รถเข็นสินค้าติดตามผู้ใช้งานอัตโนมัติโดยใช้สัญญาณบลูทูธ

AUTOMATIC FOLLOW SHOPPING CART BASED ON BLUETOOTH SIGNAL

โดย

นางสาวกฤตติพร ครุฑเงิน

นายธีรพงษ์ กันทาง

นายศุภกร ชัยธนาพร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถเข็นสินค้าติดตามผู้ใช้งานอัตโนมัติโดยใช้สัญญาณบลูทูธ

AUTOMATIC FOLLOW SHOPPING CART BASED ON BLUETOOTH SIGNAL

โดย

นางสาวกฤตติพร ครุฑเงิน 64010014

นายธีรพงษ์ กันทาง 64010383

นายศุภกร ชัยธนาพร 64010854

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.พิพัฒน์ พรหมมี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2567

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง รถเข็นสินค้าติดตามผู้ใช้งานอัตโนมัติโดยใช้สัญญาณบลูทูธ

AUTOMATIC FOLLOW SHOPPING CART BASED ON BLUETOOTH SIGNAL

ผู้จัดทำ

1. นางสาวกฤตติพร ครุฑเงิน 64010014
2. นายธีรพงษ์ กันทาง 64010383
3. นายศุภกร ชัยธนาพร 64010854

..... **อาจารย์ที่ปรึกษา**

(รศ.ดร.พิพัฒน์ พรหมมี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง “รถเข็นสินค้าติดตามผู้ใช้งานอัตโนมัติโดยใช้สัญญาณบลูทูธ” จะไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ คือ รศ.ดร.พิพัฒน์ พรหมมี ที่กรุณาให้คำปรึกษา และแนวทางการแก้ไขปัญหาตลอดระยะเวลาในการจัดทำปริญญานิพนธ์ รวมทั้งสนับสนุนสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในระหว่างการจัดทำปริญญานิพนธ์ ขอขอบพระคุณในความห่วงใยและความหวังดีที่มีให้แก่คณะผู้จัดทำเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำ

ขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน อาทิ บิดา มารดา และเพื่อนนักศึกษา ที่คอยสนับสนุน แนะนำช่วยเหลือ และให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำเสมอมา จนกระทั่งปริญญานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวกฤตติพร ครุฑเงิน
นายธีรพงษ์ กันทาง
นายศุภกร ชัยธนาพร
ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถเข็นสินค้าติดตามผู้ใช้งานอัตโนมัติโดยใช้สัญญาณบลูทูธ
AUTOMATIC FOLLOW SHOPPING CART BASED ON BLUETOOTH SIGNAL

โดย นางสาวกฤตติพร ครุฑเงิน 64010014
นายธีรพงษ์ กันทาง 64010383
นายศุภกร ชัยธนาพร 64010854

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พิพัฒน์ พรหมมี

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอรถเข็นสินค้าที่ติดตามผู้ใช้งานอัตโนมัติโดยใช้สัญญาณบลูทูธ เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้งานในห้างสรรพสินค้า โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่รองรับการทำงานของบลูทูธและเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ ไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณทิศทางของผู้ใช้งานจากความแรงของสัญญาณ (RSSI) ที่ได้รับจากสายอากาศทิศทาง ซึ่งถูกติดตั้งภายใน Housing ที่ออกแบบขึ้น นอกจากนี้ยังมีโมดูลขับมอเตอร์สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ รวมถึงเซนเซอร์ไจโรสโคปสำหรับคำนวณองศาการเลี้ยว และเซนเซอร์อัลตราโซนิกเพื่อตรวจจับสิ่งกีดขวาง โดยระบบจะสั่งหยุดหรือเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่หากพบสิ่งกีดขวาง เพื่อหลีกเลี่ยงการชน

คำสำคัญ: รถเข็นสินค้าที่ติดตามอัตโนมัติ, บลูทูธ, ไมโครคอนโทรลเลอร์, RSSI, สายอากาศทิศทาง

ABSTRACT

This thesis presents an Automatic follow shopping cart based on Bluetooth signal, providing convenience for users in shopping malls. The shopping cart uses a microcontroller board that supports Bluetooth, which connects to a mobile application on the user's smartphone. The microcontroller determines the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

user's direction based on the signal strength (RSSI: Received Signal Strength Indicator) received from directional antennas installed within the custom-designed housing. Additionally, a motor driver module is used to control the cart's movement, while a gyroscope sensor measures turning angles, and an ultrasonic sensor detects obstacles. The system halts or changes direction to avoid collisions when obstacles are detected.

Keywords: Automatic follow shopping cart, Bluetooth, Microcontroller, RSSI, Directional antenna

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		I
บทคัดย่อ		II
สารบัญ		IV
สารบัญรูป		X
สารบัญตาราง		XV
บทที่ 1	**บทนำ**	
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์	1
	1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2	**ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง**	
	2.1 บลูทูธคลาสสิค	3
	2.1.1 หลักการทำงานของบลูทูธคลาสสิค	3
	2.1.2 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของบลูทูธคลาสสิค	4
	2.2 RSSI (Received Signal Strength Indication)	5
	2.3 สายอากาศยากิ-อูดะ	6
	2.3.1 ส่วนประกอบของสายอากาศยากิ-อูดะ	6
	2.3.2 หลักการทำงานของสายอากาศยากิ-อูดะ	7
	2.3.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยากิ-อูดะ	8
	2.3.4 แผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ	9
	2.4 สายอากาศรอบทิศทาง	11
	2.4.1 ส่วนประกอบของสายอากาศรอบทิศทาง	12
	2.4.2 หลักการทำงานของสายอากาศรอบทิศทาง	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรอบทิศทาง	13
2.4.4 สายอากาศรอบทิศทาง 2.4 – 2.5 GHz	14
2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-WROOM-32U	15
2.5.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของ ESP32-WROOM-32U	16
2.5.2 การกำหนดขาของ ESP32-WROOM-32U	17
2.6 โมดูลสวิตช์ RF HMC241	18
2.6.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลสวิตช์ HMC241	19
2.6.2 การกำหนดขาของโมดูลสวิตช์ HMC241	20
2.7 โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521	21
2.7.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521	22
2.7.2 การกำหนดขาของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521	23
2.8 โมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04	24
2.8.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04	25
2.8.2 การกำหนดขาของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04	26
2.9 โมดูลขับมอเตอร์ BTS7960	26
2.9.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลขับมอเตอร์ BTS7960	27
2.9.2 การกำหนดขาของโมดูลขับมอเตอร์ BTS7960	28
2.10 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	29
2.10.1 มอเตอร์เกียร์หนอน	29
2.10.2 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของมอเตอร์เกียร์หนอน	30
2.11 โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596	30
2.11.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596	31
2.11.2 การกำหนดขาของโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596	32
2.12 โมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226	33
2.12.2 การกำหนดขาของโมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226	34
2.13 จอแสดงผล LCD (Liquid Crystal Display)	34
2.13.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของจอแสดงผล LCD	36
2.13.2 การกำหนดขาของจอแสดงผล LCD ที่ใช้การเชื่อมต่อผ่าน I2C	36
2.14 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	37
2.14.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	38
2.14.2 สูตรในการคำนวณระยะเวลาใช้งานของแบตเตอรี่	39
2.15 โปรแกรม Arduino Ide	39
2.16 โปรแกรม Proteus	40
2.17 โปรแกรม Tinkercad	41
2.18 โปรแกรม Android Studio	42
2.19 โปรแกรม Wireshark	43
บทที่ 3 การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์	
3.1 การออกแบบ	45
3.1.1 การออกแบบระบบการทำงาน	45
3.1.2 การออกแบบการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า	47
3.1.3 การออกแบบการรับสัญญาณบลูทูธ	50
3.1.4 การออกแบบการควบคุมการเคลื่อนที่	53
3.1.5 การออกแบบการตรวจสอบสิ่งกีดขวางและการหลบหลีก	60
3.1.6 การออกแบบการวัดระดับพลังงานแบตเตอรี่	65
3.1.7 การออกแบบการแสดงผลบนรถเข็นสินค้าผ่านจอ LCD	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.8 การออกแบบวงจรรวม	71
3.1.9 การออกแบบ Housing	72
3.1.10 การออกแบบโครงสร้างรถเข็นสินค้า	73
3.1.11 การออกแบบแอปพลิเคชัน	75
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	80
3.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-WROOM-32U	80
3.2.2 สายอากาศยากิ-อูดะ แบบ PCB	80
3.2.3 สายอากาศรอบทิศทาง	80
3.2.4 โมดูลสวิตช์ RF HMC241	80
3.2.5 โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521	80
3.2.6 โมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04	81
3.2.7 โมดูลขับมอเตอร์ BTS7960	81
3.2.8 มอเตอร์เกียร์หนอน	81
3.2.9 โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596	81
3.2.10 โมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226	81
3.2.11 จอแสดงผล LCD	81
3.2.12 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	82
3.2.13 แผ่นอลูมิเนียม	82
3.2.14 แผ่นพลาสวูด	82
3.2.15 แผ่นตะแกรง	82
3.2.16 เบรกเกอร์	82
3.2.17 ฟิวส์	82
3.2.18 ล้ออิสระ	83
3.2.19 ล้อขับเคลื่อน	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	3.2.20 โปรแกรม Arduino Ide	83
	3.2.21 โปรแกรม Proteus	83
	3.2.22 โปรแกรม Tinkercad	83
	3.2.23 โปรแกรม Android Studio	83
	3.2.24 โปรแกรม Wireshark	84
	3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง	84
	3.3.1 การทดสอบการเชื่อมต่อโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า	84
	3.3.2 การทดสอบการตรวจสอบค่า RSSI เพื่อระบุตำแหน่ง	84
	3.3.3 การทดสอบการควบคุมทิศทาง	84
	3.3.4 การทดสอบการตรวจจับสิ่งกีดขวางและหลบหลีกสิ่งกีดขวาง	85
	3.3.5 การทดสอบการตรวจสอบระดับพลังงานแบตเตอรี่	85
	3.3.6 การทดสอบการรับน้ำหนักของรถเข็นสินค้า	85
	3.3.7 การทดสอบการแสดงผลบนหน้าจอ LCD	85
	3.3.8 การทดสอบการทำงานของแอปพลิเคชัน	85
บทที่ 4	**ผลการทดลอง**	
	4.1 ผลการทดสอบการเชื่อมต่อโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า	86
	4.1.1 ผลการทดสอบการนำ ESP32 ค้นหาสัญญาณบลูทูธของโทรศัพท์มือถือ	86
	4.1.2 ผลการทดสอบการใช้โปรแกรม Wireshark เพื่อตรวจสอบการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธ	86
	4.2 ผลการทดสอบการตรวจสอบค่า RSSI เพื่อระบุตำแหน่ง	91
	4.2.1 ผลการทดสอบค่า RSSI โดยไม่มีการติดตั้ง Housing	91
	4.2.2 ผลการทดสอบค่า RSSI โดยมีการติดตั้ง Housing	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	4.2.3 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบค่า RSSI กับระยะทางเมื่อติดตั้งและติดตั้ง HOUSING	97
	4.3 ผลการทดสอบการควบคุมทิศทาง	99
	4.4 ผลการทดสอบการตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวาง	100
	4.5 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของรถเข็นสินค้า	102
	4.6 ผลการทดสอบการตรวจสอบระดับพลังงานแบตเตอรี่	103
	4.7 ผลการทดสอบการแสดงผลบนหน้าจอ LCD	105
	4.8 ผลการทดสอบการทำงานของแอปพลิเคชัน	106
บทที่ 5	**สรุปผลและข้อเสนอแนะ**	
	5.1 สรุปผล	108
	5.2 ข้อเสนอแนะ	109
บรรณานุกรม		**110**
ภาคผนวก ก	คู่มือการใช้งานรถเข็นสินค้า	116
ภาคผนวก ข	ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าในการติดตามผู้ใช้งาน	119
ภาคผนวก ค	โค้ดโปรแกรม	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่

2.1 สัญลักษณ์บลูทูธ 3
2.2 ระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) 5
2.3 ส่วนประกอบของสายอากาศยากิ-อูดะ 6
2.4 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (ตัวสะท้อนยาวเท่ากับตัวขับ) 8
2.5 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (ตัวสะท้อนยาวมากกว่าตัวขับ) 8
2.6 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (ตัวกำกับยาวน้อยกว่าตัวขับ) 9
2.7 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (ตัวสะท้อน ตัวขับ และตัวกำกับรวมกัน) 9
2.8 องค์ประกอบชั้นบนของแผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ และทิศทางการแพร่กระจายคลื่น 10
2.9 องค์ประกอบชั้นล่างของแผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ และทิศทางการแพร่กระจายคลื่น 10
2.10 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น 3 มิติของแผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ 2.4 GHz 11
2.11 ส่วนประกอบของสายอากาศรอบทิศทาง 12
2.12 รูปแบบการแพร่กระจายสัญญาณของสายอากาศรอบทิศทางในแนวระนาบ 13
2.13 รูปแบบการแพร่กระจายสัญญาณของสายอากาศรอบทิศทางในแนวตั้ง 14
2.14 สายอากาศรอบทิศทาง 2.4 – 2.5 GHz 14
2.15 บอร์ด ESP32-WROOM-32U 16
2.16 พินเอาต์ของบอร์ด ESP32-WROOM-32U 17
2.17 โมดูลสวิตช์ HMC241 19
2.18 โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY521 21
2.19 แกนตรวจจับข้อมูลของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป 22
2.20 พินเอาต์ของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

2.21 โมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 24
2.22 หลักการทำงานของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก 25
2.23 พินเอาต์ของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 26
2.24 โมดูลขับมอเตอร์ BTS7960 27
2.25 พินเอาต์ของโมดูลขับมอเตอร์ BTS7960 28
2.26 มอเตอร์เกียร์หนอน 29
2.27 โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596 31
2.28 พินเอาต์ของโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596 32
2.29 โมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226 33
2.30 พินเอาต์ของโมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226 34
2.31 จอแสดงผล LCD 35
2.32 พินเอาต์ของจอแสดงผล LCD ขนาด 20X4 ที่ใช้การเชื่อมต่อผ่าน I2C 37
2.33 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด 12V 8AH 38
2.34 สัญลักษณ์ของโปรแกรม Arduino Ide 40
2.35 สัญลักษณ์ของโปรแกรม Proteus 41
2.36 สัญลักษณ์ของโปรแกรม Tinkercad 42
2.37 สัญลักษณ์ของโปรแกรม Android Studio 43
2.38 สัญลักษณ์ของโปรแกรม WIRESHARK 44
3.1 ขั้นตอนการทำงานของรถเข็นสินค้าติดตามผู้ใช้งานอัตโนมัติโดยใช้สัญญาณบลูทูธ 46
3.2 ขั้นตอนการทำงานของการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า 47
3.3 วงจรสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า 49
3.4 คำสั่งในการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อ 50
3.5 ขั้นตอนการทำงานของการรับสัญญาณบลูทูธ 50
3.6 วงจรสำหรับรับสัญญาณบลูทูธ 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	คำสั่งการตรวจสอบอุปกรณ์ที่ค้นพบ	53
3.8	คำสั่งการลบอุปกรณ์ออกจากระบบ	53
3.9	ขั้นตอนการออกตัวของรถเข็นสินค้า	54
3.10	ขั้นตอนการทำงานของระบบการเคลื่อนที่	55
3.11	วงจรสำหรับควบคุมการเปลี่ยนทิศทางโดยใช้โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป	56
3.12	วงจรสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้โมดูลขับมอเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้า	57
3.13	คำสั่งในการอ่านค่าการหมุนของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป	59
3.14	คำสั่งในการควบคุมการเคลื่อนที่ผ่าน PWM	59
3.15	ขั้นตอนการทำงานของการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง	60
3.16	วงจรสำหรับการตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยใช้โมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก	62
3.17	คำสั่งในการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง	63
3.18	ฟังก์ชันคำนวณระยะทาง	64
3.19	คำสั่งในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง	64
3.20	ขั้นตอนการวัดระดับพลังงานแบตเตอรี่	65
3.21	วงจรสำหรับวัดระดับพลังงานแบตเตอรี่	66
3.22	คำสั่งในการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่	67
3.23	ขั้นตอนการทำงานของการแสดงผลบนหน้าจอ LCD	68
3.24	วงจรสำหรับรับแสดงผลบนหน้าจอ LCD	69
3.25	คำสั่งในการแสดงผลบนหน้าจอ LCD แสดงสถานการณ์เชื่อมต่อ	70
3.26	คำสั่งในการแสดงผลบนหน้าจอ LCD แสดงสถานะการเคลื่อนที่	70
3.27	วงจรรวมของระบบการทำงาน	71
3.28	โมเดลการออกแบบ Housing ด้าน Top View	73
3.29	โมเดลการออกแบบ Housing ด้าน Front View	73
3.30	โมเดลการออกแบบโครงสร้างรถเข็นสินค้า ด้าน Front View	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

3.31 โมเดลการออกแบบโครงสร้างรถเข็นสินค้า ด้าน Back View 74
3.32 โครงสร้างรถเข็นสินค้า ด้าน Front View 74
3.33 หน้าแอปพลิเคชัน 75
3.34 คำสั่งสำหรับขอสิทธิ์การใช้งาน 76
3.35 คำสั่งสำหรับการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสถานะของบลูทูธ 76
3.36 คำสั่งสำหรับการรับข้อมูลจากระบบเมื่ออุปกรณ์บลูทูธถูกค้นพบ 77
3.37 คำสั่งสำหรับการเปิด/ปิดบลูทูธ 77
3.38 คำสั่งสำหรับการค้นหาอุปกรณ์บลูทูธ 78
3.39 คำสั่งสำหรับฟังก์ชันการเชื่อมต่อ 78
3.40 คำสั่งสำหรับฟังก์ชันการยกเลิกเชื่อมต่อ 79
3.41 คำสั่งสำหรับฟังก์ชันควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า 79
4.1 ผลการทดสอบการเชื่อมต่ออุปกรณ์และอ่านค่า RSSI 86
4.2 แพ็กเกจข้อมูลเมื่อเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับรถเข็นสินค้าสำเร็จ 87
4.3 แพ็กเกจข้อมูลเมื่อยกเลิกเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับรถเข็นสินค้าสำเร็จ 88
4.4 แพ็กเกจข้อมูลของอุปกรณ์ภายนอกเมื่อพยายามเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้า 90
4.5 กราฟ Radiation Pattern ของสายอากาศยากิ-อูดะ (ไม่มีการติดตั้ง Housing) 93
4.6 กราฟ Radiation Pattern ของสายอากาศยากิ-อูดะ (ติดตั้ง Housing ด้านซ้าย) 95
4.7 กราฟ Radiation Pattern ของสายอากาศยากิ-อูดะ (ติดตั้ง Housing ตรงกลาง) 96
4.8 กราฟ Radiation Pattern ของสายอากาศยากิ-อูดะ (ติดตั้ง Housing ด้านขวา) 96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

4.9	กราฟ Radiation Pattern ของสายอากาศยากิ-อูดะ (ติดตั้ง Housing ทั้ง 3 ทิศทาง)	97
4.10	กราฟเปรียบเทียบ Rssi กับระยะทาง เมื่อไม่ติดตั้ง Housing และติดตั้ง Housing	98
4.11	ระดับพลังงานแบตเตอรี่ 85%	105
4.12	ระดับพลังงานแบตเตอรี่ 80%	105
4.13	การแสดงสถานะการไม่เชื่อมต่ออุปกรณ์ และรถเข็นสินค้าหยุดการเคลื่อนที่บนจอ LCD	105
4.14	การแสดงสถานะการเชื่อมต่ออุปกรณ์ และรถเข็นสินค้ากำลังเคลื่อนที่บนจอ LCD	106
4.15	หน้าแอปพลิเคชัน สำหรับแสดงสถานะต่าง ๆ	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของบลูทูธคลาสสิค	4
2.2	ข้อมูลเฉาะทางเทคนิคของแผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ 2.4 GHz	10
2.3	ข้อมูลเฉาะทางเทคนิคของสายอากาศรอบทิศทาง 2.4 – 2.5 GHz	15
2.4	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของ ESP32- WROOM-32U	16
2.5	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลสวิตช์ HMC241	19
2.6	ลอจิกควบคุมโมดูลสวิตช์ HMC241	20
2.7	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521	22
2.8	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04	25
2.9	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลขับมอเตอร์ BTS7960	27
2.10	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของมอเตอร์เกียร์หนอน	30
2.11	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596	31
2.12	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226	33
2.13	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของจอแสดงผล LCD	36
2.14	ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด 12V 8AH	38
4.1	ผลการทดสอบค่า RSSI โดยไม่มีการติดตั้ง Housing	91
4.2	ผลการทดสอบค่า RSSI โดยมีการติดตั้ง Housing	93
4.3	ผลการการเปรียบเทียบค่า RSSI กับระยะทาง เมื่อไม่ติดตั้งและติดตั้ง Housing	97
4.4	ผลการการเปรียบเทียบมุมอ้างอิงกับมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปและมุมการหมุนจริง	99
4.5	ผลการทดสอบการเปรียบเทียบระหว่างระยะทางอ้างอิงกับระยะทางที่วัดได้จากโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก	100
4.6	ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของรถเข็นสินค้า	102
4.7	การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์พลังงาน	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีบลูทูธได้รับการพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน โดยเฉพาะในด้านการสร้างอุปกรณ์ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน ซึ่งการใช้งานรถเข็นในกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การซื้อสินค้า ถือเป็นสิ่งที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามการเคลื่อนย้ายรถเข็นสินค้าด้วยตนเองอาจก่อให้เกิดความไม่สะดวกสำหรับผู้ใช้งานบางกลุ่ม เช่น ผู้สูงอายุ ผู้พิการ หรือผู้ที่ต้องการความสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น ปัญหาดังกล่าวทำให้ผู้จัดทำมีแนวคิดที่จะพัฒนารถเข็นสินค้าติดตามผู้ใช้งานอัตโนมัติ โดยอาศัยเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายอย่างบลูทูธ ซึ่งสามารถช่วยลดภาระการเคลื่อนย้ายรถเข็นสินค้าด้วยตนเองได้อย่างมีประสิทธิภาพ รถเข็นสินค้าดังกล่าวจะใช้บลูทูธในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ของผู้ใช้งานและใช้การวัดค่าความแรงของสัญญาณ (RSSI) เพื่อนำมาประมวลผลและระบุทิศทางการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าไปยังตำแหน่งผู้ใช้งาน ระบบนี้ยังถูกออกแบบให้มีการควบคุมการหมุนของมอเตอร์โดยใช้โมดูลขับมอเตอร์ และใช้เซนเซอร์ตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวาง เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและลดความเสี่ยงในการชน

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการสื่อสารระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และโทรศัพท์มือถือผ่านสัญญาณบลูทูธ
2. เพื่อพัฒนารถเข็นสินค้าที่สามารถติดตามผู้ใช้งานได้โดยอัตโนมัติผ่านการใช้สัญญาณบลูทูธ
3. ออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าให้สามารถตรวจจับและติดตามสัญญาณบลูทูธจากโทรศัพท์มือถือได้อย่างแม่นยำ
4. เพื่ออำนวยความสะดวกในการเคลื่อนย้ายสินค้าและลดภาระของผู้ใช้งาน
5. ทดสอบและปรับปรุงระบบติดตามเพื่อให้รถเข็นสินค้าสามารถเคลื่อนที่ตามผู้ใช้งานได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการออกแบบและสร้างรถเข็นสินค้าที่สามารถติดตามผู้ใช้งานโดยอัตโนมัติผ่านการรับสัญญาณบลูทูธ ซึ่งรถเข็นสินค้านี้มีคุณสมบัติสำคัญดังต่อไปนี้

1. สามารถรับสัญญาณบลูทูธ จากอุปกรณ์ของผู้ใช้งานผ่านสายอากาศยากิ-อูดะที่ติดตั้งบนตัวรถเข็นสินค้า

2. สามารถประมวลผลค่าความแรงของสัญญาณ (RSSI) ที่ได้รับ เพื่อวิเคราะห์และกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าให้ตรงกับตำแหน่งของผู้ใช้งานได้อย่างแม่นยำ

3. สามารถควบคุมการเคลื่อนที่และหยุดการเคลื่อนที่โดยอัตโนมัติ โดยพิจารณาจากค่า RSSI เพื่อให้การติดตามผู้ใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย รวมถึงการหยุดการเคลื่อนที่เมื่อพบสิ่งกีดขวางหรือเมื่อผู้ใช้งานอยู่ในระยะใกล้กับตัวรถเข็นสินค้า

4. สามารถตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้โดยอัตโนมัติ โดยระบบจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากเซนเซอร์เพื่อตรวจจับสิ่งกีดขวางในเส้นทาง และทำการปรับทิศทางหรือหยุดการเคลื่อนที่ได้อย่างเหมาะสม เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน

ปริญญานิพนธ์นี้ผสมผสานเทคโนโลยีบลูทูธกับการประมวลผลของเซนเซอร์ เพื่อสร้างระบบการติดตามที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัยในการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 บลูทูธคลาสสิค

บลูทูธคลาสสิค (Bluetooth Classic) คือมาตรฐานการสื่อสารไร้สายที่ได้รับการพัฒนาในปี 1998 โดยกลุ่ม Bluetooth Special Interest Group (SIG) แนวคิดดั้งเดิมของบลูทูธคลาสสิค คือการสร้างเทคโนโลยีที่ช่วยให้การสื่อสารระยะสั้นระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ สามารถทำได้โดยไม่ต้องใช้สาย ช่วยอำนวยความสะดวกในการเชื่อมต่อและแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์หลายประเภท เช่น โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ หูฟัง และอุปกรณ์เสริมต่างๆ การพัฒนาและปรับปรุงบลูทูธคลาสสิคทำให้เป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายทั่วโลกในฐานะโปรโตคอลการสื่อสารไร้สายที่มีความน่าเชื่อถือ [1]

รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์บลูทูธ [1]

2.1.1 หลักการทำงานของบลูทูธคลาสสิค

บลูทูธคลาสสิคทำงานโดยใช้คลื่นวิทยุในย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ (ISM) อุปกรณ์ที่รองรับบลูทูธคลาสสิคสามารถสร้างเครือข่ายแบบพื้นที่ส่วนบุคคล (Personal Area Network: PAN) ที่ช่วยให้การสื่อสารระยะสั้นมีความปลอดภัยและเสถียรขึ้น หนึ่งในจุดเด่นของบลูทูธคลาสสิคคือ ความสามารถในการเชื่อมต่ออุปกรณ์หลายเครื่องพร้อมกัน ทำให้อุปกรณ์หนึ่งสามารถสื่อสารกับอุปกรณ์อื่นได้หลายชิ้นภายในเครือข่ายเดียวกัน อีกทั้งยังรองรับโปรไฟล์การใช้งานที่ช่วยให้อุปกรณ์สามารถใช้งานฟังก์ชันเฉพาะทางได้ เช่น A2DP สำหรับส่งสัญญาณเสียง HSP/HFP สำหรับหูฟัง และ SPP สำหรับการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของบลูทูธคลาสสิค

บลูทูธคลาสสิคเป็นมาตรฐานการสื่อสารไร้สายที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีการกำหนดคุณสมบัติทางเทคนิคเพื่อให้สามารถทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความสามารถในการทำงานของระบบนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลทางเทคนิคที่ช่วยให้การเชื่อมต่อและการสื่อสารข้อมูลเป็นไปอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ซึ่งข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคที่สำคัญของบลูทูธคลาสสิค แสดงดังตารางที่ 2.1 [3] [4]

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของบลูทูธคลาสสิค [3] [4]

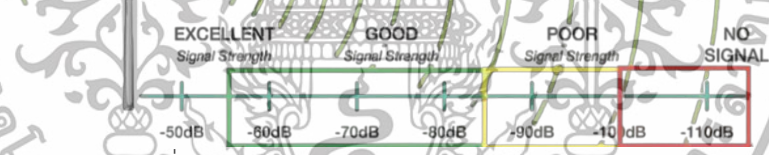
Parameter	Technical Specifications
Frequency Band	2.4GHz ISM Band (2.402 – 2.480 GHz Utilized)
Channels	79 channels with 1 MHz spacing
Channel Usage	Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS)
Modulation	GFSK, π/4 DQPSK, 8DPSK
Data Rate	EDR PHY (8DPSK): 3 Mb/s EDR PHY (π/4 DQPSK): 2 Mb/s BR PHY (GFSK): 1 Mb/s
Tx Power	≤ 100 mW (+20 dBm)
Rx Sensitivity	≤-70 dBm
Data Transports	Asynchronous Connection-oriented Synchronous Connection-oriented
Communication Topologies	Point-to-Point (including piconet)
Data Rate	1–3 Mb/s
Security and Encryption	64b/128 bit
Connection Range	10–30 m
Latency	Approx. 100 ms
Communication Direction	Two way directional (Bidirectional)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 RSSI (Received Signal Strength Indication)

RSSI (Received Signal Strength Indicator) เป็นค่าที่ใช้วัดระดับความแรงของสัญญาณที่อุปกรณ์รับ เช่น บลูทูธ Wi-Fi หรืออุปกรณ์สื่อสารไร้สายประเภทอื่น ๆ ได้รับจากแหล่งส่งสัญญาณ ค่า RSSI เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการประเมินความสามารถในการเชื่อมต่อและการสื่อสารไร้สาย โดยจะทำให้ทราบถึงคุณภาพและความเสถียรของการเชื่อมต่อในระบบไร้สาย

เมื่อเครื่องส่งสัญญาณเข้าใกล้เครื่องรับ ความแรงของสัญญาณที่ส่งผ่านสายอากาศจะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า RSSI เพิ่มขึ้นด้วย แสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งหมายถึงสัญญาณที่ได้รับมีความแรงและเสถียร การเชื่อมต่อจะมีความรวดเร็วและประสิทธิภาพสูง เช่น สามารถส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและคุณภาพในการเชื่อมต่อมีความเสถียร ในทางกลับกัน เมื่อเครื่องส่งสัญญาณห่างออกจากเครื่องรับ ค่า RSSI จะลดลง ซึ่งหมายถึงสัญญาณที่อ่อนและอาจส่งผลให้การเชื่อมต่อมีปัญหา เช่น เกิดความล่าช้าในการส่งข้อมูล การเชื่อมต่อหลุดบ่อยครั้ง หรือคุณภาพการเชื่อมต่อที่ไม่เสถียร [5]



รูปที่ 2.2 ระดับความแรงของสัญญาณ (RSSI) [6]

ค่า RSSI วัดเป็นหน่วยเดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm) เป็นตัวเลขสัมบูรณ์ที่แสดงระดับพลังงานของสัญญาณในหน่วยมิลลิวัตต์ การวัดในหน่วย dBm ใช้การเทียบกำลังของสัญญาณที่ได้รับกับกำลัง 1 milliwatt (mW) โดยใช้ระบบลอการิทึม ซึ่งค่า 0 dBm แสดงถึงพลังงานสัญญาณที่มีค่าเท่ากับ 1 mW ขณะที่ค่าติดลบ เช่น -10 dBm แสดงถึงสัญญาณที่มีพลังงานต่ำกว่าหรืออ่อนกว่า 1 mW โดยค่าของ RSSI ที่แสดงในรูปของค่าติดลบเกิดจากการที่สัญญาณมักจะลดทอนพลังงานลงเมื่อเดินทางผ่านอากาศหรือสิ่งกีดขวาง ค่า dBm ใกล้เคียงกับ 0 dBm (เช่น -20 dBm) แสดงว่าสัญญาณที่มีความแรงมากและคุณภาพดี ซึ่งเหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อที่เสถียรและมีประสิทธิภาพสูง ขณะที่ค่าติดลบที่มากขึ้น (เช่น -80 dBm) แสดงว่าสัญญาณที่อ่อนลงอย่างมาก ซึ่งอาจไม่เพียงพอสำหรับการเชื่อมต่อที่มีประสิทธิภาพหรืออาจทำให้การเชื่อมต่อมีปัญหา [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

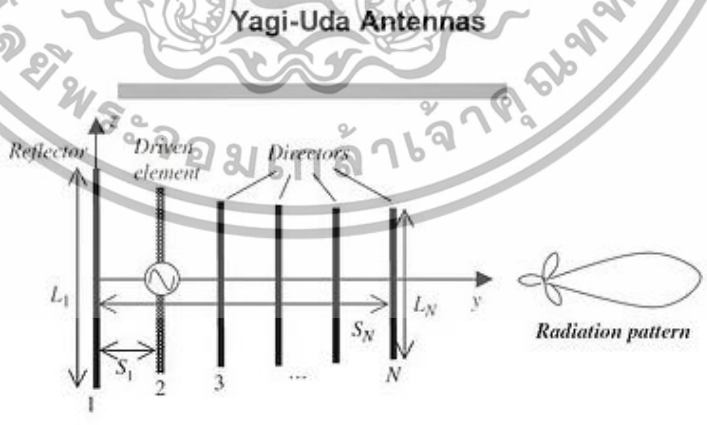
2.3 สายอากาศยากิ-อูดะ

สายอากาศยากิ-อูดะ (Yagi-Uda Antenna) เป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับการรับและส่งสัญญาณโทรทัศน์และคลื่นวิทยุ ถูกพัฒนาโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น Hidetsugu Yagi และ Shintaro Uda ในช่วงทศวรรษที่ 1920 สายอากาศนี้มีการออกแบบที่ประกอบด้วยองค์ประกอบหลายส่วน ซึ่งเรียกว่าไดเรกเตอร์ และรีเฟลกเตอร์ ที่จัดเรียงในลักษณะเฉพาะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับสัญญาณจากทิศทางที่กำหนด โดยมีองค์ประกอบหลักคือ ไดโพลที่เกิดการสั่นพ้องตามความถี่ที่ใช้งาน

สายอากาศยากิ-อูดะ มีประสิทธิภาพสูงและมีการนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น การรับสัญญาณโทรทัศน์และการสื่อสารวิทยุสมัครเล่น โดยสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 30 MHz ถึง 3 GHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ VHF และ UHF สายอากาศชนิดนี้มีจุดเด่นในการส่งและรับสัญญาณจากทิศทางที่เฉพาะเจาะจง ทำให้สามารถรับสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าสายอากาศชนิดอื่นๆ [8]

2.3.1 ส่วนประกอบของสายอากาศยากิ-อูดะ

ส่วนประกอบของสายอากาศยากิ-อูดะ ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ที่ตัวนำหลายตัวที่จัดเรียงกันเป็นแนวตรง ได้แก่ ตัวขับ ตัวสะท้อน และตัวนำ โดยรายละเอียดองค์ประกอบหลักของสายอากาศยากิ-อูดะ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของสายอากาศยากิ-อูดะ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดองค์ประกอบหลักของสายอากาศยากิ-อูดะ มีดังต่อไปนี้

1) ตัวขับ (Driven Element) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายหรือเครื่องส่งสัญญาณ ทำหน้าที่รับและส่งคลื่นวิทยุ

2) ตัวสะท้อน (Reflector) ตั้งอยู่ด้านหลังของตัวนำหลัก ทำหน้าที่สะท้อนสัญญาณที่เข้ามาและส่งสัญญาณไปในทิศทางที่ต้องการ

3) ตัวกำกับ (Directors) ตั้งอยู่ด้านหน้าของตัวนำหลัก ทำหน้าที่กำกับทิศทางของสัญญาณเพื่อให้เสริมความแรงของคลื่นวิทยุในทิศทางนั้น [10]

2.3.2 หลักการทำงานของสายอากาศยากิ-อูดะ

สายอากาศยากิ-อูดะทำงานโดยอาศัยหลักการของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านองค์ประกอบหลักของสายอากาศ ซึ่งได้แก่ ตัวขับ และตัวนำกาฝาก โดยตัวขับทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นหลักที่ได้รับสัญญาณจากสายนำสัญญาณและส่งกระจายออกไปในอากาศ ขณะที่ตัวนำกาฝาก ซึ่งไม่ได้รับสัญญาณโดยตรงจากแหล่งกำเนิด จะถูกจัดวางในตำแหน่งใกล้กับตัวขับภายในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใกล้ตัว (Near Field) ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำกาฝาก กระแสที่เกิดขึ้นในตัวนำกาฝากจะทำให้เกิดการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอีกครั้ง หรือที่เรียกว่า Re-radiation อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติของคลื่นที่ถูกแพร่ออกมานี้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างตัวขับกับตัวนำกาฝาก รวมถึงความยาวของตัวนำกาฝากเมื่อเทียบกับค่าความยาวคลื่นเรโซแนนซ์ทางไฟฟ้า หากตัวนำกาฝากมีความยาวสั้นกว่าค่าความยาวเรโซแนนซ์ กระแสที่ไหลในตัวนำกาฝากจะมีเฟสที่เร็วขึ้น แต่หากตัวนำกาฝากยาวกว่าค่าดังกล่าว เฟสของกระแสจะช้าลง

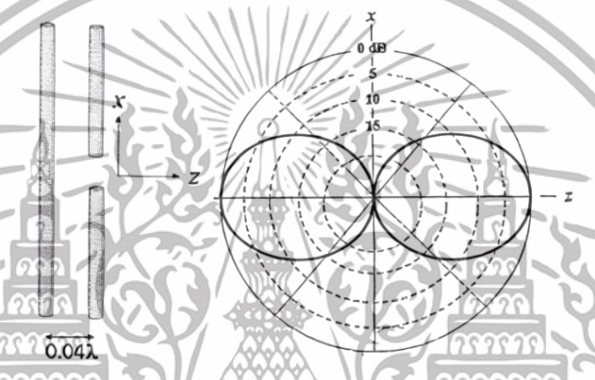
การรวมกันของคลื่นจากตัวขับและตัวนำกาฝากส่งผลให้เกิดการเสริมกันในบางทิศทางและหักล้างกันในบางทิศทาง ทำให้ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นมีความจำเพาะเจาะจงมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากตัวนำกาฝากไม่ได้รับสัญญาณโดยตรงจากสายนำสัญญาณ การควบคุมขนาดและเฟสของกระแสในตัวนำกาฝากจึงขึ้นอยู่กับระยะห่างและความยาวของตัวนำกาฝากเป็นหลัก ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นทำให้สายอากาศยากิ-อูดะสามารถให้ค่าการขยายสัญญาณในทิศทางด้านหน้าสูง ในขณะที่การแพร่กระจายในทิศทางด้านหลังต่ำ ซึ่งช่วยให้มีอัตราส่วนการขยายด้านหน้าต่อด้านหลัง (Front to Back Ratio) สูง และทำให้สายอากาศชนิดนี้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยากิ-อูดะ

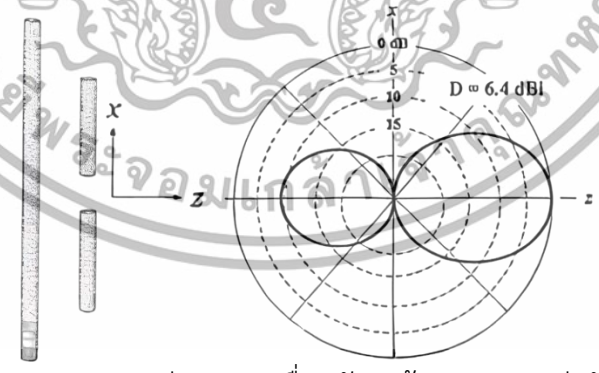
สายอากาศยากิ-อูดะ เป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทาง (Directional Antenna) โดยสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ จะพุ่งไปในทิศที่สายอากาศชี้ไป ซึ่งทิศทางการแพร่กระจายคลื่นสามารถกำหนดได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบและจัดวางสายอากาศ

เมื่อตัวสะท้อนยาวเท่ากับตัวขับ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในสองทิศทางจะเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (ตัวสะท้อนยาวเท่ากับตัวขับ) [12]

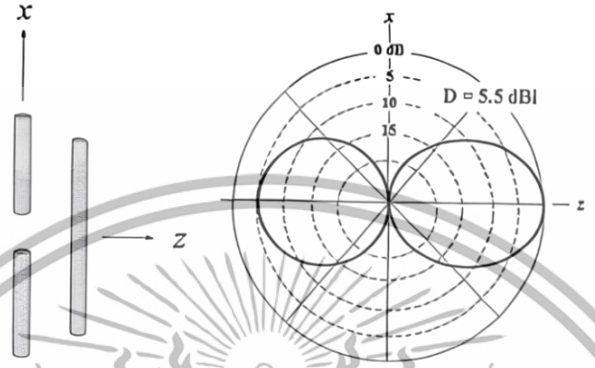
เมื่อตัวสะท้อนยาวมากกว่าตัวขับ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะมีทิศทางด้านขวามากกว่าด้านซ้าย แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.2 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (ตัวสะท้อนยาวมากกว่าตัวขับ) [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจัดวางแค่ตัวกำกับและตัวขับ โดยที่ตัวกำกับอยู่ถัดไปด้านขวาของตัวขับ และกำหนดให้ตัวกำกับมีขนาดเล็กกว่า รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นจะมีทิศทางด้านขวามากกว่าด้านซ้าย แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (ตัวกำกับยาวน้อยกว่าตัวขับ) [12]

เมื่อจัดวางตัวสะท้อน ตัวขับ และตัวกำกับรวมกัน จะได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดซึ่งดีที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.7

รูปที่ 2.4 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (ตัวสะท้อน ตัวขับ และตัวกำกับรวมกัน) [12]

2.3.4 แผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ

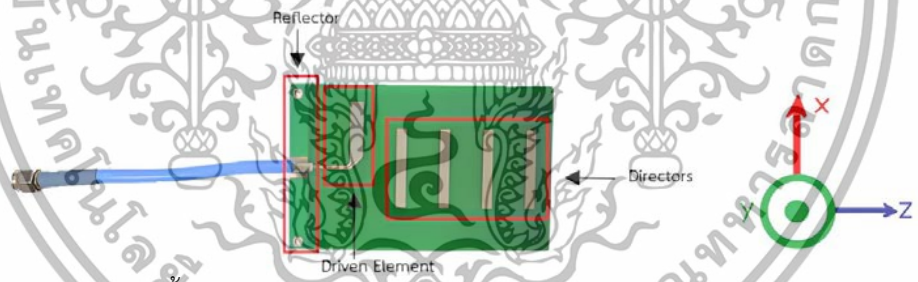
แผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ เป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทาง ซึ่งมีอัตราขยาย (Gain) ประมาณ 7 dBi ความต้านทานของอินพุตสายอากาศ 50 โอห์ม และสามารถใช้งานได้ในย่านความถี่ 2.4 GHz แสดงดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

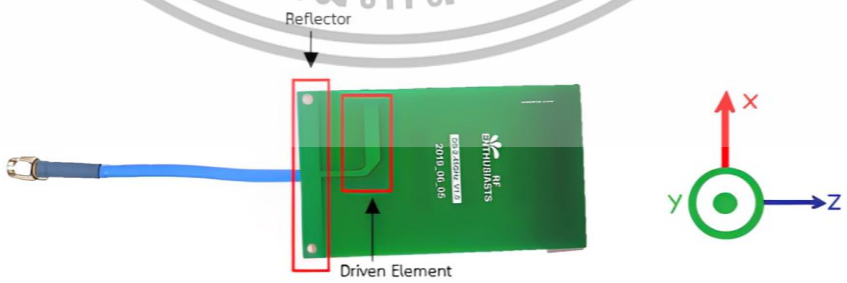
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลเฉาะทางเทคนิคของแผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ 2.4 GHz [13]

Parameter	Technical Specifications
Port Impedance	50 Ω
Material	Metal
Gain	7 dBi
Bandwidth	2.4 GHz
Radiation Pattern	Directional Antenna
Leading method	SMA-J (RG316 radio frequency wire + SMA female threaded male for head)
Package size	6x10 cm

องค์ประกอบชั้นบนของแผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ 2.4 GHz ซึ่งประกอบด้วยตัวขับและตัวกำกับและตัวสะท้อนและทิศทางการแพร่กระจายคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.8 และองค์ประกอบชั้นล่างของสายอากาศยากิ-อูดะ 2.4 GHz ซึ่งประกอบด้วยตัวขับและตัวสะท้อน และทิศทางการแพร่กระจายคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.9 [14]



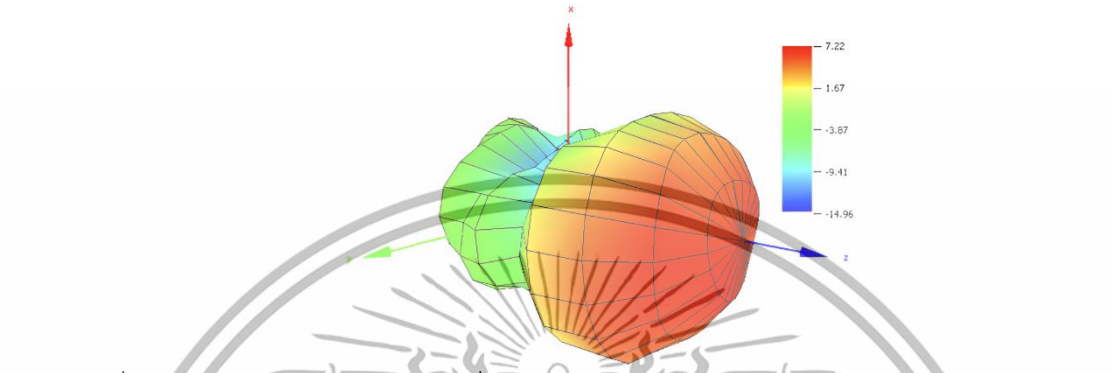
รูปที่ 2.5 องค์ประกอบชั้นบนของแผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ และทิศทางการแพร่กระจายคลื่น[14]



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบชั้นล่างของแผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ และทิศทางการแพร่กระจายคลื่น[14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ 2.4 GHz จัดวางตัวสะท้อน ตัวขับ และตัวกำกับรวมกัน โดยตัวสะท้อนมีความยาวมากที่สุด รองลงมาคือ ตัวขับและตัวกำกับ ซึ่งรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.7 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น 3 มิติของแผ่นวงจรสายอากาศยากิ-อูดะ 2.4 GHz [14]

จากรูปที่ 2.10 รูปแบบการกระจายคลื่น (Radiation Pattern) ของสายอากาศยากิ-อูดะ แสดงถึงการกระจายพลังงานของคลื่นวิทยุในทิศทางต่าง ๆ โดยในกรณีนี้ แสดงให้เห็นว่าพลังงานส่วนใหญ่ถูกส่งออกไปในทิศทางแกน Z ซึ่งเป็นทิศทางหลักของการแผ่พลังงาน จะพบว่าสีแสดงถึงระดับกำลังของสัญญาณ (ค่า Gain) ที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดความสามารถของสายอากาศในการเพิ่มระดับพลังงานสัญญาณ ในกรณีนี้ Gain เท่ากับ 7.22 dBi เมื่อใช้งานในความถี่ 2.4 GHz

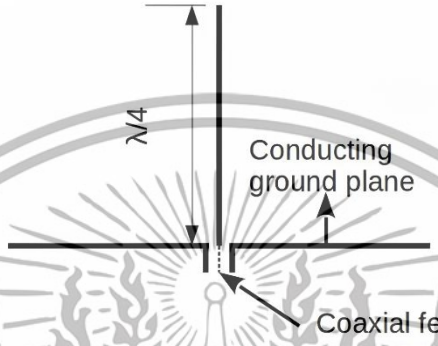
2.4 สายอากาศรอบทิศทาง

สายอากาศรอบทิศทาง (Omni-Directional Antenna) เป็นสายอากาศที่สามารถแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปในทุกทิศทางรอบตัวในระนาบแนวราบหรือในรูปแบบที่ใกล้เคียงกับทรงกลม ลักษณะเด่นคือสามารถส่งและรับสัญญาณได้จากทุกทิศทางในระนาบเดียวกัน โดยไม่ต้องมีการปรับตำแหน่งหรือมุมของสายอากาศ ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการครอบคลุมพื้นที่กว้าง เช่น ระบบเครือข่ายไร้สาย, การสื่อสารผ่านโทรศัพท์มือถือ, วิทยุสื่อสาร และระบบเครือข่ายภายในอาคาร โครงสร้างของสายอากาศรอบทิศทางมักถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นแท่งกระบอก หรือเป็นเส้นลวดตรง เช่น สายอากาศแบบไดโพล, สายอากาศแบบโมโนโพล โดยมักติดตั้งในแนวตั้งเพื่อให้สามารถแพร่กระจายสัญญาณออกไปในแนวราบได้อย่างมีประสิทธิภาพ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ส่วนประกอบของสายอากาศรอบทิศทาง

สายอากาศรอบทิศทาง ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนกระจายคลื่น กราวด์เพลน และสายนำสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแต่ละส่วนมีหน้าที่และความสำคัญที่แตกต่างกันในการช่วยให้สายอากาศสามารถรับและส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ [16]



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของสายอากาศรอบทิศทาง [16]

รายละเอียดองค์ประกอบหลักของสายอากาศยากิ-อูดะ ดังต่อไปนี้

1) ส่วนกระจายคลื่น (Radiating Element)

ส่วนกระจายคลื่น เป็นส่วนที่ใช้สำหรับปล่อยและรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปจะมีความยาวประมาณหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นที่ใช้งาน ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของสายอากาศในย่านความถี่วิทยุ เพราะช่วยให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ดี ทำให้สามารถปล่อยคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและกระจายออกไปในทุกทิศทางรอบสายอากาศ

2) กราวด์เพลน (Ground Plane)

กราวด์เพลน เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นพื้นดินจำลองให้กับสายอากาศ ซึ่งกราวด์เพลนที่เหมาะสมจะช่วยให้สายอากาศสามารถปรับแต่งอิมพีแดนซ์ให้เข้ากับสายนำสัญญาณได้ดีขึ้น และช่วยให้การกระจายคลื่นมีความสมมาตรและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

3) สายนำสัญญาณ (Transmission Line)

สายนำสัญญาณ เป็นส่วนที่ใช้เชื่อมต่อสายอากาศกับอุปกรณ์รับหรือส่งสัญญาณ โดยทำหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณไฟฟ้าระหว่างสายอากาศและอุปกรณ์อย่างมีประสิทธิภาพ สายนำสัญญาณที่ใช้ต้องมีอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสม (โดยทั่วไปคือ 50 โอห์ม) เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานและการสะท้อนกลับของสัญญาณ [16]

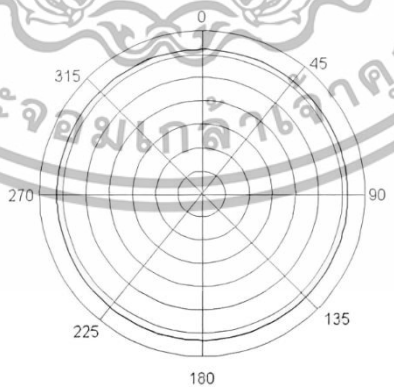
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 หลักการทำงานของสายอากาศรอบทิศทาง

สายอากาศรอบทิศทางทำงานโดยใช้หลักการของการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปในทุกทิศทางในแนวราบ เมื่อกระแสไฟฟ้าสลับเข้าสู่ตัวนำคลื่น จะสร้างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกัน ส่งผลให้เกิดคลื่นที่กระจายออกไปทั่วบริเวณ แนวรับสัญญาณเกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในตัวนำ ซึ่งจะถูกส่งไปประมวลผลในอุปกรณ์รับ สายอากาศที่มีค่าอัตราขยายสูงจะบีบอัดพลังงานให้อยู่ในแนวราบมากขึ้น ส่งผลให้สัญญาณส่งได้ไกลแต่มุมกระจายแคบ ในขณะที่ค่าอัตราขยายต่ำจะให้การครอบคลุมในมุมกว้างขึ้นแต่ระยะส่งสัญญาณสั้นกว่า นอกจากนี้ สายอากาศรอบทิศทางมักออกแบบให้ลดทอนสัญญาณในแนวดิ่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายพลังงานในแนวราบได้ดีที่สุด [17]

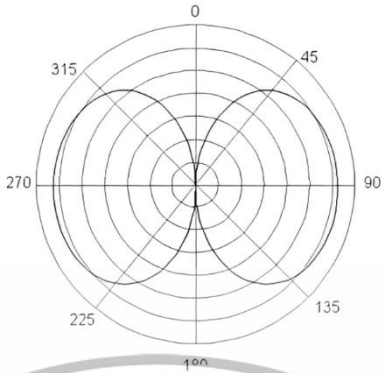
2.4.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรอบทิศทาง

รูปแบบการแพร่กระจายสัญญาณของสายอากาศรอบทิศทางสามารถแบ่งออกเป็นสองมิติหลัก ได้แก่ แนวระนาบ แสดงดังรูปที่ 2.12 และแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยในแนวระนาบ สัญญาณจะกระจายออกไปในทุกทิศทางรอบตัวเหมือนคลื่นน้ำ ทำให้เหมาะสำหรับการครอบคลุมพื้นที่กว้าง เช่น เครือข่ายโทรศัพท์มือถือ ส่วนในแนวตั้ง การแพร่กระจายจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราขยายของสายอากาศ สายอากาศที่มีอัตราขยายต่ำจะกระจายสัญญาณในมุมกว้าง ส่วนสายอากาศที่มีอัตราขยายสูงจะกระจายสัญญาณในมุมแคบ ทำให้สามารถส่งสัญญาณไกลขึ้นในแนวระนาบและมีมุมกระจายแคบลงในแนวดิ่ง [18]



รูปที่ 2.12 รูปแบบการแพร่กระจายสัญญาณของสายอากาศรอบทิศทางในแนวระนาบ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 รูปแบบการแพร่กระจายสัญญาณของสายอากาศรอบทิศทางในแนวตั้ง [18]

2.4.4 สายอากาศรอบทิศทาง 2.4 – 2.5 GHz

สายอากาศรอบทิศทางที่ทำงานในย่านความถี่ 2.4 – 2.5 GHz เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสื่อสารไร้สายในเครือข่าย Wi-Fi, Bluetooth และระบบสื่อสารอื่น ๆ ซึ่งต้องการความครอบคลุมของสัญญาณในพื้นที่กว้าง โดยไม่จำเป็นต้องปรับทิศทางของสายอากาศให้ตรงกับอุปกรณ์ปลายทางโดยเฉพาะ ด้วยคุณสมบัติที่สามารถกระจายสัญญาณได้ในทุกทิศทาง สายอากาศประเภทนี้จึงเหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการการเชื่อมต่อไร้สายที่เสถียรและต่อเนื่อง เช่น เราเตอร์ไร้สายและอุปกรณ์ IoT นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปใช้ในระบบเครือข่ายที่ต้องการให้สัญญาณครอบคลุมบริเวณกว้าง เช่น ภายในอาคาร สำนักงาน หรือพื้นที่ที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก โดยช่วยให้การรับส่งข้อมูลเป็นไปอย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพ [19] แสดงดังรูปที่ 2.14 และข้อมูลเฉาะทางเทคนิคแสดงดังตารางที่ 2.3

รูปที่ 2.14 สายอากาศรอบทิศทาง 2.4 – 2.5 GHz [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลเฉาะทางเทคนิคของสายอากาศรอบทิศทาง 2.4 – 2.5 GHz [19]

Parameter	Technical Specifications
Frequency Band	2.4 – 2.5 GHz
Gain	> 2.5 dBi
V.S.W.R.	< 1.5
Impedance	50 Ω
Maximum Input Power	50 W
Connector Type	SMA Connector
Radiating Material	Copper
Cable Length	100/120/200 mm
Package Size	295 × 110 × 60 mm
Operating Temperature	-40 ~ +70 °C
Storage Temperature	-55 ~ +80 °C

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-WROOM-32U

ESP32-WROOM-32U เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งถูกพัฒนาโดยบริษัท Espressif Systems ซึ่งได้รับการยอมรับในวงการ Internet of Things (IoT) และระบบฝังตัว (Embedded Systems) ไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ใช้ชิป ESP32 ซึ่งเป็นชิปที่มีประสิทธิภาพสูงและมาพร้อมกับการประมวลผลแบบ Dual-core ที่ช่วยให้สามารถจัดการงานหลายงานพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ [20]

ESP32-WROOM-32U มีความสามารถในการเชื่อมต่อไร้สายที่ครอบคลุมทั้ง Wi-Fi และบลูทูธ (Bluetooth Classic และ Bluetooth Low Energy หรือ BLE) ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโครงการที่ต้องการการเชื่อมต่อที่หลากหลาย เช่น การสร้างเครือข่ายเซ็นเซอร์พลังงานต่ำ การสตรีมข้อมูลเสียง หรือการสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติแบบไร้สาย และมีขั้วต่อสายอากาศภายนอกแบบ U.FL connector ที่ช่วยให้ผู้พัฒนาสามารถเลือกใช้สายอากาศภายนอกที่เหมาะสมกับความต้องการ มีการเพิ่มระยะการรับส่งสัญญาณหรือใช้สายอากาศที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว เช่น สายอากาศที่สามารถต้านทานสภาพแวดล้อมที่มีความรุนแรง [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.15 บอร์ด ESP32-WROOM-32U [21]

2.5.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของ ESP32-WROOM-32U

ESP32-WROOM-32U เป็นโมดูลที่ออกแบบมาเพื่อการใช้งานในระบบ IoT ที่ต้องการความเสถียรและประสิทธิภาพสูง ด้วยขนาดที่กะทัดรัดและการประหยัดพลังงาน โดยข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของ ESP32- WROOM-32U [22]

Categories	Parameter	Technical Specifications
Certification	Wi-Fi Certification	Wi-Fi Alliance
	Bluetooth certification	BQB
	Green Certification	REACH/RoHS
Wi-Fi	Protocols	802.11 b/g/n (802.11n up to 150 Mbps)
	Frequency range	2.4 - 2.5 GHz
Bluetooth	Protocols	Bluetooth v4.2 BR/EDR and Bluetooth LE
	Radio	NZIF receiver with –97 dBm sensitivity, Class-1, class-2 and class-3 transmitter
Hardware	Module interfaces	SD card, UART, SPI, SDIO, I2C, LED PWM, Motor PWM, I2S, IR, pulse counter, GPIO, capacitive touch sensor, ADC, DAC, Two-Wire Automotive Interface, compatible with ISO11898-1 capacitive touch sensor

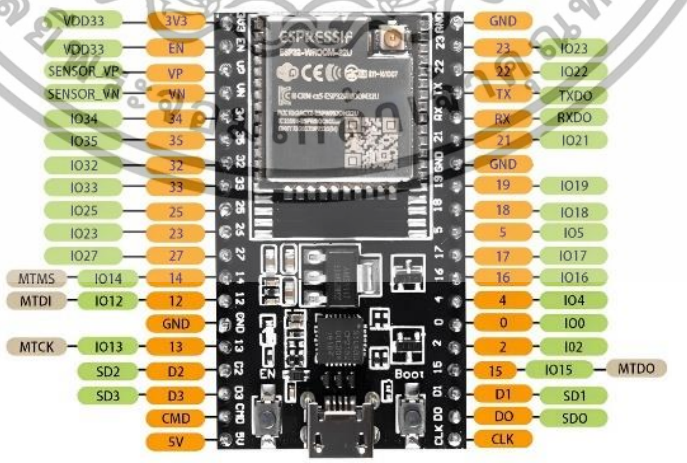
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของ ESP32-WROOM-32U (ต่อ)

Categories	Items	Specifications
Hardware	Integrated crystal	40 MHz crystal
	Integrated SPI flash	4 MB
	Power supply	3.0 V - 3.6 V
	Operating current	Average 80 mA
	Minimum current delivered by power supply	500 mA
	Recommended operating ambient temperature range	–40 °C - +85 °C
	Package size	18×25.50×3 mm

2.5.2 การกำหนดขาของ ESP32-WROOM-32U

พินเอาต์ของบอร์ด ESP32-WROOM-32U ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการเชื่อมต่อและการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีขั้วต่อและพอร์ตที่หลากหลายเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เสริมและเซนเซอร์ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังรองรับการจ่ายไฟและการสื่อสารข้อมูลหลายรูปแบบเพื่อความสะดวกในการพัฒนา แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 พินเอาต์ของบอร์ด ESP32-WROOM-32U [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดพินเอาต์ของ ESP32-WROOM-32U มี ทั้งหมด 38 พิน ดังต่อไปนี้

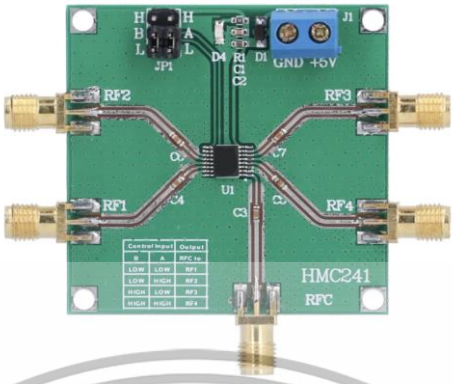
- พิน GPIO: มี 32 พิน กำหนดฟังก์ชันได้ทั้งดิจิทัล แอนะล็อก และสัมผัส
- พินอินพุตเฉพาะ: พิน 4, 5, 6, 7 รองรับทั้งดิจิทัลและแอนะล็อก
- พินขัดจังหวะ: กำหนด GPIO ใด ๆ ให้เป็นขัดจังหวะได้
- พิน ADC: แปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ความละเอียดสูงสุด 12 บิต
- พิน DAC: แปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ความละเอียด 8 บิต
- พินสัมผัส: มี 10 พิน วัดการเปลี่ยนแปลงความจุเมื่อสัมผัส
- พิน I2C: มี 2 อินเทอร์เฟซ กำหนด GPIO ใด ๆ เป็น SDA และ SCL ได้
- พิน SPI: มี SPI, HSPI, VSPI ใช้เชื่อมต่อทั่วไปและหน่วยความจำแฟลช
- พิน UART: มี UART0, UART1, UART2 รองรับการสื่อสารอนุกรม พร้อม RTS/CTS
- พิน PWM: ปรับความละเอียดสูงได้ ความถี่ 0-10 MHz
- พิน RTC GPIO: ใช้ปลุก ESP32 จากโหมด Sleep
- พินรัด: GPIO0, GPIO2, GPIO5, GPIO12, GPIO15 ใช้เลือกโหมด BOOT/FLASH
- พินไฟฟ้า: จ่าย 3.3V และ GND
- พิน EN: พินเปิดใช้งาน เมื่อดึงเป็นระดับสูง ชิปทำงาน [22]

2.6 โมดูลสวิตช์ RF HMC241

HMC241 เป็นโมดูลสวิตช์ RF (Radio Frequency) ชนิด Single-Pole, Four-Throw (SP4T) แสดงดังรูปที่ 2.17 ที่ออกแบบมาเพื่อการควบคุมสัญญาณวิทยุในช่วงความถี่ ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 4 GHz โดยผลิตจากวัสดุกลุ่มแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้มีประสิทธิภาพสูงในการสวิตช์สัญญาณ RF โดย HMC241 มีการออกแบบที่ช่วยลดปัญหาการสะท้อนของสัญญาณ ซึ่งสามารถให้การแยกสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงและมีการสูญเสียการแทรกต่ำ และรองรับการทำงานที่ต้องการการแยกสัญญาณที่ดี ซึ่งสามารถป้องกันการปะปนของสัญญาณจากพอร์ตต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ชิป HMC241 มีตัวถอดรหัสแบบไบนารีที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากสองเส้นควบคุมลอจิก High/Low เพื่อเลือกพอร์ตสัญญาณ RF หนึ่งในสี่พอร์ตได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ การควบคุมการทำงานของ HMC241 สามารถทำได้ด้วยแรงดันไฟฟ้าจ่ายขั้วบวกเดียวในช่วง 3-5V ทำให้ HMC241 สามารถทำงานร่วมกับระบบที่มีแหล่งจ่ายไฟได้หลากหลาย [23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 โมดูลสวิตช์ HMC241 [23]

2.6.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลสวิตช์ HMC241

โมดูลสวิตช์ HMC241 เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อการควบคุมสัญญาณ RF โดยเฉพาะ ซึ่งข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลสวิตช์ HMC241 แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลสวิตช์ HMC241 [24]

Parameter	Technical Specifications
Frequency Range	100 MHz to 4 GHz
Package Dimensions	3.54x2.36x0.39 inches
Item Weight	0.741 ounces
Nonreflective	50 Ω
Insertion Loss (2 GHz to 2.5 GHz)	1.2 dB
Isolation (2 GHz to 2.5 GHz)	35 dB
Return Loss	
RFC and RF1 to RF4 (On) (100 MHz to 2.5 GHz)	18 dB
RF1 to RF4 (Off) (100 MHz to 4 GHz)	12 dB
Supply	
Voltage	3 - 5 V
Current (Maximum)	5 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลสวิตช์ HMC241 (ต่อ)

Parameter	Technical Specifications
Digital Control Inputs	
Current	
Low	0.2 μA
High	40 μA
Digital Control Inputs	
Voltage (VDD = 3 V)	
Low	0 - 0.8 V
High	2 – 3 V
Voltage (VDD = 5 V)	
Low	0 - 0.8 V
High	2 – 5 V

2.6.2 การกำหนดขาของโมดูลสวิตช์ HMC241

HMC241 ใช้แรงดันไฟฟ้าบวกที่ขา VDD และควบคุมด้วยสัญญาณลอจิก A และ B เพื่อตั้งค่าสถานะเส้นทาง RF แสดงดังตารางที่ 2.6 หนึ่งเส้นทางอยู่ในสถานะ Insertion Loss และเชื่อมสัญญาณระหว่างขาสัง RF กับ RF Common Pad ส่วนอีกสามเส้นทางอยู่ในสถานะ Isolation โดยเชื่อมต่อกับตัวต้านทาน 50 Ω ภายในเพื่อให้มีการสูญเสียสูง [24]

ตารางที่ 2.6 ลอจิกควบคุมโมดูลสวิตช์ HMC241 [24]

RF Paths	Digital Control Input	
	A	B
RFC to RF1	Low	Low
RFC to RF2	High	Low
RFC to RF3	Low	High
RFC to RF4	High	High

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521

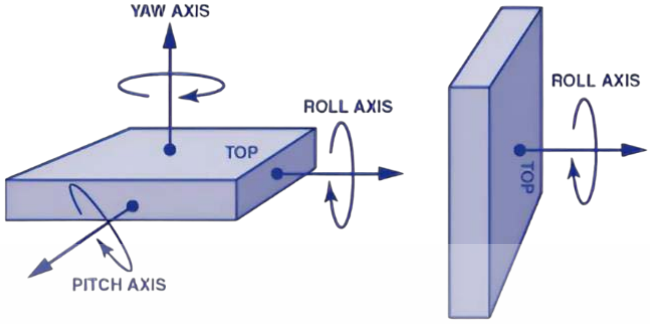
โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope Sensor Module) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดและตรวจจับการหมุนหรือการเอียงของวัตถุในระบบสามมิติ สามารถตรวจวัดการเคลื่อนไหวที่ซับซ้อน มีการใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการข้อมูลเกี่ยวกับการเคลื่อนไหว เช่น โทรศัพท์มือถือ ระบบนำทางในยานพาหนะ และโดรน โดยเซนเซอร์ไจโรสโคปทำงานโดยใช้หลักการของการหมุน เพื่อสร้างข้อมูลที่สามารถนำไปคำนวณการเปลี่ยนแปลงของมุมในแต่ละแกน เซนเซอร์จะตรวจจับทิศทางการหมุนและให้ค่าการเคลื่อนที่ในรูปแบบของค่าเชิงมุม ซึ่งสามารถนำไปประมวลผลเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุ [25]

โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521 หรือ MPU 6050 แสดงดังรูปที่ 2.18 เป็นโมดูลที่รวมทั้งไจโรสโคปและแอกเซเลอโรมิเตอร์ไว้ในตัวเดียวกัน ช่วยวัดการเคลื่อนไหวและการหมุนในสามแกน (X, Y, Z) โดยแอกเซเลอโรมิเตอร์ใช้วัดการเร่งความเร็วเชิงเส้น ส่วนไจโรสโคปวัดการหมุนในแต่ละแกน มี Digital Motion Processor (DMP) สำหรับประมวลผลข้อมูลการเคลื่อนไหวภายในรองรับการสื่อสารผ่าน I2C ทำให้เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น Arduino, ESP32 สามารถปรับช่วงการวัดได้ตามความต้องการ มีความละเอียดในการวัด 16 บิต และใช้พลังงานต่ำ เหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการประหยัดพลังงานหรืออุปกรณ์พกพา [26]

รูปที่ 2.18 โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY521 [26]

การตรวจจับข้อมูลของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป ทำโดยวัดการหมุนรอบแกนสามแกนหลัก ได้แก่ แกน X, แกน Y และแกน Z ซึ่งการเคลื่อนไหวในแต่ละแกนจะถูกอธิบายโดยค่าทางเชิงมุมสามประเภท คือ Yaw, Pitch และ Roll แสดงดังรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แกนตรวจจับข้อมูลของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป [27]

- แกน Yaw คือการวัดการหมุนรอบแกน Z บอกถึงการหมุนไปทางซ้ายหรือขวา เช่น การหมุนของหัวในแนวนอน หรือการเปลี่ยนทิศทางของยานพาหนะ

- แกน Pitch คือการวัดการหมุนรอบแกน Y บอกถึงการยกหรือกดหัวขึ้นหรือลง เช่น การก้มหน้า หรือการยกปลายด้านหน้าของเครื่องบินขึ้น

- แกน Roll คือการวัดการหมุนรอบแกน X บอกถึงการเอียงข้างของวัตถุ เช่น การเอียงตัวไปทางซ้ายหรือขวา หรือการหมุนของปีกเครื่องบิน [27]

2.7.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521

โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521 มีฟังก์ชันการวัดความเร่งและการหมุนอยู่ในชิปเดียวกัน ซึ่งออกแบบมาเพื่อรองรับการใช้งานในระบบต่าง ๆ เช่น การควบคุมการเคลื่อนไหวและการสั่นสะเทือน โดยข้อมูลเฉพาะทางของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521 แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521 [28]

Parameter	Technical Specifications
Model	GY-521
Chip	MPU-6050
Chip built-in	16bit AD converter, 16bits of data output
Supply Voltage, VDD	3 V to 5 V
VLOGIC Input Voltage Level (MPU-6050)	-0.5 V to VDD + 0.5 V

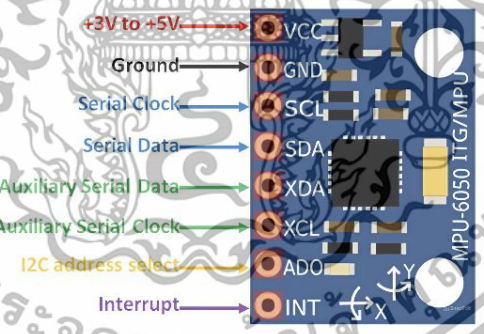
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521 (ต่อ)

Parameter	Technical Specifications
REGOUT	-0.5 V to 2 V
CPOUT (2.5V ≤ VDD ≤ 3.6V)	-0.5 V to 30 V
Input Voltage Level (CLKIN, AUX_DA, AD0, FSYNC, INT, SCL, SDA)	-0.5 V to VDD + 0.5 V
Acceleration (Any Axis, unpowered)	10000 g for 0.2 ms
Operating Temperature Range	-40 °C to +105 °C
Storage Temperature Range	-40 °C to +125 °C
Package size	16×20 mm

2.7.2 การกำหนดขาของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521

พินเอาต์ของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521 แสดงดังรูปที่ 2.20 ที่แสดงรายละเอียดการเชื่อมต่อและการใช้งานของโมดูล โดยพินแต่ละตัวจะมีฟังก์ชันเฉพาะที่ช่วยให้สามารถเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.20 พินเอาต์ของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521 [29]

รายละเอียดพินเอาต์ของโมดูล GY-521 มีดังต่อไปนี้

- พิน VCC: จ่ายไฟให้โมดูลได้ตั้งแต่ +3V ถึง +5V
- พิน GND: เป็นขาต่อสาย Ground
- พิน SCL: ใช้สำหรับให้พัลส์นาฬิกาสำหรับการสื่อสาร I2C
- พิน SDA: ใช้ในการถ่ายโอนข้อมูลผ่านการสื่อสาร I2C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พิน XDA: ใช้เชื่อมต่อโมดูล I2C อื่นๆ กับ MPU6050
- พิน XCL: ใช้เชื่อมต่อโมดูล I2C อื่นๆ กับ MPU6050
- พิน AD0: ใช้เพื่อเปลี่ยนที่อยู่ หากใช้ MPU6050 มากกว่าหนึ่งตัวใน MCU เดียว
- พิน INT: พินขัดจังหวะเพื่อระบุว่ามีข้อมูลให้ MCU อ่าน [29]

2.8 โมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04

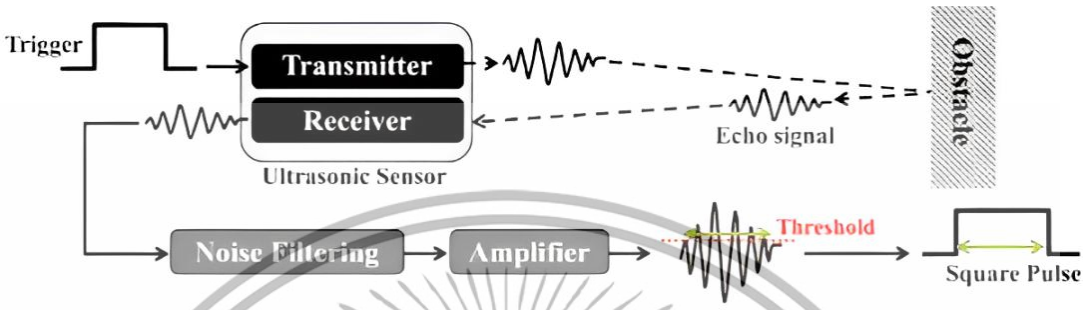
โมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic Sensor Module) HC-SR04 แสดงดังรูปที่ 2.21 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับระยะทางของวัตถุโดยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ซึ่งอยู่ในช่วงที่สูงกว่าที่หูมนุษย์สามารถได้ยิน เซนเซอร์อัลตราโซนิกใช้ในการตรวจวัดระยะทางและตรวจจับวัตถุในงานหลายประเภท เช่น ระบบหุ่นยนต์ ระบบอัตโนมัติ และระบบรักษาความปลอดภัย โดยโมดูลเซนเซอร์ HC-SR04 ประกอบด้วยส่วนหลักสองส่วน ได้แก่ ตัวส่งคลื่นเสียง (Transmitter) และตัวรับคลื่นเสียง (Receiver) ที่ทำงานร่วมกัน โดยอุปกรณ์นี้สามารถวัดระยะทางของวัตถุได้อย่างแม่นยำในระยะตั้งแต่ 2 เซนติเมตรถึง 400 เซนติเมตร มีความละเอียดในการวัดที่สูงและตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้โมดูล HC-SR04 ยังมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และสามารถเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์หรือระบบสมองกลฝังตัวอื่นๆ [30]

รูปที่ 2.21 โมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 [30]

หลักการทำงานของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 คือการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อตรวจวัดระยะห่างระหว่างเซนเซอร์และวัตถุ เมื่อเริ่มวัดตัวส่งคลื่นเสียงของเซนเซอร์จะส่งคลื่นเสียงอัลตราโซนิกออกไปในทิศทางตรงจากตำแหน่งของเซนเซอร์ คลื่นเสียงนี้จะเดินทางไปในอากาศจนกระทบกับวัตถุที่อยู่ในเส้นทาง เมื่อคลื่นเสียงชนกับวัตถุแล้วมันจะสะท้อนกลับมาและเดินทางกลับไปยังตัวรับคลื่นเสียงของเซนเซอร์ จากนั้นตัวรับคลื่นเสียงจะรับสัญญาณคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับมา และเซนเซอร์จะคำนวณระยะเวลาที่คลื่นเสียงใช้ในการเดินทางจากตัวส่งคลื่นเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปยังวัตถุและสะท้อนกลับมาถึงตัวรับคลื่นเสียง โดยระยะเวลานี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณระยะทางระหว่างเซนเซอร์และวัตถุ [31] แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 หลักการทำงานของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก [31]

2.8.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04

โมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อวัดระยะห่างโดยใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก โดยข้อมูลเฉพาะทางของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 แสดงดังตารางที่ 2.8

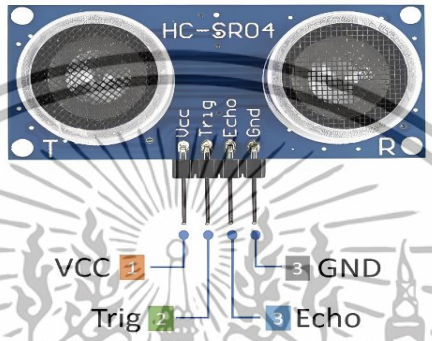
ตารางที่ 2.8 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 [32]

Parameter	Technical Specifications
The operating voltage	5 V
Current	15 mA
Frequency	40 kHz
Maximum distance (Measured)	4 m
Minimum distance (Measured)	0.02 m
Accuracy	±3 mm
Measuring degree	15 degrees
Trigger Input Signal	10 us TTL Pulse

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 การกำหนดขาของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04

พินเอาต์ของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์หรืออุปกรณ์ควบคุมอื่น ๆ โดยประกอบไปด้วยขั้วต่อสัญญาณที่สำคัญที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณเพื่อวัดระยะห่าง โดยรายละเอียดพินเอาต์ของโมดูล HC-SR04 แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 พินเอาต์ของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 [33]

รายละเอียดพินเอาต์ของโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 มีดังต่อไปนี้

- พิน VCC: ทำงานบน +5V DC
- พิน GND: เชื่อมต่อกับกราวด์
- พิน Trig: ทำหน้าที่เป็นพินอินพุต
- พิน Echo: ทำหน้าที่เป็นพินเอาต์พุต

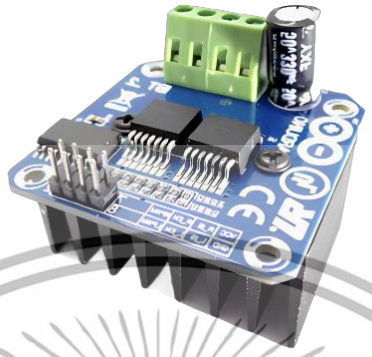
2.9 โมดูลขับมอเตอร์ BTS7960

BTS7960 เป็นโมดูลขับมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.24 ที่ออกแบบมาเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยมีขนาดกระทัดรัดและเหมาะสำหรับการใช้งานในระบบที่ต้องการพลังงานสูง โมดูลนี้รองรับการทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 24V และสามารถขับกระแสได้สูงสุดถึง 43A ซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการควบคุมมอเตอร์ที่ต้องการพลังงานสูง

BTS7960 ใช้ PWM (Pulse Width Modulation) ที่มีความถี่ประมาณ 25 kHz ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ โดยสามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้ตามสัญญาณ PWM ที่ได้รับ โมดูลนี้มีฟังก์ชัน Active Freewheeling ช่วยลดการกระแทกเมื่อมอเตอร์หยุดหรือเปลี่ยนทิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางการหมุน และมีระบบป้องกันต่างๆ เช่น การป้องกันแรงดันเกิน (Over-Voltage) แรงดันต่ำ (Under-Voltage) และอุณหภูมิสูง (Over-Temperature) [34]



รูปที่ 2.24 โมดูลขับมอเตอร์ BTS7960 [34]

2.9.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลขับมอเตอร์ BTS7960

โมดูลขับมอเตอร์ BTS7960 สามารถควบคุมมอเตอร์ที่มีพลังงานสูง รวมทั้งแรงดันไฟฟ้า กระแสสูงสุด ฟังก์ชันการป้องกัน และข้อมูลอื่นๆ ที่จำเป็นสำหรับการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลขับมอเตอร์ BTS7960 แสดงดังตารางที่ 2.9

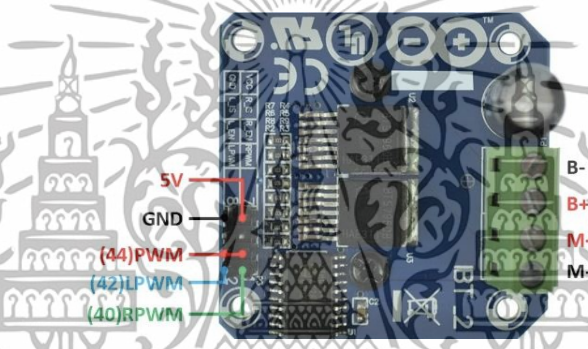
ตารางที่ 2.9 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลขับมอเตอร์ BTS7960 [35]

Parameter	Technical Specifications
Input Voltage	6 – 27 Vdc
Driver	Dual BTS7960 H Bridge
Peak current	43 A
PWM capability	25 kHz
Control Input	3.3 - 5V
Control Mode	PWM or level
Working Duty Cycle	0 - 100%.
Package size	50x50x43 mm
Weight	66 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 การกำหนดขาของโมดูลขับมอเตอร์ BTS7960

โมดูลขับมอเตอร์ BTS7960 ถูกออกแบบมาเพื่อควบคุมมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) โดยสามารถควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) และสัญญาณควบคุมทิศทาง โมดูลนี้มีพินเอาต์ที่สำคัญ เช่น ขั้วต่อสำหรับรับสัญญาณ PWM เพื่อปรับความเร็วของมอเตอร์, ขั้วต่อสำหรับควบคุมทิศทางการหมุน, และขั้วต่อสำหรับจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ ทำให้สามารถใช้งานในการควบคุมมอเตอร์ที่มีความแม่นยำและสามารถปรับเปลี่ยนทิศทางได้ตามต้องการ โดยรายละเอียดพินเอาต์ของโมดูลขับมอเตอร์ BTS7960 แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 พินเอาต์ของโมดูลขับมอเตอร์ BTS7960 [36]

รายละเอียดพินเอาต์ของโมดูลขับมอเตอร์ BTS7960 มีดังต่อไปนี้

- พิน VCC: ทำงานบน +5V DC
- พิน GND: เชื่อมต่อกับกราวด์
- พิน PWM: ทำหน้าที่เป็นโหมดควบคุม
- พิน LPWM: ระดับย้อนกลับหรือสัญญาณ PWM, Active High
- พิน RPWM: ระดับไปข้างหน้าหรือสัญญาณ PWM, Active High
- พิน B-: ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟมอเตอร์เชิงลบ
- พิน B+: ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟมอเตอร์เชิงบวก 6 - 27VDC
- พิน M-: ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์เอาต์พุตลบ
- พิน M+: ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์เอาต์พุตบวก [*36*]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง จากแหล่งจ่ายพลังงานให้กลายเป็นพลังงานกล การทำงานของมอเตอร์ชนิดนี้อาศัยหลักการสร้างสนามแม่เหล็กภายในโครงสร้างที่ประกอบด้วยสองส่วนหลัก ได้แก่ Stator ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่และประกอบด้วยขดลวดสนาม (Field Coil) ที่สร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้อาจถูกสร้างจากแม่เหล็กถาวรหรือขดลวดไฟฟ้า และ Rotor ซึ่งเป็นส่วนที่เคลื่อนที่และประกอบด้วยขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) ที่รับกระแสไฟฟ้าผ่านแปรงถ่าน (Brush) และชุด Commutator เมื่อกระแสไฟฟ้าถูกจ่ายเข้าสู่ขดลวดอาร์เมเจอร์ จะทำให้เกิดแรงดันที่ทำให้ขั้วแม่เหล็กใน Stator และ Rotor ผลักกัน ส่งผลให้เกิดแรงบิด (Torque) ที่ทำให้ Rotor หมุน การหมุนของ Rotor จะมีการเปลี่ยนแปลงขั้วแม่เหล็ก ซึ่งจะต้องมีการควบคุมอย่างเหมาะสมโดยชุด Commutator และแปรงถ่าน เพื่อให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่หยุดชะงัก [37]

2.10.1 มอเตอร์เกียร์หนอน

มอเตอร์เกียร์หนอน (Worm Gear Motor) แสดงดังรูปที่ 2.26 คือมอเตอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ระบบเฟืองตัวหนอนในการถ่ายทอดพลังงานและแปลงพลังงานการหมุน สามารถลดความเร็วการหมุนและเพิ่มแรงบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการทำงานของมอเตอร์เกียร์หนอน คือเมื่อหมุนของเฟืองตัวหนอน ซึ่งหมุนในแนวตั้งฉากกับล้อหนอน เมื่อเฟืองตัวหนอนหมุน ฟันของล้อหนอนที่พอดีกับเกลียวของหนอนจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการหมุน การออกแบบนี้ทำให้การหมุนเปลี่ยนมุมได้ 90 องศา ช่วยลดรอบหมุนและสามารถเพิ่มแรงบิดอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ เฟืองตัวหนอนยังมีคุณสมบัติป้องกันการหมุนย้อนกลับ จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความปลอดภัยและความแม่นยำในการควบคุม [38]

รูปที่ 2.26 มอเตอร์เกียร์หนอน [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของมอเตอร์เกียร์หนอน

มอเตอร์เกียร์หนอน มีลักษณะเฉพาะที่สามารถทำงานต้องการแรงบิดสูงและการควบคุมความเร็วที่แม่นยำ มักถูกนำไปใช้ในระบบที่ต้องการการลดความเร็วของการหมุนและเพิ่มแรงบิด เช่น ในเครื่องจักรอุตสาหกรรม หุ่นยนต์ หรืออุปกรณ์ขนส่ง โดยข้อมูลเฉพาะทางของมอเตอร์เกียร์หนอน แสดงดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของมอเตอร์เกียร์หนอน [39]

Parameter	Technical Specifications
Voltage	DC 12 V
No-load speed	80 RPM
No-load current	0.35 A
Rated speed	60 RPM
Rated current	1.6 A
Rate torque	20 kg.cm
Stall torque	50 kg.cm
Stall current	6.5 A
Weight	355 g

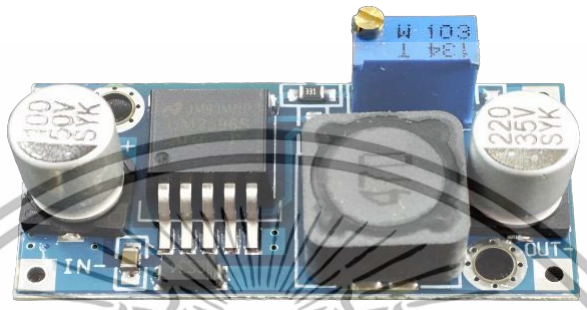
2.11 โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596

โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596 คือวงจรแปลงไฟแบบ DC-DC ที่ใช้ในการลดแรงดันไฟฟ้าจากค่าที่สูงลงมาเป็นค่าที่ต่ำกว่า โดยมีการใช้ชิป LM2596 เป็นตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า วงจรนี้ถูกออกแบบให้ทำงานในลักษณะของ Switching Regulator ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าวงจรแปลงไฟแบบ Linear Regulator เพราะสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อยลง

โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596 แสดงดังรูปที่ 2.27 สามารถปรับค่าแรงดันขาออกได้ โดยทั่วไปมักจะมีตัวต้านทานปรับค่าได้ สำหรับปรับค่าแรงดันที่ต้องการ และสามารถรองรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่มีค่าอยู่ในช่วงกว้าง เหมาะสำหรับการใช้งานในวงจรที่ต้องการแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าให้เข้ากับความต้องการของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น การจ่ายไฟให้กับโมดูลอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ที่ต้องใช้แรงดันต่ำกว่าแรงดันต้นกำเนิด วงจรนี้ยังมาพร้อมกับฟังก์ชันป้องกันการลัดวงจรและการเกิดความร้อนสูงช่วยให้การทำงานมีความปลอดภัยมากขึ้น [40]



รูปที่ 2.27 โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596 [40]

2.11.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596

โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596 มีความสามารถในการลดแรงดันไฟฟ้าจากขาเข้าให้เป็นแรงดันที่ต่ำกว่า โดยถูกออกแบบให้สามารถใช้งานในระบบไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ต้องการการปรับแรงดันอย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังตารางที่ 2.11

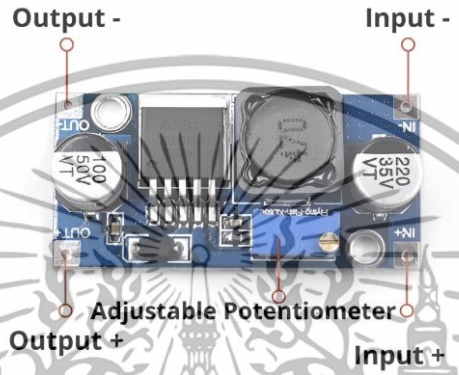
ตารางที่ 2.11 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596 [41]

Parameter	Technical Specifications
Input voltage	4-35 V
Output Voltage	1.5 – 35 V (adjustable)
Output current	Rated current 2 A, Maximum 3 A
Output ripple	<30 mV
Operating temperature	-40 °C to +85 °C
Switching frequency	150 kHz
Conversion efficiency	92% (highest)
Package size	43x21x14 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2 การกำหนดขาของโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596

พินเอาต์ของโมดูล LM2596 ประกอบด้วยขั้วต่อสำหรับการรับและจ่ายแรงดันไฟฟ้า รวมถึงตัวต้านทานปรับค่าได้ สำหรับปรับค่าแรงดันเอาต์พุต เพื่อให้สามารถปรับค่าตามความต้องการได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว รายละเอียดพินเอาต์และส่วนประกอบต่างๆ ของโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596 แสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 พินเอาต์ของโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596 [42]

รายละเอียดพินเอาต์ของโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596 มีดังต่อไปนี้

- พิน Input + เป็นพินสำหรับต่อไฟบวก (แรงดันไฟฟ้าขาเข้า)
- พิน Input - เป็นพินสำหรับต่อไฟลบ (กราวด์ของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า)
- พิน Output + เป็นพินสำหรับต่อไฟบวก (แรงดันไฟฟ้าขาออก)
- พิน Output - เป็นพินสำหรับต่อไฟลบ (กราวด์ของแรงดันไฟฟ้าขาออก)
- Adjustable Potentiometer เป็นตัวปรับค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก [42]

2.12 โมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226

โมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226 แสดงดังรูปที่ 2.29 เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าต่าง ๆ โดยสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้า (Power Monitoring) ได้ในตัว ซึ่งทำให้เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในระบบที่ต้องการตรวจสอบและควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ เช่น ระบบจัดการพลังงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ระบบควบคุมแบตเตอรี่ หรือในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และ IoT ที่ต้องการข้อมูลพลังงานอย่างแม่นยำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและลดการสูญเสียพลังงาน [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.29 โมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226 [43]

2.12.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226

โมดูลเซนเซอร์ INA226 มีคุณสมบัติในการวัดแรงดันไฟฟ้าผ่านขั้วต่อ VIN+ และ VIN- พร้อมกับการวัดกระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานชันต์ (Shunt Resistor) ทำให้สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าโดยตรงจากแรงดันและกระแสที่วัดได้ ด้วยความละเอียดในการวัดระดับ 16 บิต รองรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดถึง 36 โวลต์ และวัดกระแสไฟฟ้าได้ในช่วงที่กว้างขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของตัวต้านทานชันต์ นอกจากนี้มีการเชื่อมต่อแบบ I2C รวมถึงรองรับการปรับเปลี่ยน Address I2C ได้สูงสุด 16 ค่า เพื่อให้สามารถใช้งานโมดูลเซนเซอร์ INA226 หลายตัวในระบบเดียวกันได้โดยไม่มีปัญหาการชนกันของ Address [44] โดยข้อมูลเฉพาะทางเทคนิค แสดงดังตารางที่ 2.12

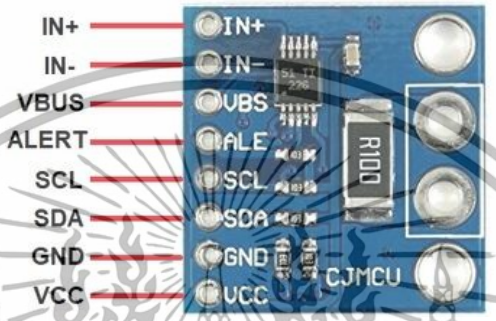
ตารางที่ 2.12 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของโมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226 [44]

Parameter	Technical Specifications
Supply Voltage	6 V
Analog Inputs (VIN+, VIN–)	–40 to +40 V
SDA	GND – 0.3 to +6 V
SCL	GND – 0.3 to VS + 0.3 V
Input Current Into Any Pin	5 mA
Open-Drain Digital Output Current	10 mA
Storage Temperature	–65 to +150 °C
Bus voltage input range	0 - 36 V
Shunt voltage input range	81.9175 - 81.92 mV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.2 การกำหนดขาของโมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226

พินเอาต์ของโมดูลเซนเซอร์ INA226 ใช้ในการเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์หรืออุปกรณ์ควบคุมอื่น ๆ โดยประกอบไปด้วยขั้วต่อสัญญาณที่สำคัญสำหรับการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ารวมถึงการสื่อสารผ่านโปรโตคอล I2C เพื่อส่งข้อมูลการวัดไปยังอุปกรณ์ควบคุม โดยรายละเอียดพินเอาต์ของโมดูลเซนเซอร์ INA226 แสดงดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 พินเอาต์ของโมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226 [45]

รายละเอียดพินเอาต์ของโมดูลเซนเซอร์ INA226 มีดังต่อไปนี้

- พิน VCC: แรงดันไฟฟ้าขาเข้าตั้งแต่ 2.7V ถึง 5.5V
- พิน GND: ขากราวด์ เชื่อมต่อกับกราวด์ของแหล่งจ่ายไฟ
- พิน SDA: สายข้อมูลแบบอนุกรมสำหรับอินเทอร์เฟซ I2C
- พิน SCL: สายสัญญาณนาฬิกาแบบอนุกรมสำหรับอินเทอร์เฟซ I2C
- พิน ALE: พิน Alert เป็นเอาต์พุตแบบโอเพนเดรน
- พิน VBUS: ใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย
- พิน IN-: ใช้เชื่อมต่อกับโหลด เพื่อตรวจจับกระแสไฟฟ้า
- พิน IN+: ใช้สำหรับการกำหนดที่อยู่ I2C [45]

2.13 จอแสดงผล LCD (Liquid Crystal Display)

เทคโนโลยีมอนิเตอร์ LCD (Liquid Crystal Display) เป็นจอแสดงผลที่ใช้คุณสมบัติของผลึกคริสตอลเหลวในการควบคุมแสงและแสดงข้อมูล โดยหลักการทำงานคือมีแหล่งกำเนิดแสงด้านหลัง หรือที่เรียกว่า Backlight ทำหน้าที่เป็นแสงพื้นหลัง เมื่อมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้นผลึกคริสตอล ผลึกจะเปลี่ยนสภาพให้เป็นโปร่งแสงหรือทึบแสงขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่าน ส่งผลให้แสงจาก Backlight สามารถผ่านหรือถูกบังในตำแหน่งต่างๆ บนจอภาพ

จอแสดงผล Character LCD ใช้ในการแสดงข้อมูลพื้นฐานที่เป็นข้อความหรือตัวเลข ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีความละเอียดสูงหรือกราฟิกที่ซับซ้อน เหมาะสำหรับการใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์และระบบฝังตัว ที่ต้องการแสดงผลข้อมูลที่เข้าใจง่าย เช่น ค่าสถานะต่างๆ ของระบบ ข้อความแจ้งเตือน หรือตัวเลขจากเซนเซอร์ เช่น จอ LCD ขนาด 20x4 หมายถึงใน 1 แถว มีตัวอักษรใส่ได้ 20 ตัว และมีทั้งหมด 4 บรรทัด แสดงดังรูปที่ 2.31 โดยการควบคุมจอ Character LCD ใช้คอนโทรลเลอร์ที่รองรับการเชื่อมต่อผ่านพอร์ตแบบขนานหรืออนุกรม ทำให้สามารถสั่งงานให้แสดงผลได้ [46]

รูปที่ 2.31 จอแสดงผล LCD [46]

การเชื่อมต่อกับจอ Character LCD แบ่งเป็น 2 แบบ ดังนี้

1) การเชื่อมต่อแบบขนาน เป็นการเชื่อมต่อจอ LCD เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรง ซึ่งจะแบ่งเป็นการเชื่อมต่อแบบ 4 บิต และการเชื่อมต่อแบบ 8 บิต

2) การเชื่อมต่อแบบอนุกรม เป็นการเชื่อมต่อกับจอ LCD ผ่านโมดูลแปลงรูปแบบการเชื่อมต่อกับจอ LCD จากแบบขนาน มาเป็นการเชื่อมต่อแบบอื่นที่ใช้สายน้อยกว่า เช่น การใช้โมดูล I2C Serial Interface จะเป็นการนำโมดูลเชื่อมเข้ากับตัวจอ LCD แล้วใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อกับบอร์ดโมดูลผ่านโปรโตคอล I2C ทำให้ใช้สายเพียง 4 เส้น ก็ทำให้หน้าจอแสดงผลข้อความต่าง ๆ ออกมาได้ [46]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของจอแสดงผล LCD

จอแสดงผล LCD ขนาด 20x4 ที่ใช้การเชื่อมต่อผ่าน I2C ถูกออกแบบมาให้สามารถแสดงตัวอักษรและข้อมูลในรูปแบบที่อ่านง่ายบนหน้าจอขนาด 20x4 ตัวอักษร ซึ่งการเชื่อมต่อผ่าน I2C ช่วยให้การเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์สะดวกและมีประสิทธิภาพสูง โดยข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของจอแสดงผล LCD แสดงดังตารางที่ 2.13 [47]

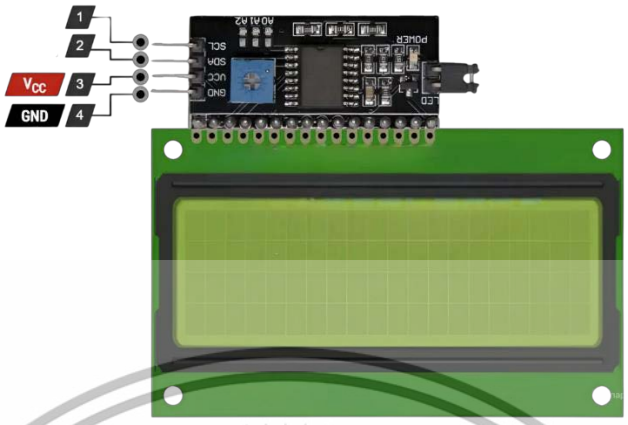
ตารางที่ 2.13 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของจอแสดงผล LCD [47]

Parameter	Technical Specifications
Display Type	LCD (Liquid Crystal Display)
Display Size	20x4 characters
Interface	I2C (Inter-Integrated Circuit)
Operating Voltage	5V (Typical) / 3.3V (Optional)
Operating Current	20-40 mA (depending on brightness)
Backlight	LED backlight (Adjustable brightness)
Operating Temperature	-20°C to +70°C
Dimensions	116 x 58 x 18 mm
Contrast Control	Potentiometer (V0 pin)

2.13.2 การกำหนดขาของจอแสดงผล LCD ที่ใช้การเชื่อมต่อผ่าน I2C

พินเอาต์ของจอแสดงผล LCD ขนาด 20x4 ที่ใช้การเชื่อมต่อผ่าน I2C ประกอบไปด้วยขั้วต่อที่สำคัญสำหรับการจ่ายไฟและการสื่อสารข้อมูลระหว่างจอแสดงผลและไมโครคอนโทรลเลอร์หรืออุปกรณ์ควบคุมอื่น ๆ โดยใช้โปรโตคอล I2C เพื่อส่งข้อมูลและคำสั่งการแสดงผลไปยังจอแสดงผลได้อย่างรวดเร็วและสะดวก ขั้วเหล่านี้ช่วยลดจำนวนขาที่ต้องใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างจอ LCD และไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้การติดตั้งและการใช้งานง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมความคมชัดของจอแสดงผลผ่านขา V0 เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแสงในแต่ละสถานที่ได้อีกด้วย โดยที่ไม่ต้องใช้ขาต่อมากมายเหมือนในแบบขาแบบขนาน. แสดงรายละเอียดพินเอาต์ของจอ LCD ขนาด 20x4 แสดงดังรูปที่ 2.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 พินเอาต์ของจอแสดงผล LCD ขนาด 20x4 ที่ใช้การเชื่อมต่อผ่าน I2C [48]

รายละเอียดพินเอาต์ของจอแสดงผล LCD ที่ใช้การเชื่อมต่อผ่าน I2C มีดังต่อไปนี้

- พิน VCC: ขาจ่ายไฟบวก (ทั่วไป 5V หรือ 3.3V ขึ้นอยู่กับประเภทของ LCD)
- พิน GND: ขากราวด์
- พิน SDA: ขาสำหรับส่งข้อมูล ระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และจอแสดงผล
- พิน SCL: ขาสำหรับส่งสัญญาณนาฬิกา เพื่อประสานการส่งข้อมูล [48]

2.14 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (Lead-Acid Battery) คือแบตเตอรี่ที่ภายในประกอบไปด้วยแผ่นขั้วบวกขั้วลบที่ทำจากตะกั่ว และอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นกรดซัลฟิวริก หากแบตเตอรี่ถูกชาร์จอิเล็กโทรไลต์จะแตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบ ซึ่งไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก ส่วนไอออนลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบ ทำให้เกิดการสะสมของประจุไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสอง และเมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้งาน กระแสไฟฟ้าจะถูกปล่อยออกมาจากตัวแบตเตอรี่ เพื่อเป็นพลังงานให้แก่ระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด สามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ในปริมาณสูงและมีต้นทุนต่ำ แต่มีน้ำหนักมากและต้องการการบำรุงรักษาอยู่เสมอ [49]

แบตเตอรี่ 6FM-8 (12V8Ah/20Hr) เป็นแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบปิดผนึก (Sealed Lead-Acid Battery หรือ SLA) แสดงดังรูปที่ 2.33 โดยแบตเตอรี่ประเภทนี้ไม่ต้องการการบำรุงรักษาในเรื่องการเติมน้ำกลั่น เนื่องจากระบบถูกปิดผนึกเพื่อป้องกันการรั่วไหลของอิเล็กโทรไลต์และการระเหยของน้ำในเซลล์ แบตเตอรี่ประเภทนี้นิยมใช้งานในอุปกรณ์สำรองไฟ (UPS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ และรถยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก เนื่องจากมีความปลอดภัยสูงและง่ายต่อการใช้งาน [50]

รูปที่ 2.33 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด 12V 8Ah [50]

2.14.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดขนาด 12V 8Ah ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในระบบสำรองไฟฟ้า (UPS), อุปกรณ์สื่อสาร, ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ และยานพาหนะไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยสามารถจ่ายพลังงานต่อเนื่องได้นานถึง 20 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งานและอัตราการดึงกระแสไฟ โดยสามารถชาร์จไฟใหม่ได้ง่ายและทนทานต่อการใช้งานที่ต่อเนื่อง แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความทนทานสูงและเหมาะสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ทั้งในอุณหภูมิที่เย็นและร้อน ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานทั้งภายในอาคารและภายนอกอาคาร จึงเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการใช้งานในหลาย ๆ ระบบที่ต้องการแหล่งพลังงานสำรองที่มีความน่าเชื่อถือ แสดงดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด 12V 8Ah [50]

Parameter	Technical Specifications
Charging voltage	13.5 - 13.8 V
Charging current (Max)	1.2 - 2.40 A
Continuous current use	20 hours
Package size	6.5x15x9 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.2 สูตรในการคำนวณระยะเวลาใช้งานของแบตเตอรี่

การคำนวณระยะเวลาใช้งานของแบตเตอรี่เป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบและใช้งานอุปกรณ์ รวมถึงระบบพลังงานสำรองที่ต้องการความเสถียรและความต่อเนื่องของกระแสไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือแม้แต่ยานพาหนะไฟฟ้า การทราบระยะเวลาที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานได้ช่วยให้สามารถวางแผนการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดความเสี่ยงจากการขาดพลังงานขณะใช้งาน

หลักการพื้นฐานของการคำนวณระยะเวลาใช้งานของแบตเตอรี่มาจากแนวคิดเกี่ยวกับปริมาณประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในแบตเตอรี่ ซึ่งมักแสดงในหน่วยแอมป์ชั่วโมง (Ah) หรือมิลลิแอมป์ชั่วโมง (mAh) โดยค่าดังกล่าวหมายถึงปริมาณกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ภายในระยะเวลาหนึ่ง เมื่ออุปกรณ์หรือโหลดใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าจะถูกดึงออกมาตามอัตราที่โหลดต้องการ ซึ่งทำให้ระดับพลังงานของแบตเตอรี่ลดลงเรื่อย ๆ จนถึงระดับที่ไม่สามารถจ่ายพลังงานต่อไปได้ ระยะเวลาที่แบตเตอรี่สามารถทำงานได้ขึ้นอยู่กับอัตราการใช้พลังงานของโหลดโดยตรง หากโหลดใช้พลังงานมากขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ถูกดึงออกจากแบตเตอรี่ก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แบตเตอรี่หมดเร็วขึ้น ในทางกลับกัน หากโหลดใช้พลังงานต่ำลง กระแสที่ถูกดึงออกมาจะลดลง ทำให้ระยะเวลาใช้งานของแบตเตอรี่นานขึ้น โดยสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณระยะเวลาใช้งานของแบตเตอรี่สามารถแสดงได้ดังนี้ [51]

$$T = \frac{i_{Ah}}{i_{Aps}} \quad (Hours) \qquad (1)$$

โดยที่ T คือ ระยะเวลาใช้งานของแบตเตอรี่ (ชั่วโมง)

i_Ah คือ ความจุของแบตเตอรี่ (แอมป์ชั่วโมง, Ah)

i_Aps คือ กระแสที่โหลดใช้งาน (แอมป์, A)

2.15 โปรแกรม Arduino IDE

Arduino IDE (Integrated Development Environment) แสดงดังรูปที่ 2.34 เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการเขียน แก้ไข คอมไพล์ และอัปโหลดโค้ดไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ผ่านแอปพลิเคชัน IDE เหมาะสำหรับระบบปฏิบัติการที่แตกต่างกัน เช่น Windows, Mac OS X และ Linux รองรับภาษาการเขียนโปรแกรม C และ C++ [52]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.34 สัญลักษณ์ของโปรแกรม Arduino IDE [53]

โครงสร้างพื้นฐานของภาษาซีที่ใช้กับ Arduino ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

1) Header จะมีหรือไม่มีก็ได้ ถ้ามีต้องกำหนดไว้ในส่วนเริ่มต้นของโปรแกรม ได้แก่ ส่วนที่เป็น Compiler Directive ต่างๆ รวมไปถึงส่วนของการประกาศตัวแปร และค่าคงที่ต่าง ๆ

2) setup() เป็นฟังก์ชันบังคับที่ต้องกำหนดให้มีในทุกๆโปรแกรมใช้เป็นตัวกำหนดของเขตของฟังก์ชัน ได้แก่คำสั่งเกี่ยวกับการ Setup ค่าการทำงานต่างๆ เช่น การกำหนดหน้าที่การใช้งานของ pinMode และการกำหนดค่าสำหรับใช้งานพอร์ตสื่อสารอนุกรม

3) loop() เป็นฟังก์ชันบังคับที่ต้องกำหนดให้มีในทุกๆ โปรแกรม ใช้บรรจุคำสั่งที่ต้องการให้โปรแกรมทำงานซ้ำๆกัน [53]

2.16 โปรแกรม Proteus

Proteus เป็นซอฟต์แวร์ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แสดงดังรูปที่ 2.35 ที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัท Labcenter Electronics มุ่งเน้นไปที่การจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์และการสร้างแบบจำลองโปรแกรมที่ใช้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น Arduino, PIC และ AVR โดยซอฟต์แวร์ Proteus มีคุณสมบัติหลักหลายประการที่ทำให้มันเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับนักออกแบบวงจรและวิศวกร สามารถจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ช่วยให้ผู้ใช้สามารถทดสอบและตรวจสอบการทำงานของวงจรก่อนที่จะทำการสร้างจริงได้ และมีการสนับสนุนส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ที่หลากหลาย รวมถึงเซนเซอร์และชิ้นส่วนมาตรฐานต่าง ๆ นอกจากนี้ผู้ใช้ยังสามารถเขียนโปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรงในโปรแกรม และทดสอบการทำงานร่วมกับวงจรในสภาพแวดล้อมที่เสมือนจริง [54]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.35 สัญลักษณ์ของโปรแกรม Proteus [54]

คุณสมบัติที่สำคัญของโปรแกรม Proteus ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

1) การจับภาพแผนผัง (Schematic Capture) เป็นเครื่องมือออกแบบที่รองรับการนำการออกแบบกลับมาใช้ใหม่ การจัดการตัวแปรการประกอบ และระบบย่อยการรายงาน BOM ที่ครบถ้วน

2) การออกแบบ PCB เป็นการผสมผสานโมดูล Schematic Capture และ PCB Layout เพื่อให้ผู้ใช้ได้รับชุดเครื่องมือที่ใช้งานง่ายและมีประสิทธิภาพสำหรับการออกแบบ PCB

3) การสร้างแบบจำลองระบบเสมือน (VSM) เป็นการรวมการจำลอง SPICE เข้ากับการจำลองไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถสร้างต้นแบบของการออกแบบฮาร์ดแวร์และเฟิร์มแวร์ได้ในซอฟต์แวร์ โดยสามารถออกแบบ ทดสอบ และดีบักโครงการฝังตัวในเครื่องจำลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ Proteus [55]

2.17 โปรแกรม Tinkercad

Tinkercad เป็นโปรแกรมออนไลน์ที่พัฒนาโดย Autodesk แสดงดังรูปที่ 2.36 ซึ่งออกแบบมาเพื่อการสร้างโมเดล 3 มิติ ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และการเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างง่าย โปรแกรมนี้ใช้งานฟรีและได้รับความนิยมในหมู่ผู้เริ่มต้น นักเรียน ครู และผู้ที่สนใจในการออกแบบและพัฒนาโปรเจคด้านอิเล็กทรอนิกส์และการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยอินเตอร์เฟซที่ใช้งานง่ายและเครื่องมือที่หลากหลาย และเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้เบราว์เซอร์ จึงสามารถเข้าถึงได้จากอุปกรณ์ใดก็ได้ที่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต ทำให้ผู้ใช้สามารถทำงานออกแบบได้อย่างง่าย [56]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.36 สัญลักษณ์ของโปรแกรม Tinkercad [56]

คุณสมบัติที่สำคัญของโปรแกรม Tinkercad ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

1) การออกแบบโมเดล 3 มิติ สามารถสร้างและปรับแต่งโมเดล 3 มิติผ่านการลากและวางรูปทรงต่าง ๆ มาประกอบกัน เหมาะสำหรับผู้ที่สนใจในการออกแบบโมเดลเพื่อการพิมพ์ 3 มิติ หรือการสร้างชิ้นงานต้นแบบ

2) การจำลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รองรับการออกแบบและจำลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งรวมถึงการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ตัวต้านทาน ไดโอด ทรานซิสเตอร์ สามารถทดลองต่อวงจรและดูผลลัพธ์ของวงจรได้แบบเรียลไทม์

3) การเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ รองรับการเขียนโค้ดสำหรับ Arduino โดยใช้ทั้งภาษา C/C++ และการเขียนโปรแกรมแบบบล็อก (Block Programming) [57]

2.18 โปรแกรม Android Studio

Android Studio เป็นสภาพแวดล้อมการพัฒนาแบบบูรณาการ (IDE) ที่พัฒนาโดย Google สำหรับการสร้างแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการ Android แสดงดังรูปที่ 2.37 โปรแกรมนี้มีฟีเจอร์หลากหลายที่ช่วยให้นักพัฒนาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การออกแบบ UI แบบลากแล้ววาง (Drag-and-Drop UI Designer) ที่ช่วยให้ออกแบบหน้าจอแอปได้ง่ายและสะดวก นอกจากนี้ยังมี Android Emulator ซึ่งเป็นเครื่องมือจำลองอุปกรณ์ Android หลากหลายรุ่น ช่วยให้นักพัฒนาสามารถทดสอบแอปในอุปกรณ์จำลองโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์จริง Android Studio รองรับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Java, Kotlin และ C++ และมีระบบจัดการโปรเจค Gradle ที่ช่วยจัดการเวอร์ชันของไลบรารีและการสร้างไฟล์ APK หรือ App Bundle [58]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.37 สัญลักษณ์ของโปรแกรม Android Studio [59]

คุณสมบัติที่สำคัญของโปรแกรม Android Studio ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

1) เครื่องมือพัฒนาแอปพลิเคชัน เป็น Integrated Development Environment (IDE) ที่มีฟีเจอร์ต่าง ๆ สำหรับการเขียนโค้ด, การออกแบบอินเทอร์เฟซผู้ใช้ (UI) และการจัดการโปรเจค แอปพลิเคชันที่พัฒนาภายในโปรแกรมนี้สามารถใช้งานได้ทั้งในแอปพลิเคชัน Android Studio บนเครื่องคอมพิวเตอร์และระบบคลาวด์

2) การจำลองอุปกรณ์ (Emulator) โปรแกรมมีการสนับสนุนการจำลองการทำงานของแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยไม่ต้องใช้โทรศัพท์จริง ทำให้ผู้พัฒนาสามารถทดสอบแอปพลิเคชันได้ในหลายรุ่นของอุปกรณ์ Android โดยไม่มีข้อจำกัด

3) การดีบักและโปรไฟล์ (Debugging and Profiling) มีเครื่องมือในการตรวจสอบข้อผิดพลาดและปรับปรุงประสิทธิภาพแอปพลิเคชัน โดยสามารถดูการทำงานของแอปพลิเคชันในระหว่างการทดสอบแบบเรียลไทม์ พร้อมกับเครื่องมือในการตรวจสอบการใช้ทรัพยากรระบบต่าง ๆ เช่น หน่วยความจำ, CPU และแบตเตอรี่ [59]

2.19 โปรแกรม Wireshark

Wireshark เป็นโปรแกรมวิเคราะห์และดักจับข้อมูลในเครือข่าย (Network Packet Analyzer) แสดงดังรูปที่ 2.38 ซึ่งพัฒนาโดย Gerald Combs โดยเป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สที่ใช้งานได้ฟรีและได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในหมู่นักวิเคราะห์เครือข่าย ผู้ดูแลระบบ นักพัฒนา และผู้ที่สนใจด้านความปลอดภัยของระบบเครือข่าย โปรแกรมนี้สามารถดักจับข้อมูลแพ็กเกจที่วิ่งผ่านเครือข่ายและแสดงผลในรูปแบบที่อ่านและวิเคราะห์ได้ง่าย โดยสามารถทำงานได้บนหลายระบบปฏิบัติการ เช่น Windows, macOS และ Linux ด้วยคุณสมบัติที่หลากหลายและอินเตอร์เฟซที่ใช้งานง่าย ทำให้ Wireshark เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาเครือข่าย [60]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.38 สัญลักษณ์ของโปรแกรม Wireshark [60]

คุณสมบัติที่สำคัญของโปรแกรม Wireshark ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

1) การดักจับและวิเคราะห์แพ็กเกจข้อมูล สามารถดักจับและวิเคราะห์แพ็กเกจข้อมูลที่วิ่งผ่านเครือข่ายได้แบบเรียลไทม์ โดยสามารถดูรายละเอียดของแพ็กเกจแต่ละประเภท เช่น TCP, UDP, ICMP, HTTP, DNS และโปรโตคอลอื่น ๆ อีกมากมาย ทำให้สามารถติดตามการรับ-ส่งข้อมูลและวิเคราะห์ปัญหาเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2) การกรองและค้นหาข้อมูล มีการรองรับการกรองและค้นหาข้อมูลแพ็กเกจตามเงื่อนไขที่กำหนด เช่น ที่อยู่ IP, พอร์ต, โปรโตคอล หรือเนื้อหาของแพ็กเกจ ทำให้ผู้ใช้สามารถเจาะจงและวิเคราะห์ข้อมูลที่สนใจได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

3) การวิเคราะห์และสร้างรายงาน สามารถวิเคราะห์สถิติของเครือข่าย เช่น จำนวนแพ็กเกจ ความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูล และการแจกแจงโปรโตคอลที่ใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถสร้างรายงานสรุปผลการวิเคราะห์ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อใช้ในการตรวจสอบและแก้ไขปัญหาเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ [61]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์

3.1 การออกแบบ

3.1.1 การออกแบบระบบการทำงาน

การออกแบบระบบการทำงานของรถเข็นสินค้าติดตามผู้ใช้งานอัตโนมัติโดยใช้สัญญาณบลูทูธ เป็นการใช้เทคโนโลยีบลูทูธและไมโครคอนโทรลเลอร์ในการตรวจจับและติดตามตำแหน่งของผู้ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 3.1

เริ่มต้นจากฝั่งแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งาน ซึ่งผู้ใช้งานต้องเปิดบลูทูธและเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้าผ่านแอปพลิเคชัน เมื่อการเชื่อมต่อสำเร็จ แอปพลิเคชันจะแสดงสถานะการเชื่อมต่อเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถมั่นใจได้ว่าเชื่อมต่อสำเร็จและระบบพร้อมใช้งาน จากนั้นผู้ใช้งานสามารถเริ่มการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าได้โดยการกดปุ่ม "เริ่มการเคลื่อนที่" ผ่านแอปพลิเคชัน ซึ่งจะทำให้ระบบเริ่มต้นการตรวจจับสัญญาณบลูทูธจากโทรศัพท์มือถือและหาทิศทางการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า

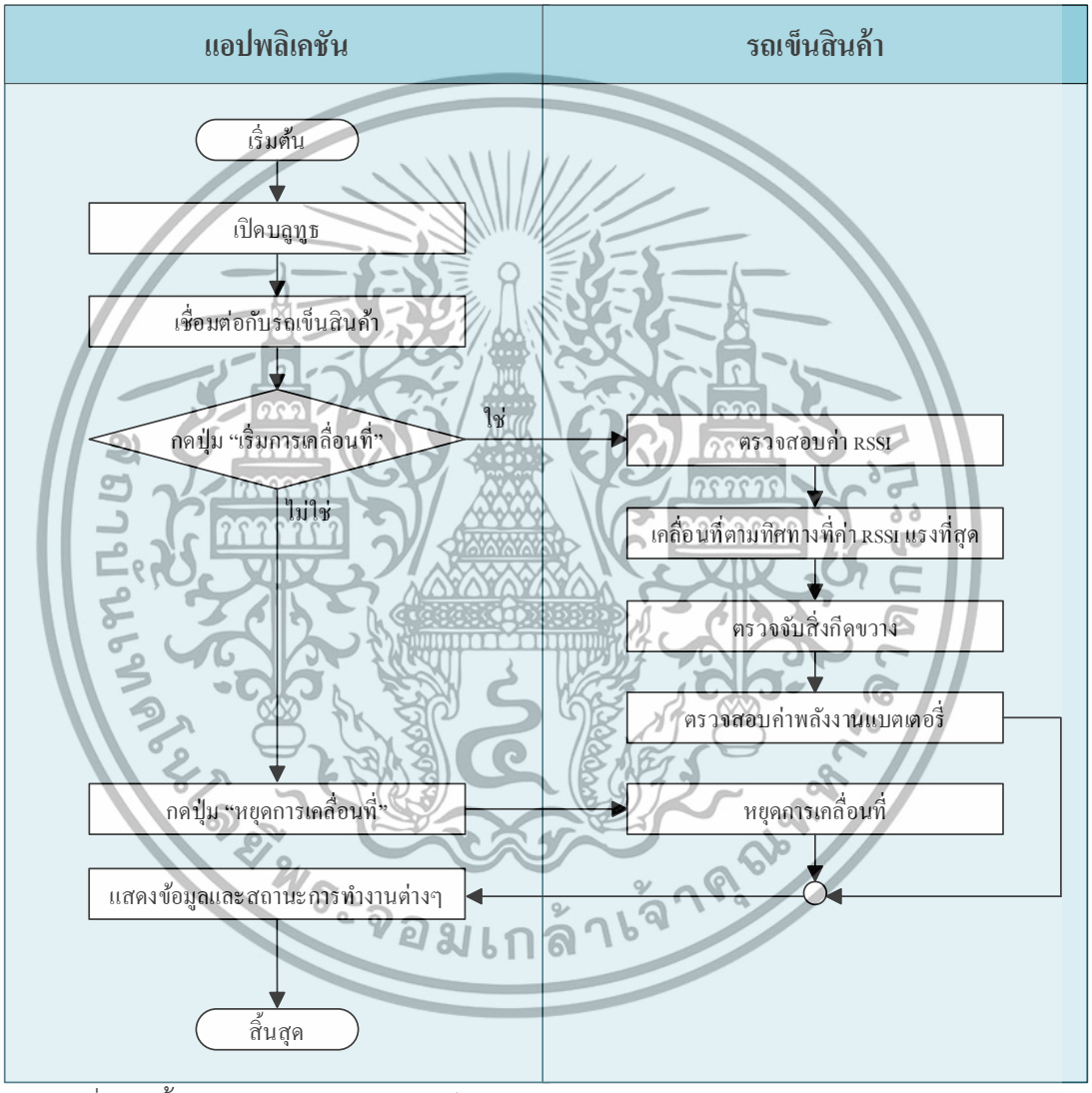
การตรวจจับเริ่มต้นโดยการวัดค่า RSSI จากโทรศัพท์มือถือ โดยใช้สายอากาศแบบยากิ-อูดะที่ติดตั้งบนตัวรถเข็นสินค้า ซึ่งสามารถวัดสัญญาณในสามทิศทาง ได้แก่ ทิศทางด้านซ้าย ตรงกลางและด้านขวา เมื่อรถเข็นสินค้าได้ค่า RSSI ในแต่ละทิศทาง ระบบจะทำการคำนวณหาทิศทางที่มีสัญญาณแรงที่สุด ซึ่งเป็นทิศทางที่เหมาะสมที่สุดในการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของผู้ใช้งาน

เมื่อระบบได้ทิศทางที่เหมาะสมแล้ว รถเข็นสินค้าจะเริ่มเคลื่อนที่ไปในทิศทางนั้น พร้อมกับการตรวจสอบสิ่งกีดขวางที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่างทาง หากพบสิ่งกีดขวาง ระบบจะประเมินว่ามีวิธีการหลบหลีกได้หรือไม่ หากสามารถหลบหลีกได้ รถเข็นสินค้าจะปรับเส้นทางโดยอัตโนมัติแล้วกลับเข้าสู่เส้นทางเดิมเมื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางสำเร็จ แต่หากไม่สามารถหลบหลีกได้ ระบบจะสั่งให้หยุดเคลื่อนที่ทันทีเพื่อความปลอดภัย

ระบบยังมีการตรวจสอบค่า RSSI อย่างต่อเนื่องเพื่อให้แน่ใจว่าค่า RSSI ยังคงอยู่ในระยะที่เหมาะสม หากค่าความแรงของสัญญาณลดลงจนเกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ระบบจะสั่งให้รถเข็นสินค้าหยุดเคลื่อนที่ทันที เพื่อป้องกันไม่ให้รถเข็นสินค้าเข้าใกล้ผู้ใช้งานเกินไป เมื่อค่า RSSI กลับมาอยู่ในระยะที่เหมาะสมแล้ว รถเข็นสินค้าจะเริ่มเคลื่อนที่ต่อไป นอกจากนี้ ผู้ใช้งานสามารถกดปุ่ม "หยุดการเคลื่อนที่" บนแอปพลิเคชันเพื่อสั่งให้รถเข็นสินค้าหยุดการเคลื่อนที่ในทันที ซึ่งช่วยให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ใช้งานสามารถควบคุมระบบได้อย่างสะดวก ในส่วนของแอปพลิเคชันจะมีการแสดงสถานะต่าง ๆ ของระบบอย่างครบถ้วน เช่น สถานะการเชื่อมต่อ ระดับพลังงานแบตเตอรี่ของทั้งโทรศัพท์มือถือและรถเข็น รวมถึงสถานะการเคลื่อนที่ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามการทำงานของระบบได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ

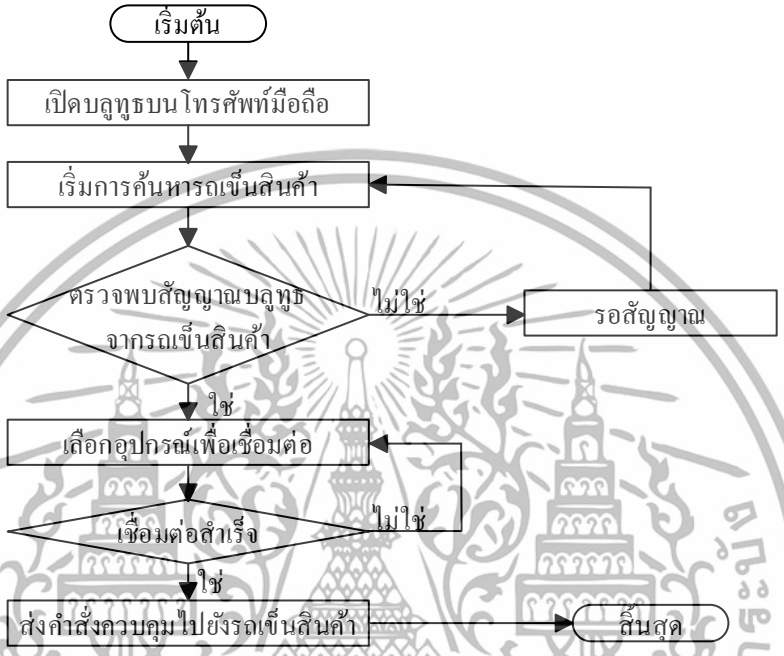


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของรถเข็นสินค้าติดตามผู้ใช้งานอัตโนมัติโดยใช้สัญญาณบลูทูธ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การออกแบบการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า

3.1.2.1 ขั้นตอนการทำงานของการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานของการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า

จากรูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการทำงานของการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) เปิดบลูทูธบนโทรศัพท์มือถือ

โทรศัพท์มือถือจะต้องเปิดใช้งานบลูทูธเพื่อให้สามารถค้นหาและเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้าได้ นอกจากนี้ยังต้องเปิดโหมด Discoverable หรือโหมดที่ให้โทรศัพท์สามารถถูกค้นหาได้ในช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อให้รถเข็นสินค้าสามารถตรวจพบและร้องขอการเชื่อมต่อได้ หากไม่เปิดโหมดนี้ รถเข็นสินค้าจะไม่สามารถมองเห็นโทรศัพท์มือถือและเริ่มต้นการเชื่อมต่อได้

2) เริ่มการค้นหารถเข็นสินค้า

เมื่อบลูทูธเปิดใช้งาน โทรศัพท์มือถือจะต้องเริ่มต้นกระบวนการค้าหาอุปกรณ์ที่อยู่ภายในระยะสัญญาณ ซึ่งเป็นกระบวนการที่โทรศัพท์จะส่งคำขอออกไปและรับข้อมูลจากอุปกรณ์บลูทูธที่เปิดใช้งานอยู่ในบริเวณใกล้เคียง โทรศัพท์จะตรวจสอบค่า MAC Address ของอุปกรณ์ที่พบ ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAC Address เป็นหมายเลขเฉพาะของฮาร์ดแวร์บลูทูธในแต่ละอุปกรณ์ โดยระบบจะเปรียบเทียบค่าที่พบกับค่าของรถเข็นสินค้าเพื่อตรวจสอบว่ามีอุปกรณ์ที่ต้องการอยู่ในพื้นที่หรือไม่ หากไม่มีการตรวจพบอุปกรณ์ที่ตรงกับ MAC Address ของรถเข็นสินค้า อาจต้องทำการค้นหาซ้ำ

3) ตรวจพบสัญญาณบลูทูธจากรถเข็นสินค้า

เมื่อโทรศัพท์มือถือทำการค้นหาสัญญาณบลูทูธและพบอุปกรณ์ที่มี MAC Address ตรงกับรถเข็นสินค้า ระบบจะดึงข้อมูลและแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์นั้น เช่น ชื่ออุปกรณ์ (Device Name) และที่อยู่ MAC Address เพื่อให้แน่ใจว่าเป็นรถเข็นสินค้าที่ต้องการเชื่อมต่อ หากมีอุปกรณ์หลายตัวที่ส่งสัญญาณในบริเวณนั้น ระบบอาจต้องให้ผู้ใช้งานระบุว่าต้องการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ใดโดยเฉพาะ ในกรณีที่ยังไม่พบรถเข็นสินค้า โทรศัพท์มือถืออาจต้องทำการค้นหาใหม่ หรือรอให้รถเข็นสินค้าเปิดบลูทูธและส่งสัญญาณตอบกลับมา

4) เลือกอุปกรณ์ที่ต้องการเชื่อมต่อ

เมื่อโทรศัพท์มือถือตรวจพบอุปกรณ์ที่เปิดบลูทูธอยู่ ระบบจะเปรียบเทียบที่อยู่ MAC Address ของรถเข็นสินค้ากับค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ผู้ใช้งานจะต้องเลือกอุปกรณ์ที่ตรงกับรถเข็นสินค้าโดยอ้างอิงจากรายชื่อที่ปรากฏในแอปพลิเคชัน เมื่อเลือกอุปกรณ์สำเร็จ โทรศัพท์จะส่งคำขอการเชื่อมต่อไปยังรถเข็นสินค้า

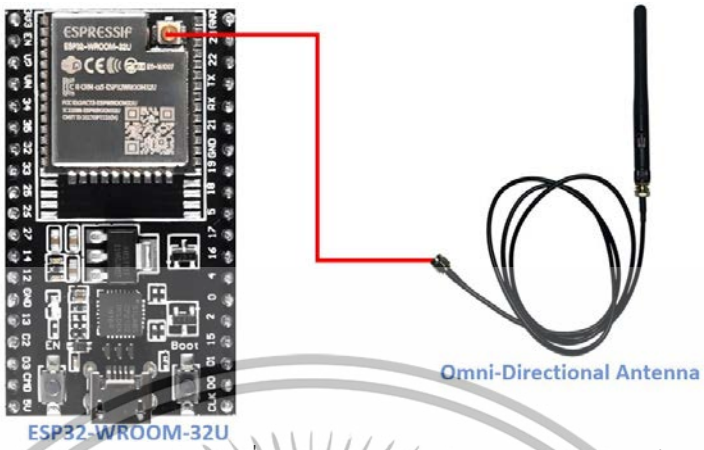
5) ดำเนินการเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้า

หลังจากเลือกอุปกรณ์สำเร็จ ระบบจะดำเนินการเชื่อมต่อโทรศัพท์มือถือกับ ESP32 บนรถเข็นสินค้า เมื่อการเชื่อมต่อสำเร็จ โทรศัพท์มือถือจะสามารถส่งคำสั่งควบคุมไปยังรถเข็นสินค้าได้โดยตรงผ่านบลูทูธ เช่น คำสั่งให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ หรือหยุดการเคลื่อนที่

3.1.2.2 การออกแบบการต่อวงจรสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า

การออกแบบการต่อวงจรสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า โดยใช้ ESP32 และสายอากาศรอบทิศทางจะเป็นการเชื่อมต่อที่ช่วยให้รถเข็นสินค้าสามารถรับสัญญาณบลูทูธจากโทรศัพท์มือถือได้ในทุกทิศทาง โดยใช้สัญญาณบลูทูธที่ส่งมาจากโทรศัพท์มือถือเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าและปรับทิศทางการเคลื่อนที่ตามตำแหน่งของผู้ใช้งาน โดยรายละเอียดการเชื่อมต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 วงจรสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า

จากรูปที่ 3.3 การเชื่อมต่อระหว่าง ESP32 และสายอากาศรอบทิศทางถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับสัญญาณบลูทูธจากทุกทิศทาง ซึ่งช่วยลดปัญหาสัญญาณอ่อนเมื่อโทรศัพท์มือถือเปลี่ยนตำแหน่ง สายอากาศรอบทิศทางจะถูกเชื่อมต่อผ่านพอร์ต U.FL ของ ESP32 โดยพอร์ตนี้ช่วยให้การเชื่อมต่อกับสายอากาศภายนอกทำได้สะดวกและเสถียร การเชื่อมต่อผ่าน U.FL ช่วยให้สามารถติดตั้งสายอากาศที่มีคุณภาพสูงเพื่อเสริมระยะและคุณภาพของสัญญาณบลูทูธได้ดีขึ้น เมื่อโทรศัพท์มือถือส่งสัญญาณบลูทูธ สัญญาณจะถูกรับผ่านสายอากาศและส่งเข้าสู่ ESP32 ซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผลและเชื่อมต่อกับระบบควบคุมของรถเข็นสินค้า

3.1.2.3 การเขียนโปรแกรมการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า

การเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการตรวจสอบว่ารถเข็นสินค้าถูกเชื่อมต่อกับโทรศัพท์มือถืออยู่หรือไม่ เพื่อให้การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์สองตัวนี้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย เป็นคำสั่งในการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อของ ESP32 กับโทรศัพท์มือถือ โดยมีการตรวจสอบว่าการเชื่อมต่อยังคงอยู่หรือไม่ หากมีการเชื่อมต่อ ESP32 จะทำการแสดงสถานะ "Connected" ในกรณีที่การเชื่อมต่อถูกตัดออกหรือไม่มีการเชื่อมต่อ ระบบแสดงข้อความ "Disconnect" โดยคำสั่งในการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อ แสดงดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

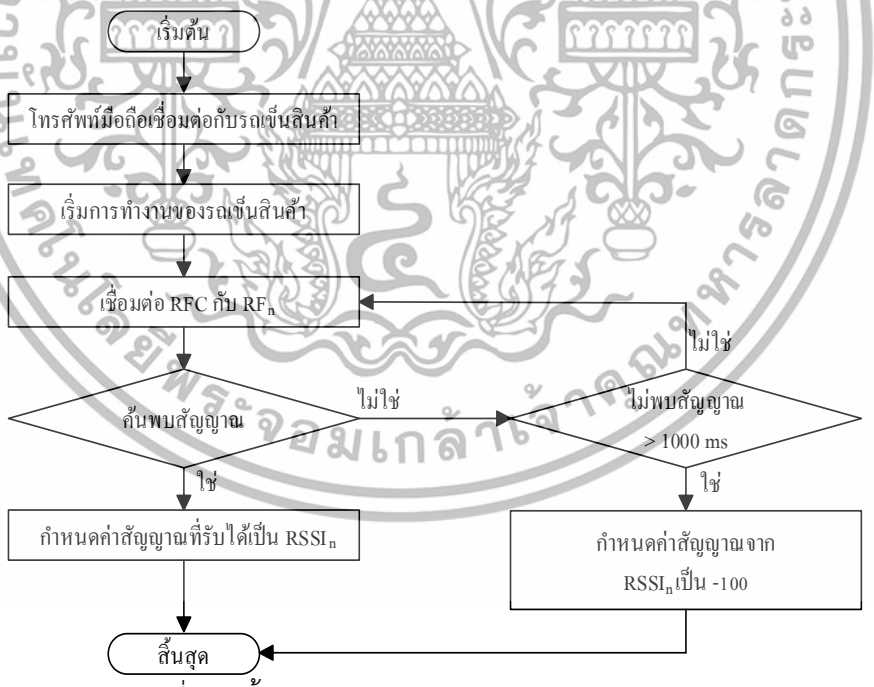
```
float vMPU6050Task() {
  if (mpu.dmpGetCurrentFIFOPacket(fifoBuffer)) {
    #ifdef OUTPUT_READABLE_YAWPITCHROLL
    mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
    mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
    mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);
    #endif
    return (ypr[0] * 180 / M_PI) ;
  }
}
```

รูปที่ 3.4 คำสั่งในการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อ

3.1.3 การออกแบบการรับสัญญาณบลูทูธ

3.1.3.1 ขั้นตอนการทำงานของการรับสัญญาณบลูทูธ

การออกแบบการรับสัญญาณบลูทูธเป็นการใช้สายอากาศยากิ-อูดะที่ติดตั้งไว้ในทิศทางต่าง ๆ เพื่อรับสัญญาณจากโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งาน ระบบจะใช้ข้อมูล RSSI ที่ได้รับจากสายอากาศในทิศทางต่าง ๆ เพื่อกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าตามการรับสัญญาณที่แรงที่สุด การทำงานนี้จะถูกดำเนินการตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทำงานของการรับสัญญาณบลูทูธ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการทำงานของการรับสัญญาณบลูทูธ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) โทรศัพท์มือถือเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้าผ่านสัญญาณบลูทูธ

ระบบเริ่มต้นทำงานเมื่อโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานเชื่อมต่อกับระบบรถเข็นสินค้าอัตโนมัติผ่านสัญญาณบลูทูธ โดยการเชื่อมต่อในขั้นตอนนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้โทรศัพท์มือถือและรถเข็นสินค้าสามารถสื่อสารกันได้อย่างอัตโนมัติเมื่ออยู่ในระยะการรับสัญญาณเดียวกัน

2) เชื่อมต่อ RFC กับ $\mathbf{RF_n}$

หลังจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำเร็จ ระบบจะทำการเชื่อมต่อโมดูลสวิตช์ระหว่างพอร์ต RFC กับพอร์ต $\mathbf{RF_n}$ ของสายอากาศยากิ-อูดะที่ติดตั้งในทิศทางต่าง ๆ โดยแต่ละสายอากาศจะรับสัญญาณบลูทูธที่มาจากโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานในทิศทางนั้น ๆ ทำให้สามารถประเมินได้ว่าสัญญาณจากทิศทางใดมีความแรงมากที่สุด

3) ตรวจจับการมีสัญญาณ

ระบบทำการตรวจสอบว่ามีการรับสัญญาณบลูทูธจากโทรศัพท์มือถือหรือไม่ โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี

- กรณีพบสัญญาณ: ระบบจะทำการคำนวณค่า RSSI จากสัญญาณที่ได้รับในแต่ละทิศทาง โดยค่า RSSI ที่ได้รับจะถูกบันทึกเป็น $\mathbf{RSSI_n}$ ซึ่ง $\mathbf{RSSI_1}$ จะเป็นค่าที่ได้รับจากสายอากาศด้านซ้าย, $\mathbf{RSSI_2}$ จากสายอากาศตรงกลาง และ $\mathbf{RSSI_3}$ จากสายอากาศด้านขวา และในขั้นตอนนี้ระบบจะสิ้นสุดการทำงานเมื่อได้รับค่า RSSI ที่ถูกต้อง
- กรณีไม่พบสัญญาณ: ระบบจะทำการตรวจสอบว่าระยะเวลาที่ไม่พบสัญญาณเกิน 1000 มิลลิวินาทีหรือไม่ ถ้าเกิน 1000 มิลลิวินาที ระบบจะกำหนดค่า RSSI เป็น -100 ซึ่งเป็นค่าสัญญาณต่ำสุดที่แสดงให้เห็นว่าสัญญาณขาดหายไป บ่งชี้ว่าโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานอยู่นอกระยะที่รถเข็นสินค้าสามารถติดตามได้

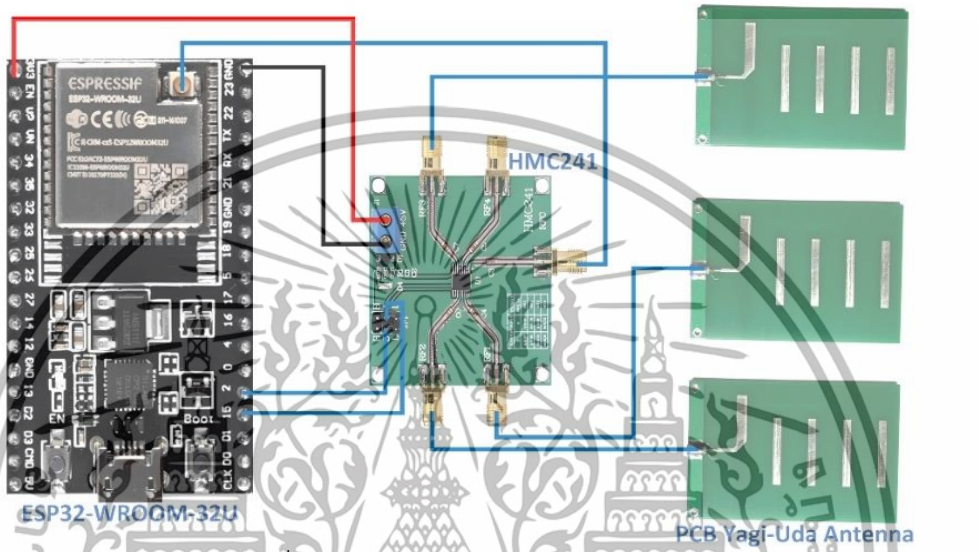
4) วนซ้ำการตรวจจับสัญญาณ

ระบบจะทำการตรวจจับสัญญาณซ้ำอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้แน่ใจว่ารถเข็นสินค้าสามารถติดตามโทรศัพท์มือถือได้ หากสัญญาณกลับมา ระบบจะกลับไปยังขั้นตอนการตรวจจับค่า RSSI เพื่อปรับทิศทางการเคลื่อนที่ตามทิศทางที่ตรวจพบสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.2 การออกแบบการต่อวงจรสำหรับรับสัญญาณบลูทูธ

วงจรสำหรับรับสัญญาณบลูทูธในระบบนี้ถูกออกแบบให้สามารถรับสัญญาณจากหลายทิศทางโดยใช้ ESP32 เป็นตัวประมวลผลหลัก ที่เชื่อมต่อกับโมดูลสวิตช์และสายอากาศแบบยากิ-อูดะ 3 ตัว เพื่อวัดค่าสัญญาณจากแต่ละทิศทาง แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรสำหรับรับสัญญาณบลูทูธ

จากรูปที่ 3.6 วงจรนี้มีการออกแบบให้สามารถรับสัญญาณบลูทูธจากหลายทิศทางด้วยการใช้ ESP32 เป็นตัวประมวลผลหลัก โดยมีการเชื่อมต่อกับโมดูลสวิตช์และสายอากาศแบบยากิ-อูดะ จำนวน 3 ตัวที่ติดตั้งไว้ในทิศทางด้านซ้าย ตรงกลาง และด้านขวา โดยโมดูลสวิตช์ ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เพื่อเลือกสายอากาศแต่ละตัวตามการควบคุมจากพอร์ต GPIO ของ ESP32 ซึ่งจะส่งสัญญาณควบคุมไปยังอินพุต A และ B ของโมดูลสวิตช์เพื่อเลือกทิศทางที่ต้องการอ่านค่า RSSI จากสายอากาศที่ตั้งอยู่ในทิศทางต่าง ๆ โดย ESP32 จะสลับการเลือกสัญญาณจากแต่ละทิศทางอย่างต่อเนื่อง การเลือกทิศทางที่มี RSSI แรงที่สุดจะทำให้ ESP32 สามารถประมวลผลและใช้ข้อมูลนี้ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าได้ เช่น ถ้าสัญญาณจากทิศทางซ้ายแรงที่สุด ระบบจะทำให้รถหมุนไปทางซ้าย เป็นต้น การใช้โมดูลสวิตช์ทำให้ระบบสามารถตรวจจับสัญญาณได้จากหลายทิศทางอย่างมีประสิทธิภาพและไม่ต้องหมุนสายอากาศไปมา เพิ่มความแม่นยำในการติดตามและลดภาระการประมวลผลของ ESP32 ในขณะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.3 การเขียนโปรแกรมการรับสัญญาณบลูทูธ

การเขียนโปรแกรมที่ใช้ ESP32 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ช่วยตรวจสอบและจัดการอุปกรณ์บลูทูธ โดยแบ่งออกเป็นสองฟังก์ชันหลัก ได้แก่ การตรวจสอบอุปกรณ์ที่ค้นพบ โดยคำสั่งในการตรวจสอบอุปกรณ์ที่ค้นพบ ระบบจะทำการสแกนอุปกรณ์บลูทูธที่มีสัญญาณใกล้เคียงจากตัว ESP32 และดึงข้อมูลที่อยู่ของอุปกรณ์เหล่านั้นมาเก็บไว้ในอาร์เรย์ที่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบได้ เพื่อให้สามารถตรวจสอบได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ได้เชื่อมต่อกับระบบแล้วหรือไม่ หากพบว่าเป็นอุปกรณ์ที่เคยเชื่อมต่อไว้ก่อนหน้านี้ โปรแกรมจะทำการบันทึก RSSI แสดงดังรูปที่ 3.7 และในส่วนของคำสั่งในการลบอุปกรณ์ออกจากระบบ โดยจะดึงข้อมูลที่อยู่ของอุปกรณ์และทำการลบออกทีละอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.8

```
void btAdvertisedDeviceFound01(BTAdvertisedDevice* pDevice) {
  int count = esp_bt_gap_get_bond_device_num();
  if (count > 0) {
    esp_bd_addr_t pairedDevices[count];
    esp_bt_gap_get_bond_device_list(&count, pairedDevices);
    for (int i = count-1 ; i < count; i++) {
      if (memcmp(pDevice->getAddress().getNative(), pairedDevices[i], 6) == 0) {
        Serial.printf("Found a paired device asynchronously: %s\n", pDevice->toString().c_str());
        std::string deviceName = pDevice->getName();
        String deviceAddress = pDevice->getAddress().toString();
        int deviceRSSI = pDevice->getRSSI();
        rssi[0] = pDevice->getRSSI();
        n = 0;
        return;
      }
    }
  }
}
```

รูปที่ 3.7 คำสั่งการตรวจสอบอุปกรณ์ที่ค้นพบ

```
void removeBondedDevices() {
  int count = esp_bt_gap_get_bond_device_num();
  esp_bd_addr_t pairedDevices[count];
  esp_bt_gap_get_bond_device_list(&count, pairedDevices);
  for (int i = 0; i < count; i++) {
    esp_bt_gap_remove_bond_device(pairedDevices[i]);
  }
}
```

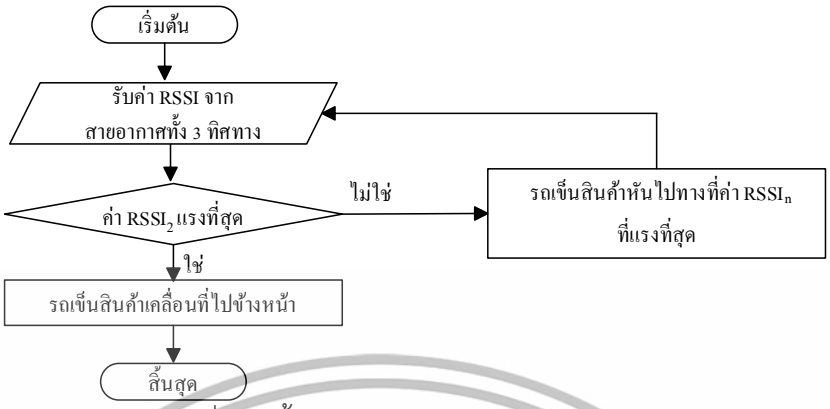
รูปที่ 3.8 คำสั่งการลบอุปกรณ์ออกจากระบบ

3.1.4 การออกแบบการควบคุมการเคลื่อนที่

3.1.4.1 ขั้นตอนการค้นหาทิศทางเริ่มต้นของรถเข็นสินค้า

การออกแบบการค้นหาทิศทางเริ่มต้นของรถเข็นสินค้า เพื่อตัดสินใจทิศทางการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าโดยประมวลผลจากค่า RSSI ที่รับจากแต่ละทิศทาง แล้วเลือกว่ารถเข็นสินค้าควรเคลื่อนที่ไปในทิศทางใด โดยเลือกทิศทางที่มีค่า RSSI แรงที่สุด แสดงดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการออกตัวของรถเข็นสินค้า

จากรูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการทำงานของการรับสัญญาณบลูทูธ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) รับค่า RSSI จากสายอากาศทั้ง 3 ทิศทาง

ESP32 จะทำการรับค่า RSSI จากสายอากาศยากิ-อูดะที่ติดตั้งในแต่ละทิศทาง เพื่อคำนวณและเปรียบเทียบค่า RSSI ซึ่งจะบ่งบอกทิศทางที่มีสัญญาณบลูทูธจากโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานแรงที่สุด และกำหนดทิศทางที่รถเข็นสินค้าควรเคลื่อนที่ไป

2) ตรวจสอบค่า $\mathbf{RSSI_2}$

หลังจากระบบรับค่า RSSI จากสายอากาศทุกทิศทางแล้ว ระบบจะตรวจสอบว่า $\mathbf{RSSI_2}$ ซึ่งเป็นค่า RSSI จากสายอากาศที่ติดตั้งในมุม 0 องศา มีความแรงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทิศทางอื่นๆ หรือไม่

- กรณี $\mathbf{RSSI_2}$ แรงที่สุด: ระบบจะสั่งให้รถเข็นสินค้าทำการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ซึ่งเป็นทิศทางที่สอดคล้องกับตำแหน่งผู้ใช้งานที่อยู่ตรงหน้า
- กรณี $\mathbf{RSSI_2}$ ไม่ใช่ค่าแรงที่สุด: ระบบจะประมวลผลและสั่งให้รถเข็นสินค้าเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางทิศที่มีค่า $\mathbf{RSSI}_n$ แรงที่สุด เพื่อปรับตำแหน่งให้หันเข้าหาผู้ใช้งาน

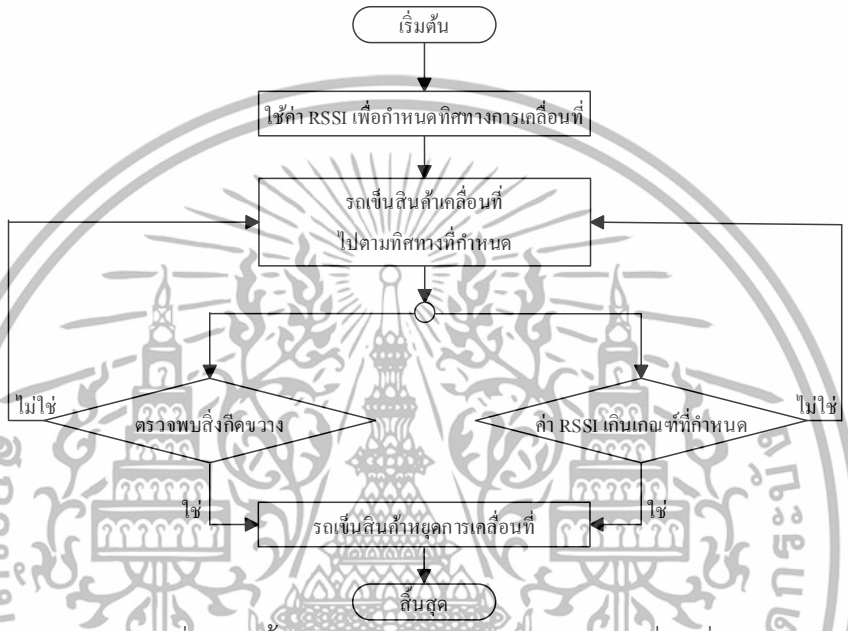
3) วนซ้ำการประมวลผล

กระบวนการจะถูกวนซ้ำ โดยระบบจะตรวจสอบและประมวลผลค่า RSSI อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้รถเข็นสินค้าสามารถติดตามผู้ใช้งานได้ตลอดเวลาจนกว่าจะสิ้นสุดการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบการเคลื่อนที่ติดตามผู้ใช้งาน

การออกแบบการควบคุมการเคลื่อนที่ติดตามผู้ใช้งานของรถเข็นสินค้า โดยประมวลผลค่า RSSI จากสัญญาณบลูทูธซึ่งรับจากสายอากาศยากิ-อูดะที่ติดตั้งในทิศทางต่าง ๆ เพื่อนำมาคำนวณทิศทางการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า การออกแบบการควบคุมนี้มีขั้นตอน การทำงานแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทำงานของระบบการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทำงานของระบบการเคลื่อนที่ มีรายละเอียดดังนี้

1) การค้นหาและเปรียบเทียบค่า RSSI

ESP32 จะทำการนำค่า RSSI ที่ได้รับจากสายอากาศแต่ละตัวที่ได้รับมาเปรียบเทียบกันเพื่อระบุทิศทางที่มีค่า RSSI สูงที่สุด เพื่อให้สามารถติดตามผู้ใช้งานได้อย่างถูกต้องโดยระบบจะทำการอัปเดตข้อมูลนี้ตลอดเพื่อให้สามารถติดตามการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง

2) การปรับทิศทางและการเคลื่อนที่

เมื่อระบบกำหนดทิศทางได้แล้วและไม่พบสิ่งกีดขวางในทิศทางที่จะเคลื่อนที่ดังกล่าว ESP32 จะส่งสัญญาณควบคุมไปยังมอเตอร์ผ่านโมดูลขับมอเตอร์เพื่อให้รถเข็นสินค้าเริ่มเคลื่อนที่ในทิศทางที่ระบุไว้ โดยการปรับความเร็วการหมุนของมอเตอร์ทั้งสองข้างให้เหมาะสมเพื่อให้รถเข็นสินค้าเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เลี้ยวไปทางซ้าย เลี้ยวไปทางขวา ซึ่งในระหว่างที่รถเข็นสินค้ากำลังเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ระบบจะใช้โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคปในการอ่านค่าองศาการหมุนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถเข็นสินค้า และในขณะที่รถเข็นสินค้ากำลังเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ระบุ ESP32 จะทำการรับค่า RSSI ใหม่อย่างต่อเนื่องเพื่อประมวลผลทิศทางที่ผู้ใช้งานเคลื่อนที่อยู่ หากพบว่าทิศทางของผู้ใช้งานเปลี่ยนแปลงไป ระบบจะปรับทิศทางของรถเข็นสินค้าให้สอดคล้องกับทิศทางใหม่ในทันที

3) การตรวจจับสิ่งกีดขวาง

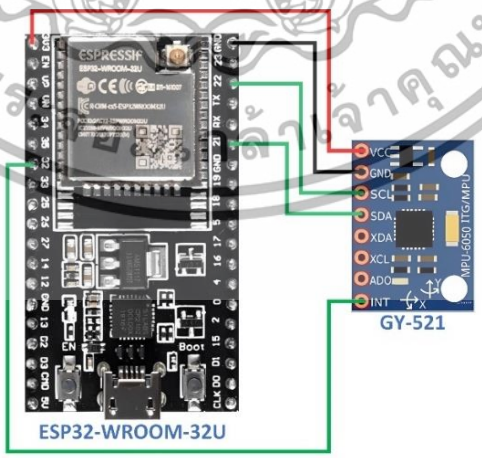
หากในระหว่างที่รถเข็นสินค้ากำลังเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่กำหนด ระบบจะใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกในการตรวจจับระยะห่างด้านหน้าของรถเข็นสินค้าเพื่อตรวจสอบว่ามีสิ่งกีดขวางหรือไม่ หากตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะ 60 เซนติเมตร รถเข็นสินค้าจะหยุดการเคลื่อนที่ชั่วคราวและรอจนกว่าสิ่งกีดขวางจะถูกนำออกไป

4) การตรวจสอบค่า RSSI เกินค่าที่กำหนด

หากในระหว่างที่รถเข็นสินค้ากำลังเคลื่อนที่ ค่า RSSI ที่ตรวจพบสูงเกินค่าที่กำหนดไว้รถเข็นสินค้าจะหยุดการเคลื่อนที่ชั่วคราว และรอจนกว่าค่า RRSI จะต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้จึงให้รถเข็นสินค้าเคลื่อนที่ต่อไปได้

3.1.4.3 การออกแบบการต่อวงจรสำหรับการเปลี่ยนทิศทาง

การออกแบบการเปลี่ยนทิศทางของรถเข็นสินค้า เป็นการเชื่อมต่อระหว่าง ESP32 และโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับการหมุนและการเคลื่อนไหวในสามแกน ข้อมูลจากเซนเซอร์ไจโรสโคปนี้จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมทิศทางการหมุนของรถเข็นสินค้า โดยรายละเอียดการเชื่อมต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรสำหรับควบคุมการเปลี่ยนทิศทางโดยใช้โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป

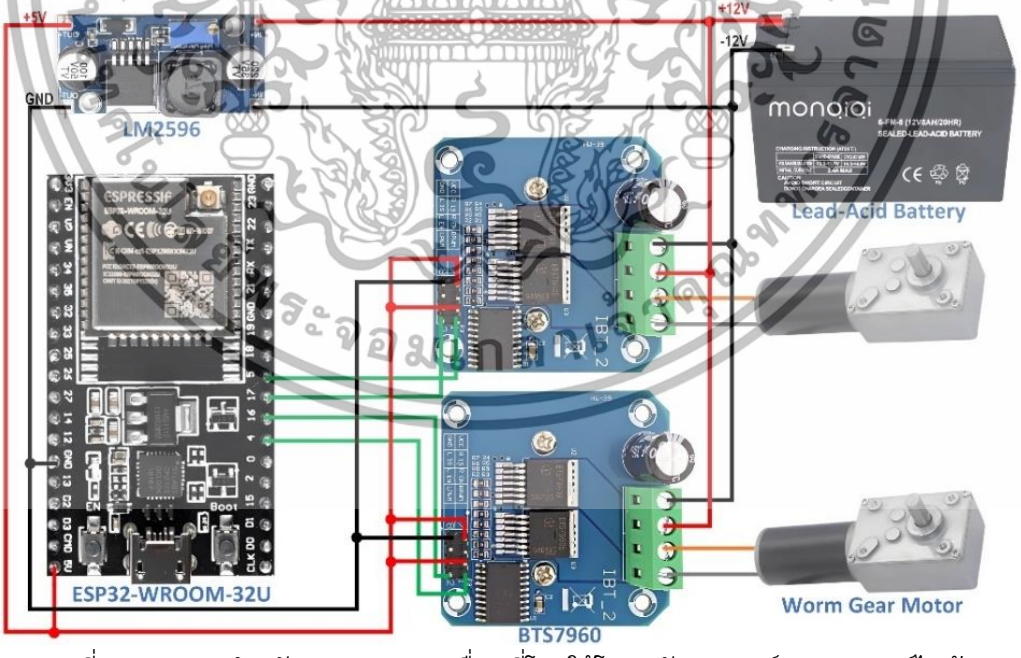
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.11 วงจรนี้ออกแบบมาเพื่อเชื่อมต่อระหว่าง ESP32 และโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป โดยใช้โปรโตคอล I2C ในการสื่อสาร เพื่อให้สามารถรับข้อมูลการหมุนและการเคลื่อนไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ วงจรประกอบด้วยการเชื่อมต่อขา SDA สำหรับการส่งข้อมูลและขา SCL สำหรับสัญญาณนาฬิกา โดยการเชื่อมต่อระหว่าง ESP32 และเซนเซอร์ไจโรสโคปจะถูกดำเนินการโดยใช้สายไฟที่เชื่อมต่อจากขา SDA และ SCL ของเซนเซอร์ไปยังพอร์ต GPIO ของ ESP32 ทำให้สามารถสื่อสารและประมวลผลข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง

ESP32 จะทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลหลักที่รวบรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ไจโรสโคป เมื่อมีการรับค่าจากเซนเซอร์ วงจรจะทำการประมวลผลข้อมูลและใช้เพื่อควบคุมทิศทางการหมุนของรถเข็นสินค้า

3.1.4.4 การออกแบบการต่อวงจรสำหรับการเคลื่อนที่

การออกแบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า ระบบประกอบด้วยส่วนควบคุมการขับเคลื่อนที่ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์และมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งจะต้องมีการจัดการพลังงานและการควบคุมการเคลื่อนที่อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้โมดูลขับมอเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.12 วงจรนี้ออกแบบมาเพื่อให้ ESP32 สามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์เกียร์หนอนผ่านโมดูลขับมอเตอร์ โดยการใช้สัญญาณ PWM ที่ส่งจาก ESP32 ไปยังโมดูลขับมอเตอร์ โมดูลขับมอเตอร์ทำหน้าที่รับสัญญาณ PWM และแปลงเป็นสัญญาณที่สามารถขับมอเตอร์ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความกว้างของพัลส์ PWM จะช่วยควบคุมความเร็วการหมุนของมอเตอร์ ยิ่งความกว้างของพัลส์มากขึ้น มอเตอร์ก็จะหมุนเร็วขึ้น สัญญาณ PWM นี้ยังสามารถควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้ผ่านการกำหนดขา OUT ของโมดูลขับมอเตอร์ โดยหากส่งสัญญาณไปในทิศทางที่กำหนด มอเตอร์จะหมุนไปตามทิศทางนั้น โมดูลขับมอเตอร์จะเชื่อมต่อกับมอเตอร์เกียร์หนอน ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการแรงบิดสูงและการควบคุมทิศทางที่แม่นยำ มอเตอร์นี้มีลักษณะการหมุนที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ง่าย เนื่องจากการใช้เกียร์หนอนในการส่งกำลัง

แหล่งจ่ายไฟในระบบนี้คือแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดที่มีแรงดัน 12V ซึ่งจะถูกแปลงเป็น 5V โดยโมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า (DC-DC Converter) เพื่อจ่ายไฟให้กับ ESP32 และอุปกรณ์อื่น ๆ ในวงจร แบตเตอรี่จะเป็นแหล่งพลังงานหลักที่จ่ายไฟให้กับระบบทั้งหมดเพื่อให้ ESP32 และอุปกรณ์อื่น ๆ ได้รับพลังงานอย่างเหมาะสม

3.1.4.5 การเขียนโปรแกรมการเปลี่ยนทิศทาง

การเขียนโปรแกรมที่ใช้โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคปเพื่อวัดการหมุนรอบแกนของอุปกรณ์ทำงานโดยการดึงข้อมูลจากเซนเซอร์เพื่อตรวจสอบว่ามีข้อมูลในบัฟเฟอร์หรือไม่ หากมีข้อมูล ระบบจะทำการคำนวณการหมุนของอุปกรณ์ในรูปแบบ Quaternion ซึ่งเป็นการแทนการหมุนในมิติสามมิติ โดย Quaternion จะช่วยให้การคำนวณการหมุนที่มีความซับซ้อนสามารถทำได้ง่ายขึ้นและลดปัญหาที่เกิดจากการหมุนในลักษณะต่าง ๆ เมื่อได้รับข้อมูลจากเซนเซอร์ ระบบจะคำนวณ ค่าความเร่ง ที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงซึ่งช่วยในการหาค่ามุมหมุนของอุปกรณ์ ในขั้นตอนนี้จะคำนวณการหมุนในมุมที่แสดงถึงการหมุนรอบแกน Yaw ซึ่งคือมุมที่แสดงถึงการหมุนในแนวนอน จากนั้นจะทำการแปลงค่าที่คำนวณได้จาก เรเดียน เป็น องศา เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานและการแสดงผล

มุมหมุนที่ได้จากการคำนวณนี้จะถูกนำไปใช้เพื่อบอกทิศทางการหมุนของรถเข็นสินค้า ซึ่งสามารถช่วยในการควบคุมการหมุนและการเคลื่อนไหวของรถเข็นให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
float vMPU6050Task() {
  if (mpu.dmpGetCurrentFIFOPacket(fifoBuffer)) {
    #ifdef OUTPUT_READABLE_YAWPITCHROLL
    mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
    mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
    mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);
    #endif
    return (ypr[0] * 180 / M_PI) ;
  }
}
```

รูปที่ 3.13 คำสั่งในการอ่านค่าการหมุนของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป

3.1.4.6 การเขียนโปรแกรมการเคลื่อนที่

การเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าผ่านการปรับความแรงของสัญญาณ PWM ที่ส่งไปยังมอเตอร์แต่ละตัวจะทำให้สามารถควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าได้ตามต้องการ โดยใช้สัญญาณ PWM ซึ่งเป็นสัญญาณที่สามารถปรับความแรงได้อย่างละเอียด เพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์แต่ละตัว

เมื่อรถเข็นสินค้าต้องการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ระบบจะส่งสัญญาณ PWM ไปยังมอเตอร์ทั้งสองชุดในค่าที่กำหนด ทำให้ทั้งสองมอเตอร์หมุนในทิศทางเดียวกัน ส่งผลให้รถเข็นสินค้าเคลื่อนที่ไปข้างหน้า โดยการปรับค่าความแรงของ PWM ที่ส่งไปยังมอเตอร์จะกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ ในกรณีที่ต้องการเลี้ยวขวา การควบคุมทิศทางจะทำให้มอเตอร์ด้านซ้ายหมุนเร็วกว่ามอเตอร์ด้านขวา เพื่อให้รถเข็นสินค้าหมุนไปทางขวา เมื่อเลี้ยวซ้าย การควบคุมจะตรงกันข้าม โดยมอเตอร์ด้านขวาจะหมุนเร็วกว่ามอเตอร์ด้านซ้าย ทำให้รถเข็นสินค้าหมุนไปทางซ้าย รถเข็นสินค้าจึงควบคุมทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ตามต้องการ แสดงดังรูปที่ 3.14

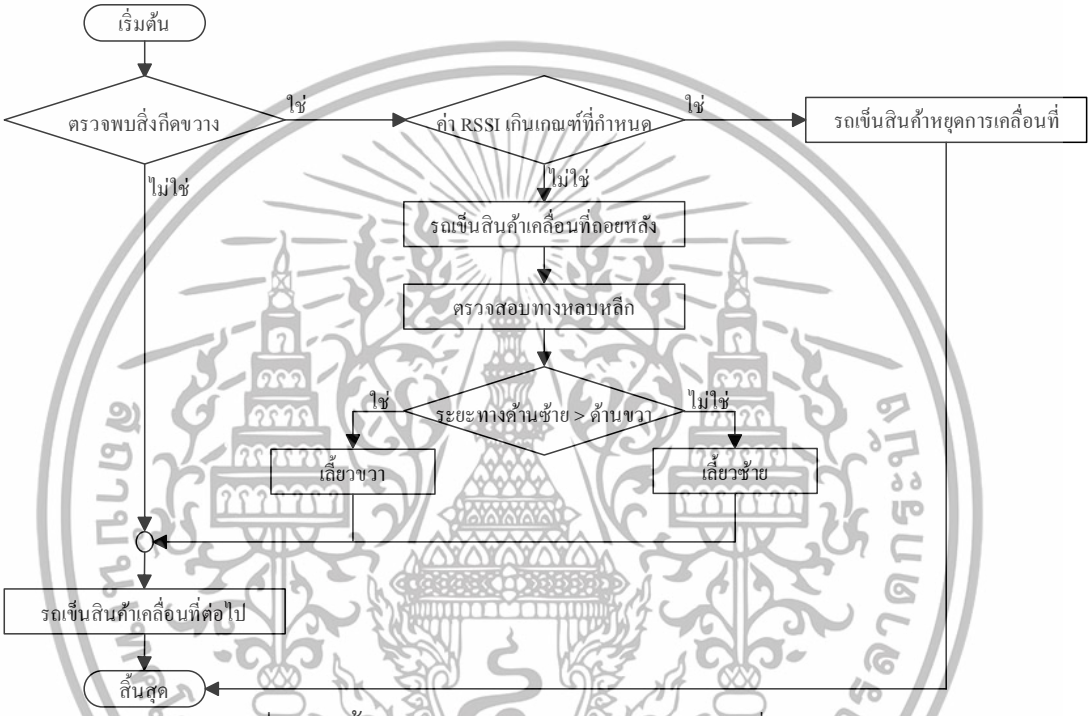
รูปที่ 3.14 คำสั่งในการควบคุมการเคลื่อนที่ผ่าน PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 การออกแบบการตรวจสอบสิ่งกีดขวางและการหลบหลีก

3.1.5.1 ขั้นตอนการทำงานของการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง

การออกแบบขั้นตอนการทำงานการตรวจสอบสิ่งกีดขวางถูกออกแบบมาเพื่อให้รถเข็นสินค้าสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างปลอดภัย โดยใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกในการตรวจสอบสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหน้าของรถเข็นสินค้า ซึ่งขั้นตอนการทำงานนี้แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการทำงานของการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง

จากรูปที่ 3.15 ขั้นตอนการทำงานของการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง มีรายละเอียดดังนี้

1) ตรวจสอบสิ่งกีดขวาง

ระบบจะตรวจสอบว่ามีสิ่งกีดขวางอยู่ด้านหน้าของรถเข็นสินค้าหรือไม่ โดยใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าของรถเข็นสินค้า ระบบจะอ่านค่าระยะทางจากเซนเซอร์เพื่อตรวจสอบว่ามีสิ่งกีดขวางอยู่ภายในระยะที่กำหนด (60 เซนติเมตร) หรือไม่ การตรวจสอบนี้ช่วยป้องกันการชนหรืออุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นขณะรถเข็นเคลื่อนที่

- กรณีพบสิ่งกีดขวาง: ระบบตรวจสอบพบว่ามีวัตถุหรือสิ่งกีดขวางอยู่ภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะที่กำหนด (60 เซนติเมตร) ด้านหน้าของรถเข็นสินค้า ระบบจะเข้าสู่กระบวนการตรวจสอบเพิ่มเติม

- กรณีไม่พบสิ่งกีดขวาง: ระบบตรวจสอบไม่พบวัตถุหรือสิ่งกีดขวางใดๆ ในระยะด้านหน้าของรถเข็นสินค้า ระบบจะส่งสัญญาณให้มอเตอร์ขับเคลื่อนต่อไปตามทิศทางที่ระบุโดยไม่หยุดชะงัก

2) ตรวจสอบค่า RSSI เพื่อประเมินทิศทางการหลบหลีก

หากพบสิ่งกีดขวาง ระบบจะทำการตรวจสอบค่า RSSI เพื่อวิเคราะห์ว่าผู้ใช้งานอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมหรือไม่ และตัดสินใจเกี่ยวกับทิศทางการหลบหลีก

- กรณีค่า RSSI สูงกว่าค่าที่กำหนด: ผู้ใช้งานอยู่ในระยะปกติ ระบบจะดำเนินการหลบหลีกโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับระยะทางเพื่อตัดสินใจเลือกเส้นทางที่ปลอดภัยที่สุด
- กรณีค่า RSSI ต่ำกว่าค่าที่กำหนด: ผู้ใช้งานอยู่ใกล้รถเข็นสินค้าเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสี่ยงที่รถเข็นสินค้าจะชน ระบบจะสั่งให้รถเข็นสินค้าหยุดการเคลื่อนที่ชั่วคราว

3) ตรวจสอบเส้นทางถอยหลัง

หากพบว่าสามารถหลบหลีกได้โดยการถอยหลัง ระบบจะตรวจสอบว่าด้านหลังมีสิ่งกีดขวางหรือไม่

- กรณีด้านหลังไม่มีสิ่งกีดขวาง: ระบบจะถอยหลังเล็กน้อยเพื่อเพิ่มระยะห่างจากผู้ใช้งานและสิ่งกีดขวาง
- กรณีด้านหลังมีสิ่งกีดขวาง: ระบบจะสั่งให้รถเข็นสินค้าหยุดการเคลื่อนที่ชั่วคราว

4) เปรียบเทียบระยะทางด้านซ้ายและขวาเพื่อเลือกทางหลบหลีก

หากสามารถดำเนินการหลบหลีกได้ ระบบจะเปรียบเทียบระยะทางด้านซ้ายและขวาเพื่อตัดสินใจเลือกทิศทางที่เหมาะสม

- กรณีระยะทางด้านซ้ายมากกว่าด้านขวา: ระบบจะสั่งให้รถเข็นสินค้าเลี้ยวซ้ายเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง
- กรณีระยะทางด้านขวามากกว่าด้านซ้าย: ระบบจะสั่งให้รถเข็นสินค้าเลี้ยวขวาเพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

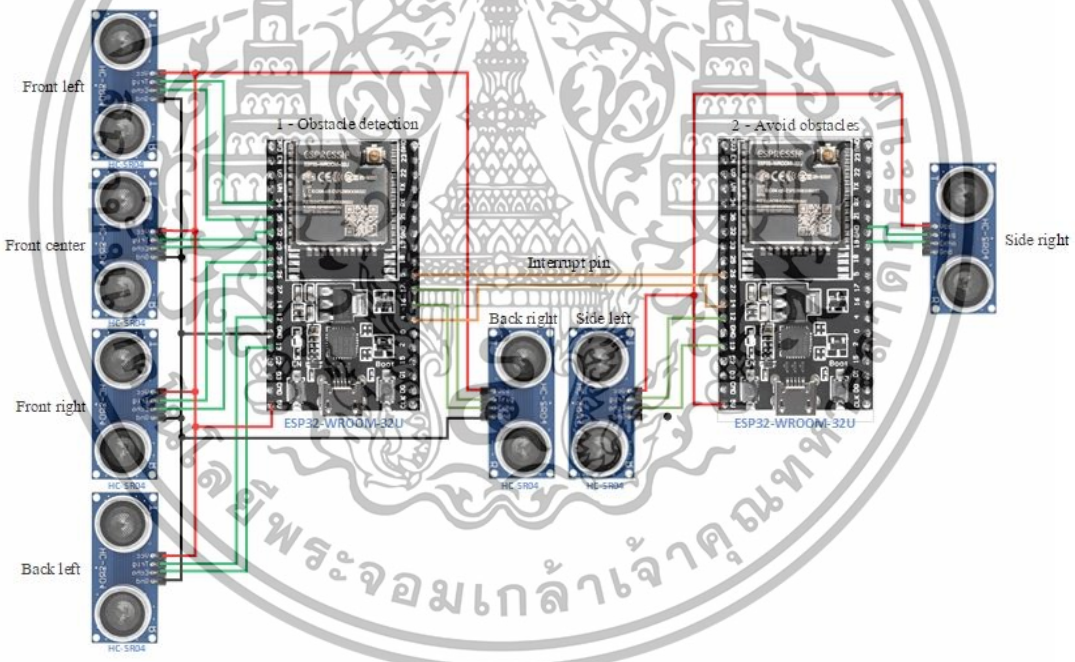
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การเคลื่อนที่ต่อหลังจากการหลบหลีก

เมื่อระบบดำเนินการหลบหลีกเสร็จเรียบร้อย รถเข็นสินค้าจะกลับเข้าสู่เส้นทางหลักและเคลื่อนที่ไปยังจุดหมายปลายทาง โดยยังคงตรวจสอบสิ่งกีดขวางและค่า RSSI อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างปลอดภัย

3.1.5.2 การออกแบบการต่อวงจรสำหรับการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง

การออกแบบวงจรการตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวางใช้การเชื่อมต่อระหว่าง ESP32 กับโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิกจำนวน 7 ตัว แสดงดังรูปที่ 3.16 มีการติดตั้งเซนเซอร์ไว้ที่ด้านหน้า ด้านหลังและด้านข้างของรถเข็นสินค้า ทำให้สามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางได้ครอบคลุมในหลายมุม เพื่อนำข้อมูลจากเซนเซอร์อัลตราโซนิกสั่งการให้รถเข็นสินค้าหยุดการเคลื่อนที่และหลบหลีกสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 3.16 วงจรสำหรับการตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยใช้โมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก

จากรูปที่ 3.16 การเชื่อมต่อระหว่าง ESP32 และเซนเซอร์อัลตราโซนิกทั้ง 7 ตัว เพื่อรับข้อมูลระยะทางจากแต่ละเซนเซอร์ในแบบเรียลไทม์ โดยเซนเซอร์อัลตราโซนิก 5 ตัวที่เชื่อมต่อกับ ESP32(1) จะตรวจจับสิ่งกีดขวางในทิศทางด้านหน้าและด้านหลังของรถเข็นสินค้า เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนเซอร์ตรวจจับสิ่งกีดขวางในระยะที่กำหนด (60 เซนติเมตร) จะส่งสัญญาณไปยัง ESP32(1) ผ่าน interrupt ซึ่งช่วยให้การประมวลผลและตอบสนองเกิดขึ้นทันที

ข้อมูลที่ได้รับจาก ESP32(1) จะถูกส่งไปยัง ESP32(2) เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า โดย ESP32(2) จะใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์อัลตราโซนิก 2 ตัวที่ติดตั้งด้านซ้ายและด้านขวาของรถเข็นสินค้าเพื่อเปรียบเทียบระยะห่างจากพื้นที่ทั้งสองด้านเพื่อตัดสินใจหลบหลีกไปทางที่มีพื้นที่ว่างมากกว่า โดยการเชื่อมต่อระหว่าง ESP32 และเซนเซอร์อัลตราโซนิกจะใช้ GPIO pins ในการสื่อสารผ่านสัญญาณ Trigger และ Echo เพื่อส่งและรับข้อมูลจากเซนเซอร์ เซนเซอร์แต่ละตัวจะถูกควบคุมผ่านวงจรขับเคลื่อนที่ทำงานร่วมกับการควบคุมมอเตอร์เพื่อให้รถเข็นสินค้าเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ถูกต้องตามการตัดสินใจของระบบ การออกแบบวงจรนี้ทำให้ระบบสามารถตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.1.5.3 การเขียนโปรแกรมการตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

การเขียนโปรแกรมสำหรับระบบตรวจสอบสิ่งกีดขวางใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกวัดระยะห่างเพื่อตัดสินใจให้รถเข็นสินค้าเคลื่อนที่หรือหยุด โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การตรวจสอบสิ่งกีดขวาง การคำนวณระยะทาง และการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

คำสั่งในการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง จะทำการตรวจสอบระยะทางระหว่างเซนเซอร์และรถเข็นสินค้า หากเซนเซอร์ตรวจพบวัตถุภายใน 60 ซม. (ด้านหน้า) หรือ 1 เมตร (ด้านหลัง) รถเข็นสินค้าจะหยุดเคลื่อนที่โดยส่งสัญญาณ HIGH ไปยังพิน Interrupt แต่หากไม่พบสิ่งกีดขวางจะส่งสัญญาณ LOW เพื่อให้เคลื่อนที่ต่อ แสดงดังรูปที่ 3.17

```
if ( Front_left < 60 || Front_center < 60  || Front_right < 60 ) {
  digitalWrite(Front_break , HIGH); //ตรวจจับสิ่งกีดขวางบริเวณด้านหน้ารถเข็น
}
else {
  digitalWrite(Front_break , LOW);
}
if ( Back_left < 100 || Back_right < 100 ) {
  digitalWrite(Back_break , HIGH); //ตรวจจับสิ่งกีดขวางบริเวณด้านหลังรถเข็น
}
else {
  digitalWrite(Back_break , LOW);
}
```

รูปที่ 3.17 คำสั่งในการตรวจสอบสิ่งกีดขวาง

ฟังก์ชัน Cal_distance คำนวณระยะทางจากเซนเซอร์อัลตราโซนิกจะใช้วิธีการวัดเวลาที่คลื่นเสียงเดินทางไปและสะท้อนกลับจากวัตถุ เมื่อเซนเซอร์ได้รับคำสั่งให้ส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณผ่านขา Trig คลื่นอัลตราโซนิกจะเดินทางไปยังวัตถุแล้วสะท้อนกลับมาถึงขา Echo ซึ่งจะวัดเวลาในการเดินทางกลับ จากนั้นแปลงเวลานั้นเป็นระยะทางในหน่วยเซนติเมตรโดยใช้สูตร duration / 29 / 2 เพื่อหาค่าระยะทางที่แท้จริงจากเซนเซอร์ถึงวัตถุ แสดงดังรูปที่ 3.18

```
long Cal_distance(int Trig , int Echo) {
  digitalWrite(Trig, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(Trig, HIGH);
  delayMicroseconds(5);
  digitalWrite(Trig, LOW);
  duration = pulseIn(Echo, HIGH);
  return duration / 29 / 2 ;
}
```

รูปที่ 3.18 ฟังก์ชันคำนวณระยะทาง

คำสั่งหลบหลีกสิ่งกีดขวางเริ่มจากการตรวจสอบสถานะการเคลื่อนที่ของรถเข็น หากพบสิ่งกีดขวางด้านหน้า ระบบจะสั่งให้ถอยหลัง 1 เมตร พร้อมตรวจสอบสิ่งกีดขวางด้านหลังเพื่อป้องกันการชน จากนั้นระบบจะใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกตรวจสอบพื้นที่ว่างด้านซ้ายและขวา หากด้านใดมีพื้นที่มากกว่า รถเข็นจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางนั้นเพื่อหลบหลีกและกลับเข้าสู่เส้นทางหลัก กระบวนการนี้ช่วยให้รถเข็นสามารถติดตามผู้ใช้งานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ แสดงดังรูปที่ 3.19

```
if ( digitalRead(Front_break) == HIGH ) {
  Serial.println("Break!");
  turn = "Break";
  if (rssi1 < -32 && rssi2 < -32 && rssi3 < -32) { //หลบหลีกสิ่งกีดขวาง
    d++;
    if ( d == 3) {
      if (digitalRead(Back_break) == LOW) { // เช็คสิ่งกีดขวางบริเวณด้านหลังก่อนเคลื่อนที่ถอยหลัง ···
      }
      Serial.println("rssi1 scan done");
      Serial.println("rssi2 scan done");
      Serial.println("rssi3 scan done");
      rssi1 = Average_val(list_rssi1[0],list_rssi1[1]);
      rssi2 = Average_val(list_rssi2[0],list_rssi2[1]);
      rssi3 = Average_val(list_rssi3[0],list_rssi3[1]);
      if ( (rssi2 - rssi1) >= 6 && (rssi2 - rssi3) >= 6 ) { //เช็คค่าทิศทางของผู้ใช้งานว่าอยู่ด้านหน้าหรือไม่
        // ให้เรียกใช้ ultrasonic
        DL = Cal_distance(TrigL, EchoL);
        DR = Cal_distance(TrigR, EchoR);
        DL += 1.1; //ชดเชยค่าความผิดพลาดของ ultrasonic
        DR += 1.3;
        if ( DL >= DR ) {···
        }
        else {···
        }
      } //หากอยู่ด้านหน้าที่มีสิ่งกีดขวางกั้นอยู่จะหลบไปทางด้านซ้าย/ขวา
      else {
        MovementOfTheCart();
      }
    }
```

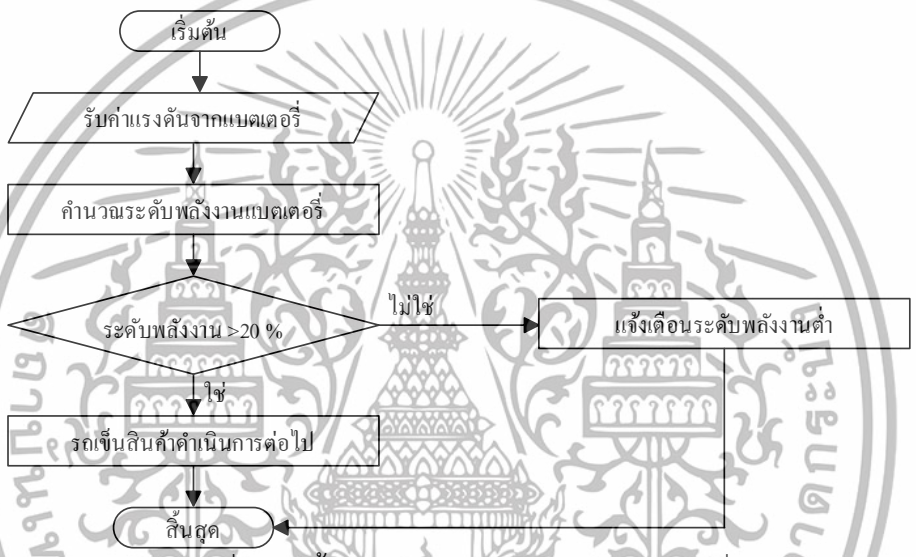
รูปที่ 3.19 คำสั่งในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 การออกแบบการวัดระดับพลังงานแบตเตอรี่

3.1.6.1 ขั้นตอนการวัดระดับพลังงานแบตเตอรี่

การออกแบบการวัดระดับพลังงานแบตเตอรี่ เพื่อให้รถเข็นสินค้าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากระดับพลังงานต่ำ ระบบจะทำการแจ้งเตือนเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถดำเนินการชาร์จแบตเตอรี่ได้ก่อนที่พลังงานจะหมดลง ซึ่งจะช่วยป้องกันปัญหาการหยุดทำงานกะทันหันและเพิ่มความต่อเนื่องของการใช้งาน การทำงานนี้จะถูกดำเนินการตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการวัดระดับพลังงานแบตเตอรี่

จากรูปที่ 3.20 แสดงขั้นตอนการวัดระดับพลังงานแบตเตอรี่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) รับค่าแรงดันจากแบตเตอรี่

การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะทำโดยการใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแรงดัน ซึ่งจะเชื่อมต่อกับระบบเพื่อให้สามารถรับค่าที่แม่นยำจากแบตเตอรี่ โดยค่าแรงดันที่ได้จะถูกส่งไปยัง ESP32 ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลและคำนวณระดับพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่

2) คำนวณระดับพลังงานแบตเตอรี่

เมื่อได้ค่าแรงดันจากเซนเซอร์แล้ว ระบบจะนำค่าแรงดันที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของระดับพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ ซึ่งการคำนวณนี้จะช่วยให้สามารถแสดงผลระดับพลังงานได้ในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและผู้ใช้งานสามารถทราบว่าแบตเตอรี่เหลือพลังงานมากน้อยแค่ไหน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

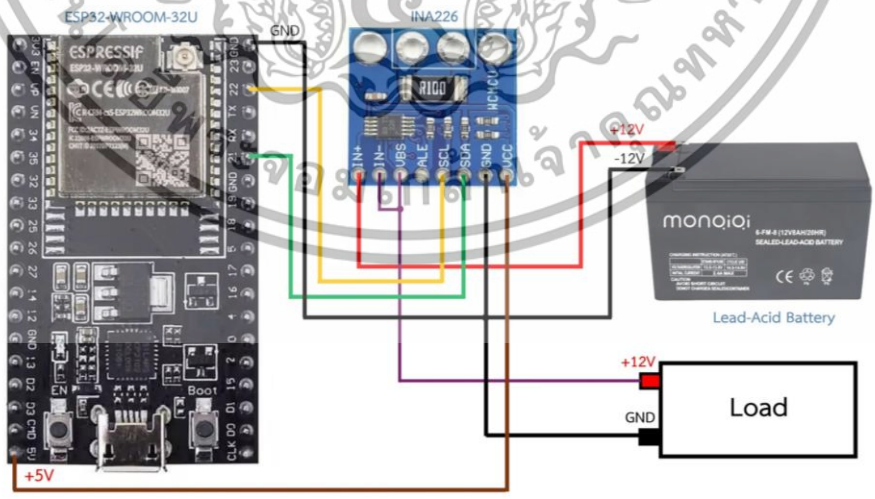
3) การตรวจสอบระดับพลังงาน

เมื่อคำนวณระดับพลังงานแบตเตอรี่เสร็จแล้ว ระบบจะตรวจสอบว่าแบตเตอรี่มีพลังงานเหลืออยู่มากกว่าหรือเท่ากับ 20% หรือไม่ ซึ่งการตั้งค่าระดับที่ 20% นี้เป็นการกำหนดเกณฑ์ที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบสามารถทำงานต่อไปได้อย่างปลอดภัย หากระดับพลังงานต่ำกว่านี้ ระบบจะได้รับข้อมูลที่บ่งชี้ว่าพลังงานแบตเตอรี่ใกล้หมดและจำเป็นต้องชาร์จทันที

- กรณีระดับพลังงานมากกว่า 20%: ระบบจะพิจารณาว่าแบตเตอรี่มีพลังงานเพียงพอในการทำงาน รถเข็นสินค้าสามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้โดยไม่มีปัญหาหรือข้อจำกัดด้านพลังงาน
- กรณีระดับพลังงานน้อยกว่าเท่ากับ 20%: ระบบจะทำการแจ้งเตือนผู้ใช้งานว่าพลังงานของแบตเตอรี่อยู่ในระดับต่ำผ่านทางการแสดงผลผ่านการแจ้งเตือนทางแอปพลิเคชัน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถดำเนินการชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มก่อนที่จะหมดพลังงานและทำให้รถเข็นสินค้าหยุดทำงาน

3.1.6.2 การออกแบบการต่อวงจรสำหรับวัดระดับพลังงานแบตเตอรี่

วงจรประกอบด้วยโมดูลเซนเซอร์ INA226 เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าเชื่อมต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ รวมถึงแหล่งจ่ายไฟและโหลดในวงจร เพื่อให้สามารถตรวจวัดค่าต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 วงจรสำหรับวัดระดับพลังงานแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.21 โมดูลเซนเซอร์ INA226 ถูกเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เพื่อใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด โดยขา VBUS ของ INA226 จะเชื่อมต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่ายออกมา ขา GND ของ INA226 จะเชื่อมต่อกับขั้วกราวด์ของแบตเตอรี่และกราวด์ของ ESP32 เพื่อให้ทั้งสองแหล่งพลังงานมีแรงดันอ้างอิงเดียวกัน การเชื่อมต่อสัญญาณ I2C นั้น ขา SCL และ SDA ของ INA226 จะเชื่อมต่อกับขา GPIO พิน 22 และ GPIO พิน21 ของ ESP32 ตามลำดับ ขา VCC ของ INA226 จะเชื่อมต่อกับขา 3.3V ของ ESP32 เพื่อจ่ายพลังงานให้กับโมดูล INA226 ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จาก INA226 จะถูกส่งไปยัง ESP32 ผ่านการสื่อสาร I2C เพื่อทำการประมวลผลและคำนวณระดับพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแสดงผลในรูปแบบเปอร์เซ็นต์เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบถึงระดับพลังงานของแบตเตอรี่ ช่วยในการติดตามและแจ้งเตือนผู้ใช้งานเมื่อระดับพลังงานของแบตเตอรี่ต่ำ ซึ่งจะช่วยป้องกันการหยุดทำงานของระบบในขณะที่กำลังใช้งาน

3.1.6.3 การเขียนโปรแกรมวัดระดับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่

การเขียนโปรแกรมสำหรับ ESP32 เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่โดยใช้โมดูลเซนเซอร์ INA226 และคำนวณระดับแบตเตอรี่ที่เหลือในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ โดยใช้เงื่อนไขตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าเพื่อตั้งค่าระดับเปอร์เซ็นต์ตามช่วงที่กำหนดไว้ หลังจากคำนวณเปอร์เซ็นต์ของพลังงานแบตเตอรี่ที่เหลือแล้ว โปรแกรมจะทำการแสดงผลเปอร์เซ็นต์นี้บนหน้าจอ LCD เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถดูสถานะของแบตเตอรี่ได้ทันที นอกจากนี้ ข้อมูลเปอร์เซ็นต์ของแบตเตอรี่ยังสามารถส่งไปแสดงบนหน้าจอแอปพลิเคชัน ทำให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะแบตเตอรี่ได้ ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกและความปลอดภัยในการใช้งานของระบบที่ใช้แบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 3.22

```
ina226.readAndClearFlags(); // อ่านค่าสถานะของเซ็นเซอร์และเคลียร์ค่าเก่า
shuntVoltage_mV = ina226.getShuntVoltage_mV();  // อ่านค่าแรงดันตกคร่อมที่ shunt resistor (mV)
busVoltage_V = ina226.getBusVoltage_V();        // อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส (V)
current_mA = ina226.getCurrent_mA();            // อ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านบัส (mA)
power_mW = ina226.getBusPower();                // อ่านค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (mW)
loadVoltage_V = (busVoltage_V + (shuntVoltage_mV / 1000) - 0.1 ); // คำนวณค่าแรงดันโหลดโดยรวม (V)
```

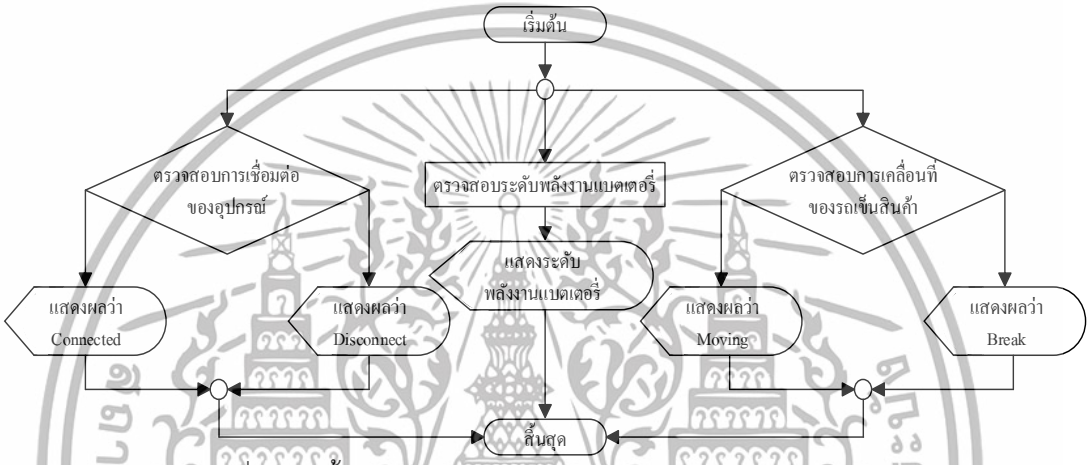
รูปที่ 3.22 คำสั่งในการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 การออกแบบการแสดงผลบนรถเข็นสินค้าผ่านจอ LCD

3.1.7.1 ขั้นตอนการทำงานของการรับสัญญาณบลูทูธ

การออกแบบการแสดงผลในปริญญานิพนธ์นี้เป็นการใช้หน้าจอ LCD ขนาด 20×4 เพื่อแสดงสถานะการทำงานของระบบในรูปแบบเรียลไทม์ ซึ่งการรายละเอียดการแสดงผลประกอบด้วยสถานะการเชื่อมต่อและสถานะการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า โดยมีขั้นตอนการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการทำงานของการแสดงผลบนหน้าจอ LCD

จากรูปที่ 3.23 แสดงขั้นตอนการทำงานของการแสดงผลบนหน้าจอ LCD โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ตรวจสอบการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธกับโทรศัพท์มือถือ

เมื่อระบบเริ่มทำงาน จะทำการตรวจสอบการเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานและรถเข็นสินค้า หากการเชื่อมต่อเสร็จสมบูรณ์ หน้าจอ LCD จะแสดงข้อความ "Connected" เพื่อแสดงว่าสามารถเชื่อมต่อได้เรียบร้อย แต่หากยังไม่มีการเชื่อมต่อ จะแสดงข้อความ "Disconnect" เพื่อให้ผู้ใช้ทราบว่าระบบยังไม่เชื่อมต่อกับโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งาน

2) ตรวจสอบการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า

ระบบจะตรวจสอบสถานะการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า หากรถเข็นสินค้ากำลังเคลื่อนที่ หน้าจอจะแสดงข้อความ "Moving" เพื่อแสดงว่ารถเข็นสินค้ากำลังเคลื่อนที่ แต่หากรถเข็นสินค้าหยุดการเคลื่อนที่ หน้าจอจะแสดงข้อความ "Break" เพื่อแสดงว่ารถเข็นสินค้าหยุดนิ่ง

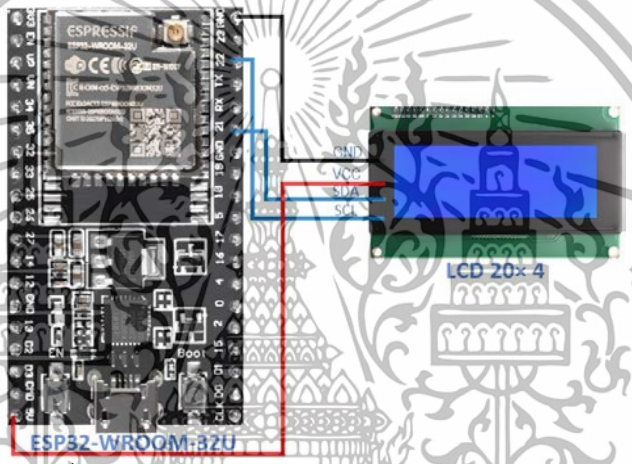
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ตรวจสอบระดับพลังงานแบตเตอรี่

ระบบจะตรวจสอบระดับพลังงานแบตเตอรี่ของรถเข็นสินค้า โดยจะถูกแสดงบนหน้าจอ LCD และบนแอปพลิเคชัน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะของแบตเตอรี่ได้ แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเตรียมตัวชาร์จแบตเตอรี่หากพลังงานเริ่มหมดลง

3.1.7.2 การออกแบบการต่อวงจรสำหรับรับการแสดงผลบนหน้าจอ LCD

วงจรการแสดงผลประกอบด้วยการเชื่อมต่อหน้าจอ LCD กับ ESP32 โดยใช้การสื่อสารแบบ I2C แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 วงจรสำหรับรับแสดงผลบนหน้าจอ LCD

จากรูปที่ 3.24 แสดงการออกแบบวงจรสำหรับการแสดงผล โดยมีการเชื่อมต่อหน้าจอ LCD เข้ากับ ESP32 ผ่านพอร์ต I2C ซึ่งพอร์ต SDA และ SCL ของ ESP32 จะเชื่อมต่อกับพอร์ต SDA และ SCL ของหน้าจอ LCD ตามลำดับ ซึ่งการออกแบบวงจรนี้ช่วยให้ ESP32 สามารถส่งข้อมูลสถานะการเชื่อมต่อและการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าไปยังหน้าจอ LCD ได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะของระบบได้อย่างชัดเจน

3.1.7.3 การเขียนโปรแกรมการแสดงผลบนหน้าจอ LCD

การเขียนโปรแกรมเพื่อแสดงการอ่านค่าสถานะการเชื่อมต่ออุปกรณ์ โดยระบบจะทำการตรวจสอบว่ารถเข็นสินค้าสามารถเชื่อมต่อกับโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานผ่านบลูทูธได้หรือไม่ หากระบบตรวจพบว่าอุปกรณ์สามารถเชื่อมต่อได้สำเร็จ จะทำการอัปเดตสถานะการเชื่อมต่อและแสดง

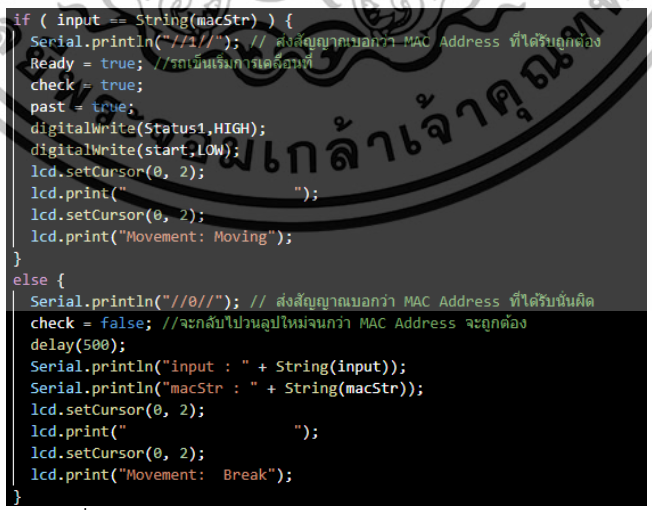
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อความ "Connected" บนหน้าจอ LCD เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบว่าระบบสามารถทำงานร่วมกับโทรศัพท์มือถือได้เรียบร้อยแล้ว ในทางกลับกัน หากระบบตรวจสอบพบว่าไม่มีการเชื่อมต่อเกิดขึ้น หรือเกิดการตัดการเชื่อมต่อ ระบบจะแสดงข้อความ "Disconnected" บนหน้าจอ LCD เพื่อแจ้งเตือนให้ผู้ใช้งานทราบว่าโทรศัพท์มือถือไม่ได้เชื่อมต่ออยู่กับรถเข็นสินค้า แสดงดังรูปที่ 3.25

```
if (SerialBT.connected()) {
  n++;
  c = 0;
  if (n == 1) {
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("                ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Status: Connected");
  }
}
else {
  c++;
  n = 0;
  if (c == 1) {
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("                ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Status: Disconnect");
  }
}
```

รูปที่ 3.25 คำสั่งในการแสดงผลบนหน้าจอ LCD แสดงสถานการณ์เชื่อมต่อ

การเขียนโปรแกรมเพื่อแสดงสถานะเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า เมื่อรถเข็นสินค้าเคลื่อนที่ ข้อมูลจากเซนเซอร์จะถูกประมวลผลและแสดงผลบนหน้าจอ LCD เป็นข้อความ "Moving" เพื่อแจ้งให้ผู้ใช้งานทราบว่ารถเข็นสินค้ากำลังเคลื่อนที่อยู่ แต่หากตรวจพบว่ารถเข็นสินค้าหยุดการเคลื่อนที่ ระบบจะทำการอัปเดตข้อความเป็น "Brake" เพื่อแสดงให้เห็นว่ารถเข็นสินค้าหยุดการเคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 3.26



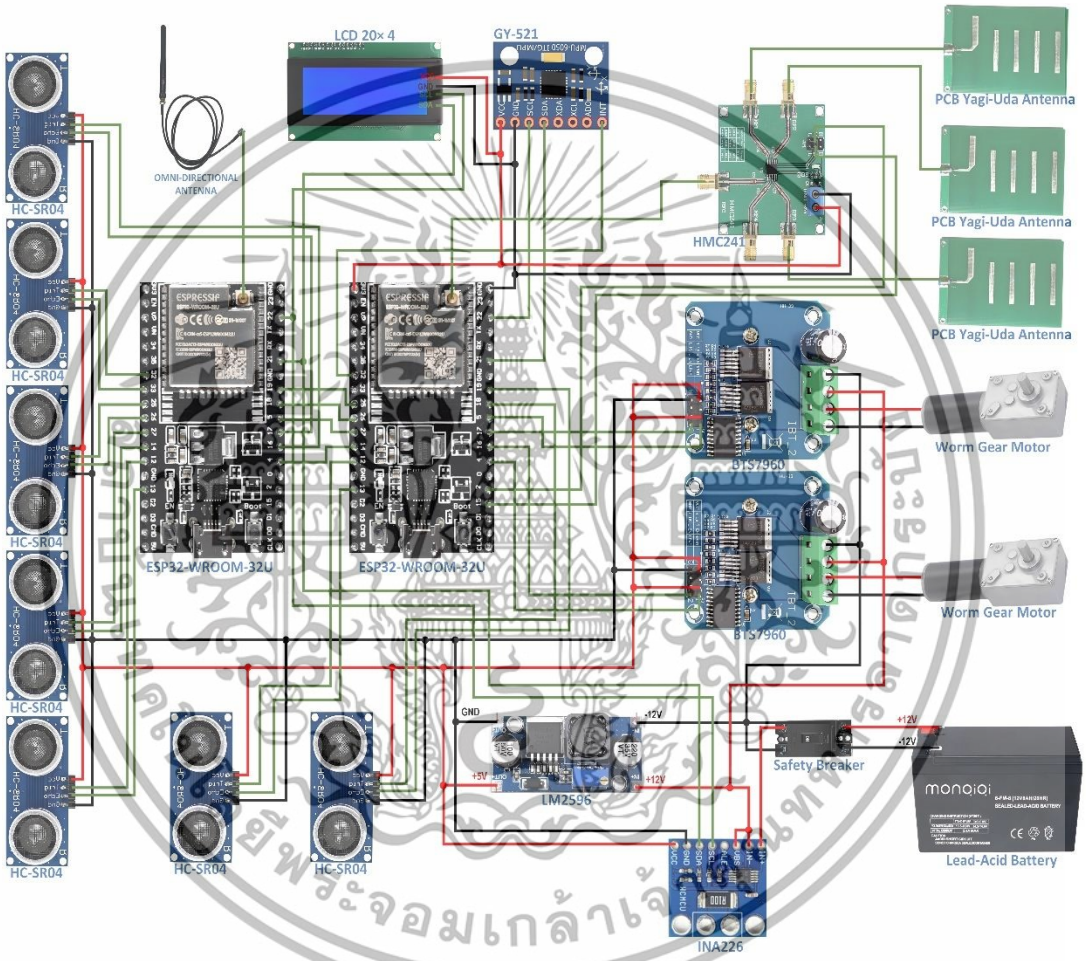
```
if ( input == String(macStr) ) {
  Serial.println("//1//"); // ส่งสัญญาณบอกว่า MAC Address ที่ได้รับถูกต้อง
  Ready = true; //รถเข็นเริ่มการเคลื่อนที่
  check = true;
  past = true;
  digitalWrite(Status1,HIGH);
  digitalWrite(start,LOW);
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("                ");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("Movement: Moving");
}
else {
  Serial.println("//0//"); // ส่งสัญญาณบอกว่า MAC Address ที่ได้รับนั้นผิด
  check = false; //จะกลับไปวนลูปใหม่จนกว่า MAC Address จะถูกต้อง
  delay(500);
  Serial.println("input : " + String(input));
  Serial.println("macStr : " + String(macStr));
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("                ");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("Movement:  Break");
}
```

รูปที่ 3.26 คำสั่งในการแสดงผลบนหน้าจอ LCD แสดงสถานะการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.8 การออกแบบวงจรรวม

การออกแบบวงจรรวมเป็นการนำวงจรย่อยต่าง ๆ มาทำงานร่วมกันเป็นระบบเดียวอย่างมีประสิทธิภาพ วงจรรวมนี้ครอบคลุมส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ระบบรับสัญญาณบลูทูธเพื่อระบุตำแหน่งของผู้ใช้งาน ระบบควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า ระบบตรวจสอบและหลบหลีกสิ่งกีดขวางเพื่อป้องกันการชน และระบบแหล่งจ่ายไฟ แสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 วงจรรวมของระบบการทำงาน

จากรูปที่ 3.27 ซึ่งเป็นการรวมวงจรของระบบการทำงานทั้งหมด โดยมี ESP32 ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์และสัญญาณบลูทูธ เพื่อนำมาควบคุมการทำงานโมดูลและเซนเซอร์ต่าง ๆ ในระบบ ข้อมูลจะถูกอัปเดตเพื่อแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD และแอปพลิเคชันของผู้ใช้งานเพื่อให้สามารถติดตามสถานะการทำงานของระบบได้แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียลไทม์ การออกแบบนี้ช่วยให้การทำงานของระบบเป็นไปอย่างสอดคล้อง ลดความซับซ้อนในการควบคุม และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของรถเข็นสินค้า

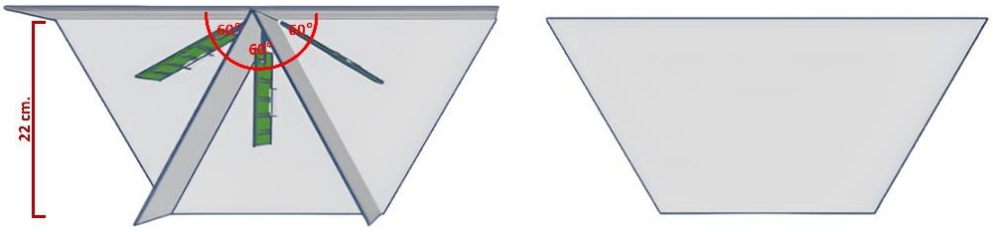
3.1.9 การออกแบบ Housing

การออกแบบ Housing สำหรับสายอากาศยากิ-อูดะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของการรับสัญญาณ โดยสายอากาศยากิ-อูดะเป็นสายอากาศที่เน้นการรับสัญญาณในทิศทางเฉพาะ การออกแบบ Housing เพื่อรองรับสายอากาศนี้ช่วยให้สามารถควบคุมการกระจายของสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การรับสัญญาณมีความเสถียรมากขึ้น และสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้แม่นยำขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.28 และ รูปที่ 3.29

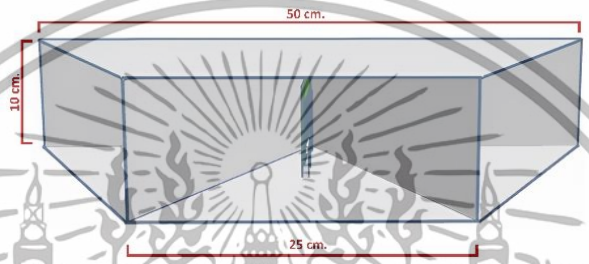
แนวคิดหลักในการออกแบบ Housing สำหรับสายอากาศยากิ-อูดะในระบบนี้ คือการกระจายสัญญาณใน สามทิศทางหลัก ได้แก่ ด้านซ้าย ตรงกลาง และด้านขวา เพื่อตรวจจับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยออกแบบให้ Housing มี มุมเอียง 60 องศา ในแต่ละด้าน ซึ่งมุมเอียงนี้มีบทบาทสำคัญในการ บีบลำคลื่นของสัญญาณ ให้มีทิศทางที่ชัดเจนและเน้นไปยังพื้นที่เป้าหมายโดยตรง ลดการปล่อยให้คลื่นกระจายออกไปในทุกทิศทางโดยไม่มีการควบคุม ผลของการทำให้ลำคลื่นแคบลงนี้ช่วยลดการรบกวนจากสัญญาณที่มาจากทิศทางอื่นและเพิ่มความเข้มข้นของพลังงานสัญญาณที่ส่งไปยังสายอากาศในแต่ละทิศทาง ซึ่งส่งผลให้การรับและประมวลผลสัญญาณมีความแม่นยำสูงขึ้น ช่วยให้ระบบสามารถติดตามตำแหน่งของแหล่งสัญญาณได้ดีขึ้น

วัสดุที่เลือกใช้ในการออกแบบ Housing และแผ่นกั้นระหว่างสายอากาศ คือ แผ่นอลูมิเนียม ซึ่ง อลูมิเนียมสามารถสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดการสูญเสียของสัญญาณในระบบและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ อลูมิเนียมยังมีคุณสมบัติที่แข็งแรง ทนต่อแรงกระแทก มีน้ำหนักเบา ทำให้สะดวกต่อการติดตั้งและขนย้าย รวมถึงลดภาระน้ำหนักของระบบโดยรวม และสามารถทนต่อความชื้นและสภาวะอากาศที่หลากหลายโดยไม่เกิดสนิมหรือเสื่อมสภาพเร็ว จึงสามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันได้โดยไม่ต้องดูแลรักษาบ่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 โมเดลการออกแบบ Housing ด้าน Top view



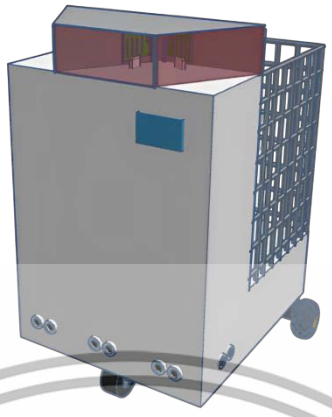
รูปที่ 3.29 โมเดลการออกแบบ Housing ด้าน Front view

3.1.10 การออกแบบโครงสร้างรถเข็นสินค้า

การออกแบบโครงสร้างของรถเข็นสินค้ามีเป้าหมายเพื่อให้สามารถจัดเก็บและเคลื่อนย้ายสินค้าได้อย่างสะดวก รวมถึงรองรับการติดตั้งและบำรุงรักษาอุปกรณ์ภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างจึงถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงแต่น้ำหนักเบา โดยเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมต่อการใช้งานและสามารถรองรับน้ำหนักของสินค้าได้ดี รูปแบบหลักของโครงสร้างเป็นกรอบสี่เหลี่ยมที่ให้ความมั่นคงและสามารถบรรจุอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ โครงสร้างได้รับการออกแบบให้สามารถประกอบและถอดแยกชิ้นได้บางส่วนเพื่อให้สะดวกต่อการซ่อมบำรุง รวมถึงสามารถติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพิ่มเติมในภายหลังได้ แสดงดังรูปที่ 3.30 และรูปที่ 3.31

วัสดุหลักที่ใช้คือแผ่นพลาสวูด ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติแข็งแรงแต่มีน้ำหนักเบา เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการทั้งความทนทานและความสะดวกในการเคลื่อนย้าย พลาสวูดสามารถทนต่อความชื้นและอุณหภูมิได้ดี ไม่เกิดการบวมหรือเสียรูปง่ายเมื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่เสมอ อีกทั้งยังไม่เป็นสนิมหรือผุกร่อนเหมือนโลหะ ทำให้สามารถใช้งานได้ยาวนานโดยไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อย แสดงดังรูปที่ 3.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 โมเดลการออกแบบโครงสร้างรถเข็นสินค้า ด้าน Front view

รูปที่ 3.31 โมเดลการออกแบบโครงสร้างรถเข็นสินค้า ด้าน Back view

รูปที่ 3.32 โครงสร้างรถเข็นสินค้า ด้าน Front view

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.11 การออกแบบแอปพลิเคชัน

3.1.11.1 การออกแบบระบบหน้าจอ UI/UX Design

การออกแบบหน้าจอ UI/UX Design เป็นกระบวนการสร้างและปรับแต่งส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface: UI) และประสบการณ์การใช้งาน (User Experience: UX) การออกแบบนี้เริ่มต้นด้วยหน้าจอสำหรับจัดการการเชื่อมต่อบลูทูธ ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเปิดหรือปิดบลูทูธได้ผ่านปุ่มเปิด/ปิดบลูทูธ มีปุ่มสำหรับค้นหาอุปกรณ์ใกล้เคียง เมื่อระบบค้นพบอุปกรณ์ (รถเข็นสินค้า) รายการอุปกรณ์ที่พบจะแสดงผลในรูปแบบรายการให้ผู้ใช้งานเลือกเชื่อมต่อหรือยกเลิกการเชื่อมต่อเพื่อควบคุมการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธ นอกจากนี้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมการทำงานของรถเข็นสินค้า โดยเริ่มหรือหยุดการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าผ่านปุ่มควบคุม ส่วนสุดท้ายจะแสดงสถานะการทำงาน เช่น สถานะเชื่อมต่อ สถานะการเคลื่อนที่ รวมถึงสถานะระดับแบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 3.33

รูปที่ 3.33 หน้าแอปพลิเคชัน

3.1.11.2 การเขียนโปรแกรมสำหรับสร้างแอปพลิเคชัน

แอปพลิเคชันนี้พัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมรถเข็นสินค้าผ่านการเชื่อมต่อบลูทูธ โดยผู้ใช้สามารถเปิด/ปิดบลูทูธ ค้นหารถเข็นสินค้าที่อยู่ใกล้ และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่กำหนดไว้ในรายการที่อนุญาต เมื่อเชื่อมต่อสำเร็จ แอปพลิเคชันจะควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าด้วยการ

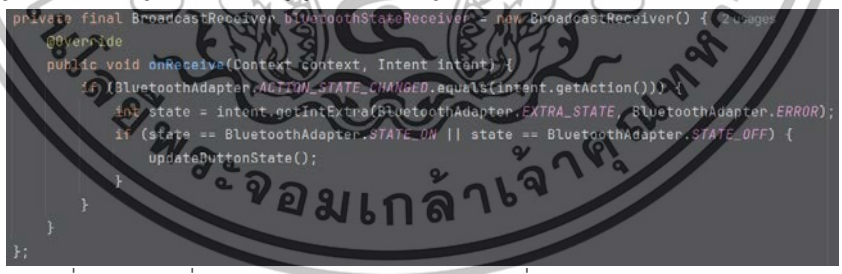
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กดปุ่มเพื่อเริ่มหรือหยุดการเคลื่อนที่ และแสดงสถานะการเชื่อมต่อ สนถานะการเคลื่อนที่ และระดับแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ แอปพลิเคชันนี้มีการจัดการสิทธิ์การใช้งานบลูทูธอย่างเหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้แอนดรอยด์เวอร์ชัน 11+

สำหรับคำสั่งในการกำหนดสิทธิ์การใช้งานในไฟล์ AndroidManifest.xml สำหรับแอปพลิเคชันแอนดรอยด์ สิทธิ์ที่จำเป็นต้องประกาศมีทั้งสิทธิ์สำหรับการเข้าถึงตำแหน่งที่ตั้งและการใช้งานบลูทูธ ซึ่งเป็นสิทธิ์ที่แอนดรอยด์กำหนดให้เมื่อแอปต้องการตรวจจับสัญญาณบลูทูธในบริเวณใกล้เคียง โดยการใช้งานบลูทูธต้องมีสิทธิ์ในการเปิดใช้งานบลูทูธ, เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่รองรับ, และค้นหาอุปกรณ์ที่อยู่ในระยะ ซึ่งการประกาศสิทธิ์เหล่านี้จะทำให้แอปสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและปลอดภัยตามข้อกำหนดของระบบแอนดรอยด์ แสดงดังรูปที่ 3.34

รูปที่ 3.34 คำสั่งสำหรับขอสิทธิ์การใช้งาน

เมื่อสถานะของบลูทูธมีการเปลี่ยนแปลง เช่น เปิดหรือปิด ระบบจะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงทันทีจากข้อมูลที่ได้รับผ่าน Intent ซึ่งจะทำให้แอปสามารถอัปเดต UI หรือสถานะปุ่มให้ตรงกับสถานะของบลูทูธ โดยการเปลี่ยนแปลงข้อความหรือสถานะการเปิด/ปิดของปุ่ม เพื่อให้ผู้ใช้งานรับรู้ถึงสถานะที่ถูกต้องของบลูทูธ แสดงดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 คำสั่งสำหรับการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสถานะของบลูทูธ

การค้นหาอุปกรณ์บลูทูธ ระบบจะทำการตรวจสอบข้อมูลที่ได้รับจาก Intent ที่ส่งมาจากการค้นหาอุปกรณ์ในบริเวณใกล้เคียง เช่น ชื่อและที่อยู่ของอุปกรณ์ เพื่อตรวจสอบว่าเป็นอุปกรณ์ที่ต้องการเชื่อมต่อหรือไม่ หากพบอุปกรณ์ที่ตรงกับรายการอนุญาต เช่น รถเข็นสินค้า ระบบจะตรวจสอบสิทธิ์ในการเข้าถึงบลูทูธจากการกำหนดใน AndroidManifest.xml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากได้รับสิทธิ์ที่เพียงพอ ระบบจะกรองอุปกรณ์ที่ต้องการและเลือกเฉพาะอุปกรณ์ที่อนุญาตให้เชื่อมต่อได้ เช่น รถเข็นสินค้า ช่วยเพิ่มความปลอดภัยจากการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ไม่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 3.36

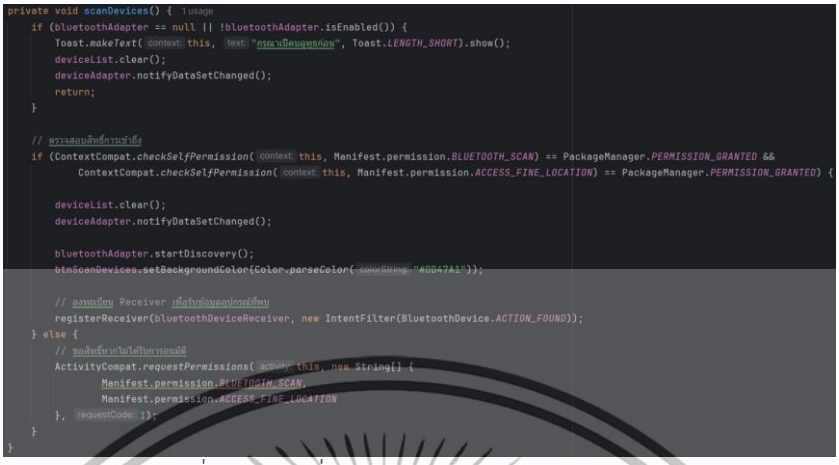
รูปที่ 3.36 คำสั่งสำหรับการรับข้อมูลจากระบบเมื่ออุปกรณ์บลูทูธถูกค้นพบ

ฟังก์ชันเปิด/ปิดบลูทูธจะทำการตรวจสอบสถานะของบลูทูธก่อน หากบลูทูธปิดอยู่ ระบบจะขออนุญาตจากผู้ใช้ให้เปิดบลูทูธ โดยการแสดงหน้าต่างขออนุญาตเพื่อเปิดบลูทูธ เมื่อผู้ใช้เปิดบลูทูธแล้ว ระบบจะทำการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์บลูทูธ ในกรณีที่บลูทูธเปิดอยู่แล้วและผู้ใช้งานต้องการปิด ระบบจะตัดการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์บลูทูธทั้งหมดและแสดงข้อความแจ้งว่าบลูทูธถูกปิด แสดงดังรูปที่ 3.37

รูปที่ 3.37 คำสั่งสำหรับการเปิด/ปิดบลูทูธ

ฟังก์ชันการค้นหาอุปกรณ์บลูทูธจะเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบว่าบลูทูธเปิดหรือไม่ หากยังปิดอยู่ ระบบจะแจ้งเตือนให้เปิดบลูทูธ หากบลูทูธเปิดแล้ว ระบบจะตรวจสอบสิทธิ์การเข้าถึงบลูทูธ หากได้รับอนุญาตจากผู้ใช้ ระบบจะเริ่มการค้นหาอุปกรณ์บลูทูธ และหากไม่ได้รับอนุญาต ระบบจะขอสิทธิ์จากผู้ใช้เพื่อให้สามารถทำการค้นหาได้ แสดงดังรูปที่ 3.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.38 คำสั่งสำหรับการค้นหาอุปกรณ์บลูทูธ

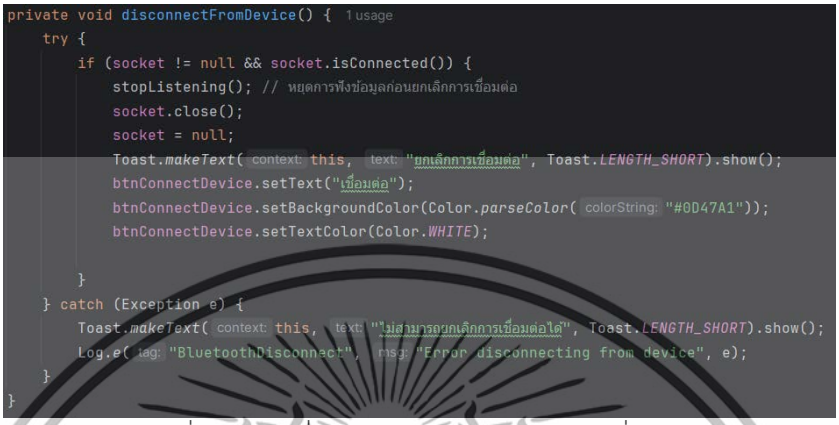
ฟังก์ชันที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ผู้ใช้เลือกจากรายการ เมื่อได้รับอนุญาตแล้ว ระบบจะพยายามเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่เลือกโดยใช้ที่อยู่บลูทูธ (MAC address) เมื่อเชื่อมต่อสำเร็จ ระบบจะแสดงข้อความแจ้งว่าการเชื่อมต่อสำเร็จและอัปเดตสถานะการเชื่อมต่อใน UI รวมถึงเริ่มต้นการรับข้อมูลจากอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ แสดงดังรูปที่ 3.39

รูปที่ 3.39 คำสั่งสำหรับฟังก์ชันการเชื่อมต่อ

ฟังก์ชันการยกเลิกการเชื่อมต่อทำงานเมื่อมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์บลูทูธแล้ว หากผู้ใช้ต้องการยกเลิกการเชื่อมต่อ เช่น ปิดการเชื่อมต่อจากอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่ ฟังก์ชันนี้จะดำเนินการตัดการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์และอัปเดตสถานะการเชื่อมต่อของแอปพลิเคชันโดยอัตโนมัติ

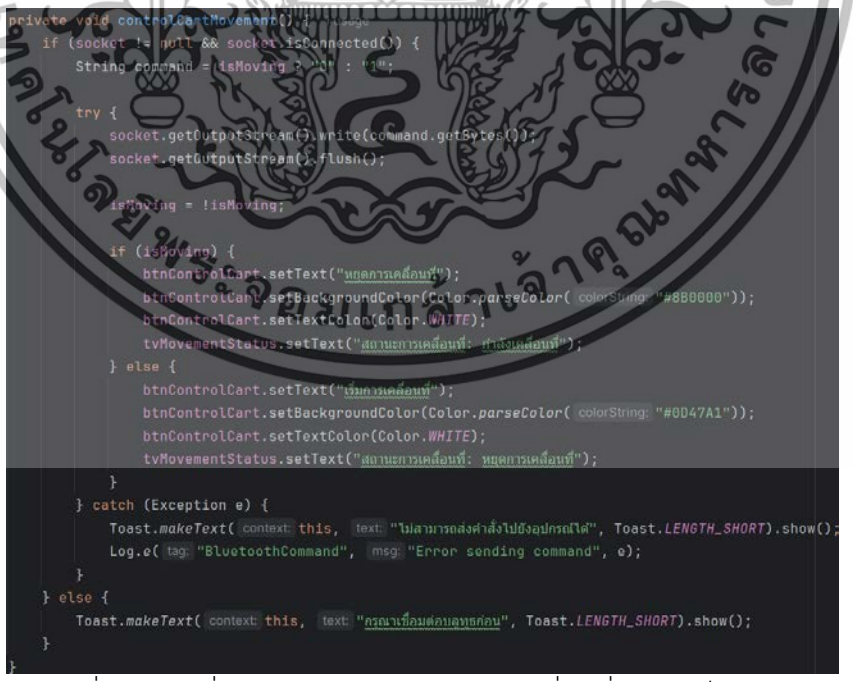
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อแจ้งให้ผู้ใช้ทราบว่าไม่สามารถใช้งานบลูทูธต่อได้ในขณะนั้น สถานะปุ่มหรือข้อความในแอปพลิเคชันจะเปลี่ยนไปตามสถานะการเชื่อมต่อที่อัปเดตใหม่ แสดงดังรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 คำสั่งสำหรับฟังก์ชันการยกเลิกเชื่อมต่อ

ฟังก์ชันการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าที่เชื่อมต่อผ่านบลูทูธ ระบบจะส่งคำสั่งที่ต้องการให้รถเข็นทำตาม เช่น ส่งคำสั่ง "1" เพื่อให้รถเข็นสินค้าเริ่มเคลื่อนที่ หรือ "0" เพื่อให้หยุดการเคลื่อนที่ เมื่อได้รับคำสั่ง ระบบจะทำการอัปเดตสถานะการเคลื่อนที่บนแอปพลิเคชัน หากไม่มีการเชื่อมต่อบลูทูธ ระบบจะแสดงข้อความขอให้ผู้ใช้งานเชื่อมต่อบลูทูธก่อนทำการส่งคำสั่ง เพื่อให้การควบคุมรถเข็นสินค้าดำเนินการได้อย่างถูกต้อง แสดงดังรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 คำสั่งสำหรับฟังก์ชันควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-WROOM-32U

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-WROOM-32U ซึ่งเป็นหน่วยประมวลผลหลักในการควบคุมการทำงานของระบบรถเข็นสินค้าอัตโนมัติ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์นี้มีความสามารถในการเชื่อมต่อไร้สายผ่านบลูทูธ สามารถรับสัญญาณบลูทูธจากโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งาน เพื่อตรวจจับตำแหน่งและควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า

3.2.2 สายอากาศยากิ-อูดะ แบบ PCB

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้สายอากาศยากิ-อูดะ แบบ PCB เพื่อรับสัญญาณบลูทูธจากโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้ ซึ่งใช้ในการวัดค่า RSSI เพื่อระบุตำแหน่งของผู้ใช้งาน อุปกรณ์นี้ถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงในด้านการรับสัญญาณจากทิศทางที่ต้องการ

3.2.3 สายอากาศรอบทิศทาง

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้สายอากาศรอบทิศทางเพื่อรับสัญญาณบลูทูธจากโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งาน โดยรับสัญญาณได้จากทุกทิศทางรอบตัว ทำให้สามารถตรวจจับสัญญาณจากอุปกรณ์ที่อยู่ในระยะใกล้เคียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อุปกรณ์นี้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจจับตำแหน่งของผู้ใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง

3.2.4 โมดูลสวิตช์ RF HMC241

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้โมดูลสวิตช์ HMC241 ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ RF ในการเลือกทิศทางของสัญญาณที่สายอากาศยากิ-อูดะรับมา เพื่อเปรียบเทียบระดับสัญญาณจากทิศทางต่างๆ ช่วยให้ระบบสามารถระบุทิศทางของผู้ใช้งานได้อย่างเหมาะสม

3.2.5 โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป GY-521 เพื่อวัดการหมุนของรถเข็นสินค้าในระหว่างการเคลื่อนที่ ข้อมูลจากโมดูลนี้ช่วยให้ระบบสามารถปรับทิศทางของรถเข็นสินค้าได้อย่างแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 โมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้โมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก HC-SR04 เพื่อใช้ในการตรวจจับสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหน้ารถเข็นสินค้า โดยการวัดระยะทางด้วยคลื่นเสียง ทำให้รถเข็นสินค้าสามารถหยุดการเคลื่อนที่ได้เมื่อพบกับสิ่งกีดขวางด้านหน้า

3.2.7 โมดูลขับมอเตอร์ BTS7960

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้โมดูลขับมอเตอร์ BTS7960 เพื่อใช้ควบคุมการขับมอเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ในรถเข็นสินค้า ช่วยในการปรับความเร็วและทิศทางของมอเตอร์

3.2.8 มอเตอร์เกียร์หนอน

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้มอเตอร์เกียร์หนอน เพื่อใช้ขับเคลื่อนรถเข็นสินค้า โดยเกียร์หนอนช่วยให้มอเตอร์ทำงานด้วยแรงบิดสูง และสามารถควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ได้

3.2.9 โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้โมดูลแปลงแรงดันไฟฟ้า LM2596 เพื่อใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดที่มีค่า +12V และ -12V ให้กลายเป็น +5V และ GND เพื่อจ่ายพลังงานให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ในระบบ

3.2.10 โมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า INA226

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้โมดูลเซนเซอร์ INA226 สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในระบบรถเข็นสินค้า โดยสามารถตรวจสอบระดับแรงดันไฟฟ้าและนำไปใช้คำนวณเปอร์เซ็นต์ของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ ข้อมูลที่ได้สามารถแสดงผลให้ผู้ใช้งานทราบสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ ช่วยให้สามารถวางแผนการใช้งานและชาร์จแบตเตอรี่ได้อย่างเหมาะสม

3.2.11 จอแสดงผล LCD

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้จอแสดงผล LCD เพื่อใช้แสดงข้อมูลสถานะการเชื่อมต่ออุปกรณ์ และสถานะการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.12 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักของระบบรถเข็นสินค้า โดยมีความสามารถในการเก็บพลังงานสูงเพียงพอที่จะจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์และอุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบ

3.2.13 แผ่นอลูมิเนียม

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้แผ่นอลูมิเนียม เพื่อใช้เป็นวัสดุในการสร้างโครงสร้าง Housing ของสายอากาศยากิ-อูดะ ซึ่งมีความแข็งแรงทนทานและสามารถป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในจากการกระแทกและความชื้น

3.2.14 แผ่นพลาสวูด

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้แผ่นพลาสวูด เพื่อใช้ทำโครงสร้างหลักของรถเข็นสินค้า โดยเป็นวัสดุน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับรองรับการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ

3.2.15 แผ่นตะแกรง

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้ตะแกรง เพื่อใช้ในการสร้างตะกร้าสำหรับบรรทุกสินค้า โดยติดตั้งไว้บนโครงรถเข็นสินค้าเพื่อให้ผู้ใช้สามารถวางสินค้าในขณะเดินซื้อสินค้า

3.2.16 เบรกเกอร์

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้เบรกเกอร์ เพื่อใช้ในการป้องกันระบบไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าที่เกินพิกัด เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเกินกว่าค่าที่กำหนด เบรกเกอร์จะทำการตัดวงจรไฟฟ้าโดยอัตโนมัติเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบ

3.2.17 ฟิวส์

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้ฟิวส์ เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินที่ติดตั้งอยู่ในวงจรไฟฟ้า มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไปไหลผ่านและทำลายอุปกรณ์หรือระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.18 ล้ออิสระ

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้ล้ออิสระถูกติดตั้งที่ด้านหน้าของรถเข็นสินค้า เพื่อให้สามารถหมุนได้อิสระและช่วยในการปรับทิศทางของรถเข็นสินค้าขณะเคลื่อนที่

3.2.19 ล้อขับเคลื่อน

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้ล้อขับเคลื่อนติดตั้งอยู่ที่ด้านหลังของรถเข็นสินค้า ทำหน้าที่ขับเคลื่อนรถเข็นสินค้าให้เคลื่อนที่ตามการควบคุมจากมอเตอร์

3.2.20 โปรแกรม Arduino IDE

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้โปรแกรม Arduino IDE เพื่อเป็นเครื่องมือในการพัฒนาและอัปโหลดโค้ดไปยัง ESP32 ช่วยให้สามารถพัฒนาโปรแกรมควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ และมี Serial Monitor ที่ช่วยในการตรวจสอบข้อมูลที่ส่งมาจากเซนเซอร์และอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ

3.2.21 โปรแกรม Proteus

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้โปรแกรม Proteus เพื่อจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ก่อนสร้างขึ้นจริง สามารถตรวจสอบความถูกต้องของวงจรที่ออกแบบ และใช้ในการออกแบบลายวงจรพิมพ์ (PCB) เพื่อให้สามารถผลิตและประกอบวงจรได้อย่างเป็นระบบ

3.2.22 โปรแกรม Tinkercad

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้โปรแกรม Tinkercad เพื่อใช้ในการออกแบบและสร้างแบบจำลอง 3 มิติของโครงสร้าง Housing และตัวรถเข็นสินค้า

3.2.23 โปรแกรม Android Studio

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้ Android Studio เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมรถเข็นสินค้า ผ่านบลูทูธ ผู้ใช้สามารถเชื่อมต่อ สั่งเคลื่อนที่หรือหยุด และตรวจสอบสถานะระบบ เช่น ระดับแบตเตอรี่และสัญญาณเซนเซอร์แบบเรียลไทม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.23 โปรแกรม Wireshark

ในปริญญานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำเลือกใช้ Wireshark เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบและวิเคราะห์การเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือและรถเข็นสินค้าผ่านบลูทูธ โดยสามารถดักจับแพ็กเกจข้อมูลที่รับ-ส่งระหว่างอุปกรณ์ได้แบบเรียลไทม์ ทำให้สามารถตรวจสอบรายละเอียดของการสื่อสาร เช่น อุปกรณ์ต้นทางและปลายทาง รูปแบบของแพ็กเก็ต ขนาดของข้อมูล โปรโตคอล และใช้ในการตรวจจับความผิดปกติในการรับ-ส่งข้อมูล เช่น การพยายามแทรกแซงการเชื่อมต่อ

3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

3.3.1 การทดสอบการเชื่อมต่อโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า

เป็นการทดสอบเพื่อแสดงผลลัพธ์ของการเชื่อมต่อระบบบลูทูธระหว่างรถเข็นสินค้าและโทรศัพท์มือถือ โดยทดสอบความสามารถในการเชื่อมต่อและความเสถียรของการเชื่อมต่อ รวมถึงการอ่านค่าที่อยู่บลูทูธของโทรศัพท์มือถือเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ถูกต้อง

3.3.2 การทดสอบการตรวจสอบค่า RSSI เพื่อระบุตำแหน่ง

เป็นการทดสอบเพื่อแสดงผลลัพธ์ของการตรวจสอบค่า RSSI ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของโทรศัพท์มือถือเมื่อเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้า โดยใช้สายอากาศยากิ-อูดะเพื่อวิเคราะห์ทิศทางของสัญญาณและระบุทิศทางที่มีค่าสัญญาณแรงที่สุด พร้อมทั้งทดสอบความแม่นยำในการระบุทิศทางในระยะทางต่างๆ

3.3.3 การทดสอบการควบคุมทิศทาง

เป็นการทดสอบเพื่อแสดงผลลัพธ์ของการควบคุมการปรับเปลี่ยนทิศทางของรถเข็นสินค้าเมื่อระบบพบค่า RSSI ที่แรงที่สุดในแต่ละทิศทาง โดยใช้โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคปเพื่อตรวจวัดองศาในการหมุนของรถเข็นสินค้า เพื่อให้สามารถปรับทิศทางการเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำและสอดคล้องกับทิศทางของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การทดสอบการตรวจจับสิ่งกีดขวางและหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

เป็นการทดสอบเพื่อแสดงผลลัพธ์ของระบบตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวางของรถเข็นสินค้า โดยใช้เซนเซอร์ระยะทางเพื่อตรวจหาวัตถุที่อยู่ในเส้นทางการเคลื่อนที่ หากตรวจพบสิ่งกีดขวาง ระบบจะประมวลผลเพื่อตัดสินใจหยุดรถเข็นสินค้าหรือปรับทิศทางการเคลื่อนที่ใหม่เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวาง และทดสอบความแม่นยำของเซนเซอร์ในระยะต่าง ๆ

3.3.5 การทดสอบการรับน้ำหนักของรถเข็นสินค้า

เป็นการทดสอบเพื่อแสดงผลลัพธ์ของความสามารถในการรับน้ำหนักของรถเข็นสินค้า โดยทำการทดสอบในน้ำหนักต่างๆ เพื่อประเมินความเสถียรของการเคลื่อนที่และการควบคุมทิศทางของรถเข็นสินค้าภายใต้ภาระน้ำหนักที่แตกต่างกัน รวมถึงทดสอบว่าเมื่อรับน้ำหนักสูงสุดที่กำหนดแล้ว ระบบยังคงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

3.3.6 การทดสอบการตรวจสอบระดับพลังงานแบตเตอรี่

เป็นการทดสอบเพื่อแสดงผลลัพธ์ของการตรวจสอบระดับพลังงานของแบตเตอรี่ที่ใช้จ่ายไฟให้กับรถเข็นสินค้า โดยใช้วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบระดับพลังงานคงเหลือของแบตเตอรี่ ระบบจะทดสอบการแจ้งเตือนเมื่อระดับพลังงานต่ำกว่าค่าที่กำหนด

3.3.7 การทดสอบการแสดงผลบนหน้าจอ LCD

เป็นการทดสอบเพื่อแสดงผลลัพธ์สถานะของรถเข็นสินค้าบนหน้าจอ LCD ในการแสดงสถานะการเชื่อมต่ออุปกรณ์และสถานะการเคลื่อนที่

3.3.8 การทดสอบการทำงานของแอปพลิเคชัน

เป็นการทดสอบเพื่อแสดงผลลัพธ์ของการทำงานของแอปพลิเคชันที่ใช้เชื่อมต่อควบคุมและติดตามการทำงานของรถเข็นสินค้า โดยทดสอบการค้นหาอุปกรณ์บลูทูธ การเชื่อมต่อและยกเลิกการเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้า รวมถึงการแสดงสถานะการทำงานของรถเข็นสินค้า ทดสอบความถูกต้องของข้อมูลที่แสดงในแอปพลิเคชัน และการตอบสนองของระบบเมื่อผู้ใช้งานส่งคำสั่งผ่านแอปพลิเคชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบการเชื่อมต่อโทรศัพท์มือถือกับรถเข็นสินค้า

4.1.1 ผลการทดสอบการนำ ESP32 ค้นหาสัญญาณบลูทูธของโทรศัพท์มือถือ

ผลการทดสอบการใช้งาน ESP32 ในการค้นหาสัญญาณบลูทูธจากโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานได้แสดงให้เห็นว่า เมื่อโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานทำการเชื่อมต่อกับระบบของรถเข็นสินค้า ESP32 สามารถตรวจจับสัญญาณบลูทูธจากอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อได้อย่างแม่นยำ โดยแสดงผลที่อยู่บลูทูธของโทรศัพท์มือถือที่เชื่อมต่อ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่ช่วยให้ระบบสามารถระบุอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อได้อย่างถูกต้องและแน่ใจว่าไม่มีการรบกวนจากอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ไม่ได้รับอนุญาตหรือไม่ได้มีส่วนร่วมในกระบวนการเชื่อมต่อ โดยข้อมูลที่แสดงในระบบสามารถใช้เพื่อยืนยันการเชื่อมต่อที่ถูกต้อง แสดงดังรูปที่ 4.1

หลังจากที่การเชื่อมต่อบลูทูธสำเร็จ ESP32 จะทำการวัดค่า RSSI ที่ได้รับผ่านสายอากาศยากิ-อูดะ เพื่อใช้ในการคำนวณตำแหน่งและทิศทางของโทรศัพท์มือถือที่เชื่อมต่ออยู่ในขณะนั้น การวัด RSSI จะช่วยให้ระบบสามารถประมาณตำแหน่งของโทรศัพท์มือถือได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าให้สามารถติดตามผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนั้น, ในระหว่างที่ ESP32 กำลังตรวจจับและติดตามการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งาน, ระบบจะทำการค้นหาสัญญาณบลูทูธอย่างต่อเนื่อง เพื่ออัปเดตค่า RSSI ที่ได้รับในแบบเรียลไทม์ ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถปรับเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าให้สอดคล้องกับตำแหน่งของผู้ใช้งานได้ทันทีและอย่างแม่นยำ เมื่อผู้ใช้งานเคลื่อนที่ไปในทิศทางใด, ESP32 จะอัปเดตข้อมูลและคำนวณทิศทางใหม่ให้รถเข็นสินค้าเดินตามได้อย่างเหมาะสม โดยสามารถตอบสนองต่อการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ทำให้รถเข็นสามารถติดตามผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ในแต่ละช่วงเวลา

```
Name: Phone 1, Address: f4:d6:20:ac:44:1f, cod: 0x5a020c, rssi: -59
Name: Phone 1, Address: f4:d6:20:ac:44:1f, cod: 0x5a020c, rssi: -39
Name: Phone 1, Address: f4:d6:20:ac:44:1f, cod: 0x5a020c, rssi: -55
```

รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบการเชื่อมต่ออุปกรณ์และอ่านค่า RSSI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดสอบการใช้โปรแกรม Wireshark เพื่อตรวจสอบการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธ

ผลการทดสอบการรักษาการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธระหว่างรถเข็นสินค้าและอุปกรณ์ของผู้ใช้งานแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถรักษาการเชื่อมต่อได้อย่างเสถียร แม้จะมีอุปกรณ์อื่นพยายามเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้า การทดสอบนี้ใช้โน๊ตบุ๊คจำลองเป็นอุปกรณ์บลูทูธของผู้ใช้งานเพื่อดักจับแพ็กเกจข้อมูลผ่านโปรแกรม Wireshark และนำข้อมูลที่ได้มาตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อ, การยกเลิกการเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับรถเข็นสินค้า นอกจากนี้ยังตรวจสอบแพ็กเก็ตข้อมูลเมื่อมีอุปกรณ์อื่นพยายามเชื่อมต่อในระหว่างที่เชื่อมต่ออยู่กับอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน

4.1.2.1 ผลการทดสอบการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธ

ผลการทดสอบการเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับรถเข็นสินค้าสำเร็จ แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยมี HCI Event: Connect Complete (Frame 3) เป็นตัวบ่งชี้หลักว่าการเชื่อมต่อเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากการแลกเปลี่ยนแพ็กเกจHCI Command: Create Connection (Frame 1) และ HCI Event: Command Status (Frame 2) ตามลำดับ ดังนี้

1) HCI Command (Frame 1): คือคำสั่ง "Create Connection" ที่ส่งจากอุปกรณ์ผู้ใช้งานปยังรถเข็นสินค้าเพื่อเริ่มการเชื่อมต่อ

2) HCI Event (Frame 2, 3): คือการตอบกลับจากรถเข็นสินค้า ซึ่งประกอบด้วย "Command Status" ยืนยันการรับคำสั่ง และ "Connect Complete" แจ้งการเชื่อมต่อสำเร็จ

	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000	host	controller	HCI_CMD	17	Sent Create Connection
2	0.064570	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Command Status (Create Connection)
3	0.850544	controller	host	HCI_EVT	14	Rcvd Connect Complete
4	0.850562	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Read RSSI
5	0.852524	controller	host	HCI_EVT	10	Rcvd Command Complete (Read RSSI)
6	0.859827	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	15	Rcvd Information Request (Extended Features Mask)
7	0.862889	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	17	Sent Connection Request (SDP, SCID: 0x0040)
8	0.862930	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Role Discovery
9	0.863338	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	21	Sent Information Response (Extended Features Mask, Success)
10	0.864589	controller	host	HCI_EVT	10	Rcvd Command Complete (Role Discovery)
11	0.864670	host	controller	HCI_CMD	8	Sent Write Automatic Flush Timeout
12	0.866616	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Command Complete (Write Automatic Flush Timeout)
13	0.866656	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Read Clock offset
14	0.869063	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Command Status (Read Clock offset)
15	0.869143	host	controller	HCI_CMD	7	Sent Read Tx Power Level
16	0.871548	controller	host	HCI_EVT	10	Rcvd Command Complete (Read Tx Power Level)
17	0.871622	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Read Link Quality
18	0.873606	controller	host	HCI_EVT	10	Rcvd Command Complete (Read Link Quality)
19	0.873737	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Read Link Supervision Timeout
20	0.875781	controller	host	HCI_EVT	11	Rcvd Command Complete (Read Link Supervision Timeout)
21	0.875830	host	controller	HCI_CMD	7	Sent Read Tx Power Level
22	0.877528	controller	host	HCI_EVT	10	Rcvd Command Complete (Read Tx Power Level)
23	0.907538	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
24	0.908526	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Read Clock Offset Complete
25	0.909528	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
26	1.177333	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	21	Rcvd Connection Response - Pending (SCID: 0x0040)
27	1.178463	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	15	Rcvd Information Request (Fixed Channels Supported)
28	1.178472	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	25	Sent Information Response (Fixed Channels Supported, Success)
29	1.182525	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
30	1.188566	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	21	Rcvd Connection Response - Success (SCID: 0x0040, DCID: 0x0040)

รูปที่ 4.2 แพ็กเกจข้อมูลเมื่อเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับรถเข็นสินค้าสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 ผลการทดสอบการยกเลิกเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธ

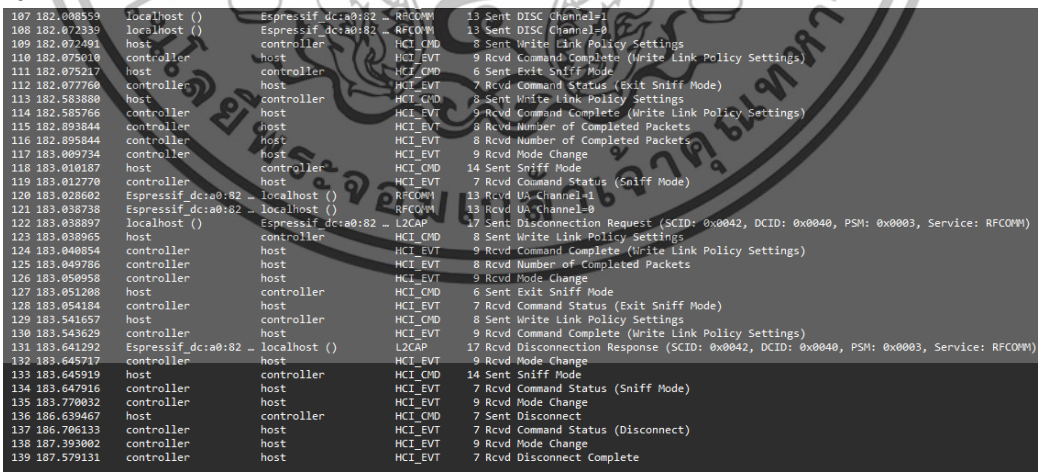
ผลการทดสอบการยกเลิกเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับรถเข็นสินค้าสำเร็จ แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยการยกเลิกการเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างทั้งสองอุปกรณ์นั้นได้รับการยืนยันจาก HCI Event: Disconnect Complete (Frame 139) ซึ่งเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นหลังจากมีการแลกเปลี่ยนแพ็กเกจ RFCOMM DISC,L2CAP Disconnection Request/Response และ HCI Command: Disconnect ตามลำดับ ดังนี้

1) RFCOMM DISC (Frames 107, 108) : อุปกรณ์ผู้ใช้งานและรถเข็นสินค้าแลกเปลี่ยนแพ็กเกจ RFCOMM DISC เพื่อร้องขอยกเลิกการเชื่อมต่อ RFCOMM ซึ่งเป็นการจำลอง Serial Port บนบลูทูธ

2) L2CAP Disconnection Request/Response (Frames 122, 131) : อุปกรณ์ผู้ใช้งานและรถเข็นสินค้าแลกเปลี่ยนแพ็กเกจ L2CAP Disconnection Request/Response เพื่อยกเลิกการเชื่อมต่อในระดับ L2CAP

3) HCI Command: Disconnect (Frame 136): อุปกรณ์ของผู้ใช้งานส่งคำสั่ง HCI "Disconnect" ไปยังรถเข็นสินค้า ซึ่งเป็นคำขอการยกเลิกการเชื่อมต่อบลูทูธในระดับ HCI (Host Controller Interface) เพื่อยุติการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ทั้งสอง

4) HCI Event: Disconnect Complete (Frame 139): รถเข็นสินค้าจะส่ง Event "Disconnect Complete" กลับมายังอุปกรณ์ผู้ใช้งาน เพื่อแจ้งว่า การยกเลิกการเชื่อมต่อบลูทูธเสร็จสมบูรณ์แล้ว



107	182.008559	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	RFCOMM	13	Sent DISC Channel=1
108	182.072339	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	RFCOMM	13	Sent DISC Channel=0
109	182.072491	host	controller	HCI_CMD	8	Sent Write Link Policy Settings
110	182.075010	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Command Complete (Write Link Policy Settings)
111	182.075217	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Exit Sniff Mode
112	182.077760	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Command Status (Exit Sniff Mode)
113	182.583880	host	controller	HCI_CMD	8	Sent Write Link Policy Settings
114	182.585766	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Command Complete (Write Link Policy Settings)
115	182.893844	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
116	182.895844	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
117	183.009734	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Mode Change
118	183.010187	host	controller	HCI_CMD	14	Sent Sniff Mode
119	183.012770	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Command Status (Sniff Mode)
120	183.028602	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	RFCOMM	13	Rcvd UA Channel=1
121	183.038738	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	RFCOMM	13	Rcvd UA Channel=0
122	183.038897	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	17	Sent Disconnection Request (SCID: 0x0042, DCID: 0x0040, PSM: 0x0003, Service: RFCOMM)
123	183.038965	host	controller	HCI_CMD	8	Sent Write Link Policy Settings
124	183.040854	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Command Complete (Write Link Policy Settings)
125	183.049786	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
126	183.050958	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Mode Change
127	183.051208	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Exit Sniff Mode
128	183.054184	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Command Status (Exit Sniff Mode)
129	183.541657	host	controller	HCI_CMD	8	Sent Write Link Policy Settings
130	183.543629	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Command Complete (Write Link Policy Settings)
131	183.641292	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	17	Rcvd Disconnection Response (SCID: 0x0042, DCID: 0x0040, PSM: 0x0003, Service: RFCOMM)
132	183.645717	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Mode Change
133	183.645919	host	controller	HCI_CMD	14	Sent Sniff Mode
134	183.647916	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Command Status (Sniff Mode)
135	183.770032	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Mode Change
136	186.639467	host	controller	HCI_CMD	7	Sent Disconnect
137	186.706133	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Command Status (Disconnect)
138	187.393002	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Mode Change
139	187.579131	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Disconnect Complete

รูปที่ 4.3 แพ็กเกจข้อมูลเมื่อยกเลิกเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับรถเข็นสินค้าสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 ผลการทดสอบการตรวจสอบแพ็กเกจข้อมูลเมื่อมีอุปกรณ์ภายนอกพยายามเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้า

ผลการทดสอบการตรวจสอบแพ็กเกจข้อมูลในการเชื่อมต่อสัญญาณบลูทูธของอุปกรณ์ภายนอกกับรถเข็นสินค้าที่มีการเชื่อมต่ออยู่แล้ว แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าอุปกรณ์ภายนอกไม่สามารถเชื่อมต่อได้สำเร็จและมีการยกเลิกการเชื่อมต่อ ดังนี้

1) HCI Event: Connect Complete (Frame 5): ถึงแม้จะมีเหตุการณ์นี้เกิดขึ้น แต่เกิดขึ้นหลังจากมีการเปลี่ยนแปลง Link Supervision Timeout ซึ่งบ่งชี้ว่าการเชื่อมต่ออาจไม่สมบูรณ์

2) L2CAP Connection Request/Response (Frames 8, 26, 31, 44, 47, 74, 79): มีการร้องขอและตอบรับการเชื่อมต่อ L2CAP หลายครั้ง แต่การเชื่อมต่อไม่เสถียร และมีแนวโน้มที่จะถูกยกเลิกในภายหลัง

3) RFCOMM SABM/UA (Frames 88, 90, 94, 97): มีการร้องขอและตอบรับการเชื่อมต่อ RFCOMM (Serial Port) แต่ก็ไม่สำเร็จ และมีการยกเลิกการเชื่อมต่อในที่สุด

4)L2CAP Disconnection Request/Response (Frames 41, 43, 56-58, 107-108): มีการแลกเปลี่ยนแพ็กเกจ Disconnection L2CAP หลายครั้ง ซึ่งเป็นการยืนยันการยกเลิกการเชื่อมต่อในระดับ L2CAP

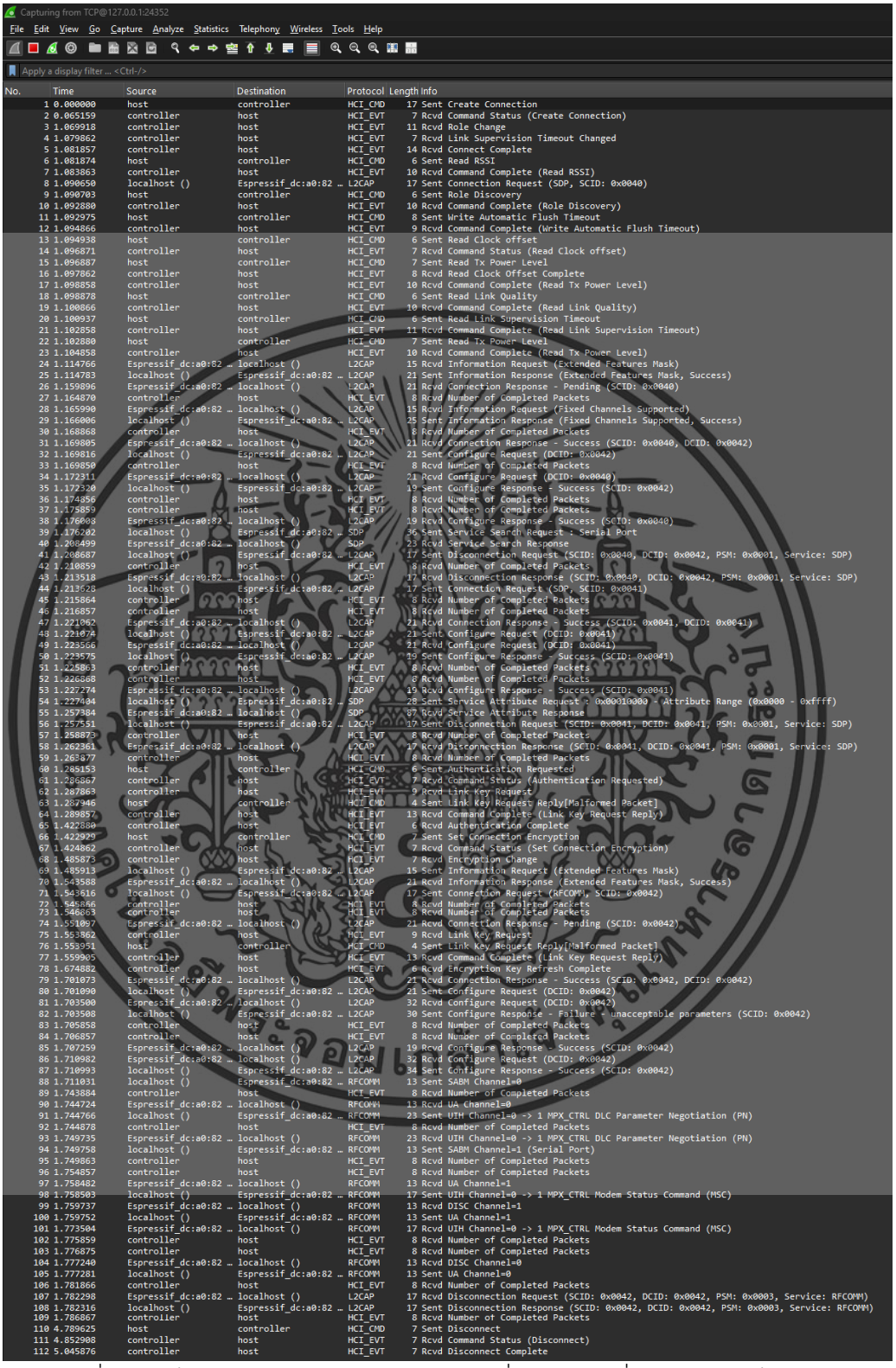
5) RFCOMM DISC/UA (Frames 99, 100, 104, 105): มีการแลกเปลี่ยนแพ็กเกจ DISC (Disconnect) RFCOMM หลายครั้ง เป็นการยืนยันการยกเลิกการเชื่อมต่อ RFCOMM (Serial Port)

6) HCI Command: Disconnect (Frame 110): อุปกรณ์ภายนอกทำการส่งคำสั่ง HCI "Disconnect" เพื่อยกเลิกการเชื่อมต่อบลูทูธ

7) HCI Event: Disconnect Complete (Frame 112): แจ้งว่าการยกเลิกการเชื่อมต่อบลูทูธเสร็จสมบูรณ์แล้ว

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ภายนอกพยายามเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้า แต่ไม่สามารถทำการเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้าที่มีอุปกรณ์ของผู้ใช้งานเชื่อมต่ออยู่แล้วได้สำเร็จ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการรักษาความเสถียรของการเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างรถเข็นสินค้าและอุปกรณ์ผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้จะมีอุปกรณ์เครื่องอื่นพยายามเชื่อมต่อในระหว่างที่การเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างรถเข็นสินค้ากับอุปกรณ์ผู้ใช้งานยังคงดำเนินการอยู่ การพยายามเชื่อมต่อของอุปกรณ์ภายนอกจะถูกยกเลิกในที่สุด โดยการยกเลิกการเชื่อมต่อเหล่านี้แสดงถึงการจัดการที่ดีในการป้องกันการรบกวนจากอุปกรณ์อื่นและการรักษาความต่อเนื่องของการเชื่อมต่อหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Capturing from TCP@127.0.0.1:24352

File Edit View Go Capture Analyze Statistics Telephony Wireless Tools Help

Apply a display filter ... <Ctrl-/>

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000	host	controller	HCI_CMD	17	Sent Create Connection
2	0.065159	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Command Status (Create Connection)
3	1.069918	controller	host	HCI_EVT	11	Rcvd Role Change
4	1.079862	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Link Supervision Timeout Changed
5	1.081857	controller	host	HCI_EVT	14	Rcvd Connect Complete
6	1.081874	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Read RSSI
7	1.083863	controller	host	HCI_EVT	10	Rcvd Command Complete (Read RSSI)
8	1.090650	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	17	Sent Connection Request (SDP, SCID: 0x0040)
9	1.090703	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Role Discovery
10	1.092880	controller	host	HCI_EVT	10	Rcvd Command Complete (Role Discovery)
11	1.092975	host	controller	HCI_CMD	8	Sent Write Automatic Flush Timeout
12	1.094866	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Command Complete (Write Automatic Flush Timeout)
13	1.094938	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Read Clock offset
14	1.096871	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Command Status (Read Clock offset)
15	1.096887	host	controller	HCI_CMD	7	Sent Read Tx Power Level
16	1.097862	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Read Clock Offset Complete
17	1.098858	controller	host	HCI_EVT	10	Rcvd Command Complete (Read Tx Power Level)
18	1.098878	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Read Link Quality
19	1.100866	controller	host	HCI_EVT	10	Rcvd Command Complete (Read Link Quality)
20	1.100937	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Read Link Supervision Timeout
21	1.102858	controller	host	HCI_EVT	11	Rcvd Command Complete (Read Link Supervision Timeout)
22	1.102880	host	controller	HCI_CMD	7	Sent Read Tx Power Level
23	1.104858	controller	host	HCI_EVT	10	Rcvd Command Complete (Read Tx Power Level)
24	1.114766	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	15	Rcvd Information Request (Extended Features Mask)
25	1.114783	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	21	Sent Information Response (Extended Features Mask, Success)
26	1.159896	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	21	Rcvd Connection Response - Pending (SCID: 0x0040)
27	1.164870	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
28	1.165990	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	15	Rcvd Information Request (Fixed Channels Supported)
29	1.166006	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	25	Sent Information Response (Fixed Channels Supported, Success)
30	1.168868	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
31	1.169805	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	21	Rcvd Connection Response - Success (SCID: 0x0040, DCID: 0x0042)
32	1.169816	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	21	Sent Configure Request (DCID: 0x0042)
33	1.169850	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
34	1.172311	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	21	Rcvd Configure Request (DCID: 0x0040)
35	1.172320	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	19	Sent Configure Response - Success (SCID: 0x0042)
36	1.174856	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
37	1.175859	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
38	1.176008	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	19	Rcvd Configure Response - Success (SCID: 0x0040)
39	1.176202	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	SDP	36	Sent Service Search Request : Serial Port
40	1.208499	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	SDP	23	Rcvd Service Search Response
41	1.208687	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	17	Sent Disconnection Request (SCID: 0x0040, DCID: 0x0042, PSM: 0x0001, Service: SDP)
42	1.210859	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
43	1.213518	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	17	Rcvd Disconnection Response (SCID: 0x0040, DCID: 0x0042, PSM: 0x0001, Service: SDP)
44	1.213628	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	17	Sent Connection Request (SDP, SCID: 0x0041)
45	1.215864	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
46	1.216857	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
47	1.221062	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	21	Rcvd Connection Response - Success (SCID: 0x0041, DCID: 0x0041)
48	1.221074	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	21	Sent Configure Request (DCID: 0x0041)
49	1.223566	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	21	Rcvd Configure Request (DCID: 0x0041)
50	1.223575	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	19	Sent Configure Response - Success (SCID: 0x0041)
51	1.225863	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
52	1.226868	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
53	1.227274	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	19	Rcvd Configure Response - Success (SCID: 0x0041)
54	1.227404	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	SDP	28	Sent Service Attribute Request : 0x00010000 - Attribute Range (0x0000 - 0xffff)
55	1.257384	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	SDP	87	Rcvd Service Attribute Response
56	1.257551	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	17	Sent Disconnection Request (SCID: 0x0041, DCID: 0x0041, PSM: 0x0001, Service: SDP)
57	1.258873	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
58	1.262361	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	17	Rcvd Disconnection Response (SCID: 0x0041, DCID: 0x0041, PSM: 0x0001, Service: SDP)
59	1.263877	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
60	1.285153	host	controller	HCI_CMD	6	Sent Authentication Requested
61	1.286867	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Command Status (Authentication Requested)
62	1.287863	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Link Key Request
63	1.287946	host	controller	HCI_CMD	4	Sent Link Key Request Reply[Malformed Packet]
64	1.289857	controller	host	HCI_EVT	13	Rcvd Command Complete (Link Key Request Reply)
65	1.422880	controller	host	HCI_EVT	6	Rcvd Authentication Complete
66	1.422929	host	controller	HCI_CMD	7	Sent Set Connection Encryption
67	1.424862	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Command Status (Set Connection Encryption)
68	1.485873	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Encryption Change
69	1.485913	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	15	Sent Information Request (Extended Features Mask)
70	1.543588	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	21	Rcvd Information Response (Extended Features Mask, Success)
71	1.543616	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	17	Sent Connection Request (RFCOMM, SCID: 0x0042)
72	1.545866	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
73	1.546863	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
74	1.551097	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	21	Rcvd Connection Response - Pending (SCID: 0x0042)
75	1.553862	controller	host	HCI_EVT	9	Rcvd Link Key Request
76	1.553951	host	controller	HCI_CMD	4	Sent Link Key Request Reply[Malformed Packet]
77	1.559905	controller	host	HCI_EVT	13	Rcvd Command Complete (Link Key Request Reply)
78	1.674882	controller	host	HCI_EVT	6	Rcvd Encryption Key Refresh Complete
79	1.701073	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	21	Rcvd Connection Response - Success (SCID: 0x0042, DCID: 0x0042)
80	1.701090	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	21	Sent Configure Request (DCID: 0x0042)
81	1.703500	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	32	Rcvd Configure Request (DCID: 0x0042)
82	1.703508	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	30	Sent Configure Response - Failure - unacceptable parameters (SCID: 0x0042)
83	1.705858	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
84	1.706857	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
85	1.707259	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	19	Rcvd Configure Response - Success (SCID: 0x0042)
86	1.710982	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	32	Rcvd Configure Request (DCID: 0x0042)
87	1.710993	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	34	Sent Configure Response - Success (SCID: 0x0042)
88	1.711031	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	RFCOMM	13	Sent SABM Channel=0
89	1.743884	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
90	1.744724	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	RFCOMM	13	Rcvd UA Channel=0
91	1.744766	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	RFCOMM	23	Sent UIH Channel=0 -> 1 MPX_CTRL DLC Parameter Negotiation (PN)
92	1.744878	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
93	1.749735	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	RFCOMM	23	Rcvd UIH Channel=0 -> 1 MPX_CTRL DLC Parameter Negotiation (PN)
94	1.749758	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	RFCOMM	13	Sent SABM Channel=1 (Serial Port)
95	1.749863	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
96	1.754857	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
97	1.758482	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	RFCOMM	13	Rcvd UA Channel=1
98	1.758503	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	RFCOMM	17	Sent UIH Channel=0 -> 1 MPX_CTRL Modem Status Command (MSC)
99	1.759737	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	RFCOMM	13	Rcvd DISC Channel=1
100	1.759752	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	RFCOMM	13	Sent UA Channel=1
101	1.773504	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	RFCOMM	17	Rcvd UIH Channel=0 -> 1 MPX_CTRL Modem Status Command (MSC)
102	1.775859	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
103	1.776875	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
104	1.777240	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	RFCOMM	13	Rcvd DISC Channel=0
105	1.777281	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	RFCOMM	13	Sent UA Channel=0
106	1.781866	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
107	1.782298	Espressif_dc:a0:82 …	localhost ()	L2CAP	17	Rcvd Disconnection Request (SCID: 0x0042, DCID: 0x0042, PSM: 0x0003, Service: RFCOMM)
108	1.782316	localhost ()	Espressif_dc:a0:82 …	L2CAP	17	Sent Disconnection Response (SCID: 0x0042, DCID: 0x0042, PSM: 0x0003, Service: RFCOMM)
109	1.786867	controller	host	HCI_EVT	8	Rcvd Number of Completed Packets
110	4.789625	host	controller	HCI_CMD	7	Sent Disconnect
111	4.852908	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Command Status (Disconnect)
112	5.045876	controller	host	HCI_EVT	7	Rcvd Disconnect Complete

รูปที่ 4.4 แพ็กเกจข้อมูลของอุปกรณ์ภายนอกเมื่อพยายามเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบการตรวจสอบค่า RSSI เพื่อระบุตำแหน่ง

ผลการทดสอบการตรวจสอบค่า RSSI เพื่อระบุตำแหน่ง เป็นการวัดความแรงของสัญญาณเพื่อประเมินทิศทางและระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือและรถเข็นสินค้า โดยใช้ค่า RSSI ที่ได้รับจากสายอากาศยากิ-อูดะในการวิเคราะห์ตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ส่งสัญญาณในมุมและระยะต่างๆ เพื่อให้ระบบสามารถระบุตำแหน่งได้แม่นยำขึ้น โดยผลการทดสอบ มี 3 กรณี คือ ผลการทดสอบค่า RSSI โดยไม่มีการติดตั้ง Housing ผลการทดสอบค่า RSSI โดยมีการติดตั้ง Housing และผลการทดสอบการเปรียบเทียบค่า RSSI กับระยะทางเมื่อไม่มีการติดตั้ง Housing และมีการติดตั้ง Housing

4.2.1 ผลการทดสอบค่า RSSI โดยไม่มีการติดตั้ง Housing

ผลการทดสอบค่า RSSI โดยใช้สายอากาศยากิ-อูดะเป็นตัวรับสัญญาณ ทำการทดสอบโดยที่ไม่มีการติดตั้ง Housing ซึ่งโทรศัพท์มือถือทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณบลูทูธ มีระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือกับสายอากาศยากิ-อูดะอยู่ที่ 1 เมตร การทดสอบนี้จะทำการวัดค่า RSSI ในมุมต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา บริเวณรอบ ๆ สายอากาศยากิ-อูดะ ซึ่งมีการหมุนโทรศัพท์มือถือให้ครอบคลุมทุกมุมที่ต้องการทดสอบ เพื่อประเมินทิศทางและความแรงของสัญญาณในแต่ละมุมที่ได้รับจากการส่งสัญญาณจากโทรศัพท์มือถือ การทดสอบนี้ได้ผลลัพธ์ที่แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่า RSSI โดยไม่มีการติดตั้ง Housing

มุม (องศา)	ค่า RSSI (dBm)
0	-24.40
15	-25.00
30	-25.50
45	-26.90
60	-30.80
75	-40.60
90	-35.90
105	-37.60
120	-35.60
135	-41.70

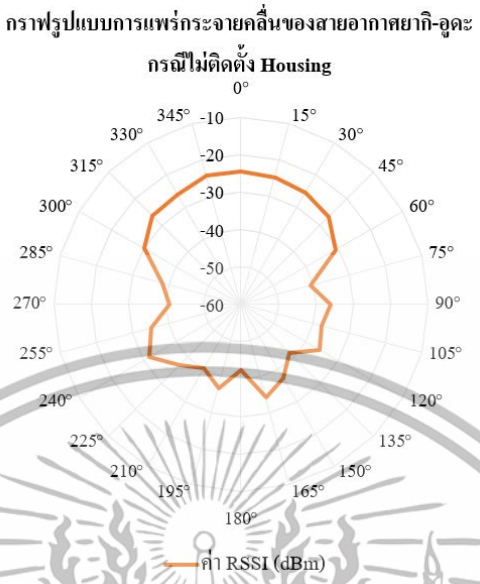
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่า RSSI โดยไม่มีการติดตั้ง Housing (ต่อ)

มุม (องศา)	ค่า RSSI (dBm)
150	-37.20
165	-34.20
180	-42.40
195	-36.70
210	-40.20
225	-35.30
240	-31.80
255	-32.30
270	-40.90
285	-38.10
300	-30.20
315	-26.60
330	-26.10
345	-24.40

จากตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบพบว่า ทิศทางที่สายอากาศยากิ-อูดะได้รับสัญญาณได้ดีที่สุด คือทิศทางที่ตรงกับแกนอ้างอิงของสายอากาศ หรือบริเวณด้านหน้าของสายอากาศ ซึ่งถูกออกแบบมาให้มีการรับและส่งสัญญาณในทิศทางนี้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด จากการวัดค่า RSSI ที่มุม 0 องศาและมุมใกล้เคียง พบว่าค่าที่ได้มีค่าสูงกว่ามุมอื่น ๆ ซึ่งค่าที่สูงหมายถึงความแรงของสัญญาณที่ดีกว่า ในทางกลับกัน เมื่อทำการวัดค่า RSSI ในทิศทางที่อยู่ห่างจากแกนหลักของสายอากาศ เช่น บริเวณด้านข้างหรือด้านหลัง พบว่าค่าที่ได้ลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งบ่งบอกว่าสายอากาศมีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณลดลงในทิศทางเหล่านั้น เป็นผลมาจากลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นที่ถูกออกแบบให้เน้นไปยังทิศทางด้านหน้าเป็นหลัก เมื่อนำค่า RSSI จากการวัดในมุมต่าง ๆ รอบสายอากาศยากิ-อูดะ พล็อตกราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น แสดงดังรูปที่ 4.5 และจากผลการทดสอบพบว่าค่ามุมกว้างครึ่งกำลัง (Half Power Beam Width: HPBW) ของสายอากาศยากิ-อูดะที่วัดค่า RSSI ที่ไม่มีการติดตั้งภายใน Housing มีค่า 95 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยากิ-อูดะ (ไม่มีการติดตั้ง Housing)

4.2.2 ผลการทดสอบค่า RSSI โดยมีการติดตั้ง Housing

ผลการทดสอบค่า RSSI โดยใช้สายอากาศยากิ-อูดะเป็นตัวรับสัญญาณ ทำการทดสอบโดยมีการติดตั้ง Housing เพื่อป้องกันอุปกรณ์จากสภาพแวดล้อมภายนอกและการบีบสัญญาณ ที่ได้รับจากโทรศัพท์มือถือ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณบลูทูธ โดยระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือและสายอากาศยากิ-อูดะอยู่ที่ 1 เมตร การทดสอบนี้จะทำการวัดค่า RSSI ในมุมต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 360 องศา รอบสายอากาศ โดยรับสัญญาณจาก 3 ทิศทาง ได้แก่ ด้านซ้าย ตรงกลาง และด้านขวา ซึ่งจะช่วยให้เห็นถึงการกระจายสัญญาณในแต่ละทิศทางภายใต้การบีบสัญญาณที่เกิดจาก Housing ที่ติดตั้งอยู่ภายใน การทดสอบนี้ได้ผลลัพธ์ที่แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่า RSSI โดยมีการติดตั้ง Housing

มุม (องศา)	ค่า RSSI (dBm)		
	ด้านซ้าย	ตรงกลาง	ด้านขวา
0	-46.10	-22.60	-46.30
15	-53.90	-28.90	-42.50
30	-52.40	-33.20	-33.90
45	-54.20	-41.10	-23.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบค่า RSSI โดยมีการติดตั้ง Housing (ต่อ)

มุม (องศา)	ค่า RSSI (dBm)		
	ด้านซ้าย	Center	ด้านซ้าย
60	-53.20	-46.00	-21.90
75	-52.50	-56.20	-27.70
90	-58.70	-49.20	-40.10
105	-56.20	-53.40	-45.40
120	-50.90	-56.10	-45.10
135	-55.00	-54.90	-46.80
150	-55.40	-53.30	-57.90
165	-57.70	-56.60	-58.10
180	-58.80	-55.90	-56.20
195	-55.20	-52.10	-56.90
210	-55.20	-54.80	-59.70
225	-54.60	-55.50	-67.30
240	-50.20	-55.20	-57.80
255	-46.50	-56.90	-62.70
270	-37.80	-51.50	-57.70
285	-25.50	-57.40	-51.40
300	-21.30	-41.60	-48.80
315	-27.70	-45.20	-58.00
330	-37.60	-35.80	-59.90
345	-44.80	-28.10	-57.20

จากตารางที่ 4.2 แสดงการวัดค่า RSSI เมื่อโทรศัพท์มือถือส่งสัญญาณบลูทูธและสายอากาศยากิ-อูดะ ที่ติดตั้งอยู่ภายใน Housing ทำหน้าที่รับสัญญาณ พบว่าความแรงของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงตามมุมและตำแหน่งของโทรศัพท์มือถือ และการติดตั้ง Housing ยังส่งผลกระทบต่อการกระจายของสัญญาณด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Housing ทำหน้าที่หุ้มและป้องกันสายอากาศจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ทำให้เกิดการบีบลำคลื่นสัญญาณที่ชัดเจนขึ้น เมื่อสายอากาศมีการส่งและรับสัญญาณในทิศทางเฉพาะมากขึ้น ทำให้สัญญาณถูกจำกัดให้อยู่ในทิศทางที่แม่นยำ ซึ่งทำให้สายอากาศมีความไวต่อสัญญาณในทิศทางที่แน่นอน และลดการรับสัญญาณจากทิศทางอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ทิศทางหลัก โดยสายอากาศที่ติดตั้งภายใน Housing จะรับสัญญาณจาก 3 ทิศทาง ได้แก่ ด้านซ้าย ตรงกลาง และด้านขวา

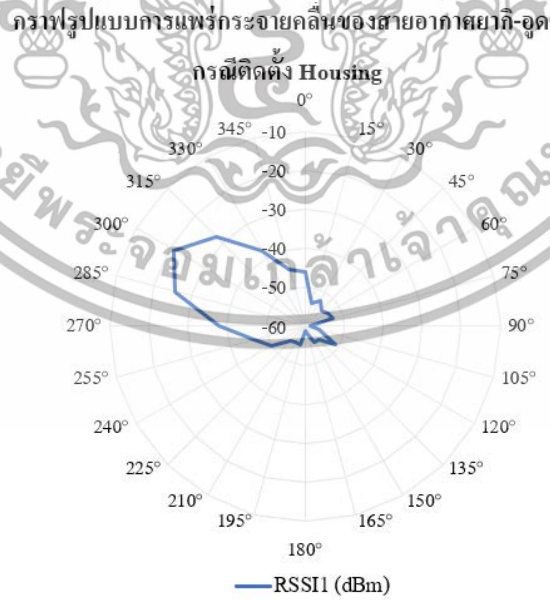
- ด้านซ้าย สัญญาณจะแรงที่สุดที่มุม 300 องศา ที่ -21.3 dBm แสดงว่าโทรศัพท์มือถือที่อยู่ด้านซ้ายของ Housing และจะได้รับสัญญาณแรงที่สุดในทิศทางนี้ แสดงดังรูปที่ 4.6

- ตรงกลาง สัญญาณจะแรงที่สุดที่มุม 0 องศา ที่ -22.6 dBm แสดงว่าโทรศัพท์มือถือที่อยู่ตรงกลางของ Housing และจะได้รับสัญญาณแรงที่สุดในทิศทางนี้ แสดงดังรูปที่ 4.7

- ด้านขวา สัญญาณจะแรงที่สุดที่มุม 60 องศา ที่ -21.9 dBm แสดงว่าโทรศัพท์มือถือที่อยู่ด้านขวาของ Housing และจะได้รับสัญญาณแรงที่สุดในทิศทางนี้ แสดงดังรูปที่ 4.8

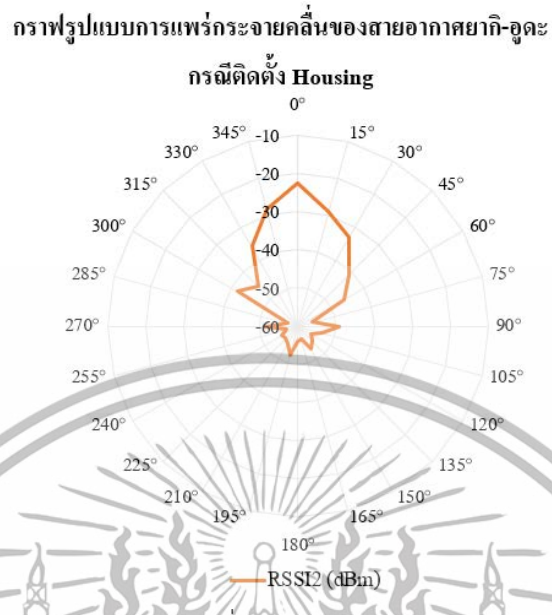
สัญญาณจะแรงที่สุดเมื่อโทรศัพท์มือถืออยู่ในทิศทางที่ตรงกับแนวของสายอากาศยากิ-อูดะแต่ละด้าน และจะอ่อนลงเมื่ออยู่ห่างจากทิศทางนั้น

จากผลการทดสอบพบว่าค่ามุมกว้างครึ่งกำลัง (Half Power Beam Width: HPBW) ของสายอากาศยากิ-อูดะที่วัดค่า RSSI จากการติดตั้งภายใน Housing โดยด้านซ้ายมีค่ามุมกว้างครึ่งกำลัง 14 องศา, ตรงกลางมีค่ามุมกว้างครึ่งกำลัง 14 องศา และด้านขวามีค่ามุมกว้างครึ่งกำลัง 23 องศา

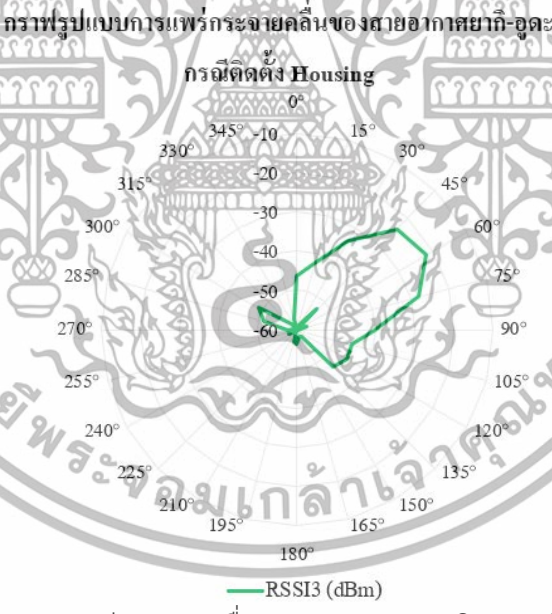


รูปที่ 4.6 กราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยากิ-อูดะ (ติดตั้ง Housing ด้านซ้าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

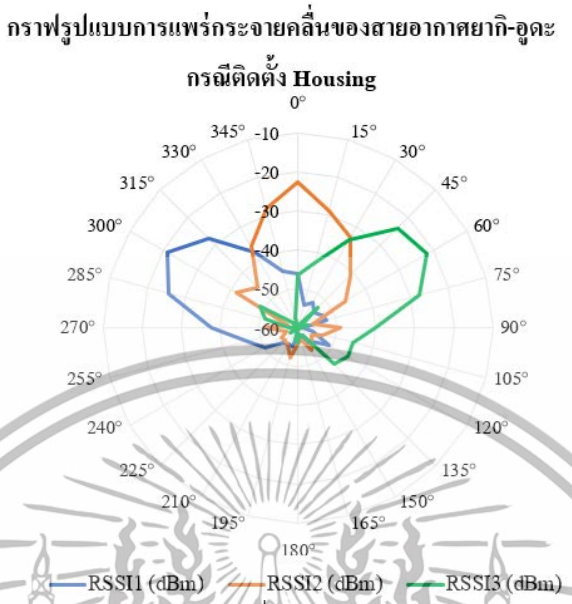


รูปที่ 4.7 กราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยากิ-อูดะ (ติดตั้ง Housing ตรงกลาง)



รูปที่ 4.8 กราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยากิ-อูดะ (ติดตั้ง Housing ด้านขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยากิ-อูดะ (ติดตั้ง Housing ทั้ง 3 ทิศทาง)

4.2.3 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบค่า RSSI กับระยะทางเมื่อติดตั้งและติดตั้ง Housing

ผลการทดสอบการทดสอบเปรียบเทียบค่า RSSI ที่ได้รับจากการวัดในระยะทางต่าง ๆ แบ่งการทดสอบออกเป็นสองกรณี คือการทดสอบเมื่อสายอากาศยากิ-อูดะไม่ได้ติดตั้งใน Housing และการทดสอบเมื่อสายอากาศยากิ-อูดะติดตั้งอยู่ภายใน Housing โดยมีการวัดค่าในระยะทางตั้งแต่ 1 เมตร ถึง 5 เมตร เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการรับสัญญาณของทั้งสองกรณี การทดสอบนี้ได้ผลลัพธ์ที่แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการการเปรียบเทียบค่า RSSI กับระยะทาง เมื่อไม่ติดตั้งและติดตั้ง Housing

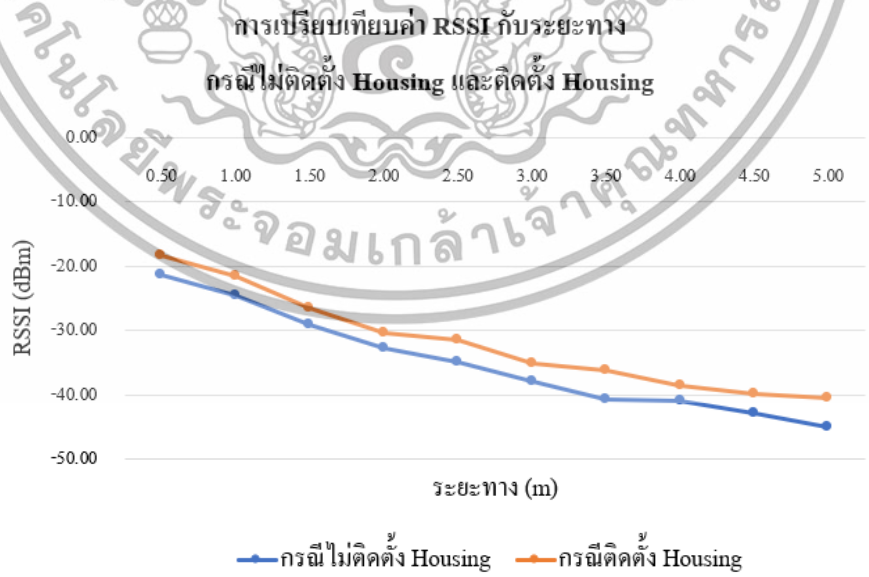
ระยะทาง (m)	ค่า RSSI (dBm)	
	ไม่ติดตั้ง Housing	มีติดตั้ง Housing
0.50	-21.40	-18.30
1.00	-24.60	-21.60
1.50	-29.20	-26.60
2.00	-32.80	-30.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการการเปรียบเทียบค่า RSSI กับระยะทาง เมื่อไม่ติดตั้งและติดตั้ง Housing (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่า RSSI (dBm)	
	ไม่ติดตั้ง Housing	มีติดตั้ง Housing
2.50	-35.00	-31.40
3.00	-38.00	-35.20
3.50	-40.70	-36.20
4.00	-41.00	-38.60
4.50	-42.80	-39.80
5.00	-45.00	-40.50

จากตารางที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบ RSSI กับระยะทาง แสดงดังรูปที่ 4.10 เมื่อไม่มีการติดตั้งสายอากาศยากิ-อูดะใน Housing และมีการติดตั้ง Housing โดยกรณีไม่ติดตั้ง Housing ค่า RSSI จะมีค่าติดลบมากกว่าติดตั้ง Housing ในทุกระยะทาง ซึ่งหมายความว่าสัญญาณจะอ่อนลงเมื่อไม่มีการห่อหุ้มสายอากาศหรืออุปกรณ์รับสัญญาณ เช่น ที่ระยะทาง 1 เมตร พบว่ามีค่า RSSI ที่ -24.60 dBm ขณะที่ในกรณีติดตั้ง Housing ที่ช่วยลดการรบกวนจากสภาพแวดล้อม ค่า RSSI จะดีกว่า ที่ -21.60 dBm ซึ่งหมายถึงสัญญาณที่แรงกว่า และเมื่อระยะทางมากขึ้น ค่า RSSI จะติดลบมากขึ้น ซึ่งหมายถึงสัญญาณอ่อนลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบ RSSI กับระยะทาง เมื่อไม่ติดตั้ง Housing และติดตั้ง Housing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบการควบคุมทิศทาง

ผลการทดสอบการควบคุมการเปลี่ยนทิศทางเพื่อประเมินความแม่นยำของระบบในการหมุนทิศทางของรถเข็นสินค้า โดยใช้โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคปในการวัดมุมการหมุนของรถเข็นสินค้าและเปรียบเทียบผลลัพธ์กับมุมอ้างอิงที่กำหนดไว้และมุมที่หมุนจริงของรถเข็นสินค้าในแต่ละรอบการทดสอบ ซึ่งมุมอ้างอิงนี้จะเป็นมุมมาตรฐานที่ถูกตั้งไว้เพื่อเป็นเกณฑ์ในการประเมินความถูกต้องของการหมุนและการควบคุมทิศทางของระบบ การทดสอบนี้ได้ผลลัพธ์ที่แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการการเปรียบเทียบมุมอ้างอิงกับมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปและมุมการหมุนจริง

มุมอ้างอิง (องศา)	มุมที่วัดได้ (องศา)	
	เซนเซอร์ไจโรสโคป	มุมการหมุนจริง
-150	-151.01	-156.00
-120	-120.15	-126.00
-90	-90.18	-94.00
0	0.25	0.00
-60	-60.21	-64.00
-30	-30.17	-33.00
0	0.25	0.00
30	30.42	34.00
60	60.41	63.00
90	90.27	95.00
120	120.47	125.00
150	150.06	158.00
180	180.18	184.00

จากตารางที่ 4.4 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนทั้งในส่วนของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคปและมุมการหมุนจริงของรถเข็นสินค้า โดยเมื่อพิจารณามุมอ้างอิงเทียบกับมุมที่วัดได้จากโมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนเซอร์ไจโรสโคป พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เช่น มุมอ้างอิง -150 องศา โมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคปวัดได้ -151.01 องศา ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อน 1.01 องศา ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น ความไม่แม่นยำของโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น

เมื่อพิจารณาจากมุมอ้างอิงเทียบกับมุมการหมุนจริงของรถเข็นสินค้า พบว่ามีความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่าค่ามุมที่ได้จากโมดูลเซนเซอร์ไจโรสโคป เช่น มุมอ้างอิง -150 องศา มุมการหมุนจริงที่วัดได้ -156.00 องศา ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อน 6 องศา ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากหลายปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของรถเข็น เช่น แรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์ รวมถึงพื้นผิวที่ไม่เรียบของพื้นที่ที่รถเข็นสินค้าเคลื่อนที่อยู่ ซึ่งอาจส่งผลให้การหมุนเกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการหมุนจริงจึงสูงกว่ามุมที่วัดจากเซนเซอร์ไจโรสโคป โดยเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในการหมุนจริงอยู่ที่ 4.33 องศา

4.4 ผลการทดสอบการตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

ผลการทดสอบการตรวจจับและการหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้รับการดำเนินการโดยการใช้โมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิกเพื่อวัดระยะทางระหว่างเซนเซอร์และวัตถุที่เป็นสิ่งกีดขวางบนเส้นทางการเคลื่อนที่ โดยรถเข็นสินค้าติดตั้งเซนเซอร์ทั้งหมด 7 ตัว ซึ่งประกอบด้วยเซนเซอร์ด้านหน้า 3 ตัว, ด้านหลัง 2 ตัว และด้านข้าง 2 ตัว การทดสอบนี้จะเปรียบเทียบระหว่างระยะทางอ้างอิงและระยะทางที่วัดได้จากเซนเซอร์อัลตราโซนิก เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของเซนเซอร์ในการตรวจจับระยะทางจากวัตถุที่อยู่ในเส้นทาง ซึ่งจะนำไปใช้ในการหลบหลีกหรือหยุดรถเข็นสินค้าเมื่อพบสิ่งกีดขวางในระยะที่กำหนดไว้ การทดสอบนี้ได้ผลลัพธ์ที่แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบระหว่างระยะทางอ้างอิงกับระยะทางที่วัดได้จากโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก

ระยะทางอ้างอิง (cm)	ระยะทางที่วัดได้จากโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก (cm)						
	ตำแหน่งด้านหน้า			ตำแหน่งด้านหลัง		ตำแหน่งด้านข้าง	
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.10	10.00	10.00
20.00	20.00	20.00	20.00	19.40	20.10	19.30	19.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบระหว่างระยะทางอ้างอิงกับระยะทางที่วัดได้จากโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก (ต่อ)

ระยะทางอ้างอิง (cm)	ระยะทางที่วัดได้จากโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิก (cm)						
	ตำแหน่งด้านหน้า			ตำแหน่งด้านหลัง		ตำแหน่งด้านข้าง	
	ซ้าย	กลาง	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
30.00	29.00	29.00	29.80	30.00	29.40	30.10	29.00
40.00	38.90	38.90	39.00	39.80	39.40	40.00	38.70
50.00	49.00	49.00	49.00	48.30	48.10	48.30	49.80
60.00	58.90	58.20	58.70	57.90	58.00	58.00	58.00
70.00	68.20	68.00	68.70	68.00	68.20	68.90	68.00
80.00	78.00	77.70	78.00	78.80	78.00	77.40	78.00
90.00	88.20	86.60	87.60	88.60	88.80	88.40	87.90
100.00	97.00	97.90	97.70	98.20	98.70	98.20	97.70
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (cm)	**1.28**	**1.47**	**1.15**	**1.10**	**1.12**	**1.14**	**1.30**

จากตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบระหว่างระยะทางอ้างอิงกับระยะทางที่วัดได้จากโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิกโมดูลเซนเซอร์อัลตราโซนิกแต่ละตัวมีความสามารถในการวัดระยะทางได้อย่างแม่นยำ โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าระยะทางอ้างอิงกับค่าระยะทางที่ได้จากการวัดจริง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.10–1.47 เซนติเมตร นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการวัดจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งในตำแหน่งต่าง ๆ ได้แก่ ด้านหน้า ด้านหลัง และด้านข้าง พบว่าค่าเฉลี่ยของระยะทางที่วัดได้มีความใกล้เคียงกับค่าระยะทางอ้างอิงในทุกระยะที่ทำการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์สามารถทำงานได้อย่างเสถียรในสภาพแวดล้อมของการทดลอง อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ตามแม้ว่าเซนเซอร์อัลตราโซนิกจะสามารถวัดระยะทางได้อย่างแม่นยำและเสถียรในสภาพแวดล้อมของการทดลอง แต่เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสถานการณ์จริง จะดำเนินการปรับเทียบเซนเซอร์เพิ่มเติมก่อนนำไปติดตั้งในระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางของรถเข็นสินค้า เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสถานการณ์จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของรถเข็นสินค้า

ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของรถเข็นสินค้า โดยทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจาก 0 กิโลกรัม จนถึง 12 กิโลกรัม พร้อมบันทึกระยะทางที่รถเข็นสินค้าเคลื่อนที่ได้ และความเร็วที่วัดได้ในหน่วยเซนติเมตรต่อวินาที โดยรถเข็นสินค้ามีความเร็วพื้นฐานเมื่อไม่มีน้ำหนักบรรทุกที่ 45.40 เซนติเมตรต่อวินาที แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของรถเข็นสินค้า

น้ำหนัก (kg)	ระยะทาง (cm)	ความเร็ว (cm/sec)	กระแสไฟฟ้า (A)
0	227.00	45.40	1.35
2	223.00	44.60	1.43
4	220.00	44.00	1.52
6	214.50	42.90	1.69
8	206.00	41.20	1.85
10	204.50	40.90	1.87
12	198.00	39.60	1.90

จากตารางที่ 4.6 เป็นผลการทดสอบการรับน้ำหนักของรถเข็นสินค้า พบว่าการเพิ่มน้ำหนักของรถเข็นสินค้าส่งผลกระทบต่อระยะทาง ความเร็ว และกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักตั้งแต่ 0 กิโลกรัมไปจนถึง 12 กิโลกรัม พบว่า ระยะทางที่รถเข็นสินค้าสามารถเคลื่อนที่ได้ลดลงจาก 227.00 เซนติเมตร เหลือ 198.00 เซนติเมตร มีความเร็วเฉลี่ยที่รถเข็นสินค้าสามารถเคลื่อนที่ได้ก็ลดลงจาก 45.40 เซนติเมตรต่อวินาที เหลือ 39.60 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเคลื่อนที่ก็ลดลงตามไปด้วย เนื่องจากมอเตอร์ต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อเคลื่อนที่กับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนก็เพิ่มขึ้นจาก 1.35 แอมแปร์เป็น 1.90 แอมแปร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มน้ำหนักส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นอาจจะทำให้ระบบต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการเคลื่อนที่ในสภาวะที่มีน้ำหนักบรรทุกสูงขึ้น ดังนั้นการเพิ่มน้ำหนักส่งผลให้ระยะทางและความเร็วลดลง ในขณะที่การใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการทดสอบการตรวจสอบระดับพลังงานแบตเตอรี่

ผลการทดสอบการตรวจสอบพลังงานแบตเตอรี่ถูกดำเนินการโดยการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่จ่ายให้กับระบบต่าง ๆ ในรถเข็นสินค้า โดยมีการใช้โมดูลวัดแรงดันไฟฟ้าเพื่อรับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแบตเตอรี่ในระหว่างการใช้งานจริง เพื่อตรวจสอบว่าแบตเตอรี่ยังคงสามารถจ่ายพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลดลงตามระดับที่กำหนดไว้ จะมีการแสดงเปอร์เซ็นต์พลังงานบนหน้าจอ LCD และในแอปพลิเคชันของมือถือ โดยการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์พลังงาน แสดงดังตารางที่ 4.6

จากการทดสอบการทำงานของรถเข็นสินค้า โดยใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 V ความจุ 8 Ah คำนวณระยะเวลาการทำงานของรถเข็นดังสมการที่ (1) โดยกำหนดให้ T คือระยะเวลาการทำงานของรถเข็น i_Ah คือความจุของแบตเตอรี่ i_Aps คือกระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้งานแสดงดังตารางที่ 4.7

$$T = \frac{i_{Ah}}{i_{Aps}} \qquad (1)$$

คำนวณระยะเวลาการทำงานสูงสุดของรถเข็นสินค้า เมื่อไม่มีน้ำหนัก

$$T = \frac{8}{1.35} = 5.93\ Hours \qquad (2)$$

คำนวณระยะเวลาการทำงานต่ำสุดของรถเข็นสินค้า ที่น้ำหนัก 12 กิโลกรัม

$$T = \frac{8}{1.9} = 4.21\ Hours \qquad (3)$$

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกส่งผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบรถเข็นสินค้า โดยเมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ภายในระบบต้องใช้จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มอเตอร์ต้องทำงานหนักขึ้นเพื่อรองรับภาระที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พลังงานจากแบตเตอรี่ถูกใช้มากขึ้นและลดระยะเวลาการใช้งานของรถเข็นสินค้า

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ระยะเวลาการทำงานของรถเข็นสินค้าจะลดลงเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น โดยช่วงเวลาการใช้งานที่สามารถรองรับได้อยู่ระหว่าง ประมาณ 4 - 6 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น อัตราการใช้งานของมอเตอร์ และประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ในขณะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

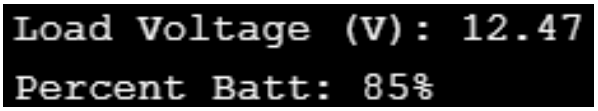
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์พลังงาน

แรงดัน (V)	เปอร์เซ็นต์พลังงาน (%)
10.50	0
11.30	5
11.50	10
11.60	15
11.70	20
11.80	25
11.85	30
11.90	35
11.95	40
12.10	45
12.15	50
12.20	55
12.25	60
12.30	65
12.35	70
12.40	75
12.45	80
12.50	85
12.60	90
12.65	95
12.70	100

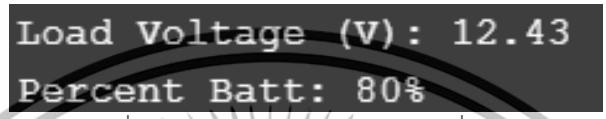
ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลดลงตามระดับที่กำหนดไว้ จะมีการแสดงเปอร์เซ็นต์ โดยการแปลงค่าระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์พลังงานนั้นตามตารางที่กำหนดไว้ ตัวอย่างเช่น เมื่อแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 12.47V จะเป็นการแสดงระดับพลังงานที่ 85% แสดงดังรูปที่ 4.11 ขณะที่เมื่อแรงดันไฟฟ้าลดลงถึง 12.43V จะเป็นการแสดงระดับพลังงานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

80% แสดงดังรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าและคำนวณระดับแบตเตอรี่ได้แม่นยำในช่วงการทำงานที่ออกแบบไว้



รูปที่ 4.11 ระดับพลังงานแบตเตอรี่ 85%



รูปที่ 4.12 ระดับพลังงานแบตเตอรี่ 80%

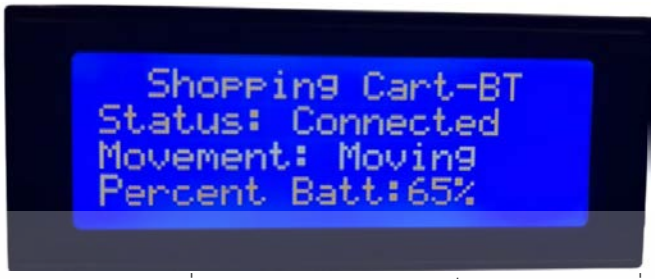
4.7 ผลการทดสอบการแสดงผลบนหน้าจอ LCD

ผลการทดสอบการแสดงผลบนหน้าจอ LCD โดยการทดสอบจะทำการตรวจสอบการเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานและรถเข็นสินค้า และหลังจากระบบทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์แล้ว ระบบจะตรวจสอบสถานการณ์เคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า โดยจะแสดงสถานะบนหน้าจอ LCD แสดงดังรูปที่ 4.13 และ รูปที่ 4.14

ระบบจะตรวจสอบการเชื่อมต่อบลูทูธระหว่างโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานและรถเข็นสินค้า หากมีการเชื่อมต่อสำเร็จหน้าจอ LCD จะแสดงข้อความ "Connected" เพื่อแสดงว่าสามารถเชื่อมต่อได้เรียบร้อย แต่หากยังไม่ได้เชื่อมต่อ หน้าจอ LCD จะแสดงข้อความ "Disconnect" เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบว่าระบบยังไม่เชื่อมต่อกับโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งาน และระบบจะตรวจสอบสถานะการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า หากรถเข็นสินค้าไม่มีสิ่งกีดขวางและสามารถเคลื่อนที่ได้ หน้าจอ LCD จะแสดงข้อความ "Moving" เพื่อแสดงว่ารถเข็นสินค้ากำลังเคลื่อนที่ แต่หากมีสิ่งกีดขวางที่ทำให้รถเข็นสินค้าหยุดชั่วคราว หน้าจอ LCD จะแสดงข้อความ "Break" เพื่อแสดงว่ารถเข็นสินค้าหยุดการเคลื่อนที่

รูปที่ 4.13 การแสดงสถานะการไม่เชื่อมต่ออุปกรณ์ และรถเข็นสินค้าหยุดการเคลื่อนที่บนจอ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 การแสดงสถานะการเชื่อมต่ออุปกรณ์ และรถเข็นสินค้ากำลังเคลื่อนที่บนจอ LCD

4.8 ผลการทดสอบการทำงานของแอปพลิเคชัน

ผลการทดสอบการทำงานของแอปพลิเคชัน สำหรับควบคุมรถเข็นสินค้าอัตโนมัติผ่านการเชื่อมต่อบลูทูธ โดยแอปพลิเคชันมีฟังก์ชันการทำงานหลากหลาย เริ่มจากการเปิด/ปิดบลูทูธ, ค้นหารถเข็นสินค้าที่อยู่ในระยะ, เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่เลือก, ส่งคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่, และแสดงสถานะต่าง ๆ ของรถเข็นสินค้า แสดงดังรูปที่ 4.15

รูปที่ 4.15 หน้าแอปพลิเคชัน สำหรับแสดงสถานะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอปพลิเคชันนี้จัดการสิทธิ์การเข้าถึงบลูทูธและตำแหน่งที่ตั้งของอุปกรณ์ จะแสดงคำขอสิทธิ์หากผู้ใช้ยังไม่ได้ให้สิทธิ์ เช่น การขออนุญาตเปิดใช้งานบลูทูธ ขออนุญาตเข้าถึงตำแหน่งของอุปกรณ์ โดยแอปพลิเคชันจะตรวจสอบว่าอุปกรณ์รองรับบลูทูธหรือไม่ หากรองรับ ผู้ใช้งานสามารถเปิดหรือปิดบลูทูธผ่านปุ่มควบคุมบนหน้าจอ โดยเมื่อเปิดใช้งานบลูทูธ ระบบจะแสดงข้อความว่า "บลูทูธเปิดใช้งานแล้ว" และเมื่อปิด ระบบจะแจ้งว่า "บลูทูธปิดใช้งานแล้ว"

ฟังก์ชันสำคัญของแอปพลิเคชันคือการค้นหารถเข็นสินค้าที่อยู่ใกล้เคียง โดยแสดงรายชื่ออุปกรณ์ในรูปแบบรายการ พร้อมข้อมูลชื่อและที่อยู่ (Address) ของรถเข็นสินค้า หากไม่มีอุปกรณ์ใดในบริเวณใกล้เคียง ระบบจะแจ้งว่า "ไม่พบอุปกรณ์ใดๆ" เมื่อผู้ใช้เลือกอุปกรณ์จากรายการ แอปพลิเคชันสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ดังกล่าวได้ หากการเชื่อมต่อสำเร็จ ระบบจะแสดงข้อความว่า "เชื่อมต่อสำเร็จ" แต่หากมีการยกเลิกการเชื่อมต่อ ระบบจะแจ้งว่า "ยกเลิกการเชื่อมต่อแล้ว" นอกจากนี้ ผู้ใช้งานสามารถส่งคำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า เช่น เริ่มหรือหยุดการเคลื่อนที่ โดยระบบจะแสดงสถานะคำสั่ง เช่น "กำลังเคลื่อนที่" หรือ "หยุดการเคลื่อนที่" ตามลำดับ อีกทั้งแอปพลิเคชันยังสามารถตรวจสอบระดับแบตเตอรี่ของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ และแสดงข้อมูลในรูปแบบข้อความ เช่น "ระดับแบตเตอรี่: 80%" เพื่อช่วยให้ผู้ใช้ทราบสถานะการใช้งานของอุปกรณ์ได้อย่างสะดวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ปริญญานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จในการออกแบบและสร้างรถเข็นสินค้าที่สามารถติดตามผู้ใช้งานอัตโนมัติโดยใช้สัญญาณบลูทูธ เพื่ออำนวยความสะดวกในการเคลื่อนย้ายสินค้าให้แก่ผู้ใช้งาน โดยระบบนี้ใช้เทคโนโลยีบลูทูธและไมโครคอนโทรลเลอร์ในการตรวจจับและติดตามตำแหน่งของผู้ใช้งาน ประกอบด้วย 3 ส่วนได้แก่ การรับสัญญาณบลูทูธ การควบคุมการเคลื่อนที่และการตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

การรับสัญญาณบลูทูธ ระบบใช้ ESP32 เชื่อมต่อกับโมดูลสวิตช์เพื่อเลือกทิศทางของสัญญาณที่ได้รับจากโทรศัพท์มือถือผ่านสายอากาศยากิ-อูดะสามทิศทาง ได้แก่ 0 องศา (ตรงกลาง), 60 องศา (ด้านขวา), และ 300 องศา (ด้านซ้าย)) จากผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถรับสัญญาณและวัดค่า RSSI ได้ และผลการทดสอบค่า RSSI ระหว่างการติดตั้ง Housing และการไม่ติดตั้ง Housing แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนในประสิทธิภาพการรับสัญญาณ พบว่าการติดตั้ง Housing ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับสัญญาณ RSSI ได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในทิศทางหลัก เช่น มุม 0 องศา, 60 องศา และ 300 องศา ซึ่งการติดตั้ง Housing ช่วยเพิ่มความแรงของสัญญาณในทิศทางเหล่านี้อย่างมาก นอกจากนี้ ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า Housing ช่วยลดความกว้างของลำคลื่นสัญญาณ โดยที่มุม 0 องศา เมื่อไม่ติดตั้ง Housing มีค่ามุมกว้างครึ่งกำลัง 95 องศา และหลังจากการติดตั้ง Housing ลดลงเหลือเพียง 14 องศา ซึ่งหมายความว่าการติดตั้ง Housing ทำให้สายอากาศยากิ-อูดะสามารถรับสัญญาณจากทิศทางหลักได้ดียิ่งขึ้น และลดการรับสัญญาณจากทิศทางที่ไม่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการติดตั้ง Housing ค่า RSSI เฉลี่ยสูงกว่าการไม่ติดตั้งประมาณ 3.19 dBm ซึ่งทำให้สัญญาณมีความแรงและเสถียรภาพมากขึ้น ส่งผลให้การใช้งานสายอากาศยากิ-อูดะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นในทุกทิศทาง และลดผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบใช้ ESP32 ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วและทิศทางของมอเตอร์ผ่านโมดูลขับมอเตอร์ โดยใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์ไจโรสโคปเพื่อตรวจจับองศาการหมุนของรถเข็น ทำให้สามารถติดตามผู้ใช้งานและเปลี่ยนทิศทางได้แบบเรียลไทม์ ผลการทดสอบการควบคุมการเปลี่ยนทิศทาง พบว่ามุมอ้างอิงเทียบกับมุมการหมุนจริงของรถเข็นสินค้า มีค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคลาดเคลื่อน 4.33 องศา เมื่อทดสอบการรับน้ำหนักของรถเข็นสินค้าพบว่าความเร็วการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าอยู่ที่ 45.4 cm/s และระยะเวลาที่รถเข็นสินค้าสามารถใช้งานได้คือประมาณ 4 - 6 ชั่วโมง

การตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ระบบใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกเพื่อตรวจสอบระยะห่างระหว่างรถเข็นสินค้าและสิ่งกีดขวาง เมื่อเซนเซอร์ตรวจพบวัตถุในระยะที่กำหนด ระบบจะสั่งให้รถเข็นสินค้าหยุดการเคลื่อนที่เพื่อลดความเสี่ยงในการชน พร้อมทั้งปรับทิศทางโดยอัตโนมัติเพื่อเลี่ยงสิ่งกีดขวางและกลับมาติดตามผู้ใช้งานต่อได้อย่างราบรื่น ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางได้แม่นยำที่ระยะ 10-80 เซนติเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 1.22 เซนติเมตร นอกจากนี้ การเปลี่ยนเส้นทางของรถเข็นสินค้าหลังตรวจพบสิ่งกีดขวางสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบระบบการรับสัญญาณบลูทูธแสดงให้เห็นว่า การเชื่อมต่อโทรศัพท์มือถือกับระบบรถเข็นอัตโนมัติผ่านบลูทูธมีบทบาทสำคัญในการติดตามตำแหน่งของผู้ใช้ โดยระบบต้องทำงานอย่างต่อเนื่องเพื่อให้รถเข็นติดตามผู้ใช้ได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม การเชื่อมต่อบลูทูธตลอดเวลานำไปสู่การลดลงของพลังงานแบตเตอรี่ในโทรศัพท์อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในกรณีที่มีการรับส่งข้อมูลอย่างต่อเนื่อง และอีกปัจจัยคือระยะเวลาการใช้งานของแบตเตอรี่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความต่อเนื่องของระบบรถเข็นอัตโนมัติ จากการทดสอบพบว่ารถเข็นสินค้าสามารถทำงานได้ประมาณ 4-6 ชั่วโมง ซึ่งอาจเพียงพอสำหรับการใช้งานในบางสถานการณ์ แต่หากต้องการให้ระบบรองรับการใช้งานที่ยาวนานขึ้น จำเป็นต้องพิจารณาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เช่น การใช้แบตเตอรี่ที่มีความจุสูงขึ้น หรือการออกแบบระบบจัดการพลังงานที่สามารถลดการสูญเสียพลังงานที่ไม่จำเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Argenox Technologies. “Introduction to Bluetooth Classic.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.argenox.com/library/bluetooth-classic/introduction-to-bluetooth-classic/

[2] Ezurio. “Bluetooth Low Energy vs. Bluetooth Classic” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.ezurio.com/resources/blog/bluetooth-low-energy-vs-bluetooth-classic-what-s-the-difference#ble-overview

[3] Bluetooth SIG, Inc. “Bluetooth Wireless Technology” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/

[4] Mamtaz Alam. “Classic Bluetooth Vs. Bluetooth LE” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://how2electronics.com/classic-bluetooth-vs-bluetooth-low-energy-comparison/

[5] NovelBits. “Received Signal Strength Indicator (RSSI).” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://novelbits.io/bluetooth-rtls-direction-finding-and-rssi/

[6] Moko Blue. “Bluetooth RSSI.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.mokoblue.com/rssi-vs-aoa-asset-tracking/

[7] ONE Hospitality Solutions. “รู้จัก Signal Strength.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จากhttps://www.onehospitality.co.th/signal-strength-noise- snr/#Received_Signal_Strength_Indicator_RSSI

[8] WatElectronics. “What is Yagi Uda Antenna.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.watelectronics.com/yagi-uda-antenna/.

[9] Wix. “กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง Directional Antenna.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://aksboon9.wixsite.com/antenna/กระจายคล-นแบบม-ท-ศทาง.

[10] GeekfoeGeeks. “Yagi-Uda Antenna.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.geeksforgeeks.org/yagi-uda-antenna/.

[11] “สายอากาศ ยากิ-อูดะ ทำงานอย่างไร.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://e20ae.blogspot.com/2017/03/how-yagi-uda-antenna-works.html.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

[12] “การสร้างสายอากาศกำลังสูงสำหรับเครื่องเข้าถึงข้อมูลข่าวสาร.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.dsi.go.th/Upload/598837b15621874fe7e2bbf65f7e80e4.pdf.

[13] 2.4ghz Pcb Directional Antenna. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.chinavasion.com/china/wholesale/home-garden/industrial- scientific/ professional-tools/2.4ghz-pcb-directional-antenna-light-we- fqzle-dnzz4rqh.

[14] Richard & Steve. “2.4 GHz YAGI PCB Antenna.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf.

[15] ANTENNA EXPERTS. “What is Omnidirectional Antenna.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.antennaexperts.co/blog/what-is-omnidirectional-antenna.

[16] Aksorn Boonchalee. “สายอากาศแบบกระจายคลื่นรอบตัว.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://aksboon9.wixsite.com/antenna/กระจายคล-นรอบต-ว.

[17] xjs@gyxjs. “What is An Omni Directional Antenna.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.gyxjs.com/article/what-is-an-omni-directional-antenna.html.

[18] Sarah Greiner. “Omnidirectional Antenna Radiation Patterns Explained.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.mpantenna.com/omnidirectional-antenna-radiation-patterns/.

[19] Robot Pi Shop. “2.4G Omni Directional Antenna.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://robotpishop.com/products/2-4g-omni-directional-antenna.

[20] @rfm0967y. “บอร์ด ESP-32 NodeMCU ESP-WROOM-32.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.arduitronics.com/product/5007/บอร์ด-esp-32-nodemcu-esp-wroom-32-wi-fi-and-bluetooth-dual-core-ch9102x

[21] ESP32 WROOM 32 MICRO, DEVKIT RF 38 PIN. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://dientunhattung.com/san-pham/esp32-wroom-32-micro-devkit-rf-38-pin/.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

[22] LuckyFishGeek. “ESP32-WROOM-32 Pinout Reference." [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://github.com/tobozo/ESP32BLECollector/issues/42?fbclid=IwY2xjawF28GdleHRuA2FlbQIxMAABHQaXW9vsbjOSzwQDmzJe9gp40IhSyZMttbF_Qi4ifwX4JKA7T6a3VtHmAQ_aem_MXnWj_LoCoWCoBDaKTrWGg

[23] RF Switch Module Flexible 4 Throw Board HMC241. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.amazon.com/Flexible-Stations-Portable-Wireless-Systems/dp/ B0CXN9R4NF.

[24] HMC241 Datasheet. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=HMC241&sField=2.

[25] ไจโรสโคปคืออะไร. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จากhttps://th.fmuser.net/content/?20896.html.

[26] เซนเซอร์ GY-521 หรือ MPU 6050. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.as99shop.com/product/370/gy-521-mpu-6050-module-three-axis-acceleration-gyroscope-6dof.

[27] เซนเซอร์ Gyroscope. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://tips.thaiware.com/427.html.

[28] MPU-6050 Datasheet. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/517744/ETC1/MPU-6050.html.

[29] MPU6050 Pin Configuration. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.modulemore.com/product/66/-gy-521-for-arduino-imu-3-axis-accelerometer-gyro-module-mpu6050.

[30] Indiamart. “HC-SR04 Ultrasonic Sensor.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.indiamart.com/proddetail/hc-sr04-ultrasonic-sensor-20997852673.html

[31] MkCocs. “การใช้งานโมดูล HC-SR04 Ultrasonic Sensor.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://iot-kmutnb.github.io/blogs/sensors/hc-sr04/

[32] Fitrox. “การใช้งาน HC-SR04 Ultrasonic Module.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://fitrox.lnwshop.com/article/27/tutorial99-hc-sr04-ultrasonic-module.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

[33] ElectronicWings. “Ultrasonic hc-sr04 Sensor Interfacing.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.electronicwings.com/esp32/ultrasonic-hc-sr04-sensor-interfacing-with-esp32

[34] Buraphateonics. “BTS7960 43A Driver.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.buraphatronics.com/product/476/bts7960-43a-driver-94-43a

[35] Handson. “BTS7960 High Current Motor Driver.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.handsontec.com/dataspecs/module/BTS7960%20Motor%20Driver.pdf

[36] CyberTice. “BTS7960 H-Bridge DC Motor Drive.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.cybertice.com/product/761/bts7960-h-bridge-dc-motor-drive-87-6-27v-47a-max-module

[37] มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Motor) คือ อะไร. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จากhttps://naichangmashare.com/2021/05/28/electric-motor-ep-1/.

[38] พื้นฐานของมอเตอร์เกียร์หนอน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.bauergmc.com/exploring-the-basics-of-worm-gear- motor.html.

[39] 5840 31zy DC มอเตอร์เกียร์หนอน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://thai.aslongdcmotor.com/sale-14442103-5840-31zy-dc-worm-gear-motors-type-d-shaft-24v-gear-motor-with-encoder.html.

[40] ProtoSupplies. “โมดูลลดแรงดันไฟฟ้า DC-DC แบบปรับได้ LM2596S” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://protosupplies.com/product/lm2596s-adjustable-dc-dc-step- down-module/

[41] As99shop. “LM2596S DC-DC step-down module.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.as99shop.com/product/924/lm2596s-dc-dc-step-down- module-94-3a

[42] Electrobes. “LM2596 Buck Adjustable Step Down” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://electrobes.com/product/lm2596-buck-adjustable-step-down-power-supply-module-dc-dc-converter/#tab-specification

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

[43] Dr. Tobias Weltner. “INA226 Current And Voltage Monitoring.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://done.land/components/power/measuringcurrent/viashunt/ina226/.

[44] Texas Instruments. “CURRENT/POWER MONITOR with I2C Interface.” [ออนไลน์].เข้าถึงได้จากhttps://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/download/419932/TI1/INA226.html

[45] Brampton. “How to use INA226 DC Current Sensor with Arduino.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จากhttps://how2electronics.com/how-to-use-ina226-dc-current-sensor-with-arduino/.

[46] cybertice@gmail.com. “การใช้งานจอ LCD.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จากwww.cybertice.com com/article/47/การใช้งานจอ-character-lcd-กับ-arduino-แบบละเอียด

[47] @rfm0967y. “การใช้งานจอ LCD กับ Arduino.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก www.arduitronics.com/article/28/การใช้งาน-lcd-กับ-arduino

[48] DeepBlueMbedded. “LCD 20×4 I2C.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://deepbluembedded.com/arduino-lcd-20x4-i2c-code-example-tutorial/

[49] Aprtech. “แบตเตอรี่ตะกั่วกรดคืออะไร มาทำความรู้จักกัน” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.aprtech.co.th/content/7674/what-is-lead-acid-battery? srsltid =AfmBOoqTVMdBKwKMPuQN9ongamoyc2qqNLYc3eKPNWtFQlPaw57eWWbl

[50] Gaming_A. “12V8AH 12V12AH แบตเตอรี่แห้ง” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จากhttps://th.shp.ee/NLFbLih

[51] เค่อเหิง. “สูตรพื้นฐานสำหรับการคำนวณเวลาใช้งานแบตเตอรี่” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จากhttps://kehengbattery.com/th/how-to-calculate-battery-run-time-essential-formulas/

[53] AndProf. “ซอฟต์แวร์ Arduino (IDE) คืออะไร.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://andprof.com/tools/what-is-arduino-software-ide-and-how-use-it/

[53] Introduction to Arduino IDE. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://cpham.perso.univ-pau.fr/LORA/HUBIQUITOUS/solution-lab/arduino-lora- tutorial/introduction_arduino_ide/introduction_arduino_ide/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

[54] Devid Watson. “Introduction to Proteus.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.theengineeringprojects.com/2020/01/introduction-to- proteus.html

[55] สโมสร EA & HAM, NIT วารังคัล. “What is Proteus.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://ea-ham-nitw.medium.com/what-is-proteus-6d408f5d2d5c

[56] Tinkercad. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.tinkercad.com/blog/skill-badges

[57] yoli_arriaga. “What is Tinkercad? Learn 3D design.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.domestika.org/en/blog/11113-what-is-tinkercad-learn-3d-design-from-scratch

[58] Android Developers“Android Studio.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://developer.android.com/studio/intro?hl=th

[59] GeeksforGeeks Community. “Android Studio คืออะไร?.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://www.geeksforgeeks.org/overview-of-android-studio/.

[60] Chinitsara Jongkranying. “การทำงานของ Wireshark.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://datafarm-cybersecurity.medium.com/wireshark-345b7f739ed0.

[61] saixiii. “Wireshark คือ.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก https://url.in.th/lHxVU.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้งานรถเข็นสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการใช้งานรถเข็นสินค้า

การออกแบบคู่มือการใช้งานรถเข็นสินค้าได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตั้งและใช้งานได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นการลดความซับซ้อนในการใช้งาน และช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถทำตามขั้นตอนได้อย่างถูกต้อง คู่มือจะถูกออกแบบในรูปแบบที่เป็นระบบระเบียบ โดยแบ่งการใช้งานออกเป็นขั้นตอนที่ชัดเจนและสามารถเข้าใจได้ง่าย เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถปฏิบัติตามได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว เพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างราบรื่น คู่มือฉบับนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็นส่วนต่าง ๆ ตามลำดับขั้นตอน ตั้งแต่การติดตั้งแอปพลิเคชัน การเชื่อมต่ออุปกรณ์ การใช้งานฟังก์ชันต่าง ๆ รวมถึงคำแนะนำในการตรวจสอบสถานะการทำงานของรถเข็นสินค้าอย่างละเอียด

ขั้นตอนแรกของคู่มือจะเริ่มต้นด้วยการแนะนำให้ผู้ใช้ดาวน์โหลดและติดตั้งแอปพลิเคชันที่ใช้ในการควบคุมรถเข็นสินค้า ซึ่งจะมีการแนะนำให้ผู้ใช้สแกน QR Code ที่แนบไว้ในคู่มือเพื่อให้สามารถเข้าถึงซอฟต์แวร์ได้อย่างรวดเร็วและสะดวก แอปพลิเคชันนี้สามารถติดตั้งได้เฉพาะในแอนดรอยด์ โดยหลังจากดาวน์โหลดและติดตั้งแอปพลิเคชันเสร็จสิ้น ผู้ใช้งานจะได้รับคำแนะนำให้เปิดใช้งานบลูทูธบนอุปกรณ์มือถือ เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้าได้ ซึ่งการเชื่อมต่อผ่านบลูทูธเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้ผู้ใช้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าได้อย่างสมบูรณ์

เมื่อการตั้งค่าเบื้องต้นเสร็จสมบูรณ์ ผู้ใช้งานสามารถเปิดแอปพลิเคชันและทำการค้นหารถเข็นสินค้าในรายการอุปกรณ์บลูทูธที่สามารถเชื่อมต่อได้ จากนั้นเมื่อเชื่อมต่อสำเร็จ ระบบจะทำการเปิดใช้งานฟังก์ชันติดตามผู้ใช้งาน โดยรถเข็นสินค้าจะสามารถเคลื่อนที่ตามทิศทางของผู้ใช้งานได้โดยอัตโนมัติ รถเข็นสินค้าจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เหมาะสม และสามารถหยุดการเคลื่อนที่ได้เมื่อผู้ใช้งานต้องการ นอกจากนี้ ยังมีฟังก์ชันที่ช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานรถเข็นสินค้าคือระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง โดยเมื่อระบบตรวจพบว่ามีสิ่งกีดขวางในเส้นทางของรถเข็นสินค้า สัญญาณจะถูกส่งไปยังระบบเพื่อหยุดการเคลื่อนที่หรือปรับทิศทางของรถเข็นสินค้าให้หลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางโดยอัตโนมัติ ซึ่งช่วยให้การใช้งานรถเข็นสินค้าเป็นไปอย่างปลอดภัย

การตรวจสอบระดับแบตเตอรี่ของรถเข็นสินค้าจะถูกแสดงผ่านแอปพลิเคชัน โดยผู้ใช้สามารถดูสถานะแบตเตอรี่ได้ทันทีบนหน้าจอของอุปกรณ์มือถือ พร้อมทั้งจะมีระบบแจ้งเตือนเมื่อระดับพลังงานของแบตเตอรี่ต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถทำการชาร์จแบตเตอรี่ก่อนที่จะหมดและป้องกันปัญหาการหยุดการทำงานของรถเข็นสินค้าได้ รวมทั้งแสดงสถานะการทำงานของรถเข็นสินค้า เพื่อความสะดวกในการใช้งาน แสดงดังรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1 คู่มือการใช้งานรถเข็นสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าในการติดตามผู้ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าในการติดตามผู้ใช้งาน

การทดสอบการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าเริ่มจากจุดฐาน (Base Station) โดยรถเข็นสินค้าจะทำการตรวจจับทิศทางจากค่า RSSI ที่ได้รับจากโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานและเคลื่อนที่ไปยังทิศทางที่มีค่า RSSI สูงที่สุดในแต่ละช่วงเวลา ระบบจะปรับทิศทางการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องเพื่อให้รถเข็นสินค้าสามารถติดตามผู้ใช้งานได้ตลอดเวลา แสดงดังรูปที่ 2

รูปที่ 2 รถเข็นสินค้าเคลื่อนที่ตามผู้ใช้งาน

ในกรณีที่ผู้ใช้งานเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปจากทิศทางเดิม รถเข็นสินค้าจะสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงนี้และปรับทิศทางการเคลื่อนที่ให้ตรงกับทิศทางที่มีค่า RSSI สูงที่สุด เพื่อให้สามารถติดตามผู้ใช้งานได้อย่างแม่นยำอย่างต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 รถเข็นสินค้าปรับทิศทางการเคลื่อนที่ตามผู้ใช้งาน

ระหว่างการเคลื่อนที่ รถเข็นสินค้าจะใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกในการตรวจจับระยะห่างจากสิ่งกีดขวางที่อาจปรากฏในเส้นทางการเคลื่อนที่ หากตรวจพบสิ่งกีดขวาง รถเข็นสินค้าจะทำการหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยการปรับทิศทางใหม่และประมวลผลค่า RSSI ใหม่เพื่อเคลื่อนที่ต่อไปยังตำแหน่งของผู้ใช้งาน และเมื่อระบบจะตรวจพบว่าเข้าสู่ระยะที่ใกล้กับผู้ใช้งานเกินไป ซึ่งจะทำให้รถเข็นสินค้าหยุดการเคลื่อนที่อัตโนมัติเมื่อค่า RSSI สูงเกินเกณฑ์ที่กำหนดแสดงดังรูปที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4 รถเข็นสินค้าหยุดเคลื่อนที่เมื่อค่า RSSI เกินที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

โค้ดโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพัฒนาโครงงานรถเข็นสินค้าที่ติดตามผู้ใช้งานอัตโนมัติ มีการใช้โค้ดหลัก 3 ส่วน สำหรับควบคุมการทำงานของระบบ โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่เฉพาะดังนี้

1. โค้ดสำหรับบอร์ดหลัก

บอร์ดหลักทำหน้าที่ประมวลผลค่า RSSI จากสายอากาศทิศทางเพื่อระบุตำแหน่งของผู้ใช้งาน และใช้ข้อมูลดังกล่าวในการสั่งงานมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามทิศทางที่ถูกต้อง รวมถึงการใช้เซนเซอร์ไจโรสโคปเพื่อตรวจสอบการหมุนของรถเข็นสินค้า และช่วยให้สามารถปรับแก้ทิศทางการเคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เข้าถึงได้จาก https://drive.google.com/file/d/1v2GW5PfdgtX5rYEVqGYcGOVD4m6D8tzr/view?usp=sharing

2. โค้ดสำหรับบอร์ดที่สอง

บอร์ดที่สองรับผิดชอบการเชื่อมต่อกับโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานผ่านบลูทูธ และการตรวจจับสิ่งกีดขวางโดยใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิก ข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์จะถูกส่งไปยังบอร์ดหลักเพื่อให้รถเข็นสินค้าสามารถหยุดหรือเปลี่ยนทิศทางได้เมื่อพบสิ่งกีดขวาง นอกจากนี้ยังทำหน้าที่แลกเปลี่ยนข้อมูลกับแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือเพื่อให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบสถานะของระบบได้ เข้าถึงได้จาก https://drive.google.com/file/d/1SsOAuhdUJCqO5uuHtQyqRojLFOl-OvNc/view?usp=sharing

3. โค้ดสำหรับแอปพลิเคชันแอนดรอยด์

แอปพลิเคชันนี้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้เชื่อมต่อกับระบบรถเข็นสินค้าผ่านบลูทูธ และแสดงข้อมูลสถานะการทำงานของระบบในรูปแบบที่ผู้ใช้สามารถเข้าใจได้ง่าย ภายในแอปพลิเคชันมีฟังก์ชันสำหรับค้นหาอุปกรณ์บลูทูธที่เกี่ยวข้อง เชื่อมต่อและยกเลิกการเชื่อมต่อกับรถเข็นสินค้า รวมถึงแสดงผลข้อมูลที่ได้รับจากบอร์ดควบคุม เช่น เริ่มการเคลื่อนที่ หยุดการเคลื่อน ระดับพลังงานแบตเตอรี่ เข้าถึงได้จาก https://drive.google.com/drive/folders/1LnXIrQ_z-_NCRLIDdlYhFt5U8R8S35oW?usp=sharing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ฟังก์ชันโค้ดที่มีบทบาทหลักในการทำงานของรถเข็นสินค้า

4.1 ฟังก์ชันตรวจจับอุปกรณ์บลูทูธและอ่านค่า RSSI

ฟังก์ชัน btAdvertisedDeviceFound01, btAdvertisedDeviceFound02, และ btAdvertisedDeviceFound03 ใช้สำหรับตรวจจับสัญญาณจากอุปกรณ์บลูทูธที่เชื่อมต่อไว้ และอ่านค่าความแรงของสัญญาณ RSSI ในสามทิศทาง ดังต่อไปนี้

```
void btAdvertisedDeviceFound01(BTAdvertisedDevice *pDevice) {
  if (memcmp(pDevice->getAddress().getNative(),
pairedDevices[0], 6) == 0) {
    Serial.printf("Found a paired device asynchronously: %s\n",
pDevice->toString().c_str());
    std::string deviceName = pDevice->getName();
    String deviceAddress = pDevice->getAddress().toString();
    int deviceRSSI = pDevice->getRSSI();
    rssi[0] = pDevice->getRSSI();
    n = 0;
    return;
  }
}

void btAdvertisedDeviceFound02(BTAdvertisedDevice *pDevice) {
  if (memcmp(pDevice->getAddress().getNative(),
pairedDevices[0], 6) == 0) {
    Serial.printf("Found a paired device asynchronously: %s\n",
pDevice->toString().c_str());
    std::string deviceName = pDevice->getName();
    String deviceAddress = pDevice->getAddress().toString();
    int deviceRSSI = pDevice->getRSSI();
    rssi[1] = pDevice->getRSSI();
    n = 0;
    return;
  }
}

void btAdvertisedDeviceFound03(BTAdvertisedDevice *pDevice) {
  if (memcmp(pDevice->getAddress().getNative(),
pairedDevices[0], 6) == 0) {
    Serial.printf("Found a paired device asynchronously: %s\n",
pDevice->toString().c_str());
    std::string deviceName = pDevice->getName();
    String deviceAddress = pDevice->getAddress().toString();
    int deviceRSSI = pDevice->getRSSI();
    rssi[2] = pDevice->getRSSI();
    n = 0;
    return;
  }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ฟังก์ชันอ่านค่ามุมจากเซ็นเซอร์ MPU6050

ฟังก์ชัน vMPU6050Task() ใช้สำหรับอ่านค่ามุม Yaw จากเซนเซอร์ MPU6050 จะตรวจสอบว่ามีข้อมูลใหม่ใน FIFO Buffer หรือไม่ หากมีข้อมูล ก็จะดึงค่าควอเทอร์เนียนมาคำนวณแรงโน้มถ่วง และแปลงเป็นมุม Yaw, Pitch, Roll สุดท้ายจะคืนค่ามุม Yaw เป็นหน่วยองศา ดังต่อไปนี้

```
float vMPU6050Task() {
  if (mpu.dmpGetCurrentFIFOPacket(fifoBuffer)) {
    #ifdef OUTPUT_READABLE_YAWPITCHROLL
    mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
    mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
    mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);
    mpu.resetFIFO();    // ลองเพิ่มตัวนี้เข้ามา
    #endif
    return (ypr[0] * 180 / M_PI) ;
  }
}
```

4.3 ฟังก์ชันควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้า

ฟังก์ชัน MovementOfTheCart() ใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็นสินค้าโดยใช้ค่า RSSI จากสายอากาศสามทิศทางเพื่อตัดสินใจทิศทางการเคลื่อนที่ จากนั้นจะกำหนดค่ามุมเลี้ยวและใช้ฟังก์ชัน set_PWM(turn) เพื่อปรับความเร็วของมอเตอร์ให้เหมาะสม ดังต่อไปนี้

```
void MovementOfTheCart(void) {
  //define PWM_A is Left : PWM_B is Right
  if ( (rssi2 - rssi1) >= 3 && (rssi2 - rssi3) >= 3 ) { // -15
to 15 degree
    turn = "0";
    Serial.println("Turn : " + String(turn));
    set_PWM(turn);
    forward();
  }
  else if ( abs(rssi1 - rssi2) <= 6 && (rssi1 - rssi3) >= 6 &&
(rssi2 - rssi3) >= 6 ) { // -30 degree
    turn = "-30";
    Serial.println("Turn : " + String(turn));
    set_PWM(turn);
    reangle();
    angle = vMPU6050Task();
    while ( angle > -25) {
      forward();
      Serial.println("Angle: " + String(angle));
      delay(100);
      angle = vMPU6050Task();
      if (digitalRead(Front_break) == HIGH) {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        angle = -30;
      }
    }
    Serial.println("เลี้ยวสำเร็จ");
    turn = "00";
    if (digitalRead(Front_break) == HIGH) {
      turn = "Break";
    }
    set_PWM(turn);
    forward();
    reangle();
  }
  else if ((rssi3 - rssi1) >= 6 && (rssi2 - rssi1) >= 6 &&
abs(rssi2 - rssi3) <= 6 ) { // 30 degree
    turn = "30";
    Serial.println("Turn : " + String(turn));
    set_PWM(turn);
    reangle();
    angle = vMPU6050Task();
    while ( angle < 25) {
      forward();
      Serial.println("Angle: " + String(angle));
      delay(100);
      angle = vMPU6050Task();
      if (digitalRead(Front_break) == HIGH) {
        angle = 30;
      }
    }
    Serial.println("เลี้ยวสำเร็จ");
    turn = "00";
    if (digitalRead(Front_break) == HIGH) {
      turn = "Break";
    }
    set_PWM(turn);
    forward();
    reangle();
  }
  else if ( (rssi1 - rssi2) > 10  && (rssi1 - rssi3) > 10 ) {
// -45 to -75 degree
    turn = "-60";
    Serial.println("Turn : " + String(turn));
    set_PWM(turn);
    reangle();
    angle = vMPU6050Task();
    while ( angle > -55) {
      forward();
      Serial.println("Angle: " + String(angle));
      delay(100);
      angle = vMPU6050Task();
      if (digitalRead(Front_break) == HIGH) {
        angle = -60;
      }
    }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Serial.println("เลี้ยวสำเร็จ");
    turn = "00";
    if (digitalRead(Front_break) == HIGH) {
      turn = "Break";
    }
    set_PWM(turn);
    forward();
    reangle();
  }
  else if ( (rssi3 - rssi2) > 10  && (rssi3 - rssi1) > 10 ) {
// 45 to 75 degree
    turn = "60";
    Serial.println("Turn : " + String(turn));
    set_PWM(turn);
    reangle();
    angle = vMPU6050Task();
    while ( angle < 55) {
      forward();
      Serial.println("Angle: " + String(angle));
      delay(100);
      angle = vMPU6050Task();
      if (digitalRead(Front_break) == HIGH) {
        angle = 60;
      }
    }
    Serial.println("เลี้ยวสำเร็จ");
    turn = "00";
    if (digitalRead(Front_break) == HIGH) {
      turn = "Break";
    }
    set_PWM(turn);
    forward();
    reangle();
  }
}
```

4.4 ฟังก์ชันการตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวางของรถเข็นสินค้า

ฟังก์ชันสำหรับการตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวางของรถเข็นสินค้า โดยใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกตรวจจับสิ่งกีดขวาง หากมีสิ่งกีดขวางด้านหน้า รถเข็นสินค้าจะหยุดการเคลื่อนที่และตรวจสอบค่าระยะทางด้านซ้ายและด้านขวา เพื่อตัดสินใจหลบหลีกไปทางซ้ายหรือขวา จากนั้นจะหมุนรถเข็นสินค้าตามทิศทางที่เลือกและกลับมาเคลื่อนที่ต่อไป ดังต่อไปนี้

```
if ( digitalRead(Front_break) == HIGH ) {
  Serial.println("Break!");
  turn = "Break";
  if (rssi1 < -35 && rssi2 < -35 && rssi3 < -35) { //หลบหลีกสิ่งกีดขวาง
    d++;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    if ( d == 3) {
      digitalWrite(Status_move, LOW);
      delay(200);
      if (digitalRead(Back_break) == LOW) { // เช็คสิ่งกีดขวางบริเวณด้านหลังก่อนเคลื่อนที่ถอยหลัง
        detachInterrupt(Front_break);
        attachInterrupt(Back_break, Break_cart, RISING);  // เปิดใช้งาน interrupt เบรกหลัง
        backward();
        delay(3500);
        stopTurning();
        detachInterrupt(Back_break);
        attachInterrupt(Front_break, Break_cart, RISING);
        digitalWrite(Status_move, HIGH);
        r = 0;
      }
      if (true) { //เช็คค่าทิศทางของผู้ใช้งานว่าอยู่ด้านหน้าหรือไม่
        // ให้เรียกใช้ ultrasonic
        DL = Cal_distance(TrigL, EchoL);
        DR = Cal_distance(TrigR, EchoR);
        Serial.println("เช็คบริเวณด้านข้างของรถเข็น");
        DL += 1.1; //ชดเชยค่าความผิดพลาดของ ultrasonic
        DR += 1.3;
        Serial.println("DL : " + String(DL) + " cm");
        Serial.println("DR : " + String(DR) + " cm");
        if ( DL >= DR ) {
          turn = "-60";
          Serial.println("Turn : " + String(turn));
          Serial.println("Turn : หลบหลีกไปทางซ้าย ");
          set_PWM(turn);
          reangle();
          angle = vMPU6050Task();
          while ( angle > -55) {
            forward();
            Serial.println("Angle: " + String(angle));
            delay(100);
            angle = vMPU6050Task();
            if (digitalRead(Front_break) == HIGH) {
              Serial.println("พบสิ่งกีดขวางระหว่างเลี้ยวซ้าย");
              angle = -60;
            }
          }
          Serial.println("เลี้ยวสำเร็จ");
          turn = "00";
          if (digitalRead(Front_break) == HIGH) {
            turn = "Break";
          }
          set_PWM(turn);
          forward();
          reangle();
        }
        else {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            turn = "60";
            Serial.println("Turn : " + String(turn));
            Serial.println("Turn : หลบหลีกไปทางขวา ");
            set_PWM(turn);
            reangle();
            angle = vMPU6050Task();
            while ( angle < 55) {
              forward();
              Serial.println("Angle: " + String(angle));
              delay(100);
              angle = vMPU6050Task();
              if (digitalRead(Front_break) == HIGH) {
                Serial.println("พบสิ่งกีดขวางระหว่างเลี้ยวขวา");
                angle = 60;
              }
            }
            Serial.println("เลี้ยวสำเร็จ");
            turn = "00";
            if (digitalRead(Front_break) == HIGH) {
              turn = "Break";
            }
            set_PWM(turn);
            forward();
            reangle();
          }
        } //หากอยู่ด้านหน้าที่มีสิ่งกีดขวางกั้นอยู่จะหลบไปทางด้านซ้าย/ขวา
      }
    }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้