

การพัฒนาระบบตรวจติดตามสถานะแบบเวลาจริงเครื่องจักรกลไฟฟ้าผ่าน
โปรแกรมจำลองสถานการณ์เพื่อการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์



นายเกียรติคุณ พลแสน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2563

**DEVELOPMENT OF REAL TIME ELECTRICAL
MACHINES MONITORING SYSTEM THROUGH
SIMULATION PROGRAM FOR PREDICTIVE
MAINTENANCE**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Industrial Systems and**

Environmental Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การพัฒนาระบบตรวจติดตามสถานะแบบเวลาจริงเครื่องจักรกลไฟฟ้าผ่านโปรแกรม
จำลองสถานการณ์เพื่อการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร.นรา สมัตถภาพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.นิวิท เจริญใจ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เกียรติคุณ พลแสน : การพัฒนาระบบตรวจติดตามสถานะแบบเวลาจริงเครื่องจักรกลไฟฟ้า ผ่านโปรแกรมจำลองสถานการณ์เพื่อการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (DEVELOPMENT OF REAL-TIME ELECTRICAL MACHINES MONITORING SYSTEM THROUGH SIMULATION PROGRAM FOR PREDICTIVE MAINTENANCE) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.นรา สมัตถภาพงศ์, 128 หน้า

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้อุปกรณ์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและโปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim® ในการตรวจติดตามสถานะแบบเวลาจริงเครื่องจักรกลไฟฟ้าเพื่อใช้ข้อมูลดังกล่าววางแผนการซ่อมบำรุงเชิงคาดการณ์ ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองสถานการณ์และนำเข้าข้อมูลจากระบบฐานข้อมูล MySQL ที่เก็บค่าการสั่นสะเทือนจากการประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ เพื่อใช้ในการแสดงผลค่าการสั่นสะเทือนแบบเวลาจริงและพยากรณ์แนวโน้มด้วยวิธีการพยากรณ์อนุกรมเวลาแบบวิธีกึ่งเฉลี่ย (semi-average method) และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 5 กรณี โดยแต่ละกรณีจะเก็บข้อมูลจำนวน 400 ค่า จากนั้นทดลองวัดค่าการสั่นสะเทือนและพยากรณ์แนวโน้มค่าการสั่นสะเทือน เทียบกับมาตรฐานการสั่นสะเทือน ISO 10816-3 การวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่า การพยากรณ์ค่าแนวโน้มการสั่นสะเทือนก่อนที่ค่าการสั่นสะเทือนจะถึงจุดวิกฤต เวลามากที่สุดเท่ากับ 53,623 ชั่วโมงด้วยวิธีกึ่งเฉลี่ยในกรณีที่ 1 และเวลาน้อยที่สุดเท่ากับ 4,168 ชั่วโมงด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดในกรณีที่ 5 การพยากรณ์วิธีด้วยกำลังสองน้อยที่สุดมีความแม่นยำในระพยากรณ์ดีกว่าวิธีกึ่งเฉลี่ยเปรียบเทียบจาก MAD และ MSE ซึ่งค่าการพยากรณ์ที่ได้ในแต่ละรอบนั้นไม่สามารถรองรับได้ว่าเป็นค่าที่ดีที่สุด แต่สามารถใช้ในการตรวจติดตามสถานะของเครื่องจักรและใช้ประกอบการตัดสินใจในการวางแผนซ่อมบำรุงได้

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา เดิมนรติคุณ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา นรา สมัตถภาพงศ์

KIATTIKHUN POLSAEN : DEVELOPMENT OF REAL-TIME
ELECTRICAL MACHINES MONITORING SYSTEM THROUGH
SIMULATION PROGRAM FOR PREDICTIVE MAINTENANCE. THESIS
ADVISOR : NARA SAMATTAPAPONG, Ph.D., 128 PP.

SIMULATION / MAINTENANCE / PREDICTIVE

This research aims to apply the Internet of Things device and Flexsim® simulation program to real-time monitoring of electrical machinery to use such information to plan predictive maintenance. The researchers modeled the situation and imported data from the MySQL database system that collects vibration values from the application of the Internet of Things as a detection device. To be used to display vibration values in real time and forecast trends using the semi-average time series forecasting method. The experiment was divided into 5 cases, in which 400 values were collected in each case. The vibration values were measured and the tendency to be predicted. Compared with the vibration standard ISO 10816-3, the analysis of the experimental results showed that Vibration tendency forecast before the critical vibration value is reached. The greatest time was 53,623 hours with the quasi-mean method in case 1 and the least time was 4,168 hours with the least-squares method in case 5. Forecasting of the least-squares method had better forecast accuracy than the quasi-mean method.

Compared to MAD and MSE, the forecast value obtained in each cycle cannot be supported as the best value. But it can be used to monitor the status of the machine and use it for decision making in maintenance planning.



School of Industrial Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature ชัชวราภรณ์

Advisor's Signature mm

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

อาจารย์ ดร.นรา สมัตถภาพงศ์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำคำปรึกษาช่วยแก้ปัญหาแก่ผู้วิจัย มาโดยตลอด รวมทั้งตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ขอกราบขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท เจริญใจ ที่ได้ให้คำชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัยรวมถึงการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของเนื้อหาการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่เป็นผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และข้อคิดต่างๆ ให้แก่ผู้วิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ธนศักดิ์ หวังล้อมกลาง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษาทั้งในด้านเทคนิค เครื่องมือ และสถานที่ ให้แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณ คุณพัชมล กลิ่นเล็ก คุณปิยกาญจน์ พูนเกิดมะเริง คุณพิพัฒน์ วงสวาท คุณคมกฤต ขำวุฒิ และพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนในด้านการศึกษาดลอดมารวมถึงอุปการะเลี้ยงดูอบรมสั่งสอน และคอยเป็นกำลังใจในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงด้วยดี

เกียรติคุณ พลแสน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ปรัชญ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สาเหตุความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์.....	3
2.2 ทฤษฎีการสั่นสะเทือน.....	4
2.2.1 ลักษณะการสั่นสะเทือน.....	5
2.2.2 ประเภทของการสั่นสะเทือน.....	6
2.2.3 หลักการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน.....	7
2.2.4 มาตรฐานระดับการสั่นสะเทือน.....	8
2.2.5 การวัดความสั่นสะเทือน.....	8
2.3 การพยากรณ์.....	10
2.3.1 ความหมายอนุกรมเวลา.....	10
2.3.2 ส่วนประกอบของอนุกรมเวลา.....	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 การวิเคราะห์ค่าแวนโน้มและการพยากรณ์ค่าแวนโน้ม.....	11
2.4.1 วิธีกิ่งเฉลี่ย.....	12
2.4.2 วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่.....	13
2.4.3 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด.....	13
2.5 ความแม่นยำของการพยากรณ์.....	14
2.5.1 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ (MAD).....	14
2.5.2 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE).....	15
2.5.3 ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (MAPE).....	15
2.6 อุปกรณ์ควบคุมและประมวลผล (ESP32).....	16
2.7 เซ็นเซอร์ Vibration sensor ADXL345.....	16
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	19
3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.....	20
3.2 การออกแบบซอฟต์แวร์.....	20
3.3 การออกแบบฮาร์ดแวร์.....	22
3.4 การสร้างระบบฐานข้อมูล.....	23
3.5 การประกอบอุปกรณ์ตรวจรู้.....	23
3.6 การสร้างแบบจำลองสถานการณ์.....	26
3.6.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Flexsim®.....	29
3.7 การออกแบบการทดลอง.....	43
3.8 ขั้นตอนการพยากรณ์ค่าแวนโน้มการสันสะท้อน.....	48
3.9 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองและอุปกรณ์ตรวจรู้.....	49
4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	50
4.1 ผลการประกอบอุปกรณ์ตรวจรู้.....	50
4.2 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงผลโดยใช้โปรแกรม Flexsim®.....	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ข้อมูลจากโปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim®.....	51
4.2.2 การแสดงค่าการสิ้นสะท้อนด้วยโปรแกรม Flexsim®.....	55
4.3 ผลการพยากรณ์ค่าการสิ้นสะท้อนด้วยวิธีการพยากรณ์.....	58
4.3.1 ผลกรณีศึกษา.....	58
4.4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการพยากรณ์.....	61
4.4.1 ข้อมูลการสิ้นสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก.....	61
4.4.2 ข้อมูลการสิ้นสะท้อนถ่วงน้ำหนัก 1 คู่.....	61
4.4.3 ข้อมูลการสิ้นสะท้อนถ่วงน้ำหนัก 2 คู่.....	62
4.4.4 ข้อมูลการสิ้นสะท้อนถ่วงน้ำหนัก 3 คู่.....	62
4.4.5 ข้อมูลการสิ้นสะท้อนถ่วงน้ำหนัก 4 คู่.....	63
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	64
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	65
รายการอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โฉมการทำงานของ Object.....	68
ภาคผนวก ข. ผลค่าการสิ้นสะท้อน.....	77
ภาคผนวก ค. รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	118
ประวัติผู้วิจัย.....	128

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงผลลัพธ์ของการพยากรณ์ กรณีศึกษา.....	59
4.2 แสดงผลลัพธ์ของการพยากรณ์ กรณีเปลี่ยนแปลง.....	60
4.3 MAD และ MSE ของการพยากรณ์การสิ้นสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก.....	61
4.4 MAD และ MSE ของการพยากรณ์การสิ้นสะท้อนถ่วงน้ำหนัก 1 คู่.....	61
4.5 MAD และ MSE ของการพยากรณ์การสิ้นสะท้อนถ่วงน้ำหนัก 2 คู่.....	62
4.6 MAD และ MSE ของการพยากรณ์การสิ้นสะท้อนถ่วงน้ำหนัก 3 คู่.....	62
4.7 MAD และ MSE ของการพยากรณ์การสิ้นสะท้อนถ่วงน้ำหนัก 4 คู่.....	63

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	สาเหตุนำไปสู่การพังเสียหายของมอเตอร์ไฟฟ้า..... 4
2.2	หลักการวัดความสั่นสะเทือน..... 7
2.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มเทียบกับเวลา..... 7
2.4	แสดงตัวอย่างมาตรฐานการสั่นสะเทือน ISO10816-1..... 8
2.5	ตำแหน่งวัดการสั่นสะเทือนในแนวแกน X, Y และ Z..... 9
2.6	โครงสร้างของอุปกรณ์ควบคุมและประมวลผล ESP32..... 16
2.7	ตัวอย่าง Vibration sensor ADXL345..... 17
3.1	แสดงตัวอย่างฐานข้อมูลที่ใช้ในการเก็บค่าสั่นสะเทือน..... 23
3.2	แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อ ESP32 กับ ADXL345..... 24
3.3	แสดงตัวอย่างวงจรการเชื่อมต่อ ESP32 กับ ADXL345..... 24
3.4	แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อ ESP32, ADXL345 และแบตเตอรี่..... 25
3.5	แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจรู้..... 25
3.6	แสดงตัวอย่างโปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim®..... 26
3.7	แสดงหน้าต่างกำหนดค่าพื้นฐานของโปรแกรม..... 27
3.8	แสดงหน้าต่างต่างโปรแกรมจำลอง..... 28
3.9	แสดงตัวอย่าง Library Fixed Resource..... 29
3.10	แสดงตัวอย่างการวาง Object..... 30
3.11	แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อระหว่าง Object..... 31
3.12	แสดงตัวอย่าง Object ในหน้าโปรแกรม Flexsim®..... 32
3.13	แสดงตัวอย่างการสร้างตัวแปรในโปรแกรม Flexsim®..... 33
3.14	แสดงตัวอย่างการสร้าง GUI ในโปรแกรมจำลอง Flexsim®..... 34
3.15	แสดงตัวอย่างการติดต่อฐานข้อมูลด้วยโปรแกรม Flexsim®..... 35
3.16	แสดงตัวอย่างเงื่อนไขการแจ้งเตือนสถานะเครื่องจักรด้วยสี..... 36

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17	แสดงตัวอย่าง Statistics Collector โปรแกรม Flexsim®..... 37
3.18	แสดงตัวอย่างค่าการสันสะท้อนด้วยโปรแกรม Flexsim®..... 39
3.19	แสดงตัวอย่างแบบจำลอง 2 มิติ ในการพยากรณ์วิธีกึ่งเฉลี่ย..... 40
3.20	แสดงตัวอย่างแบบจำลอง 2 มิติ ในการพยากรณ์วิธีกำลังสองน้อยที่สุด..... 41
3.21	แสดงตัวอย่างผลของหน้าจอแบบจำลอง..... 42
3.22	แสดงตัวอย่างกรณีที่ 1 ตำแหน่งไม่ใส่สรุมนี้อ..... 44
3.23	แสดงตัวอย่างกรณีที่ 2 ตำแหน่งการใส่สรุมนี้อจำนวน 1 คู่..... 44
3.24	แสดงตัวอย่างกรณีที่ 2 ตำแหน่งการใส่สรุมนี้อจำนวน 2 คู่..... 44
3.25	แสดงตัวอย่างกรณีที่ 2 ตำแหน่งการใส่สรุมนี้อจำนวน 3 คู่..... 45
3.26	แสดงตัวอย่างกรณีที่ 2 ตำแหน่งการใส่สรุมนี้อจำนวน 4 คู่..... 45
3.27	แสดงตัวอย่างน้ำหนักรุมนี้อจำนวน 1 คู่..... 46
3.28	แสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้บริเวณเบริง..... 46
3.29	แสดงตัวอย่างการใส่น้ำหนักรุมนี้อจำนวน 4 คู่..... 47
4.1	แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจรู้..... 51
4.2	แสดงตัวอย่างลักษณะการส่งข้อมูลการสันสะท้อน..... 52
4.3	แสดงตัวอย่างค่าการสันสะท้อนแนวแกน Z..... 53
4.4	แสดงตัวอย่างค่าการสันสะท้อนแนวแกน Z ถ่วงน้ำหนัก 1 คู่..... 53
4.5	แสดงตัวอย่างค่าการสันสะท้อนแนวแกน Z ถ่วงน้ำหนัก 2 คู่..... 54
4.6	แสดงตัวอย่างค่าการสันสะท้อนแนวแกน Z ถ่วงน้ำหนัก 3 คู่..... 54
4.7	แสดงตัวอย่างค่าการสันสะท้อนแนวแกน Z ถ่วงน้ำหนัก 4 คู่..... 55
4.8	แสดงตัวอย่างการแสดงผลในโปรแกรม Flexsim® ในรูปแบบ 3 มิติ..... 56
4.9	แสดงตัวอย่างหน้าจอกราฟแสดงค่าการสันสะท้อน..... 57
4.10	แสดงตัวอย่างหน้าจอแสดงค่าลิมิต..... 57
4.11	แสดงตัวอย่างหน้าจอแสดงค่าลิมิต..... 58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในส่วนของภาคอุตสาหกรรมต่างๆ มีความต้องการที่จะดูแลป้องกันเครื่องจักรให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพและการบำรุงรักษาบ่อย ซึ่งเครื่องจักรเป็นเครื่องมือสำคัญของวงการอุตสาหกรรม การซ่อมบำรุงเครื่องจักรโดยส่วนใหญ่จะทำเมื่อเครื่องจักรชำรุด อาจก่อให้เกิดความเสียหายให้กับเครื่องจักรและทำให้สายการผลิตต้องหยุดชะงัก การทำงานภายใต้วิธีการนี้ก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองแรงงานและค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังกระทบต่อเวลาการผลิตอีกด้วย และในภาคอุตสาหกรรม เครื่องจักรกลถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมการผลิต จึงทำมีบทบาทสำคัญในภาคอุตสาหกรรมและการบำรุงรักษาอย่างมีประสิทธิภาพจะส่งผลให้ธุรกิจดำเนินต่อไปอย่างราบรื่นมีประสิทธิภาพ

ปัจจุบันการการวัดความสิ้นเปลืองการทำงานของเครื่องจักร เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องจักรวิธีหนึ่ง ซึ่งการวัดการสิ้นเปลืองเป็นวิธีการที่วิวัฒนาการเพิ่มเติมจากการวัดอุณหภูมิ และใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถวิเคราะห์หาสาเหตุผิดปกติของเครื่องจักรได้อย่างครอบคลุม ทั้งการติดตั้ง การสึกหรอ การหลวมคลาย การยึดไม่แน่น การเสียหายของแบริ่ง โดยได้ผลการวิเคราะห์ออกมาได้อย่างถูกต้องทำให้สามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดค่าใช้จ่าย ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดการสิ้นเปลืองจะช่วยให้สามารถวางแผนซ่อมหรือเปลี่ยนอะไหล่เครื่องจักรก่อนที่จะเกิดการหยุดชะงักในทันที ซึ่งการบำรุงรักษาแบบเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) มีโอกาสที่เครื่องจักรจะต้องหยุดซ่อมบำรุงก่อนแม้เครื่องจักรยังสามารถทำงานได้ หรือเครื่องจักรอาจจะเสียก่อนที่จะถึงกำหนดเวลาการซ่อมบำรุง แต่การบำรุงรักษาแบบเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) จะหยุดการทำงานของเครื่องจักรก็ต่อเมื่อเครื่องจักรต้องได้รับการบำรุงรักษาจริงๆเท่านั้น ทำให้การใช้งานเครื่องจักรมีประสิทธิภาพสูงสุด การบำรุงรักษาแบบเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลสถานะของเครื่องจักร ในการทำนายว่าเครื่องจักรที่ใช้งานอยู่เริ่มที่จะต้องตรวจสอบหรือซ่อมบำรุงหรือไม่ สถานะการทำงานของเครื่องจักรสามารถตรวจสอบได้จาก อุณหภูมิ เสียง การสิ้นเปลือง ฯลฯ

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาพัฒนาระบบตรวจติดตามสถานะแบบเวลาจริง เครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim Simulation ข้อมูลที่ใช้จะเป็นค่าการสั่นสะเทือนของเครื่องจำลองการสั่นสะเทือน และนำข้อมูลมาคำนวณด้วยเทคนิคการพยากรณ์อนุกรมเวลา โดยวิธีการที่ใช้จะเป็นวิธีการพยากรณ์ค่าแนวโน้มซึ่งเป็นส่วนประกอบอย่างหนึ่งของอนุกรมเวลา

การวิจัยครั้งนี้จะใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนที่ได้พัฒนาขึ้นจำนวน 5 ชุด ซึ่งเก็บรวบรวมข้อมูลชุดละ 400 ค่า ใช้ในการคำนวณแนวโน้มที่ชี้ให้เห็นแนวทางการเคลื่อนไหวของข้อมูลที่เกิดขึ้นว่าข้อมูลมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใด เพื่อประกอบการตัดสินใจในการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อประยุกต์ใช้อุปกรณ์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IOT) ในการตรวจสอบสถานะของเครื่องจักร (Universal Machine Tracking Device)
2. เพื่อศึกษาการสร้างแบบจำลองสำหรับติดตามสถานะของเครื่องจักร (Monitoring)
3. เพื่อพยากรณ์ค่าความการสั่นสะเทือนสำหรับการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (Predictive Maintenance)

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. พัฒนาอุปกรณ์ตรวจสอบความสั่นสะเทือนสำหรับเครื่องจักร
2. ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบสถานะเครื่องจักรและส่งค่าความสั่นสะเทือนไปยังฐานข้อมูล
3. สร้างแบบจำลองสถานการณ์และพยากรณ์การสั่นสะเทือนสำหรับการซ่อมบำรุงรักษา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. อุปกรณ์ต้นแบบสำหรับติดตามสถานะเครื่องจักร
2. แบบจำลองสถานการณ์สำหรับติดตามประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร
3. แนวทางในการประกอบการตัดสินใจเพื่อวางแผนการซ่อมบำรุงรักษา

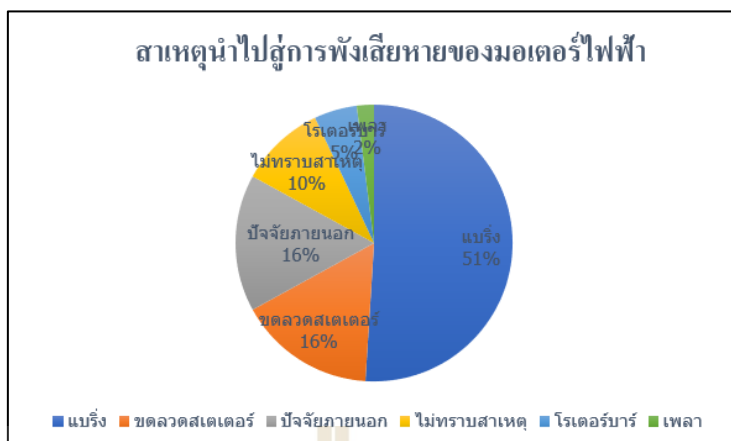
บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเฝ้าติดตามสถานะของเครื่องจักรกลไฟฟ้าผ่านโปรแกรมจำลองสถานการณ์ โดยส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในโครงการวิจัยนี้ ที่มีความสำคัญ ๆ ได้แก่ เซ็นเซอร์และทรานสดิวเซอร์ การอ้างอิงสัญญาณ ไมโครคอนโทรลเลอร์ การจำลองสถานการณ์ การพยากรณ์การซ่อมบำรุง รวมทั้งศึกษาหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการที่จะนำไปประกอบการศึกษาจนบรรลุเป้าหมายตามที่กำหนดไว้

2.1 สาเหตุความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์

สาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายหรือบกพร่องกับมอเตอร์ โดยส่วนใหญ่มาจากการเลือกใช้มอเตอร์ไม่ตรงกับข้อกำหนดของมอเตอร์นั้น ๆ ความล้มเหลวในการทำงานเกือบ 70% ของมอเตอร์ไฟฟ้ามักมาจาก 2 สาเหตุหลัก คือ เกิดจากความเสียหายที่แบร์ริงประมาณ 51% (การขาดการหล่อลื่น (Lack of Lubrication) การหล่อลื่นมากเกินไป (Over Lubrication) สารหล่อลื่นผิดประเภท (Wrong Lubricant) การเยื้องศูนย์ (Misalignment) การสั่นสะเทือน (Vibration) การเกิดความร้อนสูง (Over Heating) ภาวะโหลดเกินที่เพลา (Shaft Overload) และเกิดจากความเสียหายที่ขดลวดสเตเตอร์ราว 16% (ความร้อนสูง (Over Heating) ภาวะโหลดเกิน (Over Loading) จากข้อมูลสถิติดังแสดงในรูปที่ 2.1 แม้ว่าเบร์ริงเซ็นด์ความเสียหายที่ขดลวดสเตเตอร์ซึ่งเป็นอันดับสองจะห่างจากความเสียหายที่แบร์ริงซึ่งเป็นอันดับหนึ่งมากที่สุดทีเดียว แต่กลับพบว่าขอบเขตของความเสียหาย ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม เวลาของการหยุดเดินมอเตอร์หรือเครื่องจักร (Downtime) จากสาเหตุเกิดความเสียหายที่ขดลวดสเตเตอร์กลับสูงมากกว่าความเสียหายที่มีสาเหตุจากแบร์ริง



รูปที่ 2.1 สาเหตุนำไปสู่การพังเสียหายของมอเตอร์ไฟฟ้า

2.2 ทฤษฎีการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนคือ การเคลื่อนที่ไป-มาของมวลทุกทิศทางในตำแหน่งอยู่กับที่ ซึ่งเกิดจากแรงกระทำภายในหรือภายนอกก็ได้ ทำให้มวลเกิดการสั่นสะเทือนในลักษณะต่าง ๆ กัน โดยปกติแล้วแรงการสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นในทุกทิศทาง สำหรับเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรม การทำงานของเครื่องจักรจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งถ้าหากสูงเกินไปจำเป็นจะต้องหาสาเหตุเพื่อหาวิธีแก้ไขปัญหา โดยลดการสั่นสะเทือนให้อยู่ในขอบเขตหรือพิสัยที่สามารถยอมรับได้ เพื่อให้เครื่องจักรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีอายุการใช้งานยาวนาน ลดค่าใช้จ่ายจากการซ่อมบำรุงซึ่งนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์ได้

สาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน การทำงานของเครื่องจักร อุปกรณ์ ชิ้นส่วน จะทำให้เกิดพลังงานและการเคลื่อนที่ โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่ไม่สมดุล และมีการหมุนเคลื่อนที่ สิ่งหลักที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือ การสั่นสะเทือน ซึ่งเกิดจากชิ้นส่วนตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปเคลื่อนที่เสียดสีกันทำให้เกิดการสั่นสะเทือนได้เช่นกัน อาจมีสาเหตุมาจากการขาดสารหล่อลื่น การหล่อลื่นไม่เพียงพอ การหล่อลื่นผิดวิธี ผิวของชิ้นส่วนมีลักษณะไม่เรียบ ผิวของชิ้นส่วนสัมผัสกันโดยตรง การสึกหรอ การหลวม คลาย การหลวมห่างจากระยะที่มีการออกแบบไว้ ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนได้

ผลเสียจากการสั่นสะเทือน ในกรณีที่มีการสั่นสะเทือนเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ จะส่งผลให้สมรรถนะ ประสิทธิภาพ การทำงานของเครื่องจักรลดลง เกิดการเสียหาย ชัดข้อเร็วกว่ากำหนด ทำให้สายพานการผลิตต้องหยุดชะงัก ส่งผลให้เสียค่าใช้จ่ายมาก ฉะนั้นในการแก้ไขปัญหา และการควบคุมการสั่นสะเทือน จึงจะต้องมีความรู้ เข้าใจลักษณะและความหมายของการสั่นสะเทือน เพื่อ

ทราบสาเหตุที่ถูกต้อง สามารถนำไปใช้ปรับปรุงแก้ไข ทำให้ขนาดเครื่องจักรมีการสั่นสะเทือนลดลง อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับ เพื่อที่จะไม่ให้ส่งผลเสียต่อเครื่องจักร

สาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรอุตสาหกรรมนั้นมาจากหลายสาเหตุ เช่น

1) ความไม่สมดุลในการหมุน (Unbalance) จะเกิดขึ้นเมื่อจุดศูนย์กลางของการหมุนและจุดศูนย์กลางของมวลนั้น ไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน เช่น การไม่สมดุลของเพลาคงหรือชาร์ด การไม่สมดุลของใบพัดที่เกิดการแตกหัก

2) ความไม่ได้ศูนย์ (Misalignment) ระหว่างเพลลาของปั๊มและมอเตอร์ต้นกำลัง

3) การหลุดหลวมของชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องจักร

4) การที่แบร์ริงหรือบูช เกิดการชำรุดสึกหรอหรือเกิดจากการขาดสารหล่อลื่น

5) แท่นเครื่องหรือจุกจับยึดของเครื่องจักร ไม่แน่น หรือไม่แข็งแรง

2.2.1 ลักษณะการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนแบบเรมดอม (Random) เป็นการสั่นสะเทือนที่มีคลื่นต่างๆ กัน ไม่แน่นอน ไม่ซ้ำกัน การเคลื่อนที่ในลักษณะนี้เราเรียกว่า การเคลื่อนที่แบบเรมดอมซึ่งเกิดจากความแตกต่างของแรงที่มีขนาดต่างๆ ไม่เท่ากันที่กระทำต่อระบบมวล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเครื่องจักรกลซึ่งมีชิ้นส่วนประกอบจำนวนมาก และมีขนาดแรง กระทำที่แตกต่างกัน หรือเครื่องกระแทกที่ใช้ความถี่สูง

การสั่นสะเทือนแบบด้านการสั่น เป็นการสั่นสะเทือนที่มีตัวหน่วงการเคลื่อนที่ของระบบ โดยใช้อุปกรณ์ประเภท ช็อกแอบซอร์เบอร์ (Shock absorber) ที่ใช้ในระบบรองรับการสั่นสะเทือนของรถยนต์และรถจักรยานยนต์ หรือ ใช้อุปกรณ์รองรับยึดหยุ่นประเภทยาง แคมเปอร์ (Damper) ประกอบรวมกันในระบบ ลักษณะของคลื่นการสั่นสะเทือนในช่วงแรก จะมีระยะการเคลื่อนที่มากและจะลดลงตามลำดับ

การสั่นสะเทือนแบบไม่เป็นรอบ มีผลมาจากในระบบมีความหน่วงมากเกินไป (Overdamp) ทำให้ระยะในช่วงการเคลื่อนที่แรงมาก และลดลงโดยไม่มีการเคลื่อนที่กลับไป-กลับมา เป็นการเคลื่อนที่ไม่เป็นรอบไม่มีคาบ โดยเราเรียกการสั่นสะเทือนหรือการเคลื่อนที่แบบนี้ว่า การเคลื่อนที่ไม่เป็นรอบ (Non periodic หรือ Aperiodic)

2.2.2 ประเภทของการสั่นสะเทือน

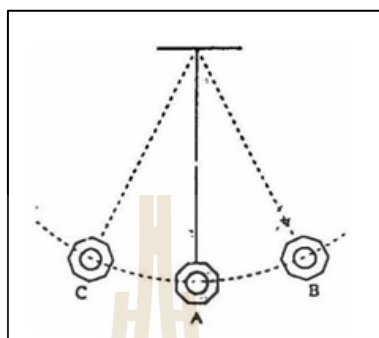
การทำงานของเครื่องจักรกล จะทำให้เกิดแรงที่กระทำต่อมวลส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ไป-กลับ เป็นการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะการเคลื่อนที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแรงกระทำต่อระบบ ความเร็ว เวลา และลักษณะขนาดรูปร่างของระบบ เป็นต้น แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะแบ่งประเภทของแรงกระทำเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ

1) การสั่นสะเทือนอิสระ (Free vibration) การสั่นสะเทือนอิสระ คือ การสั่นสะเทือนเคลื่อนที่กลับไป-กลับมาจากมวลภายใต้แรงสะสมของระบบ โดยปราศจากแรงกระทำภายนอกมากระทำต่อระบบ ความถี่การกลับไป-กลับมาจากมวลที่เกิดขึ้น ในกรณีนี้เรียกว่า ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ซึ่งอาจจะมีหลายความถี่หรือความถี่เดียวก็ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างการสั่นสะเทือนของระบบ เช่น การปิดสวิตช์เพื่อหยุดเครื่องไม่ให้มีแรงกระทำเครื่องจักรจะสั่นด้วยแรงอิสระจนหยุดนิ่ง เครื่องจักรกลการหาความถี่ธรรมชาติของระบบอาจใช้วิธีการตรวจวัดตั้งแต่การเริ่มเดินเครื่องจักร จนถึงรอบการใช้งานปกติ และหยุดเครื่อง เครื่องจักรจะลดความเร็วรอบการหมุนลงจะหยุดนิ่ง จึงนำค่าจากการที่ได้บันทึกมาทำการตรวจสอบค่าและมุมการสั่นสะเทือน

2) การสั่นสะเทือนโดยแรง (Forced vibration) คือการเคลื่อนที่กลับไป-กลับมาจากของระบบจากแรงกระทำภายนอก ทำให้ระบบเกิดการเคลื่อนที่ตัวอย่างเช่น พัดลมขับด้วยสายพานส่งกำลังมาจากมอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น ในกรณีนี้ถือว่ามอเตอร์เป็นเครื่องต้นกำลังขับเคลื่อน เป็นแรงกระทำภายนอก ทำให้พัดลมหมุนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วรอบ ที่มีความถี่เช่นเดียวกับแรงที่กระทำ ถ้าแรงกระทำมีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบ จะทำให้เกิดสภาพความสั่นสูงซ้อนทับกันระหว่างการสั่นของแรงกระทำ กับ การสั่นสะเทือนธรรมชาติของระบบ จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงเป็นอันตรายต่อระบบอย่างมาก ลักษณะนี้เรียกว่า เกิดการเรโซแนนซ์ (Resonant) ในการใช้งานเครื่องจักรจะต้องหลีกเลี่ยงการทำงานย่านความถี่นี้

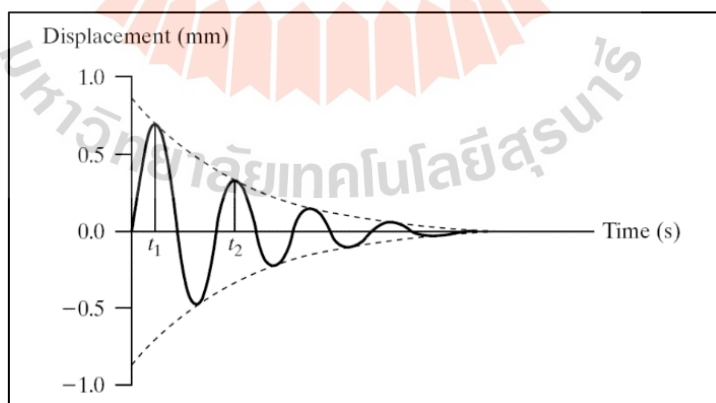
2.2.3 หลักการวัดวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรโดยทั่วไป ใช้หลักการเหมือนกับแกว่งลูกตุ้มไป-มา ดังรูปที่



รูปที่ 2.2 หลักการวัดความสั่นสะเทือน

เมื่อลูกตุ้มเคลื่อนที่จากจุดหยุดนิ่ง A มาจุด B ระยะการเคลื่อนที่นี้เรียกว่า ขนาด หรือแอมพลิจูด อย่างไรก็ตามแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อลูกตุ้มจะทำให้มันเคลื่อนที่กลับไปยังตำแหน่ง A และเกิดแรงสะสมในตัวของมันเอง ทำให้เคลื่อนที่ต่อไปถึงจุด C จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่จากจุด A ไปจุด B จะเท่ากับจุด A ไปจุด C เรียกว่า ระยะการเคลื่อนที่ของลูกตุ้ม (Displacement)



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มเทียบกับเวลา

ถ้าระยะการเคลื่อนที่จากจุด A ไปจุด B หรือจากจุด A ไปจุด C แทนการเคลื่อนที่สูงสุด และถ้า ลูกตุ้มต้องเคลื่อนที่ช้าลงจะกระทั้งหยุดนิ่งที่จุด A ระยะทางการเคลื่อนที่เท่ากับศูนย์ และการเคลื่อนที่จากจุด A ไปจุด B หรือจากจุด A ไปจุด C ความเร็วจะเริ่มลดลงที่จุด B หรือจุด C เนื่องจาก แรงโน้มถ่วงของโลกและจุด A เป็นจุดที่มีความเร็วสูงสุด ฉะนั้นความเร็วก็คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของระยะทางใน 1 หน่วยเวลา

2.2.4 มาตรฐานการสั่นสะเทือน

การแบ่งระดับการสั่นสะเทือน จะนำมาใช้เพื่อประเมินสภาพการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น จากการตรวจวัดและวิเคราะห์หาสาเหตุการสั่นผิดปกติของเครื่องจักรอุปกรณ์ จากการวัดค่าการสั่นสะเทือน โดยรวม (Overall) บนจุดวัดของเครื่องจักรแต่ละจุด โดยเปรียบเทียบค่าความรุนแรงกับมาตรฐาน ISO 2372 หรือ ISO 10816-3

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816-1						
Machine	Class I		Class II	Class III	Class IV	
	in/s	mm/s	Small Machines	Medium Machines	Large Rigid Foundation	Large Soft Foundation
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28				
	0.02	0.45				
	0.03	0.71			GOOD	
	0.04	1.12				
	0.07	1.80				
	0.11	2.80			SATISFACTORY	
	0.18	4.50				
	0.28	7.10			UNSATISFACTORY	
	0.44	11.20				
	0.70	18.00				
	1.10	28.00			UNACCEPTABLE	
1.77	45.90					

รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างมาตรฐานการสั่นสะเทือน ISO 10816-1

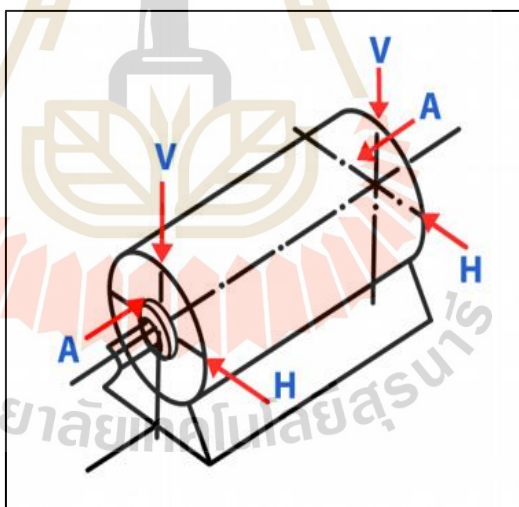
2.2.5 การวัดความสั่นสะเทือน

การวัดความสั่นสะเทือนนั้น โดยปกติแล้วจะวัดใน 3 จุดคือ จุดวัดในแนวแกน (Axial, A) จุดวัดในแนวนอน (Horizontal, H) และจุดวัดในแนวตั้ง (Vertical, V) ในการวัดนั้นจุดที่วัด จะต้องเป็นจุดที่เป็นตัวเรือนเครื่องจักรหรือตัวเรือนของมอเตอร์ไม่แนะนำให้วัดบนฝาครอบหรือชิ้นส่วนอื่นๆเพราะจะทำให้ค่าที่ได้จากการวัดผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง และในการวัดนั้น แรงกดของทุกครั้งที่วัดของทุกจุดจะต้องเท่ากัน หรือเลือกใช้ โพรบแบบแม่เหล็ก ในการวัดแต่ละแนวนั้น ค่าที่ได้จากแต่ละแนวของการวัดจะเป็นตัวที่บ่งบอกถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น โดยจุดวัดในแนวแกนสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) แนวแกน (Axial, A) คือ จุดวัดที่อยู่ในแนวขนานกับเพลลาของเครื่องจักรที่ต้องการวัด ในการวัดนั้นเราต้องวัดในจุดที่อยู่ใกล้กับเพลลาให้มากที่สุด การสั่นสะเทือน ที่เกิดขึ้นมากผิดปกติหรือเกิดขึ้นอย่างรุนแรงในแนวนี้มีสาเหตุมาจากการหมุนของเพลลาการคดงอของเพลลา

2) แนวนอน (Horizontal, H) คือ จุดวัดที่อยู่ในแนวนอนหรือแนวขนานกับพื้นหรือ ตั้งฉากกับจุดยึดของฐานมอเตอร์ หรือเครื่องจักรซึ่งจะวัดทางด้านขวา หรือ ด้านซ้ายของชิ้นส่วนหรือเครื่องจักรที่ต้องการวัดก็ได้แต่มุมการวัดต้องได้ 90 องศา หรือใกล้เคียง กับจุดวัดที่เป็นแนวตั้ง (Vertical, V) การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมากผิดปกติหรือเกิดขึ้นอย่างรุนแรงในแนวนี้มีสาเหตุมาจากความสมดุล (Balance) ของเพลลา ใบพัด ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่เป็นวงกลม หรือการแกว่งของเพลลา ของเครื่องจักรนั้น ๆ

3) แนวตั้งฉากหรือแนวตั้ง (Vertical, V) คือ จุดวัดที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับกับพื้นหรือด้านที่อยู่ตรงกันข้ามกับจุดจับยึดมอเตอร์หรือเครื่องจักร โดยทั่ว ๆ ไปแล้วจุดที่ทำการวัดคือจุดวัดที่อยู่ด้านบนของเครื่องจักรที่ต้องการจะวัดเช่นด้านบนของมอเตอร์หรือเครื่องจักร โดยจุดที่วัดจะต้องมีมุมขนาน 90 องศา หรือใกล้เคียงกับจุดวัดในแนวนอน



รูปที่ 2.5 จุดวัดการสั่นสะเทือนในแนวแกน X, Y และ Z

2.3 การพยากรณ์

การพยากรณ์ (forecasting) หมายถึงการทำนาย (prediction) การคาดการณ์ การประมาณค่าในอนาคตโดยอาศัยข้อมูลหรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอดีตที่มีพื้นฐานองค์ประกอบสถานการณ์เดียวกัน การพยากรณ์เป็นส่วนสำคัญของการวางแผนงานที่จะทำไม่ว่าจะเป็นงานภาครัฐหรือเอกชน ผู้พยากรณ์จะต้องอาศัยประสบการณ์หรือทฤษฎีหลักเกณฑ์เพื่อสนับสนุนการพยากรณ์สำหรับเทคนิควิธีการพยากรณ์แบ่งออกเป็น 2 เทคนิคใหญ่ ๆ ได้คือ

1) เทคนิคการพยากรณ์โดยใช้ความชำนาญ (Judgemental techniques) เป็นการพยากรณ์ที่อาศัยประสบการณ์ ความคิดเห็นและการตัดสินใจของผู้พยากรณ์ที่มีความชำนาญประสบการณ์ โดยไม่มีทฤษฎีหรือหลักเกณฑ์สนับสนุน ลักษณะการพยากรณ์จะไม่มีรูปแบบแน่นอน (informal) เทคนิคการพยากรณ์โดยใช้ความชำนาญ เช่น วิธี Delphi หรือวิธี Secenario Projection

2) เทคนิคการพยากรณ์โดยใช้หลักสถิติ (statistical techniques) เป็นการพยากรณ์ที่ใช้ทฤษฎีและหลักการทางสถิติ ดังนั้นเทคนิคการพยากรณ์ โดยใช้หลักสถิติจึงต้องใช้ข้อมูลในอดีต (past data) และรูปแบบของข้อมูลในอนาคตคล้ายกับรูปแบบของข้อมูลในอดีต สำหรับเทคนิคการพยากรณ์โดยใช้หลักสถิติแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหรือตัวแปร โดยศึกษาความสัมพันธ์ในรูปแบบเหตุและผล (causal model) เทคนิคการพยากรณ์โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหรือตัวแปรที่เห็นกันได้บ่อย ได้แก่ การวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลกับเวลา โดยการศึกษารูปแบบการเคลื่อนไหวก่อนของข้อมูลอนุกรมเวลา โดยดูจากรูปแบบอนุกรมเวลา (time series patten) วิธีการพยากรณ์ที่วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลกับเวลาเรียกว่าการวิเคราะห์อนุกรมเวลา ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลามีมากมายหลายวิธี ทั้งที่เป็นเทคนิควิธีอย่างง่าย (native method) จนถึงวิธียุ่งยากซับซ้อนที่ต้องใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ

2.3.1 ความหมายอนุกรมเวลา

อนุกรมเวลา (time series) หมายถึงค่าข้อมูลหรือค่าสังเกตที่เก็บรวบรวมตามลำดับเวลาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ช่วงเวลาที่เก็บรวบรวมข้อมูลอาจห่างเท่ากันหรือไม่ก็ได้ ส่วนใหญ่ช่วงเวลาระหว่างเท่ากัน แต่ถ้าช่วงเวลาระหว่างไม่เท่ากันอาจเกิดปัญหาในการวิเคราะห์อนุกรมเวลาได้ อนุกรมเวลาจะมีลักษณะเด่นที่แตกต่างจากข้อมูลอื่น ๆ คือ อนุกรมเวลาเป็นข้อมูลที่ไม่อิสระกัน

อนุกรมเวลาแบ่งได้ 2 ประเภทคือ อนุกรมเวลาชนิดต่อเนื่อง หมายถึงอนุกรมเวลาที่มีค่าต่อเนื่อง และอนุกรมเวลาชนิดไม่ต่อเนื่อง หมายถึงค่าอนุกรมเวลาที่มีค่าไม่ต่อเนื่อง ค่าอนุกรมเวลาจะเป็นจุด

2.3.2 ส่วนประกอบของอนุกรมเวลา

1) แนวโน้ม (trend สัญลักษณ์ที่ใช้ T) เป็นผลเนื่องจากการเพิ่มขึ้นหรือหยุดนิ่ง หรือการลดลงของข้อมูลในช่วงเวลาที่ยาวนาน ความยาวนานของช่วงเวลาที่กำหนดได้แน่นอนแต่อย่างน้อยไม่ควรต่ำกว่า 10 ช่วงเวลา แนวโน้มเป็นการวัดค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งเรียกว่าค่าแนวโน้ม แนวโน้มมีลักษณะค่อยเป็นค่อยไปกล่าวคือการเคลื่อนไหวตลอดเวลา ซึ่งบางครั้งสามารถอธิบายได้จากเส้นตรงหรือเส้นโค้ง

2) ความผันแปรตามฤดูกาล (seasonal variation สัญลักษณ์ที่ใช้ S) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงในช่วงคาบเวลา ซึ่งจังหวะการเปลี่ยนแปลงจะเป็นรูปแบบซ้ำเดิมในช่วงเวลาภายใน 1 ปี หรือน้อยกว่า ความผันแปรตามฤดูกาลเป็นเครื่องชี้ให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาซึ่งอาจเป็นวัน สัปดาห์ เดือน หรือถ้าเป็น 1 ปี จะเป็นช่วงเวลาที่มากที่สุดของคำว่า “ฤดูกาล” สาเหตุที่ทำให้เกิดความผันแปรตามฤดูกาล คือ สภาพภูมิอากาศ วัฒนธรรม สภาพสังคม หรือเทศกาลต่างๆ

3) ความผันแปรตามวัฏจักร (cyclical variation สัญลักษณ์ที่ใช้ C) เป็นการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่มีลักษณะขึ้นลงของการเคลื่อนที่ซ้ำ คล้ายกับความผันแปรตามฤดูกาล ต่างกันที่ช่วงเวลากการเคลื่อนที่ขึ้นลงซ้ำกัน จะมีระยะเวลานานกว่า 1 ปี การศึกษาเหตุผลที่ทำให้เกิดความผันแปรตามวัฏจักรเป็นเรื่องยุ่งยาก มีทฤษฎีทางเศรษฐศาสตร์มากมายที่พยายามอธิบายความผันแปรตามวัฏจักร แต่ยังไม่สามารถสรุปรูปแบบความผันแปรตามวัฏจักรที่แน่นอนได้ จึงทำให้ไม่สามารถทำนายเหตุการณ์ได้แน่นอน นอกจากผู้ทำนายมีความในธุรกิจนั้น และสังเกตเป็นรูปแบบวัฏจักรของธุรกิจ

4) ความผันแปรเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอ (irregular variation สัญลักษณ์ที่ใช้ I) เป็นการเคลื่อนที่ของข้อมูลที่เกิดขึ้นอย่างไม่คาดการณ์ หรือไม่มีรูปแบบการเกิดที่แน่นอนเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถพยากรณ์ล่วงหน้าได้

2.4 การวิเคราะห์ค่าแนวโน้มและการพยากรณ์ค่าแนวโน้ม

การสร้างเส้นแนวโน้มโดยการคำนวณ เป็นวิธีการสร้างแนวโน้มที่ต้องอาศัยความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคณิตศาสตร์ การสร้างเส้นแนวโน้มโดยการคำนวณ มีหลักเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือ อีกทั้งแนวโน้มที่สร้างขึ้นจะมีเพียงเส้นเดียวเท่านั้น และไม่ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้สร้าง ก่อนการสร้างเส้นแนวโน้มโดยการคำนวณจะต้องเขียนแผนภาพการกระจายข้อมูลเพื่อดูการเคลื่อนไหวข้อมูลว่าเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง แล้วจึงคำนวณหาเส้นแนวโน้ม

2.4.1 วิธีกึ่งเฉลี่ย (semi-average method)

เป็นวิธีสร้างเส้นแนวโน้มที่เป็นเส้นตรง โดยใช้หลักการสร้างคล้ายกับวิธีเลือกจุด 2 จุดใด ๆ กล่าวคือจะต้องหาจุด 2 จุดและลากเส้นเชื่อมจุด 2 จุดเช่นเดียวกัน ต่างกันที่จุด 2 จุดของวิธีกึ่งเฉลี่ยจะต้องได้จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่เก็บรวบรวมข้อมูล ขั้นตอนการสร้างเส้นแนวโน้มด้วยวิธีกึ่งเฉลี่ยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่มเท่า ๆ กัน
- 2) หาค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละครึ่ง โดยการหาผลรวมของข้อมูลในช่วงนั้น จำนวนอนุกรมเวลาในช่วงนั้นจะได้ \bar{y}_1 และ \bar{y}_2
- 3) หาจุดกึ่งกลางของช่วงเวลาในแต่ละครึ่งและให้ d
- 4) หาค่า a และ b

$$a = \bar{y}_1 \quad (2.1)$$

$$b = \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{d} \quad (2.2)$$

5. แทนค่า a และ b จะได้สมการแนวโน้ม $\hat{Y}_i = a + bX$ โดยที่

\hat{Y}_i = ค่าแนวโน้ม

\bar{y}_1 = ค่าเฉลี่ยข้อมูลในครั้งที่ 1

\bar{y}_2 = ค่าเฉลี่ยข้อมูลในครั้งที่ 2

d = ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางอนุกรมเวลาของครั้งแรกและครั้งหลัง

a = ค่าแนวโน้ม ณ จุดเริ่มต้นของอนุกรมเวลา

b = ความชันของเส้นแนวโน้ม

X = หน่วยเวลา

2.4.2 วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average method)

เป็นวิธีการคำนวณหาเส้นแนวโน้มที่เป็นเส้นตรง ซึ่งมีหลักการคล้ายกับวิธีกำลังสองน้อยที่สุด คือใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลแต่ใช้ค่าเฉลี่ยหลายค่า แต่ละค่าเฉลี่ยคำนวณได้จากข้อมูลที่มีช่วงเวลาซ้อนกัน วิธีเฉลี่ยเคลื่อนที่เป็นการหาเส้นแนวโน้มโดยใช้เทคนิคการจัดส่วนประกอบของอนุกรมเวลาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงที่อยู่ในอนุกรมเวลาให้หมดไปเพื่อเหลือแต่ค่าแนวโน้มของข้อมูล โดยการใช้การเฉลี่ยข้อมูล ขั้นตอนการสร้างเส้นแนวโน้มด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

- 1) กำหนดช่วงเวลาที่ต้องการหาค่าเฉลี่ย
- 2) คำนวณหาค่าเฉลี่ยแต่ละช่วง โดยหาค่าเฉลี่ยของแต่ละช่วงโดยใช้ข้อมูลข้างต้นทีละตัว แล้วใช้ข้อมูลข้างล่างของช่วงเวลากลับไปแทนค่าเพื่อหาค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยที่ใช้เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิต
- 3) ลากเส้นผ่านค่าเฉลี่ยเลขคณิตแต่ละช่วงเวลาที่สามารถคำนวณได้ โดยอาจต้องมีการปรับเส้นที่ลากเพื่อให้เส้นที่ลากได้เรียบไม่หักมุม เส้นที่ลากได้นี้คือเส้นแนวโน้ม

การสร้างเส้นแนวโน้มด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่จะมีสมการเส้นแนวโน้มเช่นวิธีอื่น ๆ การพยากรณ์ค่าแนวโน้ม จึงทำได้โดยการใช้จุดตัดของช่วงเวลาที่ต้องการหาค่าแนวโน้มกับเส้นแนวโน้มที่เกิดจากการเฉลี่ยเคลื่อนที่

2.4.3 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method)

เป็นวิธีการสร้างเส้นแนวโน้มที่ใช้แนวคิดที่จะทำให้ผลรวมกำลังสองของผลต่างระหว่างค่าแนวโน้มกับค่าข้อมูลที่เก็บมาได้มีค่าน้อยที่สุด (least-square error) การสร้างเส้นแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เป็นวิธีที่นิยมเพราะเป็นวิธีที่ใช้คุณสมบัติทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญและน่าเชื่อถือได้ในการหาเส้นที่เหมาะสมที่สุด (line of best fit) ที่เป็นตัวแทนของข้อมูลที่เก็บมาได้ และใช้เส้นแนวโน้มเป็นเส้นตรงหรือไม่ใช่เส้นตรงก็ได้ โดยการสมการเส้นแนวโน้มเส้นตรงวิธีกำลังสองน้อยที่สุด คือ $Y = a + bX$ ซึ่งจะหาค่า a และ b จากสมการปกติได้ว่า

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2.3)$$

$$\hat{Y}_i = a + b\bar{X} \quad (2.4)$$

โดยที่ \hat{Y}_i = ค่าแนวโน้ม

a = ค่าแนวโน้ม ณ จุดเริ่มต้นของอนุกรมเวลา

b = ความชันของเส้นแนวโน้ม

n = ค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าแนวโน้ม ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

X = หน่วยเวลา

พิจารณาค่า x ซึ่งแทนหน่วยเวลา ถ้าจำนวนรายการของข้อมูลอนุกรมเวลาในอดีตที่เก็บรวบรวมมา ได้มีมาก ค่า x จะมากและการคำนวณ a, b จะทำได้ยุ่งยาก และเนื่องเราสามารถเลือกใช้ช่วงเวลาใด เวลาหนึ่งของอนุกรมเวลาเป็นจุดเริ่มต้นได้ จึงทำให้เกิดการคำนวณค่า a และ b แบบลัด โดย กำหนดให้ x คือ x เมื่อปรับจุดเริ่มต้นของเวลาแล้ว สำหรับการปรับจุดเริ่มต้นยึดหลักว่าเมื่อปรับค่า x ให้เป็น x จะต้องทำให้ $\sum x = 0$ ดังนั้นสมการ a, b จะได้ว่า

$$b = \frac{\sum xy}{\sum x^2} \quad (2.5)$$

$$a = \bar{Y} \quad (2.6)$$

การปรับค่า X ทำได้โดย ถ้าจำนวนรายการของข้อมูลอนุกรมเวลาในอดีตที่เก็บ รวบรวมมาได้เป็นเลขคู่ จุดเริ่มต้นของอนุกรมเวลา ($x=0$) จะอยู่กึ่งกลางของอนุกรมเวลา อนุกรม ของ x คือ $\dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$ และ x เป็นหนึ่งหน่วยเวลา ถ้าจำนวนรายการของข้อมูล อนุกรมเวลาในอดีตที่เก็บรวบรวมมาได้เป็นเลขคู่ จุดเริ่มต้นของอนุกรมเวลา ($x=0$) จะอยู่กึ่งกลาง ระหว่างกลางของอนุกรมเวลา อนุกรมเวลา x คือ $\dots, -5, -3, -1, 1, 3, 5, \dots$ และ x เป็น $\frac{1}{2}$ หน่วยเวลา

2.5 ความแม่นยำของการพยากรณ์ (accuracy)

หมายถึงความถูกต้องแม่นยำของการพยากรณ์ ซึ่งการวัดความแม่นยำจะใช้ได้กับเทคนิค การพยากรณ์โดยหลักสถิติเท่านั้น

2.5.1 ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ (mean absolute deviation : MAD)

เป็นการวัดความแม่นยำจากค่าเฉลี่ยผลรวมความแตกต่างระหว่างค่าข้อมูลที่แท้จริงกับค่าพยากรณ์

$$MAD = \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{n} \quad (2.7)$$

เมื่อ Y_i หมายถึง ค่าข้อมูลที่แท้จริง
 \hat{Y}_i หมายถึง ค่าพยากรณ์
 n หมายถึง จำนวนข้อมูล

2.5.2 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (mean square error : MSE)

เป็นการวัดความแม่นยำจากค่าเฉลี่ยผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าข้อมูลที่แท้จริงกับค่าพยากรณ์

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n} \quad (2.8)$$

เมื่อ Y_i หมายถึง ค่าข้อมูลที่แท้จริง
 \hat{Y}_i หมายถึง ค่าพยากรณ์
 n หมายถึง จำนวนข้อมูล

2.5.3 ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (mean absolute percent error : MAPE)

เป็นการวัดค่าความแม่นยำที่ไม่มีหน่วยซึ่งจะใช้เป็นค่าเปรียบเทียบความแม่นยำที่เกิดขึ้นจากการพยากรณ์อนุกรมเวลาหลายชุดที่มีหน่วยของข้อมูลต่างกัน

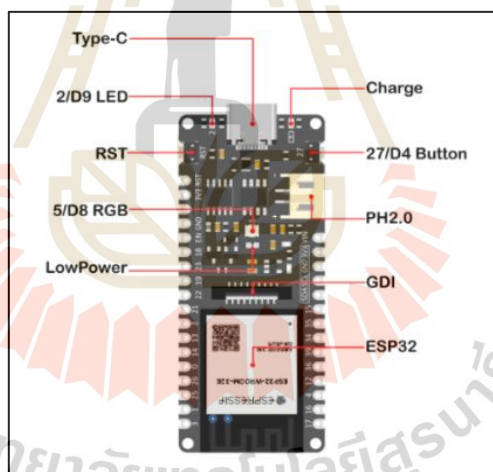
$$MAPE = \frac{(\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| / Y_i)}{n} \quad (2.9)$$

เมื่อ Y_i หมายถึง ค่าข้อมูลที่แท้จริง
 \hat{Y}_i หมายถึง ค่าพยากรณ์
 n หมายถึง จำนวนข้อมูล

การวัดความแม่นยำของการพยากรณ์ด้วยวิธี MAD และ MSE เกิดจากแนวคิดเดียวกันคือวัดความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่แท้จริงกับค่าที่พยากรณ์ได้โดย MAD กำจัดเครื่องหมายโดยเกิดจากการใช้สัมบูรณ์ แต่ MSE กำจัดเครื่องหมายโดยการใช้กำลังสอง ด้วยเหตุนี้ค่าการพยากรณ์ของ MSE จะมีความไวต่อการพยากรณ์มากกว่าค่า MAD

2.6 อุปกรณ์ควบคุมและประมวลผล

FireBeetle ESP32 ออกแบบมาเป็นพิเศษสำหรับ IoT เป็นบอร์ดควบคุมหลักที่ใช้ ESP-WROOM-32 พร้อมชิปอัลคอร์ด รองรับการสื่อสารแบบสองโหมด WiFi และ Bluetooth และมีขนาดเล็กใช้พลังงานต่ำเป็นพิเศษวงจรชาร์จบนบอร์ดและอินเทอร์เฟซที่ใช้งานง่ายซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างสะดวกสำหรับ IoT ในบ้านอัจฉริยะ แอปพลิเคชัน IOT สำหรับอุตสาหกรรมและอื่นๆ FireBeetle ESP32 รองรับการพัฒนาโปรแกรม Arduino ภาษา C และการเขียนโปรแกรม MicroPython



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอุปกรณ์ควบคุมและประมวลผล ESP32

2.7 เซ็นเซอร์ Vibration sensor ADXL345

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับความสั่นสะเทือนของเครื่องจักร สามารถวัดความเร่งได้ 3 แกน ประกอบไปด้วย แกน x แกน y และแกน z สามารถเลือกค่าสัญญาณการวัดได้ตั้งแต่ ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g ไปจนถึง ± 16 g เซ็นเซอร์ ADXL345 วัดความเร่งแบบไดนามิกรวมถึงการตอบสนองการทำงานที่ความถี่สูงได้



รูปที่ 2.7 ตัวอย่าง Vibration sensor ADXL345

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

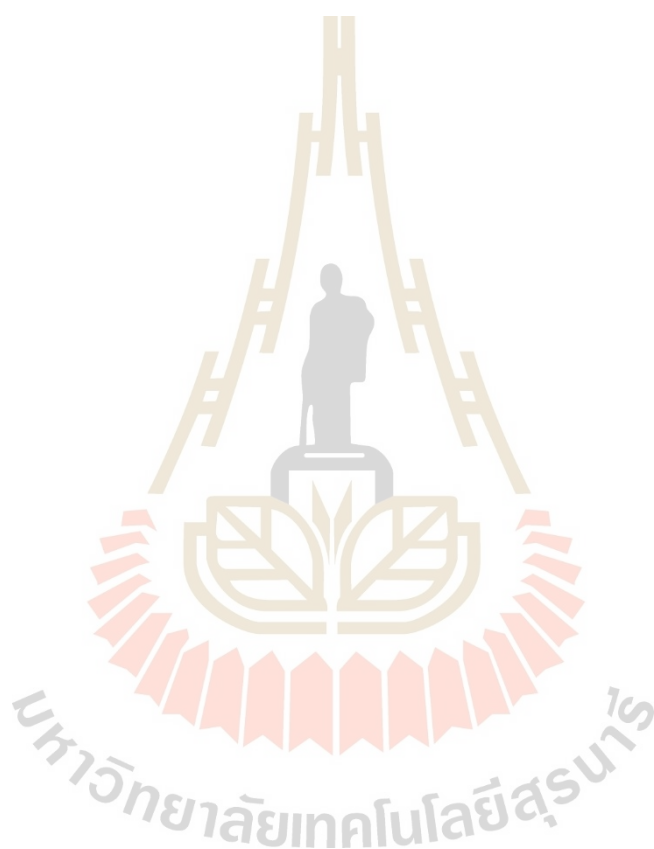
Osorio-Gordillo และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการตรวจจับข้อผิดพลาดของเบร็ริง โดยใช้การออกแบบ Takagi-Sugeno PI observer ในการประมาณ โทลคทอร์ค ซึ่งการทดลองนี้ ได้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกรณีศึกษาและการวิเคราะห์ผลแสดงให้เห็นว่าไม่สามารถประมาณค่า โทลคทอร์ค ที่เกิดขึ้น ได้หากเบร็ริงเกิดข้อผิดพลาดเกิดขึ้น

Ray Y. Zhong และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ Internet of Things (IoT) เพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องจักรแบบเรียลไทม์สำหรับจัดเตรียมความพร้อมของทรัพยากร ทำงานร่วมกับ Cloud Manufacturing (CMfg) ได้พัฒนาขึ้นสำหรับการบันทึกข้อมูลสถานะของเครื่องจักรแบบเรียลไทม์และแสดงภาพผ่านแดชบอร์ดในรูปแบบกราฟ

Alessandra Caggiano และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษา Cloud Manufacturing สำหรับเครื่องจักรกล CNC โดยใช้ มัลติเซ็นเซอร์ในการตรวจสอบสถานะของเครื่องจักรบริเวณมีดกลึง (Tool) ประกอบไปด้วยการวัด Force, Torque, Power, Vibration และ Temperature sensors จากนั้นส่งข้อมูลไปยังระบบ Cloud ที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อเก็บข้อมูล และแสดงผลผ่านจอมอนิเตอร์ในลักษณะกราฟ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบสถานะจะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อทำนายการเสียหายของมีดกลึง Catastrophic Tool Failure (CTF)

เฉลิมชาติ มานพ และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเฝ้าตรวจสอบสถานะมอเตอร์ไฟฟ้า โดยการวัดกระแสไฟฟ้า สัญญาณที่สำคัญของมอเตอร์จะถูกวัดและจัดเก็บเพื่อประมวลผลหาประเภทของฟอลต์ (Faults) โดยโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนซอฟต์แวร์ได้ออกแบบและสามารถทำการอินเตอร์เฟซได้ในลักษณะกราฟิก (GUI) ด้วยโปรแกรม MATLAB ในการทดลองหากเกิดฟอลต์ขึ้นในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่ระบบสามารถส่งข้อความเพื่อเป็นการแจ้งเตือนออกหน้าจอและหยุดการทำงานของมอเตอร์

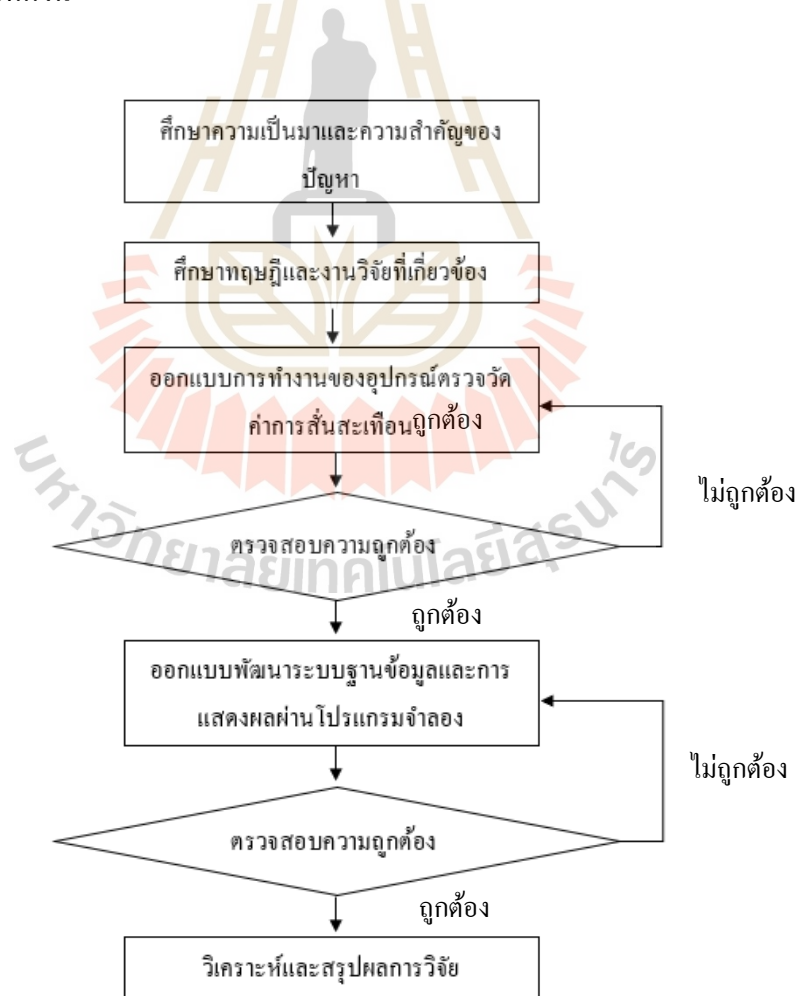
Sun Hui และคณะ (2018) ได้ทำการศึกษาการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ ในการติดตาม และควบคุม AGV แบบ Real-Time โดยการสร้างแบบจำลองนี้จะกำหนด Layout และค่าพารามิเตอร์ ต่างๆในระบบงานจริง เช่น ความเร็วของ AGV, ข้อมูลการรับส่งสินค้า, เวลาในกระบวนการผลิต และความแตกต่างของสินค้าแต่ละประเภท โปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim Simulation เชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูล SQL รับส่งข้อมูลแบบ Real-Time และแสดงผลตำแหน่งของ AGV ขณะทำงาน สามารถติดตามสถานการณ์ทำงานของ AGV ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัย เรื่อง การพัฒนาระบบตรวจติดตามสถานะแบบเวลาจริงเครื่องจักรกลไฟฟ้าผ่านโปรแกรมจำลองสถานการณ์เพื่อการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ มีระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย ประกอบไปด้วย การเก็บรวบรวมข้อมูล พยากรณ์ค่าความสั่นสะเทือนโดยใช้วิธีการพยากรณ์ค่าแอมพลิจูด ในการพยากรณ์ใช้ 2 วิธีคือการพยากรณ์ค่าแอมพลิจูดแบบวิธีกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งการออกแบบพัฒนาโปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim® ในการแสดงผลแบบเวลาจริงและการใช้ข้อมูลในการพยากรณ์การซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังนี้



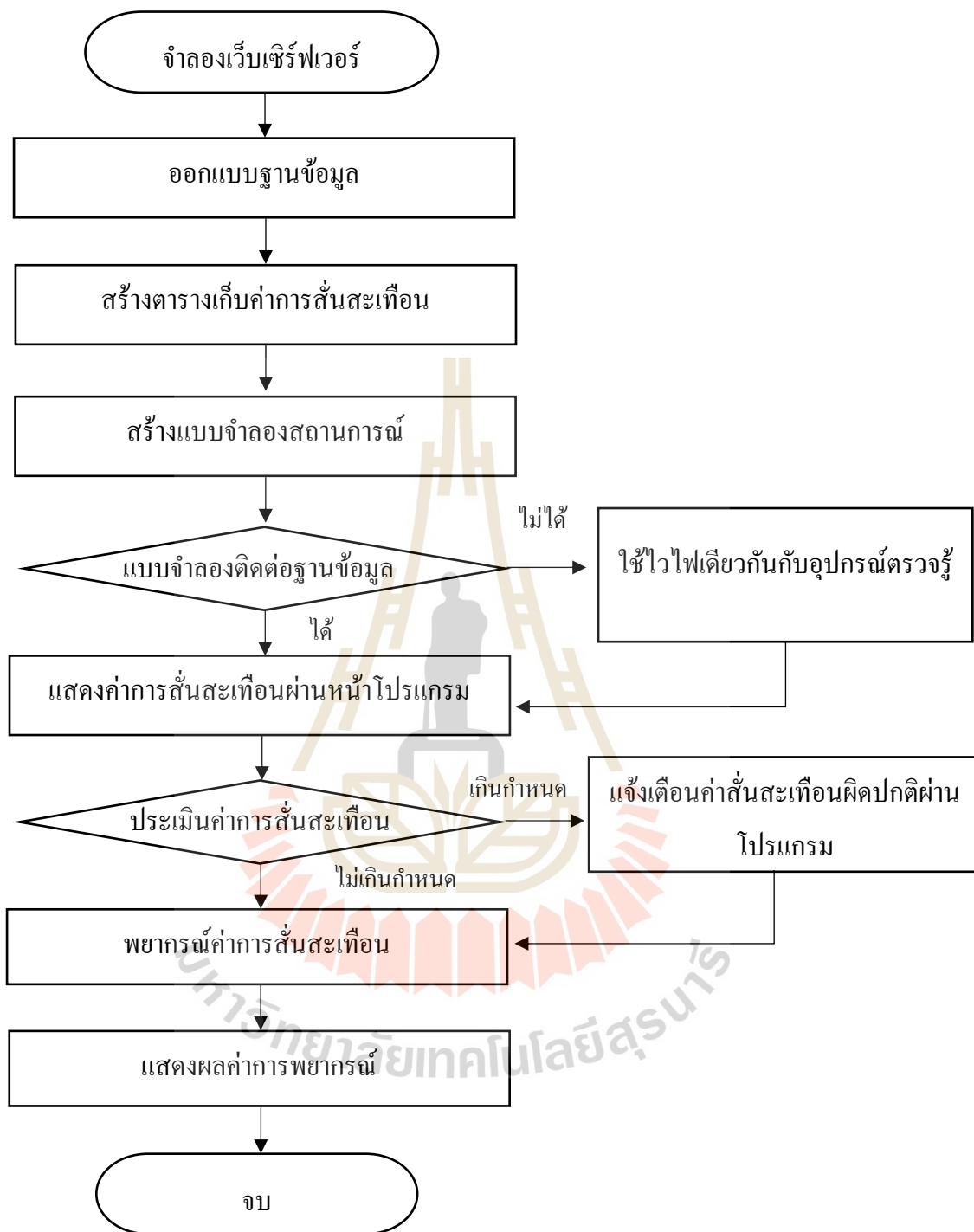
3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

การเก็บรวบรวมข้อมูลในขั้นตอนนี้ เป็นการวัดค่าความสัมพันธ์ ระหว่างเครื่องจักรที่ทำงานแบบปกติและเครื่องจักรที่ทำงานภายใต้การที่ไม่สมดุล นำไปสู่การตรวจจับและทำนายระดับความรุนแรงที่เกิดขึ้น เพื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ระดับความรุนแรงของการทำงานที่ผิดปกติ ถ้าหากระดับความรุนแรงถึงระดับที่กำหนดไว้จึงจะแสดงค่าระดับความรุนแรงที่ค่านี้ออกมา โดยจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 5 กรณี ซึ่งเป็นค่าการสัมพันธ์จากเครื่องจำลองการสัมพันธ์จะแบ่งออกเป็น ค่าการสัมพันธ์ปกติ ค่าการสัมพันธ์ระดับที่หนึ่ง ค่าการสัมพันธ์ระดับที่สอง การสัมพันธ์ระดับที่สาม และการสัมพันธ์ระดับที่สี่ ซึ่งในแต่ละระดับการสัมพันธ์จะเป็นการใส่น้ำหนักเข้าไปในโหลดเพื่อให้โหลดทำงานในภาวะที่ไม่สมดุล ทำการหมุนส่งกำลังด้วยมอเตอร์ DC ที่ความเร็ว 4,400 รอบต่อนาที

3.2 การออกแบบซอฟต์แวร์

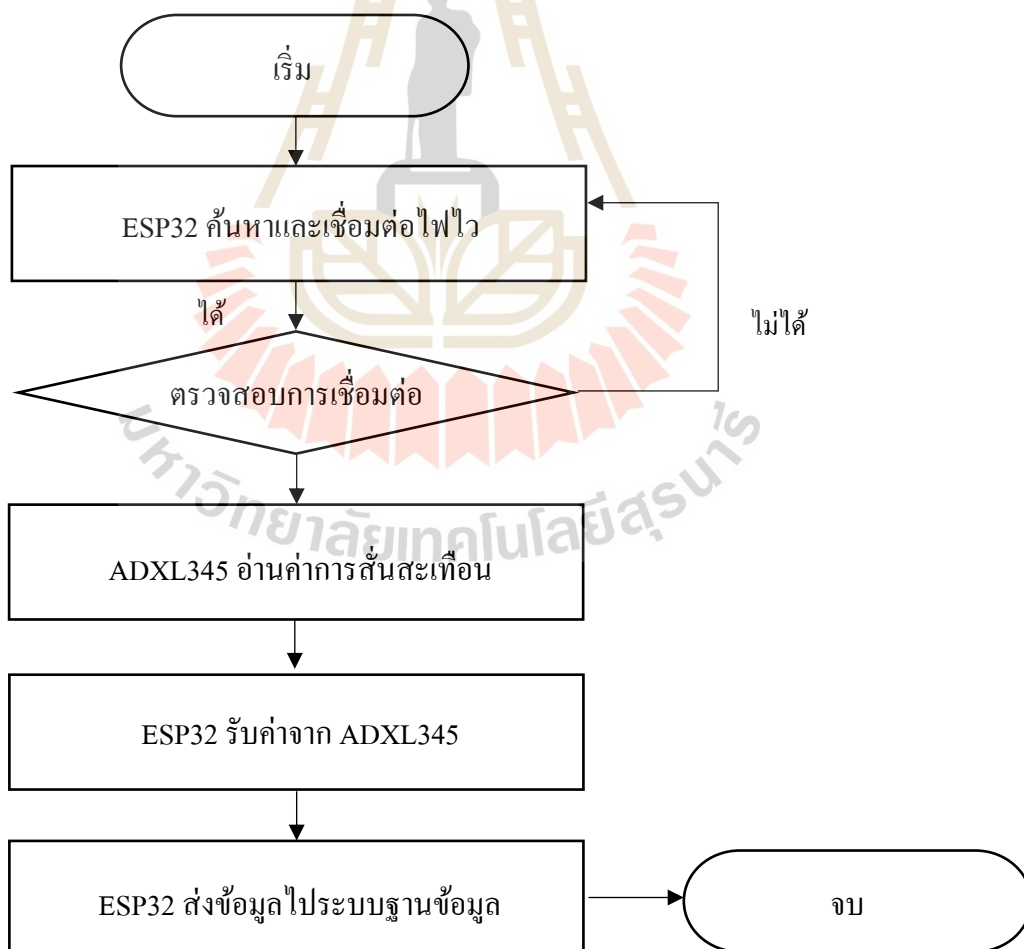
ในส่วนของการแสดงผลได้ใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim® เป็นโปรแกรมที่มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สร้างแบบจำลองการทำงานของเครื่องจักรกล สามารถแสดงผลของการวัดค่าความสัมพันธ์ผ่านหน้าโปรแกรมได้ อีกทั้งยังสามารถที่จะติดต่อกับระบบฐานข้อมูล My SQL ที่เป็นตัวกลางในการเก็บค่าความสัมพันธ์โดยจำลองเว็บเซิร์ฟเวอร์ผ่านโปรแกรม XAMPP ซึ่งรับค่ามาจากอุปกรณ์ตรวจวัดความสัมพันธ์ที่มีเซ็นเซอร์ ADXL345 เป็นตัวประมวลผลความสัมพันธ์และไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่สามารถเชื่อมต่อได้ทั้งไวไฟและบลูทูธส่งค่าความสัมพันธ์ไปเก็บไว้ที่ฐานข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ซอฟต์แวร์จำลองสถานการณ์ Flexsim® มาใช้ในการประมวลผลที่ได้จากการวัดค่าความสัมพันธ์ ซอฟต์แวร์ดังกล่าวจะสามารถติดตามสถานะเครื่องจักร โดยผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งค่าของสัญญาณที่จะแสดงออกให้เห็นได้แก่ ค่าของความสัมพันธ์ของเครื่องจักรในหน่วยของความเร่ง โดยขั้นตอนการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการแสดงผลโดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim® สามารถแสดงเป็นแผนภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้



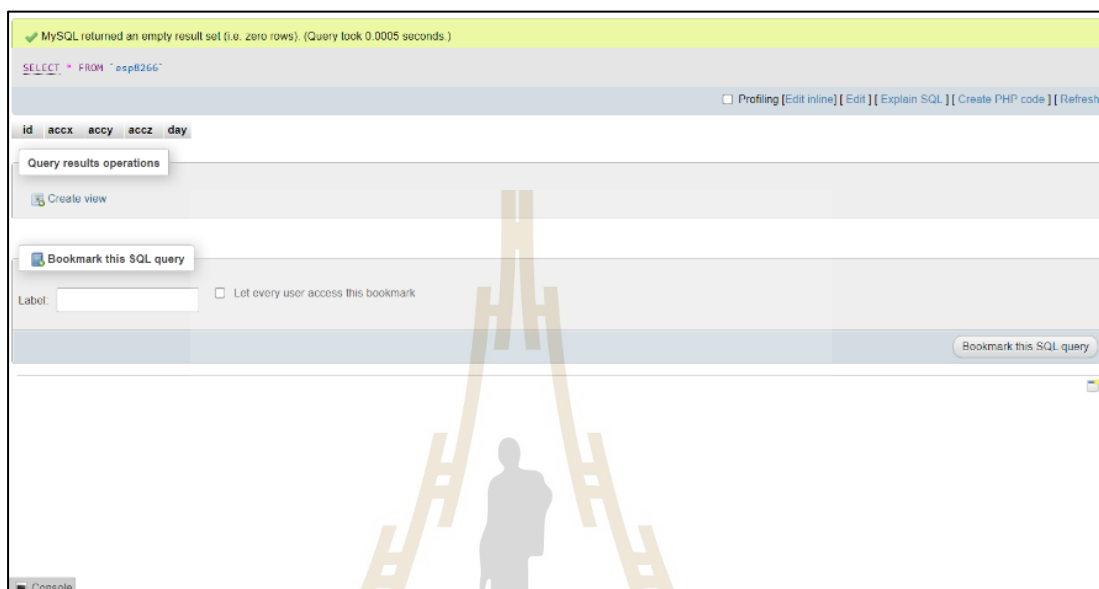
3.3 การออกแบบฮาร์ดแวร์

วงจรตรวจรู้ค่าความสั่นสะเทือน ใช้เซ็นเซอร์ AXDL345 สามารถวัดความเร่งได้ 3 แกน ประกอบไปด้วยแกน X แกน Y และแกน Z สามารถเลือกค่าสัญญาณการวัดได้ตั้งแต่ ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g ไปจนถึง ± 16 g เซ็นเซอร์ ADXL345 วัดความเร่งแบบไดนามิกหน่วยการวัดจะเป็นเมตรต่อวินาที กำลังสอง รวมถึงการตอบสนองการทำงานที่ความถี่สูงได้ สามารถนำมาทำงานร่วมกับ ไมโคร ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลไปยังฐานข้อมูลโดยการเขียนชุดคำสั่งใน โปรแกรมอาคุยโนไอดีอี (Arduino IDE) ให้รับค่าจากเซ็นเซอร์ ADXL345 และส่งค่าการ สั่นสะเทือนไปเก็บไว้ฐานข้อมูล MySQL ผ่านการส่งค่าสั่นสะเทือนด้วยวิธีการส่งค่าไปยังลิงค์ URL ที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งการต่อวงจรระหว่างเซ็นเซอร์ AXDL345 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และชุดจ่ายไฟเชื่อมต่อมาจากแบตเตอรี่ลิเธียม โดยขั้นตอนการพัฒนาฮาร์ดแวร์เพื่อใช้ในการวัดค่า ความสั่นสะเทือนสามารถแสดงเป็นแผนภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้



3.4 การสร้างระบบฐานข้อมูล

1) จำลองเว็บไซต์เฟิร์ฟเวอร์ฐานข้อมูลด้วยโปรแกรมจำลองฐานข้อมูล XAMPP เพื่อใช้ฐานข้อมูล MySQL ในการเก็บข้อมูลค่าการสั่นสะเทือน



รูป 3.1 แสดงตัวอย่างฐานข้อมูลที่ใช้ในการเก็บค่าสั่นสะเทือน

- 2) สร้างตารางเก็บข้อมูลในฐานข้อมูล MySQL โดยจะมีตารางเก็บค่าแนวแกน X, Y และแนวแกน Z
- 3) เขียนโค้ดภาษา PHP เพื่อติดต่อฐานข้อมูล MySQL ให้สามารถเก็บค่าการสั่นสะเทือนผ่านลิงค์ URL

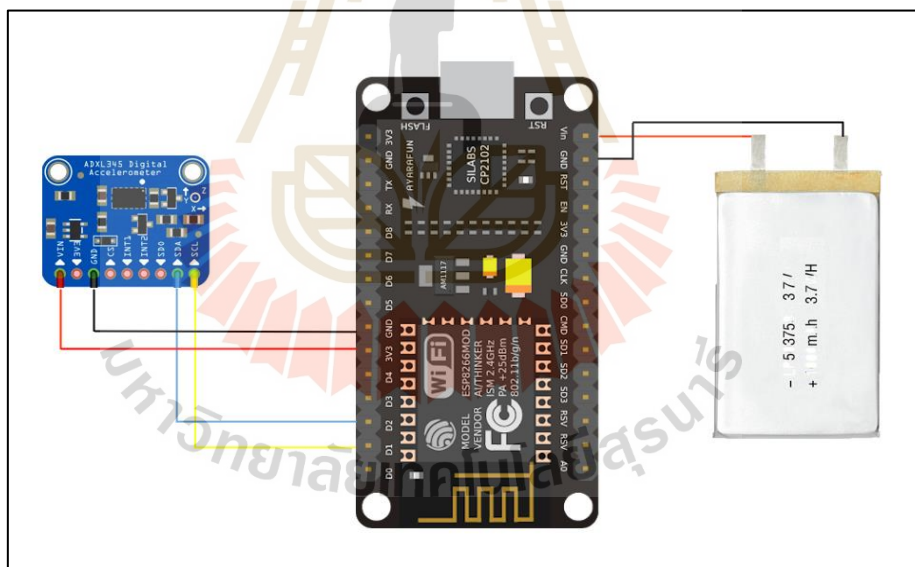
3.5 การประกอบอุปกรณ์ตรวจรู้

1) ประกอบ ESP32 กับ ADXL345 โดยเชื่อมต่อดังนี้ GND เข้า GND, VCC เข้า VCC, SDA เข้า D21, SCL เข้า D22 ตามลำดับ ดังรูป 3.3

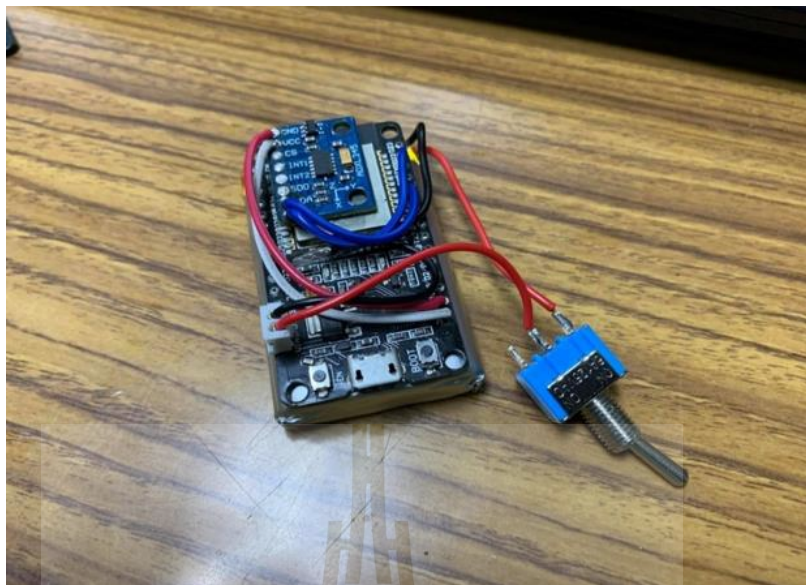
LOLIN32 Connection	Module Connection
3v3	VCC
Gnd	Gnd
SDA 21	SDA
SCL 22	SCL

รูป 3.2 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อ ESP32 กับ ADXL345

2) ประกอบ ESP32 กับ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนขนาด 2000 mAh แรงดันไฟในการชาร์จประมาณ 3.7 V โดยขั้วบวกต่อเข้า VIN และขั้วลบต่อเข้า GND และวงจรการประกอบ ESP32 กับ ADXL345 สามารถแสดงได้ดังรูป 3.4



รูป 3.3 แสดงตัวอย่างวงจรการเชื่อมต่อ ESP32 กับ ADXL345



รูป 3.4 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อ ESP32, ADXL345, แบตเตอรี่, สวิตช์ เปิด-ปิด

3) นำ ESP32 ที่เชื่อมต่อกับ ADXL345 และแบตเตอรี่ ประกอบเข้ากล่องอลูมิเนียมขนาด 23x44x60 mm.



รูป 3.5 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจรู้

3.6 การสร้างแบบจำลองสถานการณ์

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim® ซึ่งเป็นโปรแกรมสร้างแบบจำลองได้ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ แบบ Real Time สามารถจำลองระบบได้หลากหลายระบบ โดยการเลียนแบบสถานการณ์การปฏิบัติของระบบการทำงานต่าง ๆ อาทิเช่น ออกแบบคลังสินค้า (Warehouse) ระบบการผลิต (Manufacturing) ระบบการขนถ่ายวัสดุ (Material Handling) และยังสามารถเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล (Database Connectors) เช่น MySQL, SQL Server เป็นต้น การนำเทคโนโลยี Simulation มาประยุกต์ใช้กับกระบวนการทำงาน เพื่อช่วยวิเคราะห์แก้ไขปัญหาคือเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ระบบซอฟต์แวร์ Flexsim Simulation ถือเป็นโปรแกรมสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ที่สามารถใช้วิเคราะห์การรับและจ่ายสินค้าได้ (Input/Output Analysis) พร้อมทั้งแสดงการจำลองเพื่อวางแผนในการควบคุมวัสดุคงคลัง (Inventory Control) การวิเคราะห์ Performance ของสายการผลิตได้อย่างหลากหลาย เช่น OEE, Utilization, WIP, Throughput, Productivity และอื่นๆ

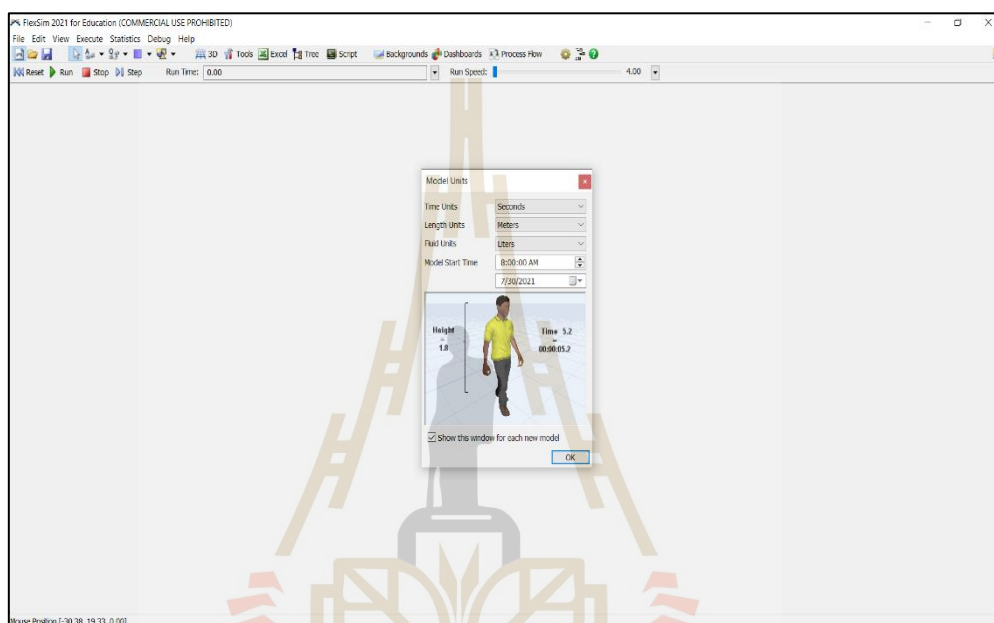


รูป 3.6 แสดงตัวอย่างโปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim®

เมื่อทำการกดสร้างโมเดลใหม่ (New Model) จะเข้าสู่การกำหนดค่าพื้นฐานของโปรแกรม จะเป็นการตั้งค่าหน่วยที่จะใช้ในโมเดล ประกอบไปด้วยหน่วยเวลา, ความยาว และหน่วยของการ

ไหลในงานวิจัยนี้จะกำหนดหน่วยเวลาเป็นวินาที กำหนดหน่วยความยาวเป็นเมตร และกำหนดไหลการไหลเป็นลิตร เพื่อเป็นค่าที่จะใช้ในโมเดล

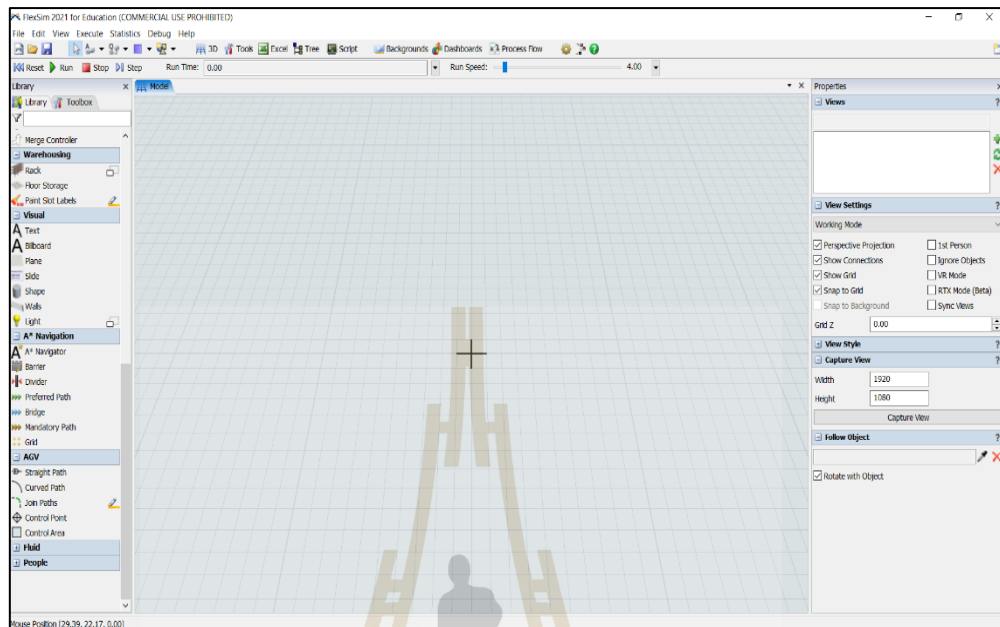
ในงานวิจัยนี้จะกำหนดหน่วยเวลาเป็นวินาที กำหนดหน่วยความยาวเป็นเมตร และกำหนดหน่วยการไหลเป็นลิตร เพื่อเป็นค่าที่จะใช้ในโมเดล



รูปที่ 3.7 แสดงหน้าต่างกำหนดค่าพื้นฐานของโปรแกรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

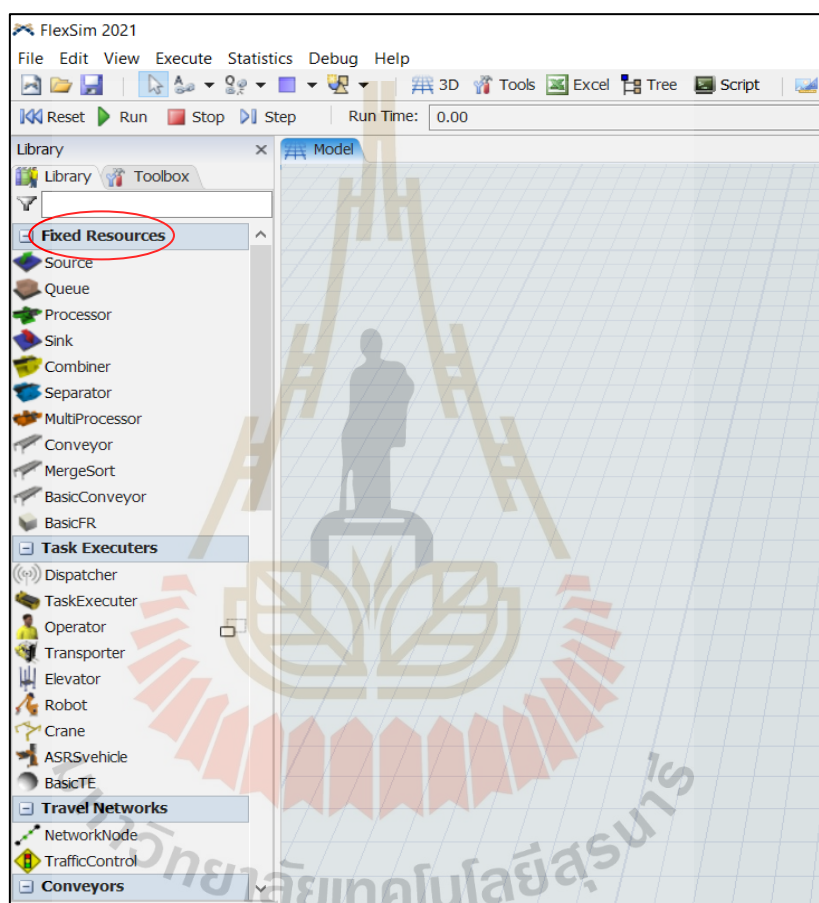
เมื่อกำหนดหน่วยของโปรแกรมเรียบร้อยแล้วจะเข้าสู่หน้าจอโปรแกรมจำลองสามารถแสดงดังรูป



รูปที่ 3.8 แสดงหน้าต่างโปรแกรมจำลอง

3.6.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Flexsim®

แบบจำลองด้วยโปรแกรม Flexsim® ในงานวิจัยนี้จะทำงานร่วมกับระบบฐานข้อมูล MySQL ที่เป็นระบบจัดเก็บข้อมูลที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะเก็บค่าการสิ้นสະเทือนที่ได้จากการวัดค่าด้วยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IOT) มาเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ โดย Object ที่จะใช้จะอยู่ใน Library Fixed Resources ของโปรแกรม สามารถแสดงดังรูป



รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่าง Library Fixed Resource

ในงานวิจัยนี้จะใช้ Object ที่อยู่ในกลุ่ม Fixed Resources จะประกอบไปด้วย Source, Queue, Processor และ Sink ในการวางอยู่ในพื้นที่แสดงโมเดล ส่วนการแสดงผล 3 มิติจะใช้ Object ที่อยู่ในกลุ่ม Visual ซึ่งแบบจำลองจะสามารถแสดงผลค่าการสิ้นสະเทือนผ่านหน้าจอ และพยากรณ์การสิ้นสະเทือนด้วยวิธีกึ่งเฉลี่ย (semi-average method) และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) โดยมีขั้นตอนดังนี้

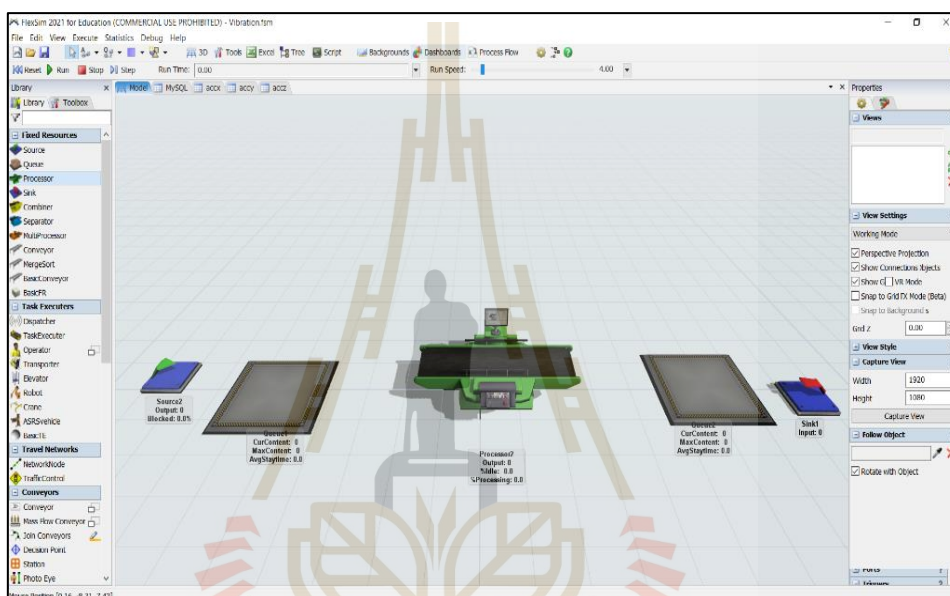
1) วาง Object ให้ได้ตามต้องการโดยประกอบไปด้วย Source, Queue, Processor และ Sink ซึ่งอยู่ในกลุ่มของ Fixed Resources โดยวิธีการแสดงดังนี้

Step 1 >> คลิกซ้ายค้างที่ Source และลากลงมาวางในพื้นที่โมเดล

Step 2 >> คลิกซ้ายค้างที่ Queue และลากลงมาวางในพื้นที่โมเดล

Step 3 >> คลิกซ้ายค้างที่ Processor และลากลงมาวางในพื้นที่โมเดล

Step 4 >> คลิกซ้ายค้างที่ Sink และลากลงมาวางในพื้นที่โมเดล



รูป 3.10 แสดงตัวอย่างการวาง Object

2) เชื่อมต่อระหว่าง Object ด้วยการเชื่อมต่อแบบ Output to Input หรือกด A ค้างคลิกที่ Object ไปยัง Object และทำการตั้งค่า โดยวิธีการแสดงดังนี้

Step 1 >> กดปุ่ม A ค้างให้เมาส์เปลี่ยนเป็นรูปโซ่

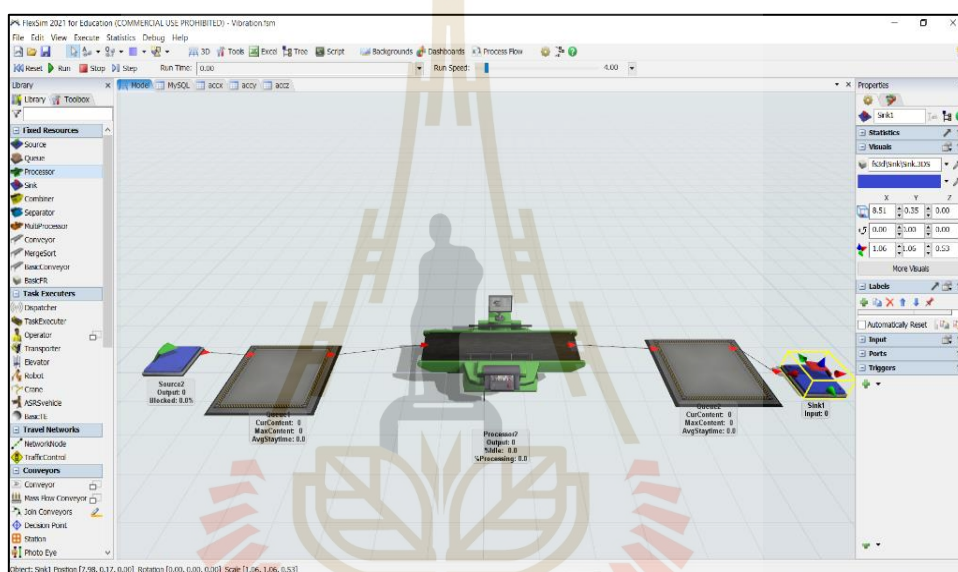
Step 2 >> คลิกซ้ายที่ Source 1 ครั้ง โดยที่กด A ค้างอยู่และเอามาสีไปคลิกที่ Queue 1 ครั้ง ตามด้วย Processor 1 ครั้ง ตามด้วย Queue 1 ครั้ง ตามด้วย Sink 1 ครั้ง

Step 3 >> ปลดปล่อยปุ่ม A

Step 4 >> ดับเบิลคลิก Source เลือกแถบ Triggers

Step 5 >> เลือก On Message จากนั้นคลิก Edit code (รูปกระดาษ) เขียนโค้ดเพื่อให้โปรแกรมจำลองสามารถติดต่อระบบฐานข้อมูลและรับค่าจากระบบฐานข้อมูล แสดงโค้ดในภาคผนวก ก หน้า 62

Step 6 >> เลือก On Reset จากนั้นคลิก Edit code (รูปกระดาษ) เขียนโค้ดเพื่อให้โปรแกรมเริ่มรับค่าจากระบบฐานข้อมูลเมื่อมีการกดปุ่ม Reset ก่อนเริ่มแบบจำลอง แสดงโค้ดในภาคผนวก ก

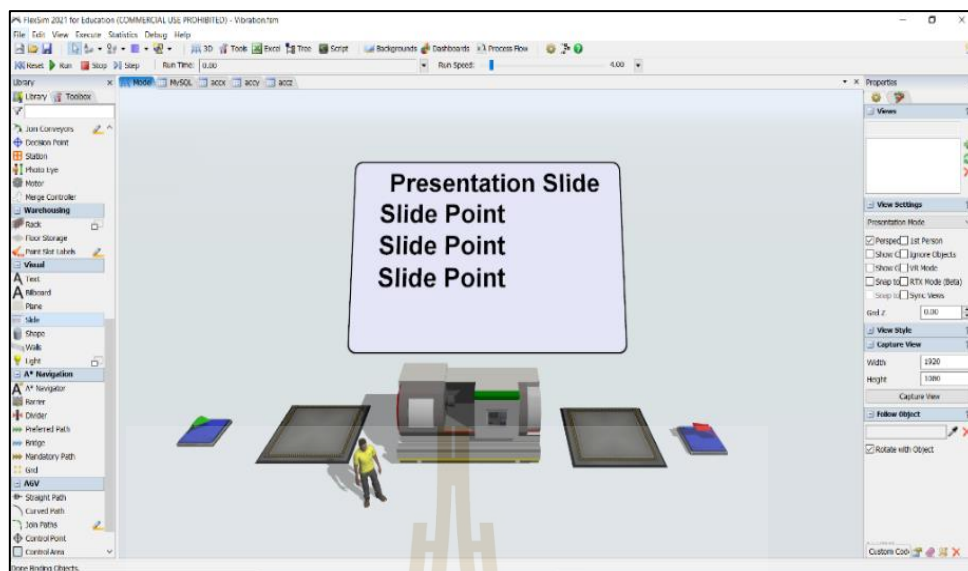


รูป 3.11 แสดงตัวอย่างการเชื่อมต่อระหว่าง Object

3) เปลี่ยนรูปร่าง Process เป็นเครื่องจักรและทำการวาง Slide ในกลุ่ม Visual โดยวิธีการแสดงดังนี้

Step 1 >> ดับเบิลคลิก Process เลือกแถบ Visuals จากนั้นนำเข้าไฟล์ที่เป็นรูปร่างเครื่องจักร โดยมีนามสกุลไฟล์เป็น (.skp)

Step 2 >> เลือกแถบ Library Visuals ลาก Object Slide ลงมาวางในพื้นที่โมเดลโมเดล



รูป 3.12 แสดงตัวอย่าง Object ในหน้าโปรแกรม Flexsim®

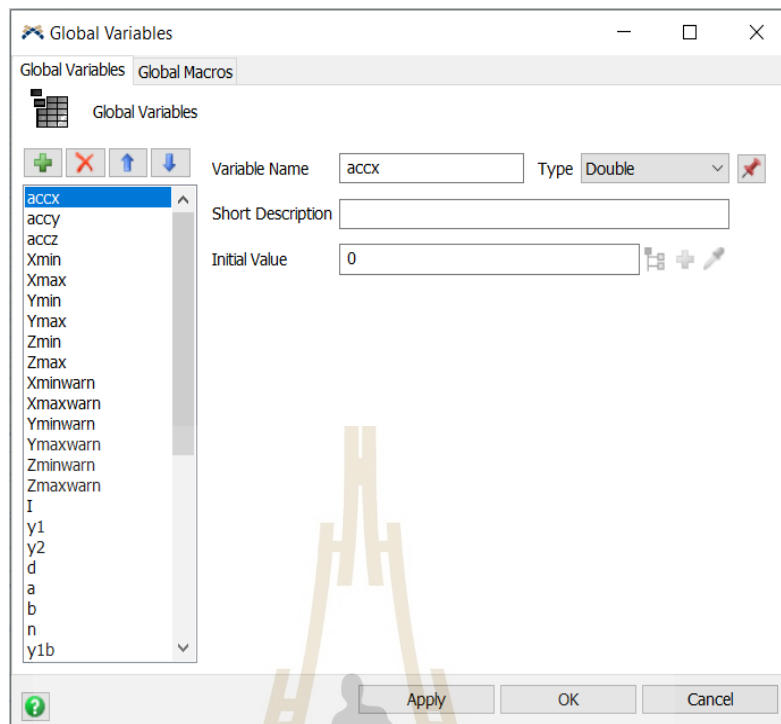
4) สร้างตัวแปรในโปรแกรมจำลอง เพื่อใช้สำหรับคำนวณหรือใช้เก็บค่าข้อมูลต่างๆ โดยวิธีการแสดงดังนี้

Step 1 >> เลือกแถบ Toolbox คลิกสัญลักษณ์บวก

Step 2 >> เลือกแถบ Modeling Logic เพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมา

Step 3 >> หน้าต่าง Global Variable ให้เลือกแถบ Global Variable

Step 4 >> ตั้งชื่อตัวแปรและเลือกประเภทของตัวแปร หากต้องการเพิ่มตัวแปรใหม่ ให้คลิกสัญลักษณ์บวกในหน้าต่าง Global Variable



รูป 3.13 แสดงตัวอย่างการสร้างตัวแปรใน โปรแกรม Flexsim®

5) สร้าง GUI ใหม่สำหรับการใส่ข้อมูลและการบันทึกค่า เพื่อให้ตอบสนองตามความต้องการของผู้ใช้งาน โดยวิธีการแสดงดังนี้

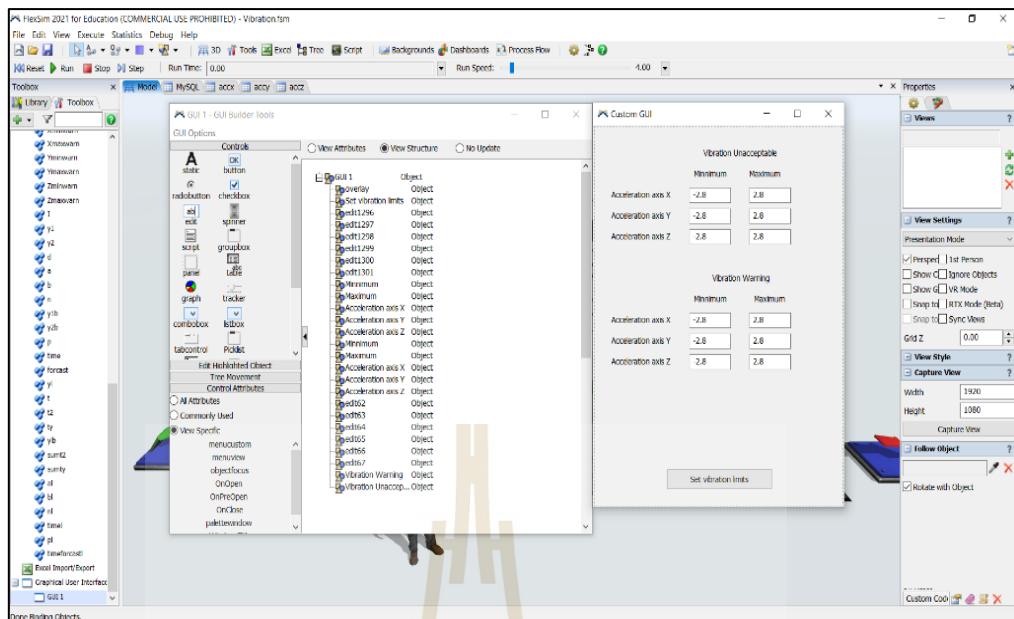
Step 1 >> เลือกแถบ Toolbox คลิกสัญลักษณ์บวก

Step 2 >> เลือกแถบ Modeling Logic เพื่อที่จะสร้างหน้าต่าง GUI ใหม่

Step 3 >> เลือกแถบ Graphical User Interface

Step 4 >> เลือกข้อความ และช่องใส่ตัวเลขเพื่อสร้างหน้าต่าง GUI ใหม่

Step 5 >> ทำการ hotlink ช่องใส่ตัวเลขไปยังตัวแปรที่ต้องการ



รูป 3.14 แสดงตัวอย่างการสร้าง GUI ในโปรแกรม Flexsim®

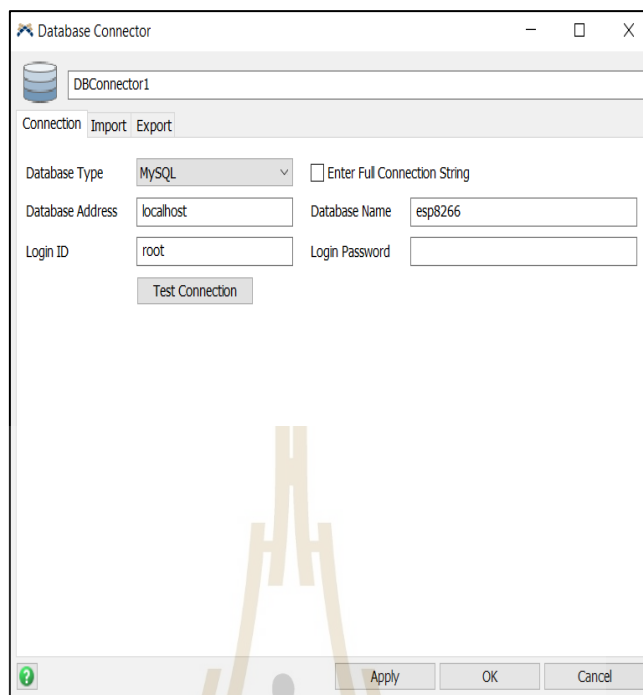
6) เชื่อมต่อฐานข้อมูล MySQL โดยวิธีการแสดงดังนี้

Step 1 >> เลือกแถบ Toolbox คลิกสัญลักษณ์บวกร

Step 2 >> เลือกแถบ Connectivity คลิก Database Connector

Step 3 >> Database Type เลือกเป็น MySQL ช่อง Database Name ให้ใส่
ชื่อฐานข้อมูลจากระบบฐานข้อมูล MySQL ที่ตั้งเอาไว้

Step 4 >> คลิก Test Connection เพื่อเช็การเชื่อมต่อ



รูป 3.15 แสดงตัวอย่างการติดต่อฐานข้อมูลด้วยโปรแกรม Flexsim®

7) สร้างแถบสีแจ้งเตือนสถานะของเครื่องจักรที่ทำการวัดค่าด้วยอุปกรณ์ตรวจสอบ ซึ่งแถบสีจะช่วยบ่งบอกสถานะของเครื่องจักรว่าการทำงานปกติหรือไม่ โดยกำหนด สีแดง คือไม่สามารถยอมรับได้เข้าตรวจเช็คทันที สีส้ม คือ เครื่องจักรเริ่มมีอาการผิดปกติแต่สามารถยอมรับได้ และ สีเขียว คือ เครื่องจักรสามารถทำงานได้อย่างปกติ ซึ่งค่าที่จะใช้กำหนดขอบเขตการตัดสินใจ จะใช้ค่ามาตรฐาน ISO 10816-3 โดยมีค่าไม่เกิน 0.71 mm/s เป็นสีเขียว ค่าที่อยู่ระหว่าง 0.72 mm/s ถึง 2.8 mm/s เป็นสีส้ม และค่าที่เกิน 2.8 mm/s ขึ้นไปจะเป็นสีแดง โดยวิธีการแสดงดังนี้

Step 1 >> เลือกแถบ Toolbox คลิกสัญลักษณ์บวก

Step 2 >> เลือกแถบ Process Flow คลิก General

Step 3 >> หน้าต่าง 2 มิติจะปรากฏขึ้นมา และ Library จะเปลี่ยนไป

Step 4 >> วาง Event-Triggered Source เพื่อใช้ในการรับค่าจาก 3 มิติ

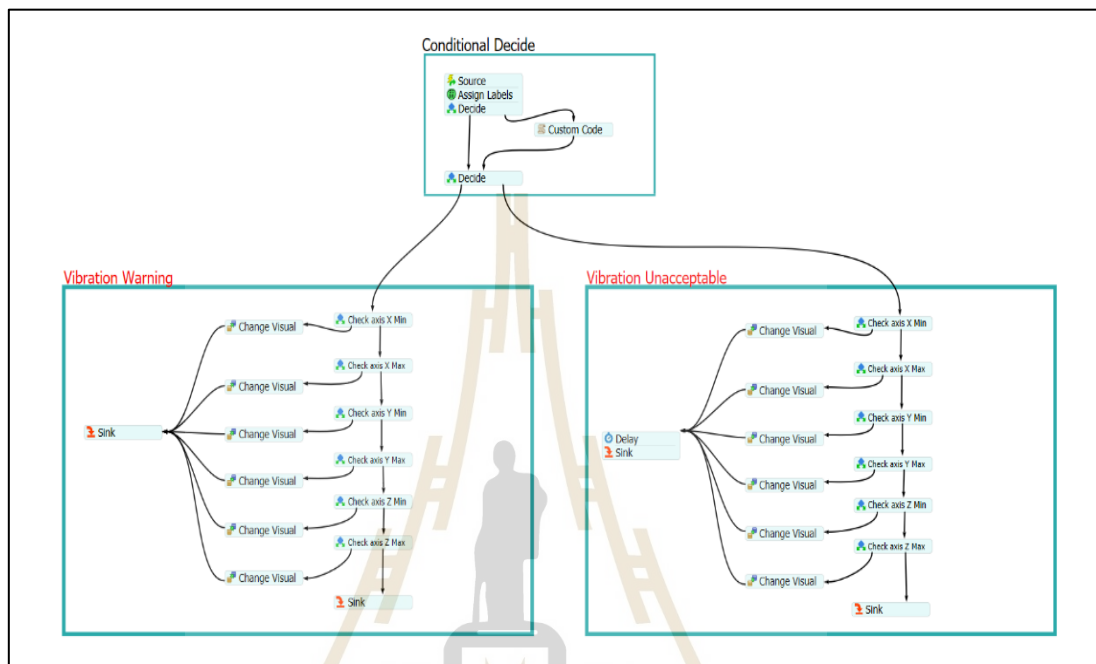
Step 5 >> วาง Assign Labels เพื่อติดค่าการสั่งสะท้อนให้ Token

Step 6 >> วาง Decide เพื่อใช้ในการตัดสินใจตัดสินในหากค่าการสั่งสะท้อนเกินในช่วงที่กำหนดหรือไม่

Step 7 >> วาง Change Visual เพื่อใช้ในการเปลี่ยนสี Object ใน 3 มิติที่กำหนดให้เป็นสีแจ้งเตือน

Step 8 >> วาง Sink เพื่อจบการทำงาน

Step 9 >> เชื่อมต่อด้วยการใช้เมาส์ลากจากขอบล่าง Object ไปยัง ขอบบน Object ที่ต้องการเชื่อมต่อ



รูป 3.16 แสดงตัวอย่างเงื่อนไขการแจ้งเตือนสถานะเครื่องจักรด้วยสี

8) สร้างตัวแปรสำหรับกราฟ Time Plot แสดงค่าที่นำเข้าจากระบบฐานข้อมูล MySQL โดยวิธีการแสดงดังนี้

Step 1 >> เลือกแถบ Toolbox คลิกสัญลักษณ์บวก

Step 2 >> เลือกแถบ Statistics คลิก Statistics

Step 3 >> เลือกแถบ Statistics คลิก Statistics Collector

Step 4 >> เลือกแถบ Events ให้ใช้ Sample คลิกที่ Processor เลือกเหตุการณ์ On Entry

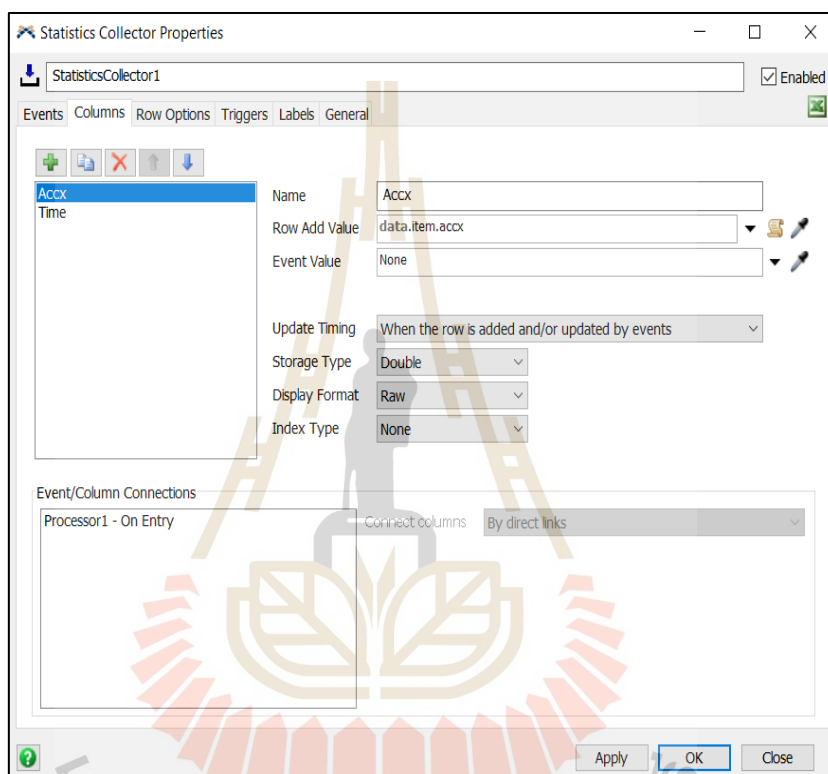
Step 5 >> เลือกแถบ Columns คลิกสัญลักษณ์บวกเพื่อสร้างตัวแปรใหม่

Step 6 >> ตั้งชื่อให้ช่อง Name เป็น Accx ช่อง Row Add Value เก็บค่าเป็น data.item.accx

Step 7 >> เลือกแถบ Columns คลิกสัญลักษณ์บวกเพื่อสร้างตัวแปรใหม่
อีกหนึ่งตัว

Step 8 >> ตั้งชื่อให้ช่อง Name เป็น Time ช่อง Row Add Value เก็บค่า
เป็น Model.dateTime

Step 9 >> ทำซ้ำ Step 1 ถึง Step 8 ให้เป็น Accy และ Acc



รูป 3.17 แสดงตัวอย่าง Statistics Collector โปรแกรม Flexsim®

9) ตั้งค่าส่วนแสดงผล 3 มิติ โดยวิธีการแสดงดังนี้

Step 1 >> ดับเบิลคลิกตัวหนังสือ Presentation Slide ใน Object Slide

Step 2 >> เลือกแถบ Text กด Edit Parameters (รูปมือ) เปลี่ยนชื่อเป็น
Monitoring

Step 3 >> ดับเบิลคลิกตัวหนังสือ Slide Point ใน Object Slide ลำดับที่ 1
เลือกแถบ Text กด Edit Code แสดงโค้ดใน ภาคนวท ก เป็น
การแสดงผลค่าแนวแกน X

Step 4 >> ดับเบิลคลิกตัวหนังสือ Slide Point ใน Object Slide ระดับที่ 2
เลือกแถบ Text กด Edit Code แสดงโค้ดใน ภาคนวท ก เป็น
การแสดงความแกน Y

Step 5 >> ดับเบิลคลิกตัวหนังสือ Slide Point ใน Object Slide ระดับที่ 3
เลือกแถบ Text กด Edit Code แสดงโค้ดใน ภาคนวท ก เป็น
การแสดงความแกน Z

10) ตั้งค่าส่วนแสดงผล 2 มิติ Graph Vibration Monitoring โดยวิธีการแสดงดังนี้

Step 1 >> เลือกแถบ Toolbox คลิกสัญลักษณ์บวก

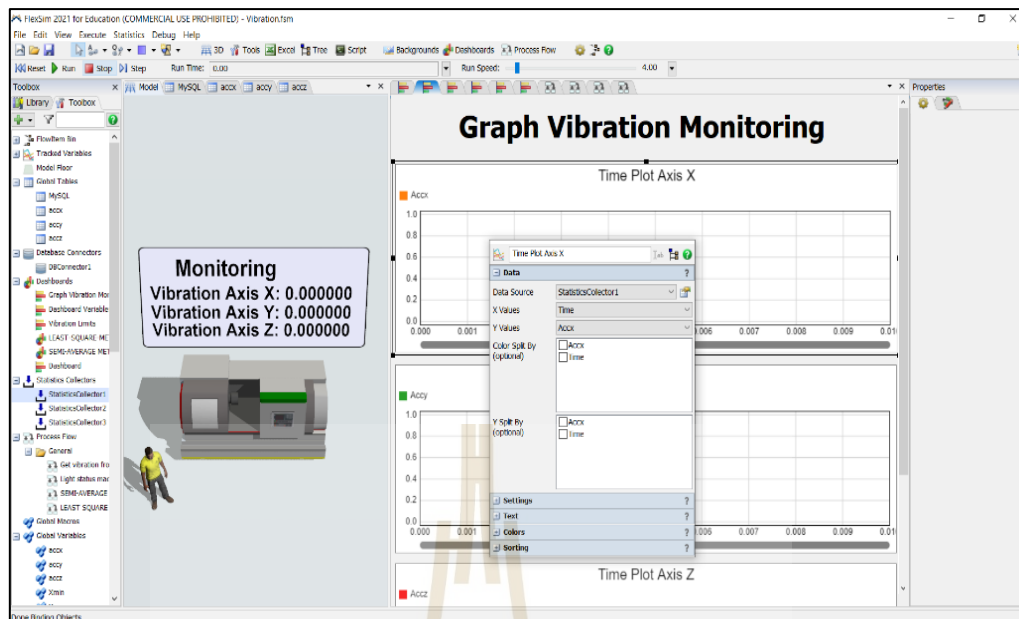
Step 2 >> เลือกแถบ Dashboards จากนั้นหน้าต่าง Dashboards จะปรากฏ
ขึ้นมา ใช้ Static Text ในการแสดงชื่อการเป็น Graph Vibration
Monitoring

Step 4 >> คลิกพื้นที่ใดๆ ในหน้า Dashboards แถบ Library จะเปลี่ยนไป
เป็นเมนูกราฟให้เลือกใช้กราฟแบบ Time Plot โดยลากลงมา
จำนวน 3 กราฟ

Step 5 >> ดับเบิลคลิกไปที่กราฟ Time Plot อันบนจะปรากฏหน้าต่างตั้ง
ค่าขึ้นมา เลือก Statistics Collector1 ซึ่งสร้างไว้แล้วเพื่อให้
แสดงค่าการสั่นสะเทือนแกน X ในช่อง Data Source

Step 6 >> ในช่อง X Value ให้เปลี่ยนเป็น Time และในช่อง Y Value ให้
เลือกตัวแปรที่ได้ตั้งไว้ให้เก็บค่าการสั่นสะเทือนแกน X

Step 7 >> ทำ Step 1- 6 ซ้ำเพื่อตั้งค่าให้กราฟ Time Plot อีกทั้งสองอัน



รูป 3.18 แสดงตัวอย่างค่าการสั่นสะเทือนด้วยโปรแกรม Flexsim®

11) สร้างแบบจำลอง 2 มิติเพื่อกำหนดค่าการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการพหุการณแบบกึ่งเฉลี่ย โดยใช้สมการ (2.1), (2.2) และตัวแปรด้านล่างเป็นตัวอ้างอิง

$$a = \bar{y}_1 \quad (2.1)$$

$$b = \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{d} \quad (2.2)$$

แทนค่า a และ b จะได้สมการแนวโน้ม $\hat{Y}_i = a + bX$ โดยที่

\hat{Y}_i = ค่าแนวโน้ม

\bar{y}_1 = ค่าเฉลี่ยข้อมูลในครั้งที่ 1

\bar{y}_2 = ค่าเฉลี่ยข้อมูลในครั้งที่ 2

d = ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางอนุกรมเวลาของครั้งแรกและครั้งหลัง

a = ค่าแนวโน้ม ณ จุดเริ่มต้นของอนุกรมเวลา

b = ความชันของเส้นแนวโน้ม

X = หน่วยเวลา

การพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยใช้สมการ (2.3), (2.4) และและตัวแปรด้านล่าง
เป็นตัวอ้างอิง

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2.3)$$

$$\hat{Y}_i = a - b\bar{X} \quad (2.4)$$

แทนค่า a และ b จะได้สมการแนวโน้ม $\hat{Y}_i = a + bX$ โดยที่

\hat{Y}_i = ค่าแนวโน้ม

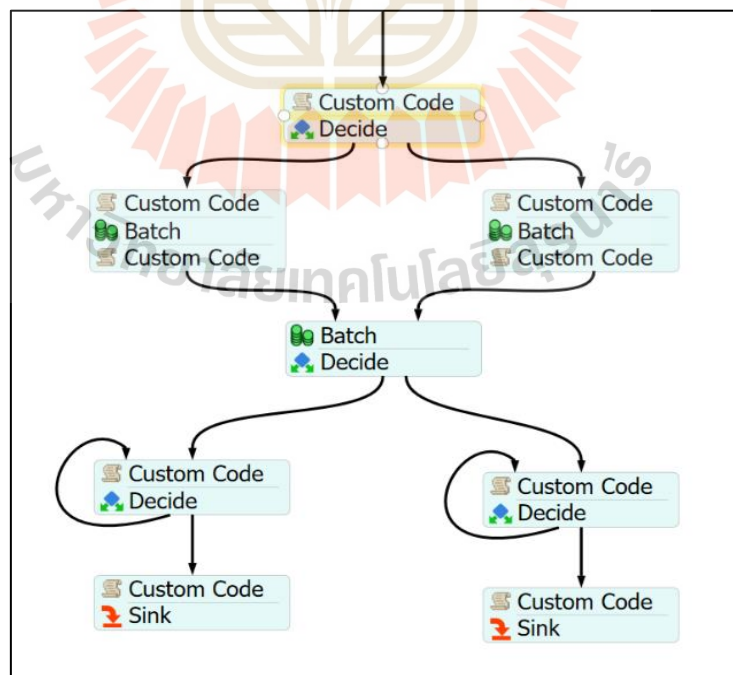
a = ค่าแนวโน้ม ณ จุดเริ่มต้นของอนุกรมเวลา

b = ความชันของเส้นแนวโน้ม

n = ค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าแนวโน้ม ต่อหนึ่งหน่วยเวลา

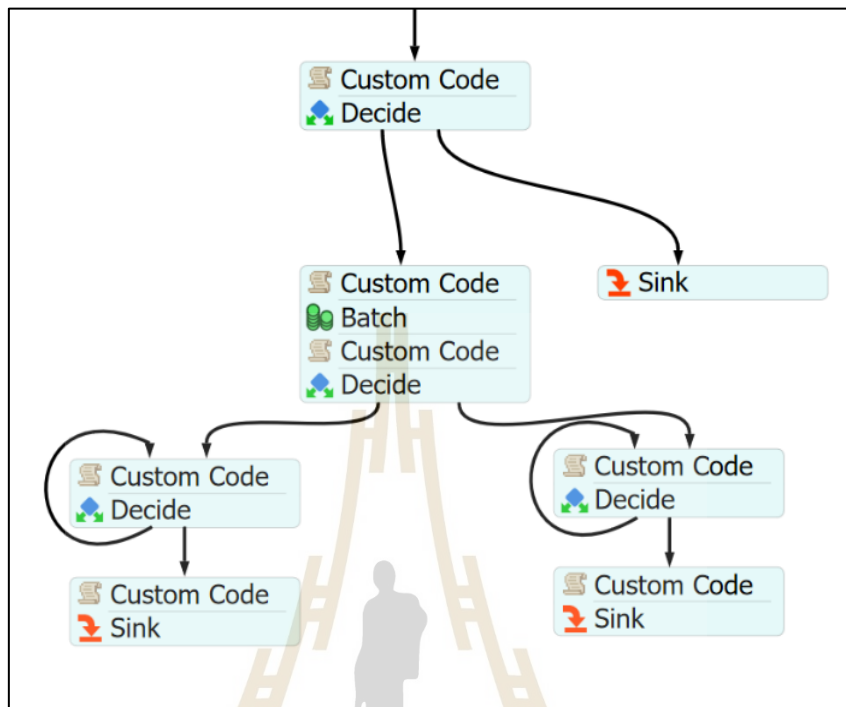
X = หน่วยเวลา

จากสมการวิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย สามารถแสดง ได้ดังนี้



รูป 3.19 แสดงตัวอย่างแบบจำลอง 2 มิติ ในการพยากรณ์วิธีกึ่งเฉลี่ย

จากสมการวิธีการพยากรณ์วิธีกำลังสองน้อยที่สุด สามารถแสดงได้ดังนี้



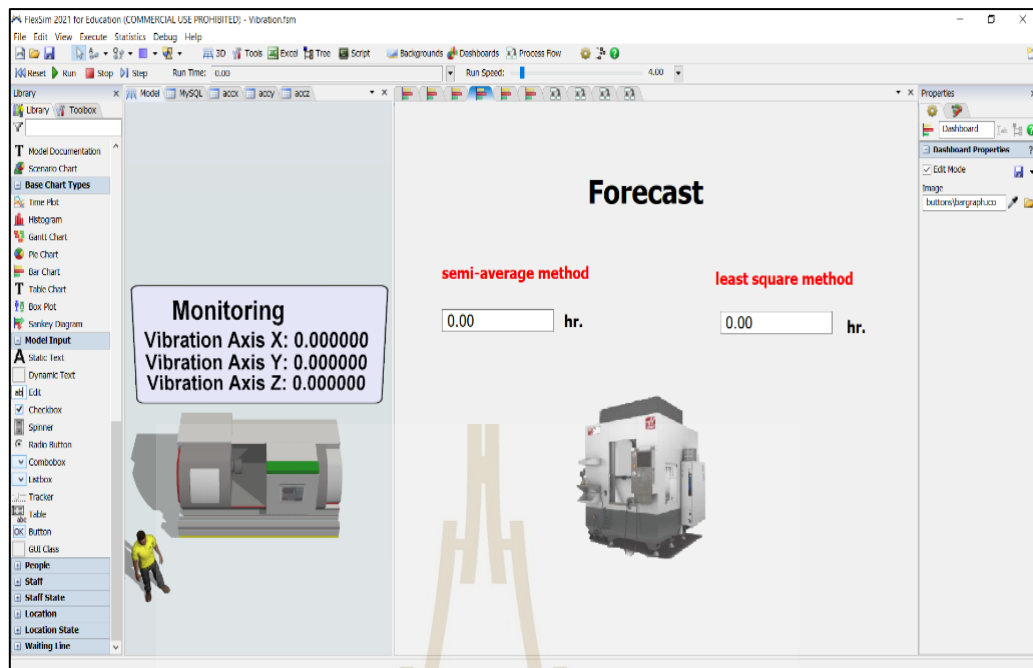
รูป 3.20 แสดงตัวอย่างแบบจำลอง 2 มิติ ในการพยากรณ์วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

12) ตั้งค่าส่วนแสดงผล 2 มิติ Forecast โดยวิธีการแสดงดังนี้

Step 1 >> เลือกแถบ Toolbox คลิกสัญลักษณ์บวก

Step 2 >> เลือกแถบ Dashboards จากนั้นหน้าต่าง Dashboards จะปรากฏขึ้นมา ใช้ Static Text ในการแสดงชื่อการเป็น Forecast, semi-average method และ least square method

Step 3 >> เลือก Dynamic Text มาวางเพื่อที่จะแสดงค่าการพยากรณ์ คลิกที่ช่อง Dynamic Text จากนั้นทำการ link ไปยังตัวแปรที่ได้กำหนด คือตัวแปรเวลาที่ได้จากการพยากรณ์ทั้งสองวิธี



รูป 3.21 แสดงตัวอย่างผลของหน้าจอแบบจำลอง

3.7 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องจำลองการสั่นสะเทือนในการจำลองการสั่นสะเทือนของการทำงานในภาวะการทำงานที่ไม่สมดุลโดยการเพิ่มน้ำหนักให้กับเพลลา 5 ส่วน ซึ่งส่วนที่หนึ่งจะเป็นการทำงานปกติของเครื่องจำลองการสั่นสะเทือน โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่ได้พัฒนาขึ้นมาที่บริเวณแบร์ริงของเครื่องจำลองการสั่นสะเทือนแสดงดังรูปที่ 3.12 จากนั้นเปิดเครื่องจำลองการสั่นสะเทือนหมุนด้วยความเร็ว 4,400 รอบต่อนาทีส่งกำลังด้วยมอเตอร์ DC ไปยังเพลลา และทำการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 20 นาที จำนวน 400 ค่าการสั่นสะเทือนในแนวแกน X, Y, และ Z โดยที่อุปกรณ์ตรวจวัดจะส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไปยังฐานข้อมูล MySQL ทุก 3 วินาที ค่าปกติที่ได้ อุปกรณ์ตรวจวัดจะเป็นหน่วยความเร่งก่อนที่จะทำการส่งค่าไปยังฐานข้อมูลจะแปลงค่าเป็นความเร็วเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณและสามารถเทียบกับมาตรฐาน ISO 10816-3 ส่วนที่สองทำการเพิ่มน้ำหนักโดยใช้สกรูน็อตจำนวน 1 คู่เข้าไปที่โหลดของเพลลา โดยน้ำหนักของสกรูน็อตจำนวน 1 คู่เท่ากับ 0.63 กรัม (g) แสดงดังรูปที่ 3.13 จากนั้นทำการเปิดเครื่อง จากนั้นทำการเปิดเครื่องจำลองการสั่นสะเทือนและเก็บข้อมูลเช่นเดียวกันกับส่วนที่หนึ่ง เมื่อเก็บข้อมูลครบตามเวลาที่กำหนดแล้วทำการเพิ่มสกรูน็อตอีกจำนวน 1 คู่ และทำการเก็บข้อมูลซ้ำ เพิ่มน้ำหนักให้กับโหลดจนกระทั่งครบ 4 คู่ แสดงดังรูป โดยอธิบายกรณีศึกษาทั้ง 5 กรณี สามารถแสดงได้ดังนี้

กรณีที่ 1 >> ไม่ใส่สกรูน็อต

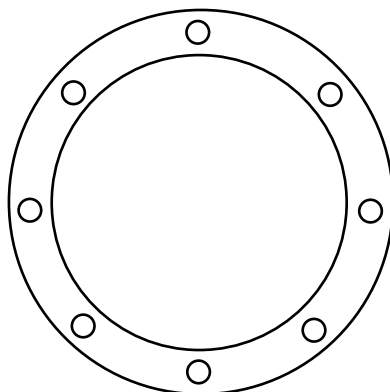
กรณีที่ 2 >> ใส่สกรูน็อตจำนวน 1 คู่

กรณีที่ 3 >> ใส่สกรูน็อตจำนวน 2 คู่

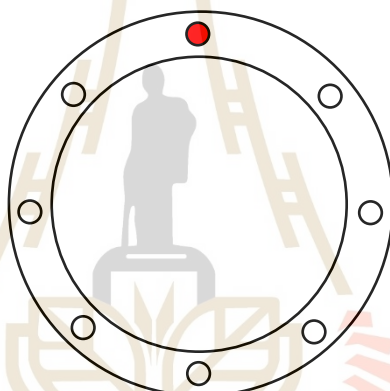
กรณีที่ 4 >> ใส่สกรูน็อตจำนวน 3 คู่

กรณีที่ 5 >> ใส่สกรูน็อตจำนวน 4 คู่

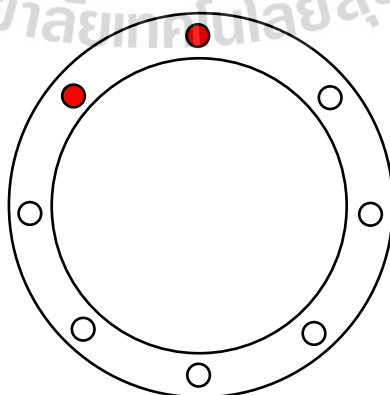
ในงานวิจัยนี้จะใช้สกรูน็อตทั้งหมดจำนวน 4 คู่ สามารถแสดงตำแหน่งการใส่สกรูน็อตเข้าไปในโหลดของเครื่องจำลองการสั่นสะเทือน ซึ่งจะใส่สกรูน็อตเข้าทีละ 1 คู่ และต้องเป็นฝั่งเดียวกัน เพื่อให้เครื่องจำลองการสั่นสะเทือนทำงานภายใต้ภาวะการทำงานที่ไม่สมดุล ดังรูปต่อไปนี้



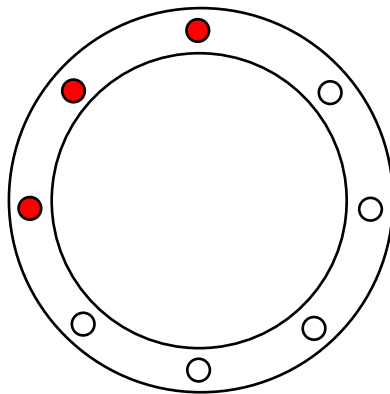
รูปที่ 3.22 แสดงตัวอย่างกรณีที่ 1 ตำแหน่งไม่ใส่สกรูน็อต



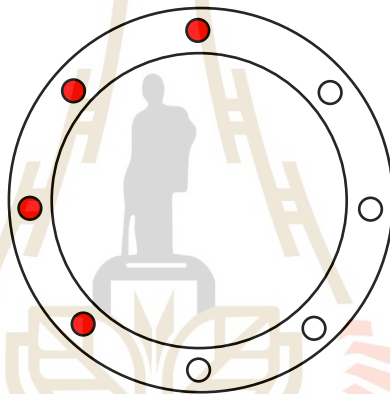
รูปที่ 3.23 แสดงตัวอย่างกรณีที่ 2 ตำแหน่งการใส่สกรูน็อตจำนวน 1 คู่



รูปที่ 3.24 แสดงตัวอย่างกรณีที่ 3 ตำแหน่งการใส่สกรูน็อตจำนวน 2 คู่



รูปที่ 3.25 แสดงตัวอย่างกรณีที่ 4 ตำแหน่งการใส่สกรูเนื้อจำนวน 3 คู่

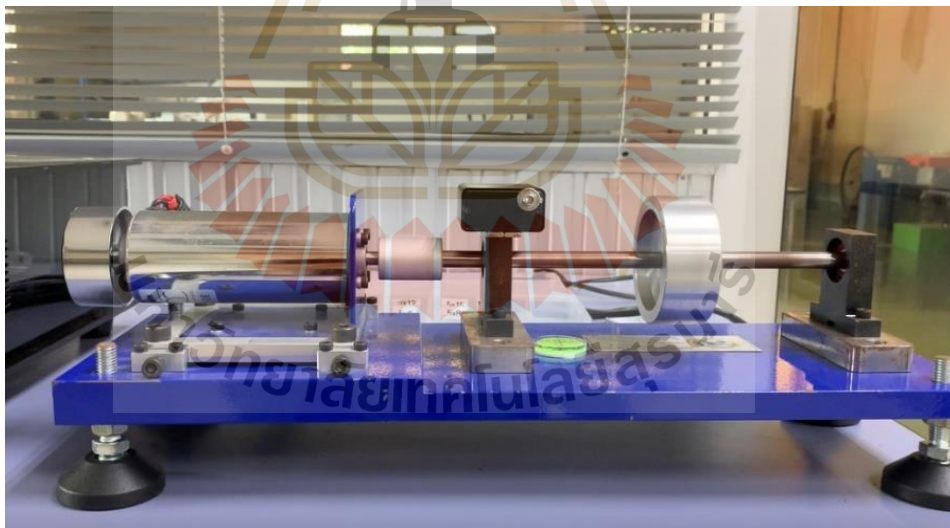


รูปที่ 3.26 แสดงตัวอย่างกรณีที่ 5 ตำแหน่งการใส่สกรูเนื้อจำนวน 4 คู่

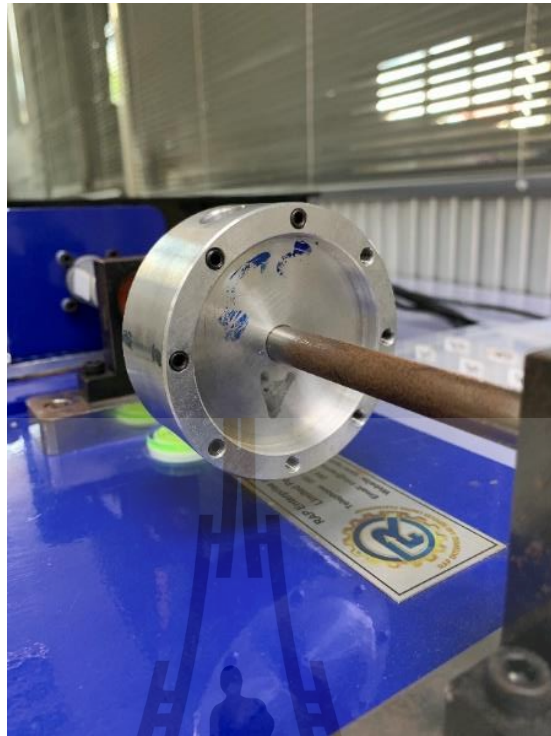
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.27 แสดงตัวอย่างน้ำหนักสกรูเนื้อจำนวน 1 คู่



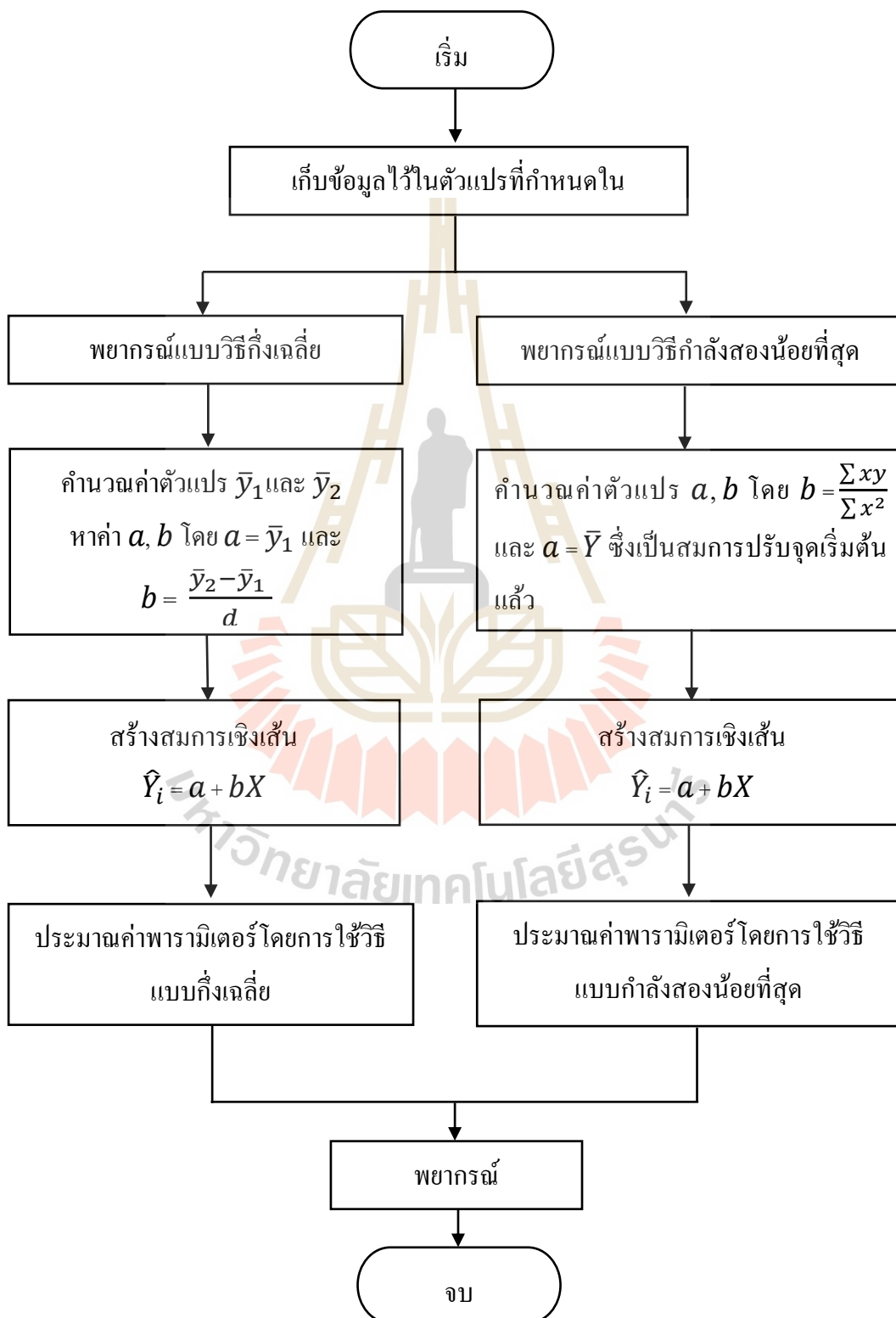
รูปที่ 3.28 แสดงตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรับบริเวณแบร์ริง



รูปที่ 3.29 แสดงตัวอย่างการใส่น้ำหนักสกรูยึดจำนวน 4 คู่

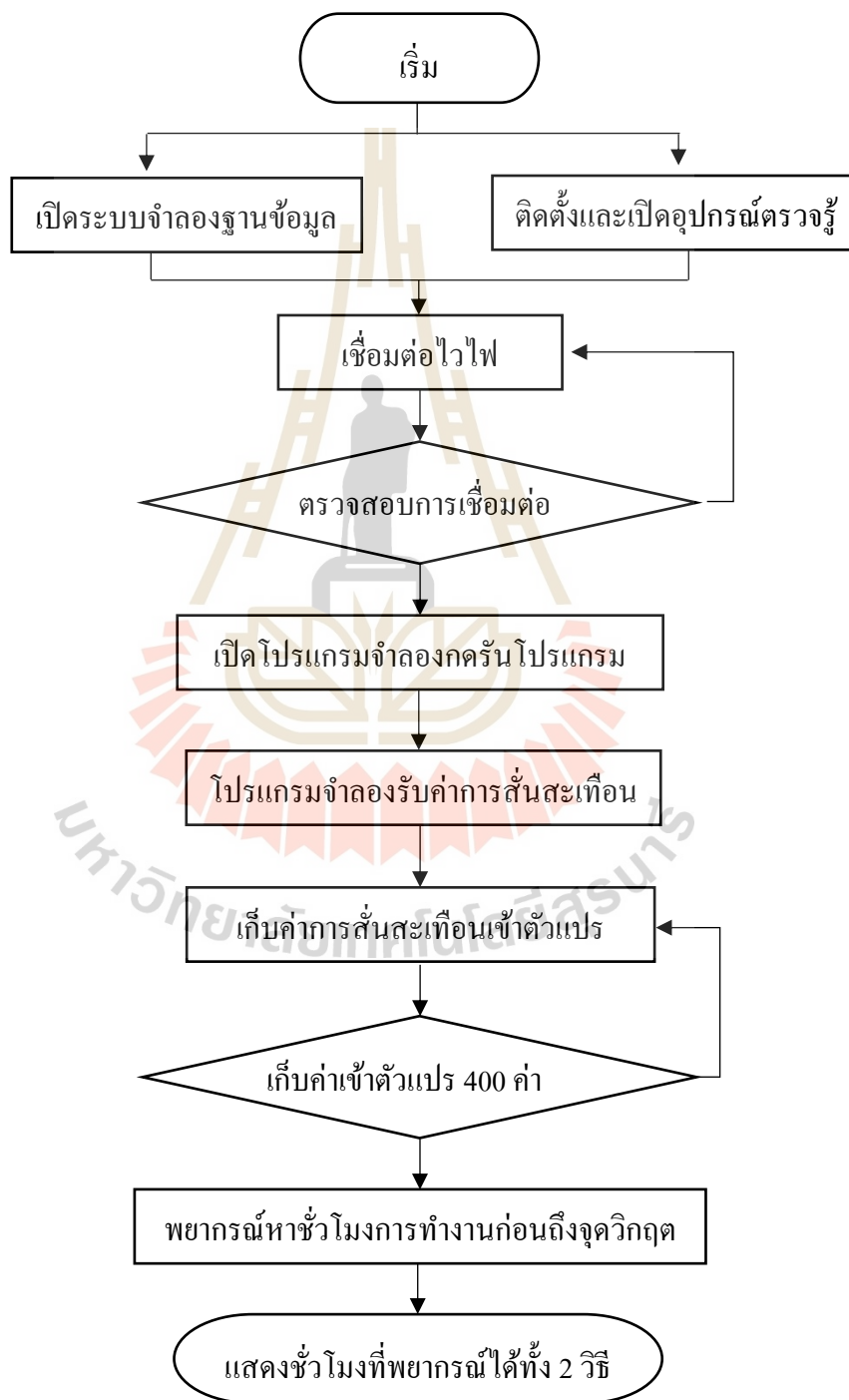


3.8 ขั้นตอนการพยากรณ์ค่าแนวโน้มการสันสะท้อนแบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด



3.9 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองและอุปกรณ์ตรวจรู้

เมื่อทำการออกแบบระบบฐานข้อมูล ฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ และออกแบบการทดลองดังกล่าวมาข้างต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ค่าวิกฤตจากมาตรฐาน ISO 10816-3 เท่ากับ 2.8 mm/s โดยในขั้นตอนการทำงานของระบบตรวจติดตามสถานะสามารถแสดงดังนี้



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบตรวจติดตามสถานะเพื่อการวางแผนซ่อมบำรุง โดยทำการประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim® ในการแสดงผลแบบเวลาจริงและการใช้ข้อมูลในการพยากรณ์การซ่อมบำรุงเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงผลวิจัยและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยวิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ในการพยากรณ์หาชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรจากลักษณะข้อมูลการสิ้นสะท้อนของเครื่องจักรที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยค่าวิกฤตที่กำหนดในงานวิจัยนี้จะเท่ากับ 2.8 มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) จากมาตรฐาน ISO 10816-3 Small machines ค่าทำการทดสอบและประมวลผลทั้งหมด 6 กรณีศึกษา โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการอุปกรณ์ตรวจรู้ (sensor)

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างอุปกรณ์ตรวจรู้ (sensor) เพื่อที่จะใช้วัดค่าการสิ้นสะท้อนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหน่วยการวัดเป็นค่าความเร่ง (m/s^2) และแปลงค่าความเร่งเป็นความเร็ว (m/s) โดยใช้อุปกรณ์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือ Internet of Things (IoT) เช่น ESP32, ADXL345 และแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน มาใช้เป็นอุปกรณ์การวัดค่าสิ้นสะท้อนที่สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต และส่งผ่านข้อมูลไปยังฐานข้อมูล โดยส่งข้อมูลการสิ้นสะท้อนตามแนวแกน 3 แนวแกนได้แก่ แกน X, Y และแกน Z ไปยังลิงก์ URL ที่ได้กำหนด และจัดเก็บเข้าระบบฐานข้อมูล MySQL ที่ได้สร้างขึ้นมาเพื่อเก็บค่าการสิ้นสะท้อน โดยอุปกรณ์ตรวจรู้จะจับยึดกับเครื่องจักรหรือมอเตอร์ที่ต้องการวัดค่าการสิ้นสะท้อนด้วยแผ่นแม่เหล็กแรงสูง ที่ติดอยู่กับอุปกรณ์ตรวจรู้ เมื่อทำการประกอบวงจรภายในและใส่กล่องอลูมิเนียมแล้ว สามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ตรวจรู้

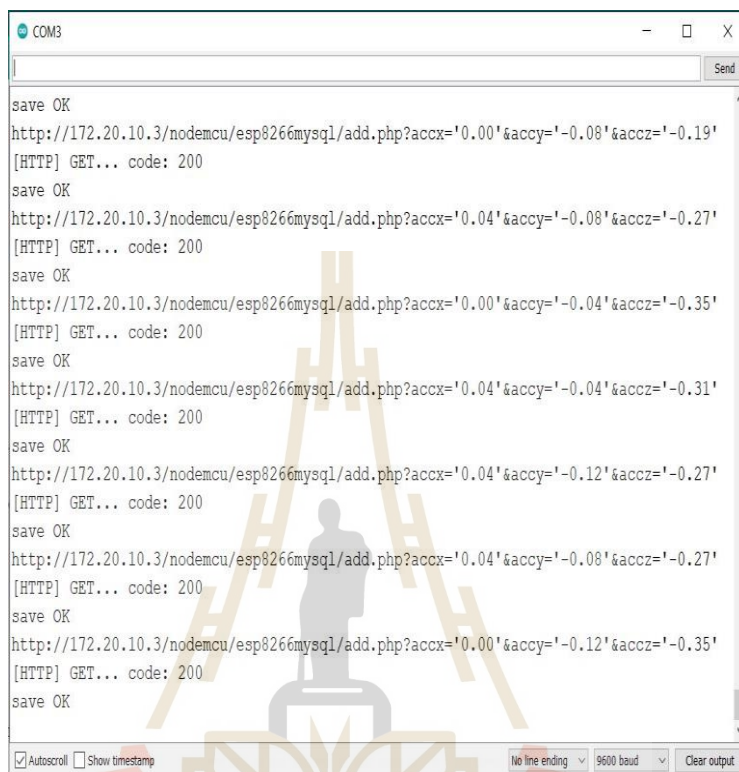
4.2 ผลการจำลองสถานการณ์แสดงผลโดยใช้โปรแกรม Flexsim®

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim® เพื่อเป็นส่วนแสดงผลออกมาในรูปแบบ 3 มิติโดยประกอบไปด้วยค่าการสั่นสะเทือนแบบเวลาจริง แสดงออกมาในรูปแบบค่าการสั่นสะเทือนทั้ง 3 แนวแกน ได้แก่ แนวแกน X, Y และแนวแกน Z โดยการเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูล MySQL ส่วนของการพยากรณ์ด้วยวิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแสดงออกมาเป็นจำนวนชั่วโมงการทำงานที่คาดว่าค่าการสั่นสะเทือนจะถึงจุดวิกฤตหรือเกินมาตรฐาน ISO 10816-3 ตามขนาดของเครื่องจักรกลไฟฟ้า

4.2.1 ข้อมูลจากโปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim®

งานวิจัยนี้ได้เก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนจากเครื่องจำลองการสั่นสะเทือนแบ่งออกเป็น 5 กรณี ได้แก่ ค่าการสั่นสะเทือนปกติ ค่าการสั่นสะเทือนระดับที่หนึ่ง ค่าการสั่นสะเทือนระดับที่สอง การสั่นสะเทือนระดับที่สาม และการสั่นสะเทือนระดับที่สี่ ตามลำดับซึ่งในแต่ละระดับการสั่นสะเทือนจะเป็นการใส่น้ำหนัก (สกรูน็อต) เข้าไปในโหลดครั้งละ 1 คู่ โดยมีน้ำหนักคู่ละ 0.63 กรัม (g) ทั้งหมดจำนวน 4 คู่ ส่งผ่านข้อมูลด้วย ESP32 โดยการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตไปยังลิงก์ URL ที่ได้กำหนดทุก 3 วินาทีต่อการส่งค่าการสั่นสะเทือนหนึ่งค่า และในแต่ละกรณีจะใช้เวลาใน

การเก็บข้อมูล 20 นาที ซึ่งแสดงรายละเอียดในการเขียนคำสั่งดังแสดงในภาคผนวก ก รูปแบบการส่งข้อมูลการสั่งสะเทือนสามารถแสดงดังรูป 4.2



```

COM3
save OK
http://172.20.10.3/nodemcu/esp8266mysql/add.php?accx='0.00'&accy='-0.08'&accz='-0.19'
[HTTP] GET... code: 200
save OK
http://172.20.10.3/nodemcu/esp8266mysql/add.php?accx='0.04'&accy='-0.08'&accz='-0.27'
[HTTP] GET... code: 200
save OK
http://172.20.10.3/nodemcu/esp8266mysql/add.php?accx='0.00'&accy='-0.04'&accz='-0.35'
[HTTP] GET... code: 200
save OK
http://172.20.10.3/nodemcu/esp8266mysql/add.php?accx='0.04'&accy='-0.04'&accz='-0.31'
[HTTP] GET... code: 200
save OK
http://172.20.10.3/nodemcu/esp8266mysql/add.php?accx='0.04'&accy='-0.12'&accz='-0.27'
[HTTP] GET... code: 200
save OK
http://172.20.10.3/nodemcu/esp8266mysql/add.php?accx='0.04'&accy='-0.08'&accz='-0.27'
[HTTP] GET... code: 200
save OK
http://172.20.10.3/nodemcu/esp8266mysql/add.php?accx='0.00'&accy='-0.12'&accz='-0.35'
[HTTP] GET... code: 200
save OK
Autoscroll Show timestamp No line ending 9600 baud Clear output

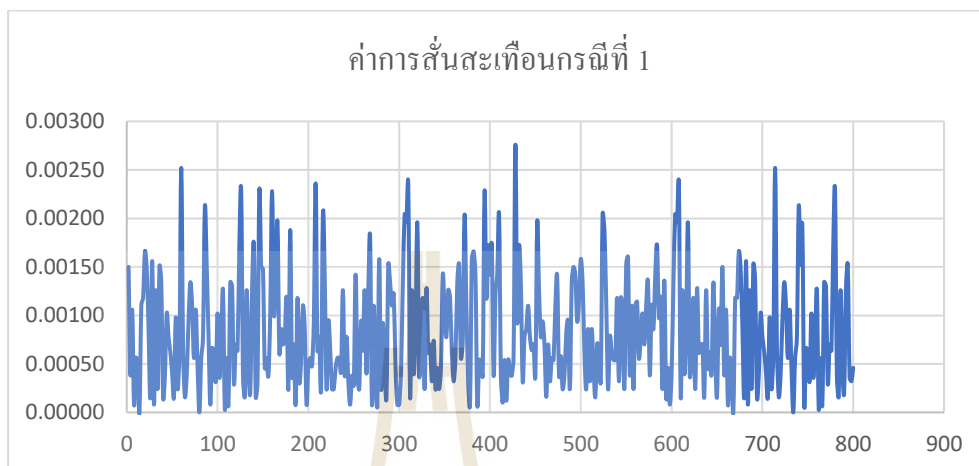
```

รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างลักษณะการส่งข้อมูลการสั่งสะเทือน

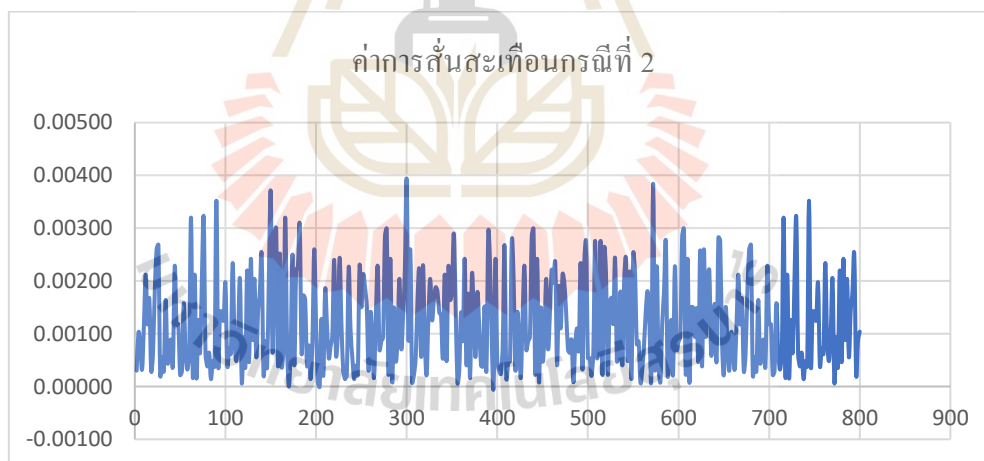
เมื่อข้อมูลบันทึกที่ระบบฐานข้อมูล MySQL โปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim® จะดึงค่าปัจจุบันจากระบบฐานข้อมูลเข้ามาในโปรแกรมเพื่อใช้ในการแสดงค่าการสั่งสะเทือนทั้ง 3 แนวส่วนการพยากรณ์ค่าการสั่งสะเทือนจะใช้เพียงค่าการสั่งสะเทือนในแนวแกน Z เพื่อใช้ในการพยากรณ์ด้วยวิธีกึ่งเฉลี่ย และวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ผลข้อมูลทั้ง 5 กรณี โดยอธิบายกรณีศึกษา ดังนี้

- กรณีที่ 1 >> ไม่ใส่สกรูน็อต
- กรณีที่ 2 >> ใส่สกรูน็อตจำนวน 1 คู่
- กรณีที่ 3 >> ใส่สกรูน็อตจำนวน 2 คู่
- กรณีที่ 4 >> ใส่สกรูน็อตจำนวน 3 คู่
- กรณีที่ 5 >> ใส่สกรูน็อตจำนวน 4 คู่

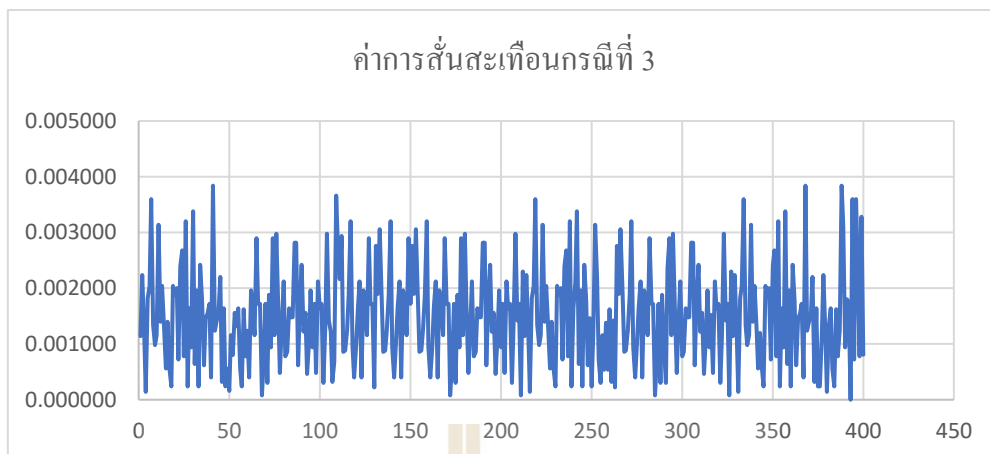
โดยลักษณะการใส่สกรูนี้ต่อถ่วงน้ำหนักแสดงในหัวข้อ 3.7 การออกแบบการทดลอง เมื่อทำการทดลองทั้ง 5 กรณีแล้ว สามารถแสดงข้อมูลการสั่นสะเทือนได้ดังนี้



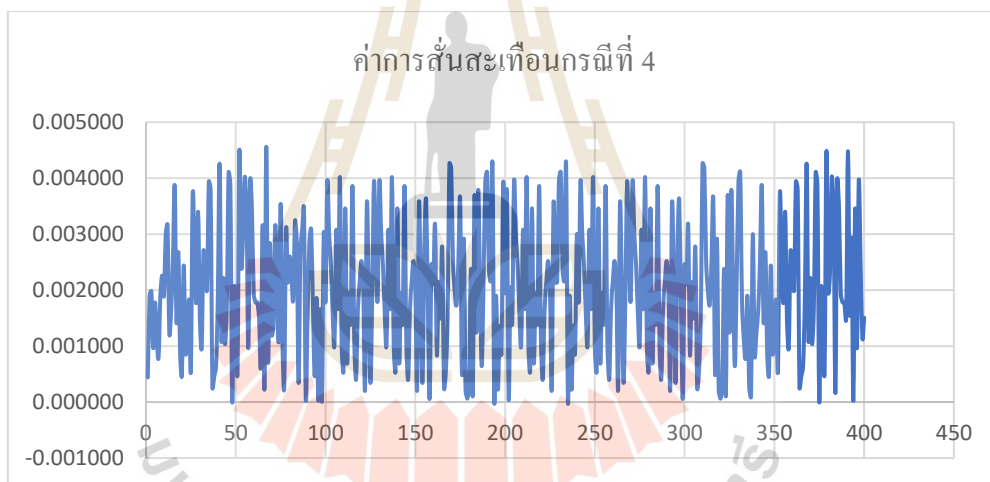
รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างกรณีที่ 1 ค่าการสั่นสะเทือนแนวแกน Z



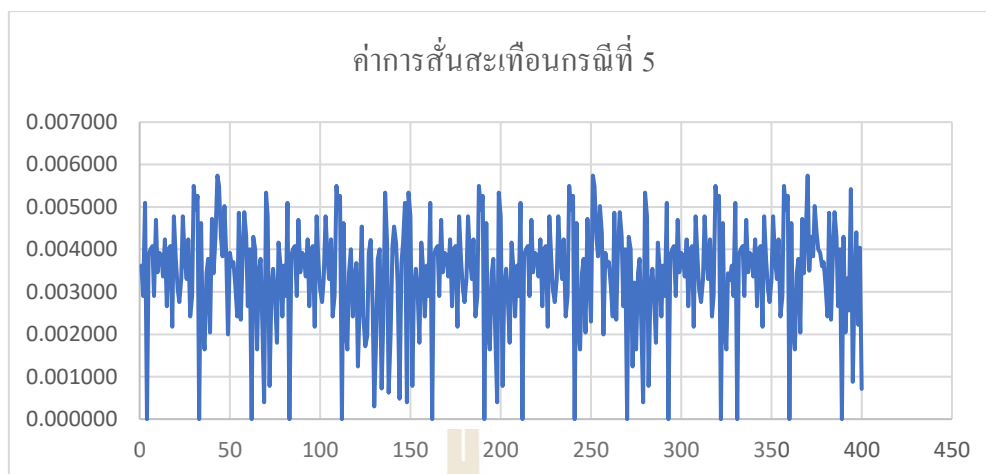
รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างกรณีที่ 2 ค่าการสั่นสะเทือนแนวแกน Z ถ่วงน้ำหนัก 1 คู่



รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างกรณีที่ 3 ค่าการสั่นสะเทือนแนวแกน Z ถ่วงน้ำหนัก 2 คู่



รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างกรณีที่ 4 ค่าการสั่นสะเทือนแนวแกน Z ถ่วงน้ำหนัก 3 คู่

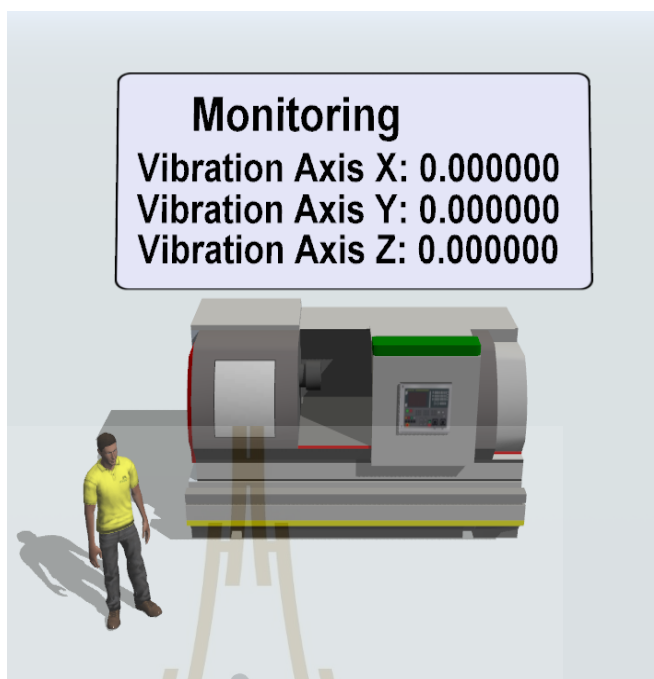


รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างกรณีที่ 5 ค่าการสั่นสะเทือนแนวแกน Z ถ่วงน้ำหนัก 4 คู่

จากรูปค่าการสั่นสะเทือนข้างต้นทั้ง 5 กรณีจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ 1 – 3 ค่าการสั่นจะเทือนจะต่างกันไม่มาก ลักษณะของข้อมูลใกล้เคียงกัน กรณีที่ 4 เริ่มเห็นความแตกต่างจากกรณีที่ 1 - 3 เนื่องจากค่าการสั่นสะเทือนสูงขึ้นชัดเจน และกรณีที่ 5 ลักษณะของการสั่นสะเทือนมีค่าแกว่งอย่างชัดเจน มากกว่าทุกกรณีจากการทดลอง และข้อมูลในแต่ละกรณีจะถูกนำไปใช้ในพยากรณ์ด้วยวิธีกึ่งเฉลี่ย และวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อหาชั่วโมงทำงานก่อนถึงจุดวิกฤตตามมาตรฐานการสั่นสะเทือน ISO 10816-3 โดยกำหนดค่าวิกฤตเท่ากับ 2.8 มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s)

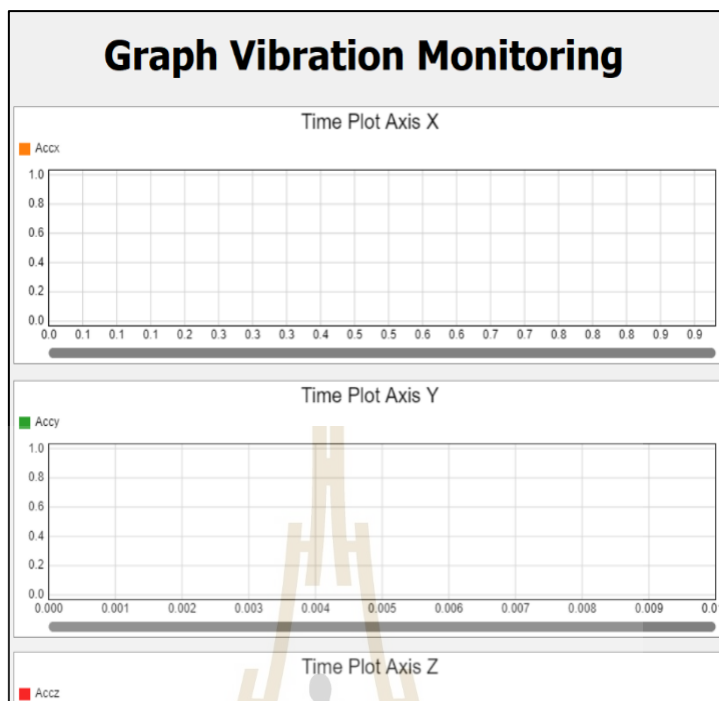
4.2.2 ผลการแสดงผลการสั่นสะเทือนด้วยโปรแกรม Flexsim®

ผลการแสดงผลการสั่นสะเทือนด้วยโปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim® แสดงผลออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งแสดงรายละเอียดวิธีการสร้างแบบจำลองดังแสดงในภาคผนวก ก โดยแบ่งออกเป็นส่วนที่ 1 แสดงผลเป็น 3 มิติจะแสดงผลเป็นจอแสดงตัวเลขค่าการสั่นสะเทือน 3 แนวแกน ซึ่งค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้จะมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาทีกำลังสอง (m/s^2) จะแปลงหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s) ส่งค่าไปที่ระบบฐานข้อมูลและค่าที่แสดงในโปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim® จะหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s) เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือนตามมาตรฐานการสั่นสะเทือน ISO 10816-3 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย



รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างการแสดงผลในโปรแกรม Flexsim® ในรูปแบบ 3มิติ

ส่วนที่ 2 จะเป็นการแสดงผลค่าต่างๆผ่านหน้าจอ 2 มิติ โดยจะประกอบไปด้วยหน้าจอแสดงผลค่าการสั่นสะเทือนในรูปแบบกราฟ หน้าจอแสดงค่าที่กำหนดผ่าน GUI ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดสำหรับขีดจำกัดการแจ้งเตือนค่าการสั่นสะเทือนในระดับที่ยอมรับได้ และค่าการสั่นสะเทือนในระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องจักรที่ทำการวัดค่าตามมาตรฐานการสั่นสะเทือน ISO 10816-3 และหน้าจอแสดงผลค่าการพยากรณ์ทั้งแบบวิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ยและการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ในแต่ละวิธีจะแสดงผลค่าผลลัพธ์จากการคำนวณเป็นชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักร ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่พยากรณ์จากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรขณะทำงานช่วงเวลาที่กำหนดคือพยากรณ์ค่าการสั่นสะเทือนทุก 400 ค่า



รูปที่ 4.9 แสดงตัวอย่างหน้าจอกราฟแสดงค่าการสั่นสะเทือน

Vibration Limits

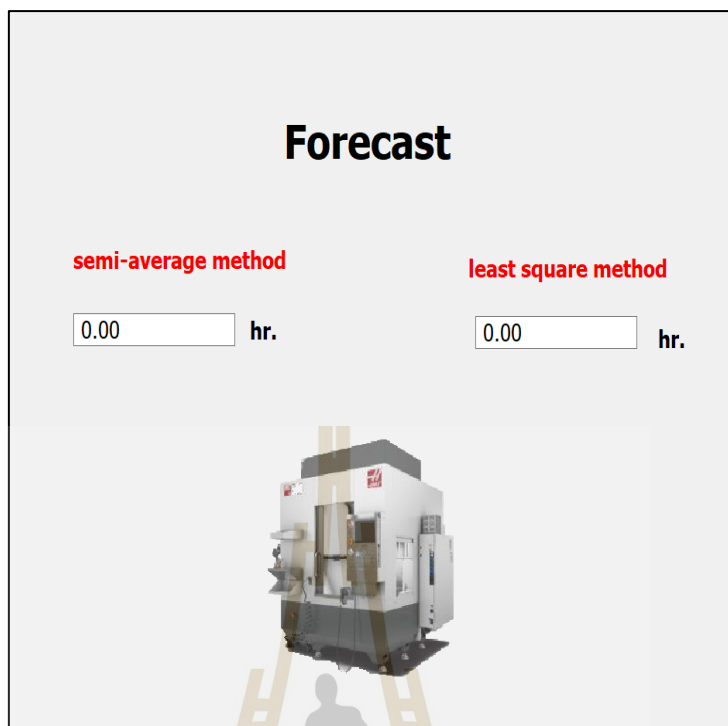
Vibration Unacceptable

	Minnimum	Maximum
Acceleration axis X	<input type="text" value="-2.80"/>	<input type="text" value="2.80"/>
Acceleration axis Y	<input type="text" value="-2.80"/>	<input type="text" value="2.80"/>
Acceleration axis Z	<input type="text" value="-2.80"/>	<input type="text" value="2.80"/>

Vibration Warning

	Minnimum	Maximum
Acceleration axis X	<input type="text" value="-2.80"/>	<input type="text" value="2.80"/>
Acceleration axis Y	<input type="text" value="-2.80"/>	<input type="text" value="2.80"/>
Acceleration axis Z	<input type="text" value="-2.80"/>	<input type="text" value="2.80"/>

รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างหน้าจอแสดงค่าลิมิต



รูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่างหน้าจอแสดงชั่วโมงการทำงาน

4.3 ผลการพยากรณ์ค่าการสิ้นสะท้อนด้วยวิธีการพยากรณ์

ค่าที่ได้จากการสร้างสมการแนวโน้มด้วยวิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จากการวัดการสิ้นสะท้อนจากเครื่องจำลองการสิ้นสะท้อนกรณีศึกษา ในเก็บข้อมูลการจำลองการสิ้นสะท้อนทั้งหมด 5 กรณี โดยมีการเพิ่มน้ำหนักให้กับโหลดเครื่องจำลองการสิ้นสะท้อนแตกต่างกันในแต่ละกรณีซึ่งแสดงรายละเอียดค่าการสิ้นสะท้อนในแต่ละกรณีดังแสดงในภาคผนวก ก โดยทำการคำนวณหาคำตอบด้วยโปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim® ในการหาผลลัพธ์ของคำตอบซึ่งผลลัพธ์ของคำตอบจะแบ่งเป็น 5 กรณีศึกษาดังนี้

4.3.1 กรณีศึกษา

จากการจำลองการสิ้นสะท้อนด้วยเครื่องจำลองการสิ้นสะท้อน ความเร็วรอบ 4400 รอบต่อนาที เก็บค่าการสิ้นสะท้อนทั้งหมด 400 ค่า โดยแสดงรายละเอียดค่าการสิ้นสะท้อน 3 แนวแกนในภาคผนวก ก และค่าที่ใช้ในการพยากรณ์จะใช้ค่าในแนวแกน Z พยากรณ์ด้วยวิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด คำนวณชั่วโมงการทำงานของ

เครื่องจักรที่คาดว่าจะสิ้นสละเพื่อนเกินมาตรฐาน ISO 10816-3 แสดงดัง ตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงผลลัพธ์ของการพยากรณ์

กรณี	วิธีกึ่งเฉลี่ย (ชม.)	วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (ชม.)
1	53,623	16,500
2	48,632	16,285
3	27,150	7,715
4	16,956	6,977
5	5,315	4,168

จากตารางที่ 4.1 พบว่า กรณีศึกษาที่ 1 การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกึ่งเฉลี่ยเท่ากับ 53,623 ชั่วโมง การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเท่ากับ 16,548 ชั่วโมง กรณีศึกษาที่ 2 การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกึ่งเฉลี่ยเท่ากับ 48,632 การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเท่ากับ 16,285 ชั่วโมง กรณีศึกษาที่ 3 การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกึ่งเฉลี่ยเท่ากับ 27,150 การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเท่ากับ 7,715 ชั่วโมง กรณีศึกษาที่ 4 การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกึ่งเฉลี่ยเท่ากับ 16,956 การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเท่ากับ 6,977 ชั่วโมง กรณีศึกษาที่ 5 การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกึ่งเฉลี่ยเท่ากับ 5,315 การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเท่ากับ 4,168 ชั่วโมง จากข้อมูลการพยากรณ์ด้วยโปรแกรมจำลองตรวจติดตามสถานะจะเห็นได้ว่าทั้งสองวิธีได้ชั่วโมงการทำงานที่แตกต่างกัน เมื่อนำเวลาไปประกอบการตัดสินใจในการวางแผนซ่อมบำรุงนั้นจะต้องเลือกเวลาหรือชั่วโมงการทำงานที่คำนวณได้น้อยที่สุดก่อน เพื่อที่จะได้เข้าไปตรวจเช็คเครื่องจักรก่อนที่การสิ้นสละเพื่อนจะไปถึงจุดวิกฤตหรือเครื่องจักรเสียหายและหยุดชะงัก

ในการทำงานจริงเครื่องจักรอาจมีการเปลี่ยนแปลงการสิ้นสละเพื่อนอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดการเสียหาย หรือเกิดจากปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อการทำงานทำให้เครื่องจักรทำงานผิดปกติ เนื่องจากเครื่องจำลองการสิ้นสละเพื่อนไม่สามารถจำลองการสิ้นสละเพื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจากการเก็บข้อมูลมาทั้งหมด 5 กรณี จึงนำข้อมูลมาจำลองว่าหากการทำงานเกิดการเปลี่ยนแปลงจากกรณีที่ 1 ไปเป็นกรณีที่ 2 จะพยากรณ์ชั่วโมงการทำงานก่อนที่จะถึงจุดวิกฤตเป็น

เวลาเท่าใด และในทำนองเดียวกันหากการเปลี่ยนแปลงจากกรณีที่ 2 ไปเป็นกรณีที่ 3 จะพยากรณ์ ชั่วโมงการทำงานก่อนที่จะถึงจุดวิกฤตเป็นเวลาเท่าใด ทั้งนี้สามารถแสดงได้ดังตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลลัพธ์ของการพยากรณ์

กรณี	วิธีกิ่งเฉลี่ย (ชม.)	วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (ชม.)
1-2	787	447
2-3	1090	585
3-4	614	388
4-5	229	160
1-2-3-4-5	230	105

จากตารางที่ 4.2 พบว่าหากจำลองการสันสะเทือนเริ่มจากกรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงไปเป็นกรณี ที่ 2 การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกิ่งเฉลี่ยเท่ากับ 787 ชั่วโมง การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธี กำลังสองน้อยที่สุดเท่ากับ 447 ชั่วโมง จากกรณีที่ 2 เปลี่ยนแปลงไปเป็นกรณีที่ 3 การพยากรณ์ เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกิ่งเฉลี่ยเท่ากับ 1,090 ชั่วโมง การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อย ที่สุดเท่ากับ 585 ชั่วโมง จากกรณีที่ 3 เปลี่ยนแปลงไปเป็นกรณีที่ 4 การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วย วิธีกิ่งเฉลี่ยเท่ากับ 614 ชั่วโมง การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเท่ากับ 388 ชั่วโมง จากกรณีที่ 4 เปลี่ยนแปลงไปเป็นกรณีที่ 5 การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกิ่งเฉลี่ยเท่ากับ 229 ชั่วโมง การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเท่ากับ 160 ชั่วโมง จากกรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงไปเป็นกรณีที่ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกิ่งเฉลี่ยเท่ากับ 230 ชั่วโมง การพยากรณ์เส้นแนวโน้มด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเท่ากับ 105 ชั่วโมง จากข้อมูลการ พยากรณ์ด้วยโปรแกรมจำลองตรวจติดตามสถานะจะเห็นได้ว่าทั้งสองวิธีได้ชั่วโมงการทำงานที่ แตกต่างกัน เมื่อนำเวลาไปประกอบการตัดสินใจในการวางแผนซ่อมบำรุงนั้นจะต้องเลือกเวลา หรือชั่วโมงการทำงานที่คำนวณได้น้อยที่สุดก่อน เพื่อที่จะได้เข้าไปตรวจเช็คเครื่องจักรก่อนที่การ สันสะเทือนจะไปถึงจุดวิกฤตหรือเครื่องจักรเสียหายและหยุดชะงัก

ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงค่าการสันสะเทือนอาจเกิดได้หลายกรณีเช่น จากกรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงไปเป็นกรณีที่ 3 หรือจากกรณีที่ 1 เปลี่ยนแปลงไปเป็นกรณีที่ 4 ได้ซึ่งการเปลี่ยนแปลง ดังกล่าวโปรแกรมตรวจติดตามสถานะก็สามารถพยากรณ์ได้เช่นกัน

4.4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการพยากรณ์

ในงานวิจัยนี้ใช้ MAD และ MSE เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการพยากรณ์อนุกรมเวลาแนวโน้มแนวโน้มคือ วิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ผลเปรียบเทียบแยกแยะแสดงตามกรณีดังนี้

4.4.1 ข้อมูลการสิ้นสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก

จากผลการศึกษาโดยการใช้ข้อมูลจากเครื่องจำลองการสิ้นสะท้อนจำนวน 400 ค่าพยากรณ์โดยใช้วิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 MAD และ MSE ของการพยากรณ์ค่าการสิ้นสะท้อนจากเครื่องจำลองการสิ้นสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก

ข้อมูล	วิธี	MAD	MSE
การสิ้นสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก	กึ่งเฉลี่ย	0.000480	0.000000329
	กำลังสองน้อยที่สุด	0.000315	0.000000212

4.4.2 ข้อมูลการสิ้นสะท้อนถ่วงน้ำหนัก 1 คู่

จากผลการศึกษาโดยการใช้ข้อมูลจากเครื่องจำลองการสิ้นสะท้อนจำนวน 400 ค่าพยากรณ์โดยใช้วิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 MAD และ MSE ของการพยากรณ์ค่าการสิ้นสะท้อนจากเครื่องจำลองการสิ้นสะท้อนถ่วงน้ำหนัก 1 คู่

ข้อมูล	วิธี	MAD	MSE
การสิ้นสะท้อนระดับที่หนึ่ง ถ่วงน้ำหนัก 1 คู่	กึ่งเฉลี่ย	0.000758	0.000000781
	กำลังสองน้อยที่สุด	0.000520	0.000000535

4.4.3 ข้อมูลการสันสะเทือนถ่วงน้ำหนัก 2 คู่

จากผลการศึกษาโดยการใช้ข้อมูลจากเครื่องจำลองการสันสะเทือนจำนวน 400 ค่า พยากรณ์โดยใช้วิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 MAD และ MSE ของการพยากรณ์ค่าการสันสะเทือนจากเครื่องจำลองการสันสะเทือนถ่วงน้ำหนัก 2 คู่

ข้อมูล	วิธี	MAD	MSE
การสันสะเทือนระดับที่สอง ถ่วงน้ำหนัก 2 คู่	กึ่งเฉลี่ย	0.000725	0.000000800
	กำลังสองน้อยที่สุด	0.000495	0.000000560

4.4.4 ข้อมูลการสันสะเทือนถ่วงน้ำหนัก 3 คู่

จากผลการศึกษาโดยการใช้ข้อมูลจากเครื่องจำลองการสันสะเทือนจำนวน 400 ค่า พยากรณ์โดยใช้วิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 MAD และ MSE ของการพยากรณ์ค่าการสันสะเทือนจากเครื่องจำลองการสันสะเทือนถ่วงน้ำหนัก 3 คู่

ข้อมูล	วิธี	MAD	MSE
การสันสะเทือนระดับที่สาม ถ่วงน้ำหนัก 3 คู่	กึ่งเฉลี่ย	0.001029	0.000001528
	กำลังสองน้อยที่สุด	0.000690	0.000001022

4.4.5 ข้อมูลการสันสะเทือนถ่วงน้ำหนัก 4 คู่

จากผลการศึกษาโดยการใช้ข้อมูลจากเครื่องจำลองการสันสะเทือนจำนวน 400 ค่า พยากรณ์โดยใช้วิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 MAD และ MSE ของการพยากรณ์ค่าการสันสะเทือนจากเครื่องจำลองการสันสะเทือนถ่วงน้ำหนัก 4 คู่

ข้อมูล	วิธี	MAD	MSE
การสันสะเทือนระดับที่สี่ ถ่วงน้ำหนัก 4 คู่	กึ่งเฉลี่ย	0.0010166	0.000001716
	กำลังสองน้อยที่สุด	0.0003695	0.000001048

จากการหาค่า MAD และ MSE ในการพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการพยากรณ์อนุกรมเวลาแนวโน้มแนวโน้มคือ วิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าค่า MAD และ MSE ของวิธีการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด มีค่าน้อยกว่าวิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย ดังนั้นวิธีการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดให้ผลแม่นยำมากกว่าวิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย การเลือกเวลาหรือชั่วโมงการทำงานที่พยากรณ์ได้จากโปรแกรมตรวจติดตามสถานะควรเลือกเวลาที่ค่า MAD และ MSE น้อยที่สุดเพื่อไปใช้ประกอบการตัดสินใจในการวางแผนซ่อมบำรุง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

หลังจากทำการพัฒนาระบบตรวจติดตามสถานะแบบเวลาจริงเครื่องจักรกลไฟฟ้าผ่านโปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim® เพื่อการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ ด้วยวิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย (semi-average method) และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) นั้นสามารถสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

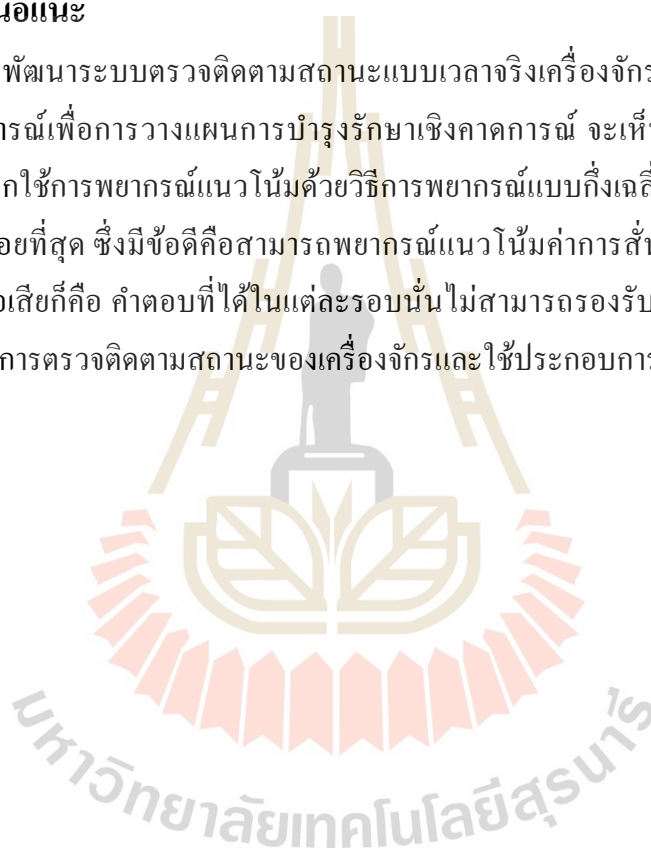
การพัฒนาระบบตรวจติดตามสถานะแบบเวลาจริงเครื่องจักรกลไฟฟ้าผ่านโปรแกรมจำลองสถานการณ์เพื่อการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ ได้ทำการวัดค่าจากเครื่องจำลองการสั่นสะเทือนทั้งหมด 5 กรณี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้อุปกรณ์ตรวจรู้วัดค่าการสั่นสะเทือนและเก็บข้อมูลไปใช้ในการพยากรณ์ ส่งผลให้สามารถรู้สถานะของเครื่องจักรและสามารถวางแผนการซ่อมบำรุงเชิงคาดการณ์จากข้อมูลการสั่นสะเทือนและการพยากรณ์ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการประยุกต์ใช้อุปกรณ์อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IOT) ในการตรวจรู้ค่าการสั่นสะเทือน ส่งข้อมูลค่าการสั่นสะเทือนไปยังฐานข้อมูล MySQL และได้สร้างแบบจำลองสถานการณ์เพื่อใช้ในการพยากรณ์ด้วยวิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ผ่านทางโปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim®

โดยได้ทำการทดสอบค่าการสั่นสะเทือนผ่านเครื่องจำลองการสั่นสะเทือนทั้งหมด 5 กรณี และ นำข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าการสั่นสะเทือนด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้มาทำการคำนวณแนวโน้มการสั่นสะเทือนและระยะเวลาการทำงานที่ค่าการสั่นสะเทือนจะเกินมาตรฐาน ISO 10816-3 และคำนวณหากค่าการสั่นสะเทือนเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละกรณี ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้คือ การพัฒนาระบบตรวจติดตามสถานะแบบเวลาจริงเครื่องจักรกลไฟฟ้าผ่านโปรแกรมจำลอง สามารถพยากรณ์หาชั่วโมงการทำงานของเครื่องจักรกลก่อนที่จะเกิดการสั่นสะเทือนเกินมาตรฐาน ISO 10816-3 ได้โดยการพยากรณ์ด้วยวิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าทั้งสองวิธีได้ชั่วโมงการทำงานที่แตกต่างกัน เมื่อจะนำเวลาไปประกอบการตัดสินใจในการวางแผนซ่อมบำรุงนั้นจะต้องเลือกเวลาหรือชั่วโมงการทำงานที่คำนวณได้น้อยที่สุดก่อน เพื่อที่จะได้เข้าไปตรวจเช็คเครื่องจักรก่อนที่การสั่นสะเทือนจะ

ไปถึงจุดวิกฤตหรือเครื่องจักรเสียหายและหยุดชะงัก และหากข้อมูลการสิ้นสะเทือนเกิดการเปลี่ยนแปลงขณะทำงาน ในแต่ละกรณีที่ได้ทำการทดลองสามารถพยากรณ์ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการพัฒนาระบบตรวจติดตามสถานะแบบเวลาจริงเครื่องจักรกลไฟฟ้าผ่านโปรแกรมจำลองสถานการณ์สามารถพยากรณ์ค่าการสิ้นสะเทือน กำหนดหาชั่วโมงการทำงานก่อนที่การสิ้นสะเทือนจะถึงจุดวิกฤตเพื่อใช้ในการประกอบการตัดสินใจในการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาระบบตรวจติดตามสถานะแบบเวลาจริงเครื่องจักรกลไฟฟ้าผ่านโปรแกรมจำลองสถานการณ์เพื่อการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ จะเห็นได้ว่ากระบวนการพยากรณ์จะเลือกใช้การพยากรณ์แนวโน้มด้วยวิธีการพยากรณ์แบบกึ่งเฉลี่ย และการพยากรณ์แบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งมีข้อดีคือสามารถพยากรณ์แนวโน้มค่าการสิ้นสะเทือนได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และข้อเสียก็คือ คำตอบที่ได้ในแต่ละรอบนั้นไม่สามารถรองรับได้ว่าเป็นค่าที่ดีที่สุด แต่สามารถใช้เป็นการตรวจติดตามสถานะของเครื่องจักรและใช้ประกอบการตัดสินใจในการวางแผนซ่อมบำรุงได้



เอกสารอ้างอิง

- ก่อเกียรติ บุญชูกุลศด, สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และ ชัยโรจน์ คุณพนิช. (2540). การวิเคราะห์การ
สิ้นสะท้อน: การเฝ้าตรวจและการจัดการการบำรุงรักษา: โรงพิมพ์ หจก. เม็ดทรายพรีนติ้ง
เฉลิมชาติ มานพ และ ศิริพร เสงเกียรติศักดิ์. (2009) การเฝ้าตรวจและตรวจสอบแบบออนไลน์
สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต.
- อภิชาติ นาควิมล. (2017). การพัฒนาระบบการจัดการบำรุงรักษาเครื่องจักรเพื่อลดการสูญเสียและ
เพิ่มประสิทธิภาพผลในการผลิต.
- Li B, Chow MY, Tipsuwan Y, Hung JC. (2000). **Neural-network-based motor rolling bearing f
ault diagnosis. IEEE transactions on industrial electronics** 2000;47:1060-9.
- Prasertsiri Varunchittapongsa (2011). **VIBRATION ANALYSIS OF TEST CHAMBER SLOT
IN TEST PROCESS.** Suranaree University of Technology
- Blödt M, Granjon P, Raison B, Rostaing G. (2008). **Models for bearing damage detection in
induction motors using stator current monitoring.** IEEE transactions on industrial
electronics 2008;55:1813-22.
- Ray Y. Zhonga, Lihui Wangb, and Xun Xua. (2017). **An IoT-enabled Real-time Machine Status
Monitoring Approach for Cloud Manufacturing.** Procedia CIRP 63 709 – 714.
- Alessandra Caggiano, Tiziana Segreto, Roberto Teti. (2016). **Cloud Manufacturing Framework
for Smart Monitoring of Machining.** Procedia CIRP 55 248 – 253
- T. Segreto, A. Caggiano, R. Teti. (2015). **Neuro-fuzzy system implementation in multiple
sensor monitoring for Ni-Ti alloy machinability evaluation.** Procedia CIRP 37 \ 193 –
198
- Chinenye D. Okwudibe and B.O Akinloye. (2017). **Design And Simulation Of Temperature
Data Logger.** American Journal of Engineering Research (AJER) e-ISSN: 2320-
0847 p-ISSN : 2320-0936

- Martínez-García, C., Osorio-Gordillo, G. L., Astorga-Zaragoza, C. M., & Puig, V. (2016, September). **Fault detection on bearings coupled to permanent magnet DC motors by using a generalized Takagi-Sugeno PI observer.** In 2016 3rd Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), (pp. 579-584). IEEE.
- I.P.S. Ahuja and J.S. Khamba. (2008). Total productive maintenance: literature review and directions pp. 709-756
- Shaohua Huang, Yu Guoa, Shanshan Zhaa, Falin Wanga, Weiguang Fanga. (2017). A real-time location system based on RFID and UWB for digital manufacturing workshop. *Procedia CIRP* 63 132 – 137
- M. Kassim, 2M.N. Ismail and 3C.K.H. Che Ku Yahaya. (2011). A Web Based Temperature Monitoring System.
- Dharmendra Singh, Divyansh Garg, Abhishek Sharma, (2018). V.R. Mishra. Approach for Machine Health Monitoring System of a Machine.
- Paul B. Bokingito Jr.a, Orven E. Llantosb. (2017). Design and Implementation of Real-Time Mobile-based Water Temperature Monitoring System.



ภาคผนวก ก

1) โค้ดการทำงานของ Source แถบ Triggers on messages สามารถแสดงได้ดังนี้

```

Object current = ownerobject(c);
treenode schedule = getvarnode(current, "schedule");
settablesize(schedule, 1, 8);
sendmessage (current,current);

Object current = ownerobject(c);
treenode schedule = getvarnode(current,"schedule");
int colNo_ArrivalTime      = 1;
int colNo_ItemName        = 2;
int colNo_ItemType        = 3;
int colNo_Quantity        = 4;
double currentSimTime = time();
double timeOffset;
string itemName = "Product";
int itemType = 1;
int quantity = 1;
int timeBetweenMessages = 3;
timeOffset = 3;

double firstName;
double SecondName;
double ThirdName;
double lastName;
//Database
Database.Connection con = Database.Connection("DBConnector1");
con.connect();
Database.ResultSet result = con.query("SELECT * FROM esp8266");
while (result.fetchNext()) {
    firstName = result["accx"];
    SecondName = result["accy"];
    ThirdName = result["accz"];
    //lastName = result["day"];
}

addtablerow(schedule);

settableheader(schedule, 1, gettablerows(schedule),
"Arrival"+numtostring(gettablerows(schedule)));
settablenum(schedule, gettablerows(schedule), colNo_ArrivalTime,
currentSimTime+timeOffset);
settablestr(schedule, gettablerows(schedule), colNo_ItemName,
itemName);
settablenum(schedule, gettablerows(schedule), colNo_ItemType,
itemType);
settablenum(schedule, gettablerows(schedule), 4, quantity);
settablenum(schedule, gettablerows(schedule), 5, firstName);
settablenum(schedule, gettablerows(schedule), 6, SecondName);
settablenum(schedule, gettablerows(schedule), 7, ThirdName);
settablenum(schedule, gettablerows(schedule), 8, lastName);

senddelayedmessage(current, timeBetweenMessages, current);

```

2) โค้ดการทำงานของ Source แถบ Triggers on reset สามารถแสดงได้ดังนี้

```
/**Custom Code*/
Object current = ownerobject(c);
treenode schedule = getvarnode(current, "schedule");
settablesize(schedule, 1, 8);
sendmessage (current,current);
```

3) โค้ดการทำงานของ Slide สามารถแสดงได้ดังนี้

```
Object current = ownerobject(c);
treenode textnode = param(1);

string starttext = /**tag:text/**/"Vibration Axis X: "/**/;

string statstr = "";
statstr = string.fromNum(accx,-3);

setnodestr(textnode, concat(starttext, statstr));
```

```
Object current = ownerobject(c);
treenode textnode = param(1);

string starttext = /**tag:text/**/"Vibration Axis Y: "/**/;

string statstr = "";
statstr = string.fromNum(accy,-3);

setnodestr(textnode, concat(starttext, statstr));
```

```
Object current = ownerobject(c);
treenode textnode = param(1);

string starttext = /**tag:text/**/"Vibration Axis Z: "/**/;

string statstr = "";
statstr = string.fromNum(accz,-3);

setnodestr(textnode, concat(starttext, statstr));
```

3) โค้ด PHP จำลองเซิร์ฟเวอร์เพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูล สามารถแสดงได้ดังนี้

```
<?php
//$temp = $_GET["temp"];
$accx = $_GET["accx"];
$accy = $_GET["accy"];
$accz = $_GET["accz"];

$servername = "localhost";
$username = "root";
$password = "";
$dbname = "esp8266";

// Create connection
$conn = new mysqli($servername, $username,$password, $dbname);
// Check connection
if ($conn->connect_error) {
    die("Connection failed: " . $conn->connect_error);
}
$sql = "INSERT INTO esp8266 (accx, accy, accz) VALUES ($accx, $accy, $accz)";

if ($conn->query($sql) === TRUE) {
    echo "save OK";
} else {
    echo "Error:" . $sql . "<br>" . $conn->error;
}

$conn->close();
?>
```

4) โค้ดโปรแกรมการทำงานของอุปกรณ์ตรวจรู้เขียนผ่านโปรแกรม อาคduino IDE

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_ADXL345_U.h>
#include <HTTPClient.h>
#define WIFI_STA_NAME "*****"
#define WIFI_STA_PASS "*****"
/* Assign a unique ID to this sensor at the same time */
Adafruit_ADXL345_Unified accel = Adafruit_ADXL345_Unified(12345);
void displaySensorDetails(void)
{
  sensor_t sensor;
  accel.getSensor(&sensor);
  Serial.println("-----");
  Serial.print ("Sensor: "); Serial.println(sensor.name);
  Serial.print ("Driver Ver: "); Serial.println(sensor.version);
  Serial.print ("Unique ID: "); Serial.println(sensor.sensor_id);
  Serial.print ("Max Value: "); Serial.print(sensor.max_value); Serial.println(" m/s^2");
  Serial.print ("Min Value: "); Serial.print(sensor.min_value); Serial.println(" m/s^2");
  Serial.print ("Resolution: "); Serial.print(sensor.resolution); Serial.println(" m/s^2");
  Serial.println("-----");
  Serial.println("");
  delay(500);
}
void displayDataRate(void)
{
  Serial.print ("Data Rate: ");
  switch(accel.getDataRate())
  {
    case ADXL345_DATARATE_3200_HZ:
      Serial.print ("3200 ");
      break;
    case ADXL345_DATARATE_1600_HZ:
      Serial.print ("1600 ");
      break;
    case ADXL345_DATARATE_800_HZ:

```

4) โค้ดโปรแกรมการทำงานของอุปกรณ์ตรวจรู้เขียนผ่านโปรแกรม อาคduino IDE (ต่อ)

```
case ADXL345_DATARATE_800_HZ:
Serial.print ("800 ");
break;
case ADXL345_DATARATE_400_HZ:
Serial.print ("400 ");
break;
case ADXL345_DATARATE_200_HZ:
Serial.print ("200 ");
break;
case ADXL345_DATARATE_100_HZ:
Serial.print ("100 ");
break;
case ADXL345_DATARATE_50_HZ:
Serial.print ("50 ");
break;
case ADXL345_DATARATE_25_HZ:
Serial.print ("25 ");
break;
case ADXL345_DATARATE_12_5_HZ:
Serial.print ("12.5 ");
break;
case ADXL345_DATARATE_6_25HZ:
Serial.print ("6.25 ");
break;
case ADXL345_DATARATE_3_13_HZ:
Serial.print ("3.13 ");
break;
case ADXL345_DATARATE_1_56_HZ:
Serial.print ("1.56 ");
break;
case ADXL345_DATARATE_0_78_HZ:
Serial.print ("0.78 ");
break;
```

4) โค้ดโปรแกรมการทำงานของอุปกรณ์ตรวจรู้เขียนผ่านโปรแกรม อาคduino IDE (ต่อ)

```
case ADXL345_DATARATE_0_39_HZ:
Serial.print ("0.39 ");
break;
case ADXL345_DATARATE_0_20_HZ:
Serial.print ("0.20 ");
break;
case ADXL345_DATARATE_0_10_HZ:
Serial.print ("0.10 ");
break;
default:
Serial.print ("???? ");
break;
}
Serial.println(" Hz");
}
void displayRange(void)
{
Serial.print ("Range: +/- ");
switch(accel.getRange())
{
case ADXL345_RANGE_16_G:
Serial.print ("16 ");
break;
case ADXL345_RANGE_8_G:
Serial.print ("8 ");
break;
case ADXL345_RANGE_4_G:
Serial.print ("4 ");
break;
case ADXL345_RANGE_2_G:
Serial.print ("2 ");
break;
default:
Serial.print ("?? ");
break;
}
```

4) โค้ดโปรแกรมการทำงานของอุปกรณ์ตรวจรู้เขียนผ่านโปรแกรม อาคยโน้ IDE (ต่อ)

```

Serial.print ("?? ");
break;
}
Serial.println(" g");
}
void setup(void)
{
Serial.begin(9600);
Serial.println();
Serial.println();
Serial.print("Connecting to ");
Serial.println(WIFI_STA_NAME);
WiFi.mode(WIFI_STA);
WiFi.begin(WIFI_STA_NAME, WIFI_STA_PASS);
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
delay(500);
Serial.print(".");
}
Serial.println("WiFi connected");
Serial.println("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
Serial.println("Accelerometer Test"); Serial.println("");
/* Initialise the sensor */
if(!accel.begin())
{
/* There was a problem detecting the ADXL345 ... check your connections */
Serial.println("Ooops, no ADXL345 detected ... Check your wiring!");
while(1);
}
displaySensorDetails();
/* Display additional settings (outside the scope of sensor_t) */
displayDataRate();
displayRange();

```


4) โค้ดโปรแกรมการทำงานของอุปกรณ์ตรวจรู้เขียนผ่านโปรแกรม อาคยโน้ IDE (ต่อ)

```
Serial.println("");
}
void loop(void)
{
  /* Get a new sensor event */
  sensors_event_t event;
  accel.getEvent(&event);
  if ((WiFi.status() == WL_CONNECTED)) {
    HTTPClient http;
    float accx = event.acceleration.x;
    float accy = event.acceleration.y;
    float accz = ((event.acceleration.z)-9.45);
    String url =
    "http://172.20.10.3/nodemcu/esp8266mysql/add.php?accx="+String(accx)+
    "&accy="+String(accy)+"&accz="+String(accz)+"";

    Serial.println(url);
    http.begin(url); //HTTP
    int httpCode = http.GET();
    if (httpCode > 0) {
      Serial.printf("[HTTP] GET... code: %d\n", httpCode);
      if (httpCode == HTTP_CODE_OK) {
        String payload = http.getString();
        Serial.println(payload);
      }
    } else {
      Serial.printf("[HTTP] GET... failed, error: %s\n", http.errorToString(httpCode).c_str());
    }
    http.end();
  }
  delay(2000);
}
```



ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 ค่าการสันสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
1	0.00039	0.00071	0.00150	28	0.0009	0.00055	0.00024
2	0.00118	0.00114	0.00038	29	0.00133	0.0011	0.00062
3	0.00027	0.00133	0.00106	30	0.00008	0.00031	0.00252
4	0.00016	0.00082	0.00008	31	0.00094	0.00024	0.00066
5	0.00067	0.00071	0.00056	32	0.00082	0.00051	0.00016
6	0.00051	0.00055	0.00048	33	0.00039	0.00071	0.00150
7	0.00027	0.00082	0.00000	34	0.00094	0.00004	0.00038
8	0.00149	0.00118	0.00110	35	0.00024	0.00086	0.00094
9	0.00149	0.00106	0.00118	36	0.00012	0.00016	0.00134
10	0.00024	0.00078	0.00166	37	0.00102	0.00008	0.00110
11	0.00149	0.00102	0.00148	38	0.00071	0.00027	0.00056
12	0.00016	0.00098	0.00086	39	0.00027	0.0009	0.00106
13	0.00082	0.00059	0.00016	40	0.00035	0.00008	0.00046
14	0.00027	0.00137	0.00156	41	0.00047	0.00063	0.00000
15	0.00024	0.00082	0.00008	42	0.00043	0.00039	0.00056
16	0.00106	0.00016	0.00126	43	0.00024	0.00082	0.00078
17	0.00059	0.00027	0.00024	44	0.00016	0.00047	0.00212
18	0.00129	0.0011	0.00150	45	0.00098	0.00012	0.00152
19	0.00051	0.00067	0.00134	46	0.00067	0.00098	0.00080
20	0.00071	0.0011	0.00016	47	0.00094	0.00012	0.00008
21	0.00051	0.00035	0.00038	48	0.00133	0.00035	0.00066
22	0.00059	0.0002	0.00102	49	0.00027	0.00051	0.00062
23	0.00024	0.00051	0.00078	50	0.00122	0.00137	0.00032
24	0.00027	0.0009	0.00062	51	0.00063	0.00082	0.00102
25	0.00137	0.00118	0.00040	52	0.00047	0.00008	0.00036
26	0.00094	0	0.00016	53	0.00094	0.0002	0.00074
27	0.0011	0.00016	0.00098	54	0.00051	0.00031	0.00126

ตารางที่ ข.1 ค่าการสันสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
55	0.00031	0.00149	0.00004	82	0.00027	0.00102	0.00102
56	0.00051	0.00078	0.00056	83	0.00063	0.00012	0.00142
57	0.00106	0.0002	0.00008	84	0.00157	0.00071	0.00196
58	0.00012	0.00157	0.00134	85	0.0002	0.00047	0.00062
59	0.00047	0.00067	0.00130	86	0.00027	0.00031	0.00086
60	0.00047	0.00055	0.00030	87	0.00047	0.00012	0.00070
61	0.00012	0.0009	0.00070	88	0.00027	0.0011	0.00078
62	0.00008	0.00067	0.00064	89	0.0002	0.0009	0.00118
63	0.00059	0.00086	0.00172	90	0.00098	0.00067	0.00024
64	0.00051	0.00024	0.00228	91	0.00055	0.00063	0.000860
65	0.00055	0.00043	0.00038	92	0.00129	0.00047	0.00050
66	0.00047	0.00027	0.00016	93	0.00063	0.00012	0.00056
67	0.00008	0.00153	0.00126	94	0.00078	0.00027	0.00048
68	0.00035	0.00094	0.00046	95	0.00008	0.00031	0.00094
69	0.00031	0.00126	0.00020	96	0.00071	0.00043	0.00236
70	0.00016	0.00106	0.00126	97	0.00075	0.00059	0.00064
71	0.00075	0.0002	0.00172	98	0.00024	0.00027	0.00078
72	0.00043	0.00031	0.00016	99	0.00016	0.0002	0.00024
73	0.00165	0.00047	0.00032	100	0.00055	0.00063	0.000860
74	0.0009	0.00027	0.00228	101	0.00129	0.00047	0.00050
75	0.00016	0.0011	0.00150	102	0.00063	0.00012	0.00056
76	0.00153	0.00086	0.00148	103	0.00078	0.00027	0.00048
77	0.00024	0.00024	0.00046	104	0.00008	0.00031	0.00094
78	0.00051	0.00043	0.00056	105	0.00071	0.00043	0.00236
79	0.00055	0.00024	0.00038	106	0.00075	0.00059	0.00064
80	0.00004	0.00004	0.00102	107	0.00024	0.00027	0.00078
81	0.0002	0.00016	0.00228	108	0.00016	0.0002	0.00024

ตารางที่ ข.1 ค่าการสันสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
109	0.00067	0	0.00204	136	0.00149	0.00126	0.00008
110	0.00027	0.00102	0.00142	137	0.00027	0.00106	0.00110
111	0.00035	0.00047	0.00024	138	0.00047	0.00024	0.00032
112	0.00078	0.00031	0.00094	139	0.00059	0.0002	0.00008
113	0.00137	0.00043	0.00066	140	0.00016	0.00027	0.00158
114	0.00075	0.00126	0.00024	141	0.0002	0.00051	0.00024
115	0.00047	0.00075	0.00024	142	0.00165	0.00071	0.00092
116	0.00102	0.00016	0.00046	143	0.00129	0.00047	0.00046
117	0.00055	0.00098	0.00056	144	0.0011	0.00047	0.00016
118	0.00075	0.00059	0.00056	145	0.00078	0.0011	0.00152
119	0.00133	0.00024	0.00042	146	0.00012	0.00024	0.00134
120	0.00043	0.00016	0.00126	147	0.00067	0.00027	0.00110
121	0.00051	0.00055	0.00038	148	0.00043	0.00082	0.00122
122	0.00012	0.00106	0.00078	149	0.00024	0.00008	0.00046
123	0.00067	0.00012	0.00032	150	0.00027	0.00051	0.00008
124	0.00051	0.00082	0.00008	151	0.00055	0.00024	0.00008
125	0.00024	0.00016	0.00038	152	0.00071	0.00078	0.00040
126	0.00153	0.00094	0.00028	153	0.00071	0.00086	0.00132
127	0.00031	0.0011	0.00142	154	0.0002	0.0002	0.00204
128	0.00118	0.00082	0.00038	155	0.00094	0.0002	0.00196
129	0.0002	0.00059	0.00024	156	0.00145	0.00075	0.00236
130	0.00051	0.00102	0.00094	157	0.00067	0	0.00016
131	0.00102	0.00047	0.00064	158	0.00024	0.00039	0.00126
132	0.00012	0.00016	0.00126	159	0.00035	0.00067	0.00040
133	0.00047	0.00051	0.00040	160	0.00024	0.0009	0.00086
134	0.00145	0.00106	0.00126	161	0.00024	0.00004	0.00196
135	0.00039	0.00122	0.00180	162	0.00027	0.00004	0.00038

ตารางที่ ข.1 ค่าการสันสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
163	0.00016	0.00106	0.00054	190	0.00094	0.00012	0.00008
164	0.00008	0.00169	0.00118	191	0.0002	0.00114	0.00158
165	0.00035	0.00039	0.00024	192	0.00016	0.00055	0.00166
166	0.0009	0.00098	0.00128	193	0.00031	0.00133	0.00142
167	0.00047	0.00027	0.00062	194	0.00071	0.00012	0.00008
168	0.00059	0.00059	0.00070	195	0.0011	0	0.00054
169	0.00004	0.00078	0.00032	196	0.00094	0.00031	0.00054
170	0.0002	0.00039	0.00074	197	0.00016	0.00098	0.00038
171	0.00035	0.00039	0.00024	198	0.00078	0.00082	0.00228
172	0	0.0009	0.00046	199	0.00031	0.00008	0.00118
173	0.00047	0.00027	0.00024	200	0.00055	0.00106	0.00172
174	0	0.00102	0.00046	201	0.0002	0.00035	0.00142
175	0.00012	0.00008	0.00142	202	0.00008	0.00063	0.00172
176	0.00008	0.00169	0.00102	203	0.00071	0.00059	0.00038
177	0.00063	0.00008	0.00078	204	0.00039	0.00027	0.00122
178	0.00141	0.00094	0.00126	205	0.00016	0.0002	0.00142
179	0.00012	0.00137	0.00118	206	0.00024	0.0011	0.00204
180	0.00102	0	0.00062	207	0.00051	0.00016	0.00038
181	0.00059	0.00047	0.00032	208	0.00063	0.0002	0.00010
182	0.00039	0.00075	0.00056	209	0.00008	0.00031	0.00054
183	0.00031	0.00129	0.00134	210	0.00063	0.00082	0.00012
184	0.00082	0.0011	0.00152	211	0.0002	0.00067	0.00054
185	0.00047	0.00082	0.00056	212	0.00035	0.00047	0.00040
186	0.00133	0.0009	0.00074	213	0.00122	0.0002	0.00038
187	0.00071	0.00016	0.00204	214	0.00129	0.00067	0.00058
188	0.00016	0.00145	0.00110	215	0.00094	0.00094	0.00276
189	0.00043	0.00024	0.00032	216	0.00027	0.00035	0.00094

ตารางที่ ข.1 ค่าการสันสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
217	0.00071	0.00067	0.00172	244	0.00067	0.00012	0.00094
218	0.00004	0.00161	0.00134	245	0.00039	0.00071	0.00024
219	0.00067	0.00035	0.00032	246	0.00012	0.00145	0.00134
220	0.00039	0.00114	0.00078	247	0	0.00063	0.00150
221	0.00071	0.0002	0.00086	248	0.00008	0	0.00142
222	0.00035	0.00075	0.00110	249	0	0.00047	0.00094
223	0.00051	0.00012	0.00078	250	0.00141	0.0009	0.00114
224	0.00047	0.00114	0.00064	251	0.00059	0.00102	0.00158
225	0.00039	0.0011	0.00070	252	0.00027	0.00012	0.00134
226	0.00118	0.00016	0.00038	253	0.0002	0.0011	0.00062
227	0.00082	0.00051	0.00196	254	0.00114	0.00035	0.00024
228	0.00012	0.00149	0.00126	255	0.00004	0.00004	0.00086
229	0.00047	0.0002	0.00078	256	0.00106	0	0.00032
230	0.00129	0.00047	0.00094	257	0.00012	0	0.00086
231	0.00075	0.00063	0.00070	258	0.00031	0.00004	0.00046
232	0.00027	0.00031	0.00016	259	0.00043	0.00043	0.00016
233	0.00031	0	0.00070	260	0.00102	0.00004	0.00070
234	0.00043	0	0.00032	261	0.0011	0.00008	0.00054
235	0.00075	0.00047	0.00056	262	0.00031	0.00059	0.00032
236	0.00063	0.0009	0.00054	263	0.00063	0.00094	0.00204
237	0.00012	0.00055	0.00110	264	0.00082	0.00012	0.00188
238	0.00027	0.00063	0.00140	265	0.00063	0	0.00114
239	0.00016	0.00024	0.00038	266	0.0009	0.00051	0.00024
240	0.00141	0.00035	0.00058	267	0.00004	0.00047	0.00078
241	0.00063	0.0011	0.00024	268	0.00016	0.00031	0.00062
242	0	0.00027	0.00038	269	0.00035	0.00051	0.00054
243	0.00114	0.00004	0.00082	270	0.00027	0.00102	0.00054

ตารางที่ ข.1 ค่าการสันสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
271	0.0002	0.00004	0.00118	298	0.00086	0.00071	0.00016
272	0.00102	0.00035	0.00032	299	0.00024	0.00035	0.00046
273	0.00024	0.00004	0.00118	300	0	0.00035	0.00008
274	0.00004	0.0002	0.00110	301	0.00071	0.00027	0.00040
275	0.00008	0.00102	0.00024	302	0.0009	0.00071	0.00132
276	0.00063	0.00059	0.00152	303	0.00106	0.00027	0.00204
277	0.00075	0.00051	0.00160	304	0.00122	0.00039	0.00196
278	0.00004	0.00027	0.00038	305	0	0.00133	0.00236
279	0.0002	0.00024	0.00110	306	0.00063	0.00004	0.00016
280	0.00063	0.00024	0.00024	307	0.00055	0.00004	0.00126
281	0.00012	0.0002	0.00110	308	0.00051	0.00024	0.00040
282	0.00067	0.00082	0.00114	309	0.00004	0.00157	0.00086
283	0.00059	0.00016	0.00056	310	0.00102	0.00031	0.00196
284	0.0011	0.00004	0.00078	311	0.00075	0.00082	0.00038
285	0.00012	0.0002	0.00102	312	0.00004	0	0.00054
286	0.00094	0.00039	0.00070	313	0.0002	0.00035	0.00118
287	0.00039	0.00086	0.00110	314	0	0.00035	0.00024
288	0.00043	0.00129	0.00134	315	0.00106	0.00012	0.00128
289	0.00039	0.00039	0.00038	316	0.00027	0.00031	0.00062
290	0.0002	0.00063	0.00110	317	0.00059	0.00098	0.00070
291	0.00067	0.00106	0.00086	318	0.00004	0.00047	0.00070
292	0.00039	0.00098	0.00142	319	0.00055	0.00016	0.00016
293	0.00035	0.00094	0.00172	320	0.0002	0.0002	0.00126
294	0.00129	0.00039	0.00098	321	0.00118	0.00024	0.00046
295	0.00051	0.0011	0.00118	322	0.00039	0.00102	0.00062
296	0.00106	0.0002	0.00024	323	0.00043	0.00039	0.00040
297	0.00075	0.00016	0.00136	324	0.00031	0.00141	0.00134

ตารางที่ ข.1 ค่าการสันสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
325	0.00039	0.00008	0.00062	352	0.0011	0.00016	0.00098
326	0.00004	0.00082	0.00016	353	0.0009	0.00055	0.00024
327	0.00027	0.00027	0.00106	354	0.00133	0.0011	0.00062
328	0.00059	0.00016	0.00070	355	0.00008	0.00031	0.00252
329	0.00039	0.00071	0.00150	356	0.00094	0.00024	0.00066
330	0.00118	0.00114	0.00038	357	0.00082	0.00051	0.00016
331	0.00051	0.00055	0.00048	358	0.00094	0.00004	0.00038
332	0.00027	0.00082	0.00000	359	0.00024	0.00086	0.00094
333	0.00149	0.00118	0.00118	360	0.00012	0.00016	0.00134
334	0.00149	0.00106	0.00118	361	0.00051	0.00055	0.00048
335	0.00024	0.00078	0.00166	362	0.00027	0.00082	0.00000
336	0.00149	0.00102	0.00148	363	0.00149	0.00118	0.00118
337	0.00016	0.00098	0.00086	364	0.00102	0.00008	0.00110
338	0.00082	0.00059	0.00016	365	0.00071	0.00027	0.00056
339	0.00027	0.00137	0.00156	366	0.00027	0.0009	0.00106
340	0.00024	0.00082	0.00008	367	0.00035	0.00008	0.00046
341	0.00106	0.00016	0.00126	368	0.00047	0.00063	0.00000
342	0.00059	0.00027	0.00024	369	0.00043	0.00039	0.00056
343	0.00129	0.0011	0.00152	370	0.00024	0.00082	0.00078
344	0.00051	0.00067	0.00136	371	0.00016	0.00047	0.00212
345	0.00071	0.0011	0.00016	372	0.00098	0.00012	0.00152
346	0.00051	0.00035	0.00038	373	0.00067	0.00098	0.00192
347	0.00059	0.0002	0.00102	374	0.00094	0.00012	0.00008
348	0.00024	0.00051	0.00078	375	0.00133	0.00035	0.00066
349	0.00027	0.0009	0.00062	376	0.00027	0.00051	0.00062
350	0.00137	0.00118	0.00040	377	0.00122	0.00137	0.00032
351	0.00094	0	0.00016	378	0.00063	0.00082	0.00102

ตารางที่ ข.1 ค่าการสันสะท้อนปกติไม่ถ่วงน้ำหนัก (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
379	0.00047	0.00008	0.00036	390	0.00059	0.00086	0.00172
380	0.00094	0.0002	0.00074	391	0.00051	0.00024	0.00228
381	0.00051	0.00031	0.00126	392	0.00055	0.00043	0.00038
382	0.00031	0.00149	0.00004	393	0.00047	0.00027	0.00016
383	0.00051	0.00078	0.00056	394	0.00008	0.00153	0.00126
384	0.00106	0.0002	0.00008	395	0.00035	0.00094	0.00046
385	0.00012	0.00157	0.00134	396	0.00031	0.00126	0.00020
386	0.00047	0.00067	0.00130	397	0.00016	0.00106	0.00126
387	0.00047	0.00055	0.00030	398	0.00075	0.0002	0.00152
388	0.00012	0.0009	0.00070	399	0.00043	0.00031	0.00036
389	0.00008	0.00067	0.00064	400	0.00165	0.00047	0.00032

ตารางที่ ข.2 การสันสะท้อนระดับที่หนึ่ง ถ่วงน้ำหนัก 1 คู่

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
1	0.00043	0.00078	0.000300	28	0.00051	0.00075	0.000620
2	0.00035	0.00071	0.001020	29	0.00024	0.00008	0.000320
3	0	0.00114	0.000780	30	0.00047	0.00039	0.000620
4	0.00008	0.00047	0.000320	31	0.00078	0.00067	0.003200
5	0.00027	0.002	0.001160	32	0.00055	0.00114	0.000160
6	0.00059	0.00047	0.002120	33	0.00027	0.00114	0.002120
7	0.00012	0.00059	0.001180	34	0.00024	0.00094	0.000160
8	0.00012	0.00016	0.001660	35	0.00031	0.00063	0.001260
9	0.00043	0.00055	0.000300	36	0.00063	0.00122	0.000640
10	0.00114	0.00161	0.000620	37	0.00024	0.00059	0.002040
11	0.0002	0.00122	0.001800	38	0.00027	0.00078	0.003200
12	0.00043	0.0002	0.002600	39	0.00043	0.00106	0.000620
13	0.00051	0.00043	0.002680	40	0.00027	0.00114	0.000380
14	0.00043	0.00122	0.000220	41	0.00012	0.00067	0.000640
15	0.00035	0.00137	0.000560	42	0.00016	0.00008	0.000140
16	0.00063	0.00031	0.000300	43	0.00027	0.00106	0.000480
17	0.00035	0.00137	0.001640	44	0.00027	0.00016	0.000380
18	0.00012	0.00071	0.000460	45	0.00009	0.00102	0.003520
19	0.00059	0.00078	0.000720	46	0.00063	0.00114	0.000400
20	0.00027	0.00075	0.000880	47	0.00082	0.00059	0.001420
21	0.00059	0.00067	0.000400	48	0.00086	0.00086	0.001420
22	0.00055	0.00098	0.002280	49	0.00071	0.0011	0.001260
23	0.00039	0.00055	0.001180	50	0.00039	0.00063	0.001960
24	0.00067	0.00082	0.001180	51	0.00071	0.0009	0.000400
25	0.00086	0.00102	0.000220	52	0.0009	0.00071	0.000720
26	0.00012	0.0009	0.000300	53	0.00106	0.00012	0.000620
27	0.00051	0.00086	0.001580	54	0.00102	0.00008	0.002340

ตารางที่ ข.2 การสันสะท้อนระดับที่หนึ่ง ถ่วงน้ำหนัก 1 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
55	0.00024	0.00055	0.000860	82	0.00102	0.00086	0.000720
56	0.00102	0.00075	0.000480	83	0.00016	0.00024	0.003200
57	0.00047	0.00114	0.001020	84	0.00059	0.00126	0.000780
58	0.00055	0.00114	0.002040	85	0.00004	0.00004	0.000000
59	0.00012	0.00043	0.000080	86	0.00016	0.00075	0.000720
60	0.00016	0.00004	0.000940	87	0.00016	0.00039	0.002500
61	0.00035	0.00031	0.000380	88	0.00071	0.00071	0.000400
62	0.00004	0.00067	0.002200	89	0.00055	0.0009	0.002180
63	0.00016	0.00086	0.000460	90	0.0002	0.00031	0.002280
64	0.00039	0.00098	0.002420	91	0.00027	0.00059	0.003060
65	0.0002	0.00067	0.000880	92	0.00059	0.00055	0.000640
66	0.00067	0.00102	0.002040	93	0.00008	0.00063	0.001720
67	0.00016	0.00043	0.000560	94	0.00043	0.00173	0.001640
68	0.00055	0.00086	0.001420	95	0.00075	0.00126	0.000400
69	0.00027	0.00039	0.001800	96	0.00094	0.00094	0.000780
70	0.00035	0.00114	0.002500	97	0.0011	0.00051	0.000140
71	0.0002	0.00024	0.000240	98	0.00039	0.00051	0.000860
72	0.00047	0.00012	0.000860	99	0.00063	0.00075	0.002600
73	0.00063	0.0011	0.000380	100	0.00078	0.00126	0.001220
74	0.00024	0.00098	0.002180	101	0.00051	0.00039	0.000080
75	0.00047	0.00098	0.003680	102	0	0.00043	0.000000
76	0.00024	0.0002	0.000640	103	0.00039	0.00047	0.001280
77	0.00051	0.00106	0.002740	104	0.00004	0.00051	0.000200
78	0.00043	0.00141	0.002980	105	0.0002	0.00051	0.001840
79	0.00055	0.00086	0.000380	106	0.00071	0.00086	0.001180
80	0.00059	0.00082	0.002520	107	0.00016	0.00047	0.000540
81	0.00031	0.00086	0.000380	108	0.00031	0.0009	0.000760

ตารางที่ ข.2 การสันสะท้อนระดับที่หนึ่ง ถ่วงน้ำหนัก 1 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
109	0.00059	0.00071	0.000980	136	0.00039	0.00055	0.000860
110	0.00106	0.0011	0.002400	137	0.00016	0.00043	0.000940
111	0.00118	0.00012	0.000600	138	0.00098	0.00078	0.002840
112	0.0011	0.00098	0.000980	139	0.00008	0.00047	0.002980
113	0.00027	0.00161	0.002440	140	0.00078	0.00082	0.000220
114	0.00063	0.00071	0.001200	141	0.00043	0.00031	0.002420
115	0.00043	0.00031	0.000300	142	0.00067	0.0002	0.000080
116	0.00024	0.00106	0.000140	143	0.00098	0.00051	0.001500
117	0.00012	0.00043	0.000240	144	0.00047	0.00043	0.000480
118	0.0009	0.00039	0.002260	145	0.00094	0.00039	0.000940
119	0.00078	0.00031	0.001100	146	0.00027	0.00047	0.002040
120	0.00063	0.00149	0.000560	147	0.00039	0.00118	0.000720
121	0.00055	0.00075	0.000140	148	0.00016	0.0011	0.001340
122	0.00098	0.00086	0.000400	149	0.00051	0.00004	0.002200
123	0.00071	0.00129	0.000220	150	0.00114	0.00161	0.003920
124	0.00035	0.00024	0.002280	151	0.00067	0.00047	0.000880
125	0.00035	0.00075	0.001500	152	0.00059	0.00024	0.002600
126	0.0009	0.00027	0.002120	153	0.00008	0.00027	0.000080
127	0.00027	0.00071	0.001880	154	0.00059	0.00067	0.000220
128	0.00039	0.00031	0.001500	155	0.00008	0.00016	0.000560
129	0.0002	0.0011	0.000300	156	0.0009	0.00141	0.001660
130	0.00047	0.00043	0.001400	157	0.00086	0.00043	0.002200
131	0.00075	0.00082	0.000940	158	0.00051	0.00122	0.000560
132	0.00012	0.00067	0.000160	159	0.00031	0.00165	0.002300
133	0.00004	0.00122	0.001340	160	0.00043	0.00114	0.000860
134	0.00031	0.00094	0.002280	161	0.00071	0.00059	0.000220
135	0.00067	0.00137	0.000700	162	0.00082	0.00126	0.001320

ตารางที่ ข.2 การสันสะท้อนระดับที่หนึ่ง ถ่วงน้ำหนัก 1 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
163	0.0002	0.00094	0.002040	190	0.00078	0.00071	0.001160
164	0.00051	0.00067	0.001260	191	0.00094	0.00016	0.000400
165	0.00059	0.00039	0.001640	192	0.00039	0.00165	0.000380
166	0.00031	0.00067	0.001880	193	0.00004	0.00004	0.001520
167	0.00043	0.00169	0.001800	194	0.00051	0.00157	0.000300
168	0.00082	0.00126	0.001400	195	0.00004	0.00031	0.002900
169	0.00106	0.0002	0.001340	196	0.00047	0.00067	0.002340
170	0.00043	0.00114	0.000540	197	0.00004	0.0009	0.000800
171	0.0011	0	0.002120	198	0.0002	0	0.000000
172	0.00078	0.00055	0.000480	199	0.00078	0.00067	0.002420
173	0.00075	0.00071	0.002260	200	0.00075	0.00067	0.000480
174	0.00047	0.00031	0.001640	201	0.0002	0.00118	0.000300
175	0.00063	0.00059	0.001800	202	0.00063	0.00039	0.000240
176	0.00008	0.00086	0.002900	203	0.00063	0.00024	0.000780
177	0.00012	0.00047	0.001560	204	0.00047	0.00051	0.002680
178	0.00059	0.00055	0.000080	205	0.00035	0.00059	0.000160
179	0.00086	0.0002	0.000300	206	0.00051	0.00016	0.000460
180	0.00094	0.0002	0.001400	207	0.00004	0.00004	0.000480
181	0.00051	0.00031	0.000880	208	0.0009	0.00086	0.002760
182	0.00055	0.00169	0.002420	209	0.00055	0.00016	0.002040
183	0.00051	0.00071	0.000400	210	0.00008	0.00094	0.000300
184	0.00098	0.00051	0.001760	211	0.00008	0.00047	0.001400
185	0.00016	0.0009	0.000160	212	0.00063	0.00051	0.000940
186	0.00082	0.00027	0.002120	213	0.00063	0.00016	0.000160
187	0.00082	0.00055	0.001400	214	0.00008	0.00122	0.001340
188	0.0002	0.00086	0.000560	215	0.00047	0.00149	0.002280
189	0.00071	0.00051	0.001780	216	0.00035	0.00149	0.000700

ตารางที่ ข.2 การสันสะท้อนระดับที่หนึ่ง ถ่วงน้ำหนัก 1 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
217	0.00047	0.00016	0.000860	244	0.00055	0.00082	0.001100
218	0.00059	0.0002	0.000940	245	0.00063	0.00051	0.000700
219	0.00063	0.00047	0.002840	246	0.00016	0.00086	0.002340
220	0.00035	0.00031	0.002980	247	0.00075	0.00051	0.000320
221	0.00071	0.00106	0.000220	248	0.00059	0.00055	0.002340
222	0.00102	0.00004	0.002420	249	0.00055	0.00055	0.002740
223	0.00035	0.00031	0.000080	250	0.0011	0.00008	0.000540
224	0.00012	0.00051	0.001500	251	0.00078	0.00063	0.000540
225	0.00031	0.00024	0.000480	252	0.00051	0.00075	0.000200
226	0.00004	0.0002	0.000940	253	0.00004	0.00012	0.000660
227	0.00078	0.00012	0.002040	254	0.00051	0.00043	0.002760
228	0.00008	0.00067	0.000720	255	0.00075	0.00047	0.000560
229	0	0.00039	0.001340	256	0.00075	0.00039	0.000800
230	0.00071	0.00012	0.002200	257	0.00031	0.00024	0.002760
231	0.00008	0.00051	0.001960	258	0.00024	0.0002	0.000220
232	0.00043	0.00039	0.002340	259	0.00063	0.00012	0.002600
233	0.0002	0.00039	0.000400	260	0.00012	0.00016	0.002120
234	0.00086	0.00024	0.001900	261	0.00024	0.00035	0.000220
235	0.00039	0.00043	0.001100	262	0.00082	0.00027	0.001560
236	0.00102	0.00004	0.002120	263	0.00078	0.0002	0.001680
237	0.00031	0.00106	0.001960	264	0.00051	0.00145	0.001200
238	0.00043	0.00126	0.001400	265	0.00078	0.0011	0.002440
239	0.00051	0.00016	0.000700	266	0.00067	0.00055	0.000480
240	0.00051	0.00035	0.000640	267	0.00047	0.00102	0.000560
241	0.00055	0.00071	0.000880	268	0.00067	0.00035	0.001800
242	0.00055	0.00075	0.000080	269	0.00008	0.00031	0.000400
243	0.00106	0.00047	0.000780	270	0.00059	0.00031	0.002000

ตารางที่ ข.2 การสันสะท้อนระดับที่หนึ่ง ถ่วงน้ำหนัก 1 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
271	0.0002	0.00031	0.002420	298	0.00043	0.00055	0.002280
272	0.00106	0.0009	0.000480	299	0.00035	0.00035	0.000700
273	0.00051	0.00161	0.002180	300	0.00016	0.00008	0.000860
274	0.00043	0.00051	0.000140	301	0.00004	0.00004	0.000940
275	0.00047	0.00177	0.002500	302	0.00055	0.0009	0.002840
276	0.00063	0.00031	0.002140	303	0.00055	0.00016	0.002980
277	0.00067	0.00035	0.000800	304	0.00067	0.00031	0.000220
278	0.00051	0.00169	0.000860	305	0.00071	0.00004	0.002420
279	0.00071	0.00035	0.000080	306	0.00031	0.00008	0.000080
280	0.00031	0.00035	0.000320	307	0.00047	0.00063	0.001500
281	0.00075	0.00008	0.000800	308	0.00059	0.00008	0.001500
282	0.00078	0.00075	0.001460	309	0.00063	0.00004	0.000940
283	0.00094	0.00012	0.001800	310	0.00051	0.00039	0.001480
284	0.00004	0.00043	0.001140	311	0.00098	0.00031	0.000480
285	0.00071	0.00086	0.000160	312	0.00016	0.0002	0.002580
286	0.00008	0.00035	0.003840	313	0.00067	0.00118	0.000380
287	0.00008	0.00031	0.000320	314	0.00059	0.00078	0.002600
288	0.00082	0.00012	0.002280	315	0.00012	0.00008	0.000940
289	0.0002	0.0002	0.000400	316	0.00067	0.00075	0.002040
290	0.00027	0.00082	0.000080	317	0.00047	0.00126	0.002200
291	0.00024	0.00063	0.001180	318	0.00008	0.00051	0.000620
292	0.00047	0.00071	0.001800	319	0.00078	0.00098	0.000940
293	0.00078	0.00031	0.002740	320	0.00016	0.00082	0.001560
294	0.00047	0.00035	0.000220	321	0.00078	0.00098	0.000480
295	0.00071	0.00004	0.000560	322	0.00098	0.0002	0.002820
296	0.00055	0.00024	0.001260	323	0.00055	0.00004	0.002760
297	0.00067	0.00122	0.000220	324	0.00024	0.00075	0.000880

ตารางที่ ข.2 การสันสเทือนระดับที่หนึ่ง ถ่วงน้ำหนัก 1 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
325	0.00004	0.00098	0.000220	352	0.00086	0.00145	0.000220
326	0.00008	0.00051	0.001500	353	0.00008	0.00008	0.000300
327	0.00012	0.00016	0.000800	354	0.0009	0.00035	0.001580
328	0.00055	0.00129	0.000300	355	0.00016	0.00039	0.000620
329	0.00067	0.00098	0.001020	356	0.00055	0.0002	0.000320
330	0.00008	0.00008	0.000780	357	0.00016	0.0002	0.000620
331	0.00047	0.00031	0.000320	358	0.00106	0.0002	0.003200
332	0.00043	0.00098	0.001160	359	0.00082	0.00031	0.000160
333	0.00059	0.00063	0.002120	360	0.00004	0.00024	0.002120
334	0.00024	0.00039	0.001180	361	0.00039	0.0002	0.000160
335	0.00012	0.00055	0.001660	362	0.00063	0.00133	0.001260
336	0.00067	0.0002	0.000300	363	0.00039	0.00024	0.000640
337	0.00067	0.00043	0.000620	364	0.00075	0.00075	0.002040
338	0.00031	0.00086	0.001800	365	0.00098	0.00031	0.003200
339	0.00078	0.00082	0.002600	366	0.00035	0.00102	0.000620
340	0.00098	0.00027	0.002680	367	0.00047	0.00133	0.000380
341	0.00067	0.00059	0.000220	368	0.00051	0.00027	0.000640
342	0.00043	0.00055	0.000560	369	0.00063	0.00094	0.000140
343	0.00059	0.00031	0.000300	370	0.00075	0.00114	0.000480
344	0.00012	0.00098	0.001640	371	0.00047	0.00137	0.000380
345	0.00071	0.00078	0.000460	372	0.00071	0.00008	0.003520
346	0.00012	0.00122	0.000720	373	0.00047	0.00043	0.000400
347	0.00059	0.00035	0.000880	374	0.00067	0.00047	0.001420
348	0.00008	0.0002	0.000400	375	0.00051	0.00043	0.001420
349	0.0002	0.00016	0.002280	376	0.00055	0.0002	0.001260
350	0.00035	0.00157	0.001180	377	0.00055	0.00086	0.001960
351	0.00055	0.00012	0.001180	378	0.00051	0.00153	0.000400

ตารางที่ ข.2 การสันสะท้อนระดับที่หนึ่ง ถ่วงน้ำหนัก 1 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
379	0.00043	0.00114	0.000720	390	0.00063	0.00016	0.000460
380	0.00008	0.00063	0.000620	391	0.00016	0.00027	0.002420
381	0.00059	0.00157	0.002340	392	0.0002	0.00031	0.000880
382	0.00004	0.00059	0.000860	393	0.00055	0.0011	0.002040
383	0	0.00016	0.000480	394	0.00086	0.00027	0.000560
384	0.0002	0.0011	0.001020	395	0.00024	0.00039	0.001420
385	0.00067	0.00078	0.002040	396	0.00055	0.00035	0.001800
386	0.00078	0.00075	0.000080	397	0.00035	0.00039	0.002500
387	0.00031	0.00059	0.000940	398	0.00043	0.00024	0.000240
388	0.00008	0.00126	0.000380	399	0.00047	0.00016	0.000860
389	0.00039	0.00063	0.002200	400	0.00043	0.00169	0.001040

ตารางที่ ข.3 การสันสเทือนระดับที่สอง ถ่วงน้ำหนัก 2 คู่

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
1	0.00078	0.00086	0.00114	28	0.00102	0.00067	0.00164
2	0.00016	0.00035	0.00224	29	0.00078	0.00059	0.00094
3	0.00012	0.00047	0.00124	30	0.00118	0.00071	0.00338
4	0.00082	0.00102	0.00014	31	0.00016	0.00047	0.00064
5	0.00071	0.00016	0.00182	32	0.00063	0.00094	0.00196
6	0.00016	0.00012	0.00204	33	0.00004	0.00016	0.00024
7	0.00106	0.00137	0.0036	34	0.00016	0.00035	0.00242
8	0.00102	0.00016	0.00134	35	0.00043	0.0002	0.00178
9	0.00043	0.00098	0.00098	36	0.00129	0.00055	0.00062
10	0.00012	0.00035	0.00116	37	0.00071	0.00145	0.00146
11	0.00059	0.00008	0.00314	38	0.00008	0.00043	0.00154
12	0.00078	0.0009	0.0014	39	0.00043	0.00035	0.00172
13	0.00043	0.00067	0.00204	40	0.0009	0.00063	0.0004
14	0.00012	0.00063	0.00132	41	0.00016	0.00165	0.00384
15	0.00122	0.00039	0.00056	42	0.00075	0.00055	0.00124
16	0.00051	0.00027	0.0014	43	0.00039	0.00078	0.0014
17	0.00055	0.00012	0.00056	44	0.00031	0.00149	0.00154
18	0.00035	0.00059	0.00024	45	0.00024	0.00118	0.0022
19	0.00067	0.00102	0.00204	46	0.00008	0.00129	0.00032
20	0.00075	0.00114	0.00188	47	0.00078	0.00114	0.00164
21	0.00008	0.00228	0.002	48	0.00102	0.00129	0.00024
22	0.00086	0.00078	0.00072	49	0.0011	0.00149	0.00056
23	0.00059	0.00051	0.0024	50	0.00016	0.00047	0.00016
24	0.00043	0.00024	0.00268	51	0.00008	0.0009	0.00116
25	0.00059	0.00024	0.00078	52	0.00067	0.00031	0.0008
26	0.00082	0.00039	0.0032	53	0.00122	0.00063	0.00156
27	0	0.00051	0.00024	54	0.00082	0.00094	0.00132

ตารางที่ ข.3 การสันสะท้อนระดับที่สอง ถ่วงน้ำหนัก 2 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
55	0.00012	0.00004	0.00164	82	0.00114	0.00051	0.00086
56	0.0009	0.00039	0.00056	83	0.00035	0.00098	0.00164
57	0.00122	0.00075	0.00024	84	0.00008	0.00071	0.00148
58	0.00055	0.00035	0.00162	85	0.00067	0.00024	0.00148
59	0.00071	0.00071	0.00078	86	0.00031	0.00051	0.00282
60	0.00016	0.0002	0.00124	87	0.00071	0.00055	0.00282
61	0.00063	0.00035	0.0004	88	0.00126	0.00102	0.00062
62	0.00067	0.00114	0.00196	89	0.00027	0.00008	0.0018
63	0.00039	0.00102	0.00168	90	0.00071	0.00067	0.00242
64	0.00075	0.00043	0.00116	91	0.00016	0.00094	0.00122
65	0.00031	0.00141	0.0029	92	0.00039	0.00031	0.00156
66	0.00059	0.00157	0.00172	93	0.00055	0.00031	0.00046
67	0.00078	0.00094	0.00172	94	0.00047	0.00067	0.00102
68	0.0002	0.00129	8E-05	95	0.00051	0.00027	0.00196
69	0.0009	0.00145	0.00064	96	0.0002	0.00051	0.00094
70	0.00012	0.00055	0.00172	97	0.00024	0.00118	0.00172
71	0	0.00118	0.0003	98	0.00004	0.00051	0.00048
72	0.00118	0.00078	0.00188	99	0.00129	0.00075	0.00212
73	0.00039	0.00039	0.00094	100	0.00012	0.0002	0.00164
74	0.00059	0.00149	0.0029	101	0.00012	0.0018	0.00172
75	0.00016	0.00075	0.00116	102	0.00047	0.00078	0.0003
76	0.00075	0.00141	0.00298	103	0.00039	0.00086	0.00132
77	0.00059	0.00035	0.00164	104	0.00051	0.00063	0.00298
78	0.00027	0.00059	0.00048	105	0.00016	0.00071	0.00142
79	0.00075	0.00016	0.00134	106	0	0.0011	0.00122
80	0.00075	0.00126	0.00212	107	0.00027	0.00067	0.00032
81	0.0002	0.00004	0.00078	108	0.00059	0.00102	0.00068

ตารางที่ ข.3 การสันสเทือนระดับที่สอง ถ่วงน้ำหนัก 2 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
109	0.00047	0.0009	0.00366	136	0.00012	0.00027	0.00088
110	0.00118	0.00067	0.0028	137	0.00075	0.00012	0.00124
111	0.00071	0.00126	0.00216	138	0.00027	0.00086	0.00188
112	0.00035	0.00075	0.00294	139	0.0011	0.00059	0.0032
113	0.00078	0.00129	0.00086	140	0.00122	0.00024	0.00094
114	0.00043	0.00094	0.00088	141	0.00027	0.00055	0.0004
115	0.00035	0.0009	0.00124	142	0.0002	0.00035	0.00094
116	0.00004	0.00047	0.00188	143	0.00043	0.00082	0.00166
117	0.00075	0.00051	0.0032	144	0.00008	0.00027	0.00212
118	0.00071	0.00145	0.00094	145	0.00114	0.00086	0.0004
119	0.0009	0.00161	0.0004	146	0.00055	0.00071	0.00196
120	0.00047	0.00059	0.00094	147	0.00078	0.00039	0.00168
121	0.00067	0.00027	0.00166	148	0.00008	0.00055	0.00116
122	0.00047	0.00067	0.00212	149	0.00024	0.00043	0.0029
123	0.00031	0.00008	0.0004	150	0.00012	0.00059	0.00172
124	0.0002	0.00067	0.00196	151	0	0.00086	0.00276
125	0.0011	0.00106	0.00168	152	0.00082	0.00024	0.0019
126	0.00063	0.00161	0.00116	153	0.00043	0.00047	0.00306
127	0.00063	0.00008	0.0029	154	0.00071	0.00024	0.00204
128	0.00102	0.00153	0.00172	155	0.00043	0.00024	0.00086
129	0.00063	0.00098	0.00172	156	0.00129	0.00075	0.00088
130	0.00094	0.00114	0.00022	157	0.00063	0.00082	0.00124
131	0.00137	0.00106	0.00276	158	0.00024	0.00196	0.00188
132	0.00078	0.00082	0.0019	159	0.00035	0.00102	0.0032
133	0.0002	0.00188	0.00306	160	0.00008	0.00027	0.00094
134	0.00004	0	0.00204	161	0.00078	0.00039	0.0004
135	0.00027	0.00031	0.00086	162	0.00004	0.00004	0.00094

ตารางที่ ข.3 การสันสเทือนระดับที่สอง ถ่วงน้ำหนัก 2 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
163	0.00051	0.00016	0.00166	190	0	0.00012	0.00282
164	0.00059	0.00004	0.00212	191	0.00012	0.0011	0.00282
165	0.00063	0.00043	0.0004	192	0.00047	0.00047	0.00062
166	0.00055	0.00016	0.00196	193	0.0002	0.00157	0.0018
167	0.0002	0.00024	0.00168	194	0.00067	0.00016	0.00242
168	0.00016	0.0002	0.00116	195	0.00016	0.00031	0.00122
169	0.00094	0.00106	0.0029	196	0.00012	0.00004	0.00156
170	0.00122	0.00067	0.00172	197	0.00004	0.00094	0.00046
171	0.00027	0.00027	0.00172	198	0.00027	0.00039	0.00102
172	0.0009	0.00039	8E-05	199	0.00004	0.00051	0.00196
173	0.00086	0.00098	0.00064	200	0.00055	0.00067	0.00094
174	0.00051	0.0002	0.00172	201	0.00082	0.0009	0.00172
175	0.00059	0.00027	0.0003	202	0.00102	0.00086	0.00048
176	0.00043	0.00027	0.00188	203	0.00027	0.00133	0.00212
177	0.00043	0.00133	0.00094	204	0.00008	0.00047	0.00164
178	0.00055	0.00031	0.0029	205	0.00075	0.00047	0.00172
179	0.00024	0.0018	0.00116	206	0.00075	0.0002	0.0003
180	0.00098	0.00129	0.00298	207	0.0002	0.0018	0.00132
181	0.00008	0.0009	0.00164	208	0.00055	0.00078	0.00298
182	0.00004	0.00051	0.00048	209	0.00043	0.00027	0.00142
183	0.00012	0.00094	0.00134	210	0.00051	0.00008	0.00172
184	0.00024	0.00094	0.00212	211	0.0002	0.00016	8E-05
185	0.00055	0.00075	0.00078	212	0.00012	0.00118	0.0023
186	0.00024	0.00067	0.00086	213	0.00016	0.00043	0.00114
187	0	0.00008	0.00164	214	0.00082	0.00102	0.00224
188	0.00063	0.00047	0.00148	215	0.00055	0.00082	0.00124
189	0.00071	0.0002	0.00148	216	0.00122	0.00086	0.00014

ตารางที่ ข.3 การสันสเทือนระดับที่สอง ถ่วงน้ำหนัก 2 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
217	0.00012	0.00075	0.00182	244	0.00126	0.00098	0.00196
218	0.00067	0.0002	0.00204	245	0.00008	0.00059	0.00024
219	0.00082	0.0002	0.0036	246	0.00082	0.00129	0.00242
220	0.00051	0.00027	0.00134	247	0.00008	0.00094	0.00178
221	0.0002	0	0.00098	248	0.00086	0.00098	0.00062
222	0.00016	0.00031	0.00116	249	0.00043	0.00051	0.00146
223	0.00063	0.00008	0.00314	250	0.00027	0.00078	0.00024
224	0.0009	0.00098	0.0014	251	0.00031	0.00063	0.00116
225	0.00118	0.00075	0.00204	252	0.00102	0.00051	0.00314
226	0.00012	0.00035	0.00132	253	0.00059	0.00031	0.00218
227	0.00071	0.00161	0.00056	254	0.00059	0.00078	0.00072
228	0.00012	0.0018	0.0014	255	0.0002	0.00169	0.0003
229	0.00106	0.00161	0.00056	256	0.00075	0.00102	0.00116
230	0.00075	0.00039	0.00024	257	0.00086	0.00067	0.00054
231	0.00051	0.00118	0.00204	258	0.00016	0.00106	0.00138
232	0.00012	0.00094	0.00188	259	0.00016	0.0002	0.00054
233	0.00004	0.00133	0.002	260	0.00055	0.00008	0.00162
234	0.00024	0.00024	0.00072	261	0.00086	0.00051	0.00032
235	0.00071	0.0009	0.0024	262	0.00051	0.00012	0.00142
236	0.00051	0.00012	0.00268	263	0.00024	0.00047	0.00022
237	0.00047	0.00122	0.00078	264	0.00031	0.00106	0.00276
238	0.00067	0.00027	0.0032	265	0.00071	0.00106	0.0019
239	0.00129	0.00082	0.00024	266	0.00071	0.00106	0.00306
240	0.00004	0.00106	0.00164	267	0.00008	0.00102	0.00204
241	0.00082	0.00118	0.0021	268	0.00055	0.00004	0.00086
242	0.00063	0.00161	0.00338	269	0.00082	0.00067	0.00088
243	0.00106	0.00086	0.00064	270	0.00043	0.00078	0.00124

ตารางที่ ข.3 การสันสเทือนระดับที่สอง ถ่วงน้ำหนัก 2 คู่ (ต่อ)

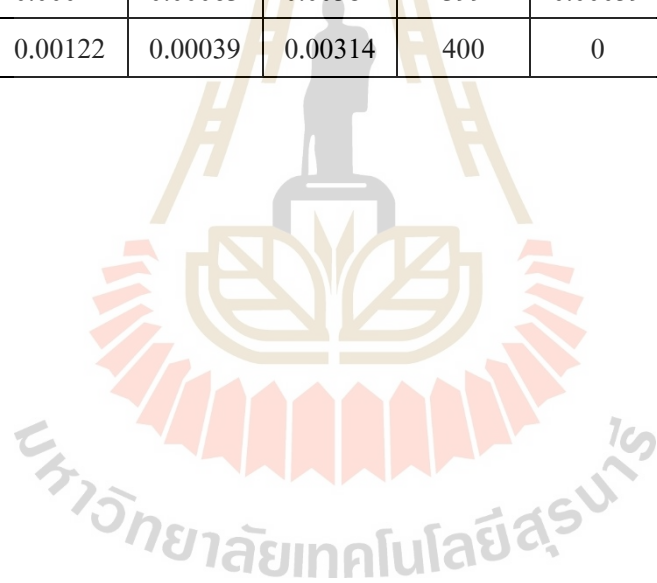
ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
271	0.00004	0.00043	0.00188	298	0.00075	0.00086	0.00134
272	0.00106	0.00086	0.0032	299	0.0002	0.00051	0.00212
273	0.00086	0.00129	0.00094	300	0.00008	0.00043	0.00078
274	0.00043	0.00063	0.0004	301	0.00047	0.00047	0.00086
275	0.00024	0.00224	0.00094	302	0.00051	0.00039	0.00164
276	0.00043	0.00102	0.00166	303	0.00055	0.00043	0.00148
277	0.00075	0.00098	0.00212	304	0.00086	0.00027	0.00148
278	0.00078	0.00067	0.0004	305	0.00008	0.00047	0.00282
279	0.00067	0.00016	0.00196	306	0.00055	0.00059	0.00282
280	0.00071	0.00137	0.00168	307	0.00067	0.00059	0.00062
281	0.00031	0.00122	0.00116	308	0.00098	0.00129	0.0018
282	0.00024	0.00137	0.0029	309	0.00004	0.00086	0.00242
283	0.00031	0.00027	0.00172	310	0	0.00016	0.00122
284	0.00024	0.00161	0.00172	311	0.00133	0.00075	0.00156
285	0.00012	0.00067	8E-05	312	0.00075	0.00055	0.00046
286	0.00027	0.00086	0.00064	313	0.00063	0.00043	0.00102
287	0.00086	0.00141	0.00172	314	0.00078	0.00106	0.00196
288	0.00075	0.00098	0.0003	315	0.00043	0.00094	0.00094
289	0.00129	0.00082	0.00188	316	0.00047	0.00027	0.00152
290	0.00071	0.00063	0.00094	317	0.00051	0.00059	0.00048
291	0.00067	0.00012	0.0003	318	0.00141	0.00094	0.00212
292	0.00075	0.00165	0.00236	319	0.00024	0.00157	0.00164
293	0.00043	0.00078	0.0029	320	0.00008	0.00004	0.00172
294	0.00067	0.00024	0.00116	321	0.00016	0.00114	0.0003
295	0.00133	0.00075	0.00298	322	0.00059	0.00039	0.00112
296	0.00098	0.00114	0.00164	323	0.00035	0.0002	0.00298
297	0.00071	0.00059	0.00048	324	0.00055	0.00043	0.00142

ตารางที่ ข.3 การสันสะท้อนระดับที่สอง ถ่วงน้ำหนัก 2 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
325	0.00118	0.00078	0.00172	352	0.00055	0.00004	0.00078
326	0.00035	0.00024	8E-05	353	0.00126	0.00071	0.0032
327	0.00067	0.00129	0.0023	354	0.00075	0.00031	0.00024
328	0.00067	0.00035	0.00114	355	0.00043	0.00086	0.00164
329	0.00027	0.00165	0.00224	356	0.00078	0.00027	0.00094
330	0.00031	0.00078	0.00124	357	0.00012	0.00008	0.00338
331	0.00031	0.00126	0.00014	358	0.00075	0.00157	0.00064
332	0.00012	0.00043	0.00182	359	0.00078	0.00059	0.00196
333	0.00004	0.00137	0.00204	360	0.00059	0.00035	0.00024
334	0.00004	0.00031	0.0036	361	0.0002	0.00024	0.00242
335	0.00067	0.00055	0.00134	362	0.00071	0.00055	0.00178
336	0.00067	0.00047	0.00098	363	0.00008	0.00035	0.00062
337	0	0.00071	0.00116	364	0.00137	0.00075	0.00146
338	0.00075	0.00051	0.00314	365	0.00075	0.00129	0.00154
339	0.00043	0.00086	0.0014	366	0.00024	0.00067	0.00172
340	0.00024	0.00106	0.00204	367	0.00078	0.00114	0.0004
341	0.00039	0.00071	0.00132	368	0.00086	0.00067	0.00384
342	0.00035	0.00004	0.00056	369	0.00004	0.00055	0.00124
343	0.00016	0.0002	0.0012	370	0.00059	0.00012	0.0014
344	0.00082	0.00035	0.00056	371	0.00129	0.00078	0.00154
345	0.00078	0.00071	0.00024	372	0.0002	0.00067	0.0022
346	0.00137	0.00149	0.00204	373	0.00039	0.00004	0.00032
347	0.00078	0.00149	0.00188	374	0.00012	0.00012	0.00164
348	0.0011	0.00055	0.002	375	0.00078	0.00086	0.00024
349	0.00137	0.00059	0.00072	376	0.00016	0.00035	0.00024
350	0.0002	0.00043	0.0024	377	0.00012	0.00047	0.00114
351	0.00129	0.00137	0.00268	378	0.00082	0.00102	0.00224

ตารางที่ ข.3 การสันสะท้อนระดับที่สอง ถ่วงน้ำหนัก 2 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
379	0.00071	0.00016	0.00124	390	0.00051	0.00027	0.00094
380	0.00016	0.00012	0.00014	391	0.00055	0.00012	0.0018
381	0.00106	0.00137	0.00132	392	0.00035	0.00059	0.00172
382	0.00102	0.00016	0.00164	393	0.00067	0.00102	0
383	0.00043	0.00098	0.00056	394	0.00075	0.00114	0.0036
384	0.00012	0.00035	0.00024	395	0.00008	0.00228	0.00072
385	0.00059	0.00008	0.00162	396	0.00086	0.00078	0.0036
386	0.00078	0.0009	0.00078	397	0.00059	0.00051	0.00224
387	0.00043	0.00067	0.00124	398	0.00043	0.00024	0.00078
388	0.00012	0.00063	0.00384	399	0.00059	0.00024	0.00328
389	0.00122	0.00039	0.00314	400	0	0	0.000807



ตารางที่ ข.4 การสันสะท้อนระดับที่สาม ถ่วงน้ำหนัก 3 คู่

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
1	0.00157	0.00031	0.000440	28	0.00129	0.00129	0.001780
2	0.00106	0.00082	0.001900	29	0.00059	0.0009	0.003400
3	0.00169	0.00027	0.001980	30	0.00082	0.00216	0.001500
4	0.00149	0.00035	0.000960	31	0.00078	0.00059	0.000960
5	0.00102	0.00208	0.001780	32	0.00012	0.00047	0.002680
6	0.00196	0.00043	0.001120	33	0.00082	0.00118	0.002380
7	0.00145	0.00071	0.000800	34	0.00086	0.00086	0.002020
8	0.00129	0.00027	0.001900	35	0.00031	0.00141	0.003940
9	0.00184	0.00212	0.002260	36	0.00035	0.00004	0.003780
10	0.00051	0.00043	0.001900	37	0.00063	0.0029	0.000260
11	0.0011	0.00035	0.003000	38	0.00043	0.00161	0.000460
12	0.00161	0.00196	0.003160	39	0.00149	0.00086	0.000640
13	0.00161	0.00118	0.001240	40	0.00129	0.00126	0.001860
14	0.00098	0.00078	0.001640	41	0.00059	0.0002	0.004260
15	0.00024	0.00012	0.002520	42	0.00137	0.00196	0.001120
16	0.00035	0.00067	0.003860	43	0.00039	0.00067	0.002220
17	0.00082	0.00208	0.001420	44	0.00039	0.00027	0.001040
18	0.00012	0.00035	0.002680	45	0.00169	0.00106	0.001700
19	0.00082	0.00169	0.000880	46	0.00027	0.00106	0.004100
20	0.00004	0.0011	0.000480	47	0.00043	0.00114	0.003860
21	0.00004	0.00063	0.002440	48	0.0018	0.00122	0.000020
22	0.00039	0.00047	0.000880	49	0.00094	0.00078	0.002020
23	0.00149	0.00086	0.001160	50	0.00067	0.0002	0.001420
24	0.00035	0.00078	0.001820	51	0.00102	0.00122	0.000560
25	0.0002	0.00051	0.000560	52	0.00004	0.00071	0.004480
26	0.00043	0.0009	0.003700	53	0.00016	0.00071	0.002440
27	0.00063	0.0002	0.002680	54	0.00008	0.00071	0.002920

ตารางที่ ข.4 การสันสะท้อนระดับที่สาม ถ่วงน้ำหนัก 3 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
55	0.0002	0.00106	0.004020	82	0.00169	0.00063	0.001820
56	0.00098	0.00012	0.003460	83	0.00047	0.00145	0.003240
57	0.00106	0.00047	0.000960	84	0	0.00067	0.002840
58	0.00035	0.00067	0.003940	85	0.00075	0.00039	0.000340
59	0.00016	0.00075	0.003460	86	0.00024	0.0002	0.002680
60	0.00098	0.0009	0.001940	87	0.00071	0.00098	0.003080
61	0.00098	0.00027	0.001780	88	0.00043	0.00126	0.003460
62	0.00133	0.00043	0.001780	89	0.0018	0.00114	0.000060
63	0.00118	0.00149	0.001480	90	0.00114	0.00153	0.001560
64	0.00075	0.00078	0.000640	91	0.00004	0.00055	0.002840
65	0.00027	0.00114	0.003160	92	0.00055	0.00122	0.003080
66	0.00075	0.0033	0.000220	93	0.00161	0.00133	0.001700
67	0.00043	0.00082	0.004560	94	0.00161	0.00169	0.000460
68	0.00059	0.00043	0.000720	95	0.00157	0.00114	0.001860
69	0.00063	0.00122	0.002840	96	0.00102	0.00235	0.000020
70	0.00059	0.0009	0.001200	97	0.00098	0.00035	0.001660
71	0.00043	0.00039	0.001360	98	0.0009	0.00337	0.000020
72	0.00008	0.00078	0.003160	99	0.00067	0.00141	0.003000
73	0.00157	0.00122	0.001940	100	0.00153	0.00137	0.001780
74	0.00055	0.00094	0.001120	101	0.00012	0.00039	0.003940
75	0.00004	0.00106	0.003540	102	0.00161	0.0011	0.003000
76	0.00126	0.00208	0.001080	103	0.00067	0.0002	0.002440
77	0.00043	0.00094	0.000260	104	0.00059	0.00055	0.001560
78	0.00059	0.00129	0.003080	105	0.00051	0.00016	0.001040
79	0.00067	0.00035	0.002140	106	0.00043	0.00126	0.003080
80	0.00071	0.00094	0.002600	107	0.00157	0.00271	0.001660
81	0.00086	0.0002	0.002300	108	0.0002	0.00008	0.004020

ตารางที่ ข.4 การสันสะท้อนระดับที่สาม ถ่วงน้ำหนัก 3 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
109	0.00063	0.00047	0.001000	136	0.00051	0.00051	0.001660
110	0.00004	0.00043	0.000560	137	0.00067	0.00012	0.004020
111	0.00078	0.0011	0.003460	138	0.00016	0.00082	0.001000
112	0.00039	0.00039	0.000720	139	0.00027	0.00126	0.000560
113	0.0009	0.00102	0.001940	140	0.00067	0.00137	0.003460
114	0.00106	0.00133	0.001420	141	0.00035	0.00098	0.000720
115	0.00055	0	0.003860	142	0.00031	0.00051	0.001940
116	0.00004	0.00047	0.001080	143	0.00035	0.00082	0.001420
117	0.00051	0.00051	0.000400	144	0.00051	0.00106	0.003860
118	0.00126	0.00192	0.001640	145	0.0011	0.00126	0.001080
119	0.00043	0.00008	0.002140	146	0.00059	0.00027	0.000400
120	0.00008	0.00071	0.002520	147	0.00035	0.00126	0.001640
121	0.00024	0.00004	0.002060	148	0.00098	0.00133	0.002140
122	0.00012	0.00071	0.000220	149	0.00086	0.00365	0.002520
123	0.00051	0.0009	0.003540	150	0.00106	0.00114	0.002060
124	0.00086	0.00298	0.002140	151	0.00059	0.00129	0.000220
125	0.00047	0.00055	0.000340	152	0.00043	0.00086	0.003540
126	0.00165	0.00067	0.001860	153	0.00075	0.00349	0.002140
127	0.00047	0.00126	0.003940	154	0.00047	0.00055	0.000340
128	0.00008	0.00086	0.002680	155	0.00024	0.00008	0.002680
129	0.00047	0.00071	0.001820	156	0.00094	0.00075	0.003620
130	0.00043	0.00027	0.003940	157	0.00149	0.0011	0.001700
131	0.00043	0.00114	0.003000	158	0.00086	0.00082	0.000060
132	0.00126	0.00047	0.002440	159	0.00016	0.00027	0.002440
133	0.00082	0.00118	0.001560	160	0.00118	0.00129	0.002100
134	0.00082	0.00063	0.001040	161	0.00067	0.0011	0.003160
135	0.00122	0.00071	0.003080	162	0.00067	0.0009	0.000840

ตารางที่ ข.4 การสันสะท้อนระดับที่สาม ถ่วงน้ำหนัก 3 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
163	0.00165	0.00102	0.002140	190	0.00035	0.00118	0.004100
164	0.00063	0.00031	0.001500	191	0.0011	0.00114	0.002380
165	0.00086	0.00122	0.002760	192	0.00098	0.00071	0.002180
166	0.00067	0.00004	0.000260	193	0.00063	0.00031	0.004260
167	0.00063	0.00141	0.000540	194	0.00086	0.00047	0.000020
168	0.00067	0.00043	0.001500	195	0.00102	0.00043	0.001900
169	0.00047	0.0011	0.004260	196	0.00047	0.0011	0.000220
170	0.00027	0.0011	0.004180	197	0.00051	0	0.001360
171	0.00016	0.00035	0.002520	198	0.00055	0.00063	0.000880
172	0.00094	0.00008	0.001980	199	0.00039	0.00106	0.003940
173	0.00059	0.00027	0.001740	200	0.00145	0.00145	0.001940
174	0.0002	0.00059	0.002520	201	0.00047	0.00106	0.003780
175	0.00039	0.00133	0.003620	202	0.00047	0.0009	0.000060
176	0.00165	0.00129	0.000480	203	0.00071	0.00008	0.002020
177	0.00067	0.00145	0.002920	204	0.00043	0.00008	0.001420
178	0.0009	0.00129	0.000220	205	0.00035	0.00012	0.003940
179	0.00071	0.00353	0.000060	206	0.00063	0.00122	0.003000
180	0.00078	0.00063	0.000300	207	0.0002	0.00043	0.002440
181	0.00067	0.00031	0.002380	208	0.00129	0.00102	0.001560
182	0.00102	0.00255	0.000100	209	0.00047	0.00082	0.001040
183	0.00047	0.00129	0.003700	210	0.00035	0.00094	0.003080
184	0.00137	0.00184	0.001240	211	0.00051	0.00024	0.001660
185	0.00039	0.00071	0.003780	212	0.00114	0.00027	0.004020
186	0.00082	0.00055	0.002140	213	0.00106	0.00141	0.001000
187	0.00094	0.00106	0.000640	214	0.00161	0.00118	0.000560
188	0.00106	0.00051	0.002140	215	0.00047	0.00102	0.003460
189	0.00035	0.00051	0.003940	216	0.00055	0.00035	0.000720

ตารางที่ ข.4 การสันสะท้อนระดับที่สาม ถ่วงน้ำหนัก 3 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
217	0.00141	0.00192	0.001940	244	0.00082	0	0.002440
218	0.0009	0.00024	0.001420	245	0.00055	0.00043	0.001560
219	0.00016	0.00059	0.003860	246	0.00086	0.0009	0.001040
220	0.00102	0.00106	0.001080	247	0.00043	0.00075	0.003080
221	0.00094	0.00153	0.000400	248	0.00008	0.00024	0.001660
222	0.00122	0.00126	0.001640	249	0.00106	0.00294	0.004020
223	0.00086	0.0002	0.002140	250	0.00102	0.00102	0.001000
224	0.00027	0.00043	0.002520	251	0.00086	0.00031	0.000560
225	0.00106	0.00043	0.002060	252	0.00133	0.00192	0.003460
226	0.00157	0.00161	0.000220	253	0.00047	0.00067	0.000720
227	0.00031	0.00122	0.003540	254	0.00012	0.00098	0.001940
228	0.0011	0.00031	0.002140	255	0.00047	0.00047	0.001420
229	0.00161	0.00118	0.002140	256	0.00012	0.00075	0.003860
230	0.00035	0.00082	0.003940	257	0.00153	0.00145	0.001080
231	0.00055	0.0011	0.004100	258	0.00012	0.00106	0.000400
232	0.00063	0.00071	0.002380	259	0.00082	0.00086	0.001640
233	0.00016	0.00051	0.002180	260	0.00114	0.00012	0.002140
234	0.00016	0.00047	0.004260	261	0.0009	0.00082	0.002520
235	0.00126	0.00059	0.000020	262	0.00102	0.00165	0.002060
236	0.00039	0.00086	0.001900	263	0.00027	0.00059	0.000220
237	0.00098	0.00247	0.000220	264	0.00051	0.00122	0.003540
238	0.00016	0.00059	0.001360	265	0	0.00075	0.002140
239	0.00141	0.00196	0.000880	266	0.00078	0.00102	0.000340
240	0.00149	0.00133	0.003000	267	0.00118	0.00114	0.001860
241	0.00114	0.00161	0.001780	268	0.00063	0.00027	0.003940
242	0.00098	0.00031	0.003940	269	0.0002	0.00043	0.002680
243	0.00016	0.00051	0.003000	270	0.00031	0.00082	0.001820

ตารางที่ ข.4 การสันสะท้อนระดับที่สาม ถ่วงน้ำหนัก 3 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
271	0.00153	0.00157	0.003940	298	0.00051	0.0009	0.001700
272	0.00012	0.00059	0.003000	299	0.00071	0.00063	0.000060
273	0.00102	0.00051	0.002440	300	0.00149	0.00118	0.002440
274	0.00047	0.0011	0.001560	301	0.00161	0.0011	0.002100
275	0.00012	0.00059	0.001040	302	0.00059	0.00043	0.003160
276	0.00047	0.00024	0.003080	303	0.00055	0.00098	0.000840
277	0.00039	0.00031	0.001660	304	0.00055	0.00114	0.002140
278	0.00137	0.00177	0.004020	305	0.00173	0.00102	0.001500
279	0.00082	0.00169	0.001000	306	0.00059	0.00039	0.002760
280	0.00133	0.002	0.000560	307	0.00059	0.00075	0.000260
281	0.00047	0.00122	0.003460	308	0.0002	0.00067	0.000540
282	0.00078	0.00004	0.000720	309	0.00039	0.00082	0.001500
283	0.00067	0.00024	0.001940	310	0.00043	0.00059	0.004260
284	0.00149	0.00161	0.001420	311	0.0011	0.00271	0.004180
285	0.00047	0.0011	0.003860	312	0.00063	0.00004	0.002520
286	0.00067	0.00282	0.001080	313	0.00098	0.00102	0.001980
287	0.00043	0.00059	0.000400	314	0.00055	0.00031	0.001740
288	0.00075	0.00082	0.001640	315	0.00067	0.00279	0.002520
289	0.00047	0.0011	0.002140	316	0.00075	0.00373	0.003620
290	0.00051	0.00078	0.002520	317	0.00098	0.00043	0.000480
291	0.00059	0.00012	0.002060	318	0.00004	0.00106	0.002920
292	0.00004	0.00078	0.000220	319	0.00051	0.00047	0.000220
293	0.00078	0.00043	0.003540	320	0.00071	0.0033	0.000060
294	0.00165	0.00094	0.002140	321	0.00067	0.00035	0.000300
295	0.00165	0.00137	0.000340	322	0.00063	0.00047	0.002380
296	0.00078	0.00173	0.002680	323	0.00055	0.0011	0.000100
297	0.00063	0.00051	0.003620	324	0.00078	0.00271	0.003700

ตารางที่ ข.4 การสันสเทือนระดับที่สาม ถ่วงน้ำหนัก 3 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
325	0.00071	0.00086	0.001240	352	0.00047	0.00016	0.000560
326	0.00024	0.00043	0.003780	353	0.00016	0.00067	0.003700
327	0.00145	0.00173	0.002140	354	0.00027	0.0011	0.002680
328	0.00047	0.00122	0.000640	355	0.00094	0.00027	0.001780
329	0.00086	0.00075	0.002140	356	0.00153	0.0018	0.003400
330	0.00008	0.00051	0.003940	357	0.00165	0.0011	0.001500
331	0.00039	0.00016	0.004100	358	0.00016	0.00039	0.000960
332	0.00051	0.00118	0.001780	359	0.00161	0.00078	0.002680
333	0.00098	0.00282	0.001120	360	0.00075	0.00063	0.002380
334	0.00012	0.00094	0.000800	361	0.00145	0.00071	0.002020
335	0.00078	0.00251	0.001900	362	0.00075	0.00345	0.003940
336	0.00169	0.00145	0.000260	363	0.00141	0.0018	0.003780
337	0.00059	0.0009	0.000100	364	0.00106	0.00043	0.000260
338	0.00122	0.00035	0.003000	365	0.00078	0.00008	0.000460
339	0.00004	0.00043	0.000840	366	0.00027	0	0.000640
340	0.00059	0.00027	0.001240	367	0.00141	0.00102	0.001860
341	0.00169	0.00145	0.001640	368	0.00082	0.00043	0.004260
342	0.00122	0.00098	0.002520	369	0.00098	0.00059	0.001120
343	0.00031	0.00078	0.003860	370	0.00043	0.00137	0.002220
344	0.00016	0.00102	0.001420	371	0.00043	0.00126	0.001040
345	0.00078	0.00008	0.002680	372	0.00043	0.0009	0.001700
346	0.00082	0.00286	0.000880	373	0.00008	0.00094	0.004100
347	0.00157	0.00141	0.000480	374	0.00004	0.00071	0.003860
348	0.00145	0.00126	0.002440	375	0.00145	0.00173	0.000020
349	0.00059	0.00098	0.000880	376	0.00071	0.00326	0.002020
350	0.00047	0.00067	0.001160	377	0.00067	0.00016	0.001420
351	0.00027	0.00051	0.001820	378	0.00059	0.00016	0.000560

ตารางที่ ข.4 การสันสะท้อนระดับที่สาม ถ่วงน้ำหนัก 3 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
379	0.00016	0.00043	0.004480	390	0.00082	0.00208	0.001480
380	0.00094	0.00133	0.001980	391	0.00012	0.00035	0.004480
381	0.00082	0.00137	0.002320	392	0.00082	0.00169	0.001560
382	0.00051	0.00078	0.004020	393	0.00004	0.0011	0.002920
383	0.00051	0.00043	0.003460	394	0.00004	0.00063	0.000020
384	0.0011	0.00035	0.000160	395	0.00039	0.00047	0.003460
385	0.00161	0.00196	0.003940	396	0.00149	0.00086	0.000960
386	0.00161	0.00118	0.003460	397	0.00035	0.00078	0.003940
387	0.00098	0.00078	0.001940	398	0.0002	0.00051	0.002540
388	0.00024	0.00012	0.001780	399	0.00043	0.0009	0.001160
389	0.00035	0.00067	0.001780	400	0.00063	0.0002	0.001507



ตารางที่ ข.5 การสันสะท้อนระดับที่สี่ ถ่วงน้ำหนัก 4 คู่

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
1	0.00106	0	0.003620	28	0.00192	0.00051	0.002420
2	0.0018	0.00047	0.002900	29	0.00129	0.00004	0.002900
3	0.0002	0.00047	0.005100	30	0.00047	0.00051	0.005500
4	0.0022	0.00051	0.000000	31	0.002	0.0002	0.004940
5	0.00047	0.00031	0.003860	32	0.00027	0.00024	0.005260
6	0.00059	0.00012	0.004000	33	0.00216	0.0002	0.000000
7	0.00102	0.00082	0.004080	34	0.00031	0.0009	0.004620
8	0.00126	0.00008	0.002900	35	0.00039	0.00031	0.002120
9	0.00012	0.00118	0.004700	36	0.00161	0.00039	0.001640
10	0.00047	0.0002	0.003460	37	0.00153	0.00126	0.003440
11	0.00078	0.00024	0.003920	38	0.00102	0.00016	0.003780
12	0.00047	0.00039	0.003860	39	0.00212	0.00024	0.002040
13	0.00126	0.00039	0.003360	40	0.0002	0.00039	0.004720
14	0.00067	0.00016	0.004240	41	0.00137	0.00165	0.003440
15	0.002	0.00031	0.002660	42	0.002	0.00051	0.004300
16	0.00098	0.00051	0.004000	43	0.00063	0.00043	0.005740
17	0.00035	0.00027	0.004080	44	0.00055	0.00035	0.005500
18	0.00184	0.0011	0.002180	45	0.00078	0.00133	0.004300
19	0.0002	0.00118	0.004780	46	0.00067	0.0009	0.003840
20	0.00031	0.00024	0.003780	47	0.00027	0.00024	0.005020
21	0.00188	0.00027	0.003060	48	0.002	0.00055	0.003780
22	0.00047	0.00035	0.002760	49	0.00196	0.00035	0.002000
23	0.00051	0.00027	0.003300	50	0.00212	0.00051	0.003920
24	0.00012	0.00106	0.004780	51	0.00118	0.00169	0.003600
25	0.0011	0.00012	0.003780	52	0.00094	0.00012	0.003700
26	0.00035	0.00027	0.003300	53	0.0018	0.00086	0.003140
27	0.00055	0.00035	0.004240	54	0.00192	0.00059	0.002420

ตารางที่ ข.5 การสันสะท้อนระดับที่สี่ ถ่วงน้ำหนัก 4 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
55	0	0.00094	0.004860	82	0.00039	0.0002	0.005100
56	0.00196	0.00063	0.002340	83	0.00204	0.00039	0.000000
57	0.00094	0.00031	0.003920	84	0.00212	0.00016	0.003860
58	0.00071	0.00024	0.004880	85	0.00063	0.00043	0.004000
59	0.00106	0.00133	0.004300	86	0.00051	0.00126	0.004080
60	0.00208	0.00043	0.002660	87	0.00024	0.0009	0.002900
61	0.0009	0.00055	0.004000	88	0.00145	0.00133	0.004700
62	0.00122	0.00063	0.000000	89	0.0022	0.00031	0.003460
63	0.0009	0.00126	0.004300	90	0.00067	0.00149	0.003920
64	0.00039	0.00035	0.004000	91	0.00055	0.00043	0.003860
65	0.00239	0.00004	0.001640	92	0.0022	0.00016	0.003360
66	0.00118	0.00008	0.003440	93	0.0022	0.00027	0.004240
67	0.00059	0.00031	0.003780	94	0.00055	0.00086	0.002660
68	0.00192	0.00063	0.002040	95	0.0022	0.00043	0.004000
69	0.00039	0	0.000400	96	0.00071	0.00043	0.004080
70	0.00012	0.0009	0.005340	97	0.00184	0.00051	0.002180
71	0.00106	0.00063	0.004780	98	0.00216	0.00016	0.004780
72	0.00173	0.00078	0.000780	99	0.00235	0.00016	0.003780
73	0.002	0.00039	0.003060	100	0.00177	0.00039	0.003060
74	0.00094	0.00051	0.003540	101	0.00024	0.00039	0.002760
75	0.00039	0.00039	0.002900	102	0.00106	0.00059	0.003300
76	0.00228	0.00027	0.001800	103	0.002	0.00059	0.004780
77	0.00071	0	0.004160	104	0.0018	0.00067	0.003780
78	0.00173	0.00137	0.003620	105	0.00024	0.00016	0.003300
79	0.00118	0.0009	0.002420	106	0.00161	0.00133	0.004240
80	0.00016	0.0011	0.003620	107	0.00208	0.00035	0.002420
81	0.00212	0.00024	0.002900	108	0.00192	0.00012	0.002900

ตารางที่ ข.5 การสันสะท้อนระดับที่สี่ ถ่วงน้ำหนัก 4 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
109	0.00216	0.00043	0.005500	136	0.00141	0.00024	0.005340
110	0.00094	0.00043	0.004940	137	0.00094	0.00059	0.004160
111	0.00184	0.00106	0.005260	138	0.00224	0.00004	0.000620
112	0.00071	0.00035	0.000000	139	0.00145	0.00008	0.001960
113	0.002	0.00031	0.004620	140	0.00031	0.00008	0.004080
114	0.00012	0.00129	0.002120	141	0.0002	0.00141	0.004540
115	0.00161	0.00008	0.001640	142	0.00078	0.00035	0.004160
116	0.00059	0.00031	0.003440	143	0.00188	0.00086	0.003200
117	0.002	0.00059	0.004000	144	0.00094	0.00055	0.000480
118	0.002	0.00075	0.002420	145	0.00239	0.00043	0.003680
119	0.00047	0.00075	0.003280	146	0.00071	0.00055	0.004160
120	0.00086	0.00043	0.003680	147	0.00228	0.00016	0.005100
121	0.00153	0.00086	0.001240	148	0.00094	0.00043	0.000400
122	0.00173	0.00094	0.002900	149	0.0009	0.00047	0.005340
123	0.0002	0.00141	0.004540	150	0.00224	0.00039	0.004780
124	0.00212	0.00071	0.002420	151	0.00078	0.00008	0.000780
125	0.0018	0.00059	0.001720	152	0.0002	0.00137	0.003060
126	0.00208	0.00078	0.001960	153	0.00063	0.00027	0.003540
127	0.00051	0.00039	0.003920	154	0.00059	0.00047	0.002900
128	0.00059	0.00153	0.004220	155	0.00216	0	0.001800
129	0.00043	0.00051	0.002660	156	0.00102	0.00004	0.004160
130	0.00224	0.00024	0.000300	157	0.00239	0.00012	0.003620
131	0.00188	0.00086	0.001960	158	0.00055	0.00016	0.002420
132	0.00071	0.00008	0.003780	159	0.00149	0.00055	0.003620
133	0.00071	0.00016	0.004000	160	0.00047	0.00008	0.002900
134	0.00204	0.00039	0.000720	161	0.00247	0.00016	0.005100
135	0.0022	0.00063	0.002260	162	0.00224	0.00008	0.000000

ตารางที่ ข.5 การสันสะท้อนระดับที่สี่ ถ่วงน้ำหนัก 4 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
163	0.00075	0.00051	0.003860	190	0.00098	0.00059	0.005260
164	0.00235	0.00039	0.004000	191	0.00216	0.00031	0.000000
165	0.00224	0.00031	0.004080	192	0.0018	0.00082	0.004620
166	0.00208	0.00063	0.002900	193	0.00173	0.00024	0.002120
167	0.00078	0.00055	0.004700	194	0.00231	0.00059	0.001640
168	0.002	0.00008	0.003460	195	0.00141	0.00157	0.003440
169	0.00137	0.00051	0.003920	196	0.0009	0.00043	0.003780
170	0.00212	0.00012	0.003860	197	0.00067	0.00035	0.002040
171	0.00059	0.00031	0.003360	198	0.00216	0.00035	0.000400
172	0.00016	0.0002	0.004240	199	0.00059	0.00039	0.005340
173	0.00228	0.00016	0.002660	200	0	0.00098	0.004780
174	0.00063	0.00043	0.004000	201	0.00086	0.00047	0.000780
175	0.00075	0.00016	0.004080	202	0.00118	0.00008	0.003060
176	0.00212	0.0002	0.002180	203	0.002	0.00024	0.003540
177	0.00075	0.00008	0.004780	204	0.00051	0.00043	0.002900
178	0.00004	0.0011	0.003780	205	0.00208	0.00035	0.001800
179	0.00012	0.00106	0.003060	206	0.002	0.00035	0.004160
180	0.00071	0.00035	0.002760	207	0.00078	0.00012	0.003620
181	0	0.00012	0.003300	208	0.002	0.00063	0.002420
182	0.00051	0.00024	0.004780	209	0.00106	0	0.003620
183	0.0011	0.00098	0.003780	210	0.0018	0.00047	0.002900
184	0.00071	0.00008	0.003300	211	0.0002	0.00047	0.005100
185	0.00114	0.00059	0.004240	212	0.0022	0.00051	0.000000
186	0.00153	0.00008	0.002420	213	0.00047	0.00031	0.003860
187	0.00114	0.00039	0.002900	214	0.00059	0.00012	0.004000
188	0.00078	0.00012	0.005500	215	0.00102	0.00082	0.004080
189	0.00204	0.00047	0.004940	216	0.00126	0.00008	0.002900

ตารางที่ ข.5 การสันสะท้อนระดับที่สี่ ถ่วงน้ำหนัก 4 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
217	0.00012	0.00118	0.004700	244	0.00161	0.00039	0.001640
218	0.00047	0.0002	0.003460	245	0.00153	0.00126	0.003440
219	0.00078	0.00024	0.003920	246	0.00102	0.00016	0.003780
220	0.00047	0.00039	0.003860	247	0.00212	0.00024	0.002040
221	0.00126	0.00039	0.003360	248	0.0002	0.00039	0.004720
222	0.00067	0.00016	0.004240	249	0.00137	0.00165	0.003440
223	0.002	0.00031	0.002660	250	0.002	0.00051	0.002300
224	0.00098	0.00051	0.004000	251	0.00063	0.00043	0.005740
225	0.00035	0.00027	0.004080	252	0.00055	0.00035	0.005500
226	0.00184	0.0011	0.002180	253	0.00078	0.00133	0.004300
227	0.0002	0.00118	0.004780	254	0.00067	0.0009	0.003840
228	0.00031	0.00024	0.003780	255	0.00027	0.00024	0.005020
229	0.00188	0.00027	0.003060	256	0.002	0.00055	0.004380
230	0.00047	0.00035	0.002760	257	0.00196	0.00035	0.002000
231	0.00051	0.00027	0.003300	258	0.00212	0.00051	0.003920
232	0.00012	0.00106	0.004780	259	0.00118	0.00169	0.003600
233	0.0011	0.00012	0.003780	260	0.00094	0.00012	0.003700
234	0.00035	0.00027	0.003300	261	0.0018	0.00086	0.003140
235	0.00055	0.00035	0.004240	262	0.00192	0.00059	0.002420
236	0.00192	0.00051	0.002420	263	0	0.00094	0.004860
237	0.00129	0.00004	0.002900	264	0.00196	0.00063	0.002340
238	0.00047	0.00051	0.005500	265	0.00094	0.00031	0.003920
239	0.002	0.0002	0.004940	266	0.00071	0.00024	0.004880
240	0.00027	0.00024	0.005260	267	0.00106	0.00133	0.004300
241	0.00216	0.0002	0.000000	268	0.00208	0.00043	0.002660
242	0.00031	0.0009	0.004620	269	0.0009	0.00055	0.004000
243	0.00039	0.00031	0.002120	270	0.00122	0.00063	0.000000

ตารางที่ ข.5 การสันสะท้อนระดับที่สี่ ถ่วงน้ำหนัก 4 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
271	0.0009	0.00126	0.004300	298	0.00067	0.00149	0.004700
272	0.00039	0.00035	0.004000	299	0.00055	0.00043	0.003460
273	0.00239	0.00004	0.001240	300	0.0022	0.00016	0.003920
274	0.00118	0.00008	0.003220	301	0.0022	0.00027	0.003860
275	0.00059	0.00031	0.001640	302	0.00055	0.00086	0.003360
276	0.00192	0.00063	0.003440	303	0.0022	0.00043	0.004240
277	0.00039	0	0.003780	304	0.00071	0.00043	0.002660
278	0.00012	0.0009	0.002040	305	0.00184	0.00051	0.004000
279	0.00106	0.00063	0.000400	306	0.00216	0.00016	0.004080
280	0.00173	0.00078	0.005340	307	0.00235	0.00016	0.002180
281	0.002	0.00039	0.004780	308	0.00177	0.00039	0.004780
282	0.00094	0.00051	0.000780	309	0.00024	0.00039	0.003780
283	0.00039	0.00039	0.003060	310	0.00106	0.00059	0.003060
284	0.00228	0.00027	0.003540	311	0.002	0.00059	0.002760
285	0.00071	0	0.002900	312	0.0018	0.00067	0.003300
286	0.00173	0.00137	0.001800	313	0.00024	0.00016	0.004780
287	0.00118	0.0009	0.004160	314	0.00161	0.00133	0.003780
288	0.00016	0.0011	0.003620	315	0.00208	0.00035	0.003300
289	0.00212	0.00024	0.002420	316	0.00192	0.00012	0.004240
290	0.00039	0.0002	0.003620	317	0.00216	0.00043	0.002420
291	0.00204	0.00039	0.002900	318	0.00094	0.00043	0.002900
292	0.00212	0.00016	0.005100	319	0.00184	0.00106	0.005500
293	0.00063	0.00043	0.000000	320	0.00071	0.00035	0.004940
294	0.00051	0.00126	0.003860	321	0.002	0.00031	0.005260
295	0.00024	0.0009	0.004000	322	0.00012	0.00129	0.000000
296	0.00145	0.00133	0.004080	323	0.00161	0.00008	0.004620
297	0.0022	0.00031	0.002900	324	0.00059	0.00031	0.002120

ตารางที่ ข.5 การสันสเทือนระดับที่สี่ ถ่วงน้ำหนัก 4 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
325	0.002	0.00059	0.001640	352	0.00094	0.00055	0.003780
326	0.002	0.00075	0.003440	353	0.00239	0.00043	0.003300
327	0.00047	0.00075	0.003280	354	0.00071	0.00055	0.004240
328	0.00086	0.00043	0.003620	355	0.00228	0.00016	0.002420
329	0.00153	0.00086	0.002900	356	0.00094	0.00043	0.002900
330	0.00173	0.00094	0.005100	357	0.0009	0.00047	0.005500
331	0.0002	0.00141	0.000000	358	0.00224	0.00039	0.004940
332	0.00212	0.00071	0.003860	359	0.00078	0.00008	0.005260
333	0.0018	0.00059	0.004000	360	0.0002	0.00137	0.000000
334	0.00208	0.00078	0.004080	361	0.00063	0.00027	0.004620
335	0.00051	0.00039	0.002900	362	0.00059	0.00047	0.002120
336	0.00059	0.00153	0.004700	363	0.00216	0	0.001640
337	0.00043	0.00051	0.003460	364	0.00102	0.00004	0.003440
338	0.00224	0.00024	0.003920	365	0.00239	0.00012	0.003780
339	0.00188	0.00086	0.003860	366	0.00055	0.00016	0.002040
340	0.00071	0.00008	0.003360	367	0.00149	0.00055	0.004720
341	0.00071	0.00016	0.004240	368	0.00047	0.00008	0.003440
342	0.00204	0.00039	0.002660	369	0.00247	0.00016	0.004300
343	0.0022	0.00063	0.004000	370	0.00224	0.00008	0.005740
344	0.00141	0.00024	0.004080	371	0.00075	0.00051	0.003500
345	0.00094	0.00059	0.002180	372	0.00235	0.00039	0.004300
346	0.00224	0.00004	0.004780	373	0.00224	0.00031	0.003840
347	0.00145	0.00008	0.003780	374	0.00208	0.00063	0.005020
348	0.00031	0.00008	0.003060	375	0.00078	0.00055	0.004380
349	0.0002	0.00141	0.002760	376	0.002	0.00008	0.004000
350	0.00078	0.00035	0.003300	377	0.00137	0.00051	0.003920
351	0.00188	0.00086	0.004780	378	0.00212	0.00012	0.003600

ตารางที่ ข.5 การสันสเทือนระดับที่สี่ ถ่วงน้ำหนัก 4 คู่ (ต่อ)

ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z	ลำดับ	แกน X	แกน Y	แกน Z
379	0.00059	0.00031	0.003700	390	0.00051	0.00024	0.004300
380	0.00016	0.0002	0.003140	391	0.0011	0.00098	0.002040
381	0.00228	0.00016	0.002420	392	0.00071	0.00008	0.003320
382	0.00063	0.00043	0.004860	393	0.00114	0.00059	0.002560
383	0.00075	0.00016	0.002340	394	0.00153	0.00008	0.005420
384	0.00212	0.0002	0.003920	395	0.00114	0.00039	0.000880
385	0.00075	0.00008	0.004880	396	0.00078	0.00012	0.002980
386	0.00004	0.0011	0.004300	397	0.00204	0.00047	0.004400
387	0.00012	0.00106	0.002660	398	0.00098	0.00059	0.002220
388	0.00071	0.00035	0.004000	399	0.00216	0.00031	0.004040
389	0	0.00012	0.000000	400	0	0	0.000713



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Kiattikhun Polsaen and Nara Samattapong. (2020). **Universal Machine Tracking Device.**

SUT International Virtual Conference on Science and Technology (IVCST 2020), Nakhon

Ratchasima, Thailand. August 28 th, 2020. 175-180 PP.



EAT0030

UNIVERSAL MACHINE TRACKING DEVICE

Kiattikhun Polsaen¹, and Nara Samattapong^{1,*}

¹ Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District,
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

* Corresponding Author: nara@sut.ac.th

Abstract. In the manufacturing industry, One important element is the machine. (Including production belts) This is an important part of determining the cost. Process and production process This affects the cost of raw materials. Including the personnel in the production belt. If you effectively care. It will help to produce continuous operation without interruption. In order to control the machine efficiency as required. It is important to be able to monitor performance data, performance, and issues that may be causing the problem. It is necessary to have a specific device for checking the information the machine. Efficiency Signal and Signal Problems For use in monitoring and evaluation (forecasting), operation, and maintenance. Machinery and conveyor belts.

So if there is a system that can gather important information for each machine. Processed to optimize the maintenance of machinery. The impact on production is minimal. or no effect at all. This is a good thing for a factory.

Keywords : machine, maintenance, conveyor belts

1. Introduction

There are a few numbers of needs in taking care of the machine to be ready for usage effectively. Most of machine repairing process will be required only for damage case or when the process is due. One of the main reasons why the machine is broken is because of abnormally high temperature and vibrates which can't be predicted or measured. Thus, the developers have adjusted to using temperature and vibrating measuring methods by using a microcontroller machine to measure the over-rated high temperature and vibrates from the sensor of this machine. This machine will send the data of measuring via wireless communicating instrument and will show it on the website to enhance the ability to repair the process to be of utmost effectiveness.

1.1. Purpose

1. To create the measuring working status instrument for machines.
2. The instrument can measure both machine's temperature and vibrates.
3. The data of this instrument can be shown on IoT Analytics website.

1.2. Project boundary

1. The data of this instrument can be shown on IoT Analytics website.
2. This system can show the graph of machine's temperature and vibrates every 60 seconds.

2. Research review

If a machine is maintained with a proper maintenance policy, this can lead to the increase in life of a machine. Scheduled Maintenance is the kind of Maintenance in which the maintenance activity is scheduled after a fix interval of time [10]. This research contains the idea of using the computer technology and software to adapt to use for checking the working statement of the machine [5] [8]

which use the motor as power resources combines with using of the Embedded System for analyzing data via internet system in order to be matched with the concept of this study and solve problems. This can be used effectively for producing progress because this can reduce risk factors such as accidentally shutting down case from an electric machine during the producing progress [1] [6]. Fault's checking system and this automatic management for the electric machine will analyze with the input data which is the signal that occurs within the electric machine and this will bring the data to be checked by the Internal Fault instrument. And the signal from electric power resource which will lead to the External Fault checking.

The working progress of Fault's checking system and this automatic management for the electric machine will analyze all variables that might accidentally cause any damages e.g. pressure signal, a current signal, temperature signal [9], and cycle speed signal [2] [3] [4]. This evaluating and showing data program is written by adjusted software using. And this research result will be analyzed by using Artificial Intelligence afterward. Besides, a statistic data is collecting as a document file for checking process as well [7]. If there is anything abnormal occur it will be analyzed and shown on the computer screen on time [6].

3. Method

3.1. Procedures

The machine's statement tracking system is developed with the consist of sensor sets which are installed with motors especially the temperature tracking instrument. Which is meant to be installed inside the motor or around the bearing area of the motor. When we combine the sensor sets with motors already. They will be installed within the main networking computer by connecting all this with the internet system in order to send data to subsidiary members who are responsible for this and have logged in order to access this data as well.

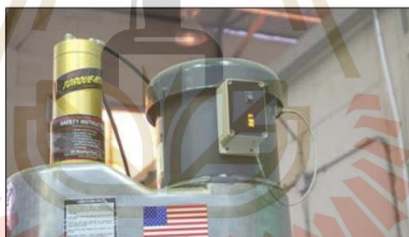


Figure 1. Installing sensor on motor's surface.

The process has begun with accuracy checking of an electric signal data which sensors that have been installed have had tracked and reported by measuring the number of the signal which can be shown on the researching result according to the Figure 2 and this has been compared to the temperature measuring instruments in order to assure all this data is correct and precise. And it has been found that the result of the reading process from the software is somewhat acceptable.

3.2. Real-time platform

For data showing part will be activated on Thingspeak web-board. Thingspeak web-board is used for this showing part in order to show the result of the data number that has been tracked after all this time. This data show is presented as a graph on the computer screen which allows us to notice any changes in data that can be tracked at any time. Besides showing results from tracking, this can save as a database for reviewing as well. The motor used in the test was a class B. This website is for receiving date and showing data that has been sent from the Esp8266 and this can show the parameter's measurement on

the computer screen as well. And it can evaluate result and send signal from order or condition which can be received from this system as well. So Thingspeak web-board is used in this project in order to show the result from machine's statement checking instrument. This software will track on the statement of motor via the computer screen which is installed apart from the motor itself. The number of signal data will be shown as the data of vibrating signal and the data of inner temperature of an electric machine including the form of data showing screen which shows the motor's speed signal.



Figure 2. Show device tracking system results.

4. Result

4.1. Result and Discussion

After successful installation of device on the machine the following graphs are plotted and based on this data we have made several conclusions. The graph which has been plotted is Time Vs Temperature at a constant speed and Time Vs Vibration at a constant speed. For taking the readings and for plotting this graph one has to identify certain places like tool, belt-pulley bearing casing and motor.

The Fig 3, 4, 5 below shows the Temperature of Temperature with Load at constant rpm on motor. In this we show the variation of temperature with load at constant speed. There are three speed ratios in the lathe machine and the graph is plotted on all the three speed ratios.

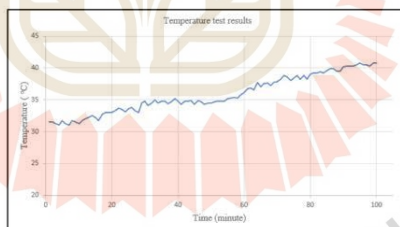


Figure 3. Temperature test results at motor speeds 600 rpm.

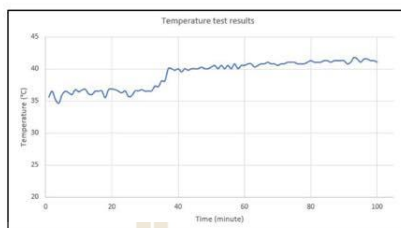


Figure 4. Temperature test results at motor speeds 720 rpm.

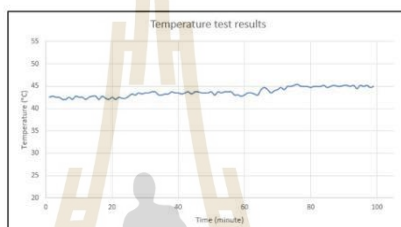


Figure 5. Temperature test results at motor speeds 900 rpm.

The Fig 6, 7, 8 below shows the variation of Vibration with Load at constant rpm on motor. In this we show the variation of temperature with load at constant speed. There are three speed ratios in the lathe machine and the graph is plotted on all the three speed ratios.

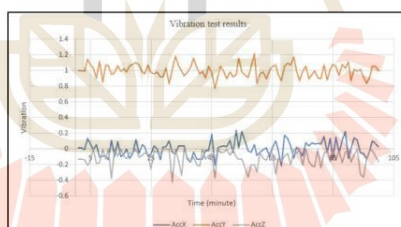


Figure 6. Vibration test results at a motor speed of 600 rpm.

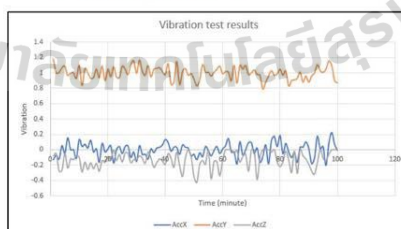


Figure 7. Vibration test results at a motor speed of 720 rpm.

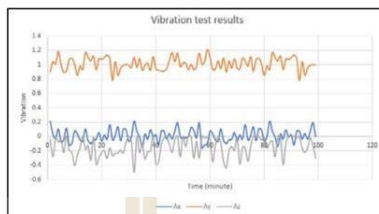


Figure 8. Vibration test results at a motor speed of 900 rpm.

4.2. Analyzation experiment result

1. While running without load Minutes from 0 to 100 minutes it is found that the temperature at the measuring area, when operating for a long time, will increase the temperature in the test area.
2. While running without load Minutes from 0 to 100minutes at that temperature measurements are made at differently according to the speed of the machine.
3. While running without load Minutes from 0 to 100 minutes at the office found that the vibration measurements that vary according to the speed of the machine.

When compared with the temperature values from the test area Found that if operating the engine for a long time, it may cause the motor to heat and damage and should not run the electric motor beyond the label (Nameplate) Because it will make the electric motor Must work overload. We can compare the temperature obtained from the sensor, Figure 9, compare the temperature and the vibration value obtained from the sensor, Figure 10. Compare vibration Meets rated motor class for use in maintenance planning. The motor used in the test was a class B.

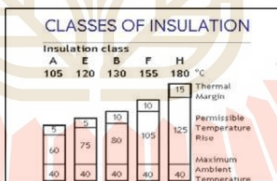


Figure 9. Classes of Insulation motor.

Class	Small-sized machines	Medium-sized machines	Large machines	Turbo machines	Class	Class	Class
Class I	0.25	0.40	0.80	1.12	A	A	A
Class II	0.40	0.63	1.25	1.8	B	B	B
Class III	0.63	1.0	2.0	2.8	C	C	C
Class IV	1.0	1.5	3.15	4.5	D	D	D

A=Good, B=Acceptable, C=Warning, D=Dangerous

Figure 10. Vibration analysis (based on ISO 2372, CDI 2056 and ISO 2954)

5. Conclusion

This research presents the tracking system for motor's working that has been created by investing much less cost compared to purchasing. Which any of authorized person can check information on the internet. And this software that has been developed up can track many kinds of motor's statement which are the speed of motor and inner temperature rate of motor. According to the result of experiment, it was found that the temperature and vibration at 600, 720, 900 rpm were suitable. When comparing data with Figure 9,10. The tracking system for motor's that has been create is easy to use and it can measure the rate of many kinds of parameter that very necessary for meter precisely. Including saving data as database to use for analyzation and calculate the best way to repair and prevent motor from damages. In another word is checking the statement of motor can be done every time. During the operation all the signal rate can be used for comparing to the previous database in order to be used for choosing the best and most appropriate repairing for motor effectively as well.

Acknowledgments

I would like to express Professor Industrial Engineering Department Suranaree University of Technology Without them none of this indeed be possible. Also we are thankful to Dr. Nara Samattapong, Head of Department Industrial Engineering Suranaree University of Technology for providing a concrete background to our research and thereafter.

References

- [1] Li B, Chow MY, Tipsuwan Y, Hung JC. Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis. *IEEE transactions on industrial electronics* 2000;47:1060-9.
- [2] Prasertsiri Varunchittapongsa (2554). *VIBRATION ANALYSIS OF TEST CHAMBER SLOT IN TEST PROCESS*. Suranaree University of Technology
- [3] Suechoey B, Siriporananon S, Pringsakul N, and Chupun P. Analysis of the performance bearings in electric motors. The 3rd SAU National Interdisciplinary Conference 2016; 2016 June 23; Nonthaburi, Thailand. p. 69-73. (In Thai)
- [4] Blödt M, Granjon P, Raison B, Rostaing G. Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring. *IEEE transactions on industrial electronics* 2008;55:1813-22.
- [5] Ray Y, Zhonga, Lihui Wangb, and Xun Xua. An IoT-enabled Real-time Machine Status Monitoring Approach for Cloud Manufacturing. *Procedia CIRP* 63 (2017) 709 – 714.
- [6] Alessandra Caggiano, Tiziana Segreto, Roberto Teti. Cloud Manufacturing Framework for Smart Monitoring of Machining. *Procedia CIRP* 55 (2016) 248 – 253.
- [7] T. Segreto, A. Caggiano, R. Teti. Neuro-fuzzy system implementation in multiple sensor monitoring for Ni-Ti alloy machinability evaluation. *Procedia CIRP* 37 (2015) 193 – 198
- [8] Chinenye D. Okwudibe and B.O Akinloye. Design And Simulation Of Temperature Data Logger. *American Journal of Engineering Research (AJER)* (2017) e-ISSN: 2320-0847 p-ISSN : 2320-0936
- [9] Yavuz Egea , Osman Kalenderb , Hakan Çıtakc , Sedat Nazlıbilekd & Mustafa Çoramıka. New real time temperature monitoring and evaluation system (2015) pp. 652-663
- [10] I.P.S. Ahuja and J.S. Khamba. Total productive maintenance: literature review and directions (2008) pp. 709-756



Certificates of Participation

This is to certify that

Kiattikhun Polsaen

from Suranaree University of Technology

has participated and presented a paper titled

UNIVERSAL MACHINE TRACKING DEVICE

at SUT-International Virtual Conference on Science and Technology (SUT-IVCST 202)

hosted by Suranaree University of Technology, Thailand

28th August , 2020.

W. Pairsuwan

Assoc. Prof. Dr. Weerapong Pairsuwan

Honorary Chair

Rector of Suranaree University of Technology

Kont Chyot

Assoc. Prof. Ft. Lt. Dr. Kontorn Chamniprasart

Conference Chair

Vice Rector for Academic Affairs and Internationalization



At Suranaree University of Technology



Best Presentation Award

This certificate is awarded to

Kiattikhun Polsaen

For the presentation entitled

Universal machine tracking device

at SUT International Virtual Conference on Science and Technology (SUT-IVCST 202)
28th August , 2020, Nakhon Ratchasima, THAILAND.

W. Pairsuwan

Assoc. Prof. Dr. Weerapong Pairsuwan
Honorary Chair

Rector of Suranaree University of Technology

Kont Chyot

Assoc. Prof. Ft. Lt. Dr. Kontorn Chamniprasart
Conference Chair

Vice Rector for Academic Affairs and Internationalization



ประวัติผู้วิจัย

นายเกียรติคุณ พลแสน เกิดเมื่อวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2539 เรียนชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านโนนสวรรค์ ชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนเดชอุดม ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 จังหวัดอุบลราชธานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2561 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม ในวิชาเอกสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งในขณะที่ทำการศึกษาค้นคว้าได้รับมอบหมายเป็นวิทยากรบรรยาย Flexsim Simulation Training 2019 และ 2020 นอกจากนี้ยังได้รับมอบหมายจากอาจารย์ที่ปรึกษาให้เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชา Simulation Systems and Applications



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี