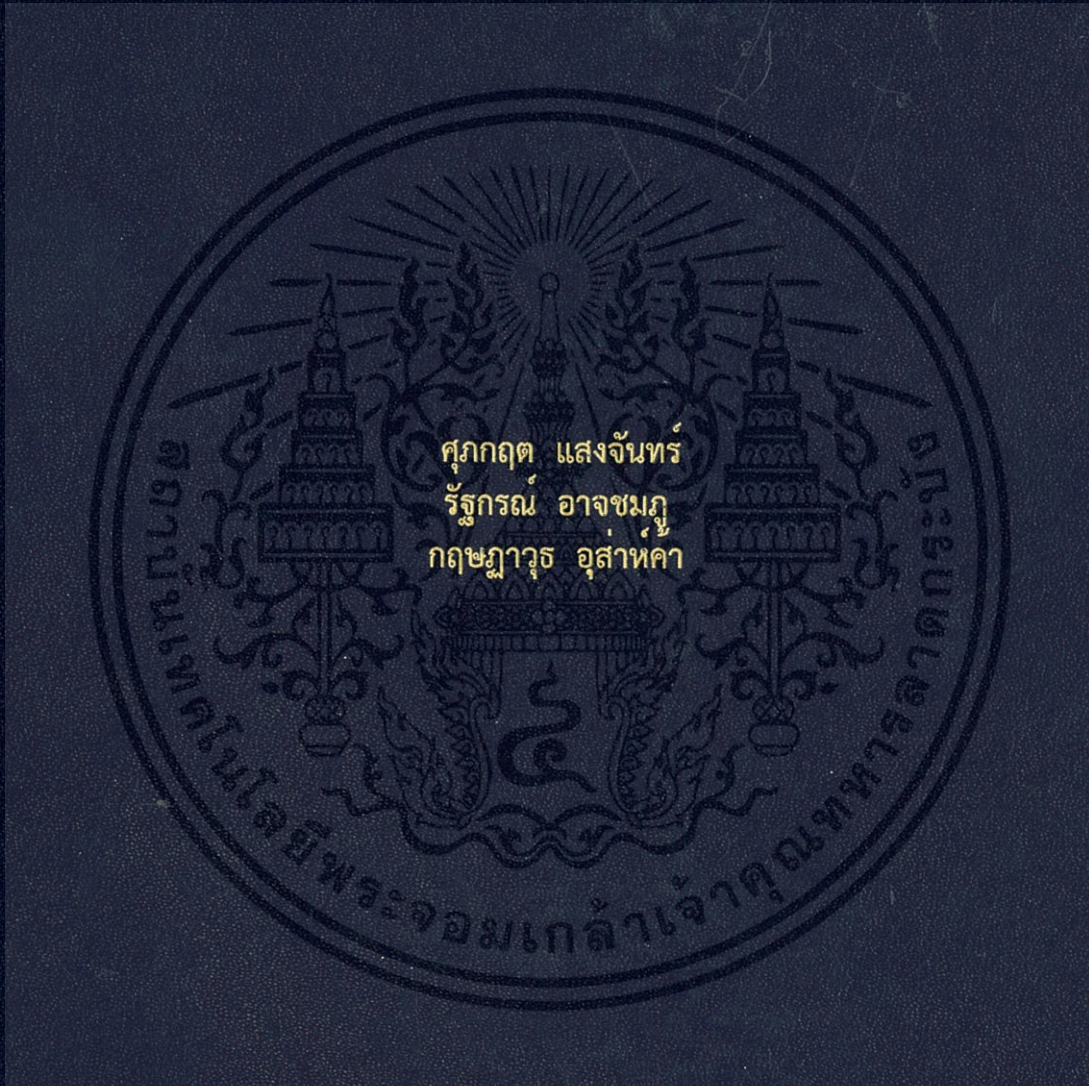


การตรวจจับรถไฟด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของราง
TRAIN DETECTION USING RAILWAY VIBRATION MEASUREMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2559

การตรวจจับรถไฟด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของราง
TRAIN DETECTION USING RAILWAY VIBRATION MEASUREMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TRAIN DETECTION USING RAILWAY VIBRATION MEASUREMENT



Supbhakrit Saengchan
Rattakorn Arjchompoo
Kritsadawut Usaka

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKABANG
2016
KMUTL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การตรวจจับรถไฟด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของราง

TRAIN DETECTION USING RAILWAY VIBRATION MEASUREMENT

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|-----------------|-----------|--------------|----------|
| 1. นายศุภกฤต | แสงจันทร์ | รหัสประจำตัว | 55011228 |
| 2. นายรัฐกรณ์ | อาจชมภู | รหัสประจำตัว | 55011037 |
| 3. นายกฤษฎาวัชร | อุสาค้า | รหัสประจำตัว | 55010040 |


..... อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์
(ผศ.ดร.อนันต์ พิณโสภณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การตรวจจําบรลไฟด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือน
ของราง

นักศึกษา

นายศุภกฤต แสงจันทร์ นายรัฐกรณ์ อาจชมพู
และนายกฤษฎา วุฒิสำห้ค้ำ

รหัสนักศึกษา

55011228, 55011037 และ 55010040

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

พ.ศ.

2559

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

ผศ.ดร.อนันต์ พิณโสภณ

บทคัดย่อ

จุดตัดทางรลไฟหลายแห่งในประเทศไทยไม่มีการติดตั้งสัญญาณเตือนในบริเวณทางข้ามรางรลไฟ เนื่องจากจําเป็นต้องใช้งบประมาณในการติดตั้งสูงอีกทั้งยังมีจํานวนมาก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อุบัติเหตุนบริเวณจุดตัดทางรลไฟเกิดขึ้นบ่อยครั้ง นำมาซึ่งการสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยป้องกันการเกิดอุบัติเหตุที่เกิดจากรลไฟในบริเวณทางข้ามที่ไม่มีสัญญาณเตือน ในงานปริญญานิพนธ์เล่มนี้ ได้นำเสนอการใช้ตัวตรวจวัดความร่งมาใช้วัดสัญญาณความร่ง เพื่อใช้ในการตรวจจําบรลไฟและนำไปใช้ในการส่งสัญญาณแจ้งเตือนด้วยระบบแสง ซึ่งระบบการส่งสัญญาณแจ้งเตือนจะประกอบไปด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณความร่งที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของไม้หมอน ระบบเครือข่ายไร้สาย Zigbee network ที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจําบรลไฟไปยังตัวรับสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณเตือนและอุปกรณ์วัดความร่งราคาถูกที่ทำหน้าที่ตรวจวัดสัญญาณความร่งจากการสั่นสะเทือนของไม้หมอนขณะรลไฟมา ซึ่งจากการวัดสัญญาณความร่งจากรลไฟ 25 ขบวน พบว่าเกณฑ์ในการตรวจจําบรลไฟนั้น จะต้องมีความร่งของไม้หมอนมากกว่า 4g และมีย่านความถี่ตอบสนองที่ 1 – 1000 Hz

Thesis	Train Detection Using Railway Vibration Measurement
Student	Supbhakrit Saengchan Rattakorn Arjchompoo and Kritsadaewut Usaka
Student ID.	55011228, 55011037 and 55010040
Degree	Bachelor Of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Unnat Pinsopon

ABSTRACT

Crossing notification signs are not installed at a large number of railway crossings in Thailand because of the installation cost and the large number of crossings. Therefore, accidents often took place at these sign-less railway crossings leading to death and the loss of assets. This project intends to help preventing accidents at sign-less railway crossings. The train detection system with the use of an acceleration sensor is proposed for checking the arrival of train and sending light alarms. The signal transmission system consist of a microcontroller that acquires railway acceleration signal, Zigbee wireless network that sends signal to a receiver for alarming, and a low cost acceleration sensor attached to the rail sleeper that measure railway acceleration. From the acceleration signal measurement obtained from 25 trains, the train detection criteria for checking the arrival of train is the railway acceleration signal measured at the rail sleeper must be higher than 4g between the frequency range of 1 to 1000 Hz.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยการตรวจจذبรถไฟด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของราง จะไม่สำเร็จล่วงไปได้ด้วยดี ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้

ผศ.ดร.อุณหัต พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำเป็นอย่างดีในการแก้ปัญหาต่างๆ มาโดยตลอด

ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่คอยให้คำปรึกษา และคำแนะนำที่ดีในการแก้ปัญหาต่างๆ

หน่วยงานการรถไฟแห่งประเทศไทย และ ดร.ธนา ภูเฝ้ากรัตน์ วิศวกรใหญ่ฝ่ายช่างกล การรถไฟแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนด้านแบบแปลนของหัวรถจักรไทยประเภทต่างๆ

คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจและคอยสนับสนุนอยู่เสมอ และเปรียบเสมือนครูคนแรกผู้ซึ่งมีพระคุณอย่างหาที่เปรียบมิได้

เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในกลุ่มงานวิจัยระบบอัตโนมัติ จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้งานวิจัยสำเร็จมาได้ด้วยดี

ขอบพระคุณจากทุกท่านที่มีส่วนร่วมทำให้งานวิจัยสำเร็จล่วงไปได้ด้วยดีไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ศุภกฤต แสงจันทร์
รัฐกรณ์ อาจชมภู
กฤษฎาวุธ อู่สำห้คำ

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินการ	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การเลือกชนิดของตัวตรวจจับวัตถุ	3
2.2 เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน	7
2.3 ประเภทของหัวรถจักร	8
2.4 ระบบส่งสัญญาณไร้สายด้วย Zigbee network	13
2.5 XBee	14
2.5.1 รูปแบบในการต่อโครงข่ายไร้สายของ XBee	14
2.5.2 การพิจารณา Xbee เพื่อให้เหมาะสมกับงาน	16
2.5.2 ลักษณะทั่วไปของ XBee	17
2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino UNO R3	19
บทที่ 3 การออกแบบการทดลองและการตั้งค่าอุปกรณ์	22
3.1 อุปกรณ์การทดลอง	22
3.2 วิธีทำการทดลอง	25
3.3 การติดตั้งระบบเตือน	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

3.4 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ตรวจจ็บบรรณไฟ	27
3.4.1 อุปกรณ์ของตัวตรวจจ็บบรรณไฟ	28
3.4.2 ขนาดของแบตเตอรี่	28
3.4.3 โค้ดที่ใช้ในอุปกรณ์ฝั้งตรวจจ็บบรรณไฟ	29
3.4.4 Flow chart แสดงการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจ็บบรรณไฟ	32
3.5 ส่วนประกอบของอุปกรณ์รับสัญญาณ	34
3.5.1 อุปกรณ์ของตัวรับสัญญาณ	34
3.5.2 ขนาดของแบตเตอรี่	35
3.5.3 โค้ดที่ใช้ในอุปกรณ์ฝั้งรับสัญญาณ	35
3.5.4 Flow chart แสดงการทำงาน	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล	38
4.1 สัญญาณความเร่งที่เกิดจากห้วงจรดีเซลรางและดีเซลไฟฟ้า	38
4.1.1 การหาจำนวนตู้โดยสาร	39
4.1.2 การแยกประเภทของห้วงจร	40
4.1.3 การหาย่านของความถี่ตอบสนอง	42
4.1.4 การหาระยะเพลลาของห้วงจร	43
(1) การหาระยะเพลลาของห้วงจรดีเซลราง	43
(2) การหาระยะเพลลาของห้วงจรดีเซลไฟฟ้า	45
(3) การเปรียบเทียบระยะเพลลาที่คำนวณได้กับระยะจริง	46
4.2 การวิเคราะห์สัญญาณ FFT ของห้วงจร	48
4.2.1 การวิเคราะห์โดยใช้ปัจจัยน้ำหนักกตเพลลาที่กับความเร็วของรถจักร	48
4.2.2 การวิเคราะห์โดยใช้ปัจจัยความเร็วของรถจักรคงที่กับน้ำหนักกตเพลลา	50
4.3 เภนทในการเตือนสัญญาณจากรถไฟ	52
4.4 การเลือกขนาดของ MEMS accelerometer	54
4.5 การสอบเทียบของเซนเซอร์	55
4.5.1 การหาสมการความเร่งของ MEMS accelerometer	55
4.5.2 ผลการสอบเทียบ MEMS และ IEPE accelerometer	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.6 ผลการวัดที่ได้จาก MEMS accelerometer	58
4.7 ผลการทดลองจากการใช้ระบบเตือนการมาของรถไฟ	60
บทที่ 5 บทสรุป	62
5.1 สรุปผลการทดลอง	62
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	62
5.3 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก ก	65
ภาคผนวก ข	72



สารบัญตาราง

ตาราง 2.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบลักษณะของตัวตัวจับวัตถุชนิดต่างๆ	5
ตาราง 2.2 ประเภทของหัวรถจักร	8
ตาราง 2.3 การเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีไร้สายชนิดอื่นๆ	13
ตาราง 2.4 คุณสมบัติของ xbee แต่ละประเภท	17
ตาราง 2.5 การทำงานของแต่ละขาของ Xbee	18
ตาราง 2.6 สภาพะการทำงานของ Arduino Uno	21
ตาราง 4.1 การเปรียบเทียบระยะ S_1 และ S_2 จากการคำนวณเทียบกับระยะจริงของรถดีเซลราง	46
ตาราง 4.2 การเปรียบเทียบระยะ S_1 และ S_2 จากการคำนวณเทียบกับระยะจริงของรถดีเซลไฟฟ้า	47
ตาราง 4.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของควมถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุดและขนาดของความเร่งสูงสุดโดยใช้น้ำหนักดเพลาคงที่	49
ตาราง 4.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของควมถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุดและขนาดของความเร่งสูงสุดโดยใช้ความเร็วของรถจักรที่ใกล้เคียงกัน	51
ตาราง 4.5 แสดงค่า t_1 , t_2 และ a ของหัวรถจักรดีเซลรางและหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า	53
ตาราง 4.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ Accelerometer	54
ตาราง 4.7 ผลการสอบเทียบ MEMS accelerometer ด้วย IEPE accelerometer	56

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 เซนเซอร์แบบเหนี่ยวนำ (Inductive proximity sensor)	3
รูปที่ 2.2 เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ (Capacitive proximity sensor)	4
รูปที่ 2.3 เซนเซอร์แสง (Photo sensor)	4
รูปที่ 2.4 เซนเซอร์เสียง (Ultrasonic sensor)	4
รูปที่ 2.5 เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน (Vibration sensor)	5
รูปที่ 2.6 อุปกรณ์วัดความเร่งชนิด IEPE accelerometer	7
รูปที่ 2.7 อุปกรณ์วัดความเร่งชนิด MEMS accelerometer	8
รูปที่ 2.8 หัวรถจักร Alsthom (ADD)	8
รูปที่ 2.9 หัวรถจักร Alsthom (AHK)	9
รูปที่ 2.10 รูปที่ หัวรถจักร THN	9
รูปที่ 2.11 หัวรถจักร GEA (CM22-7i)	10
รูปที่ 2.12 หัวรถจักร Hitachi (HID)	10
รูปที่ 2.13 หัวรถจักร GEK (UM12C)	11
รูปที่ 2.14 หัวรถจักร Quishuyan (SDA3)	11
รูปที่ 2.15 หัวรถจักร NKF	12
รูปที่ 2.16 ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์เครือข่าย ZigBee	14
รูปที่ 2.17 การต่อเครือข่ายแบบ Star	15
รูปที่ 2.18 การต่อเครือข่ายแบบ Cluster Tree	15
รูปที่ 2.19 การต่อเครือข่ายแบบ Mesh	16
รูปที่ 2.20 ลักษณะขาของ Xbee	18
รูปที่ 2.21 ลักษณะทั่วไปของ Arduino Uno	20
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์วัดความเร่งชนิด IEPE accelerometer	22
รูปที่ 3.2 DEWESoft43A	22
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์วัดความเร่งชนิด MEMS accelerometer	23
รูปที่ 3.4 Arduino Uno	23
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ Xbee Pro. Series1 U.FL Antenna	24
รูปที่ 3.6 Level logic converter	24
รูปที่ 3.7 Ultrasonic sensor	24
รูปที่ 3.8 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นของรางรถไฟ	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

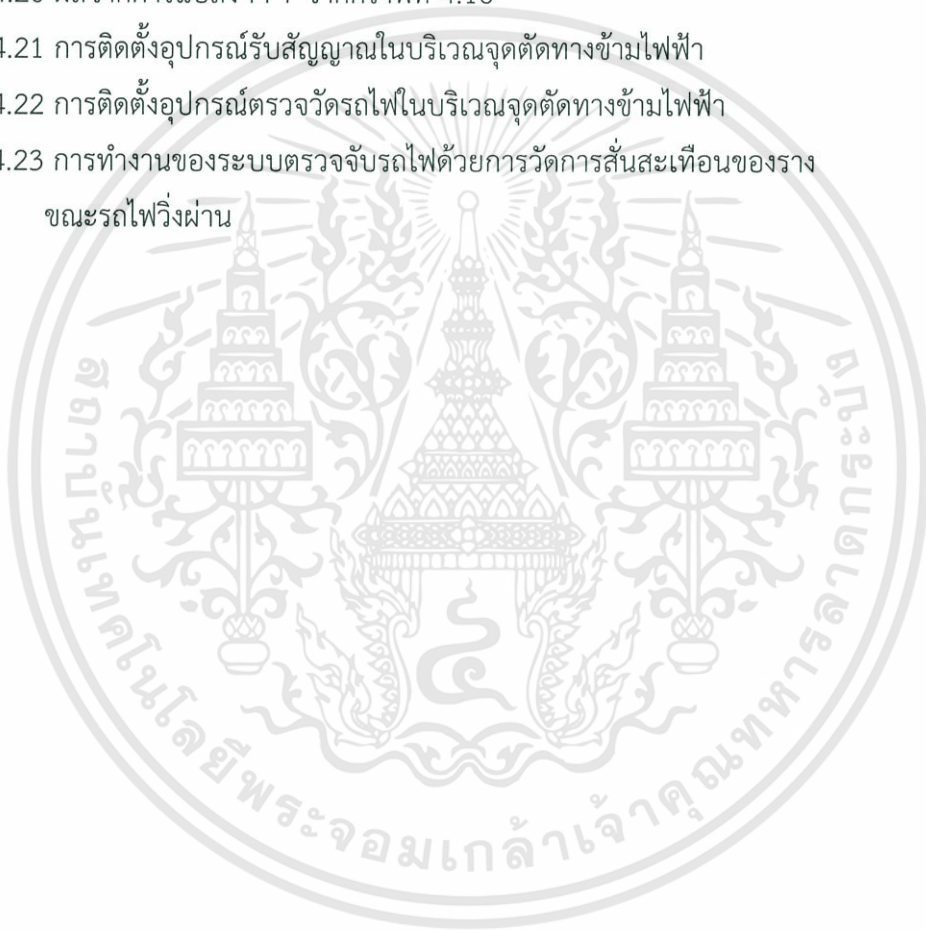
สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบการใช้งาน	26
รูปที่ 3.10 การทำงานของอุปกรณ์ต้นแบบ	26
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ตรวจจذبรถไฟ	27
รูปที่ 3.12 การต่อวงจรของอุปกรณ์ตรวจจذبรถไฟ	28
รูปที่ 3.13 Flow chart แสดงการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจذبรถไฟ	32
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์รับสัญญาณ	34
รูปที่ 3.15 การต่อวงจรของอุปกรณ์รับสัญญาณ	34
รูปที่ 3.16 Flow chart แสดงการทำงานของอุปกรณ์รับสัญญาณ	36
รูปที่ 4.1 สัญญาณความถี่ที่เกิดจากหัวรถจักรดีเซลราง	38
รูปที่ 4.2 สัญญาณความถี่ของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า	39
รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ส่วนประกอบต่างๆ จากกราฟสัญญาณการสั่นสะเทือนของรถดีเซลราง ซึ่งกราฟที่ได้ ทำการดัดแปลงมาจากกราฟในรูปที่ 4.1	39
รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ส่วนประกอบต่างๆ จากกราฟสัญญาณการสั่นสะเทือนของรถดีเซลไฟฟ้า ซึ่งกราฟที่ได้ ทำการดัดแปลงมาจากกราฟในรูปที่ 4.2	40
รูปที่ 4.5 ลักษณะของหัวรถจักรดีเซลราง	40
รูปที่ 4.6 ลักษณะหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า	41
รูปที่ 4.7 ผลจากการแปลงสัญญาณ FFT จากกราฟสัญญาณความถี่ของหัวรถจักรดีเซลราง	42
รูปที่ 4.8 ผลจากการแปลงสัญญาณ FFT จากกราฟสัญญาณความถี่ของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า	42
รูปที่ 4.9 แบบแปลนบางส่วนของหัวรถจักร NKF	43
รูปที่ 4.10 แสดงการหาค่า t_1 และ t_2 จากกราฟสัญญาณความถี่ของรถจักรดีเซลราง	44
รูปที่ 4.11 แบบแปลนบางส่วนของหัวรถจักร ALSTHOM	45
รูปที่ 4.12 แสดงการหาค่า t_1 และ t_2 จากกราฟสัญญาณความถี่ของรถจักรดีเซลไฟฟ้า	46
รูปที่ 4.13 ผลจากการแปลง FFT จากสัญญาณความถี่ของหัวรถจักร Alsthom ซึ่งประกอบด้วยกราฟ a - f ดังนี้	49
รูปที่ 4.14 ผลจากการแปลง FFT จากสัญญาณความถี่ของหัวรถจักรในแต่ละรุ่นซึ่ง ประกอบด้วยกราฟ g - j ดังนี้	50
รูปที่ 4.15 เกลนทีในการเตือนสัญญาณความถี่ของรถดีเซลราง	52
รูปที่ 4.16 เกลนทีในการเตือนสัญญาณความถี่ของรถดีเซลไฟฟ้า	52
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง MEMS acceleration (G) และค่า A/D value	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า IEPE acceleration _{rms} (G) หรือค่าความเร่งที่เกิดขึ้นจริงและค่า MEMS acceleration _{rms} (G)	57
รูปที่ 4.19 สัญญาณความเร่งของหัวรถจักรดีเซลราง ที่อ่านได้จาก MEMS accelerometer	58
รูปที่ 4.20 ผลจากการแปลง FFT จากกราฟที่ 4.16	59
รูปที่ 4.21 การติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณในบริเวณจุดตัดทางข้ามไฟฟ้า	60
รูปที่ 4.22 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดรถไฟในบริเวณจุดตัดทางข้ามไฟฟ้า	60
รูปที่ 4.23 การทำงานของระบบตรวจจับรถไฟด้วยการวัดการสั่นสะเทือนของรางขณะรถไฟวิ่งผ่าน	61



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

จุดตัดรถไฟในประเทศไทยมีอยู่หลายชนิดโดยประกอบไปด้วยจุดหลักผ่าน 590 จุด ซึ่งเป็นทางตัดผ่านทางรถไฟของเอกชนที่ไม่ได้รับอนุญาตจากการรถไฟแห่งประเทศไทย จุดที่มีป้ายจราจร 788 จุด จุดที่มีสะพานหรือทางลอด 261 จุด (เป็นจุดที่ไม่ตัดผ่านกับถนน) จุดที่มีคานกั้นอัตโนมัติและมีคนควบคุม 834 จุด จุดที่มีสัญญาณไฟอัตโนมัติ 40 จุด และจุดที่มีเอกชนควบคุม 5 จุด โดยจุดที่ไม่มีสัญญาณเตือนมีทั้งหมด 1418 จุด (รวมถึงป้ายจราจร) จากทั้งหมด 2518 จุด [1] อีกทั้งยังมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นในบริเวณจุดตัดอีกบ่อยครั้ง ซึ่งในปี 2557 มีอุบัติเหตุบริเวณจุดตัดเกิดขึ้น 127 ครั้ง มีผู้ได้รับบาดเจ็บ 91 คน และมีผู้เสียชีวิต 27 คน [2]

ในปัจจุบันระบบสัญญาณควบคุมการเดินทางและระบุตำแหน่งของรถไฟที่ใช้คือ วงจรไฟตอน หรือ Track circuit โดยมีหลักการทำงานคือ จะมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าแรงดันต่ำเข้าไปในรางรถไฟ ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็นตอนๆ และในแต่ละตอนจะมีขนาดกันไว้ ในสภาวะปกติเมื่อไม่มีขบวนรถไฟวิ่งในตอนสัญญาณ กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านวงจรรีเลย์เพื่อแสดงสัญญาณว่าไม่มีรถไฟวิ่งในตอนสัญญาณนี้ และเมื่อมีขบวนรถไฟวิ่งเข้ามาในตอนสัญญาณ กระแสไฟฟ้างี้จะวิ่งผ่านล้อรถไฟ ส่งผลให้ไม่มีไฟฟ้าไหลผ่านวงจรรีเลย์ ทำให้สามารถรู้ได้ว่ามีขบวนรถไฟวิ่งอยู่ในตอนสัญญาณนี้ [3]

เครื่องกั้นทางข้ามรถไฟที่ใช้ในปัจจุบันมี 2 แบบ คือ แบบที่อัตโนมัติหรือสามารถทำงานได้เองและแบบที่ใช้คนควบคุม เครื่องกั้นทางข้ามรถไฟแบบอัตโนมัติจะมีเครื่องนับล้อติดอยู่ข้างรางรถไฟ ก่อนถึงจุดตัดประมาณ 700 เมตร จำนวน 1 ตัว และหลังจุดตัดประมาณ 50 เมตร “เมื่อรถเหยียบแท็กรีกของเครื่องนับล้อตัวแรกเครื่องกั้นก็จะยกคานลงโดยอัตโนมัติและเมื่อรถไฟวิ่งผ่านไปอีก 50 เมตร รถไฟจะเหยียบแท็กรีกของเครื่องนับล้ออีกตัวหนึ่ง เครื่องกั้นก็จะยกตัวขึ้นภายใน 7 วินาที” [4]

ในงานปริญญาโทฉบับนี้ ได้นำเสนอการใช้ตัวตรวจวัดความเร่งมาใช้วัดสัญญาณความเร่งเพื่อใช้ในการตรวจจบริดไฟและนำไปใช้ในการส่งสัญญาณแจ้งเตือนด้วยระบบแสง โดยระบบเตือนจะเป็นเอกเทศกับระบบตอนสัญญาณรถไฟหรือไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบสัญญาณรถไฟ ซึ่งระบบการส่งสัญญาณแจ้งเตือนจะประกอบไปด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณความเร่งที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของไม้หมอน ระบบเครือข่ายไร้สาย Zigbee network ที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณเตือน และอุปกรณ์วัดความเร่งราคาถูกที่ทำหน้าที่ตรวจวัดสัญญาณความเร่งจากการสั่นสะเทือนของไม้หมอนขณะรถไฟมา ซึ่งจากการวัดสัญญาณความเร่งจากรถไฟ 25 ขบวน พบว่าเกณฑ์ในการตรวจวัดการมา

ของรถไฟนั้น จะต้องมีขนาดความเร่งของไม้หมอนมากกว่า 4g และมีย่านความถี่ตอบสนองที่ 1 – 1000 Hz

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อนำเสนอระบบตรวจวัดการมาของรถไฟ โดยใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนของไม้หมอน

1.2.2 นำเสนอระบบแจ้งเตือนการมาของรถไฟโดยใช้ระบบ Zigbee network และเป็นเอกเทศกับระบบตอนสัญญาณรถไฟ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองกับรถไฟสายตะวันออกจากสถานีลาดกระบังไปยังสถานีพระจอมเกล้าภายในบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1.3.2 ทำการทดลองเฉพาะรถไฟไทย

1.4 วิธีการดำเนินการ

1.4.1 ศึกษาลักษณะการตรวจจับของเซนเซอร์แต่ละชนิดเพื่อเลือกลักษณะการตรวจจับที่เหมาะสม

1.4.2 ศึกษาลักษณะการสั่นสะเทือนของรางรถไฟ โดยใช้ IEPE accelerometer เป็นเครื่องมือในการศึกษา

1.4.3 นำข้อมูลที่ได้จากข้อที่ 1.4.2 ไปเลือกขนาดของ MEMS accelerometer ที่เหมาะสมกับลักษณะงาน และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมสัญญาณที่เกิดขึ้น

1.4.5 ออกแบบและสร้างระบบตรวจจับรถไฟ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1.5.1 ช่วยป้องกันอุบัติเหตุที่เกิดจากการเดินข้ามทางรถไฟ

1.5.2 มีความรู้ในเรื่องเซนเซอร์และการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

1.5.3 ทราบถึงลักษณะการสั่นสะเทือนของรางรถไฟ

1.5.4 สามารถรู้และเข้าใจข้อมูลพื้นฐานของรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

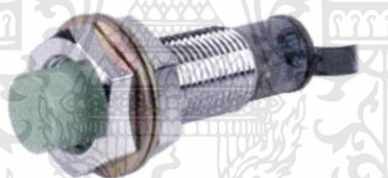
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเลือกชนิดของตัวตรวจจับวัตถุ

ตัวตรวจจับวัตถุหรือเซนเซอร์นั้นเป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมเช่น เสียง แสงและการเคลื่อนไหวที่อยู่รอบๆ มาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วส่งไปยังส่วนควบคุมของเครื่องไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่ต่อเข้ากับตัวเซนเซอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้วัตถุที่ต้องการตรวจจับคือรถไฟ จึงได้ทำการสืบค้นว่าในทางอุตสาหกรรมใช้เซนเซอร์ชนิดใดบ้าง ดังต่อไปนี้

(1) เซนเซอร์แบบเหนี่ยวนำ (Inductive proximity sensor) เป็นเซนเซอร์ที่ทำงานโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ทำให้สามารถตรวจจับวัตถุที่เป็นโลหะเท่านั้น



รูปที่ 2.1 เซนเซอร์แบบเหนี่ยวนำ (Inductive proximity sensor)

(รูปจาก : http://www.autoniconline.com/product/product&product_id=287)

(2) เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ (Capacitive proximity sensor) เป็นเซนเซอร์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความจุ ซึ่งเมื่อค่าความจุเปลี่ยนแปลงจนถึงค่า ๆ หนึ่ง จะส่งผลให้เกิดการอสซิลเลทสัญญาณขึ้นและส่งต่อให้เอาต์พุตทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 เซนเซอร์ชนิดเก็บประจุ (Capacitive proximity sensor)
(รูปจาก : <http://www.inno-ins.com/781837/พรีอิกซิมิต์เซนเซอร์>)

(3) เซนเซอร์แสง (Photo sensor) เป็นเซนเซอร์ที่ทำงานโดยอาศัยส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ ตัวส่งแสง (emitter) และตัวรับแสง (receiver) ลักษณะการตรวจจับเกิดจากการที่ลำแสงจากตัวส่งแสง ส่งไปสะท้อนกับวัตถุหรือถูกขวางกั้นด้วยวัตถุ ส่งผลให้ตัวรับแสงรู้สภาวะที่เกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงสภาวะของสัญญาณทางด้านเอาต์พุตเพื่อนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.3 เซนเซอร์แสง (Photo sensor)

(รูปจาก <http://www.directindustry.com/prod/sensopart/product-9202-769533.html>)

(4) เซนเซอร์เสียง (Ultrasonic sensor) เป็นเซนเซอร์ที่ทำงานโดยอาศัยการกระจายหรือการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงความถี่สูงไปกระทบกับพื้นผิวของตัวกลาง และคลื่นเสียงความถี่สูงนี้จะสะท้อนกลับเรียกว่า "Echo" โดยช่วงเวลาของการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างระหว่างวัตถุกับเซนเซอร์



รูปที่ 2.4 เซนเซอร์เสียง (Ultrasonic sensor)

(รูปจาก <http://www.newark.com/schneider-electric-telemecanique>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5) เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน (Vibration sensor) เป็นเซนเซอร์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการการสั่นสะเทือนของสิ่งแวดล้อมบริเวณที่ติดตั้งเซนเซอร์เพื่อตรวจจับวัตถุ



รูปที่ 2.5 เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน (Vibration sensor)

(รูปจาก <http://digiducer.com>)

โดยจะนำข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นมาวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียในการตรวจจับรถไฟ ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

ตาราง 2.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบลักษณะของตัวตรวจจับวัตถุชนิดต่างๆ

ชนิดของตัวตรวจจับ	ข้อดีในการตรวจจับรถไฟ	ข้อเสียในการตรวจจับรถไฟ
Inductive proximity sensor	<ul style="list-style-type: none"> -สามารถใช้งานได้ดีในสภาพแวดล้อมที่เลวร้าย -ตอบสนองต่อการทำงานได้รวดเร็ว -มีอายุการใช้งานยาวนาน -สามารถตรวจจับรถไฟได้ 	<ul style="list-style-type: none"> -มีระยะการตรวจจับวัตถุที่ใกล้ ซึ่งโดยทั่วไป อยู่ระหว่าง 4-40 mm ขึ้นอยู่กับขนาด -ติดตั้งได้ยากเนื่องจากต้องติดตั้งใกล้ขบวนรถไฟและเสี่ยงต่อความเสียหาย -สามารถตรวจจับวัตถุอื่นๆ ที่เป็นโลหะ
Capacitive proximity sensor	<ul style="list-style-type: none"> -สามารถใช้งานได้ดีในสภาพแวดล้อมที่เลวร้าย -ตอบสนองต่อการทำงานได้รวดเร็ว -มีอายุการใช้งานยาวนาน -สามารถตรวจจับรถไฟได้ 	<ul style="list-style-type: none"> -มีระยะการตรวจจับวัตถุที่ใกล้ ซึ่งโดยทั่วไป อยู่ระหว่าง 4-40 mm ขึ้นอยู่กับขนาด -ติดตั้งได้ยากเนื่องจากต้องติดตั้งใกล้ขบวนรถไฟและเสี่ยงต่อความเสียหาย

ตาราง 2.1 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบลักษณะของตัวตรวจจับวัตถุชนิดต่างๆ (ต่อ)

ชนิดของตัวตรวจจับ	ข้อดีในการตรวจจับรถไฟ	ข้อเสียในการตรวจจับรถไฟ
		-สามารถตรวจจับวัตถุอื่นๆ ที่ไม่ต้องการได้
Photo sensor	-สามารถใช้งานได้ดีในสภาพแวดล้อมที่เลวร้าย -ตอบสนองต่อการทำงานได้รวดเร็ว -มีระยะเวลาการตรวจจับที่ไกล -มีอายุการใช้งานยาวนาน -สามารถตรวจจับรถไฟได้	-สามารถตรวจจับวัตถุอื่นๆ ที่ไม่ต้องการ
Ultrasonic sensor	-สามารถใช้งานได้ดีในสภาพแวดล้อมที่เลวร้าย -ตอบสนองต่อการทำงานได้รวดเร็ว -มีระยะเวลาการตรวจจับที่ไกล -มีอายุการใช้งานยาวนาน -สามารถตรวจจับรถไฟได้	-สามารถตรวจจับวัตถุอื่นๆ ที่ไม่ต้องการ
Vibration sensor	-สามารถตรวจจับรถไฟได้ -ตอบสนองต่อการทำงานได้รวดเร็ว -เมื่อต่อเข้ากับอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถเลือกเฉพาะรูปแบบการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากรถไฟได้	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของเซนเซอร์แต่ละประเภท จะเห็นว่าเซนเซอร์ทุกชนิดจะตรวจจับวัตถุอื่นๆ ที่ไม่ต้องการ ยกเว้นเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน ทำให้ไม่เหมาะสมในการนำมาเตือนการมาของรถไฟ แต่เนื่องจากเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนสามารถแยกสัญญาณการสั่นสะเทือนของรถไฟได้เมื่อทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้งานวิจัยนี้ใช้เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนในการตรวจจับรถไฟ

2.2 เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน

เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าแอคเซเลอโรเมตร (Accelerometer) ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการการสั่นสะเทือนของสิ่งแวดล้อม บริเวณที่ติดตั้งเซนเซอร์ เพื่อตรวจจับวัตถุ โดยแอคเซเลอโรเมตรที่นำมาพิจารณานั้นมีดังนี้

(1) IEPE accelerometer หรือ Integrated electronic piezoelectric accelerometer เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกลต่างๆ โดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นตัวกลางในการทำงาน เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียดหรือแรงกระทำอื่นๆ โดยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะเปลี่ยนพลังงานกลต่างๆ เหล่านี้ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในรูปความต่างศักย์ ซึ่งขนาดของความต่างศักย์จะมีขนาดแปรผันตรงกับขนาดของแรงที่มากระทำ

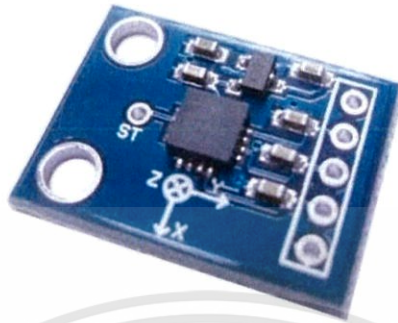


รูปที่ 2.6 อุปกรณ์วัดความเร่งชนิด IEPE accelerometer

(ที่มา <https://www.kistler.com/th/en/products/components/accelerometer-sensors>)

(2) MEMS accelerometer หรือ Micro-Electro Mechanical System เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งอันเนื่องมาจากแรงกลต่างๆ เช่น แรงดัน ความเร่ง การสั่น แรงเครียดหรือแรงกระทำอื่นๆ โดยพลังงานกลต่างๆ เหล่านี้จะทำให้เกิดการสั่นของมวลในระดับไมโคร ทำให้วงจรภายในเกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับแรงที่มากระทำ ด้วยคุณสมบัตินี้จึงสามารถนำมาเป็นอุปกรณ์วัดความเร่งได้ และ MEMS accelerometer มีราคาต่ำกว่า IEPE accelerometer อยู่มาก แต่มีประสิทธิผลที่ต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์วัดความเร่งชนิด MEMS accelerometer
(ที่มา <http://www.hobbytronics.co.uk/adxl335-breakout>)

2.3 ประเภทของหัวรถจักร

หัวรถจักรที่ใช้ในประเทศไทยมีอยู่หลายประเภท โดยรุ่นที่ได้ทำการทดลองมีทั้งหมด 7 รุ่น ดังที่ได้แสดงที่ตารางที่ 2.2 และในภาคผนวก อนึ่งข้อมูลหัวรถจักรชุดนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงาน การรถไฟแห่งประเทศไทย และ ดร.ธนา ภูเฝ้ากรัตน์ วิศวกรใหญ่ฝ่ายช่างกล การรถไฟแห่งประเทศไทย

ตาราง 2.2 ประเภทของหัวรถจักร

รุ่น	ภาพตัวอย่าง	ลักษณะเฉพาะ
ALSTHOM (ADD)	 <p>รูปที่ 2.8 หัวรถจักร Alsthom (ADD) (ที่มา https://th.wikipedia.org/wiki/รถจักรดีเซลไฟฟ้าในประเทศไทย)</p>	<p>ชนิดรถจักร : รถจักรดีเซลไฟฟ้า หมายเลขรถ : 4401 - 4420 เครื่องยนต์ : Pielstick 16PA4V185VG ขนาดความจุ 7000 ซีซี. 8 สูบ เครื่องยนต์เดี่ยว กำลังขับเคลื่อน : 2,400 แรงม้า ที่ 1,500 รอบต่อนาที ความเร็วสูงสุด : 100 กม./ชม. การจัดวางล้อ : Co-Co น้ำหนักตัวรถ : 77.50 ตัน (เมื่อจอดนิ่ง) และ 82.50 ตัน (ขณะทำขบวน) น้ำหนักกดเพลา : 13.75 ตัน ระยะเพลา : 1.65 เมตร</p>

ตาราง 2.2 ประเภทของหัวรถจักร (ต่อ)

รุ่น	ภาพตัวอย่าง	ลักษณะเฉพาะ
ALSTHOM (AHK)	 <p>รูปที่ 2.9 หัวรถจักร Alsthom (AHK) (ที่มาจาก https://th.wikipedia.org/wiki/รถจักรดีเซลไฟฟ้าในประเทศไทย)</p>	<p>ชนิดรถจักร : รถจักรดีเซลไฟฟ้า หมายเลขรถ : 4201-4230 เครื่องยนต์ : Pielstick 16PA4V185VG ขนาด 7000 ซีซี. 8 สูบ เครื่องยนต์เดี่ยว กำลังขับเคลื่อน : 2,400 แรงม้า ที่ 1,500 รอบต่อนาที ความเร็วสูงสุด : 100 กม./ชม. การจัดวางล้อ : Co-Co น้ำหนักตัวรถ : 77.50 ตัน (เมื่อจอดนิ่ง) / 82.50 ตัน (ขณะทำงาน) น้ำหนักกดเพลา : 13.75 ตัน ระยะเพลา : 1.65 เมตร</p>
THN	 <p>รูปที่ 2.10 รูปที่ หัวรถจักร THN (ที่มาจาก https://th.wikipedia.org/รถดีเซลราง)</p>	<p>ชนิดรถจักร : รถจักรดีเซลราง หมายเลขรถ : 1101-1140 เครื่องยนต์ : Cummins N855-R2 กำลังขับเคลื่อน : 235 แรงม้า ที่ 2,100 รอบต่อนาที ความเร็วสูงสุด : 100 กิโลเมตร/ชั่วโมง การจัดวางล้อ : 1A-2 น้ำหนักตัวรถ : 33.500 ตัน (น้ำหนักรถเปล่า) 35.322 ตัน (น้ำหนักขณะทำงาน) น้ำหนักกดเพลา : 12 ตัน ระยะเพลา : 2.10 เมตร</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.2 ประเภทของหัวรถจักร (ต่อ)

รุ่น	ภาพถ่ายอย่าง	ลักษณะเฉพาะ
<p>GEA (CM22-7i)</p>	 <p>รูปที่ 2.11 หัวรถจักร GEA (CM22-7i) (ที่มา https://th.wikipedia.org/wiki/รถจักรดีเซลไฟฟ้าในประเทศไทย)</p>	<p>ชนิดรถจักร : รถจักรดีเซลไฟฟ้า หมายเลขรถ : 4523-4560 เครื่องยนต์ : Cummins KTA-50L ขนาดความจุ 5000 ซีซี. 10 สูบ มี 2 เครื่องยนต์ กำลังขับเคลื่อน : 2 x 1,250 แรงม้า ที่ 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วสูงสุด : 100 กม./ชม. การจัดวางล้อ : Co-Co น้ำหนักตัวรถ : 80.60 ตัน (จอดนิ่ง) และ 86.50 ตัน (ขณะทำขบวน) น้ำหนักกดเพลลา : 14.42 ตัน ระยะเพลลา : 1.80 เมตร</p>
<p>HITACHI (HID)</p>	 <p>รูปที่ 2.12 หัวรถจักร Hitachi (HID) (ที่มา https://th.wikipedia.org/wiki/รถจักรดีเซลไฟฟ้าในประเทศไทย)</p>	<p>ชนิดรถจักร : รถจักรดีเซลไฟฟ้า หมายเลขรถ : 4501-4522 เครื่องยนต์ : Cummins KTTA-50L ขนาดความจุ 8000 ซีซี. 12 สูบ มี 2 เครื่องยนต์ กำลังขับเคลื่อน : 2 x 1430 แรงม้า ที่ 1,800 รอบต่อนาที ความเร็วสูงสุด : 100 - 120 กม./ชม. การจัดวางล้อ : Co-Co น้ำหนักตัวรถ : 84.50 ตัน (เมื่อจอดนิ่ง) และ 90.00 ตัน (ขณะทำขบวน) น้ำหนักกดเพลลา : 15.00 ตัน ระยะเพลลา : 1.85 เมตร</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.2 ประเภทของหัวรถจักร (ต่อ)

รุ่น	ภาพถ่ายอย่าง	ลักษณะเฉพาะ
<p>GEK (UM12C)</p>	 <p>รูปที่ 2.13 หัวรถจักร GEK (UM12C) (ที่มา http://www.geocities.ws/railsthai/train01.htm)</p>	<p>ชนิดรถจักร : รถจักรดีเซลไฟฟ้า หมายเลขรถ : 4001-4050 เครื่องยนต์ : Cummins KT38-L ขนาดความจุ 3,800 ซีซี. 12 สูบ มี 2 เครื่องยนต์ กำลังขับเคลื่อน : 660 แรงม้า X 2 เครื่อง = 1320 แรงม้า ที่รอบ 1,985 รอบต่อนาที ความเร็วสูงสุด : 103 กม./ชม. แต่ถูกกำหนดไว้ที่ 95 กม./ชม. การจัดวางล้อ : แบบล้อ Co-Co น้ำหนักตัวรถ : 70.178 ตัน (เมื่อจอดนิ่ง) / 75.00 ตัน (ขณะทำขบวน) น้ำหนักกดเพลลา : 12.5 ตัน ระยะเพลลา : 1.911 เมตร (เพลลาแรก) ระยะเพลลา : 1.803 เมตร (เพลลาหลัง)</p>
<p>CSR Qishuyan U20 (SDA3)</p>	 <p>รูปที่ 2.14 หัวรถจักร Quishuyan (SDA3) (ที่มา https://th.wikipedia.org/wiki/รถจักรดีเซลไฟฟ้าในประเทศไทย)</p>	<p>ชนิดรถจักร : รถจักรดีเซลไฟฟ้า หมายเลขรถ : 5101 - 5120 เครื่องยนต์ : Caterpillar C175 ACERT แรงม้า : 3,800 แรงม้า ความเร็วสูงสุด : 110 กิโลเมตร/ชั่วโมง การจัดวางล้อ : Co-Co น้ำหนักตัวรถ : 120 ตัน น้ำหนักกดเพลลา : 20 ตัน ระยะห่างเพลลา : 1.80 เมตร</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 2.2 ประเภทของหัวรถจักร (ต่อ)

รุ่น	ภาพตัวอย่าง	ลักษณะเฉพาะ
NKF	 <p>รูปที่ 2.15 หัวรถจักร NKF (ที่มา https://th.wikipedia.org/รถดีเซลราง)</p>	<p>ชนิดรถจักร : รถจักรดีเซลราง หมายเลขรถ : 1201-1264 เครื่องยนต์ : Cummins N855-R2 กำลังขับเคลื่อน : 235 แรงม้า ที่ 2,100 รอบต่อนาที ความเร็วสูงสุด : 100 กิโลเมตร/ชั่วโมง การจัดวางล้อ : 1A-2 น้ำหนักตัวรถ : 33.500 ตัน (น้ำหนักรถเปล่า) 35.322 ตัน (น้ำหนักขณะทำงาน) น้ำหนักกดเพลลา : 12 ตัน ระยะเพลลา : 2.10 เมตร</p>

หมายเหตุ : หัวรถจักรที่ได้แสดงไปเป็นเพียงส่วนหนึ่งจากทั้งหมด เนื่องจากผู้ทดลองต้องการเฉพาะหัวรถจักรที่วิ่งผ่านบริเวณที่ทำการทดลองเท่านั้น

ลักษณะการจัดวางล้อของหัวรถจักร

การจัดวางล้อจะระบุเป็นตัวเลขหรือตัวอักษรดังต่อไปนี้

ล้อรับน้ำหนักจะระบุเป็นตัวเลขตามจำนวนเพลลา เช่น 1, 2, 3, ...

ล้อกำลังจะระบุเป็นตัวอักษรตามจำนวนเพลลา เช่น A, B, C, ...

ตัวโอเล็ก “o” หมายถึง ล้อนั้นมีมอเตอร์ขับเคลื่อน

เครื่องหมาย - หมายถึง แคร่ล้อนั้นแยกกันอยู่

เครื่องหมาย + หมายถึง แต่ละแคร่อยู่บนโครงเดียวกัน [5] และลักษณะการจัดวางล้อที่พบ

ในรถไฟในตารางที่ 2.2 มีดังนี้

(1) แบบ Co - Co หมายถึง หัวรถจักรมี 2 แคร่ และใน 1 แคร่จะมี 3 เพลลา โดยล้อกำลังมีมอเตอร์ขับเคลื่อนแยกกัน 3 เพลลา

(2) แบบ Bo - Bo หมายถึง มี 2 แคร่ และใน 1 แคร่จะมี 2 เพลลา ล้อกำลังมีมอเตอร์ขับเคลื่อนแยกกัน 2 เพลลา

(3) แบบ 1A-2 หมายถึง มี 2 แคร่ โดยแคร่แรกเป็นล้อรับน้ำหนัก 1 เพลลา ล้อขับเคลื่อน 1 เพลลา และ แคร่สองเป็นล้อรับน้ำหนักทั้งสองเพลลา นับไล่จากหน้ามาหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ระบบส่งสัญญาณไร้สายด้วย Zigbee network

ซิกบี (ZigBee) จะเป็นการสื่อสารไร้สายประเภทหนึ่งที่มีการกำหนดมาตรฐานโดย ซิกบีออลิแอนซ์ (Zigbee Alliance) ซึ่งจะอ้างอิงตามมาตรฐานการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย 802.15.4 ซึ่งข้อดีของตัวซิกบีจะใช้พลังงานน้อยและมีขนาดเล็ก ซึ่งในปัจจุบันนิยมมาเอาซิกบี มาใช้ในระบบ ไรเรสเซนเซอร์เน็ตเวิร์ค (Wireless Sensor Network) เนื่องจากใช้พลังงานน้อย สามารถนำไปวางไว้ตามจุดต่างๆ ในพื้นที่ทำงานได้อย่างสะดวก โดยไม่มีปัญหาเรื่องพลังงาน ทำให้ใช้งานได้เป็นระยะเวลานานๆ เหมาะอย่างยิ่งสำหรับระบบตรวจจับ หรือระบบตรวจวัดต่างๆ ที่ต้องเฝ้าดูค่าการเปลี่ยนแปลงของระบบที่ใช้ระยะเวลาต่อเนื่อง ซิกบีจะมีความถี่หลักๆ ที่ใช้งานกันอยู่ 3 ย่านความถี่ ได้แก่

ย่านความถี่ 868 MHz มี 1 ช่องสัญญาณ อัตราการส่งข้อมูลจะอยู่ที่ 20 Kbps

ย่านความถี่ 915 MHz มี 10 ช่องสัญญาณ อัตราการส่งข้อมูลจะอยู่ที่ 40 Kbps

ย่านความถี่ 2.4 GHz มี 16 ช่องสัญญาณ อัตราการส่งข้อมูลจะอยู่ที่ 250 Kbps

ในการใช้งานซิกบีนั้นจะเห็นได้ว่ามีคลื่นความถี่ 3 ระดับ แต่ทั้ง 3 ระดับนั้นเราไม่สามารถนำมาใช้งานร่วมกันได้ ในการเลือกซิกบีมาใช้งานนั้น ภายในระบบต้องเป็นย่านความถี่เดียวกันทั้งหมด โดยส่วนใหญ่แล้วผู้ใช้งานมักจะเลือกย่านความถี่ที่ 2.4 GHz มาใช้งาน ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบเครือข่าย Zigbee และเครือข่ายอื่นๆ ดังนี้

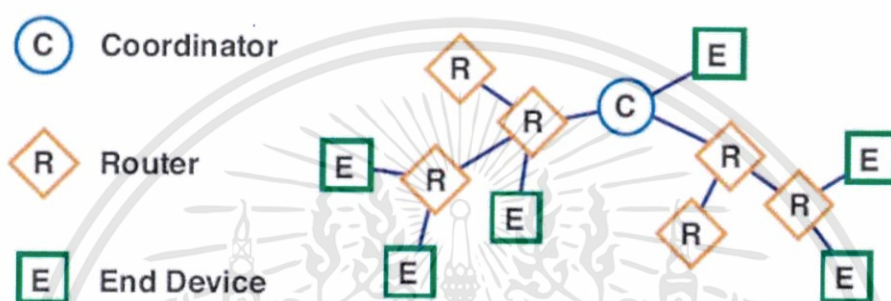
ตาราง 2.3 การเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีไร้สายชนิดอื่นๆ

Standard	Zigbee (802.15.4)	WI-FI (802.11b)	Bluetooth (802.15.1)
Transmission Rang (m)	1-100	1-100	1-10
Battery Life (days)	100-1000	0.5-5	1-7
Network Size (nodes)	>64000	32	7
Application	Monitoring & Control	Web,Email	Cable Replacement
Stack Size (Kb)	4-32	1000	250
Throughput (Kb/s)	20-250	11000	720

ซึ่งจากตารางที่ 2.3 จะเห็นว่าเครือข่าย Zigbee(802.15.4) มีอายุการใช้งานที่ยาวและมีระยะการส่งสัญญาณที่ไกลที่สุด แต่มีความเร็วในการส่งที่น้อยที่สุด ซึ่งไม่ใช่ปัญหาแต่อย่างใด เพราะงานที่ใช้เป็นการส่งข้อมูลขนาดเล็ก และถ้าแบ่งประเภท Zigbee ตามรูปแบบการทำงาน เราสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ ซึ่งแต่ละประเภทมีลักษณะการทำงานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (1) โคออดิเนเตอร์ (Coordinator) จะทำการสร้างการสื่อสาร เชื่อมโยงเครือข่ายระหว่างอุปกรณ์เครือข่ายทั้งหมด
- (2) เอ็นดีไวซ์ (End Device) เป็นอุปกรณ์ที่อยู่โหนดสุดท้ายมีหน้าที่รับข้อมูลจากพวกเซนเซอร์ต่างๆ แล้วทำการส่งต่อออกไป
- (3) เราเตอร์ (Router) จะเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลผ่านต่อไปยังโหนดอื่นๆ



รูปที่ 2.16 ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์เครือข่าย ZigBee

2.5 XBee

XBee เป็นอุปกรณ์ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์และ RF IC อยู่ภายใน ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณรับส่งสัญญาณ (Transceiver) ย่านความถี่ 2.4 GHz มีการจัดการโดยใช้พลังงานต่ำ ใช้งานง่าย มีอินเทอร์เฟซที่ใช้รับส่งข้อมูลกับ XBee เป็น UART (TTL) ซึ่งสามารถนำขาที่ใช้ติดต่อสื่อสาร UART ของ XBee ต่อเข้ากับ UART ของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เลย

XBee สามารถใช้งานตามมาตรฐาน ZigBee ได้ โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมสร้างเครือข่าย Zigbee เพราะทางผู้ผลิตได้จัดทำเฟิร์มแวร์ (Firmware) ที่จะโหลดเข้าไปในตัว XBee ให้สามารถตั้งค่าพารามิเตอร์ผ่านซอฟต์แวร์อินเทอร์เฟซ (X-CTU หรือโปรแกรมที่เขียนขึ้นเอง) ผ่านทาง At Command (เหมือนการควบคุม GSM Module) โดยใช้ไฮเปอร์เทอร์มินอล (Hyper terminal) ผ่านทางการรับส่งข้อมูลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้อย่างง่ายดาย โดยเมื่อตั้งค่า XBee ให้ทำงานเป็นอุปกรณ์ในเครือข่าย ZigBee แล้ว เราจะเรียก XBee แต่ละตัวว่าโหนด เฟิร์มแวร์ที่ใช้กับ XBee จะโหลดผ่านโปรแกรม X-CTU ทั้งนี้ XBee แต่ละรุ่น จะสามารถตั้งค่าการใช้งานได้มากมาย ทำให้เฟิร์มแวร์ที่จะต้องโหลดเข้าไปในนั้นมีมากมายหลายแบบและต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน

2.5.1 รูปแบบในการต่อโครงข่ายไร้สายของ XBee

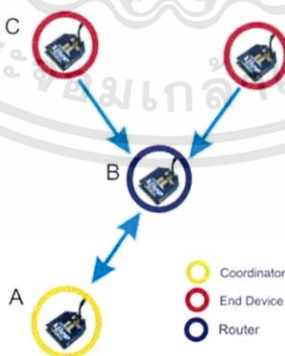
XBee เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ รับส่งข้อมูลแบบไร้สาย และสามารถสร้างระบบเครือข่ายขึ้นมาได้ โดย ZigBee ได้อ้างอิง มาตรฐานตาม IEEE 802.15.4 โดยสามารถแบ่ง หน้าที่การทำงานของ XBee เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามรูปแบบการสื่อสารในลักษณะต่างๆ ได้ อาทิ Coordinator, Router, End Device ในการสร้างโครงข่ายไร้สายของ ZigBee นั้น จะต้องประกอบด้วยโหนด จำนวนอย่างน้อยที่สุด 2 ชนิด คือ Coordinator node และ node ลูกข่าย ชนิดใดชนิดหนึ่ง (Router/End device) จึงจะสามารถสื่อสารและทำงานในรูปแบบของ PAN (Personal area network) ได้ โดย ZigBee สามารถแบ่งรูปแบบ เครือข่ายได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

(1) Star (Broadcast) การเชื่อมต่อแบบ Star หรือแบบ Broadcast เป็นการรับส่งข้อมูลแบบ ไม่เฉพาะเจาะจง จุดหมายปลายทางหรือ XBee ทุกตัวที่อยู่ในระบบเครือข่ายเดียวกันสามารถรับข้อมูลทุกข้อมูลได้ทุกตัว



(2) Cluster Tree เป็นการ รับส่งข้อมูล แบบ ส่งผ่าน เช่น A ต้องการติดต่อ กับ C แต่ C อยู่ไกลจาก A จน A ไม่สามารถ ติดต่อกับ C ได้ แต่พอดีมี B ที่อยู่ระหว่าง A กับ C ดังนั้น Cluster Tree จะใช้ B เป็นเหมือน ตัวกลาง เชื่อมการติดต่อ (Repeater) ระหว่าง A กับ C



(3) Mesh การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบ Mesh เป็นโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากข้อมูลสามารถส่งไปถึงเป้าหมายได้หลายทาง ทำให้ ระบบนี้สามารถรับส่งข้อมูลไปยังจุดหมาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลายทางได้ แม้จะเกิดความเสียหายของระบบในบางส่วนก็ตาม (ขึ้นอยู่กับ การออกแบบระบบของ ผู้ใช้ด้วย) ระบบนี้จึงเป็นระบบที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.19 การต่อเครือข่ายแบบ Mesh

2.5.2 การพิจารณา Xbee เพื่อให้เหมาะสมกับงาน

(1) เลือก Series ของ Xbee โดยข้อแตกต่างระหว่าง Series1 และ Series2 คือ Series1 ทำ Mesh Network ไม่ได้ แต่ Series2 ทำ Mesh Network ได้ และ Series2 จะแบ่งเป็นอีก 2 รุ่นย่อยคือ Znet2.5 และ ZB ซึ่ง ปัจจุบัน Xbee Series 2 จะเป็นรุ่น ZB เท่านั้นและเพิ่มความสามารถในการอัปเดต Firmware ของ Xbee ผ่านอากาศได้ (แต่โดยส่วนมาก ยังไม่ค่อยได้ใช้ฟังก์ชันนี้) ดังนั้นการจะเลือกซื้อในขั้นแรก ให้พิจารณา Application ที่ได้ออกแบบไว้ ยกตัวอย่างเช่น ระบบ Wireless Sensor Network ในเกษตรกรรม ในพื้นที่กว้าง ๆ และมีการวัดค่า Sensor หลายจุด และมีความซับซ้อนของการรับส่งข้อมูล ควรพิจารณาว่าจะใช้ Mesh Network อาจจะเหมาะกว่า Star Network

(2) เลือกระยะเวลาการรับส่งสัญญาณ สำหรับ Xbee จะแยกรุ่นสำหรับเรื่องระยะเวลาการรับส่งอย่างชัดเจน ด้วยคำว่า "PRO" โดยรุ่นระยะสั้น กำลังการส่ง 1-2 mW จะมีระยะรับส่งประมาณ 100-120 เมตร ส่วนรุ่นระยะไกล "PRO" กำลังส่งจะอยู่ในช่วง 50-60 mW โดยจะมีระยะประมาณ 1500 เมตร การที่ Xbee จะส่งสัญญาณออกไปได้ไกลนั้นขึ้นอยู่กับ สภาพแวดล้อมของระบบ และ สายอากาศ เนื่องจากเป็นความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สูง อัตราการลดทอนสัญญาณก็จะสูง และ สิ่งกีดขวางจะมีผลอย่างมาก

(3) เลือกแบบของสายอากาศ ซึ่งจากข้อ 2 ระยะเวลาที่ Xbee รับส่งได้จริงตามที่คุณสมบัติบอกไว้ จะขึ้นกับสายอากาศ สายอากาศที่ Xbee ใช้จะมีอยู่ 4 แบบ คือ PCB , Chip , UFL และ SMA การคำนวณว่ากรณีใดทั้งสี่ อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีการพิจารณาในแต่ละประเภทดังนี้

PCB Antenna เหมาะกับการใช้งานใน โครงการที่ต้องการขนาดเล็ก เพราะการใช้สายอากาศแบบนี้ สายอากาศไม่เกะกะ นำไปใส่กล่องได้ แต่ได้เฉพาะกล่องพลาสติก ไม่สามารถใส่กล่องเหล็กได้ เนื่องจากใส่กล่องเหล็กสัญญาณจะไม่สามารถส่งออกมานอกกล่องเหล็กได้ หากต้องใช้กล่องเหล็ก ควรเลือกใช้สายอากาศที่ต่อออกมานอกกล่องเหล็ก

Wire Antenna ระยะและความเสถียร จะได้ตามคุณสมบัติที่บอกไว้และด้วยสายอากาศที่ยื่นออกมาลักษณะนี้ บางทีผู้ใช้อาจจะรู้สึกเกะกะ ทำให้ใส่กล่องที่ออกแบบมาไม่ได้ แต่ถ้าใช้งานแบบทั่วไป สายอากาศชนิดนี้จะเหมาะสมที่สุด

UFL Antenna ระยะและความเสถียร จะได้ตามคุณสมบัติที่บอกมา เหมาะกับงานที่ออกแบบใส่ในกล่อง และต้องการให้สายอากาศยื่นออกมานอกกล่อง และเนื่องจากการที่ต้องต่อสาย UFL to SMA ออกมาเพิ่มเติม ตรงจุดนี้จะทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณบ้างเล็กน้อย แต่ก็จะมีการขยายสัญญาณที่สายอากาศอีกที จึงต้องไปพิจารณาอัตราขยายที่สายอากาศต่อกับ (อัตราขยายเรียกว่า Gain มีหน่วยเป็น(dB หรือ dBi)

SMA Antenna ระยะและความเสถียร จะได้ตามคุณสมบัติที่ดีที่สุด ต่อใช้งานร่วมกับสายอากาศ จะมีการขยายสัญญาณที่สายอากาศอีกที ในการต่อใช้งานจริง การออกแบบใส่กล่องจะต้องออกแบบให้มีตำแหน่งของ Xbee ให้ใกล้กับรูเจาะกล่อง

ตาราง 2.4 คุณสมบัติของ xbee แต่ละประเภท

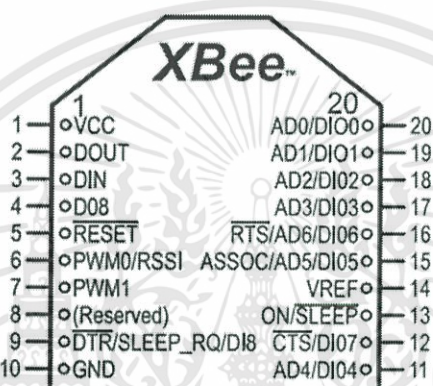
Feature	Xbee series 1	Xbee series 2	Xbee pro series 1	Xbee pro series 2
Power Input	3.3V @ 50mA	3.3V @ 40mA	3.3V @ 215mA	3.3V @ 295mA
Max data rate (Air)	250kbps	250kbps	250kbps	250kbps
Power Output	1mW output (+0dBm)	2mW output (+3dBm)	60mW output (+18dBm)	50mW output (+17dBm)
Distance	300ft (100m)	400ft (120m)	1 mile (1500m)	1mile (1600m)

2.5.2 ลักษณะทั่วไปของ XBee

- (1) ทำงานในช่วงความถี่ 2.4 GHz
- (2) มีสายอากาศให้เลือกหลายแบบ
- (3) ใช้ไฟเลี้ยงอยู่ที่ 2.8-3.4 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (4) กระแสไฟตกน้อยกว่า $10 \mu A$
- (5) มีอัตราการรับส่งข้อมูลอยู่ที่ 250 Kbps (สัญญาณที่ส่งผ่านอากาศ)
- (6) มีอัตราการส่งข้อมูลอินเตอร์เฟสแบบอนุกรมอยู่ระหว่าง 1.2-115.2 Kbps (ส่วนที่ใช้ติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์)
- (7) เป็นการกระจายคลื่นชนิด DSSS (Direct Sequence)
- (8) การกำหนดที่อยู่ มีลำดับลักษณะคือ กำหนด PAN ID สำหรับเครือข่ายหนึ่งๆ กำหนดช่องที่ที่อยู่ของแต่ละตัว



รูปที่ 2.20 ลักษณะขาของ Xbee

ตาราง 2.5 การทำงานของแต่ละขาของ Xbee

ขาที่	ชื่อขา	การทำงาน
1	Vcc	ขาต่อไฟเลี้ยง +3.3V
2	DOUT	ขาเอาต์พุตส่งข้อมูลอนุกรม
3	DIN	ขาอินพุตรับข้อมูลอนุกรม
4	DO8	ขาเอาต์พุตดิจิตอลช่อง 8
5	RESET	ขารีเซ็ต (แอกทีฟ “0”)
6	PWM0/RSSI	ขาเอาต์พุต PWM ช่อง 0 และ
7	PWM1	ขาเอาต์พุตแสดงแรงของการรับสัญญาณขาเอาต์พุต PWM ช่อง 1
8	NC	ไม่ใช้งาน
9	DTR/SLEEP_RQ/DI8	ขาอินพุตรับสัญญาณให้หยุดทำงานเข้าสู่โหมดสลีป (Sleep mode) หรือเป็นขาอินพุตดิจิตอลช่อง 8
10	GND	ขาต่อกราวด์
11	AD4/DIO4	ขาอินพุตอะนาล็อก 4 หรือ ขาเอาต์พุตดิจิตอล 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

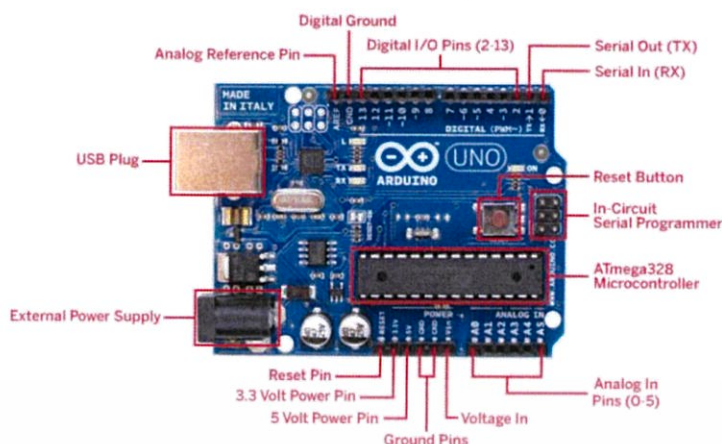
ตารางที่ 2.5 การทำงานของแต่ละขาของ Xbee (ต่อ)

12	CTS/DIO7	อินพุตรับสัญญาณแจ้งการส่งข้อมูลของโฮสต์ (Clear-To-Send) ใช้ในการควบคุมจังหวะการรับส่งข้อมูล หรือขาอินพุตเอาต์พุตดิจิทัล 7
13	ON/SLEEP	ขาแสดงสถานะการทำงาน “1” : อยู่ในโหมดทำงานปกติ และ “2” : อยู่ในโหมดสลีป (Sleep mode)
14	VRE	ขาต่อแรงดันอ้างอิงสำหรับโมดูลแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล
15	Associated/AD5/DIO5	ขาแสดงสถานะการเชื่อมต่อหรือขาอินพุตอะนาล็อก 5 หรือขาอินพุตเอาต์พุตดิจิทัล 5
16	RTS/AD6/DIO6	ขาเอาต์พุตแจ้งความพร้อมในการส่งข้อมูล (Ready-To-Send) ใช้ควบคุมจังหวะการรับส่งข้อมูลหรือเป็นขาอินพุตอะนาล็อก 6 หรือเป็นขาอินพุตเอาต์พุตดิจิทัล 6
17	AD3/DIO3	ขาอินพุตอะนาล็อก 3 หรือขาอินพุตเอาต์พุตดิจิทัล 3
18	AD2/DIO2	ขาอินพุตอะนาล็อก 2 หรือขาอินพุตเอาต์พุตดิจิทัล 2
19	AD1/DIO1	ขาอินพุตอะนาล็อก 1 หรือขาอินพุตเอาต์พุตดิจิทัล 1
20	AD0/DIO0	ขาอินพุตอะนาล็อก 0 หรือขาอินพุตเอาต์พุตดิจิทัล 0

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino UNO R3

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยรวมเอาหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก วงจรรับสัญญาณอินพุต วงจรขับสัญญาณเอาต์พุต หน่วยความจำ และวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถนำไปใช้งานแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ซึ่งภาษาที่ใช้เขียนโปรแกรมนี้มี ภาษา Assembly ภาษา C หรือ ภาษา Java เป็นต้น

ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีชื่อว่า Arduino Uno R3 ซึ่งมีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software และมีภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมเฉพาะตัวซึ่งคล้ายกับภาษา C ทำให้ตัวบอร์ด Arduino สามารถให้ใช้งานได้ง่ายโดยสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O และสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมอุปกรณ์ที่นำมาต่อได้ โดยรายละเอียดของขาต่างๆ มีดังนี้



รูปที่ 2.21 ลักษณะทั่วไปของ Arduino Uno

(1) RESET เป็นสัญญาณ Input Logic Reset ของ MCU เมื่อเป็น Logic Low จะทำให้ MCU อยู่ในสภาวะรีเซ็ต เมื่อเป็น Logic High จะทำให้ MCU อยู่ในสภาวะทำงานตามปกติ โดยสัญญาณ RESET นี้จะถูกควบคุมจาก 2 แหล่ง คือจากสวิตช์ RESET ภายในบอร์ด และจากสัญญาณ DTR ของ FT232RL ถ้ามีการเลือก Enable Jumper ของ Auto Reset จาก DTR ไว้

(2) +3.3 เป็นแหล่งจ่ายไฟขนาด +3.3V ที่ได้จากวงจร Regulate ภายในของ ATmega328P สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 50mA ซึ่งเมื่อต้องการนำแหล่งจ่าย +3.3 V นี้ไปใช้งาน เป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่างๆต้องระมัดระวังเรื่องการดึงกระแสของโหลดด้วยถ้าโหลดมีการดึงกระแสมากกว่า 50mA อาจทำให้ ATmega328P เสียหายได้

(3) +VIN เป็นไฟ DC ที่รับมาจาก Jack VIN(External Supply) แต่ผ่านการ Rectifier และ Filter เป็น DC แล้ว มีขนาดแรงดันเฉลี่ยตามขนาดแรงดันที่ป้อนให้กับบอร์ดทาง Jack Vin

(4) +5V เป็นจุดต่อแหล่งจ่ายไฟของบอร์ดออกไปใช้งาน ซึ่งมาจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง คือจากพอร์ต USB และจาก External Supply ซึ่งถ้าต่อแหล่งจ่ายให้บอร์ดจาก External Supply ผ่านทาง Jack VIN แหล่งจ่าย +5V นี้จะมาจาก Switching Regulate (LM2575-5V) สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดถึง 1A แต่ถ้าใช้แหล่งจ่ายจากพอร์ต USB แหล่งจ่าย +5V นี้จะมาจากพอร์ต USB โดยตรงโดยจะมีฟิวส์แบบ Poly ขนาด 500mA ต่อกันการดึงกระแสเกิน เพื่อป้องกันความเสียหายของพอร์ต USB โดยจะจ่ายกระแสได้สูงสุดไม่เกิน 500mA ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในการจ่ายกระแสของพอร์ต USB และการ Configure ค่าให้กับ FT232RL ด้วย

(5) A0-A5 เป็นขาสัญญาณ Analog Input แบบ ADC มีขนาดความละเอียด 10 บิต มี 6 ขา สามารถรับแรงดันอนาล็อกอินพุตได้ 0-5 VDC

(6) D0-D13 เป็นขาสัญญาณ Digital Input/Output แบบ TTL มีทั้งหมด 14 Pin สามารถใช้ทำหน้าที่เป็นอินพุตหรือเอาต์พุตตามการกำหนดจากโปรแกรม โดยมีบางขาสามารถกำหนดหน้าที่ใช้งานเป็นฟังก์ชันพิเศษต่างๆเพิ่มเติมได้อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6.1) D0-D1 ถูกสงวนไว้ใช้ทำหน้าที่เป็นพอร์ตสื่อสารอนุกรม RS232(UART0) โดยได้ทำการเชื่อมต่อกับ USB Bridge ของ FT232RL เพื่อใช้อัพโหลดให้กับบอร์ด และยังสามารถใช้ทดลองติดต่อสื่อสารรับส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดกับคอมพิวเตอร์ PC ได้ด้วย

(6.2) D3, D5, D6 และ D9-D11 สามารถ โปรแกรมหน้าที่เป็น PWM ได้

(6.3) D14 สามารถโปรแกรมหน้าที่เป็น TX1 สำหรับ ส่งข้อมูลของ UART1

(6.4) D15 สามารถโปรแกรมหน้าที่เป็น RX1 สำหรับ รับข้อมูลให้กับ UART1 ได้

(7) AREF เป็นสัญญาณ Analog Reference จากภายนอกที่ต้องการป้อนให้กับ MCU ซึ่งตามปกติแล้ว ATMEGA1280 สามารถโปรแกรมให้เลือกใช้แรงดันอ้างอิงจากภายในได้อยู่แล้ว โดยสามารถเลือกเป็น 1.1V หรือ 2.56V หรือ AVCC (+5V) โดยไม่จำเป็นต้องป้อนแรงดันอ้างอิงจากภายนอกให้กับบอร์ดอีก แต่ถ้าต้องการแรงดันอ้างอิงที่มีความแตกต่างจากที่กล่าวมาแล้วก็สามารถป้อนเป็นแรงดันอ้างอิงจากภายนอกผ่านทางขา AREF นี้เข้าไปเองได้ระหว่าง 0-5V

ตาราง 2.6 สภาวะการทำงานของ Arduino Uno

Microcontroller	ATmega328
Voltage supply (recommend)	7-12V
Digital pin I/O	14 ขา (6 รองรับเอาต์พุตแบบ PWM)
Input analog pin	6 ขา
current per pin I/O	40 mA
3v3 current supply	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328)
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

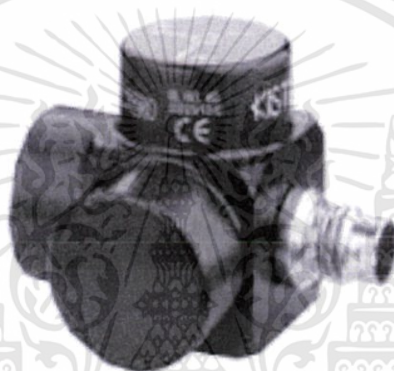
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบการทดลองและการตั้งค่าอุปกรณ์

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

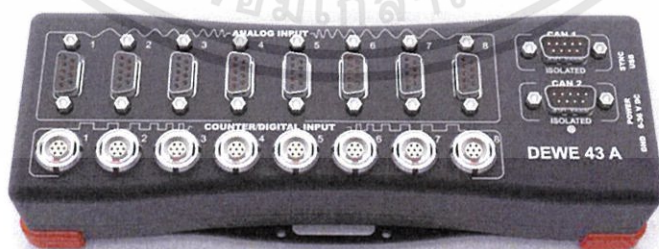
(1) อุปกรณ์วัดความเร่งชนิด IEPE accelerometer รุ่น Kistler SN8692C50 มีช่วงการวัดที่ $\pm 80g$ ความถี่ตอบสนอง 1 – 5000 Hz ทำหน้าที่วัดค่าการสั่นสะเทือนของรางรถไฟ โดยใช้เพื่อศึกษา ลักษณะการสั่นสะเทือนของราง และนำข้อมูลที่ได้ออกไปเลือกเซนเซอร์ที่มีราคาถูกกว่ามาติดตั้งแทน



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์วัดความเร่งชนิด IEPE accelerometer

(ที่มา <https://www.kistler.com/th/en/products/components/accelerometer-sensors>)

(2) DEWEsoft43A สามารถทำหน้าที่ได้ดังนี้ Data acquisition, processing, analyzing and storage software เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับข้อมูลจาก IEPE accelerometer และบันทึกผลไว้ในคอมพิวเตอร์

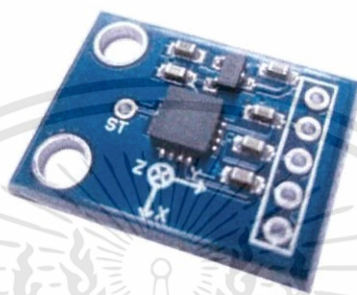


รูปที่ 3.2 DEWEsoft43A

(ที่มา <http://www.dewesoft.com/products/dewe-43>)

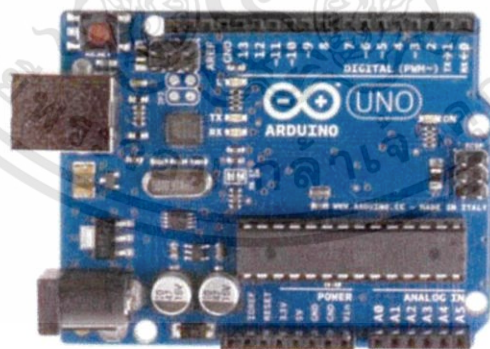
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) อุปกรณ์วัดความเร่งราคาถูกชนิด MEMS accelerometer รุ่น ADXL325 ที่ได้มาจากวิเคราะห์จากการใช้ IEPE accelerometer ซึ่งมีช่วงการวัดที่ $\pm 5g$ ความถี่ตอบสนอง 1 – 1600 Hz และมีกำลังขยายในตัว (Output amplifier) อยู่ในช่วง 0.1 – 2.8V ทำหน้าที่วัดค่าการสั่นสะเทือนของรางรถไฟ และจะนำอุปกรณ์ชนิดนี้ไปติดตั้งในการทำงานจริง



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์วัดความเร่งชนิด MEMS accelerometer
(ที่มา <http://www.hobbytronics.co.uk/adxl335-breakout>)

(4) Arduino Uno หรือ Atmega328 microcontroller ซึ่งมีรับสัญญาณได้ตั้งแต่ 0-5V (Analog input) ทำให้สามารถรับสัญญาณที่ออกจาก MEMS accelerometer ได้ และนำไปประมวลผลในการเตือนการมาของรถไฟ และทำหน้าที่บ้านศูนย์กลางการทำงานของระบบเตือน



รูปที่ 3.4 Arduino Uno

(ที่มา <http://robotechshop.com/shop/arduino/arduino-board/arduino-uno>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

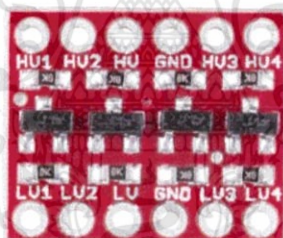
(5) Xbee Pro. Series1 U.FL Antenna ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณไร้สายระยะไกลของอุปกรณ์ตรวจวัดรถไฟและอุปกรณ์รับสัญญาณ



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ Xbee Pro. Series1 U.FL Antenna

(ที่มา <http://thaieasyelec.com/products/wireless-modules/xbee-series-1>)

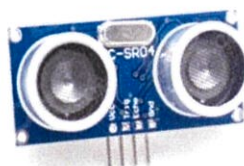
(6) Level logic converter เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟจาก 5V ของ Atmega328 เป็น 3V3 ของ Xbee Pro. เพื่อเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเช่น ข้อมูลที่รับส่งทาง UART (Tx,Rx) อาจจะเป็นข้อมูลขยะ (อ่านไม่เป็นตัวอักษร)



รูปที่ 3.6 Level logic converter

(ที่มา <http://thaieasyelec.com/products/interface-modules/logic-level>)

(7) Ultrasonic sensor เป็นเซนเซอร์ที่ใช้วัดระยะทาง โดยนำมาใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบทิศทางการเดินรถของรถไฟ ทำให้สามารถเลือกทิศทางของรถไฟที่ต้องการตรวจจับได้และใช้วัดความเร็วของรถไฟ



รูปที่ 3.7 Ultrasonic sensor

(ที่มา <http://robu.in/product-category/sensors/ultrasonic-sensors/>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนลิขสิทธิ์ในชื่อผู้จัดทำขึ้นโดยไม่มีเงื่อนไขในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีทำการทดลอง

ศึกษาลักษณะสัญญาณการสั่นสะเทือนของรางรถไฟทั้งหมด 25 ขบวน เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้วิเคราะห์ สร้างเกณฑ์ในการเตือนสัญญาณที่เกิดจากรถไฟเท่านั้นและนำไปใช้ในการเลือกขนาดของเซนเซอร์ ที่จะนำไปใช้งานจริง โดยบริเวณที่ทำการทดลองคือ 360 เมตร ห่างจากทางเชื่อมของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำการทดลองกับรถไฟสายตะวันออกที่วิ่งออกจากกรุงเทพ โดยมีวิธีทำการทดลองดังนี้

(1) ใช้ IEPE accelerometer และ DEWESoft43A ไปติดตั้งบริเวณไม้หมอน เพื่อวัดค่าการสั่นสะเทือนของราง (ใช้เพื่อศึกษาลักษณะการสั่นสะเทือนของรางรถไฟเท่านั้น)



รูปที่ 3.8 การติดตั้งอุปกรณ์วัดการสั่นของรางรถไฟ

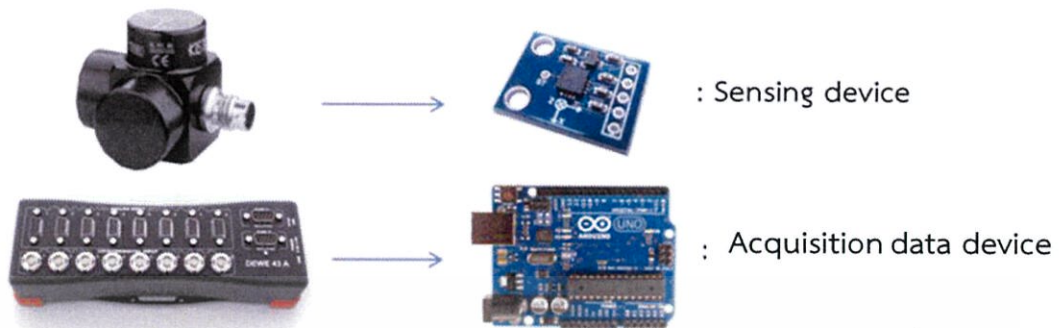
(2) นำผลการทดลองที่ได้จาก ข้อ (1) ไปใช้ในการเลือกชนิดของ MEMS accelerometer (ADXL325) ที่เหมาะสมกับงาน

(3) ทำการสอบเทียบระหว่าง IEPE accelerometer และ MEMS accelerometer โดยใช้ค่า RMS ในการเปรียบเทียบ

(4) ทำการตั้งค่าให้ MEMS accelerometer ให้ทำงานร่วมกับ Arduino Uno ได้

(5) ใช้ MEMS accelerometer และ Arduino Uno ไปติดตั้งบริเวณไม้หมอนเพื่อตรวจจับการมาของรถไฟ โดยมีการเปรียบเทียบการใช้งานดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบการใช้งาน

เนื่องจากอุปกรณ์ DEWESoft43A และ IEPE accelerometer มีราคาแพงจึงไม่เหมาะกับการนำไปติดตั้งบริเวณรางรถไฟ อีกทั้งยังต้องใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ จึงมีความยุ่งยากในการหาแหล่งจ่ายไฟ ผู้ทำการทดลองจึงได้ใช้ MEMS accelerometer และ Arduino Uno เป็นอุปกรณ์ทำงานทดแทน โดยใช้ MEMS accelerometer แทนที่ IEPE accelerometer ซึ่งทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนของราง และใช้ Arduino Uno ทำหน้าที่แทน DEWESoft43A ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณจากเซนเซอร์

3.3 การติดตั้งระบบเตือน

ผู้ทดลองได้จำลองการทำงานของชุดทดลอง โดยการติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณไว้ที่ที่ทางข้าม จุดตัดและติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดรถไฟที่บริเวณรางรถไฟ ซึ่งทั้งสอง ห่างกันเป็นระยะ 8.70 เมตร

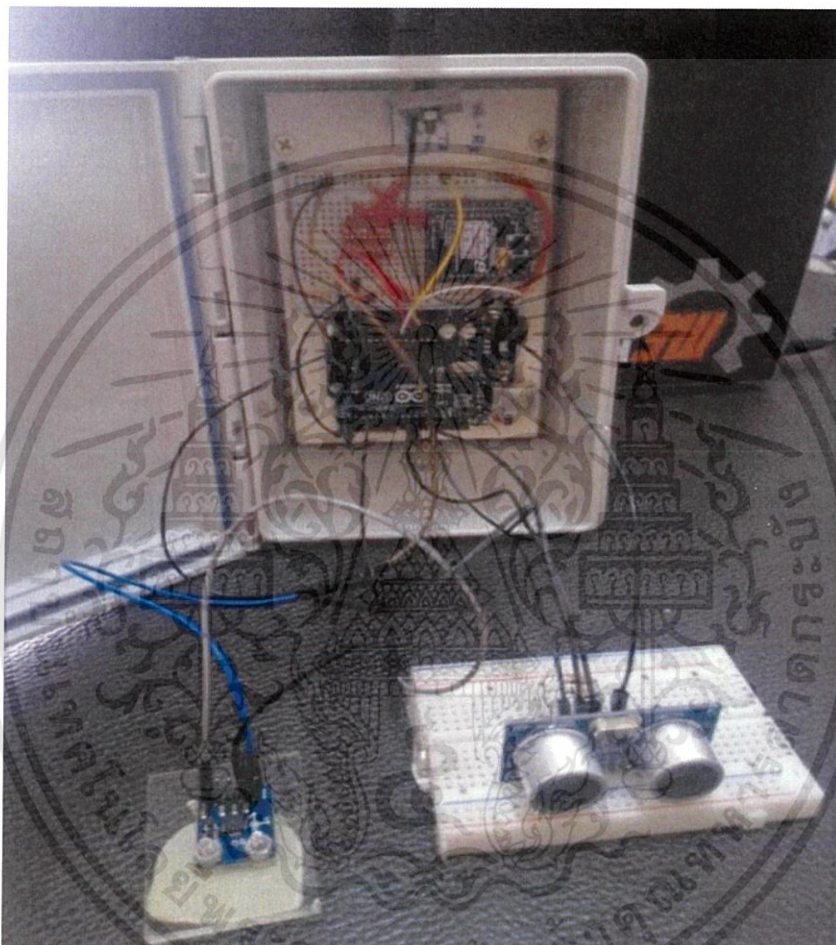


รูปที่ 3.10 การทำงานของอุปกรณ์ต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ตรวจจ็บริดไฟ

อุปกรณ์ตรวจจ็บริดไฟเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้บริเวณรางรถไฟเพื่อทำการตรวจจ็บริดการมาของรถไฟ ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

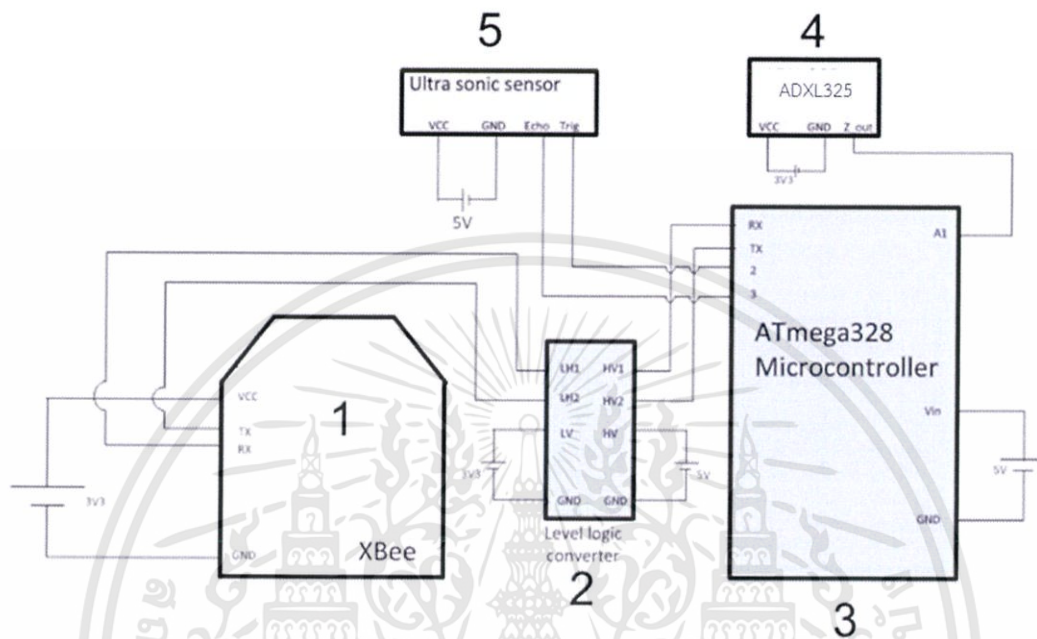


รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ตรวจจ็บริดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 อุปกรณ์ของตัวตรวจจับรถไฟ

อุปกรณ์ของตัวตรวจจับรถไฟมีดังนี้



รูปที่ 3.12 การต่อวงจรของอุปกรณ์ตรวจจับรถไฟ

- (1) Xbee Pro series 1 มีการทำงานที่ 3.3Vdc และกระแสในการส่งข้อมูลที่ 120mA
- (2) Logic level converter
- (3) Atmega328 microcontroller หรือ Arduino Uno มีการทำงานที่ 5Vdc
- (4) ADXL335 MEMS accelerometer มีการทำงานที่ 3.3Vdc และ 0.35mA
- (5) Ultra sonic sensor มีการทำงานที่ 5Vdc และ 15mA

3.4.2 ขนาดของแบตเตอรี่

- (1) ขนาดของแบตเตอรี่ต้องมีความแรงดันไฟฟ้าในช่วง 5 – 12V
- (2) ขนาดของกระแสที่ใช้ในแบตเตอรี่คือกระแสรวมทั้งหมดของวงจร ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 135.35 mA
- (3) แบตเตอรี่ที่เลือกใช้ คือ แบตเตอรี่สำรองที่ใช้ชาร์จโทรศัพท์หรือที่เรียกกันว่า Power Bank ที่มีขนาด 13000mAh ทำงานที่ 5Vdc 1.5A ดังนั้นเมื่อใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้ อุปกรณ์จะสามารถทำงานโดยปราศจากการชาร์จได้ประมาณ 4 วันเต็ม

หมายเหตุ เมื่อต่อแรงดันไฟฟ้าที่มากกว่าสเปคของอุปกรณ์ที่ระบุไว้ จำเป็นต้องใช้ IC chip หรือวงจรลดแรงดันในการแปลงแรงดันให้อยู่ในช่วงที่อุปกรณ์นั้นรับได้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 โค้ดที่ใช้ในอุปกรณ์ฝั่งตรวจจذبรถไฟ

โค้ดที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมมีดังนี้

```
float time, Acceleration, i, duration, distance;
int trig=8, echo=9;
int status=0;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(A1,INPUT);
  pinMode(trig,OUTPUT);
  pinMode(echo,INPUT);
}

void loop()
{
  //..... first condition .....
  Acceleration = 0.0215* analogRead(A1)+ 6.4503;
  if(Acceleration > 4.00 && (status == 0))
  {
    for(time = 0 ; time < 5000 ; time = time + 0.51)
    {
      delay(0.51);
      Acceleration = 0.0215* analogRead(A1)+ 6.4503;
      if(Acceleration < 4.00)
      {
        i = i + 0.51 ;
      }
      if(Acceleration > 4.00)
      {
        i = 0 ;
      }
    }
  }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(i > 90)
{
    status = 1 ;
    break;
}
}
}

} // End of first condition

//..... Second condition .....
Acceleration = 0.0215* analogRead(A1)+ 6.4503;
if((Acceleration > 4.00) && (status == 1))
{
    for(time = 0 ; time < 5000 ; time = time + 0.51)
    {
        delay(0.51);
        Acceleration = 0.0215* analogRead(A1)+ 6.4503;
        if(Acceleration < 4.00)
        {
            i = i + 0.51 ;
        }
        if(Acceleration > 4.00)
        {
            i = 0 ;
        }
    }
    if(i > 270)
    {
        status = 2 ;
        break;
    }
}
}

} // End of second condition

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//.....Check direction.....
if(status == 2)
{
  digitalWrite(trig,HIGH);
  delay(2);
  digitalWrite(trig,LOW);
  duration=pulseIn(echo,HIGH);
  distance=duration/2/29.1;
  if(distance < 180)
  {
    status = 3;
  }
} // End of check direction

//..... Alarming .....
if(status == 3)
{
  Serial.print('1');
  status = 0;
  delay(300000);
} // End of alarming.

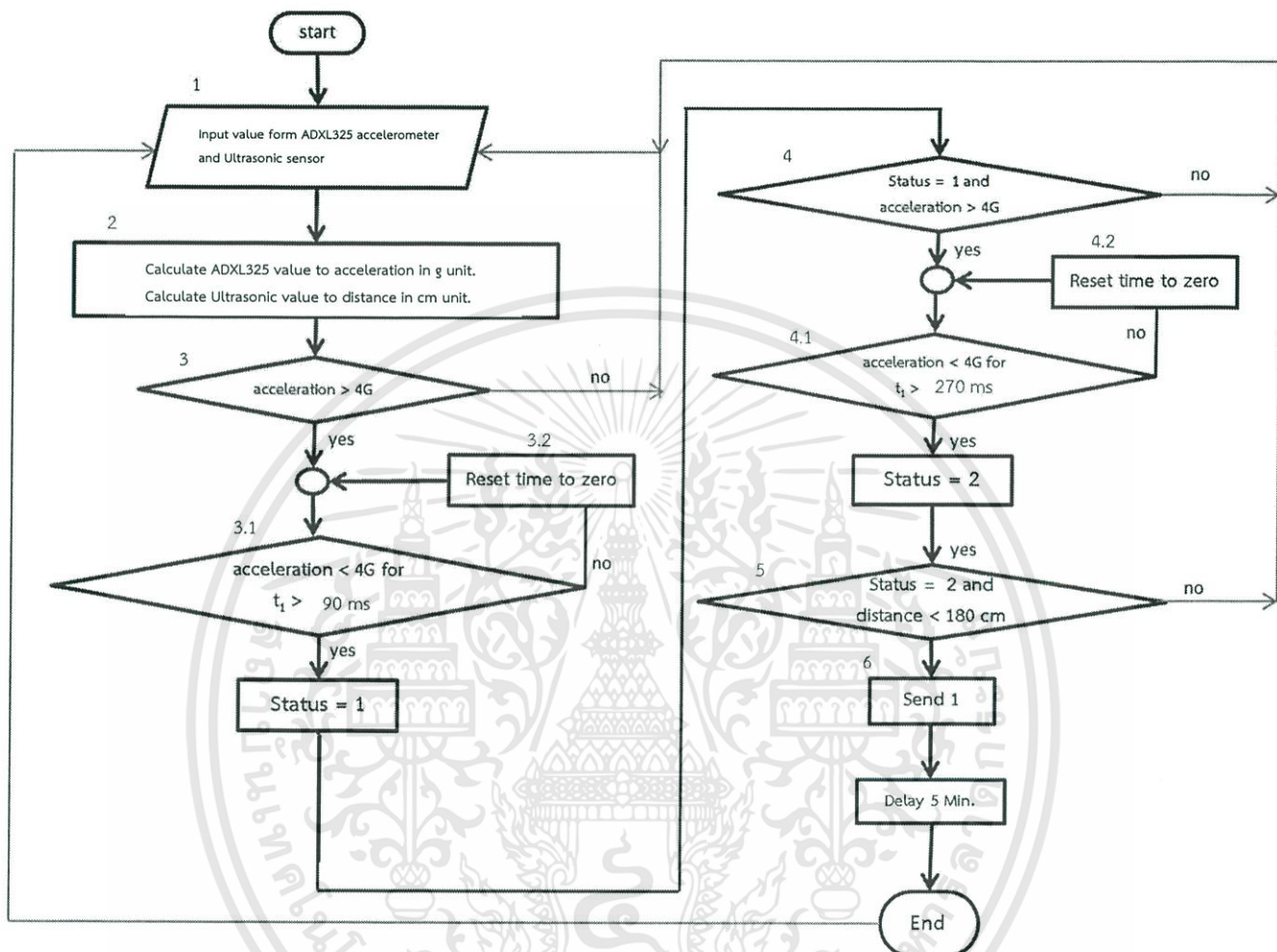
//..... End of process .....
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 Flow chart แสดงการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับรถไฟ

Flow chart สำหรับการทำงานของโปรแกรมมีดังนี้



รูปที่ 3.13 Flow chart แสดงการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับรถไฟ

คำอธิบายการทำงานของ Flow chart ของอุปกรณ์ตรวจจับรถไฟ

โดยตัวเลข 1 – 6 ที่ได้แสดงในรูปที่ 3.13 จะมีการอธิบายดังนี้

(1) รับค่าจากเซนเซอร์ ADXL325 และ Ultrasonic

(2) แปลงค่าที่ได้จาก ADXL325 และ Ultrasonic ให้อยู่ในหน่วย g และ cm ตามลำดับ

(3) เริ่มต้นทำงานเงื่อนไขที่ 1 โดยเมื่อค่าความเร่งมากกว่า 4g ระบบจะเริ่มทำงานดังต่อไปนี้

(3.1) เมื่อค่าความเร่งน้อยกว่า 4g ระบบจะเริ่มนับ t_1 และถ้า t_1 มีค่ามากกว่า 90

ms ระบบจะส่งค่า status = 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3.2) เมื่อค่าความเร่งมากกว่า 4g ในระหว่างการนับ t_1 ระบบจะส่งค่า $t_1 = 0$ และจะเริ่มนับ t_1 ใหม่อีกครั้งเมื่อความเร่งน้อยกว่า 4g และจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะเจอค่า t_1 ที่มากกว่า 90 ms

(4) เริ่มต้นทำงานเงื่อนไขที่ 2 โดยเมื่อค่าความเร่งมากกว่า 4g และมี status = 1 ระบบจะเริ่มทำงานดังต่อไปนี้

(4.1) เมื่อค่าความเร่งน้อยกว่า 4g ระบบจะเริ่มนับ t_2 และถ้า t_2 มีค่ามากกว่า 270 ms ระบบจะส่งค่า status = 2

(4.2) เมื่อค่าความเร่งมากกว่า 4g ในระหว่างการนับ t_2 ระบบจะส่งค่า $t_2 = 0$ และจะเริ่มนับ t_2 ใหม่อีกครั้งเมื่อความเร่งน้อยกว่า 4g และจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าจะเจอค่า t_2 ที่มากกว่า 270 ms

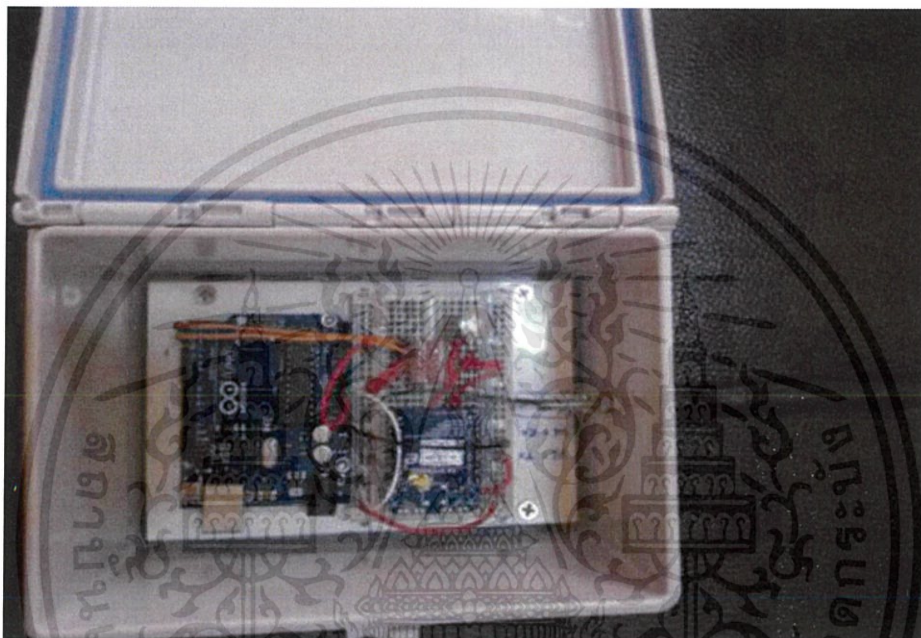
(5) เริ่มต้นทำงานเงื่อนไขที่ 3 โดยเมื่อค่า distance น้อยกว่า 180 cm (จะน้อยกว่า 180 cm เมื่อมีรถไฟวิ่งผ่าน) และมีค่า status = 2 ระบบจะส่งค่า 1 ซึ่งเป็นตัวแปรประเภท integer ผ่านทาง Serial port โดยใช้เครือข่าย Zigbee ส่งไปยังตัวรับสัญญาณที่อยู่ห่างออกไป

(6) เมื่อทำการส่งค่า 1 แล้ว ระบบจะนับเวลาถอยหลังเป็นเวลา 5 นาที เพื่อรอรับค่าความเร่งของรถไฟขบวนถัดไป

หมายเหตุ : ระบบจะทำการเก็บค่าความเร่งและวิเคราะห์ข้อมูลเฉพาะช่วงที่มีการกระตุ้นด้วยความเร่งที่มากกว่า 4g เท่านั้น ซึ่งจะทำให้ระบบมีภาระงานที่น้อยลงทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น ซึ่งค่า t_1 และ t_2 ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1.4 ในบทที่ 4

3.5 ส่วนประกอบของอุปกรณ์รับสัญญาณ

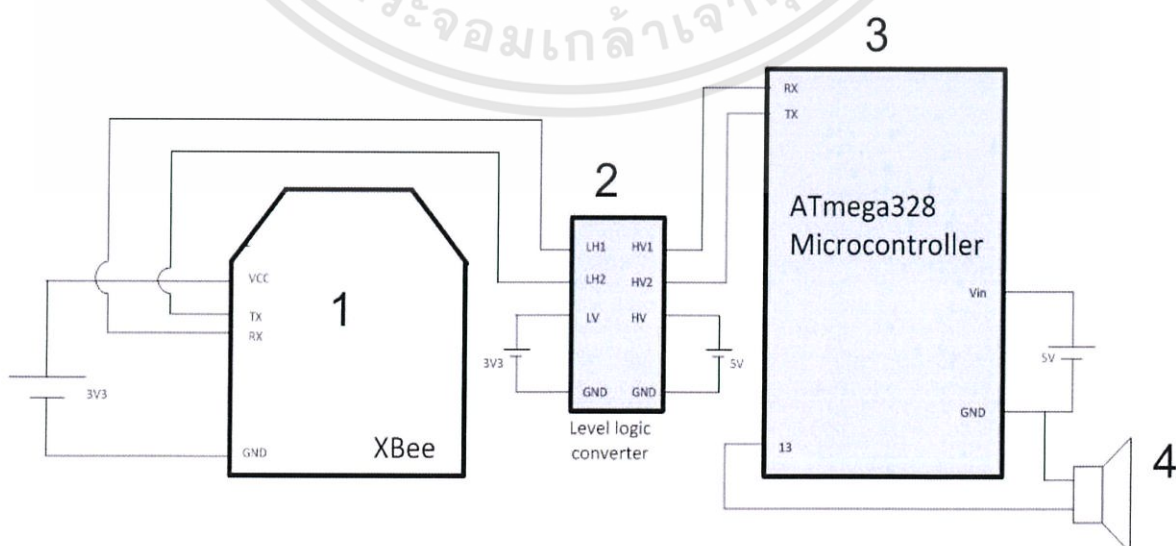
อุปกรณ์รับสัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับสนภูมิ ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้ที่จุดตัดทางข้าม โดยเมื่ออุปกรณ์ตรวจจับสนภูมิตรวจเจอว่ามีรถไฟ อุปกรณ์รับสัญญาณก็จะทำการส่งสัญญาณเตือนด้วยแสงในบริเวณนั้น



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์รับสัญญาณ

3.5.1 อุปกรณ์ของตัวรับสัญญาณ

อุปกรณ์ของตัวรับสัญญาณมีดังนี้



รูปที่ 3.15 การต่อวงจรของอุปกรณ์รับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่แนะนำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (1) Xbee Pro series 1 มีการทำงานที่ 3.3Vdc และกระแสในการรับข้อมูลที่ 45mA
- (2) Logic level converter
- (3) Atmega328 microcontroller หรือ Arduino Uno มีการทำงานที่ 5Vdc
- (4) LED siren

3.5.2 ขนาดของแบตเตอรี่

- (1) ขนาดของแบตเตอรี่ต้องมีความแรงดันไฟฟ้าในช่วง 5 – 12V
- (2) ขนาดของกระแสที่ใช้ในแบตเตอรี่คือกระแสรวมทั้งหมดของวงจร ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 45 mA
- (3) แบตเตอรี่ที่เลือกใช้ คือ แบตเตอรี่สำรองที่ใช้ชาร์จโทรศัพท์หรือที่เรียกกันว่า Power Bank ที่มีขนาด 13000mAh ทำงานที่ 5Vdc 1.5A ดังนั้นเมื่อใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้ อุปกรณ์จะสามารถทำงานโดยปราศจากการชาร์จได้ประมาณ 12 วันเต็ม

หมายเหตุ เมื่อต่อแรงดันไฟฟ้าที่มากกว่าสเปคของอุปกรณ์ที่ระบุไว้ จำเป็นต้องใช้ IC chip หรือวงจรลดแรงดันในการแปลงแรงดันให้อยู่ในช่วงที่อุปกรณ์นั้นรับได้

3.5.3 โค้ดที่ใช้ในอุปกรณ์ฝังรับสัญญาณ

โค้ดที่ใช้สำหรับเขียนโปรแกรมมีดังนี้

```
char key = '0';
int siren = 2;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(siren,OUTPUT);
  digitalWrite(siren,LOW);
}

void loop()
{
  if(Serial.available() > 0)
  {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

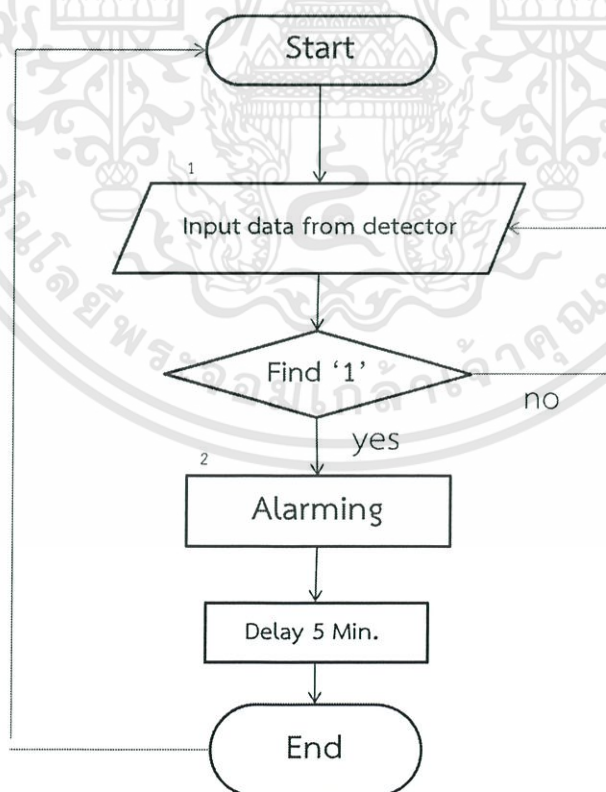
```

key = Serial.read();
}
if(key == '1')
{
digitalWrite(siren,HIGH);
delay(300000);
digitalWrite(siren,LOW);
}else{
digitalWrite(siren,LOW);
}
}

```

3.5.4 Flow chart แสดงการทำงาน

Flow chart แสดงการทำงานของโปรแกรมหาดังนี้



รูปที่ 3.16 Flow chart แสดงการทำงานของอุปกรณ์รับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายการทำงานของ Flow chart ของอุปกรณ์รับสัญญาณ

1. ทำการรับข้อมูลผ่าน Serial port ที่ส่งมาจากอุปกรณ์ตรวจวัดรถไฟ โดยเมื่อตรวจเจอค่า “1” ระบบจะส่งสัญญาณเตือน
2. เมื่อทำการส่งสัญญาณเตือนแล้ว ระบบจะนับเวลาถอยหลังเป็นเวลา 5 นาที เพื่อรอรับค่าที่ส่งมาจากอุปกรณ์ตรวจวัดรถไฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

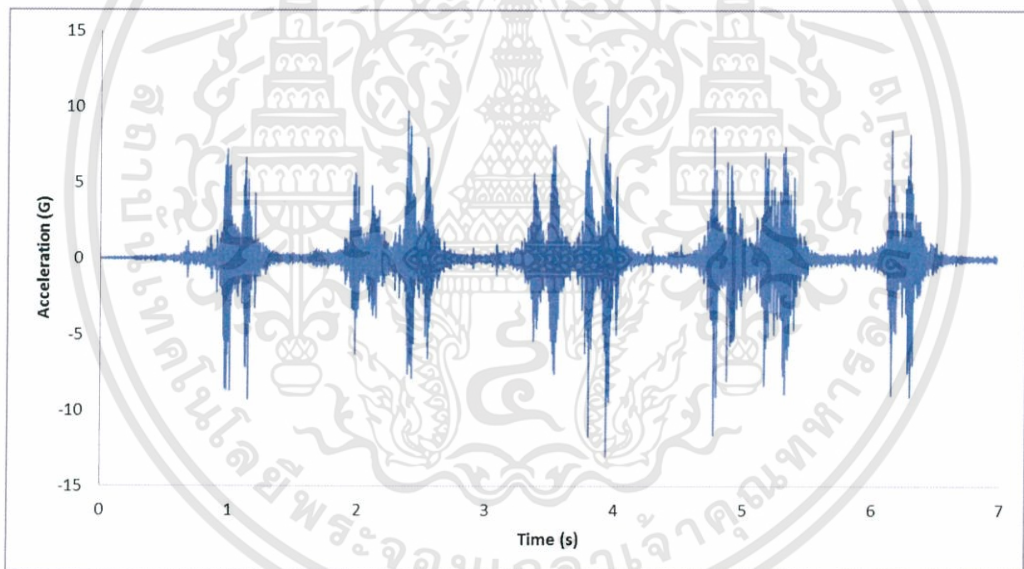
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากผลการทดลองที่วัดได้จาก Kislser SN8692C50 IEPE accelerometer สามารถแบ่งประเภทของรถไฟได้ 2 ชนิดคือ หัวรถจักรดีเซลราง และหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า ซึ่งได้แสดงดังนี้

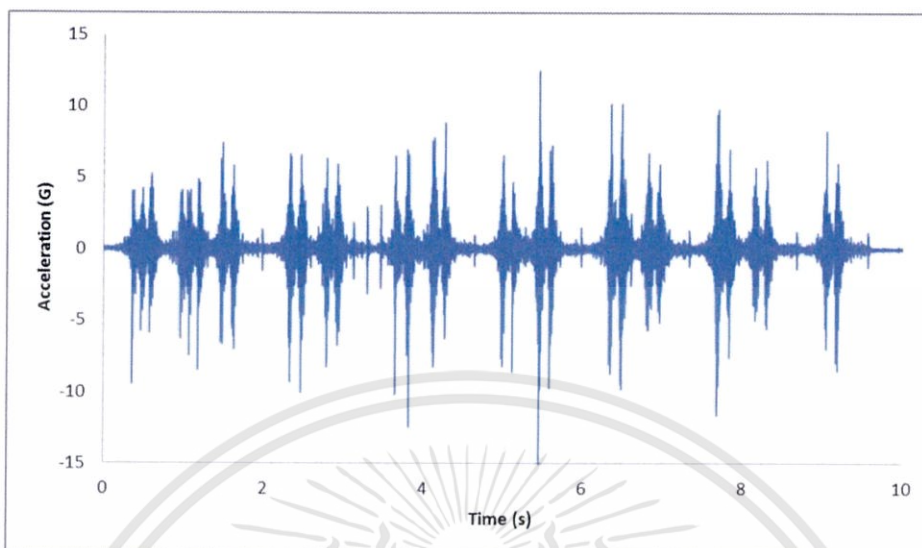
4.1 สัญญาณความเร่งที่เกิดจากหัวรถจักรดีเซลรางและดีเซลไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้ เป็นผลการทดลองที่ได้จากการนำ Kislser SN8692C50 IEPE accelerometer ไปทำการวัดสัญญาณความเร่งจากรถไฟ โดยติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวไว้ที่บริเวณไม่หมอน เพื่อต้องการทราบถึงสัญญาณความเร่งของรถไฟว่ามีลักษณะอย่างไร ซึ่งผลการทดลองจะมีลักษณะดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 สัญญาณความเร่งที่เกิดจากหัวรถจักรดีเซลราง

จากรูปที่ 4.1 เป็นสัญญาณที่เกิดจากรถไฟขบวน 281(กรุงเทพ-กบินทร์บุรี) รอบเวลา 8.55 น. ณ สถานีพระจอมเกล้า หัวรถจักรดีเซลราง รุ่น NKF ที่วิ่งด้วยความเร็ว 14.17 m/s (หาความเร็วของรถไฟจากการใช้เซนเซอร์ Ultrasonic ซึ่งได้แสดงวิธีการหาอยู่ในภาคผนวก ก)

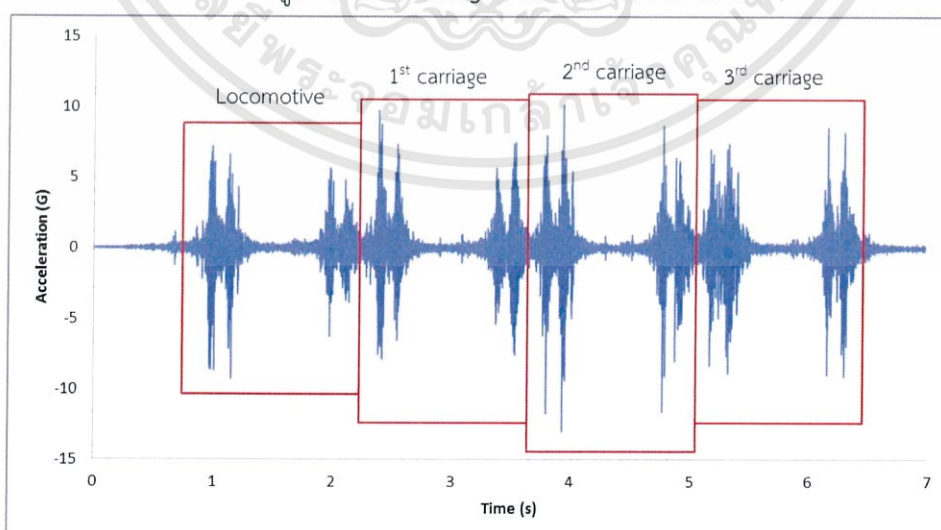


รูปที่ 4.2 สัญญาณความเร่งของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.2 เป็นสัญญาณที่เกิดจากรถไฟขบวน 383(กรุงเทพ-ฉะเชิงเทรา) รอบเวลา 18.04 น. ณ สถานีพระจอมเกล้า หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า รุ่น ALSTHOM ที่วิ่งด้วยความเร็ว 14.89 m/s (ใช้วิธีวัดความเร็ว เช่นเดียวหัวขบวนที่กล่าวไว้ข้างต้น) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาส่วนประกอบต่างๆ ได้ดังนี้

4.1.1 การหาจำนวนตู้โดยสาร

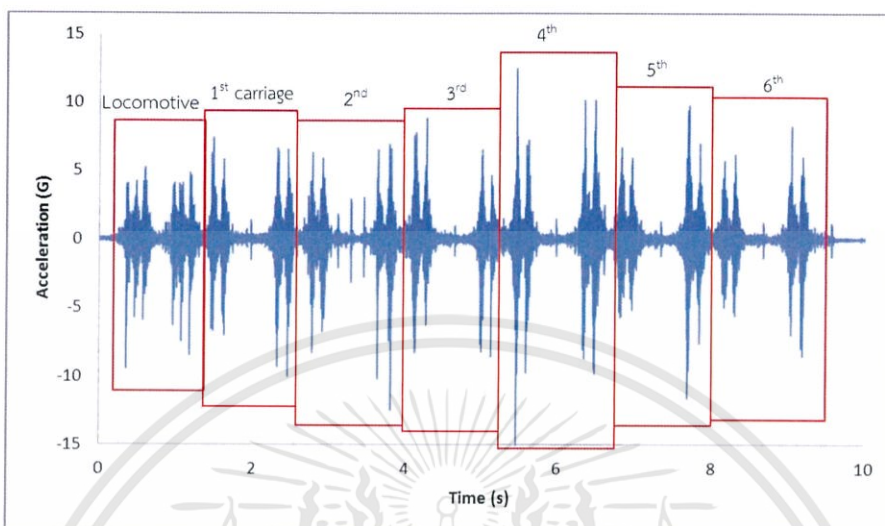
การหาจำนวนตู้โดยสารนั้น สามารถทำได้โดยการนำเอากราฟสัญญาณความเร่งของหัวรถจักรแต่ละประเภท มาแยกเป็นส่วนต่างๆ ให้มองเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยจะแบ่งเป็นขบวนหัวรถจักร (Locomotive) และขบวนตู้โดยสาร (Carriage) ซึ่งผลการทดลองมีดังนี้



รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ส่วนประกอบต่างๆ จากกราฟสัญญาณการสั่นสะเทือนของรถดีเซลราง

ซึ่งกราฟที่ได้ ทำการดัดแปลงมาจากกราฟในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



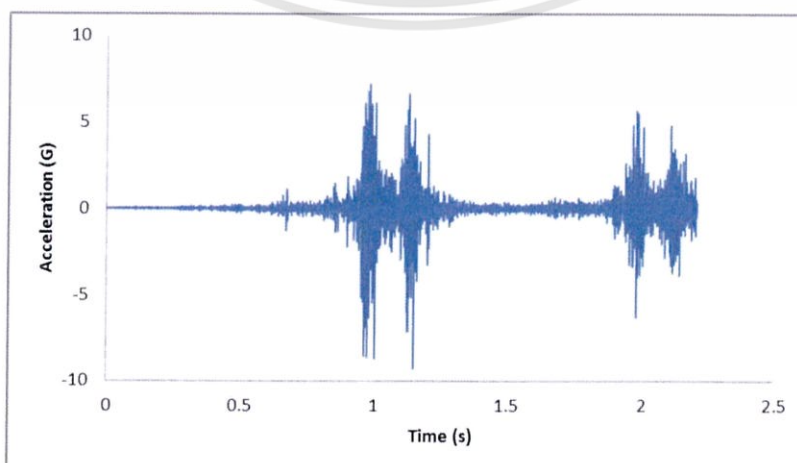
รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ส่วนประกอบต่างๆ จากกราฟสัญญาณการสั่นสะเทือนของรถดีเซลไฟฟ้า ซึ่งกราฟที่ได้ ทำการตัดแปลงมาจากกราฟในรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.3 สามารถบอกได้ว่า รถไฟคันนี้มีทั้งหมด 4 ตู้ โดยประกอบด้วย ขบวนหัวรถจักร ดีเซลราง 1 ตู้ และขบวนตู้โดยสาร 3 ตู้

และรูปที่ 4.4 สามารถบอกได้ว่า รถไฟคันนี้มีทั้งหมด 7 ตู้ โดยประกอบด้วย ขบวนหัวรถจักร ดีเซลไฟฟ้า 1 ตู้ และขบวนตู้โดยสาร 6 ตู้

4.1.2 การแยกประเภทของหัวรถจักร

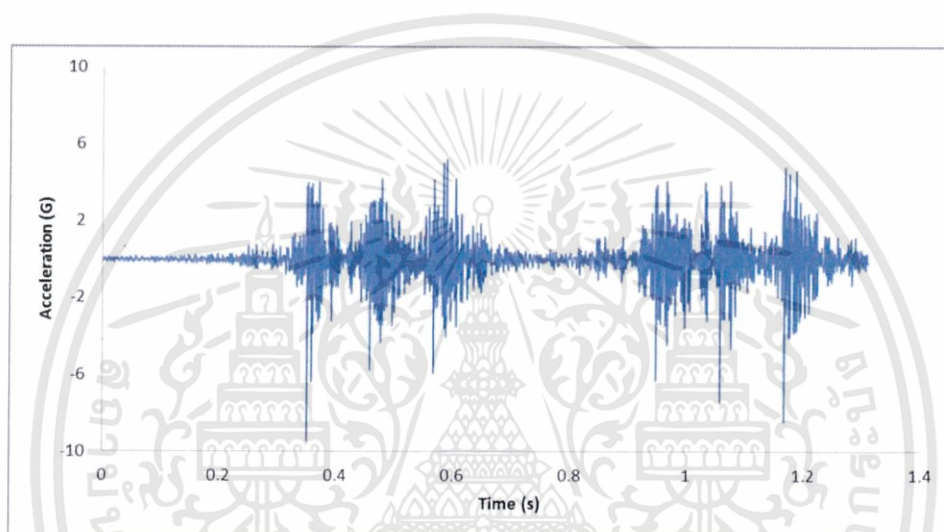
จากสัญญาณความเร่งขงหัวรถจักรในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งเมื่อได้ทำการขยายดูเฉพาะในส่วน ของหัวรถจักร จะสามารถบอกได้ว่าเป็นหัวรถจักรชนิดใด ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.5 ลักษณะของหัวรถจักรดีเซลราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 เป็นกราฟที่ได้ทำการขยายกราฟจากรูปที่ 4.1 ในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 2.21 วินาที ซึ่งจะอยู่ในส่วนของ Locomotive หรือหัวรถจักร ซึ่งจะพบว่า กราฟมีลักษณะเป็นกราฟที่มี 4 จุดยอดที่สังเกตเห็นได้ชัด ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นลักษณะการจัดวางล้อแบบ Bo – Bo หรือ 1A – 2 และลักษณะการจัดวางล้อประเภทนี้ถูกพบใน หัวรถจักร GEK (UM12C) และ หัวรถจักรดีเซลรางตามลำดับ

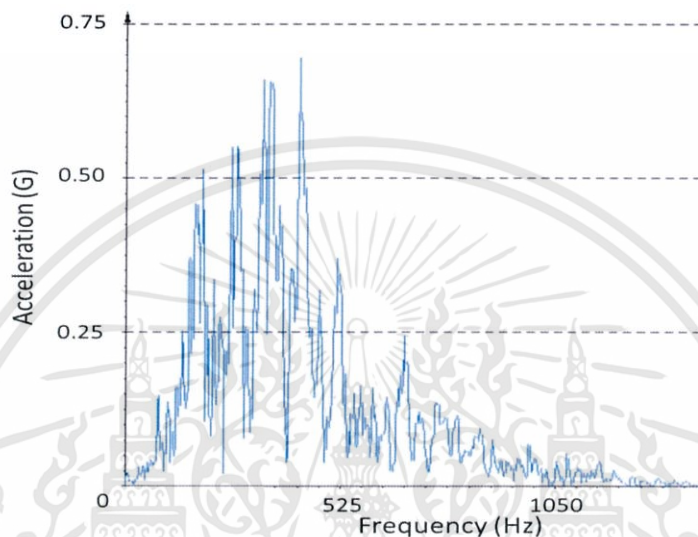


รูปที่ 4.6 ลักษณะหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า

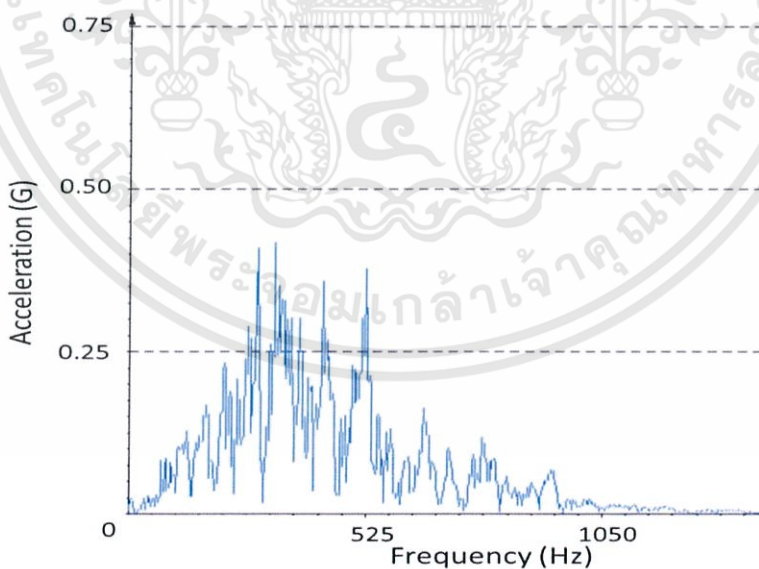
จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟที่ได้ทำการขยายกราฟจากรูปที่ 4.2 ในช่วงเวลาที่ 0 ถึง 0.131 วินาที ซึ่งจะอยู่ในส่วนของ Locomotive หรือหัวรถจักร ซึ่งจะพบว่า กราฟมีลักษณะเป็นกราฟที่มี 6 จุดยอดที่สังเกตเห็นได้ชัด ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นลักษณะการจัดวางล้อแบบ Co - Co และลักษณะการจัดวางล้อประเภทนี้ถูกพบใน หัวรถจักรประเภทดีเซลไฟฟ้า

4.1.3 การหาย่านของความถี่ตอบสนอง

เมื่อนำข้อมูลสัญญาณความเร่งที่ได้มาจากการเก็บข้อมูลของรถไฟแต่ละขบวนมาแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูป Fast Fourier Transform (FFT) จะมีลักษณะดังนี้



รูปที่ 4.7 ผลจากการแปลงสัญญาณ FFT จากกราฟสัญญาณความเร่งของหัวรถจักรดีเซลราง



รูปที่ 4.8 ผลจากการแปลงสัญญาณ FFT จากกราฟสัญญาณความเร่งของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.7 แปลงมาจากกราฟสัญญาณความเร่งของหัวรถจักรดีเซลราง (รูปที่ 4.1) ที่เกิดจากสิ้นของเพลลาแรก ซึ่งเวลาในขณะนั้นคือ 0.902 วินาที ซึ่งมีความเร่งในสัญญาณความเร่งสูงสุดขณะนั้น (Time plot) ที่ 7.021g และมีความเร่งสูงสุดในสัญญาณ FFT ที่ 0.693g เนื่องจากกราฟเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Time plot เป็นการรวมเอาแอมพลิจูดของทุกๆ ความถี่ที่เกิดขึ้นในขนาดนั้นมารวมกัน ทำให้มีแอมพลิจูดที่สูงกว่า FFT และในขณะเดียวกันในสัญญาณ FFT เป็นการแยกเอาแอมพลิจูดของในแต่ละความถี่ออกมา ทำให้มีแอมพลิจูดต่ำกว่ากราฟ time plot

และรูปที่ 4.8 เป็นกราฟ FFT ที่แปลงมาจากกราฟสัญญาณความเร่งของหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า (รูปที่ 4.2) ซึ่งเวลาในขณะนั้นคือ 0.355 วินาที ซึ่งมีความเร่งในสัญญาณความเร่งสูงสุดขณะนั้น (Time plot) ที่ 4.802g และมีความเร่งสูงสุดในสัญญาณ FFT ที่ 0.503g

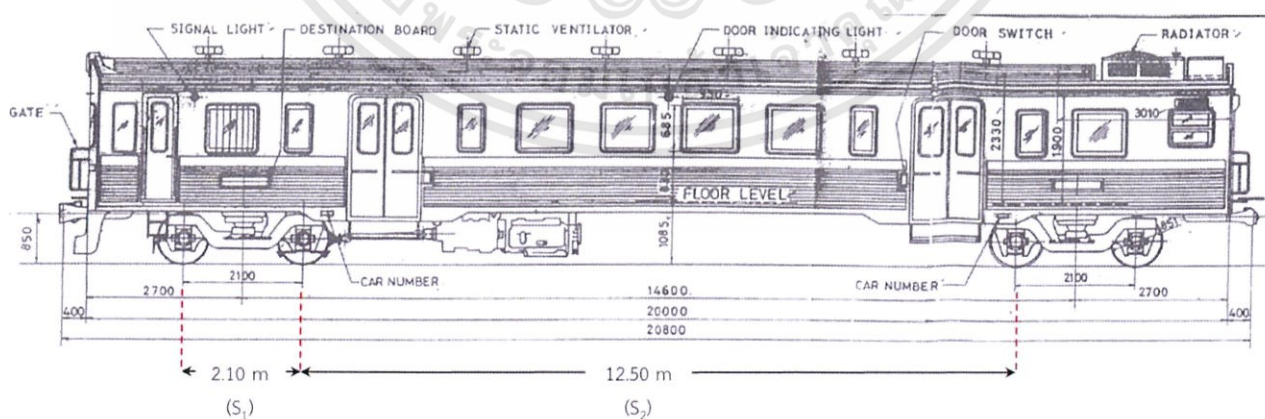
จากนั้นเมื่อสัญญาณอยู่ในรูปของ FFT จะสามารถเห็นย่านความถี่ของแรงที่กระทำกับรางรถไฟได้ชัดเจน ซึ่งพบว่าย่านความถี่ของแรงที่กระทำกับรางรถไฟจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 1000 Hz

4.1.4 การหาระยะเพลลาของหัวรถจักร

เพื่อตรวจสอบตรวจสอบความแม่นยำของกราฟสัญญาณความเร่งของหัวรถจักร จึงจำเป็นต้องคำนวณหาระยะเพลลาจากความเร็วที่วัดได้และระยะเวลาที่ใช้ ซึ่งมีตัวอย่างการคำนวณและการกำหนดระยะต่างๆ ของหัวรถจักรทั้ง 2 ประเภทดังนี้

(1) การหาระยะเพลลาของหัวรถจักรดีเซลราง

การหาระยะเพลลาของหัวรถจักรดีเซลรางนั้น หาได้โดยการนำเอาระยะเวลาระหว่างเพลลาของหัวรถจักรซึ่งสามารถหาได้จากกราฟสัญญาณความเร่ง และใช้ความเร็วของรถไฟมาคูณ ทำให้ได้ระยะเพลลาที่คำนวณได้จากกราฟ และนำไปเปรียบเทียบกับระยะจริง ซึ่งจะเป็นการยืนยันว่ากราฟสัญญาณความเร่งนั้นมีความถูกต้อง



รูปที่ 4.9 แบบแปลนบางส่วนของหัวรถจักร NKF

(ที่มา แบบแปลนรถไฟที่แสดงในภาคผนวก ข)

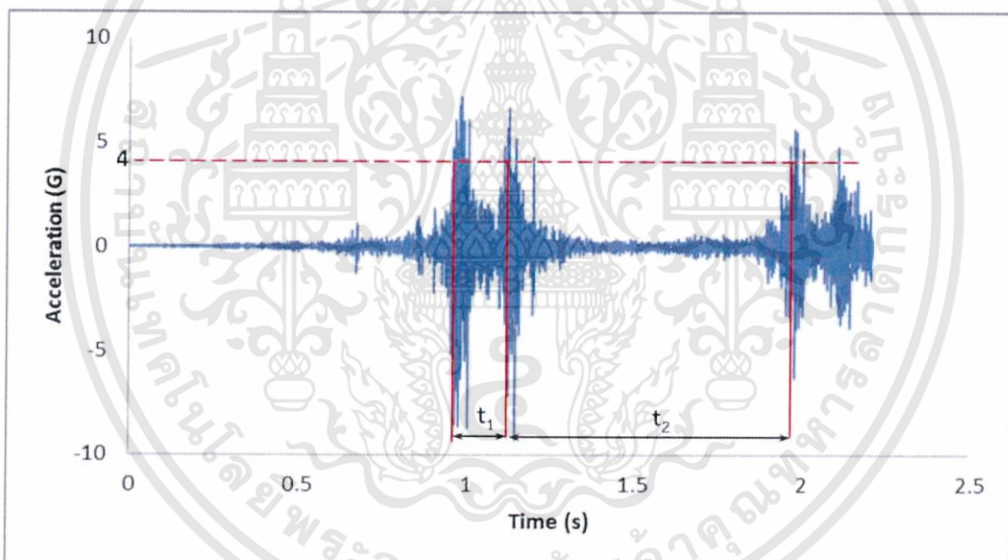
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาระยะเพลาของหัวรถจักรดีเซลรางทำได้โดยการหาเวลาที่ใช้ในแต่ละช่วง โดยจะแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ

t_1 คือ ระยะเวลาระหว่างเพลาแรกและเพลาที่สองของแคร่แรก โดยมีหลักเกณฑ์ในการวัดคือ เวลาที่ค่าความเร่งถึง 4g ในจุดยอดที่หนึ่งจนถึงเวลาที่ค่าความเร่งถึง 4g อีกครั้งในจุดยอดที่สอง

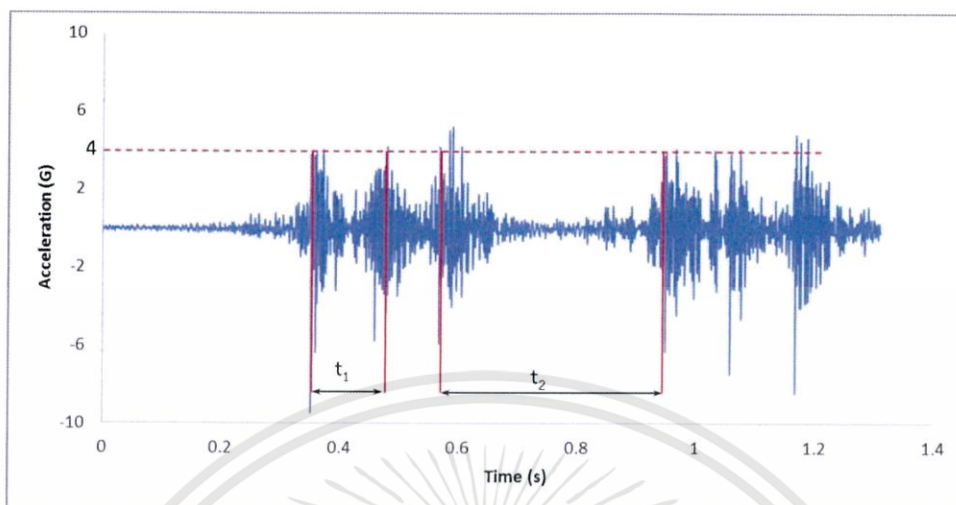
t_2 คือ ระยะเวลาระหว่างเพลาสุดท้ายของแคร่แรกและเพลาแรกของแคร่ที่สอง โดยมีหลักเกณฑ์ในการวัดคือ เวลาที่ค่าความเร่งถึง 4g ในจุดยอดที่สองจนถึงเวลาที่ค่าความเร่งถึง 4g อีกครั้งในจุดยอดที่สาม

ดังนั้นเมื่อรู้ค่า t_1 และ t_2 จึงทำให้สามารถหาระยะ S_1 และ S_2 จากการคำนวณได้ ซึ่งการหา t_1 และ t_2 จากกราฟสัญญาณความเร่งจะมีดังนี้จะมีดังนี้



รูปที่ 4.10 แสดงการหาค่า t_1 และ t_2 จากกราฟสัญญาณความเร่งของรถจักรดีเซลราง

จากรูปที่ 4.10 สามารถใช้โปรแกรม DEWESoft 7.0 ในการหาค่า t_1 ซึ่งมีค่า 143 ms ทำให้ค่าหา S_1 ได้จาก $14.17 \times 0.143 = 2.026$ m ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 3.52% และ t_2 ซึ่งมีค่า 851 ms ทำให้ค่าหา S_2 ได้จาก $14.17 \times 0.851 = 12.058$ m ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 3.53%



รูปที่ 4.12 แสดงการหาค่า t_1 และ t_2 จากกราฟสัญญาณความเร่งของรถจักรดีเซลไฟฟ้า

จากรูป 4.12 ที่สามารถใช้โปรแกรม DEWESoft 7.0 ในการหาค่า t_1 ซึ่งมีค่า 111 ms ทำให้ค่าหา S_1 ได้จาก $14.89 \times 0.111 = 1.653$ m ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 0.17% และ t_2 ซึ่งมีค่า 375 ms ทำให้ค่าหา S_2 ได้จาก $14.89 \times 0.375 = 5.583$ m ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 3.23%

(3) การเปรียบเทียบระยะเวลาที่คำนวณได้กับระยะเวลาจริง

จากการเก็บข้อมูลของหัวรถจักรประเภทดีเซลรางทั้งหมด 12 ขบวน สามารถหาค่า S_1 และ S_2 ได้ดังนี้

ตาราง 4.1 การเปรียบเทียบระยะ S_1 และ S_2 จากการคำนวณเทียบกับระยะเวลาจริงของรถดีเซลราง

Type	t_1 (ms)	t_2 (ms)	Speed(m/s)	S_1 (m)	Error ₁ (%)	S_2 (m)	Error ₂ (%)
NKF	143	851	14.17	2.026	3.51	12.064	3.49
THN	148	872	15.11	2.241	6.69	13.177	5.42
THN	105	574	20.23	2.219	5.64	12.18	2.55
NKF	134	725	15.78	2.111	0.54	11.433	8.54
THN	121	696	16.94	2.046	2.58	11.780	5.76
NKF	119	704	18.67	2.224	5.89	13.146	5.16
THN	168	861	13.29	2.229	6.16	11.448	8.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบระยะ S_1 และ S_2 จากการคำนวณเทียบกับระยะจริงของรถดีเซลราง (ต่อ)

THN	106	540	20.77	2.202	4.85	11.223	10.22
NKF	101	647	21.54	2.180	3.79	13.935	11.48
NKF	103	577	19.63	2.016	4.02	11.318	9.45
NKF	100	630	20.96	2.096	0.19	13.204	5.63
THN	96	575	24.03	2.304	9.73	13.809	10.47

โดยที่ Speed คือ ความเร็วของรถไฟขณะทำการทดลองจากการวัดจริง

S_1 คือ ระยะทางที่ใช้ระหว่างเพลาคู่ที่ติดกันของโบกี้แรก

Error₁ คือ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดจาก S_1

S_2 คือ ระยะทางที่ใช้ระหว่างเพลาสุดท้ายของโบกี้แรกกับเพลารากของโบกี้หลัง

Error₂ คือ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่เกิดจาก S_2

จากการเก็บข้อมูลของหัวรถจักรประเภทดีเซลไฟฟ้าทั้งหมด 13 ขบวน สามารถหาค่า S_1 และ S_2 ได้ดังนี้

ตาราง 4.2 การเปรียบเทียบระยะ S_1 และ S_2 จากการคำนวณเทียบกับระยะจริงของรถดีเซลไฟฟ้า

Type	t_1 (ms)	t_2 (ms)	Speed(m/s)	S_1 (m)	Error ₁ (%)	S_2 (m)	Error ₂ (%)
ALSTHOM	111	375	14.89	1.653	0.17	5.584	3.23
ALSTHOM	93	319	17.79	1.654	0.27	5.675	1.65
HITACHI	139	609	14.37	1.998	8.00	8.754	2.98
ALSTHOM	109	370	15.81	1.724	4.46	5.851	1.40
ALSTHOM	134	514	11.33	1.519	7.96	5.827	1.00
ALSTHOM	84	251	21.63	1.817	10.10	5.435	5.81
ALSTHOM	103	315	16.39	1.687	2.24	5.159	10.59
GEA	95	439	18.29	1.734	3.66	8.025	3.31
GEK	101	284	17.89	1.810	0.40	5.080	12.79
HITACHI	108	426	17.57	1.898	2.59	7.486	11.93
GEK	114	273	18.03	2.055	7.53	4.921	9.26
ALSTHOM	104	342	15.79	1.634	0.96	5.400	6.41
ALSTHOM	109	381	15.41	1.675	1.50	5.864	1.63

โดยที่ Speed คือ ความเร็วของรถไฟขณะทำการทดลองจากการวัดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S_1 คือ ระยะทางที่ใช้ระหว่างเพลลาที่ติดกันของโบกี้แรก

$Error_1$ คือ เปอร์เซนต์ความผิดพลาดที่เกิดจาก S_1

S_2 คือ ระยะทางที่ใช้ระหว่างเพลลาสุดท้ายของโบกี้แรกกับเพลลาแรกของโบกี้หลัง

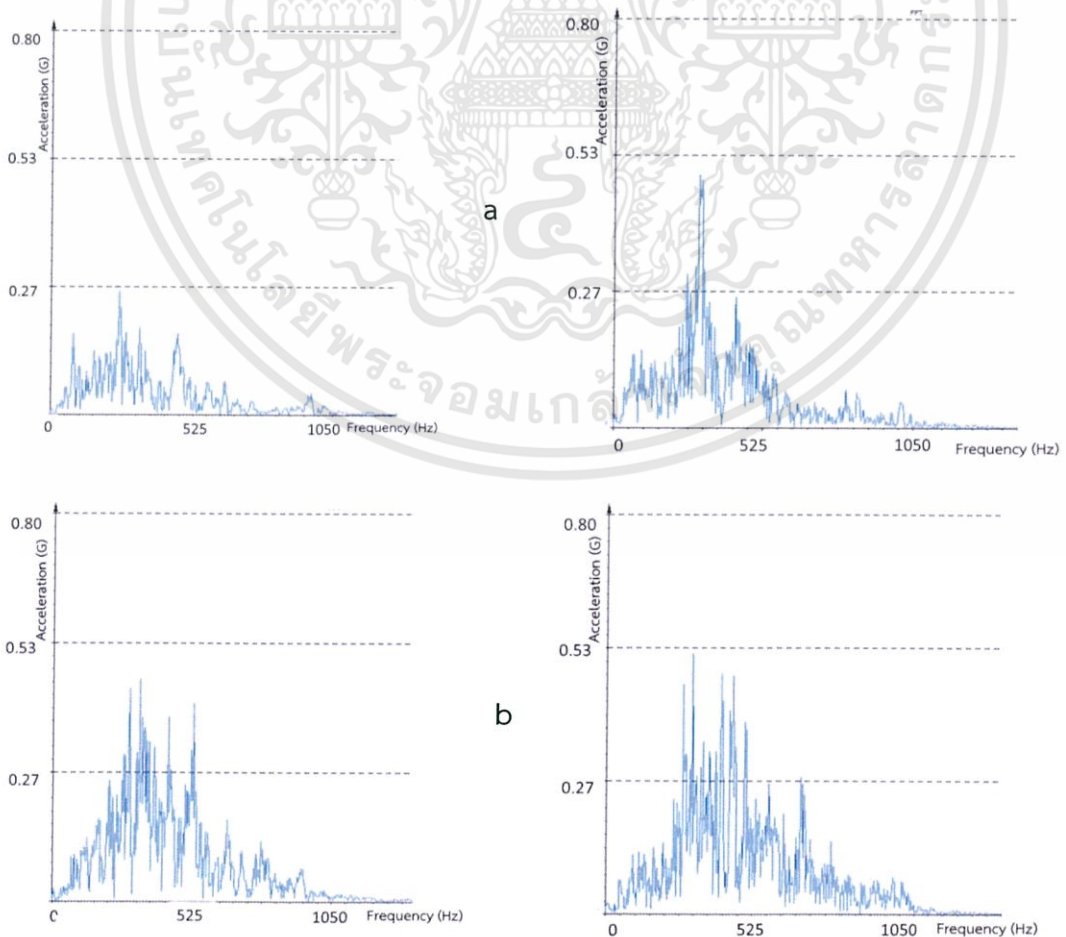
$Error_2$ คือ เปอร์เซนต์ความผิดพลาดที่เกิดจาก S_2

4.2 การวิเคราะห์สัญญาณ FFT ของหัวรถจักร

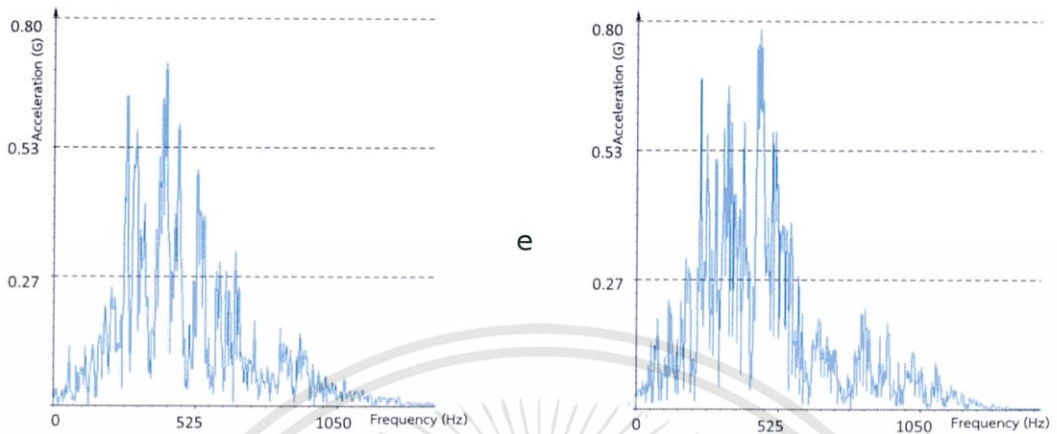
การวิเคราะห์กราฟ FFT ของหัวรถจักรแต่ละประเภท มีปัจจัยในการพิจารณาคือ ความเร็วของรถไฟและน้ำหนักกดเพลลา จึงได้ทำการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุดและขนาดของความถี่สูงสุด ซึ่งการวิเคราะห์มีดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์โดยใช้ปัจจัยน้ำหนักกดเพลลาคงที่กับความเร็วของรถจักร

ทำการทดลองโดยทดลองกับหัวรถจักร Alsthom (เป็นรุ่นที่ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลสัญญาณความถี่มากที่สุด) ซึ่งมีน้ำหนักกดเพลลาเท่ากับ 13.75 ตัน จากนั้นทำการเก็บข้อมูลสัญญาณในแต่ละความเร็วและสังเกตขนาดความถี่สูงสุดและความถี่ของแอมพลิจูดสูงสุด ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ผลจากการแปลง FFT จากสัญญาณความเร่งของหัวรถจักร Alsthom ซึ่งประกอบด้วย กราฟ a – f ดังนี้

รูป a คือ FFT ของหัวรถจักร Alsthom ที่วิ่งด้วยความเร็ว 11.33 m/s

รูป b คือ FFT ของหัวรถจักร Alsthom ที่วิ่งด้วยความเร็ว 14.89 m/s

รูป c คือ FFT ของหัวรถจักร Alsthom ที่วิ่งด้วยความเร็ว 15.81 m/s

รูป d คือ FFT ของหัวรถจักร Alsthom ที่วิ่งด้วยความเร็ว 16.39 m/s

รูป e คือ FFT ของหัวรถจักร Alsthom ที่วิ่งด้วยความเร็ว 17.79 m/s

รูป f คือ FFT ของหัวรถจักร Alsthom ที่วิ่งด้วยความเร็ว 21.63 m/s

จากการวิเคราะห์สัญญาณ FFT ของกราฟ a – f ของหัวรถจักร Alsthom จึงได้สรุปค่าแอมพลิจูดสูงสุดและความถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุดได้ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 4.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุดและขนาดของความเร่งสูงสุดโดยใช้น้ำหนักกดเพลาคงที่

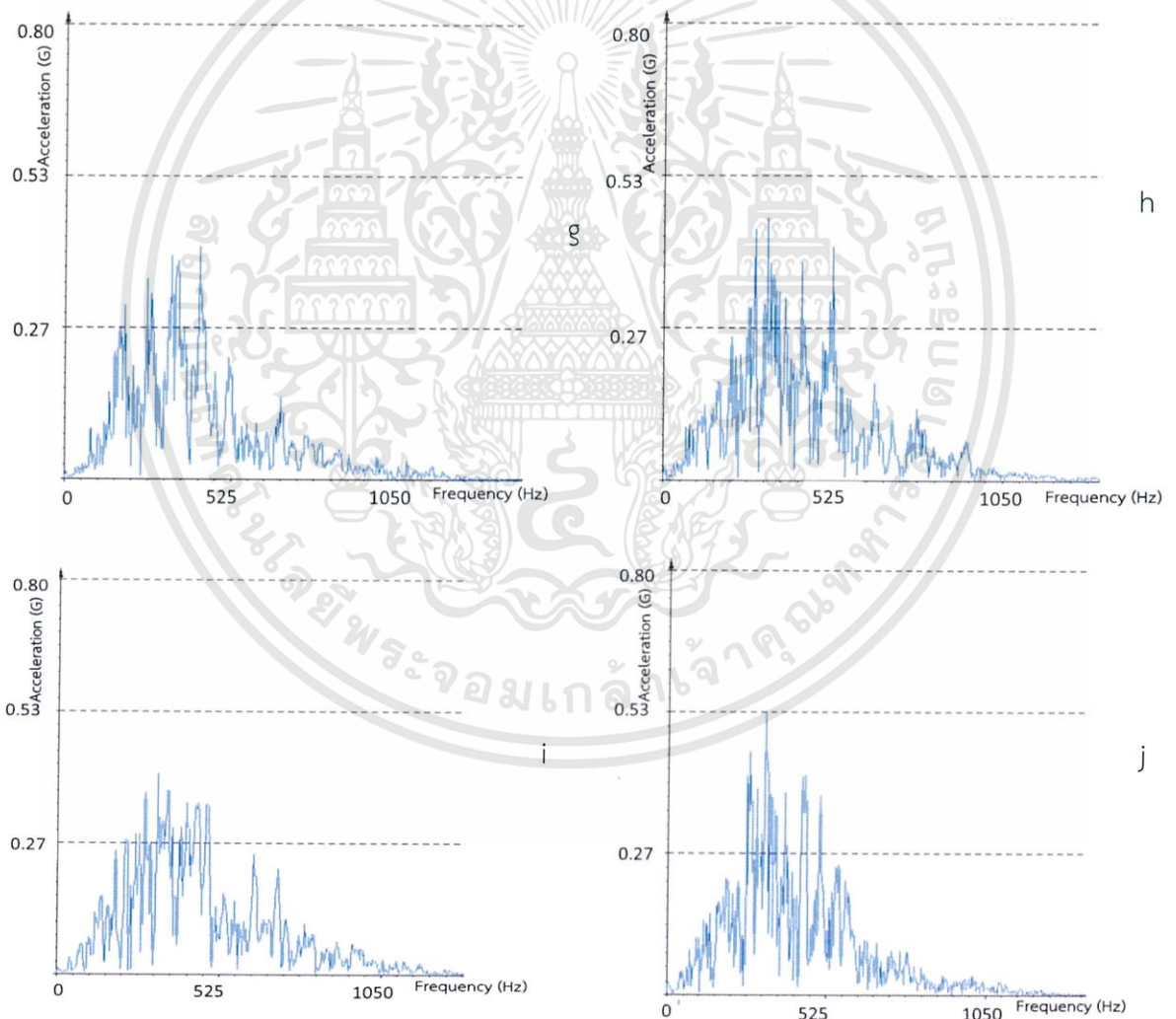
น้ำหนักกดเพลลา (ตัน)	ความเร็วของหัวรถจักร (m/s)	ขนาดความเร่งสูงสุด (G)	ความถี่ของแอมพลิจูดสูงสุด (Hz)
13.75	11.33	0.257	251
13.75	14.89	0.468	285
13.75	15.81	0.497	297
13.75	16.39	0.526	307
13.75	17.79	0.716	415
13.75	21.63	0.793	456

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อรถจักรมีน้ำหนักดเพลลาเท่ากัน จะทำให้ขนาดความเร่งสูงสุดและความถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของความเร็วรถไฟ

4.2.2 การวิเคราะห์ที่ใช้ปัจจัยความเร็วของรถจักรคงที่กับน้ำหนักดเพลลา

ทำการทดลองโดยทดลองกับหัวรถจักรที่มีความเร็วใกล้เคียงกันและแตกต่างกันไม่เกิน 5% (เนื่องจากผู้วิจัยไม่สามารถหารถจักรที่มีความเร็วเท่ากันได้) ซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 14.72 m/s จากนั้นทำการเก็บข้อมูลสัญญาณความเร่งในแต่ละรุ่นซึ่งมีน้ำหนักดเพลลาไม่เท่ากันและสังเกตขนาดความเร่งสูงสุดและความถี่ของแอมพลิจูดสูงสุด ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้



รูปที่ 4.14 ผลจากการแปลง FFT จากสัญญาณความเร่งของหัวรถจักรในแต่ละรุ่นซึ่งประกอบด้วยกราฟ g – j ดังนี้

รูป g คือ FFT ของหัวรถจักร THN ซึ่งมีน้ำหนักดเพลลา 12 ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป h คือ FFT ของหัวรถจักร THN ซึ่งมีน้ำหนักดเพลลา 12 ตัน

รูป i คือ FFT ของหัวรถจักร Alsthom ซึ่งมีน้ำหนักดเพลลา 13.75 ตัน

รูป j คือ FFT ของหัวรถจักร Hitachi ซึ่งมีน้ำหนักดเพลลา 15 ตัน

จากการวิเคราะห์สัญญาณ FFT ของกราฟ g – j ของหัวรถจักรประเภทต่างๆ จึงได้สรุปค่าแอมพลิจูดสูงสุดและความถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุดได้ดังตารางต่อไปนี้

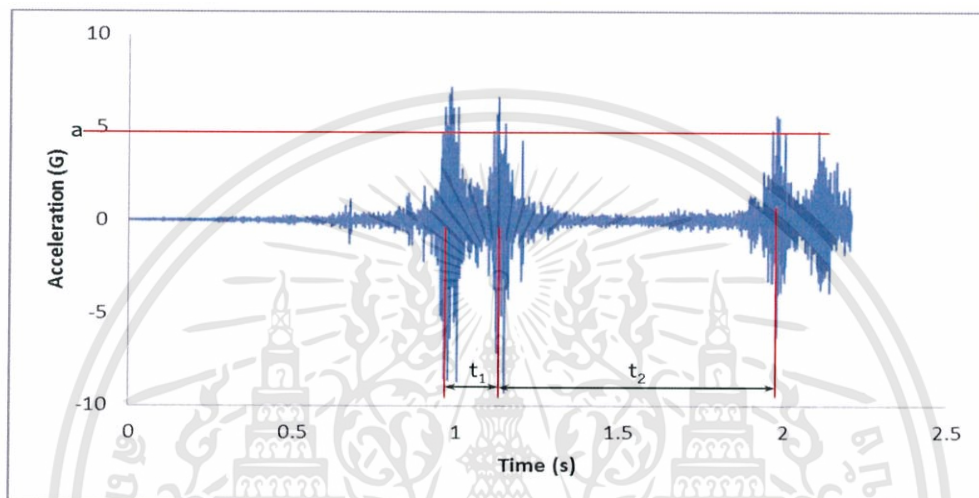
ตาราง 4.4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่มีแอมพลิจูดสูงสุดและขนาดของความเร่งสูงสุดโดยใช้ความเร็วของรถจักรที่ใกล้เคียงกัน

ความเร็วของหัวรถจักร (m/s)	น้ำหนักดเพลลา (ตัน)	ขนาดความเร่งสูงสุด (G)	ความถี่ของแอมพลิจูด สูงสุด (Hz)
14.51	12.00	0.431	424
15.11	12.00	0.491	324
14.89	13.75	0.468	322
14.37	15.00	0.547	322

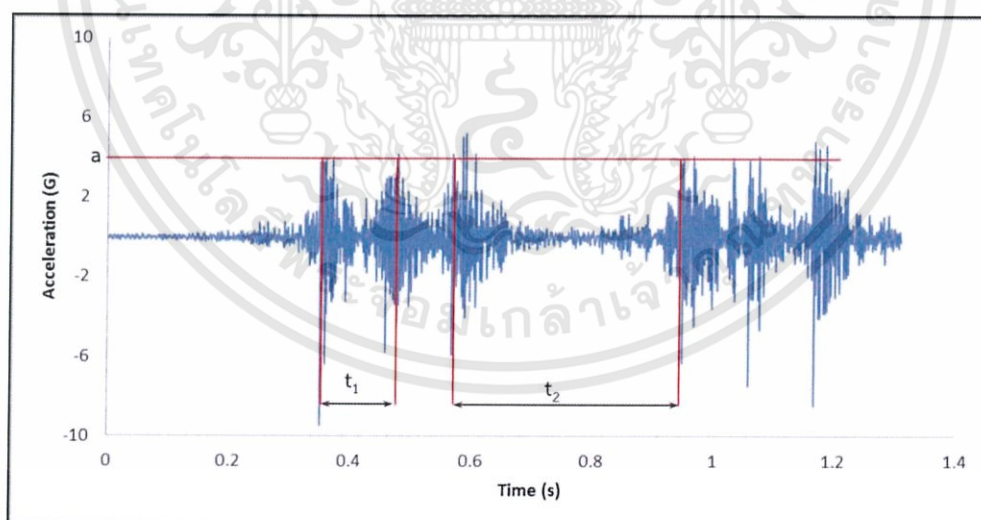
จากข้อมูลในตารางที่ 4.4 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อรถจักรมีความเร็วใกล้เคียงกัน จะทำให้ขนาดความเร่งสูงสุดเพิ่มขึ้นตามขนาดของน้ำหนักดเพลลาและมีขนาดใกล้เคียงกัน

4.3 เกณฑ์ในการเตือนสัญญาณจากรถไฟ

จากผลการทดลองทำให้สามารถบอกลักษณะทางกายภาพของรถไฟได้ เช่น จำนวนล้อของรถไฟ ประเภทของหัวรถจักร ความเร็วที่ใช้ในการเดินทาง จำนวนตู้โดยสาร และเวลาที่ใช้ในแต่ละจุดบนรถไฟ ทำให้สามารถสร้างเกณฑ์ในการเตือนได้โดยใช้ค่าดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.15 เกณฑ์ในการเตือนสัญญาณความเร่งของรถดีเซลราง



รูปที่ 4.16 เกณฑ์ในการเตือนสัญญาณความเร่งของรถดีเซลไฟฟ้า

โดยที่ a คือ ค่าความเร่ง ณ จุดยอด ที่มีค่าน้อยที่สุด

t_1 และ t_2 คือ ระยะเวลาที่ใช้ระหว่างเพลลาที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1.4

เนื่องจากต้องการให้ตรวจจบบรถไฟที่วิ่งมาเฉพาะหัวขบวนด้วย จึงใช้สัญญาณที่เกิดจากหัวรถ

จักรเท่านั้นและการจากเก็บข้อมูลจากรถไฟทั้งหมด 25 ขบวน จึงสามารถสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.5 แสดงค่า t_1 , t_2 และ a ของหัวรถจักรดีเซลรางและหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า

No.	Type	a^1 (G)	speed(m/s)	t_1 (ms)	t_2 (ms)
1	NKF	6.023	14.51	143	856
2	THN	4.418	15.11	148	872
3	THN	7.287	20.23	105	574
4	NKF	5.183	15.78	134	725
5	THN	5.358	16.94	121	696
6	NKF	5.317	18.67	119	704
7	THN	12.059	13.29	168	861
8	THN	12.608	20.77	106	540
9	NKF	7.206	21.54	101	647
10	NKF	4.230	19.63	103	577
11	NKF	5.754	20.96	100	630
12	THN	11.107	24.03	96	575
13	ALSTHOM	4.149	14.89	111	375
14	ALSTHOM	7.534	17.79	93	319
15	HITACHI	4.092	14.37	139	609
16	ALSTHOM	5.262	15.81	109	370
17	ALSTHOM	4.833	11.33	134	514
18	ALSTHOM	4.461	21.63	84	251
19	ALSTHOM	4.578	16.39	103	315
20	GEA	9.052	18.29	95	439
21	GEK	5.513	17.89	101	284
22	HITACHI	11.841	17.57	108	426
23	GEK	4.446	18.03	114	273
24	ALSTHOM	4.404	15.79	104	342
25	ALSTHOM	5.379	15.41	109	381

หมายเหตุ : 1 คือ $1 G = 9.8066 \text{ m/s}^2$ หรือ $1 g = 9.8066 \text{ m/s}^2$

ดังนั้นเกณฑ์ที่ใช้ในการเตือนสัญญาณของรถไฟ คือ

- (1) ค่า a ที่น้อยที่สุด คือ 4.092 g ใช้เป็น 4.00 g
- (2) ค่า t_1 ที่น้อยที่สุด คือ 93 ms ใช้เป็น 90 ms
- (3) ค่า t_2 ที่น้อยที่สุด คือ 273 ms ใช้เป็น 270 ms

4.4 การเลือกขนาดของ MEMS accelerometer

จากข้อมูลในที่ได้กล่าวมา พบว่าเซนเซอร์ MEMS accelerometer มีจะนำมาใช้งานจริง ต้องมีคุณสมบัติคือ มีช่วงการวัดที่มากกว่า 4g และต้องมีย่านความถี่ตอบสนองมากกว่า 1000 Hz ซึ่งพบว่าเซนเซอร์ที่มีลักษณะนี้ คือ ADXL325 MEMS accelerometer และได้เปรียบเทียบคุณสมบัติกับ IEPE accelerometer รุ่น 8692C50 ได้ดังนี้

ตาราง 4.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ Accelerometer

Specification	8692C50	ADXL325
Measurement Range (G)	80	5
Bandwidth (Hz)	5000	1600
Resonant frequency (Hz)	22000	5500
Operating voltage (V)	20 - 30	1.8 - 5.0
Supply current (mA)	2 - 20	0.350
Temperature operating ($^{\circ}$ C)	0 - 65	-40 - 85

4.5 การสอบเทียบของเซนเซอร์

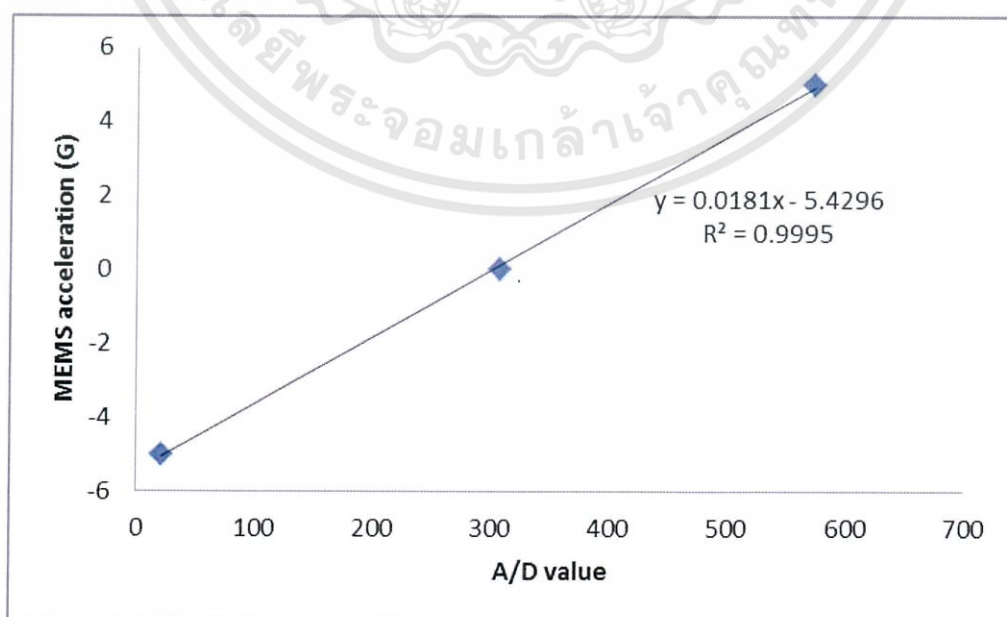
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาแล้วแต่มาการวัดด้วย Kistler SN8692C50 IEPE accelerometer ทั้งสิ้น แต่เนื่องจากการใช้งานจริงไม่สามารถนำเซนเซอร์ดังกล่าวไปใช้ในระบบจริงได้ เนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านราคาและการติดตั้ง ทำให้ต้องใช้ ADXL325 MEMS accelerometer จึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบระหว่างเซนเซอร์สองตัวนี้ โดยค่าที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno อ่านได้นั้นเป็นข้อมูลประเภท 10 bit ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1024 (หรือเรียกว่า A/D value) โดยมีแรงดันไฟฟ้าที่ 0 – 5V

4.5.1 การหาสมการความเร่งของ MEMS accelerometer

ในส่วนของ MEMS accelerometer นั้นมีวงจรขยายสัญญาณในตัวและสามารถส่งสัญญาณที่มีแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0.1 - 2.8V หรือ A/D value ที่ 21 – 573 และมีช่วงการวัดที่ -5 - 5G โดยมีรายละเอียดของการทำงานดังนี้

- (1) มีช่วงการวัดสูงสุดคือ 5g ที่ A/D value ที่ 573 (2.8V)
- (2) มีช่วงการวัดต่ำสุดคือ 5g ที่ A/D value ที่ 21 (0.1V)
- (3) มีค่า A/D value ที่ 300 (1.5V) ที่ความเร่ง 0g
- (4) มี Nonlinearity ± 0.2 ในช่วงของ -5 – 5G (ข้อมูลจากภาคผนวก ก)

จากหัวข้อที่ (1) – (4) ที่กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถประมาณว่าเป็นสมการเส้นตรงได้ทำให้สามารถสร้างกราฟเส้นตรงได้ดังนี้ได้ดังนี้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง MEMS acceleration (G) และค่า A/D value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 จะได้สมการที่ใช้หาค่าความเร่งจาก MEMS accelerometer ได้ดังนี้

$$\text{MEMS acceleration} = 0.0181 * (\text{A/D value}) - 5.4296, \text{ A/D value} \in (21, 573)$$

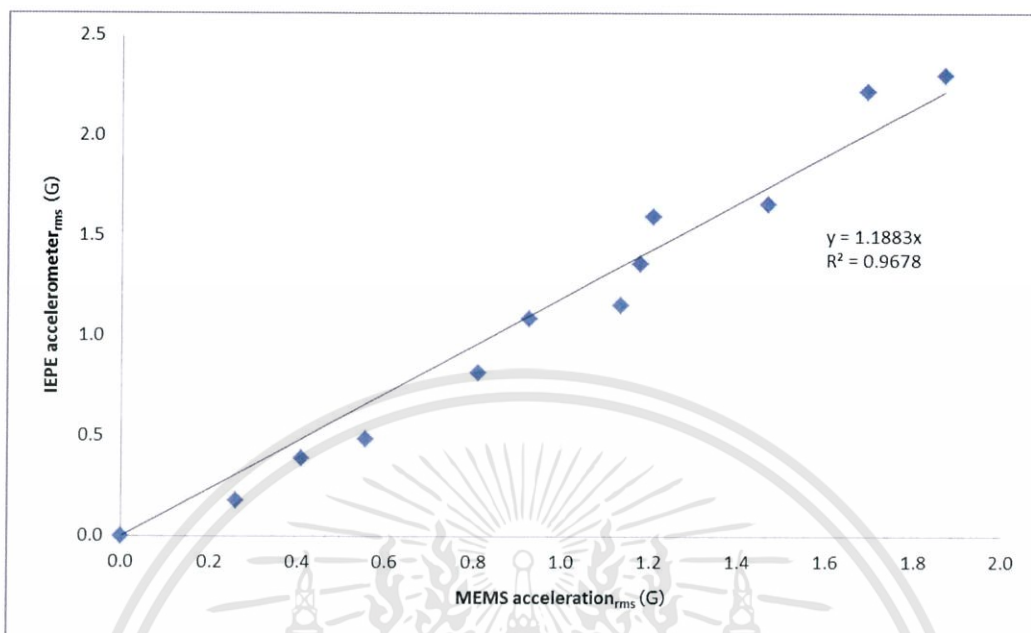
โดยที่ MEMS acceleration (g) คือ ค่าความเร่งที่อ่านได้จาก MEMS acceleration และ A/D value คือ ค่าที่อ่านได้จากการนำเอา MEMS accelerometer ไปต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์และอ่านค่าที่ได้ผ่านทาง Serial port

4.5.2 ผลการสอบเทียบ MEMS และ IEPE accelerometer

จากหัวข้อที่ 4.5.1 สามารถหาสมการที่ใช้หาค่าความเร่งจากค่า A/D value ได้ แต่เนื่องจากไม่ทราบว่า MEMS accelerometer มีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด ดังนั้นจึงได้ทำการสอบเทียบ MEMS accelerometer ด้วย IEPE accelerometer โดยใช้ค่า RMS ในการสอบเทียบ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ มีดังนี้

ตาราง 4.7 ผลการสอบเทียบ MEMS accelerometer ด้วย IEPE accelerometer

MEMS acceleration _{rms} (G)	IEPE _{rms} acceleration _{rms} (G)
0.009	0.001
0.260	0.176
0.410	0.386
0.556	0.483
0.809	0.815
0.926	1.085
1.134	1.152
1.178	1.361
1.207	1.596
1.467	1.658
1.693	2.221
1.867	2.299



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า IEPE acceleration_{rms} (G) หรือค่าความเร่งที่เกิดขึ้นจริงและค่า MEMS acceleration_{rms} (G)

ซึ่งจากรูปที่ 4.18 จะได้สมการที่ใช้หาค่าความเร่งจาก MEMS accelerometer ได้ดังนี้

$$\text{IEPE accelerometer}_{\text{rms}} = 1.188 * (\text{MEMS acceleration}_{\text{rms}})$$

โดยค่า IEPE accelerometer_{rms} คือ ค่าเฉลี่ยแบบ RMS ที่วัดได้จาก IEPE accelerometer
MEMS acceleration_{rms} คือ ค่าเฉลี่ยแบบ RMS ที่อ่านได้จาก MEMS accelerometer
ดังนั้นทำให้ได้สมการคำนวณค่าความเร่งจากค่า A/D value หลังจากทำการสอบเทียบกับ

IEPE accelerometer คือ

$$\begin{aligned} \text{Acceleration} &= 1.188 * (\text{MEMS acceleration}) \\ &= 1.188 * (0.0181 * (\text{A/D value}) - 5.4296) \end{aligned}$$

หรือ

$$\text{Acceleration} = 0.0215 * (\text{A/D value}) - 6.4503, \text{ A/D value} \in (21, 573)$$

โดยที่ Acceleration คือ ค่าความเร่งที่เกิดขึ้นจริง ในหน่วย g

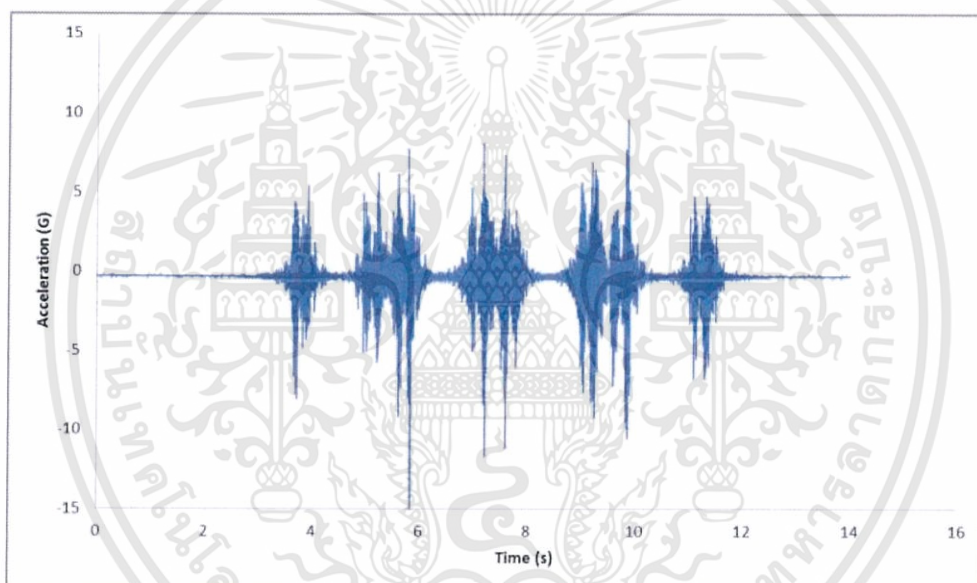
และ A/D value คือ ค่าที่อ่านได้จากการนำเอา MEMS accelerometer ไปต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์และอ่านค่าที่ได้ผ่านทาง Serial port

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเมื่อนำค่า A/D value ที่ 21 และ 573 แทนค่าในสมการข้างต้นจะพบว่า สามารถให้ค่าความเร่งต่ำสุดที่ $-5.99g$ และค่าสูงสุดที่ $5.86g$ ซึ่งสามารถวัดได้เกินช่วงการวัดที่ตัวเซนเซอร์ได้ระบุไว้ (± 5)

4.6 ผลการวัดที่ได้จาก MEMS accelerometer

เมื่อทำการสอบเทียบ MEMS accelerometer แล้ว จึงได้นำเซนเซอร์ดังกล่าวไปทำการวัดกับรถไฟจริงโดยเขียนโปรแกรมให้สามารถทำงานกับ Arduino ได้และมี baud rate ที่ 115200 หรือมี Acquisition rate ที่ 1963 Hz ในการเก็บข้อมูล ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.19 สัญญาณความเร่งของหัวรถจักรดีเซลราง ที่อ่านได้จาก MEMS accelerometer

จากรูปที่ 4.19 เป็นสัญญาณความเร่งที่เกิดจาก MEMS accelerometer ซึ่งใช้สมการ $Acceleration = 0.0215 * (A/D \text{ value}) - 6.4503$ ในการหาค่าความเร่งออกมา และจะสังเกตเห็นว่าสัญญาณความเร่งที่เกิดขึ้นในรูปที่ 4.19 มีค่ามากที่สุดคือ $9.43g$ และน้อยที่สุดที่ $-15.03g$ ซึ่งเกินค่าสูงสุดที่ MEMS accelerometer จะสามารถวัดได้ และการที่เกิดเหตุการณ์นี้ขึ้นพบว่ามีข้อสันนิษฐานดังนี้

(1) ในระหว่างการสอบเทียบ MEMS accelerometer พบว่ามีค่า A/D value สูงสุดที่ 946 ซึ่งเกินค่าสูงสุดที่จะวัดได้ และมีค่าต่ำสุดที่ 12 ซึ่งเกินค่าต่ำสุดที่จะวัดได้

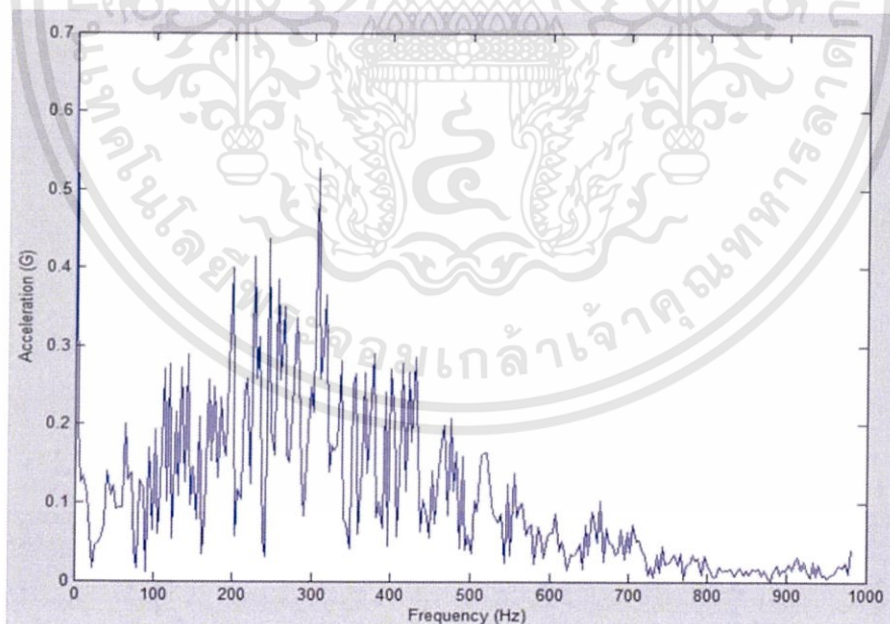
(2) สมการที่ใช้คำนวณค่าความเร่งจะเป็นสมการเส้นตรงเฉพาะช่วงที่ค่า A/D value อยู่ระหว่าง 21 – 573 เท่านั้น

(3) MEMS accelerometer มี Amplifier ภายในตัวที่ถูกต่อวงจรด้วยไฟเลี้ยง 5V ดังนั้นจึงทำให้มีโอกาสที่จะมีการขยายสัญญาณเกินช่วงสูงสุดที่ 2.9V ทำให้เกิดค่า A/D value ที่ 946 (4.62V)

(4) MEMS accelerometer มีช่วงการวัดต่ำสุดที่ 0.1V (21 A/D value) ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะมีการขยายสัญญาณไม่ถึงค่าที่ได้กำหนดไว้ ดังนั้นจึงทำให้มีโอกาสที่จะมีการขยายสัญญาณต่ำกว่าช่วงต่ำสุดที่ 0.1V ทำให้เกิดค่า A/D value ที่ 12 (0.056V)

จากข้อสันนิษฐานทั้ง 4 ข้อที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำสามารถสรุปได้ว่า MEMS accelerometer สามารถวัดค่าที่เกินช่วงสูงสุดและต่ำสุดได้ แต่ค่าที่ได้นั้นไม่สามารถหาสมการมาคำนวณได้ จึงเป็นเหตุผลให้เกิดค่า $-15.03g$ และ $9.43g$ แต่ข้อผิดพลาดนี้ไม่ได้มีผลกระทบกับการเตือนรถไฟแต่อย่างใด เพราะค่าความเร่งที่เกิดจากรถไฟนั้นมากกว่า $4g$ เสมอ และถ้ามากกว่าช่วงที่ MEMS accelerometer จะวัดได้ ค่าที่ได้ก็จะมากกว่า $4g$ เสมอ

จากรูปที่ 4.19 เป็นสัญญาณที่เกิดจากรถไฟขบวน 367(กรุงเทพ-ฉะเชิงเทรา) รอบเวลา 11.07 น. ณ สถานีพระจอมเกล้า หัวรถจักรดีเซลราง รุ่น NKF ที่วิ่งด้วยความเร็ว 16.77 m/s จากนั้นทำการหาย่านความถี่ตอบสนอง โดยการแปลงกราฟที่ 4.19 ให้อยู่ในรูป FFT เพื่อดูความถี่ตอบสนอง และได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.20 ผลจากการแปลง FFT จากกราฟที่ 4.19

จากรูปที่ 4.20 คือ สัญญาณ FFT ที่เกิดจากการสั่นของเพลารถ ซึ่งเวลาในขณะนั้นคือ 3.75 วินาที ซึ่งพบว่ามีความถี่ตอบสนองที่ 1- 981 Hz ทำให้สามารถอ่านสัญญาณที่เกิดขึ้นจากรถไฟได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และผลที่ได้การ MEMS accelerometer มีลักษณะคล้ายกับผลที่ได้จาก IEPE accelerometer ทำให้สามารถใช้เกณฑ์ในการตรวจจับสัญญาณของรถไฟร่วมกันได้

4.7 ผลการทดลองจากการใช้ระบบเตือนการมาของรถไฟ

เมื่อติดตั้งระบบเตือนซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดรถไฟ และอุปกรณ์รับสัญญาณ โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดรถไฟไว้บริเวณไม้หมอนโดยมี MEMS accelerometer ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนที่มีราคาถูกทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตรวจจับรถไฟ และติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณไว้บริเวณจุดตัดทางข้าม ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 การติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณในบริเวณจุดตัดทางข้ามไฟฟ้า



รูปที่ 4.22 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดรถไฟในบริเวณจุดตัดทางข้ามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองกับรถไฟ 9 ขบวน พบว่าเมื่อใช้เกณฑ์การตรวจวัดที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3 ระบบเตือนการมาของรถไฟจะเตือนรถไฟทั้ง 9 ขบวนด้วยสัญญาณไฟ LED



รูปที่ 4.23 การทำงานของระบบตรวจจับรถไฟด้วยการวัดการสั่นสะเทือนของรางขบวนรถไฟวิ่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

ระบบตรวจวัดการมาของรถไฟ โดยใช้การวัดการสั่นสะเทือนของรางรถไฟ สามารถทำงานได้ตามข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

(1) สามารถใช้เครื่องวัดความเร่งราคาถูก รุ่น ADXL325 MEMS accelerometer มาใช้วัดความเร่งของไม้หมอนและสามารถเตือนการมาของรถไฟได้ โดยใช้เกณฑ์ในการตรวจจับรถไฟคือ ไม้หมอนต้องมีการสั่นสะเทือนด้วยความเร่งที่มากกว่า $4g$ เวลา t_1 ซึ่งเป็นเวลาระหว่างเพลแรกและเพลที่สองของแคร่แรกมีค่ามากกว่า 90 ms และเวลา t_2 ซึ่งเป็นเวลาระหว่างเพลสุดท้ายของแคร่แรกและเพลแรกของแคร่ที่สองมีค่ามากกว่า 270 ms

(2) ระบบเตือนสามารถทำงานได้ โดยเมื่อมีรถไฟเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ตรวจวัดรถไฟ อุปกรณ์ดังกล่าวจะทำการส่งสัญญาณมาที่อุปกรณ์รับสัญญาณและทำการเตือนด้วยสัญญาณไฟในบริเวณจุดตัดทางข้าม

(3) สามารถใช้ระบบ Zigbee ในการส่งสัญญาณไร้สายได้

(4) ระบบเตือนสามารถเตือนสัญญาณที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของรถไฟเท่านั้น

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

(1) อุปกรณ์ตรวจวัดรถไฟ และอุปกรณ์รับสัญญาณไม่ทนต่อสภาพที่ร้อน ฝนตก หรือมีฝุ่นได้ เพราะอาจจะทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในเกิดความเสียหาย ดังนั้นจึงไม่สามารถติดตั้งไว้เป็นเวลานานได้

(2) ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนของรถไฟนั้น มีความยากลำบากในการเก็บข้อมูล เนื่องจากมีสภาพอากาศที่ร้อนและอยู่กลางแจ้ง อีกทั้งยังต้องหาแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับในบริเวณนั้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

(1) ใช้อุปกรณ์ที่คงทนต่อความร้อนได้ดีหรือมีระบบระบายความร้อน เช่น มีพัดลมระบายอากาศในอุปกรณ์ตรวจวัดรถไฟและอุปกรณ์รับสัญญาณ เป็นต้น

(2) ใช้ระบบส่งสัญญาณไร้สายด้วยระบบ Wi-Fi โดยให้อุปกรณ์ตรวจวัดรถไฟ และอุปกรณ์รับสัญญาณ มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต ซึ่งจะทำให้การส่งสัญญาณไม่มีข้อจำกัดด้านระยะทาง

(3) ใช้ Baud rate ที่สูงขึ้นในขั้นตอนการเก็บข้อมูลโดยใช้ MEMS accelerometer ซึ่งจะทำให้ได้กราฟสัญญาณความเร่งที่ละเอียดยิ่งขึ้น

(4) เขียนโปรแกรมโดยใช้ Arduino ให้สามารถระบุประเภทของหัวรถจักรได้ เช่น ระบุว่า เป็นหัวรถจักรดีเซลรางหรือเป็นหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า

(5) เพิ่มกระแสไฟฟ้า (ไม่ควรเกิน 120 mA) ให้อุปกรณ์ Xbee ในตัวตรวจจวัดรถไฟ จะทำให้เพิ่มระยะการส่งสัญญาณของ Zigbee ได้

(6) เขียนโปรแกรมโดยใช้ Arduino ให้สามารถคำนวณความเร็วที่ใกล้เคียงกับความเร็วที่ใช้จริงได้ เพื่อให้สามารถระบุเวลาในการที่รถไฟจะวิ่งเข้าสถานี

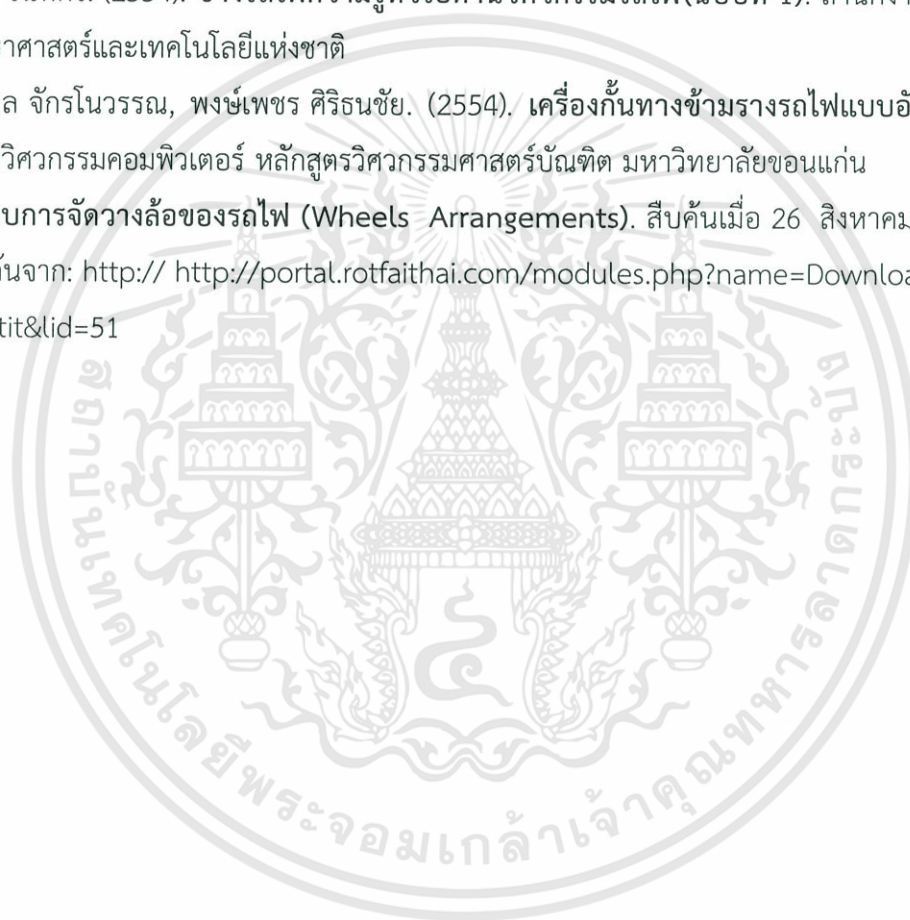
(7) ใช้โซลาร์เซลล์ในการให้กำลังไฟฟ้ากับอุปกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1]. ทางตัดรถไฟกับถนน. สืบค้นเมื่อ 4 สิงหาคม 2559. สืบค้นจาก: <http://board.postjung.com/829010.html>
- [2]. เปิดสถิติอุบัติเหตุ-เร่งวางระบบแก้ปัญหาคัดรถไฟ. สืบค้นเมื่อ 4 สิงหาคม 2559. สืบค้นจาก : <http://www.mediastudio.co.th/2016/04/04/11110/>
- [3]. นคร จันทศร. (2554). ช่างรถไฟควมรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ(ฉบับที่ 1). สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
- [4]. นวพล จักรโนวรรณ, พงษ์เพชร ศิริธชัย. (2554). เครื่องกั้นทางข้ามรางรถไฟแบบอัตโนมัติ. ภาควิศวกรรมคอมพิวเตอร์ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [5]. ระบบการจัดวางล้อของรถไฟ (Wheels Arrangements). สืบค้นเมื่อ 26 สิงหาคม 2559. สืบค้นจาก: <http://portal.rotfaithai.com/modules.php?name=Downloads&op=getit&lid=51>





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คุณสมบัติของ ADXL325 MEMS accelerometer



Small, Low Power, 3-Axis $\pm 5g$ Accelerometer

ADXL325

FEATURES

- 3-axis sensing
- Small, low profile package
 - 4 mm \times 4 mm \times 1.45 mm LFCSP
- Low power: 350 μ A typical
- Single-supply operation: 1.8V to 3.6V
- 10,000 g shock survival
- Excellent temperature stability
- Bandwidth adjustment with a single capacitor per axis
- RoHS/WEEE lead-free compliant

APPLICATIONS

- Cost-sensitive, low power, motion- and tilt-sensing applications
 - Mobile devices
 - Gaming systems
 - Disk drive protection
 - Image stabilization
 - Sports and health devices

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL325 is a small, low power, complete 3-axis accelerometer with signal conditioned voltage outputs. The product measures acceleration with a minimum full-scale range of $\pm 5g$. It can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration, resulting from motion, shock, or vibration.

The user selects the bandwidth of the accelerometer using the C_x , C_y , and C_z capacitors at the X_{OUT} , Y_{OUT} , and Z_{OUT} pins. Bandwidths can be selected to suit the application with a range of 0.5 Hz to 1600 Hz for X and Y axes and a range of 0.5 Hz to 550 Hz for the Z axis.

The ADXL325 is available in a small, low profile, 4 mm \times 4 mm \times 1.45 mm, 16-lead, plastic lead frame chip scale package (LFCSP_LQ).

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

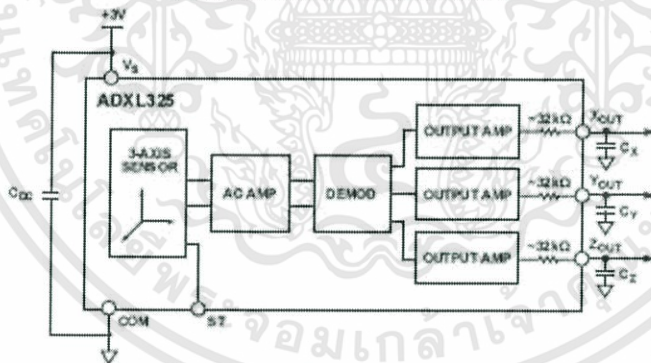


Figure 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADXL325

SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 3\text{ V}$, $C_X = C_Y = C_Z = 0.1\ \mu\text{F}$; acceleration = 0 g, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
SENSOR INPUT					
Measurement Range	Each axis	± 5	± 6		g
Nonlinearity	Percent of full scale		± 0.2		%
Package Alignment Error			± 1		Degrees
Interaxis Alignment Error			± 0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity ¹			± 1		%
SENSITIVITY (RATIOMETRIC)²					
Sensitivity at X_{out} , Y_{out} , Z_{out}	Each axis $V_S = 3\text{ V}$	156	174	192	mV/g
Sensitivity Change Due to Temperature ³	$V_S = 3\text{ V}$		± 0.01		%/ $^\circ\text{C}$
ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)					
0 g Voltage at X_{out} , Y_{out} , Z_{out}	$V_S = 3\text{ V}$	1.3	1.5	1.7	V
0 g Offset vs. Temperature			± 1		mg/ $^\circ\text{C}$
NOISE PERFORMANCE					
Noise Density X_{out} , Y_{out} , Z_{out}			250		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
FREQUENCY RESPONSE⁴					
Bandwidth X_{out} , Y_{out} ⁵	No external filter		1600		Hz
Bandwidth Z_{out} ⁵	No external filter		550		Hz
R_{FIT} Tolerance			$32 \pm 15\%$		k Ω
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
SELF TEST⁶					
Logic Input Low			+0.6		V
Logic Input High			+2.4		V
ST Actuation Current			+60		μA
Output Change at X_{out}	Self test 0 to 1	-90	-190	-350	mV
Output Change at Y_{out}	Self test 0 to 1	+90	+190	+350	mV
Output Change at Z_{out}	Self test 0 to 1	+90	+320	+580	mV
OUTPUT AMPLIFIER					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High	No load		2.8		V
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range		1.8		3.6	V
Supply Current	$V_S = 3\text{ V}$		350		μA
Turn-On Time ⁷	No external filter		1		ms
TEMPERATURE					
Operating Temperature Range		-40		+85	$^\circ\text{C}$

¹ Defined as coupling between any two axes.

² Sensitivity is essentially ratiometric to V_S .

³ Defined as the output change from ambient to maximum temperature or ambient to minimum temperature.

⁴ Actual frequency response controlled by user-supplied external filter capacitors (C_X , C_Y , C_Z).

⁵ Bandwidth with external capacitors = $1/(2 \times \pi \times 32\text{ k}\Omega \times C)$. For $C_X, C_Y = 0.003\ \mu\text{F}$, bandwidth = 1.6 kHz. For $C_Z = 0.01\ \mu\text{F}$, bandwidth = 500 Hz. For $C_X, C_Y = 10\ \mu\text{F}$, bandwidth = 0.5 Hz.

⁶ Self test response changes cubically with V_S .

⁷ Turn-on time is dependent on C_X , C_Y , C_Z and is approximately $160 \times C_X$ or C_Y or $C_Z + 1\text{ ms}$, where C_X , C_Y , C_Z are in μF .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คุณสมบัติของ Kistler SN8692C50 IEPE accelerometer

Acceleration - ATP

KISTLER

P. 1 ... 2

Type 8692C5 ... 8692C50, 8692C5M1 ... 8692C50M1,

8692C SERIES, TRIAXIAL PiezoBEAM® ACCELEROMETERS

Designed for measuring structural response in modal applications, the 8692C series of triaxial accelerometers measure vibration in three, mutually perpendicular axes (x, y and z), simultaneously. The sensors feature high sensitivity and a low impedance voltage output. These lightweight accelerometers reduce mass-loading on thin-walled structures. This series of accelerometers, each with an

integral four-pin connector, are designed for simplified and versatile installation. The unique, built-in magnet facilitates quick mounting; adhesive may be used for more permanent installations. As an option, the M1-Version is available with 10-32 mounting thread in place of the internal magnet while the M9 version is available with color-coded caps for axis identification. The 8692C series features

Continued

- Low impedance, voltage mode
- Unique integral mounting magnet
- Low cost, lightweight triaxial design
- High accuracy and stability
- Choice of ranges and sensitivities
- Excellent thermal stability
- Conforming to CE



Technical Data	Units	8692C5 8692C5M1	8692C10 8692C10M1	8692C50 8692C50M1
Acceleration Range	<i>g</i>	±5	±10	±50
Acceleration Limit	<i>g</i> pk	±3	±16	±80
Threshold nom.	<i>g</i> rms	120	280	1000
Sensitivity ±5% @ 3 <i>g</i> _{rms} & 100Hz	mV/ <i>g</i>	1000	500	100
Resonant Frequency mounted, nom.	kHz	9	22	22
Frequency Response ±5%	Hz	1 ... 3000	1 ... 5000	1 ... 6000
Phase Shift, < 5°	Hz	4 ... 2000	4 ... 2000	4 ... 4000
Amplitude Non-linearity	%FSO	±1	±1	±1
Time Constant nom.	s	1	1	1
Transverse Sensitivity	%	<1	<1	<1
Long Term Stability	%	±1	±1	±1
Environmental:				
Base Strain Sensitivity @ 250µε	<i>g</i> /µε	<0.001	<0.001	<0.001
Shock Limit (0.2ms pulse width)	<i>g</i> pk	5000	10000	10000
Temperature Coefficient of Sensitivity	%/°F	-0.02	+0.04	+0.04
	%/°C	-0.04	+0.08	+0.08
Temperature Range Operating (4mA supply current)	°F	32 ... 149	32 ... 149	32 ... 149
	°C	0 ... 65	0 ... 65	0 ... 65
Storage	°F	-10 ... 200	-10 ... 200	-10 ... 200
	°C	-23 ... 94	-23 ... 94	-23 ... 94
Output:				
Bias nom.	VDC		11	
Impedance	Ω		<500	
Voltage full scale	V		±5	
Current	mA		2	
Source:				
Voltage	VDC		20 ... 30	
Constant Current	mA		2 ... 20	
Impedance min.	kΩ		100	

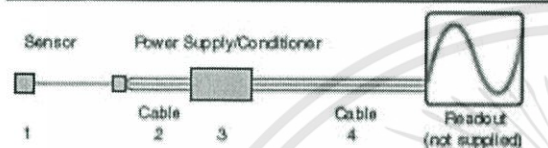
1 *g* = 9.80665 m/s², 1 inch = 25.4 mm, 1 *g*ram = 0.03527 oz., 1 lbf-in = 0.1129 Nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a wide frequency response with outstanding thermal stability and phase response. They are constructed of hard, anodized aluminum and sealed to withstand a wide range of environmental conditions. These sensors can be operated from an internal power source (IEPE, Integrated Electronic Piezo Electric) found in many FFT analyzers or from the wide range of Kistler Piezotronics power supply couplers. The low impedance voltage output allows for the use of low-cost cable and offers immunity to electrical noise.

Technical Data	Unit	8692...
Construction:		
Sensing Element	type	ceramic bimorph Bender
Housing	material	Al / hard anodized
Sealing-housing connector	type	epoxy
Connector	type	4-pin Microtech Equivalent
Ground Isolation min.	MΩ	10
Weight	grams	16
Magnetic Holding Force nom. for 8692	lbf / N	2.75 / 12.2
Mounting Torque M1 version	lbf-in (Nm)	12 (1.3)

Ordering Information



Specify:

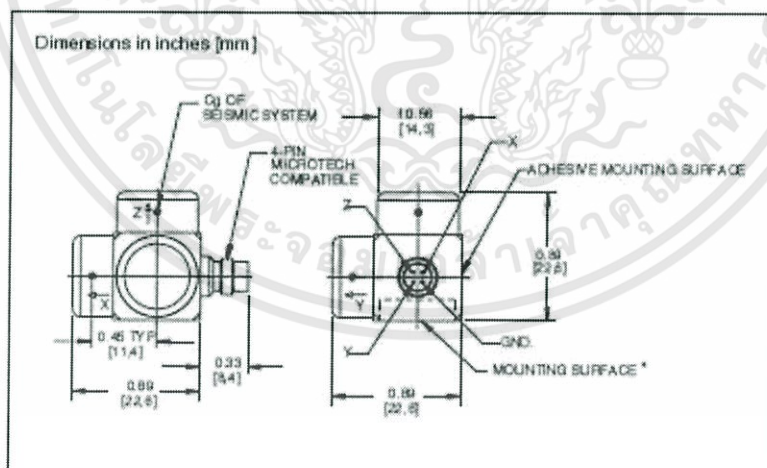
- 1 - 8692C... triaxial accelerometer with magnetic mounting specify range or accelerometer with 10-32 mounting thread
- 2 - 1578A... extension cable, 4-pin Microtech pos. to 4-pin Microtech neg., specify length in meters
- 3 - 1756B(X) cable, breakout cable 4-pin Microtech neg. to 3x BNC pos., specify length (X) = 0.5, 3, 10 meters
- 4 - 5100 series couplers, of four-channel coupler
- 4 - 5134 output cable, BNC pos. to BNC pos., specify length in meters
- 4 - 1511...

Related Products

8630C	series accelerometers, adhesive mount cube
8636C	series accelerometers, 5-40 stud mount cube
8632C	series accelerometers, single axis cube
8630C	series accelerometers, triaxial cube
9720	series impulse hammers
K-BEAM*	accelerometers for very low frequency measurements

Supplied Accessories

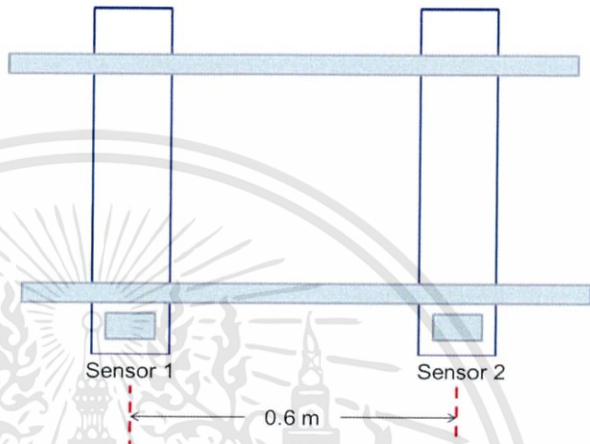
8432	mounting wax
8402	mounting stud, 10-32 (included with M1 version)
8411	mounting stud, 10-32 to M6 (included with M1 version) shipped only outside N.A.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วิธีวัดความเร็วของรถไฟ

ผู้ทำการทดลองได้ใช้การหาความเร็วของรถไฟโดยใช้เซนเซอร์ Ultra sonic สองตัววางไว้บนหมอนรองรางรถไฟ ซึ่งมีระยะห่าง 0.6 เมตร จากนั้นเขียนโปรแกรมให้เซนเซอร์ทั้งสองตัวสามารถหาผลต่างของเวลา ดังนั้นทำให้สามารถคำนวณความเร็วของรถไฟขณะนั้นได้



รูปการวัดความเร็วของรถไฟโดยใช้ Ultrasonic sensor จำนวน 2 ตัว โดยมีโค้ดที่ใช้ในการทดลองดังนี้

```
float duration1, distance1, time;
float duration2, distance2, speed;
int trig1 = 2, echo1 = 3;
int trig2 = 4, echo2 = 5;
int start, end, status = 0;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(trig1,OUTPUT);
  pinMode(echo1,INPUT);
  pinMode(trig2,OUTPUT);
  pinMode(echo2,INPUT);
}
```

```
void loop()
```

```
{
  if(status = 0)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

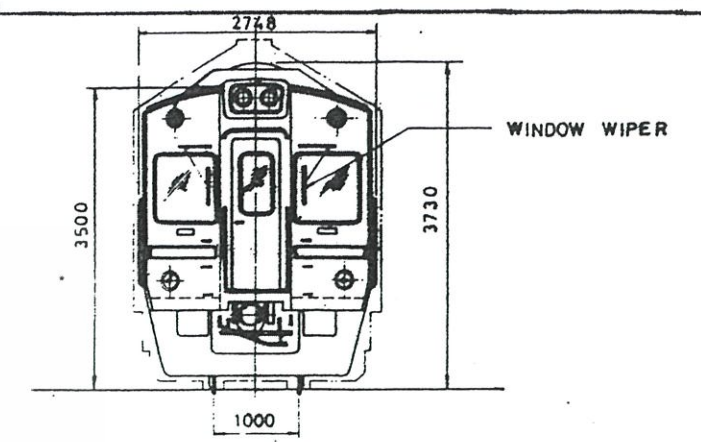
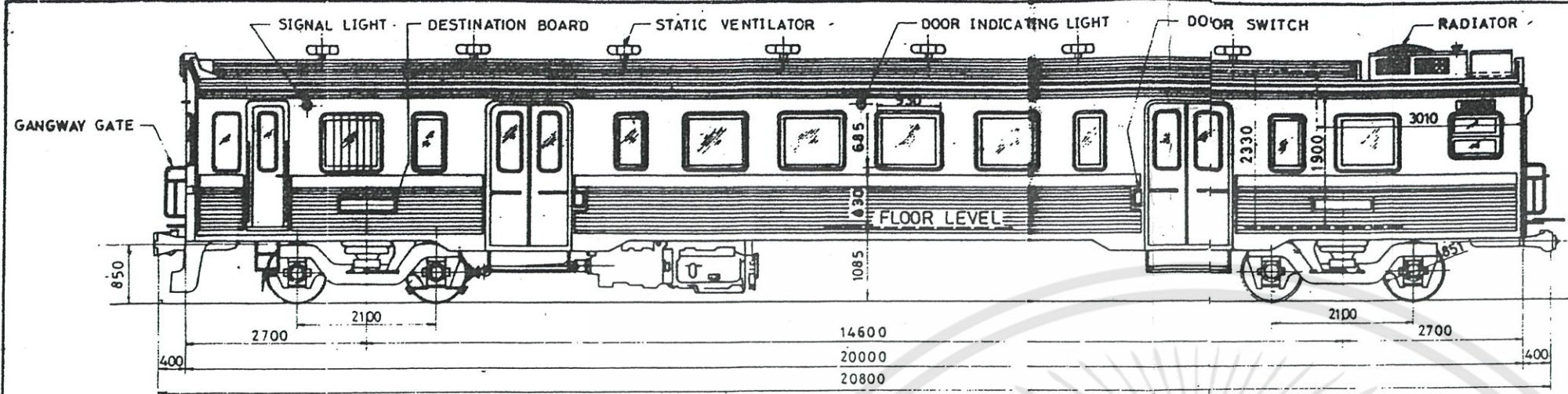
{
  digitalWrite(trig1,HIGH);
  delay(2);
  digitalWrite(trig1,LOW);
  duration1=pulseIn(echo1,HIGH);
  distance1=(duration1)/2/29.1;
}
if(distance1 <= 2)
{
  start = millis();
  status = 1;
}
if(status = 1)
{
  digitalWrite(trig2,HIGH);
  delay(2);
  digitalWrite(trig2,LOW);
  duration2=pulseIn(echo2,HIGH);
  distance2=(duration2)/2/29.1;
  if(distance2 <= 2)
  {
    end = millis();
    time = start - end;
    speed = 600/time;
    Serial.println(speed);
    delay(180000);
  }
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

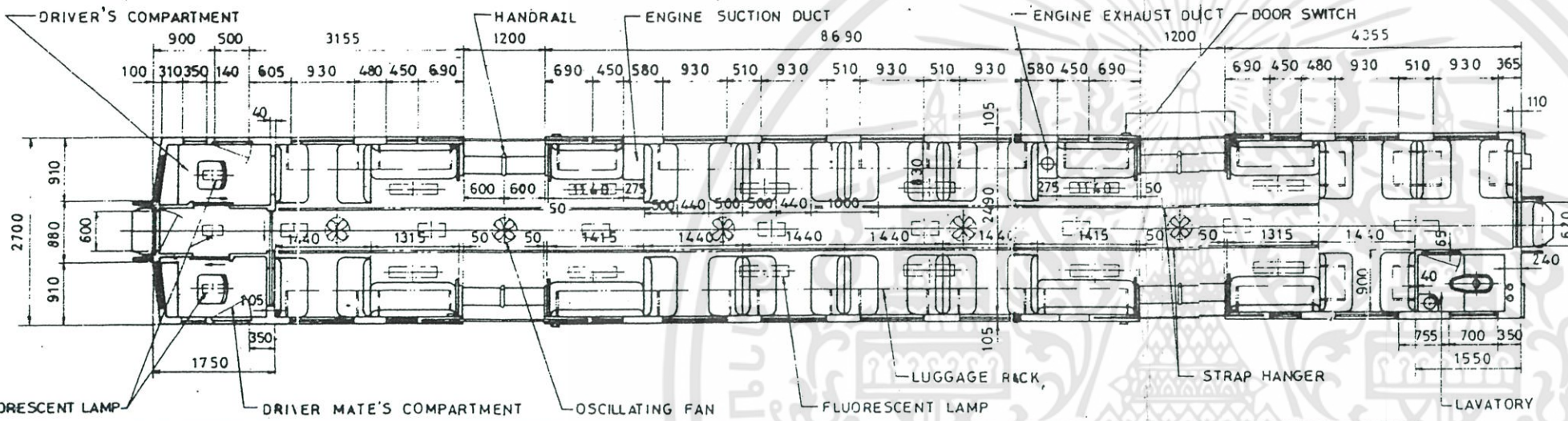


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



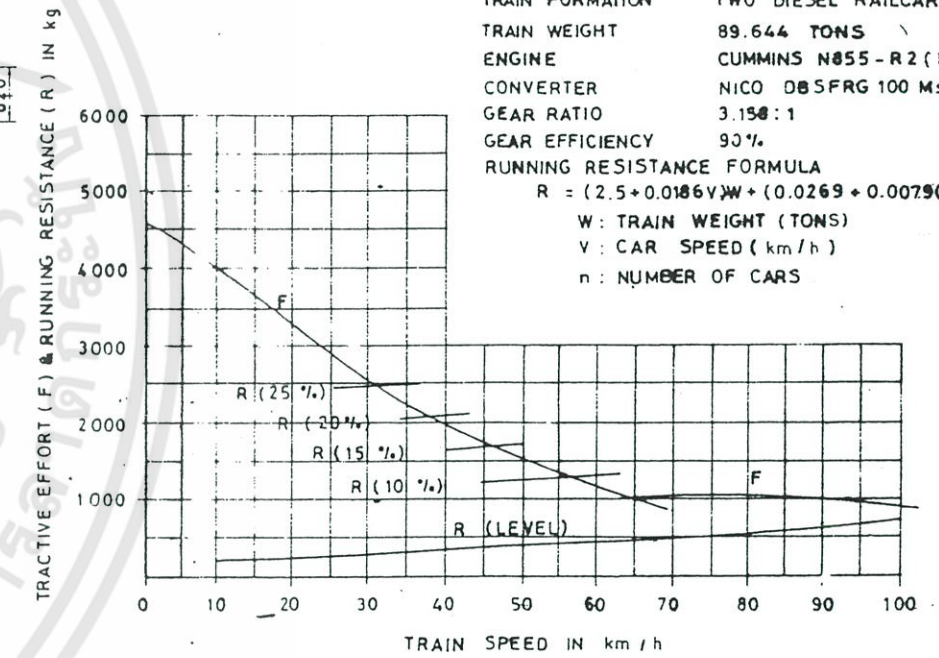
CAPACITY, PASSENGERS

NORMAL SEATED	74
NORMAL STANDING	72
TOTAL	146



TRAIN PERFORMANCE CURVE

TRAIN FORMATION TWO DIESEL RAILCARS
 TRAIN WEIGHT 89.644 TONS
 ENGINE CUMMINS N855-R2 (BIG CAM)
 CONVERTER NICO DBSFRG 100 Ms 300
 GEAR RATIO 3.158:1
 GEAR EFFICIENCY 90%
 RUNNING RESISTANCE FORMULA
 $R = (2.5 + 0.0186V)W + (0.0269 + 0.0079(n-1))V^2$
 W: TRAIN WEIGHT (TONS)
 V: CAR SPEED (km/h)
 n: NUMBER OF CARS



YEAR IN SERVICE	2526 (1983)	FIRING ORDER	1-5-3-6-2-4
NUMBER OF CARS ON ORDER	20 CARS	HYDRAULIC TRANSMISSION (NIIGATA)	NICO
WEIGHT OF POWER CAR		TYPE	DBSFRG. 100 Ms 300
IN WORKING ORDER (APPROX)	35322 kg	NUMBER OF CONVERTER FOR EACH DRIVING DIRECTION	1
EMPTY (APPROX)	33500 kg	AXLE DRIVE	RG-53
WHEEL ARRANGEMENT	BOGIE	REDUCTION RATIO	3.158:1
MAXIMUM AXLE LOAD	12 TONS	LIGHTING AND STARTING	
CAPACITY/ENGINE		3-φ GENERATOR WITH BRIDGE RECTIFIER	NIKKO-37000-0402
HYDRAULIC TRANSMISSION OIL	APPROX 50 l	NOMINAL OUTPUT VOLTAGE & CURRENT	25 V AC, 80 A
HYDRAULIC COUPLING OIL FOR THE COOLING FANS	150 l	BATTERY	LEAD ACID TYPE TRK.15-12
FUEL	300 l	VOLTAGE	24 V DC (12V x 2SETS)
LUBRICATING ENGINE OIL	30.6 l	CAPACITY (5 HOUR RATING)	175 AH
COOLING WATER	230 l	HEAD LIGHT (TYPE SEALED BEAM WITH CONNECTOR)	150W /50W
SAND / CAR	80 l	BRAKE	DA1-E WITH ME-23-A
POWER CAR OUT PUT		TYPE OF BRAKE ON CAR	AIR & HAND
MAXIMUM TRACTIVE EFFORT	4600 kg	AIR COMPRESSOR	TYPE C-1200
MAXIMUM SPEED	100 km/hr	EFF. CAPACITY @ MAX. PRESSURE AND MAX. SPEED	1240 l / MIN
DIESEL ENGINE	4 STROKE, HORIZONTAL	MINIMUM CURVE RADIAS NEGOTIABLE	122 m
MAKER AND TYPE	CUMMINS N855-R2 (BIG CAM)	WHEEL DIAMETER	851 mm
NUMBER OF ENGINE	1	NEW	
CYLINDER x BORE x STROKE	6 X 140 X 152 mm	WORN OFF	799 mm
MAXIMUM OUT PUT @ SPEED	235 hp @ 2100 rpm	CAPACITY OF WATER SERVICE TANK	1000 l
IDLING SPEED	600 rpm		

R S R. 235 HP DIESEL RAILCAR SCALE 1:75

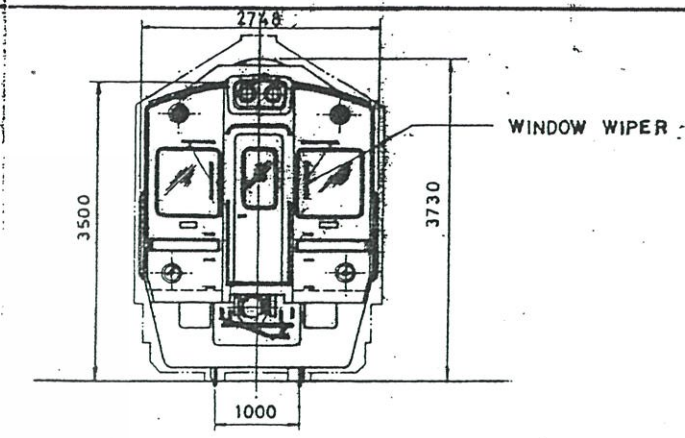
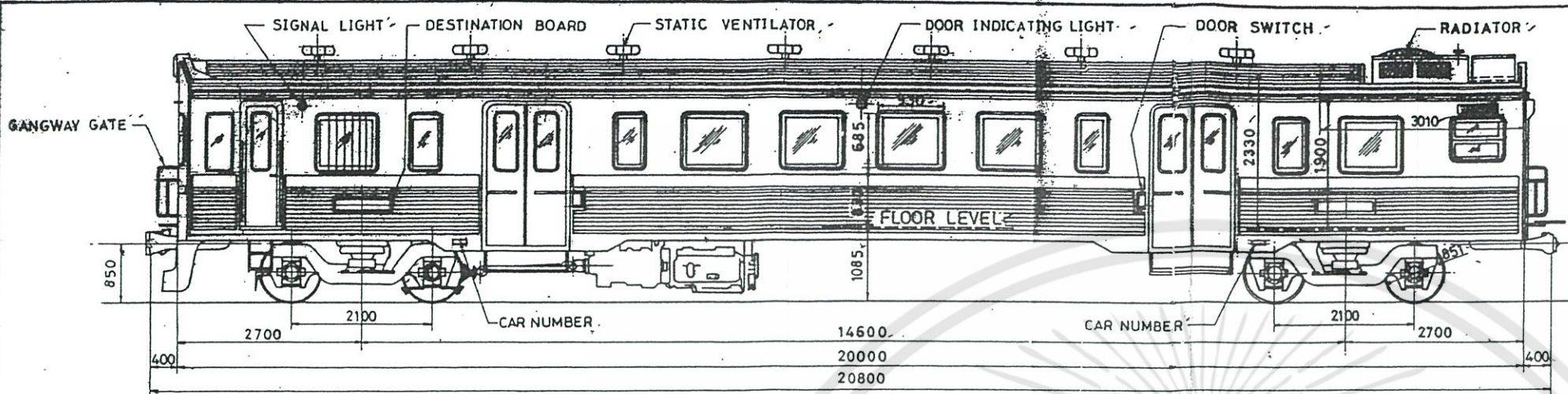
USED FOR: BPD No 1101-1140 (THN)

REMARKS: เขียนจากแบบของรถไฟไทยเลขที่ C110-04757

DATE: 15-11-33

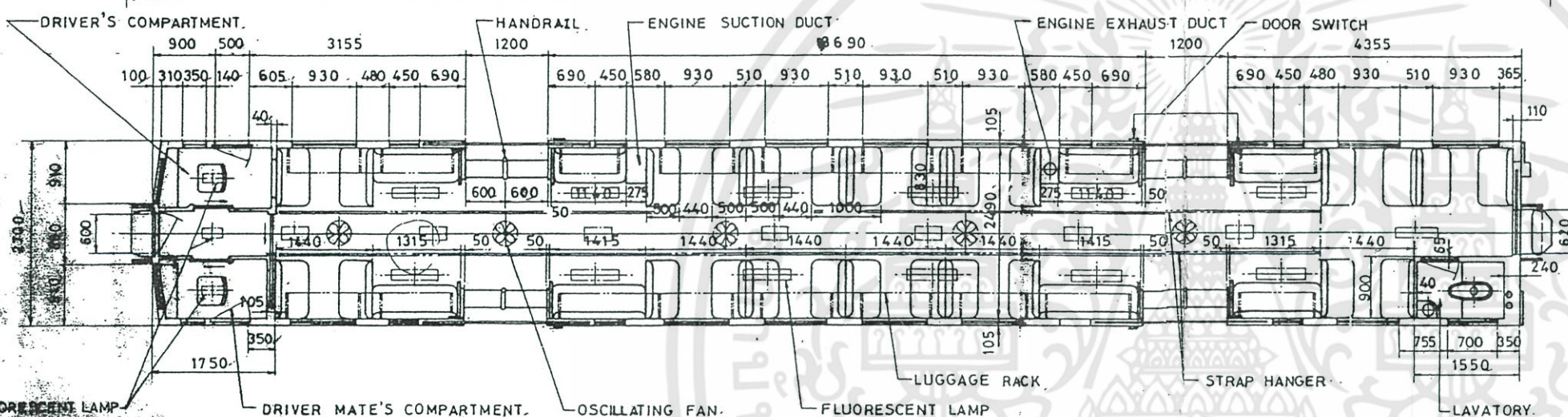
DIAGRAM No BPD. 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าการนี้ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

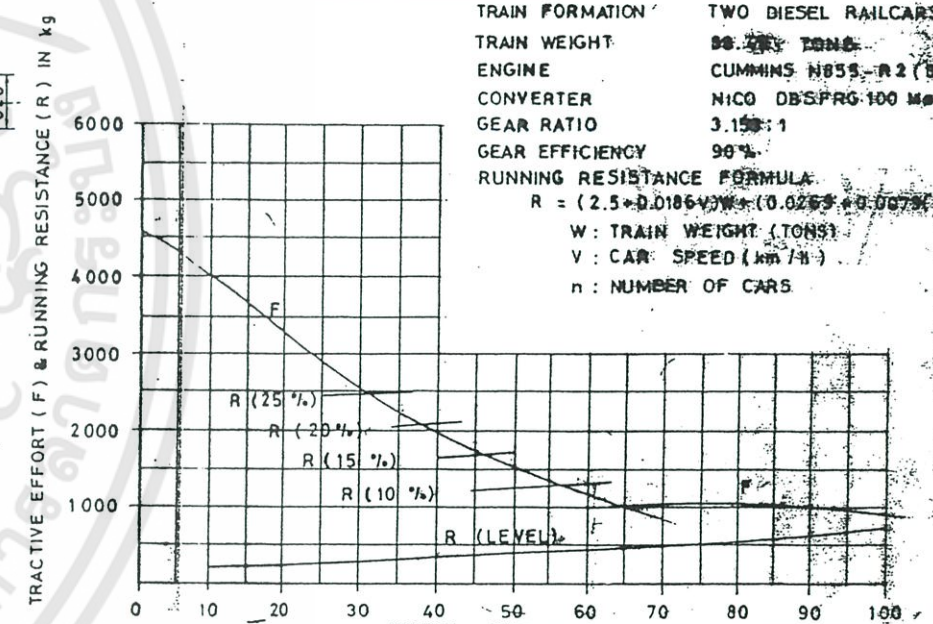


CAPACITY, PASSENGERS

NORMAL SEATED	74
NORMAL STANDING	72
TOTAL	146



TRAIN PERFORMANCE CURVE



TRAIN FORMATION TWO DIESEL RAILCARS
 TRAIN WEIGHT 98.2 TONS
 ENGINE CUMMINS N855-R2 (BIG CAM)
 CONVERTER NICO DBSFRG-100 Ms 300
 GEAR RATIO 3.158:1
 GEAR EFFICIENCY 96%
 RUNNING RESISTANCE FORMULA
 $R = (2.5 + 0.0186V)W + (0.0265 + 0.0077V^2)n$
 W: TRAIN WEIGHT (TONS)
 V: CAR SPEED (km/h)
 n: NUMBER OF CARS

YEARS IN SERVICE	2528 (1985)	FIRING ORDER	1-5-3-6-2-4
NUMBER OF CARS ON ORDER	32 CARS	HYDRAULIC TRANSMISSION (NIIGATA)	NICO
WEIGHT OF POWER CAR	35225 kg	TYPE	DBSFRG. 100 Ms 300
IN WORKING ORDER (APPROX)	33360 kg	NUMBER OF CONVERTER FOR EACH DRIVING DIRECTION	1
ENGINE APPROX	33360 kg	AXLE DRIVE	RG-53
WHEEL ARRANGEMENT	BOGIE	REDUCTION RATIO	3.158:1
MAXIMUM AXLE LOAD	12 TONS	LIGHTING AND STARTING	3-GENERATOR WITH BRIDGE RECTIFIER
CAPACITY ENGINE			NIKKO 0-37000-0402
HYDRAULIC TRANSMISSION OIL	APPROX 50 l	NOMINAL OUTPUT VOLTAGE & CURRENT	25 VAC, 80 A
HYDRAULIC COUPLING OIL FOR THE COOLING FANS	150 l	BATTERY	LEAD ACID TYPE TRK.15-12
FUEL	350 l	VOLTAGE	24 VDC (12V x 2SETS)
LUBRICATING ENGINE OIL	30.6 l	CAPACITY (5 HOUR RATING)	175 AH
COOLING WATER	230 l	HEAD LIGHT (TYPE SEALED BEAM WITH CONNECTOR)	150W / 50W
SAND / CAR	80 l	BRAKE	DA1-E WITH ME-23-A
POWER CAR OUT PUT		TYPE OF BRAKE ON CAR	AIR & HAND
MAXIMUM TRACTIVE EFFORT	4600 kg	AIR COMPRESSOR	TYPE C-1200
MAXIMUM SPEED	100 km/hr	EFF. CAPACITY @ MAX. PRESSURE AND MAX. SPEED	1240 l / MIN
DIESEL ENGINE	4 STROKE, HORIZONTAL	MINIMUM CURVE RADII NEGOTIABLE	122 m
MANUFACTURER AND TYPE	CUMMINS N855-R2 (BIG CAM)	WHEEL DIAMETER	851 mm
NUMBER OF ENGINE	1	NEW	799 mm
CYLINDER x BORE x STROKE	6 X 140 X 152 mm	WORN OFF	1000 l
MAXIMUM OUT. PUT @ SPEED	235 hp @ 2100 rpm	CAPACITY OF WATER SERVICE TANK	
IDLING SPEED	600 rpm		

R S R. 235 HP. DIESEL RAILCAR

SCALE 2:1:75

DIMENSIONS IN mm

USED FOR: BPD. No 1201-1264 (NK)

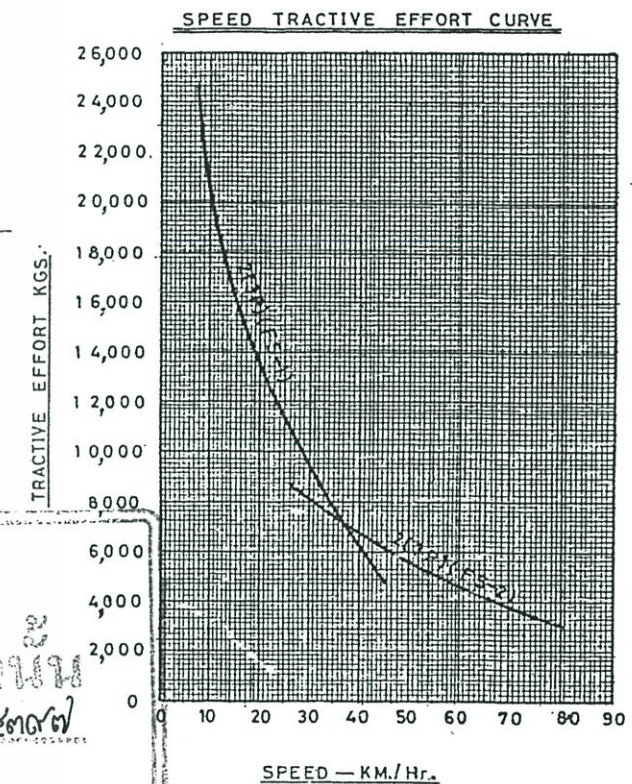
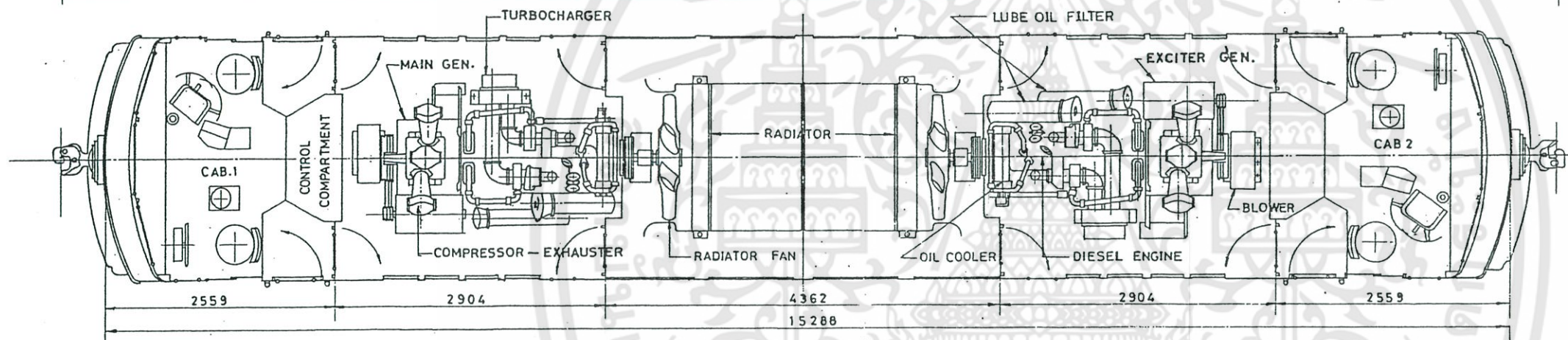
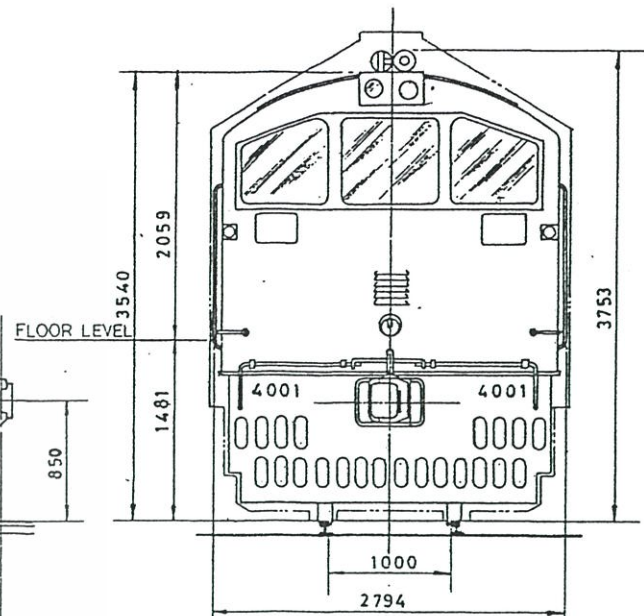
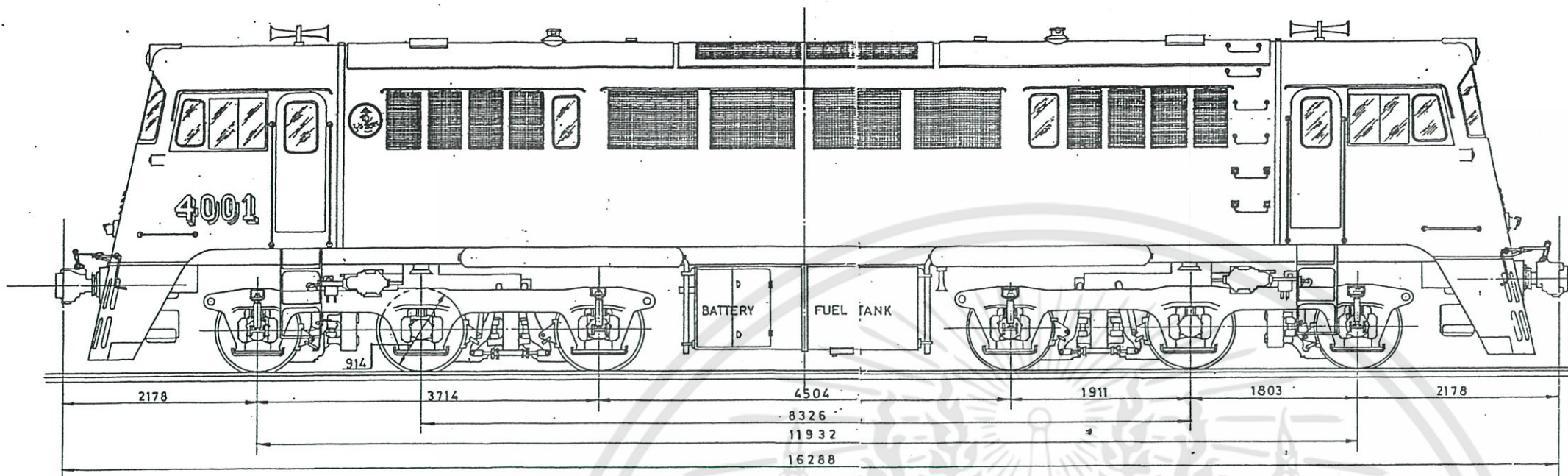
REF. DWG. NO. No. 0506.00/0506.01

REMARKS: เขียนจากแผนผังของรถจักรโตเกียวเลขที่ C110-05066

DATE: 15-11-32

DIAGRAM NO: BPL10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต



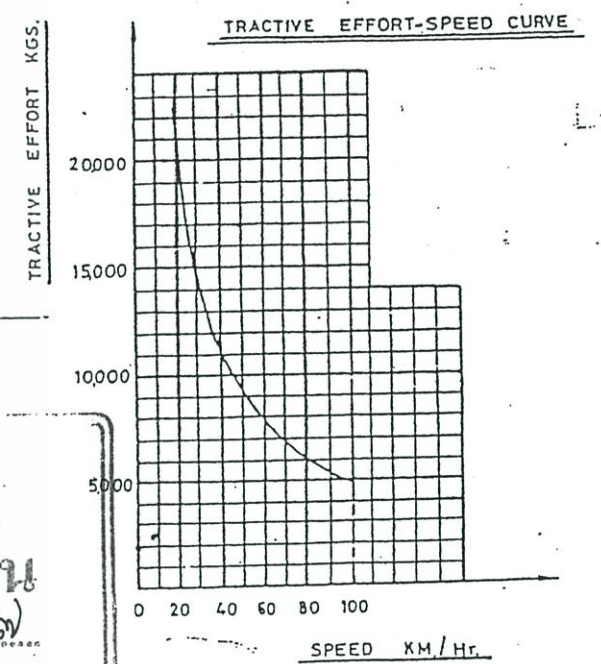
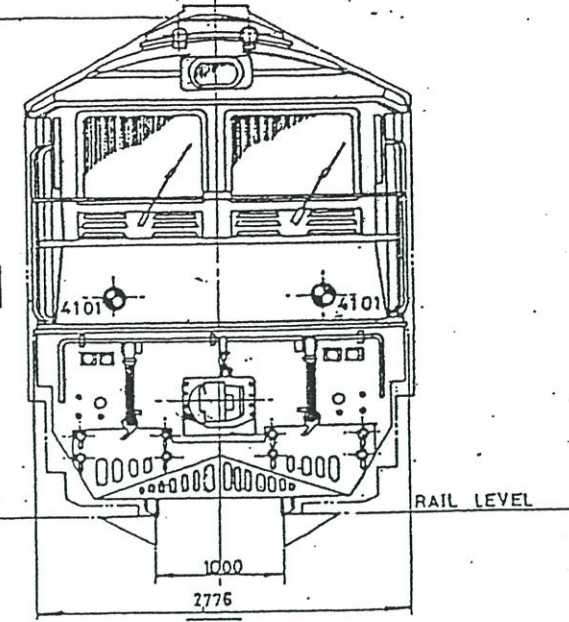
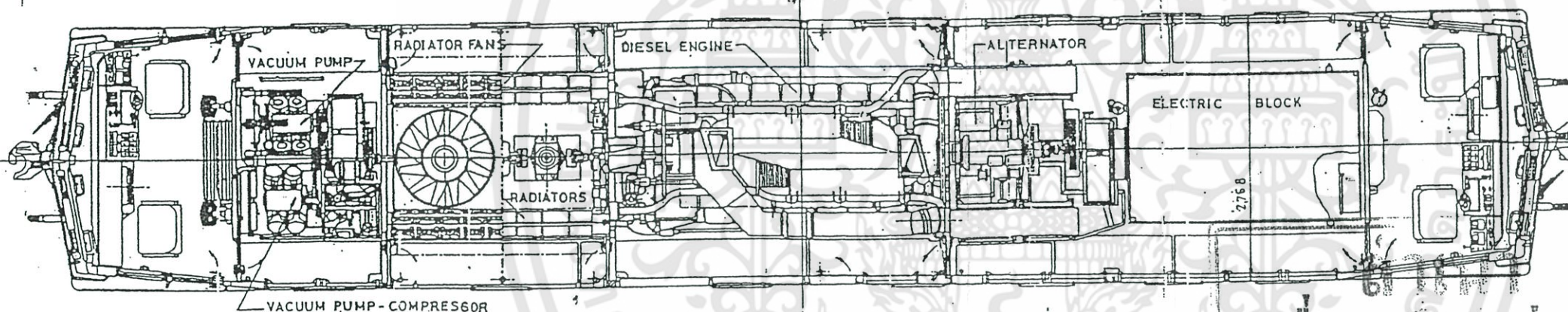
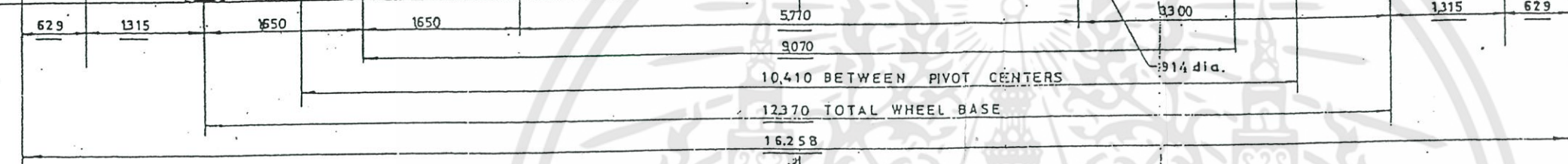
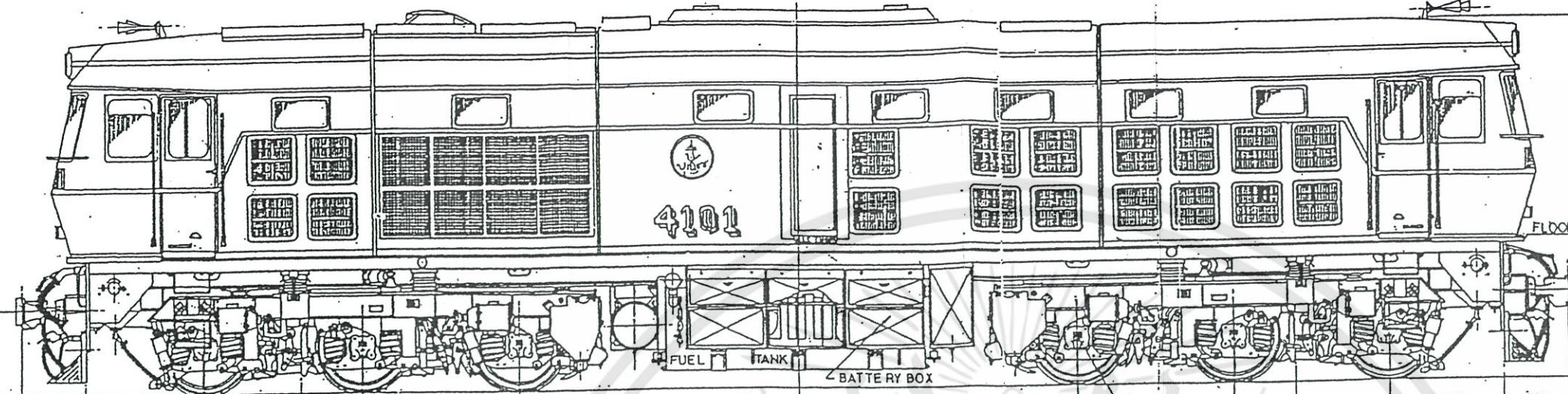
YEAR, LOCOMOTIVE IN SERVICE (B.E.)	2507	TRACTION MOTOR	
WEIGHT OF LOCOMOTIVE		NUMBER OF UNITS	6
IN WORKING ORDER	75,000 KGS	TYPE	5GE-761-A3
EMPTY	70178 "	NUMBER OF POLES	4
WHEEL ARRANGEMENT	Co-Co	CONTINUOUS RATING	150 KW.
MAXIMUM AXLE LOAD	12.5 TONS	MAXIMUM SPEED	3100 RPM.
CAPACITY (PER LOCOMOTIVE)		GEAR RATIO	93:18
FUEL	3,500 LITRES	MAIN GENERATOR	
LUBRICATING ENGINE OIL	530 "	NUMBER OF UNITS	2
COOLING WATER	605 "	TYPE	5GT-605-A1
SAND	510 "	NUMBER OF POLES	6
LOCOMOTIVE OUT PUT		CONTINUOUS RATING	600 V, 1550 AMP.
MIN. CONTINUOUS RATED TRACTIVE EFFORT	17,963 KGS.	MAXIMUM VOLTAGE	600 V.
MIN. CONTINUOUS SPEED	13 KM./HR.	BRAKING	
MAXIMUM TRACTIVE EFFORT 30% ADHESION	22,500 KGS.	TYPE OF BRAKE ON LOCOMOTIVE	28-1V-1 COMBINED AIR & VACUUM BRAKE
MAXIMUM SPEED	103 KM./HR.	CAPACITY OF VACUUM PUMP	2X6372L/MIN. AT 1000 RPM.
DIESEL ENGINE	4-STROKE CYCLE	CAPACITY OF AIR COMPRESSOR	2X1614L/MIN. AT 1000 RPM.
MAKER AND TYPE (CUMMINS)	(VT12-825-B1) VTA-1710-1	BRAKE POWER PERCENTAGE	60.5%
NUMBER OF ENGINE	2	BATTERY	
CYLINDER X BORE X STROKE	12X139.7MM.X152MM	VOLTAGE	75 V.
MAXIMUM OUT PUT & RPM.	2X 660 AT 2,000	CAPACITY	180 AH.
CONTINUOUS OUT PUT & RPM.	2X 600 AT 1,700	NUMBER OF LOCOMOTIVE ON ORDER	50 UNITS
1 HOUR RATING OUT PUT & RPM.		MINIMUM CURVE RADIUS NEGOTIABLE	57.9 M.

สำนักงาน
เพื่อการศึกษาเท่านั้น
Ref. No. ๑๕๒๕.๑๖ / ๑๕๓๑๗
อันดัน
- วิศวกรศึกษาเทคนิคการช่าง

R.S.R. 1320HP. DIESEL ELECTRIC LOCOMOTIVE		SCALE 1 : 50
DIMENSIONS IN MM.		
USED FOR	REF. DWG. No.	
D.E.L. No. 4001-4050 (G.E.)		
REMARKS: ๑. เชื้อเพลิงจากแผนผังเลขที่ D.14 11๓๑๑๗ ๒. เตาเผาการฉนวนใหม่ให้เหมาะสม.	SANCD. <i>PO</i> SEM.	
DATE 25-6-16	DIAGRAM No. D.14/1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้
ไปทำประโยชน์อื่นใด

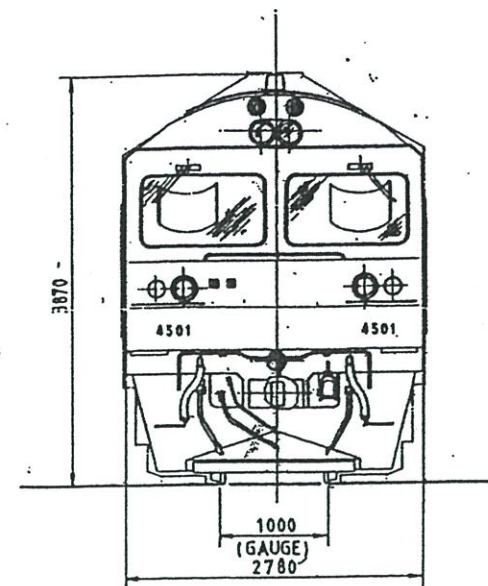
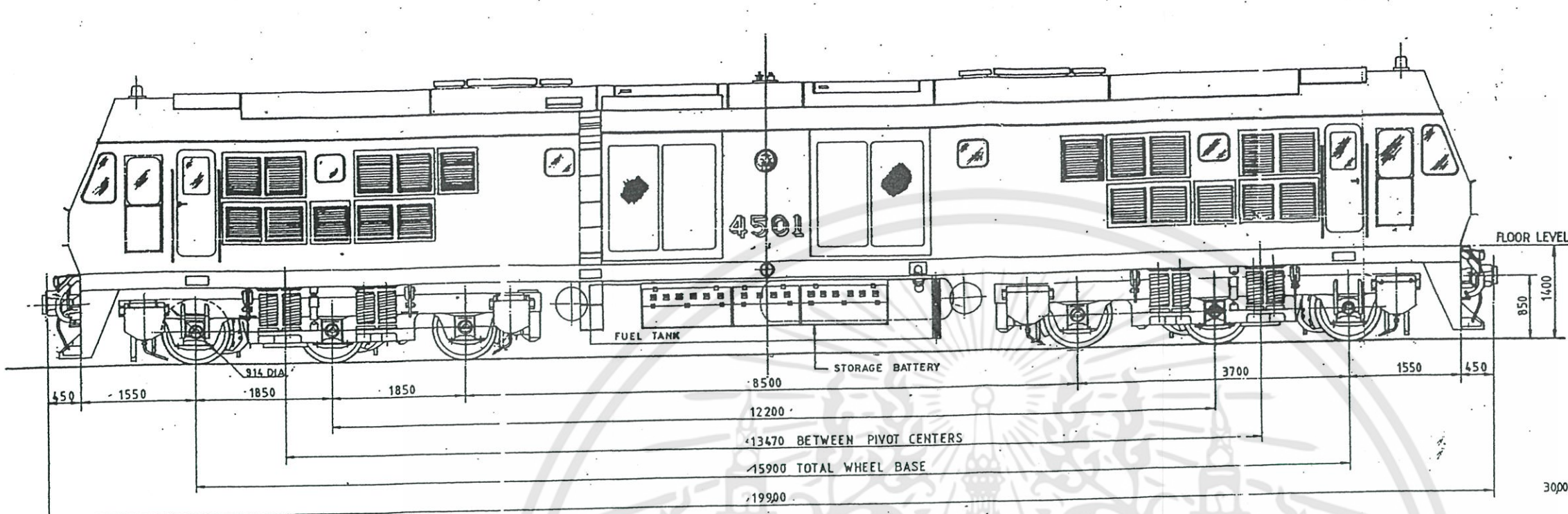
วันที่ ๑๕ มิ.ย. ๒๕๖๖



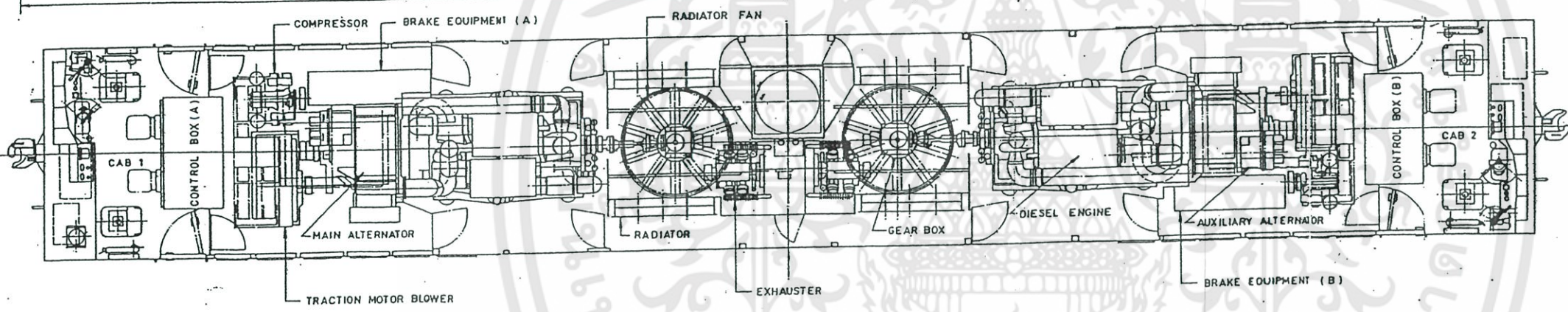
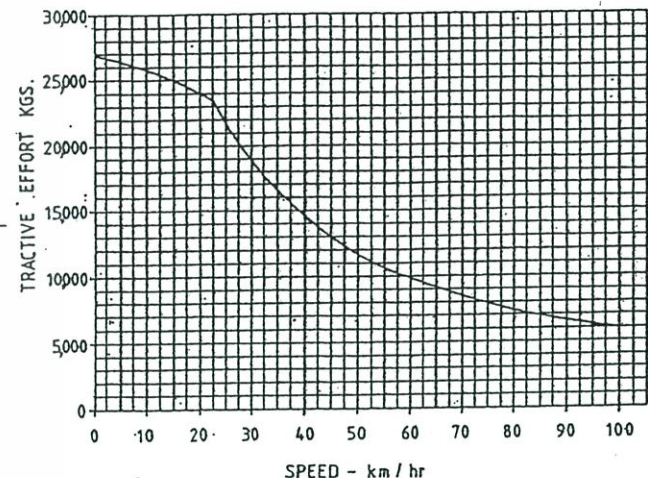
YEAR, LOCOMOTIVE IN SERVICE. (BE.)	2517	TRACTION MOTOR	
WEIGHT OF LOCOMOTIVE		NUMBER OF UNIT	6
IN WORKING ORDER	82500 KGS.	TYPE	TA 671 A3
EMPTY	77500 "	NUMBER OF POLES	4
WHEEL ARRANGEMENT	Co - Co	CONTINUOUS RATING & RPM.	390V, 690A, 660RPM, 235 KW.
MAXIMUM AXLE LOAD	13.75 TONS	MAXIMUM SPEED	3050 RPM.
CAPACITY (PER LOCOMOTIVE)		GEAR RATIO	79:18
FUEL	3500 LITRES	TRACTION ALTERNATOR	
LUBRICATING ENGINE OIL	450 "	NUMBER OF UNIT	1
COOLING WATER	800 "	TYPE	AT 5.4L A2
SAND	500 "	NUMBER OF POLES	12
LOCOMOTIVE OUT PUT		CONTINUOUS RATING & RPM.	315 V, 3180 A, 1500RPM.
MIN. CONTINUOUS RATED TRACTIVE EFFORT	20600 KGS.	MAXIMUM VOLTAGE	850 V.
MIN. CONTINUOUS SPEED	20.8 KM/HR.	BRAKING	
MAXIMUM TRACTIVE EFFORT AT 30% ADHESION	24800 KGS.	TYPE OF BRAKE ON LOCOMOTIVE	28 LV 1, COMBINED AIR & VAC
MAXIMUM SPEED	95 KM/HR.	CAPACITY OF VACUUM BRAKE (SWEEP VOLUME)	15,235 L/MIN. AT 1500 RPM.
DIESEL ENGINE	4-STROKE-CYCLE	CAPACITY OF AIR COMPRESSOR (")	1239 L/MIN. AT 1500 RPM.
MAKER AND TYPE (S.E.M.T. - PIELSTICK)	16 PA 4 185	BRAKE POWER PERCENTAGE	80%.
NUMBER OF ENGINE	1	BATTERY	
CYLINDER X BORE X STROKE	16 V X 185 MM X 210 MM	VOLTAGE	72 V.
MAXIMUM OUT PUT & RPM. (SITE RATING 2250 HP. AT 1500)	2400 HP. AT 1500	CAPACITY	380 AH.
		NUMBER OF LOCOMOTIVE ON ORDER	54
		MINIMUM CURVE RADIUS NEGOTIABLE	122 M.

เพื่อการใช้งาน
 Ref. No. *ดร. อธิชิต ๒/๕๓๒๗*
สม ๑๗
 - วิศวกร
 วันที่ *๑๗/๗/๕๓*
 R.S.R. LOCOMOTIVE

USED FOR	REF. DWG. NO.	SCALE 1:50
DEL. NO. 4101 - 4154 (ALSTHOM)		
REMARKS: <i>ใช้บนทางรถไฟ TR 9024 187 ๑๐๖๖๗ ALSTHOM</i>		DIMENSIONS IN M.M.
		DATE 3-1-18
		DIAGRAM No D 18



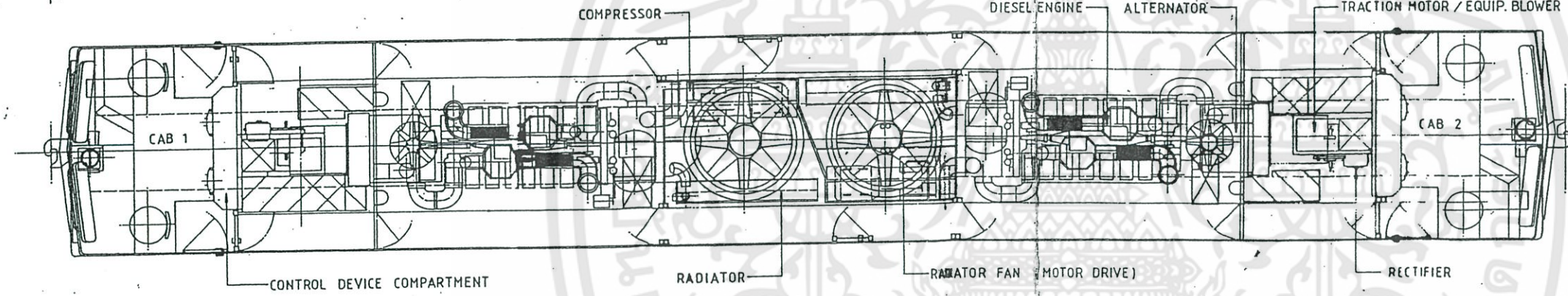
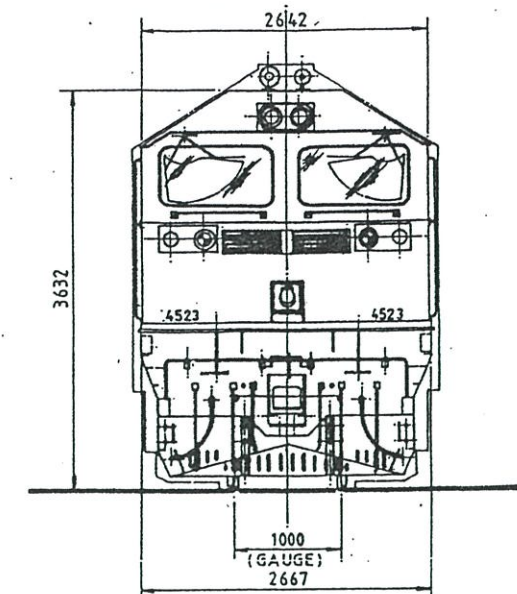
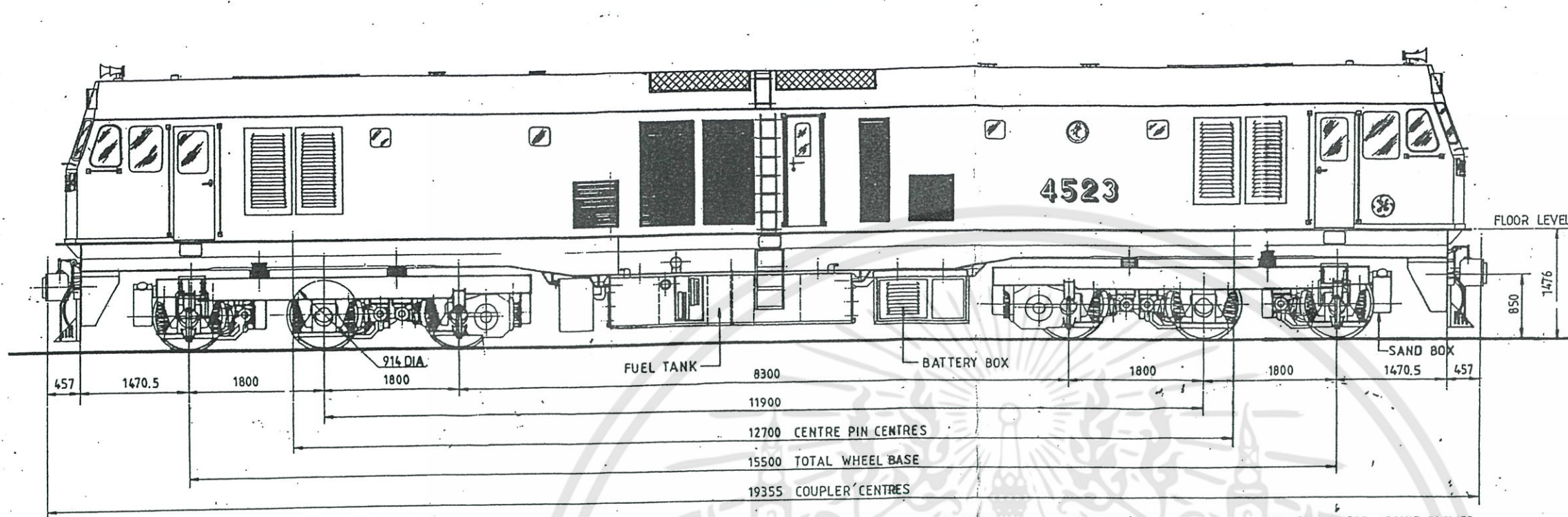
TRACTIVE EFFORT - SPEED CURVE



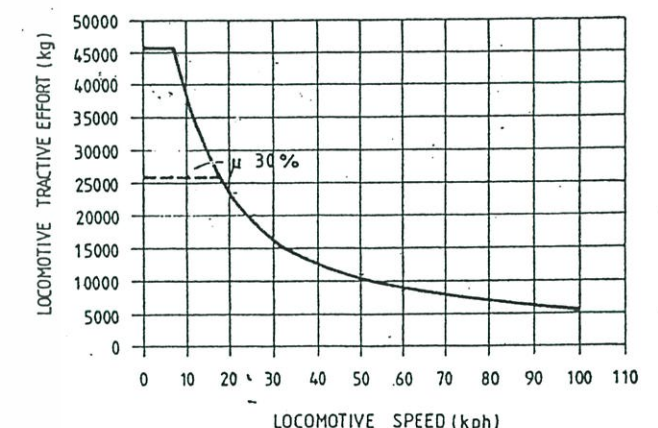
YEAR, LOCOMOTIVE IN SERVICE (B.E.)	2536 (1993)	1 TRACTION MOTOR	
WEIGHT OF LOCOMOTIVE		NUMBER OF UNIT	6
IN WORKING ORDER	90 TONS	TYPE	HS. 21241-01R
EMPTY	88.5 TONS	NUMBER OF POLES	4
WHEEL ARRANGEMENT	C ₀ -C ₀	CONTINUOUS RATING & RPM.	263KW, 455V, 645A, 785 RPM.
MAXIMUM AXLE LOAD	15 TONS	MAXIMUM SPEED	3060 RPM / MIN
CAPACITY (PER LOCOMOTIVE)		GEAR RATIO	73 : 18
FUEL	5000 LITERS	MAIN ALTERNATOR	
LUBRICATING ENGINE OIL	28265 LITERS	NUMBER OF UNIT	2
COOLING WATER	28375 LITERS	TYPE (YEFC ₀)	SELF VENTILATED
SAND	500 LITERS	NUMBER OF POLES	-
LOCOMOTIVE OUT PUT		NOMINAL RATING & RPM.	950KVA, 36V, 1524 A, 1800 RPM.
MIN. CONTINUOUS RATED TRACTIVE EFFORT	11700 KGS.	HIGHT VOLTAGE	590 V.
MIN. CONTINUOUS RATED SPEED	32.1 km/hr	BRAKING (WESTINGHOUSE)	
MAXIMUM TRACTIVE EFFORT AT 30% ADHESION	27000 KGS.	TYPE OF BRAKE ON LOCOMOTIVE (20-LAAY-1)	COMBINED AIR AND VACUUM BRAKE, AND DYNAMIC BRAKE
MAXIMUM SPEED	100 km/hr	CAPACITY OF VACUUM BRAKE (SWEEP VOLUME)	2x8700 L/MIN. AT 1800 RPM.
DIESEL ENGINE		CAPACITY OF AIR COMPRESSOR (" ")	2x3200 L/MIN. AT 1800 RPM.
MAKER AND TYPE (CUMMINS, UK.)	KTTA-50-L	BRAKE POWER PERCENTAGE	
NUMBER OF ENGINE	2	BATTERIES (TYPE LEAD ACID BATTERY)	
CYLINDER x BORE x STROKE	16V-159mmx159mm	VOLTAGE	84 VOLTS, 32 CELLS
MAXIMUM OUT PUT & RPM. (H.P.)	21430 HP. AT 1800 RPM.	CAPACITY	175 AH. AT 5hr
		NUMBER OF LOCOMOTIVE ON ORDER	22 UNITS
		MINIMUM CURVE RADIUS NEGOTIABLE	122 M.

สำนักงาน
เพื่อการรถไฟแห่งประเทศไทย
 Ref. No. **ศร. ๕๕๒๕.๐๖/๕๓๘๓**
 ณ วันที่ **๑๕/๓/๕๓**
 R.S.R.

2900PS. DIESEL ELECTRIC LOCOMOTIVE		SCALE: 1:50
DIMENSIONS IN mm		
USED FOR	REF. DWG. NO.	
DEL. No. 4501 - 4522 (HITACHI)		
REMARKS:	เขียนขึ้นจากแบบพิมพ์เลขที่ 313 - 3A200679 ของบริษัท HITACHI แต่ได้เพิ่มเติมรายการขึ้นใหม่ให้เหมาะสม	
DATE 29/4/37	DIAGRAM No. D23	



TRACTIVE EFFORT - SPEED CURVE



YEAR, LOCOMOTIVE IN SERVICE (B.E.)	2538 (1995)	TRACTION MOTOR	
WEIGHT OF LOCOMOTIVE		NUMBER OF UNIT	6
IN WORKING ORDER	tons 86.5	TYPE	GE792
EMPTY	tons 80.6	NUMBER OF POLES	4
WHEEL ARRANGEMENT	CO - CO	CONTINUOUS RATING	245KW, 336V, 730A
MAXIMUM AXLE LOAD	tons 15	MAXIMUM SPEED	rpm 3100
CAPACITY (PER LOCOMOTIVE)		GEAR RATIO	90:17
FUEL	l 4540	MAIN AND AUXILIARY ALTERNATOR	
LUBRICATING ENGINE OIL	l 424	NUMBER OF UNITS	2
COOLING WATER	l 794	TYPE	SGHS 200 A1
SAND	l 450	NUMBER OF POLES	4
LOCOMOTIVE OUT PUT		CONTINUOUS RATING	amp 2190
TRACTIVE EFFORT AT MIN. CONTINUOUS SPEED	kg 24090	MAXIMUM VOLTAGE	V. 900
MIN. CONTINUOUS SPEED	kph 20.1	BRAKING	
MAX. TRACTIVE EFFORT 30% ADHESION	kg 25950	TYPE OF BRAKE ON LOCOMOTIVE	26L MODIFIED PURE AIR BRAKE
MAX. SPEED	100	CAPACITY OF VACUUM PUMP	
DIESEL ENGINE	STROKE 4	CAPACITY OF AIR COMPRESSOR 1/ min rpm	2 x 3000 @ 1500
MAKER AND TYPE (CUMMINS)	KTA 50-L	BRAKE POWER PERCENTAGE	
NUMBER OF ENGINE	2	BATTERY	
CYLINDER x BORE x STROKE	mm 16 x 159 x 159	VOLTAGE	V. 65
MAXIMUM OUT PUT & RPM.	BHP (kw) 2 x 1250 (933) @ 1800	CAPACITY	AH. 180
		NUMBER OF LOCOMOTIVE ON ORDER	38
		MINIMUM CURVE RADIUS NEGOTIABLE	M. 122

เพื่อการใช้งานที่
 ศ. ๐๕๒๔.๐๖ / ๕๓๐๓
 ๑๓ ๑๖
 ๑๕ / ๗ / ๕๓

RSR	2500 HP. DIESEL ELECTRIC LOCOMOTIVE	SCALE 1:50
USED FOR	REF. DWG. NO.	DIMENSIONS IN mm
DEL. 4523 - 4560 (GEA.)		
REMARKS. เขียนขึ้นจากแผนผังเลขที่ 41E915376 ของบริษัท GE TRANSPORTATION SYSTEMS แต่ได้เพิ่มเติมรายการขึ้นใหม่ให้เหมาะสม	SANCD. <i>[Signature]</i> SEM.	
DR. <i>[Signature]</i> CH. <i>[Signature]</i> CH. <i>[Signature]</i>	DATE 14/11/38	DIAGRAM No. D24