามิเตอร์	ความหมาย	เท่ากับ	หน่วย
η_m	ประสิทธิภาพมอเตอร์ (อ้างอิงรูปที่ 4.10)	0.83	-
η_{inv}	ประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์ (อ้างอิงตารางที่ 4.5)	0.97	-
DoD_{batt}	ประสิทธิภาพการคายประจุของแบตเตอรี่	0.80	-

*หมายเหตุ : ค่าพารามิเตอร์ DoD_{batt} (อ้างอิงบทความ S. Kaewpoung และคณะ, 2023)

พิจารณาการคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ : กรณีวิ่งเดินทางหน้าบรรทุกโหลต (ขาไป)

- การคำนวณพลังงานไฟฟ้าขาไป (ช่วงเร่งและช่วงความเร็วคงที่)

กรอบคำนวณที่ 4.9

การคำนวณพลังงานไฟฟ้า ขาไป (ช่วงเร่ง E_{F1}) i มีค่าเท่ากับ 1

คำนวณพลังงานไฟฟ้า (สมการที่ 3.11) คือ $E_{F1} = (P_{F1}/\eta_m \eta_{inv}) \times (S_{F1}/3,600 DoD_{batt} v_{F1})$

กำหนดให้ $P_{F1} = 4.059$ kW , $S_{F1} = 0.375$ m , $v_{F1} = 0.75$ m/s ,

$$\eta_m = 0.83 , \eta_{inv} = 0.97 \text{ และ } DoD_{batt} = 0.80$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสูตร } E_{F1} &= [(4.059)/(0.83)(0.97)] \times [(0.375)/(3,600)(0.80)(0.75)] \\ &= [5.04] \times [0.0001] \end{aligned}$$

ดังนั้น $E_{F1} = 0.0005$ kWh ***

การคำนวณพลังงานไฟฟ้า ขาไป (ช่วงความเร็วคงที่ E_{F2}) i มีค่าเท่ากับ 2

คำนวณพลังงานไฟฟ้า (สมการที่ 3.11) คือ $E_{F2} = (P_{F2}/\eta_m \eta_{inv}) \times (S_{F2}/3,600 DoD_{batt} v_{F2})$

กำหนดให้ $P_{F2} = 0.470$ kW , $S_{F2} = 199.625$ m , $v_{F2} = 0.75$ m/s ,

$$\eta_m = 0.83 , \eta_{inv} = 0.97 \text{ และ } DoD_{batt} = 0.80$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าในสูตร } E_{F2} &= [(0.470)/(0.83)(0.97)] \times [(199.625)/(3,600)(0.80)(0.75)] \\ &= [0.58] \times [0.09] \end{aligned}$$

ดังนั้น $E_{F2} = 0.052$ kWh ***

สรุปการคำนวณ

สรุปผลการคำนวณ : พลังงานไฟฟ้าช่วงเร่ง (ขาไป) $E_{F1} = 0.0005$ kWh

พลังงานไฟฟ้าช่วงความเร็วคงที่ (ขาไป) $E_{F2} = 0.052$ kWh

พลังงานไฟฟ้ารวม (ขาไป) $E_{FT} = 0.053$ kWh***

พิจารณาการคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ : กรณีวิ่งถอยหลังรถเปล่า (ขากลับ)

- การคำนวณพลังงานไฟฟ้าขากลับ (ช่วงเร่งและช่วงความเร็วคงที่)

กรอบคำนวณที่ 4.10

การคำนวณพลังงานไฟฟ้า ขากลับ (ช่วงเร่ง E_{R1}) i มีค่าเท่ากับ 1

คำนวณพลังงานไฟฟ้า (สมการที่ 3.12) คือ $E_{R1} = (P_{R1}/\eta_m \eta_{inv}) \times (S_{R1}/3,600 DoD_{batt} v_{R1})$

กำหนดให้ $P_{R1} = 0.699$ kW , $S_{R1} = 0.375$ m , $v_{R1} = 0.75$ m/s ,

$\eta_m = 0.83$, $\eta_{inv} = 0.97$ และ $DoD_{batt} = 0.80$

แทนค่าในสูตร $E_{R1} = [(0.699)/(0.83)(0.97)] \times [(0.375)/(3,600)(0.80)(0.75)]$
 $= [0.86] \times [0.0001]$

ดังนั้น $E_{R1} = 0.00008$ kWh ***

การคำนวณพลังงานไฟฟ้า ขากลับ (ช่วงความเร็วคงที่ E_{R2}) i มีค่าเท่ากับ 2

คำนวณพลังงานไฟฟ้า (สมการที่ 3.12) คือ $E_{R2} = (P_{R2}/\eta_m \eta_{inv}) \times (S_{R2}/3,600 DoD_{batt} v_{R2})$

กำหนดให้ $P_{R2} = 0.081$ kW , $S_{R2} = 199.625$ m , $v_{R2} = 0.75$ m/s ,

$\eta_m = 0.83$, $\eta_{inv} = 0.97$ และ $DoD_{batt} = 0.80$

แทนค่าในสูตร $E_{R2} = [(0.081)/(0.83)(0.97)] \times [(199.625)/(3,600)(0.80)(0.75)]$
 $= [0.10] \times [0.09]$

ดังนั้น $E_{R2} = 0.009$ kWh ***

สรุปการคำนวณ

สรุปผลการคำนวณ : พลังงานไฟฟ้าช่วงเร่ง (ขากลับ) $E_{R1} = 0.00008$ kWh

พลังงานไฟฟ้าช่วงความเร็วคงที่ (ขากลับ) $E_{R2} = 0.009$ kWh

พลังงานไฟฟ้ารวม (ขากลับ) $E_{RT} = 0.009$ kWh***

พิจารณาการคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ : กรณีวิ่งขนส่งแ่งมันสำปะหลัง ต่อ รอบ

- การคำนวณพลังงานไฟฟ้ารวม ต่อ รอบ (รวมขาไปและขากลับ)

กรอบคำนวณที่ 4.11	
การคำนวณพลังงานไฟฟ้ารวม ต่อ รอบ (E_T)	
คำนวณหาพลังงานไฟฟ้ารวม ต่อ รอบ (สมการที่ 3.8) คือ $E_T = E_{FT} + E_{RT}$	
กำหนดให้ $E_{FT} = 0.053$ kWh (กรอบคำนวณที่ 4.9) และ $E_{RT} = 0.009$ kWh (กรอบคำนวณที่ 4.10)	
แทนค่าในสูตร $E_T = 0.053 + 0.009$	
ดังนั้น	$E_T = 0.062$ kWh ***
สรุปการคำนวณ	
สรุปผลการคำนวณ : พลังงานไฟฟ้ารวม ต่อ รอบ $E_T = 0.062$ kWh	

จากการคำนวณพลังงานไฟฟ้าในกรณีวิ่งเดินทาง (ขาไป) และกรณีวิ่งถอยหลัง (ขากลับ) โดยพิจารณา 2 ช่วง คือ ช่วงเร่งและช่วงความเร็วคงที่ (กรอบการคำนวณที่ 4.9 ถึง 4.10) เพื่อหาพลังงานไฟฟ้าแต่ละช่วงความเร็วที่ใช้ในการขนส่งแ่งมันสำปะหลัง ซึ่งผลสรุปของการคำนวณ ดังตารางที่ 4.11 พบว่าในกรณีวิ่งเดินทาง (ขาไป) ช่วงเร่ง $E_{F1} = 0.0005$ kWh และช่วงความเร็วคงที่ $E_{F2} = 0.052$ kWh ในกรณีวิ่งถอยหลัง (ขากลับ) ช่วงเร่ง $E_{R1} = 0.00008$ kWh และช่วงความเร็วคงที่ $E_{R2} = 0.009$ kWh นอกจากนี้จากการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงความเร็วสามารถนำไปสรุปผลการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้ารวม (กรอบการคำนวณที่ 4.11) ในกรณีวิ่งเดินทาง (ขาไป) $E_{FT} = 0.053$ kWh และค่าพลังงานไฟฟ้ารวมในกรณีวิ่งถอยหลัง (ขากลับ) $E_{RT} = 0.009$ kWh รวมทั้งค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ทั้งหมดในการวิ่งขนส่งแ่งมันสำปะหลัง ต่อ รอบ $E_T = 0.062$ kWh ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าของแต่ละช่วงความเร็ว

กรณี (ช่วงความเร็ว)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
ช่วงเร่ง (E_{F1})	0.0005
ช่วงความเร็วคงที่ (E_{F2})	0.052
ช่วงเร่ง (E_{R1})	0.00008
ช่วงความเร็วคงที่ (E_{R2})	0.009

ตารางที่ 4.12 ผลการคำนวณหาพลังงานไฟฟ้ารวมของขาไป ขากลับ และที่ใช้ทั้งหมด ต่อรอบ

กรณี (วิ่งรถขนส่ง)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)
วิ่งเดินทาง ขาไป (E_{FT})	0.053
วิ่งถอยหลัง ขากลับ (E_{RT})	0.009
พลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ทั้งหมด ต่อ รอบ (E_T)	0.062

สำหรับการเลือกขนาดแบตเตอรี่ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยพิจารณาจากค่าพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ทั้งหมดของการวิ่งขนส่งแบริ่งน้ำมันสำปะหลัง ต่อ รอบ และจำนวนรอบที่ต้องการขนส่งแบริ่งน้ำมันสำปะหลัง ต่อ วัน ซึ่งเป้าหมายต้องการขนส่งแบริ่งน้ำมันสำปะหลังขนาด 480,000 kg หรือ 100 รอบ ภายใน 1 วัน (อ้างอิงหัวข้อที่ 4.2.4) ทั้งนี้การคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่เพื่อให้รองรับการขนส่งแบริ่งน้ำมันสำปะหลังจำนวน 100 รอบ ต่อ วัน (ใน 1 รอบการชาร์จ) ดังสมการที่ 3.13 คือ $E_{batt} = 0.062 \text{ kWh} \times 100 = 6.2 \text{ kWh}$ หรือ 6,200 Wh ดังนั้นขนาดแบตเตอรี่ที่เลือกใช้งานต้องมีค่าพลังงานไฟฟ้ามากกว่า 6,200 Wh เนื่องจากชุดควบคุมมอเตอร์ที่เลือกใช้ คือ 5 kW 48 V Controller Model MC3528 (อ้างอิงรูปที่ 4.14) มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าอินพุต (Input) เท่ากับ 48 Vdc แบตเตอรี่ที่เลือกใช้งานมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า เท่ากับ 48 Vdc และขนาดกระแสไฟฟ้าต้องมากกว่า (6,200 Wh / 48 Vdc) , 129 Ah



รูปที่ 4.27 Lithium-ion Battery 48 Vdc, 130 Ah (Shenzhen Himax Electronics Co., Ltd.)

ในกรณีนี้ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน เนื่องจากเป็นที่นิยมอุปกรณ์ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน โดยถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีขนาดที่เล็กลงและสามารถให้พลังงานได้มากขึ้น ซึ่งข้อดีที่ทำให้ถูกเลือกมาเป็นแกนพลังงานหลักในการขับเคลื่อนรถยนต์พลังงานไฟฟ้า หรือยานยนต์ไฟฟ้า คือน้ำหนักเบา เป็นเซลล์แห้ง มีอายุการใช้งานนาน ให้พลังงานสูง มีความเสถียรภาพคงที่ และชาร์จประจุได้เร็ว ดังนั้นแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนที่เลือกใช้เป็นผลิตภัณฑ์ของ Shenzhen Himax Electronics Co., Ltd. ขนาด 48 Vdc, 130 Ah ดังรูปที่ 4.27 และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.13 รวมทั้งชุดชาร์จประจุแบตเตอรี่อัจฉริยะ (Smart Charger Battery) ขนาดพิกัดแรงดัน 48 Vdc และมีกระแสชาร์จสูงสุด 30 A เพื่อใช้สำหรับชาร์จประจุแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ดังรูปที่ 4.28 และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.13 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ Lithium-ion Battery 48 Vdc, 130 Ah

Item	detail
Brand Name	Shenzhen Himax Electronics Co., Ltd.
Type	Lithium-ion Battery
Rated Voltage	48 Vdc
Range Voltage	48 - 58.4 Vdc
Max. Voltage	58.4 Vdc
Min. Voltage	48 Vdc
Max. Charge	60 A
Circuit Protect	BMS
Range Temp.	-20 ถึง 60 องศาเซลเซียส
Cycle Life	>3000, 80 % DoD
Capacity	130 Ah
Standard	CE และ ROHS
BMS	Smart BMS
Battery Size	640x470x230 mm
Weight	66.5 kg
Protection	OVP, LVP, OVT, SCP
Plug Input Type	Aderson
Plug Output Type	Aderson
Communication (Option)	CAN bus/RS485



รูปที่ 4.28 ชุดชาร์จประจุแบตเตอรี่อัจฉริยะ 48 Vdc, 30 A

ตารางที่ 4.14 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของชุดชาร์จประจุแบตเตอรี่อัจฉริยะ 48 Vdc, 30 A

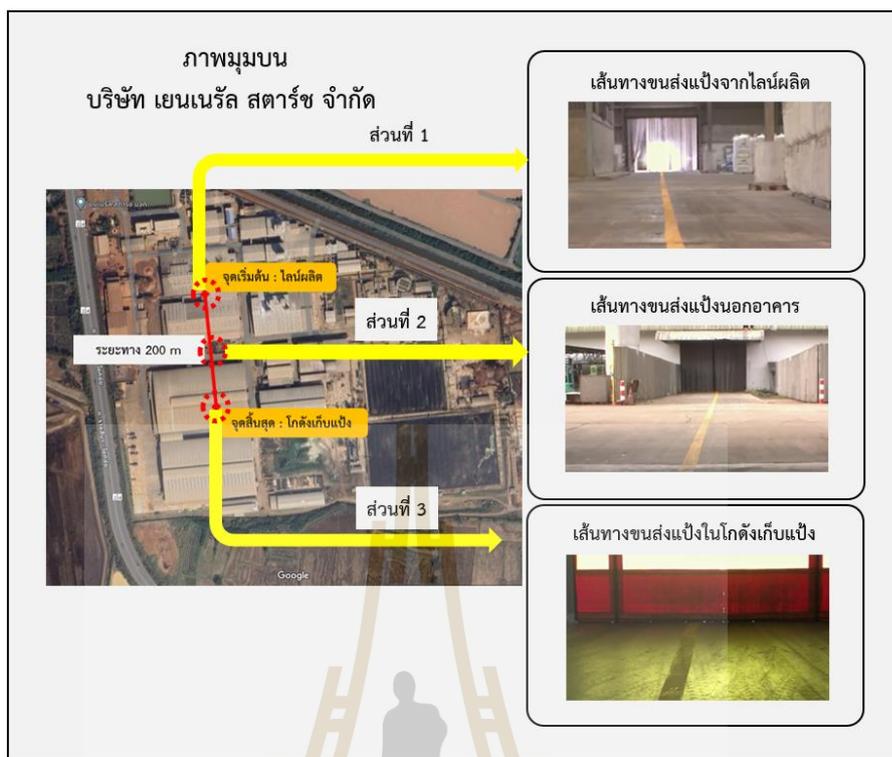
Item	detail
Use for	Lithium-ion Battery
Charging Mode	6 Stages, CC, CV และ Trickle
Rated Output Voltage	48 Vdc
Output Current	30 A
AC input	10 Vac or 220 Vac, (47-63 Hz)
RH	0 - 95%
Max. Altitude	20,000 m
Work Conditions	-40 ถึง 70 องศาเซลเซียส
Standard	CE และ ROHS
Size	86x168x284 mm
Weight	3.5 kg
Plug Input Type	EU
Plug Output Type	Aderson
Communication (Option)	CAN bus/RS485
Protection	IP67

4.7 การออกแบบระบบนำทางและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง

การใช้เทคโนโลยีนำทางแบบอัตโนมัติโดยอาศัยรูปแบบการนำทาง ในหัวข้อที่ 3.5 ซึ่งเป็นรูปแบบของการนำทางต่าง ๆ ของรถขนส่ง หรือยานพาหนะ สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้รูปแบบการนำทางอัตโนมัติที่มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในโรงงานอุตสาหกรรมที่เป็นไปได้มากที่สุด การสำรวจเส้นทางที่ต้องการวิ่งรถเพื่อขนส่งแ่งมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตแ่งไปยังโกดังเก็บแ่งของทางบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด พบว่ามีระยะทาง 200 m ขาไปและขากลับรวมระยะทาง 400 m ตัวอย่างเส้นทางจากภาพถ่ายมุมมองด้านบนของทางบริษัท ดังรูปที่ 4.29 และสภาพพื้นที่ด้านในตัวอาคารของทางบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด ที่ต้นทาง (จุดเริ่มต้น : ไลน์ผลิต) ตลอดจนปลายทาง (จุดสิ้นสุด : โกดังเก็บแ่ง) พบว่าทางบริษัทมีการตีเส้นถนน หรือ เส้นจราจร เพื่อเป็นไกด์นำทาง โดยแ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือ เส้นทางขนส่งแ่งจากไลน์ผลิต ส่วนที่ 2 คือ เส้นทางขนส่งแ่งนอกอาคาร และส่วนที่ 3 คือ เส้นทางขนส่งแ่งในโกดังเก็บแ่ง ดังรูปที่ 4.30 เพื่อให้พนักงานทราบถึงเส้นทางเดินรถในการขนส่งแ่งมันสำปะหลัง และสีที่ทางบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด ใช้ คือ สีเทอร์โมพลาสติก ใช้สำหรับทำเครื่องหมายบนผิวทาง ของบริษัท สยามทราฟฟิค จำกัด ภายใต้ชื่อผลิตภัณฑ์ “ไตร-สตาร์” (TRI-STAR) ซึ่งผลิตตามมาตรฐานกรมทางหลวง ได้รับมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 542-2549 และยังได้รับการรับรองมาตรฐานคุณภาพ ISO 9001 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 จนถึงปัจจุบัน ISO 9001 : 2015 แสดงตัวอย่างของสีเทอร์โมพลาสติก ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.29 ระยะทางขนส่งแ่งมันสำปะหลังระหว่างอาคาร 200 m รวมขาไปและขากลับ 400 m



รูปที่ 4.30 สภาพพื้นที่เส้นทางขนส่งแป้งมันสำปะหลังของบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด



รูปที่ 4.31 สีเทอร์โมพลาสติกสำหรับทำเครื่องหมายบนผิวทาง ของบริษัท สยามทราฟฟิค จำกัด

สำหรับรูปแบบการนำทางต้องการให้มีการนำทางแบบอัตโนมัติตามเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากความต้องการขนส่งแบริ่งมันสำปะหลังระหว่างอาคาร ต้องขนส่งในสภาพแวดล้อมทั้งในส่วนที่อยู่ในอาคารและนอกอาคาร อีกทั้งทางบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด ได้ดำเนินการตีเส้นถนน หรือ เส้นจราจร เพื่อเป็นไกด์นำทางไว้ก่อนหน้าลงสำรวจพื้นที่ ซึ่งสิ่งที่ทางบริษัทใช้สำหรับตีเส้นคือ สีเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นรูปแบบการนำทางที่เกี่ยวข้องกับหัวข้องานวิจัยที่ตั้งไว้และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ตามสภาพแวดล้อมพื้นที่ทำงานจริง คือ การนำทางด้วยแสง (อ้างอิงหัวข้อที่ 3.5.6) ซึ่งการนำทางในรูปแบบนี้ต้องมีการทาสีบนเส้นทางการนำทางของรถขนส่ง และตระหนักถึงการนำทางโดยเพียงแค่มวลผลสัญญาณภาพของสีที่ถ่ายโดยใช้กล้อง ทั้งนี้เป้าหมายที่ต้องการให้วิ่งขนส่งแบริ่งมันสำปะหลังระหว่างอาคารมี 2 กรณี คือ รถวิ่งเดินหน้า (บรรทุกแบริ่งจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแบริ่ง) และกรณีรถวิ่งถอยหลัง (วิ่งรถเปล่าจากโกดังเก็บแบริ่งกลับมาไลน์ผลิต) ดังนั้นกล้องที่นำมาประยุกต์ใช้กับรถขนส่งใช้จำนวน 2 ตัว คือ กล้องด้านหน้า (รถวิ่งเดินหน้า) และ กล้องด้านหลัง (รถวิ่งถอยหลัง) โดยกล้องที่ใช้ คือ HIKVISION รุ่น DS-2CD2625FWD-IZS ดังรูปที่ 4.32 และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของกล้อง HIKVISION รุ่น DS-2CD2625FWD-IZS

Item	detail
Image Sensor	1/2.8" Progressive Scan CMOS
Signal System	PAL/NTSC
Min. Illumination	Color: 0.0068 Lux @ (F1.4, AGC ON), 0 Lux with IR)
Shutter Time	1/3 s to 1/100,000 s
Focus	Auto
Video Compression	H.265+/H.265/H.264+/H.264/MJPEG
Wide Dynamic Range	120 dB
Day& Night	IR Cut Filter
IR Range	Up to 50m
Max. Image Resolution	1920 x 1080
Image Enhancement	BLC/3D DNR/BLC
Protocols	TCP/IP, ICMP, HTTP, HTTPS, IPv6 and Bonjour
Communication Interface	1 RJ45 10M / 100M Ethernet interface
Power Supply	12 VDC \pm 25%, PoE (802.3af Class3)
Operating Conditions	-30 $^{\circ}$ C \sim 60 $^{\circ}$ C (-22 $^{\circ}$ F \sim 140 $^{\circ}$ F)
Weather Proof	IP67
Dimensions	Φ 144.13x332.73 mm (Φ 5.67"x 13.10")
Weight	1.89 kg



รูปที่ 4.32 กล้อง HIKVISION รุ่น DS-2CD2625FWD-IZS

ระบบความปลอดภัยในระหว่างการวิ่งนำทางอัตโนมัติเพื่อต้องการนำมาประยุกต์และพัฒนาควบคู่กับการนำทางแบบอัตโนมัติ ปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่สามารถเพิ่มความปลอดภัยในการขนส่งเพื่อลดความเสียหายของการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรง ได้แก่ รถขนส่ง มนุษย์ วัตถุ และสิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนารถขนส่งแบริ่งมันสำปะหลังจำเป็นต้องมีระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เป็นชุดเซ็นเซอร์ หรือ อุปกรณ์ตรวจจับสิ่งกีดขวาง (อ้างอิงหัวข้อที่ 3.6.6) คือ LIDAR SLAMTEC รุ่น RPLIDAR A3 ดังรูปที่ 4.33 สามารถสแกนตรวจจับวัตถุได้ 360 องศา พร้อมวัดระยะที่สแกนได้ไกลถึง 25 m (สำหรับวัตถุสีขาว) และ 10 m (สำหรับวัตถุสีดำ) และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.16



รูปที่ 4.33 LIDAR SLAMTEC รุ่น RPLIDAR A3

ตารางที่ 4.16 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ LIDAR SLAMTEC รุ่น RPLIDAR A3

Item	detail
Distance Range	0.15 - 25 m
Angular Range	0-360 degree
Distance Resolution	< 0.5 (0.15~1.5 m)
Angular Resolution	0.9degree
Sample Duration	0.25 ms
Sample Frequency	≥ 4000Hz
Scan Rate	10Hz
Weight	0.430 kg
Port	USB
Working Area	Indoor/outdoor

เมื่อได้ชุดเซ็นเซอร์ หรือ อุปกรณ์สำหรับพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติของรถขนส่งแบ่งมันสำปะหลัง คือ กล้อง HIKVISION รุ่น DS-2CD2625FWD-IZS และระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง คือ LIDAR SLAMTEC รุ่น RPLIDAR A3 สิ่งสำคัญ คือ ระบบการประมวลผลที่ต้องอ่านค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ในการประมวลผลของภาพจากกล้องผ่านการเชื่อมต่อสัญญาณโดยใช้สายแลน (LAN) และระบบตรวจจับวัตถุจากไลดาร์ผ่านการเชื่อมต่อสัญญาณโดยใช้สายยูเอสบี (USB) ซึ่งใช้เชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์มินิพีซี (Mini PC) หรือ คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ที่สามารถรองรับรูปแบบการพัฒนาซอฟต์แวร์ในระบบปฏิบัติการ Windows และ Linux ได้หลากหลายภาษา เช่น ภาษา C, C++, Python, Java, Java Script และ VB เป็นต้น ดังนั้น มินิพีซี ที่เลือกใช้ คือ GK3 Mini PC CPU Intel N5105/N100 ดังรูปที่ 4.34 และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ GK3 Mini PC CPU Intel N5105/N100

Item	detail
Processor Type Series	Intel CPU Series
Graphic Card Series	Intel UHD Graphics
System Memory	8GB RAM 128GB
Operating System	Windows/Linux
Processor Frequency	3.4 GHz
Ports	HDMI, USB 2.0, USB 3.0, Ethernet LAN (RJ-45)
Storage Type	SSD + HDD
Processor Type	Quad-core
Power Supply	12 Vdc, 2.5 A



รูปที่ 4.34 GK3 Mini PC CPU Intel N5105/N100

สำหรับอุปกรณ์ที่ต้องใช้สำหรับตั้งค่าหรือกำหนดเงื่อนไขของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ตั้งค่าความเร็วที่ใช้ของรถขนส่ง และโหมดการทำงานของรถขนส่ง เป็นต้น โดยการพัฒนาซอฟต์แวร์ขึ้นมาไว้สำหรับประมวลผลและเชื่อมต่อสัญญาณการรับและส่งข้อมูลพารามิเตอร์ผ่านการสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus ซึ่งเป็นอุปกรณ์นั้น เรียกว่า อุปกรณ์ที่เป็น Master ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมในระดับอุปกรณ์รองลงมา คือ อุปกรณ์ Slave (รายละเอียดหัวข้อที่ 3.10) ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ที่เป็น Master คือ จอทัสกรีน Wecon New Style 7-inch HMI PI3070ie ดังรูปที่ 4.35 และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.18 เพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของรถขนส่ง แบตเตอรี่สำรองผ่านการเชื่อมต่อสายสัญญาณโดยใช้สายแลนเข้ากับมินิพีซี หรือ อุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ ที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อผ่านสายแลนและใช้โปรโตคอล Modbus TCP/IP



รูปที่ 4.35 จอทัสกรีน Wecon New Style 7-inch HMI PI3070ie

ตารางที่ 4.18 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ Wecon New Style 7-inch HMI PI3070ie

Item	detail
Brand Name	Wecon
Hardware	CPU Cortex A35 1.2GHz,128M FLASH, 64M RAM
Display Size	7 inch
Resolution	800×480 TFT LCD, 16,000k colors
Interface	Com1: RS232, RS422/RS485(2 in 1)
Ethernet Port (TCP/IP)	Support (Modbus TCP/IP)
Storage	128M FLASH + 64M DDRII RAM
CPU	Cortex A35 1.2GHz
Backlight Life Time	50,000 h
Touch Panel	High precision four-wire resistive
Colors	16,000K colors
Backlight Type	LED
Power Supply	DC 24 V (12 to 28 V DC)
Power	< 15w
Temperature	Working Temperature : -10 to 60 °C
IP Code	IP65 (Front panel)
Size	201.2×147.2×39.0 mm
Weight	0.52 kg

นอกจากนี้ในการควบคุมความเร็วของรถขนส่งให้สามารถวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง ซึ่งควบคุมผ่านชุดควบคุมมอเตอร์ผ่านรูปแบบสายสัญญาณ (Signal Drive) 0-5 Vdc (อ้างอิงตารางที่ 4.5) โดยใช้ 5 kW 48 V Controller Model MC3528 ควบคุมให้รถขนส่งสามารถวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลังผ่านมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อน รวมทั้งควบคุมการบังคับลิ้นชักและลิ้นชักในระหว่างวิ่งรถขนส่งผ่าน Servo Motor Model CM3-23L50A ในรูปแบบของสายสัญญาณ Digital Input และ Digital Output (อ้างอิงจากตารางที่ 4.8) ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์พีแอลซี (PLC Control) TM21CE16R Schneider Electric M221 สำหรับควบคุมชุดมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนและควบคุมการบังคับลิ้นชักของ Servo Motor โดยมีการเพิ่มโมดูลควบคุมในพีแอลซี คือ โมดูล Analog TM3AQ4 และโมดูล Digital TM3DQ8R เพื่อให้สามารถควบคุมตามฟังก์ชันที่ตั้งเป้าหมายไว้ ซึ่งภาพตัวอย่างพีแอลซี ดังรูปที่ 4.36 และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.19

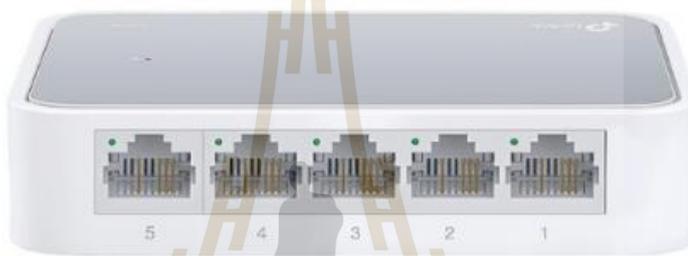


รูปที่ 4.36 พีแอลซี TM221CE16R Schneider Electric M221

ตารางที่ 4.19 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมพีแอลซี TM221CE16R Schneider Electric M221

Item	detail
Manufacturer Series	Modicon M221
Number of Inputs	9 Digital, 2 Analog
Number of Outputs	7 Digital
Programming Interface	Mini USB
Power Supply Input	220 Vac, (47-63 Hz)
Output Coil	24 Vdc
Dimensions	100.6 x 95 x 75.9 mm
Program Capacity	10,000 Steps
Program Language Used	Ladder Diagram
Depth	75.9 mm
Mounting Type	Panel Mount
Communication	Ethernet or TCP/IP, RS485
Port Support	LAN
Module Analog TM3AQ4	4 Analog Output
Module Digital TM3DQ8R	8 Digital Output

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติ ได้แก่ กล้อง HIKVISION รุ่น DS-2CD2625FWD-IZS จำนวน 2 ตัว มินิพีซี GK3 Mini PC CPU Intel N5105/N100 จำนวน 1 ตัว จอทัสกรีน Wecon New Style 7-inch HMI PI3070ie จำนวน 1 ตัว และพีแอลซี TM221CE16R Schneider Electric M221 จำนวน 1 ตัว รวมอุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมด 5 อุปกรณ์ ซึ่งแต่ละอุปกรณ์มีการเชื่อมต่อเพื่อรับส่งข้อมูลพารามิเตอร์ต่าง ๆ หรือ การตั้งค่าซอฟต์แวร์ ผ่านสายสัญญาณในรูปแบบของสายแลน ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้รวบรวมสายแลนจำนวนหลายเส้นที่มาจากแต่ละอุปกรณ์เข้าเป็นโหนด (Node) เดียวกัน นั่นคือ สวิตซ์ฮับ (Switch Hub LAN) รุ่น Switching Hub 5 Port TP-LINK TL-SF1005D ดังรูปที่ 4.37 โดยการตั้งค่าในอุปกรณ์ IP Address เพื่อเชื่อมต่อสัญญาณให้ถึงกัน และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.20



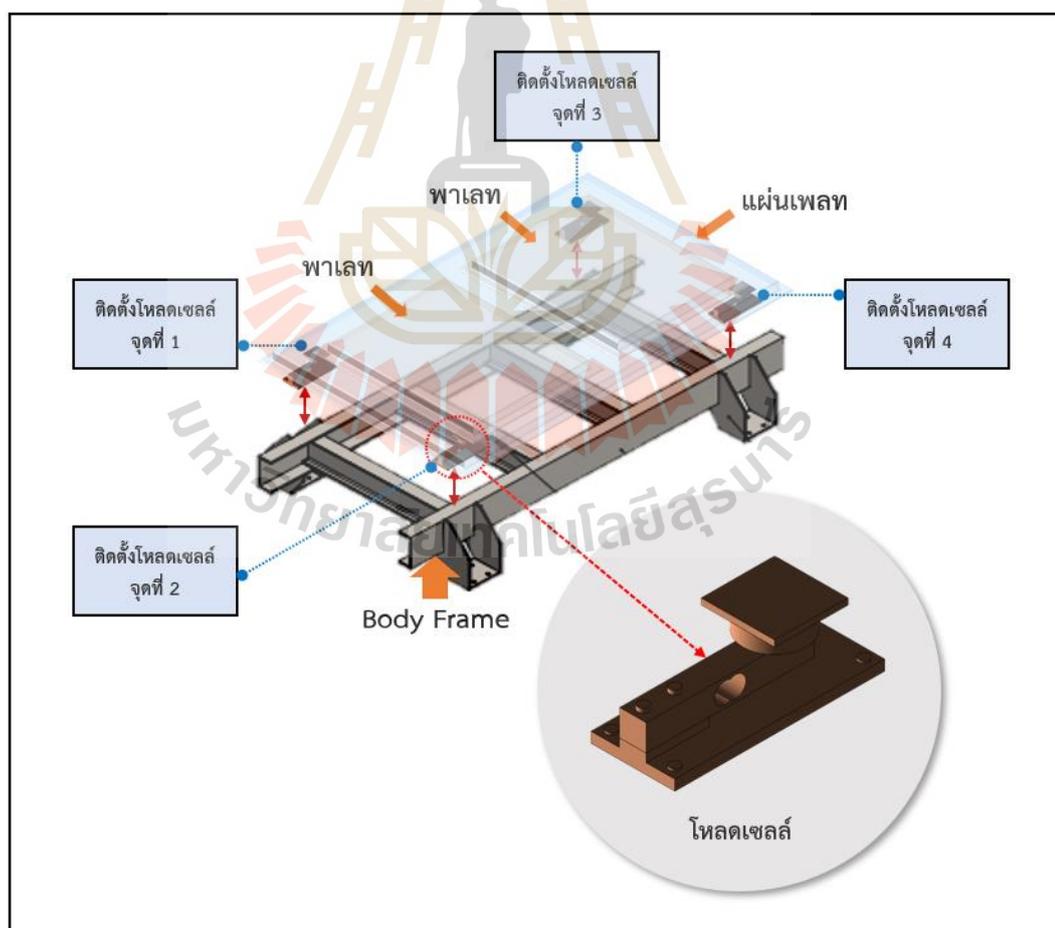
รูปที่ 4.37 Switching Hub 5 Port TP-LINK TL-SF1005D

ตารางที่ 4.20 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมของ Switching Hub 5 Port TP-LINK TL-SF1005D

Item	detail
Standards and Protocols	IEEE 802.3i/802.3u/ 802.3ab/802.3x CSMA/CD
Interface	5x Gigabit Port
Buffer Size	2 MB
External Power Supply	100 - 240VAC, 50/60Hz
Fan Quantity	Fanless
Data Rates	10/100/1,000 Mbps at Half Duplex
Power Supply	5VDC/0.6A
Dimensions	134.5 x79.0 x 22.5 mm
Certification	FCC, CE, RoHS
System Requirements	Microsoft Windows XP, Vista, 7, 8, Mac OS, and Linux
Operating Temperature	0C to 40C (32F to 104F)
Supports	Auto MDI / MDIX

4.8 การออกแบบระบบตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติ

ในการตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติที่ใช้ขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับปั๊ม ซึ่งก่อนรถวิ่งขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับปั๊มด้วยรถขนส่งอัตโนมัติต้องมีการตรวจสอบน้ำหนักของไหลที่บรรจุทุก หรือแบริ่งน้ำมันสำหรับปั๊มที่บรรจุทุกอยู่บนรถขนส่งอัตโนมัติ เพื่อป้องกันการบรรจุทุกน้ำหนักเกินที่กำหนดไว้และส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของตัวรถที่ออกแบบในการรองรับน้ำหนักเกิดความเสียหาย (หมายเหตุ : ยกเว้นรายละเอียดทางกลเชิงลึกสำหรับการออกแบบทางด้านโครงสร้าง อ้างอิงหัวข้อที่ 4.3 เนื่องจากได้รับการออกแบบโดยทางวิศวกรรมเครื่องกล หรือ วิศวกรรมยานยนต์) ทั้งนี้โครงสร้างของตัวรถที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ใช้ไหลเซลล์เป็นอุปกรณ์สำหรับติดตั้ง เพื่อชั่งน้ำหนักแบริ่งน้ำมันสำหรับปั๊มมีจำนวน 4 จุด บน Body Frame ดังรูปที่ 4.38 ซึ่งไหลเซลล์ที่นำมาใช้ต้องมีการคำนวณหาพิกัดน้ำหนักให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานและถูกต้องตามหลักการออกแบบทางวิศวกรรม ดังนั้นการคำนวณหาพิกัดของไหลเซลล์ ดังสมการที่ 3.18 กำหนดให้ใช้ไหลเซลล์จำนวน 4 ตัว ($N_L = 4$) มีไหลเซลล์ที่ต้องการบรรจุทุกสูงสุด (น้ำหนักไหลเซลล์สูงสุด) $M_T = 4,800$ kg และน้ำหนักตัวแผ่นเพลทรวมกับพาเลทที่รองรับน้ำหนัก (น้ำหนักภาชนะเปล่า) $M_C = 84$ kg ใช้พิจารณาในรอบการคำนวณที่ 4.12



รูปที่ 4.38 จุดติดตั้งไหลเซลล์จำนวน 4 จุด บน Body Frame

พิจารณาการคำนวณหาพิกัตน้ำหนัของโหลดเซลล์

- กรณีของการคำนวณหาพิกัตโหลดเซลล์ (พิกัตน้ำหนัที่ใช้ต่อจำนวน 1 ตัว)

กรอบคำนวณที่ 4.12

การคำนวณพิกัตน้ำหนัของโหลดเซลล์

คำนวณหาพิกัตน้ำหนั (สมการที่ 3.18) คือ $M_{RL} = 2(M_T + M_C)/N_L$

กำหนดให้ $M_T = 4,800$ kg , $M_C = 84$ kg และ $N_L = 4$

แทนค่าในสูตร $M_{RL} = (2)(4,800 + 84)/(4)$

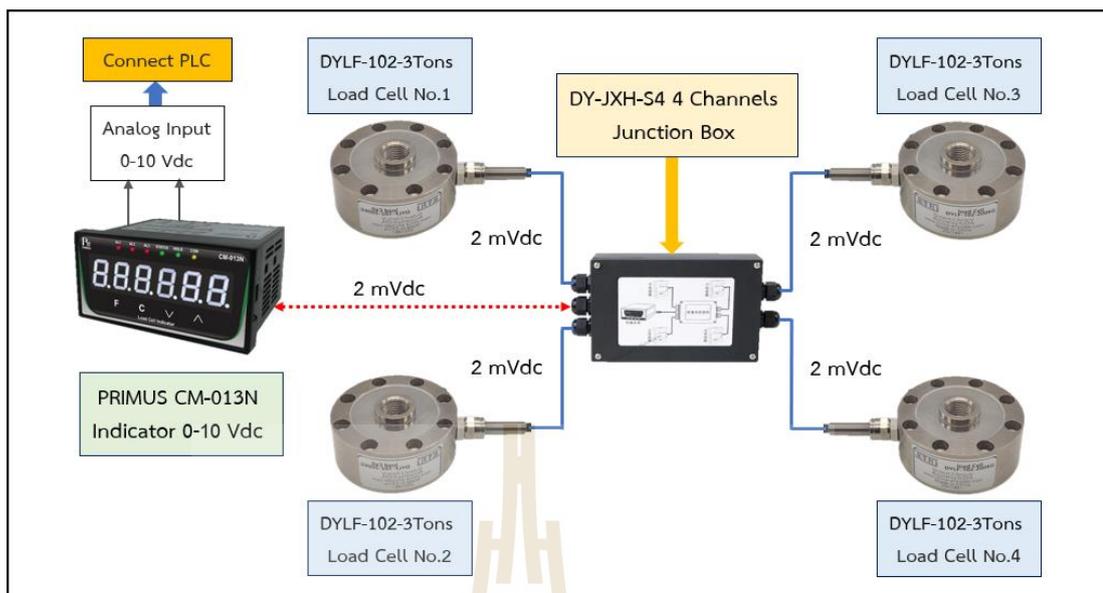
ดังนั้น $M_{RL} = (9,768)/(4) = 2,442$ kg ***

สรุปการคำนวณ

สรุปผลการคำนวณ : พิกัตน้ำหนัของโหลดเซลล์ $M_{RL} = 2,442$ kg (ต่อ 1 ตัว)

ในกรอบการคำนวณที่ 4.12 คือ การคำนวณหาพิกัตน้ำหนัของโหลดเซลล์ที่ใช้ โดยค่าที่คำนวณได้เป็นค่าพิกัตน้ำหนัของโหลดเซลล์ต่อจำนวน 1 ตัว และมีค่า $M_{RL} = 2,442$ kg ซึ่งหมายความว่าโหลดเซลล์ที่นำมาใช้พัฒนารถขนส่งอัตโนมัติแต่ละตัวต้องมีพิกัตการรับน้ำหนัมากกว่า 2,442 kg ขึ้นไป และงานวิจัยนี้ใช้โหลดเซลล์ที่มีพิกัตน้ำหนั 3,000 kg จำนวน 4 ตัว (อ้างอิงรูปที่ 4.38) เมื่อทราบพิกัตโหลดเซลล์ที่ต้องการยังมีสิ่งสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา คือ ชนิดของโหลดเซลล์ที่นำมาใช้ ซึ่งอ้างอิงจากลักษณะของการขนส่งแ่งมันสำปะหลังที่ใช้รถขนส่งอัตโนมัติ โดยที่รถขนส่งอัตโนมัติมีการรองรับน้ำหนับรรทุกทุกแ่งมันสำปะหลังที่ทิศทางเป็นแบบแรงกดในแนวตั้ง ทั้งนี้การเลือกชนิดของโหลดเซลล์ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน คือ โหลดเซลล์สเตรนเกจแบบแพนเค้กที่สามารถใช้ได้ทั้งแรงกดและแรงดึง มีความแม่นยำสูงโดยที่ค่า Linearity และ Hysteresis ในระดับ 0.03 % ถึง 0.05 % เนื่องจากมีจำนวนสเตรนเกจมากกว่าโหลดเซลล์ชนิดอื่น ๆ นิยมใช้สำหรับงานเครื่องทดสอบแรงกดหรือแรงดึงที่มีขนาดตั้งแต่ 500 kg จนถึง 500,000 kg (อ้างอิงรูปที่ 3.52)

ดังนั้นอุปกรณ์ที่เลือกใช้ตรวจสอบน้ำหนัของรถขนส่งอัตโนมัติเป็นผลิตภัณฑ์ของ Shanghai Qiyi Co., Ltd. (หมายเหตุ : โหลดเซลล์ที่เลือกนำมาใช้มีการตั้งค่าการใช้งานและเชื่อมต่อสายสัญญาณเป็นที่เรียบร้อยจากผู้ผลิต Shanghai Qiyi Co., Ltd. เพื่อให้สามารถใช้งานตามเป้าหมายที่ต้องการ คือ สามารถชั่งน้ำหนั หรือ ตรวจสอบน้ำหนัแ่งมันสำปะหลังที่บรรทุกบนรถขนส่งอัตโนมัติ) ดังรูปที่ 4.39 คือ โหลดเซลล์ DYLF-102-3Tons จำนวน 4 ตัว ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์รวมสัญญาณโหลดเซลล์ คือ DY-JXH-S4 4 Channels Junction Box ผ่านรูปแบบสายสัญญาณ 2 mVdc ส่งสัญญาณไปที่จอแสดงผล PRIMUS CM-013N Indicator 0-10 Vdc ที่เป็นตัวเชื่อมต่อสื่อสารกับพีแอลซีในรูปแบบ อนุาล็อกอินพุท (แรงดันไฟฟ้า 0-10 Vdc) และมีรายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติม ดังตารางที่ 4.21



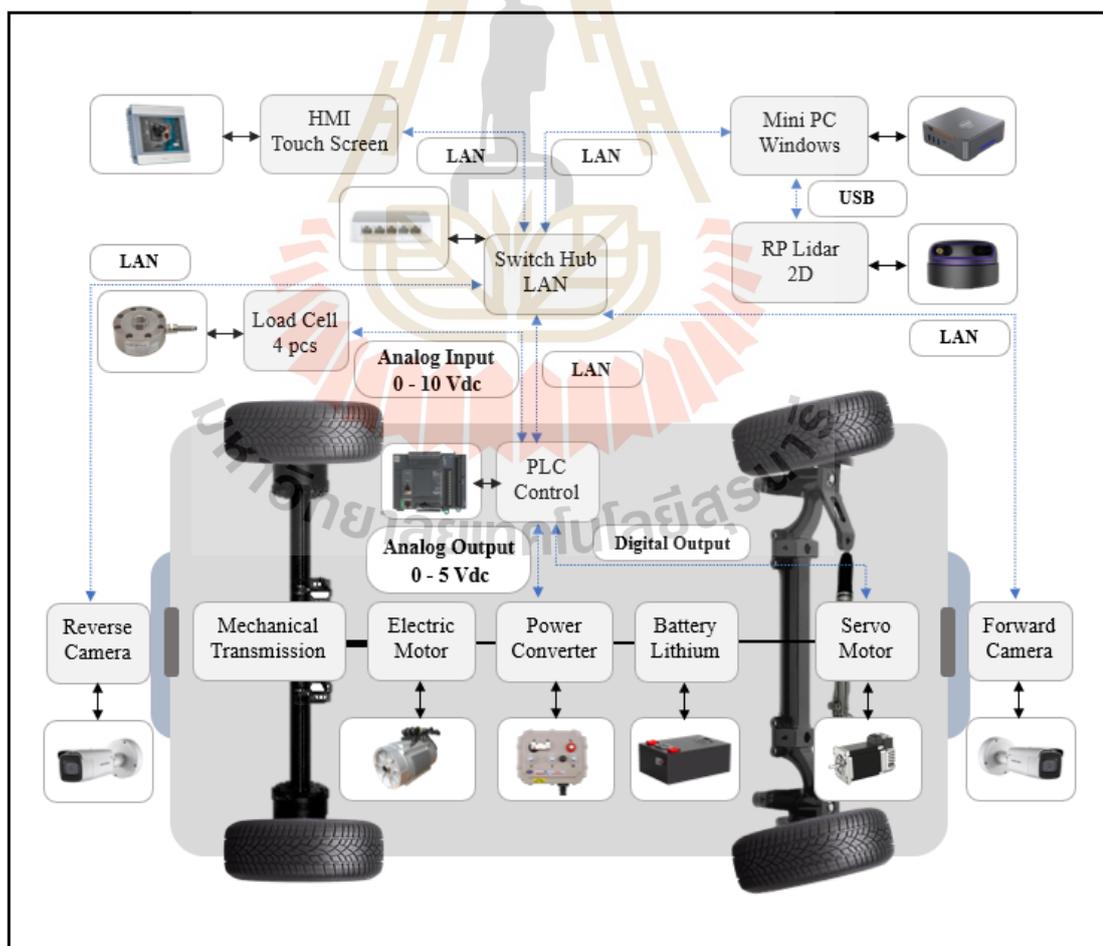
รูปที่ 4.39 อุปกรณ์ที่เลือกใช้ตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติ

ตารางที่ 4.21 รายละเอียดคุณสมบัติเพิ่มเติมอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติ

Item	detail
Manufacturer Reference	4-DYLF-102-3Tons with indicator
Measuring Range	0-3,000 kg
Sensitivity	2.0±0.05 mV (DC)
Linearity	≤±0.03 %F.S.
Hysteresis	≤ ± 0.03 % F.S.
Repeatability	≤ ± 0.03 % F.S.
Creep	≤ ± 0.03 % F.S./3 min
Zero Output	≤ ± 1 % F.S.
Operating Temperature	-20 to 80 °C
Input Resistance	750±20 Ω
Output Resistance	700±5 Ω
Analog Output (Indicator)	0-10 Vdc
Insulation Resistance	≥5000 MΩ (50 Vdc)
Supply Voltage	5-15 Vdc
Protection Rating	IP67.
Load Cell Support	4 pcs

4.9 การออกแบบระบบควบคุมของรถขนส่งอัตโนมัติ

ในการออกแบบระบบควบคุมของรถขนส่งแบงก์น้ำมันสำปะหลังที่มีการนำทางอัตโนมัติ ซึ่งแน่นอนว่าปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่สามารถทำให้รถขนส่งขับเคลื่อนแบบนำทางอัตโนมัติได้หลากหลายวิธีการ ขึ้นอยู่กับขีดความสามารถของอุปกรณ์ หรือ ชุดเซ็นเซอร์ที่เลือกใช้ประมวลผลของระบบควบคุมและฟังก์ชันของซอฟต์แวร์ รวมทั้งรูปแบบโปรโตคอลการเชื่อมต่อสื่อสารของอุปกรณ์ที่ใช้ เพื่อนำไปออกแบบอัลกอริทึมที่ใช้พัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติของรถขนส่ง สำหรับอุปกรณ์หลักที่ใช้สำหรับออกแบบที่ใช้พัฒนาระบบควบคุม ดังตารางที่ 4.22 (อ้างอิงหัวข้อที่ 4.4 ถึง 4.8) และซอฟต์แวร์ที่เลือกใช้ ดังตารางที่ 4.23 จากนั้นเชื่อมต่อของแต่ละอุปกรณ์เข้าด้วยกันทั้งหมด โดยมีรูปแบบโปรโตคอลการเชื่อมต่อสื่อสารของอุปกรณ์ ดังรูปที่ 4.40 ทั้งนี้ได้แบ่งการออกแบบเชื่อมต่อระบบออกเป็น 5 ส่วนย่อย โดยส่วนแรก คือ ส่วนของระบบขับเคลื่อน ส่วนที่สอง คือ ส่วนของระบบบังคับเลี้ยว ส่วนที่สาม คือ ส่วนของระบบตรวจสอบน้ำหนัก ส่วนที่สี่ คือ ส่วนของระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง และส่วนสุดท้าย คือ อัลกอริทึมของรถขนส่งอัตโนมัติ โดยสามารถแสดงรายละเอียดข้อมูลเชิงลึกในแต่ละส่วนดังนี้



รูปที่ 4.40 การเชื่อมต่อโปรโตคอลการสื่อสารของอุปกรณ์

ตารางที่ 4.22 อุปกรณ์สำหรับออกแบบระบบควบคุมของรถขนส่งอัตโนมัติ

อุปกรณ์หลักที่ใช้	
รายการ	รายละเอียด
มอเตอร์ขับเคลื่อน (Electric Motor)	Induction Motor 5 kW 48 Vdc
ชุดควบคุมมอเตอร์ (Power Converter)	5 kW 48 V Controller Model MC3528
แบตเตอรี่ (Battery Lithium)	Lithium-ion Battery 48 Vdc, 130 Ah
มอเตอร์บังคับเคลื่อน (Servo Motor)	Servo Motor Model CM3-23L50A
พีแอลซี (PLC Control)	TM221CE16R Schneider Electric M221
สวิตช์ฮับ (Switch Hub LAN)	TP-Link Model tl-sf1005d
จอทัสกรีน (HMI Touch Screen)	Wecon New Style 7-inch HMI PI3070ie
มินิพีซี (Mini PC Windows)	GK3 Mini PC CPU Intel N5105/N100
กล้องวีงเดินหน้า (Forward Camera)	HIKVISION IP Camera DS-2CD2625FWD-IZS
กล้องวีงถอยหลัง (Reverse Camera)	HIKVISION IP Camera DS-2CD2625FWD-IZS
เซ็นเซอร์ตรวจจับสิ่งกีดขวาง (RP Lidar 2D)	RPLIDAR A3 SLAMTEC
ชุดตรวจสอบน้ำหนัก (Load Cell 4 pcs)	Pancake Load Cells DYLF-102-3Tons

ตารางที่ 4.23 ซอฟต์แวร์สำหรับออกแบบระบบควบคุมของรถขนส่งอัตโนมัติ

ซอฟต์แวร์หลักที่ใช้	
ซอฟต์แวร์	อุปกรณ์
PIStudio	HMI Touch Screen
Node-RED	Mini PC Windows
Python V 3.11.0	Mini PC Windows
Ecostruxure Machine Expert-Basic	PLC Control
Enpower Parameter Calibrator	Power Converter
COOL WORKS QUICK V1.0.0	Servo Motor

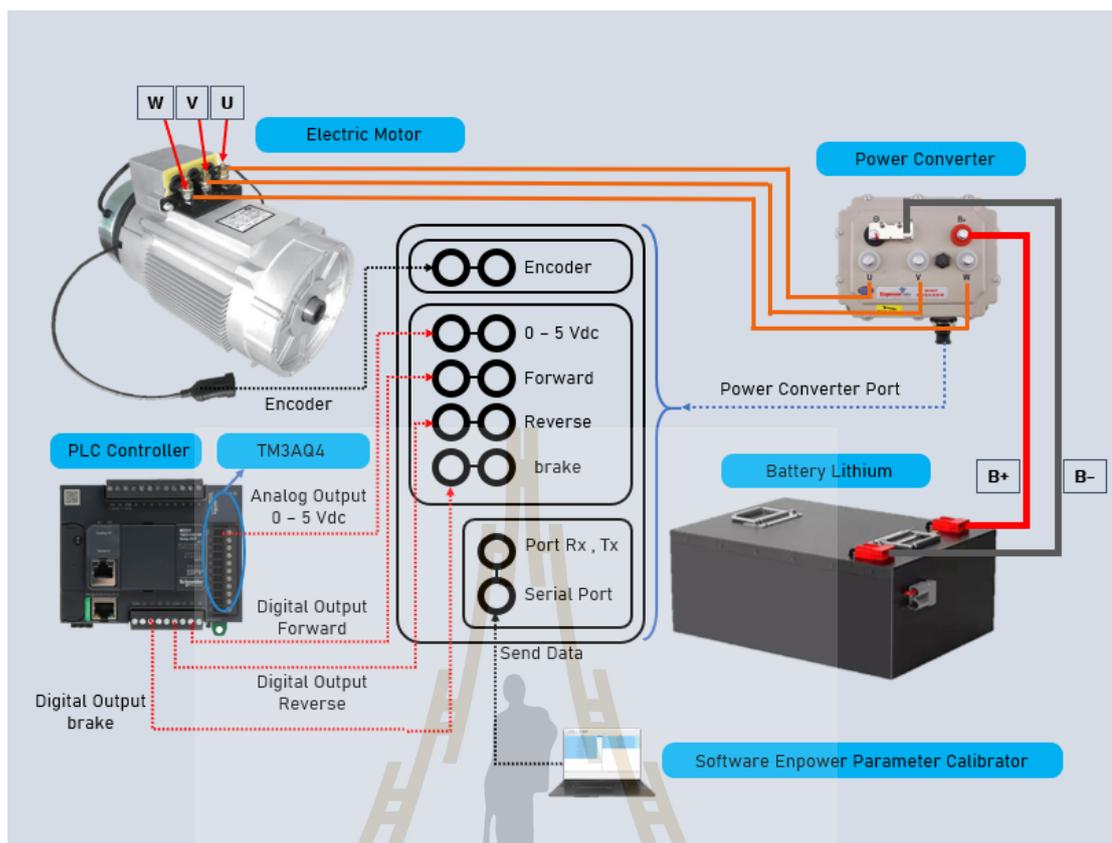
4.9.1 ระบบขับเคลื่อน

การออกแบบระบบขับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติ ซึ่งจากรูปที่ 4.40 ออกแบบให้มีการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จ่ายไฟฟ้าไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ที่มีพิกัดแรงดัน 48 Vdc เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าสำหรับจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ขับเคลื่อน และควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนผ่านรูปแบบสายสัญญาณนำล็อกเอาท์พุทที่แรงดันไฟฟ้า 0-5 Vdc โดยเพิ่มโมดูล Analog TM3AQ4 ที่พีแอลซี (อ้างอิงรูปที่ 4.36) สามารถใช้ขับเคลื่อนแบบเดินหน้า ถอยหลัง และเบรกผ่านรูปแบบสายสัญญาณ ดิจิตอลเอาท์พุท โดยใช้โดยใช้เป็นชุดควบคุมการทำงานโดยใช้ซอฟต์แวร์

Ecostruxure Machine Expret-Basic จากนั้นตรวจสอบความสัมพันธ์กับความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อน โดยใช้ซอฟต์แวร์ Enpower Parameter Calibrator รองรับการติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ หรือ โน้ตบุ๊ก ในระบบปฏิบัติการ Windows 10 ขึ้นไป ตรวจสอบค่าความเร็วรอบผ่านรูปแบบสายสัญญาณ Serial Port ซึ่งเป็นสายสัญญาณที่ใช้ควบคุมของชุดควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะ และต้องทำการเชื่อมต่อ Encoder ระหว่างชุดควบคุมมอเตอร์กับมอเตอร์ขับเคลื่อน ดังรูปที่ 4.41 และความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้า 0-5 Vdc ของพีแอลซีและความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อน ที่วัดค่าชุดควบคุมมอเตอร์ ดังตารางที่ 4.24 (หมายเหตุ : การตั้งค่าพารามิเตอร์ในซอฟต์แวร์ Enpower Parameter Calibrator แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.1)

ตารางที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความเร็วรอบ

พีแอลซีอนาล็อกเอาท์พุท (Vdc)	ชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนความเร็วรอบ (rpm)
0.00-0.78	0
0.80	318
1.00	455
1.20	690
1.40	897
1.60	1,086
1.80	1,341
2.00	1,530
2.20	1,770
2.40	1,977
2.60	2,181
2.80	2,412
3.00	2,622
3.20	2,862
3.40	3,148
3.60	3,315
3.80	3,572
4.00	3,709
4.20	3,997
4.40	4,256
4.60	4,497
4.80	4,783
5.00	4,980



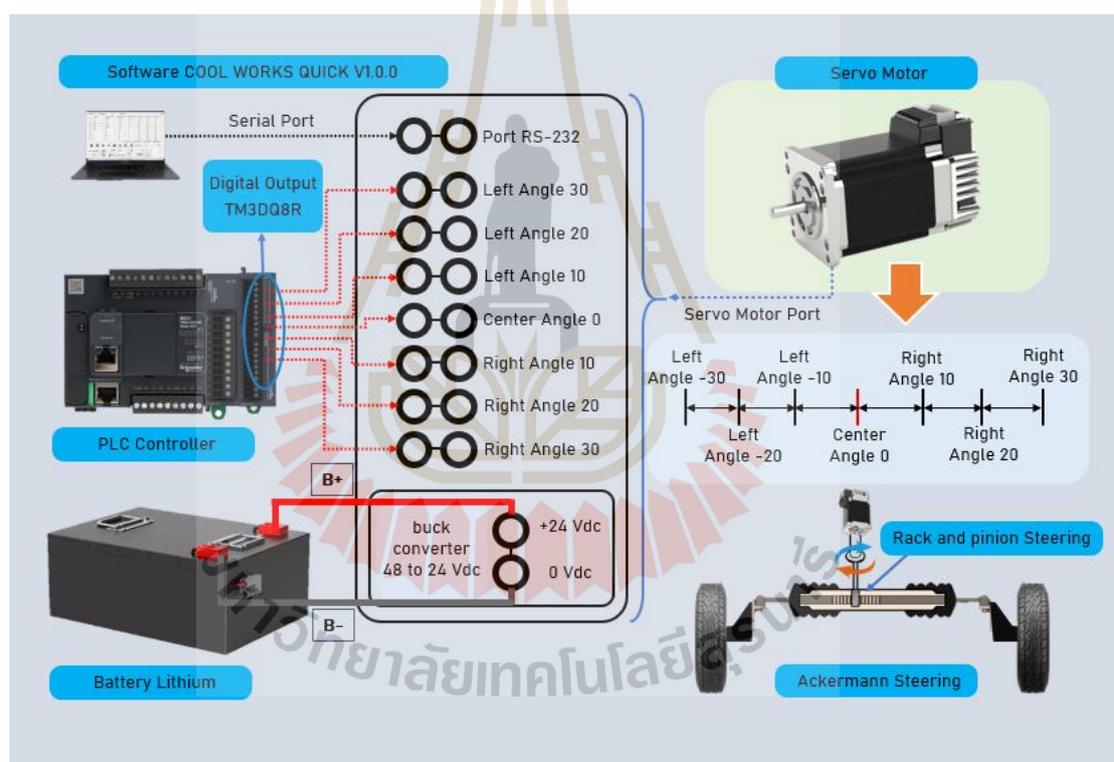
รูปที่ 4.41 การเชื่อมต่อของระบบขับเคลื่อน

4.9.2 ระบบบังคับเลี้ยว

การออกแบบระบบบังคับเลี้ยวในรูปแบบ Ackermann Steering ควบคุมโดยมอเตอร์บังคับเลี้ยวที่เชื่อมต่อกับ Rack & Pinion ซึ่งจากรูปที่ 4.40 เนื่องจากมอเตอร์บังคับเลี้ยวที่เลือกใช้มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าใช้งาน 24 Vdc จึงต้องมีการใช้ตัวปรับลดแรงดันไฟฟ้า (Buck Converter) เพื่อปรับพิกัดแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบตเตอรี่ 48 Vdc ให้ลดลงเหลือ 24 Vdc เท่ากับพิกัดแรงงานใช้งานของ มอเตอร์บังคับเลี้ยว สำหรับการควบคุมมอเตอร์บังคับเลี้ยวตั้งค่าโดยเลือกใช้งานแบบ I/O Type ผ่าน ซอฟต์แวร์ COOL WORKS QUICK V1.0.0 ให้มีการควบคุมโดยใช้สายสัญญาณแบบดิจิตอลเอาท์พุท ซึ่งใช้พีแอลซีควบคุม โดยเพิ่มโมดูล Digital TM3DQ8R และมีข้อกำหนดของโครงสร้างตัวรถมีมุมมองขาในการเลี้ยวซ้ายและเลี้ยวขวามากสุด 30 องศา โดยแบ่งมุมเลี้ยวออกเป็น 7 ช่วง รวมทั้งตั้งค่าตำแหน่ง (Position) ในซอฟต์แวร์ของมอเตอร์บังคับเลี้ยวผ่าน Serial Port ซึ่งเป็นสายสัญญาณที่ใช้ควบคุมของชุดควบคุมมอเตอร์บังคับเลี้ยวโดยเฉพาะ ตั้งค่าโดยใช้ซอฟต์แวร์ COOL WORKS QUICK V1.0.0 ได้ความสัมพันธ์ ดังตารางที่ 4.25 และมีการเชื่อมต่อของระบบบังคับเลี้ยว ดังรูปที่ 4.42 (หมายเหตุ : การตั้งค่าพารามิเตอร์ในซอฟต์แวร์ COOL WORKS QUICK V1.0.0 แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.2)

ตารางที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวและตำแหน่งในซอฟต์แวร์

มุมเลี้ยว (องศา)	ตำแหน่งในซอฟต์แวร์
Left Angle -30	-60000
Left Angle -20	-40000
Left Angle -10	-20000
Center Angle 0	0
Right Angle 10	20000
Right Angle 20	40000
Right Angle 30	60000



รูปที่ 4.42 การเชื่อมต่อของระบบบังคับเลี้ยว

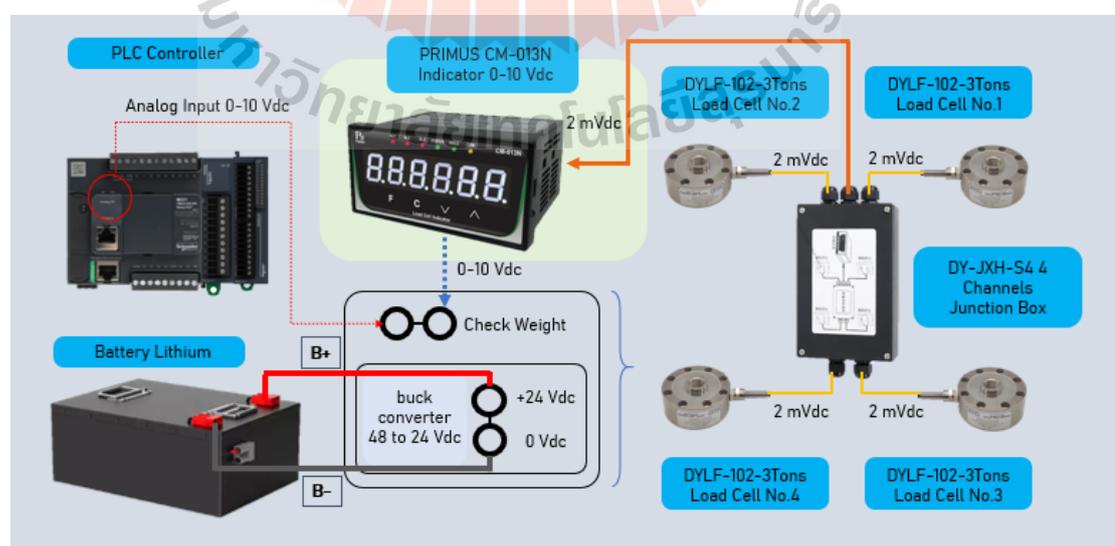
4.9.3 ระบบตรวจสอบน้ำหนัก

การออกแบบระบบตรวจสอบน้ำหนักโดยใช้โหลดเซลล์เซลล์สเตรนเกจแบบแพนเค้กจำนวน 4 ตัว แต่ละตัวมีพิกัดรับน้ำหนัก 3,000 kg ซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่โดยปรับพิกัดแรงดันแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ 48 Vdc ให้ลดลงเหลือ 24 Vdc เท่ากับพิกัดแรงงานใช้งานของอุปกรณ์ และเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์รวมสัญญาณ Junction Box จากนั้นส่งสัญญาณ 2 mVdc เชื่อมต่อเข้ากับจอแสดงผล Indicator และตั้งค่าที่จอแสดงผล Indicator ให้มีการเชื่อมต่อแบบ

อนาล็อกในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า 0-10 Vdc รวมทั้งตั้งขอบเขตในการชั่ง หรือ ตรวจสอบน้ำหนักไว้ที่ 0-5,000 kg (หมายเหตุ : มีการตั้งค่าจอแสดงผล Indicator จากผู้ผลิตในรูปแบบดังกล่าวให้พร้อมใช้งานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว) สำหรับการเชื่อมต่อสายสัญญาณอนาล็อกของจอแสดงผล Indicator เข้ากับพีแอลซีใช้รูปแบบอนาล็อกอินพุทของพีแอลซี โดยตั้งค่าที่อุปกรณ์พีแอลซีและซอฟต์แวร์ Ecostruxure Machine Expert-Basic ให้มีการรองรับสายสัญญาณแบบแรงดันไฟฟ้า 0-10 Vdc แสดงการเชื่อมต่อของระบบตรวจสอบน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.43 และได้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังที่บรรจุทุกกับสัญญาณอนาล็อกอินพุทของพีแอลซี ดังตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังกับสัญญาณอนาล็อกอินพุทของพีแอลซี

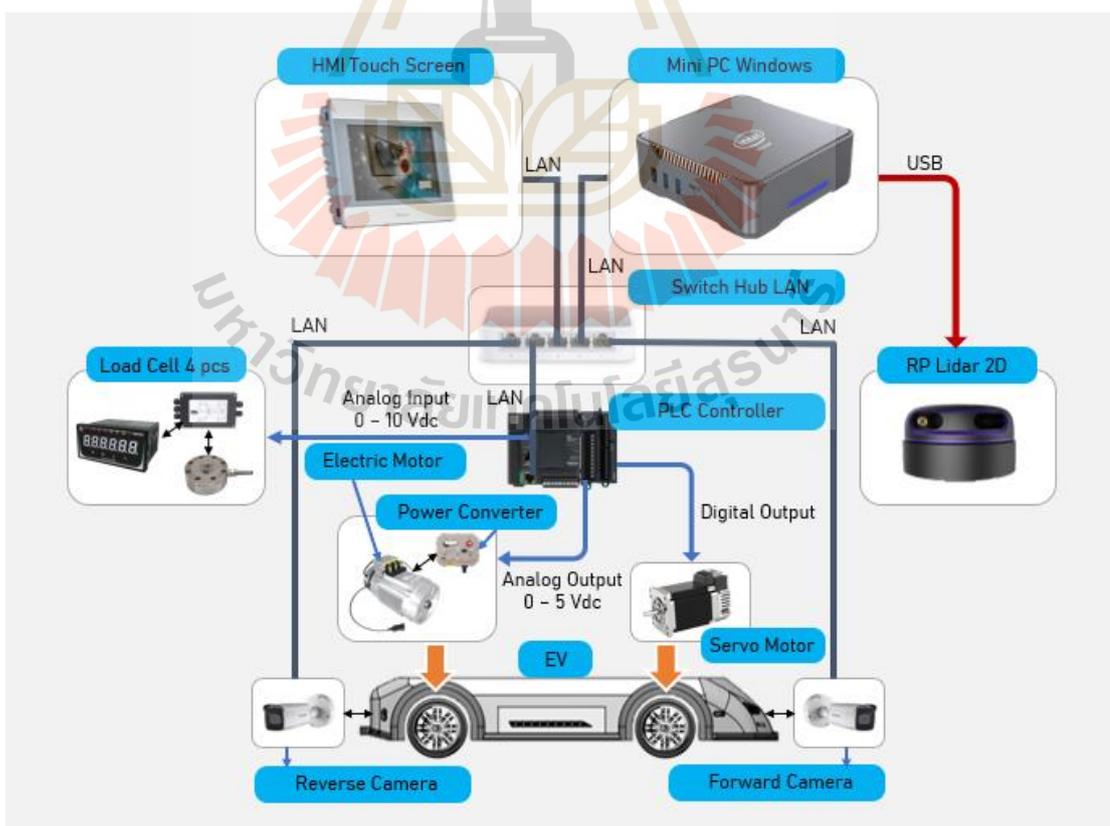
น้ำหนักแป้งมันสำปะหลัง (kg)	สัญญาณอนาล็อกอินพุท (Vdc)
0	0.00
500	0.92
1,000	1.99
1,500	3.01
2,000	4.00
2,500	4.96
3,000	5.99
3,500	7.02
4,000	8.01
4,500	8.97
5,000	9.98



รูปที่ 4.43 การเชื่อมต่อของระบบตรวจสอบน้ำหนัก

4.9.4 ระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง

การออกแบบระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ซึ่งออกแบบการควบคุมโดยใช้อุปกรณ์มินิพีซีในระบบปฏิบัติการ Windows 10 Pro ติดตั้งซอฟต์แวร์ Node-RED (รายละเอียดการติดตั้งในหัวข้อที่ 3.11) และติดตั้ง Python (รายละเอียดการติดตั้งในหัวข้อที่ 3.12) ใช้ Python V 3.11.0 โดยการออกแบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือ ระบบนำทางอัตโนมัติ ซึ่งใช้ซอฟต์แวร์ฟังก์ชัน opencv-python 4.8.0.74 ติดตั้งและเขียนด้วยภาษา Python ในโปรแกรม Visual Studio Code เชื่อมต่อกับกล้องวงแหวนด้านหน้าและกล้องวงแหวนด้านหลังผ่านสายแลนในรูปแบบของ Line Following โดยใช้จุดเชื่อมต่อที่เป็นสวิตช์ฮับ เพื่อเชื่อมต่อสายแลนให้เชื่อมต่อสัญญาณถึงกันของอุปกรณ์ และตั้งค่า IP Address ทั้งกล้องวงแหวนด้านหน้าและกล้องวงแหวนด้านหลัง จากนั้นใช้อัลกอริทึมที่ออกแบบของระบบนำทางอัตโนมัติ ใช้ควบคุมพีแอลซีผ่านสายแลนที่เชื่อมต่อกับสวิตช์ฮับ และตั้งค่า IP Address เชื่อมต่อในรูปแบบโปรโตคอล Modbus TCP/IP โดยใช้ฟังก์ชัน pyModbusTCP 0.2.0 ติดตั้งและเขียนด้วยภาษา Python และส่วนที่สอง คือ ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ซึ่งใช้ซอฟต์แวร์ฟังก์ชัน pyrplidar 0.1.2 ติดตั้งและเขียนด้วยภาษา Python ในโปรแกรม Visual Studio Code เพื่อเชื่อมต่อกับ RP Lidar 2D ผ่านสาย USB โดยตั้งค่า Port COM ของ USB ระหว่างอุปกรณ์ให้ตรงกันเพื่อเชื่อมต่อสัญญาณถึงกัน ซึ่งทั้งสองส่วนนี้การเชื่อมต่อของระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ดังรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 การเชื่อมต่อของระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง

สำหรับระบบควบคุมการทำงานหลักของระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ซึ่งจากรูปที่ 4.44 โดยใช้จอทัสกรีนเขียนด้วยซอฟต์แวร์ PStudio เชื่อมต่อมินิพีซีผ่านสายแลนที่เชื่อมต่อกับสวิทช์ฮับในรูปแบบโปรโตคอลการเชื่อมต่อ Modbus TCP/IP และตั้งค่า IP Address เพื่อให้รองรับการใช้งานกับซอฟต์แวร์ Node-RED ที่เพิ่มการติดตั้งไลบรารี node-red-contrib-pythonshell และไลบรารี node-red-contrib-modbus tcp สำหรับซอฟต์แวร์ Node-RED ซึ่งใช้ควบคุมการทำงานทั้งในส่วนของระบบระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางของรถขนส่งอัตโนมัติ นอกจากนี้การตั้งค่า IP Address ต้องตั้งค่าให้อยู่ในวง Network เดียวกัน โดยมีการกำหนด IP Address ของแต่ละอุปกรณ์ ดังตารางที่ 4.27 และกำหนด Port COM ของ USB คือ COM3 ที่เป็นการเชื่อมต่อระหว่างมินิพีซีและ RP Lidar 2D

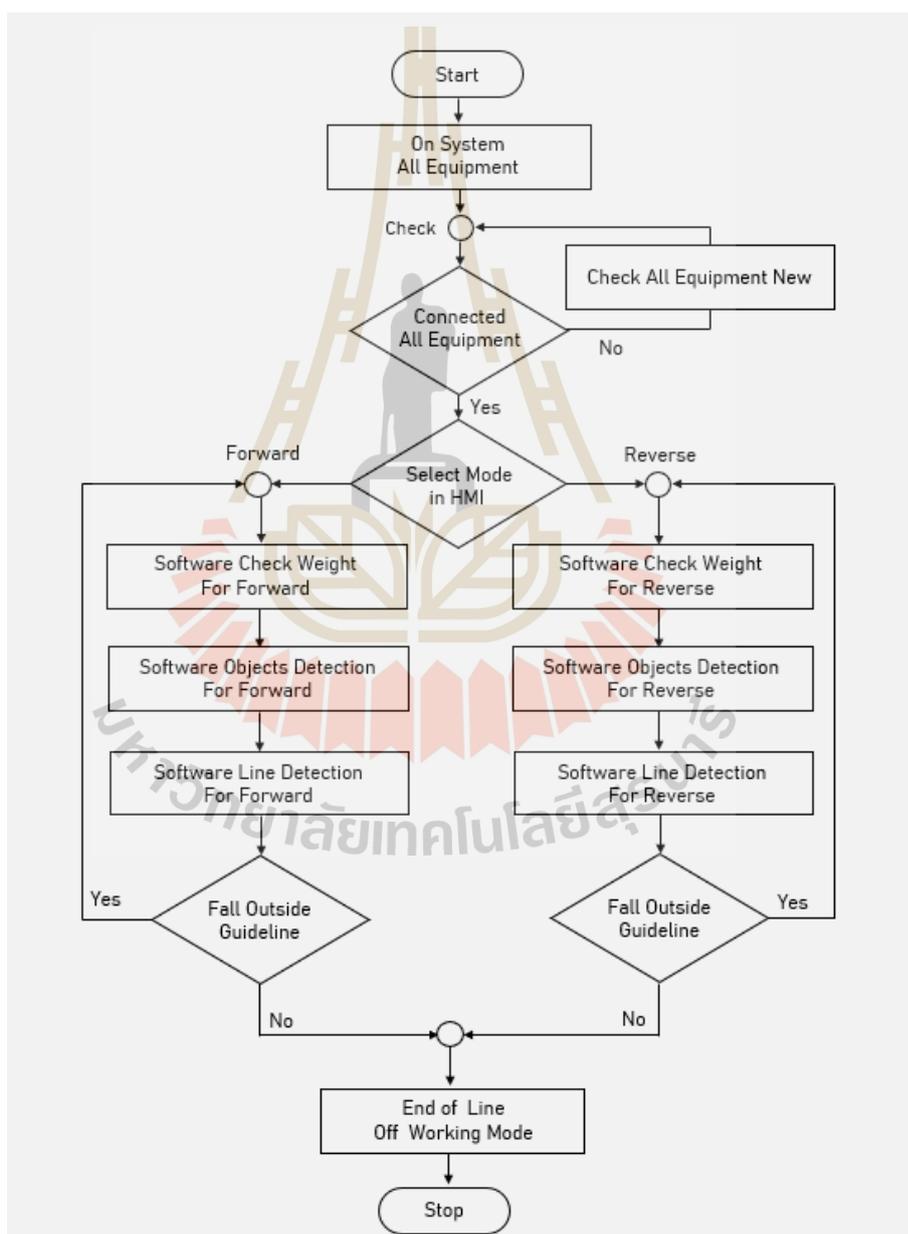
ตารางที่ 4.27 กำหนด IP Address ของแต่ละอุปกรณ์

อุปกรณ์	IP Address
HMI Touch Screen	192.168.1.10
PLC Control	192.168.1.11
Mini PC Windows	192.168.1.12
Forward Camera	192.168.1.13
Reverse Camera	192.168.1.14

4.9.5 อัลกอริทึมของรถขนส่งอัตโนมัติ

การสร้างอัลกอริทึมเพื่อใช้ออกแบบระบบควบคุมหลักของอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่เลือกใช้พัฒนาระบบ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากที่ต้องคำนึงถึง เพื่อนำไปแก้ปัญหาการออกแบบของระบบที่มีความซับซ้อนและช่วยจัดลำดับความสำคัญฟังก์ชันการทำงานของระบบให้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพ สำหรับอัลกอริทึมของการพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติ ในงานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการเปิดระบบไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ (On System All Equipment) เพื่อให้ระบบของรถขนส่งอัตโนมัติพร้อมทำงาน และตรวจสอบการเชื่อมต่อ Network ของ Port LAN โดยใช้รูปแบบโปรโตคอล Modbus TCP/IP และการเชื่อมต่อของ RP Lidar 2D ที่ใช้ Port COM ของ USB จากนั้นตั้งค่าโดยการเลือกโหมดการทำงานผ่านจอทัสกรีนที่พัฒนา Dashboard ด้วยซอฟต์แวร์ PStudio มี 2 หลัก ๆ ได้แก่ ส่วน Controller และส่วน Monitoring ซึ่งมี 2 โหมดการทำงาน คือ วิ่งเดินหน้า (Forward) และวิ่งถอยหลัง (Reverse) แบบอัตโนมัติเมื่อกดปุ่มเริ่มทำงานแต่ก่อนที่ระบบจะเริ่มทำงานอัตโนมัติระบบจะมีการตรวจเช็คน้ำมันสำรองที่ที่ต้องการบรรทุกเพื่อตรวจสอบว่ามีการบรรทุกเกินที่กำหนดหรือไม่ ต่อมาใช้ฟังก์ชันซอฟต์แวร์ Node-RED ที่เป็นตัวเชื่อมต่อสื่อสารข้อมูลจากจอทัสกรีนเพื่อรันไฟล์ Python สำหรับนำทางอัตโนมัติด้วยรูปแบบ Line Following และตรวจจับสิ่งกีดขวางโดยใช้ RP Lidar 2D โดยที่ซอฟต์แวร์มีการตรวจเช็คการหลุดออกนอกเส้นทางของเส้นทางตลอดเวลาผ่านทั้งกล้องวิ่งเดินหน้าและกล้องวิ่งถอยหลัง ถ้ามีการหลุดออกนอกเส้นทางและตรวจจับเจอวัตถุที่กีดขวาง ซอฟต์แวร์ทำการสั่งให้รถขนส่งอัตโนมัติหยุด

การทำงานทันที และเมื่อสิ้นสุดของเส้นทาง ซอฟแวร์ก็สั่งให้ระบบของรถขนส่งอัตโนมัติหยุดการทำงานเพื่อรอรับคำสั่งให้เริ่มต้นทำงานในรอบถัดไป โดยแสดงแผนภาพรูปแบบขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมของรถขนส่งอัตโนมัติ ดังรูปที่ 4.45 (หมายเหตุ : สำหรับอัลกอริทึมของรถขนส่งอัตโนมัติที่ออกแบบ ถ้าพบว่ามีอุปกรณ์เกิดความผิดปกติ หรือเสียหาย เช่น กล้อง ไลดาร์ มินิพีซี จอทัสกรีน ชุดควบคุมโพลตเซลล์ พีแอลซี และสวิทช์ฮับ ส่งผลให้รถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่ง ณ ตำแหน่งปัจจุบันทันที ไม่สามารถวิ่งใช้งานต่อไปได้ จนกระทั่งมีการแก้ไขและเปลี่ยนอุปกรณ์ใหม่) และ Dashboard จอทัสกรีนที่ออกแบบเพื่อใช้กับรถขนส่งอัตโนมัติ ดังรูปที่ 4.46

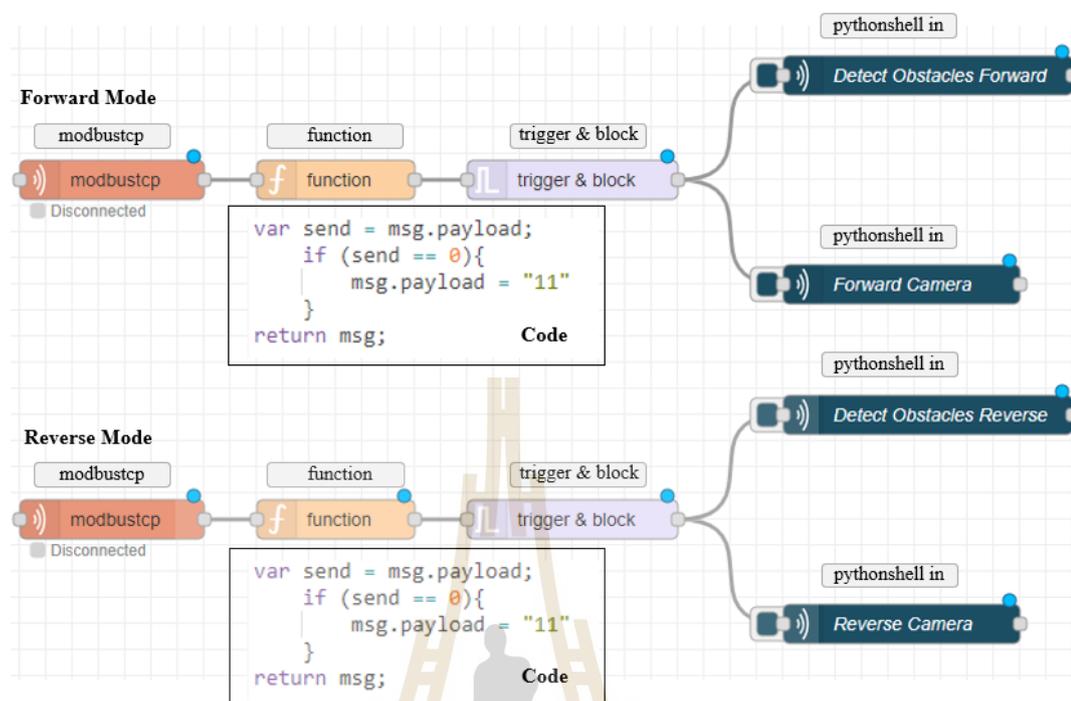


รูปที่ 4.45 อัลกอริทึมของรถขนส่งอัตโนมัติ



รูปที่ 4.46 Dashboard จอทัสกรีนควบคุมการทำงานของรถขนส่งอัตโนมัติ

สำหรับซอฟต์แวร์ประมวลผลควบคุมการทำงานของระบบในส่วนของการทำงานซึ่งในโหมดวิ่งเดินหน้า (Forward) และวิ่งถอยหลัง (Reverse) ใช้ซอฟต์แวร์ Node-RED ที่เป็นตัวเชื่อมต่อสื่อสารข้อมูลจากจอทัสกรีน โดยกำหนดรูปแบบโปรโตคอล Modbus TCP/IP โดยกำหนด Register Address ชนิด Read Multiple Holding Registers (อ้างอิงตารางที่ 3.9) ให้ตรงกันระหว่างอุปกรณ์จอทัสกรีนที่เป็น Master ควบคุมการทำงานของระบบ และในส่วนซอฟต์แวร์ Node-RED ใช้ tool modbustcp ที่เป็น Slave โดยกำหนด Register Address ของ tool modbustcp ทั้ง Forward และ Reverse เท่ากับ 1 และ 2 ตามลำดับ จากนั้นนำไปเชื่อมต่อกับ tool function โดยเพิ่ม Code สำหรับตั้งเงื่อนไขและเชื่อมต่อกับ tool trigger & block กำหนดรูปแบบ wait to be reset เพื่อรอรับค่า 11 จาก Code ใน tool function และนำไปเชื่อมต่อกับ tool pythonsell in รวมทั้งกำหนดไฟล์ของ Python ให้ตรงกับโฟลเดอร์ที่เก็บไว้ในมินิพีซีซึ่งในส่วนไฟล์ Python ที่ใช้นำทางอัตโนมัติ คือ ไฟล์ Forward Camera และ Reverse Camera และในส่วนไฟล์ Python ที่ใช้ตรวจจับสิ่งกีดขวาง คือ ไฟล์ Detect Obstacles Forward และ Detect Obstacles Reverse แสดงดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของรถขนส่งอัตโนมัติในซอฟต์แวร์ Node-RED

ในการนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following (อ้างอิงหัวข้อที่ 3.12.1) ออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับไฟล์ Python ที่ชื่อ Forward Camera และ Reverse Camera เริ่มต้นทำการ ROI โดยใช้กล่องตรวจจับเส้นนำทางบนพื้นถนนที่ต้องกำหนดรหัสสีเพื่อต้องการตรวจจับของเส้นนำทางให้ชัดเจน ซึ่งในการกำหนดขอบเขตเฟรมกล้อง (Frame Camera) เพื่อโฟกัสไปยังเป้าหมาย โดยที่เฟรมกล้องมีขอบเขต Frame [X, Y] เท่ากับ [0 : 640, 0 : 480] และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตของทั้งกล้องวิ่งเดินหน้าและถอยหลัง มีค่า Frame [X, Y] เท่ากับ [0 : 640, 300 : 480] ต่อมา Threshold โดยกำหนดรหัสสีในรูปแบบ RGB (Red, Green, Blue) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดรหัสสีที่ต้องการตรวจจับเส้นบนถนนในการนำทางอัตโนมัติออกเป็น 4 ช่วง และกำหนดช่วงขอบเขตต่ำสุด (Lower) และสูงสุด (Upper) มีรายละเอียดในการกำหนดรหัสสี ดังตารางที่ 4.28 (หมายเหตุ : ในการกำหนดรหัสสีออกเป็น 4 ช่วง เนื่องจากความเปลี่ยนแปลงของแสงที่มีผลกระทบต่อเส้นบนถนนและกล้องตามสถานะแวดล้อม และรูปแบบในการกำหนดแสดงข้อมูลรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ก.5) จากนั้น Find Contours and Center เพื่อหาจุดศูนย์กลางของเป้าหมายที่กำหนดไว้ จากการ ROI และ Threshold เพื่อสร้างเงื่อนไขให้ตรงตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้ในส่วนของระบบระบบบังคับเลี้ยว โดยแบ่งออกเป็น 7 ช่วง (อ้างอิงรูปที่ 4.42) มีความสัมพันธ์ Find Contours and Center และระบบบังคับเลี้ยว ในชื่อไฟล์ Forward Camera ในกรณีวิ่งเดินหน้า ดังตารางที่ 4.29 และความสัมพันธ์ Find Contours and Center และระบบบังคับเลี้ยว ในกรณีวิ่งถอยหลังนั้นมีความสัมพันธ์ตรงกันข้ามกับกรณีวิ่งรถเดินหน้า ในชื่อไฟล์ Forward Reverse Camera ในกรณี

วิ่งถอยหลัง จึงมีการกำหนด ดังตารางที่ 4.30 โดยกำหนดให้รถวิ่งที่ความเร็วในช่วง 0-1 m/s ทั้งการวิ่ง
 เดินหน้าและวิ่งถอยหลัง และมีแผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานในการนำทางอัตโนมัติ ดังรูปที่ 4.48

ตารางที่ 4.28 กำหนดรหัสสี 4 ช่วง ขอบเขตต่ำสุด (Lower) และสูงสุด (Upper)

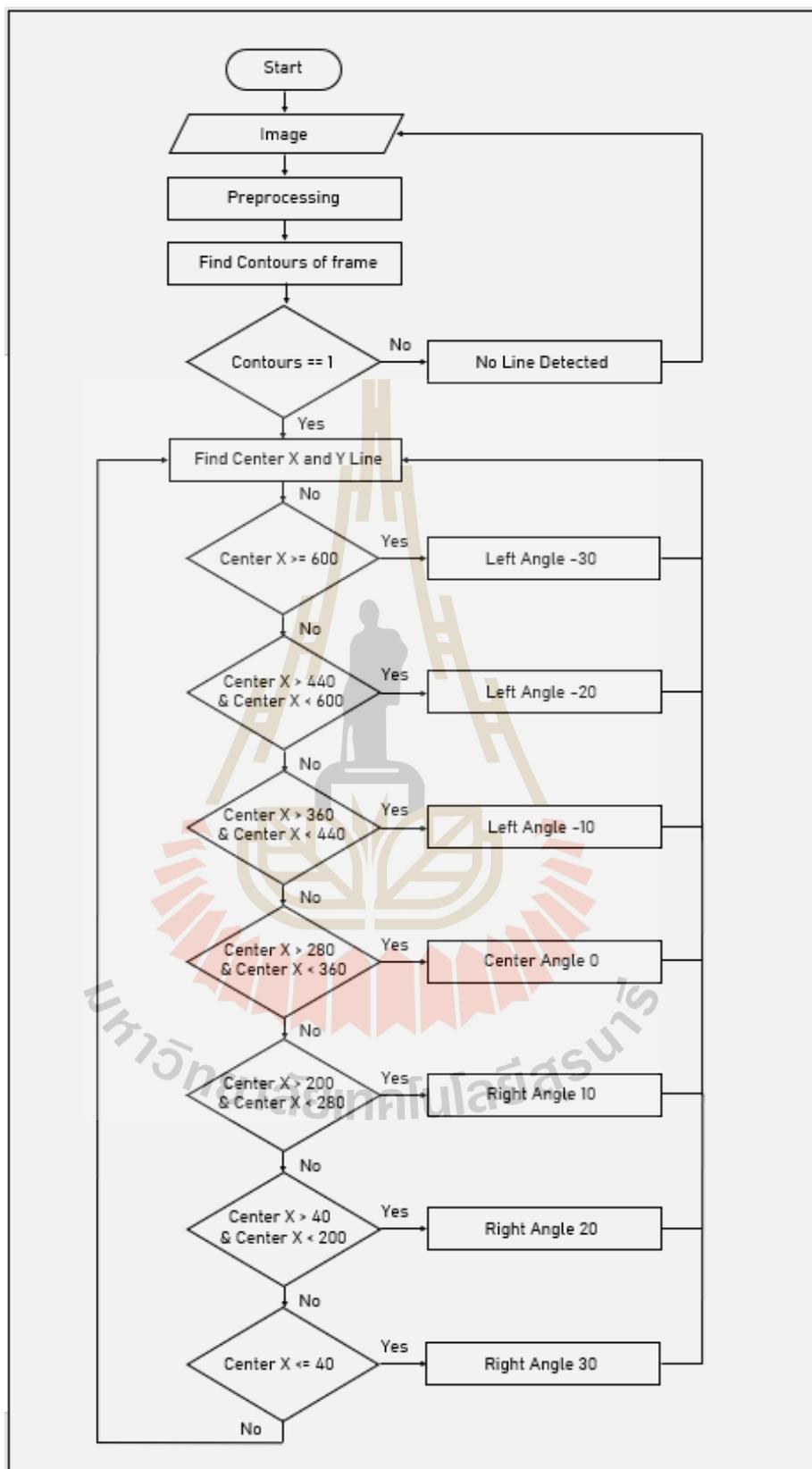
ช่วง	ขอบเขต	รหัสสี (RGB)
1	Lower	[100,100,22]
	Upper	[255,255,60]
2	Lower	[193,66,10]
	Upper	[255,255,137]
3	Lower	[140,138,5]
	Upper	[255,255,59]
4	Lower	[100,100,22]
	Upper	[255,255,248]

ตารางที่ 4.29 ความสัมพันธ์ Find Contours and Center และระบบบังคับเลี้ยว กรณีวิ่งเดินหน้า

ช่วง	Find Contours and Center (เฟรมกล้อง)	เงื่อนไขบังคับเลี้ยว (องศา)
1	ช่วง (600 ถึง 640)	Left Angle -30
2	ช่วง (440 ถึง 600)	Left Angle -20
3	ช่วง (360 ถึง 440)	Left Angle -10
4	ช่วง (280 ถึง 360)	Center Angle 0
5	ช่วง (200 ถึง 280)	Right Angle 10
6	ช่วง (40 ถึง 200)	Right Angle 20
7	ช่วง (0 ถึง 40)	Right Angle 30

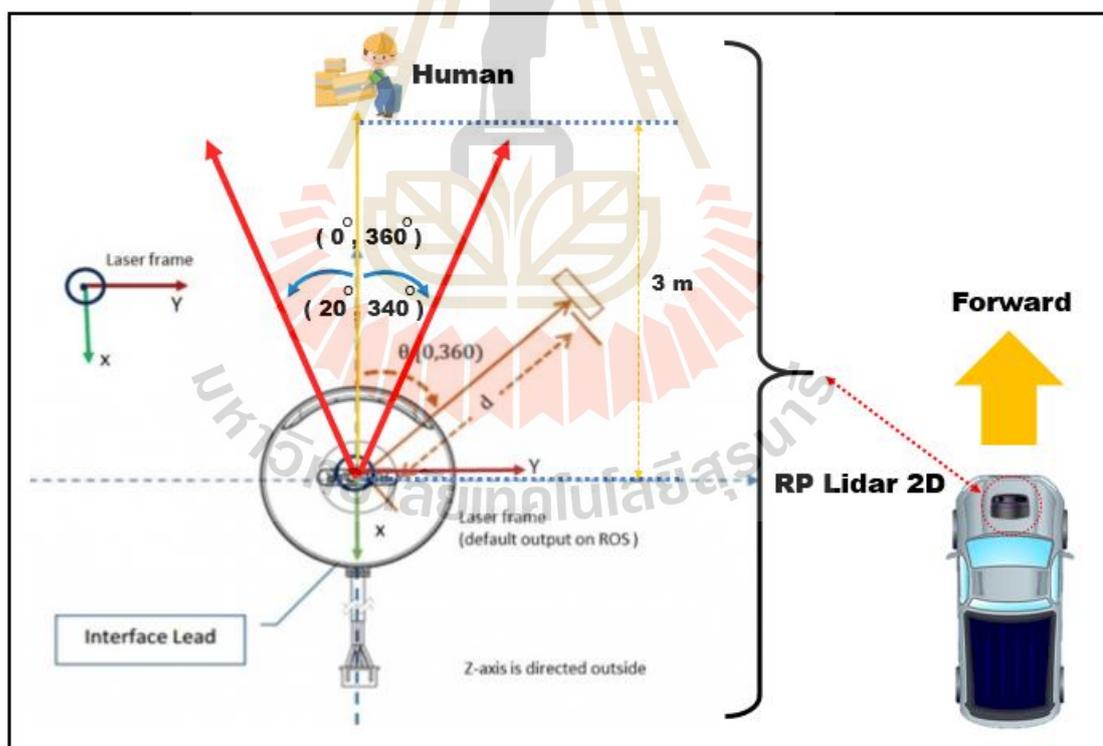
ตารางที่ 4.30 ความสัมพันธ์ Find Contours and Center และระบบบังคับเลี้ยว กรณีวิ่งถอยหลัง

ช่วง	Find Contours and Center (เฟรมกล้อง)	เงื่อนไขบังคับเลี้ยว (องศา)
1	ช่วง (600 ถึง 640)	Right Angle 30
2	ช่วง (440 ถึง 600)	Right Angle 20
3	ช่วง (360 ถึง 440)	Right Angle 10
4	ช่วง (280 ถึง 360)	Center Angle 0
5	ช่วง (200 ถึง 280)	Left Angle -10
6	ช่วง (40 ถึง 200)	Left Angle -20
7	ช่วง (0 ถึง 40)	Left Angle -30

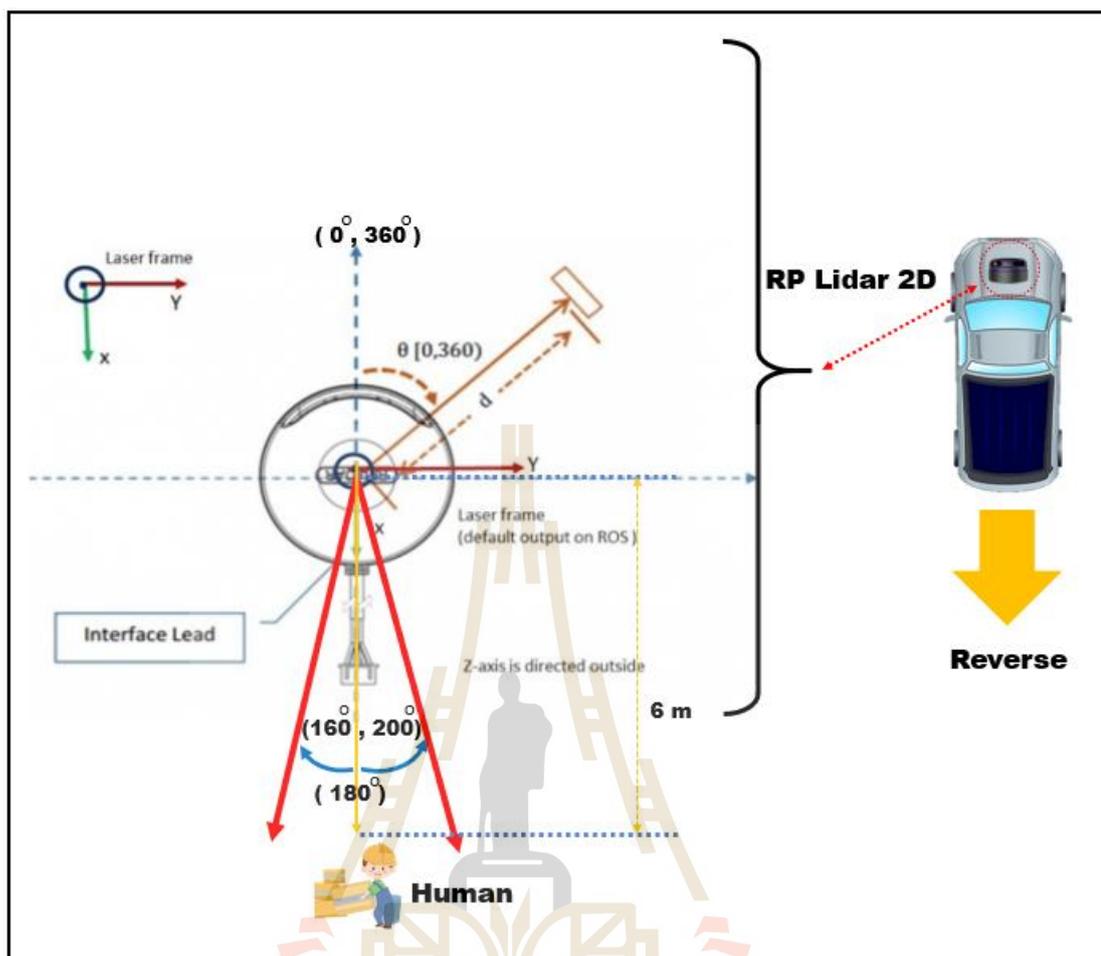


รูปที่ 4.48 ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการประมวลผลหาเส้นนำทางในการนำทางอัตโนมัติ

การออกแบบระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางที่ออกแบบไว้ คือ การใช้ RP Lidar 2D ซึ่งมีความสามารถตรวจจับได้ 360 องศา ในรอบทิศทาง (อ้างอิงรูปที่ 4.33) ออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับไฟล์ Python ในการตรวจจับสิ่งกีดขวาง ในชื่อไฟล์ Detect Obstacles Forward และ Detect Obstacles Reverse เริ่มต้นด้วยตรวจสอบสัญญาณโดยการเชื่อมต่อสาย USB ระหว่างมินิพีซีกับ RP Lidar 2D ด้วยการตั้งค่าพอร์ต COM ให้ตรงกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เป็นพอร์ต COM3 จากนั้นออกแบบด้วย Python เพื่อสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับสิ่งกีดขวางในกรณีวิ่งเดินทาง โดยกำหนดเงื่อนไข 2 พารามิเตอร์ สำหรับพารามิเตอร์แรก คือ มุมที่ต้องการตรวจจับของ RP Lidar 2D ทิศทางทวนเข็มนาฬิกามุม 0 ถึง 20 องศา และทิศทางตามเข็มนาฬิกามุม 360 ย้อนกลับถึง 340 องศา ในกรณีวิ่งเดินทาง ดังรูปที่ 4.49 ซึ่งเป็นลักษณะการใช้งานของ RP Lidar 2D ของทั้งทวนเข็มนาฬิกา และตามเข็มนาฬิกา รวมทั้งกำหนดให้มีระยะตรวจจับ 3 m และในส่วนพารามิเตอร์ที่สอง คือ ระยะทางระหว่างสิ่งกีดขวางกับ RP Lidar 2D ในรอบทิศทาง ในกรณีวิ่งถอยหลัง และในส่วนของกรณีวิ่งถอยหลังการกำหนดมุมที่ต้องการตรวจจับของ RP Lidar 2D ทิศทางทวนเข็มนาฬิกามุม 160 ถึง 180 องศา และทิศทางตามเข็มนาฬิกามุม 200 ย้อนกลับถึง 180 องศา ดังรูปที่ 4.50 ของทั้งทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกาและกำหนดให้มีระยะตรวจจับ 6 m ในกรณีวิ่งถอยหลัง



รูปที่ 4.49 เงื่อนไขสำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางกรณีวิ่งเดินทาง



รูปที่ 4.50 เงื่อนไขสำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางกรณีวิ่งถอยหลัง

4.10 สรุป

สำหรับการออกแบบระบบขนส่งแ่งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ โดยมีการออกแบบตามขอบเขตของบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด ที่กำหนดไว้ เพื่อนำไปขนส่งแ่งมันสำปะหลังภายในโรงงานระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแ่ง ซึ่งมีการออกแบบของรถขนส่งอัตโนมัติโดยแบ่งออกเป็นส่วน ๆ ได้แก่ การออกแบบโครงสร้าง การออกแบบหาขนาดมอเตอร์ขับเคลื่อน การออกแบบหาขนาดมอเตอร์บังคับเลี้ยว การออกแบบหาขนาดแบตเตอรี่ การออกแบบระบบนำทางและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง การออกแบบระบบตรวจสอบน้ำหนัก และการออกแบบระบบควบคุม เพื่อนำไปสู่การพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแ่งมันสำปะหลัง จากนั้นสามารถนำไปวิ่งใช้งานโดยที่ทดสอบขนส่งแ่งมันสำปะหลัง เพื่อทดสอบสมรรถนะและเปรียบเทียบศักยภาพของรถขนส่งอัตโนมัติที่ใช้ขนส่งแ่งมันสำปะหลังระหว่างระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแ่งที่พัฒนาขึ้น โดยรายละเอียดเพิ่มเติมของการทดสอบกล่าวในบทที่ 5 ซึ่งเป็นบทที่กล่าวถึงการพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแ่งมันสำปะหลัง

บทที่ 5

การพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

5.1 บทนำ

ในบทที่ผ่าน ๆ มาของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้อธิบายถึงการสำรวจบริษัทนวัตกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นทฤษฎีและหลักการออกแบบของระบบขนส่งแป้งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ สำหรับแนวทางในการพัฒนาของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งในการพัฒนาระบบขนส่งแป้งมันสำปะหลังภายในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถขนส่งอัตโนมัติที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์หลักโดยเน้นใช้งานทดแทนระบบขนส่งแบบดั้งเดิมที่ใช้รถบรรทุกขนส่งแป้งมันสำปะหลังระหว่างอาคาร ในบทนี้จึงเป็นการกล่าวเกี่ยวกับการพัฒนาของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ให้บรรลุเป้าหมายตามวัตถุประสงค์หลักและขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ตั้งไว้ คือ 1.) การพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง 2.) การทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติที่พิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg 3.) การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานของรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ และ 4.) การวิเคราะห์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ ซึ่งจากทั้ง 4 หัวข้อนี้ ได้มีการอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมที่เป็นไปตามวัตถุประสงค์และเป้าหมาย รวมทั้งได้มีการกล่าวในส่วนของการทดสอบและวิเคราะห์ เพื่อเป็นไปตามทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและหลักการออกแบบที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น

5.2 การพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

สำหรับการพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติเพื่อใช้ขนส่งแป้งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้ง ซึ่งมีประชุมกับทางบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด เพื่อวางแผนในลำดับขั้นตอนในการสั่งซื้ออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็น เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติต้นแบบขึ้นมา รวมทั้งวิเคราะห์และวางแผนกำหนดเส้นทางที่ใช้ทำการทดสอบในการขนส่งแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 ก่อนหน้านี้ โดยแรกเริ่มทำการตรวจสอบแบบโครงสร้างของตัวรถที่ได้รับรองการออกแบบทางวิศวกรรมยานยนต์เป็นที่เรียบร้อย ใช้เป็นแนวทางในการจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์สำหรับออกแบบระบบทางกลและระบบไฟฟ้า ให้มีความเหมาะสมและสามารถรองรับการขับเคลื่อนในขณะบรรทุกแป้งมันสำปะหลังพิกัดสูงสุด 4,800 kg ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวมีลำดับและขั้นตอนของการพัฒนา 5 ขั้นตอน ได้แก่ การพัฒนาโครงสร้างของรถขนส่งอัตโนมัติ การพัฒนาระบบขับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติ การพัฒนาระบบบังคับเลี้ยวของรถขนส่งอัตโนมัติ การพัฒนาระบบตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติ และการพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.2.1 การพัฒนาโครงสร้างของรถขนส่งอัตโนมัติ

จากแบบโครงสร้างของรถขนส่งอัตโนมัติที่มีการออกแบบและตรวจสอบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการพัฒนาโครงสร้างขึ้นมาให้ตรงตามแบบโครงสร้างที่ออกแบบไว้ (อ้างอิงหัวข้อที่ 4.3) พัฒนาขึ้นโดยอยู่ประกอบโครงสร้างรถที่อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ สำหรับการพัฒนาโครงสร้างหลัก แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ในส่วนแรก คือ การพัฒนาโครงสร้างของเฟรมรถโดยภาพรวม ดังรูปที่ 5.1 ถัดมาในส่วนที่สอง คือ การพัฒนาโครงสร้างในส่วนระบบขับเคลื่อนที่มีการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้า และเกียร์ทดรอบ ซึ่งกำหนดให้เป็นการขับเคลื่อนแบบชุดล้อหลัง ดังรูปที่ 5.2 และในส่วนที่สาม คือ การพัฒนาโครงสร้างในส่วนระบบบังคับเลี้ยวที่ใช้ระบบแร็คแอนด์พินเนียน โดยกำหนดให้เป็นการบังคับเลี้ยวของชุดล้อหน้า ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งทั้ง 3 ส่วนนี้ถือว่าการพัฒนาชุดโครงสร้างหลักเพื่อนำไปแบบพื้นฐานในการหล่อโมลของตัว Cover หรือ Body (ภาษาช่างยนต์ที่นิยมใช้กัน) สำหรับการหล่อโมลใช้วิธีการปั้นดินเหนียวเพื่อให้ได้ลักษณะรูปร่างตามที่ต้องการหรือตามที่ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 5.4 เมื่อได้ลักษณะรูปร่างที่ต้องการ จากนั้นทาเรซินที่ผิวดินเหนียวให้ทั่วเพื่อสร้างความแข็งแรงตัวและใช้เกาะป้องกันที่ผิวของดินเหนียวไม่ให้เกิดการหลุดร่อน และทำการไปวีสและขัดผิวเพื่อให้ผิวที่ต้องการหล่อโมลเรียบเนียน ดังรูปที่ 5.5 ถัดมาทำการหล่อโมลโดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนด้านหน้ารถ ส่วนด้านข้างซ้าย ส่วนด้านข้างขวา และส่วนด้านหลัง ดังรูปที่ 5.6 ถึง 5.9 ตามลำดับ หลังจากทำการหล่อโมลเสร็จสิ้นทั้ง 4 ส่วน ให้ทาเรซินร่วมกับใยแก้วไปที่โมลแต่ละส่วนเพื่อสร้างตัว Cover ขึ้นมา ดังรูปที่ 5.10 และนำตัว Cover มาการไปวีสและขัดผิวให้เรียบเนียนเพื่อดำเนินการทำสีรองพื้นก่อนใช้สีรถจริงโดยใช้สีม่วง ดังรูปที่ 5.11 จากนั้นทำการทำสีรถจริงโดยใช้เป็นสีส้ม ดังรูปที่ 5.12 นำไปประกอบติดตั้งร่วมกับโครงสร้างหลัก ดังรูปที่ 5.13 รวมทั้งตกแต่งความสวยงามเพิ่มเติมด้วยการเพิ่มลวดลายติดสติ๊กเกอร์ ติดตั้งระบบไฟส่องสว่างรอบคันรถ และจอทัสกรีน เป็นต้น ดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.1 การพัฒนาโครงสร้างในส่วนของเฟรมรถโดยภาพรวม



รูปที่ 5.2 การพัฒนาโครงสร้างในส่วนระบบขับเคลื่อน



รูปที่ 5.3 การพัฒนาโครงสร้างในส่วนระบบบังคับเลี้ยว



รูปที่ 5.4 การปั้นดินเหนียวที่ใช้เป็นแบบในการหล่อโมล



รูปที่ 5.5 การโป้วสีและขัดผิวที่ใช้เป็นแบบในการหล่อโมล



รูปที่ 5.6 การหล่อโมลส่วนด้านหน้ารถ



รูปที่ 5.7 การหล่อโมลส่วนด้านข้างซ้ายรถ



รูปที่ 5.8 การหล่อโมลส่วนด้านข้างขวารถ



รูปที่ 5.9 การหล่อโมลส่วนด้านหลังรถ



รูปที่ 5.10 การสร้าง Cover ของรถขนส่งอัตโนมัติ



รูปที่ 5.11 การโป้วสีและขัดผิวให้เรียบเนียนตัว Cover ของรถขนส่งอัตโนมัติ



รูปที่ 5.12 การทำสีจริงตัว Cover ของรถขนส่งอัตโนมัติ



รูปที่ 5.13 การประกอบตัว Cover เข้ากับชุดโครงสร้างหลักของรถขนส่งอัตโนมัติ



รูปที่ 5.14 การตกแต่งความสวยงามรอบคันเพิ่มเติมของรถขนส่งอัตโนมัติ

5.2.2 การพัฒนาระบบขับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติ

ในการพัฒนาระบบขับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติซึ่งได้กล่าวเกี่ยวกับการออกแบบระบบไว้ในหัวข้อที่ 4.9.1 และรูปที่ 4.39 เริ่มต้นด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ฟิวกัด 48 Vdc, 130 Ah เชื่อมต่อจ่ายไฟฟ้าไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ รวมทั้งเชื่อมต่อสายไฟระหว่างชุดควบคุมมอเตอร์กับตัวมอเตอร์ไฟฟ้าด้วย ดังรูปที่ 5.15 จากนั้นทดสอบจ่ายไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปยังชุดควบคุมมอเตอร์เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าให้ได้ความเร็วรอบในช่วงที่ต้องการ โดยใช้สัญญาณอนาล็อกเอาต์พุต 0-10 Vdc ของพีแอลซีด้วยการตั้งค่าใช้งานอนาล็อกเอาต์พุตเพิ่มโมดูล TM3AQ4 ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic ดังรูปที่ 5.16 ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างพีแอลซีกับชุดควบคุมมอเตอร์ ดังรูปที่ 5.17 เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้า แต่ใช้สัญญาณอนาล็อกเอาต์พุตเพียงแค่ 0-5 Vdc กำหนดที่พีแอลซีเท่านั้น เนื่องจากชุดควบคุมมอเตอร์สามารถรับสัญญาณอนาล็อกอินพุตได้ในช่วง 0-5 Vdc ซึ่งมีรายละเอียดสัญญาณอนาล็อกเอาต์พุตที่ใช้กับความเร็วที่ต้องการหลังจากใช้เกียร์ทดรอบมอเตอร์ไฟฟ้า ดังตารางที่ 5.1 อีกทั้งยังต้องตั้งค่าการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าให้สามารถควบคุมความเร็วในการวิ่งเดินหน้า (Forward) วิ่งถอยหลัง (Reverse) หรือเบรก (Brake) ด้วยการใช้สัญญาณดิจิทัลเอาต์พุตจากตัวพีแอลซี TM221CE16R Schneider Electric M221 เป็นตัวควบคุมผ่านก่อนเชื่อมต่อรีเลย์ (Relay) ไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ ดังรูปที่ 5.18 และกำหนดพารามิเตอร์เพื่อสร้างตัวแปรควบคุม ดังตารางที่ 5.2

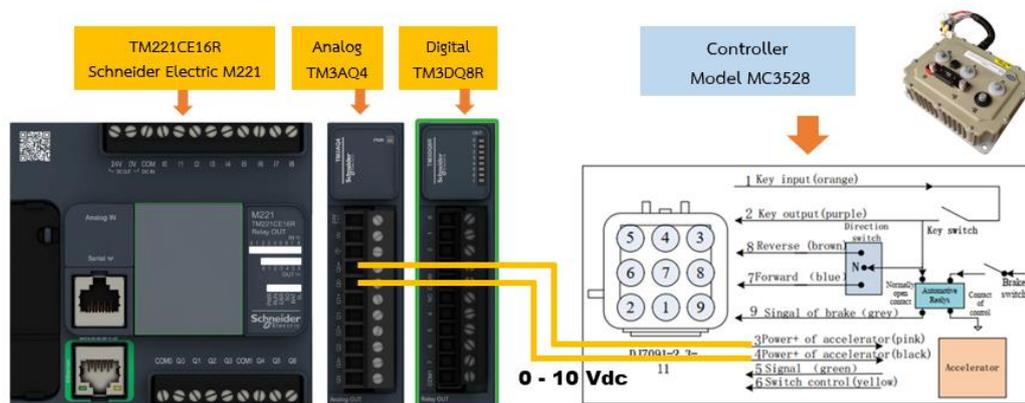


รูปที่ 5.15 การเชื่อมต่อสายไฟจากแบตเตอรี่ไปยังชุดควบคุมมอเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้า

TM3AQ4 Analog Output

Used	Address	Symbol	Type	Scope	Minimum	Maximum
<input checked="" type="checkbox"/>	%QW1.0		0 - 10 V	Normal	0	1000
<input checked="" type="checkbox"/>	%QW1.1		0 - 10 V	Normal	0	1000
<input checked="" type="checkbox"/>	%QW1.2		0 - 10 V	Normal	0	1000
<input checked="" type="checkbox"/>	%QW1.3		Not used	Not used	0	0

รูปที่ 5.16 การตั้งค่าใช้งานโมดูล TM3AQ4 ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic



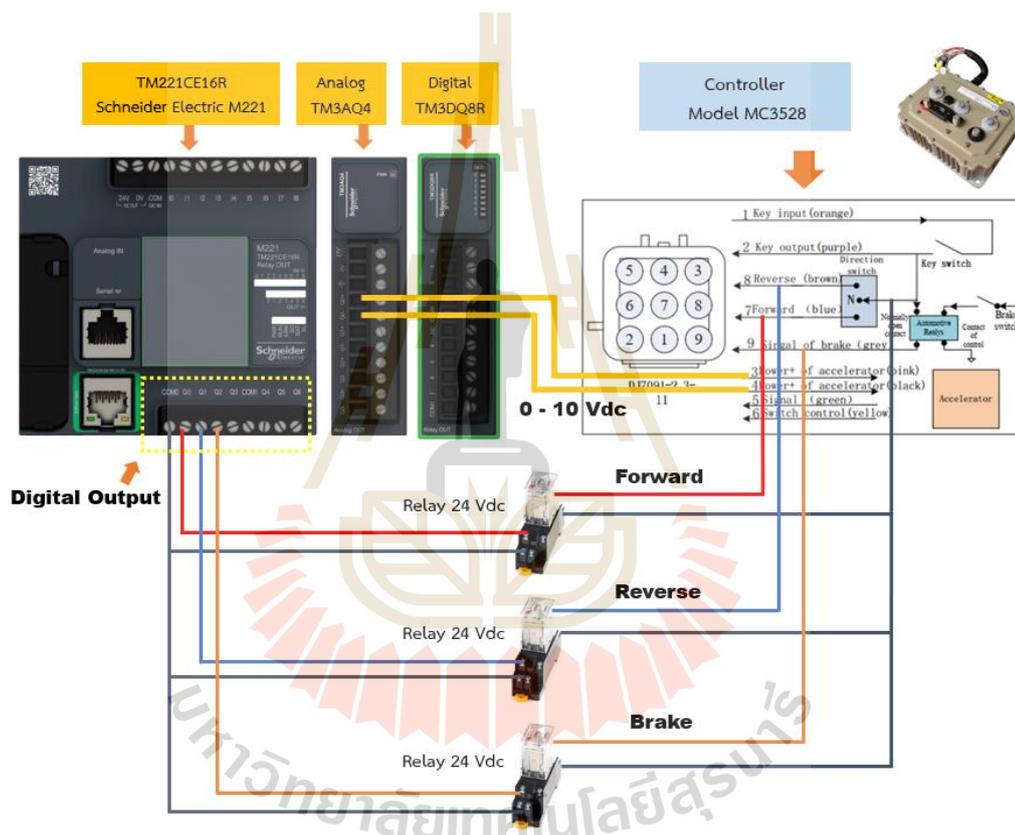
รูปที่ 5.17 การเชื่อมต่อสายสัญญาณอนาล็อกเอาต์พุต 0-10 Vdc ไปยังชุดควบคุมมอเตอร์

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความเร็วรอบ

พีแอลซี อนาล็อกเอาต์พุต (Vdc)	ชุดมอเตอร์ขับเคลื่อน ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรถ (m/s)
0.00-0.78	0	0.00
0.80	318	0.25
1.00	455	0.35
1.20	690	0.50
1.40	897	0.75
1.60	1,086	0.85
1.80	1,341	1.00
2.00	1,530	1.25
2.20	1,770	1.35
2.40	1,977	1.50
2.60	2,181	1.65
2.80	2,412	1.85
3.00	2,622	2.00
3.20	2,862	2.25
3.40	3,148	2.45
3.60	3,315	2.50
3.80	3,572	2.75
4.00	3,709	2.85
4.20	3,997	3.00

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความเร็วรอบ (ต่อ)

พีแอลซี อนาล็อกเอาต์พุต (Vdc)	ชุดมอเตอร์ขับเคลื่อน ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร็วรถ (m/s)
4.40	4,256	3.25
4.60	4,497	3.45
4.80	4,783	3.65
5.00	4,980	3.85



รูปที่ 5.18 การเชื่อมต่อสายสัญญาณดิจิทัลเอาต์พุตผ่านรีเลย์ไปยังชุดควบคุมมอเตอร์

ตารางที่ 5.2 การกำหนดพารามิเตอร์ควบคุมความเร็ว วิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และเบรก

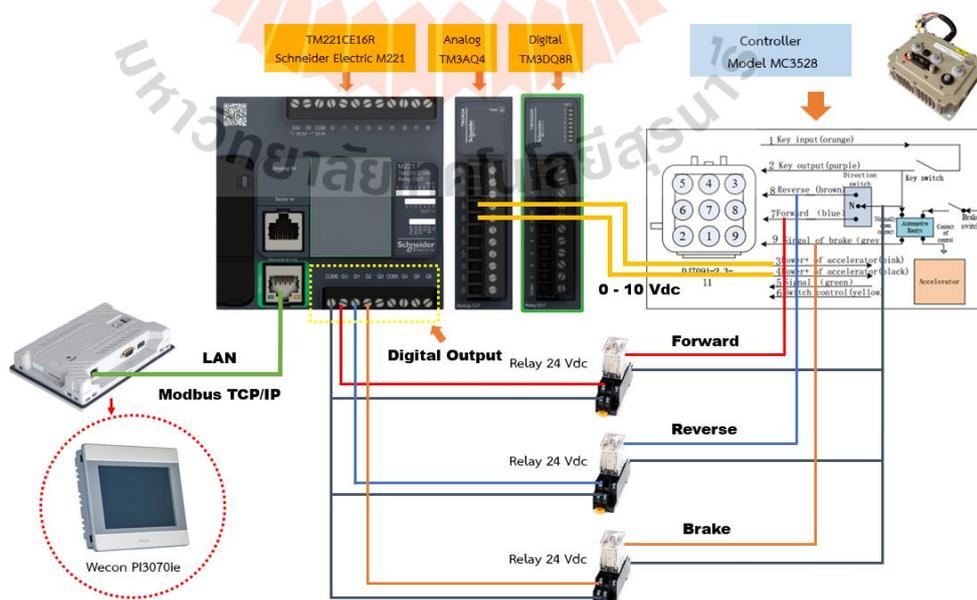
เงื่อนไข ที่กำหนด	พารามิเตอร์ รับคำสั่งจากจอตัสกรีน	พารามิเตอร์ สำหรับรอร์รับเงื่อนไข	พารามิเตอร์ เอาต์พุตจากพีแอลซี
ความเร็ว	%MW268	%MW278	%QW1.1
วิ่งเดินหน้า	%M291	%M281	%Q0.0
วิ่งถอยหลัง	%M292	%M282	%Q0.1
เบรก	%M293	%M283	%Q0.2

เมื่อทำการเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างพีแอลซีไปยังชุดควบคุมมอเตอร์เสร็จสิ้นรวมทั้งกำหนดพารามิเตอร์ในการควบคุมความเร็วในการวิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และเบรก (อ้างอิงตารางที่ 5.2) จากนั้นทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic ที่เขียนด้วยภาษา Ladder Diagram เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขสำหรับควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าของรถขนส่งอัตโนมัติให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยควบคุมความเร็วในกรณีวิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และเบรก ดังรูปที่ 5.19 เริ่มต้นด้วยการทดสอบเพื่อตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานอย่างถูกต้องที่สร้างขึ้นในโปรแกรมของพีแอลซี จากการทดสอบในกรณีวิ่งเดินหน้าโดยให้เงื่อนไข %M291 มีค่าเท่ากับ 1 พบว่า %Q0.0 ทำงาน (แสดงสีเขียว) ภายใต้อินพุตความเร็วที่กำหนดของ %MW268 ดังรูปที่ 5.20 ต่อมาทดสอบในกรณีวิ่งถอยหลังโดยให้เงื่อนไข %M292 มีค่าเท่ากับ 1 พบว่า %Q0.1 ทำงาน (แสดงสีเขียว) ภายใต้อินพุตความเร็วที่กำหนดของ %MW268 ดังรูปที่ 5.21 อีกทั้งทดสอบในกรณีวิ่งเบรกโดยให้เงื่อนไข %M293 มีค่าเท่ากับ 1 พบว่า %Q0.2 ทำงาน (แสดงสีเขียว) ภายใต้อินพุตความเร็วที่กำหนดของ %MW268 ดังรูปที่ 5.22 จากที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นเป็นส่วนของการพัฒนาซอฟต์แวร์ของระบบขับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติ โดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาใช้โปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ของพีแอลซี TM221CE16R Schneider Electric M221 เท่านั้น จากนั้นทำการทดสอบเงื่อนไขในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าจากชุดควบคุม เพื่อให้รถขนส่งอัตโนมัติทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ คือ วิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และเบรก โดยมีการทดสอบวิ่งใช้งานจริงในเบื้องต้นในกรณีวิ่งเดินหน้า ดังรูปที่ 5.23

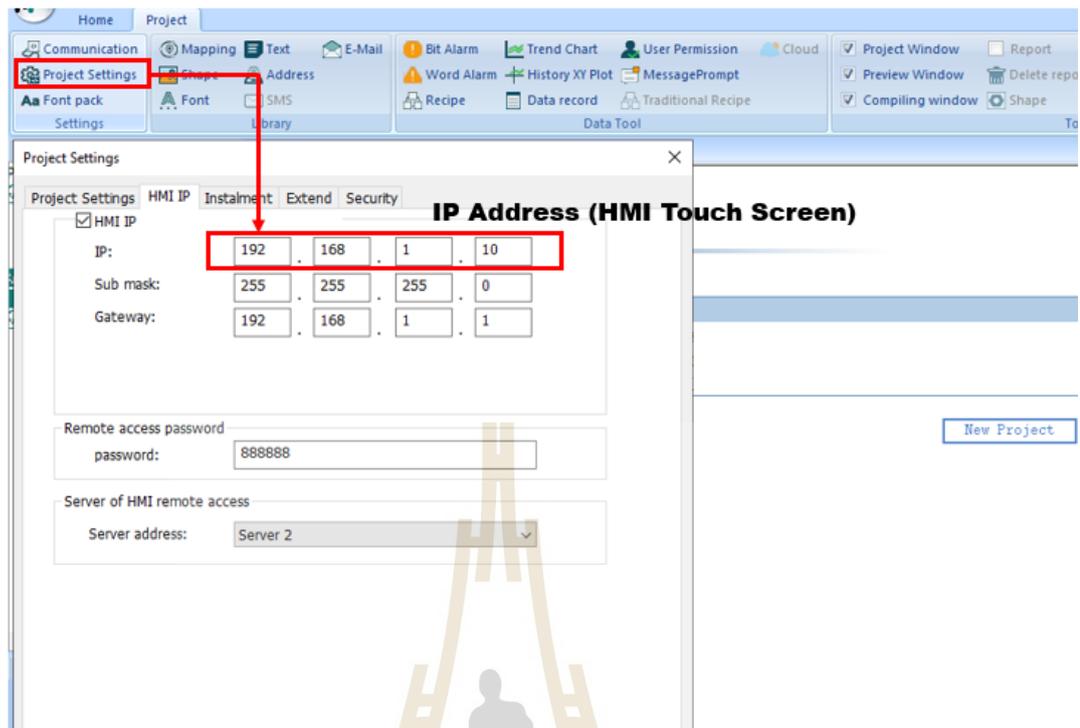


รูปที่ 5.19 ซอฟต์แวร์สำหรับควบคุมความเร็วในกรณีวิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และเบรก

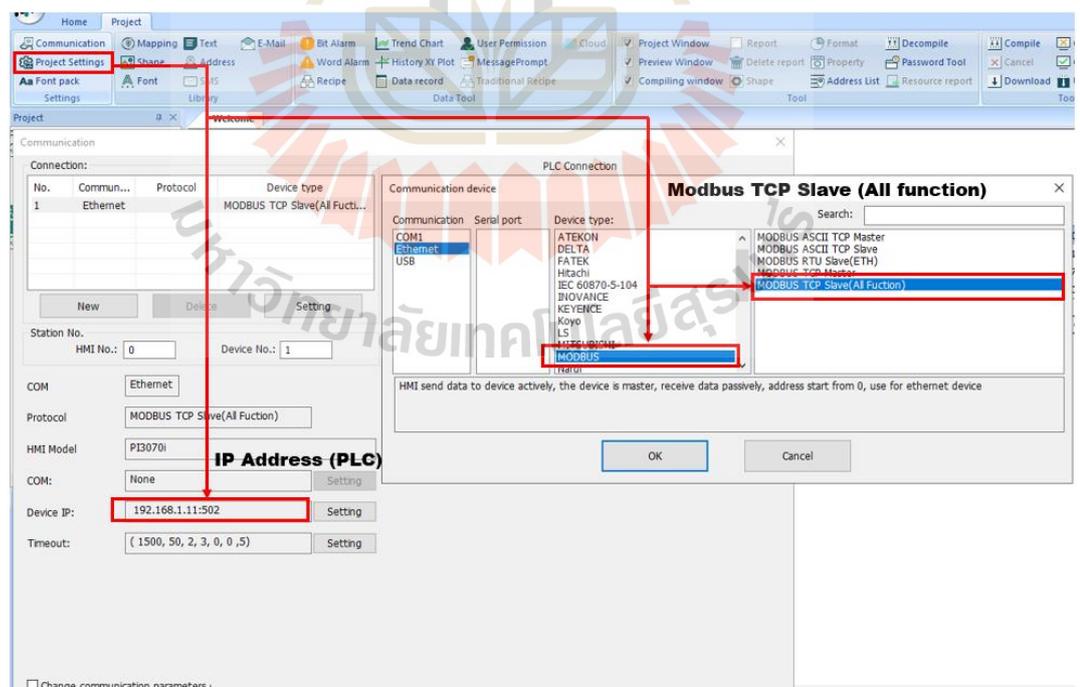
นอกจากการใช้พีแอลซีควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าของรถขนส่งอัตโนมัติ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีกล่าวถึงการออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 4.9 ที่ใช้อุปกรณ์ควบคุมการทำงานหลัก คือ จอทัสกรีน โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากแบตเตอรี่พิกัด 48 Vdc, 130 Ah เชื่อมต่อสายไฟไปยังตัวปรับลดแรงดันไฟฟ้า (Buck Converter) เพื่อปรับพิกัดแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบตเตอรี่ 48 Vdc ให้ลดลงเหลือ 24 Vdc เท่ากับพิกัดแรงงานใช้งานของจอทัสกรีน โดยออกแบบให้มีการควบคุมด้วยการกดปุ่มสัมผัสที่หน้าจอทัสกรีน ก่อนที่จะเริ่มพัฒนาซอฟต์แวร์ของจอทัสกรีนด้วยโปรแกรม PISudio ซึ่งเป็นโปรแกรมของจอทัสกรีนที่เลือกใช้โดยเฉพาะ คือ จอทัสกรีน Wecon PI3070ie เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างพีแอลซีและจอทัสกรีนได้ จึงมีการใช้รูปแบบการเชื่อมต่อสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP ที่ใช้สายแลนเชื่อมต่อ ดังรูปที่ 5.24 เนื่องจากเป็นการเชื่อมต่อในรูปแบบสายแลนต้องทำการกำหนด IP Address ของจอทัสกรีนและพีแอลซี โดยกำหนดตามดังที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 4.27 คือ กำหนดให้ IP Address ของจอทัสกรีนเป็น 192.168.1.10 และกำหนดของพีแอลซีเป็น 192.168.1.11 (หมายเหตุ : ในส่วนของการกำหนดค่า Subnet Mask และ Gateway ต้องกำหนดให้อยู่ในวงแลนเดียวกัน เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อสัญญาณถึงกันได้) สำหรับการตั้งค่า IP Address ของจอทัสกรีน ในโปรแกรม PISudio โดยตั้งค่า IP Address เป็น 192.168.1.10 ซึ่งเป็น IP Address ดังรูปที่ 5.25 จากนั้นเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างจอทัสกรีนกับพีแอลซีด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP จึงต้องตั้งค่าเพื่อให้รองรับการใช้งานโปรโตคอล โดยกำหนดเป็นรูปแบบ Modbus TCP Slave (All function) ดังรูปที่ 5.26 และการตั้งค่า IP Address ของพีแอลซีเพื่อให้รองรับการเชื่อมต่อสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP บนโปรแกรม Ecostruxure Machine Expret-Basic โดยตั้งค่า IP Address เป็น 192.168.1.11 ดังรูปที่ 5.27 (หมายเหตุ : สำหรับการเริ่มต้นใช้งานและวิธีขั้นตอนการพัฒนาซอฟต์แวร์ PISudio สามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ <https://www.we-con.com.cn/en/service.html>)



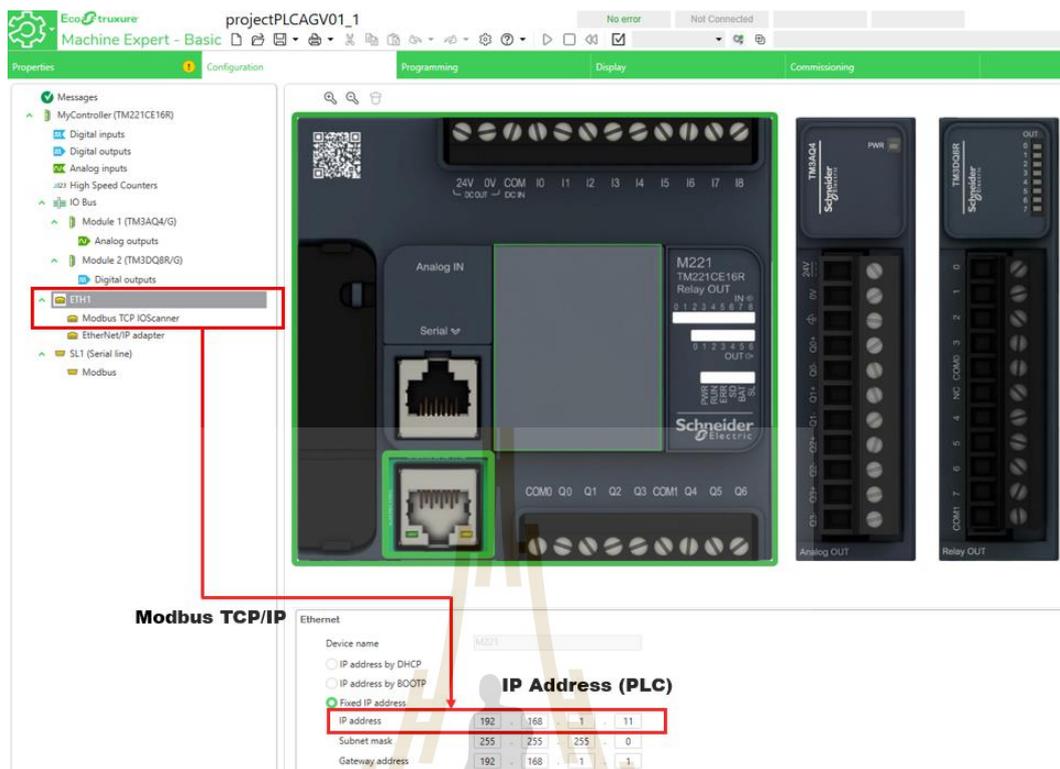
รูปที่ 5.24 การใช้จอทัสกรีนเชื่อมต่อสื่อสารกับพีแอลซีสำหรับควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อน



รูปที่ 5.25 การตั้งค่า IP Address ของจอทัสกรีนบนโปรแกรม PISudio

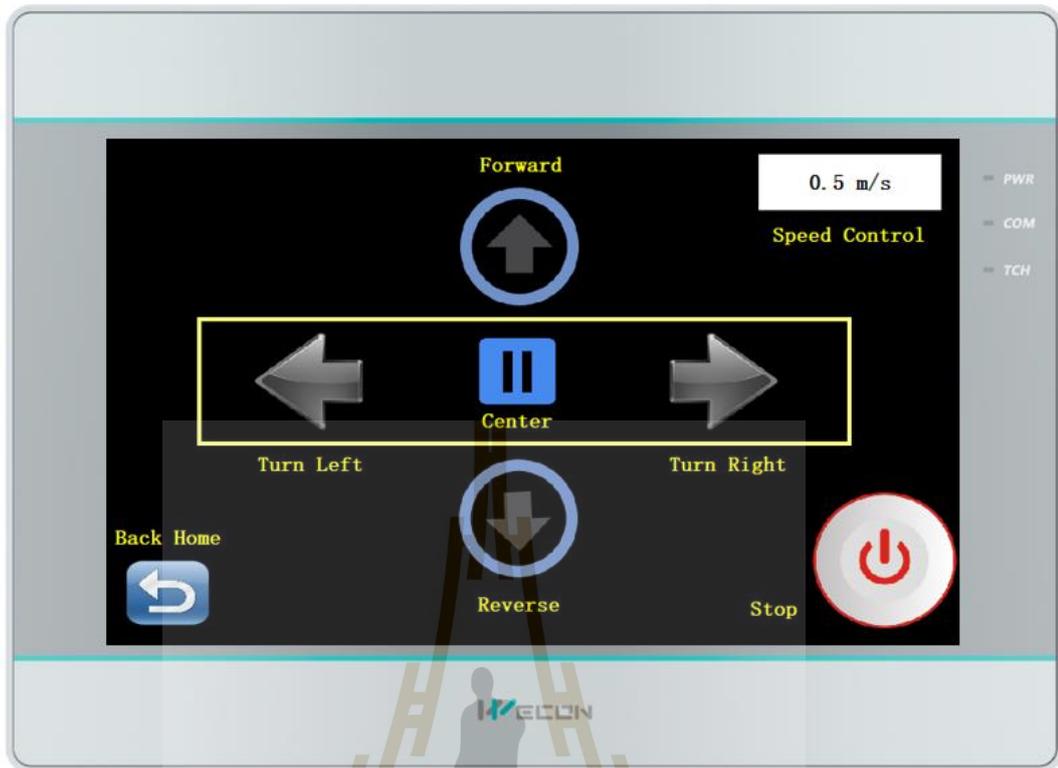


รูปที่ 5.26 การตั้งค่าเชื่อมต่อสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP ระหว่างจอทัสกรีนกับพีแอลซี

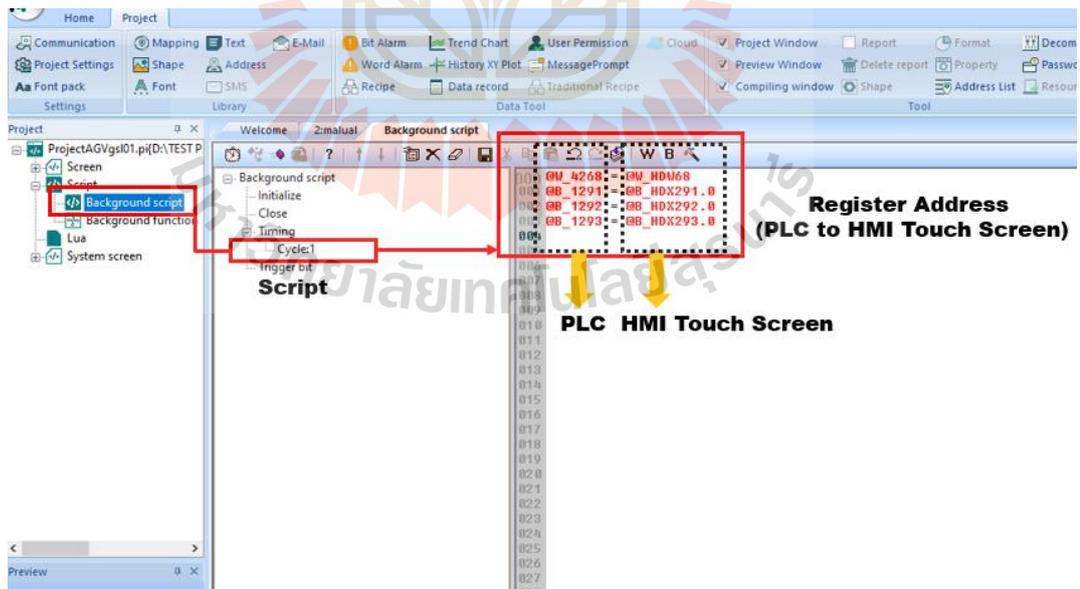


รูปที่ 5.27 การตั้งค่า IP Address ของพีแอลซีบนโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic

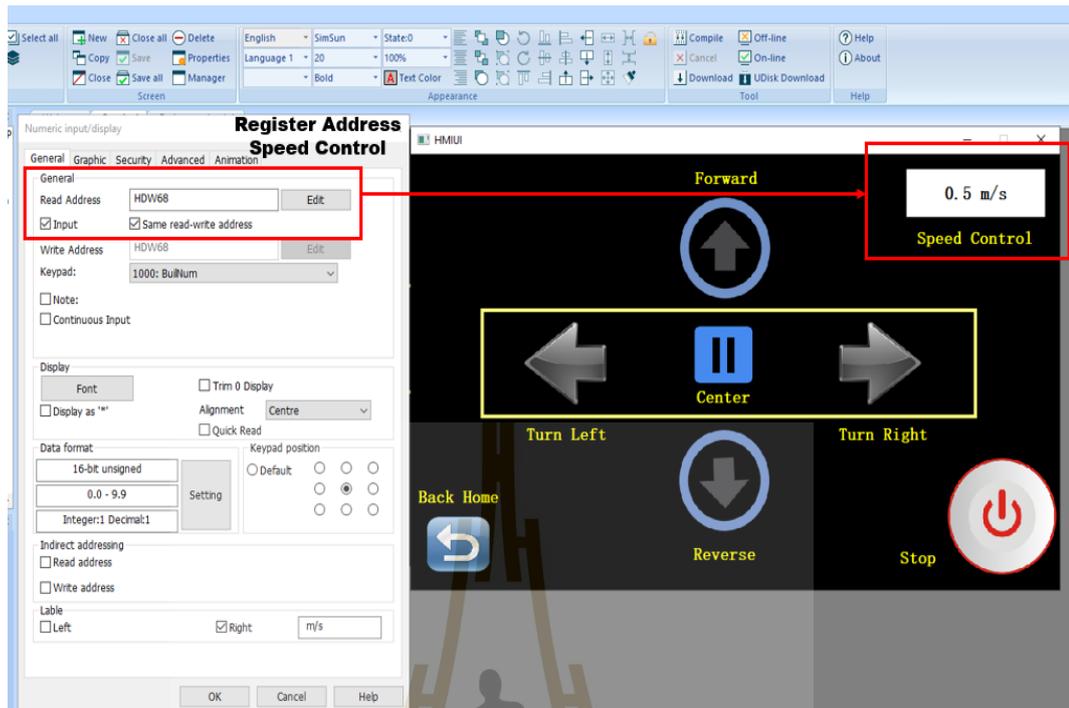
สำหรับการพัฒนา Dashboard จอทัสกรีนเพื่อใช้ควบคุมระบบการขับเคลื่อนรถขนส่งอัตโนมัติ ซึ่งได้ออกแบบและพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนของ Dashboard จากรูปที่ 4.44 โดยออกแบบและพัฒนา Dashboard ของระบบ Manual ดังรูปที่ 5.28 เพื่อให้สามารถควบคุมความเร็วในการวิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และเบรก จากการกดปุ่มสัมผัสที่หน้าจอทัสกรีน จากนั้นทำการเขียน Script บนโปรแกรม PStudio เชื่อมต่อ Register Address ในรูปแบบโปรโตคอล Modbus TCP/IP ระหว่างจอทัสกรีนกับพีแอลซี (อ้างอิงตารางที่ 5.2) สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดความเร็ว (พิมพ์คำสั่ง @W_4268 = @W_HDW68) วิ่งเดินหน้า (พิมพ์คำสั่ง @B_1291 = @B_HDX291.0) วิ่งถอยหลัง (พิมพ์คำสั่ง @B_1292 = @B_HDX292.0) และเบรก (พิมพ์คำสั่ง @B_1293 = @B_HDX293.0) บนหน้าต่าง Script ในโปรแกรม PStudio ดังรูปที่ 5.29 (หมายเหตุ : รูปแบบสำหรับการกำหนด Register Address ของจอทัสกรีนบนโปรแกรม PStudio ในภาคผนวก ก.6) จากนั้นทำการตั้งค่าของพารามิเตอร์ Dashboard ของระบบ Manual จากรูปที่ 5.28 โดยตั้งค่า Register Address ของพารามิเตอร์ความเร็ว (Speed Control) เป็น HDW68 ดังรูปที่ 5.30 ถัดมาเป็นการตั้งค่า Register Address ของพารามิเตอร์วิ่งเดินหน้า (Forward) เป็น HDX291.0 ดังรูปที่ 5.31 และให้ทำการตั้งค่า Register Address ของพารามิเตอร์วิ่งถอยหลัง (Reverse) เป็น HDX292.0 ดังรูปที่ 5.32 รวมทั้งตั้งค่า Register Address ของพารามิเตอร์เบรก (Stop) เป็น HDX293.0 ดังรูปที่ 5.33 เพื่อควบคุมจาก Dashboard ไปยังคำสั่ง Script ในโปรแกรม PStudio ในการกำหนดความเร็ว วิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และเบรก โดยการกดปุ่มสัมผัส Dashboard ของจอทัสกรีน



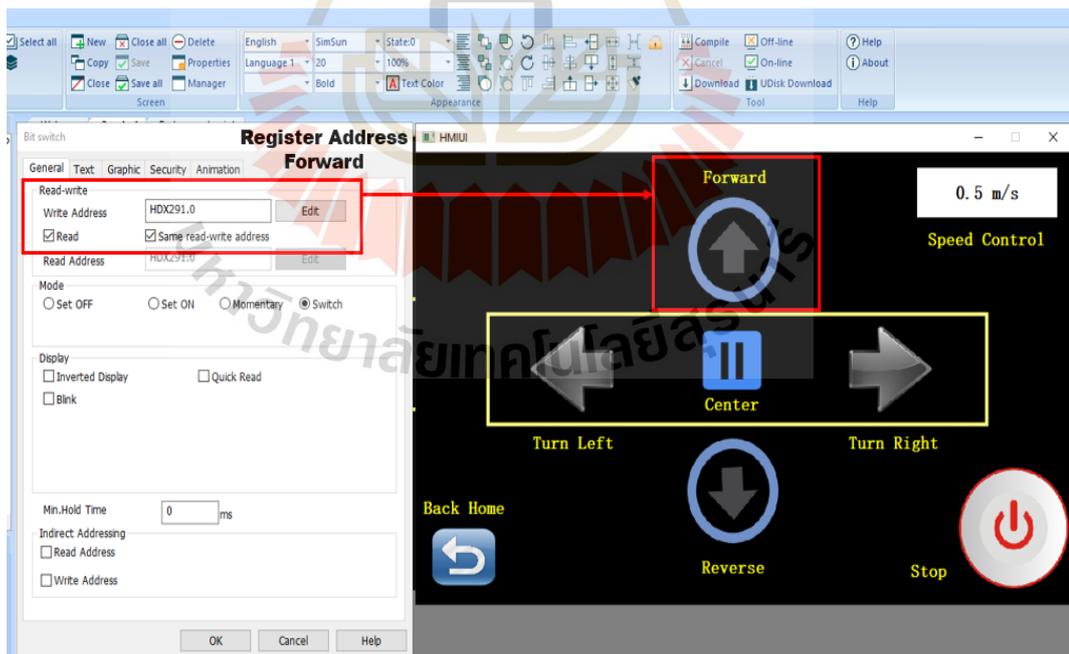
รูปที่ 5.28 Dashboard จอทัสกรีนของระบบ Manual ควบคุมในการวิ่งรถ



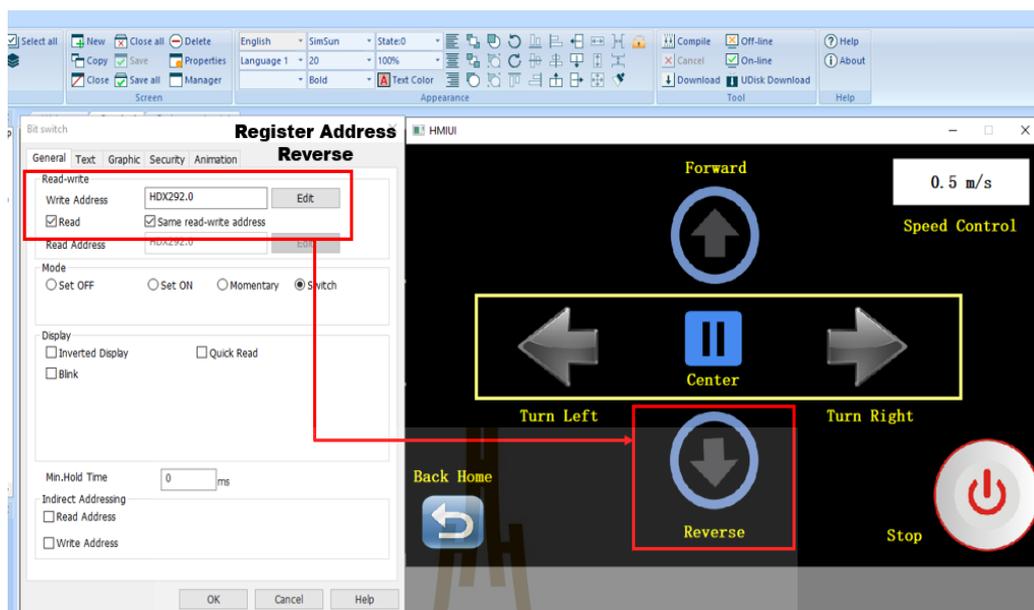
รูปที่ 5.29 กำหนด Register Address ระบบขับเคลื่อนในโปรแกรมจอทัสกรีนบนหน้าต่าง Script



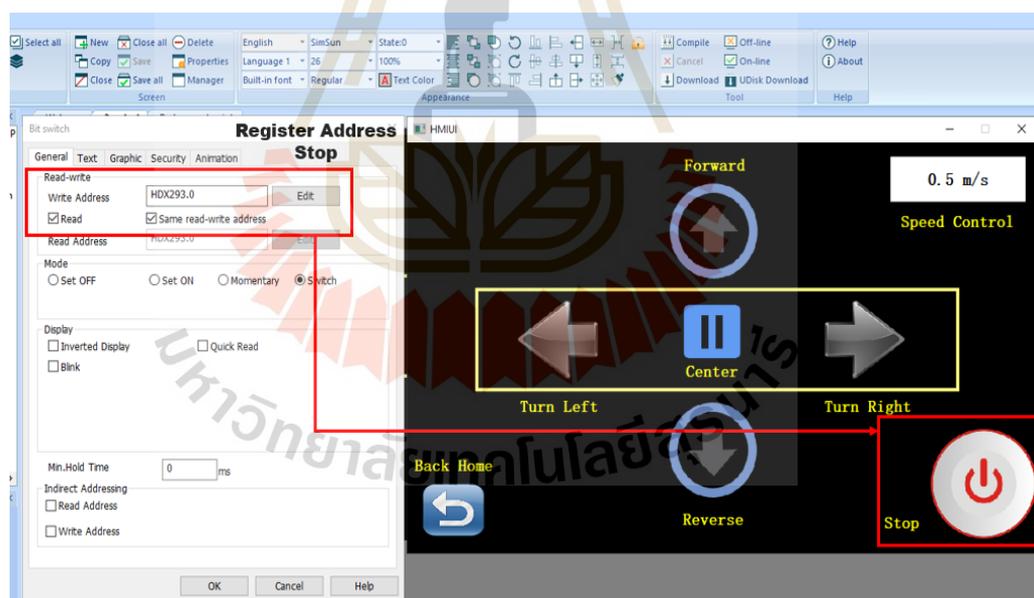
รูปที่ 5.30 กำหนด Register Address ของพารามิเตอร์ควบคุมความเร็วที่ Dashboard จอทัสกรีน



รูปที่ 5.31 กำหนด Register Address ของพารามิเตอร์วิ่งเดินหน้าที่ Dashboard จอทัสกรีน

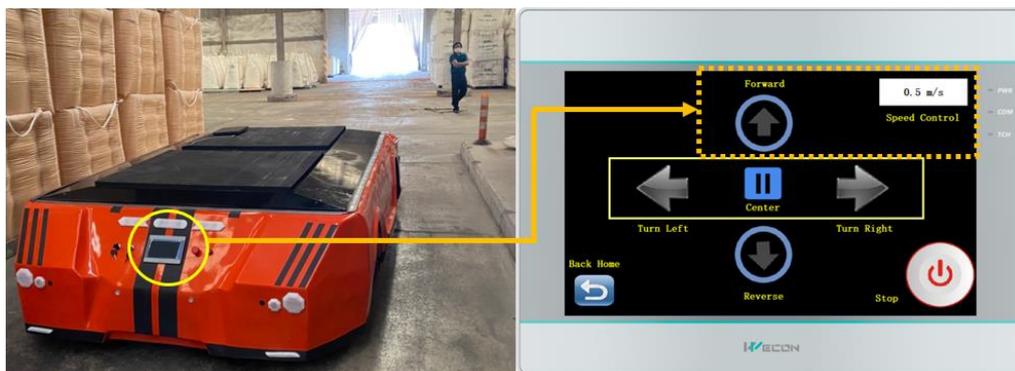


รูปที่ 5.32 กำหนด Register Address ของพารามิเตอร์วิ่งถอยหลังที่ Dashboard จอทัสกรีน



รูปที่ 5.33 กำหนด Register Address ของพารามิเตอร์เบรกที่ Dashboard จอทัสกรีน

เมื่อพัฒนาระบบควบคุมของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเสร็จสิ้น เพื่อนำไปใช้ควบคุมความเร็วในการวิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และเบรก ของรถรถขนส่งอัตโนมัติ โดยใช้จอทัสกรีนควบคุมด้วยการกดปุ่มสัมผัสที่หน้า Dashboard ซึ่งมีการเชื่อมต่อสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP ระหว่างจอทัสกรีนและพีแอลซี ใช้ทดสอบวิ่งใช้งานจริงในกรณีวิ่งเดินหน้าโดยการควบคุมความเร็ว (Speed Control) เท่ากับ 0.5 m/s และกดปุ่มวิ่งเดินหน้า (Forward) ที่จอทัสกรีน ดังรูปที่ 5.34



รูปที่ 5.34 การทดสอบวิ่งใช้งานระบบขับเคลื่อนในกรณีวิ่งเดินหน้าควบคุมโดยใช้จอทัสกรีน

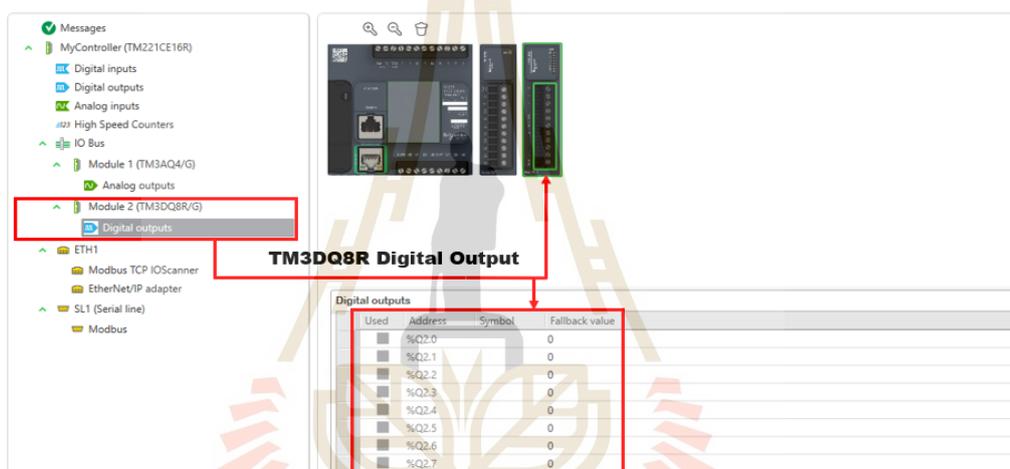
5.2.3 การพัฒนาระบบบังคับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติ

สำหรับการพัฒนาระบบบังคับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติซึ่งได้กล่าวเกี่ยวกับหลักการออกแบบระบบไว้ในหัวข้อที่ 4.9.2 และรูปที่ 4.40 เริ่มต้นด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากแบตเตอรี่พิกัด 48 Vdc, 130 Ah เชื่อมต่อสายไฟไปยังตัวปรับลดแรงดันไฟฟ้า (Buck Converter) เพื่อปรับพิกัดแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบตเตอรี่ 48 Vdc ให้ลดลงเหลือ 24 Vdc เท่ากับพิกัดแรงงานใช้งานของ มอเตอร์บังคับเคลื่อนเชื่อมต่อจ่ายไฟฟ้าไปยังเซอร์โวมอเตอร์ จากนั้นทดสอบจ่ายไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปยังเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ให้ทำงานตรงตามที่ต้องการ โดยใช้สัญญาณดิจิตอลเอาต์พุตของพีแอลซีด้วยการตั้งค่าใช้งานดิจิตอลเอาต์พุตเพิ่มโมดูล TM3DQ8R ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expret-Basic ของพีแอลซี ดังรูปที่ 5.35 ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างพีแอลซีกับเซอร์โวมอเตอร์ผ่านรูปแบบ I/O Cable (อ้างอิงรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.22) เพื่อควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ ดังรูปที่ 5.36 ซึ่งในการเชื่อมต่อระหว่างพีแอลซีกับเซอร์โวมอเตอร์ เนื่องจากเซอร์โวมอเตอร์ที่เลือกใช้มีการควบคุมแบบ I/O Cable เพื่อรับเงื่อนไขคำสั่งควบคุมการทำงานได้ 7 คำสั่ง (อ้างอิงการตั้งค่าพารามิเตอร์ใช้งานซอฟต์แวร์ COOL WORKS QUICK V1.0.0 ภาคผนวก ก.2) โดยกำหนดเงื่อนไขในการควบคุมจากพีแอลซีผ่านรีเลย์ไปยังเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อใช้เป็นระบบบังคับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติ ดังตารางที่ 5.3

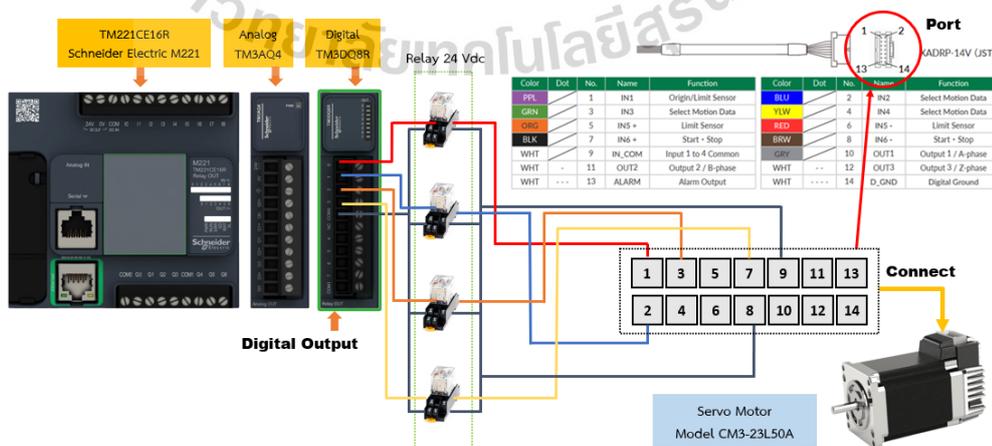
หลังจากนั้นพัฒนาในส่วนซอฟต์แวร์ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expret-Basic ด้วยการกำหนดพารามิเตอร์สำหรับควบคุมระบบบังคับเคลื่อนซึ่งมีความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่กำหนด เพื่อควบคุมระหว่างพีแอลซีที่ใช้โมดูล TM3DQ8R ไปยังเซอร์โวมอเตอร์ที่ Port KADRP-14V (JST) ของ Pin ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ IN1, IN2, IN3 และ IN6 ดังตารางที่ 5.4 ทั้งนี้ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ควบคุมการทำงานของทั้ง 7 คำสั่ง ดังตารางที่ 5.5 และการพัฒนาซอฟต์แวร์ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expret-Basic โดยควบคุมของทั้ง 7 คำสั่ง ดังรูปที่ 5.37 อีกทั้งพัฒนาซอฟต์แวร์ให้มีความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของทั้ง 7 คำสั่ง กับพารามิเตอร์ %Q2.0, %Q2.1 และ %Q2.2 Pin ที่เกี่ยวข้องกับ Pin IN1, IN2 และ IN3 ดังรูปที่ 5.38

เมื่อพัฒนาซอฟต์แวร์เงื่อนไขการควบคุมของระบบบังคับเคลื่อนเสร็จสิ้น จากนั้นทดสอบความสัมพันธ์ในแต่ละเงื่อนไขการควบคุมทั้ง 7 คำสั่ง โดยเงื่อนไขแรก คือ เลี้ยวซ้าย 30 องศา (Left Angle

-30) ซึ่ง %Q2.0 ต้องทำงาน (แสดงสีเขียว) เพื่อควบคุมไปยัง Pin IN1 ดังรูปที่ 5.39 เงื่อนไขที่สอง คือ เลี้ยวซ้าย 20 องศา (Left Angle -20) ซึ่ง %Q2.1 ต้องทำงาน (แสดงสีเขียว) เพื่อควบคุมไปยัง Pin IN2 ดังรูปที่ 5.40 เงื่อนไขที่สาม คือ เลี้ยวซ้าย 10 องศา (Left Angle -10) ซึ่ง %Q2.2 ต้องทำงาน (แสดงสีเขียว) เพื่อควบคุมไปยัง Pin IN3 ดังรูปที่ 5.41 เงื่อนไขที่สี่ คือ คืบล้อตรงกลาง 20 องศา (Center Angle 0) ซึ่ง %Q2.0, %Q2.1 ต้องทำงาน (แสดงสีเขียว) เพื่อควบคุมไปยัง Pin IN1, IN2 ดังรูปที่ 5.42 เงื่อนไขที่ห้า คือ เลี้ยวขวา 10 องศา (Right Angle 10) ซึ่ง %Q2.0, %Q2.2 ต้องทำงาน (แสดงสีเขียว) เพื่อควบคุมไปยัง Pin IN1, IN3 ดังรูปที่ 5.43 เงื่อนไขที่หก คือ เลี้ยวขวา 20 องศา (Right Angle 20) ซึ่ง %Q2.1, %Q2.2 ต้องทำงาน (แสดงสีเขียว) เพื่อควบคุมไปยัง Pin IN2, IN3 ดังรูปที่ 5.44 และเงื่อนไขที่เจ็ด คือ เลี้ยวขวา 30 องศา (Right Angle 30) ซึ่ง %Q2.0, %Q2.1, %Q2.2 ต้องทำงาน (แสดงสีเขียว) เพื่อควบคุมไปยัง Pin IN1, IN2, IN3 ดังรูปที่ 5.45



รูปที่ 5.35 การตั้งค่าใช้งานโมดูล TM3DQ8R ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic



รูปที่ 5.36 การเชื่อมต่อสายสัญญาณดิจิทัลเอาต์พุตโมดูล TM3DQ8R ไปยังเซอร์โวมอเตอร์

ตารางที่ 5.3 การควบคุมแบบ I/O Cable เซอร์โวมอเตอร์ของเงื่อนไข 7 คำสั่ง ในการบังคับเคลื่อน

ควบคุมจากพีแอลซีไปยัง Port KADRP-14V (JST)	มุมเคลื่อน (องศา)	ตำแหน่งในซอฟต์แวร์ COOL WORKS QUICK V1.0.0
IN1	Left Angle -30	-60000
IN2	Left Angle -20	-40000
IN3	Left Angle -10	-20000
IN1, IN2	Center Angle 0	0
IN1, IN3	Right Angle 10	20000
IN2, IN3	Right Angle 20	40000
IN1, IN2, IN3	Right Angle 30	60000

(หมายเหตุ : การควบคุม IN6 คือ การรีเซ็ตการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ให้เตรียมพร้อมตลอดเวลา โดยใช้คำสั่ง Pulse ให้มีการทำงาน (ติด-ดับ) ทุก 1 s (วินาที) ซึ่งใช้พีแอลซีควบคุม)

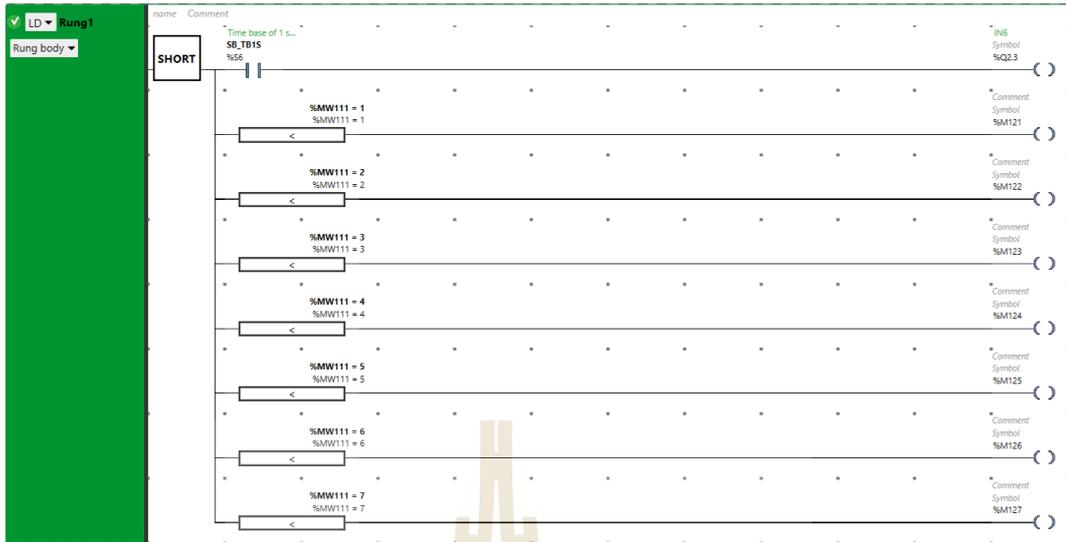
ตารางที่ 5.4 การกำหนดพารามิเตอร์ควบคุมความเร็ว วิ่งเดินหน้า วิ่งถอยหลัง และเบรก

พารามิเตอร์ เอาต์พุตจากพีแอลซี	Pin (I/O) Cable ที่ใช้ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์
%Q2.0	IN1
%Q2.1	IN2
%Q2.2	IN3
%Q2.3	IN6

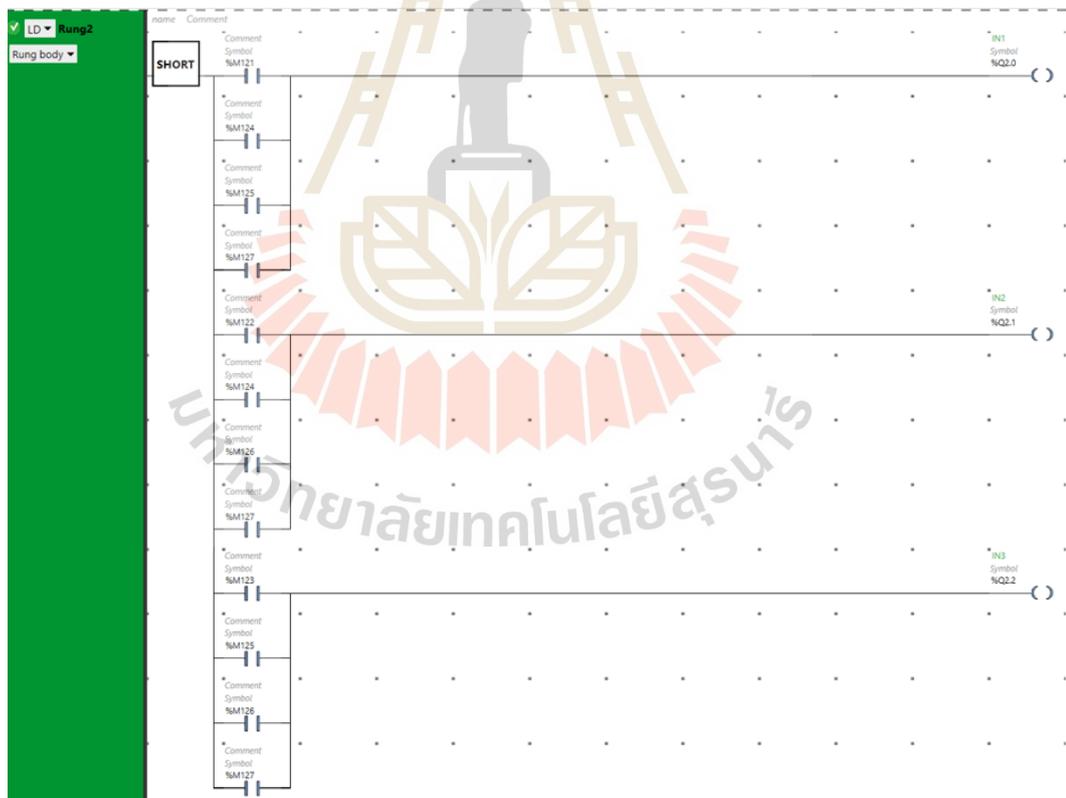
ตารางที่ 5.5 การควบคุมแบบ I/O Cable เซอร์โวมอเตอร์ของเงื่อนไข 7 คำสั่ง ในการบังคับเคลื่อน

คำสั่ง (ลำดับ)	พารามิเตอร์ รับคำสั่งจากจอตัสกรีน	พารามิเตอร์ สำหรับรองรับเงื่อนไข	มุมเคลื่อน (องศา)
1	%MW111=1	%M121	Left Angle -30
2	%MW111=2	%M122	Left Angle -20
3	%MW111=3	%M123	Left Angle -10
4	%MW111=4	%M124	Center Angle 0
5	%MW111=5	%M125	Right Angle 10
6	%MW111=6	%M126	Right Angle 20
7	%MW111=7	%M127	Right Angle 30

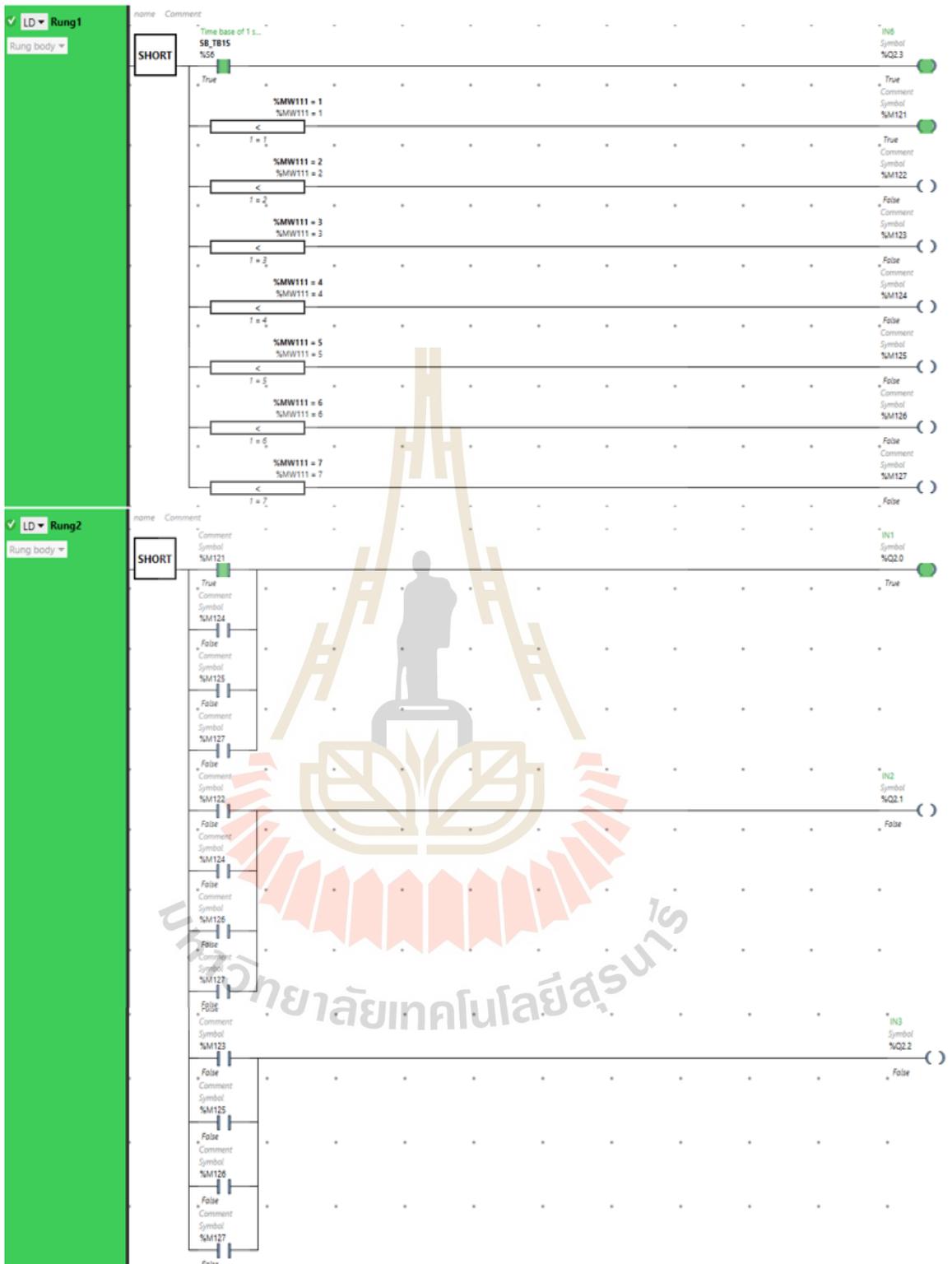
(หมายเหตุ : การควบคุม Pin IN6 ในโปรแกรมของพีแอลซีใช้พารามิเตอร์ %S6 เป็นคำสั่ง Pulse ให้มีการทำงาน (ติด-ดับ) ทุก 1 s (วินาที) ควบคุมการทำงานไปที่พารามิเตอร์ %Q2.3)



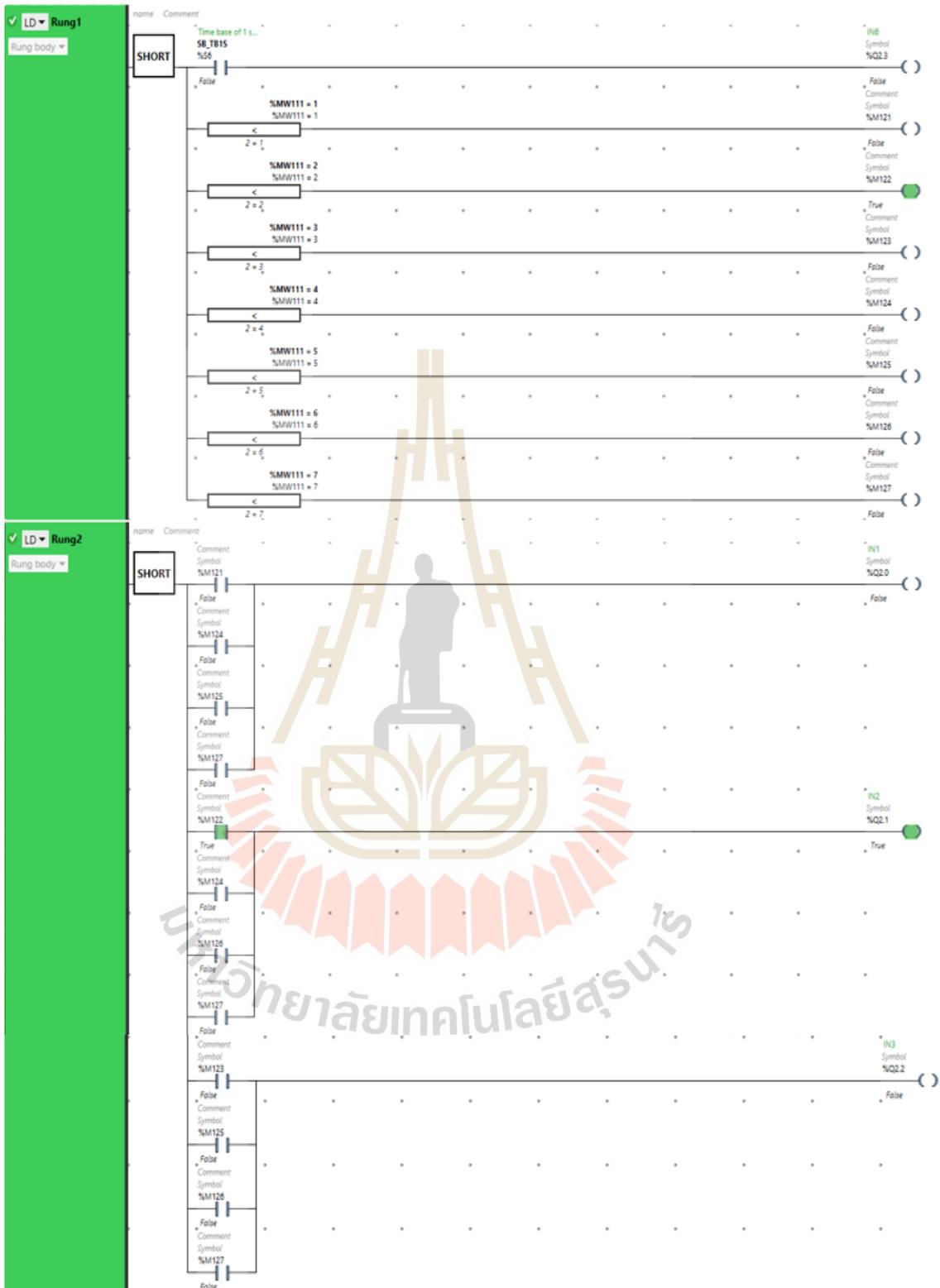
รูปที่ 5.37 ซอฟแวร์ของพีแอลซีสำหรับควบคุมเงื่อนไขการบังคับลิ้นวทั้ง 7 คำสั่ง



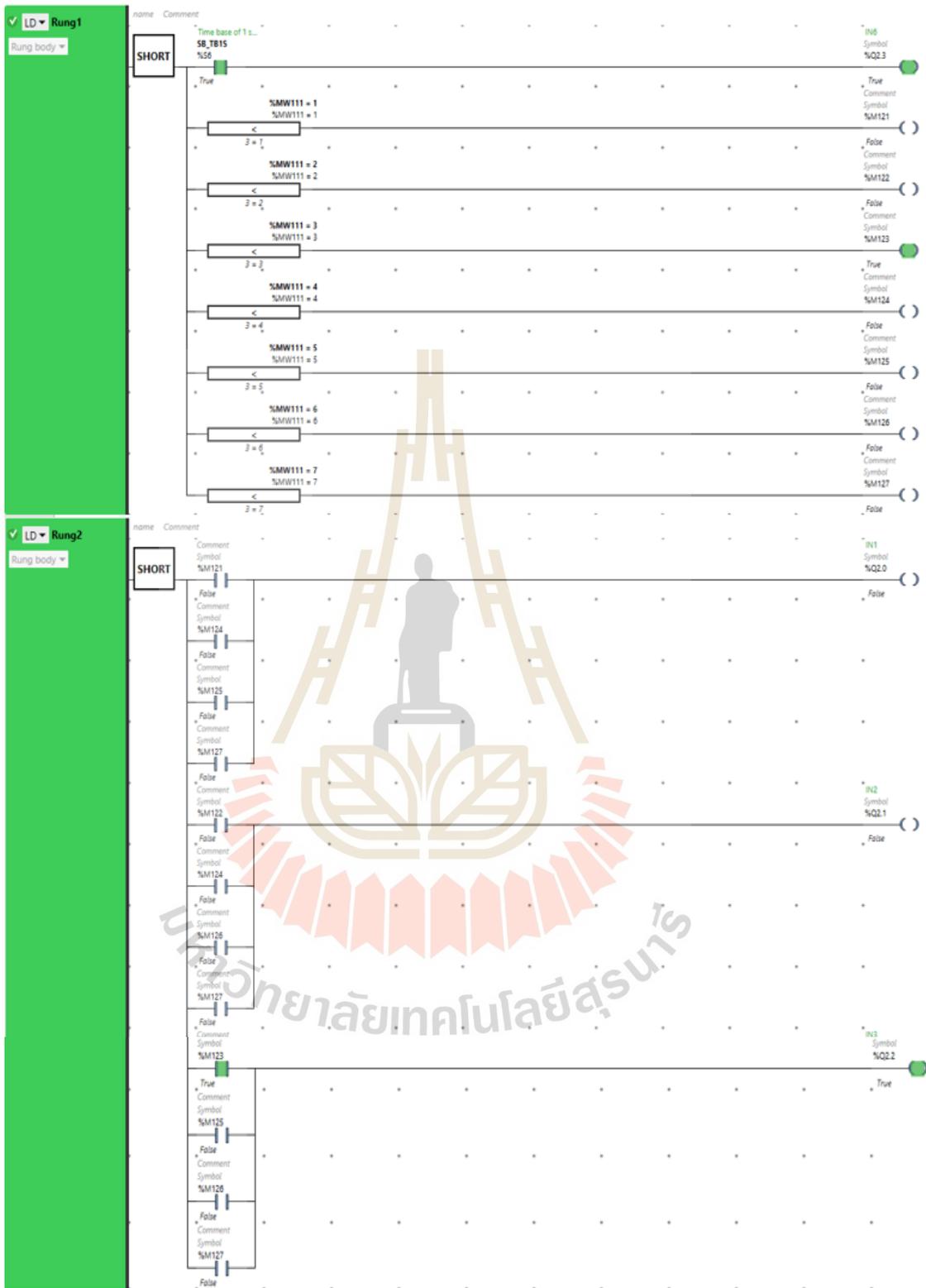
รูปที่ 5.38 ซอฟแวร์ของพีแอลซีควบคุมของทั้ง 7 คำสั่ง กับ %Q2.0, %Q2.1 และ %Q2.2



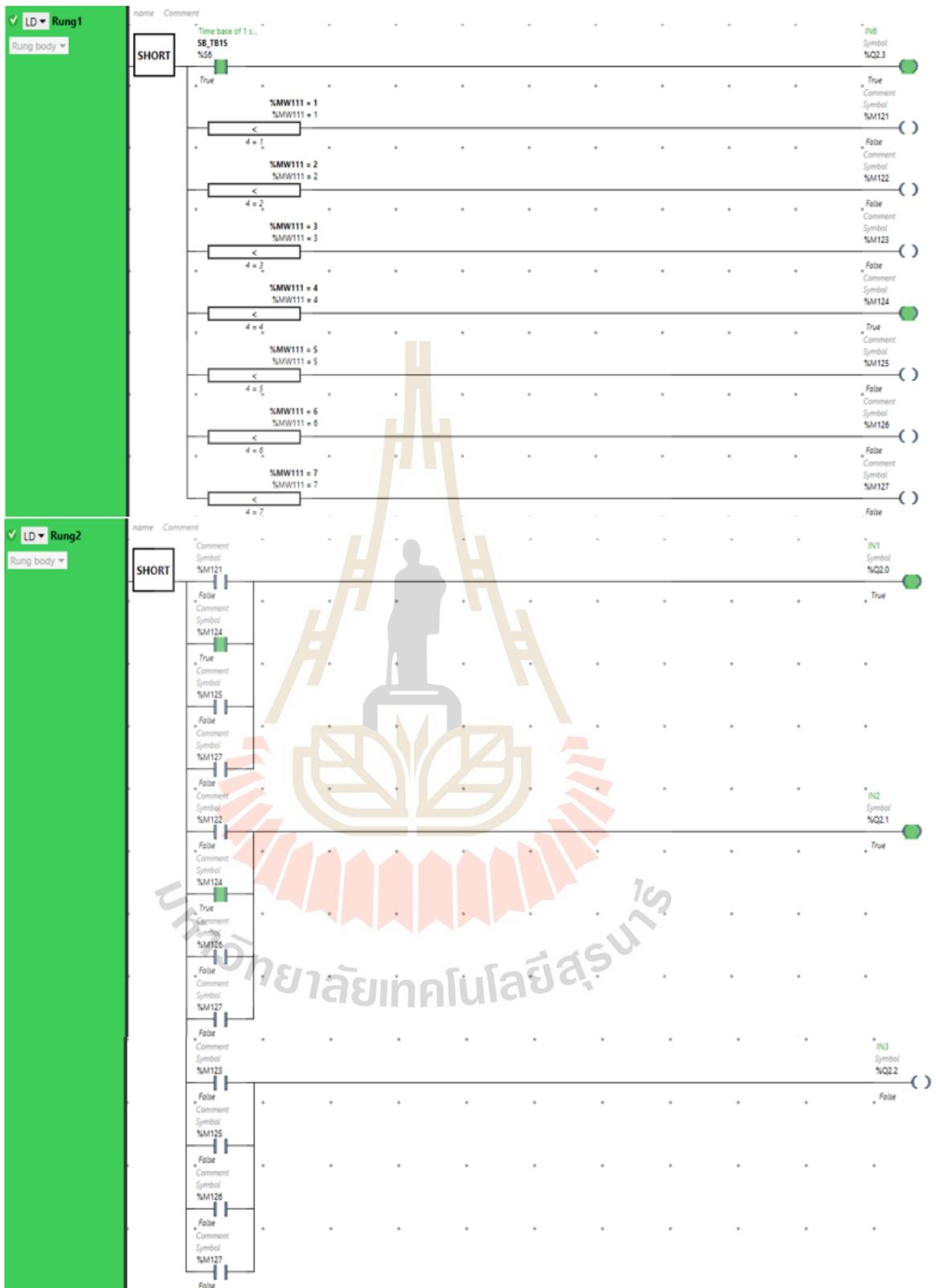
รูปที่ 5.39 การทดสอบเงื่อนไขแล้วซ้ำ 30 องศา โดยให้ %Q2.0 ทำงาน



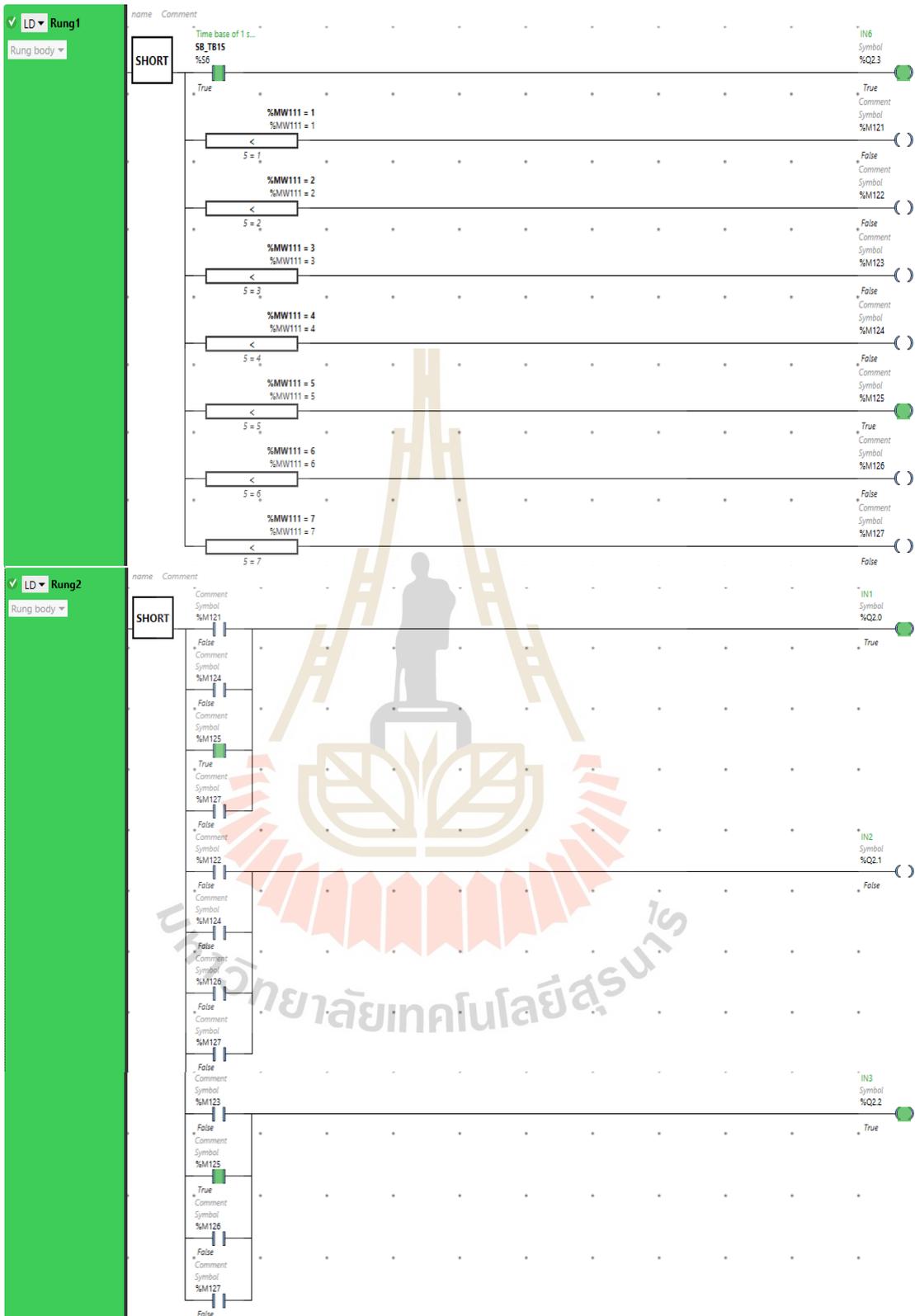
รูปที่ 5.40 การทดสอบเงื่อนไขเขียวซ้าย 20 องศา โดยให้ %Q2.1 ทำงาน



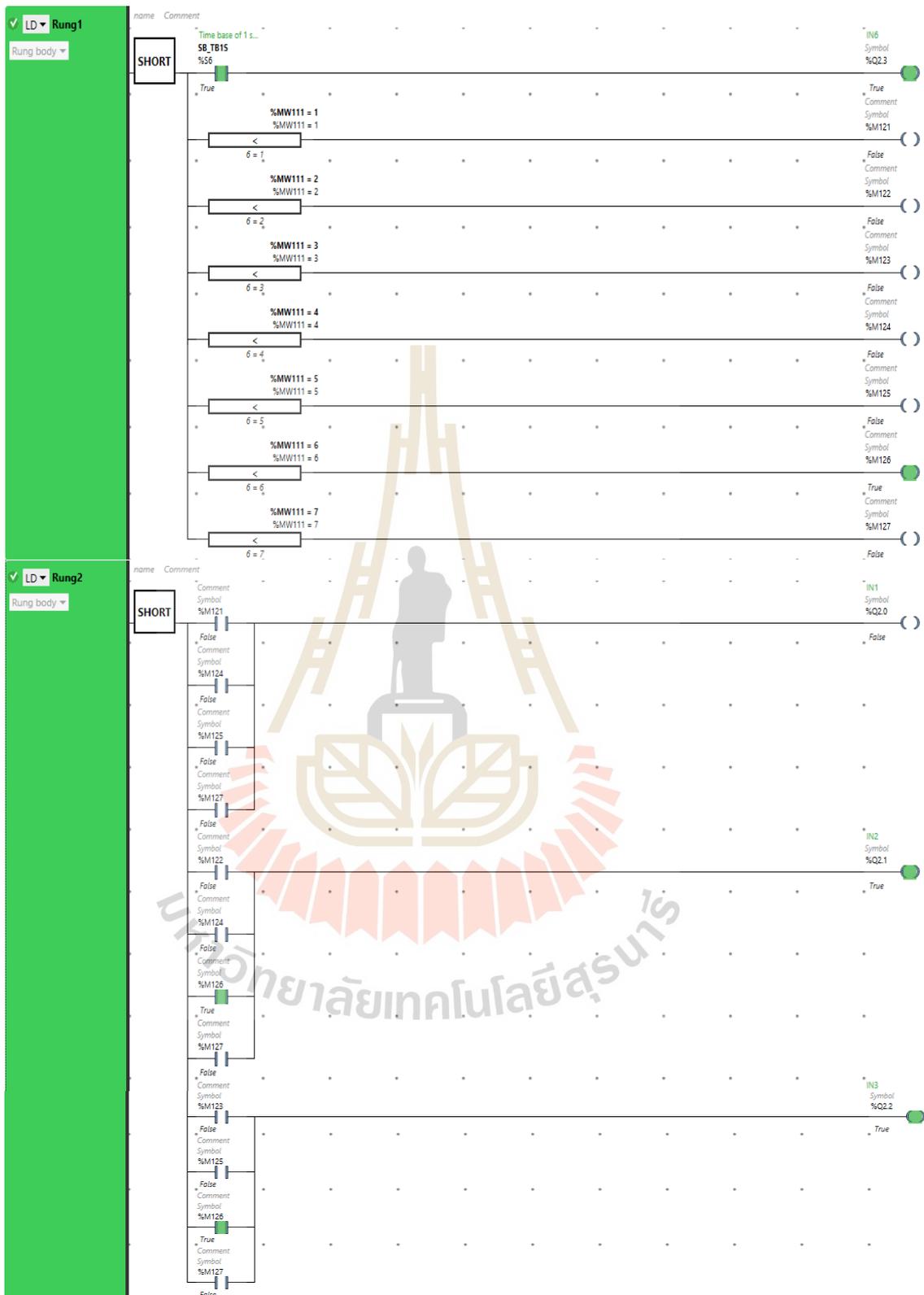
รูปที่ 5.41 การทดสอบเงื่อนไขเลขห้า 10 องศา โดยให้ %Q2.2 ทำงาน



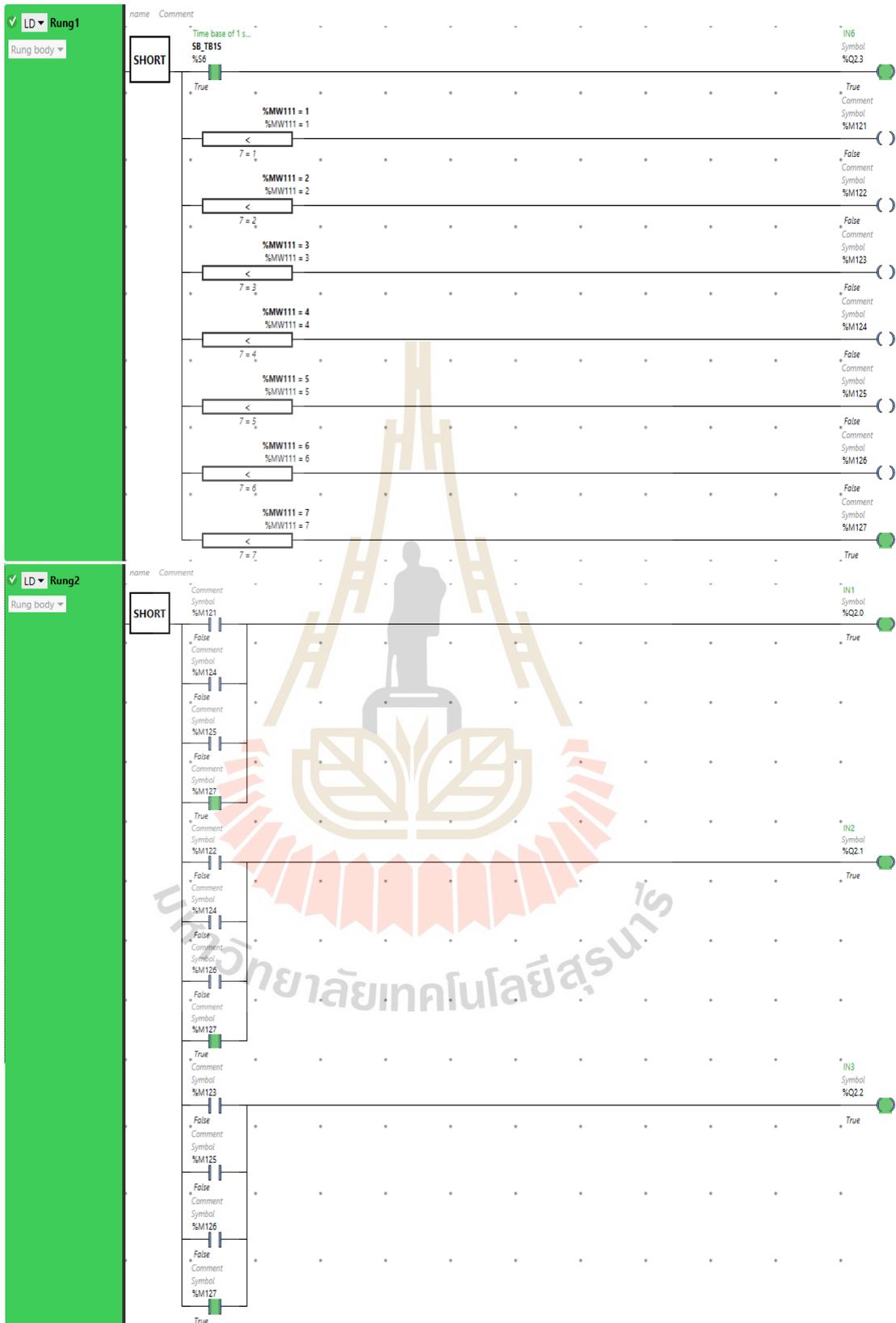
รูปที่ 5.42 การทดสอบเงื่อนไขคิ่ตรงกลาง 0 องศา โดยให้ %Q2.0 และ %Q2.1 ทำงาน



รูปที่ 5.43 การทดสอบเงื่อนไขเลี้ยวขวา 10 องศา โดยให้ %Q2.0 และ %Q2.2 ทำงาน



รูปที่ 5.44 การทดสอบเงื่อนไขไขเลี้ยวขวา 20 องศา โดยให้ %Q2.1 และ %Q2.2 ทำงาน



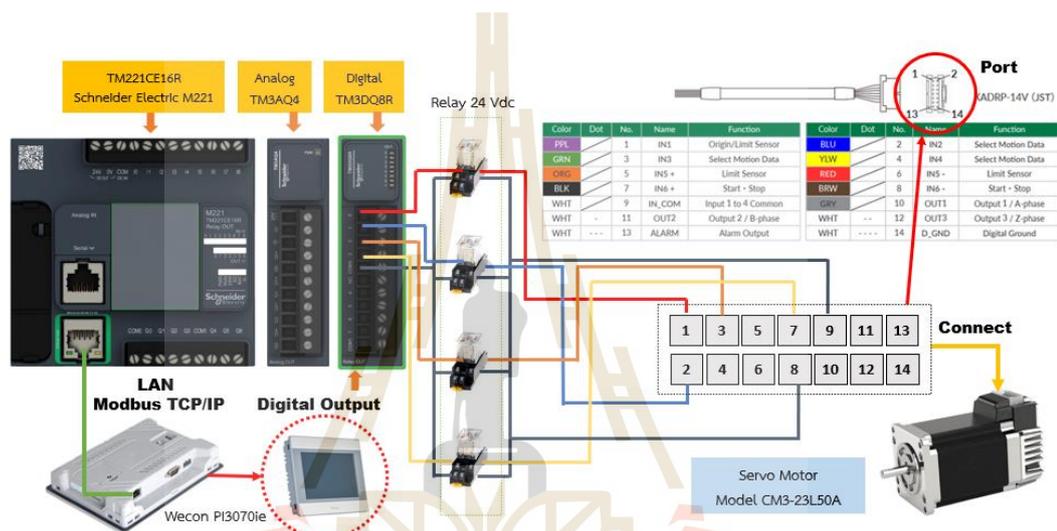
รูปที่ 5.45 การทดสอบเงื่อนไขแถว 30 องศา โดยให้ %Q2.0, %Q2.1 และ %Q2.2 ทำงาน

จากนั้นทำการทดสอบเงื่อนไขในการบังคับเลี้ยวผ่านเซอร์โวมอเตอร์ในรูปแบบดิจิตอลเอาท์พุท (I/O Cable) ระหว่างพีแอลซีไปยังเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อให้รถขนส่งอัตโนมัติทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ทั้ง 7 ช่วง คือ การบังคับเลี้ยวซ้าย 30 องศา (Left Angle -30) เลี้ยวซ้าย 20 องศา (Left Angle -32) เลี้ยวซ้าย 10 องศา (Left Angle -10) คิ่่นล้อรถให้อยู่ตรงกลาง 0 องศา (Center Angle 0) เลี้ยวขวา 10 องศา (Right Angle 10) เลี้ยวขวา 20 องศา (Right Angle 20) และเลี้ยวขวา 30 องศา (Right Angle 30) ริงถอยหลัง และเบรก โดยมีการทดสอบระบบบังคับเลี้ยวด้วยพีแอลซีใช้ในเบื้องต้นด้วยการทดสอบเลี้ยวซ้าย 30 องศา ดังรูปที่ 5.46



รูปที่ 5.46 การทดสอบระบบบังคับเลี้ยวด้วยพีแอลซีสำหรับเลี้ยวซ้าย 30 องศา

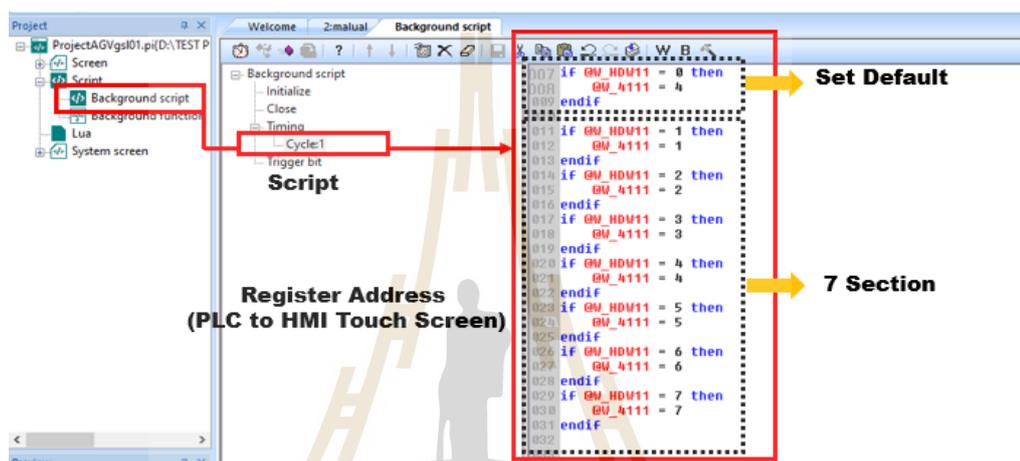
นอกจากการใช้พีแอลซีควบคุมระบบบังคับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีกล่าวถึงการออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 4.9 โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมการทำงานหลัก คือ จอทัสกรีน สำหรับรูปแบบการสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP ระหว่างพีแอลซีกับจอทัสกรีน ได้กล่าวในส่วนขอรูปแบบการตั้งค่าใช้งานการพัฒนาในเบื้องต้นในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยใช้จอทัสกรีนเดียวกันกับที่ใช้กับสำหรับระบบขับเคลื่อนเพียงแต่มีการพัฒนาในส่วนระบบบังคับเคลื่อนเพิ่มเติม (อ้างอิงหัวข้อที่ 5.2.2) ทำให้มีการใช้รูปแบบการเชื่อมต่อสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP ที่ใช้สายแลนเชื่อมต่อระหว่างพีแอลซีกับจอทัสกรีน เพื่อควบคุมการทำงานระบบบังคับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติ ดังรูปที่ 5.47



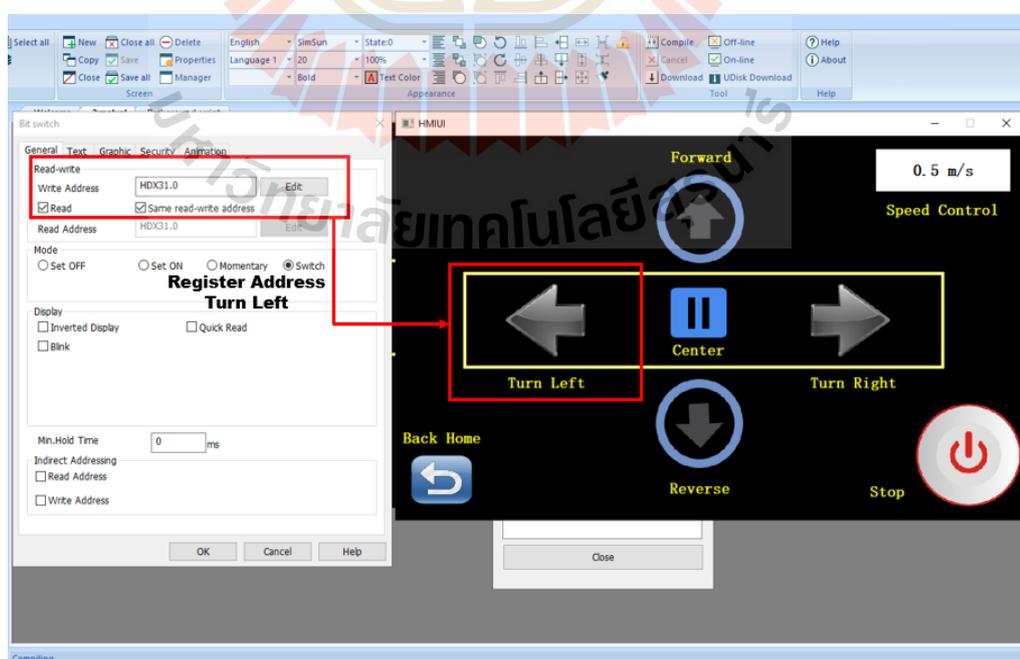
รูปที่ 5.47 การใช้จอทัสกรีนเชื่อมต่อสื่อสารกับพีแอลซีสำหรับควบคุมการทำงานระบบบังคับเคลื่อน

สำหรับการพัฒนา Dashboard จอทัสกรีนเพื่อใช้ควบคุมระบบบังคับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติ ซึ่งได้ออกแบบและพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนของ Dashboard จากรูปที่ 5.28 โดยเพื่อให้สามารถควบคุมการบังคับเคลื่อนผ่านเซอร์โวมอเตอร์ด้วยการกดปุ่มสัมผัสที่หน้าจอทัสกรีน จากนั้นทำการเขียน Script บนโปรแกรม PIStudio เชื่อมต่อ Register Address รูปแบบโปรโตคอล Modbus TCP/IP ระหว่างจอทัสกรีนกับพีแอลซี (อ้างอิงตารางที่ 5.5) สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ให้มีการกำหนดพารามิเตอร์เพิ่มเติมด้วย Register Address @W_HDW11 เพื่อเป็นพารามิเตอร์รองรับคำสั่งจากเงื่อนไขของทั้ง 7 คำสั่ง โดยกำหนดคำสั่ง Set ค่า Default ด้วยเงื่อนไข @W_HDW11 = 0 ให้ @W_4111 = 4 คือ ให้ล้ออยู่ตรงกลาง จากนั้นกำหนดเงื่อนไขที่แรก @W_HDW11 = 1 ให้ @W_4111 = 1 คือ ให้เลี้ยวซ้าย 30 องศา เงื่อนไขที่สอง @W_HDW11 = 2 ให้ @W_4111 = 2 คือ ให้เลี้ยวซ้าย 20 องศา เงื่อนไขที่สาม @W_HDW11 = 3 ให้ @W_4111 = 3 คือ ให้เลี้ยวซ้าย 10 องศา เงื่อนไขที่สี่ @W_HDW11 = 4 ให้ @W_4111 = 4 คือ ให้ล้ออยู่ตรงกลาง 0 องศา เงื่อนไขที่ห้า @W_HDW11 = 5 ให้ @W_4111 = 5 คือ ให้เลี้ยวขวา 10 องศา เงื่อนไขที่หก @W_HDW11 = 6 ให้ @W_4111 = 6 คือ ให้เลี้ยวขวา 20 องศา และเงื่อนไขที่เจ็ด @W_HDW11 = 7 ให้ @W_4111 = 7 คือ ให้เลี้ยวขวา 30 องศา บนหน้าต่าง Script

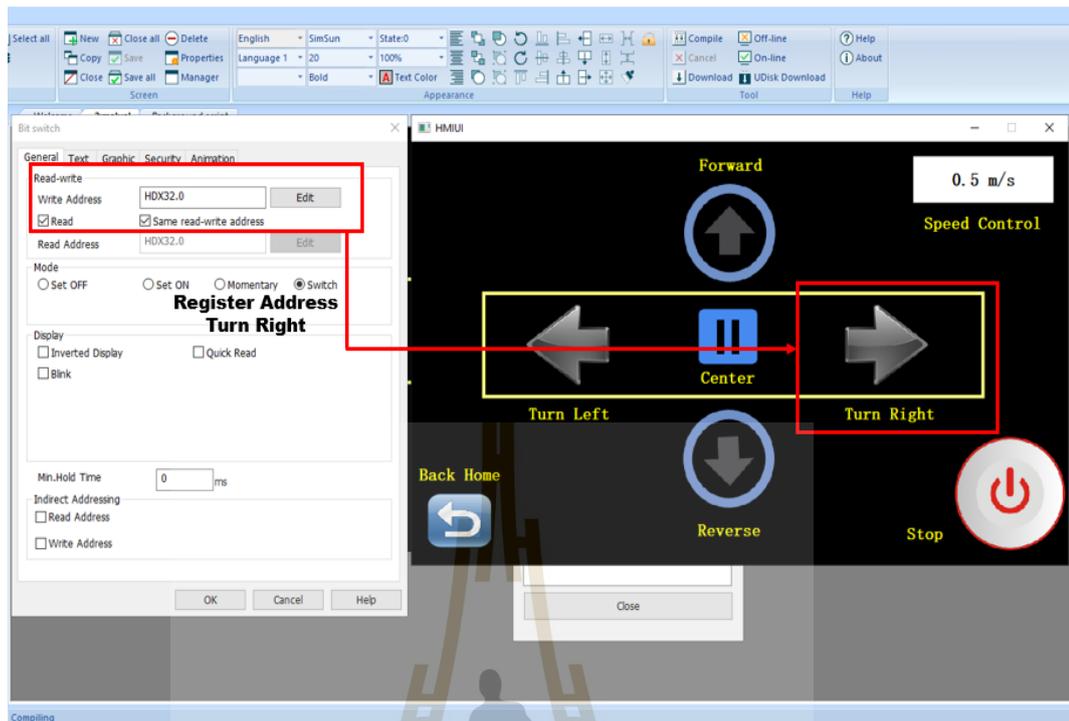
ในโปรแกรม PIStudio ดังรูปที่ 5.48 จากนั้นทำการตั้งค่าของพารามิเตอร์ Dashboard ของระบบ Manual จากรูปที่ 5.28 โดยตั้งค่า Register Address ของพารามิเตอร์บังคับเลี้ยวซ้าย 30 องศา (Turn Left) เป็น HDX31.0 ดังรูปที่ 5.49 ถัดมาเป็นการตั้งค่า Register Address ของพารามิเตอร์บังคับเลี้ยวขวา 30 องศา (Turn Right) เป็น HDX32.0 ดังรูปที่ 5.50 และให้ทำการตั้งค่า Register Address ของพารามิเตอร์คั่นล้อให้อยู่ตรงกลาง 0 องศา (Center) เป็น HDX33.0 ดังรูปที่ 5.51 รวมทั้งพัฒนาซอฟต์แวร์เพิ่มเติมจาก Dashboard ควบคุมเงื่อนไขการบังคับเลี้ยวไปยังหน้าต่าง Script ในโปรแกรม PIStudio ดังรูปที่ 5.52



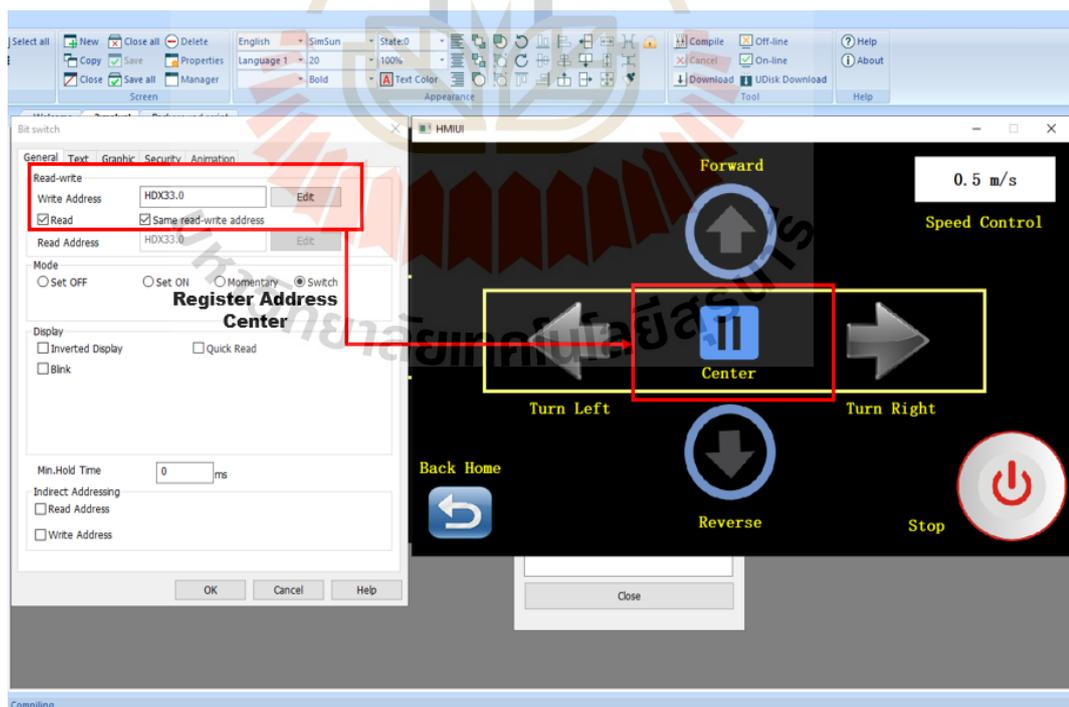
รูปที่ 5.48 กำหนด Register Address ระบบบังคับเลี้ยวในโปรแกรมจอทัสกรีนบนหน้าต่าง Script



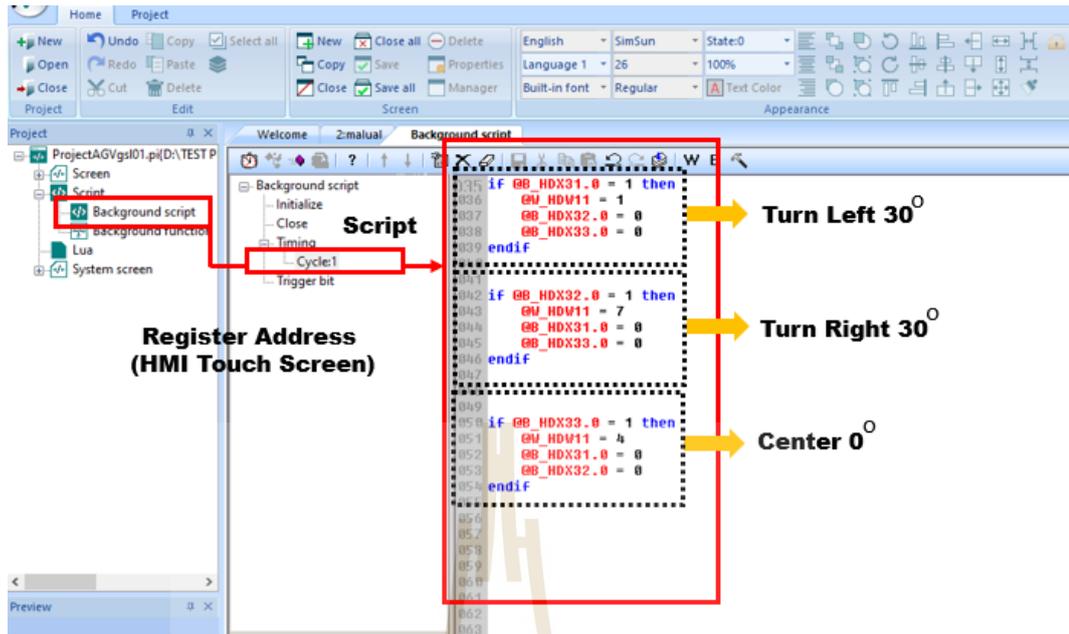
รูปที่ 5.49 กำหนด Register Address พารามิเตอร์เลี้ยวซ้าย 30 องศา ที่ Dashboard จอทัสกรีน



รูปที่ 5.50 กำหนด Register Address พารามิเตอร์เลขว้า 30 องศา ที่ Dashboard จอทัสกรีน

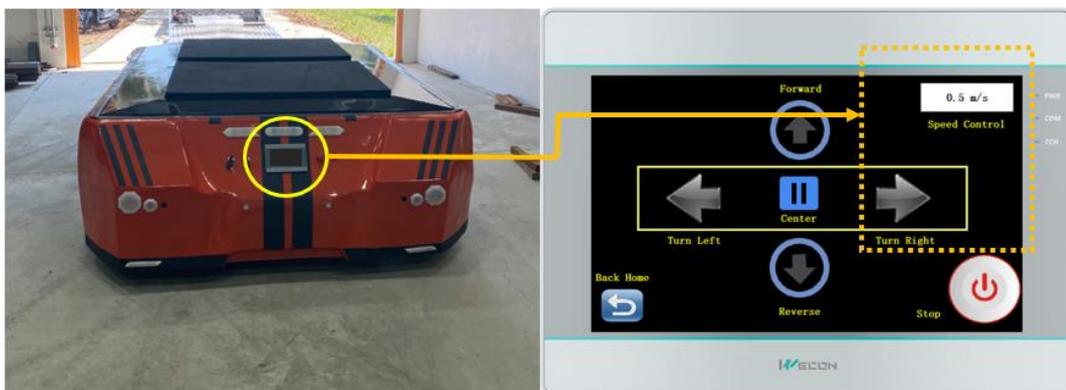


รูปที่ 5.51 กำหนด Register Address พารามิเตอร์คั่นลือ 0 องศา ที่ Dashboard จอทัสกรีน



รูปที่ 5.52 พัฒนาซอฟต์แวร์การควบคุมจาก Dashboard ไปยังหน้าต่าง Script สำหรับการบังคับเลี้ยว

จากรูปที่ 5.52 เป็นการกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมของระบบบังคับเลี้ยวเพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานจาก Dashboard ไปยังหน้าต่าง Script เริ่มต้นด้วยเมื่อมีการกดปุ่มสัมผัสที่จอทัสกรีน Turn Left ทำให้ Register Address @B_HDX31.0 = 1 พารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขบังคับเลี้ยว @W_HDW11 = 1, @B_HDX32.0 = 0 และ @B_HDX33.0 = 0 คือ บังคับเลี้ยวซ้าย 30 องศา ถัดมาเมื่อกดปุ่มสัมผัสที่จอทัสกรีน Turn Right ทำให้ Register Address @B_HDX32.0 = 1 พารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขบังคับเลี้ยว @W_HDW11 = 7, @B_HDX31.0 = 0 และ @B_HDX33.0 = 0 คือ บังคับเลี้ยวขวา 30 องศา จากนั้นเมื่อกดปุ่มสัมผัสที่จอทัสกรีน Center ทำให้ Register Address @B_HDX33.0 = 1 สำหรับพารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขบังคับเลี้ยว @W_HDW11 = 7, @B_HDX31.0 = 0 และ @B_HDX32.0 = 0 คือ การคืนล้ออยู่ตรงกลาง 0 องศา

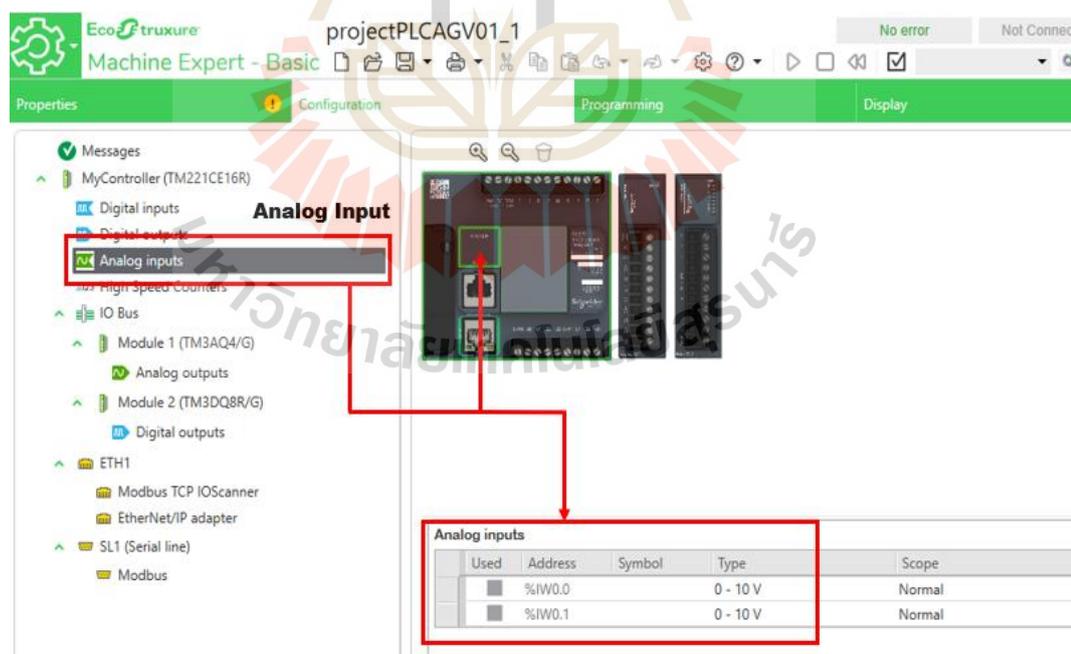


รูปที่ 5.53 การทดสอบวิ่งใช้งานระบบบังคับเลี้ยวในกรณีเลี้ยวขวา 30 องศา ควบคุมโดยใช้จอทัสกรีน

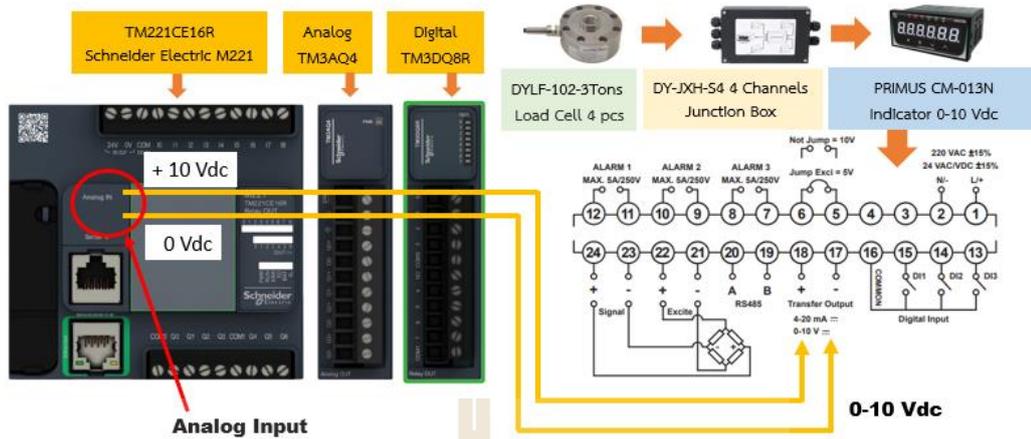
เมื่อพัฒนาระบบควบคุมของการบังคับเลี้ยวเสร็จสิ้น เพื่อนำไปใช้ควบคุมการเลี้ยวให้ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดของรถรถขนส่งอัตโนมัติ โดยใช้จอทัสกรีนควบคุมด้วยการกดปุ่มสัมผัสที่หน้า Dashboard ซึ่งมีการเชื่อมต่อสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP ระหว่างจอทัสกรีนและพีแอลซี ใช้ทดสอบวิ่งใช้งานจริงในกรณีวิ่งเดินหน้าโดยการควบคุมความเร็ว (Speed Control) เท่ากับ 0.5 m/s และกดปุ่มเลี้ยวขวา 30 องศา (Turn Right) ที่จอทัสกรีน ดังรูปที่ 5.53

5.2.4 การพัฒนาระบบตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติ

เทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาระบบตรวจสอบน้ำหนักของรถขนส่งอัตโนมัติ ซึ่งได้กล่าวเกี่ยวกับหลักการออกแบบระบบไว้ในหัวข้อที่ 4.9.3 และรูปที่ 4.41 เริ่มต้นด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากแบตเตอรี่พิกัด 48 Vdc, 130 Ah เชื่อมต่อสายไฟไปยังตัวปรับลดแรงดันไฟฟ้า (Buck Converter) เพื่อปรับพิกัดแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบตเตอรี่ 48 Vdc ให้ลดลงเหลือ 24 Vdc เท่ากับพิกัดแรงงานใช้งานชุดควบคุมโหลดเซลล์ จากนั้นทดสอบจ่ายไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปยังชุดควบคุมโหลดเซลล์ เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการอ่านค่าพารามิเตอร์ของน้ำหนักที่โหลดเซลล์ตรวจวัดได้ โดยใช้สัญญาณอนาล็อกอินพุทของพีแอลซีด้วยการตั้งค่าใช้งานอนาล็อกอินพุทพีแอลซี TM221CE16R Schneider Electric M221 ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic ให้รองรับในการเชื่อมต่อสัญญาณอนาล็อกอินพุท 0-10 Vdc ดังรูปที่ 5.54 จากนั้นเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างพีแอลซีกับชุดควบคุมโหลดเซลล์ เพื่ออ่านค่าพารามิเตอร์น้ำหนักที่โหลดเซลล์ตรวจวัดได้ด้วยสัญญาณอนาล็อกอินพุท 0-10 Vdc ดังรูปที่ 5.55



รูปที่ 5.54 การตั้งค่าใช้งาน Analog Input ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic



รูปที่ 5.55 การเชื่อมต่อสายสัญญาณอนาล็อกอินพุทของพีแอลซีไปยังชุดควบคุมโหลดเซลล์

ลำดับถัดมาพัฒนาในส่วนซอฟต์แวร์ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic ด้วยการกำหนดพารามิเตอร์สำหรับอ่านค่าสัญญาณอนาล็อกอินพุท 0-10 Vdc ของชุดควบคุมโหลดเซลล์ เพื่ออ่านค่าน้ำหนักที่โหลดเซลล์ตรวจวัดได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่กำหนดระหว่างพีแอลซี กับชุดควบคุมโหลดเซลล์ (อ้างอิงตารางที่ 4.26) โดยกำหนดพารามิเตอร์ %IW0.0 อ่านค่าสัญญาณอนาล็อกอินพุท 0-10 Vdc ของพีแอลซี และกำหนดพารามิเตอร์ %MW100 เพื่อเป็นพารามิเตอร์ส่งออกค่าจากพีแอลซีไปยังจอทัสกรีนด้วยการพัฒนาซอฟต์แวร์ในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic ดังรูปที่ 5.56 เมื่อพัฒนาซอฟต์แวร์ของระบบตรวจวัดน้ำหนักด้วยโหลดเซลล์เสร็จสิ้น เพื่อตรวจสอบการอ่านค่าน้ำหนักจริงในเบื้องต้นใช้ถังน้ำที่มีขนาดบรรจุ 1,650 kg จำนวน 2 ถัง เติมน้ำถึงละ 500 ลิตร (L) วางบนรถขนส่งอัตโนมัติเพื่อทำการทดสอบ โดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับใช้ตรวจสอบน้ำหนักในโปรแกรมของ Ecostruxure Machine Expert-Basic อ่านค่าได้ 999 kg ของพารามิเตอร์ %IW0.0 = 999 และพารามิเตอร์ %MW100 = 999 ซึ่งหมายความว่าอ่านค่าของการตรวจวัดน้ำหนักได้ 999 kg (เนื่องจากมวลของน้ำ 1 L มีค่าเท่ากับ 1 kg) ดังรูปที่ 5.57 สำหรับการทดสอบระบบตรวจสอบน้ำหนักจริงของรถขนส่งอัตโนมัติด้วยถังน้ำจำนวน 2 ถัง เติมน้ำถึงละ 500 L ดังรูปที่ 5.58



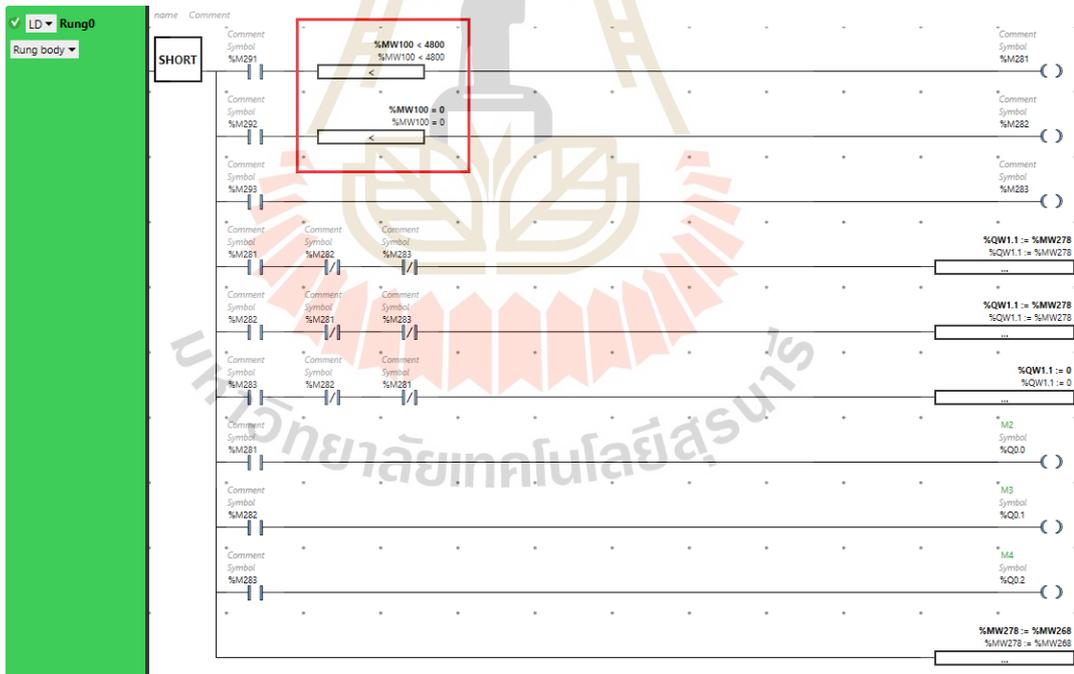
รูปที่ 5.56 ซอฟต์แวร์ของพีแอลซีสำหรับตรวจสอบน้ำหนักด้วยโหลดเซลล์



รูปที่ 5.57 การทดสอบอ่านค่าน้ำหนักด้วยโหลดเซลล์ของถังน้ำจำนวน 2 ถัง ในโปรแกรมพีแอลซี



รูปที่ 5.58 การทดสอบอ่านค่าน้ำหนักด้วยโหลดเซลล์ของถังน้ำจำนวน 2 ถัง เติมน้ำถังละ 500 L



รูปที่ 5.59 พัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อเป็นเงื่อนไขตรวจสอบน้ำหนักของระบบขับเคลื่อนเพิ่มเติม

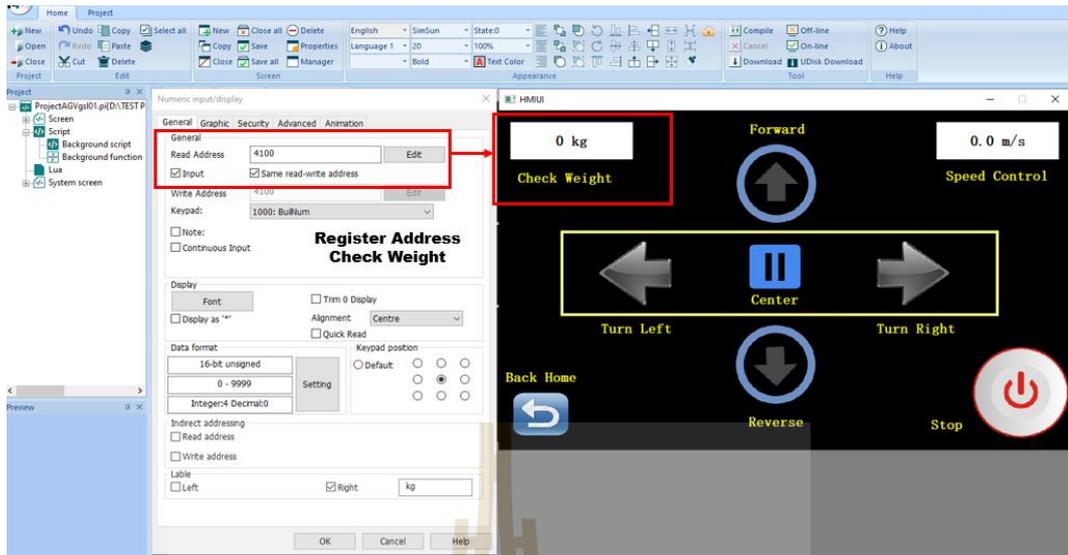
สำหรับการแสดงค่าน้ำหนักเพื่อต้องการตรวจสอบว่าในกรณีบรรทุกแบงก์น้ำมันสำหรับหลังด้วยรถขนส่งอัตโนมัติเกินพิกัดน้ำหนักตามที่กำหนดไว้สูงสุด คือ 4,800 kg ซึ่งหมายความว่ารถขนส่งอัตโนมัติสามารถบรรทุกแบงก์น้ำมันสำหรับหลังได้สูงสุด 4,800 kg ในกรณีบรรทุกแบงก์น้ำมันสำหรับหลังเกิน 4,800 kg

ต้องมีการควบคุมให้รถขนส่งอัตโนมัติไม่ทำการวิ่งชนส่งแป้งมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้ง เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายตัวโครงสร้างรถที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาในขณะทำการวิ่ง รวมทั้งขนาดมอเตอร์ขับเคลื่อน ขนาดมอเตอร์บังคับเลี้ยว และขนาดแบตเตอรี่ ที่ได้ออกแบบการคำนวณการรองรับน้ำหนักมาก่อนหน้านี้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อเป็นเงื่อนไขในการตรวจสอบน้ำหนักในโปรแกรม Ecostruxure Machine Expert-Basic ในส่วนของการควบคุมระบบขับเคลื่อนเพิ่มเติมทั้งในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง โดยตั้งค่าพิกัดน้ำหนักสูงสุดไว้ที่ 4,800 kg และใช้พารามิเตอร์ %MW100 เป็นเงื่อนไข (ในกรอบสีแดง) ดังรูปที่ 5.59

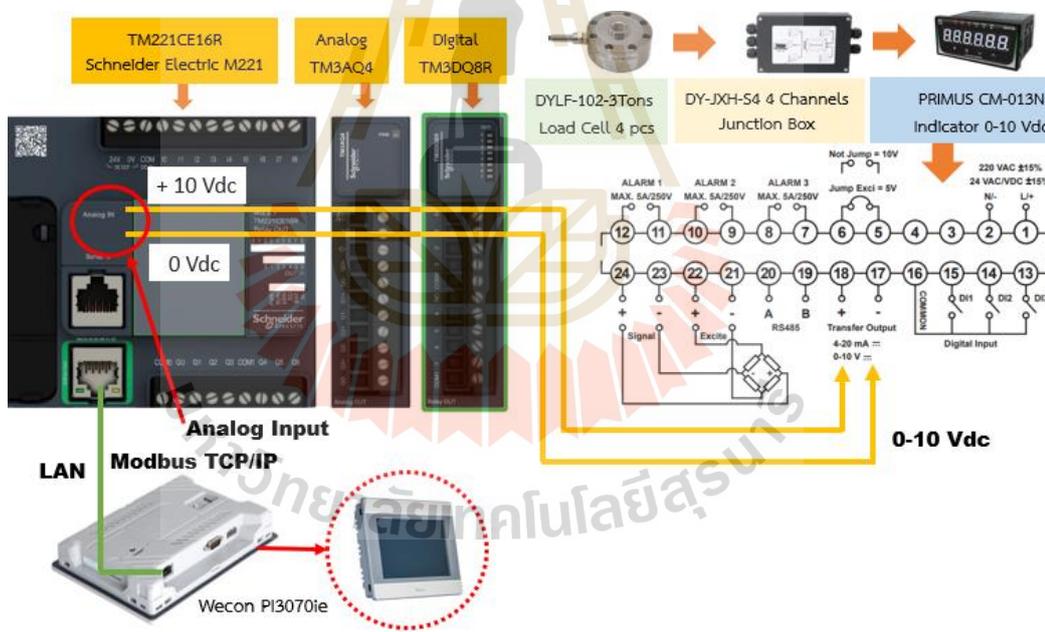
หลังจากนั้นพัฒนา Dashboard ของระบบ Manual เพิ่มเติม โดยให้มีการแสดงค่าตรวจสอบน้ำหนัก (Check Weight) ในกรอบสีแดง ดังรูปที่ 5.60 และการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบน้ำหนัก (Check Weight) เพื่อเชื่อมต่อ Register Address รูปแบบโปรโตคอล Modbus TCP/IP ระหว่างจอทัสกรีนกับพีแอลซี บนโปรแกรม PStudio ดังรูปที่ 5.61 สำหรับรูปแบบการสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP ระหว่างพีแอลซีกับจอทัสกรีน ได้กล่าวในส่วนของการตั้งค่าใช้งานการพัฒนาในเบื้องต้นในหัวข้อที่ผ่านมา โดยใช้จอทัสกรีนเดียวกันกับที่ใช้สำหรับระบบขับเคลื่อนและระบบบังคับเลี้ยว เพียงแค่มีการพัฒนาในส่วนของการตรวจสอบน้ำหนักเพิ่มเติม (อ้างอิงหัวข้อที่ 5.2.2 และ 5.2.3) และมีการใช้รูปแบบการเชื่อมต่อสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP ที่ใช้สายแลนเชื่อมต่อระหว่างพีแอลซีกับจอทัสกรีน เพื่ออ่านค่าน้ำหนักที่วัดได้โดยใช้โพลดเซลล์ ดังรูปที่ 5.62



รูปที่ 5.60 พัฒนา Dashboard เพื่อเป็นเงื่อนไขตรวจสอบน้ำหนักของระบบขับเคลื่อนเพิ่มเติม



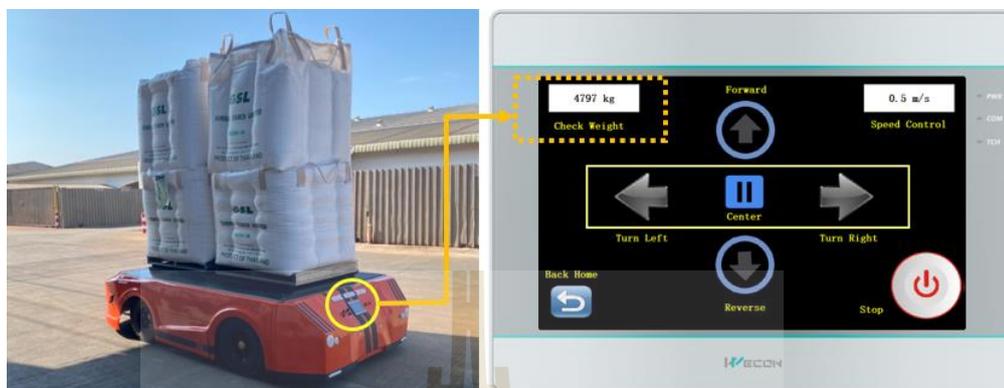
รูปที่ 5.61 กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Check Weight ที่ Dashboard จอทัสกรีน



รูปที่ 5.62 การใช้จอทัสกรีนเชื่อมต่อสื่อสารกับพีแอลซีสำหรับอ่านค่าน้ำหนักที่วัดได้ด้วยโหลดเซลล์

เมื่อพัฒนาระบบตรวจสอบน้ำหนักเสร็จสิ้น ถัดมาทำการทดสอบอ่านค่าน้ำหนักที่วัดได้แสดงผลบน Dashboard ของจอทัสกรีน เพื่อใช้เป็นระบบตรวจสอบน้ำหนักในการบรรทุกแบงก์มันสำปะหลังของรถขนส่งอัตโนมัติก่อนทำการวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง โดยทดสอบบรรทุกแบงก์มันสำปะหลังจำนวน 4 กระสอบ ในแต่ละกระสอบบรรจุแบงก์มันสำปะหลังน้ำหนักเฉลี่ย 1,200 kg จากการ

ทดสอบพบว่าที่ Dashboard ของจอตส์กรีน แสดงค่าน้ำหนักแบ่งมันสำปะหลังที่บรรทุกบนรถขนส่งอัตโนมัติ จำนวน 4 กระสอบ เท่ากับ 4,797 kg ดังรูปที่ 5.63



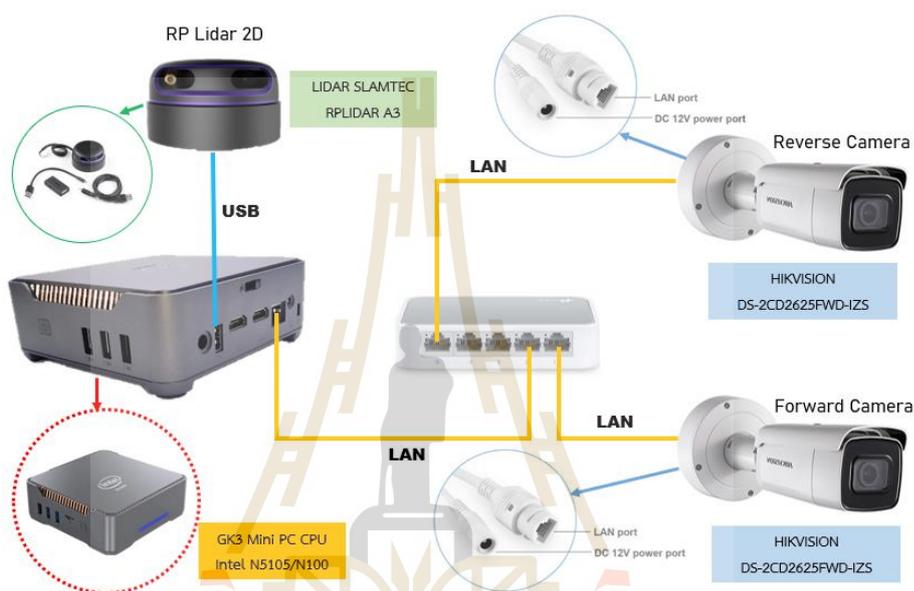
รูปที่ 5.63 การทดสอบอ่านค่าน้ำหนักแบ่งมันสำปะหลังที่บรรทุกจำนวน 4 กระสอบ ที่หน้าจอตส์กรีน

5.2.5 การพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง

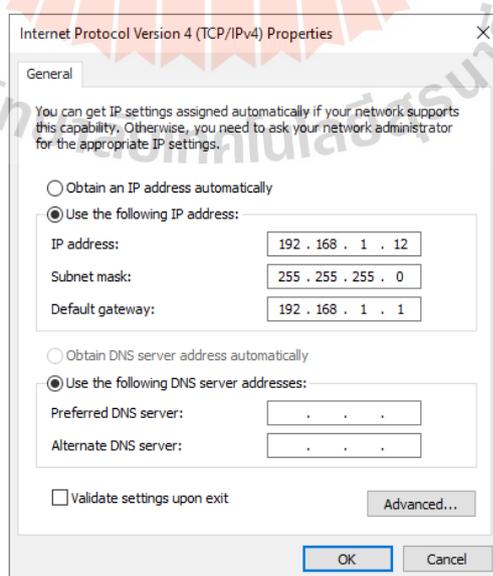
ในส่วนหัวข้อสุดท้ายของการพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแบ่งมันสำปะหลังในงานวิจัยนี้ นั่นก็คือการพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ซึ่งเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ได้กล่าว เกี่ยวกับหลักการออกแบบระบบไว้ในหัวข้อที่ 4.9.4 และรูปที่ 4.42 เริ่มต้นด้วยการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่กัก 48 Vdc, 130 Ah เชื่อมต่อสายไฟไปยังตัวปรับลดแรงดันไฟฟ้า (Buck Converter) เพื่อปรับพิคกิ้งแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้าแบตเตอรี่ 48 Vdc ให้ลดลงเหลือ 12 Vdc เท่ากับพิคกิ้งแรงงานใช้งานกล้องและมินิพีซี และใช้ตัวปรับลดแรงดันไฟฟ้าอีกชุดเพื่อปรับพิคกิ้งแรงดันไฟฟ้าจาก 12 Vdc ให้ลดลงเหลือ 5 Vdc เท่ากับพิคกิ้งแรงงานสวิทช์ฮับ จากนั้นทดสอบจ่ายไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปยังอุปกรณ์ เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางของรถขนส่งอัตโนมัติ ถัดมาเชื่อมต่อสายแลนจากกล้องไปยังสวิทช์ฮับที่เป็นจุดรวมการเชื่อมต่อสายแลนเข้าด้วยกันของทั้งกล้องสำหรับวิ่งเดินหน้า กล้องสำหรับวิ่งถอยหลัง และมินิพีซี รวมทั้งเชื่อมต่อสาย USB ระหว่างมินิพีซีกับไลดาร์ (RP Lidar 2D) ดังรูปที่ 5.64 รวมทั้งตั้งค่า IP Address ของแต่ละอุปกรณ์ (อ้างอิงตารางที่ 4.27) โดยให้กล้องวิ่งเดินหน้าตั้งค่า IP Address เท่ากับ 192.168.1.13 และกล้องวิ่งถอยหลังตั้งค่า IP Address เท่ากับ 192.168.1.14 (หมายเหตุ : การตั้งค่า IP Address ของทั้งกล้องวิ่งเดินหน้าและกล้องวิ่งถอยหลัง มีการตั้งค่า IP Address รวมทั้ง Username และ Password จากผู้ผลิตเป็นที่เรียบร้อยแล้ว) ในส่วนของมินิพีซีตั้งค่า IP Address เท่ากับ 192.168.1.12 ดังรูปที่ 5.65 และสำหรับการเชื่อมต่อใช้งานระหว่างมินิพีซีกับไลดาร์ ตั้งค่าการเชื่อมต่อโดยใช้ Port COM3 (หมายเหตุ : เมื่อทำการเชื่อมต่อสาย USB ระหว่างมินิพีซีกับไลดาร์ Port COM จะสุ่มตัวเลขในการเชื่อมต่อซึ่งอุปกรณ์มินิพีซีแต่ละเครื่องจะสุ่มตัวเลข Port COM ไม่ตรงกัน)

ลำดับถัดมาพัฒนาซอฟต์แวร์ของระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง โดยอ้างอิงอัลกอริทึมของรถขนส่งอัตโนมัติที่ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 4.9.5 เริ่มต้นด้วยใช้มินิพีซีติดตั้งระบบปฏิบัติการ Windows 10 Pro เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์ซึ่งใช้โปรแกรม Visual

Studio Code เป็นเครื่องมือในการพัฒนาที่รองรับการใช้ Python และทำการติดตั้ง Python ในเวอร์ชัน Python V 3.11.0 จากนั้นติดตั้งไลบรารีที่ใช้สำหรับพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติ เพื่อให้สามารถใช้งานกล้องในรูปแบบการเชื่อมต่อสายแลนด้วยการใช้ Python ซึ่งใช้ซอฟต์แวร์ฟังก์ชัน opencv-python 4.8.0.74 และติดตั้งไลบรารีที่ใช้สำหรับพัฒนาระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง เพื่อให้สามารถใช้งานไลดาร์ในรูปแบบการเชื่อมต่อสื่อสารผ่านสาย USB ซึ่งใช้ซอฟต์แวร์ฟังก์ชัน pyrpilidar 0.1.2 บนโปรแกรม Visual Studio Code



รูปที่ 5.64 การเชื่อมต่อสายแลนจากมินิพีซีผ่านสวิตช์ไปยังกล้องสำหรับวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง



รูปที่ 5.65 การตั้งค่า IP Address เท่ากับ 192.168.1.12 ของมินิพีซี

เมื่อติดตั้งไลบรารีสำหรับการใช้งานกล้องและไลดาร์เสร็จสิ้น หลังจากนั้นพัฒนาในส่วนซอฟต์แวร์ให้ตรงตามเงื่อนไขที่กล่าวถึงการออกแบบไว้ ซึ่งมีลำดับชั้นการทำงานของอัลกอริทึม ด้วยการพัฒนาซอฟต์แวร์ในของระบบนำทางอัตโนมัติเป็นลำดับแรกที่ใช้รูปแบบการนำทางแบบ Line Following โดยการพัฒนารูปแบบ Line Following แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ROI, Threshold และ Find Contours and Center ซึ่งมีการกำหนดเงื่อนไขสำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์แบ่งออกเป็น 2 กรณี ในกรณีแรก คือ การพัฒนาซอฟต์แวร์วิ่งเดินหน้ารูปแบบ Line Following ของระบบนำทางอัตโนมัติบนโปรแกรม Visual Studio Code ด้วย Python โดยกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์เริ่มต้นด้วยการเรียกใช้ไลบรารี Open CV (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 1 ถึง บรรทัดที่ 3) และใช้คำสั่งในการเรียกใช้งานกล้องรูปแบบ (rtsp://Username:Password@IP Address/doc/page/preview.asp) โดยที่กำหนด Username คือ admin กำหนด Password คือ G5Lelc2023 และกำหนด IP Address คือ 192.168.1.13 (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 5 ถึง บรรทัดที่ 8) ดังรูปที่ 5.66 ถัดมาพิมพ์คำสั่งเพื่อทำการ ROI เพื่อกำหนดขอบเขตเป้าหมายของเฟรมกล้อง โดยกำหนดขอบเขต frame[300:480, 0:640] (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 10 ถึง บรรทัดที่ 16) ดังรูปที่ 5.67 และพิมพ์คำสั่งสำหรับ Threshold เพื่อต้องการกำหนดรหัสสีในรูปแบบ BGR (Blue, Green, Red) โดยกำหนดสีออกเป็น 4 ช่วง ดังตารางที่ 5.6 (อ้างอิงจากตารางที่ 4.28) ที่ใช้ในการตรวจจับสีเส้นนำทางบนถนน (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 18 ถึง บรรทัดที่ 38) ดังรูปที่ 5.68 จากนั้นพิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center โดยกำหนดเงื่อนไขในการวิ่งนำทางอัตโนมัติของทั้ง 7 ช่วง ดังตารางที่ 5.7 เพื่อเป็นคำสั่งในการควบคุมความเร็วและการบังคับเลี้ยวของรถขนส่งอัตโนมัติในการเริ่มต้น Find Contours and Center (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 40 ถึง บรรทัดที่ 52) ดังรูปที่ 5.69 สำหรับการ Find Contours and Center ช่วงที่ 1 ถึง ช่วงที่ 5 (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 54 ถึง บรรทัดที่ 93) ดังรูปที่ 5.70 และการ Find Contours and Center ช่วงที่ 6 ถึง ช่วงที่ 7 (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 94 ถึง บรรทัดที่ 109) ดังรูปที่ 5.71 รวมทั้งการ Find Contours and Center ในกรณีหลุดออกนอกเส้นนำทาง (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 110 ถึง บรรทัดที่ 119) ดังรูปที่ 5.72 หลังจากนั้นพิมพ์คำสั่งหยุดการทำงานสำหรับ Find Contours and Center เพื่อเตรียมความพร้อมในการรอรับคำสั่งเมื่อมีการเข้าเงื่อนไขในรอบถัด ๆ ไป (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 120 ถึง บรรทัดที่ 136) ดังรูปที่ 5.73 และในส่วนสุดท้ายเป็นการสั่งให้กล้องหยุดทำงาน ด้วยการกดอักขระตัว q ที่คีย์บอร์ดทำให้ซอฟต์แวร์ที่ใช้ไลบรารี Open CV รวมทั้งปิดหน้าต่างภาพของกล้องที่แสดงผลที่มีนิพจน์เพื่อสั่งหยุดการทำงานทันที (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 138 ถึง บรรทัดที่ 146) ดังรูปที่ 5.74 จากการพิมพ์คำสั่งทั้งหมดนี้ที่ใช้สำหรับนำทางอัตโนมัติในกรณีวิ่งเดินหน้าให้ทำการบันทึก (Save) นามสกุลของ Python ชื่อไฟล์ Forward Camera ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อของการออกแบบ

```

1 # Import Library
2 import numpy as np
3 import cv2
4
5 # Setting Port LAN
6 video_capture = cv2.VideoCapture('rtsp://admin:G5Lelc2023@192.168.1.13/doc/page/preview.asp')
7 video_capture.set(2, 160)
8 video_capture.set(5, 120)
9

```

รูปที่ 5.66 พิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานไลบรารี Open CV และคำสั่งเรียกใช้งานกล้องในกรณีวิ่งเดินหน้า

ตารางที่ 5.6 กำหนดรหัสสี 4 ช่วง ขอบเขตต่ำสุด (Lower) และสูงสุด (Upper) ในกรณีวิ่งเดินหน้า

ช่วง	ขอบเขต	รหัสสี (BGR)
1	Lower	[22,100,100]
	Upper	[60,255,255]
2	Lower	[10,66,193]
	Upper	[137,255,255]
3	Lower	[5,138,140]
	Upper	[59,255,255]
4	Lower	[22,100,100]
	Upper	[248,255,255]

(หมายเหตุ : ตารางที่ 5.6 มีการสลับตำแหน่งรหัสสีจาก RGB เป็น BGR อ้างอิงข้อมูลรายละเอียดจากตารางที่ 4.28)

```

10 while(True):
11
12     ret, frame = video_capture.read()
13
14     # Crop the Image ROI
15     crop_img = frame[300:480, 0:640]
16     gray = cv2.cvtColor(crop_img, cv2.COLOR_BGR2HSV)
17

```

รูปที่ 5.67 พิมพ์คำสั่งสำหรับ ROI เพื่อกำหนดขอบเขตเป้าหมายของเฟรมกล้อง ในกรณีวิ่งเดินหน้า

```

18     # Color BGR Threshold
19     yellow_lower = np.array([22,100,100])
20     yellow_upper = np.array([60,255,255])
21
22     yellow_lower1 = np.array([10,66,193])
23     yellow_upper1 = np.array([137,255,255])
24
25     yellow_lower2 = np.array([5,138,140])
26     yellow_upper2 = np.array([59,255,255])
27
28     yellow_lower3 = np.array([22,100,100])
29     yellow_upper3 = np.array([248,255,255])
30
31     yellow = cv2.inRange(gray, yellow_lower, yellow_upper)
32     yellow1 = cv2.inRange(gray, yellow_lower1, yellow_upper1)
33     yellow2 = cv2.inRange(gray, yellow_lower2, yellow_upper2)
34     yellow3 = cv2.inRange(gray, yellow_lower3, yellow_upper3)
35
36     out_yellow= np.bitwise_or(yellow, yellow1)
37     out_yellow1= np.bitwise_or(out_yellow, yellow2)
38     out_yellow2= np.bitwise_or(out_yellow1, yellow3)
39

```

รูปที่ 5.68 พิมพ์คำสั่งสำหรับ Threshold เพื่อกำหนดขอบเขตสีเส้นทางในกรณีวิ่งเดินหน้า

```

40 # Find Contours and Center
41 contours,hierarchy = cv2.findContours(out_yellow2, 1 ,cv2.CHAIN_APPROX_NONE)
42 if len(contours) > 0:
43     c = max(contours, key=cv2.contourArea)
44     M = cv2.moments(c)
45
46     if M["m00"] !=0 :
47         cx = int(M['m10']/M['m00'])
48         cy = int(M['m01']/M['m00'])
49         print("CX : "+str(cx)+" CY : "+str(cy))
50         cv2.line(crop_img,(cx,0),(cx,640),(255,0,0),2)
51         cv2.line(crop_img,(0,cy),(480,cy),(255,0,0),2)
52         cv2.drawContours(crop_img, contours, -1, (0,255,0), 2)
53

```

รูปที่ 5.69 พิมพ์คำสั่งสำหรับเริ่มต้น Find Contours and Center ในกรณีวิ่งเดินหน้า

```

54 #Section 1
55 if cx >= 600 and cx < 640:
56     print ("Turn Left 30")
57     cv2.imshow('Reverse',frame)
58     servo = 1
59     print("Servo : "+str(servo))
60     drive = 80
61     print("Drive : "+str(drive))
62 #Section 2
63 if cx >= 440 and cx < 600:
64     print ("Turn Left 20")
65     cv2.imshow('Reverse',frame)
66     servo = 2
67     print("Servo : "+str(servo))
68     drive = 100
69     print("Drive : "+str(drive))
70 #Section 3
71 if cx >= 360 and cx < 440:
72     print ("Turn Left 10")
73     cv2.imshow('Reverse',frame)
74     servo = 3
75     print("Servo : "+str(servo))
76     drive = 120
77     print("Drive : "+str(drive))
78 #Section 4
79 if cx >= 280 and cx < 360:
80     print ("On Track and Center")
81     cv2.imshow('Reverse',frame)
82     servo = 4
83     print("Servo : "+str(servo))
84     drive = 140
85     print("Drive : "+str(drive))
86 #Section 5
87 if cx >= 200 and cx < 280:
88     print ("Turn Right 10")
89     cv2.imshow('Reverse',frame)
90     servo = 5
91     print("Servo : "+str(servo))
92     drive = 120
93     print("Drive : "+str(drive))

```

รูปที่ 5.70 พิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center ช่วงที่ 1 ถึง 5 ในกรณีวิ่งเดินหน้า

```

94     #Section 6
95     if cx >= 40 and cx < 200:
96         print ("Turn Right 20")
97         cv2.imshow('Reverse',frame)
98         servo = 6
99         print("Servo : "+str(servo))
100        drive = 100
101        print("Drive : "+str(drive))
102    #Section 7
103    if cx >= 0 and cx < 40:
104        print ("Turn Right 30")
105        cv2.imshow('Reverse',frame)
106        servo = 7
107        print("Servo : "+str(servo))
108        drive = 80
109        print("Drive : "+str(drive))

```

รูปที่ 5.71 พิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center ช่วงที่ 6 ถึง 7 ในกรณีวิ่งเดินหน้า

```

110    #Section Off Course
111    if cx == 0:
112        print ("I don't see the line to stop")
113        cx = 0
114        cy = 0
115        servo = 4
116        print("Servo : "+str(servo))
117        drive = 0
118        print("Drive : "+str(drive))
119        cv2.imshow('Reverse',frame)

```

รูปที่ 5.72 พิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center หลุดเส้นทางในกรณีวิ่งเดินหน้า

```

120    #Section Stop
121    if M["m00"] == 0 :
122        cx = 0
123        cy = 0
124        servo = 4
125        print("Servo : "+str(servo))
126        drive = 0
127        print("Drive : "+str(drive))
128        cv2.imshow('Reverse',frame)
129    #Section Standby
130    if len(contours) == 0:
131        cx = int(0)
132        cy = int(0)
133        servo = 4
134        print("Servo : "+str(servo))
135        drive = 0
136        print("Drive : "+str(drive))

```

รูปที่ 5.73 พิมพ์คำสั่งสำหรับหยุดการทำงาน Find Contours and Center ในกรณีวิ่งเดินหน้า

```

138    # Stop Camera
139    if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
140        break
141    cv2.imshow('Reverse',frame)
142
143    # Release Everything Finish
144    video_capture.release()
145    video_capture1.release()
146    cv2.destroyAllWindows()

```

รูปที่ 5.74 พิมพ์คำสั่งสำหรับหยุดการทำงานที่ใช้กล้องนำทางอัตโนมัติในกรณีวิ่งเดินหน้า

ตารางที่ 5.7 เงื่อนไขสำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์รูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งเดินหน้า

เงื่อนไข (ลำดับ)	สัญญาณนาฬิกา เอาต์พุตพีแอลซี (Vdc)	ความเร็ว (Drive) (m/s)	Servo Motor (Step)	มุมเลี้ยว (องศา)
1	0.80	0.2	1	Left Angle -30
2	1.00	0.3	2	Left Angle -20
3	1.20	0.5	3	Left Angle -10
4	1.40	0.7	4	Center Angle 0
5	1.20	0.5	5	Right Angle 10
6	1.00	0.3	6	Right Angle 20
7	0.80	0.2	7	Right Angle 30

สำหรับกรณีสอง คือ การพัฒนาซอฟต์แวร์วิ่งถอยหลังรูปแบบ Line Following ของระบบนำทางอัตโนมัติบนโปรแกรม Visual Studio Code ด้วย Python โดยกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์เริ่มต้นด้วยการเรียกใช้ไลบรารี Open CV (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 1 ถึง บรรทัดที่ 3) และใช้คำสั่งในการเรียกใช้งานกล้องรูปแบบ (rtsp://Username:Password@IP Address/doc/page/preview.asp) โดยที่กำหนด Username คือ admin กำหนด Password คือ GSlclc2023 และกำหนด IP Address คือ 192.168.1.14 (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 5 ถึง บรรทัดที่ 8) ดังรูปที่ 5.75 ถัดมาพิมพ์คำสั่งเพื่อทำการ ROI เพื่อกำหนดขอบเขตเป้าหมายของเฟรมกล้อง โดยกำหนดขอบเขต frame[300:480, 0:640] (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 10 ถึง บรรทัดที่ 16) ดังรูปที่ 5.76 และพิมพ์คำสั่งสำหรับ Threshold เพื่อต้องการกำหนดรหัสสีในรูปแบบ BGR (Blue, Green, Red) โดยกำหนดสีออกเป็น 4 ช่วง ดังตารางที่ 5.6 (ใช้กรณีเดียวกันกับวิ่งเดินหน้า) ที่ใช้ในการตรวจจับสีเส้นนำทางบนถนน (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 18 ถึง บรรทัดที่ 38) ดังรูปที่ 5.77 จากนั้นพิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center โดยกำหนดเงื่อนไขในการวิ่งนำทางอัตโนมัติของทั้ง 7 ช่วง ดังตารางที่ 5.8 เพื่อเป็นคำสั่งในการควบคุมความเร็วและการบังคับเลี้ยวของรถขนส่งอัตโนมัติในการเริ่มต้น Find Contours and Center (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 40 ถึง บรรทัดที่ 52) ดังรูปที่ 5.78 สำหรับการ Find Contours and Center ช่วงที่ 1 ถึง ช่วงที่ 3 (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 54 ถึง บรรทัดที่ 77) ดังรูปที่ 5.79 และการ Find Contours and Center ช่วงที่ 4 ถึง ช่วงที่ 7 (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 78 ถึง บรรทัดที่ 109) ดังรูปที่ 5.80 รวมทั้งการ Find Contours and Center ในกรณีหลุดออกนอกเส้นนำทาง (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 110 ถึง บรรทัดที่ 119) ดังรูปที่ 5.81 หลังจากนั้นพิมพ์คำสั่งหยุดการทำงานสำหรับ Find Contours and Center เพื่อเตรียมความพร้อมในการรอรับคำสั่งเมื่อมีการเข้าเงื่อนไขในรอบถัด ๆ ไป (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 120 ถึง บรรทัดที่ 136) ดังรูปที่ 5.82 และในส่วนสุดท้ายเป็นการสั่งให้กล้องหยุดทำงาน ด้วยการกดอักขระตัว q ที่คีย์บอร์ดทำให้ซอฟต์แวร์ที่ใช้ไลบรารี Open CV รวมทั้งปิดหน้าต่างภาพของกล้องที่แสดงผลที่มีนิพจน์เพื่อสั่งหยุดการทำงานทันที (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 138 ถึง บรรทัดที่ 146) ดังรูปที่ 5.83 จากการพิมพ์คำสั่งทั้งหมดนี้ที่ใช้สำหรับนำทางอัตโนมัติในกรณีวิ่งถอยหลังให้ทำการบันทึก (Save) นามสกุลของ Python ชื่อไฟล์ Reverse Camera ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อของการออกแบบ

```

1 # Import Library
2 import numpy as np
3 import cv2
4
5 # Setting Port LAN
6 video_capture = cv2.VideoCapture('rtsp://admin:GSLeIc2023@192.168.1.14/doc/page/preview.asp')
7 video_capture.set(2, 160)
8 video_capture.set(5, 120)

```

รูปที่ 5.75 พิมพ์คำสั่งเรียกใช้งานไลบรารี Open CV และคำสั่งเรียกใช้งานกล้องในกรณีวิ่งถอยหลัง

```

10 while(True):
11
12     ret, frame = video_capture.read()
13
14     # Crop the Image ROI
15     crop_img = frame[300:480, 0:640]
16     gray = cv2.cvtColor(crop_img, cv2.COLOR_BGR2HSV)

```

รูปที่ 5.76 พิมพ์คำสั่งสำหรับ ROI เพื่อกำหนดขอบเขตเป้าหมายของเฟรมกล้อง ในกรณีวิ่งถอยหลัง

```

18 # Color BGR Threshold
19 yellow_lower = np.array([22,100,100])
20 yellow_upper = np.array([60,255,255])
21
22 yellow_lower1 = np.array([10,66,193])
23 yellow_upper1 = np.array([137,255,255])
24
25 yellow_lower2 = np.array([5,138,140])
26 yellow_upper2 = np.array([59,255,255])
27
28 yellow_lower3 = np.array([22,100,100])
29 yellow_upper3 = np.array([248,255,255])
30
31 yellow = cv2.inRange(gray, yellow_lower, yellow_upper)
32 yellow1 = cv2.inRange(gray, yellow_lower1, yellow_upper1)
33 yellow2 = cv2.inRange(gray, yellow_lower2, yellow_upper2)
34 yellow3 = cv2.inRange(gray, yellow_lower3, yellow_upper3)
35
36 out_yellow= np.bitwise_or(yellow, yellow1)
37 out_yellow1= np.bitwise_or(out_yellow, yellow2)
38 out_yellow2= np.bitwise_or(out_yellow1, yellow3)

```

รูปที่ 5.77 พิมพ์คำสั่งสำหรับ Threshold เพื่อกำหนดขอบเขตสีเส้นนำทางในกรณีวิ่งถอยหลัง

ตารางที่ 5.8 เงื่อนไขสำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์รูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งถอยหลัง

เงื่อนไข (ลำดับ)	สัญญาณอนาล็อก เอาท์พุทพีแอลซี (Vdc)	ความเร็ว (Drive) (m/s)	Servo Motor (Step)	มุมเลี้ยว (องศา)
1	0.80	0.2	7	Right Angle 30
2	1.00	0.3	6	Right Angle 20
3	1.20	0.5	5	Right Angle 10

ตารางที่ 5.8 เงื่อนไขสำหรับพัฒนาซอฟต์แวร์รูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งถอยหลัง (ต่อ)

เงื่อนไข (ลำดับ)	สัญญาณอนาล็อก เอาท์พุทพีแอลซี (Vdc)	ความเร็ว (Drive) (m/s)	Servo Motor (Step)	มุมเลี้ยว (องศา)
4	1.40	0.7	4	Center Angle 0
5	1.20	0.5	3	Left Angle -10
6	1.00	0.3	2	Left Angle -20
7	0.80	0.2	1	Left Angle -30

```

40 # Find Contours and Center
41 contours,hierarchy = cv2.findContours(out_yellow2, 1 ,cv2.CHAIN_APPROX_NONE)
42 if len(contours) > 0:
43     c = max(contours, key=cv2.contourArea)
44     M = cv2.moments(c)
45
46     if M["m00"] !=0 :
47         cx = int(M["m10"]/M["m00"])
48         cy = int(M["m01"]/M["m00"])
49         print("CX : "+str(cx)+" CY : "+str(cy))
50         cv2.line(crop_img, (cx,0),(cx,640),(255,0,0),2)
51         cv2.line(crop_img, (0,cy),(480,cy),(255,0,0),2)
52         cv2.drawContours(crop_img, contours, -1, (0,255,0), 2)
53

```

รูปที่ 5.78 พิมพ์คำสั่งสำหรับเริ่มต้น Find Contours and Center ในกรณีวิ่งถอยหลัง

```

54 #Section 1
55 if cx >= 600 and cx < 640:
56     print ("Turn Right 30")
57     cv2.imshow('Reverse',frame)
58     servo = 7
59     print("Servo : "+str(servo))
60     drive = 80
61     print("Drive : "+str(drive))
62 #Section 2
63 if cx >= 440 and cx < 600:
64     print ("Turn Right 20")
65     cv2.imshow('Reverse',frame)
66     servo = 6
67     print("Servo : "+str(servo))
68     drive = 100
69     print("Drive : "+str(drive))
70 #Section 3
71 if cx >= 360 and cx < 440:
72     print ("Turn Right 10")
73     cv2.imshow('Reverse',frame)
74     servo = 5
75     print("Servo : "+str(servo))
76     drive = 120
77     print("Drive : "+str(drive))

```

รูปที่ 5.79 พิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center ช่วงที่ 1 ถึง 3 ในกรณีวิ่งถอยหลัง

```

78 #Section 4
79 if cx >= 280 and cx < 360:
80     print ("On Track and Center")
81     cv2.imshow('Reverse',frame)
82     servo = 4
83     print("Servo : "+str(servo))
84     drive = 140
85     print("Drive : "+str(drive))
86 #Section 5
87 if cx >= 200 and cx < 280:
88     print ("Turn Left 10")
89     cv2.imshow('Reverse',frame)
90     servo = 3
91     print("Servo : "+str(servo))
92     drive = 120
93     print("Drive : "+str(drive))
94 #Section 6
95 if cx >= 40 and cx < 200:
96     print ("Turn Left 20")
97     cv2.imshow('Reverse',frame)
98     servo = 2
99     print("Servo : "+str(servo))
100    drive = 100
101    print("Drive : "+str(drive))
102 #Section 7
103 if cx >= 0 and cx < 40:
104     print ("Turn Left 30")
105     cv2.imshow('Reverse',frame)
106     servo = 1
107     print("Servo : "+str(servo))
108     drive = 80
109     print("Drive : "+str(drive))

```

รูปที่ 5.80 พิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center ช่วงที่ 4 ถึง 7 ในกรณีวิ่งถอยหลัง

```

110 #Section Off Course
111 if cx == 0:
112     print ("I don't see the line to stop")
113     cx = 0
114     cy = 0
115     servo = 4
116     print("Servo : "+str(servo))
117     drive = 0
118     print("Drive : "+str(drive))
119     cv2.imshow('Reverse',frame)

```

รูปที่ 5.81 พิมพ์คำสั่งสำหรับ Find Contours and Center หลุดเส้นนำทางในกรณีวิ่งถอยหลัง

```

120 #Section Stop
121 if M["m00"] == 0 :
122     cx = 0
123     cy = 0
124     servo = 4
125     print("Servo : "+str(servo))
126     drive = 0
127     print("Drive : "+str(drive))
128     cv2.imshow('Reverse',frame)
129 #Section Standby
130 if len(contours) == 0:
131     cx = int(0)
132     cy = int(0)
133     servo = 4
134     print("Servo : "+str(servo))
135     drive = 0
136     print("Drive : "+str(drive))

```

รูปที่ 5.82 พิมพ์คำสั่งสำหรับหยุดการทำงาน Find Contours and Center ในกรณีวิ่งถอยหลัง

```

138     # Stop Camera
139     if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
140         break
141     cv2.imshow('Reverse', frame)
142
143 # Release Everything Finish
144 video_capture.release()
145 video_capture1.release()
146 cv2.destroyAllWindows()

```

รูปที่ 5.83 พิมพ์คำสั่งสำหรับหยุดการทำงานที่ใช้กล้องนำทางอัตโนมัติในกรณีวิ่งถอยหลัง

นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาซอฟต์แวร์ของระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางที่ใช้ไลดาร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับให้ตรงตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวถึงการออกแบบไว้ก่อนหน้านี้ (อ้างอิงหัวข้อที่ 4.9.5 รูปที่ 4.48) หลังจากนั้นพัฒนาในส่วนซอฟต์แวร์ของระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางแบ่งออกเป็น 2 กรณี โดยกรณีแรก คือ ซอฟต์แวร์ตรวจจับสิ่งกีดขวางในกรณีวิ่งไปด้านหน้า เริ่มต้นด้วยการพิมพ์คำสั่งการเรียกใช้ไลบรารี RP Lidar (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 1 ถึง บรรทัดที่ 3) และใช้คำสั่งในการเรียกใช้งานไลดาร์รูปแบบ Port COM โดยที่ กำหนด COM3 เพื่อเชื่อมต่อการสื่อสารรับส่งข้อมูลระหว่างมินิพีซีกับไลดาร์ (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 5 ถึง บรรทัดที่ 6) จากนั้นพิมพ์คำสั่งที่ใช้เรียกพารามิเตอร์ของมุมและระยะที่สแกน (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 8 ถึง บรรทัดที่ 12) ต่อด้วยพิมพ์คำสั่ง เพื่อสร้างเงื่อนไขในการตรวจจับของไลดาร์กำหนดระยะที่สแกนไว้ (พารามิเตอร์ s) ที่ระยะ 3 m (ในซอฟต์แวร์ใช้ตัวเลข s = 3000 mm) และมุมที่ต้องการสแกน (พารามิเตอร์ p) มี 2 ช่วง คือ 0 ถึง 20 องศา และ 340 ถึง 360 องศา ซึ่งหมายความว่า ถ้ามีวัตถุอยู่ในช่วง มุมสแกนของไลดาร์ที่กำหนด 2 ช่วงนี้ และอยู่ในระยะ 3 m ซอฟต์แวร์สั่งให้พารามิเตอร์ Drive = 0 (สั่งให้ รถหยุดทำงาน) ถ้ามีวัตถุอยู่ในช่วงมุมสแกนของไลดาร์ที่กำหนด 2 ช่วงนี้ และไม่อยู่ในระยะ 3 m ซอฟต์แวร์ สั่งให้พารามิเตอร์ Drive = 1 (สั่งให้รถทำงาน) (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 14 ถึง บรรทัดที่ 22) ดังรูปที่ 5.84 จากการพิมพ์คำสั่งทั้งหมดนี้ ที่ใช้สำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางในกรณีวิ่งเดินหน้าให้ทำการบันทึก (Save) นามสกุลของ Python ชื่อไฟล์ Detect Obstacles Forward ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อของการออกแบบ

ในกรณีที่สอง คือ การพัฒนาซอฟต์แวร์ตรวจจับสิ่งกีดขวางในกรณีวิ่งไปถอยหลัง ซึ่ง ในกรณีนี้มีคำสั่งการเรียกใช้ไลบรารี RP Lidar และการเชื่อมต่อสื่อสารข้อมูลระหว่างมินิพีซีกับไลดาร์ รวมทั้งการเรียกใช้พารามิเตอร์ของมุมและระยะที่สแกนเหมือนกับกรณีวิ่งไปด้านหน้า เนื่องจาก ใช้งานไลดาร์ตัวเดียวกันในการตรวจจับสิ่งกีดขวาง ต่างกันแค่เงื่อนไข ในการตรวจจับของไลดาร์ กำหนดระยะที่สแกนไว้ (พารามิเตอร์ s) ที่ระยะ 6 m (ในซอฟต์แวร์ใช้ตัวเลข s = 6000 mm) และ มุมที่ต้องการสแกน (พารามิเตอร์ p) มี 2 ช่วง คือ 160 ถึง 180 องศา และ 180 ถึง 200 องศา ซึ่ง หมายความว่า ถ้ามีวัตถุอยู่ในช่วงมุมสแกนของไลดาร์ที่กำหนด 2 ช่วงนี้ และอยู่ในระยะ 6 m ซอฟต์แวร์สั่งให้พารามิเตอร์ Drive = 0 (สั่งให้รถหยุดทำงาน) ถ้ามีวัตถุอยู่ในช่วงมุมสแกนของไลดาร์ที่ กำหนด 2 ช่วงนี้ และไม่อยู่ในระยะ 6 m ซอฟต์แวร์สั่งให้พารามิเตอร์ Drive = 1 (สั่งให้รถทำงาน) (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 14 ถึง บรรทัดที่ 22) ดังรูปที่ 5.85 จากการพิมพ์คำสั่งทั้งหมดนี้ที่ใช้สำหรับ ตรวจจับสิ่งกีดขวางในกรณีวิ่งเดินหน้าให้ทำการบันทึก (Save) นามสกุลของ Python ชื่อไฟล์ Detect Obstacles Reverse ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อของการออกแบบ

```

1 # Import Library
2 from rplidar import RPLidar
3 import serial
4
5 #Setting Port COM USB
6 lidar = RPLidar('COM3')
7
8 for scan in lidar.iter_scans():
9     for angle in scan:
10        p = angle[1]
11        r = angle[2]
12        s = 3000
13
14        if (p > 0 and p < 20) or (p > 340 and p < 360):
15            if (r < s):
16                print("Drive")
17                Drive = 0
18                ser.write(servo.encode())
19            if (r > s):
20                print("Stop")
21                Drive = 1
22                ser.write(servo.encode())

```

รูปที่ 5.84 พิมพ์คำสั่งสำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางด้วยไลดาร์ ในกรณีวิ่งเดินหน้า

```

1 # Import Library
2 from rplidar import RPLidar
3 import serial
4
5 #Setting Port COM USB
6 lidar = RPLidar("COM3")
7
8 for scan in lidar.iter_scans():
9     for angle in scan:
10        p = angle[1]
11        r = angle[2]
12        s = 6000
13
14        if (p > 160 and p < 180) or (p > 180 and p < 200):
15            if (r < s):
16                print("Drive")
17                Drive = 0
18                ser.write(servo.encode())
19            if (r > s):
20                print("Stop")
21                Drive = 1
22                ser.write(servo.encode())

```

รูปที่ 5.85 พิมพ์คำสั่งสำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางด้วยไลดาร์ ในกรณีวิ่งถอยหลัง

เมื่อพัฒนาซอฟต์แวร์ของระบบนำทางและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางเสร็จสิ้น ให้ทำการเชื่อมต่อสายแลนของพีแอลซีและจอทัสกรีนไปยังสวิทช์ฮับ เพื่อใช้ในการควบคุมระบบขับเคลื่อนและระบบบังคับเลี้ยวของรถขนส่งอัตโนมัติด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP ผ่านการเชื่อมต่อสายแลน จึงทำให้มีระบบควบคุมหลักสำหรับควบคุมการทำงานของรถขนส่งอัตโนมัติจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมด ดังรูปที่ 5.86 จากนั้นพัฒนาในส่วนของซอฟต์แวร์เพิ่มเติมเพื่อให้สามารถมีการเชื่อมต่อสื่อสารรับส่งข้อมูลพารามิเตอร์ระหว่างซอฟต์แวร์ Python บนโปรแกรม Visual Studio Code ของ

ระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางไปยังจอทัสกรีน โดยใช้รูปแบบการเชื่อมต่อสื่อสารรับส่งข้อมูลด้วยโปรโตคอล Modbus TCP/IP เริ่มต้นในส่วนจากระบบนำทางอัตโนมัติซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี สำหรับกรณีแรก คือ กรณีวิ่งเดินหน้าด้วยการพิมพ์คำสั่งการเรียกใช้งานไลบรารีของ Modbus TCP/IP ซึ่งทำการแทรกคำสั่งเพิ่มเติมเข้าไปในไฟล์ Forward Camera ที่บันทึกไฟล์ไว้ก่อนหน้านี้ (แทรกคำสั่งบรรทัดที่ 5 ถึง บรรทัดที่ 8) ซึ่งบรรทัดที่ 8 เป็นการกำหนด IP Address ของจอทัสกรีน คือ 192.168.1.10 จึงทำให้คำสั่งในการเรียกใช้งานกล้อง (เลื่อนคำสั่งไปเริ่มต้นที่บรรทัดที่ 10) ดังรูปที่ 5.87 ถัดมาทำการแทรกคำสั่งการส่งค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบ Integer (ตัวเลขจำนวนเต็ม) เพื่อส่งค่าพารามิเตอร์ drive และ servo ในซอฟต์แวร์ระบบนำทางอัตโนมัติที่พัฒนาไว้ก่อนหน้านี้ ไปยังจอทัสกรีน โดยกำหนด Register Address ที่ใช้กับระบบขับเคลื่อน เท่ากับ %MW77 และกำหนด Register Address ที่ใช้กับระบบบังคับเลี้ยว เท่ากับ %MW78 (แทรกคำสั่งบรรทัดที่ 143 ถึง บรรทัดที่ 152 โดยคำสั่งก่อนหน้านี้เลื่อนมาจบที่บรรทัดที่ 141 และทำให้คำสั่งหยุดการทำงานของกล้องเลื่อนคำสั่งไปเริ่มต้นที่บรรทัดที่ 155 ถึง บรรทัดที่ 163) ดังรูปที่ 5.88



รูปที่ 5.86 การเชื่อมต่อระบบความหลักสำหรับควบคุมการทำงานของรถขนส่งอัตโนมัติ

สำหรับกรณีที่สอง คือ กรณีวิ่งถอยหลังด้วยการพิมพ์คำสั่งการเรียกใช้งานไลบรารีของ Modbus TCP/IP ซึ่งทำการแทรกคำสั่งเพิ่มเติมเข้าไปในไฟล์ Reverse Camera ที่บันทึกไฟล์ไว้ก่อนหน้านี้ (แทรกคำสั่งบรรทัดที่ 5 ถึง บรรทัดที่ 8) ซึ่งบรรทัดที่ 8 เป็นการกำหนด IP Address ของจอทัสกรีน คือ 192.168.1.10 จึงทำให้คำสั่งในการเรียกใช้งานกล้อง คำสั่งต่างจากกรณีวิ่งเดินหน้า คือ IP Address ของกล้องวิ่งถอยหลัง คือ 192.168.1.14 (เลื่อนคำสั่งไปเริ่มต้นที่บรรทัดที่ 10) ดังรูปที่ 5.89 ถัดมาทำการแทรก

คำสั่งการส่งค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบ Integer (ตัวเลขจำนวนเต็ม) เพื่อส่งค่าพารามิเตอร์ drive และ servo ในซอฟต์แวร์ระบบนำทางอัตโนมัติที่พัฒนาไว้ก่อนหน้านี้ไปยังจอทัสกรีน โดยกำหนด Register Address ที่ใช้กับระบบขับเคลื่อน เท่ากับ %MW77 และกำหนด Register Address ที่ใช้กับระบบบังคับเลี้ยว เท่ากับ %MW78 (แทรกคำสั่งบรรทัดที่ 143 ถึง บรรทัดที่ 152 โดยคำสั่งก่อนหน้านี้เลื่อนมาจบที่บรรทัดที่ 141 และทำให้คำสั่งหยุดการทำงานของกล้องเลื่อนคำสั่งไปเริ่มต้นที่บรรทัดที่ 155 ถึง บรรทัดที่ 163) ซึ่งคำสั่งเหมือนกับในกรณีวิ่งเดินหน้า (อ้างอิงรูปที่ 5.88)

```

1  # Import Library
2  import numpy as np
3  import cv2
4
5  from pymodbus.client.sync import ModbusTcpClient as ModbusClient
6  from pymodbus.payload import BinaryPayloadBuilder, Endian, BinaryPayloadDecoder
7
8  TRIPLC = ModbusClient(host='192.168.1.10', port=502)
9
10 # Setting Port LAN
11 video_capture = cv2.VideoCapture('rtsp://admin:GSLeIc2023@192.168.1.13/doc/page/preview.asp')
12 video_capture.set(2, 160)
13 video_capture.set(5, 120)
14

```

รูปที่ 5.87 การแทรกคำสั่งสำหรับเชื่อมต่อโปรโตคอล Modbus TCP/IP ในกรณีวิ่งเดินหน้า

```

134 #Section Standby
135 if len(contours) == 0:
136     cx = int(0)
137     cy = int(0)
138     servo = 4
139     print("Servo : "+str(servo))
140     drive = 0
141     print("Drive : "+str(drive))
142
143 -----Connect HMI Touch Screen -----
144 builder = BinaryPayloadBuilder(byteorder=Endian.Big, wordorder=Endian.Big)
145 builder.reset()
146
147 builder.add_16bit_int(int(drive*1))
148 builder.add_16bit_int(int(servo*1))
149 payload = builder.to_registers()
150 PLC_write_a = TRIPLC.write_register(77, payload[0])
151 PLC_write_b = TRIPLC.write_register(78, payload[1])
152 print(payload)
153 -----
154
155 # Stop Camera
156 if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
157     break
158 cv2.imshow('Reverse', frame)
159
160 # Release Everything Finish
161 video_capture.release()
162 video_capture1.release()
163 cv2.destroyAllWindows()
164

```

รูปที่ 5.88 การแทรกคำสั่งส่งค่าพารามิเตอร์ drive และ servo ไปยังจอทัสกรีนในกรณีวิ่งเดินหน้า

```

1 # Import Library
2 import numpy as np
3 import cv2
4
5 from pymodbus.client.sync import ModbusTcpClient as ModbusClient
6 from pymodbus.payload import BinaryPayloadBuilder, Endian, BinaryPayloadDecoder
7
8 TRIPLC = ModbusClient(host='192.168.1.10', port=502)
9
10 # Setting Port LAN
11 video_capture = cv2.VideoCapture('rtsp://admin:GSLeIc2023@192.168.1.14/doc/page/preview.asp')
12 video_capture.set(2, 160)
13 video_capture.set(5, 120)
14

```

รูปที่ 5.89 การแทรกคำสั่งสำหรับเชื่อมต่อโปรโตคอล Modbus TCP/IP ในกรณีวิ่งถอยหลัง

```

1 # Import Library
2 from rplidar import RPLidar
3 import serial
4
5 from pymodbus.client.sync import ModbusTcpClient as ModbusClient
6 from pymodbus.payload import BinaryPayloadBuilder, Endian, BinaryPayloadDecoder
7
8 TRIPLC = ModbusClient(host='192.168.1.10', port=502)
9
10 #Setting Port COM USB
11 lidar = RPLidar('COM3')
12
13 for scan in lidar.iter_scans():
14     for angle in scan:
15         p = angle[1]
16         r = angle[2]
17         s = 6000
18
19         if (p > 0 and p < 20) or (p > 340 and p < 360):
20             if (r < s):
21                 print("Drive")
22                 Drive = 0
23                 ser.write(servo.encode())
24             if (r > s):
25                 print("Stop")
26                 Drive = 1
27                 ser.write(servo.encode())
28
29 #-----PLC -----
30 builder = BinaryPayloadBuilder(byteorder=Endian.Big, wordorder=Endian.Big)
31 builder.reset()
32
33 builder.add_16bit_int(int(Drive*1))
34 payload = builder.to_registers()
35 PLC_write_a = TRIPLC.write_register(79, payload[0])
36 #-----PLC -----
37

```

รูปที่ 5.90 การแทรกคำสั่งส่งค่าพารามิเตอร์ Drive ไปยังจอตัสกรีนในกรณีวิ่งเดินหน้า

หลังจากนั้นในส่วนของการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง เพื่อให้มีการส่งค่าพารามิเตอร์ Drive ของซอฟต์แวร์ในชื่อไฟล์ Detect Obstacles Forward เริ่มต้นในส่วนของการตรวจจับสิ่งกีดขวาง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี สำหรับกรณีแรก คือ กรณีวิ่งเดินหน้าด้วยการพิมพ์คำสั่งการเรียกใช้งานไลบรารีของ Modbus TCP/IP ซึ่งทำการแทรกคำสั่งเพิ่มเติมเข้าไปใน Detect Obstacles Forward ที่บันทึกไฟล์ไว้ก่อนหน้านี้ (แทรกคำสั่งบรรทัดที่ 5 ถึง บรรทัดที่ 8) ซึ่งบรรทัดที่ 8 เป็นการกำหนด IP Address ของจอตัสกรีน คือ 192.168.1.10 จึงทำให้คำสั่งในการเรียกใช้งานการตั้งค่าเชื่อมต่อ Port COM3 (เลื่อนคำสั่งไปเริ่มต้นที่บรรทัดที่ 10 ถึง บรรทัดที่ 27) ถัดมาทำการแทรกคำสั่งการส่งค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบ Integer (ตัวเลขจำนวนเต็ม) เพื่อส่งค่าพารามิเตอร์ Drive ในซอฟต์แวร์ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางที่พัฒนาไว้ก่อนหน้านี้ไปยังจอตัสกรีน โดยกำหนด Register Address ที่ใช้กับระบบขับเคลื่อน เท่ากับ %MW79 (แทรกคำสั่งเพิ่มในบรรทัดที่ 29 ถึง บรรทัดที่ 36) ดังรูปที่ 5.90 และในกรณีที่สอง คือ กรณีวิ่งถอยหลังรูปแบบลำดับขั้นตอนของการแทรกคำสั่งเหมือนกับกับกรณีวิ่งเดินหน้า ต่างกันแค่เงื่อนไขที่ใช้กำหนดมุมสแกนและระยะทางที่ตรวจจับได้ของไลดาร์ โดยมีการพิมพ์คำสั่งแทรกเข้าไปเพิ่มเติมในส่วนของการเชื่อมต่อสื่อสารข้อมูลรูปแบบโปรโตคอล Modbus TCP/IP ในชื่อไฟล์ Detect Obstacles Reverse ดังรูปที่ 5.91

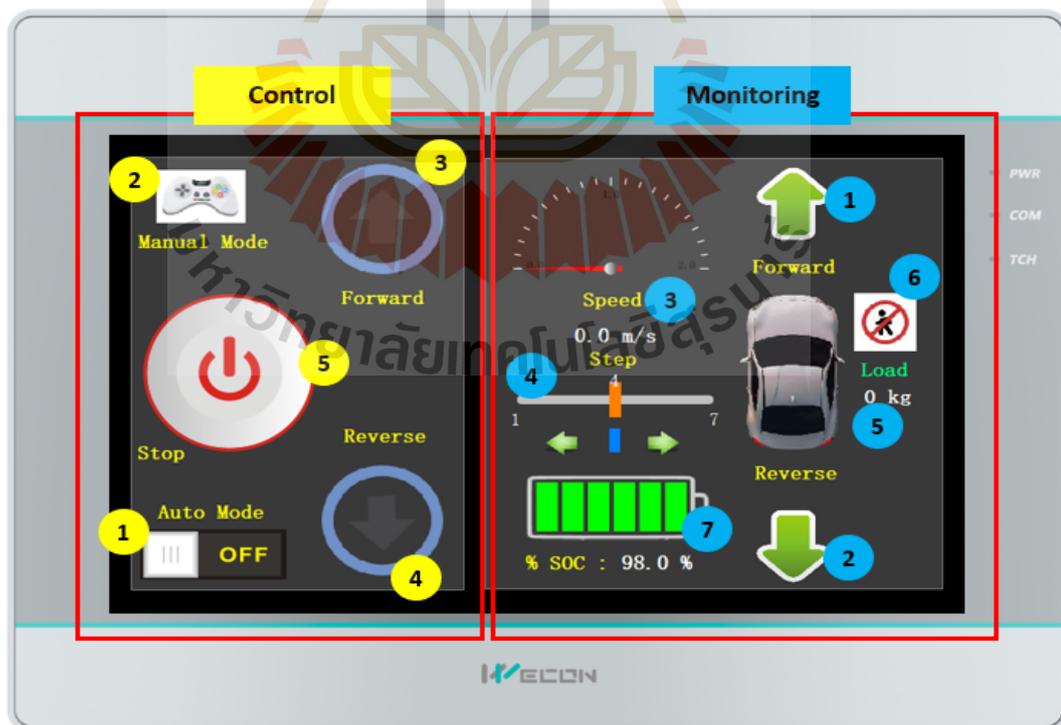
```

1 # Import Library
2 from rplidar import RPLidar
3 import serial
4
5 from pymodbus.client.sync import ModbusTcpClient as ModbusClient
6 from pymodbus.payload import BinaryPayloadBuilder, Endian, BinaryPayloadDecoder
7
8 TRIPLC = ModbusClient(host='192.168.1.10', port=502)
9
10 #Setting Port COM USB
11 lidar = RPLidar('COM3')
12
13 for scan in lidar.iter_scans():
14     for angle in scan:
15         p = angle[1]
16         r = angle[2]
17         s = 6000
18
19         if (p > 160 and p < 180) or (p > 180 and p < 200):
20             if (r < s):
21                 print("Drive")
22                 Drive = 0
23                 ser.write(servo.encode())
24             if (r > s):
25                 print("Stop")
26                 Drive = 1
27                 ser.write(servo.encode())
28
29 #-----PLC -----
30 builder = BinaryPayloadBuilder(byteorder=Endian.Big, wordorder=Endian.Big)
31 builder.reset()
32
33 builder.add_16bit_int(int(Drive*1))
34 payload = builder.to_registers()
35 PLC_write_a = TRIPLC.write_register(79, payload[0])
36 #-----PLC -----

```

รูปที่ 5.91 การแทรกคำสั่งส่งค่าพารามิเตอร์ Drive ไปยังจอตัสกรีนในกรณีวิ่งถอยหลัง

ในส่วนถัดมาสำหรับการควบคุมระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางของรถขนส่งอัตโนมัติ ถูกออกแบบโดยใช้การควบคุมด้วยการกดปุ่มสัมผัสที่หน้าจอที่สกรีนที่ได้กล่าวเกี่ยวกับการออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 4.9.5 รูปที่ 4.44 ซึ่งเป็น Dashboard ควบคุมในโหมด Auto หมายถึงการนำทางแบบอัตโนมัติเมื่อมีการกดปุ่มสัมผัสที่หน้า Dashboard นี้ โดยมีการขยายความเพิ่มเติมในการออกแบบ เพื่อนำไปพัฒนาในการควบคุมระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง มีรายละเอียด 2 ส่วน คือ ส่วนควบคุม (Control) และส่วนแสดงผล (Monitoring) ทั้งนี้ในส่วนควบคุมมีการระบุหมายเลข (สีเหลือง) จำนวน 5 หมายเลข ซึ่งมีความหมายของแต่ละหมายเลข โดยหมายเลข 1 คือ สวิตช์โหมด (เลือกโหมดการทำงานแบบอัตโนมัติ) หมายเลข 2 คือ Manual Mode (ไปสู่ Dashboard หน้า Manual อ้างอิงรูปที่ 5.60) หมายเลข 3 คือ การวิ่งนำทางอัตโนมัติและตรวจจับสิ่งกีดขวาง ในกรณีวิ่งเดินหน้า (Forward) หมายเลข 4 คือ การวิ่งนำทางอัตโนมัติและตรวจจับสิ่งกีดขวาง ในกรณีวิ่งถอยหลัง (Reverse) และหมายเลข 5 คือ หยุดการทำงานของการทำงานนำทางอัตโนมัติและตรวจจับสิ่งกีดขวางของทั้งในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง (Stop) อีกทั้งในส่วนแสดงผลมีการระบุหมายเลข (สีฟ้า) จำนวน 7 หมายเลข โดยหมายเลข 1 คือ แสดงสถานะกรณีวิ่งเดินหน้า (Forward) หมายเลข 2 คือ แสดงสถานะกรณีวิ่งถอยหลัง (Reverse) หมายเลข 3 คือ แสดงความเร็วที่รถวิ่ง (Speed) หมายเลข 4 คือ แสดงมุมของการเลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา และคืนล้อให้อยู่ตรงกลาง (Step 1 ถึง Step 7) หมายเลข 5 คือน้ำหนักแบริ่งสำหรับบรรทุก (Load) หมายเลข 6 คือ แสดงการตรวจจับสิ่งกีดขวาง (ถ้ารูปแสดงขึ้นมาหมายความว่ามีการตรวจพบสิ่งกีดขวาง) และหมายเลข 7 คือ แสดง %SOC ของแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 5.92



รูปที่ 5.92 Dashboard ควบคุมในโหมด Auto ของรถขนส่งอัตโนมัติ

เมื่อพัฒนาในส่วนของ Dashboard ควบคุมในโหมด Auto ของรถขนส่งอัตโนมัติเสร็จสิ้น จากนั้นพัฒนาซอฟต์แวร์ในโปรแกรม PIStudio บนหน้าต่าง Script เพื่อกำหนด Register Address เพื่อใช้ควบคุมระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง โดยมีการแทรกคำสั่งหรือเพิ่มเติมคำสั่งในการกำหนด Register Address จากที่ได้พัฒนาซอฟต์แวร์บนหน้าต่าง Script ในหัวข้อที่ผ่านมา คือ หัวข้อในส่วนของการระบบขับเคลื่อนและระบบบังคับเลี้ยว ซึ่งแบ่งในส่วนของการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบควบคุมและแสดงผลบนหน้าต่าง Script ออกเป็น 2 โหมด ได้แก่ โหมด Manual Script ซึ่ง Register Address ที่กำหนดบนหน้าต่าง Script สามารถใช้สื่อสารควบคุมไปยัง Dashboard หน้า Manual Mode และพีแอลซีด้วยรูปแบบโปรโตคอล Modbus TCP/IP (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 0 ถึง บรรทัดที่ 51) ดังรูปที่ 5.93 และโหมด Auto ซึ่ง Register Address ที่กำหนดบนหน้าต่าง Script สามารถใช้สื่อสารควบคุมจาก Dashboard หน้า Auto Mode ไปยังซอฟต์แวร์ Python ที่พัฒนาของระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง รวมทั้งพีแอลซีด้วยรูปแบบโปรโตคอล Modbus TCP/IP (พิมพ์คำสั่งบรรทัดที่ 53 ถึง บรรทัดที่ 105) ดังรูปที่ 5.94

```

000 '-----Manual mode-----
001 '-----Check-----
002 if @B_HDX399.0 = 0 then
003 '-----HMI to PLC for Drive-----
004 @W_4268 = @W_HDV68
005 @B_1291 = @B_HDX291.0
006 @B_1292 = @B_HDX292.0
007 @B_1293 = @B_HDX293.0
008 '-----HMI to PLC for Servo-----
009 if @W_HDV11 = 0 then
010 @W_4111 = 4
011 endif
012 if @W_HDV11 = 1 then
013 @W_4111 = 1
014 endif
015 if @W_HDV11 = 2 then
016 @W_4111 = 2
017 endif
018 if @W_HDV11 = 3 then
019 @W_4111 = 3
020 endif
021 if @W_HDV11 = 4 then
022 @W_4111 = 4
023 endif
024 if @W_HDV11 = 5 then
025 @W_4111 = 5
026 endif
027 if @W_HDV11 = 6 then
028 @W_4111 = 6
029 endif
030 if @W_HDV11 = 7 then
031 @W_4111 = 7
032 endif
033 '-----Dashboard Manual Mode-----
034 if @B_HDX31.0 = 1 then
035 @W_HDV11 = 1
036 @B_HDX32.0 = 0
037 @B_HDX33.0 = 0
038 endif
039 if @B_HDX32.0 = 1 then
040 @W_HDV11 = 7
041 @B_HDX31.0 = 0
042 @B_HDX33.0 = 0
043 endif
044 if @B_HDX33.0 = 1 then
045 @W_HDV11 = 4
046 @B_HDX31.0 = 0
047 @B_HDX32.0 = 0
048 endif
049 '-----
050 endif
051 '-----Manual mode-----
052

```

รูปที่ 5.93 การแทรกคำสั่ง Script ควบคุมการทำงานในโหมด Manual ในโปรแกรม PIStudio

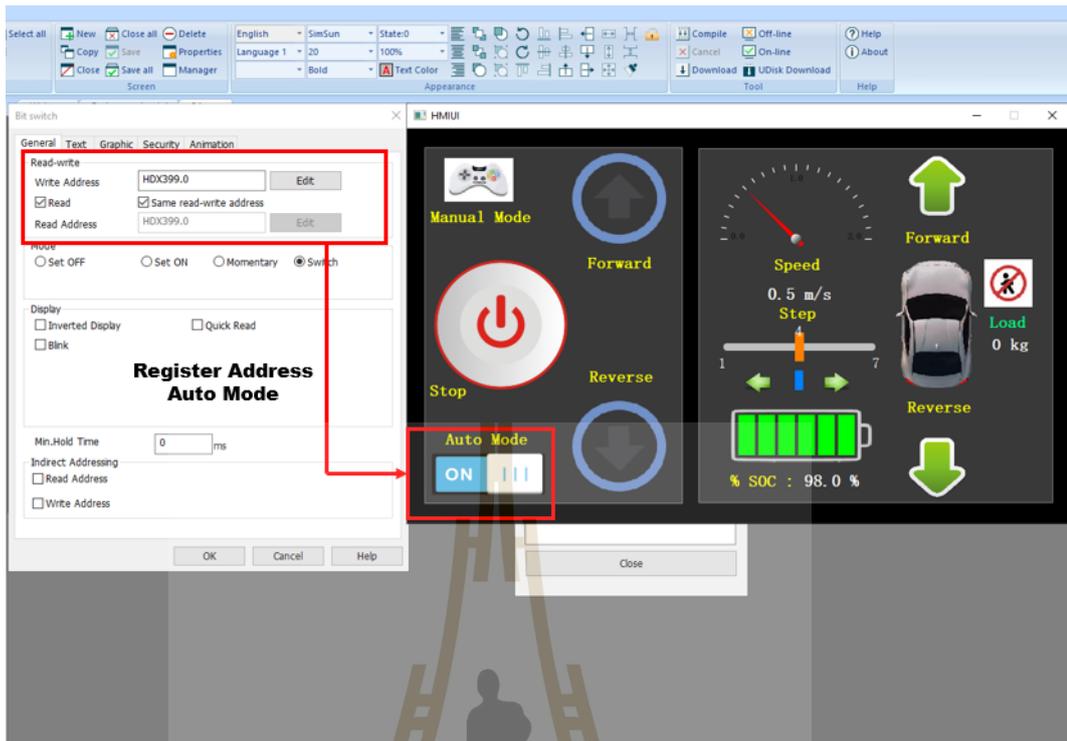
```

153 -----Auto mode-----
154 -----Check-----
155 if GB_HDX399.0 = 1 then
156 -----PLC to Python-----
157 GW_4268 = GW_477
158 GW_4111 = GW_478
159 -----Lidar Detect-----
160 if GW_479 = 0 then
161   GB_HDX293.0 = 1
162   GB_HDX355.0 = 1
163 endif
164 -----HMi to PLC-----
165 if GW_HDW44 = 1 then
166   GB_HDX291.0 = 1
167   GB_HDX292.0 = 0
168   GB_HDX293.0 = 0
169 endif
170 if GW_HDW44 = 2 then
171   GB_HDX291.0 = 0
172   GB_HDX292.0 = 1
173   GB_HDX293.0 = 0
174 endif
175 if GW_HDW44 = 3 then
176   GB_HDX291.0 = 0
177   GB_HDX292.0 = 0
178   GB_HDX293.0 = 1
179 endif
180 -----Dashboard Auto Mode-----
181 if GB_HDX381.0 = 1 then
182   GW_HDW44 = 1
183   GB_HDX382.0 = 0
184   GB_HDX383.0 = 0
185   GW_488 = 0
186   GW_4376 = 1
187 endif
188 if GB_HDX382.0 = 1 then
189   GW_HDW44 = 2
190   GB_HDX381.0 = 0
191   GB_HDX383.0 = 0
192   GW_488 = 0
193   GW_4377 = 1
194 endif
195 if GB_HDX383.0 = 1 then
196   GW_HDW44 = 3
197   GB_HDX381.0 = 0
198   GB_HDX382.0 = 0
199   GW_488 = 1
200   GW_4376 = 0
201   GW_4377 = 0
202 endif
203 -----
204 endif
205 -----Auto mode-----
206

```

รูปที่ 5.94 การแทรกคำสั่ง Script ควบคุมการทำงานในโหมด Auto ในโปรแกรม PIStudio

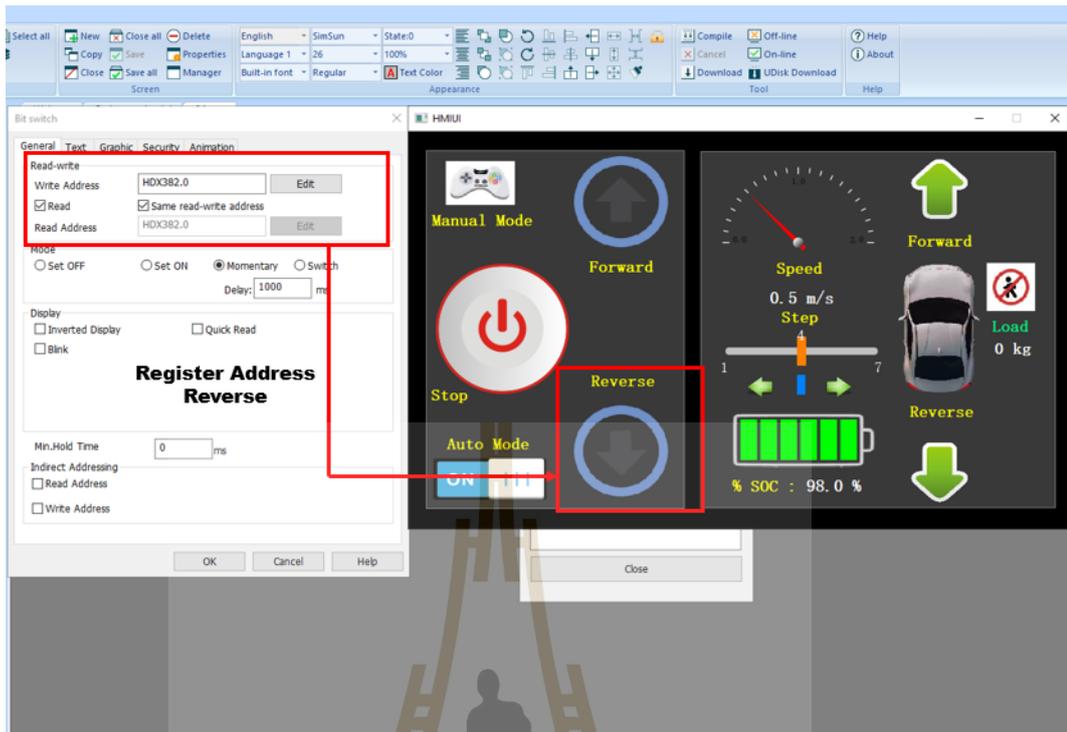
สำหรับการกำหนด Register Address เพื่อให้สามารถสื่อสารข้อมูลพารามิเตอร์ไปยังหน้าต่าง Script ในโปรแกรม PIStudio ทั้งในส่วนควบคุมและแสดงผล ซึ่งได้แสดงรูปแบบในการกำหนด Register Address เฉพาะส่วนที่จำเป็น เพื่อพัฒนาสำหรับใช้งานของระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ได้แก่ สวิตช์โหมดที่ใช้สำหรับเลือกโหมดการทำงานแบบอัตโนมัติ (Auto Mode) ดังรูปที่ 5.95 การวิ่งนำทางอัตโนมัติและตรวจจับสิ่งกีดขวางในกรณีวิ่งเดินหน้า (Forward) ดังรูปที่ 5.96 การวิ่งนำทางอัตโนมัติและตรวจจับสิ่งกีดขวางในกรณีวิ่งถอยหลัง (Reverse) ดังรูปที่ 5.97 หยุดการนำทางอัตโนมัติและตรวจจับสิ่งกีดขวาง ในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง (Stop) ดังรูปที่ 5.98 ตัวเลขแสดงผลความเร็วในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง (Speed) ดังรูปที่ 5.99 เข็มไมล์แสดงผลความเร็วในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง (Mileage Speed) ดังรูปที่ 5.100 แสดงมุมมองลิฟต์บังคับลิฟต์ในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง (Step 1 ถึง 7) ดังรูปที่ 5.101 แสดงสถานะตรวจจับสิ่งกีดขวางในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง (Lidar Detect) ดังรูปที่ 5.102 แสดงน้ำหนักแ่งมันสำปะหลังที่บรรทุกในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง (Load : kg) ดังรูปที่ 5.103 และแสดงสถานะ % SOC ของแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 5.104



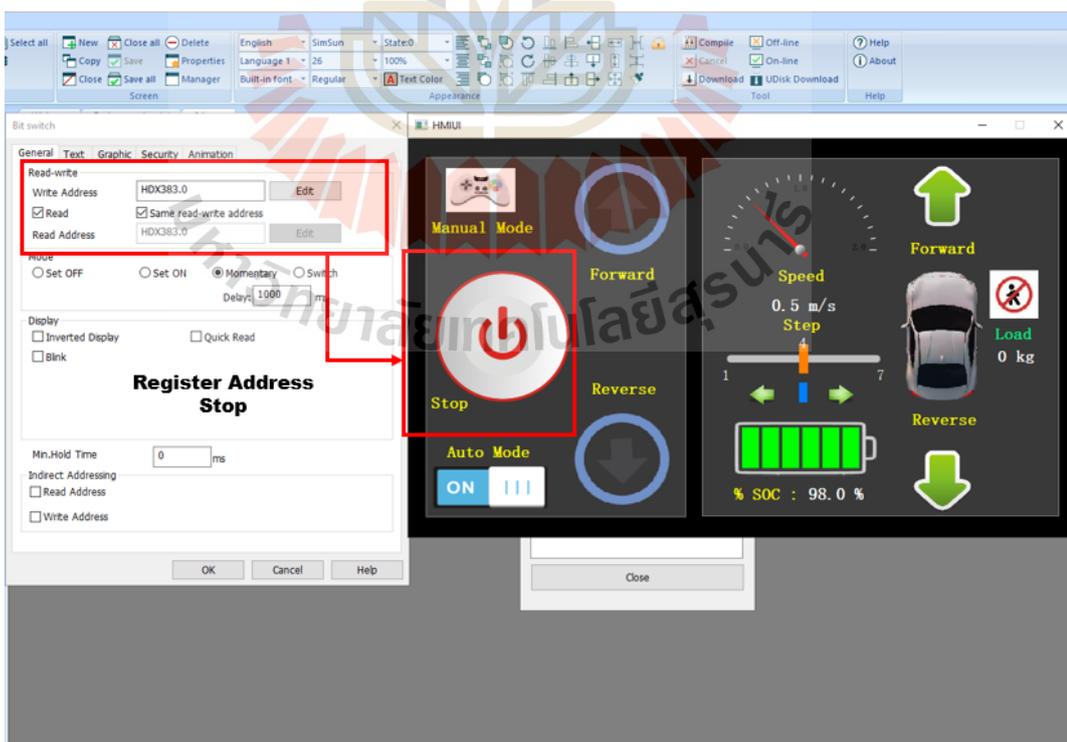
รูปที่ 5.95 กำหนด Register Address พารามิเตอร์สวิตช์โหมดที่ Dashboard Auto Mode



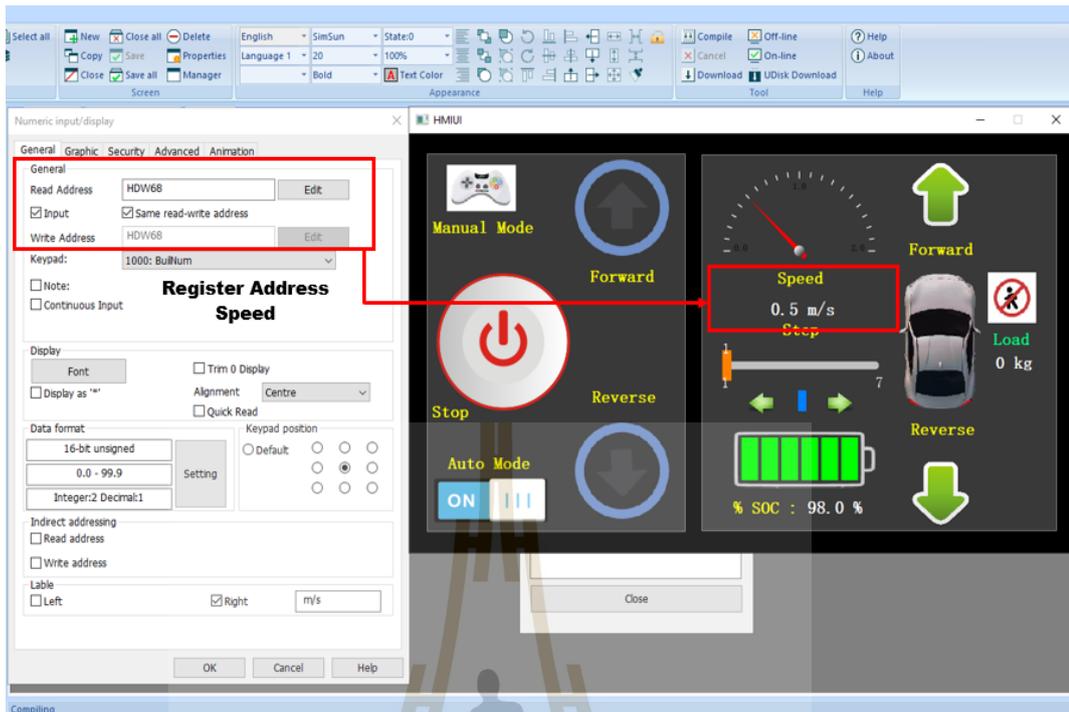
รูปที่ 5.96 กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Forward ที่ Dashboard Auto Mode



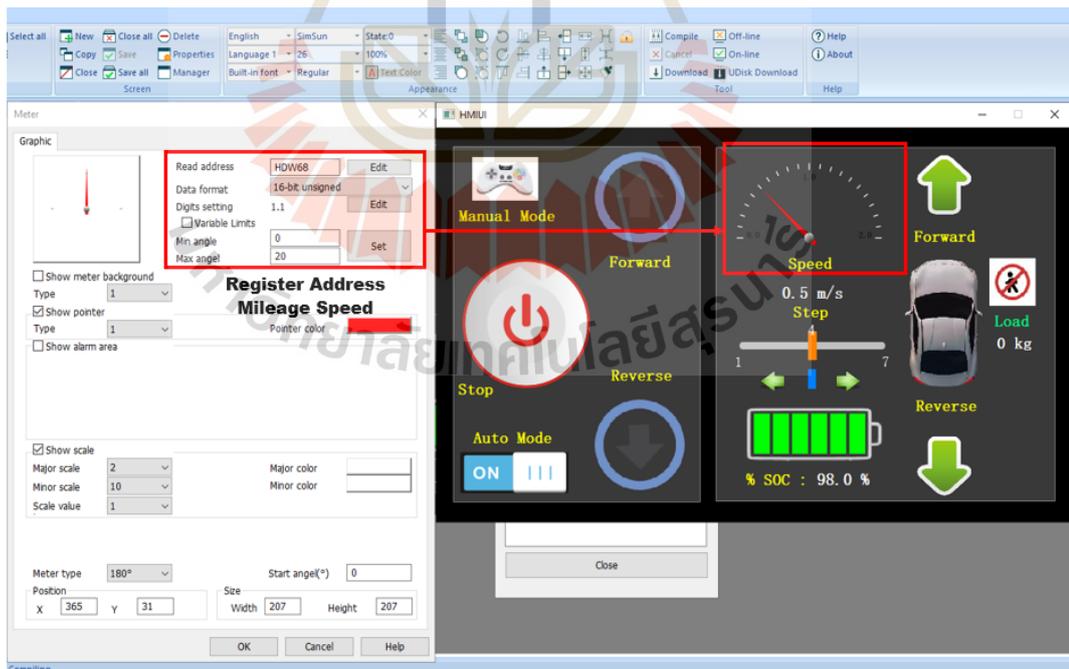
รูปที่ 5.97 กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Reverse ที่ Dashboard Auto Mode



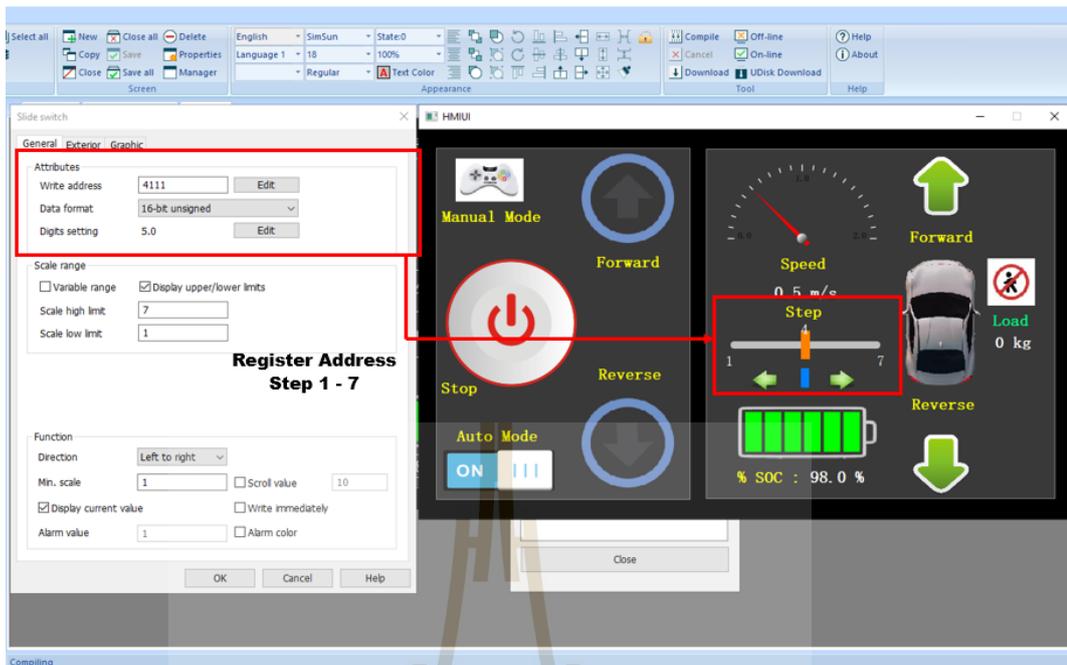
รูปที่ 5.98 กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Stop ที่ Dashboard Auto Mode



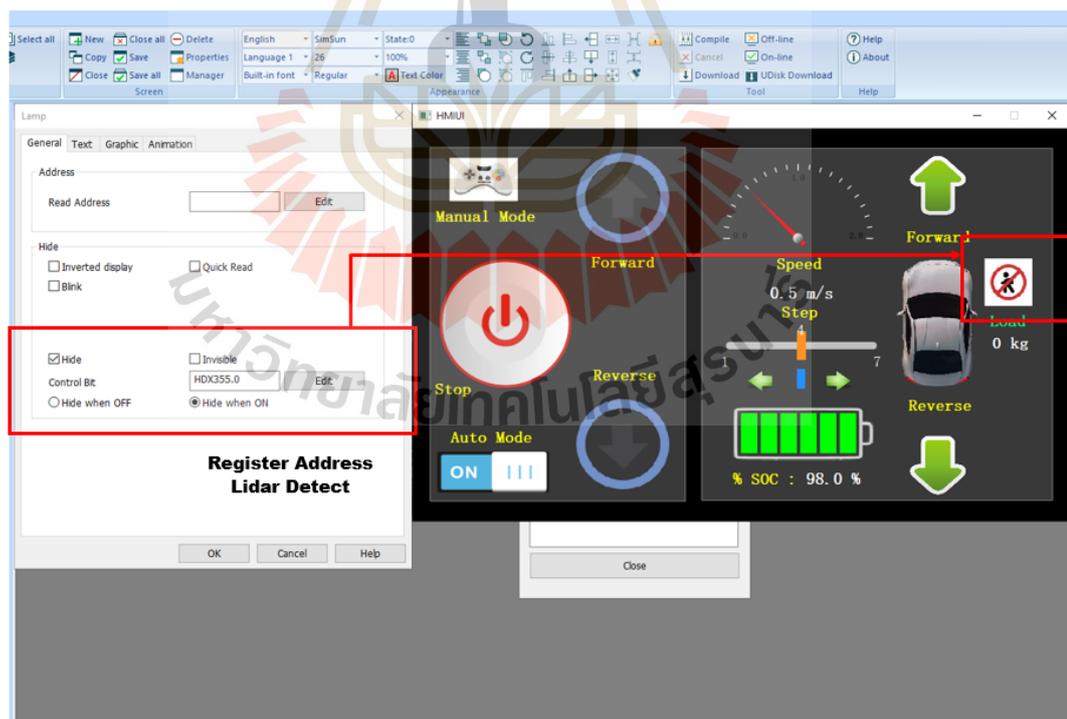
รูปที่ 5.99 กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Speed ที่ Dashboard Auto Mode



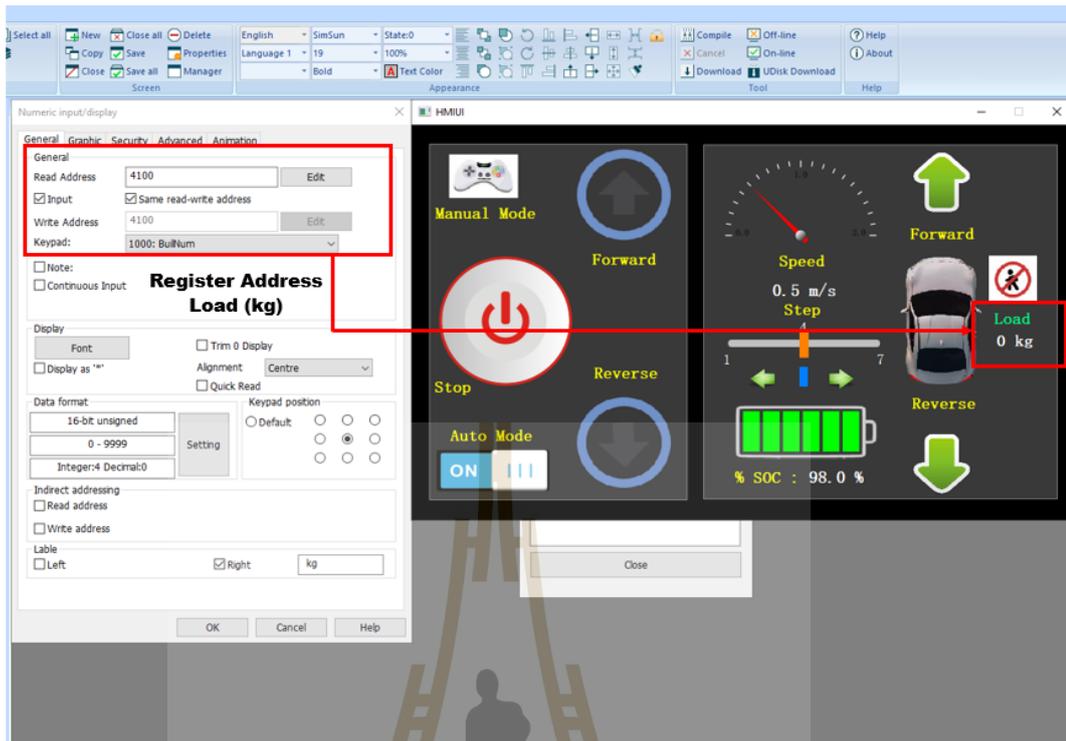
รูปที่ 5.100 กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Mileage Speed ที่ Dashboard Auto Mode



รูปที่ 5.101 กำหนด Register Address พารามิเตอร์มุมเลี้ยว Step1-7 ที่ Dashboard Auto Mode



รูปที่ 5.102 กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Lidar Detect ที่ Dashboard Auto Mode



รูปที่ 5.103 กำหนด Register Address พารามิเตอร์ Load (kg) ที่ Dashboard Auto Mode



รูปที่ 5.104 กำหนด Register Address พารามิเตอร์ % SOC ที่ Dashboard Auto Mode

เนื่องจากพารามิเตอร์ที่สั่งหยุดการทำงานของระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง (Stop) จากรูปที่ 5.98 ในการกำหนด Register Address เพื่อสั่งหยุดการทำงาน โดยควบคุมจากจอทัสกรีนไปยังซอฟต์แวร์ Python ของทั้ง 4 ไฟล์ที่บันทึกไว้ ได้แก่ Forward Camera, Reverse Camera, Detect Obstacles Forward และ Detect Obstacles Reverse โดย Register Address ของพารามิเตอร์ (Stop) ที่ Dashboard Auto Mode กำหนดการผ่าน Register Address %MW80 (จากเงื่อนไขคำสั่งบนหน้าต่าง Script ในโปรแกรม PIStudio บรรทัดที่ 80 ถึง บรรทัดที่ 103 ในรูปที่ 5.94) ให้สามารถเชื่อมต่อสื่อสารข้อมูลพารามิเตอร์ไปยังไฟล์ Python ทั้ง 4 ไฟล์ ซึ่งมีการพัฒนาซอฟต์แวร์เพิ่มเติมในส่วนของระบบนำทางอัตโนมัติทั้งในกรณีวิ่งเดิน หน้าชื่อไฟล์ Forward Camera และในกรณีวิ่งถอยหลังชื่อไฟล์ Reverse Camera เพื่อสั่งหยุดการทำงานของกล้อง (แทรกคำสั่งเพิ่มเติมในบรรทัดที่ 154 ถึง บรรทัดที่ 170) ดังรูปที่ 5.105 อีกทั้งในส่วน of ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางทั้งในกรณีวิ่งเดินหน้าชื่อไฟล์ Detect Obstacles Forward และในกรณีวิ่งถอยหลังชื่อไฟล์ Detect Obstacles Reverse เพื่อสั่งหยุดการทำงานของไลดาร์ (แทรกคำสั่งเพิ่มเติมในบรรทัดที่ 37 ถึง บรรทัดที่ 49) ดังรูปที่ 5.106

```

154 #-----Connect HMI Touch Screen -----
155 read_reg0 = 80
156 read_qty = 1
157 rr =TRIPLC.read_holding_registers(read_reg0, read_qty)
158 print('Input0: ', rr.getRegister(0))
159 g0 = rr.getRegister(0)
160 #-----
161
162 # Stop Camera
163 if cv2.waitKey(1) & g0 == 1:
164     break
165     cv2.imshow('Forward',frame)
166
167 # Release Everything Finish
168 video_capture.release()
169 video_capture1.release()
170 cv2.destroyAllWindows()
171

```

รูปที่ 5.105 แทรกคำสั่งหยุดการทำงานของกล้องในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง

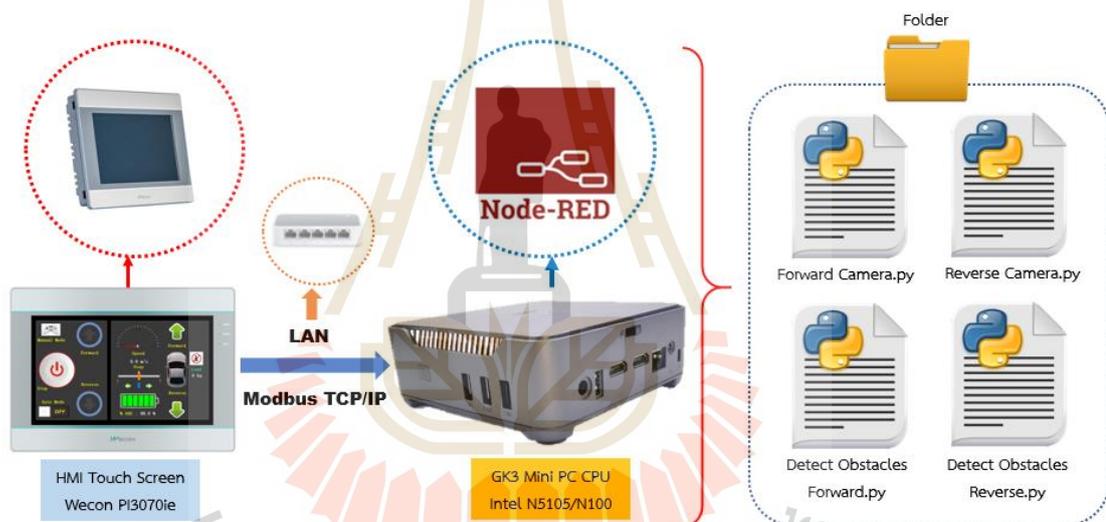
```

37 #-----Connect HMI Touch Screen -----
38 read_reg0 = 80
39 read_qty = 1
40 rr =TRIPLC.read_holding_registers(read_reg0, read_qty)
41 print('Input0: ', rr.getRegister(0))
42 g0 = rr.getRegister(0)
43 #-----
44
45 # Stop Lidar
46 if g0 == 1:
47     break
48     lidar.stop()
49     lidar.stop_motor()
50

```

รูปที่ 5.106 แทรกคำสั่งหยุดการทำงานของไลดาร์ในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง

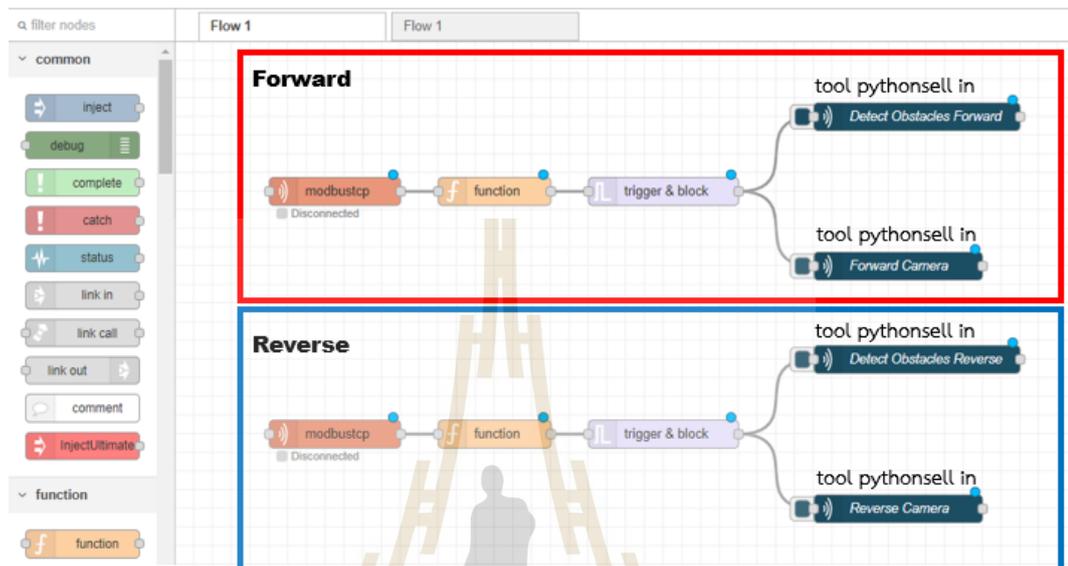
ลำดับสุดท้ายของการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง คือ การพัฒนาซอฟต์แวร์ Node-RED ที่ได้กล่าวถึงการออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 4.9.4 รูปที่ 4.45 เนื่องจากซอฟต์แวร์ Python ที่พัฒนาขึ้นมาของระบบนำทางและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางมีทั้งหมด 4 ไฟล์ที่มีการบันทึกไว้อยู่ใน Folder เดียวกัน ได้แก่ Forward Camera, Reverse Camera, Detect Obstacles Forward และ Detect Obstacles Reverse ซึ่งปกติแล้ว ถ้าต้องการ Run ไฟล์ Python ต้อง Run โดยใช้คำสั่งชื่อของไฟล์นั้นบน Command Prompt ในระบบปฏิบัติการ Windows ที่ละไฟล์ทำให้เกิดความยุ่งยากและซับซ้อนในการควบคุมระบบแบบอัตโนมัติ ดังนั้นการพัฒนาซอฟต์แวร์ Node-RED จึงเป็นตัวกลางที่สามารถเชื่อมต่อไฟล์ Python ของทั้ง 4 ไฟล์ เพื่อให้พร้อมสำหรับรอคำสั่ง Run ไฟล์จากจอทัสกรีน โดยใช้รูปแบบการเชื่อมต่อสื่อสารโปรโตคอล Modbus TCP/IP ด้วยการกำหนด Register Address สำหรับควบคุมโหมดของการทำงานของระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ดังรูปที่ 5.107



รูปที่ 5.107 รูปแบบการควบคุมไฟล์ Python ที่ใช้จอทัสกรีนผ่านซอฟต์แวร์ Node-RED

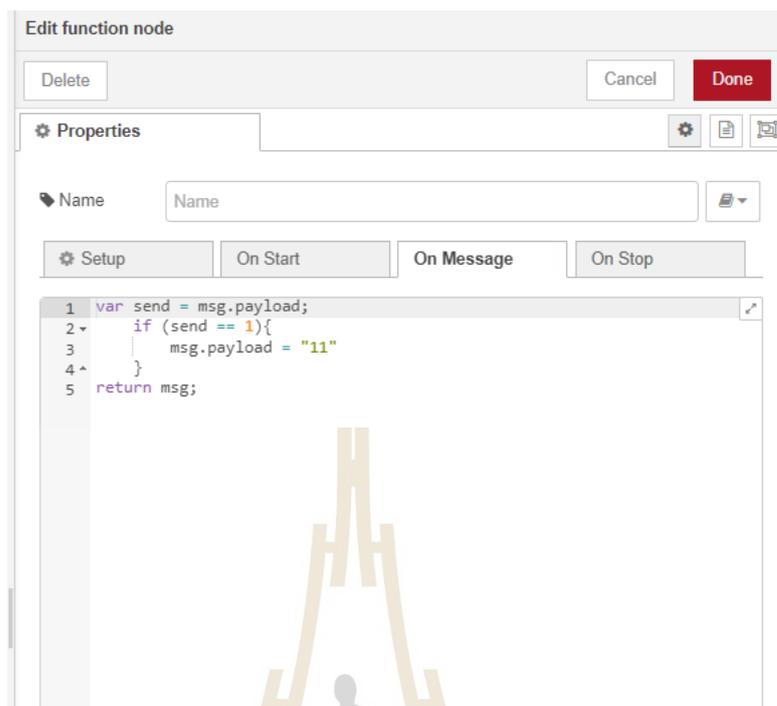
หลังจากนั้นพัฒนาซอฟต์แวร์ Node-RED เริ่มต้นเปิดหน้าต่าง Command Prompt พิมพ์คำสั่ง node-red แล้วกด Enter ถัดมาทำการเปิดหน้าต่างของ Google Chrome แล้วให้พิมพ์ <http://localhost:1880/> เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาซอฟต์แวร์ Node-RED โดยแบ่งการพัฒนาออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีวิ่งเดินหน้าและกรณีวิ่งถอยหลัง สำหรับกรณีวิ่งเดินหน้าโดยนำ tool modbus tcp เข้ามาเชื่อมต่อไปยัง tool function และนำ tool function เชื่อมต่อไปยัง tool trigger & block ต่อด้วยนำ tool trigger & block เชื่อมต่อไปยัง tool pythonsell in จำนวน 2 box ที่ตั้งชื่อว่า Detect Obstacles Forward และ Forward Camera (ในกรอบสีแดง) ดังรูปที่ 5.108 และในส่วนของ tool modbus tcp กำหนดพารามิเตอร์สำหรับรอรับคำสั่งจากจอทัสกรีนด้วย Register Address %MW376 ในรูปแบบโปรโตคอล Modbus TCP/IP ดังรูปที่ 5.109 และในการสร้างเงื่อนไขด้วยการพิมพ์คำสั่งใน tool function ดังรูป 5.110 ตามด้วยการกำหนดพารามิเตอร์ใน tool trigger

& block ดังรูปที่ 5.111 จากนั้นการเรียกไฟล์ Python ที่บันทึกไว้ใน Folder C:\Users\ADMIN ของไฟล์ชื่อ Detect Obstacles Forward ดังรูปที่ 5.112 และการเรียกไฟล์ Python ที่บันทึกไว้ใน Folder ของไฟล์ชื่อ Forward Camera ดังรูปที่ 5.113

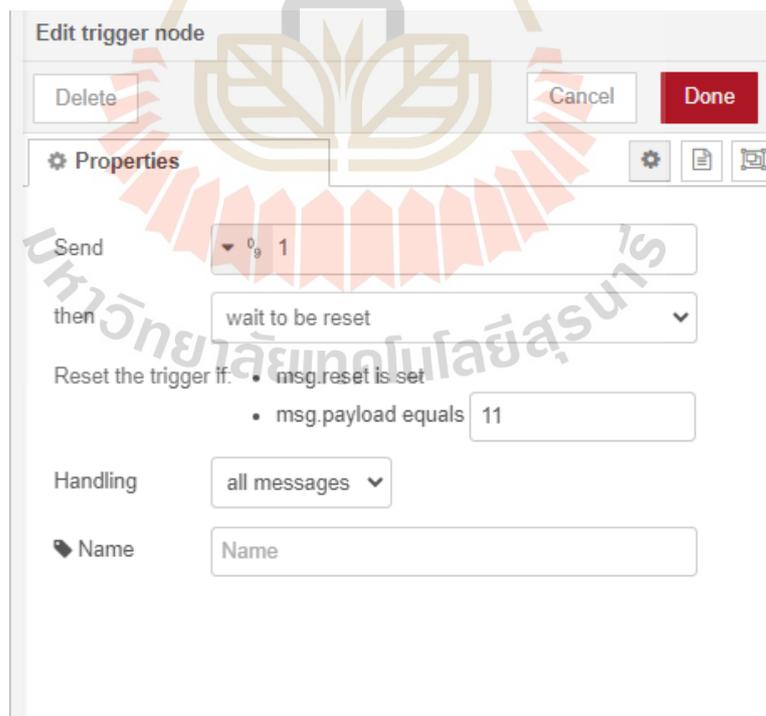


รูปที่ 5.108 การพัฒนาซอฟต์แวร์ Node-RED ที่ใช้ในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง

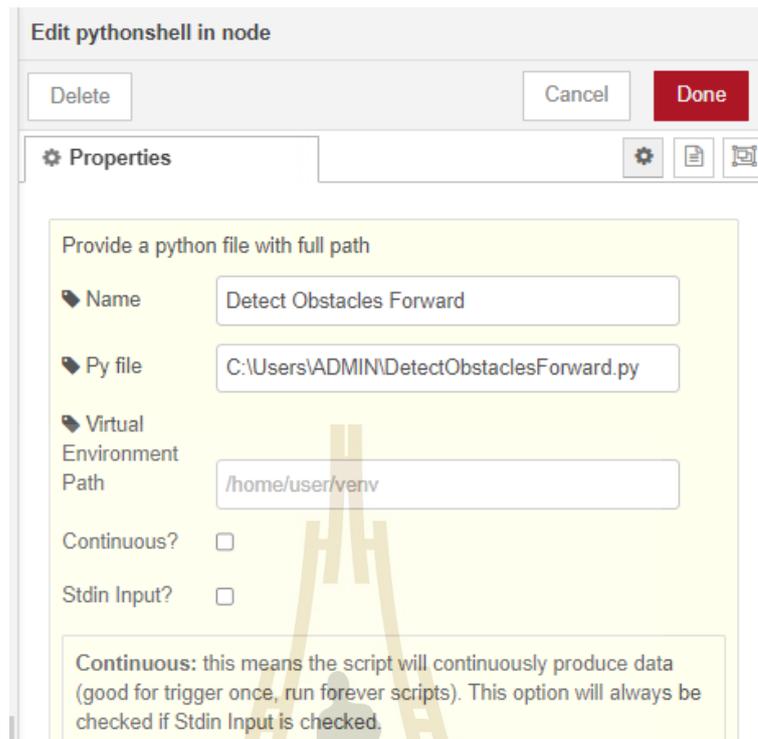
รูปที่ 5.109 กำหนดพารามิเตอร์ใน tool modbus tcp ที่ใช้ในกรณีวิ่งเดินหน้า



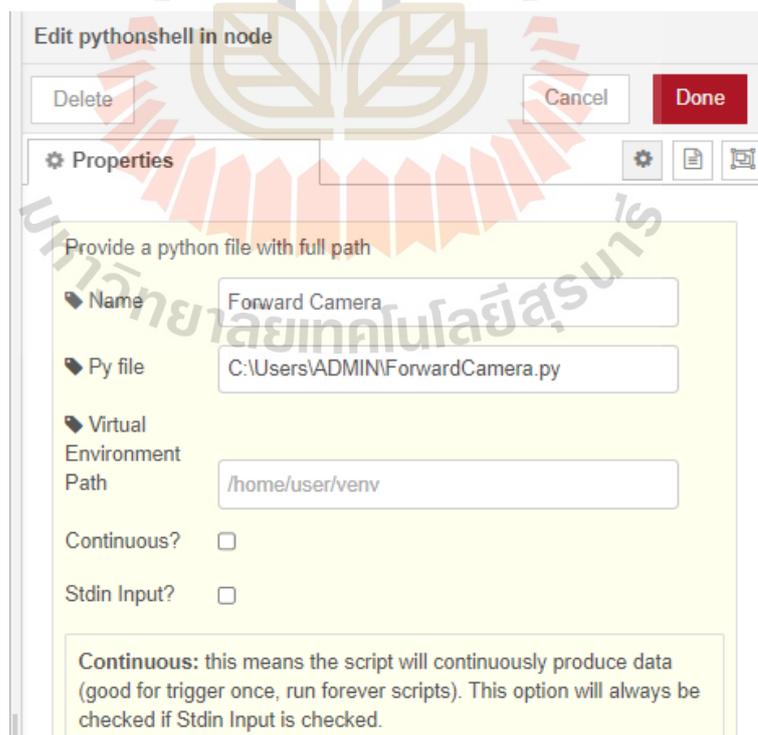
รูปที่ 5.110 การสร้างเงื่อนไขใน tool function ที่ใช้ในกรณีวิ่งเดินหน้า



รูปที่ 5.111 กำหนดพารามิเตอร์ใน tool trigger & block ที่ใช้ในกรณีวิ่งเดินหน้า



รูปที่ 5.112 การเรียกไฟล์ Python ชื่อไฟล์ Detect Obstacles Forward ที่ใช้ในกรณีวิ่งเดินหน้า



รูปที่ 5.113 การเรียกไฟล์ Python ชื่อไฟล์ Forward Camera ที่ใช้ในกรณีวิ่งเดินหน้า

สำหรับกรณีวงจรถอยหลังซึ่งรูปแบบการเชื่อมต่อ tool box เหมือนกับกรณีวงจรถูกเดินหน้า โดยนำ tool modbustcp เชื่อมต่อไปยัง tool function และนำ tool function เชื่อมต่อไปยัง tool trigger & block ต่อด้วยนำ tool trigger & block เชื่อมต่อไปยัง tool pythonsell in จำนวน 2 box ที่ต้องชื่อว่า Detect Obstacles Reverse และ Reverse Camera (ในกรอบสีน้ำเงิน) ดังรูปที่ 5.108 และในส่วนของ tool modbustcp กำหนดพารามิเตอร์สำหรับรอรับคำสั่งจากจอทัสกรีน ด้วย Register Address %MW377 ในรูปแบบโปรโตคอล Modbus TCP/IP ดังรูปที่ 5.114 ถัดมา ในการสร้างเงื่อนไขด้วยการพิมพ์คำสั่งใน tool function และการกำหนดพารามิเตอร์ใน tool trigger & block เหมือนกันกับกรณีวงจรถูกเดินหน้าอ้างอิงรูปที่ 5.110 และ 5.111 ตามลำดับ จากนั้นการเรียกไฟล์ Python ที่บันทึกไว้ใน Folder C:\Users\ADMIN ของไฟล์ชื่อ Detect Obstacles Reverse ดังรูปที่ 5.115 และการเรียกไฟล์ Python ที่บันทึกไว้ใน Folder ของไฟล์ชื่อ Reverse Camera ดังรูปที่ 5.116 (หมายเหตุ : การสั่งให้ซอฟต์แวร์ Node-RED ทำงานอัตโนมัติเมื่อเปิดเครื่อง มินิพีซีพร้อมใช้งาน สามารถดูรายละเอียดการตั้งค่าได้ที่ <https://suthipongb.medium.com/auto-startup-node-red-with-pm2-on-windows-f050f0232d07> และมินิพีซีต้องทำการแก้ไขในส่วน ของ Bios ให้บู๊ต (Boot) ทำงานทันทีเมื่อมีการจ่ายไฟไปที่มินิพีซี)

The screenshot shows the configuration interface for a 'modbustcp' node. The fields are as follows:

- Name: Name
- Topic: topic
- FC: FC 3: Read Holding Registers
- Address: 377
- Quantity: 1
- Poll Rate: 50 millisecond(s)
- Server: modbustcp@192.168.1.10:502
- IEEE-754 # Type: <off>
- Endian: =>

รูปที่ 5.114 กำหนดพารามิเตอร์ใน tool modbustcp ที่ใช้ในกรณีวงจรถอยหลัง

Edit pythonshell in node

Delete Cancel Done

Properties

Provide a python file with full path

Name Detect Obstacles Reverse

Py file C:\Users\ADMIN\DetectObstaclesReverse.py

Virtual Environment Path /home/user/venv

Continuous?

Stdin Input?

Continuous: this means the script will continuously produce data (good for trigger once, run forever scripts). This option will always be checked if Stdin Input is checked.

รูปที่ 5.115 การเรียกไฟล์ Python ชื่อไฟล์ Detect Obstacles Reverse ที่ใช้ในกรณีวิ่งถอยหลัง

Edit pythonshell in node

Delete Cancel Done

Properties

Provide a python file with full path

Name Reverse Camera

Py file C:\Users\ADMIN\ReverseCamera.py

Virtual Environment Path /home/user/venv

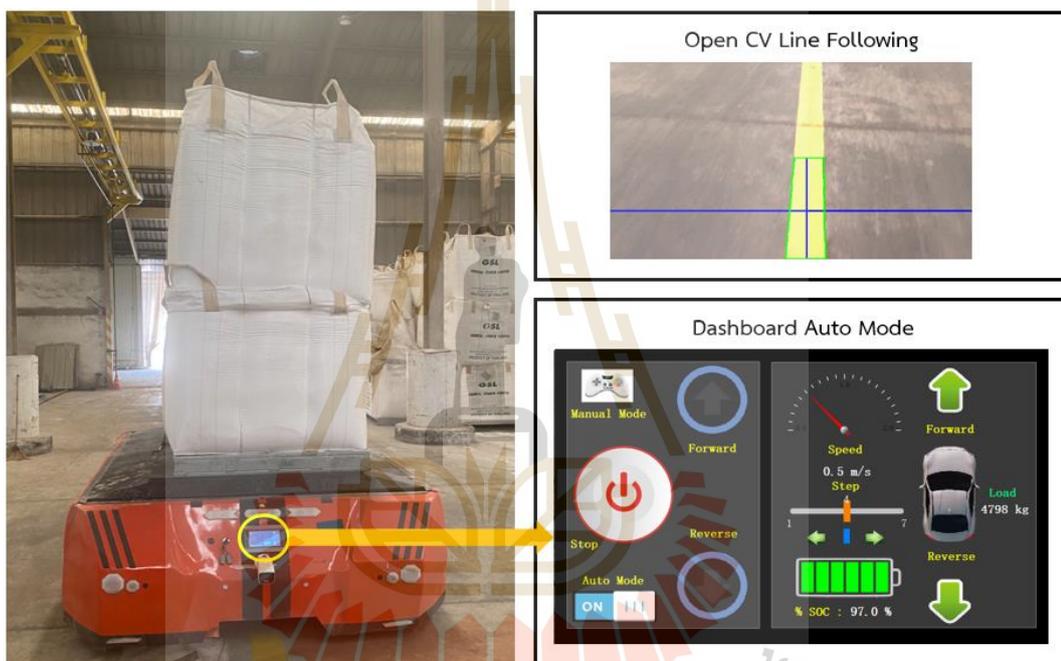
Continuous?

Stdin Input?

Continuous: this means the script will continuously produce data (good for trigger once, run forever scripts). This option will always be checked if Stdin Input is checked.

รูปที่ 5.116 การเรียกไฟล์ Python ชื่อไฟล์ Reverse Camera ที่ใช้ในกรณีวิ่งถอยหลัง

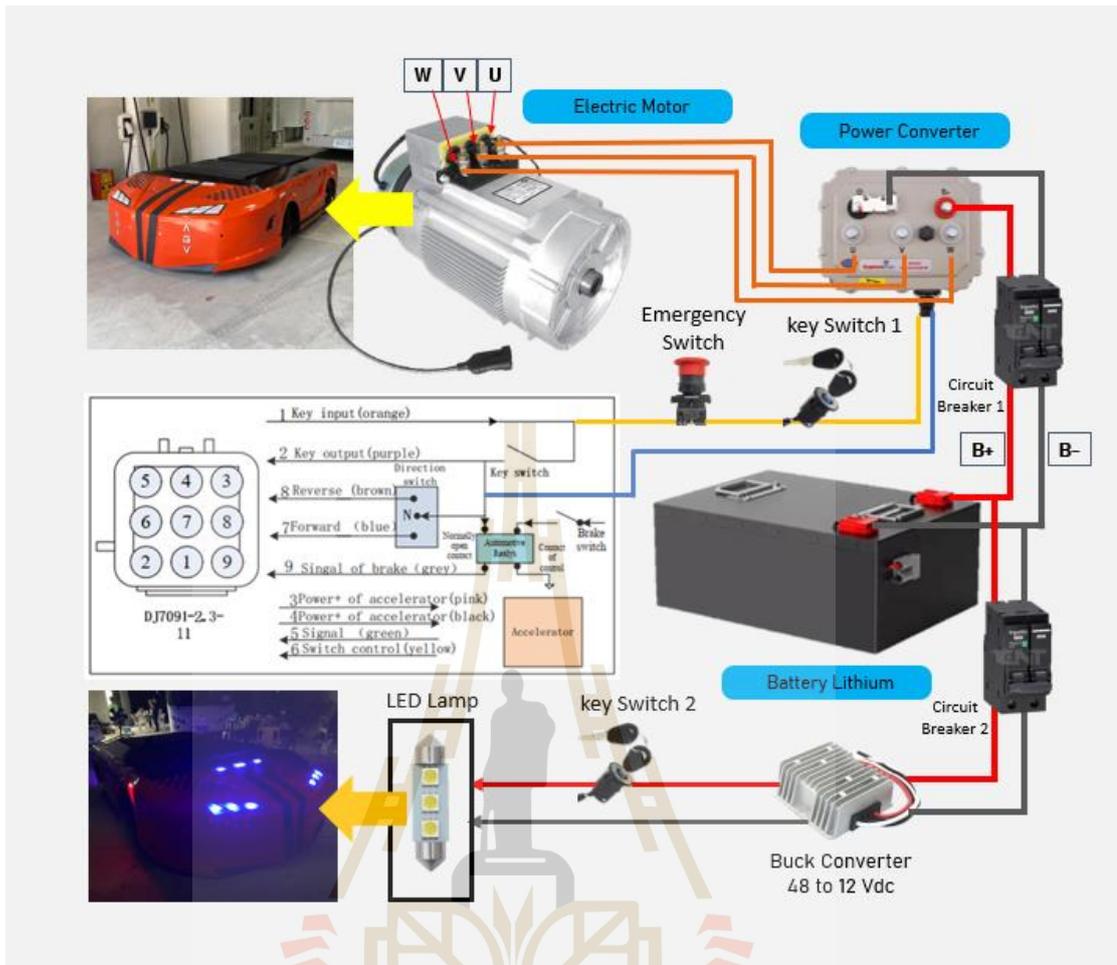
จากทั้งหมดที่กล่าวมาในหัวข้อของการพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางสำหรับรถขนส่งอัตโนมัติ ในเบื้องต้นการทดสอบวิ่งขนส่งแบงก์น้ำมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแบงก์ที่มีบรรทุกแบงก์หนักที่สุด 4,800 kg หรือ 4 กระสอบ โดยใช้งานในโหมดนำทางอัตโนมัติ (Auto Mode) ควบคุมด้วยการกดปุ่มสัมผัสที่จอทัสกรีน ปุ่มวิ่งเดินหน้า (Forward) ดังนั้นในการวิ่งขนส่งแบงก์น้ำมันสำปะหลังใช้งานจริงด้วยระบบนำทางอัตโนมัติที่ความเร็ว 0.5 m/s ซึ่งแสดงภาพจากกล้องที่ใช้ซอฟต์แวร์ฟังก์ชัน Open CV รูปแบบ Line Following รวมทั้งตรวจสอบน้ำหนักด้วยโหลดเซลล์ (Load : 4,798 kg) แสดงผลผ่านหน้าจอทัสกรีน Dashboard Auto Mode ในกรณีวิ่งเดินหน้าจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแบงก์ ดังรูปที่ 5.117



รูปที่ 5.117 การทดสอบวิ่งขนส่งแบงก์น้ำมันสำปะหลังเบื้องต้นโดยใช้ระบบนำทางอัตโนมัติ

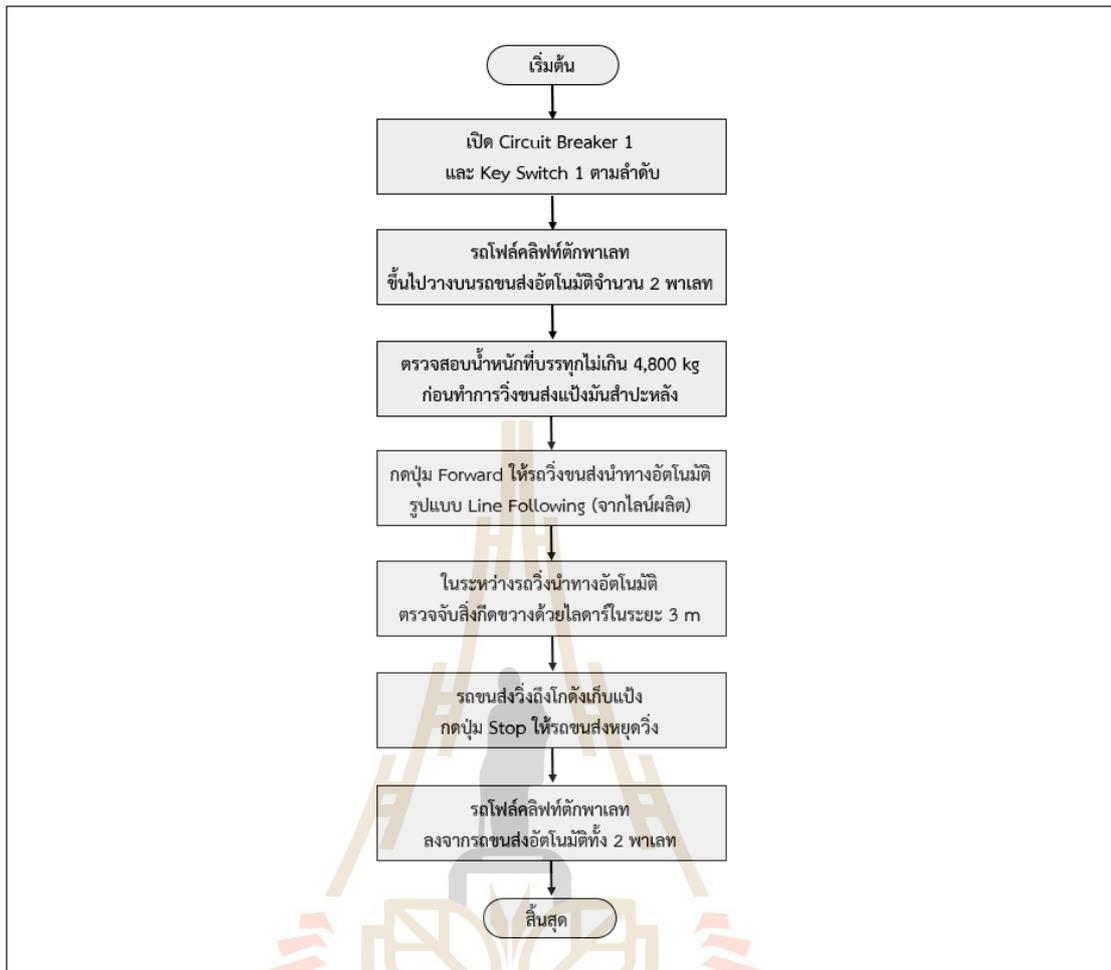
5.3 การทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติที่พิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg

ในหัวข้อที่ 5.2 ได้กล่าวถึงการพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติเพื่อใช้ขนส่งแบงก์น้ำมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีพิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg โดยให้มีการนำทางอัตโนมัติและตรวจจับสิ่งกีดขวางในระหว่างวิ่งขนส่งแบงก์น้ำมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแบงก์ของบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด ก่อนทำการทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติที่พิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg เพื่อให้ได้ตรงตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายที่ตั้งไว้ ซึ่งมีการพัฒนาเพิ่มเติมในด้านความปลอดภัยก่อนทำการจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ของรถขนส่งอัตโนมัติ โดยติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม Circuit Breaker 1, Key Switch 1 และ Emergency Switch และติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม Circuit Breaker 2, Key Switch 2 และ LED Lamp สำหรับไฟส่องสว่างรอบคัน ดังรูปที่ 5.118

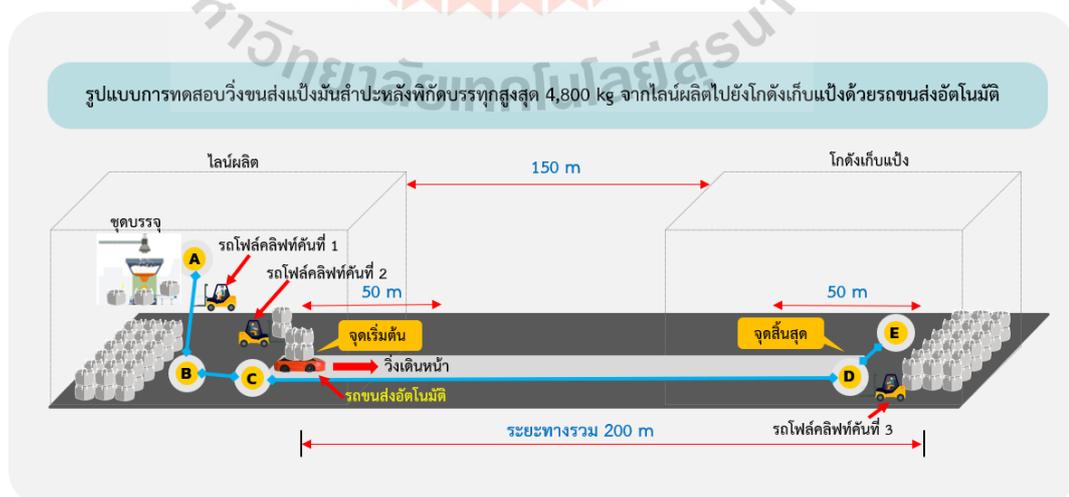


รูปที่ 5.118 การต่ออุปกรณ์ Circuit Breaker, Key Switch, Emergency Switch และ LED Lamp

สำหรับหัวข้อนี้ เป็นการทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมาอ้างอิงจากรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นรูปแบบการขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแบริ่งที่มีระยะทางในการขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับปะหลัง 200 m ด้วยรถขนส่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมาใช้ทดสอบวิ่งขนส่ง โดยมีลำดับขั้นตอนและกระบวนการวิ่งขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับปะหลังพิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg ในกรณีวิ่งเดินทางจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแบริ่ง แสดงแผนภาพ Flow chart ดังรูปที่ 5.119 และรูปแบบการขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับปะหลังโดยเริ่มจากใช้รถโฟล์คคลิฟท์คันที่ 1 ตักกระสอบแบริ่งที่ออกจากชุดบรรจุของไลน์ผลิต (จุด A) มาวางทับกันบนพาเลทจำนวน 2 กระสอบ ในพื้นที่จัดเตรียมไว้ (จุด B) ใช้รถโฟล์คคลิฟท์คันที่ 2 ตักพาเลทที่วางกระสอบแบริ่งมีน้ำหนักรวมเฉลี่ย 4,800 kg ไปวางบนรถขนส่งอัตโนมัติที่จอดรอสำหรับวิ่งขนส่ง (จุด C) จากนั้นรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแบริ่ง (จุด D) ในระยะทางขนส่งเฉลี่ยรวม 200 m และให้รถโฟล์คคลิฟท์คันที่ 3 ตักพาเลทลงจากรถขนส่งอัตโนมัติเพื่อไปจัดวางในพื้นที่ของโกดังเก็บแบริ่งที่จัดเตรียมไว้ (จุด E) แสดงแผนภาพตัวอย่างรูปแบบการวิ่งขนส่ง ดังรูปที่ 5.120



รูปที่ 5.119 Flow chart ลำดับขั้นตอนการวิ่งขนส่งไปยังถังเก็บ

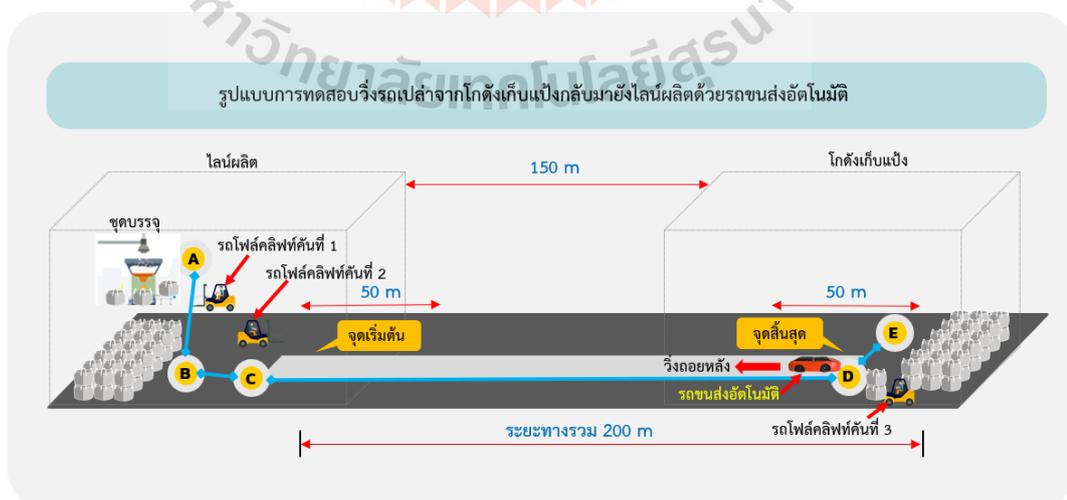


รูปที่ 5.120 รูปแบบการวิ่งขนส่งไปยังถังเก็บด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ

ในกรณีวิ่งถอยหลังซึ่งเป็นรูปแบบการวิ่งรถเปล่าจากโกดังเก็บแบ้งกลับมายังไลน์ผลิต ที่มีระยะทางเฉลี่ยรวม 200 m ด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ โดยมีลำดับขั้นตอนและกระบวนการวิ่งรถเปล่า ในกรณีวิ่งถอยหลังจากโกดังเก็บแบ้งกลับมายังไลน์ผลิต แสดงแผนภาพ Flow chart ดังรูปที่ 5.121 และรูปแบบการวิ่ง เริ่มจากจุดที่รถเปล่าจอดอยู่ (จุด D) วิ่งถอยหลังจากโกดังเก็บแบ้งกลับมายังไลน์ผลิต (จุด C) ในระยะทางเฉลี่ยรวม 200 m จากนั้นให้รถหยุดรอการวิ่งขนส่งแบ้งมาสำหรับหลัง ในรอบถัดไป แสดงแผนภาพตัวอย่าง ดังรูปที่ 5.122



รูปที่ 5.121 Flow chart ลำดับขั้นตอนการวิ่งรถเปล่าจากโกดังเก็บแบ้งกลับมายังไลน์ผลิต



รูปที่ 5.122 รูปแบบการวิ่งรถเปล่าจากโกดังเก็บแบ้งกลับมายังไลน์ผลิตด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ

5.3.1 การทดสอบและผลการทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติในกรณีวิ่งเดินหน้า

สำหรับการทดสอบวิ่งขนส่งแ่งมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแ่งด้วยรถขนส่งอัตโนมัติที่มีพิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg ซึ่งมีลำดับขั้นตอนของกระบวนการทำงานและรูปแบบการวิ่งขนส่งในกรณีวิ่งเดินหน้า อ้างอิงจากรูปที่ 5.119 และรูปที่ 5.120 ตามลำดับ เริ่มต้นด้วยการเปิด Circuit Breaker 1 อ้างอิงจากรูปที่ 5.118 เพื่อให้แบตเตอรี่จ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ในระบบรถขนส่งอัตโนมัติทั้งหมดเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับใช้งาน จากนั้นเปิด Key Switch 1 เพื่อให้ชุดควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนและชุดควบคุมมอเตอร์บังคับเบิ้ลพร้อมทำงานหลังจากเปิด Circuit Breaker 1 ก่อนหน้านี้ จากนั้นทำการทดสอบบรรทุกแ่งมันสำปะหลังจำนวน 4 กระสอบ แต่ละกระสอบบรรจุแ่งมันสำปะหลังเฉลี่ย 1,200 kg ทำให้มีน้ำหนักบรรทุกแ่งมันสำปะหลังรวมเฉลี่ยสูงสุด 4,800 kg ซึ่งการนำกระสอบที่บรรจุแ่งมันสำปะหลังที่วางทับกันอยู่บนพาเลทจำนวน 2 กระสอบ ต่อ 1 พาเลท ใช้รถโฟล์คลิฟต์ตักพาเลทขึ้นไปวางบนรถขนส่งอัตโนมัติที่ละ 1 พาเลท โดยรถโฟล์คลิฟต์ตักจำนวนทั้งหมด 2 พาเลท ทำให้มีพิกัดบรรทุกที่ต้องการเฉลี่ย 4,800 kg ดังนั้นผลการทดสอบในการทดสอบโดยใช้รถโฟล์คลิฟต์ตักพาเลทจำนวน 2 พาเลท ขึ้นไปวางบนรถขนส่งอัตโนมัติ ดังรูปที่ 5.123



รูปที่ 5.123 ผลการทดสอบใช้รถโฟล์คลิฟต์ตักพาเลทขึ้นไปวางบนรถขนส่งอัตโนมัติทั้ง 2 พาเลท

ลำดับถัดมาก่อนทำการวิ่งขนส่งแ่งมันสำปะหลังในกรณีวิ่งเดินหน้าซอฟต์แวร์ของระบบตรวจสอบน้ำหนักที่พัฒนาขึ้นมาในหัวข้อที่ 5.2.4 ได้ทำการประมวลผลเพื่อตรวจสอบน้ำหนักที่บรรทุกแ่งมันสำปะหลัง ผลการทดสอบพบว่าที่ Dashboard Auto Mode ของจอทัสกรีนแสดงค่า (Load : 4,799 kg) ดังรูปที่ 5.124 ซึ่งหมายความว่าน้ำหนักที่บรรทุกบนรถขนส่งอัตโนมัติมีค่าไม่เกินพิกัดน้ำหนักสูงสุดที่ตั้งไว้ คือ 4,800 kg ทำให้รถขนส่งอัตโนมัติสามารถวิ่งขนส่งแ่งมันสำปะหลังจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแ่งในกรณีวิ่งเดินหน้าได้



รูปที่ 5.124 ผลการทดสอบตรวจสอบน้ำหนักที่บรรทุก (Load : 4,799 kg) ก่อนทำการวิ่งขนส่ง

หลังจากนั้นทดสอบกดปุ่มสัมผัสที่ Dashboard Auto Mode ที่ปุ่ม Forward เพื่อเริ่มทดสอบการวิ่งขนส่งอัตโนมัติในกรณีวิ่งเดินหน้าจากไลน์ผลิต (จุดเริ่มต้น) โดยใช้ซอฟต์แวร์ฟังก์ชัน Open CV รูปแบบ Line Following ด้วยเงื่อนไขกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรถกับมุมในการบังคับเลี้ยวของเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 7 ช่วง รวมทั้งขอบเขตภาพจากเฟรมกล้องที่กำหนดไว้คือ $frame[Cy, Cx]$ เท่ากับ $frame[0:480, 0:640]$ โดยกำหนดขอบเขตในการ Find Contours and Center ค่า $Cx [0:640]$ และ $Cy [300:480]$ ของแต่ละช่วงที่สัมพันธ์กับมุมเลี้ยว ดังตารางที่ 5.9 ในการนำทางอัตโนมัติด้วยการใช้กล้องสำหรับวิ่งเดินหน้าตรวจจับเส้นสีที่กำหนดไว้บนพื้นถนนของทางบริษัทเตรียมไว้เพื่อทดสอบ โดยมีรหัสสีรูปแบบ BRG ซึ่งกำหนดขอบเขตของรหัสสีทั้ง 4 ช่วง ดังตารางที่ 5.10 ดังนั้นผลการทดสอบวิ่งขนส่งแ่งมันสำปะหลังด้วยการนำทางอัตโนมัติในรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งเดินหน้า พบว่าที่ระยะเริ่มออกตัว (จุดเริ่มต้น) ภาพจากกล้องมีการ Find Contours and Center ซึ่งแสดง Point $[Cx, Cy]$ เท่ากับ $[315, 399]$ โดยอยู่ในขอบเขตที่กำหนดของระยะ $[Cy, Cx]$ เท่ากับ $[300:480, 0:640]$ และแสดงการตรวจจับสีเส้นถนนบนพื้นในรูปแบบ BGR (137,255,255) ระบบบังคับเลี้ยวของเซอร์โวมอเตอร์ Step 4 วิ่งด้วยความเร็ว 0.75 m/s ที่บรรทุกแ่งมันสำปะหลังน้ำหนัก 4,799 kg จากไลน์ผลิต (จุดเริ่มต้น) ไปยังโกดังเก็บแ่ง (จุดสิ้นสุด) ดังรูปที่ 5.125

ตารางที่ 5.9 เงื่อนไขทดสอบวิ่งนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งเดินหน้า

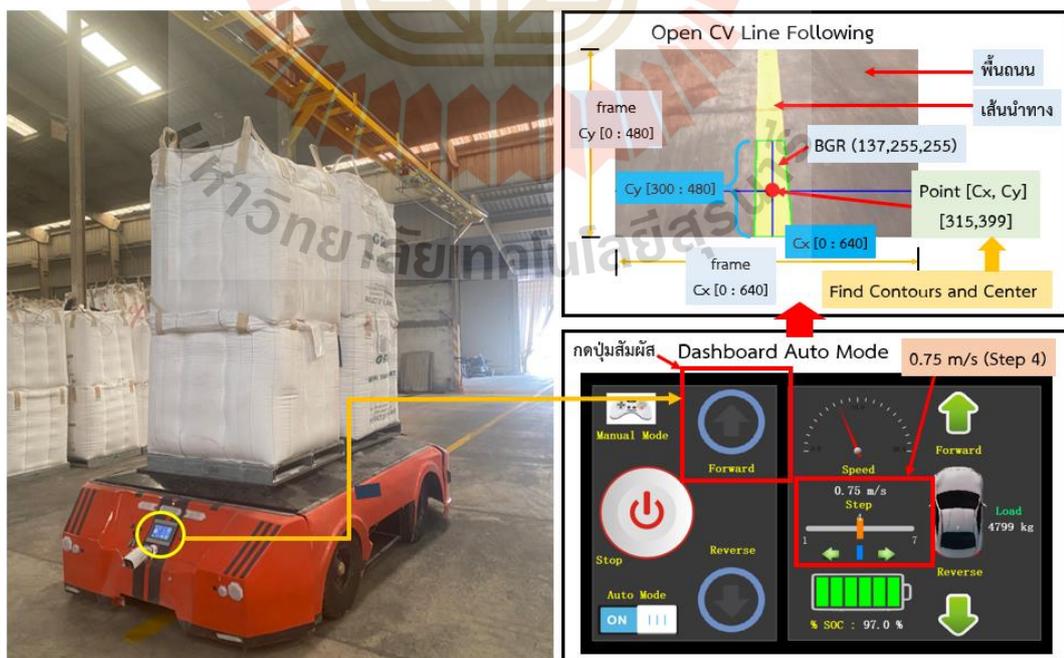
เงื่อนไข (ลำดับ)	ความเร็ว (m/s)	Cy	Cx	Servo Motor (Step)	มุมเลี้ยว (องศา)
1	0.25	300 ถึง 480	600 ถึง 640	1	Left Angle -30
2	0.35	300 ถึง 480	440 ถึง 600	2	Left Angle -20
3	0.50	300 ถึง 480	360 ถึง 440	3	Left Angle -10

ตารางที่ 5.9 เงื่อนไขทดสอบวิ่งนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งเดินหน้า (ต่อ)

เงื่อนไข (ลำดับ)	ความเร็ว (m/s)	Cy	Cx	Servo Motor (Step)	มุมเลี้ยว (องศา)
4	0.75	300 ถึง 480	280 ถึง 360	4	Center Angle 0
5	0.50	300 ถึง 480	200 ถึง 280	5	Right Angle 10
6	0.35	300 ถึง 480	40 ถึง 200	6	Right Angle 20
7	0.25	300 ถึง 480	0 ถึง 40	7	Right Angle 30

ตารางที่ 5.10 กำหนดขอบเขตรหัสสีต่ำสุด (Lower) และสูงสุด (Upper) 4 ช่วง ในกรณีวิ่งเดินหน้า

ช่วง	ขอบเขต	ภาพสี	รหัสสี (BGR)
1	Lower		[22,100,100]
	Upper		[60,255,255]
2	Lower		[10,66,193]
	Upper		[137,255,255]
3	Lower		[5,138,140]
	Upper		[59,255,255]
4	Lower		[22,100,100]
	Upper		[248,255,255]

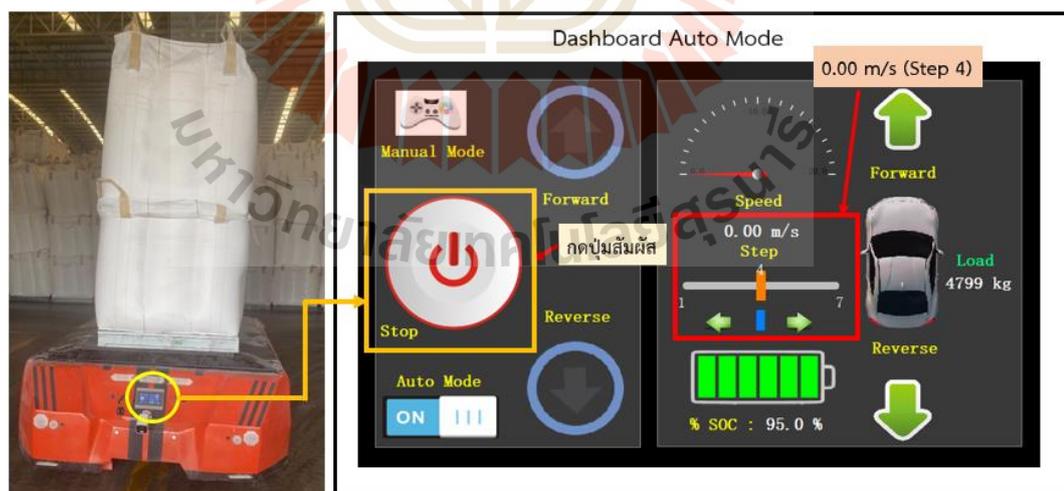


รูปที่ 5.125 ผลการทดสอบวิ่งขนส่งนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งเดินหน้า

ในระหว่างวิ่งนำทางอัตโนมัติทดสอบให้รถโฟล์คลิฟท์วิ่งผ่านหน้ารถขนส่งอัตโนมัติ ในเส้นทางประมาณตำแหน่งที่ 123 m รถขนส่งอัตโนมัติจึงหยุดวิ่งความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s และมุมของการบังคับเลี้ยว (Step 4) ในขณะที่บรรทุกแบ็กเก็ตน้ำหนัก 4,799 เนื่องจากไลดาร์ตรวจพบว่ามีสิ่งกีดขวางในระยะ 3 m ที่กำหนดเงื่อนไขไว้ในซอฟต์แวร์ของระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ทำให้มีผลการทดสอบของระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางที่แสดงผล Dashboard Auto Mode ของจอทัสกรีนแจ้งเตือนโดยแสดงรูป Lidar Detect ดังรูปที่ 5.126



รูปที่ 5.126 ผลการทดสอบรถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งเมื่อไลดาร์ตรวจพบว่ามีสิ่งกีดขวางในระยะ 3 m



รูปที่ 5.127 ผลการทดสอบหยุดวิ่งขนส่งนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งเดินหน้า

เมื่อรถโฟล์คลิฟท์ได้วิ่งผ่านไปและหลุดออกจากระยะ 3 m ทำให้รถขนส่งอัตโนมัติ เริ่มวิ่งทำงานต่อไปยังโกดังเก็บแบ็กเก็ต (จุดสิ้นสุด) และทดสอบกดปุ่ม Stop ที่ Dashboard Auto Mode ของ

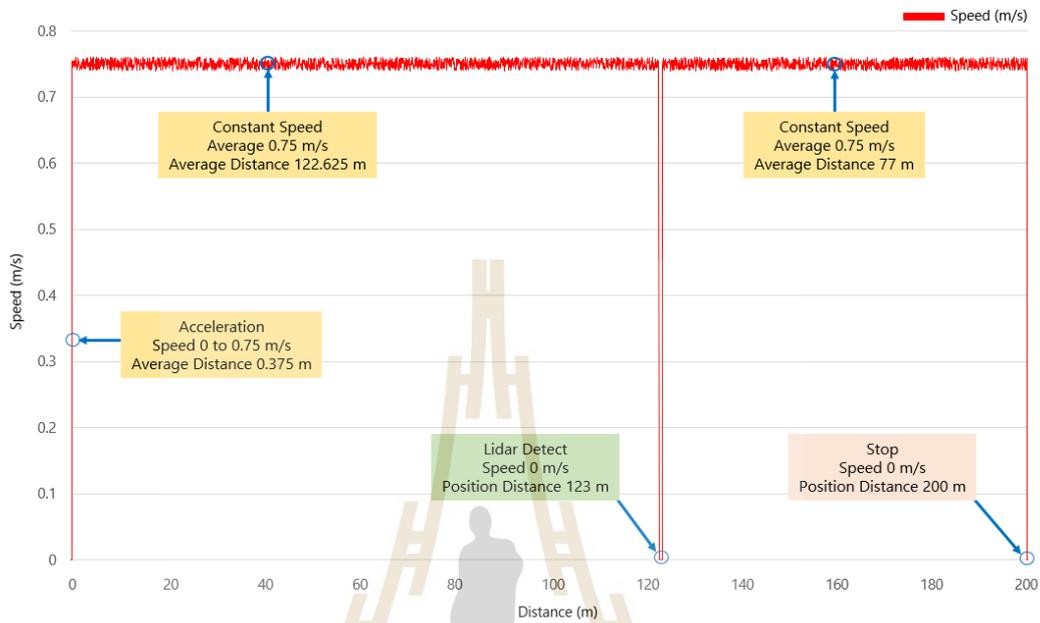
จอตัสกรีน ทำให้มีผลการทดสอบของรถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งนำทางอัตโนมัติในรูปแบบ Line Following ความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s และมุมของการบังคับเลี้ยว (Step 4) ในขณะที่บรรทุกแป้งมันสำปะหลัง น้ำหนัก 4,799 เพื่อ ดังรูปที่ 5.127 หลังจากนั้นทดสอบใช้รถโฟล์คลิฟท์รถโฟล์คลิฟท์ตักพาเลทลงจากรถขนส่งอัตโนมัติที่พาเลทให้ลงจากรถขนส่งอัตโนมัติจนหมด แสดงผลการทดสอบการใช้รถโฟล์คลิฟท์ตักพาเลทลงจากรถขนส่งอัตโนมัติทั้ง 2 พาเลท ดังรูปที่ 5.128 จึงถือว่าสิ้นสุดการทดสอบขนส่งแป้งมันสำปะหลังในกรณีวิ่งเดินหน้า สำหรับในกรณีวิ่งเดินหน้าเพื่อทดสอบขนส่งแป้งมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิต (จุดเริ่มต้น) ไปยังโกดังเก็บแป้ง (จุดสิ้นสุด) มีระยะทางขนส่งเฉลี่ย 200 m



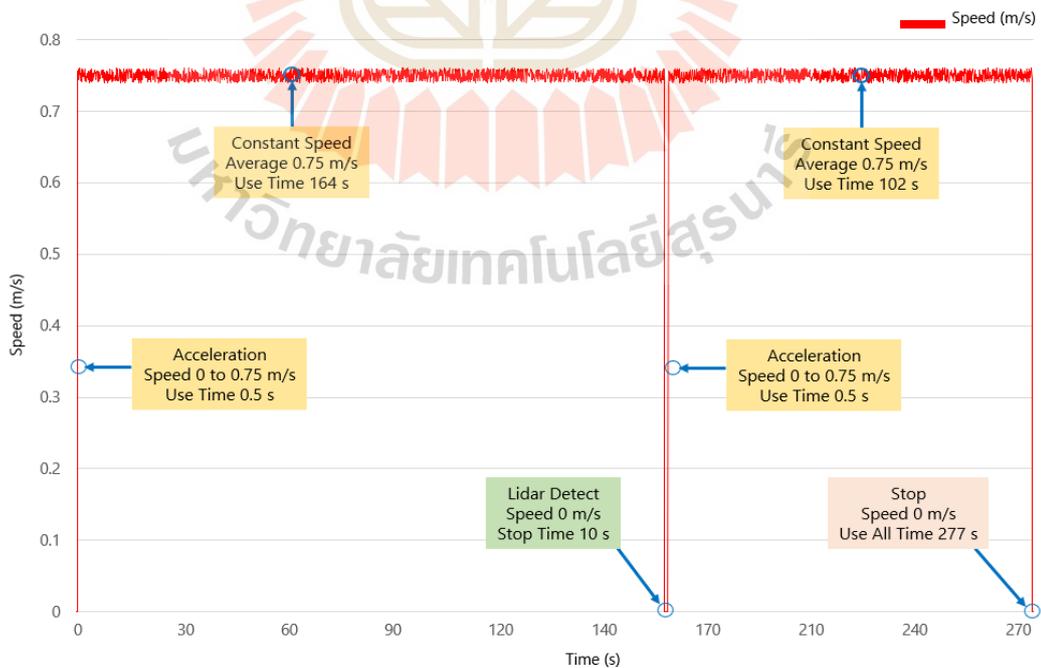
รูปที่ 5.128 ผลการทดสอบใช้รถโฟล์คลิฟท์ตักพาเลทลงจากรถขนส่งอัตโนมัติทั้ง 2 พาเลท

นอกจากนี้ยังมีผลการทดสอบวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้งด้วยรถขนส่งอัตโนมัติในกรณีวิ่งเดินหน้าบรรทุกแป้งมันสำปะหลังน้ำหนักรวม 4,799 kg ในระยะทางเฉลี่ยรวม 200 m ซึ่งใช้รูปแบบการวิ่งนำทางแบบอัตโนมัติในรูปแบบ Line Following ตลอดเส้นทางวิ่งขนส่ง และยังมี การตรวจจับสิ่งกีดขวาง เมื่อมีรถโฟล์คลิฟท์ขวางอยู่หน้ารถขนส่งอัตโนมัติในระยะ 3 m ที่ตำแหน่งระยะทาง 123 m โดยมีผลการทดสอบเพิ่มเติมแสดงในรูปแบบกราฟ ซึ่งมีผลการทดสอบจำนวน 6 กราฟ ได้แก่ 1.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วเปรียบเทียบกับระยะทาง 2.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วเปรียบเทียบกับเวลา 3.) กราฟแสดงความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลา 4.) กราฟแสดงความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลา 5.) กราฟแสดงความสัมพันธ์

แรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลา และ 6.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ C_x เปรียบเทียบกับระยะทาง จากผลการทดสอบรูปแบบกราฟทั้ง 6 กราฟ สามารถอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้



รูปที่ 5.129 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเปรียบเทียบกับระยะทางในกรณีวิ่งเดินทาง



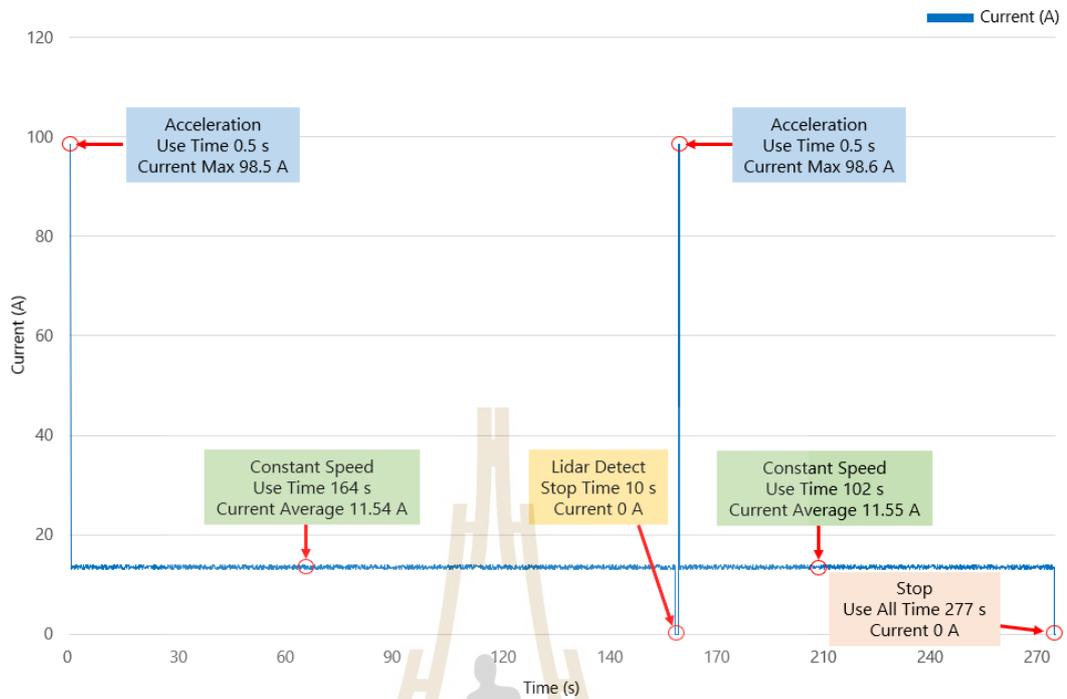
รูปที่ 5.130 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งเดินทาง

จากกราฟในรูปที่ 5.129 คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วเปรียบเทียบกับระยะทางในกรณีวิ่งเดินหน้า พบว่าจากไลน์ผลิต (จุดเริ่มต้น) รถขนส่งอัตโนมัติวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังมีช่วงเร่งออกตัวด้วยความเร็วจาก 0.00 m/s ถึง 0.75 m/s ในระยะทางเฉลี่ย 0.375 m และวิ่งต่อด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s ในระยะทาง 122.625 m แต่มีช่วงความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s เมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะ 3 m ที่ตำแหน่งระยะทาง 123 m จากนั้นเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s ในระยะทาง 77 m ไปยังโกดังเก็บแป้ง (จุดสิ้นสุด) รถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s ที่ตำแหน่งระยะทาง 200 m

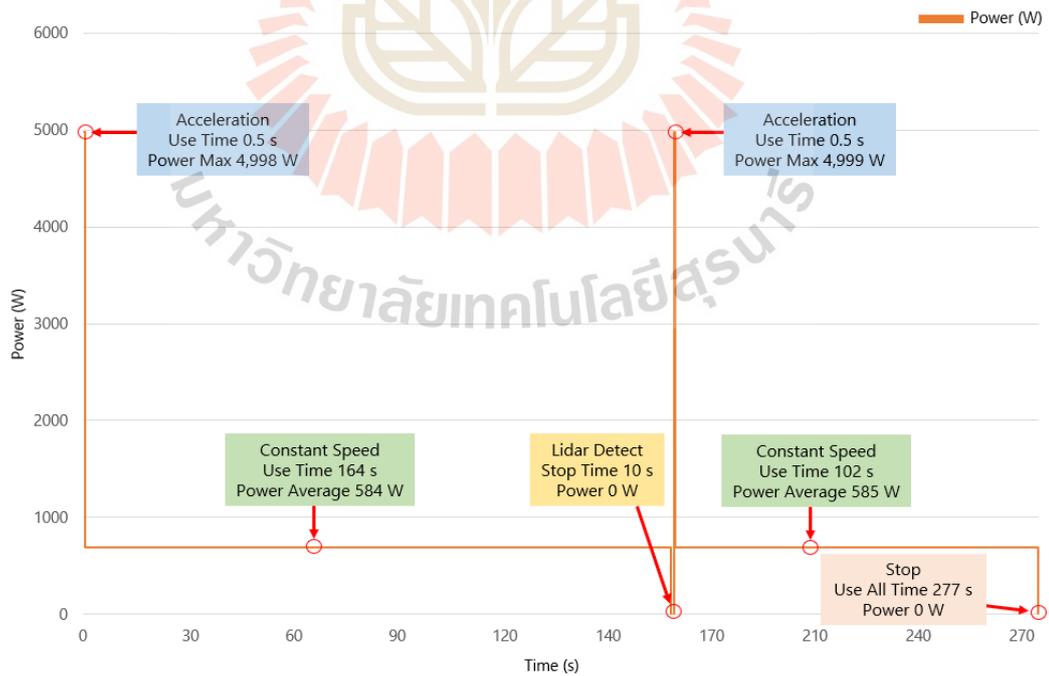
จากกราฟในรูปที่ 5.130 คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งเดินหน้า พบว่าจากไลน์ผลิต (จุดเริ่มต้น) รถขนส่งอัตโนมัติวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังมีช่วงเร่งออกตัวด้วยความเร็วจาก 0.00 m/s ถึง 0.75 m/s ใช้เวลาในการออกตัว 0.5 s และวิ่งต่อด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s แต่ความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s เมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะ 3 m ที่ตำแหน่งระยะทาง 123 m โดยใช้เวลาในการวิ่งถึงจุดที่พบสิ่งกีดขวาง 164 s และรถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่ง 10 s จากนั้นเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s ไปยังโกดังเก็บแป้ง (จุดสิ้นสุด) รถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s ซึ่งใช้เวลาในการวิ่งต่อมาถึงโกดังเก็บแป้ง 102 s ทำให้ใช้เวลาในการวิ่งตลอดเส้นทางขนส่งแป้งมันสำปะหลังจากไลน์ผลิตมายังโกดังเก็บแป้งทั้งหมด 277 s ในระยะทางวิ่งขนส่ง 200 m

จากกราฟในรูปที่ 5.131 คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งเดินหน้า พบว่าจากไลน์ผลิต (จุดเริ่มต้น) รถขนส่งอัตโนมัติวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังใช้เวลาเร่งออกตัว 0.5 s และใช้กระแสไฟฟ้าในการเร่งออกตัวสูงสุด 98.5 A จากนั้นวิ่งต่อโดยใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 11.54 A และใช้เวลา 164 s แต่มีช่วงกระแสไฟฟาลดลงเหลือ 0.00 A เมื่อรถขนส่งอัตโนมัติตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะ 3 m ที่ตำแหน่งระยะทาง 123 m จึงทำให้รถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งเป็นเวลา 10 s จากนั้นเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งต่อโดยใช้เวลาเร่งออกตัวอีกครั้ง 0.5 s และใช้กระแสไฟฟ้าในการเร่งออกตัวอีกครั้งสูงสุด 98.6 A วิ่งไปยังโกดังเก็บแป้ง (จุดสิ้นสุด) ซึ่งใช้เวลาในการวิ่งต่อมาถึงโกดังเก็บแป้ง 102 s โดยใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 11.55 A เมื่อถึงโกดังเก็บแป้งรถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งกระแสไฟฟ้าจึงลดลงเหลือ 0.00 A ในระยะทางวิ่งขนส่งจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้ง 200 m และใช้เวลา 277 s

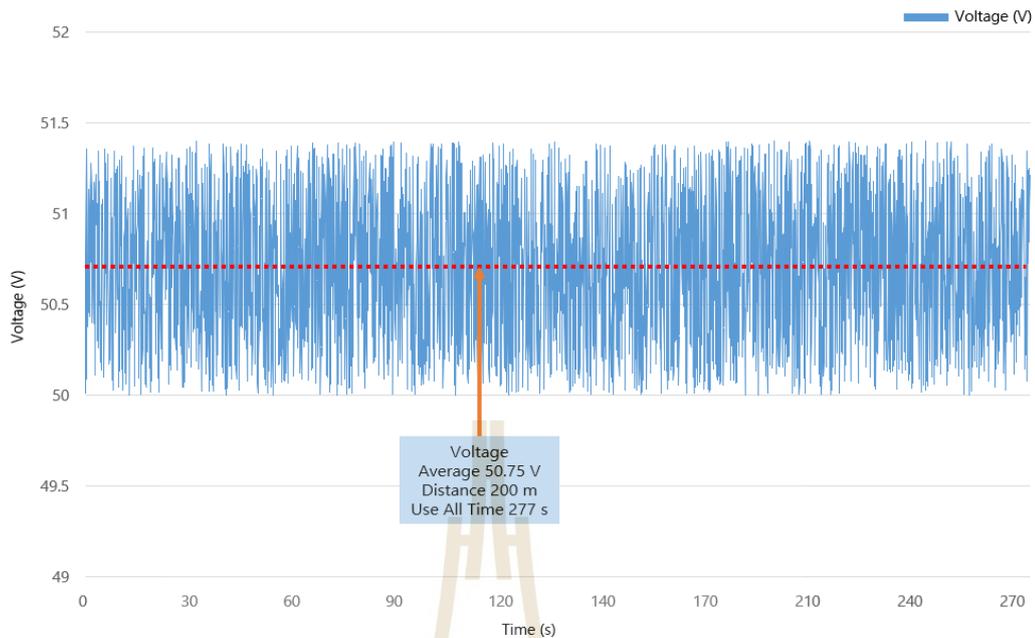
จากกราฟในรูปที่ 5.132 คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งเดินหน้า พบว่าจากไลน์ผลิต (จุดเริ่มต้น) รถขนส่งอัตโนมัติวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังใช้เวลาเร่งออกตัว 0.5 s และใช้กำลังไฟฟ้าในการเร่งออกตัวสูงสุด 4,998 W จากนั้นวิ่งต่อโดยใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 584 W และใช้เวลา 164 s แต่มีช่วงกำลังไฟฟาลดลงเหลือ 0 W เมื่อรถขนส่งอัตโนมัติตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะ 3 m ที่ตำแหน่งระยะทาง 123 m จึงทำให้รถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งเป็นเวลา 10 s จากนั้นเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งต่อโดยใช้เวลาเร่งออกตัวอีกครั้ง 0.5 s และใช้กำลังไฟฟ้าในการเร่งออกตัวอีกครั้งสูงสุด 4,999 W วิ่งไปยังโกดังเก็บแป้ง (จุดสิ้นสุด) ซึ่งใช้เวลาในการวิ่งต่อมาถึงโกดังเก็บแป้ง 102 s โดยใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 585 W เมื่อถึงโกดังเก็บแป้งรถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งกำลังไฟฟ้าจึงลดลงเหลือ 0 W ในระยะทางวิ่งขนส่งจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้ง 200 m และใช้เวลา 277 s



รูปที่ 5.131 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งเดินหน้า



รูปที่ 5.132 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งเดินหน้า



รูปที่ 5.133 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งเดินหน้า



รูปที่ 5.134 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Cx เปรียบเทียบกับระยะทางในกรณีวิ่งเดินหน้า

จากกราฟในรูปที่ 5.133 คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งเดินหน้า พบว่าจากไลน์ผลิต (จุดเริ่มต้น) รถขนส่งอัตโนมัติวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังใช้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 50.75 V ตลอดเส้นทางไปยังโกดังเก็บแป้ง (จุดสิ้นสุด) ในระยะทางวิ่งขนส่งจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้ง 200 m และใช้เวลา 277 s

จากกราฟในรูปที่ 5.134 คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ Cx เปรียบเทียบกับระยะทางในกรณีวิ่งเดินหน้า พบว่าจากไลน์ผลิต (จุดเริ่มต้น) รถขนส่งอัตโนมัติวิ่งขนส่งแบงก์น้ำมันสำปะหลัง มีค่า Find Contours and Center (Cx) อยู่ในช่วงเงื่อนไขของการควบคุมบังคับเลี้ยวในตำแหน่ง Center (Step 4) มุมล้ออยู่ตรงกลาง ตลอดเส้นทางไปยังโกดังเก็บแบงก์ (จุดสิ้นสุด) ด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s ในระยะทางวิ่งขนส่งจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแบงก์ 200 m และใช้เวลา 277 s

5.3.2 การทดสอบและผลการทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติในกรณีวิ่งถอยหลัง

สำหรับการทดสอบวิ่งรถเปล่าจากโกดังเก็บแบงก์กลับมายังไลน์ผลิตด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนของกระบวนการทำงานและรูปแบบการวิ่งรถเปล่าในกรณีวิ่งถอยหลังอ้างอิงจากรูปที่ 5.121 และรูปที่ 5.122 ตามลำดับ เริ่มต้นด้วยซอฟต์แวร์ของระบบตรวจสอบน้ำหนักในกรณีวิ่งถอยหลัง ทำการประมวลผลเพื่อตรวจสอบน้ำหนักว่ามีค่าการตกพาละหลงจากรถขนส่งอัตโนมัติหรือไม่ ผลการทดสอบพบว่าที่ Dashboard Auto Mode ของจอทัสกรีนแสดงค่า (Load : 0 kg) ดังรูปที่ 5.135 ซึ่งหมายความว่ารถโฟล์คคลิฟท์ได้ทำการตกพาละหลงจากรถขนส่งอัตโนมัติหมดแล้วน้ำหนักที่บรรทุกบนรถขนส่งอัตโนมัติมีค่าเท่ากับ 0 kg ทำให้รถขนส่งอัตโนมัติสามารถวิ่งจากโกดังเก็บแบงก์กลับมายังไลน์ผลิตในกรณีวิ่งถอยหลังได้



รูปที่ 5.135 ผลการทดสอบตรวจสอบน้ำหนักรถเปล่า (Load : 0 kg) ก่อนทำการวิ่งถอยหลัง

หลังจากนั้นทดสอบกดปุ่มสัมผัสที่ Dashboard Auto Mode ที่ปุ่ม Reverse เพื่อเริ่มทดสอบการวิ่งรถเปล่าในกรณีวิ่งถอยหลังจากโกดังเก็บแบงก์กลับมายังไลน์ผลิต โดยใช้ซอฟต์แวร์ฟังก์ชัน Open CV รูปแบบ Line Following ด้วยเงื่อนไขกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรถกับมุมในการบังคับเลี้ยวของเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 7 ช่วง รวมทั้งขอบเขตภาพจากเฟรมกล้องที่กำหนดไว้คือ $frame[Cy, Cx]$ เท่ากับ $frame[0:480, 0:640]$ โดยกำหนดขอบเขตในการ Find Contours and Center ค่า Cx $[0:640]$ และ Cy $[300:480]$ ของแต่ละช่วงที่สัมพันธ์กับมุมเลี้ยว ซึ่งความสัมพันธ์ของมุมเลี้ยวมีค่าตรงกันข้ามกับกรณีวิ่งเดินหน้า ดังตารางที่ 5.11 ในการการนำทางอัตโนมัติด้วยการใช้กล้องสำหรับวิ่งถอยหลังตรวจจับเส้นสีที่กำหนดไว้บนพื้นถนนของทางบริษัทเตรียมไว้เพื่อทดสอบ โดย

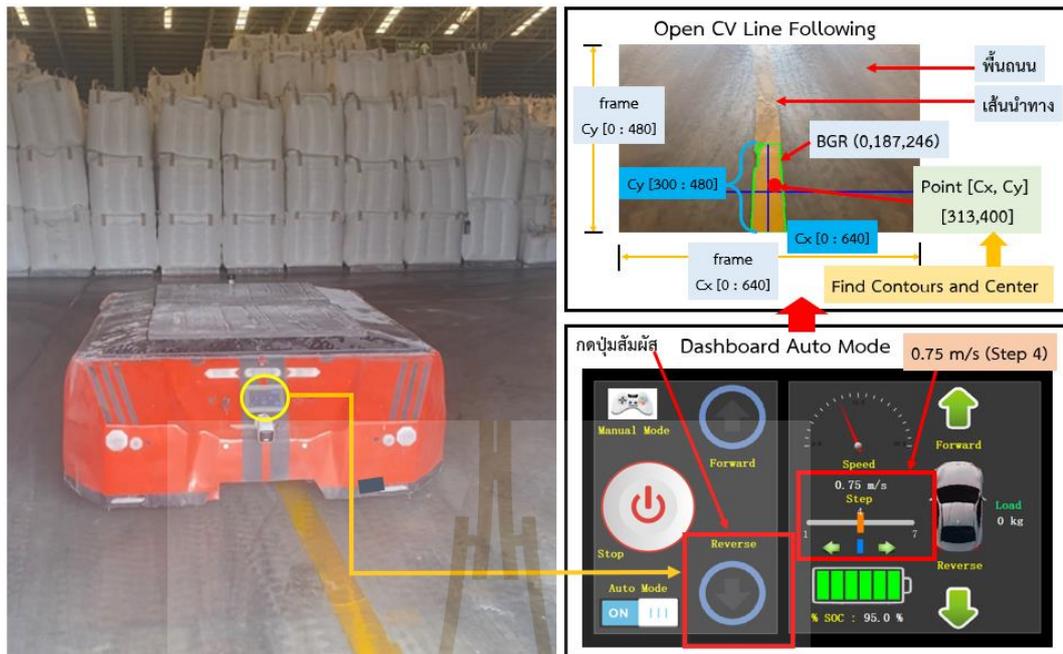
มีรหัสสี่รูปแบบ BRG ซึ่งกำหนดขอบเขตของรหัสสี่ทั้ง 4 ช่วง ใช้เหมือนกันกับกรณีวิ่งเดินทางหน้า ดังตารางที่ 5.10 ดังนั้นผลการทดสอบวิ่งรถเปล่าด้วยการนำทางอัตโนมัติในรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งถอยหลัง พบว่าที่ระยะเริ่มออกตัว (จุดเริ่มต้น) ภาพจากกล้องมีการ Find Contours and Center ซึ่งแสดง Point [Cx, Cy] เท่ากับ [313, 400] โดยอยู่ในขอบเขตที่กำหนดของระยะ [Cy, Cx] เท่ากับ [300:480, 0:640] และแสดงการตรวจจับสี่เส้นถนนบนพื้นในรูปแบบ BGR (0,187,246) ระบบบังคับเลี้ยวของเซอร์โวมอเตอร์ Step 4 วิ่งด้วยความเร็ว 0.75 m/s ซึ่งไม่มีการบรรทุกแบงก์น้ำมันสำปะหลัง น้ำหนัก 0 kg วิ่งรถเปล่าจากโกดังเก็บแบงก์กลับมายังไลน์ผลิตมีผลการทดสอบ ดังรูปที่ 5.136

ตารางที่ 5.11 เงื่อนไขทดสอบวิ่งนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งถอยหลัง

เงื่อนไข (ลำดับ)	ความเร็ว (m/s)	Cy	Cx	Servo Motor (Step)	มุมเลี้ยว (องศา)
1	0.25	300 ถึง 480	600 ถึง 640	7	Right Angle 30
2	0.35	300 ถึง 480	440 ถึง 600	6	Right Angle 20
3	0.50	300 ถึง 480	360 ถึง 440	5	Right Angle 10
4	0.75	300 ถึง 480	280 ถึง 360	4	Center Angle 0
5	0.50	300 ถึง 480	200 ถึง 280	3	Left Angle -10
6	0.35	300 ถึง 480	40 ถึง 200	2	Left Angle -20
7	0.25	300 ถึง 480	0 ถึง 40	1	Left Angle -30

ในระหว่างวิ่งนำทางอัตโนมัติทดสอบให้พนักงานยืนขวางด้านหลังรถขนส่งอัตโนมัติ ในเส้นทางประมาณตำแหน่งที่ 145 m (เริ่มต้นจากโกดังเก็บแบงก์ตำแหน่งระยะทาง 0 m กลับไปยังไลน์ผลิตตำแหน่งระยะทาง 200 m) รถขนส่งอัตโนมัติจึงหยุดวิ่งความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s และมุมของการบังคับเลี้ยว (Step 4) ในขณะที่วิ่งรถเปล่าโดยไม่มีการบรรทุกแบงก์น้ำมันสำปะหลัง เนื่องจากไลดาร์ตรวจพบว่ามีสิ่งกีดขวางในระยะ 6 m ที่กำหนดเงื่อนไขไว้ในซอฟต์แวร์ของระบบ ตรวจจับสิ่งกีดขวาง ทำให้มีผลการทดสอบของระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางที่แสดงผล Dashboard Auto Mode ของจอทัสกรีนแจ้งเตือนโดยแสดงรูป Lidar Detect ดังรูปที่ 5.137

เมื่อพนักงานได้เดินออกจากหลังรถขนส่งอัตโนมัติและหลุดออกจากระยะ 6 m ทำให้รถขนส่งอัตโนมัติเริ่มวิ่งทำงานต่อไปยังไลน์ผลิต และทดสอบกดปุ่ม Stop ที่ Dashboard Auto Mode ของจอทัสกรีน ทำให้มีผลการทดสอบของรถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งนำทางอัตโนมัติในรูปแบบ Line Following ความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s และมุมของการบังคับเลี้ยว (Step 4) ในขณะที่วิ่งรถเปล่าไม่มีการบรรทุกแบงก์น้ำมันสำปะหลัง แสดงผลการทดสอบ ดังรูปที่ 5.138 จึงถือว่าสิ้นสุดกระบวนการในกรณีวิ่งถอยหลัง เพื่อรอกระบวนการขนส่งแบงก์น้ำมันสำปะหลังในจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแบงก์ในรอบถัดไป



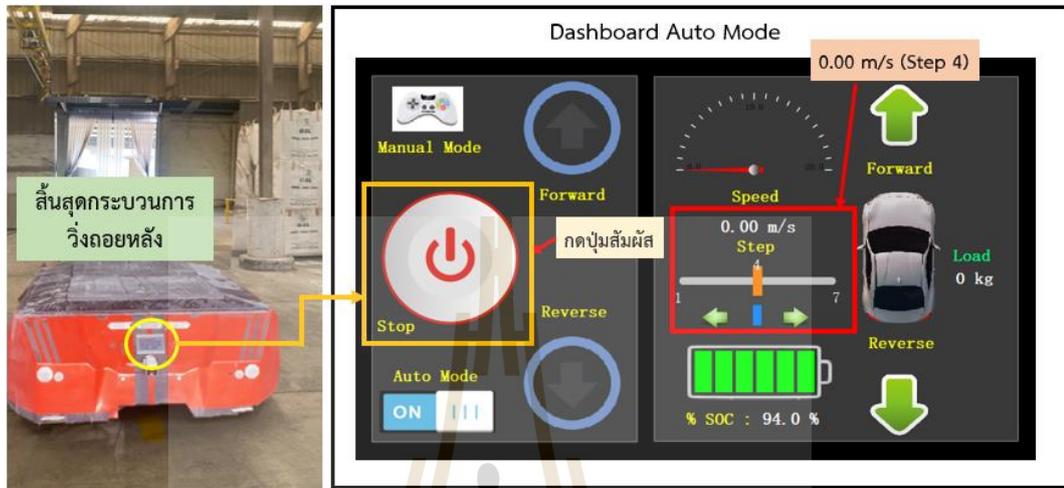
รูปที่ 5.136 ผลการทดสอบวิ่งนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวิ่งถอยหลัง



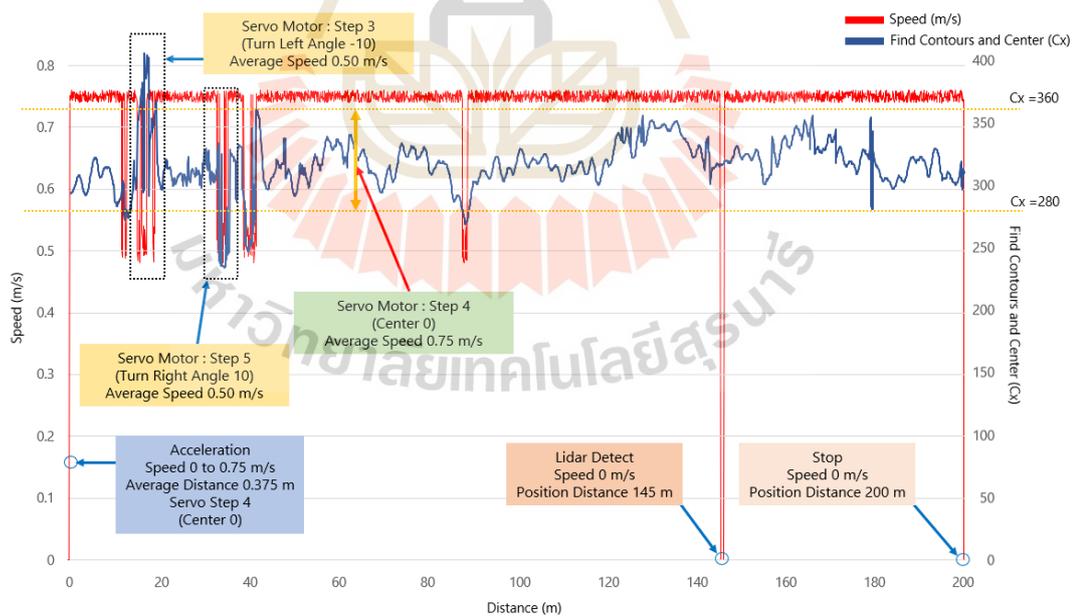
รูปที่ 5.137 ผลการทดสอบรถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งเมื่อไลดาร์ตรวจพบว่ามีสิ่งกีดขวางในระยะ 6 m

นอกจากนี้ยังมีผลการทดสอบวิ่งรถเปล่าจากโกดังเก็บแป้งกลับมายังไลน์ผลิตด้วยรถขนส่งอัตโนมัติในกรณีวิ่งถอยหลัง โดยไม่มีการบรรทุกแป้งมันสำปะหลังน้ำหนัก Load 0 kg ในระยะทางเฉลี่ยรวม 200 m ซึ่งใช้รูปแบบการวิ่งนำทางแบบอัตโนมัติในรูปแบบ Line Following ตลอดเส้นทางวิ่งขนส่ง และยังมีการตรวจจับสิ่งกีดขวางเมื่อมีพนักงานขวางอยู่หลังรถขนส่งอัตโนมัติในระยะ 6 m ที่ตำแหน่งระยะทาง 145 m โดยมีผลการทดสอบเพิ่มเติมแสดงในรูปแบบกราฟ ซึ่งมีผลการทดสอบจำนวน 4 กราฟ ได้แก่ 1.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วและ Cx เปรียบเทียบกับ

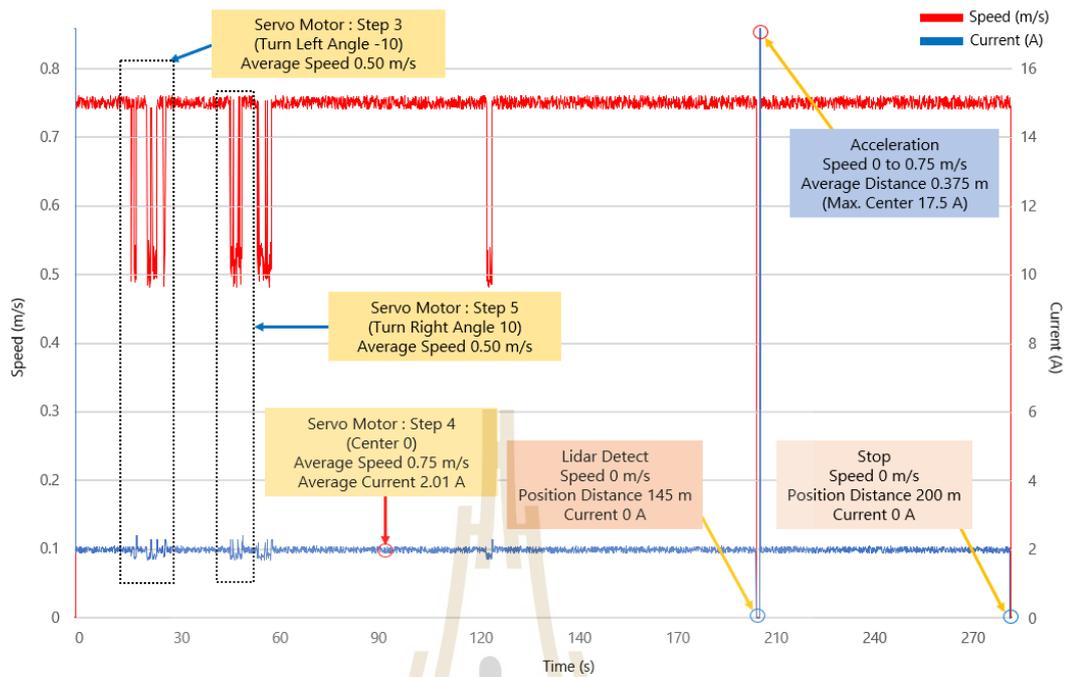
ระยะทาง 2.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วและกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลา 3.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วและกำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลา 4.) กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลา จากผลการทดสอบรูปแบบกราฟทั้ง 4 กราฟ สามารถชี้แจงรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้



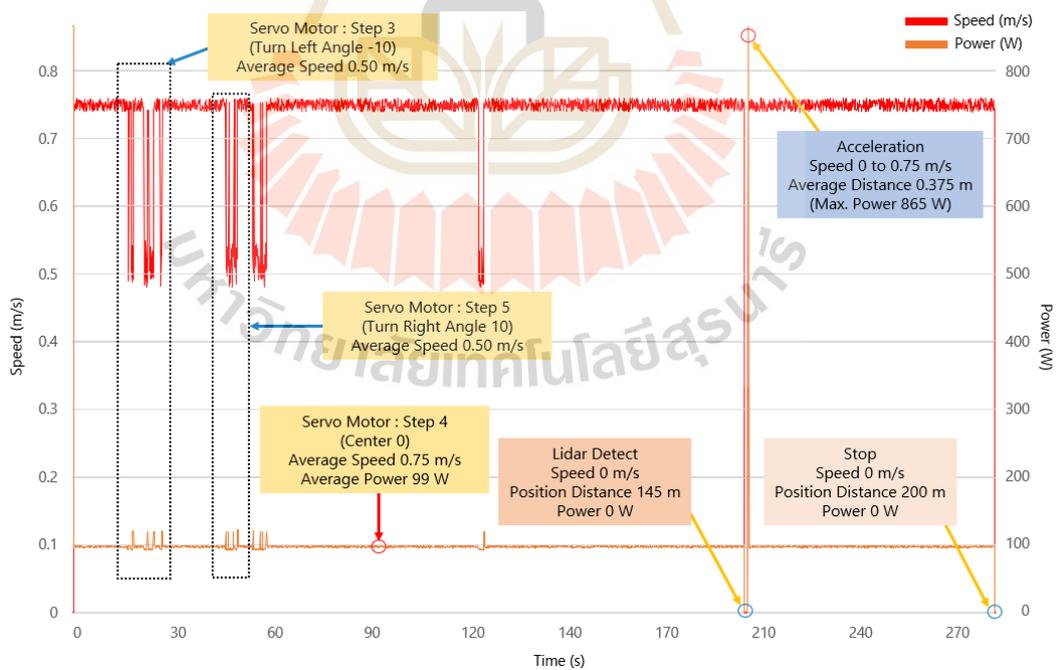
รูปที่ 5.138 ผลการทดสอบหยุดวงรีนำทางอัตโนมัติรูปแบบ Line Following ในกรณีวงรีหลัง



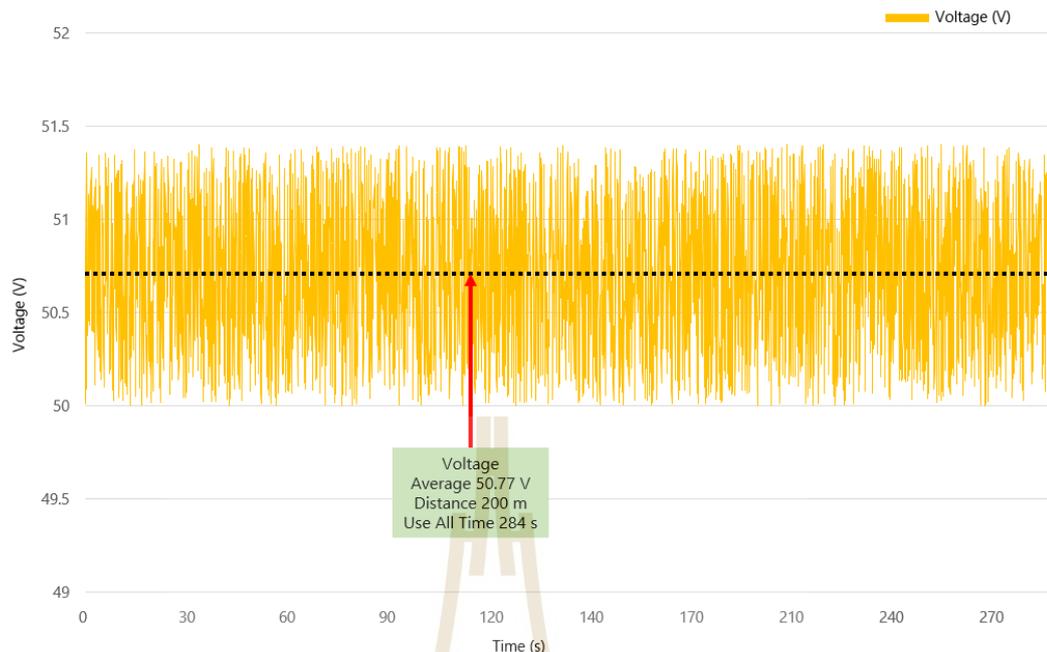
รูปที่ 5.139 กราฟแสดงความสัมพันธ์ Cx, ความเร็ว และระยะทางในกรณีวงรีหลัง



รูปที่ 5.140 กราฟแสดงความสัมพันธ์กระแสไฟฟ้า ความเร็ว และเวลาในกรณีวิ่งถอยหลัง



รูปที่ 5.141 กราฟแสดงความสัมพันธ์กำลังไฟฟ้า ความเร็ว และเวลาในกรณีวิ่งถอยหลัง



รูปที่ 5.142 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งถอยหลัง

จากกราฟในรูปที่ 5.139 คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วและ C_x เปรียบเทียบกับระยะทางในกรณีวิ่งถอยหลัง พบว่าจากโกดังเก็บแปรงรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งถอยหลังมีช่วงเร่งออกตัวด้วยความเร็วจาก 0.00 m/s ถึง 0.75 m/s ในระยะทางเฉลี่ย 0.375 m โดยมีการบังคับเลี้ยวอยู่ในตำแหน่งมุมล้ออยู่ตรงกลาง (Center 0) จากเงื่อนไขบังคับเลี้ยวที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5.11 ที่ตำแหน่งมุมล้อ (Center 0 ซึ่งค่า C_x อยู่ในช่วง 280 ถึง 360) วิ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s ในระหว่างวิ่งถอยหลัง พบว่ามีช่วงของค่า C_x เกินค่า 280 ทำให้การบังคับเลี้ยวซ้าย 10 องศา (Left Angle -10) และมีช่วงของค่า C_x เกินค่า 360 ทำให้การบังคับเลี้ยวขวา 10 องศา (Right Angle 10) โดยความเร็วลดลงเหลือ 0.50 m/s แต่มีช่วงความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s เมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะ 6 m ที่ตำแหน่งระยะทาง 145 m จากนั้นเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s กลับมายังไลน์ผลิต เมื่อถึงไลน์ผลิตรถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s ที่ตำแหน่งระยะทาง 200 m

จากกราฟในรูปที่ 5.140 คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วและกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งถอยหลัง พบว่าจากโกดังเก็บแปรงรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งถอยหลังมีช่วงเร่งออกตัวด้วยความเร็วจาก 0.00 m/s ถึง 0.75 m/s ใช้กระแสไฟฟ้าในการออกตัว 17.5 A โดยมีการบังคับเลี้ยวจากความสัมพันธ์ในกราฟรูปที่ 5.137 วิ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s ในระหว่างวิ่งถอยหลังพบว่ามี การบังคับเลี้ยวซ้าย 10 องศา (Left Angle -10) และมีการบังคับเลี้ยวขวา 10 องศา (Right Angle 10) โดยความเร็วลดลงเหลือ 0.50 m/s ทำให้กระแสไฟฟ้าลดลงเล็กน้อยและวิ่งต่อด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s ใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 2.01 A แต่มีช่วงความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s เมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะ 6 m ที่ตำแหน่งระยะทาง 145 m ทำให้กระแสไฟฟ้าลดลง

เหลือ 0 A จากนั้นเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งต่อโดยใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 2.01 A ด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s กลับมายังไลน์ผลิต เมื่อถึงไลน์ผลิตรถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s และกระแสไฟฟ้าลดลงเหลือ 0 A ที่ตำแหน่งระยะทาง 200 m และใช้เวลาทั้งหมด 284 s

จากกราฟในรูปที่ 5.141 คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วและกำลังไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งถอยหลัง พบว่าจากโกดังเก็บแปรงรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งถอยหลังมีช่วงเร่งออกตัวด้วยความเร็วจาก 0.00 m/s ถึง 0.75 m/s ใช้กำลังไฟฟ้าในการออกตัว 865 W โดยมีการบังคับเลี้ยวจากความสัมพันธ์ในกราฟรูปที่ 5.137 วิ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s ในระหว่างวิ่งถอยหลังพบว่าการบังคับเลี้ยวซ้าย 10 องศา (Left Angle -10) และมีการบังคับเลี้ยวขวา 10 องศา (Right Angle 10) โดยความเร็วลดลงเหลือ 0.50 m/s ทำให้กำลังไฟฟ้าน้อยลงเล็กน้อย และวิ่งต่อด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s ใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 99 W แต่มีช่วงความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s เมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะ 6 m ที่ตำแหน่งระยะทาง 145 m ทำให้กำลังไฟฟ้าน้อยลงเหลือ 0 W จากนั้นเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวางรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งต่อโดยใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 99 W ด้วยความเร็วเฉลี่ย 0.75 m/s กลับมายังไลน์ผลิต เมื่อถึงไลน์ผลิตรถขนส่งอัตโนมัติหยุดวิ่งความเร็วลดลงเหลือ 0.00 m/s และกำลังไฟฟ้าน้อยลงเหลือ 0 W ที่ตำแหน่งระยะทาง 200 m และใช้เวลาทั้งหมด 284 s

จากกราฟในรูปที่ 5.142 คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาในกรณีวิ่งถอยหลัง พบว่าจากโกดังเก็บแปรงรถขนส่งอัตโนมัติวิ่งถอยหลังโดยใช้แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 50.77 V ตลอดเส้นทางกลับมายังไลน์ผลิต ในระยะทางวิ่ง 200 m และใช้เวลาทั้งหมด 284 s

5.3.3 สรุปผลทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติในกรณีวิ่งเดินทางและวิ่งถอยหลัง

ในส่วนสรุปผลการทดสอบสมรรถนะของรถขนส่งอัตโนมัติที่มีพิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg วิ่งขนส่งแปรงไม้สำหรับระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแปรง ซึ่งมีรูปแบบการนำทางแบบอัตโนมัติ โดยใช้กล้องนำทางของทั้งกล้องวิ่งเดินทางและกล้องวิ่งถอยหลัง ทดสอบโดยใช้ซอฟต์แวร์ฟังก์ชัน Open CV รูปแบบ Line Following พบว่าเป็นไปตามเงื่อนไขกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการขับเคลื่อนและมุมในการบังคับเลี้ยวของเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 7 ช่วง และมีเงื่อนไขในการตรวจจับสิ่งกีดขวางด้วยไลดาร์ในระหว่างวิ่งนำทางอัตโนมัติในกรณีวิ่งเดินทางในระหว่างตรวจจับในกรณีวิ่งถอยหลังในระยะตรวจจับ 6 m รวมทั้งเงื่อนไขการตรวจสอบน้ำหนักที่ใช้โหลดเซลล์ของรถขนส่งอัตโนมัติทั้งในกรณีวิ่งเดินทางและในกรณีวิ่งถอยหลัง ทั้งนี้จากผลการทดสอบจากหัวข้อที่ 5.3.1 (กรณีวิ่งเดินทาง) และหัวข้อที่ 5.3.2 (กรณีวิ่งถอยหลัง) ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ใช้งานจริงและผลจากการคำนวณเพื่อใช้ในการออกแบบที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งเปรียบเทียบเฉพาะในส่วนหลัก ๆ คือ การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของรถขนส่งอัตโนมัติ เพื่อให้เข้าใจว่าสิ่งที่ได้จากการคำนวณเพื่อใช้ออกแบบและในส่วนของการพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดสอบใช้งานจริง นั้นมีแนวโน้มของทางทฤษฎีและหลักการเป็นไปในทางเดียวกันหรือไม่ รวมทั้งใช้เป็นหลักการตรวจสอบความถูกต้องตามที่ได้ออกแบบทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยมีการเปรียบเทียบผลการทดสอบดังกล่าวในตารางที่ 5.12 ดังนี้

ตารางที่ 5.12 เปรียบเทียบ % ความคลาดเคลื่อนผลที่ได้จากการคำนวณและผลทดสอบใช้งานจริง

กรณี	พารามิเตอร์	ผลจากการคำนวณ	ผลทดสอบจริง	ความคลาดเคลื่อน (%)
วิ่งเดินหน้า	กำลังไฟฟ้า P_e (W) ในช่วงเร่งออกตัว	4,890 W	4,998 W	2.16 %
	กำลังไฟฟ้า P_e (W) ในช่วงความเร็วคงที่	566 W	584 W	3.08 %
วิ่งถอยหลัง	กำลังไฟฟ้า P_e (W) ในช่วงเร่งออกตัว	843 W	865 W	2.54 %
	กำลังไฟฟ้า P_e (W) ในช่วงความเร็วคงที่	97 W	99 W	2.02 %
รวม	กำลังไฟฟ้ารวม P_e (W)	6,396 W	6,546 W	2.29 %
วิ่งเดินหน้า	พลังงานไฟฟ้า E_{FT} (kWh)	0.053 kWh	0.052 kWh	1.92 %
วิ่งถอยหลัง	พลังงานไฟฟ้า E_{RT} (kWh)	0.009 kWh	0.0088 kWh	2.27 %
รวม	พลังงานไฟฟ้ารวม E_T (kWh)	0.062 kWh	0.061 kWh	1.63 %

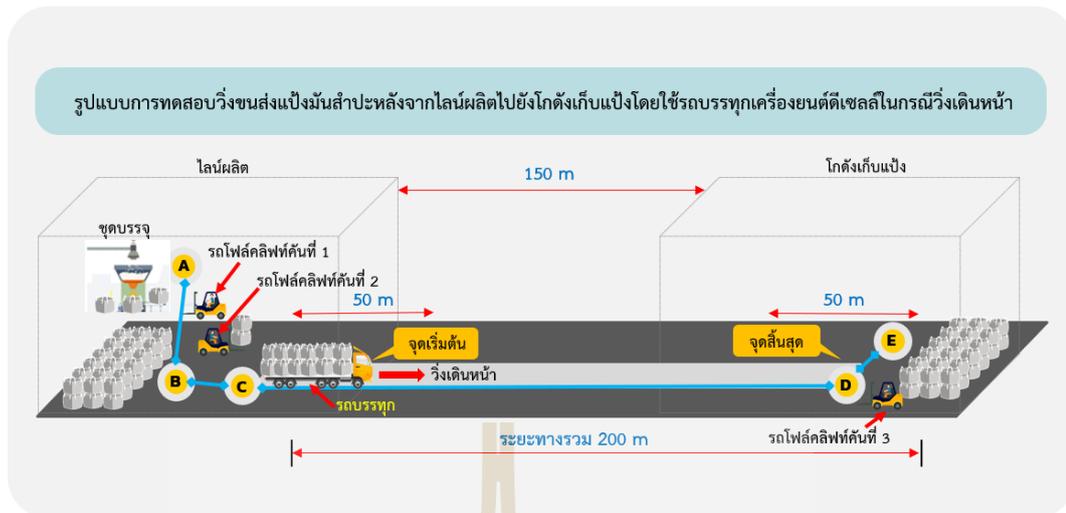
จากตารางที่ 5.12 พบว่าผลทดสอบกำลังไฟฟ้าของรถขนส่งอัตโนมัติกรณีวิ่งเดินหน้า ในช่วงเร่งออกตัว โดยมีผลจากการคำนวณ เท่ากับ 4,890 W และผลจากการทดสอบใช้งานจริง เท่ากับ 4,998 W ซึ่งมี % ความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 2.16 % ถัดมาผลทดสอบกำลังไฟฟ้า กรณีวิ่งเดินหน้าในช่วงความเร็วคงที่ โดยมีผลจากการคำนวณ เท่ากับ 566 W และผลจากการทดสอบใช้งานจริง เท่ากับ 584 W ซึ่งมี % ความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 3.08 % รวมทั้งผลทดสอบพลังงานไฟฟ้ากรณีวิ่งเดินหน้า โดยมีผลจากการคำนวณ เท่ากับ 0.053 kWh และผลจากการทดสอบใช้งานจริง เท่ากับ 0.052 kWh ซึ่งมี % ความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 1.92 % สำหรับผลทดสอบกำลังไฟฟ้าของรถขนส่งอัตโนมัติกรณีวิ่งถอยหลังในช่วงเร่งออกตัว โดยมีผลจากการคำนวณ เท่ากับ 843 W และผลจากการทดสอบใช้งานจริง เท่ากับ 865 W ซึ่งมี % ความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 2.54 % ถัดมาผลทดสอบกำลังไฟฟ้ากรณีวิ่งถอยหลังในช่วงความเร็วคงที่ โดยมีผลจากการคำนวณ เท่ากับ 97 W และผลจากการทดสอบใช้งานจริง เท่ากับ 99 W ซึ่งมี % ความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 2.02 % รวมทั้งผลทดสอบพลังงานไฟฟ้ากรณีวิ่งถอยหลัง โดยมีผลจากการคำนวณ เท่ากับ 0.009 kWh และผลจากการทดสอบใช้งานจริง เท่ากับ 0.0088 kWh ซึ่งมี % ความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 2.27 % ดังนั้นจากผลการทดสอบการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของรถขนส่งอัตโนมัติ สามารถสรุปได้ว่ามีแนวโน้มของทางทฤษฎีและหลักการที่ใช้คำนวณเพื่อออกแบบเป็นไปในทางเดียวกัน และสามารถใช้เป็นหลักการตรวจสอบความถูกต้องโดยพัฒนาขึ้นมาทดสอบใช้งานจริง เพื่อให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง

5.4 การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานของรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ

สำหรับหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานของรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ โดยการขนส่งแ่งมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแ่งแบบดั้งเดิมของบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด ใช้รถบรรทุกยี่ห้อ อีซูซุ ดังรูปที่ 5.143 ซึ่งจากการสำรวจข้อมูลการใช้งานรถบรรทุกขนส่งแ่งมันสำปะหลัง พบว่ามีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิงดีเซลเฉลี่ย 4.34 L/km (ลิตร/กิโลเมตร) โดยใช้รถบรรทุกทดสอบบรรทุกแ่งมันสำปะหลังจำนวน 24 กระสอบ ต่อ รอบ แต่ละกระสอบบรรจุแ่งมันสำปะหลัง 1,200 kg ทำให้มีน้ำหนักบรรทุกรวม 28,800 kg ซึ่งรถบรรทุกสามารถรับพิกัดบรรทุกสูงสุดได้ 28,800 kg โดยรูปแบบการขนส่งแ่งมันสำปะหลังในกรณีวิ่งเดินทางจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแ่ง เริ่มจากใช้รถโฟล์คลิฟท์คันที่ 1 ตักกระสอบแ่งที่ออกจากชุดบรรจุของไลน์ผลิต (จุด A) มาวางทับกันบนพาเลทจำนวน 2 กระสอบ ในพื้นที่จัดเตรียมไว้ (จุด B) ใช้รถโฟล์คลิฟท์คันที่ 2 ตักพาเลทที่วางกระสอบแ่งมีน้ำหนักรวมเฉลี่ย 28,800 kg ไปวางบนรถบรรทุกที่จอดรอสำหรับวิ่งขนส่ง (จุด C) จากนั้นรถบรรทุกวิ่งขนส่งแ่งมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแ่ง (จุด D) ในระยะทางขนส่งเฉลี่ยรวม 200 m และให้รถโฟล์คลิฟท์คันที่ 3 ตักพาเลทลงจากรถบรรทุกเพื่อไปจัดวางในพื้นที่ของโกดังเก็บแ่งที่จัดเตรียมไว้ (จุด E) แสดงแผนภาพตัวอย่างรูปแบบการวิ่งขนส่ง ดังรูปที่ 5.144



รูปที่ 5.143 รถบรรทุกที่ใช้ทดสอบขนส่งแ่งมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแ่ง



รูปที่ 5.144 รูปแบบการวิ่งขนส่งน้ำมันสำปะหลังจากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแ่งด้วยรถบรรทุก

ในกรณีวิ่งถอยหลังซึ่งเป็นรูปแบบการวิ่งรถเปล่าจากโกดังเก็บแ่งกลับมายังไลน์ผลิตที่มีระยะทางเฉลี่ยรวม 200 m ด้วยรถบรรทุก โดยมีรูปแบบการวิ่งรถเปล่า ในกรณีวิ่งถอยหลังจากโกดังเก็บแ่งกลับมายังไลน์ผลิต เริ่มจากจุดที่รถเปล่าจอดอยู่ (จุด D) วิ่งถอยหลังจากโกดังเก็บแ่งกลับมายังไลน์ผลิต (จุด C) ในระยะทางเฉลี่ยรวม 200 m จากนั้นให้รถหยุดรอกระบวนการวิ่งขนส่งน้ำมันสำปะหลังในรอบถัดไป แสดงแผนภาพตัวอย่างรูปแบบการวิ่งรถเปล่าจากโกดังเก็บแ่งกลับมายังไลน์ผลิต ดังรูปที่ 5.145



รูปที่ 5.145 รูปแบบการวิ่งขนส่งน้ำมันสำปะหลังจากโกดังเก็บแ่งกลับมายังไลน์ผลิตด้วยรถบรรทุก

สำหรับเป้าหมายในการทดสอบขนส่งแ่งมันสำปะหลังจำนวน 480,000 kg ภายใน 1 วัน ของทางบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด พบว่าในกรณีแรกทดสอบขนส่งแ่งมันสำปะหลัง โดยใช้รถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซลที่มีพิกัดบรรทุก 28,800 kg ต่อรอบ ใน 1 วัน รถบรรทุกต้องวิ่งขนส่งจำนวน 17 รอบ ซึ่งใช้เวลาในการขนส่งต่อรอบเฉลี่ย 84 นาที (Minute) (รวมเวลาใช้รถโพล์คลิฟท์ ตักพาเลทขึ้นและตักพาเลทลง) โดยมีระยะทางวิ่งขนส่งของทั้งไปและกลับ 400 m ต่อรอบ ทำให้มีระยะทางวิ่งขนส่งรวมทั้งหมด 6,800 m หรือ 6.8 km และใช้เวลารวมทั้งหมด 1,428 นาที หรือ 23 ชั่วโมง (h) 48 นาที มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของรถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซลเฉลี่ย 4.34 L/km

ในกรณีที่สองทดสอบขนส่งแ่งมันสำปะหลังโดยใช้รถขนส่งอัตโนมัติที่มีพิกัดบรรทุกเฉลี่ย 4,800 kg ซึ่งมีผลทดสอบการใช้รถขนส่งอัตโนมัติขนส่งแ่งมันสำปะหลังจำนวน 10 รอบ ดังตารางที่ 5.13 เพื่อใช้เป็นข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของรถขนส่งอัตโนมัติเฉลี่ย ต่อ รอบ โดยใช้เวลาในการขนส่งเฉลี่ย 14.2 นาทีต่อรอบ มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเฉลี่ย E_T เท่ากับ 0.061 kWh ต่อรอบ ซึ่งใช้วิเคราะห์สำหรับทดสอบใน 1 วัน รถขนส่งอัตโนมัติต้องวิ่งขนส่งจำนวน 100 รอบ ซึ่งใช้เวลาในการขนส่งต่อรอบเฉลี่ย 14.2 นาที (รวมเวลาใช้รถโพล์คลิฟท์ ตักพาเลทขึ้นและตักพาเลทลง สำหรับเวลาที่รถขนส่งอัตโนมัติวิ่งจริงทั้งไปและกลับเฉลี่ย 10 นาที) โดยมีระยะทางวิ่งขนส่งของทั้งไปและกลับ 400 m ต่อรอบ ทำให้มีระยะทางวิ่งขนส่งรวมทั้งหมด 40,000 m หรือ 40.0 km และใช้เวลา รวมทั้งหมด 1,420 นาที หรือ 23 ชั่วโมง 40 นาที มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของขนส่งอัตโนมัติเฉลี่ย 0.061 kWh ต่อรอบ โดยการทดสอบขนส่งแ่งมันสำปะหลังทั้ง 2 กรณี ดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.13 ผลทดสอบการใช้รถขนส่งอัตโนมัติขนส่งแ่งมันสำปะหลังจำนวน 10 รอบ

การขนส่ง (รอบ)	เวลาเริ่มและสิ้นสุดการขนส่ง	เวลา (นาที) ขนส่งต่อรอบ	จำนวนสิ่งกีดขวาง (ครั้ง)	การใช้พลังงานเฉลี่ย E_T (Kwh) ต่อรอบ
รอบที่ 1	9.00-9.15 น.	15	2	0.061
รอบที่ 2	9.15-9.31 น.	16	5	0.063
รอบที่ 3	9.31-9.43 น.	12	0	0.060
รอบที่ 4	9.43-9.57 น.	14	1	0.061
รอบที่ 5	9.57-10.11 น.	14	1	0.061
รอบที่ 6	10.11-10.25 น.	14	1	0.061
รอบที่ 7	10.25-10.41 น.	16	4	0.062
รอบที่ 8	10.41-10.56 น.	15	2	0.061
รอบที่ 9	10.56-11.10 น.	14	1	0.061
รอบที่ 10	11.10-11.22 น.	12	0	0.060
ใช้เวลาเฉลี่ย ต่อ รอบ		14.2 นาที	E_T เฉลี่ย ต่อ รอบ	0.061 kWh

หมายเหตุ: 1. เวลาในการขนส่งต่อรอบ ซึ่งรวมเวลาที่ใช้รถโพล์คลิฟท์ ตักพาเลทขึ้นและตักพาเลทลง
2. จำนวนสิ่งกีดขวาง (ครั้ง) เป็นจำนวนรวมทั้งในกรณีวิ่งเดินหน้าและวิ่งถอยหลัง

ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบผลทดสอบขนส่งแบริ่งน้ำมันสำปะหลังระหว่างรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ

ชนิดรถขนส่ง	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน (เฉลี่ย)	จำนวนรอบขนส่ง	ระยะทางวิ่งขนส่งทั้งหมด	เวลาที่ใช้ขนส่งทั้งหมด
รถบรรทุก พิกัด 28,800 kg	น้ำมันดีเซล 4.34 L/km	วิ่งขนส่ง 17 รอบ	เฉลี่ย 6.8 km	23 ชั่วโมง (h) 48 นาที
รถขนส่งอัตโนมัติ พิกัด 4,800 kg	พลังงานไฟฟ้า 0.061 kWh/รอบ	วิ่งขนส่ง 100 รอบ	เฉลี่ย 40.0 km	23 ชั่วโมง (h) 40 นาที

หมายเหตุ : อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดีเซลของรถบรรทุกพิกัด 28,800 kg ซึ่งเป็นข้อมูลอ้างอิง

จากการสำรวจของบริษัท เยนเนรัล สตาร์ช จำกัด

และงานวิจัยของ ทศพล นภาสวัสดิ์ (พ.ศ. 2556)

จากตารางที่ 5.15 พบว่ารถบรรทุกแบริ่งน้ำมันสำปะหลังพิกัด 28,800 kg ต่อรอบ มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่อวันที่ใช้น้ำมันดีเซล 29.51 L และมีค่าใช้จ่ายพลังงานต่อวันรวมทั้งรวม 898.28 บาท คิดที่ราคาน้ำมันดีเซล 30.44 บาท/L (อ้างอิงราคาน้ำมันดีเซล วันที่ 20 มกราคม 2567) สำหรับรถขนส่งอัตโนมัติบรรทุกแบริ่งน้ำมันสำปะหลังพิกัด 4,800 kg ต่อ รอบ มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่อวัน 6.1 kWh หรือ 6.1 หน่วย และมีค่าใช้จ่ายพลังงานต่อวันรวมทั้งรวม 27.45 บาท คิดที่ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.5 บาท/หน่วย

ดังนั้นสรุปได้ว่า การขนส่งแบริ่งน้ำมันสำปะหลังใน 1 วัน เมื่อทำการทดสอบขนส่งแบริ่งน้ำมันสำปะหลังรวมทั้งรวม 480,000 kg การใช้รถขนส่งอัตโนมัติวิ่งขนส่งแบริ่งน้ำมันสำปะหลังใน 1 วัน สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 870.83 บาท ต่อ วัน เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้รถบรรทุกวิ่งขนส่งแบริ่งน้ำมันสำปะหลังใน 1 วัน แต่ถ้าเปรียบเทียบต่อปี (คิดที่ 365 วัน คือ 1 ปี) สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ถึง 317,852.95 บาท ต่อ ปี

ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายพลังงานระหว่างรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ

ชนิดรถขนส่ง	อัตราการพลังงานรวม	ราคาพลังงาน	ค่าใช้จ่ายพลังงาน
รถบรรทุก พิกัด 28,800 kg	น้ำมันดีเซล 29.51 L	น้ำมันดีเซล 30.44 บาท/L	ทั้งหมด 898.28 บาท
รถขนส่งอัตโนมัติ พิกัด 4,800 kg	พลังงานไฟฟ้า 6.1 kWh (หน่วย)	ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.5 บาท/หน่วย	ทั้งหมด 27.45 บาท
ผลต่างการลดค่าใช้จ่ายพลังงานเฉลี่ย ต่อ วัน			870.83 บาท
ผลต่างการลดค่าใช้จ่ายพลังงานเฉลี่ย ต่อ ปี			317,852.95 บาท

5.5 การวิเคราะห์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ

สำหรับหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยปัจจุบันได้มีการรับรองให้สามารถนำไปซื้อขายในตลาดได้ จึงทำให้กลไกของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ช่วยให้องค์กรต่าง ๆ สามารถชดเชยการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ด้วยเหตุนี้ทำให้การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในประเทศไทยยังมีความสำคัญมาก ในการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิให้เป็นศูนย์ (Net Zero Emission) เพื่อมุ่งไปที่เศรษฐกิจสีเขียวทางบริษัท เยนเนรัล สตาร์ซ จำกัด ซึ่งก็มีนโยบายสำคัญในเรื่องของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้นการปรับเปลี่ยนรูปแบบการขนส่งแบบดั้งเดิมที่ใช้รถบรรทุกเครื่องยนต์ดีเซลมาใช้ในรูปแบบพลังงานไฟฟ้าด้วยการพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติที่ใช้พลังงานฟ้าขึ้นมาทดแทน ซึ่งจากผลการทดสอบในหัวข้อที่ 5.4 พบว่ารถบรรทุกมีอัตราการใช้พลังงานน้ำมันดีเซล 29.51 L ต่อ วัน ในการขนส่งแ่งมันสำปะหลัง 480,000 kg ใน 1 วัน และรถขนส่งอัตโนมัติมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 6.1 kWh (หน่วย) ต่อ วัน ในการขนส่งแ่งมันสำปะหลัง 480,000 kg ใน 1 วัน โดยค่าพลังงานที่ใช้เหล่านี้สามารถนำไปเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor : EF) ดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor : EF)

ทรัพยากร	EF (kg CO ₂)	หน่วย
น้ำมันดีเซล	2.7406	L (ลิตร)
ไฟฟ้า	0.5986	kWh (หน่วย)

(หมายเหตุ : ข้อมูลในตารางที่ 5.16 อ้างอิง <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y0hKdlpVmpkSE5mWlcxcGMzTnBiMjQ9>)

ตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกระหว่างรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ

ทรัพยากร	อัตราการใช้พลังงาน	EF (kg.CO ₂)	การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก
รถบรรทุก	29.51 L	2.7406	80.87 kg.CO ₂
รถขนส่งอัตโนมัติ	6.1 kWh	0.5986	3.65 kg.CO ₂
ผลต่างการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ย ต่อ วัน			77.22 kg.CO ₂
ผลต่างการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเฉลี่ย ต่อ ปี			28,185.30 kg.CO ₂

จากตารางที่ 5.17 พบว่าการขนส่งแ่งมันสำปะหลังด้วยรถบรรทุกมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 80.87 kg.CO₂ ต่อ วัน และการขนส่งแ่งมันสำปะหลังด้วยรถขนส่งอัตโนมัติมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 3.65 kg.CO₂ ต่อ วัน ดังนั้นการใช้รถขนส่งอัตโนมัติทดแทนการขนส่งแบบดั้งเดิมที่ใช้รถบรรทุกสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึง 77.22 kg.CO₂ ต่อวัน คิดเฉลี่ย

ต่อปี (คิดที่ 365 วัน คือ 1 ปี) สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึง 28,185.30 kg.Co₂ ต่อปี ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 95.48%

5.6 สรุป

ในบทนี้เป็นการพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง มีวัตถุประสงค์หลักโดยเน้นใช้ทดแทนระบบขนส่งแบบดั้งเดิมที่ใช้รถบรรทุกขนส่งแป้งมันสำปะหลัง ระหว่างอาคาร (จากไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้ง) ซึ่งแนวทางในการพัฒนาของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดเป้าหมายให้ตรงตามวัตถุประสงค์หลักและขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ตั้งไว้ คือ การพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังขึ้นมา และทำการทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติที่พิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg รวมทั้งวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ สำหรับรถขนส่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมาสามารถรองรับการบรรทุกพิกัดน้ำหนัก 4,800 kg ตรวจสอบน้ำหนักโดยใช้โหลดเซลล์และวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแป้งด้วยการนำทางแบบอัตโนมัติ โดยใช้กล้องนำทางรูปแบบ Line Following ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการขับเคลื่อนและมุมในการบังคับเลี้ยวของเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 7 ช่วง และเงื่อนไขในการตรวจจับสิ่งกีดขวางด้วยไลดาร์ในระหว่างวิ่งนำทางอัตโนมัติกรณีวิ่งเดินหน้ามีระยะตรวจจับ 3 m กรณีวิ่งถอยหลังระยะตรวจจับ 6 m จากนั้นนำผลการทดสอบวิ่งขนส่งแป้งมันสำปะหลังซึ่งได้ผลการทดสอบจริงเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเปรียบเทียบเฉพาะในส่วนหลัก ๆ คือ การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของรถขนส่งอัตโนมัติ พบว่าค่ากำลังไฟฟ้ารวม P_e (W) และพลังงานไฟฟ้ารวม E_T (kWh) จากการคำนวณและทดสอบวิ่งใช้งานจริงมีความคลาดเคลื่อน 2.29% และ 1.63% ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มที่เป็นไปตามทางทฤษฎีและหลักการในทิศทางเดียวกันสามารถนำไปใช้เป็นหลักการตรวจสอบความถูกต้องในทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องได้ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงอัตราการใช้พลังงานของรถบรรทุกและรถขนส่งอัตโนมัติ ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบถึงการประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงาน พบว่าการใช้รถขนส่งอัตโนมัติบรรทุกแป้งมันสำปะหลังพิกัด 4,800 kg ต่อรอบ วิ่งทดแทนการขนส่งแบบดั้งเดิมที่ใช้รถบรรทุกแป้งมันสำปะหลังพิกัด 28,800 kg ต่อรอบ สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 870.83 บาทต่อวัน ถ้าเปรียบเทียบต่อปี สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ถึง 317,852.95 บาทต่อปี รวมทั้งการใช้รถขนส่งอัตโนมัติทดแทนการขนส่งแบบดั้งเดิมที่ใช้รถบรรทุกสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึง 77.22 kg.Co₂ ต่อวัน ถ้าคิดเฉลี่ยต่อปีสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึง 28,185.30 kg.Co₂ ต่อปี ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 95.48% ดังนั้นในบทนี้จึงได้สรุปรายละเอียดของการพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังทั้งหมด รวมถึงการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้อย่างครบถ้วน เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ที่สามารถนำไปต่อยอดได้ในอนาคต

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงการพัฒนากระบวนการขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยรถยนต์ขนส่งอัตโนมัติที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า มีเป้าหมายหลักโดยใช้รถยนต์ขนส่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมาทดแทนรูปแบบการขนส่งแบบดั้งเดิมที่ใช้รถบรรทุกขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแบริ่ง ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ได้นำถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและหลักการออกแบบ เพื่อใช้สำหรับพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติขึ้นมา โดยมีลำดับขั้นตอนของการพัฒนา 5 ขั้นตอน ได้แก่ การพัฒนาโครงสร้างของรถยนต์ขนส่งอัตโนมัติ การพัฒนาระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ขนส่งอัตโนมัติ การพัฒนาระบบบังคับเลี้ยวของรถยนต์ขนส่งอัตโนมัติ การพัฒนาระบบตรวจสอบน้ำหนักของรถยนต์ขนส่งอัตโนมัติ และการพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง เมื่อพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติเสร็จสิ้นจึงนำไปทดสอบสมรรถนะของรถยนต์ขนส่งอัตโนมัติในการวิ่งขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับที่พิกัด 4,800 kg ด้วยรูปแบบการวิ่งนำทางแบบอัตโนมัติ Line Following และมีระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง โดยใช้ไลดาร์ในระหว่างวิ่งนำทางอัตโนมัติ รวมทั้งมีระบบตรวจสอบน้ำหนักก่อนทำการวิ่งขนส่งด้วยโหลดเซลล์ จากนั้นนำผลการทดสอบวิ่งขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับด้วยรถยนต์ขนส่งอัตโนมัติเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณของกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า จากผลการทดสอบพบว่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของรถยนต์ขนส่งอัตโนมัติมีแนวโน้มที่เป็นไปตามทางทฤษฎีและหลักการในทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับระหว่างรถบรรทุกและรถยนต์ขนส่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมา พบว่าจากการใช้รถยนต์ขนส่งอัตโนมัติบรรทุกแบริ่งน้ำมันสำหรับพิกัด 4,800 kg ต่อรอบ กับการขนส่งแบบดั้งเดิมที่ใช้รถบรรทุกบรรทุกแบริ่งน้ำมันสำหรับพิกัด 28,800 kg ต่อรอบ พบว่าการใช้รถยนต์ขนส่งอัตโนมัติทดแทนการขนส่งแบริ่งน้ำมันสำหรับด้วยรถบรรทุก สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 870.83 บาทต่อวัน และถ้าคิดต่อปีสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน 317,852.95 บาทต่อปี รวมทั้งลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึง 77.22 kg.Co₂ต่อวัน ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 95.48% และถ้าคิดเฉลี่ยต่อปี สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึง 28,185.30 kg.Co₂ต่อปี

สำหรับการดำเนินงานวิทยานิพนธ์นี้ เริ่มต้นด้วยการศึกษาความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในบทที่ 1 เพื่อใช้สำหรับกำหนดเป้าหมายและเป็นแนวทางของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ลำดับถัดมาสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ถือเป็นรากฐานที่สำคัญในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบและพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ในงานวิจัย โดยศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทที่ 3 เพื่อนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้แก่ มอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ระบบบังคับเลี้ยวของยานยนต์ ระบบนำทางอัตโนมัติ ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ระบบตรวจสอบน้ำหนัก ระบบควบคุมในภาคอุตสาหกรรม โปรโตคอล

การสื่อสารในภาคอุตสาหกรรม การสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus Node-RED และ Python ซึ่งจากการศึกษาค้นคว้าสามารถใช้เป็นทฤษฎีกล่าวอ้างส่วนของการออกแบบในบทที่ 4 เพื่อใช้เป็นหลักการออกแบบระบบขนส่งแปรงมันสำปะหลังด้วยรถขนส่งอัตโนมัติ ได้แก่ การออกแบบโครงสร้าง การออกแบบหาขนาดมอเตอร์ขับเคลื่อน การออกแบบหาขนาดมอเตอร์บังคับลิ้น การออกแบบหาขนาดแบตเตอรี่ การออกแบบระบบนำทางและระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง การออกแบบระบบตรวจสอบน้ำหนัก และการออกแบบระบบควบคุม จึงนำไปสู่การพัฒนาการขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแปรงมันสำปะหลังที่กล่าวถึงในบทที่ 5 โดยการพัฒนางานวิจัยวิทยานิพนธ์ให้บรรลุเป้าหมายตามวัตถุประสงค์หลักและขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ตั้งไว้ ได้แก่ การพัฒนาการขนส่งอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรมแปรงมันสำปะหลังขึ้นมา จากนั้นทำการทดสอบสมรรถนะรถขนส่งอัตโนมัติที่พิกัดบรรทุกสูงสุด 4,800 kg และวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานเพื่อใช้เปรียบเทียบการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของรถบรรทุกกับรถขนส่งอัตโนมัติ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาจึงนำไปสู่บทสรุปในบทที่ 6 นี้ เพื่อนำองค์ความรู้และประโยชน์ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ไปต่อยอดงานวิจัยในอนาคตได้

6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

1. พัฒนางานวิจัยนี้โดยใช้รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียม (Deep Learning : CNN) สร้างเงื่อนไขสำหรับควบคุมความเร็วของระบบขับเคลื่อนและมุมบังคับลิ้นของเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อใช้ทดสอบวิ่งนำทางอัตโนมัติในการขนส่งแปรงมันสำปะหลังระหว่างอาคาร
2. พัฒนางานวิจัยนี้โดยใช้ระบบ ROS (Robot Operating System) ควบคุมกับไลดาร์แบบ 3 มิติ สร้างแผนที่จำลองเส้นทางการวิ่งในพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน เพื่อให้สามารถเข้าใกล้จุดเริ่มต้นของการวิ่งขนส่งแปรงมันสำปะหลังได้มากยิ่งขึ้น
3. พัฒนางานวิจัยนี้โดยใช้ระบบ Autopilot ควบคุมกับอุปกรณ์ที่ทันสมัยมากยิ่งขึ้น เพื่อใช้สำหรับพัฒนาระบบนำทางอัตโนมัติในการขนส่งแปรงมันสำปะหลังที่มีเส้นทางวิ่งหลายเส้นทาง รวมทั้งเพิ่มระบบความปลอดภัยระหว่างการวิ่งนำทางมากยิ่งขึ้น
4. พัฒนางานวิจัยนี้ให้มีการเชื่อมต่อสื่อสารรับส่งข้อมูลพารามิเตอร์แบบไร้สาย (Wireless) เพื่อใช้สำหรับแสดงผลข้อมูลพารามิเตอร์แบบเรียลไทม์และรองรับการเชื่อมต่อรับส่งข้อมูลในระบบ ERP (Enterprise Resource Planning)
5. พัฒนางานวิจัยนี้ให้มีการควบคุมและแสดงผลการทำงานผ่านแพลตฟอร์มบริหารจัดการในรูปแบบ Web Application และ Mobile Application ได้

รายการอ้างอิง

- จิราภรณ์ ปุณยวัจน์พรกุล. (2561). การใช้เทคนิคการวิเคราะห์หัตถ์โออัตรเร็วสูงศึกษาการเคลื่อนที่ของเพนดูลัมวงแหวนเพื่อพัฒนาแนวคิดวิทยาศาสตร์ของนักศึกษาครุศึกษาศาสตร์. Chiang Mai Rajabhat University. เชียงใหม่.
- ชัยวัช โขวเจริญสุข. (2563). มั่นสำปะหลัง : แนวน้อมธุรกิจ/อุตสาหกรรม. วิจัยกรุงศรี/ธนาคารกรุงศรีอยุธยา จำกัด (มหาชน). กรุงเทพมหานคร.
- ทศพล นภาสวัสดิ์. (2556). การศึกษาอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถบรรทุก. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- เทคนิคคาร์.คอม. (2023). ระบบบังคับเลี้ยว หรือ ระบบพวงมาลัยรถยนต์ (Steering Systems) เจาะลึกเกี่ยวกับอะไหล่รถยนต์. กรุงเทพมหานคร.
- ธงชัย ธงวิจิตรมณี. (2019). โปรโตคอลการสื่อสารในภาคอุตสาหกรรม. ทีมระบบไซเบอร์กายภาพ, หน่วยทรัพยากรด้านการคำนวณและไซเบอร์กายภาพ. กรุงเทพมหานคร.
- นพรุจ เขียวนาค และ สมมาตร พรหมพุด. (2022). การออกแบบและพัฒนารถขนส่งวัสดุอัตโนมัติราคาถูกสำหรับขนส่งวัสดุระหว่างกระบวนการผลิต. Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University Journal. (หน้า 92-106).
- บุษบา พุกษาพันธุ์รัตน์, อินทิชา วิภูเสรี และ พนิตพร เบญจผ่องวัฒนา. (2022). แบบจำลองสถานการณ์ลอจิสติกส์ภายในของระบบเอจีวีในแผนกประกอบโรงงานผลิตรถยนต์. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 32. ฉบับที่ 2. (หน้า 355-365).
- บริษัท เทคโนโลยีเซล (เฟรย์) จำกัด. (2023). แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร.
- บริษัท แฟ็คโตมาร์ท จำกัด. (2023). Vision Sensor. กรุงเทพมหานคร.
- บริษัท แรบพิท แคร้ โบรคเกอร์ จำกัด. (2023). ระบบบังคับเลี้ยวรถยนต์. กรุงเทพมหานคร.
- วิทยาลัยเทคนิคพัทยา. (2020). การกระจายน้ำหนักและการทรงตัวของยานยนต์. ชลบุรี.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (พ.ศ. 2564). ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร/ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร/ตารางแสดงรายละเอียดน้ำมันสำปะหลัง. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพมหานคร.
- ฤเชาว์ ภูประดับศิลป์. (2022). เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้า/มอเตอร์ไฟฟ้า. ทีมวิจัยมอเตอร์และการแปลงผันกำลังงาน (MAP), กลุ่มวิจัยการควบคุมและอิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูง (ACERG), เนคเทค สวทช. กรุงเทพมหานคร.
- Ajay M. Tayde, Sanket P. Golhar, Shital R. Ughade and Nikita Ramdas Kakde. (2019). Design of Rack and Pinion Steering System for all Terrain Vehicle. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Vol. 06, pp. (612-615).

- A. Ma'arif, A. A. Nuryono and Iswanto. (2020). Vision-Based Line Following Robot in Webots. FORTEI-International Conference on Electrical Engineering (FORTEI-ICEE). doi: 10.1109/FORTEI-ICEE50915.2020.9249943. pp. (24-28).
- A. Nabi Akpolat, Y. Yang, F. Blaabjerg, E. Dursun and A. Emin Kuzucuoglu. (2020). Li-ion-based Battery Pack Designing and Sizing for Electric Vehicles under Different Road Conditions. International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). doi: 10.1109/SEST48500.2020.9203196. pp. (1-6).
- A. S. Mohammed Shariff, R. Bhatia, R. Kuma and S. Jha. (2021). Vehicle Number Plate Detection Using Python and Open CV. International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). Greater Noida. India. doi: 10.1109/ICACITE51222.2021.9404556. pp. (525-529).
- A. Mughaid, S. A. Bi and A. AlZioud. (2022). SCADA Authentication Identification Over The Next Generation CyberNet. available at Research Square. doi: 10.21203/rs.3.rs-2364360/v1.
- B. Li, G. Chen, L. Wang and Z. Hao. (2017). Tower Crane Remote Wireless Monitoring System Based on Modbus/Tcp Protocol. IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC). Guangzhou. China. doi: 10.1109/CSE-EUC.2017.217. pp. (187-190).
- C. Lin and S. Zhaolu. (2019). Realization of Modern Tram Data Acquisition System Based on Labview and Modbus TCP. International Conference on Safety Produce Informatization (IICSPI). doi: 10.1109/IICSPI48186.2019.9095896. pp. (199-201).
- CC-Link Partner Association. (2023). ระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มความแม่นยำลดความสูญหายในการทำงาน. กรุงเทพมหานคร.
- D. Okeke and S. M. Musa. (2021). Energy Management and Anomaly Detection in Condition Monitoring for Industrial Internet of Things Using Machine Learning. International Conference on Informatics, Multimedia, Cyber and Information System. doi: 10.1109/ICIMCIS53775.2021.9699352. pp. (65-68).
- E. Aziz, C. Chassapis, S. Esche, S. Dai, S. Xu, and R. Jia. (2008). Online Wind Tunnel Laboratory. Paper presented at 2008 Annual Conference & Exposition. Pittsburgh. Pennsylvania. Doi: 10.18260/1-2-3402.
- factomart.com. (2023). คู่มือเกี่ยวกับโหลดเซลล์ (Load Cell). กรุงเทพมหานคร.
- G. Yue. (2020). Design of Intelligent Monitoring and Control System Based on Modbus. International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP). China. doi: 10.1109/CCISP51026.2020.9273500. pp. (149-153).

- GSL. (2022). Home. General Starch Limited. Nakhon Ratchasima.
- G. Singh, I. Gupta, J. Singh and N. Kaur. (2022). Face Recognition using Open Source Computer Vision Library (OpenCV) with Python. International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO). Noida. India. doi: 10.1109/ICRITO56286.2022.9964836. pp. (1-6).
- H. Benyazza, M. Bouhedda, N. Faci, M. Aissani and S. Rebouh. (2019). Greenhouse Monitoring and Fuzzy Control System based on WSN and IoT. International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID). Elazig, Turkey. doi: 10.1109/ICAAID.2019.8934984. pp. (1-5).
- J. Du and M. Ouyang. (2013). Review of electric vehicle technologies progress and development prospect in China. World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27). doi: 10.1109/EVS.2013.6914849. pp. (1-8).
- J. A. Sanguesa, P. Garrido, F. J. Martinez and J. M. Marquez-Barja. (2021). Analyzing the Impact of Roadmap and Vehicle Features on Electric Vehicles Energy Consumption. in IEEE Access. vol. 9, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3072979. pp. (61475-61488).
- L. Deng, Y. Peng, C. Liu, X. Xin and Y. Xie. (2016). Intrusion Detection Method Based on Support Vector Machine Access of Modbus TCP Protocol. IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). China. doi:10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2016.90. pp. (380-383).
- L. Y. Ma, H. Zhu and H. Duan. (2021). A Method of Multiple Lane Detection Based on Constraints of Lane Information. China Automation Congress (CAC). doi: 10.1109/CAC53003.2021.9727491. pp. (4059-4064).
- M. A. Markom, A. H. Adom, E. S. M. M. Tan, S. A. A. Shukor, N. A. Rahim and A. Y. M. Shakaff. (2015). A mapping mobile robot using RP Lidar scanner. International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS). Langkawi. Malaysia. doi: 10.1109/IRIS.2015.7451592. pp. (87-92).
- M. Veneri and M. Massaro. (2021). The effect of Ackermann steering on the performance of race cars. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. Vol. 59, No. 6, pp. (907-927).
- M. -H. Lin, M. A. Sarwar, Y. -A. Daraghmi and T. -U. İk. (2022). On-Shelf Load Cell Calibration for Positioning and Weighing Assisted by Activity Detection: Smart Store Scenario. in IEEE Sensors Journal. Vol. 22, No. 4,

- doi: 10.1109/JSEN.2022.3140356. pp. (3455-3463).
- O. N. Nyasore, P. Zavorsky, B. Swar, R. Naiyeju and S. Dabra. (2020). Deep Packet Inspection in Industrial Automation Control System to Mitigate Attacks Exploiting Modbus/TCP Vulnerabilities. IEEE 6th Intl Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE Intl Conference on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE Intl Conference on Intelligent Data and Security (IDS). Baltimore. MD. USA.
doi: 10.1109/BigDataSecurity-HPSC-IDS49724.2020.00051. pp. (241-245).
- P. Liljeback, I. U. Haugstuen and K. Y. Pettersen. (2012). Path Following Control of Planar Snake Robots Using a Cascaded Approach. IEEE Transactions on Control Systems Technology. doi:10.1109/TCST.2011.2107516. pp. (111-126).
- P. Nguyen-Hoang and P. Vo-Tan. (2019). Development An Open-Source Industrial IoT Gateway. International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). doi: 10.1109/ISCIT.2019.8905157. pp. (201-204).
- S. Vonolfen, M. Kofler, A. Beham, M. Affenzeller and W. Achleitner. (2012). Optimizing assembly line supply by integrating warehouse picking and forklift routing using simulation. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC). doi: 10.1109/WSC.2012.6465077. pp. (1-12).
- S. López, J. Caicedo, M. Mamani, A. A. Romero and G. Ratta. (2014). Literature review: Potential impacts of plug-in electric vehicles on electric power systems. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA). doi: 10.1109/TDC-LA.2014.6955255. pp. (1-6).
- S. Tamboli, M. Rawale, R. Thoraiet and S. Agashe. (2015). Implementation of Modbus RTU and Modbus TCP communication using Siemens S7-1200 PLC for batch process. International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM). Avadi. India. pp. (258-263).
- S. M. M. Rahman. (2019). Forklift Routing Optimization in a Warehouse using a Clustering - based Approach. Presented in Partial Fulfillment of the Requirements For the Degree of Master of Applied Science in Industrial Engineering.
- S. Fakhri, R. Mardiati, E. Mulyana and T. Priatna. (2020). Prototype Design for Object Coordinate Detection using RP LIDAR Concept. International Conference on Wireless and Telematics (ICWT). Yogyakarta. Indonesia.
doi: 10.1109/ICWT50448.2020.9243654. pp. (1-6).

- S. Kaewpoung, W. Su-hren, P. Musigapong and T. Ratniyomchai. (2023). Development of Starch Transport Vehicle in Industrial Plant Using EV Technology for 4,000 kg Load. 15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023). Nakhon Phanom. Thailand. pp. (887-890).
- S. Mounitha, K. Abishek, M. P. Lalith Prasath, M. M, A. G and K. V. (2023). Implementation of Codesys Programming Using Raspberry-Pi for Weighing Machine Control. International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA). Coimbatore. India. doi: 10.1109/ICAECA56562.2023.10200669. pp. (1-4).
- Sumipol. (2023). Proximity Sensor. กรุงเทพมหานคร.
- The Engineering ToolBox. (2008). Rolling Resistance. Resources, Tools and Basic Information for Engineering and Design of Technical Applications.
- T. Gayathri Devi, P. Neelamegam and S. Sudha. (2017). Image Processing System for Automatic Segmentation and Yield Prediction of Fruits using Open CV. International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC). Mysore. India. doi: 10.1109/CTCEEC.2017.8455137. pp. (758-762).
- T. Bhattacharjee, A. K. Saha, S. P. Ramalingam, P. K. Shanmugam and S. Padmanaban. (2019). Server Monitoring and Priority based Automatic Load Shedding Algorithm (SEMPALS), TENCON IEEE Region 10 Conference (TENCON). doi: 10.1109/TENCON.2019.8929335. pp. (1863-1868).
- TZBOT. (2020). การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีการนำทางต่างๆของ AGV.
- V. N. Thanh, D. P. Vinh, N. T. Nghi, L. H. Nam and D. L. H. Toan. (2019). Restaurant Serving Robot with Double Line Sensors Following Approach. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). doi: 10.1109/ICMA.2019.8816404. pp. (235-239).
- W. Ye, S. Yuetian, X. Yunhe, W. Shu and Z. Yuchen. (2010). The Implementation of Lane Detective Based on OpenCV. Second WRI Global Congress on Intelligent Systems. doi: 10.1109/GCIS.2010.120. pp. (278-281).
- W. Cao, Z. Zhu, J. Nan, Q. Yang, G. Gu and H. He. (2022). An Improved Motion Control With Cyber-Physical Uncertainty Tolerance for Distributed Drive Electric Vehicle. in IEEE Access. vol. 10, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3136573. pp. (770-778).
- X. Sun, Z. Li, X. Wang and C. Li. (2019). Technology Development of Electric Vehicles: A Review. All content following this page was uploaded by Chengjiang Li on 23 December 2019, Energies 2020. doi:10.3390/en13010090.

- X. Tan and J. Zhou. (2020). Strength and Stiffness Free Modal Analysis of FSAE Car Based on ANSYS Workbench. International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA).
- Y. Cheng, F. Duan and S. Cui. (2005). The design principle of electric motors and drive systems for electric vehicles. International Conference on Electrical Machines and Systems. Vol. 1, doi: 10.1109/ICEMS.2005.202647. pp. (802-805).
- Y. Yeniydin and K. W. Schmidt. (2020). Lane Detection and Tracking based on Best Pairs of Lane Markings: Method and Evaluation. Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). doi: 10.1109/SIU49456.2020.9302424. pp. (1-4).
- Z. Yu, M. Zhang and J. Yang. (2009). Design of Energy Management Systems for Mobile Power Station of Electric Vehicles. International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. doi: 10.1109/ICIII.2009.521. pp. (250-253).



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, stylized emblem in the background. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular base with a scalloped edge. Above the figure are several vertical lines of varying heights, resembling a stylized 'H' or a traditional architectural element. The entire logo is rendered in a light, semi-transparent gold and red color.

ภาคผนวก ก
การตั้งค่าพารามิเตอร์ในซอฟต์แวร์ Enpower Parameter Calibrator
และ COOL WORKS QUICK V1.0.0

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในซอฟต์แวร์ Enpower Parameter Calibrator

สำหรับซอฟต์แวร์ Enpower Parameter Calibrator ที่ใช้งานคู่กับชุดควบคุมมอเตอร์ (Power Converter) รุ่น 5 kW 48 V Controller Model MC3528 เพื่อทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถขนส่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมา ซึ่งมีการตั้งค่าพารามิเตอร์บนหน้าต่างซอฟต์แวร์ Enpower Parameter Calibrator ได้แก่ MCU_F0-DATA, MCU_F1-DATA และ MCU_F2-DATA ดังรูปที่ ก.1 ถึง ก.3 ตามลำดับ

Num	Description	DATA
F0	Motor Type(0 - 3)	0
F1	Motor Rated Power(0 - 150.0kW)	5
F2	Motor Rated Voltage(0 - 400.0V)	48
F3	Motor Rated Current(10 - 600.0A)	120
F4	Motor Rated Frequency(10 - 300.0Hz)	100
F5	Motor Maximum Frequency(10 - 400.0Hz)	240
F6	Motor Rated Speed(100 - 6000rpm)	3000
F7	Motor Maximum Speed Limit(0 - 9000rpm)	4000
F8	Non-load current of an AC Motor(15 - 45% of Rated)	25
F9	Rotor Time-constant 1(0 - 10000)	450
F10	Rotor Time-constant 2(0 - 10000)	600
F11	Time-constant Switching Frequency(0 - 100.0Hz)	50
F12	Pulse Numbers per Round of the Encoder(1 - 1000)	64
F13	Encoder Orientation(0 - 1)	0
F14	Initial Pole Angle of PMSM Motor Field(0 - 360.0°)	0
F15	Direction of Rotation Indication(0 - 3)	0
F16	Secondary High Speed limit(100 - 9000rpm)	3000
F17	Software Version(0 - 32767)	115

Data Monitor			
SEND:	68 AA 00 00 12 00 00 00	02:29:18:669	MCU
SEND:	68 AA 00 00 12 00 00 00	02:29:18:888	MCU
SEND:	68 AA 00 00 12 00 00 00	02:29:19:104	MCU
SEND:	68 AA 00 00 12 00 00 00	02:29:19:321	MCU
SEND:	68 AA 00 00 12 00 00 00	02:29:19:538	MCU
SEND:	68 AA 00 00 12 00 00 00	02:29:19:754	MCU
SEND:	68 AA 00 00 12 00 00 00	02:29:19:972	MCU
SEND:	68 AA 00 00 12 00 00 00	02:29:20:187	MCU

ConnectType: SCI ConnectTypeConfig: COM3 RefreshTime: 100 Download parameter file:

รูปที่ ก.1 การตั้งค่าพารามิเตอร์บนหน้าต่าง MCU_F0-DATA

Enpower_Parameter_Calibrator 5.0.5.8

Connect Disconnect Upload Download OpenParaFile Layout Curve SaveData Exit

MCU_F0-DATA MCU_F1-DATA MCU_F2-DATA

Num	Description	DATA
F18	Initial Acceleration(10 - 40000)	300
F19	Secondary Acceleration(100 - 40000)	600
F20	Reverse Acceleration(100 - 40000)	400
F21	Deceleration Rate(10 - 40000)	400
F22	Braking Deceleration Rate(100 - 40000)	5000
F23	Speed Kp(100 - 40000)	1500
F24	Speed Ki(0 - 20000)	1000
F25	Reserved(0 - 65535)	0
F26	Braking Time after loosing the throttle(0 - 30s)	0
F27	Speed Filter Coefficients(0 - 7)	2
F28	Self-learning Enable Position(0 - 24)	0
F29	SOC of the battery(0 - 100%)	100
F30	The Idle State Motor Torque Setting(0 - 400%)	0
F31	Counting Down Coefficients(0 - 256.0)	8
F32	Assisted-brake Start-up Speed Setting(0 - 1500)	0

รูปที่ ก.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์บนหน้าต่าง MCU_F1-DATA

Enpower_Parameter_Calibrator 5.0.5.8

Connect Disconnect Upload Download OpenParaFile Layout Curve SaveData Exit

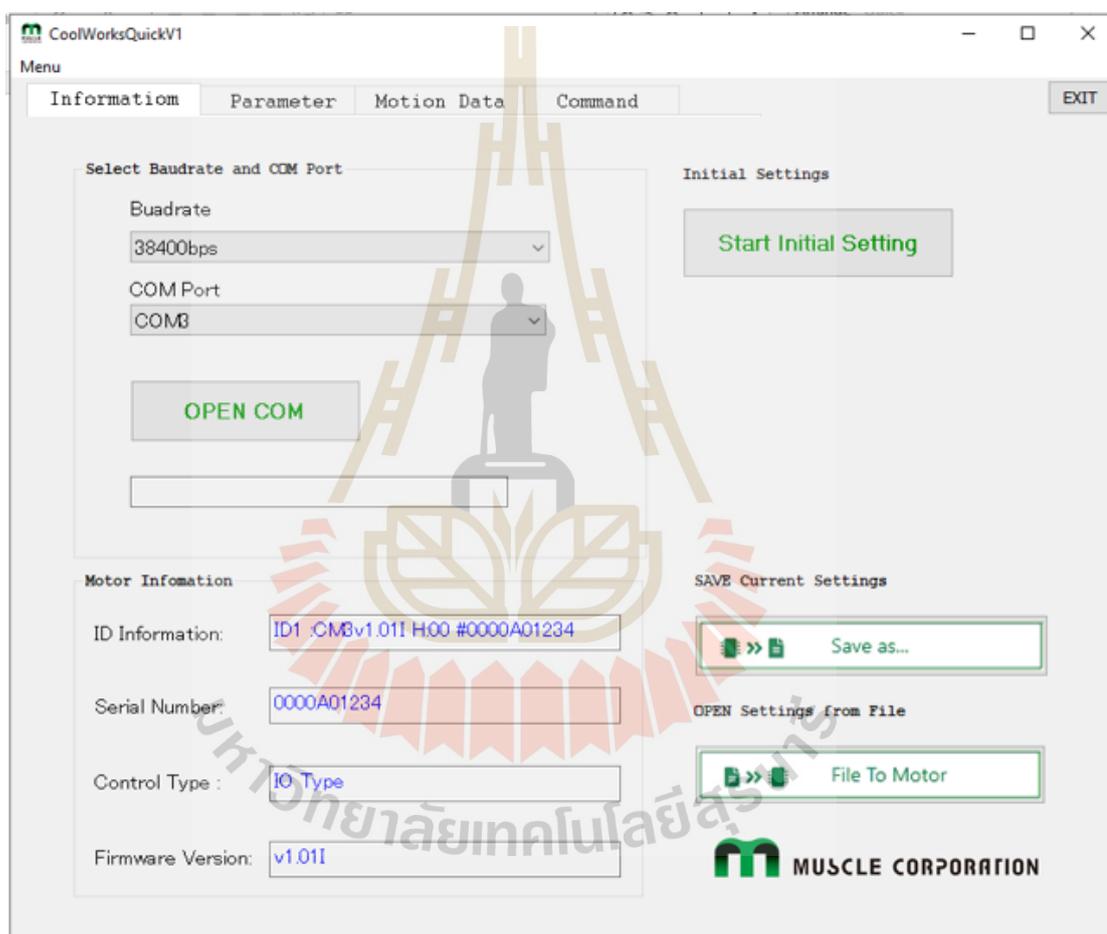
MCU_F0-DATA MCU_F1-DATA MCU_F2-DATA

Num	Description	DATA
F33	Torque Kp(100 - 40000)	200
F34	Torque Ki(0 - 20000)	600
F35	Exciting Kp(100 - 40000)	200
F36	Exciting Ki(0 - 20000)	600
F37	Drive Torque Limit(0 - 350%)	290
F38	Brake Torque Limit(0 - 350%)	80
F39	Voltage Correction Coefficient(90 - 110%)	100
F40	Current Correction Coefficient(50 - 200%)	100
F41	Under-voltage Point Setting(0 - 10000V)	38
F42	Over-Voltage Point Setting(50 - 10000V)	60
F43	Manufacturer Parameter 1(0 - 65535)	0
F44	Control Mode Selection(0 - 7)	0
F45	High Speed Mode Torque Limit(0 - 350%)	0
F46	Derating Mode Start-up Voltage(0 - 32767)	0
F47	Low Consumption Mode Speed Setting(0 - 32767)	0
F48	Reverse Motor Speed Limit(0 - 32767)	0

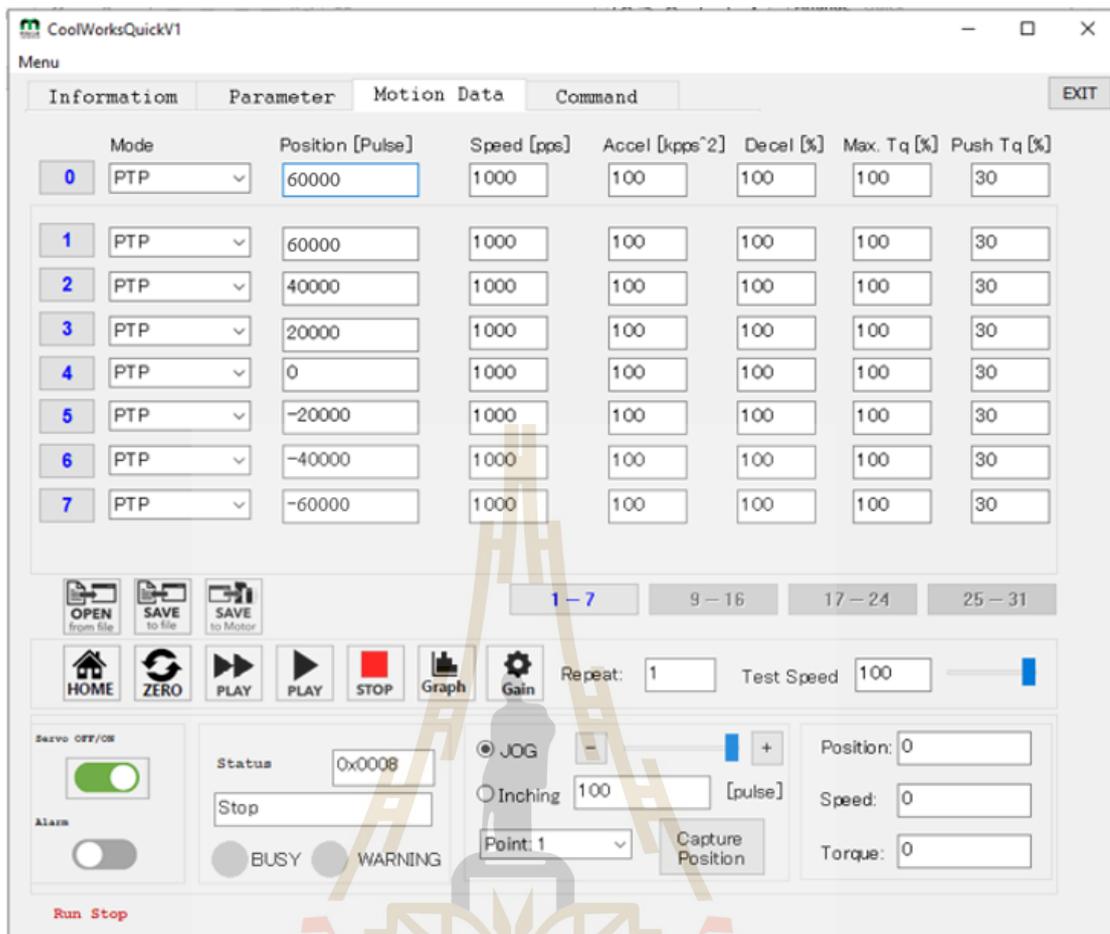
รูปที่ ก.3 การตั้งค่าพารามิเตอร์บนหน้าต่าง MCU_F2-DATA

ก.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ในซอฟต์แวร์ COOL WORKS QUICK V1.0.0

สำหรับซอฟต์แวร์ COOL WORKS QUICK V1.0.0 ที่ใช้งานคู่กับมอเตอร์บังคับเลี้ยว (Servo Motor) โมเดล CM3-23L50A เพื่อทดสอบระบบบังคับเลี้ยวของรถขนส่งอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นมา ซึ่งมีการตั้งค่าพารามิเตอร์บนหน้าต่างซอฟต์แวร์ COOL WORKS QUICK V1.0.0 เริ่มต้นด้วยการตั้งค่ารูปแบบใช้งานชนิด I/O Type Servo Motor บนหน้าต่าง Information ดังรูปที่ ก.4 และตามด้วยการตั้งค่าพารามิเตอร์ Position Pulse Servo Motor บนหน้าต่าง Motion Data ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของมมบังคับเลี้ยวทั้ง 7 ช่วง ดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.4 การตั้งค่ารูปแบบใช้งานชนิด I/O Type Servo Motor บนหน้าต่าง Information



รูปที่ ก.5 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Position Pulse Servo Motor บนหน้าต่าง Motion Data

ภาคผนวก ข
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Supachai Kaewpoung, Wiwat Su-hren, Uthen Leeton and Tosaphol Ratniyomchai. (2023). Modbus TCP/IP Protocol Development of a Driverless EV Control System for Autonomous Cassava Starch Transport. GMSARN International Journal. Thailand.

ศุภชัย แก้วพวง, วิวรรณ สุहरิน, พิรัชฎา มุสิกะพงค์ และ ทศพล รัตนนิยมชัย. การพัฒนารถขนส่ง แบ็งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าพิักัดบรรทุก 4,000 kg. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 ประจำปี 2566 (EENET 2023), 1-3 พฤษภาคม 2566.

กิตติยศ ยะเจริญ, ศุภชัย แก้วพวง และ ทศพล รัตนนิยมชัย. การจำลองระบบนำทางอัตโนมัติของ หุ่นยนต์ AMR โดยใช้โปรแกรม ROS และ Gazebo แบบ 3 มิติ. การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 ประจำปี 2566 (EENET 2023), 1-3 พฤษภาคม 2566.

วิวรรณ สุहरิน, ศุภชัย แก้วพวง และ ทศพล รัตนนิยมชัย. การตรวจจับช่องทางจราจรแบบ เร็ยลใหม่โดยใช้เทคนิคตัวกรองโซเบล. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 ประจำปี 2566 (EENET 2023), 1-3 พฤษภาคม 2566.

วิวรรณ สุहरิน, ศุภชัย แก้วพวง, อุเทน ลีตัน และ ทศพล รัตนนิยมชัย. การพัฒนาการแบ่งส่วน รูปภาพด้วยอัลกอริทึม YOLOv8 สำหรับรถไฟฟ้าไร้คนขับ. การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46 ประจำปี 2566 (EECON-46), 15-17 พฤศจิกายน 2566.

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับรางวัลดีเด่นในระหว่างศึกษา

ศุภชัย แก้วพวง, วิวรรณ สุहरิน, พิรัชฎา มุสิกะพงค์ และ ทศพล รัตนนิยมชัย. การพัฒนารถขนส่ง แบ็งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าพิักัดบรรทุก 4,000 kg. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 ประจำปี 2566 (EENET 2023), 1-3 พฤษภาคม 2566.



Modbus TCP/IP Protocol Development of a Driverless EV Control System for Autonomous Cassava Starch Transport

Supachai Kaewpoung¹, Wiwat Su-hren², Uthen Leeton²
and Tosaphol Ratniyomchai^{2,*}

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 3 September 2023

Revised: 3 September 2023

Accepted: 3 September 2023

Keywords:

Driverless EV control system

Modbus TCP/IP protocol

Cassava starch transport

Autonomous navigation

Open CV line detection

ABSTRACT

This paper describes the use of the Modbus TCP/IP protocol in the development of a driverless EV control system. The goal is to use autonomous navigation to move cassava starch from one building to another during the production process. The four main parts of the design and development are as follows: (1) communication via Modbus TCP/IP protocol; (2) Node-RED processing for the central control unit; (3) Python software and Open CV for line detection; and (4) Node-RED connection for dashboard HMI control. The operation of PLC control equipment is dependent on various components, including the electric motor of the drivetrain, servo motor, and rack-and-pinion steering, which is accountable for Ackermann steering control. EVs with a maximum load capacity of 4,800 kg carried cassava starch autonomously over a 200-meter forward distance during testing at General Starch Co., Ltd. Additionally, 2,400 kg of cassava starch that failed quality inspection were loaded over a 200-meter reverse distance. The EVs were controlled via the Modbus TCP/IP protocol and ran at an average speed of 1 m/s. The test showed that when the dashboard HMI mode is chosen, the EV can automatically transport 4,800 kg of cassava starch in the forward range. Additionally, it was discovered that [285, 390] is the center value [X, Y] of the 24-meter guide line position distance on the road surface. EV is able to transport 2,400 kg of automatic cassava starch that does not pass quality control during the reverse period. It was found that the position distance of 113-meter of the guide line on the road surface corresponded to the center value [X, Y] of [348, 395]. Furthermore, by illustrating the connection between the frame center X and the turning angle servo motor, the autonomous navigation EV's performance can be evaluated over a 200-meter distance.

1. INTRODUCTION

Currently, engineers create the majority of EV technologies in a range of control systems. It relies on the equipment choice and equipment protocol model utilized for system development. The majority of devices that have received industry certification using standardized communication protocols, including Profinet, EtherCAT, Modbus RTU, Modbus TCP/IP, and CANbus [1]. At the next level of control, control cables are employed in both digital and analog PLC devices. To create cutting-edge energy-saving management systems and EV control systems, real-time data acquisition systems must be employed, and the Modbus TCP/IP construction for the data packet protocol must be used in the design to connect data transfer with the HMI [2, 3]. It could also be used to establish GPRS wireless connections and centralized long-distance communication to show off the performance stability and dependability of the Modbus TCP/IP protocol [4].

In addition to the nature of applications in different sectors that employ ethernet models and the development of automatic control systems [5]. Remote monitoring and control applications for equipment and sensors are frequently used in industrial automation between SCADA systems and signal transmission across routers using IoT protocols like Node-RED or CoAP, among others. For the purpose of developing hardware and software solutions that link Node-RED and facilitate the quick deployment of applications across industries, industrial IoT gateways running on Linux operating systems are being developed. To make the creation of algorithms for use with different device frameworks easier [6]. Additionally, it is essential for the creation of wireless sensor network communication protocols that work well for IoT applications [7]. The device is controlled at a lower level using a raspberry pi, and it reads parameters by writing software that uses Python to send data via the Modbus TCP/IP protocol [8].

¹School of Energy and Logistics Management Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

²School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

*Corresponding author: Tosaphol Ratniyomchai: +66-5-145-6159; Email: tosaphol@sut.ac.th.

The use of cameras in navigation systems is becoming more and more common as a result of the development of autonomous navigation systems for electric vehicles. YOLOv5 libraries in the form of deep learning and Open CV Python are the primary software development tools that use cameras [9, 10]. These libraries were used to create new channel detection and tracking algorithms to identify merged lines based on the geometric properties of lines from the best lane pairs, as well as lane detection algorithms based on hough line transform using the fundamental Open CV Python algorithm [11, 12]. Additionally, it shows that the algorithm used in actual road environments is precise and produces stable detection results. It suggests using an ego-lane detection algorithm first, followed by lateral lane detection, allowing for the detection of multiple lane pairs [13].

Furthermore, the vehicle's structure plays a significant role in autonomous driving. If EV technology currently relies on automatic or driverless steering, then Ackermann steering is the system in place. This is also referred to as parallel steering, and it assesses the best possible steering performance through control techniques [14]. As a result, the rack-and-pinion steering gearbox was designed and developed to be used as a steering system with the required steering ratio. It also underwent elemental analysis to guarantee the highest level of safety and efficiency [15].

This paper proposes how to design and develop a Modbus TCP/IP-based control system for unmanned electric vehicle autonomous transportation that transports cassava starch automatically between industrial warehouses. By installing a library and optional tools like Python and Modbus TCP/IP protocol, being controlled via dashboard HMI for processing in Python files, running Open CV in line detection format of cassava starch transit, and utilizing automatic navigation, it is possible to connect via Node-RED by using the design principles of technology that uses industrial certification equipment.

2. INFORMATION AND METHODS

2.1. Modbus protocol

The Modbus protocol, which is separated into two types: Modbus RTU and Modbus TCP/IP, is the most commonly used protocol across a variety of industries. However, compared to Modbus, there are currently other protocols that are more empathetic. However, the Modbus type is still a well-known protocol that has grown in popularity. In order to provide industrial automation control systems, Modicon Incorporated created the Modbus protocol in 1979. Additionally, it has been the accepted way in the sector to link digital and analog data streams [16].

Use the master-slave or client-server approach for communicating with devices that use the Modbus TCP/IP protocol. The other device serves as a server or slave to the single device that serves as the master or client. A slave

might be any number of auxiliary devices, including an I/O transducer, PLC, valve, inverter, or other measurement tools. To process and transmit data to the master, each slave device must issue a special ID, as illustrated in Fig. 1.

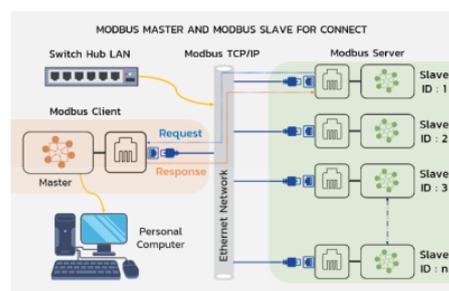


Fig. 1. Communication between Master and Slave

According to Fig. 2, Modbus TCP/IP (PDU) construction is an ethernet-based protocol that uses serial communication and transmission control protocol (TCP/IP). A Modbus application protocol (MBAP) header, which contains a transaction identification, protocol identifier, length field, and unit identifier, is used to begin the dataset. Function code is a protocol data unit (PDU) created from Modbus RTU to convert data segments to ethernet format. It ranges from 0x01 to 0x23. Using a device that can establish communication over a wireless or local area network connection, such as a router or access point, as a bridge.

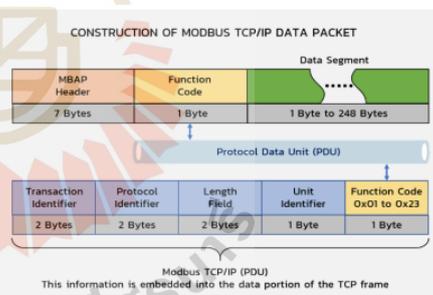


Fig. 2. Construction of Modbus TCP/IP data packet

Additionally, the Modbus TCP/IP protocol creates the Modbus RTU protocol's Rx and Tx lines as an ethernet connection, with the Modbus message structure being an application protocol that is transmitted alongside the transmission control protocol and internet protocol. Similar to the Modbus TCP/IP protocol, Table 1 displays the

function name and function code data formats used with the Modbus RTU protocol [17].

Table 1. Data formats for function name and function code

function name	function code
read discrete input	Fx02
read coils	Fx01
write single coil	Fx05
write multiple coils	Fx15
read input registers	Fx04
read multiple holding registers	Fx03
write single holding register	Fx06
write multiple holding registers	Fx16
read/write multiple registers	Fx23

2.2. Node-RED protocol

The internet of things (IoT) technology of today may link ethernet connectivity with a variety of sensor devices in industrial plants, such as power meters, flow meters, temperature sensors, PLCs, etc. [5]-[7]. Thus, the machine-to-machine (M2M) connectivity protocol known as the Node-RED protocol, also called message queuing telemetry transport (MQTT), serves as the conduit for communication between devices connected to an ethernet network. With the use of three components: publish, subscribe, and Node-RED, this enables a wide spectrum of developers to remotely operate devices running both windows and linux. As illustrated in Fig. 3, subscribe or publish can employ a number of devices, but they both need programs or apps that implement the Node-RED or MQTT protocol. For simple implementation in industrial applications, Node-RED may also enable the installation of libraries and other tools like Python, Modbus TCP/IP, cloud servers, etc. [18, 19].

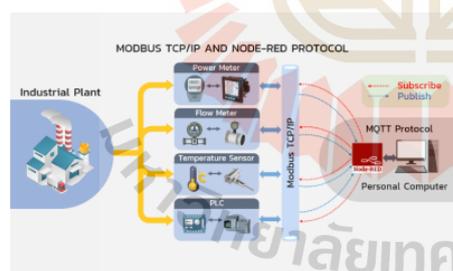


Fig. 3. Connection for Node-RED protocol communication

2.3. Python language

The Python software foundation now oversees the upkeep of the inter-programmer language that developer Guido van

Rossum created in 1990. Python is a programming language with quick writing and compilation capabilities, making it appropriate for system administration jobs. Most notably, Python, a programming language included in the Windows and Linux operating systems, is supported and may be used to program using a variety of libraries [11].

The application of the Python language, which has eight extremely well-liked framework applications for web development, software development, data analytics, machine learning, artificial intelligence, mathematical analysis, system scripting, and cyber security, has been continuously improved. Additionally, Python offers developers five features: Fig. 4 illustrates how Python is user-friendly for beginners, simple to learn, quite adaptable, incredibly flexible, and free and open-source [20].

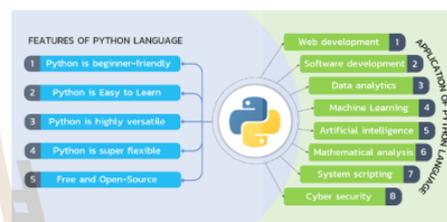


Fig. 4. Application and features for Python language

Additionally, utilizing libraries with Python lessens the workload on programmers and avoids the need to spend time writing repeated instructions, such as showing information on the screen or sending and receiving values. Using Python as a dynamic programming language with attributes, it is maintained by visual studio code software and supports several different imperative object-oriented programming languages. The open source library, which is well-liked for computer vision programming, and the Open CV library, which may construct programs primarily oriented toward real-time computer display, are two examples of the comprehensive libraries available to functional and procedural programmers. Open CV, a cross-platform library initially created by Intel, is available for free usage under the open-source BSD license [21].

2.4. Rack and pinion steering

As seen in Fig.5, the transmission rod used for rack-and-pinion steering moves as a spindle between the rack and pinion gear. Through the tire, which has a steering mechanism coupled to the steering wheel and the servo motor, the cog travels in a linear path to be utilized for steering the wheel. The benefit of rack-and-pinion steering is that turning is moderately responsive since there is direct steering contact. The fact that it cannot be repaired when there is wear and tear between the pinion gear and the rack remains a drawback, necessitating replacement instead.

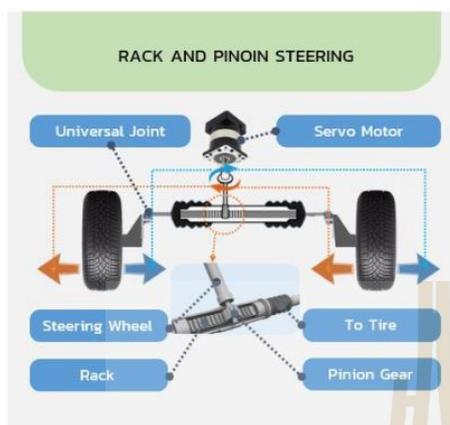


Fig. 5. Model of rack-and-pinion steering

Additionally, power steering a mix of electric systems that provide precision turning and facilitate hand turning, as well as rack and pinion steering are both increasingly utilized in modern automobiles. The usage of power steering has recently increased in the automobile sector to the point that it has forced the transition to the newest contemporary technology, namely automated steering, also known as autopilot, which is now in use and can be found in the Tesla brand, etc.

When it comes to autonomous systems or automated steering, servo motors are used in conjunction with rack and pinion steering. To be used, the control system must be built and designed. Therefore, in order to achieve the highest possible level of turning precision and efficiency, servo motor hardware technology has to be chosen in conjunction with the development of autonomous steering systems [14, 15].

3. METHODOLOGY AND RESULTS

3.1. Equipment and software for system development

The creation of autonomous EV navigation depending on the equipment capabilities chosen for processing control systems and software operations, there are technologies that can enable autonomous EV navigation in a number of ways, as well as the device's communication protocol format. The algorithms used to create EV autonomous navigation for the hardware and software chosen for this study are displayed in Tables 2 and 3, respectively [22]. After that, connect each device's connections to one another. It creates the device's communication protocol. The driving system is the first of three subsections that make up the system connection. The second component is the steering, and the third component is the autonomous navigation, as seen in Fig. 6.

Table 2. Equipment for autonomous EV navigation systems

Hardware	
Item	specification
electric motor	induction motor 5 kW 48 Vdc For EV
power converter	enpower MC3527 48 Vdc
battery lithium	48 Vdc 250 Ah lithium-ion battery
servo motor	CM3-23L50A supply 24 Vdc 5000 rpm
PLC control	TM221CE16R schneider electric M221
switch hub LAN	TP-Link model tl-sf1008d
HMI	wecon new style 7-inch HMI PI3070ie
mini PC windows	windows 10 Pro, 8GB RAM 128GB
forward camera	HIKVISION DS-2CD2625FWD-IZS
reverse camera	HIKVISION DS-2CD2625FWD-IZS

Table 3. Software for autonomous EV navigation systems

Software	
Item	Setting in Equipment
PIStudio	HMI
Node-RED	mini PC windows
Python V 3.11.0	mini PC windows
Ecostruxure Machine Expret-Basic	PLC control
enpower parameter calibrator	power converter
COOL WORKS QUICK V1.0.0	servo motor



Fig. 6. Device communication protocol connection

A. Drive system

In terms of the drivetrain, Fig. 6 shows how the power converter is powered by the lithium battery at a voltage of 48 Vdc. To convert the voltage for the electric motor's power source and regulate the speed of the motor use an analog output cable format at 0 to 5 Vdc with the PLC controller's addition of the analog TM3AQ2 module and use the digital output cable format for driving forward, backward, and braking. Using the software Ecostruxure Machine Expret-Basic, a PLC controller is utilized as a control unit. Check the relationship between the voltage 0 to 5 Vdc of the PLC controller and the speed of the electric motor measured from

the power converter as shown in Table 4 and the relationship between the voltage 0 to 5 Vdc of the PLC controller and the speed of the electric motor measured from the power converter as shown in Fig. 7. Measure the speed through the serial port, which is the software of the power converter device.

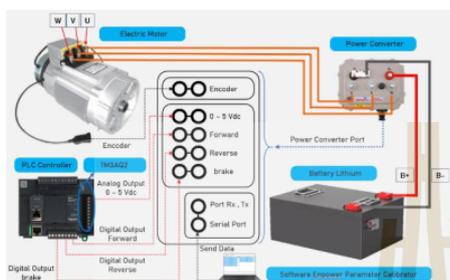


Fig. 7. Connection of the EV drive

Table 4. The relationship between voltage and speed

PLC controller voltage (Vdc)	electric motor speed (rpm)
0.00-0.78	0
0.80	318
1.00	455
1.20	690
1.40	897
1.60	1086
1.80	1341
2.00	1530
2.20	1770
2.40	1977
2.60	2181
2.80	2412
3.00	2622
3.20	2862
3.40	3148
3.60	3315
3.80	3572
4.00	3709
4.20	3997
4.40	4256
4.60	4497
4.80	4783
5.00	4980

B. Steering system

A servo motor coupled to the rack and pinion steering from Fig. 6 is used to operate the Ackermann steering model's steering system. Since the chosen servo motor has a 24 Vdc working voltage rating, a buck converter is needed to change the power supply voltage rating from battery lithium 48 Vdc

to 24 Vdc, which is equivalent to the servo motor's labor rating. Set input/output (I/O) type through the software COOL WORKS QUICK V1.0.0 to be controlled by a digital output cable using PLC control by installing the digital TM3DQ16R module for servo motor control. Along with establishing the location of the servo motor through the serial port using the software COOL WORKS QUICK V1.0.0, there is a specification of the car's construction with a maximum angle of 30 degrees left and right by splitting the turning angle into 7 ranges, as shown in Table 5, according to Fig. 8.

Table 5. The turning angle and position servo motor

turning angle (degree)	position
left angle -30	-60000
left angle -20	-40000
left angle -10	-20000
center angle 0	0
right angle 10	20000
right angle 20	40000
right angle 30	60000

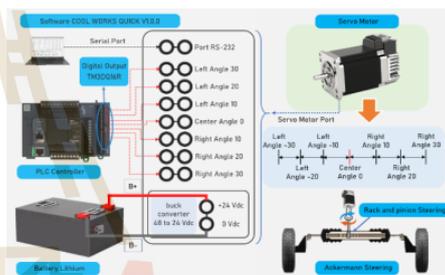


Fig. 8. Connection of the steering system

C. Automatic navigation system

The EV autonomous navigation system was developed using the mini PC's windows 10 Pro operating system. Install Node-RED and Python 3.11.0. utilizing the Open CV-Python 4.8.0.74 function package, create a method for automated navigation. Install and create a Python script that connects to a camera via a LAN wire. Use a switch hub LAN access point to connect a LAN cable to the camera, link the device signals to one another, and specify the IP addresses for both the forward camera and the reverse camera. Then, using the pyModbusTCP 0.2.0 function that has been installed and implemented in Python, the algorithm created by the autonomous navigation system is used to control PLC control through a LAN cable connected to the switch hub LAN and set an IP address to connect in Modbus TCP/IP protocol format. In addition for the master, uses an HMI to manage the system's essential functions. With the PISudio program, connect to the mini PC via a LAN cable that is

linked to the switch hub LAN using the Modbus TCP/IP connection protocol, and then set the mini PC's IP address to enable the installation of the Node-RED software's contrib-pythonshell and contrib-modbus tcp libraries. As seen in Fig. 9, it regulates the EV's Ackermann steering and propulsion. Additionally, each device's IP address must be defined as described in Table 6 in order for them to be in the same network band.

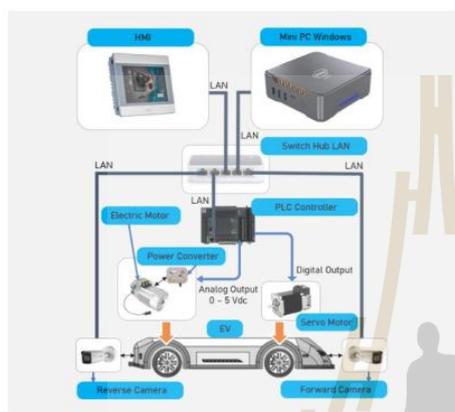


Fig. 9. Connection of automatic navigation systems

Table 6. The turning angle and position servo motor

equipment	IP address
HMI	192.168.1.10
mini PC	192.168.1.11
PLC controller	192.168.1.12
forward camera	192.168.1.13
reverse camera	192.168.1.14

3.2. Algorithms of autonomous navigation systems of EV

Designing control systems for EV devices and software that chooses to construct systems using algorithms is extremely essential to consider in order to handle complicated system design difficulties and accurately and effectively prioritize system operations. In this paper, the method for developing EV autonomous navigation is set up by first checking the network connection of the port LAN using the Modbus TCP/IP protocol format, then setting it by choosing the operating mode using the HMI. PStudio software is used to create dashboards. Fig. 10 illustrates the two primary components, the controller and monitoring. There are two operating modes: forward and reverse. Later, link data from the HMI using the software Node-RED function. In Python files for autonomous navigation using the software's line detection format, the camera continuously scans the guidance line in both forward and reverse directions. At the

end of the path, the software will advise the EV system to cease functioning and wait for the next start order if there is a slip-off as Fig. 11 depicts the flow chart diagram.



Fig. 10. Dashboard HMI for control systems

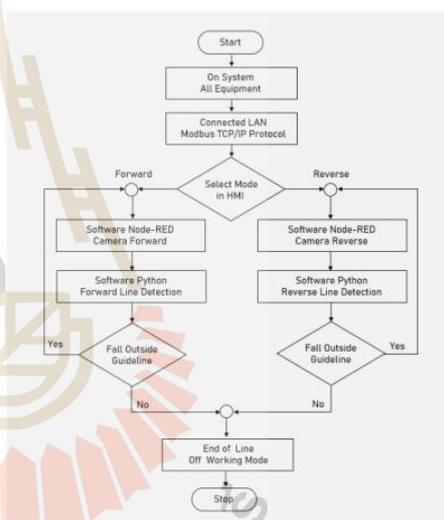


Fig. 11. Algorithm for system operation and flowchart

The system's primary functionality in forward and reverse modes is controlled by the processing software. By specifying the register address of multiple holding registers from Table 1 to match between the HMI and the master managing the operation of the system, software Node-RED may be used as a connector to exchange data from the HMI using the Modbus TCP/IP protocol format. Then, in the software Node-RED section, connect to the tool function by adding code for setting conditions, connect to the tool trigger

and block, define the wait to be reset format to wait for the value 11 from the code in the tool function, and connect to the tool pythonshell. Finally, use the tool modbustcp that is a slave by defining the register address of the tool modbustcp, both forward and reverse, as 1 and 2, respectively. As indicated in Figs. 12 and 13, the Python files for the forward camera and the reverse camera should be assigned to correspond with the files kept on the mini PC.

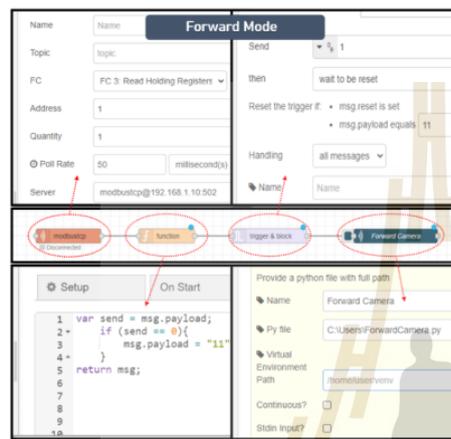


Fig. 12. Develop software Node-RED forward mode

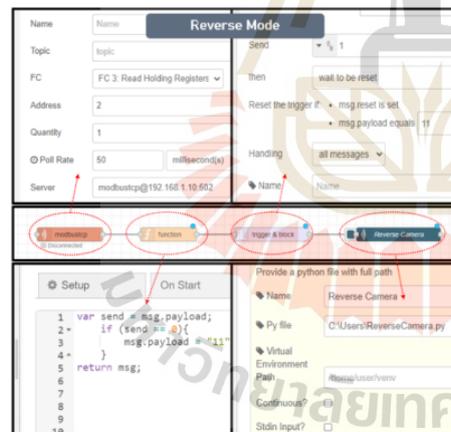


Fig. 13. Develop software Node-RED reverse mode

When employing automatic navigation, a camera is used as a sensor to find navigational markings on the route. In addition, the frame camera for both the forward camera and the reverse camera has frame [X, Y] values of [0:640,

300:480]. During the camera's startup procedure, the Open CV function is used to standby the device, detect the picture, process the colored guide lines, and locate the frame's contours in the crop center X range of 0 to 640 and the crop center Y range of 300 to 480. If true or equal to 1, locate the center X and Y lines while the EV is moving at an average speed of 1 m/s by specifying the operating range conditions in the automated steering section. In Fig. 14, a line-following detection system diagram is used to transport cassava starch between buildings both forward and reverse.

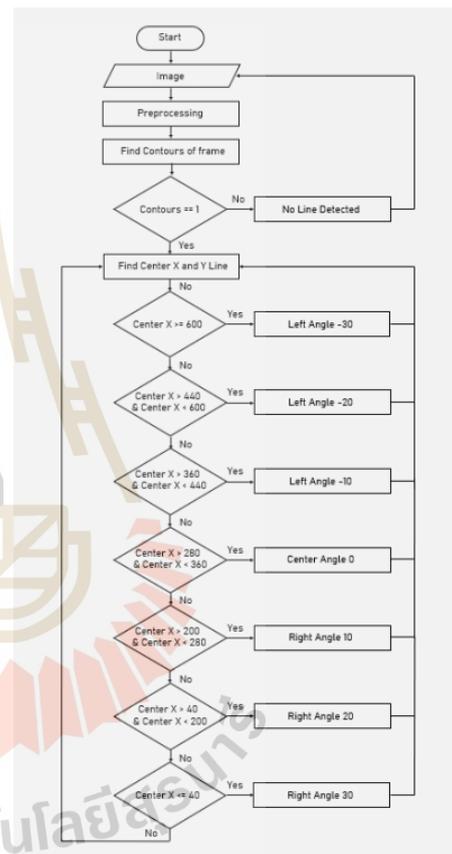


Fig. 14. Line following detection system diagram

3.3. Tests and results

Due to the requirement for autonomous navigation and the system's design to support both forward and reverse operation modes, two Python files were created during the

development of the EV operation control system. Typically, on windows operating systems, Python files must be executed one at a time using the name command of that file on the command prompt. Software Node-RED is a middleman that can link Python files with a lot of other files so that they are prepared to wait for the run command. HMI files that have produced a mode dashboard.



Fig. 15. EV for testing transportation of cassava starch

The test vehicle's development and design are depicted in Fig. 15 [22]. Transporting cassava starch among General Starch Co., Ltd. warehouses. The maximum weight it can carry while transporting cassava starch is 4,800 kg. The cassava starch is sent in large sacks that may hold up to 1,200 kg each. Test run of 200 m for forward by demand that EV's automatically go from the manufacturing line to the cassava starch warehouses after loading 4 big bags with a total weight of 4,800 kg. In addition, a test run of 200 m for reverse by 2,400 kg of cassava starch must be loaded into EV's without the use of quality control, and they must then autonomously go reverse from the warehouse to the line that makes cassava starch.

The test revealed that cassava starch was transported between warehouses using the EV's automated navigation control system. By choosing forward and sending a signal to the software Node-RED, the EV may be operated via the dashboard HMI. The processing of the EV system automatically navigates with a load capacity of 4,800 kg of 4 big bags during the forward period from the production line to the cassava starch warehouse by displaying the function Open CV in the form of line detection of the guide line on the road surface at a distance of 24 m and the actual operation result of forward mode. Fig. 16 illustrates that the center [X, Y] value is equivalent to [285, 390] from frames X [0:640] and frames Y [300:480].

When you arrive at the warehouse for cassava starch, let

the forklift remove the cassava starch from the EV and use the dashboard HMI's stop button to put an end to the operation. The forklift then loads the 2,400 kg of cassava starch that failed quality control onto the EV and pushes the dashboard HMI's reverse button, sending a signal to the software Node-RED of the EV processing to start the navigation automatically during the reverse period from the warehouse to the cassava starch for the production line. Additionally, at a distance of 113 m, it will display the real operation results of the reverse mode and function Open CV in the form of line detection of the guide line on the road surface. According to Fig. 17, the center [X, Y] is identical to [348, 395] from frames X [0:640] and Y [300:480].

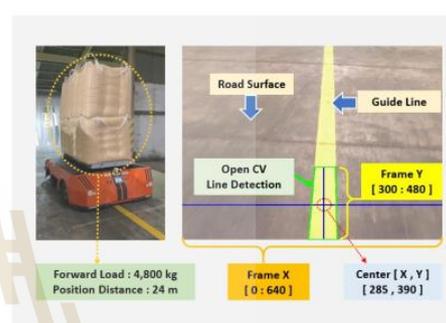


Fig. 16. EV forward line detection



Fig. 17. EV reverse line detection

Additionally, Fig. 18 illustrates the link between frame center X and the turning angle servo motor for forward in the autonomous navigation system devised and constructed to test EV performance in the forward range. It was discovered that the turning angle of the servo motor is proportional to frame center X, which has established the circumstances as indicated in Fig. 14, with the greatest turn left angle when hauling cassava starch with a load capacity of 4,800 kg over a running distance of 200 m and a value of

-20 degrees when center X values are more than 440 and less than 600 of frame center X. As seen in Fig. 19, there is a relationship between the turning angle servo motor for reverse and the frame center X for the reverse period. It was discovered that the turning angle of the servo motor is proportional to frame center X, which has established the conditions as indicated in Fig. 14 with the greatest turn right angle when transporting cassava starch with a load capacity of 2,400 kg over a running distance of 200 m. At center X, a value of 30 degrees greater than and equal to 600 of frame center X since an EV uses a reverse camera for automatic navigation, the relationship between the turning angle of the servo motor and forward is the opposite in this case. Thus, in the turning-angle servo motor, it is alternated with the forward-running type.

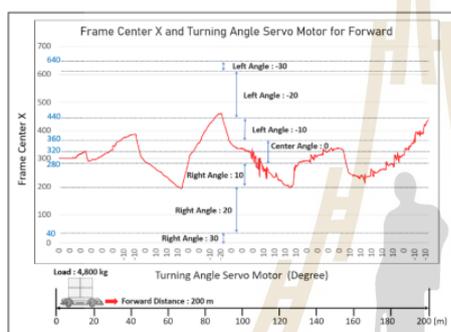


Fig. 18. Frame center X and turning angle servo motor for forward distance 200 m

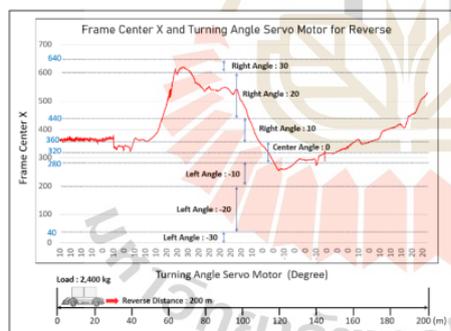


Fig. 19. Frame center X and turning angle servo motor for reverse distance 200 m

4. CONCLUSIONS

The development of EV's autonomous navigation system was focused on moving cassava starch between warehouses. It makes use of technologies that can enable EV' autonomous

driving, with a focus on Modbus TCP/IP protocol-based control systems. In addition, pick a mini PC with a core CPU running windows 10 Pro and install software like Node-RED so that it can link Python files as a middleman. Install the Python V 3.11.0 program to create autonomous navigation algorithms that make use of the line detection function provided by Open CV-python 4.8.0.74. Using the dashboard created in the HMI to control the communication connection to the slave Node-RED, it manages the fundamental functions of the master system. The Ackermann steering system, controlled by a servo motor attached to the rack and pinion steering, and the electric motor of the EV are both under PLC control. Based on the results of an experiment using an automated navigation control system employing EV's Modbus TCP/IP Protocol format control system, using line detection, EV can automatically transport cassava starch at a rate of 1 m/s by selecting the forward option on the dashboard HMI. Function frames X [0:640] and Y [300:480] initiate the activation of Open CV, or 4,800 kg of load. During the forward phase, it was discovered that the center value [X, Y] of the guide line at a position distance of 24 m on the road surface is [285, 390]. And in reverse time, it was discovered that a load of cassava starch weighing 2,400 kg had a 113 m position distance on the road surface [348, 395]. In order to evaluate the performance of the EV, it can also demonstrate the relationship between frame center X and the turning angle servo motor for forward and reverse over a 200 m distance. Additionally, to improve the efficiency of cassava starch transportation between buildings in the future, the smart warehouse system can utilize the developed EV autonomous navigation system. To act as a prototype for the switch to EV for the movement of goods inside more contemporary factories that use comparable modes of transportation, like rice mills and sugar factories.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by funding from outside sources, including the Research and Development Support Fund (OROG), Suranaree University of Technology Institute, and the management team of General Starch Co., Ltd. These sources also supported the budget for prototype development and provided useful information through interviews and operational sites for case study testing.

REFERENCES

- [1] Tamboli, S., Rawale, M., Thoraiet, R. and Agashe, S. 2015. Implementation of Modbus RTU and Modbus TCP communication using Siemens S7-1200 PLC for batch process. International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM). Avadi, India, 6-8 May 2015, pp. 258-263. <https://doi.org/10.1109/ICSTM.2015.7225424>.

- [2] Lin, C. and Zhaolu, S. 2019. Realization of Modern Tram Data Acquisition System Based on Labview and Modbus TCP. International Conference on Safety Produce Informatization (IICSPI). Chongqing, China, 28-30 November 2019, pp. 199-201. <https://doi.org/10.1109/IICSPI48186.2019.9095896>.
- [3] Mughaid, A., AlZubi, S., Alzyoud, A. and Ghazo, A.A. 2022. SCADA Authentication Identification Over The Next Generation CyberNet. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2364360/v>.
- [4] Li, B., Chen, G., Wang, L. and Hao, Z. 2017. Tower Crane Remote Wireless Monitoring System Based on Modbus/Tcp Protocol. IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC). Guangzhou, China, 21-24 July 2017, pp. 187-190. <https://doi.org/10.1109/CSE-EUC.2017.217>.
- [5] Deng, L., Peng, Y., Liu, C., Xin, X. and Xie, Y. 2016. Intrusion Detection Method Based on Support Vector Machine Access of Modbus TCP Protocol. IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). Chengdu, China, 15-18 December 2016, pp. 380-383. <https://doi.org/10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2016.90>.
- [6] Nguyen-Hoang, P. and Vo-Tan, P. 2019. Development An Open-Source Industrial IoT Gateway. International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). Ho Chi Minh, Vietnam, 25-27 September 2019, pp. 201-204. <https://doi.org/10.1109/ISCIT.2019.8905157>.
- [7] Nguyen Thi Thanh, N. and Nguyen Kim, K. 2021. ECODA - Entropy Correlation Based Data Aggregation Protocol For Wireless Sensor Networks. GMSARN International Journal, 15(2), pp. 103-112.
- [8] Bhattacharjee, T., Saha, A. K., Ramalingam, S. P., Shanmugam, P. K. and Padmanaban, S. 2019. Server Monitoring and Priority based Automatic Load Shedding Algorithm (SEMPALS). IEEE Region 10 Conference (TENCON). Kochi, India, 17-20 October 2019, pp. 1863-1868. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2019.8929335>.
- [9] Ye, W., Yuetian, S., Yunhe, X., Shu, W. and Yuchen, Z. 2010. The Implementation of Lane Detective Based on Open CV. Second WRI Global Congress on Intelligent Systems. Wuhan, China, 16-17 December 2010, pp. 278-281. <https://doi.org/10.1109/GCIS.2010.120>.
- [10] Thanh, B. D., Khanh, G. D., Anh, M. T. and Hoa, T. T. 2024. Rice Leaf Diseases Detection Using Deep Learning Ensemble Model. GMSARN International Journal, 18(3), pp. 308-314.
- [11] Mohammed Shariff, A. S., Bhatia, R., Kuma, R. and Jha, S. 2021. Vehicle Number Plate Detection Using Python and Open CV. International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). Greater Noida, India, 04-05 March 2021, pp. 525-529. <https://doi.org/10.1109/ICACITE51222.2021.9404556>.
- [12] Yemaydin, Y. and Schmidt, K. W. 2020. Lane Detection and Tracking based on Best Pairs of Lane Markings: Method and Evaluation. Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Gaziantep, Turkey, 05-07 October 2020, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/SIU49456.2020.9302424>.
- [13] Ma, L. Y., Zhu, H. and Duan, H. 2021. A Method of Multiple Lane Detection Based on Constraints of Lane Information. China Automation Congress (CAC). Beijing, China, 22-24 October 2021, pp. 4059-4064. <https://doi.org/10.1109/CAC53003.2021.9727491>.
- [14] Veneri, M. and Massaro, M. 2021. The effect of Ackermann steering on the performance of race cars. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 59(6), pp. 907-927.
- [15] Ajay, M. T., Sanket, P. G., Shital, R. U. and Nikita, R. K. 2019. Design of Rack and Pinion Steering System for all Terrain Vehicle. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 6(2), pp. 612-615.
- [16] Yue, G. 2020. Design of Intelligent Monitoring and Control System Based on Modbus. International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP). Chengdu, China, 13-15 November 2020, pp. 149-153. <https://doi.org/10.1109/CCISP51026.2020.9273500>.
- [17] Nyasore, O. N., Zavarisky, P., Swar, B., Naiyeju, R. and Dabra, S. 2020. Deep Packet Inspection in Industrial Automation Control System to Mitigate Attacks Exploiting Modbus/TCP Vulnerabilities. IEEE 6th Intl Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE Intl Conference on High Performance and Smart Computing (HPSC) and IEEE Intl Conference on Intelligent Data and Security (IDS). Baltimore, MD, USA, 25-27 May 2020, pp. 241-245. <https://doi.org/10.1109/BigDataSecurity-HPSC-IDS49724.2020.00051>.
- [18] Benyezza, H., Bouhedda, M., Faci, N., Aissani, M. and Rebouh, S. 2019. Greenhouse Monitoring and Fuzzy Control System based on WSN and IoT. International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAD). Elazig, Turkey, 25-27 September 2019, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICAAD.2019.8934984>.
- [19] Okeke, D. and Musa, S. M. 2021. Energy Management and Anomaly Detection in Condition Monitoring for Industrial Internet of Things Using Machine Learning. International Conference on Informatics, Multimedia, Cyber and Information System (ICIMCIS). Jakarta, Indonesia, 28-29 October 2021, pp. 65-68. <https://doi.org/10.1109/ICIMCIS53775.2021.9699352>.
- [20] Gayathri Devi, T., Neelamegam, P. and Sudha, S. 2017. Image Processing System for Automatic Segmentation and Yield Prediction of Fruits using Open CV. International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC). Mysore, India, 08-09 September 2017, pp. 758-762. <https://doi.org/10.1109/CTCEEC.2017.8455137>.
- [21] Singh, G., Gupta, I., Singh, J. and Kaur, N. 2022. Face Recognition using Open Source Computer Vision Library (Open CV) with Python. International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO). Noida, India, 13-14 October 2022, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICRITO56286.2022.9964836>.
- [22] Kaewpoung, S., Su-hren, W., Musigapong, P. and Ratniyomchai, T. 2023. Development of Starch Transport Vehicle in Industrial Plant Using EV Technology for 4,000 kg Load. Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023). Nakhon Phanom, Thailand, 1-3 May 2023, pp. 887-890.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)

การพัฒนารถขนส่งแป้งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าที่กักตุนรถ 4,000 kg Development of Starch Transport Vehicle in Industrial Plant Using EV Technology for 4,000 kg Load

ศุภชัย แก้วทวง¹ วรธรณ์ สุพรรณ¹ พิรัชญา มุสิกะหงส์² และ ทศพล รัตนนิยมชัย³¹สาขาวิศวกรรมจัดการพลังงานและโลจิสติกส์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000 E-mail: peper.supachai@gmail.com

²สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี111 ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000 E-mail: jamewiwat2542@gmail.com, ⁴tosaphol@sut.ac.th³สาขาวิชาชีวอนามัยและความปลอดภัย สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000 E-mail: pirutchada@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าพัฒนาการผลิตแป้งมันสำปะหลังภายในโรงงาน มีเป้าหมายเพื่อใช้ขนส่งแป้งในโรงงานที่มีกำลังผลิตแป้งต่อวันจำนวน 400,000 kg โดยกำหนดให้รถที่ต้องพัฒนามีน้ำหนักตัวรถ 1,000 kg สามารถบรรทุกโหลดได้สูงสุด 4,000 kg วิ่งความเร็วได้สูงสุด 1 m/s เพื่อใช้เป็นหลักการคำนวณหาพิกัดมอเตอร์และขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของการพัฒนารถไฟฟ้า และนำรถที่พัฒนาวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยทดสอบวิ่ง 2 กรณี ในกรณีแรกบรรทุกโหลด 4,000 kg ที่ความเร็ว 0.5 m/s พบว่ามีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อวัน 3.29 kWh และกรณีที่สองบรรทุกโหลด 2,000 kg ที่ความเร็ว 1 m/s พบว่ามีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อวัน 4.48 kWh ดังนั้นมอเตอร์ที่เลือกใช้มีกำลัง 5 kW และแบตเตอรี่ที่เลือกใช้มีขนาด 4 kWh พิจารณาจากการทดสอบวิ่งในกรณีแรกที่มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่ากรณีที่สองร้อยละ 26.56 ซึ่งมีผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทั้งนี้ผลการศึกษาดังกล่าว โรงงานสามารถนำไปใช้เป็นหลักในการวิเคราะห์เลือกขนาดแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: แป้งมันสำปะหลัง, โรงงานอุตสาหกรรม, ยานยนต์ไฟฟ้า

Abstract

The design of an electric vehicle for transporting tapioca starch in a factory that can generate 400,000 kg of product per day. The vehicle has a weight capacity of 1,000 kg to 4,000 kg and can travel with a maximum speed of 1 m/s. The necessary motor and battery capacity are determined using these designations. Two scenarios are taken into consideration to study the trade-off between throughput and energy use.

First, the vehicle uses 3.29 kWh per day while moving at a speed of 0.5 m/s and carrying 4,000 kg of load. Second, the vehicle uses 4.48 kWh per day while moving at a speed of 1 m/s and carrying 2,000 kg of load. The finding suggests that the first condition performs better than the alternative scenario. It can reduce the energy usage by 26.56%, which will have an influence on greenhouse gas emissions. Thus, the final design requires a 4 kWh battery and a 5 kW motor. Tapioca starch mills may decide to further examine this proposed design in an effort to maintain their competitiveness because it can potentially reduce power costs while maintaining high throughput.

Keywords: Starch, Industrial Plant, Electric Vehicle (EV)

1. บทนำ

ปัจจุบันการขนส่งแป้งมันสำปะหลังระหว่างไลน์ผลิตและคลังเก็บสินค้าในโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง ส่วนใหญ่มักใช้รถบรรทุกหรือรถโฟล์คลิฟท์สำหรับการขนส่งแป้งมันสำปะหลังที่บรรจุอยู่ในกระสอบที่เบ็ดที่มีขนาด 800 kg ถึง 1,000 kg ในระหว่างทำการขนส่งทำให้เกิดปัญหาการใช้เชื้อเพลิงที่สูญเปล่าในระหว่างที่ไม่จำเป็นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวการวางแผนระบบในการผลิตมีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ ในเบื้องต้นมี 2 วิธี วิธีแรก คือ การปรับปรุงสายพานลำเลียงจากชุดบรรจุให้มีระยะสั้นลง และอีกวิธี คือ การปรับเปลี่ยนเส้นทางขนส่งใหม่ให้มีระยะทางที่สั้นลง [1],[2] เนื่องจากเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ไฟฟ้าได้ก้าวเข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหาการใช้เชื้อเพลิงของรถบรรทุกและรถโฟล์คลิฟท์ [3] ดังนั้นเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ไฟฟ้าจึงเป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถนำมาพัฒนาการขนส่งสินค้า

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



ภายในโรงงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขนย้ายสินค้า รวมทั้งประหยัดค่าใช้จ่ายการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นน้ำมันและแก๊สให้มากที่สุด [4]

สิ่งสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ไฟฟ้า คือ ต้องเข้าใจหลักการออกแบบขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่ เพื่อให้ตอบโจทย์กับความต้องการและนำไปใช้งานอย่างเหมาะสม อันดับแรกที่ต้องคำนึงถึง คือ น้ำหนักโหลดสูงสุดและความเร็วเฉลี่ยที่ใช้เป็นหลัก Yuan Cheng และคณะ [5] แนะนำขึ้นขั้นตอนการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าของระบบยานยนต์ไฟฟ้า รวมทั้งวิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์แรงบิดและกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อใช้เลือกขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสม หลังจากนั้นวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูงสุดเพื่อใช้คำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่และออกแบบระบบสถานีชาร์จ ซึ่ง A. Nabi Akpolat และคณะ [6] เสนอการคำนวณขนาดแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้การทำงานสภาวะการขับขี่ในสภาพถนนต่าง ๆ เช่น ทางเรียบ ทางลงเนิน และทางขึ้นเนิน เป็นต้น เพื่อใช้วิเคราะห์และสามารถเลือกขนาดแบตเตอรี่อย่างถูกต้อง Z. Yu และคณะ [7] เสนอการพัฒนากระบวนการสร้างแบตเตอรี่และการออกแบบวงจรควบคุมของโมดูลการสื่อสารสำหรับการชาร์จของยานยนต์ไฟฟ้า

ในบทความนี้ นำเสนอการปรับเปลี่ยนมาใช้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าขนส่งแบ่งระหว่างไลน์ผลิตไปยังโกดังเก็บแข็ง กรณีศึกษาบริษัท เชนเน็กซ์ สตาร์ช จำกัด ได้นำรถที่พัฒนาทดสอบบรรทุกโหลดและปรับความเร็วเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า รวมทั้งคำนวณหาพิคคอปเตอร์และขนาดแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของการพัฒนารถให้มีประสิทธิภาพต่อการใช้งาน

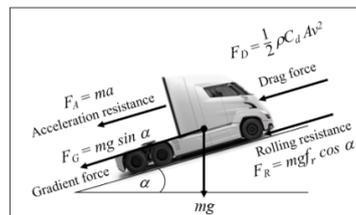
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการออกแบบขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า

การออกแบบขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีกฎข้อที่สองของนิวตัน เริ่มต้นจากการหาแรงศูนย์กลางของตัวรถเพื่อเป็นแนวทางในการหาขนาดกำลัง ดังรูปที่ 1 เมื่อรถเคลื่อนที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้น จากกฎข้อที่สองของนิวตันเมื่อมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นผลลัพธ์ของแรงทั้งหมด F_T ที่สามารถทำได้ ดังสมการที่ (1) ได้แก่ F_R แรงเสียดทานล้อ (Rolling resistance) F_D แรงต้านอากาศ (Drag force) F_G แรงต้านจากทางลาดชัน (Gradient force) และ F_A แรงต้านผิวนิวของมวลในขณะเร่งความเร็ว (Acceleration resistance) แทนค่าสมการของแรงต่าง ๆ ดังสมการที่ (2)

$$F_T = F_R + F_D + F_G + F_A \tag{1}$$

$$F_T = mgf_r \cos \alpha + \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 + mg \sin \alpha + ma \tag{2}$$



รูปที่ 1 ผลลัพธ์ของแรงกระทำทั้งหมดต่อตัวรถ

- โดยที่
- m คือ น้ำหนักตัวรถรวมบรรทุกโหลด (kg)
 - g คือ อัตราเร่งโน้มถ่วง (m/s^2)
 - f_r คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานล้อกับพื้น
 - α คือ ความชันของพื้น (องศา)
 - ρ คือ ความหนาแน่นอากาศ (kg/m^3)
 - A คือ พื้นที่หน้าตัดหน้าตัวรถ (m^2)
 - v คือ ความเร็วรถ (m/s)
 - a คือ อัตราเร่งของรถ (m/s^2)
 - C_d คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

นอกจากนี้แรงที่กระทำให้สิ่งของหมุนในจุดสาขาทรานยอนด์ เรียกว่า แรงทอร์ค หรือ แรงบิด เมื่อเกิดแรงบิดที่เพลขาขับหมุนทำให้รถเคลื่อนที่ และเกิดกำลังงานที่ใช้ต่อเนื่อง เรียกว่า แรงม้า หรือ กำลังขับของมอเตอร์ ดังนั้นใช้ผลลัพธ์ของแรงทั้งหมด จากสมการที่ (2) คำนวณหา T แรงบิด (Torque) ดังสมการที่ (3) และ P กำลังขับของมอเตอร์ (Power) ดังสมการที่ (4) [6]

$$T = \frac{F_T r}{\eta} \tag{3}$$

$$P = \frac{F_T v}{\eta} \tag{4}$$

- โดยที่
- r คือ รัศมีล้อรถ (m)
 - η คือ ประสิทธิภาพมอเตอร์

2.2 หลักการออกแบบขนาดแบตเตอรี่

การออกแบบขนาดแบตเตอรี่สำหรับรถไฟฟ้าสามารถใช้กำลังขับของมอเตอร์จากสมการที่ (4) เพื่อนำมาวิเคราะห์อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่แปรผันตามระยะทางและเวลา ใช้คำนวณหาอัตราการใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

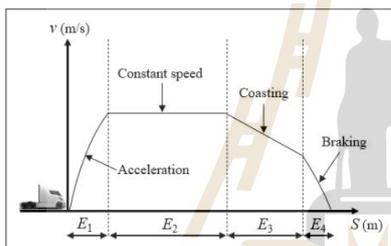
15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดเส้นทางที่วิ่ง E_T โดยใช้ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถ 4 ช่วง ได้แก่ E_1 ช่วงเร่งออกตัว (Acceleration) E_2 ช่วงความเร็วคงที่ (Constant speed) E_3 ช่วงปล่อยไหล (Coasting) และ E_4 ช่วงเบรก (Braking) ดังรูปที่ 2 ดังนั้นสามารถคำนวณหาการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงพิจารณาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของระยะทางทั้งหมดรวมทุกช่วง โดยกำหนดเป็นค่าแปร i มีค่าเท่ากับ 1 ถึง 4 ดังสมการที่ (5) [7]

$$E_T = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{P_i \cdot S_i}{\eta_{mv} \cdot DOD_{batt} \cdot v_i} \right) \quad (5)$$

โดยที่ P_i คือ กำลังขับเคลื่อน ช่วง i (kW)
 S_i คือ ระยะทางวิ่งรถ ช่วง i (m)
 v_i คือ ความเร็ววิ่ง ช่วง i (m/s)
 η_{mv} คือ ประสิทธิภาพมอเตอร์
 DOD_{batt} คือ ประสิทธิภาพการคายประจุของแบตเตอรี่



รูปที่ 2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถในแต่ละช่วง

3. เปรียบวิธีการและผลการทดสอบ

กำหนดค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 1 เพื่อใช้คำนวณผลลัพธ์ของแรงทั้งหมด ค่ามหาแรงบิด และกำลังขับของมอเตอร์ ดังสมการที่ (2)–(4) คำนวณขนาดแบตเตอรี่ โดยใช้ผลรวมของอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่แปรผันตามกำลังขับของมอเตอร์ ระยะทาง และความเร็วที่วิ่งในแต่ละช่วงที่กำหนดเป็นค่าแปร i ดังสมการที่ (5) ดังนั้นนำพิกัดมอเตอร์และขนาดแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก พัฒนาเป็นรถไฟฟ้าเพื่อใช้ขนส่งเบ้่งมันสำปะหลังภายในโรงงาน ดังรูปที่ 3

ผลการคำนวณค่ากำลังขับของมอเตอร์ในกรณีนี้พิจารณาช่วงเร่งเท่านั้น ซึ่งเป็นช่วงที่ใช้กำลังขับและแรงบิดมอเตอร์สูงสุด พบว่า P เท่ากับ 3.26 kW และ T เท่ากับ 921.82 Nm นำค่ากำลังขับของมอเตอร์คำนวณต่อการรองรับ โหลดเกิน 25 % ค่า พบว่า P เท่ากับ 4.07 kW พิกัดมอเตอร์ที่เลือกใช้จำนวน เท่ากับ 5 kW



รูปที่ 3 รถขนส่งเบ้่งมันสำปะหลังภายในโรงงานที่พัฒนา

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณหาแรงบิดและกำลังขับของมอเตอร์

พารามิเตอร์	ความหมาย	เท่ากับ	หน่วย
m	น้ำหนักตัวรวมบรรทุกโหลด	5,000	kg
g	อัตราเร่งโน้มถ่วง	9.8100	m/s ²
f_r	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานล้อกับพื้น	0.0090	-
α	ความชันของพื้น	0	องศา
ρ	ความหนาแน่นอากาศ	1.1455	kg/m ³
C_d	สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ	0.1900	-
A	พื้นที่หน้าตัดหน้าตัวรถ	2.4780	m ²
v	ความเร็วรถ	1	m/s
a	อัตราเร่งของรถ	0.5000	m/s ²
r	รัศมีล้อรถ	0.2820	m
η	ประสิทธิภาพมอเตอร์	0.9000	-
η_m	ประสิทธิภาพมอเตอร์	0.9000	-
DOD_{batt}	ประสิทธิภาพการคายประจุของแบตเตอรี่	0.8000	-

ผลการคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมต่อการใช้งานเพื่อลดต้นทุนสำหรับการพัฒนา รถไฟฟ้า นำหลักการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ดังรูปที่ 2 พิจารณาเส้นทางวิ่ง (ในกรณีไม่มีทางชันและไม่มีสิ่งกีดขวางเท่านั้น) โดยไม่พิจารณาช่วงปล่อยไหลและช่วงเบรก เนื่องจากความเร็วที่วิ่งมีความเร็วต่ำ กรณีที่ต้องการหยุดสามารถหยุดได้ทันที (ระยะเบรกน้อยมาก) ดังนั้น กำหนดระยะทางวิ่งขาไปและขากลับ 200 m มีระยะทางช่วงเร่ง 1 m และระยะทางช่วงความเร็วคงที่ 199 m

การทดสอบวิ่งรถขนส่งเบ้่งมันสำปะหลัง 2 กรณี โดยมีเป้าหมายขนส่งเบ้่งมันสำปะหลังไปยังโกดังเก็บเบ้่งมันสำปะหลังจำนวน 400,000 kg สำหรับกรณีแรก กำหนดให้ขาไปบรรทุก โหลดที่น้ำหนักรวม 4,000 kg วิ่งในระยะทางขาไป 200 m ที่ความเร็ว 0.5 m/s และขากลับไม่บรรทุก โหลด (วิ่งรถเปล่า) ที่น้ำหนัก 1,000 kg ในระยะทาง 200 m ที่ความเร็ว 0.5 m/s เพื่อขนส่งเบ้่งมันสำปะหลังเป้าหมายต่อวันใช้จำนวน 100 รอบ และกรณีที่สอง กำหนดให้ขาไปบรรทุก โหลดที่น้ำหนักรวม 2,000 kg วิ่งในระยะทางขาไป 200 m ที่ความเร็ว 1 m/s และขากลับไม่บรรทุก โหลด (วิ่งรถเปล่า) ที่

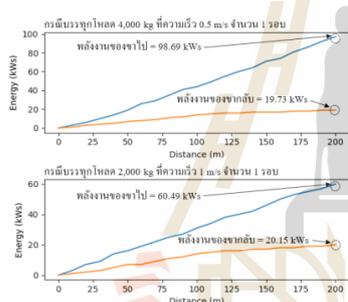
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



น้ำหนัก 1,000 kg ในระยะทาง 200 m ที่ความเร็ว 1 m/s เพื่อขนส่งเบี่ยงให้ได้ตามเป้าหมายต่อวันใช้จำนวน 200 รอบ โดยวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานเทียบกับระยะทางที่วิ่งเข้าไปและขากลับต่อรอบของทั้งสองกรณี ดังรูปที่ 4 จากการทดสอบพบว่ากรณีแรกมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่อวัน E_T เท่ากับ 3.29 kWh ซึ่งน้อยกว่ากรณีที่สองร้อยละ 26.56 ที่มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่อวัน E_T เท่ากับ 4.48 kWh ดังนั้นแบตเตอรี่ที่เลือกใช้มีขนาด 4 kWh เพื่อความยั่งยืนของการพัฒนาและลดข้อดัดนำมาใช้ประโยชน์หากรื่องกลการที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนจึงถูกนำมาพิจารณาด้วย โดยนำอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เทียบกับปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลังงานไฟฟ้า ด้วยวิธีการคำนวณของ IPCC 2007 GWP [8] พบว่า กรณีทดสอบที่ 1 และ 2 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นปริมาณ 469.55 และ 639.39 kg CO₂-eq ต่อปี ตามลำดับ ดังนั้น หากเลือกใช้กรณีที่ 1 ซึ่งมีสมรรถนะในการทำงานสูง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่ำกว่า สามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้ถึง 169.84 kg CO₂-eq ต่อปี เมื่อเทียบกับกรณีที่ 2



รูปที่ 4 การใช้พลังงานเทียบกับระยะทางวิ่งเข้าไปและขากลับต่อรอบ

4. สรุป

การพัฒนารถขนส่งเบี่ยงมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรมและบรรทุกโหนดสูงสุดที่กัก 4,000 kg ใช้สำหรับโรงงานมีกำลังการผลิตเบี่ยงต่อวัน 400,000 kg สามารถนำผลลัพธ์ของแรงที่กระทำต่อตัวรถทั้งหมด คำนวณหากำลังขับและแรงบิดของมอเตอร์ จากการคำนวณเลือกใช้พิกัดมอเตอร์ 5 kW และคำนวณขนาดแบตเตอรี่โดยใช้หลักการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ทดสอบวิ่งรถ 2 กรณี กรณีแรกบรรทุกโหนด 4,000 kg ที่ความเร็ว 0.5 m/s และกรณีที่สอง บรรทุกโหนด 2,000 kg ที่ความเร็ว 1 m/s จากการทดสอบพบว่ากรณีแรกมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 3.29 kWh ซึ่งน้อยกว่ากรณีที่สองร้อยละ 26.56 ที่มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 4.48 kWh ดังนั้นแบตเตอรี่ที่เลือกใช้มีขนาด 4 kWh นอกจากนี้ยังใช้เป็น

หลักการวิเคราะห์เพื่อนำไปพัฒนารถขนส่งภายในโรงงานของอุตสาหกรรมอื่นที่เกี่ยวข้อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Vonolfen, M. Kofler, A. Beham, M. Affenzeller and W. Achleitner, "Optimizing assembly line supply by integrating warehouse picking and forklift routing using simulation," Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), 2012, pp. 1-12, doi: 10.1109/WSC.2012.6465077.
- [2] S. M. M. Rahman, "Forklift Routing Optimization in a Warehouse using a Clustering-based Approach," Presented in Partial Fulfillment of the Requirements For the Degree of Master of Applied Science in Industrial Engineering, May 2019.
- [3] S. López, J. Caicedo, M. Mamani, A. A. Romero and G. Rattá, "Literature review: Potential impacts of plug-in electric vehicles on electric power systems," 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA), 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/TDC-LA.2014.6955255.
- [4] X. Sun, Z. Li, X. Wang and C. Li, "Technology Development of Electric Vehicles: A Review," All content following this page was uploaded by Chengjiang Li on 23 December 2019, Energies 2020, 13, 90; doi:10.3390/en13010090.
- [5] Yuan Cheng, Fuyi Duan and Shumei Cui, "The design principle of electric motors and drive systems for electric vehicles," 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005, pp. 802-805 Vol. 1, doi: 10.1109/ICEMS.2005.202647.
- [6] A. Nabi Akpolat, Y. Yang, F. Blaabjerg, E. Dursun and A. Emin Kuzucuoglu, "Li-ion-based Battery Pack Designing and Sizing for Electric Vehicles under Different Road Conditions," 2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/SEST48500.2020.9203196.
- [7] Z. Yu, M. Zhang and J. Yang, "Design of Energy Management Systems for Mobile Power Station of Electric Vehicles," 2009 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, 2009, pp. 250-253, doi: 10.1109/ICIM.2009.521.
- [8] กระทรวงพลังงาน. สำนักนโยบายและแผนพลังงาน (2565). การปล่อย CO₂. สืบค้น 2 มีนาคม 2566, จาก <https://www.eppo.go.th/index.php/th/en-energystatistics/co2-statistic>

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)

การจำลองระบบนำทางอัตโนมัติของหุ่นยนต์ AMR โดยใช้โปรแกรม ROS และ Gazebo แบบ 3 มิติ
Simulation of Automated Navigation Systems for AMR robot using ROS and Gazebo 3D Program

กิตติยศ ยะเจริญ¹ ฤกษ์ชัย แก้วพวง² และ ทศพล รัตนนิมชัย³¹สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000 E-mail: kittiyos2058@hotmail.com

²สาขาวิศวกรรมการจัดการพลังงานและโลจิสติกส์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000 E-mail: peper.supachai@gmail.com

³สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000 E-mail: tosaphol@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองหุ่นยนต์ AMR เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับนำทางอัตโนมัติโดยใช้ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ ROS และโปรแกรมจำลองผล Gazebo แบบ 3 มิติ เน้นวิเคราะห์การแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งหุ่นยนต์ของการวัดระยะทางแบบ Odometry ด้วยวิธี EKF เปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์โดยจำลองการวิ่งแบบรูป และศึกษาผลกระทบการปรับค่าพารามิเตอร์การนำทาง 2 แบบ โดยวิธีที่หนึ่งคือ Look-Ahead Distance ปรับค่าพารามิเตอร์ทดสอบที่ระยะ 0.3 m, 0.5 m, 1.5 m และ 2.5 m และแบบที่สองคือ Inflation Radius หรือ I ปรับค่าพารามิเตอร์ทดสอบที่ระยะ 0.3 m, 1.0 m และ 1.3 m จากผลการจำลองพบว่าความคลาดเคลื่อนของการวัดระยะทางแบบ Odometry ด้วยวิธี EKF ลดลงร้อยละ 32 และค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในแบบแรกเท่ากับ 1.5 m และแบบที่สอง 1.3 m นอกจากนี้สามารถใช้เป็นหลักการเพื่อวิเคราะห์การปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรมการจำลองหุ่นยนต์โดยใช้ ROS และ Gazebo แบบ 3 มิติ ให้เหมาะสมกับพื้นที่สภาพแวดล้อมการใช้งานจริง และประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาหุ่นยนต์ต้นแบบ

คำสำคัญ: ระบบนำทางอัตโนมัติ, หุ่นยนต์ AMR, ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์, โปรแกรมจำลองผล Gazebo

Abstract

This paper presents a simulation of an autonomous mobile robot (AMR) robot to develop a simulated autonomous navigation program using robot operating system (ROS) and Gazebo simulator in 3D. It focuses on solving the problem of robot position discrepancy in odometry by extended kalman filter (EKF) method based on the actual position of the robot by circular motion and study the effects of adjusting

2 navigation parameters. Firstly, Look-Ahead Distance would adjust the test parameter at 0.3 m, 0.5 m, 1.5 m, and 2.5 m. Secondly, Inflation Radius would adjust the test parameter at 0.3 m, 1.0 m and 1.3 m. From the simulation results, the error of odometry by EKF method is reduced by 32 %, the optimum parameters in the first and second types were 1.5 m and 1.3 m, respectively. Furthermore, it can be used as a formality to analyze parameter adjustments with robot simulation software using ROS and Gazebo in 3D to suit the real-world environment and can be applied for the development of prototype robots.

Keywords: AMR Robot, Robot Operating System (ROS), Gazebo

1. บทนำ

ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่โดยเฉพาะอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ระบบขนส่งในไลน์ผลิตนิยมใช้รถ Automated Guided Vehicle (AGV) ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายและเพิ่มเป็นจำนวนมากขึ้นในแต่ละปี ข้อดีคือ เป็นพาหนะที่ใช้ขนส่งภายในอาคารแบบไร้คนขับ โดยอาศัยการนำทางที่ใช้แบบหลัก ๆ เช่น Reflective Marker, Frequency ID, Magnetic Tape, Vision และ Laser Guidance เป็นต้น ส่งผลให้เกิดปัญหาของรถ AGV ที่มีข้อจำกัดอย่างมากในการเปลี่ยนเส้นทางเนื่องจากมีโครงสร้างของระบบนำทางที่ซับซ้อน ทำให้ระยะเวลาในการติดตั้งระบบในกรณีที่ต้องการปรับเปลี่ยนเส้นทางหรือเพิ่มเส้นทางใหม่ มีความยากลำบากและมีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงพอสมควร [1],[2]

ปัญหาดังกล่าวการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ Autonomous Mobile Robot (AMR) ช่วยให้มีข้อได้เปรียบในเรื่องของการเปลี่ยนเส้นทางได้ง่ายกว่ารถ AGV, J. Pechiar [3] กล่าวถึงการนำทางแบบ Trackless Natural Navigation ที่เป็นระบบเซ็นเซอร์ตรวจจับสภาพแวดล้อมเพื่อใช้ระบุเส้นทางที่กำหนดในแผนที่ W. Xue

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



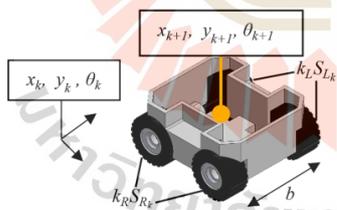
และคณะ [4] ได้เสนอการปรับเปลี่ยนเส้นทางทำได้ง่ายและสะดวกโดยใช้วิธี Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ และสามารถนำทางโดยใช้ข้อมูลจากแผนที่เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางทั้งสิ่งกีดขวางแบบอยู่กับที่ (Static Obstacle) และสิ่งกีดขวางแบบเคลื่อนที่ (Dynamic Obstacle) เพื่อความปลอดภัยระหว่างหุ่นยนต์ทำงาน Shusheng Bi และคณะ [5] กล่าวถึงการปรับค่าพารามิเตอร์การวัดระยะ Odometry ของตำแหน่งหุ่นยนต์นำทางไปยังจุดหมายในแผนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ เอลิมซันน์ สติระพจน์ และคณะ [6] เสนอการประมวลผลข้อมูลสำหรับการหาตำแหน่งด้วย GPS แบบสถิติด้วยวิธี EKF และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคำนวณค่าเชิงตัวเลขที่ใช้ในการหาตำแหน่งด้วย GPS แบบจุดเดียว

ในบทความนี้ นำเสนอการจำลองหุ่นยนต์นำทางอัตโนมัติ โดยใช้โปรแกรม ROS และ Gazebo แบบ 3 มิติ เพื่อแก้ปัญหาตำแหน่งหุ่นยนต์ที่คลาดเคลื่อน โดยวัดระยะทางของ Odometry ด้วยวิธี EKF ศึกษาผลกระทบการปรับค่าพารามิเตอร์แบบ Look-Ahead Distance และ Inflation Radius เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานกับสภาพแวดล้อมที่จริงให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.1 การวัดระยะทางแบบ Odometry

การวัดระยะทางแบบ Odometry เป็นการสอบเทียบระยะตำแหน่งหุ่นยนต์ที่จำลองในโปรแกรมกับหุ่นยนต์จริงที่พัฒนา ดังรูปที่ 1 เป็นแบบจำลองการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เพื่อใช้เป็นหลักการคำนวณพิกัดของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากจุดเริ่มต้น โดยคำนวณหาพิกัด x_{k+1} และ y_{k+1} ของหุ่นยนต์ ในหน่วย m และ θ_{k+1} เป็นมุมทิศการหมุนในหน่วย radian ส่วนพิกัดที่เปลี่ยนไปกรณีหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ดังสมการที่ (1) – (3) [5]



รูปที่ 1 แบบจำลองการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์

$$x_{k+1} = x_k + \left(\frac{k_R S_{R_k} + k_L S_{L_k}}{2} \right) \cos \left(\theta_k + \frac{k_R S_{R_k} - k_L S_{L_k}}{2b} \right) \quad (1)$$

$$y_{k+1} = y_k + \left(\frac{k_R S_{R_k} + k_L S_{L_k}}{2} \right) \sin \left(\theta_k + \frac{k_R S_{R_k} - k_L S_{L_k}}{2b} \right) \quad (2)$$

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \left(\frac{k_R S_{R_k} - k_L S_{L_k}}{b} \right) \quad (3)$$

โดยที่ x_k, y_k, θ_k คือ พิกัดและทิศการหมุนของหุ่นยนต์ ณ เวลาปัจจุบัน $x_{k+1}, y_{k+1}, \theta_{k+1}$ คือ พิกัดและทิศการหมุนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากจุด x_k, y_k และ S_{R_k}, S_{L_k} คือ สัญญาณพัลส์ (Pulse) ของ Encoder ล้อซ้ายและขวาของหุ่นยนต์ k_R, k_L คือ สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร S_{R_k}, S_{L_k} และ b คือ ระยะระหว่างล้อซ้ายและขวาของหุ่นยนต์

2.2 Extended Kalman Filter (EKF)

EKF คือ การประมาณค่าสมการเชิงเส้นของตัวแปรในระบบพลวัต (State Vector System) ณ เวลาปัจจุบัน ด้วยข้อมูลเวลาก่อนหน้า และเวลาถัดไป ซึ่งหลักการของ EKF ใช้แก้ปัญหาสัญญาณรบกวน และใช้ปรับค่าอินพุตของเซนเซอร์ให้มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ระบบพลวัตมีสมการสัมพันธ์แปรผันกับเวลา ณ เวลา k ดังสมการที่ (4) และสอดคล้องกับเวกเตอร์ค่าสังเกต (Measurement vector, z_k) ดังสมการที่ (5) [6]

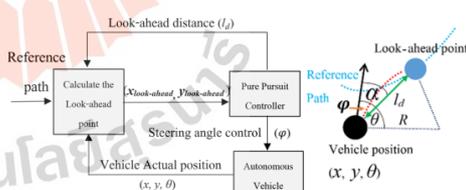
$$x_{k+1} = \phi_k x_k + w_k \quad (4)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (5)$$

โดยที่ w_k คือ System noise, v_k คือ Measurement noise, k คือ เวลา ณ ขณะนั้น ϕ_k คือ Transition matrix และ H_k คือ Measurement connection matrix

2.3 Pure Pursuit Algorithm (PPA)

กระบวนการ Pure Pursuit Algorithm คือ ตัวบ่อนำสั่งการนำทางของหุ่นยนต์อัตโนมัติ โดยสั่งการในรูปแบบความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุม กระบวนการทำงานเชิงหลักการของ PPA ดังรูปที่ 2 [7]



รูปที่ 2 Pure Pursuit Algorithm Diagram

โดย l_d เป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการควบคุมองศาเลี้ยว ϕ ของหุ่นยนต์ จากแผนภาพ ϕ มีความสัมพันธ์กับมุม α และระยะห่างล้อ b จากหัวข้อที่ 2.1 ดังสมการที่ 6

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15
15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)

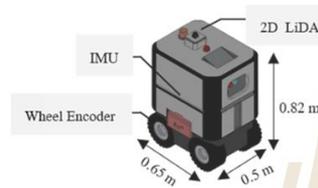


$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2b \sin \alpha}{l_d} \quad (6)$$

3. เปรียบวิธีและผลการจำลอง

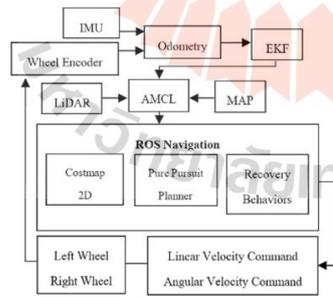
3.1 การจำลองหุ่นยนต์นำทางอัตโนมัติ

หุ่นยนต์ที่นำมาจำลองเพื่อใช้ทดสอบระบบนำทางอัตโนมัติ ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidworks ประกอบด้วยล้อทั้งหมด 4 ล้อ ขับเคลื่อนแบบ Differential Drive ติดตั้งเซนเซอร์ LiDAR, Inertial Measurement Unit (IMU) และ Encoder โดยกำหนดขนาดของหุ่นยนต์ และตำแหน่งของเซนเซอร์ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 หุ่นยนต์นำทางอัตโนมัติออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidworks

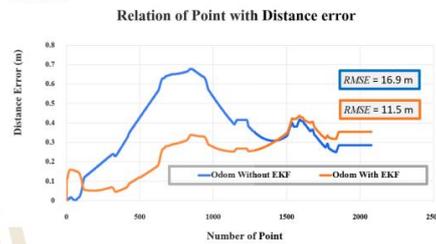
การจำลองหุ่นยนต์ที่ออกแบบใช้โปรแกรม ROS และ Gazebo ด้วยวิธีการ EKF กับการวัดระยะ Odometry ความคุมการทำงาน เพื่อระบุตำแหน่งบนแผนที่ โดยใช้หลักการ Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL) ร่วมกับ LiDAR เพื่อแก้ปัญหาคาบคลเคลื่อนบนแผนที่ โดยใช้ Pure Pursuit Planner (PPP) นำทางหุ่นยนต์แบบอัตโนมัติ จำลองในแผนที่ด้วยวิธีการ SLAM และปรับพารามิเตอร์เพื่อตรวจสอบสิ่งกีดขวางด้วย Costmap 2D ดังรูปที่ 4 สำหรับการจำลองใช้ซอฟต์แวร์ ROS 2 foxy, Gazebo, Ubuntu Mate 20.04 และคอมพิวเตอร์ CPU: i7-7700K, RAM: 16GB



รูปที่ 4 ระบบควบคุมการทำงานผ่านโปรแกรม ROS และ Gazebo

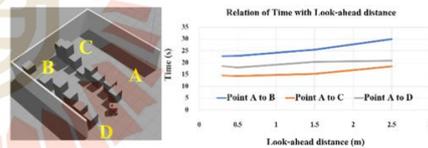
3.2 ผลการจำลอง

การเปรียบเทียบการวัดระยะ Odometry ด้วยวิธี EKF ดังรูปที่ 5 สามารถลดค่า Root Mean Square Error (RMSE) ได้ 5.4 m (กราฟเส้นสีส้ม มีค่า RMSE 11.5 m) ลดความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งได้ ร้อยละ 32 (เปรียบเทียบกับกราฟเส้นสีน้ำเงิน มีค่า RMSE 16.9 m) และค่าที่ได้สามารถนำไปพัฒนาใช้งานกับหุ่นยนต์จริง แต่ต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดของฮาร์ดแวร์และการปรับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

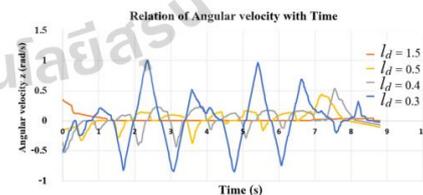


รูปที่ 5 เปรียบเทียบการวัดระยะ Odometry

การปรับพารามิเตอร์ l_d ที่ระยะ 0.3 m, 0.5 m, 1.5 m และ 2.5 m ที่ความเร็วคงที่ของหุ่นยนต์ 0.8 m/s เวลาในการนำทางจากจุด A ไปจุด B, จุด A ไป C และจุด A ไป D โดยใช้โปรแกรม Gazebo ดังรูปที่ 6 และเปรียบเทียบผลกระทบของ l_d ต่อความเร็วเชิงมุม (ω) ดังรูปที่ 7 ของหุ่นยนต์ในกรณีที่มีค่าเท่ากับ 0.3 m, 0.4 m, 0.5 m และ 1.5 m ตามลำดับ



รูปที่ 6 ตำแหน่งที่ใช้ในทางในโปรแกรม Gazebo และผลกระทบของ l_d



รูปที่ 7 ผลกระทบของ l_d ต่อ ω ของหุ่นยนต์

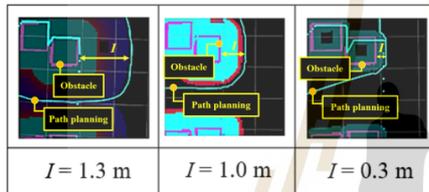
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



จากการจำลอง Inflation radius พบว่าการลดค่า I_d สามารถลดเวลาการวิ่งไปยังจุดหมายและมีความแม่นยำ ซึ่งการปรับค่า I_d น้อยเกินไป ส่งผลกระทบต่อ ω ทำให้หุ่นยนต์เกิดการแกว่ง (ทดสอบวิ่งจากจุด A ไป C) ดังรูปที่ 7 ค่า I_d ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 1.5 m ในทางกลับกัน กรณีที่ปรับค่า I_d สูงเกินไปเท่ากับ 3 m ส่งผลกระทบต่อกรณีวิ่งทางโค้ง จะทำให้หุ่นยนต์หลุดโค้งและใช้เวลานานขึ้นในการไปสู่จุดหมาย ปัจจัยที่สำคัญต่อการนำทางและไม่ให้ชนสิ่งกีดขวาง คือ การใช้ Costmap ทดสอบโดยการปรับค่า Inflation radius กำหนดเป็นตัวแปร I เท่ากับ 1.3 m, 1.0 m และ 0.3 m โดยสร้างเส้นทางให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่าน ดังรูปที่ 8 การปรับค่าค่า I สามารถปรับได้หลากหลายขึ้นอยู่กับความกว้างของตัวหุ่นยนต์ ค่า I ที่เหมาะสมสำหรับหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางมีค่าเท่ากับ 1.3 m



รูปที่ 8 เปรียบเทียบการเปลี่ยนค่า Inflation radius

4. สรุป

การจำลองหุ่นยนต์นำทางอัตโนมัติ AMR ออกแบบหุ่นยนต์ต้นแบบด้วยโปรแกรม Solidworks ทดสอบการนำทางโดยใช้โปรแกรม ROS และ Gazebo แบบ 3 มิติ สามารถแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งหุ่นยนต์ของการวัดระยะทางแบบ Odometry ด้วยวิธี EKF ลดลงร้อยละ 32 ผลกระทบจากการปรับค่าพารามิเตอร์การนำทางแบบ Look-Ahead Distance สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม 1.5 m และแบบ Inflation Radius สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม 1.3 m

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Vonofen, M. Kofler, A. Beham, M. Affenzeller and W. Achleitner, "Optimizing assembly line supply by integrating warehouse picking and forklift routing using simulation," Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), 2012, pp. 1-12, doi: 10.1109/WSC.2012.6465077.

[2] S. M. M. Rahman, "Forklift Routing Optimization in a Warehouse using a Clustering-based Approach," Presented in Partial

Fulfillment of the Requirements For the Degree of Master of Applied Science in Industrial Engineering, May 2019.

[3] J. Pechiar, "Architecture and design considerations for an autonomous mobile robot," 2021 IEEE URUCON, Montevideo, Uruguay, 2021, pp. 343-346.

[4] W. Xue, R. Ying, Z. Gong, R. Miao, F. Wen and P. Liu, "SLAM Based Topological Mapping and Navigation," 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Portland, OR, USA, 2020, pp. 1336-1341, doi: 10.1109/PLANS46316.2020.9110190.

[5] Bi, S.; Yang, D.; Cai, Y. Automatic Calibration of Odometry and Robot Extrinsic Parameters Using Multi-Composite-Targets for a Differential-Drive Robot with a Camera. Sensors 2018, 18, 3097. <https://doi.org/10.3390/s18093097>.

[6] เฉลิมชนม์ สติระพจน์ และ นุชรา ส่วนแสง. (2550). การศึกษาเปรียบเทียบวิธี Extended Kalman filter และวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ใช้ ในการหาตำแหน่งด้วยจีทีเอสแบบจุดเดี่ยวที่ให้ความละเอียดสูง. วิศวกรรมสาร มก., 20 (61), 38-46.

[7] R. Wang, Y. Li, J. Fan, T. Wang and X. Chen, "A Novel Pure Pursuit Algorithm for Autonomous Vehicles Based on Salp Swarm Algorithm and Velocity Controller," in IEEE Access, vol. 8, pp. 166525-166540, 2020.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นาย กิตติศ ษะเจริญ
นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
งานวิจัยที่สนใจ : ระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ



นาย สุขชัย แก้วพวง
นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน
และโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
งานวิจัยที่สนใจ : เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า



ผศ.ดร. ทศพล รัตนนิมชัย
อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
งานวิจัยที่สนใจ : เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)**การตรวจจับช่องทางจราจรแบบเรียลไทม์โดยใช้เทคนิคตัวกรองโซเบล****Real-time Traffic Lane Detection using Sobel Filter Techniques**วิวรรณ สุพรรณิ¹ อุชัย แก้วทวง² และ ทศพล รัตนนิยมนชัย³¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000 E-mail: jamewivat2542@gmail.com

²สาขาวิศวกรรมการจัดการพลังงานและโลจิสติกส์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000 E-mail: peper.supachai@gmail.com

³สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000 E-mail: tosaphol@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการใช้เทคนิคตัวกรองโซเบลตรวจจับช่องทางจราจรแบบเรียลไทม์ เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับพัฒนาระบบควบคุมการนำทางของรถยนต์ขับไร้คนขับ พัฒนาโดยใช้ฟังก์ชัน OpenCV ด้วย Python จำลองผ่านโปรแกรม Visual Studio Code ทดสอบตรวจจับช่องทางจราจรในกรณีทางตรง ทางโค้งซ้าย และทางโค้งขวา รวมทั้งเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนค่า ROI ให้มีความแตกต่าง 2 รูปแบบ ดังนั้นการจำลองเพื่อทดสอบหาว่า ROI ที่เหมาะสม แบบแรก 95.79% และแบบที่สอง 89.74% นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาระบบควบคุมการนำทางแบบไร้คนขับในสภาพแวดล้อมช่องทางจราจรที่มีความซับซ้อนได้

คำสำคัญ: ตัวกรองโซเบล, ช่องทางจราจร, รถยนต์ขับไร้คนขับ

Abstract

This paper proposes a real-time traffic lane detection technique using Sobel filter, which is applied for developing the traffic lane detection control of the driverless transportation vehicle. The application of the Sobel filtering algorithm uses Python's OpenCV library and tests its technique on a self-driving simulation using Visual Studio Code. The simulation includes three scenarios: forward direction, turn left, and turn right. As the results, the accuracy comparison between two region of interest (ROI) configurations for traffic lane detection have been obtained by 95.79% and 89.74%, respectively. This technique shows promising performance and robustness in different driving situations. In addition, this technique can be further improved and applied to more complex traffic lane environments under more testing data and optimizations.

Keywords: Sobel Filter, Traffic Lane, Driverless Transportation Vehicle

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบขนส่งอัตโนมัติถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพื่อนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยประยุกต์ใช้ โดยเฉพาะเทคโนโลยีทางด้านรถไร้คนขับ ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่นิยมมากที่สุดสำหรับนำไปพัฒนารถไร้คนขับ และขนส่งแบบอัตโนมัติในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถทำงานได้ตลอด 24 ชั่วโมง หรือทำงานในพื้นที่เสี่ยงภัยอันตรายต่อมนุษย์ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม โกดังสินค้า สถานที่สาธารณะ เป็นต้น รวมทั้งสถานที่เสี่ยงภัยอันตราย เช่น โรงพยาบาล และโรงงานเคมี เป็นต้น เนื่องจากเป็นพื้นที่เสี่ยงในการแพร่กระจายของเชื้อโรคได้ง่าย ดังนั้นการใช้รถยนต์ขับแบบไร้คนขับใช้ทดแทนพนักงาน ทำให้สามารถลดความเสี่ยงเหล่านั้นได้ สำหรับการเลือกใช้ระบบขนส่งแบบอัตโนมัติหรือรถยนต์ขับแบบไร้คนขับให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน เพื่อให้งานมีประสิทธิภาพมากขึ้น การนำระบบขนส่งแบบไร้คนขับมาใช้งานมีหลากหลายชนิด นอกจากนี้ระบบนำทางอัตโนมัติเป็นสิ่งสำคัญอีกอย่างที่คำนึงถึงอีกด้วย [1]

นอกจากนี้การตรวจจับช่องทางจราจรคืออาศัยเทคโนโลยีของกล้องเพื่อตรวจจับเส้นขอบทางวิ่ง ซึ่งนิยมใช้พัฒนาในกรณีศึกษาเบื้องต้นจากกล้องจำนวนหนึ่งคือไปผู้การพัฒนากล้องสองแบบหลายตัวชนิดกล้อง Stereo [2], [3] การใช้เทคโนโลยีการตรวจจับช่องทางจราจรประยุกต์ใช้เป็นระบบนำทางของรถไร้คนขับ สามารถทำให้มีความเสถียรภาพมากขึ้น เมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบเซ็นเซอร์อื่น ๆ เช่น ระบบ QR code , Electromagnetic Sensors , RFID และ LIDAR เป็นต้น [4], [5] และยังเป็นระบบนำทางสำหรับการตรวจจับช่องทางจราจรที่ช่วยผู้ขับขี่ในพหุแบบเบบถึงอัตโนมัติ โดยนำเทคนิคตรวจจับขอบถนนต่าง ๆ เข้ามาใช้ เช่น Canny Edge Detector , Sobel Edge Detector หรือ Threshold แบบปรับค่าได้ [6]

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15
15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)

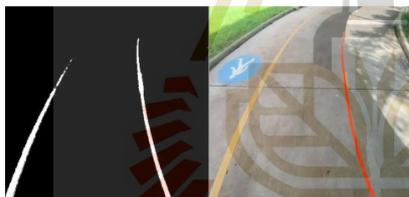


2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแยกจุดภาพที่เป็นเส้นขอบออกจากจุดภาพอื่น ๆ

ในการแยกจุดภาพ (Pixel) มีจุดประสงค์เพื่อใช้ตัดคลื่นใจว่า ส่วนใด คือ พื้นที่สำคัญที่ต้องการตรวจจับ โดยการแยกส่วนจุดภาพใช้วิธี Thresholding เพื่อแยกจุดภาพในส่วนที่ต้องการ สำหรับการไว้วิธี Thresholding ในฟังก์ชัน OpenCV นั้นจะใช้คำสั่ง cv2.threshold ซึ่งมี 5 รูปแบบ การเลือกใช้รูปแบบ cv2.THRESHOLD_BINARY ซึ่งมีหลักการทำงานโดยกำหนดค่าคงที่ไว้หนึ่งค่า จากนั้นกำหนดค่าสีมากที่สุดมีค่าเป็น 255 และค่าสีน้อยที่สุดมีค่าเป็น 0 ซึ่งสามารถช่วยลบสิ่งรบกวนในการตรวจจับเส้นขอบถนนและทำให้ตรวจจับได้ง่ายขึ้น [6], [7]

การแปลงสีแบบ RGB ซึ่งประกอบด้วย สีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีฟ้า (Blue) เป็นสีแบบ HLS เนื่องจากการตรวจจับสีแบบ HLS ดีกว่าแบบ RGB โดยแบบ HLS แบ่งสีออกเป็นค่า สี (Hue) ความอิ่มตัว (Saturation) และความสว่าง (Lightness) ในการกำจัดปัญหาด้านแสงออกไปสำหรับการกำหนดค่าสีแบบ HLS ที่เหมาะสมปกติ คือ เส้นสีขาวและสีส้มที่เป็นเส้นที่บนขอบถนนมีค่า Saturation ที่สูง นอกจากนี้พบว่าค่าสีขาวและเหลือง มีค่าสีแดงสูงมาก ดังรูปที่ 1 สามารถกำหนดช่วงสีแดงน้อยกว่าระดับที่ตั้งไว้ให้เป็นสีดำทั้งหมด เนื่องจากไม่ใช้เส้นขอบถนนที่ต้องการตรวจจับ [7]



รูปที่ 1 การแยกจุดภาพเส้นขอบถนนด้วยวิธี Thresholding

2.2 การตรวจจับขอบถนน

การตรวจจับขอบของภาพมีหลายวิธี ได้แก่ Sobel, Canny, Prewitt และ Roberts เป็นต้น ในการเลือกวิธีการตรวจจับขอบแบบตัวกรองโซเบลจากในภาพหรือในวิดีโอ ซึ่งปกติระดับของภาพสีเทาจะมีค่าแตกต่างกันบ้างในแต่ละจุดในภาพ ดังนั้นการตรวจจับขอบถนนจึงเป็นการหาจุดภาพที่ไม่ต่อเนื่อง ทำให้การตรวจจับขอบถนนแบบตัวกรองโซเบล นิยมใช้ Sobel mark เทมเพลตแบบ 3x3 จำนวนสองเทมเพลต คือ เทมเพลตแนวอน (G_x) และแนวตั้ง (G_y) ดังรูปที่ 2 [8], [9]

-1	0	1	-1	-2	-1
-2	0	2	0	0	0
-1	0	1	1	2	1
G_x			G_y		

รูปที่ 2 Sobel mark

2.3 ROI Select

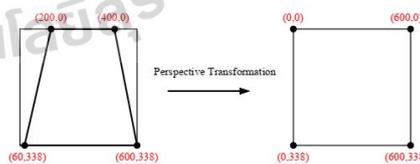
ROI (Region of Interest) หรือบริเวณพื้นที่สนใจ โดยปกติบริเวณตรงกลางของภาพและวิดีโอมักเป็นส่วนของขอบถนน ซึ่งการกำหนด ROI มุ่งเน้นไปในพื้นที่เป็นขอบถนน ซึ่งกำหนดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู สำหรับการกำหนดบริเวณ ROI ที่เหมาะสมยังสามารถช่วยกำจัดส่วนที่ไม่ใช่ถนนออกไป [7]

2.4 การแปลงมุมมอง

เนื่องจากการแปลงมุมมองปกติที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ไม่สามารถใช้งานสำหรับการคำนวณได้ ดังนั้นจึงแปลงมุมมองจากมุมมองให้เป็นมุมสูง ดังรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นผลการแปลงมุมมองจากมุมมองปกติเป็นมุมสูง เพื่อใช้คำนวณความโค้งของเส้นขอบถนน และการคำนวณความโค้งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการประมวลผลความโค้ง โดยสมการความโค้งสามารถหาได้โดยใช้เทคนิค Sliding Window พิจารณาจากจุดภาพที่สนใจถูกเก็บไว้ในช่องสี่เหลี่ยมขนาดคงที่ และทำการเพิ่มจุดลงในภาพ สุดท้ายทำการเฉลี่ยค่า x ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จากนั้นได้สัมประสิทธิ์ของพหุนามดีกรี 2 เป็นค่า A, B และ C ดังสมการที่ (1) และสมการของเส้นโค้ง ซึ่งมีรัศมี R ดังสมการที่ (2)

$$f(y) = Ay^2 + By + C \tag{1}$$

$$R = \frac{[1 + (\frac{dy}{dx})^2]^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2y}{dx^2}} \tag{2}$$

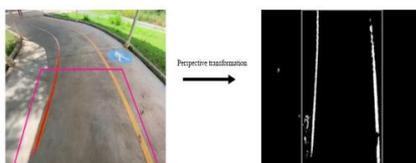


รูปที่ 3 การแปลงมุมมองปกติที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



รูปที่ 4 ผลจริงของการแปลงมุมมองปกติที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

นอกจากนี้การแสดงผลการตรวจจับมีการสร้างเงาจำลองเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมซ้อนทับบนของจริง เพื่อแสดงให้เห็นว่าผลการตรวจจับอยู่ตำแหน่งใด

3. ระเบียบวิธีการและผลการทดสอบ

ในการทดสอบ เป็นการจำลองผลในโปรแกรม Visual Studio Code บนซีพียู Intel Core i5 2.30GHz พร้อมกับ RAM ขนาด 16 GB ข้อมูลเอาต์พุตมีความละเอียด 1,080x1,920 ที่ 20 fps และการใช้งานจริง โดยการนำรถขนส่งของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมาดัดแปลงและติดตั้งกล้องเพิ่มเติมให้เป็นรถอัตโนมัติ ดังรูปที่ 5 และข้อมูลของรถที่ดัดแปลงดังตารางที่ 1 วิธีการที่นำเสนอใช้ในการตรวจจับในพื้นที่โรงพยาบาลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังรูปที่ 4 ในการทดสอบทั้ง 2 กรณีใช้สภาพแวดล้อมในการรันแบบเดียวกัน

ตารางที่ 1 ข้อมูลรถอัตโนมัติที่ใช้ในการทดสอบ

รายการ	ขนาด
แบตเตอรี่	24 V
กล้อง CCTV	1920 × 1080 / 30fps
DC motor	24 V / 1400W
Stepper motor	12 V
TB6600 (Motor Driver)	9–48 V



รูปที่ 5 ก่อนและหลังการดัดแปลงรถของอัตโนมัติ

การทดสอบพิจารณาให้ CDF (Correctly detected frame) คือ จำนวนเฟรมที่ตรวจจับได้ โดยจะนับเฉพาะส่วนที่สร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นการจำลองขอบถนนมากกว่า 80 % หรือ ไม่ขาดเกิน 20 % สำหรับการคำนวณ Detection Rate ดังสมการที่ (3) [6]

$$DR = (CDF/TF) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อกำหนดให้ DR (detection rate) คือ อัตราการตรวจจับ CDF คือ จำนวนเฟรมที่ตรวจจับได้ถูกต้อง และ TF (Total frames) คือ จำนวนเฟรมทั้งหมด วิธีการนำเสนอสามารถตรวจหาความโค้งของเส้นขอบได้ ทั้งเส้นซ้าย และขวา หากความโค้งที่ควบคุมระบบบังคับเลี้ยวของรถ และพบว่าค่า ROI มีผลต่อการตรวจจับเส้นขอบและหาความโค้งเป็นอย่างมาก ดังตารางที่ 2 แสดงการกำหนดจุด ROI เป็น 2 จุด ซึ่งผลการทดสอบ ดังรูปที่ 6(ก) และ (ข) เนื่องจากค่า ROI เป็นตัวกำหนดพื้นที่สนใจเมื่อค่า ROI มีค่าแตกต่างกันทำให้ผลการทดสอบแตกต่างกัน สังเกตว่า ROI รูปแบบที่ 2 กว้างกว่ารูปแบบที่ 1 ทำให้การตรวจจับเส้นขอบทำได้ไกลกว่าเช่นกัน แต่พบว่ามีการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมเกินออกมาเล็กน้อยจากพื้นที่เป็นเส้นขอบ อย่างไรก็ตามค่าความโค้งไม่ได้แตกต่างกัน โค้ดค่า DR ของทั้ง 2 รูปแบบแตกต่างกัน คือ 95.79 % และ 89.74 % ตามลำดับ

การทดสอบจริงโดยใช้รถอัตโนมัติที่ได้ทำการดัดแปลง ในการควบคุม Stepper และ DC Motor ด้วยบอร์ด Raspberry Pi Pico ซึ่งให้เคลื่อนที่จากตำแหน่งที่ 1 ไปตำแหน่งที่ 2 ดังรูปที่ 7 เป็นระยะทาง 239.91 เมตร กำหนดความเร็วเป็น 2 ระดับ 1. ทางตรงมีความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที 2. ขณะเข้าโค้ง 0.5 เมตรต่อวินาที ในการเดินทางไปและกลับ 1 รอบใช้เวลา 8-10 นาที และมีความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 0.7 เมตรต่อวินาที รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วและเวลาในช่วงที่ความเร็วตกลงไปนั้น คือ ช่วงที่รถกำลังเข้าโค้ง การทดสอบจริงเลือกใช้ค่า ROI ตามรูปแบบที่ 1 ทั้งนี้ในการทดสอบจริงแสงและเงายังเป็นปัญหาที่ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้อย่างแม่นยำ

ตารางที่ 2 ค่าจุด ROI ที่ใช้ในการทดสอบ

จุด ROI	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2
A (ล่าง-ซ้าย)	32,479	32,479
B (ล่าง-ขวา)	613,479	613,479
C (บน-ขวา)	464,180	464,740
D (บน-ซ้าย)	163,180	163,740

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15
15th Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)

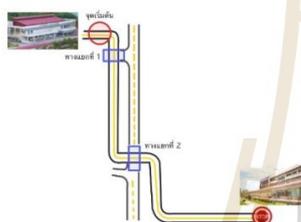


(ก)

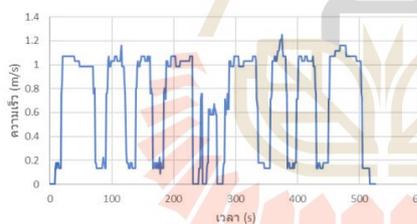


(ข)

รูปที่ 6 ผลการตรวจจับและแสดงความโค้ง ROI แบบที่ 1(ก) และ 2(ข)



รูปที่ 7 แผนที่การเดินรถของรถอัตโนมัติ



รูปที่ 8 ความเร็วเทียบกับเวลาในการเดินรถ 1 รอบ

4. สรุป

การตรวจจับและหาความโค้งด้วยวิธีเทคนิคตรวจจับขอบและตรวจจับช่องทางจราจรแบบเรียลไทม์ พัฒนาโดยใช้ฟังก์ชัน OpenCV ด้วย Python จำลองผ่านโปรแกรม Visual Studio Code ในบทความนี้ สามารถตรวจจับเส้นขอบถนนได้ในพื้นที่ที่ต้องการได้ แต่ยังไม่ทั้งหมด เนื่องจากปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวข้องที่สามารถแก้ไขหรือลดผลกระทบลงได้ เช่น แสง เงา แก้ไขโดยการเปลี่ยนเส้นขอบเป็นเส้นทึบเพื่อให้ง่าย

ตรวจจับเส้นยิ่งขึ้น และจากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า การเลือกใช้ค่า ROI ที่เหมาะสม สามารถช่วยให้การตรวจจับขอบถนนมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยค่า Detection Rate ของการเปลี่ยน ROI ทั้ง 2 รูปแบบ อยู่ที่ 95.79 % และ 89.74 % ตามลำดับ ในการทดสอบใช้จริงด้วยรถที่ดัดแปลงพบว่าสามารถทำความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 0.7 เมตรต่อวินาที และใช้เวลาการเดินรถหนึ่งรอบ 8-10 นาที

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. J. Moshayedi, J. Li and L. Liao, "AGV (automated guided vehicle) robot: Mission and obstacles in design and performance," Journal of Simulation & Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering, vol. 12, no. 4, pp.5-18, 2019.
- [2] Y. Lee and H. Kim, "Real-time lane detection and departure warning system on embedded platform," 2016 IEEE 6th International Conference on Consumer Electronics – Berlin (ICCE-Berlin), 2016, pp.1-4.
- [3] M. Bertozzi and a. Broggi, "Real-time lane and obstacle detection on the GOLD system," Proc. Conf. Intell. Veh., 1996.
- [4] A. Borkar, M. Hayes, and M. T. Smith, "A novel lane detection system with efficient ground truth generation," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 13, no. 1, pp.365-374, 2012.
- [5] J. C. McCall and M. M. Trivedi, "Video-based lane estimation and tracking for driver assistance: Survey, system, and evaluation," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 7, no. 1, pp. 20-37, 2006.
- [6] S. Sultana and B. Ahmed, "Lane Detection and Tracking under rainy weather challenges," 2021 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP), 2021, pp. 1-6.
- [7] Automaticaddison, (2021, April 12). The ultimate guide to real-time Lane detection using opencv. Automatic Addison. Retrieved January 10, 2023, from <https://automaticaddison.com/the-ultimate-guide-to-real-time-lane-detection-using-opencv/>
- [8] G. Deng and Y. Wu, "Double Lane Line Edge Detection Method Based on Constraint Conditions Hough Transform," 17th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES), 2018, pp.107-110.
- [9] A. Sharma, M. Kumar and R. Kumar, "Lane Detection Using Python," 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N), 2021, pp.88-90.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46
The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)
วันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566 ณ คิวน่า พลาซ่า กระบี่ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่



การพัฒนาการแบ่งส่วนรูปภาพด้วยอัลกอริทึม YOLOv8 สำหรับรถไฟฟ้าไร้คนขับ

Development of Image Segmentation Using YOLOv8 Algorithm for Unmanned Electric Vehicles

วิวรรณ สุรินทร์¹ สุภชัย แก้วพวง² อุเทน สัติน³ และ ทศพล รัตนนิมิตชัย⁴

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี jamewiwat2542@gmail.com

²สาขาวิชาวิศวกรรมจัดการพลังงานและโลจิสติกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี peper.supachai@gmail.com

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี uthenleeton@sut.ac.th

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี tosaphol@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาการแบ่งส่วนรูปภาพด้วยอัลกอริทึม YOLOv8 ใช้แบ่งส่วนรูปภาพที่เป็นทางเดินรถและทางเดินเท้า มีเป้าหมายเพื่อนำเทคโนโลยีไปพัฒนาระบบนำทางของรถไฟฟ้าไร้คนขับสำหรับขนส่งเวชภัณฑ์ อาหาร ยา และเครื่องมือการแพทย์ระหว่างอาคารในโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ประมวลผลรูปภาพจากกล้องและตรวจจับเลนถนนและวัตถุที่สำคัญ โดยใช้ซอฟต์แวร์ RoboFlow เข้ามาช่วยจัดการรูปภาพของถนน และประยุกต์ใช้การพัฒนาการแบ่งส่วนรูปภาพด้วยแบบจำลองรุ่นใหม่ ได้แก่ YOLOv8s จากผลการทดสอบพบว่ามีความแม่นยำและค่าเฉลี่ยความแม่นยำ เท่ากับ 99.4% และ 85.1% ตามลำดับ จากเส้นโค้งความแม่นยำพบว่า ความแม่นยำเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเชื่อมั่นเพิ่มขึ้น และเส้นโค้งความถี่มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความเชื่อมั่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบในเชิงประเภทของวัตถุพบว่า ประเภทของถนนมีความแม่นยำค่อนข้างสูง ในขณะที่ประเภทของมนุษย์มีความแม่นยำต่ำ

คำสำคัญ: การแบ่งส่วนรูปภาพ คอมพิวเตอร์วิทัศน์ การตรวจจับวัตถุ อัลกอริทึม YOLOv8

Abstract

This paper presents the development of image segmentation using the YOLOv8 algorithm to segment images that are driveway and pedestrian. The goal is to use the technology to develop a navigation system for unmanned electric vehicles for transporting pharmaceuticals, food, drugs and medical equipment between buildings in the Suranaree University of Technology Hospital. It uses computer vision technology to process images from cameras and detect important road lanes and key objects by using RoboFlow software to handle the image of the road. In addition, it applies the development of image segmentation with a new model as YOLOv8s. From the test results, it was found that the accuracy and the mean accuracy were 99.4% and 85.1%, respectively. Regarding the accuracy curve, it was found that the accuracy increases as confidence

increases and the recall curve was found when the recall value is reduced while the confidence value increases. Furthermore, when comparing in terms of object types, it was found that the type of road is quite accurate while human types have low accuracy.

Keywords: Image Segmentation, Computer Vision, Object Detection, YOLOv8 Algorithm

1. บทนำ

คอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) เป็นเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) อีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถเรียนรู้และวิเคราะห์รูปภาพนิ่ง หรือรูปภาพเคลื่อนไหวอัตโนมัติโดยใช้คอมพิวเตอร์ การพัฒนาและการก้าวกระโดดของคอมพิวเตอร์วิทัศน์ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการเพิ่มขีดความสามารถให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับกล้องในเรื่องของการมองเห็นและเข้าใจรูปภาพเสมือนจริงได้มากขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์มีหลากหลายรูปแบบตามลักษณะการใช้งานในด้านต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงวิธีการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) ในรูปภาพ หรือวิดีโอ เช่น วิธีการตรวจจับใบหน้า (Face Detection) เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบการรู้จำแบบและการระบุตัวตน เป็นต้น และวิธีการตรวจจับวัตถุ เพื่อใช้ในการติดตามและตรวจจับตามวัตถุในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น รถยนต์ไร้คนขับ (Self-Driving Cars) เป็นต้น

นอกจากนี้การจำแนกจุดภาพ (Pixel) ในรูปภาพ หรือ Instance Segmentation เป็นเทคโนโลยีที่มีความสำคัญในเรื่องของการประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์ และยังเป็นส่วนหนึ่งของคอมพิวเตอร์วิทัศน์ เพื่อนำมาใช้ในการตรวจจับและแบ่งส่วนของวัตถุแต่ละส่วนในรูปภาพ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการนำไปใช้ควบคู่กับระบบต่าง ๆ เช่น หุ่นยนต์ การขับรถอัตโนมัติ และการตรวจสอบความปลอดภัย เป็นต้น สำหรับการทำงานของเทคโนโลยี Instance Segmentation เป็นการระบุเส้นขอบของวัตถุแต่ละส่วนในรูปภาพระดับ Pixel และมีความละเอียดของรูปภาพสูง ทำให้การนำเทคโนโลยีประยุกต์ใช้ในการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Networks: CNN) มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงวิธีการเพื่อนำไปใช้เป็นหลักวิเคราะห์ สำหรับ



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 46
 The 46th Electrical Engineering Conference (EECON-46)
 วันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2566 ณ ติวานา พลาซ่า กระบี่ อ่าวนาง จังหวัดกระบี่

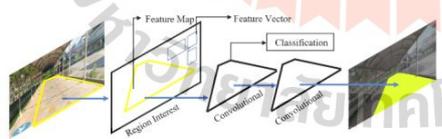
เทคโนโลยี Instance Segmentation เป็นรูปแบบการจำแนกจุดภาพในรูปภาพที่เชื่อถือได้และมีกรอบการทำงานที่ชัดเจน ได้แก่ หลักการของ Mask R-CNN (Mask Region-based Convolutional Neural Network) [1] เป็นเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ซึ่งถูกพัฒนาจากหลักการของ Faster R-CNN (Faster Region Convolution Neural Networks) และ FCN (Fully Convolutional Network) [2] และอีกวิธีการที่ได้รับความนิยมใช้พัฒนาการแบ่งส่วนรูปภาพ ได้แก่ You Only Look Once (YOLO) เนื่องจากมีรูปแบบการใช้งานง่าย รวดเร็ว และมีความแม่นยำ [3,4]

ในบทความนี้มีวัตถุประสงค์โดยเน้นการใช้อัลกอริทึม YOLOv8 ตรวจสอบชนิดและเส้นทางเดินรถ เพื่อนำไปพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบนำทางอัตโนมัติของรถไฟฟ้าไร้คนขับใช้สำหรับขนส่งเวชภัณฑ์ อาหารและยา รวมทั้งเครื่องมือการแพทย์ ของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ให้ระบบมีความปลอดภัยในการนำทาง และตรวจสอบสิ่งกีดขวางของวัตถุแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยซอฟต์แวร์และอัลกอริทึมที่ใช้พัฒนาการแบ่งส่วนรูปภาพนำเสนอในหัวข้อที่ 2 ระเบียบวิธีการที่ใช้ทดสอบนำเสนอในหัวข้อที่ 3 และหัวข้อที่ 4 แสดงผลของการทดสอบ และสุดท้ายนำเสนอบทสรุปในหัวข้อที่ 5

2. ซอฟต์แวร์และอัลกอริทึม

2.1 ซอฟต์แวร์ Instance Segmentation

สำหรับ Instance Segmentation เป็นเทคโนโลยีที่มีความสามารถในการจำแนก Pixel ของรูปภาพจำนวนมากได้ประยุกต์ใช้หลักการของ Mask R-CNN เพื่อนำมาแก้ปัญหาการแบ่งกลุ่มกรณีตัวอย่าง (Instance) โดยการเพิ่มเป้าหมายของวัตถุในรูปภาพควบคู่ไปกับการจดจำกล่องขอบเขต และหลักการของ Mask R-CNN ยังเป็นส่วนเสริมที่ใช้งานง่ายของ Faster R-CNN [1] รวมทั้งเป็นการนำตำแหน่งที่สนใจ (Region of Interest: ROI) ของฟังก์ชันลักษณะ (Feature Map) ที่มีขนาดแตกต่างกันเพื่อหาเวกเตอร์คุณลักษณะ (Feature Vector) ที่มีขนาดคงที่เข้าไปดำเนินการในชั้น Fully Connected Layer และฟังก์ชัน SoftMax เพื่อเข้าสู่กระบวนการจำแนก (Classification) และได้ค่าของกลุ่มของวัตถุ และสามารถกำหนดเป้าหมายในการระบุตำแหน่งของ Convolutional ในภาพ หรือวิดีโอ ด้วยการสร้างกรอบและระบายสีเหลือง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการของ Mask R-CNN

2.2 ซอฟต์แวร์ Roboflow

Roboflow เป็นซอฟต์แวร์และเครื่องมือให้บริการในการทำ Labeling สามารถแบ่งงานออกเป็นหลายส่วนเพื่อเตรียมชุดข้อมูล

(Dataset) ของงานในกลุ่มของคอมพิวเตอร์วิทัศน์ได้พร้อมกันหลายส่วน และมีรูปแบบการทำงานร่วมกันของ Roboflow ในการเพิ่มรูปภาพ (Image Augmentation) และเครื่องมือที่ใช้ส่งออกชุดข้อมูล (Export Dataset) มีความสะดวกในการใช้งานได้ง่าย และสะดวกมากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้ชุดข้อมูลถูกแบ่งส่วน และระบุคำอธิบายประกอบ (Annotate) ด้วย Roboflow ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการจัดการรูปภาพในด้านต่าง ๆ เช่น การปรับขนาดและใส่คำอธิบายส่วนประกอบของภาพ และยังสามารถแปลงข้อมูลไปยังรูปแบบต่าง ๆ ที่ต้องการได้อีกด้วย [2]

2.3 อัลกอริทึม YOLO

YOLO เป็นอัลกอริทึมการตรวจจับวัตถุที่เร็วที่สุด โดยใช้การประมวลผลบนหน่วยประมวลผลภาพกราฟิก (Graphics Processing Unit: GPU) ซึ่งทำให้นักพัฒนาหลายคนสามารถเข้าถึงได้ง่าย และยังถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจนถึงเวอร์ชันปัจจุบัน ได้แก่ YOLOv8 แต่ก่อนหน้านั้น อัลกอริทึมที่ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย คือ เวอร์ชัน YOLOv5 และเวอร์ชัน YOLOv3 ที่พัฒนาขึ้นบนเฟรมเวิร์ก PyTorch ซึ่งมีข้อดีคือ ใช้งานง่าย สะดวก และรวดเร็ว รวมทั้งมีความโดดเด่นในเรื่องของความแม่นยำ [3]

ในปัจจุบันเวอร์ชัน YOLOv8 ถูกนำมาใช้ทดแทนเวอร์ชัน YOLOv5 มากขึ้น โดยสองรุ่นนี้มีความเร็วและแม่นยำในการตรวจจับที่แตกต่างกัน ซึ่งเวอร์ชัน YOLOv8 จะมีความเร็วและความแม่นยำสูงกว่า เนื่องจากโครงสร้างถูกปรับปรุงและพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ [4] ในการหาความแม่นยำ ความลึก และค่าเฉลี่ยความแม่นยำ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ [5]

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \tag{1}$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \tag{2}$$

$$mAP_{0.5} = \frac{\sum_{i=0}^n Precision_{class_i}}{n} \tag{3}$$

- โดยที่
- P คือ ค่าความแม่นยำ
 - R คือ ค่าความลึก
 - TP คือ ค่าบวกจริง (True positive)
 - FP คือ ค่าบวกเท็จ (False positive)
 - FN คือ ค่าลบเท็จ (False negative)
 - mAP0.5 คือ ค่าเฉลี่ยของความแม่นยำ
 - Precision_{class_i} คือ ค่าความแม่นยำของแต่ละ Class
 - n คือ จำนวน Class



3. ระเบียบวิธีการ

ชุดข้อมูลในการพัฒนา Instance segmentation ได้มาจากการลงพื้นที่สำรวจโดยใช้กล้องถ่ายภาพบนบริเวณ โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่ามีเพียงมนุษย์เท่านั้นที่มีการเดินทางบนถนนทำให้ถูกจัดเป็นสิ่งกีดขวาง และแบ่งส่วนที่มีกระเบื้องสีของพื้นที่เหลือคือ เป็นส่วนที่เป็นทางเดินรถ และอีกส่วนเป็นทางเดินสำหรับทางเดินเท้า ดังรูปที่ 2 (ก) สภาพแวดล้อมจริง และ (ข) การแยกส่วนทางเดินรถออกจากทางเดินเท้า สำหรับข้อมูลชุดนี้สามารถแบ่งประเภท (Class) ของรูปภาพออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ถนน (Road) และมนุษย์ (Human) โดยมีรูปภาพถ่ายจำนวนทั้งหมด 419 รูป แบ่งเป็นรูปภาพสำหรับการฝึก (Training) การตรวจสอบ (Validation) และการทดสอบ (Testing) มีอัตราส่วน 87:8:5 ตามลำดับ และคิดเป็นจำนวนรูปภาพถ่ายสำหรับ Training 366 รูป Validation 34 รูป และ Testing 19 รูป ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 แสดงประเภทของจำนวนรูปภาพถ่ายที่ใช้ทั้งหมดและจำนวนภาพที่อธิบายในแต่ละประเภทและเครื่องมือที่ใช้ทดสอบในบทความนี้ ดังตารางที่ 3



รูปที่ 2 สภาพแวดล้อมจริงของการลงพื้นที่สำรวจ

ตารางที่ 1 ภาพรวมของชุดข้อมูล

Title	Description
Number of Class	2
Total Number of Input Images	419
Training Images	366
Validation Images	34
Testing Images	19

ตารางที่ 2 ประเภทของจำนวนภาพถ่ายที่ใช้ทั้งหมด

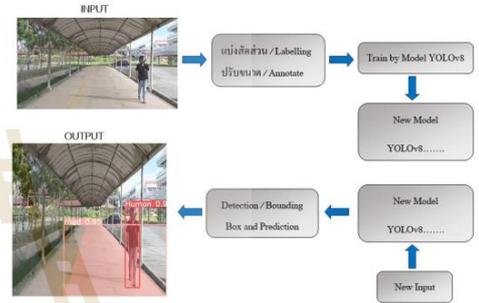
Class	Number of Raw images	Number of annotated images
Road	419	350
Human	35	19

ตารางที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

Operating environment	Version
Operating System	Window 11
Language	Python 3.10
CUDA	11.8
GPU	GTX2060
CPU	Intel(R) Core(TM) i5-10300H

4. ผลการทดสอบ

ในบทความนี้การพัฒนาการแบ่งส่วนรูปภาพ เพื่อช่วยแยกส่วนที่เป็นทางเดินรถออกจากทางเดินเท้า มีอัลกอริทึมโครงสร้างการทำงาน ดังรูปที่ 3 และการทดสอบด้วยอัลกอริทึม YOLOv8 ที่ถูกปรับเปลี่ยนให้มัน้ำหนักเพื่อเพิ่มความแม่นยำมากขึ้น โดยใช้เป็นแบบจำลองทดสอบรุ่นใหม่ (New Model) 4 รูปแบบ ได้แก่ YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l และ YOLOv8x จากผลการทดสอบ ดังตารางที่ 4 จะได้ผลการทดสอบสำหรับแบบจำลองทั้ง 4 รูปแบบ ดังนี้ ค่าความแม่นยำ (P) มีค่าค่อนข้างสูงที่ 0.994, 0.960, 0.994 และ 0.986 ตามลำดับ และค่าความลึก (R) มีค่าไม่สูงมากนักที่ 0.788, 0.650, 0.819 และ 0.807 ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (mAP0.5) มีค่าสูงเช่นกันที่ 0.851, 0.717, 0.832 และ 0.845 ตามลำดับ



รูปที่ 3 อัลกอริทึมโครงสร้างการทำงาน



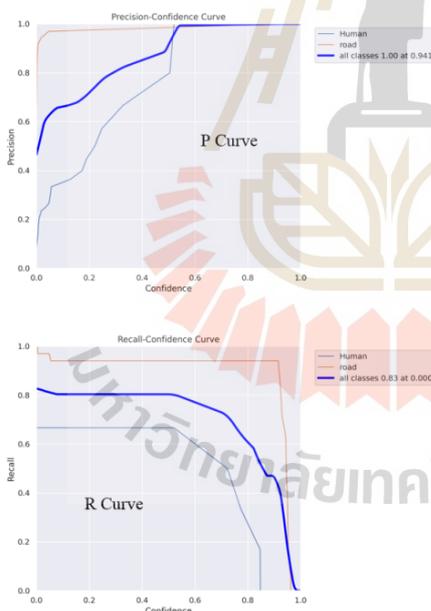
รูปที่ 4 ผลการทดสอบการแบ่งส่วนรูปภาพ



ตารางที่ 4 ผลทดสอบ New Model ของอัลกอริทึม YOLOv8 4 รูปแบบ

Model	P	R	mAP0.5
Yolov8s	0.994	0.788	0.851
Yolov8n	0.960	0.650	0.717
Yolov8m	0.994	0.819	0.832
Yolov8x	0.986	0.807	0.845

สำหรับผลการทดสอบการแบ่งส่วนรูปภาพทางเดินและทางเดินเท้า โดยมีมนุษย์เดินผ่านในพื้นที่โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังรูปที่ 4 พบว่าทางเดินมีทั้งทางตรง (ก) ทางโค้งซ้าย (ข) ทางโค้งขวา (ค) และทางเดินมุมอับ (ง) สามารถตรวจจับและแยกทางเดินออกจากทางเดินเท้าได้ชัดเจนและแม่นยำ โดยที่เส้นโค้งความแม่นยำ (P Curve) แสดงความแม่นยำซึ่งเป็นการคาดการณ์ผลในทางเชิงบวก และในทางกลับกัน เส้นโค้งความลึก (R Curve) เป็นค่าเชิงบวกที่เกิดขึ้นจริงเมื่อคาดการณ์ว่าเป็นเชิงบวก ดังรูปที่ 5 พบว่าเส้นโค้งความแม่นยำมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเชื่อมั่น (Confidence) เพิ่มขึ้น ส่วนของเส้นโค้งความลึก พบว่ากราฟมีความชันหรือความลึกมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความเชื่อมั่นเพิ่มขึ้น แสดงว่าความลึกหรือความถูกต้องในการคาดการณ์เชิงบวกมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 5 ผลทดสอบ P Curve และ R Curve

5. สรุป

การพัฒนาการแบ่งส่วนรูปภาพด้วยอัลกอริทึม YOLOv8 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบแม่นยำค่อนข้างสูง โดยรูปแบบอัลกอริทึม YOLOv8 ที่ถูกปรับเปลี่ยนให้มีน้ำหนักเพื่อเพิ่มความแม่นยำใช้เป็นแบบจำลองรุ่นใหม่ ได้แก่ รูปแบบ YOLOv8s จากการทดสอบพบว่าค่าความแม่นยำ (P) และค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (mAP0.5) เท่ากับ 99.4% และ 85.1% ตามลำดับ และจากเส้นโค้ง (P Curve) ความแม่นยำพบว่า ความแม่นยำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเชื่อมั่นเพิ่มขึ้น และเส้นโค้งความลึก (R Curve) มีค่าลดลง โดยที่ค่าความเชื่อมั่นเพิ่มขึ้น แสดงว่าความลึกหรือความถูกต้องและความแม่นยำในการคาดการณ์เชิงบวกมากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประเภทของการตรวจจับวัตถุ พบว่า ประเภทของถนนมีความแม่นยำค่อนข้างสูง แต่ประเภทของมนุษย์มีความแม่นยำไม่สูงมากนัก แต่สามารถแยกประเภทของวัตถุได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Bolya, C. Zhou, F. Xiao, and Y. J. Lee, "YOLACT: Real-Time Instance Segmentation," in *Proc. 2019 IEEE/CVF Int. Conf. on Computer Vision (ICCV)*, Seoul, Korea (South), 2019, pp. 9156-9165, doi: 10.1109/ICCV.2019.00925.
- [2] D. Deepa, A. Sivasangari, R. Roonwal and R. Nayan, "Pothole Detection using Roboflow Convolutional Neural Networks," in *Proc. 2023 7th Int. Conf. on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, Madurai, India, 2023, pp. 560-564, doi: 10.1109/ICICCS56967.2023.10142700.
- [3] I. F. E. Babila, S. A. E. Villazor and J. C. Dela Cruz, "Object Detection for Inventory Stock Counting Using YOLOv5," in *Proc. 2022 IEEE 18th Int. Colloquium on Signal Processing & Applications (CSPA)*, Selangor, Malaysia, 2022, pp. 304-309, doi: 10.1109/CSPA55076.2022.9782028.
- [4] M. Mostafa, S. Sadi, S. A. Anamika, M. S. Hussain and R. Khan, "Automatic Vehicle Classification and Speed Tracking," in *Proc. 2023 2nd Int. Conf. on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAIC)*, Salem, India, 2023, pp. 972-977, doi: 10.1109/ICAIC56838.2023.10140935.
- [5] X. Li, X. Lv, J. Jiang and S. Li, "An Improved YOLOv5s for Lane Line Detection," in *Proc. 2022 5th Int. Conf. on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE)*, Changchun, China, 2022, pp. 326-330, doi: 10.1109/RCAE56054.2022.9995995.

ประวัติผู้เขียน

นายศุภชัย แก้วพวง เกิดเมื่อวันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2535 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2556 ต่อมาสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2558 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาเอก วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงานและโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2563 และได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา (ทุน OROG) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

