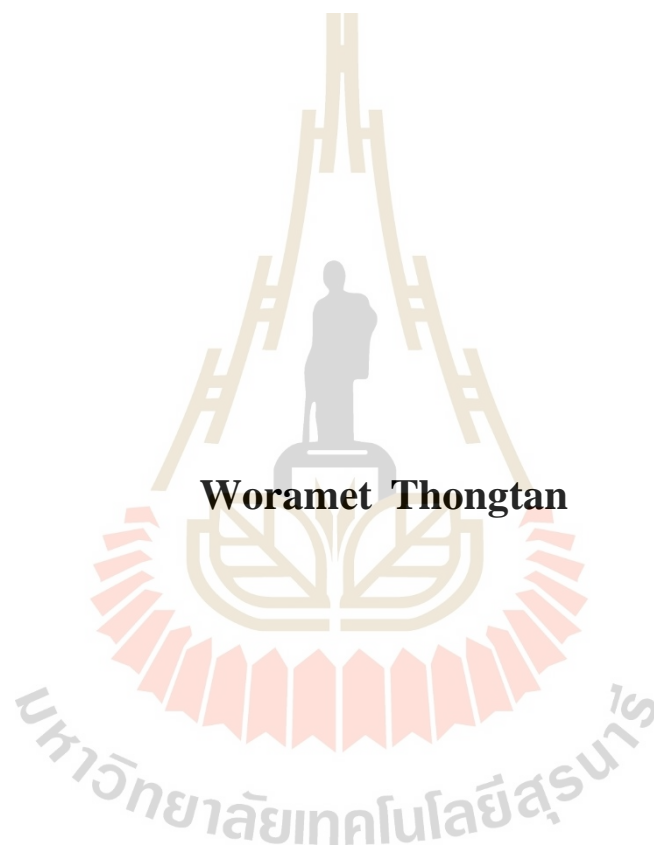


การเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์การสั่นของเพลา
โดยวิธีเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**INCREASING PRECISION IN VIBRATION ANALYSIS
OF A SHAFT ROTOR USING OPERATING
DEFLECTION SHAPE TECHNIQUE**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and
Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2019**

การเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์การสั้นของเพลลาโดยวิธีเทคนิค
รูปร่างเบียงเบนขณะปฏิบัติงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



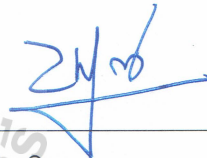
(อ. ดร.ธีทัต คลวิชัย)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสรีรุ่งผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วรมธ ทองตัน : การเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเพลลาโดยวิธี
เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน (INCREASING PRECISION IN VIBRATION
ANALYSIS OF A SHAFT ROTOR USING OPERATING DEFLECTION SHAPE
TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสวีรุผล, 78 หน้า.

ปัจจุบันเครื่องจักรได้มีบทบาทสำคัญในภาคอุตสาหกรรมเมื่อเครื่องจักรทำงานไป
เป็นเวลานานจะเกิดการสึกหรอ จึงจำเป็นต้องมีตรวจสอบเครื่องจักรเพื่อทำการแก้ไขข้อบกพร่อง
หรือวางแผนการซ่อมบำรุง วิธีที่ได้รับความนิยมในการตรวจสอบเครื่องจักรเพื่อวิเคราะห์รูปร่าง
การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรคือ เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน (Operating Deflection
Shape: ODS) เพราะทำให้ผู้วิเคราะห์สามารถเห็นรูปร่างการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร
ขณะเครื่องจักรทำงานได้ โดยมีหลักการจากการประมาณค่าเฉลี่ยระหว่างจุด (Interpolation)
เพื่อการส่งผ่านขนาดการสั่นสะเทือนไปยังจุดต่าง ๆ ซึ่งการประมาณค่าเฉลี่ยระหว่างจุดยังมี
ความละเอียดไม่มากพอและให้ผลลัพธ์ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของขนาด
การสั่นสะเทือนในตำแหน่งที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการเพิ่ม
ความแม่นยำในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเพลลาโดยวิธีเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะ
ปฏิบัติงาน โดยประยุกต์ใช้เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน เทคนิคการสร้างแบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือน และโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อการวิเคราะห์
การสั่นสะเทือนของเพลลาและปรับปรุงให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา วรมธ ทองตัน
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.จิระพล ศรีเสวีรุผล

WORAMET THONGTAN : INCREASING PRECISION IN VIBRATION
ANALYSIS OF A SHAFT ROTOR USING OPERATING DEFLECTION
SHAPE TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. JIRAPHON
SRISERTPOL, Ph.D., 78 PP.

OPERATING DEFLECTION SHAPE/ROTATING MACHINE/SHAFT ROTOR

At the present, the machine is an important role in the industrial sector. When the machine runs for a long time, it will wear out. Therefore, it is necessary to inspect the machine in order to fix or make a maintenance plan. A popular method of inspecting machines to analyze machine vibration shapes is Operating Deflection Shape technique (ODS). Because the ODS can show the vibration shape of the machine while the machine is working by the basis of Interpolation for transmitting vibration amplitude to different points. Interpolation is not enough resolution and the results are not accurate. This causes a deviation in vibration amplitude where the measuring device is not installed. In this research present the increasing precision in vibration analysis of a shaft rotor using operating deflection shape technique, the mathematical modeling technique and finite element program to analyze shaft vibration and increasing precision in vibration analysis to be more accurate.

School of Mechanical Engineering

Academic year 2019

Student's Signature Woramet Thongtan.
Advisor's Signature Suripol I

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ด้วยดีทุกประการ เพราะได้รับคำปรึกษา คำแนะนำ และการช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ ทั้งในด้านทฤษฎี ด้านการดำเนินงานวิจัย ให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ และด้านกระบวนการคิดในการดำรงชีวิต อีกทั้งคอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจ ให้รู้สึกพอกเพียร อดทน ผู้วิจัยซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์, อาจารย์ ดร.ธิตต์ คลวิชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสทรญา แข็งการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน ลีตน ที่ให้ความรู้ในด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้

ขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้มอบทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา แก่ผู้วิจัย และให้การสนับสนุนในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอบพระคุณ ดร.นิติศักดิ์ หนูมาน้อย, คุณอัยญาอุษ รอดพ่าย และคุณสุนทร โยษฐงาม รวมไปถึงบุคลากรใน System and Control Engineering Laboratory ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาในระหว่างการทำงาน ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และประสบการณ์มากขึ้น

ขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ทุก ๆ ท่าน ที่อำนวยความสะดวก ในด้านงานเอกสารต่าง ๆ ตลอดจนให้คำปรึกษาแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณพ่อสายันต์ และคุณแม่อรพินท์ รวมถึงสมาชิกครอบครัว ทองตัน ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูด้วยความรักความอบอุ่น ออบบรมสั่งสอนให้เป็นคนดี กตัญญูรู้คุณ ตลอดจนส่งเสริมการศึกษาและให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา และคอยสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

วรเมธ ทองตัน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	3
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.8 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 เครื่องจักรหมุน.....	6
2.3 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์.....	7
2.3.1 การควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ (Non-feedback control systems).....	7
2.3.2 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control systems).....	7
2.4 การโค้งตัวของเพลา.....	8
2.5 การสั่นสะเทือนแบบบังคับ.....	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1	ระบบการสั่นแบบบังคับที่มี 1 องศาอิสระ (Force vibration single degree of freedom)	10
2.5.2	ระบบการสั่นแบบบังคับที่มีหลายองศาอิสระ (Force vibration multi degree of freedom)	13
2.6	อุปกรณ์การวัดการสั่นสะเทือน	16
2.6.1	ทรานสดิวเซอร์การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนชนิดสัมผัส (Contact vibration transducer)	16
2.6.2	ทรานสดิวเซอร์วัดการสั่นสะเทือนชนิดไม่สัมผัส (Non-contact vibration transducer)	18
2.7	การทดสอบ โมดอล	20
2.7.1	การทดสอบ โมดอลด้วยการใช้ก้อน	20
2.7.2	การทดสอบ โมดอลด้วยการใช้เครื่องสร้างการสั่นสะเทือน	20
2.8	การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม	20
2.9	เทคนิคการปรับเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน	21
2.9.1	การเก็บข้อมูลในการพิจารณาแบบจุดเดียว	21
2.9.2	การเก็บข้อมูลในการพิจารณาหลายจุดวัด	21
2.10	ปรัทศวรรษกรรมที่เกี่ยวข้อง	22
2.10.1	งานวิจัยที่เกี่ยวกับไฟไนต์เอลิเมนต์	22
2.10.2	งานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคการปรับเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน (Operating deflection shape)	23
2.11	สรุป	22
3	วิธีดำเนินการวิจัย	25
3.1	บทนำ	25
3.2	ขั้นตอนทดสอบและประมวลผลข้อมูล	25
3.3	การสร้างเครื่องมือทดสอบ	27
3.3.1	ส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบ	27

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การทดสอบ โมดอล.....	28
3.4.1	อุปกรณ์ในการทดสอบ โมดอล.....	28
3.4.2	ขั้นตอนการทดสอบ โมดอล	29
3.5	การเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดี้.....	30
3.5.1	อุปกรณ์และการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	30
3.5.2	การเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยโปรแกรม LabVIEW	32
3.6	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นของเพลา.....	32
3.6.1	ส่วนประกอบของ Model A.....	32
3.6.2	ส่วนประกอบของ Model B	34
3.7	การใช้ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมในการประมาณค่าพารามิเตอร์.....	35
3.8	การสร้างแผนภาพลอกจากสมการความสัมพันธ์ของระบบ.....	39
3.9	การประมวลผลด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน	41
3.10	สรุป	42
4	ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล.....	44
4.1	บทนำ.....	44
4.2	ผลการทดสอบความถี่ธรรมชาติของชุดทดสอบ	44
4.2.1	ผลการทดสอบแบบเพลาเพียงอย่างเดียว	45
4.2.2	ผลการทดสอบแบบเพลาและมวลถ่วงตรงกลางเพลา	45
4.2.3	ผลการทดสอบแบบทั้งระบบของเครื่องมือทดสอบ.....	46
4.3	ผลการประมวลผลด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์.....	46
4.4	ผลการประมวลผลข้อมูลด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน	49
4.5	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม	53
4.5.1	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี	
	1 องศาอิสระ	53

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.2	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสันสะเทือนที่มี 2 องศาอิสระ	54
4.5.3	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสันสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระ	55
4.6	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือ Parameter estimation	55
4.6.1	การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสันสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระด้วย Parameter estimation	56
4.7	ผลการประมวลผลด้วยเทคนิคเบี่ยงเบนรูปร่างขณะปฏิบัติงานด้วยข้อมูล จากเทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	61
4.8	สรุป	65
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	67
5.1	สรุปผลการวิจัย	67
5.2	ข้อเสนอแนะ	69
รายการอ้างอิง	70
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก.	การใช้โปรแกรม SolidWorks เพื่อหาความถี่ธรรมชาติ.....	71
ภาคผนวก ข.	การใช้โปรแกรม DEWESOFT ในการทดสอบโมดอล	75
ประวัติผู้เขียน	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบ.....	27
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ โมดอล.....	29
4.1 ผลการทดสอบ โมดอล.....	46
4.2 ความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นสะเทือนของเพลลา.....	47
4.3 ความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นสะเทือนของเพลลาที่ใส่คิสิก์ตรงกลางเพลลา.....	48
4.4 เปรียบเทียบความถูกต้องจากการทดสอบ โมดอลและ โปรแกรม SolidWorks	49
4.5 ผลการประมาณค่าระหว่างช่วงของเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน ที่ 1,400 รอบต่อนาที	53
4.6 ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 1 องศาอิสระ	53
4.7 ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 1 องศาอิสระ	54
4.8 ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 2 องศาอิสระ	54
4.9 ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 2 องศาอิสระ	54
4.10 ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระ	55
4.11 ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระ	55
4.12 พารามิเตอร์ของ Model A.....	56
4.13 พารามิเตอร์ของ Model B.....	56
4.14 ขนาดการสั่นสะเทือนของเพลลาและค่าความผิดพลาดในแต่ละจุดของ Model A	60
4.15 ขนาดการสั่นสะเทือนของเพลลาและค่าความผิดพลาดในแต่ละจุดของ Model B.....	60

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างเครื่องจักรหมุน	6
2.2 ระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ.....	7
2.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	8
2.4 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุม PID.....	8
2.5 ลักษณะการ โกงตัวของเพลา.....	9
2.6 เพลาแข็งเกร็งรองรับด้วยแบริ่งที่ยืดหยุ่น.....	9
2.7 เพลาที่ยืดหยุ่นรองรับด้วยแบริ่งที่แข็งเกร็ง.....	9
2.8 แผนภาพวัตถุอิสระของเพลาที่ยืดหยุ่นรองรับด้วยแบริ่งแข็งเกร็ง	10
2.9 ระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่ไม่มีตัวหน่วง.....	11
2.10 แผนภาพวัตถุอิสระของระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่ไม่มีตัวหน่วง	11
2.11 ระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่มีตัวหน่วง.....	12
2.12 แผนภาพวัตถุอิสระของระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่มีตัวหน่วง	13
2.13 ระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่ไม่มีตัวหน่วง.....	14
2.14 แผนภาพวัตถุอิสระของระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่ไม่มีตัวหน่วง	14
2.15 ระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่มีตัวหน่วง.....	16
2.16 แผนภาพวัตถุอิสระของระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่มีตัวหน่วง	16
2.17 ทรานสดิวเซอร์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบความเร็ว.....	17
2.18 ทรานสดิวเซอร์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบความเร่ง	18
2.19 ทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดี้.....	18
2.20 Laser-vibro meter.....	19
2.21 High speed camera set	19
2.22 ตัวอย่างการใช้เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานในการวิเคราะห์ ปล่องลมขนาดใหญ่.....	22
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	26
3.2 เครื่องมือทดสอบสร้างจากโปรแกรม SolidWorks	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ โมดอล	28
3.4 ตำแหน่งการเคาะด้วยค้อนและตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์แบบความเร่ง	30
3.5 อุปกรณ์ในการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลา.....	31
3.6 ทิศทางการวัดการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน	31
3.7 ตำแหน่งการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน	32
3.8 Model A	33
3.9 Model B	34
3.10 ขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม	36
3.11 การเขียนคำสั่งในการคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบที่มี 1 องศาอิสระ	37
3.12 เครื่องมือ Optimization tool และการใช้งานขั้นตอนวิธีพันธุกรรม.....	37
3.13 การเขียนคำสั่งในการคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบที่มี 2 องศาอิสระ	38
3.14 การเขียนคำสั่งในการคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบที่มี 3 องศาอิสระ.....	39
3.15 แผนภาพบล็อกสำหรับ Model A.....	40
3.16 แผนภาพบล็อกสำหรับ Model B.....	40
3.17 แบบจำลองโครงสร้างของเพลลาและแบร์ริง.....	41
3.18 ตัวอย่างการนำสัญญาณการสั่นสะเทือนเข้าสู่โปรแกรม ME'ScopeVES	42
4.1 ผลการทดสอบ โมดอลของเพลลา	45
4.2 ผลการทดสอบ โมดอลของเพลลารวมกับคัสก์.....	47
4.3 ผลการทดสอบ โมดอลของทั้งเครื่องมือทดสอบ.....	48
4.4 การกำหนดทิศทางการเคลื่อนไหวของเพลลา.....	50
4.5 การจำกัดการเคลื่อนไหวของแบร์ริงทั้งสองข้าง.....	50
4.6 รูปร่างการสั่นสะเทือนของเพลลาที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที.....	51
4.7 การเปรียบเทียบผลตอบสนองจริงกับ Model A ที่จุด M1	57
4.8 การเปรียบเทียบผลตอบสนองจริงกับ Model A ที่จุด M2	58
4.9 การเปรียบเทียบผลตอบสนองจริงกับ Model A ที่จุด M3	58
4.10 การเปรียบเทียบผลตอบสนองจริงกับ Model B ที่จุด M1.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	การเปรียบเทียบผลตอบสนองจริงกับ Model B ที่จุด M2.....	59
4.12	การเปรียบเทียบผลตอบสนองจริงกับ Model B ที่จุด M3.....	60
4.13	การโค้งตำแหน่งตัวไถลที่สุดโดยใช้ข้อมูลจาก Model A	61
4.14	การโค้งตำแหน่งตัวไถลที่สุดโดยใช้ข้อมูลจาก Model A.....	62
4.15	การโค้งตำแหน่งตัวไถลที่สุดโดยใช้ข้อมูลจาก Model B.....	63
4.16	การโค้งตำแหน่งตัวไถลที่สุดโดยใช้ข้อมูลจาก Model B.....	64
4.17	เปรียบเทียบขนาดการโค้งตัวของการประมวลผลด้วยเทคนิคต่าง ๆ	65
ก.1	โปรแกรม SolidWorks	72
ก.2	การนำชิ้นงานเข้าสู่โปรแกรม SolidWorks	72
ก.3	ชิ้นงานเมื่ออยู่ใน โปรแกรม SolidWorks	73
ก.4	การกำหนดขนาดเมช.....	73
ก.5	การสร้างเมชที่ชิ้นงาน	74
ก.6	ผลลัพธ์จากการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติด้วยโปรแกรม SolidWorks	74
ข.1	โปรแกรม DEWESOFT X3	76
ข.2	ตำแหน่งการเคาะและติดตั้งทรานสดิวเซอร์	76
ข.3	ผลลัพธ์จากการทดสอบความถี่ธรรมชาติด้วยการทดสอบโมดอล	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันการผลิตสินค้าและบริการในภาคอุตสาหกรรมได้มีการนำเทคโนโลยีเข้ามาเป็นส่วนช่วยในการทำงานอย่างแพร่หลาย หนึ่งในนั้นคือเครื่องจักรที่มีความได้เปรียบกว่าใช้แรงงานมนุษย์ทั้ง ความรวดเร็ว ความเที่ยงตรง และความทนทานในการทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องจักรหมุน (Rotating machine) ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่มีการส่งผ่านกำลังในรูปแบบการหมุนไปยังอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น มอเตอร์ บี้ม และพัดลม เมื่อใช้งานไปเป็นเวลานานจะเกิดการสึกหรอและชำรุดเสียหาย จึงจำเป็นต้องตรวจสอบเครื่องจักรเพื่อทำการแก้ไขหรือวางแผนซ่อมบำรุงเครื่องจักรให้มีสภาพที่พร้อมใช้งาน ในปัจจุบันมีวิธีการที่ใช้สำหรับตรวจสอบเครื่องจักรหลากหลายวิธี เช่น การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยสเปกตรัม (Spectrum analysis) และวิธีที่ได้รับความนิยมในการตรวจสอบเครื่องจักรเพื่อวิเคราะห์รูปร่างการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรคือ (Operating Deflection Shape Technique: ODS) เพราะเป็นวิธีที่ทำให้ผู้วิเคราะห์สามารถเห็นถึงรูปร่างการสั่นสะเทือนจริงของเครื่องจักรขณะที่เครื่องจักรทำงานได้ เช่น รูปร่างการสั่นสะเทือนของปล่องควัน และรูปร่างการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรขนาดใหญ่ โดยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานมีหลักการจากการประมาณค่าเฉลี่ยระหว่างช่วง (Interpolation) เพื่อการประมวลผลค่าขนาดการสั่นในจุดต่าง ๆ และแสดงออกมาเป็นรูปร่างการเคลื่อนไหวยของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ซึ่งการประมวลผลด้วยการประมาณค่าในช่วงยังมีความละเอียดไม่มากนักและให้ผลลัพธ์ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของขนาดการสั่นสะเทือนในจุดที่ไม่สามารถวัดได้ รวมถึงจุดวิกฤติของเครื่องจักร

จากเหตุผลข้างต้นทำให้ทางผู้วิจัยเล็งเห็นข้อบกพร่องนี้และได้นำเสนอการปรับปรุงการวัดด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะทำงาน ซึ่งทำการศึกษาจากเครื่องมือทดสอบที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นตัวแทนของเครื่องจักรหมุน เก็บค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลานในรูปแบบของการกระจัด (Displacement) จากนั้นแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นการเก็บค่าสัญญาณการโก่งตัวของเพลาจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรและนำไปประมวลผลด้วย เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะทำงาน ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบโมดอล (Modal test) ประกอบกับการใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้ได้ความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักรและนำไปใช้ในการประมาณค่าตัวแปรขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของระบบการสั่นสะเทือน และส่วนสุดท้ายเป็นการสร้าง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการสั่นสะเทือน โดยใช้แบบจำลองทางกล มวล สปริง และ ตัวหน่วง ในการอธิบายพฤติกรรมการตอบสนองทางพลวัต โดยใช้การประมาณค่าพารามิเตอร์ เพื่อให้ทราบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการโก่งตัวของเพลลาโดยอ้างอิง ค่าของพารามิเตอร์จากการทดสอบโมดอลและการประมวลผลด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในการกำหนด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เงื่อนไข และขอบเขตในการประมาณค่า จากนั้นนำผลลัพธ์จากการประมวลผล ด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน มาเปรียบเทียบกับความถูกต้องกับการสร้างแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ของระบบการสั่นสะเทือน เพื่อตรวจสอบผลลัพธ์จากการการปรับปรุงความถูกต้อง ในการวัดการโก่งตัวของเพลลา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการวิเคราะห์สั่นของเพลลาในเครื่องจักรหมุน โดยใช้ โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน และวิธีการประมาณ ค่าพารามิเตอร์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นของเพลลา

1.2.2 เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์การสั่นของเพลลาด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบน ขณะปฏิบัติงานได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เครื่องจักรที่ใช้ทดสอบมีเบ어링รองรับที่ปลายทั้งสองข้างของเพลลา และมีดิสก์ ติดตั้งอยู่กึ่งกลางเพลลา ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 350 วัตต์ สามารถควบคุมความเร็ว รอบให้คงที่ได้ในช่วง 1,200-1,700 รอบต่อนาที

1.3.2 ใช้เพลลาเหล็กเกรด SUJ2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ยาว 700 มิลลิเมตร เป็นเพลลาในเครื่องมือทดสอบเพื่อวัดการโก่งตัวของเพลลา

1.3.3 ควบคุมความเร็วรอบที่ 1400 รอบต่อนาที

1.3.4 ใช้ทรานสดิวเซอร์กระแสของเอ็ดดี้ (Eddy current transducer) วัดการโก่งตัวของเพลลา

1.3.5 ใช้ทรานสดิวเซอร์ชนิดความเร่ง (Accelerometer) วัดสัญญาณการสั่นสะเทือน ในการทดสอบโมดอล

1.3.6 ใช้โปรแกรม ME'ScopeVES ในการประมวลผลด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะ ปฏิบัติงาน

1.3.7 ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของการสั่นของเพลลาอย่างน้อย 2 ความถี่ธรรมชาติเบื้องต้น

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1.4.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน การวิเคราะห์รูปร่าง การโค้งตัวของเพลลา การใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน และวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นเพลลา

1.4.2 ออกแบบชุดทดสอบเพื่อเป็นตัวแทนระบบเครื่องจักรหมุนและทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือทดสอบและทำการทดสอบหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องมือทดสอบ

1.4.3 ออกแบบการทดลองสำหรับการทดสอบและการเก็บค่าสัญญาณการโค้งตัวของเพลลาในรูปแบบต่าง ๆ และสร้างแผนภูมิบล็อกในโปรแกรม LabVIEW และ โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนจากเครื่องมือทดสอบ

1.4.4 เก็บค่าสัญญาณการโค้งตัวของเพลลาจากการสั่นสะเทือนจริงและจัดเตรียมข้อมูลเพื่อเข้าสู่กระบวนการประมวลผลข้อมูล

1.4.5 นำข้อมูลสัญญาณการโค้งตัวของเพลลาเข้าสู่การประมวลผลด้วยโปรแกรม ME'ScopeVES เพื่อใช้เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานสร้างเป็นรูปแบบการเคลื่อนไหวของเพลลาขณะปฏิบัติงานจริง

1.4.6 นำข้อมูลสัญญาณการโค้งตัวของเพลลาเข้าสู่การประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ภายในระบบการสั่นสะเทือน

1.4.7 สร้างแบบจำลองโครงสร้างของเพลลาเพื่อหาความถี่ธรรมชาติด้วยโปรแกรม SolidWorks

1.4.8 นำผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการสั่นสะเทือนมาเปรียบเทียบกัน เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและตรวจสอบการปรับปรุงความแม่นยำของการวัด

1.4.9 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลลัพธ์ที่ได้

1.4.10 จัดทำเอกสารและรายงานผลการวิจัย

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

อาคารเครื่องมือ 4 (F4) และอาคารเครื่องมือ 5 (F5) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

1. โปรแกรม ME'ScopeVes เพื่อใช้ในการประมวลผลเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน
2. โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อใช้ในการประมวลผล เทคนิคการสร้างแบบจำลอง
3. โปรแกรม SolidWorks เพื่อใช้ในการประมวลผลเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์
4. โปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้ในการเก็บค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจาก Eddy current transducer
5. อุปกรณ์เก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน NI PIXe-1071 และ 6996 module
6. อุปกรณ์เก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน Dewesoft X3
7. ชุดเครื่องมือทดสอบการ โกงตัวของเพลลา
8. ตัวตรวจรู้ประเภทความเร่ง
9. ตัวตรวจรู้กระแสของเฮ็ดดี
10. ค้อน (Hammer force)
11. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบด้านความแม่นยำ ประโยชน์การใช้งานของกราฟวิเคราะห์ สั่นของเพลลาในเครื่องจักรหมุนของแต่วิธี เช่น โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน และวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นเพลลา
- 1.7.2 สามารถเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์การสั่นของเพลลาด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานได้

1.8 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย ระเบียบวิธีวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลา การ โกงตัวของเพลลา เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน และเทคนิคการสร้างแบบจำลองการสั่นสะเทือน

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัยการออกแบบเครื่องมือทดสอบ การทดสอบ เพื่อหาความถี่ธรรมชาติ การเก็บผลการทดลอง และการนำข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนไป ประมวลผลร่วมกับโปรแกรม ME'ScoprVES และโปรแกรม MATLAB/Simulink

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทำวิจัย ในส่วนของการประมวลผลข้อมูลด้วยเทคนิครูปร่าง เบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน ผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการสั่นสะเทือน และการประมาณค่าตัวแปรในระบบ และการเปรียบเทียบความแม่นยำในการวัดด้วยเทคนิคต่าง ๆ

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะจากงานวิจัย



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในการศึกษาการ โกงตัวของเพลลาและการใช้โปรแกรมในการประมวลผลสัญญาณ การสั่นสะเทือนเพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการวัดด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน จำเป็นต้องมีความเข้าใจในหลักการและทฤษฎีเกี่ยวกับการสั่นสะเทือน และพื้นฐานของระบบทางกลแบบหนึ่งองศาอิสระ (Single degree of freedom) และระบบทางกลแบบหลายองศาอิสระ (Multi degree of freedom) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ การสั่นสะเทือนการทดสอบ Impact test เพื่อหาความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างและนำสัญญาณผลตอบสนองจากการทดสอบ Impact test ไปใช้ร่วมกับการประมาณค่าตัวแปร เพื่อค้นหาตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การใช้เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะทำงาน

2.2 เครื่องจักรหมุน

เครื่องจักรหมุน (Rotating machine) คือ เครื่องจักรที่มีชิ้นส่วนของเครื่องจักรเคลื่อนที่รอบจุดใดจุดหนึ่งในทิศทางเดียวกัน เครื่องจักรหมุนที่ได้รับความนิยมอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม และครัวเรือนคือ มอเตอร์ เนื่องจากเป็น เครื่องจักรต้นกำลังของเครื่องจักรอื่น เช่น พัดลม ปั๊มน้ำ พัดลมอุตสาหกรรม เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1



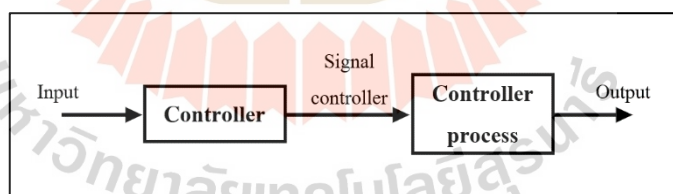
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างเครื่องจักรหมุน

2.3 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ทำให้สามารถใช้งานเครื่องจักรหมุนได้ในความเร็วที่ต้องการและสามารถรักษาความเร็วในการหมุนให้คงที่ได้ สามารถแบ่งการควบคุมออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.3.1 การควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ (Non-feedback control systems)

การควบคุมแบบไม่ป้อนกลับเป็นระบบควบคุมที่ไม่มีการป้อนกลับของผลตอบสนองกลับไปที่ตัวควบคุม หรือเรียกอีกชื่อว่า “ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop control systems)” ระบบควบคุมประเภทนี้เป็นระบบควบคุมที่ผู้ใช้งานระบบต้องปรับค่าเป้าหมายด้วยตัวเอง ไม่มีการชดเชยความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าเป้าหมายและผลตอบสนองของระบบให้ตัวอย่างเช่น พัดลม ซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานอยู่ 4 ระดับ คือ เบอร์ 0-3 เมื่อผู้ใช้งานเปิดใช้งานแล้วพัดลมจะหมุนที่ความเร็วรอบหนึ่งเสมอ แต่ถ้ามีการรบกวนจากภายนอกเช่น มีฝุ่นหรือมีวัสดุไปติดตามแกนหมุนหรือใบพัดของพัดลมจะทำให้พัดลมหมุนได้ความเร็วรอบช้าลงซึ่งพัดลมก็จะไม่มีการชดเชยเพื่อให้หมุนได้ความเร็วรอบเท่าเดิมเหมือนตอนก่อนไม่มีการรบกวนได้ผู้ใช้งานจะต้องเป็นผู้ปรับเอง เช่น ต้องเพิ่มเบอร์ของพัดลมให้มากขึ้น เพื่อให้มีความเร็วรอบเท่าเดิม กล่าวคือ ระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับหรือระบบควบคุมแบบวงเปิดนี้ ไม่สามารถปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงหรือจากการรบกวนภายนอกได้ด้วยตัวเองแผนผังอธิบายขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

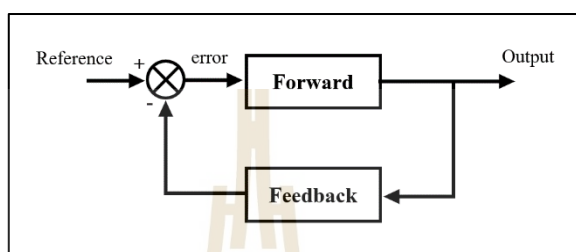


รูปที่ 2.2 ระบบควบคุมแบบไม่ป้อนกลับ

2.3.2 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control systems)

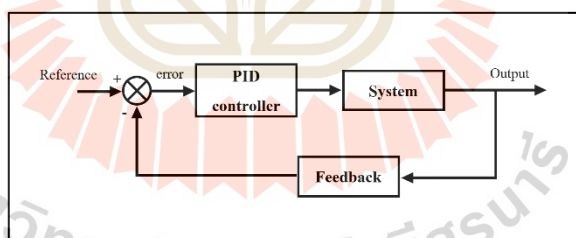
การควบคุมแบบป้อนกลับเป็นระบบควบคุมที่ไม่มีการป้อนกลับของผลตอบสนองกลับไปที่ตัวควบคุม หรือเรียกอีกชื่อว่า “ระบบควบคุมแบบวงปิด (Close-loop control systems)” ระบบควบคุมประเภทนี้เป็นระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับของผลตอบสนองของระบบ เพื่อให้ระบบชดเชยความคลาดเคลื่อนและปรับให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้เองโดยอัตโนมัติ ตัวอย่างเช่น เครื่องปรับอากาศ หากผู้ใช้งานตั้งค่าเป้าหมายเอาไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส เมื่อระบบของ

เครื่องปรับอากาศทำความเย็นได้ถึง 25 องศาเซลเซียสแล้วคอมเพรสเซอร์ก็จะตัดการทำงาน เนื่องจากถึงค่าเป้าหมายแล้ว แต่หากมีแดดออกทำให้อุณหภูมิในห้องสูงขึ้นเป็น 28 องศาเซลเซียส คอมเพรสเซอร์ของเครื่องปรับอากาศก็จะทำงานอีกครั้ง เพื่อทำความเย็นให้มีค่าเท่ากับค่าเป้าหมาย เช่นเดิมโดยอัตโนมัติ แผนผังอธิบายขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

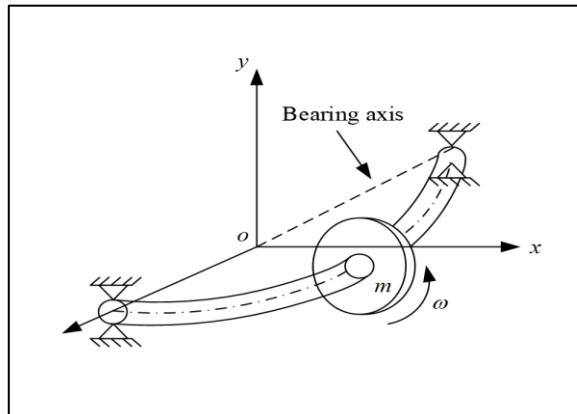
โดยทั่วไปในระบบควบคุมแบบมีการป้อนกลับมีตัวควบคุมหลายชนิด ตัวควบคุมที่ได้รับความนิยมอย่างหนึ่งคือ PID โดยเป็นการต่อเข้ากับระบบควบคุมหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ตัวควบคุม PID

2.4 การโก่งตัวของเพลลา

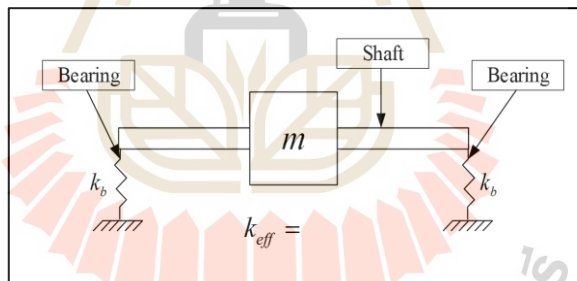
การโก่งตัวของเพลลา (Shaft whirling) เกิดจากแรงเหวี่ยงเนื่องจากน้ำหนักของเพลลาเมื่อเพลลาหมุนจะทำให้เกิดแรงเสียดสมดุล (Unbalance force) กระทำต่อเพลลา ทำให้รูปทรงของเพลลาเกิดการบิดเบี้ยวไปจากรูปทรงเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.5



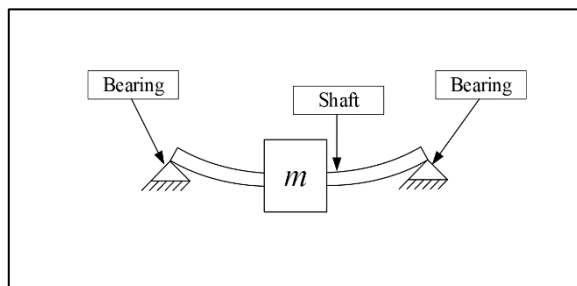
รูปที่ 2.5 ลักษณะการ โกงตัวของเพลา

ลักษณะของเพลาที่รองรับด้วยแบริ่ง (Bearing) ในการศึกษากำหนดให้มี 2 รูปแบบ คือ

- เพลาแบบแข็งเกร็งรองรับด้วยแบริ่งแบบยึดหยุ่น ดังรูปที่ 2.6
- เพลาแบบยึดหยุ่นรองรับด้วยแบริ่งแบบแข็งเกร็ง ดังรูปที่ 2.7

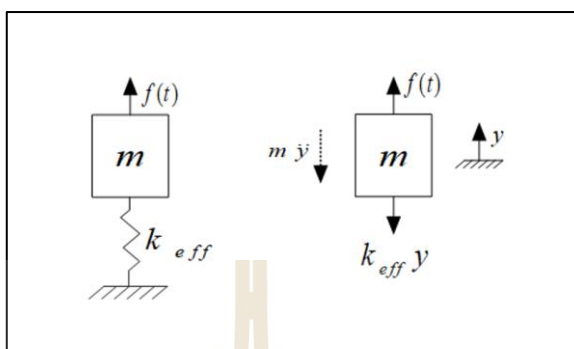


รูปที่ 2.6 เพลาแข็งเกร็งรองรับด้วยแบริ่งที่ยึดหยุ่น



รูปที่ 2.7 เพลาที่ยึดหยุ่นรองรับด้วยแบริ่งที่แข็งเกร็ง

จากรูปแบบของเพลลาที่รองรับด้วยเบริงข้างต้นสามารถเขียนเป็น แผนภาพอิสระของวัตถุ (Free body diagram) ของระบบได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพวัตถุอิสระของเพลลาที่ยึดหยุ่นรองรับด้วยเบริงแข็งเกร็ง

จากการ โกงตัวของเพลลาเนื่องจากแรงเสียดสมดุลสามารถเขียนเป็นสมการที่บอกขนาดของแรงกระทำที่เกิดจากการเสียดสมดุลได้ดังสมการที่ 2.1

$$f(t) = m\omega^2 e \sin \omega t \quad (2.1)$$

2.5 การสั่นสะเทือนแบบบังคับ

การสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Force vibration) คือ การสั่นสะเทือนของระบบเนื่องจากมีแรงภายนอกกระทำต่อระบบ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรกคือ แรงกระทำแบบคาบ (Periodic force) เป็นแรงที่มีการกระทำแบบซ้ำกลับไปกลับมา เช่น แรงกระทำแบบฮาร์โมนิกส์ (Harmonics force) ประเภทที่สอง คือ แรงกระทำแบบไม่เป็นคาบ (Non-periodic force) เป็นแรงกระทำที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงอย่างไม่เป็นคาบ เช่น แรงแบบสุ่ม (Random force) แรงกระแทก (Shock force) เป็นต้น ในทางพลศาสตร์ของการสั่นสะเทือนจะศึกษาผ่านการตอบสนองของระบบที่เป็นแบบจำลองของมวล (Mass), สปริง (Stiffness) และตัวหน่วง (Damping)

2.5.1 ระบบการสั่นแบบบังคับที่มี 1 องศาอิสระ (Force vibration single degree of freedom)

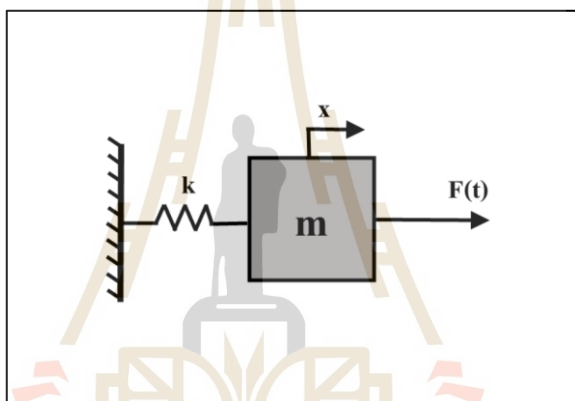
1) การสั่นแบบฮาร์โมนิกส์ของระบบที่ไม่มีตัวหน่วง (Harmonics excitation of undamped system) เป็นระบบการสั่นแบบมีแรงกระทำจากภายนอก มีส่วนประกอบคือ มวล และสปริง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 สามารถเขียนอธิบายแผนภาพวัตถุอิสระได้ดังรูปที่ 2.10

พิจารณาระบบการสั่นแบบฮาร์โมนิกส์ที่ไม่มีความหน่วงมีแรงกระทำจากภายนอก
เท่ากับ

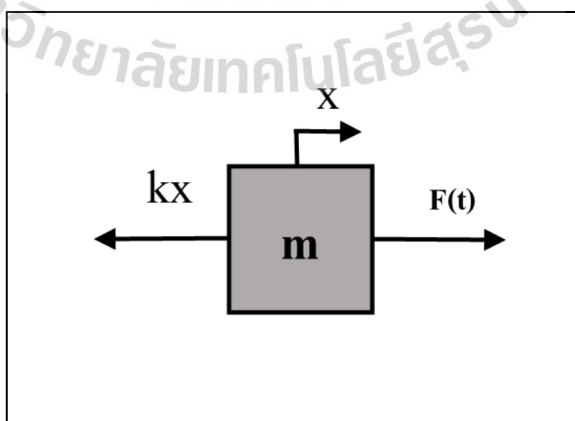
$$F(t) = F_0 \cos \omega t \quad (2.2)$$

ผลรวมของแรงที่กระทำต่อมวลในทิศทาง x ตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$m\ddot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.9 ระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่ไม่มีตัวหน่วง



รูปที่ 2.10 แผนภาพวัตถุอิสระของระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่ไม่มีตัวหน่วง

พิจารณาระบบการสั่นแบบฮาร์โมนิกส์ที่ไม่มีความหน่วงมีแรงกระทำจากภายนอก
เท่ากับ

$$F(t) = F_0 \cos \omega t \quad (2.4)$$

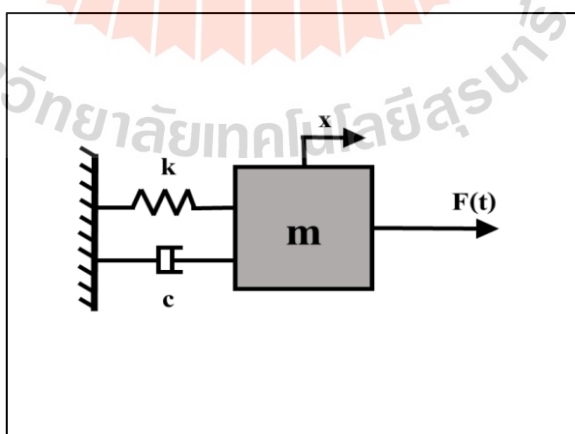
ผลรวมของแรงที่กระทำต่อมวลในทิศทาง x ตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน จะได้ดัง
สมการที่ 2.2

$$m\ddot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (2.5)$$

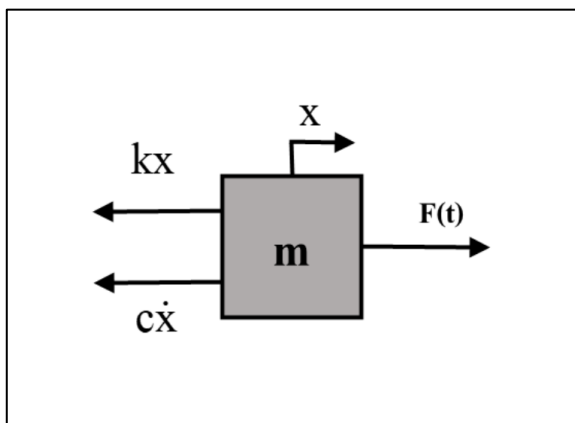
โดยสามารถหาความถี่ธรรมชาติของระบบได้จาก

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (2.6)$$

2) การสั่นแบบฮาร์โมนิกส์ของระบบที่มีความหน่วง (Harmonics excitation of damped system) เป็นระบบการสั่นแบบมีแรงกระทำจากภายนอก มีส่วนประกอบคือ มวล สปริง และตัวหน่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 สามารถเขียนอธิบายแผนภาพวัตถุอิสระได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 ระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่มีตัวหน่วง



รูปที่ 2.12 แผนภาพวัตถุอิสระของระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่มีตัวหน่วง

พิจารณาระบบการสั่นแบบบังคับแบบฮาร์โมนิกส์ที่มีความหน่วง มีแรงกระทำจากภายนอกเท่ากับ

$$F(t) = F_0 \cos \omega t \quad (2.7)$$

ผลรวมของแรงที่กระทำต่อมวลในทิศทาง x ตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน จะได้ดังสมการที่ 2.3

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (2.8)$$

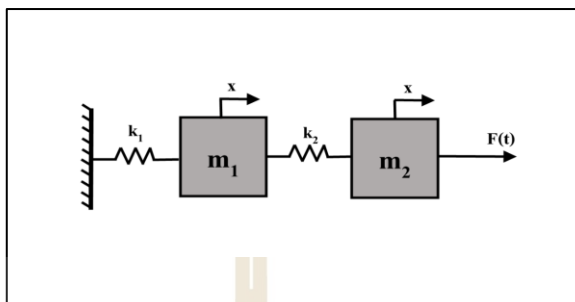
โดยสามารถหาความถี่ธรรมชาติของระบบได้จาก

$$\begin{aligned} \omega_n &= \sqrt{k/m} \\ \xi &= c / (2m\omega_n) \end{aligned} \quad (2.9)$$

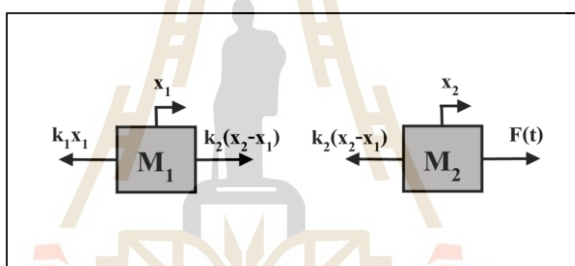
2.5.2 ระบบการสั่นแบบบังคับที่มีหลายองศาอิสระ (Force vibration multi degree of freedom)

1) การสั่นแบบบังคับของระบบที่ไม่มีตัวหน่วง (Force vibration without damped system) เป็นระบบการสั่นแบบมีแรงกระทำจากภายนอกที่มีองศาอิสระมากกว่า 1 องศาอิสระ

มีส่วนประกอบคือ มวลและสปริง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 สามารถเขียนอธิบายแผนภาพวัตถุอิสระได้ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 ระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่ไม่มีตัวหน่วง



รูปที่ 2.14 แผนภาพวัตถุอิสระของระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่ไม่มีตัวหน่วง

ผลรวมของแรงกระทำต่อมวล m_1 ในทิศทาง x ตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$\begin{aligned} -k_1x_1 + k_2(x_2 - x_1) &= m_1\ddot{x}_1 \\ m_1\ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2x_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

ผลรวมของแรงกระทำต่อมวล m_2 ในทิศทาง x ตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$\begin{aligned} F(t) - k_2(x_2 - x_1) &= m_2\ddot{x}_2 \\ m_2\ddot{x}_2 + k_2x_2 - k_2x_1 &= F(t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ ดังนี้

$$M\ddot{x} + Kx = F(t)$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F(t) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

สามารถหาความถี่ธรรมชาติของระบบได้จาก

$$\det(-\omega^2 M + K) = 0 \quad (2.13)$$

2) การสั่นแบบฮาร์โมนิกส์ของระบบที่มีความหน่วง (Force vibration with damped system) เป็นระบบการสั่นแบบมีแรงกระทำจากภายนอกที่มีองศาอิสระมากกว่า 1 องศาอิสระ มีส่วนประกอบคือ มวล สปริง และตัวหน่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.15 สามารถเขียนอธิบายแผนภาพวัตถุอิสระได้ดังรูปที่ 2.16

ผลรวมของแรงกระทำต่อมวล m_1 ในทิศทาง x ตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$\begin{aligned} -k_1 x_1 - c_1 \dot{x}_1 + k_2 (x_2 - x_1) + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) &= m_1 \ddot{x}_1 \\ m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2) x_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - k_2 x_2 - c_2 \dot{x}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

ผลรวมของแรงกระทำต่อมวล m_2 ในทิศทาง x ตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$\begin{aligned} F(t) - k_2 (x_2 - x_1) - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) &= m_2 \ddot{x}_2 \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_1 - k_2 x_2 + c_2 \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 &= F(t) \end{aligned} \quad (2.15)$$

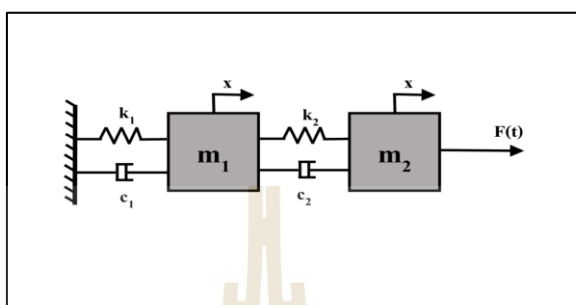
โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t)$$

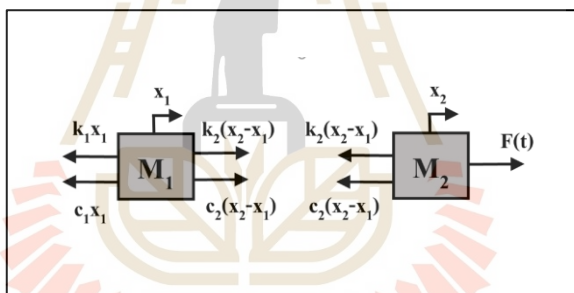
$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F(t) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

สามารถหาความถี่ธรรมชาติของระบบได้จาก

$$\det(-\omega^2 M + K) = 0 \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.15 ระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่มีตัวหน่วง



รูปที่ 2.16 แผนภาพวัตถุอิสระของระบบการสั่นแบบบังคับของระบบที่มีตัวหน่วง

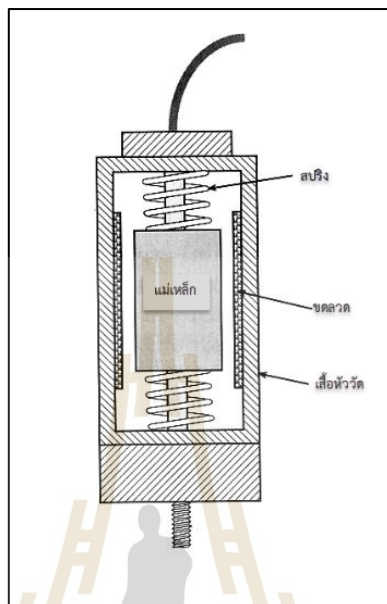
2.6 อุปกรณ์การวัดการสั่นสะเทือน

ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้สำหรับวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.6.1 ทรานสดิวเซอร์การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนชนิดสัมผัส (Contact vibration transducer)

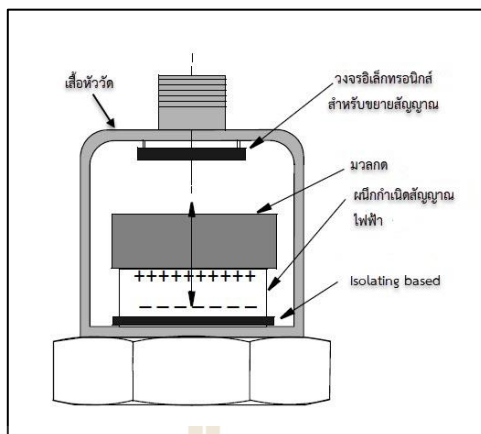
1) ทรานสดิวเซอร์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบความเร็ว (Velocity transducer) เป็นอุปกรณ์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่จำเป็นต้องติดอยู่กับชิ้นส่วนที่เกิดการสั่นสะเทือน เนื่องจากชิ้นส่วนภายในหัววัดการสั่นสะเทือนจำเป็นต้องได้รับแรงกระทำ เมื่อเกิดการสั่นแม่เหล็กถาวรที่อยู่ภายในจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาผ่านขดลวด สร้างเป็นแรงดันไฟฟ้าออกมาให้สามารถ

วัดได้ ข้อดีของหัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบความเร็ว คือ สามารถทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงได้ แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่เหมาะกับการวัดที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ใกล้ ๆ



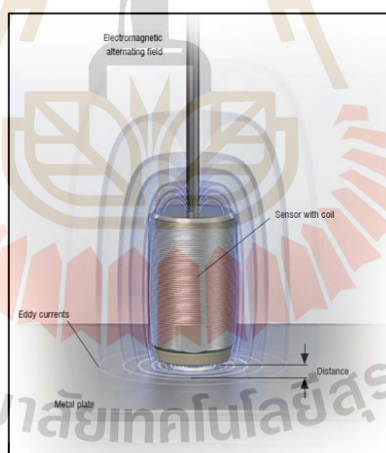
รูปที่ 2.17 ทรานสดิวเซอร์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบความเร็ว

2) ทรานสดิวเซอร์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบความเร่ง (Accelerometer) เป็นอุปกรณ์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่จำเป็นต้องติดอยู่กับชิ้นส่วนที่เกิดการสั่นสะเทือน เนื่องจากชิ้นส่วนภายในหัววัดการสั่นสะเทือนจำเป็นต้องได้รับแรงกระทำ เมื่อมีแรงมากระทำกับมวลที่อยู่ภายในหัววัด มวลจะไปกดลงที่แผ่น Piezoelectric disk เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าออกมา แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการสั่นสะเทือน ข้อดีของหัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบความเร่ง คือ เหมาะสำหรับวัดเพื่อตรวจสอบแบร์ริง (Bearing) ของเครื่องจักรหรือชุดเกียร์ (Gear box) เนื่องจากมีการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนที่มีความถี่สูงค่อนข้างดี และยังสามารถใช้วัดเพื่อตรวจสอบเครื่องจักรทั่วไปได้เนื่องจากมีช่วงความถี่ในการวัดที่ค่อนข้างกว้าง มีราคาถูก และมีความแข็งแรงทนทาน แต่ยังมีข้อจำกัดเรื่องของการวัดในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.18 ทรานสดิวเซอร์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบความเร่ง

2.6.2 ทรานสดิวเซอร์วัดการสั่นสะเทือนชนิดไม่สัมผัส (Non-contact vibration transducer)



รูปที่ 2.19 Eddy current transducer

1) ทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดี้ (Eddy current transducer) เป็นอุปกรณ์การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบที่ไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นส่วนที่เกิดการสั่นสะเทือน โดยอาศัยหลักการของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ การสั่นสะเทือนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนและการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนใด ๆ ที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างมาจากหัววัด ซึ่งสามารถนำการเปลี่ยนแปลงของ

สนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้มาวิเคราะห์ได้ แต่มีข้อจำกัดคือ ชิ้นส่วนที่ต้องการวัดต้องเป็นเหล็กหรือวัสดุที่เหนียวนำแม่เหล็กไฟฟ้าและมีระยะการวัดที่ค่อนข้างจำกัด ไม่สามารถวัดได้หากชิ้นส่วนที่จะวัดอยู่ห่างจากหัววัดมากเกินไป

2) Laser-vibro meter เป็นอุปกรณ์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ใช้หลักการของแสงเลเซอร์เข้ามาช่วย ทำให้มีระยะการวัดที่ไกลมากกว่าแบบ Eddy current sensor และสามารถวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กได้ดี



รูปที่ 2.20 Laser-vibro meter

3) Vision based vibration data collection เป็นการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ใช้เทคโนโลยีของกล้องความเร็วสูง (Highspeed camera) เข้ามาจับภาพ เพื่อถ่ายให้เห็นการเคลื่อนไหวของชิ้นส่วนที่ทำการวัดและการวิเคราะห์ภาพที่ได้ด้วยการใช้เทคโนโลยี Image processing



รูปที่ 2.21 High speed camera set

2.7 การทดสอบโมดอล

การทดสอบโมดอล (Modal test) เป็นวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือน เพื่อหาความถี่ธรรมชาติ รูปร่างการสั่นสะเทือนในโหมดต่าง ๆ และอัตราส่วนตัวหน่วงของระบบที่ทำการทดสอบ การทดสอบโมดอลเป็นการกระตุ้นให้ระบบที่ทำการทดสอบเกิดการสั่นสะเทือนด้วยความถี่ที่แน่นอน จากนั้นจึงวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น โดยระบบจะเกิดการสั่นพ้องเมื่อมีการสั่นผ่านความถี่ธรรมชาติของระบบจะเห็นขนาดของการสั่นสะเทือนสูงขึ้น ทำให้สามารถทราบถึงความถี่ธรรมชาติของระบบได้

2.7.1 การทดสอบโมดอลด้วยการใช้ค้อน

การทดสอบด้วยค้อนหรือ Impact hammer modal testing เป็นการกระตุ้นระบบให้สั่นสะเทือนโดยการเคาะด้วยค้อน โดยค้อนจะมีทรานสดิวเซอร์หรือโหลดเซลล์ที่สามารถวัดแรงในการเคาะได้ และเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยทรานสดิวเซอร์ความถี่สูง วิธีนี้มีรูปแบบในการปฏิบัติงาน 2 รูปแบบ รูปแบบแรกคือ การเคาะตำแหน่งเดียว แต่เปลี่ยนตำแหน่งในการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน (Roving transducer) รูปแบบที่สองคือ การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งเดียว แต่เปลี่ยนตำแหน่งในการเคาะ (Roving hammer) เหมาะกับชิ้นส่วนหรือโครงสร้างที่ไม่ใหญ่มาก เนื่องจากแรงที่กระตุ้นระบบจากค้อนมีไม่มาก จึงควรทดสอบกับ โครงสร้างที่มีขนาดเหมาะสมกับแรงที่เกิดจากค้อน

2.7.2 การทดสอบโมดอลด้วยการใช้เครื่องสร้างการสั่นสะเทือน

การทดสอบด้วยเครื่องสร้างการสั่นสะเทือนหรือ Shaker modal testing เป็นการกระตุ้นระบบให้สั่นสะเทือนด้วยการใช้เครื่องสร้างการสั่นสะเทือนที่สามารถตั้งค่าความถี่ในการสั่นสะเทือนได้ จากนั้นติดตั้งโหลดเซลล์ในการวัดแรง ติดตั้งทรานสดิวเซอร์ความถี่สูงเพื่อวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเหมาะกับการทดสอบ โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ เช่น การทดสอบโมดอลทางวิศวกรรมโยธา

2.8 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมหรือ Genetic Algorithm (GA) คือ การค้นหาที่เลียนแบบการคัดเลือกโดยธรรมชาติตามทฤษฎีวิวัฒนาการของชาร์ลดาร์วิน โดยจะมองรูปแบบปัญหาที่ต้องการค้นหา คำตอบเป็นเหมือนจำนวนประชากรในสังคม ซึ่งตามทฤษฎีวิวัฒนาการแล้วประชากรจะถูกคัดเลือกและปรับปรุงพันธุกรรมให้มีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่บีบบังคับ โดยวัฏจักรของขั้นตอนวิธีพันธุกรรมจะมี 3 กระบวนการ คือ การคัดเลือกสายพันธุ์ การปฏิบัติการทางสายพันธุ์ และการแทนที่ (สุจินต์, 2556) โดยมีในการทำงานของอัลกอริทึมพันธุกรรมขั้นตอนดังนี้

1. การสร้างประชากรโดยการสุ่ม (random) ตามจำนวนที่ต้องการ
2. การประเมินค่าประชากรของกลุ่ม กล่าวคือ ประชากร 1 คน มี 1 โครโมโซม ซึ่งแต่ละโครโมโซมจะแทนแต่ละชุดของแบบจำลองและยีนส์แต่ละตัวในโครโมโซมจะแทนค่าคงที่ของแต่ละพจน์ของแบบจำลองคือ ค่าความคลาดเคลื่อนของผลจากแบบจำลองและผลการทดลอง
3. คำนวณค่าความเหมาะสมแล้วส่งกลับไปยังอัลกอริทึมพันธุกรรม
4. ใช้ความเหมาะสมในการคัดเลือกโครโมโซมบางชุด เพื่อใช้เป็นต้นสายพันธุ์ที่จะใช้ถ่ายทอดสู่รุ่นถัดไป
5. นำโครโมโซมที่คัดเลือกจากข้อ 4 มาสร้างเป็นโครโมโซมรุ่นใหม่
6. คำนวณค่าความเหมาะสมของโครโมโซมรุ่นล่าสุด ดังเช่นขั้นตอนที่ 3
7. ชุดโครโมโซมเดิมจะถูกแทนที่ด้วยชุดโครโมโซมใหม่ ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 โดยใช้ค่าความเหมาะสมในการตัดสินใจการถูกแทนที่
8. เริ่มต้นกระบวนการใหม่จากขั้นตอนที่ 2 ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนได้คำตอบของปัญหาที่ต้องการ โดยสามารถใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่าคำตอบที่ได้เป็นไปตามต้องการหรือยัง

2.9 เทคนิคการปรับเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน

เทคนิคการปรับเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน (ODS) เป็นเทคนิคในทางปฏิบัติโดยและได้รับความนิยมในปัจจุบัน เทคนิคนี้ใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของจุดใด ๆ บนโครงสร้างของเครื่องจักรเทียบกับจุดอื่น ๆ โดยใช้ข้อมูลจากการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจริงที่สามารถวัดได้เป็นตัวส่งผ่านข้อมูลการสั่นสะเทือนไปยังจุดอื่น ๆ ที่ไม่สามารถวัดได้บนโครงสร้างเครื่องจักร

2.9.1 การเก็บข้อมูลในการพิจารณาแบบจุดเดียว

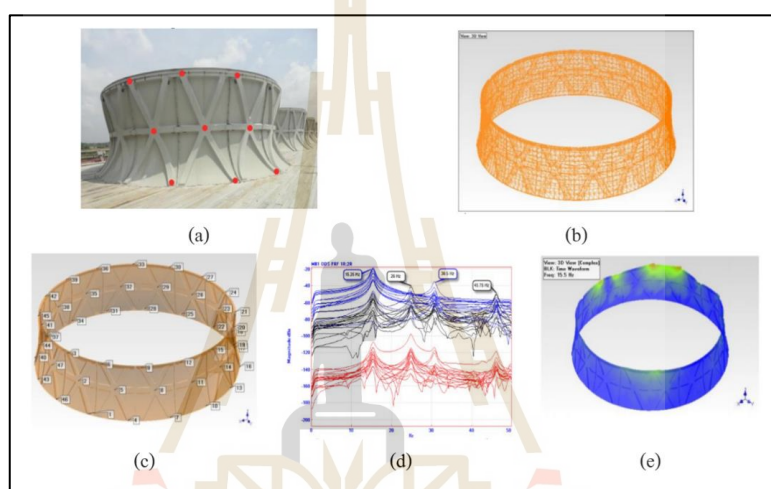
การเก็บข้อมูลในการพิจารณาแบบจุดเดียวเป็นการใช้ทรานสดิวเซอร์วัดเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน และใช้ตัววัดความเร็วรอบ (Tachometer) เป็นตัวจับตำแหน่งในการหมุนของเพลลา เพื่ออ้างอิงตำแหน่งหรือเฟสด้วยสัญญาณพัลส์จากตัววัดความเร็วรอบและทำการย้ายตำแหน่งในการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน โดยในการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนทุกครั้งจะต้องเก็บสัญญาณจากตัววัดความเร็วรอบด้วยทุกครั้ง

2.9.2 การเก็บข้อมูลในการพิจารณาหลายจุดวัด

การเก็บข้อมูลในการพิจารณาหลายจุดวัดเป็นการเก็บข้อมูลที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์บนโดเมนความถี่หรือสเปกตรัม (Spectrum) เหมาะสำหรับการวัดโครงสร้างที่มีจำนวนจุดวัดมาก ๆ โดยจะเก็บสัญญาณการวัดเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งจะเป็นการถ่ายโอนอินพุต

เทียบกับเอาต์พุตกล่าวคือ การเก็บข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนที่จุดหนึ่งเทียบกับอีกจุดหนึ่ง ควบคุมกับเสมอ

ตัวอย่างการใช้เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของปล่องลมระบายความร้อนขนาดใหญ่ (วินัย ตุ่มทอง และคณะ, 2012) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เริ่มต้นด้วย (a) การสำรวจจุดวัดที่เป็นไปได้จริง (b) การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างปล่องลม (c) การกำหนดจุดวัดในแบบจำลองให้สอดคล้องกับจุดวัดจริงที่ทำการวัด (d) เก็บข้อมูลการวัดในรูปแบบฟังก์ชันการตอบสนองเชิงความถี่ (e) พิจารณาภาพเคลื่อนไหวของปล่องลมขณะปฏิบัติงาน



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างการใช้เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานในการวิเคราะห์ปล่องลมขนาดใหญ่

2.10 ปรัชชาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของปรัชชาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

2.10.1 งานวิจัยเกี่ยวกับไฟไนต์เอลิเมนต์

ปี ค.ศ. 2009 ZHAO Bin and WANG Ke. ทำการวิเคราะห์โครงสร้างของเครื่อง Single screw compressor ด้วยโปรแกรม ANSYS โดยสนใจในเรื่องของ Displacement distribution และ Stress distribution บริเวณ Gate rotor shaft และยังทำการวิเคราะห์หา Mode shape ใน 6 โหมดแรก รวมถึงพยากรณ์ Fatigue life ของชิ้นส่วน Gate rotor shaft

ปี ค.ศ.2009 Zhang, H., Gao, R., Zhang, J., & Wang, L. ผู้วิจัยทำการศึกษา Switched Reluctance Motor ซึ่งมักเจอปัญหาเนื่องจากการสั่นสะเทือน ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาเพื่อช่วยในการหาความถี่ธรรมชาติของชิ้นส่วนตัวมอเตอร์ และจำลอง Mode shape ของตัว

มอเตอร์ เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วนมอเตอร์เมื่อทำงานภายใต้สภาวะที่มีการสั่นในความถี่ต่าง ๆ และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับ Switched reluctance motor ได้อย่างถูกต้อง

ปี ค.ศ. 2010 Fu, H., Liu, P., Zhang, Q., & Wang, Y. ทำการศึกษาระบบ Magnetic bearing ที่มี 1 องศาอิสระ ซึ่งแบ่งการศึกษาเป็นระบบที่ใช้แบร์ริงแบบธรรมดา และระบบที่ใช้แบร์ริงแบบแม่เหล็ก โดยสนใจวิเคราะห์ Mode shape ของระบบที่กล่าวมาข้างต้น และผลกระทบของการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อ Mode shape ของระบบ อีกทั้งยังทำการเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดลองจริง ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันเล็กน้อย

ปี ค.ศ. 2013 Qu, S. X., Xu, D., & Kang, R. ได้นำเอาไฟไนต์เอลิเมนต์และ Gaussian distribution method มาเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของเพลากลวง ภายใต้การสั่นสะเทือนแบบสุ่ม (Random vibration) ซึ่งจากการศึกษาด้วย โปรแกรม ANSYS สามารถวิเคราะห์เพื่อหาความถี่ธรรมชาติและ Mode shape ของชิ้นงานได้ รวมถึงพยากรณ์ fatigue life ของชิ้นงานได้ด้วย Gaussian distribution method

2.10.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคการปรับเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน (Operating deflection shape)

ปี ค.ศ. 1999 B. J. Schwarz and M. H. Richardson ทำการศึกษาการวิเคราะห์ Mode shape ด้วยวิธี ODS และความเหมาะสมของการใช้วิธี ODS ในการวิเคราะห์บน Time domain และ Frequency domain

ปี ค.ศ. 2001 P. Frank Pai และคณะ ได้ศึกษาวิธี Boundary effect detection method (BED) เพื่อการตรวจสอบและระบุตำแหน่งของความเสียหายที่มีขนาดเล็กของคาน โดยการใช้เทคนิค ODS โดยวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วย Scanning Vibro-Meter พบว่า สามารถใช้เทคนิคการวิเคราะห์ ODS ให้การตรวจสอบ ความเสียหายของคานได้ดีที่สุดจุดสูงสุด (Peak) และมีความน่าเชื่อถือในการใช้งาน

ปี ค.ศ. 2012 วินัย ตุ่มทอง และคณะ ได้นำเอา ODS ไปวิเคราะห์การสั่นและแสดงรูปร่างการสั่นของปล่องลมระบายความร้อนขนาดใหญ่ (Large Stack Cooling) โดยใช้ตัววัดความเร่งเพียงแค่ 4 ตัว สำหรับโครงสร้างขนาดใหญ่สามารถตรวจสอบพบการสั่นขนาดใหญ่ได้ โดยใช้การวิเคราะห์ ODS

ปี ค.ศ. 2017 Yonghui Hu และคณะ การประยุกต์ใช้งาน ODS ในการวิเคราะห์ปัญหาสายพานส่งกำลังเพื่อพยากรณ์ความเสียหายของสายพาน โดยใช้เทคนิค ODS FRF พิจารณารูปร่างการสั่นสะเทือนพบว่า สายพานส่งกำลังมีการสั่นสะเทือนสูงที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางของสายพานและสามารถแสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนใน 3 โหมดแรกได้

2.11 สรุป

จากการศึกษาทฤษฎีและปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องมีเป้าหมายที่จะปรับปรุงความแม่นยำในการวัดการโก่งตัวของเพลลา ซึ่งจะเห็นได้ว่าการวัดและประมวลผลด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานยังมีการให้ผลลัพธ์ที่ยังไม่สมบูรณ์ ในด้านของขนาดการสันสะเทือน ดังนั้นจากการศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจึงประยุกต์วิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการสันสะเทือนและวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์เข้ามาช่วยในการจำลองระบบการสันสะเทือน โดยใช้การทดสอบโมดอลและการประมวลผลด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นตัวช่วยในการกำหนดของเขตของการประมาณค่าพารามิเตอร์ทำให้ได้พารามิเตอร์ที่สามารถเป็นตัวแทนของระบบการสันสะเทือนของเพลลาจริงได้ เพื่อให้ทราบถึงขนาดของการโก่งตัวของเพลลาที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

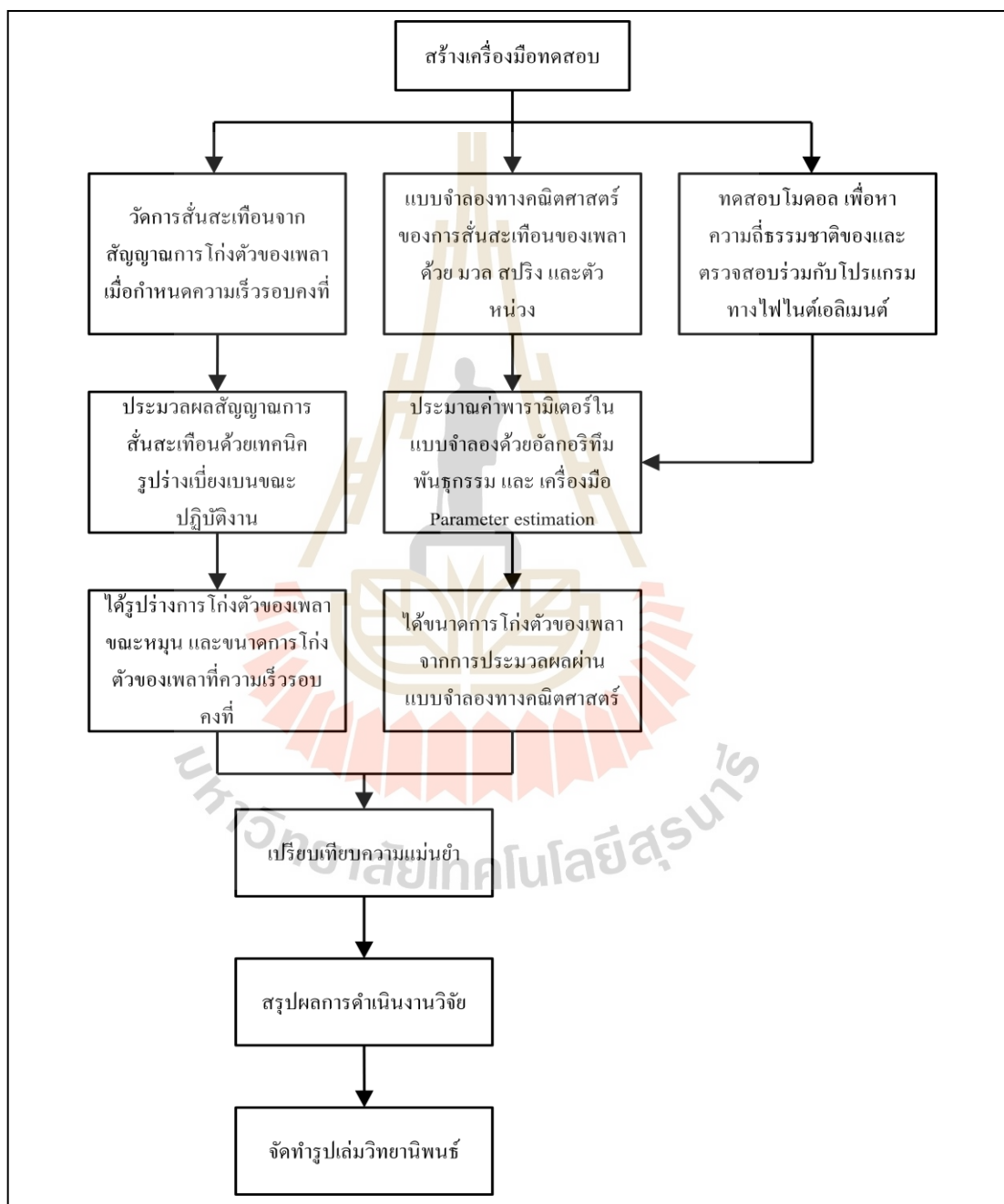
3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการวัดการ โกงตัวของเพลาด้วยเทคนิคครูปรางเบียงเบนขณะปฏิบัติงาน และศึกษาการวัดการ โกงตัวของเพลาด้วยเทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงการใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักร งานวิจัยนี้จะเก็บผลลัพธ์การ โกงตัวของเพลาจากเครื่องมือทดสอบที่สร้างขึ้น เพื่อเป็นตัวแทนระบบของเครื่องจักรหมุนด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดี้จากนั้นการดำเนินการวิจัยจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ นำผลลัพธ์ที่เก็บได้จากทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดี้ไปสร้างแบบจำลองการ โกงตัวของเพลาด้วยเทคนิคครูปรางเบียงเบนขณะปฏิบัติงาน ส่วนที่ 2 คือ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการสั่นสะเทือนของเพลา โดยใช้ผลลัพธ์ที่เก็บได้จากการทดลองเข้าสู่กระบวนการประมาณค่าตัวแปรเพื่อค้นหาตัวแปรมวล (m) และสปริง (k) ของระบบที่ทำการทดลอง จากนั้นจึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนของเพลา เข้ามาช่วยในการประมวลผลเพื่อให้ได้ขนาดการ โกงตัวของเพลาและนำผลลัพธ์จากการใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนของเพลามาสร้างภาพเคลื่อนไหวของเพลาขณะหมุนที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที เพื่อดูการ โกงตัวของเพลาที่มีความแม่นยำมากขึ้น

3.2 ขั้นตอนทดสอบและประมวลผลข้อมูล

ออกแบบเครื่องมือทดสอบโดยจำลองระบบการทำงานให้เหมือนกับเครื่องจักรหมุน จากนั้นทำการทดสอบ โมดอล ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SolidWorks เพื่อหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องมือทดสอบ จากนั้นแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ การเก็บค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลาด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดี้ จากนั้นนำสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลาที่เก็บได้จากเครื่องมือทดสอบไปเข้าสู่การประมวลผลด้วยเทคนิคครูปรางเบียงเบนขณะปฏิบัติงานด้วยโปรแกรม ME'ScopeVES เพื่อครูปรางการสั่นสะเทือนของเพลาขณะหมุนและขนาดการ โกงตัวของเพลา ส่วนที่สองคือ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนของเพลา ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองและใช้แบบจำลองประมวลผลค่าขนาดการ โกงตัวของเพลาจากนั้นนำผลลัพธ์จาก

การประมวลผลด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือน และค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจากการวัดจริงด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดคี่มาเปรียบเทียบกันเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการประมวลผลและการวัดด้วยวิธีต่าง ๆ โดยมีขั้นตอนในการทดสอบและประมวลผลดังแสดงในรูปที่ 3.1



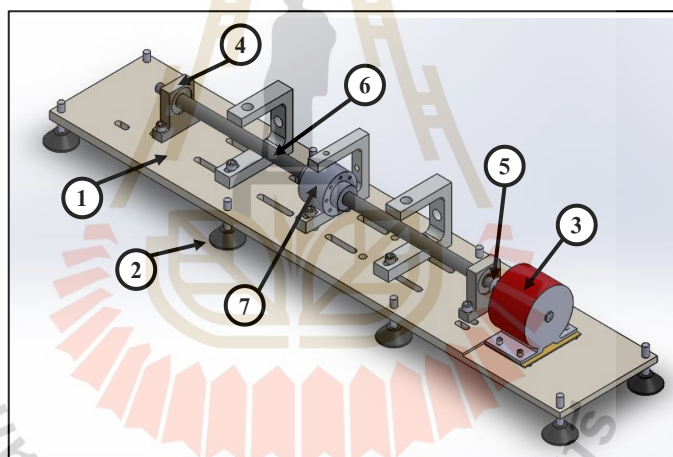
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3 การสร้างเครื่องมือทดสอบ

เครื่องมือทดสอบเพื่อจำลองระบบของเครื่องจักรหมุนถูกสร้างขึ้นเพื่อให้การทดสอบและเก็บผลมีความสะดวกและสามารถดำเนินงานได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ช่วยให้ผู้วิจัยสามารถควบคุมตัวแปรที่ต้องการใช้งานหรือไม่ต้องการต่าง ๆ ได้ ทางผู้วิจัยจึงสร้างเครื่องมือทดสอบขึ้น โดยจำลองการทำงานของเครื่องจักรหมุนที่มีการใช้งานตามบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป เพื่อให้ผลลัพธ์การโค้งตัวของเพลามีความถูกต้องและใกล้เคียงกับปัญหาที่เกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรม

3.3.1 ส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบ

เครื่องมือทดสอบเป็นชุดอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย ฐานเครื่องทดสอบ ขารองเครื่องทดสอบ ทดสอบ ทดสอบ มอเตอร์ ตลับลูกปืน เพลลา และดิสก์ โดยมีข้อมูลทางเทคนิคของส่วนประกอบ ดังตารางที่ 3.1 และมีการติดตั้งดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องมือทดสอบสร้างจากโปรแกรม SolidWorks

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบ

ลำดับที่	ส่วนประกอบ	ข้อมูลทางเทคนิค
1	Base	Steel alloy material.
2	Base Support	SUS 304 material. Adjustable level.
3	Motor	24 VDC-750 W, Maximum speed 2750 RPM.
4	Bearing	NSK No.6004-DU.

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบ (ต่อ)

ลำดับที่	ส่วนประกอบ	ข้อมูลทางเทคนิค
5	Coupling	MISUMI Oldham coupling, Aluminum and Polyacetal material.
6	Shaft	Ø 20 mm. 600 mm. length, Steel Alloy material.
7	Disk	Steel alloy material.

3.4 การทดสอบโมดอล

ในการทดสอบเพื่อเก็บค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจากเครื่องมือทดสอบจะต้องเก็บข้อมูลที่มีความเร็วรอบคงที่ และไม่ตรงกับความเร็วธรรมชาติของเครื่องจักร เพราะจะทำให้เกิดการรบกวนจากอิทธิพลของการสั่นพ้อง ซึ่งจะทำให้โครงสร้างเกิดการสั่นอย่างรุนแรง จึงมีความจำเป็นต้องทดสอบ เพื่อหาความเร็วธรรมชาติของเครื่องทดสอบก่อนนำไปใช้ในงานวิจัย เพื่อนำความเร็วธรรมชาติของเครื่องจักรไปใช้ในการเลือกความเร็วรอบที่จะใช้งานเครื่องทดสอบและใช้ในขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์

3.4.1 อุปกรณ์ในการทดสอบโมดอล

อุปกรณ์ในการทำการทดสอบโมดอล ประกอบด้วย ค้อน ทำหน้าที่เคาะหรือกระแทกเพื่อสร้างแรงสั่นสะเทือนให้โครงสร้างทรานสดิวเซอร์แบบความเร่ง ทำหน้าที่รับสัญญาณการสั่นสะเทือนของโครงสร้างจากการเคาะ และเครื่องมือเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนทำหน้าที่เก็บและประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และมีข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบโมดอล

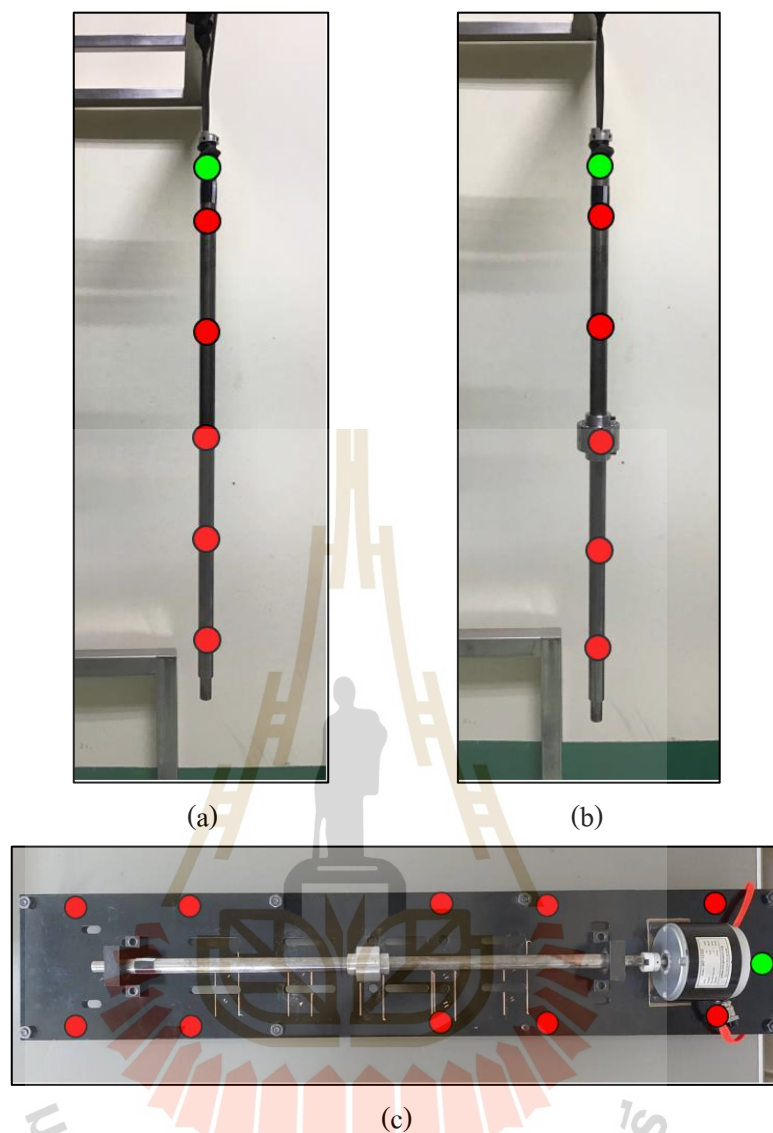
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ โมดอล

ลำดับที่	อุปกรณ์	ข้อมูลทางเทคนิค
1	Signal collector	Dewesoft DEWE 2600
2	Force hammer	Kistler IEPE Force hammer Sensitivity: 1 mV/N
3	Accelerometer	Kistler accelerometer. Sensitivity: 103.6 mV/g

3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบโมดอล

ในงานวิจัยนี้ ผู้ทำวิจัยได้ใช้รูปแบบการเปลี่ยนตำแหน่งทรานสดิวเซอร์ในการทำโมดอล ซึ่งคือการใช้ค้อนเคาะเพื่อสร้างการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งเดิม และเปลี่ยนตำแหน่งในการติดตั้งทรานสดิวเซอร์ที่ใช้เก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนไปตามจุดต่าง ๆ ของโครงสร้าง การทดสอบโมดอลในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน เพื่อสะดวกในการกำหนดขอบเขตที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

1. ทดสอบกับเพลาลูกเบี้ยวโดยปลายเพลาทั้ง 2 ด้านปล่อยอิสระทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนทั้งหมด 5 ตำแหน่ง มีตำแหน่งที่เคาะด้วยค้อน (จุดสีเขียว) และมีตำแหน่งติดตั้งทรานสดิวเซอร์แบบความเร่ง (จุดสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (a)
2. ทดสอบกับเพลาลูกเบี้ยวและดิสก์ตรงกลางเพลาลูกเบี้ยว โดยปลายเพลาทั้ง 2 ด้านปล่อยอิสระทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนทั้งหมด 5 ตำแหน่ง โดยมีตำแหน่งที่เคาะด้วยค้อน (จุดสีเขียว) และมีตำแหน่งติดตั้งทรานสดิวเซอร์แบบความเร่ง (จุดสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (b)
3. ทดสอบกับทั้งโครงสร้างของเครื่องมือทดสอบทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนทั้งหมด 10 ตำแหน่ง โดยมีตำแหน่งที่เคาะด้วยค้อน (จุดสีเขียว) และมีตำแหน่งติดตั้งทรานสดิวเซอร์แบบความเร่ง (จุดสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (c)



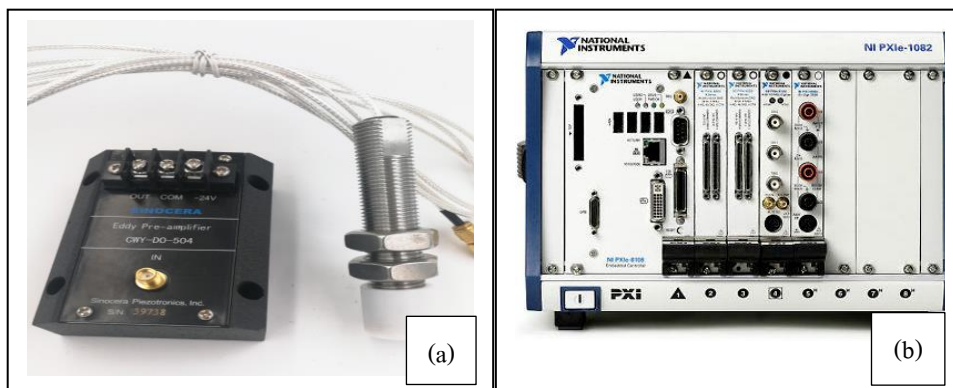
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการเกาะด้วยค้อนและตำแหน่งการติดตั้งทรานสดิวเซอร์แบบความเร่ง

3.5 การเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดี้

ในขั้นตอนการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที โดยควบคุมความเร็วรอบของเครื่องมือทดสอบให้คงที่ตลอดการเก็บข้อมูล

3.5.1 อุปกรณ์และการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน

การเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลามีอุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูลคือ ทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดี้ทำหน้าที่รับสัญญาณการสั่นสะเทือน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (a) และ เครื่องเก็บสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (b) ทำหน้าที่ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ในการเก็บค่าสัญญาณการสั่นสะเทือน

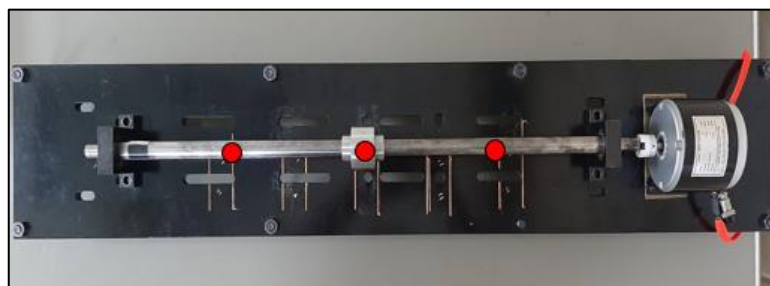


รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ในการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลา

ขั้นตอนการเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดี้เป็นการเก็บในรูปแบบของระยะการโก่งตัวของเพลลาในทิศทางแนวนอน (Horizontal) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เก็บข้อมูลทั้งหมดจำนวน 3 ตำแหน่ง ตลอดความยาวเพลลา (จุดสีแดง) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ทิศทางการวัดการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

3.5.2 การเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยโปรแกรม LabVIEW

ในการเก็บสัญญาณการโก่งตัวของเพลาด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดีจะเก็บผ่านเครื่องมือเก็บสัญญาณที่มีการทำงานร่วมกับ โปรแกรม LabVIEW โดยการเขียนคำสั่งในการเก็บข้อมูลด้วยแผนภาพบล็อก

3.6 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นของเพล

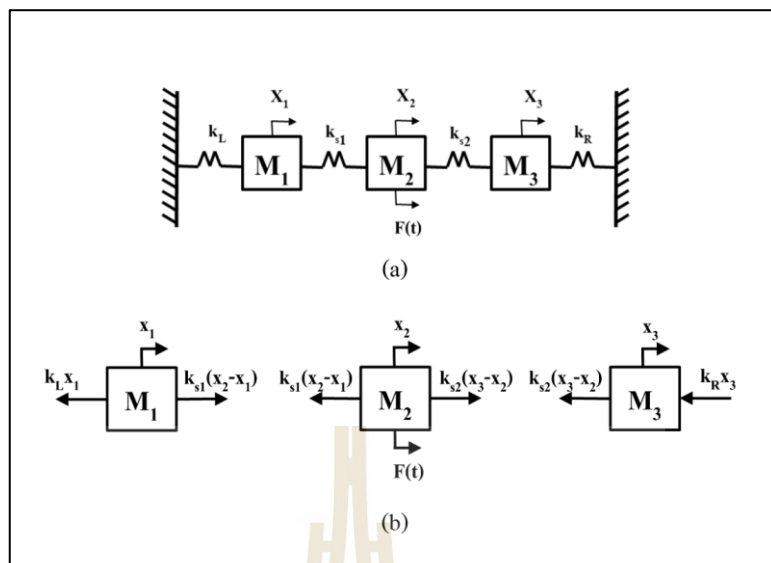
ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นของเพล เป็นการสร้างระบบการสั่นสะเทือนในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ค่ามวล สปริง และตัวหน่วง เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมแบบพลวัตของเพลขณะหมุน โดยมีข้อกำหนดในการสร้างแบบจำลองว่า

1. Model A คือ ระบบการสั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระแบบไม่มีตัวหน่วง
 2. Model B คือ ระบบการสั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระแบบมีตัวหน่วง
- โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์ ดังนี้

- M_1 คือ มวลตัวแทนของตำแหน่งวัด P2
- M_2 คือ มวลตัวแทนของตำแหน่งวัด P3
- M_3 คือ มวลตัวแทนของตำแหน่งวัด P4
- c_L และ c_R คือ ตัวหน่วงที่ตำแหน่งขอบซ้าย และขวา ของ Model A
- k_{s1} และ k_{s2} คือ สปริงด้านซ้ายและด้านขวาของมวล M_2
- k_L และ k_R คือ สปริงที่ตำแหน่งขอบซ้ายและขวาของ Model B

3.6.1 ส่วนประกอบของ Model A

ประกอบด้วยมวล 3 มวล เชื่อมต่อกันด้วยสปริงทั้งหมด 4 จุดเปรียบเสมือนเพล และมีการยึดปลายทั้ง 2 ด้านของระบบไม่ให้มีการเคลื่อนที่เปรียบเสมือนจุดยึดบริเวณแบร์ริง ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 Model A

จากแผนภาพอิสระของวัตถุของ Model A ในรูปที่ 3.8 (b) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ที่มวล M_1 มวล M_2 และมวล M_3 ได้ดังสมการที่ 3.1 สมการที่ 3.2 และสมการที่ 3.3

สมการความสัมพันธ์ที่มวล M_1

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 + k_L x_1 - k_{s1} (x_2 - x_1) &= 0 \\
 -k_L x_1 + k_{s1} (x_2 - x_1) &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 \ddot{x}_1 &= \frac{1}{m_1} (-k_L x_1 - k_{s1} (x_2 - x_1))
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

สมการความสัมพันธ์ที่มวล M_2

$$\begin{aligned}
 m_2 \ddot{x}_2 + k_{s1} (x_2 - x_1) - k_{s2} (x_3 - x_2) &= f(t) \\
 f(t) - k_{s1} (x_2 - x_1) + k_{s2} (x_3 - x_2) &= m_2 \ddot{x}_2 \\
 \ddot{x}_2 &= \frac{1}{m_2} (f(t) - k_{s1} (x_2 - x_1) + k_{s2} (x_3 - x_2))
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

สมการความสัมพันธ์ที่มวล M_3

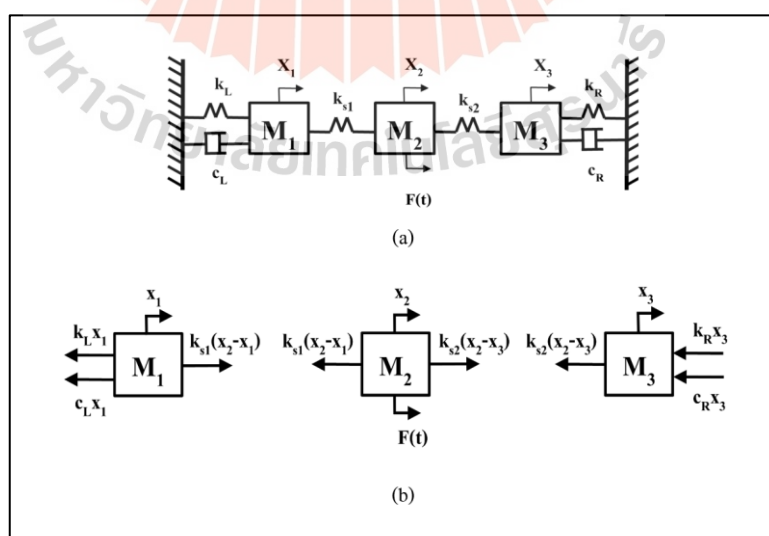
$$\begin{aligned} m_3 \ddot{x}_3 + k_{s2}(x_3 - x_2) + k_R x_3 &= 0 \\ -k_{s2}(x_3 - x_2) - k_R x_3 &= m_3 \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_3 &= \frac{1}{m_3}(-k_{s2}(x_3 - x_2) - k_R x_3) \end{aligned} \quad (3.3)$$

จากสมการความสัมพันธ์ที่มวล M_1 , M_2 และ M_3 สามารถเขียนในรูปของเมตริกได้
ดังนี้

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_L + k_{s1} & -k_{s1} & 0 \\ -k_{s1} & k_{s1} + k_{s2} & -k_R \\ 0 & -k_R & k_R + k_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.6.2 ส่วนประกอบของ Model B

ประกอบด้วย มวล 3 มวล เชื่อมต่อกันด้วยสปริงทั้งหมด 4 จุด เปรียบเสมือนเพลลาบริเวณปลายทั้งสองด้านของระบบมีตัวหน่วง และยึดบริเวณปลายทั้ง 2 ด้านของระบบไม่ให้มีการเคลื่อนที่เปรียบเสมือนจุดยึดบริเวณแบร์ริง ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 Model B

จากแผนภาพอิสระของวัตถุของ Model B ในรูปที่ 3.9 (b) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ที่มวล M_1 มวล M_2 และมวล M_3 ดังสมการที่ 3.5 สมการที่ 3.6 และสมการที่ 3.7

สมการความสัมพันธ์ที่มวล M_1

$$\begin{aligned} -k_L x_1 - c_L \dot{x}_1 + k_{s1}(x_2 - x_1) &= m_1 \ddot{x}_1 \\ m_1 \ddot{x}_1 + (k_L + k_{s1})x_1 - k_{s1}x_2 + c_L \dot{x}_1 &= 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

สมการความสัมพันธ์ที่มวล M_2

$$\begin{aligned} -k_{s1}(x_2 - x_1) + k_{s2}(x_3 - x_2) &= m_2 \ddot{x}_2 \\ m_2 \ddot{x}_2 + (k_{s1} + k_{s2})x_2 - k_{s1}x_1 - k_{s2}x_3 &= F(t) \end{aligned} \quad (3.6)$$

สมการความสัมพันธ์ที่มวล M_3

$$\begin{aligned} -k_{s2}(x_3 - x_2) - k_R x_3 - c_R \dot{x}_3 &= m_3 \ddot{x}_3 \\ m_3 \ddot{x}_3 + (k_{s2} + k_R)x_3 - k_{s2}x_2 + c_R \dot{x}_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

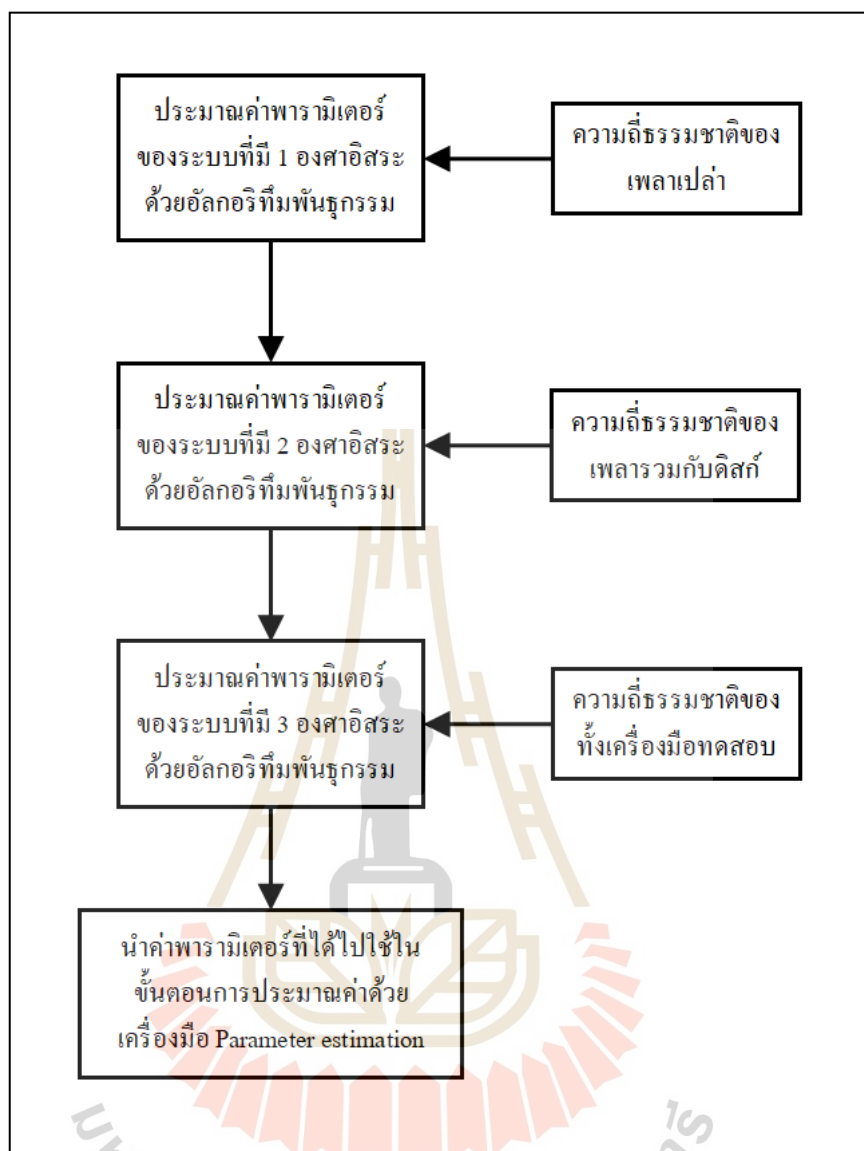
จากสมการความสัมพันธ์ที่มวล M_1 , M_2 และ M_3 สามารถเขียนในรูปของเมตริกได้

ดังนี้

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_L + k_{s1} & -k_{s1} & 0 \\ -k_{s1} & k_{s1} + k_{s2} & -k_R \\ 0 & -k_R & k_R + k_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

3.7 การใช้ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมในการประมาณค่าพารามิเตอร์

ในขั้นตอนการใช้ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมในการประมาณค่าพารามิเตอร์เป็นการนำเอาความถี่ธรรมชาติของเพลลา ดิสก์ และ โครงสร้างของเครื่องมือทดสอบทั้งหมด ที่ได้จากการทดสอบ โมดอล และการใช้โปรแกรม SolidWorks มาใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อให้ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมจะทำการค้นหาค่าของมวลและสปริงในระบบการสั่นสะเทือน โดยมีเงื่อนไขในการประมาณค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

1. การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 1 องศาอิสระจะใช้ความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบโมดอลของเพลาลำดับที่ 1 เป็นค่าอ้างอิงในการประมาณค่าพารามิเตอร์ โดยมีขั้นตอนการใช้ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมดังนี้

- สร้างคำสั่งในการคำนวณความถี่ธรรมชาติด้วยโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 3.11

```

function err = iden(p)
%Parameter for Identification
p(1);% ms;
p(2);% ks1;
p(3);% ks2;

%Matrix K and M
M=[p(1)];
K=[p(2)+p(3)];

%To calculate Natural Frequency
nat_freq_1=(1/(2*pi))*sqrt(K/M);

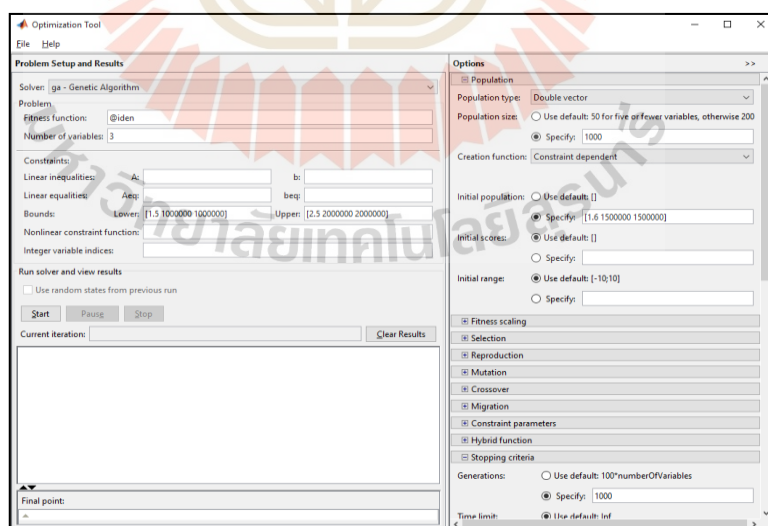
%Target Natural frequency
freqM = [195.313];

%Sum square error
err = 100*abs((freqM(1)-nat_freq_1)/freqM(1));

```

รูปที่ 3.11 การเขียนคำสั่งในการคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบที่มี 1 องศาอิสระ

- ใช้เครื่องมือ Optimization tool ในโปรแกรม MATLAB
- เปิดใช้งานขั้นตอนวิธีพันธุกรรม จากนั้นกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและขอบเขตในการประมาณค่าพารามิเตอร์ จำนวนรอบในการประมาณค่าพารามิเตอร์และค่าการเปลี่ยนแปลงของ Sum square error ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องมือ Optimization tool และการใช้งานขั้นตอนวิธีพันธุกรรม

- เริ่มการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม โปรแกรมจะทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ โดยอ้างอิงด้วยค่าของความถี่ธรรมชาติและจะทำงานไปจนกว่าจะครบจำนวนรอบที่ตั้งค่าไว้หรือได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของ Sum square error น้อยกว่าที่ตั้งค่าไว้

2. การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 2 องศาอิสระ ใช้ความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบโมดอลของเพลารวมกับดิสก์ ลำดับที่ 1 และลำดับที่ 2 เป็นค่าอ้างอิงในการประมาณค่าพารามิเตอร์ โดยมีสร้างคำสั่งในการคำนวณความถี่ธรรมชาติด้วยโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และมีขั้นตอนในการทำงานของขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเดียวกันกับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบที่มี 1 องศาอิสระ

```
function err = iden02(d)

p = [1.727,0.43];
p(1);% ms;
p(2);% md;

d(1);% ks1;
d(2);% ks2;
d(3);% kd;

M=[p(1) 0;0 p(2)];
K=[d(1)+d(3) -d(3);-d(3) d(3)+d(2)];

A=inv(M)*K;
%Obtain eigenvalues and eigenvectors of A
[V,D]=eig(A);

[D_sorted, ind] = sort(diag(D), 'ascend');
V_sorted = V(:,ind);

%V-matrix gives the eigenvectors and
%the diagonal of D-matrix gives the eigenvalues
% Sort eigen-values and eigen-vectors
nat_freq_1 = (1/(2*pi))*sqrt(D_sorted(1))
nat_freq_2 = (1/(2*pi))*sqrt(D_sorted(2))

mode_shape_1 = V_sorted(:,1);
mode_shape_2 = V_sorted(:,2);

freqM = [177.002 528.568];

err = 100*abs((freqM(1)-nat_freq_1)/freqM(1))+100*abs((freqM(2)-
nat_freq_2)/freqM(2));
```

รูปที่ 3.13 การเขียนคำสั่งในการคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบที่มี 2 องศาอิสระ

3. การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระ จะใช้ความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบ โมดอลของทั้งเครื่องมือทดสอบ ลำดับที่ 1 ลำดับที่ 2 และ

ลำดับที่ 3 เป็นค่าอ้างอิงในการประมาณค่าพารามิเตอร์ โดยมีสร้างคำสั่งในการคำนวณความถี่ธรรมชาติด้วยโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และมีขั้นตอนในการทำงานของขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเดียวกันกับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบที่มี 1 องศาอิสระ

```
function err = iden03(d)
p = [1.727 1449984 1449975 0.43 2799986];
p(1);% ms;
p(2);% ks1;
p(3);% ks2;
p(4);% md;
p(5);% kd;

d(1);% mR;
d(2);% mL;
d(3);% kR;
d(4);% kL;

M= [d(1) 0 0;0 p(1)+p(4) 0;0 0 d(2)];
K= [d(4)+p(2) -p(2) 0;-p(2) p(2)+p(3) -p(3);0 -p(3) p(3)+d(1)];

A=inv(M)*K;
%Obtain eigenvalues and eigenvectors of A
[V,D]=eig(A);

[D_sorted, ind] = sort(diag(D),'ascend');
V_sorted = V(:,ind);

%V-matrix gives the eigenvectors and
%the diagonal of D-matrix gives the eigenvalues
% Sort eigen-values and eigen-vectors
nat_freq_1 = (1/(2*pi))*sqrt(D_sorted(1))
nat_freq_2 = (1/(2*pi))*sqrt(D_sorted(2))
nat_freq_3 = (1/(2*pi))*sqrt(D_sorted(3))

mode_shape_1 = V_sorted(:,1);
mode_shape_2 = V_sorted(:,2);
mode_shape_3 = V_sorted(:,3);

freqM = [35.428 89.121 190.430];

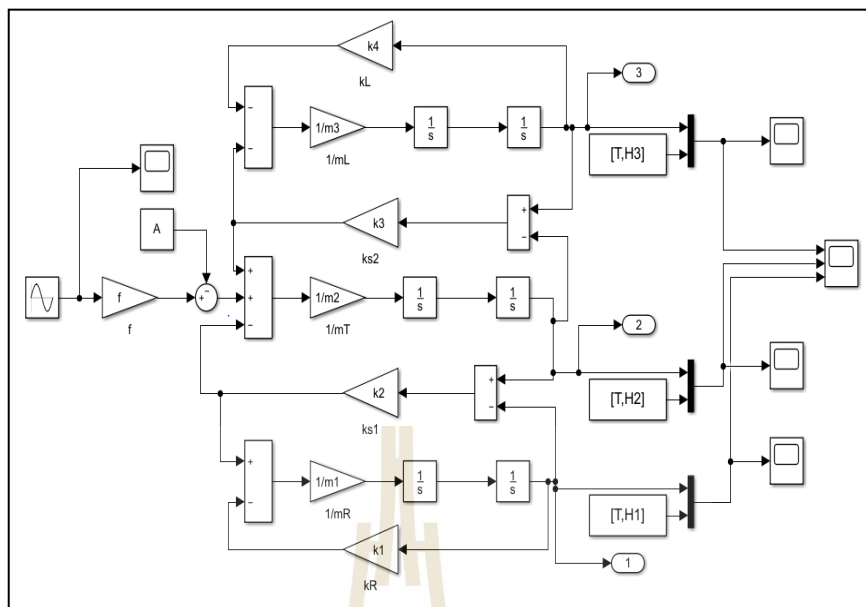
err = 100*abs((freqM(1)-nat_freq_1)/freqM(1))+100*abs((freqM(2)-
nat_freq_2)/freqM(2))+100*abs((freqM(3)-nat_freq_3)/freqM(3));
```

รูปที่ 3.14 การเขียนคำสั่งในการคำนวณความถี่ธรรมชาติของระบบที่มี 3 องศาอิสระ

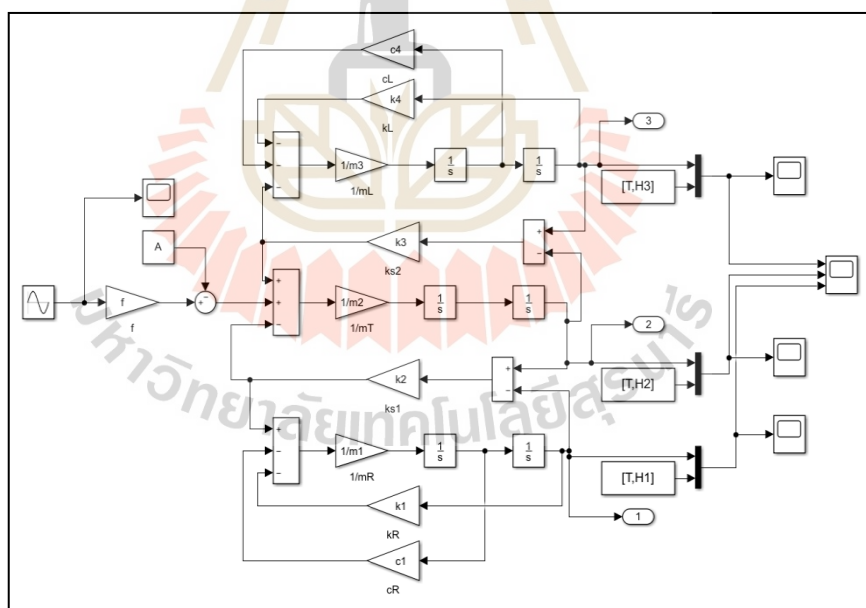
3.8 การสร้างแผนภาพบล็อกจากสมการความสัมพันธ์ของระบบ

ขั้นตอนการสร้างแผนภาพบล็อกจากสมการความสัมพันธ์ของ เพื่อใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อหาแรงที่กระทำต่อเพลา ความถี่ที่เพลาหมุน และตัวหน่วงในระบบการสั่นสะเทือน ในขั้นตอนนี้จะใช้เครื่องมือ Parameter estimation โดยสามารถเขียนแผนภาพบล็อกได้ 2 ชุด ดังนี้

- แผนภาพบล็อกของ Model A ดังรูปที่ 3.15
- แผนภาพบล็อกของ Model B ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 แผนภาพบล็อกสำหรับ Model A



รูปที่ 3.16 แผนภาพบล็อกสำหรับ Model B

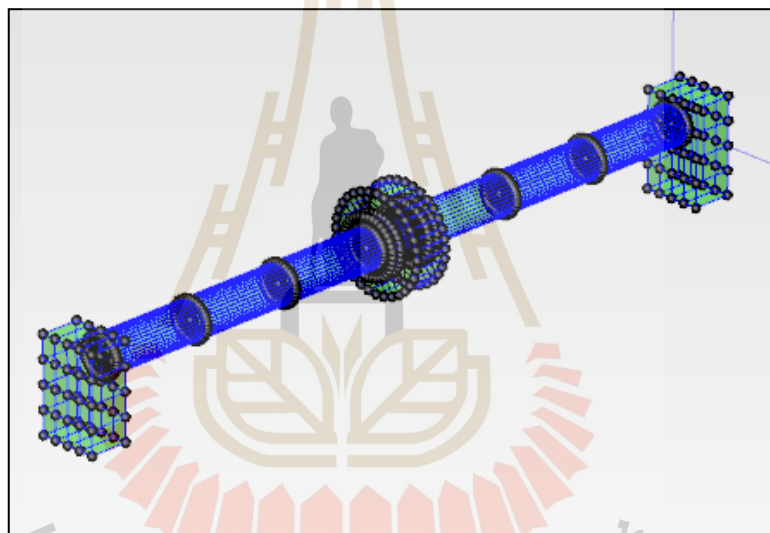
ในขั้นตอนนี้เป็นการนำค่าของมวล และสปริงที่ได้จากขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรมของระบบการสั่นสะเทือน Model A มาประมาณค่าพารามิเตอร์ต่ออีกครั้งด้วยเครื่องมือ Parameter estimation โดยใช้แบบจำลองการสั่นสะเทือนของ

Model A และ แบบจำลองการสั่นสะเทือนของ Model B เพื่อประมาณค่าของ แรงที่กระทำต่อเพลา ความถี่ที่เพลาหมุนและตัวหน่วง

3.9 การประมวลผลด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน

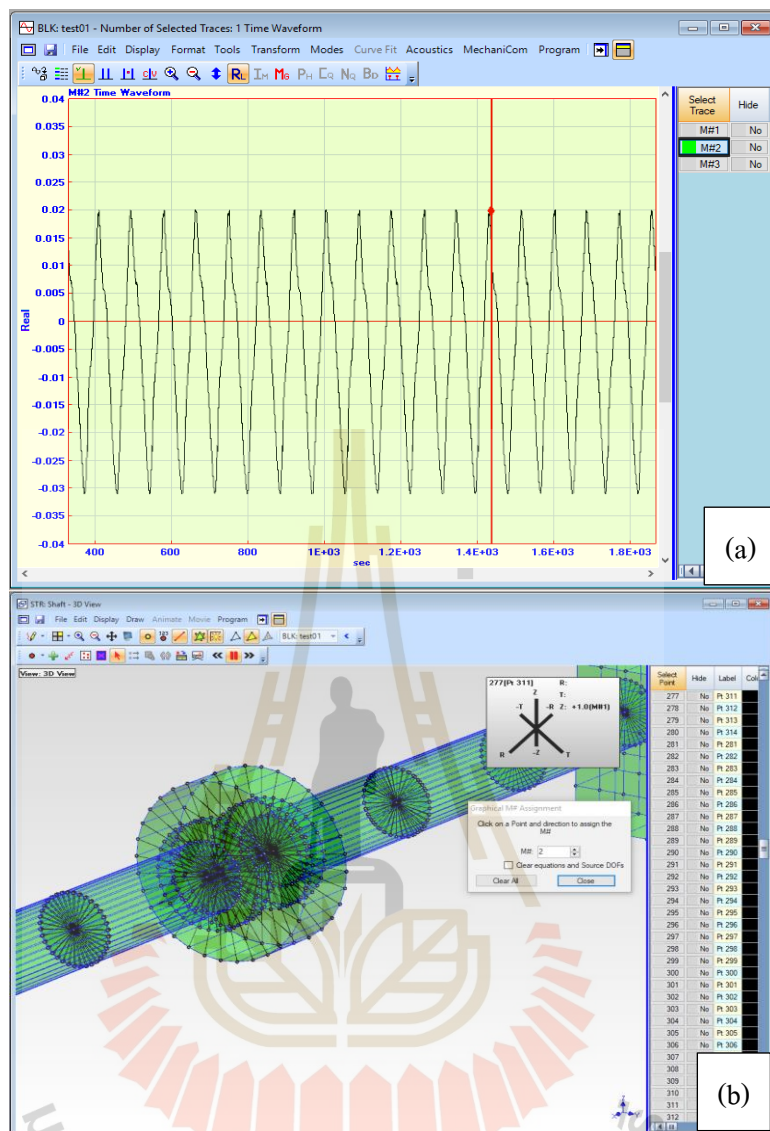
ในขั้นตอนการประมวลผลด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานคือ การนำค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จริงจากเพลาของเครื่องมือทดสอบด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสแอมป์มาประมวลผลด้วยโปรแกรม ME'ScopeVES เพื่อรูปร่างการสั่นสะเทือนในรูปแบบของการโค้งตัวของเพลาและผลตอบสนองแบบพลวัตในแต่ละช่วงเวลาของเพลา โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างแบบจำลองโครงสร้างของเพลาและตลับลูกปืน ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แบบจำลอง โครงสร้างของเพลาและเบริง

2. การนำข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม ME'ScopeVES ดังแสดงในรูปที่ 3.18 (a) และกำหนดตำแหน่งที่วัดสัญญาณการสั่นสะเทือนลงไปบนแบบจำลองโครงสร้างของเพลา ดังแสดงในรูปที่ 3.18 (b)



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการนำสัญญาณการสั่นสะเทือนเข้าสู่โปรแกรม ME'ScopeVES

3. การสร้างสมการการประมาณค่าระหว่างช่วง เพื่อถ่ายทอดขนาดการโก่งตัวของเพลลาไปยังจุดอื่น ๆ ข้างเคียง โดยการประมาณค่าระหว่างช่วง
4. เริ่มการทำงานโปรแกรมจะสร้างการเคลื่อนไหวของเพลลาโดยมีขนาดเปลี่ยนไปตามช่วงเวลาที่ทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

3.10 สรุป

ในการดำเนินงานวิจัยได้เริ่มต้นจากการสร้างเครื่องมือทดสอบทำการทดสอบความถี่ธรรมชาติของเครื่องมือทดสอบ เพื่อเลือกย่านการใช้งานไม่ให้ตรงกับความถี่ธรรมชาติและ

เพื่อใช้ความถี่ธรรมชาติเป็นตัวช่วยในการประมาณค่าพารามิเตอร์ จากนั้นจึงเก็บค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาทีจำนวน 3 ตำแหน่ง ตลอดความยาวเพลลา จากนั้นขั้นตอนการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นการประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือนด้วยเทคนิคครูปรางเบียงเบนขณะปฏิบัติงาน โดยใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนประมวลผลผ่านโปรแกรม ME'ScopeVES เพื่อให้ได้รูปร่างการสั่นสะเทือนของเพลลาขณะหมุนที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที และได้ขนาดการสั่นสะเทือนของเพลลาจากขั้นตอนการประมาณค่าระหว่างช่วง ส่วนที่ 2 เป็นการประมวลผลด้วยเทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนของเพลลาและการประมาณค่าพารามิเตอร์ เริ่มต้นจากการประมาณค่ามวลและสปริงของระบบการสั่นสะเทือนด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม โดยใช้ความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบโมดอลร่วมกับโปรแกรม SolidWorks เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ เมื่อประมาณค่าของมวลและสปริงของระบบการสั่นสะเทือน Model A ได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนของเพลลา โดยสร้าง 2 แบบจำลอง คือ แบบจำลองของระบบการสั่นสะเทือนของ Model A และแบบจำลองของระบบการสั่นสะเทือนของ Model B และใช้เครื่องมือ Parameter estimation ในการประมาณค่าแรงที่กระทำต่อเพลลาและความถี่ของเพลลาขณะหมุน เพื่อประมวลผลขนาดการสั่นสะเทือนของเพลลา จากนั้นนำค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจริงที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดี้ การใช้เทคนิคครูปรางเบียงเบนขณะปฏิบัติงาน และเทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนของเพลลามารเปรียบเทียบกันเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแต่ละเทคนิคที่ใช้ในการวัดและประมวลผล และนำขนาดการสั่นสะเทือนที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปสร้างภาพเคลื่อนไหวด้วยโปรแกรม ME'ScopeVES อีกครั้งเพื่อดูการโก่งตัวของเพลลาที่มีความแม่นยำมากขึ้น

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักรด้วยการทดสอบ โมดอล เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดของเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นของการประมาณค่าพารามิเตอร์การวัดการโก่งตัวของเพลลาจากการขณะปฏิบัติงาน โดยใช้การวัดจากเครื่องทดสอบด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสของเอ็ดดี้ โดยมีความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 1,400 รอบต่อนาที ซึ่งจะได้เป็นระยะของการโก่งตัวของเพลลาเพื่อนำไปใช้ในการประมวลผลด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน การใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการสั่นสะเทือน เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรมและเครื่องมือ Parameter estimation เพื่อให้ได้ขนาดของการสั่นสะเทือนของเพลลา

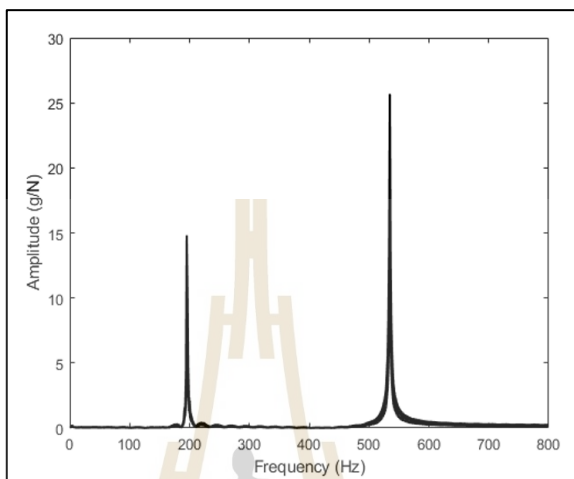
การทดสอบทั้งหมดจะมีการเปรียบเทียบความถูกต้องด้านขนาดของการสั่นสะเทือน โดยการเปรียบเทียบความถูกต้องจะใช้ค่าขนาดของการสั่นสะเทือนที่เก็บได้จริงจากเครื่องมือทดสอบเป็นค่าอ้างอิงดังนี้ การเปรียบเทียบความถูกต้องระหว่างขนาดของการสั่นสะเทือนจริงกับการประมวลผลด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน และการเปรียบเทียบความถูกต้องระหว่างขนาดของการสั่นสะเทือนจริงกับการประมวลผลด้วยเทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือน เพื่อให้ทราบถึงความคลาดเคลื่อน ข้อดีและข้อเสียของเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการวัดการโก่งตัวของเพลลา

4.2 ผลการทดสอบความถี่ธรรมชาติของชุดทดสอบ

จากการทดสอบ โมดอลเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักรแบ่งเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่หนึ่งคือ การทดสอบ โมดอลของเพลลาเพียงอย่างเดียว ปลายทั้งสองข้างของเพลลาปล่อยอิสระ โดยใช้วิธีการแบบเคาะที่ตำแหน่งเดียว แต่เปลี่ยนตำแหน่งของทรานสดิวเซอร์แบบความเร่ง 5 ตำแหน่ง ตลอดความยาวเพลลา ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (a) ส่วนที่สองคือ การทดสอบ โมดอลของเพลลาที่ติดตั้งดิสก์บริเวณกึ่งกลางเพลลาปลายทั้งสองข้างของเพลลาปล่อยอิสระ โดยใช้วิธีการแบบเคาะที่ตำแหน่งเดียว แต่เปลี่ยนตำแหน่งของทรานสดิวเซอร์แบบความเร่ง 5 ตำแหน่ง ตลอดความยาวเพลลา ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (b) ส่วนที่สามคือ การทดสอบ โมดอลของทั้งโครงสร้างเครื่องมือทดสอบ โดยใช้วิธีการแบบเคาะที่ตำแหน่งเดียวแต่เปลี่ยนตำแหน่งของทรานสดิวเซอร์แบบความเร่ง 10 ตำแหน่ง ตลอดความยาวของเครื่องมือทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (c) มีผลการทดสอบ โมดอลทั้ง 3 ส่วน ดังนี้

4.2.1 ผลการทดสอบแบบเพลลาเพียงอย่างเดียว

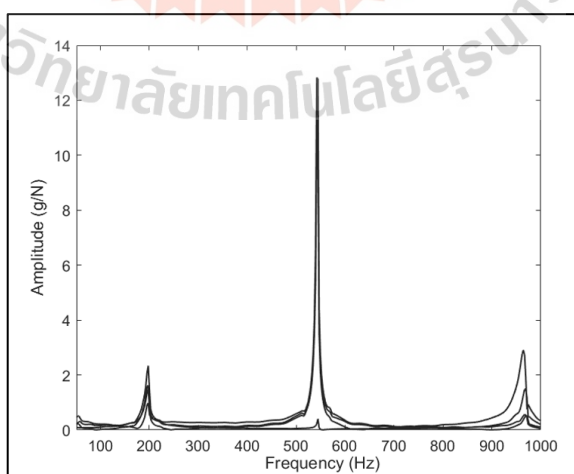
เป็นผลของการทดสอบ โมดอล โดยมีจำนวนจุดวัดและรูปแบบการกำหนดจุดวัดเก็บค่าสัญญาณการสั่นสะเทือน ดังอธิบายในหัวข้อที่ 3.4 มีผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบ โมดอลของเพลลา

4.2.2 ผลการทดสอบแบบเพลลาและมวลถ่วงตรงกลางเพลลา

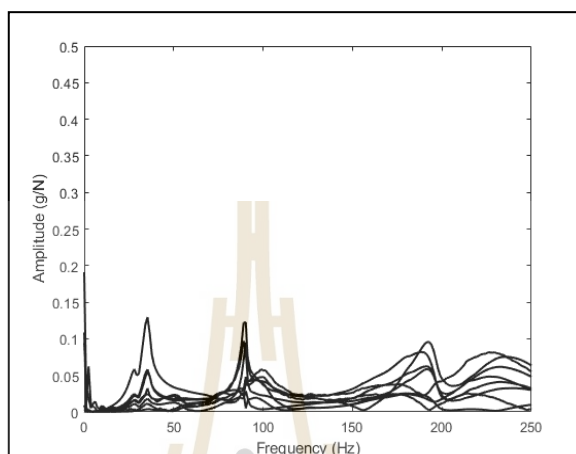
เป็นผลของการทดสอบ โมดอล โดยมีจำนวนจุดวัดและรูปแบบการกำหนดจุดวัดเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน ดังอธิบายในหัวข้อที่ 3.4 มีผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบ โมดอลของเพลลารวมกับดิสก์

4.2.3 ผลการทดสอบแบบทั้งระบบของเครื่องมือทดสอบ

เป็นผลของการทดสอบ โมดอล โดยมีจำนวนจุดวัดและรูปแบบการกำหนดจุดวัด เก็บค่าสัญญาณการสั่นสะเทือน มีผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบ โมดอลของทั้งเครื่องมือทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ โมดอล

Mode	Shaft (Hz)	Shaft + Disk (Hz)	Machine structure (Hz)
1	195.313	177.002	35.428
2	534.721	528.568	89.121
3	1,050.151	985.225	190.430

4.3 ผลการประมวลผลด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการใช้การประมวลผลด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks ทำให้สามารถทราบความถี่ธรรมชาติของเครื่องมือทดสอบ โดยมีผลลัพธ์ดังนี้

1. แบบจำลองของเพลลาเพื่อหาความถี่ธรรมชาติ โดยให้เงื่อนไขการจับยึดคือ ปลดปล่อยเพลลาอิสระทั้งสองข้าง ได้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างทั้งหมด 3 โหมด โหมดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 195.68 Hz โหมดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 534.44 Hz และโหมดที่ 3 มีค่าเท่ากับ 1,036.52 Hz มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นสะเทือนของเพลา

โหมด	ความถี่ธรรมชาติ	รูปร่างการสั่นสะเทือน
1	195.68 Hz 1,229.49 Rad/sec	
2	534.44 Hz 3,357.98 Rad/sec	
3	1,036.52 Hz 6,512.64 Rad/sec	

2. แบบจำลองของเพลาและดิสก์ตรงกลางเพลาเพื่อหาความถี่ธรรมชาติ โดยให้เงื่อนไขการจับยึดคือ ปลดปล่อยเพลาอิสระทั้งสองข้าง ได้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างทั้งหมด 3 โหมด โหมดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 180.16 Hz โหมดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 506.41 Hz และโหมดที่ 3 มีค่าเท่ากับ 993.61 Hz และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นสะเทือนของเพลลาที่ใส่ดิสก์ตรงกลางเพลลา

โหมด	ความถี่ธรรมชาติ	รูปร่างการสั่นสะเทือน
1	180.16 Hz 1,131.99 Rad/sec	
2	506.41 Hz 3,181.91 Rad/sec	
3	993.61 Hz 6,243.06 Rad/sec	

จากผลการใช้โปรแกรม SolidWorks ประมวลผลเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องมือทดสอบและ สามารถนำมาเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าความถี่ธรรมชาติกับการทดสอบโมดอล โดยใช้ค่าความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบโมดอลเป็นค่าอ้างอิง ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความถูกต้องจากการทดสอบโมดอลและโปรแกรม SolidWorks

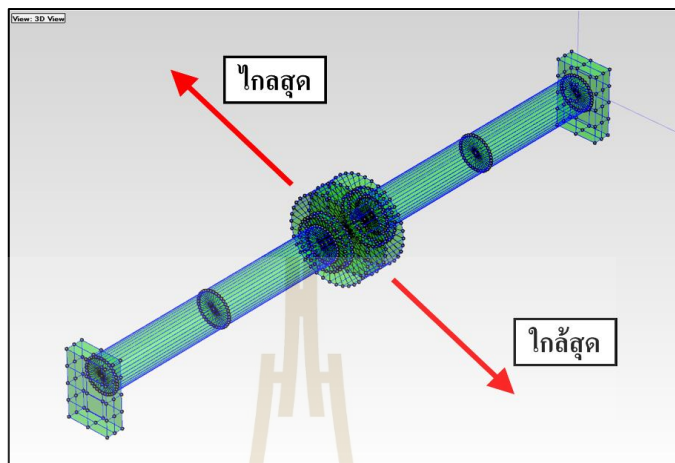
Shaft			
Mode	Modal test (Hz)	SolidWorks (Hz)	Error (%)
1	195.313	195.68	0.187
2	534.721	534.44	0.052
3	1050.151	1036.52	1.298
Shaft + Disk			
Mode	Modal test (Hz)	SolidWorks (Hz)	Error (%)
1	177.002	180.16	1.784
2	528.568	506.41	4.192
3	985.225	993.61	0.851

จากผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของความถี่ธรรมชาติที่ได้จากโปรแกรม SolidWorks ทั้ง 3 ส่วน ทำให้ทราบว่าในกรณีที่เครื่องจักรไม่มีความซับซ้อน หรือมีชิ้นส่วนจำนวนน้อยชิ้น โปรแกรม SolidWorks สามารถประมวลผลได้มีความแม่นยำ แต่กรณีที่เครื่องจักรมีความซับซ้อน หรือมีชิ้นส่วนหลายชิ้นจะทำให้การประมวลผลของโปรแกรมมีความคลาดเคลื่อนมากยิ่งขึ้น และมีความซับซ้อนในการใช้โปรแกรมมากยิ่งขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น บริเวณจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ ของชิ้นส่วนที่ไม่เหมาะสมหรือสมจริงกับที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรจริง การกำหนดข้อมูลทางกลของวัสดุต่าง ๆ ในเครื่องจักรมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เป็นต้น

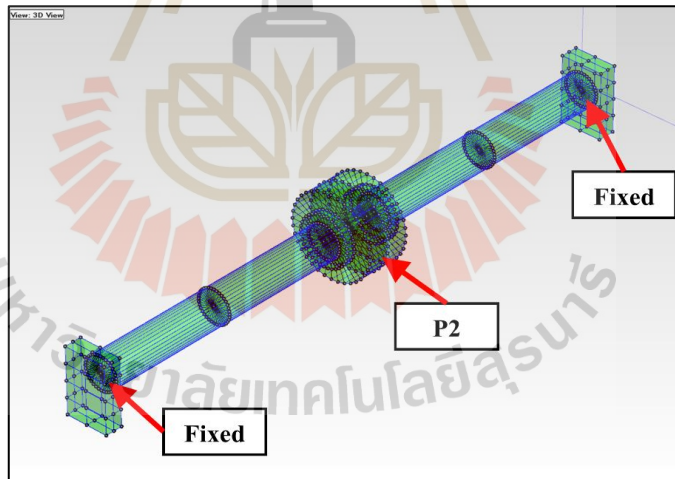
4.4 ผลการประมวลผลข้อมูลด้วยเทคนิคการร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน

จากการสร้างแบบจำลองโครงสร้างของเพลลาและแบริ่งให้มีขนาดเท่ากับในเครื่องจักรจริง และกำหนดตำแหน่งในการใส่ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนให้เป็นตำแหน่งเดียวกับการวัดสัญญาณจากเครื่องจักรและนำค่าสัญญาณการสั่นสะเทือน ในรูปของการโก่งตัวของเพลลาที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์กระแสแอมป์มาประมวลผลด้วยเทคนิคการร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน โดยมีข้อกำหนดเรื่องทิศทางการโก่งตัวคือ การโก่งตัวของเพลลาจะมีการโก่งตัวใกล้ที่สุดและการโก่งตัวใกล้ที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ใช้ค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่จุดกึ่งกลางเพลลา หรือตำแหน่งวัด P2

ในการประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือนและกำหนดให้ตำแหน่งของแบร็งทั้งสองข้างที่รองรับเพลลา ไม่มีการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 4.5

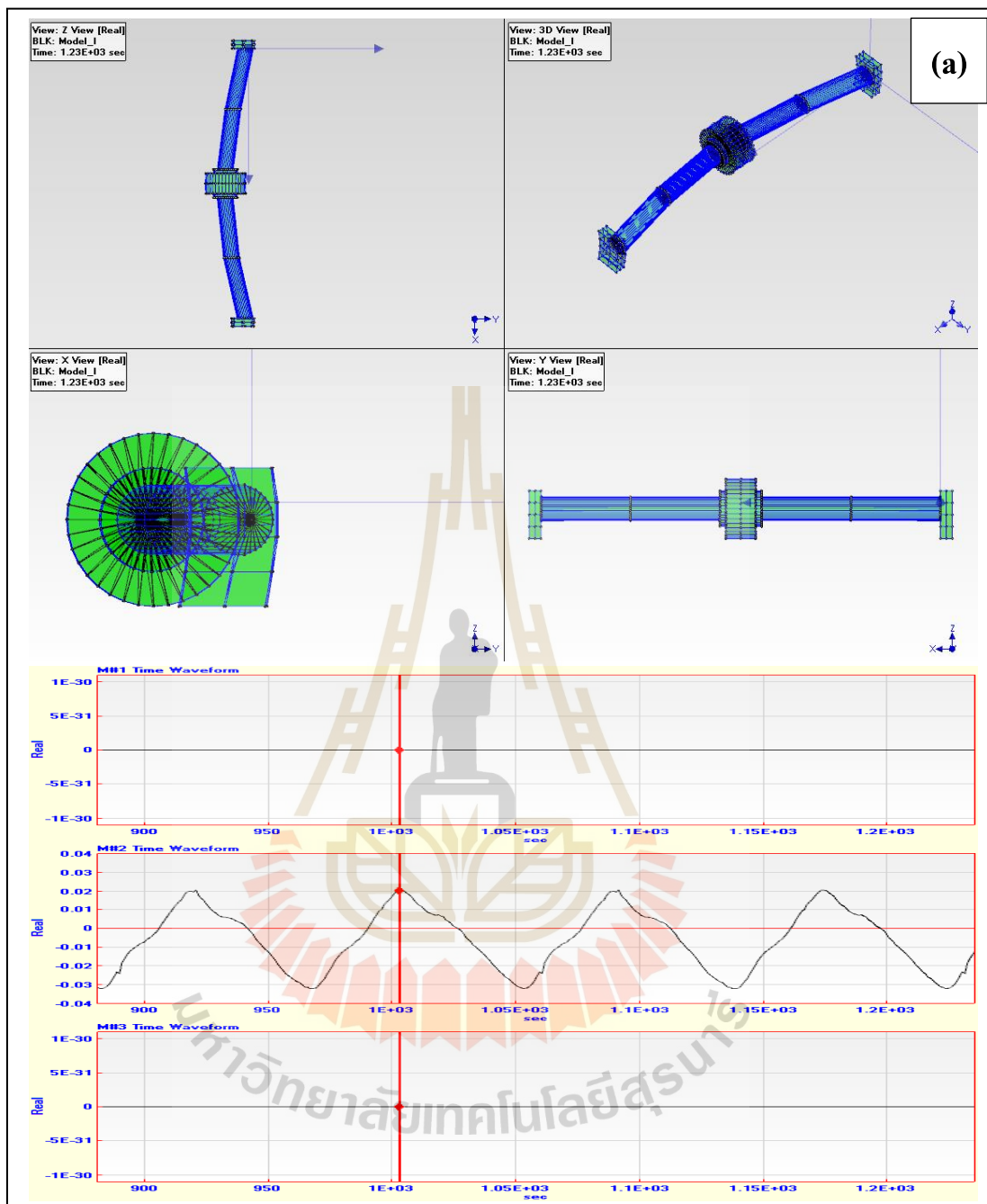


รูปที่ 4.4 การกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของเพลลา

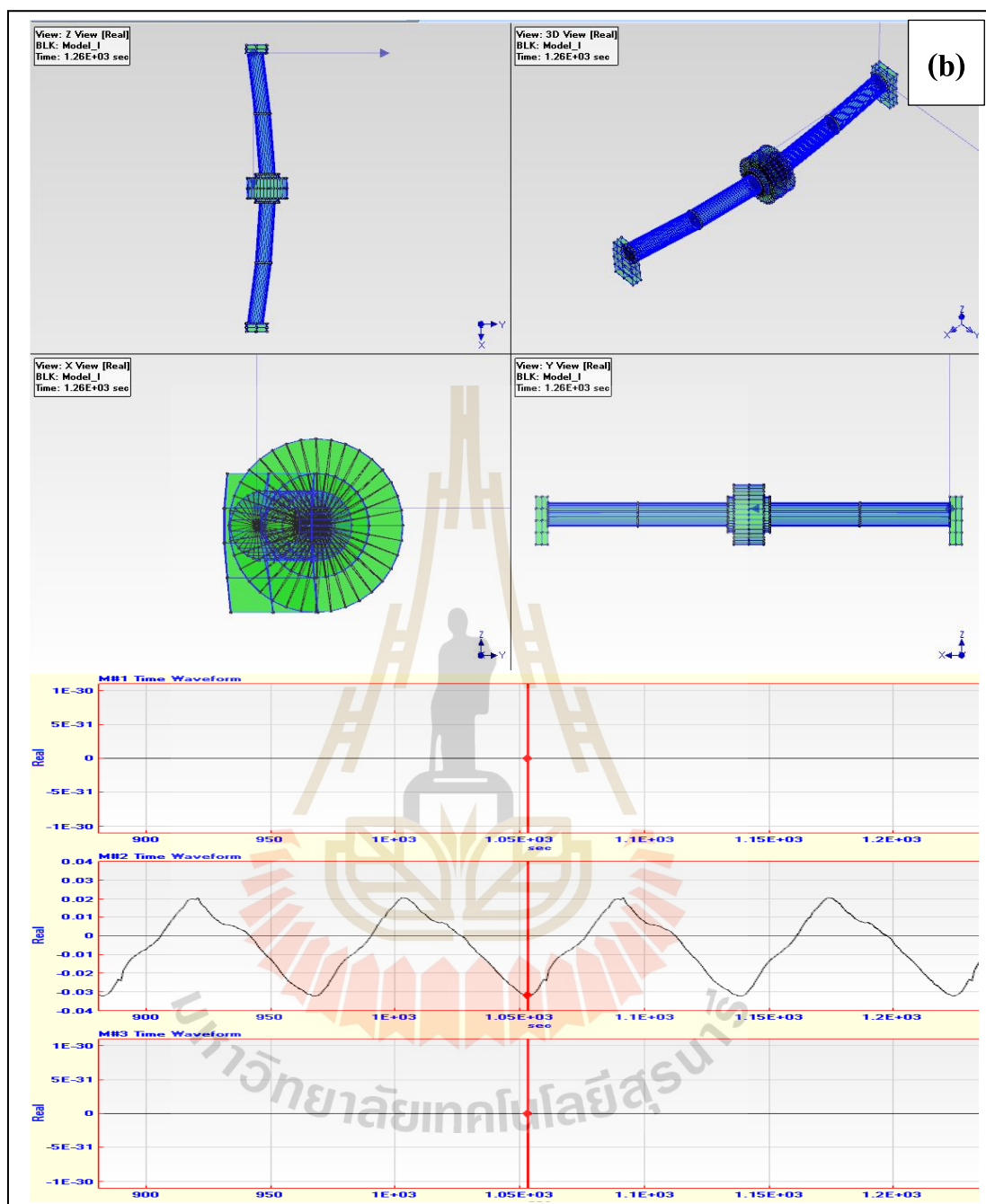


รูปที่ 4.5 การจำกัดการเคลื่อนไหวของแบร็งทั้งสองข้าง

รูปร่างการโค้งตัวของเพลลาขณะปฏิบัติงานที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที ขณะเพลลา โค้งตัวไกลที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.6 (a) และขณะเพลลาโค้งตัวใกล้ที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (b)



รูปที่ 4.6 รูปร่างการสั่นสะเทือนของเพลลาที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.6 รูปร่างการสั่นสะเทือนของเพลาคี่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที (ต่อ)

จากการใช้เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานในการประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถคำนวณขนาดของการโก่งตัวของเพลาคี่ในตำแหน่ง ระหว่างดิสก์ และแบร์ริงทั้งสองข้างได้ ซึ่งเป็นตัวแทนของตำแหน่งวัด P1 และ P3 โดยการใช้วิธีการประมาณค่าเฉลี่ยระหว่างจุด มีผลการประมาณค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการประมาณค่าระหว่างช่วงของเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานที่ 1,400 รอบ
ต่อนาที

	P1		P3	
	Max	Min	Max	Min
Measurement (mm.)	0.0136	-0.0202	0.0150	-0.0234
ODS (mm.)	0.0103	-0.0160	0.0103	-0.0160
Error (%)	24.553	20.379	31.506	31.623

4.5 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม

จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม โดยการพิจารณาความถี่ธรรมชาติจากการทดสอบโมดอลเป็นค่าอ้างอิงเพื่อประมาณค่ามวลและสปริงของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 1 องศาอิสระ ระบบการสั่นสะเทือนที่มี 2 องศาอิสระ และระบบการสั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระ

4.5.1 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 1 องศาอิสระ

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 1 องศาอิสระมีการประมวลผล 174 รอบ โดยมีค่าผลรวมของ Sum square error เท่ากับ $4.365 \times 10^{-13} \%$ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และมีค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ ดังตารางที่ 4.6 และมีความถูกต้องของความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักรจริงเทียบกับที่ได้จากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์จากการประมาณค่าด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรม ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 1 องศาอิสระ

Parameter	Value	Unit
m_s	1.843	kg
k_{s1}	1390012.772	N/m
k_{s2}	1386246.441	N/m

ตารางที่ 4.7 ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 1 องศาอิสระ

Mode	Modal (Hz)	GA (Hz)	Error (%)
1	195.313	195.338	1.279×10^{-2}

4.5.2 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 2 องศาอิสระ

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 2 องศาอิสระมีการประมวลผล 337 รอบ โดยมีค่าผลรวมของ Sum square error รอบสุดท้ายเท่ากับ 2.192×10^{-10} % มีค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ ดังตารางที่ 4.8 และมีความถูกต้องของความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักรจริงเทียบกับที่ได้จากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์จากการประมาณค่าด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรม ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 2 องศาอิสระ

Parameter	Value	Unit
m_s	1.717	kg
m_d	0.413	kg
k_{s1}	1416236.316	N/m
k_{s2}	1484941.001	N/m
k_d	2754884.892	N/m

ตารางที่ 4.9 ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 2 องศาอิสระ

Mode	Modal (Hz)	GA (Hz)	Error (%)
1	177.002	177.001	5.649×10^{-4}
2	528.568	528.558	1.891×10^{-3}

จากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์จะพบว่า k_d ซึ่งเป็นค่าของสปริงระหว่างเพลลาและดิสก์ตำแหน่งกึ่งกลางเพลลา มีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงสามารถประมาณได้ว่าเพลลาและดิสก์ตำแหน่งกึ่งกลางเพลลาติดเป็นกันมวลก้อนเดียวกัน

4.5.3 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระ

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระมีการประมวลผล 901 รอบ ค่าผลรวมของ Sum square error เท่ากับ 1.908% มีค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ ดังตารางที่ 4.10 และมีความถูกต้องของความสัมพันธ์ของเครื่องจักรจริงเทียบกับที่ได้จากการคำนวณด้วยพารามิเตอร์จากการประมาณค่าด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรมแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.10 ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระ

Parameter	Value	Unit
m_T	2.13	kg
m_R	14.949	kg
m_L	11.068	kg
k_{s1}	1416236.316	N/m
k_{s2}	1484941.001	N/m
k_R	124359.652	N/m
k_L	3870930.312	N/m

ตารางที่ 4.11 ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระ

Mode	Modal (Hz)	GA (Hz)	Error (%)
1	35.428	35.418	2.822×10^{-2}
2	89.121	89.119	2.244×10^{-3}
3	190.430	194.061	1.906

4.6 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือ Parameter estimation

ในขั้นตอนนี้เป็นการนำค่า มวล และสปริงของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระที่ได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึมพันธุกรรม เป็นตัวช่วยในการกำหนดค่าเริ่มต้นของมวลและสปริง เพื่อให้การประมาณค่าด้วยเครื่องมือ Parameter estimation มีความรวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น โดยทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ผ่านแผนภาพบล็อกของระบบการ

สั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระแบบมีตัวหน่วงและไม่มีตัวหน่วง เพื่อประมาณค่าของ แรงที่กระทำต่อ เพลลาขณะหมุน ความถี่ที่เพลลาหมุน และขนาดของการสั่นสะเทือนของเพลลา

4.6.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือนที่มี 3 องศาอิสระด้วย

Parameter estimation

ที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที การสั่นสะเทือนของมวล M1, M2 และ M3 แทนการสั่นสะเทือนที่จุดวัด P1, P2 และ P3 ตามลำดับ ได้ค่าพารามิเตอร์ของ Model A และ Model B ดังแสดงในตารางที่ 4.12-4.13 และมีผลตอบสนองของระบบการสั่นสะเทือนดังนี้

ตารางที่ 4.12 พารามิเตอร์ของ Model A

Parameter	Value	Unit
F	207.638	N
ω	23.372	Hz
m_T	2.13	kg
m_R	14.949	kg
m_L	11.068	kg
k_{s1}	1,416,236.316	N/m
k_{s2}	1,484,941.001	N/m
k_R	124,359.652	N/m
k_L	3,870,930.312	N/m

ตารางที่ 4.13 พารามิเตอร์ของ Model B

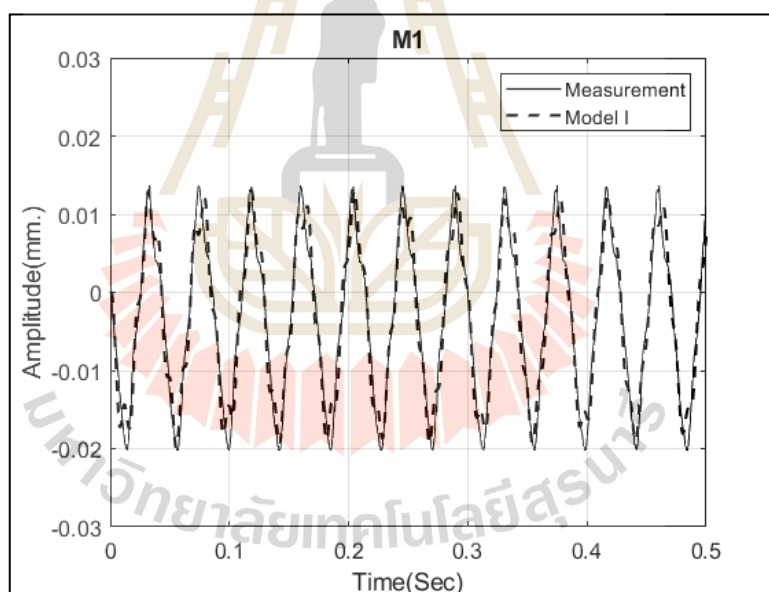
Parameter	Value	Unit
F	207.638	N
ω	23.372	Hz
m_T	2.13	kg
m_R	14.949	kg
m_L	11.068	kg
k_{s1}	1416236.316	N/m
k_{s2}	1484941.001	N/m

ตารางที่ 4.13 พารามิเตอร์ของ Model B (ต่อ)

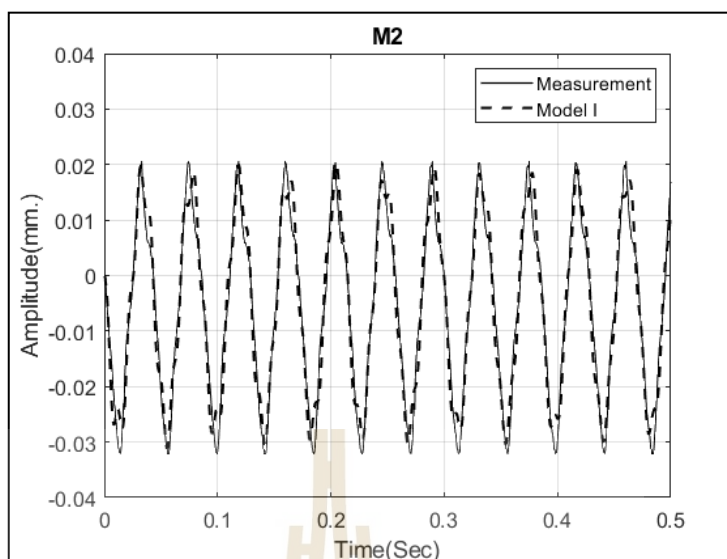
Parameter	Value	Unit
k_R	124,359.652	N/m
k_L	3,870,930.312	N/m
c_R	102.237	N·s/m
c_L	154.135	N·s/m

1. ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Model A

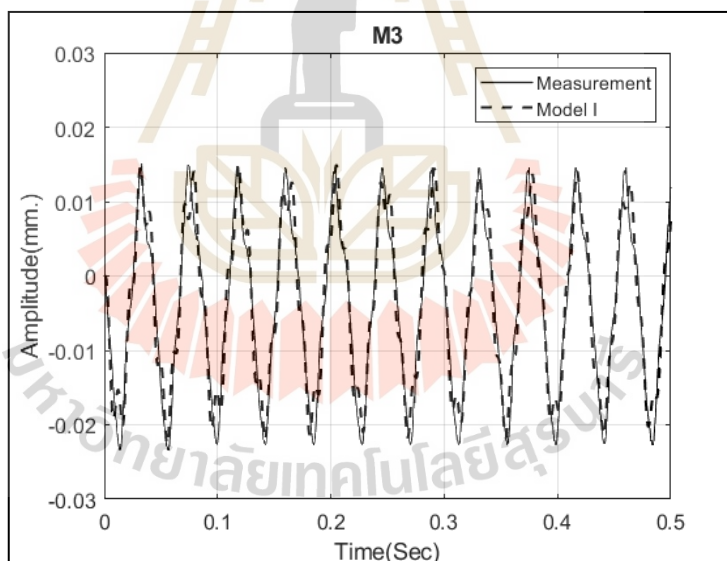
การสั่นสะเทือนของเพลลาขณะหมุนด้วยความเร็ว 1,400 รอบต่อนาที ประมวลผลจากแบบจำลองของการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มี 3 องศาอิสระแบบไม่มีตัวหน่วง มีขนาดดังแสดงในรูปที่ 4.7-4.9



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลตอบสนองจริงกับ Model A ที่จุด M1



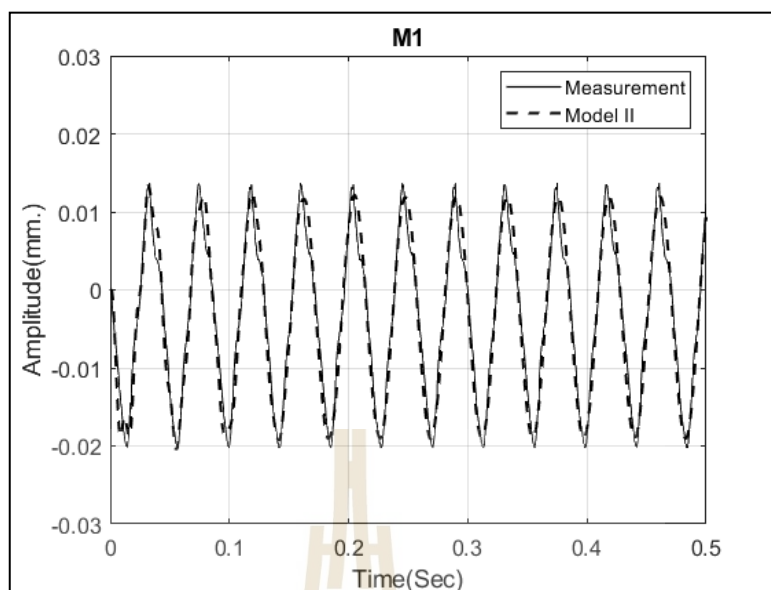
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลตอบสนองจริงกับ Model A ที่จุด M2



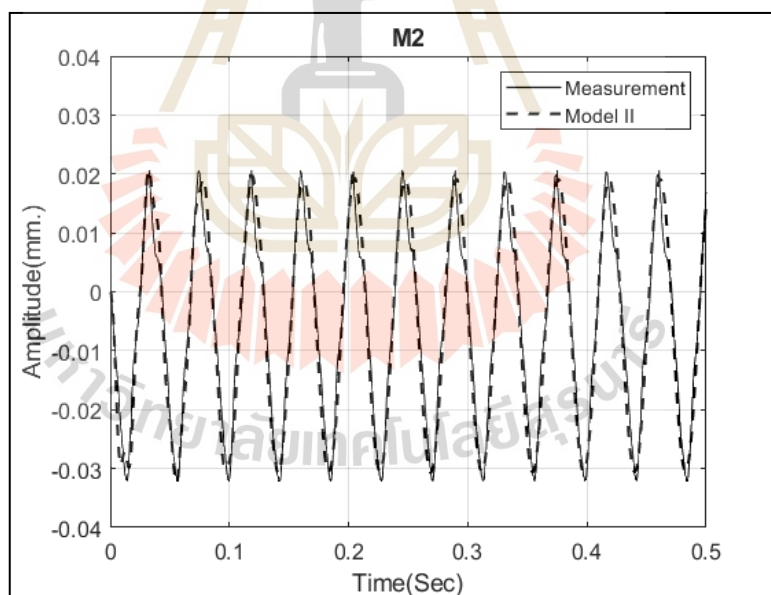
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลตอบสนองจริงกับ Model A ที่จุด M3

2. ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Model B

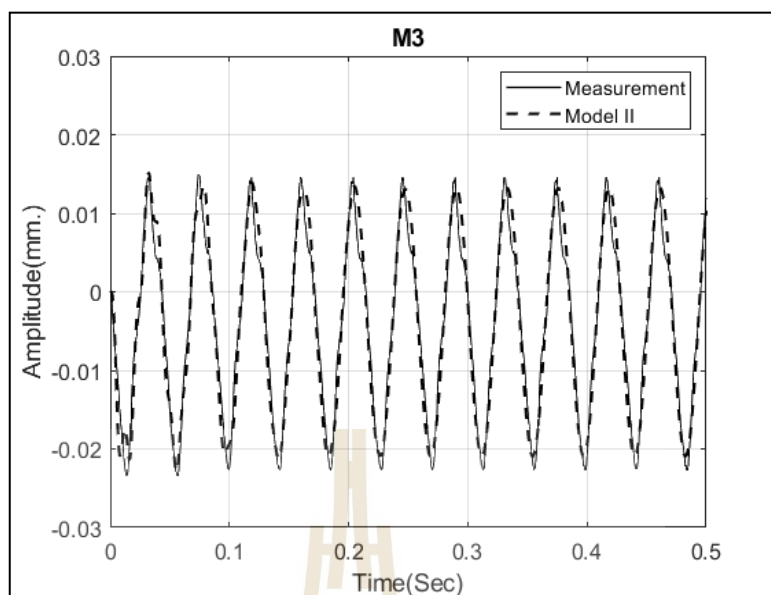
การสั่นสะเทือนของเพลลาขณะหมุนด้วยความเร็ว 1,400 รอบต่อนาที ประมวลผลจากแบบจำลองของการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มี 3 องศาอิสระแบบมีตัวหน่วงมีขนาด ดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.12



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลตอบสนองจริงกับ Model B ที่จุด M1



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลตอบสนองจริงกับ Model B ที่จุด M2



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลตอบสนองจริงกับ Model B ที่จุด M3

ตารางที่ 4.14 ขนาดการสั่นสะเทือนของเพลลาและค่าความผิดพลาดในแต่ละจุดของ Model A

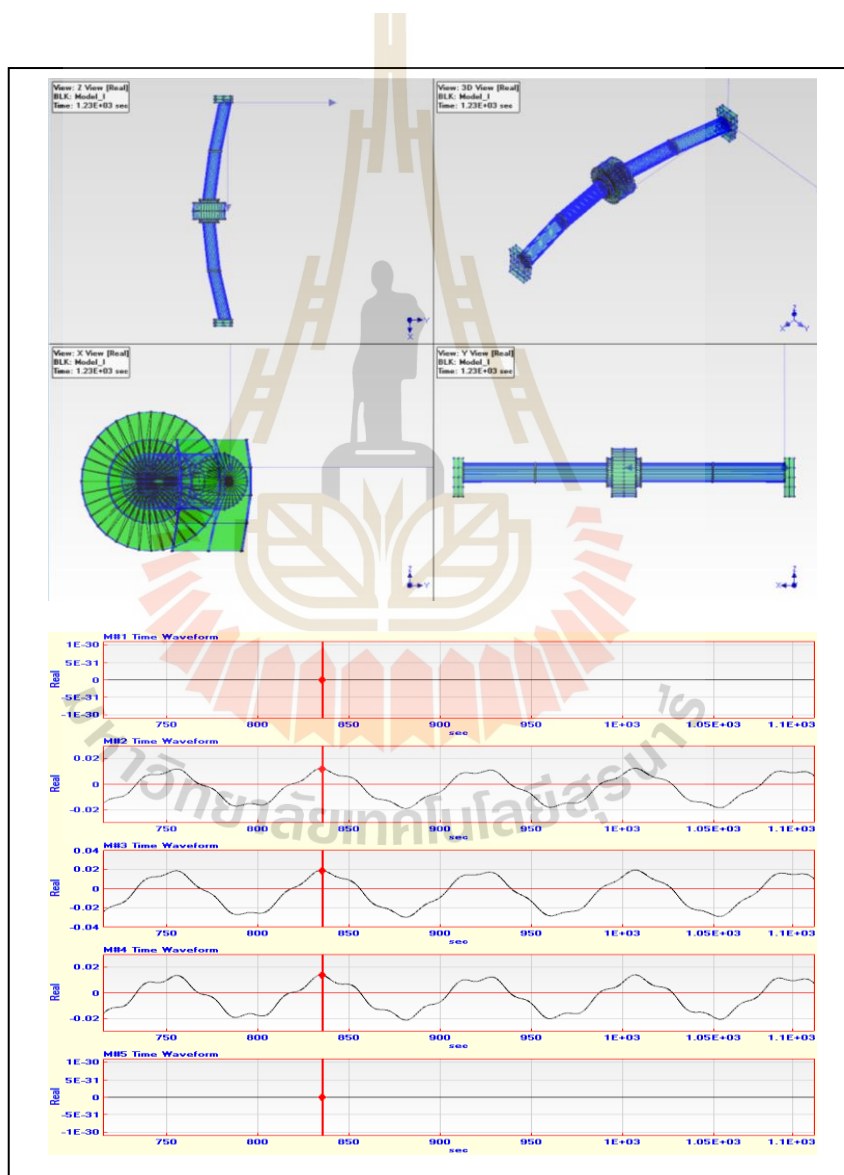
Model A	P1		P2		P3	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Measurement (mm.)	0.0136	-0.0202	0.0205	-0.0321	0.0150	-0.0234
Math model (mm.)	0.0143	-0.0207	0.0208	-0.0325	0.0156	-0.0237
Error (%)	5.1470	2.9710	1.5078	1.4047	4.6300	1.2011

ตารางที่ 4.15 ขนาดการสั่นสะเทือนของเพลลาและค่าความผิดพลาดในแต่ละจุดของ Model B

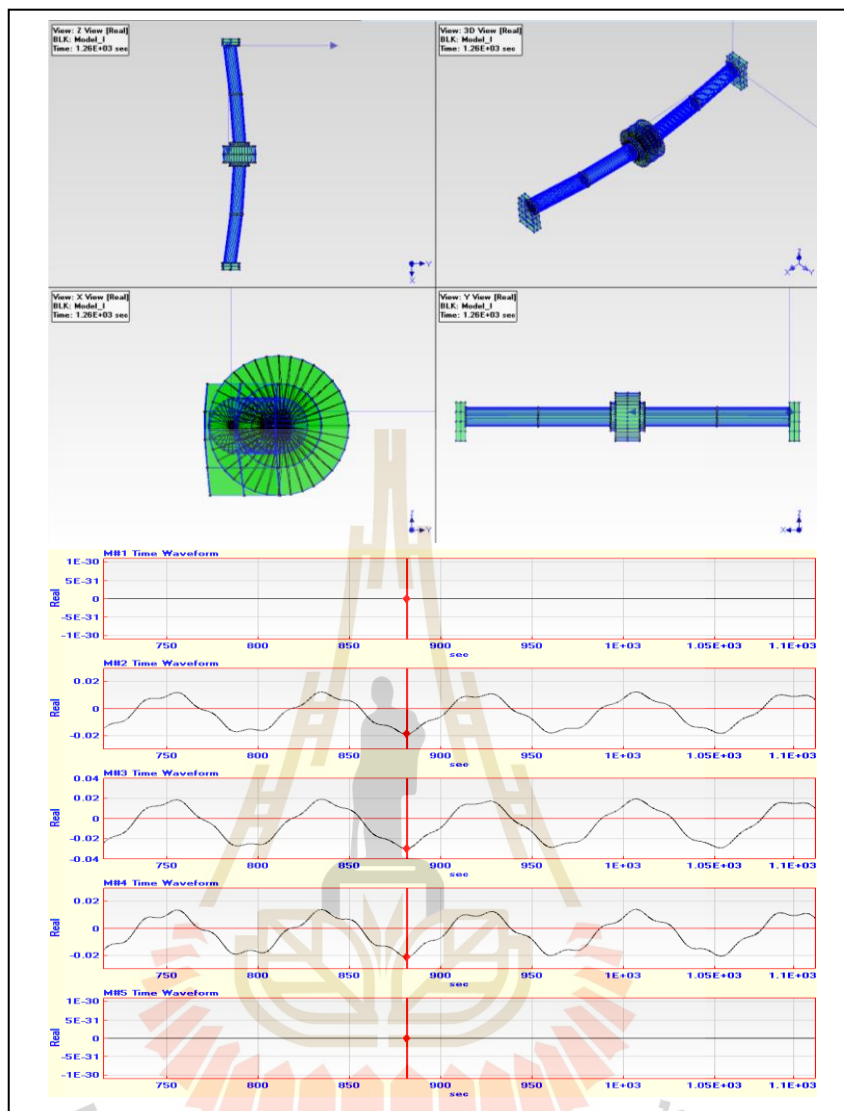
Model B	P1		P2		P3	
	Max	Min	Max	min	Max	Min
Measurement (mm.)	0.0136	-0.0202	0.0205	-0.0321	0.0150	-0.0234
Math model (mm.)	0.0135	-0.0205	0.0209	-0.0325	0.0151	-0.0229
Error (%)	0.6922	1.7266	2.0091	1.2973	1.3895	1.9122

4.7 ผลการประมวลผลด้วยเทคนิคเบี่ยงเบนรูปร่างขณะปฏิบัติงานด้วยข้อมูลจากเทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

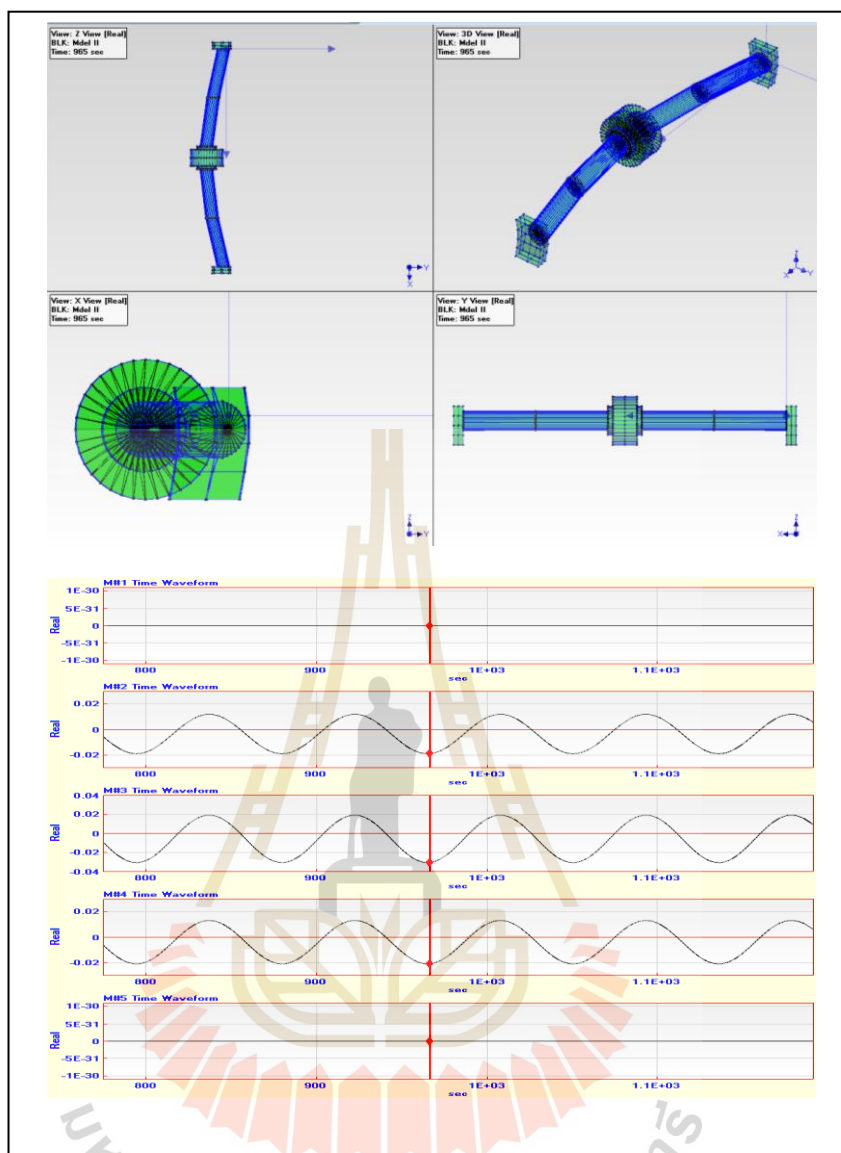
ผลลัพธ์ขนาดการโก่งตัวของเพลลาขณะหมุนที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที จากการประมวลผลด้วยเทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำกลับมาแสดงผลเป็นภาพเคลื่อนไหวอีกครั้งด้วยโปรแกรม ME'ScopeVES เพื่อตรวจสอบลักษณะการโก่งตัวของเพลลาขณะหมุนด้วยสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มีความแม่นยำมากขึ้น โดยสามารถสร้างภาพเคลื่อนไหวของการโก่งตัวของเพลลาที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาทีได้ดังรูปที่ 4.13-4.16



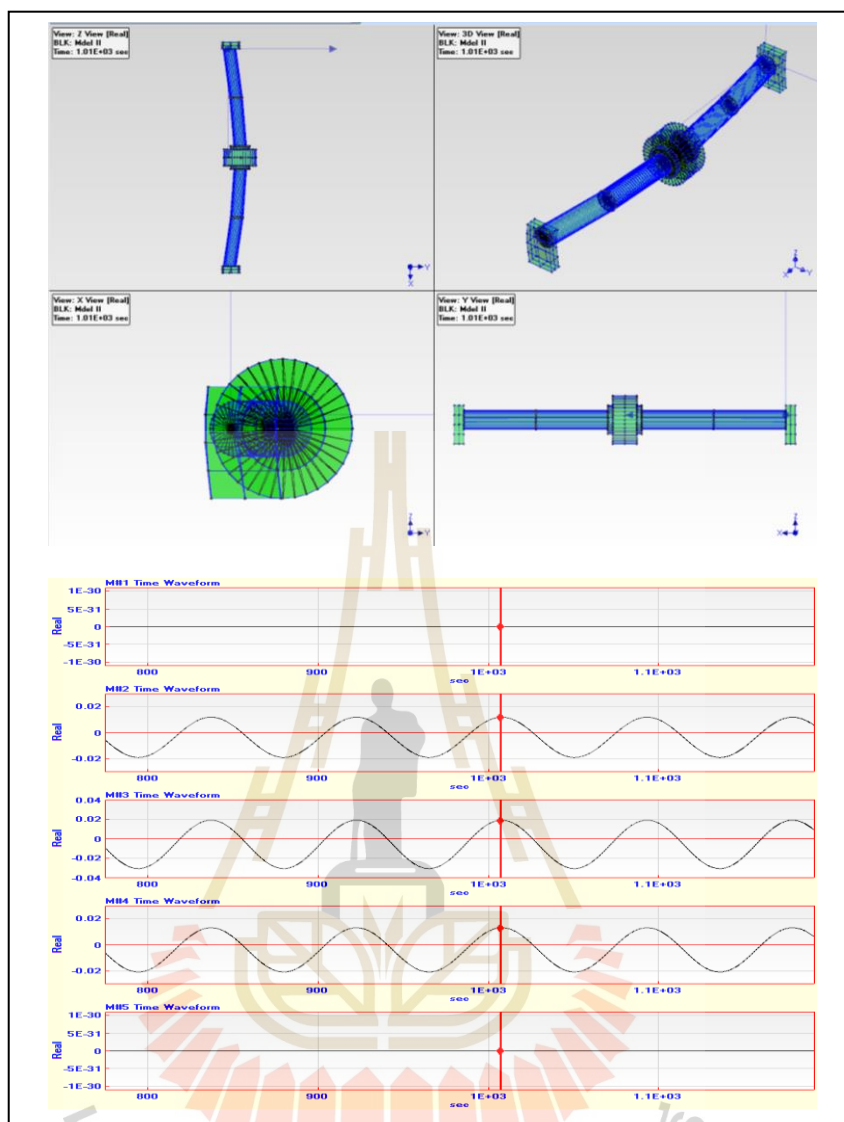
รูปที่ 4.13 การโก่งตำแหน่งตัวไกลที่สุดโดยใช้ข้อมูลจาก Model A



รูปที่ 4.14 การโค้งตำแหน่งตัวใกล้ที่สุดโดยใช้ข้อมูลจาก Model A

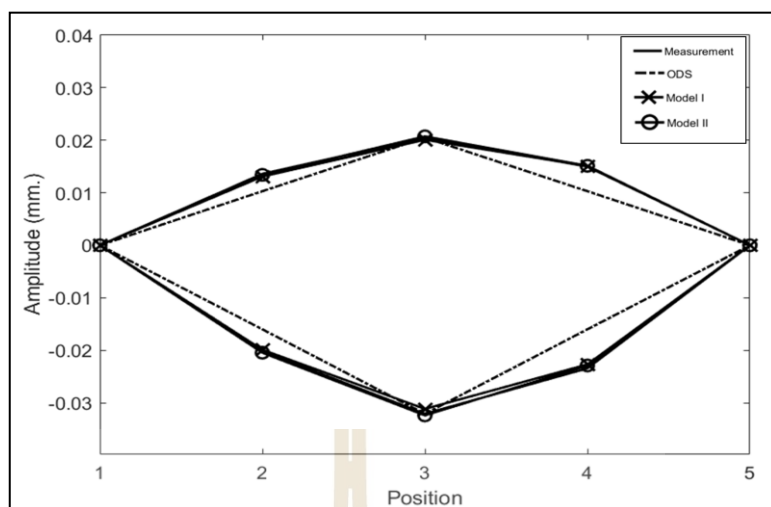


รูปที่ 4.15 การ โกงตำแหน่งตัวโก่งที่สุด โดยใช้ข้อมูลจาก Model B



รูปที่ 4.16 การ โกงตำแหน่งตัวไกล้ที่สุดโดยใช้ข้อมูลจาก Model B

ผลลัพธ์จากการใช้เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานด้วยโปรแกรม ME'ScopeVES ในการประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือน การใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการสั่นสะเทือนของเพลลา การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม และเครื่องมือ Parameter estimation ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และผลจากการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจริง สามารถนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งการ โกงตัวไกล้ที่สุดและการ โกงตัวไกล้ที่สุดได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบขนาดการโก่งตัวของการประมวลผลด้วยเทคนิคต่าง ๆ

4.8 สรุป

จากการทดสอบ โมดอลเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องมือทดสอบพบว่า เครื่องมือทดสอบมีความถี่ธรรมชาติโหมดแรกเท่ากับ 35.4 Hz โหมดที่สอง เท่ากับ 89.111 Hz จากนั้นได้ทำการเก็บค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลาด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสแอมป์จำนวน 3 ตำแหน่งเพื่อใช้ในเป็นค่าอ้างอิงสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องในการวัดและประมวลผลด้วยวิธีอื่น ๆ จากนั้นนำสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้จากเครื่องมือทดสอบจริงมาประมวลผลด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน โดยมีผลลัพธ์คือ ได้รูปร่างการสั่นสะเทือนของเพลาระหว่างความถี่รอบ 1,400 รอบต่อนาที และได้ขนาดการโก่งตัวของเพลาด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสแอมป์จำนวน 3 ตำแหน่ง โดยตำแหน่ง P1 มีการโก่งตัวไกลที่สุดเท่ากับ 0.0103 มิลลิเมตร มีการโก่งตัวไกลที่สุดเท่ากับ 0.0160 มิลลิเมตร และตำแหน่ง P3 มีการโก่งตัวไกลที่สุดเท่ากับ 0.0103 มิลลิเมตร มีการโก่งตัวไกลที่สุดเท่ากับ 0.0160 มิลลิเมตร เมื่อตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดจริงด้วยด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสแอมป์พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 31.623% ที่ตำแหน่งการโก่งตัวไกลที่สุดของจุดวัด P3 จากนั้นได้ใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการสั่นสะเทือน โดยใช้ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมในการประมาณค่าพารามิเตอร์ มวล และสปริงของระบบการสั่นสะเทือน และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการสั่นสะเทือนของเพลาด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสแอมป์ 2 รูปแบบ คือ Model A และ Model B เพื่อใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือ Parameter estimation เพื่อหาขนาดของการโก่งตัวของเพลาด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสแอมป์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้ผลลัพธ์ของ Model A คือ

ขนาดการโค้งตัวของเพลากลอบที่สุดที่ตำแหน่ง P1 เท่ากับ 0.0143 มิลลิเมตร โกงตัวใกล้ที่สุดที่ตำแหน่ง P1 เท่ากับ 0.0207 มิลลิเมตร ขนาดการโค้งตัวของเพลากลอบที่สุดที่ตำแหน่ง P2 เท่ากับ 0.0208 มิลลิเมตร โกงใกล้ที่สุดที่ตำแหน่ง P2 เท่ากับ 0.0325 มิลลิเมตร และขนาดการโค้งตัวของเพลากลอบที่สุดที่ตำแหน่ง P3 เท่ากับ 0.0156 มิลลิเมตร โกงตัวมกลที่สุดที่ตำแหน่ง P3 เท่ากับ 0.0237 มิลลิเมตร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 5.147 % ที่ตำแหน่ง เปลาโค้งตัวใกล้ที่สุดของตำแหน่ง P1 และผลลัพธ์ของ Model B คือ ขนาดการโค้งตัวของเพลากลอบที่สุดที่ตำแหน่ง P1 เท่ากับ 0.0135 มิลลิเมตร โกงตัวใกล้ที่สุดที่ตำแหน่ง P1 เท่ากับ 0.0205 มิลลิเมตร ขนาดการโค้งตัวของเพลากลอบที่สุดที่ตำแหน่ง P2 เท่ากับ 0.02098 มิลลิเมตร โกงตัวใกล้ที่สุดที่ตำแหน่ง P2 เท่ากับ 0.0325 มิลลิเมตร และขนาดการโค้งตัวของเพลากลอบที่สุดที่ตำแหน่ง P3 เท่ากับ 0.0151 มิลลิเมตร โกงตัวใกล้ที่สุดที่ตำแหน่ง P3 เท่ากับ 0.0234 มิลลิเมตร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 109122% ที่ตำแหน่งเพลากลอบใกล้ที่สุดของตำแหน่ง P3



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การตรวจสอบรูปร่างการสันสะท้อนของเครื่องจักรด้วยเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานเป็นวิธีการตรวจสอบเครื่องจักร เพื่อวิเคราะห์รูปร่างการสันสะท้อนของเครื่องจักรขณะที่เครื่องจักรทำงาน โดยใช้ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์(การกระจัด ความเร็ว ความเร่ง และเฟส) ตามจุดที่ได้กำหนดตำแหน่งวัด ปัจจุบัน โปรแกรม ME'ScopeVES แสดงค่าขนาดการสันในตำแหน่งที่ไม่ได้วัดด้วยการประมาณค่าเฉลี่ยระหว่างจุดในการแสดงรูปร่างการสันสะท้อน ซึ่งการประมวลผลด้วยวิธีดังกล่าวทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของขนาดการสันสะท้อนในตำแหน่งที่ไม่สามารถติดตั้งอุปกรณ์วัดได้ในงานวิจัยนี้ นำเสนอผลการวิเคราะห์รูปร่างการสันขณะปฏิบัติงานของการโค้งตัวของเพลลาขณะเพลลาหมุน โดยใช้ทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดี้เป็นตัววัดสัญญาณการสันสะท้อน เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานที่ใช้ปัจจุบันการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเทคนิคการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ขั้นตอนวิธีพันธุกรรม (Genetic algorithm) โดยสามารถสรุปผลงานวิจัยและขั้นตอนการศึกษาได้ดังนี้ที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที

1. ได้ออกแบบเครื่องมือทดสอบเพื่อใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย เพลาตรงรองรับด้วยแบร็งก์ทั้งสองด้าน ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 350 วัตต์ ที่มีระบบควบคุมความเร็วรอบแบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ ในช่วงความเร็วรอบระหว่าง 1,200-1,600 รอบต่อนาที
2. ได้ทดสอบหาความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างของเครื่องมือทดสอบด้วยวิธีการทดสอบโมดอล และการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม SolidWorks
3. ได้วัดสัญญาณการสันสะท้อนของเพลลาด้วยทรานสดิวเซอร์กระแสเอ็ดดี้ในทิศทางแนวนอน (Horizontal) ที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที จำนวน 3 ตำแหน่ง ตลอดความยาวเพลลา
4. ใช้เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานในการประมวลผลสัญญาณการสันสะท้อนเพื่อสร้างการเคลื่อนไหวของเพลลาขณะหมุนที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที ด้วยโปรแกรม ME'ScopeVES ได้ และสามารถระบุขนาดการสันสะท้อนในจุดที่ไม่ได้ทำการวัดได้ด้วยการ ประมาณค่าเฉลี่ยระหว่างจุดพบว่าผลจากการประมวลผลขนาดการสันสะท้อนในตำแหน่งที่ไม่ได้วัดมีความคลาดเคลื่อนของขนาดการสันสะท้อนสูงที่สุดที่ตำแหน่ง P1 เท่ากับ 24.553% และที่ตำแหน่ง P3 เท่ากับ 31.625%

5. ใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นของเพลาในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบการสั่นสะเทือน แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

1) เพื่อประมาณค่ามวลและสปริงของระบบ Model A ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม โดยพิจารณาความถี่ธรรมชาติของเครื่องมือทดสอบที่ได้จากการทดสอบ โมดอลเป็นค่าอ้างอิงในการค้นหาค่าของพารามิเตอร์มีความคลาดเคลื่อนของความถี่ธรรมชาติโหมด 1 เท่ากับ 0.028% โหมด 2 เท่ากับ 0.002% และโหมด 3 เท่ากับ 1.906%

2) เพื่อประมวลผลขนาดการสั่นสะเทือนของเพลาผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยเครื่องมือ Parameter estimation โดยใช้ค่ามวลและสปริงที่ได้จากขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยขั้นตอนวิธีพันธุกรรม โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

- Model A พบว่า ผลจากการประมวลผลขนาดการสั่นสะเทือนใน มีความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดในตำแหน่ง P1 เท่ากับ 5.147% ตำแหน่ง P2 เท่ากับ 1.507% และตำแหน่ง P3 เท่ากับ 4.630%

- Model B พบว่า ผลจากการประมวลผลขนาดการสั่นสะเทือนใน มีความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดในตำแหน่ง P1 เท่ากับ 1.726% ตำแหน่ง P2 เท่ากับ 2.009% และตำแหน่ง P3 เท่ากับ 1.912%

6. จากการศึกษาสามารถสรุปลักษณะการใช้งานของแต่ละเทคนิคได้ดังนี้

1) เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานด้วยโปรแกรม ME'ScopeVES เป็นเทคนิคเพื่อใช้แสดงรูปร่างของโครงสร้างที่เปลี่ยนไปขณะใช้งานที่ความเร็วรอบใด ๆ โดยใช้หลักการประมาณค่าเฉลี่ยระหว่างจุดเพื่อส่งผ่านขนาดการสั่นสะเทือนจากจุดที่วัดได้ไปยังจุดอื่น ๆ ข้างเคียงสามารถให้ภาพเคลื่อนไหวของโครงสร้างขณะปฏิบัติงานได้ และยังคงเกิดความคลาดเคลื่อนของขนาดการสั่นสะเทือนในตำแหน่งที่ไม่ได้วัด

2) เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นของเพลาเป็นเทคนิคที่ประมวลผลข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้แบบจำลองที่ประกอบด้วย มวล สปริง และตัวหน่วงในการอธิบายพฤติกรรมแบบพลวัตของเพลา โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 Model A สามารถให้ผลลัพธ์ขนาดการสั่นสะเทือนที่มีความแม่นยำมาก แต่ยังมีลักษณะการเคลื่อนไหวที่ไม่สมจริงมากนัก ส่วนที่ 2 Model B สามารถให้ผลลัพธ์ขนาดการสั่นสะเทือนมีความแม่นยำมาก และมีลักษณะการสั่นสะเทือนสัมพันธ์กับลักษณะการสั่นสะเทือนจริง

3) วิถีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถประมาณความถี่ธรรมชาติของระบบไม่สามารถใช้วิเคราะห์ในย่านความถี่การใช้งานหรือความถี่อื่น ๆ ได้ และเหมาะสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างที่มี

ความซับซ้อนไม่มาก เนื่องจากการใช้งานวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องคำนึงถึง 3 ส่วน คือ ขนาดของชิ้นส่วนหรือโครงสร้าง (Dimension) คุณสมบัติทางกลของวัสดุ (Material properties) และเงื่อนไขขอบเขตในการจับยึด (Boundary condition) หากกำหนดข้อมูลเหล่านี้ไม่สัมพันธ์กับความเป็นจริงหรือไม่ถูกต้องจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่ความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความคลาดเคลื่อนได้

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานในการประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือนมีความคลาดเคลื่อนของขนาดการโก่งตัวของเพลาลงที่สุดที่ตำแหน่ง P1 เท่ากับ 24.553% และที่ตำแหน่ง P3 เท่ากับ 31.625% ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือน จากนั้นจึงนำผลลัพธ์จากการใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ไปสร้างการเคลื่อนที่ของเพลาลงขณะหมุนที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที และสามารถลดความคลาดเคลื่อนของขนาดการโก่งตัวของเพลาลงได้ โดย Model A มีความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดในตำแหน่ง P1 เท่ากับ 5.147% ตำแหน่ง P2 เท่ากับ 1.507% และตำแหน่ง P3 เท่ากับ 4.630% และ Model B A มีความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดในตำแหน่ง P1 เท่ากับ 1.726% ตำแหน่ง P2 เท่ากับ 2.009% และตำแหน่ง P3 เท่ากับ 1.912%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพิ่มจุดวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการใช้งานเทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงาน
2. เพื่อจำนวนองศาอิสระของระบบการสั่นสะเทือน เพื่อเพิ่มความแม่นยำให้เทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการสั่นสะเทือน
3. ควบคุมความเร็วรอบของเครื่องจักรให้คงที่มากยิ่งขึ้น เพื่อความแม่นยำในการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน เมื่อการวัดมีความแม่นยำการนำมาประมวลผลด้วย เทคนิครูปร่างเบี่ยงเบนขณะปฏิบัติงานหรือเทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการสั่นสะเทือนก็จะมี ความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- จิระพล ศรีเสวีรัฐผล (2554). **Mechanical Vibrations**, เอกสารประกอบการเรียนรายวิชา 425304 และ 525307, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 450 หน้า.
- Adams, M.L., Jr. (2005). **Rotating Machinery Vibration: from Analysis to Trouble Shooting**, <http://www.dekker.com>.
- Chieu Chau (2008). Analysis and Solution for an Overhung Fan with Rolling Element Bearings. **Publication of American Control Conference 1993**. pp.2005-2206. June 2-4, 1993. San Francisco, CA, U.S.A.
- Gerald Chandrashekar, Winston Raj, Charles Godwin, P. Sam Paul (2018). Study on The Influence of Shaft Material on Vibration in Rotating Machinery. **International Conference on Materials Manufacturing and Modelling (ICMMM - 2017)**. pp.12071-12076.
- Jose Gonzales, Laura Delgado, Jesus M Fernandez Oro, Sandra Velarde-Sua rez, Katia Ma Arguelles and David Rodriguez (2017). Purified orbit diagram and numerical study for a failure analysis of a Sirocco fan. **Advance in Mechanical Engineering (2017)**. Vol.9(11) 1-17. June 24, 2017.
- M. Shahgholi, S.E. Khadem, S. Bab (2014). Free vibration analysis of a nonlinear slender rotating shaft with simply supported conditions. **Mechanism and Machine Theory 82 (2014)**. pp.128-140. September 6, 2014.
- R. Sino, T.N. Baranger, E. Chatelet, G. Jacquet. (2007). Dynamic analysis of rotating composite shaft. **Composites Science and Technology 68 (2007)**. pp.337-345. June 21, 2007.
- S.A.A Hosseini, S.E. Khadem (2007). Vibration and reliability of a rotating beam with random properties under random excitation. **International Journal of Mechanical Science 49 (2007)**. pp.1977-1388. May 4, 2007.
- Singiresu S. Rao, Yap Fook Fah (2005). **Mechanical Vibration SI Edition**. Pearson Education South Asia. pp.1078.

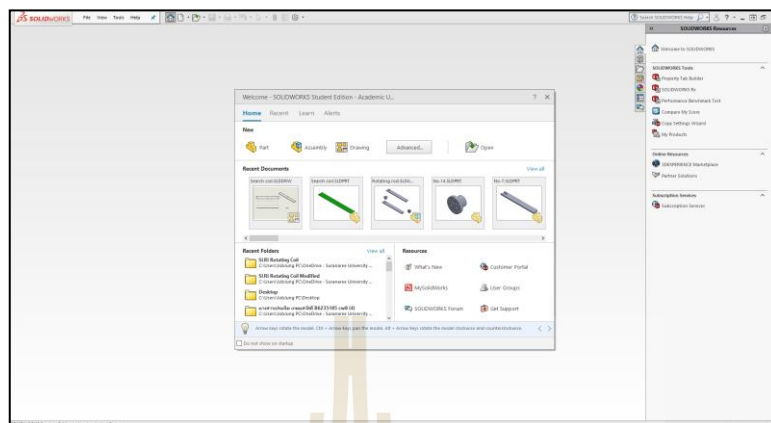


ภาคผนวก ก

การใช้โปรแกรม SolidWorks เพื่อหาความถี่ธรรมชาติ

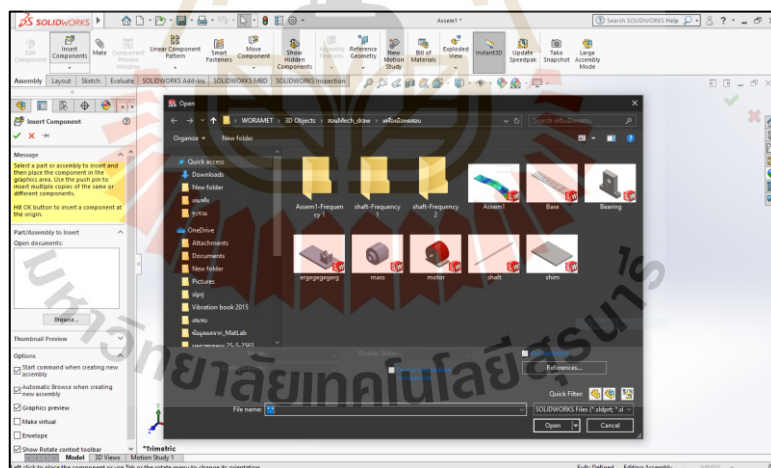
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- โปรแกรม SolidWorks

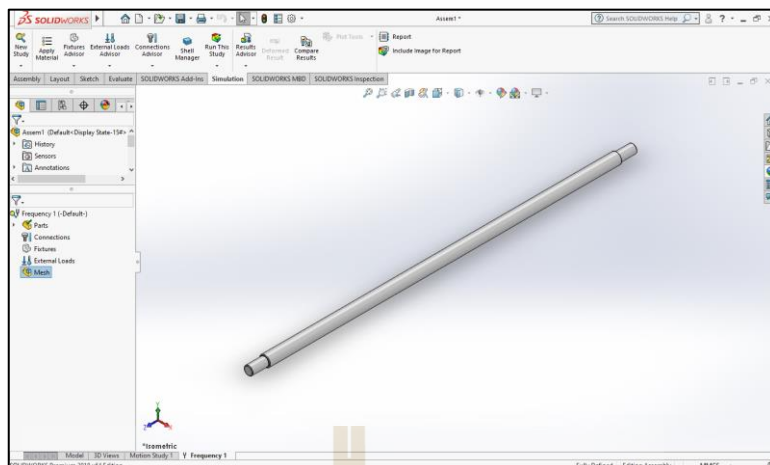


รูปที่ ก.1 โปรแกรม SolidWorks

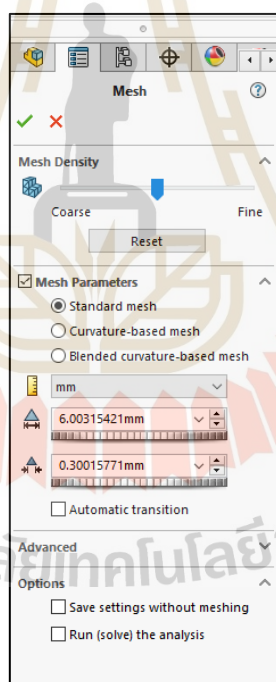
- นำโครงสร้างหรือชิ้นงานเข้าสู่โปรแกรมด้วยคำสั่ง Insert component



รูปที่ ก.2 การนำชิ้นงานเข้าสู่โปรแกรม SolidWorks



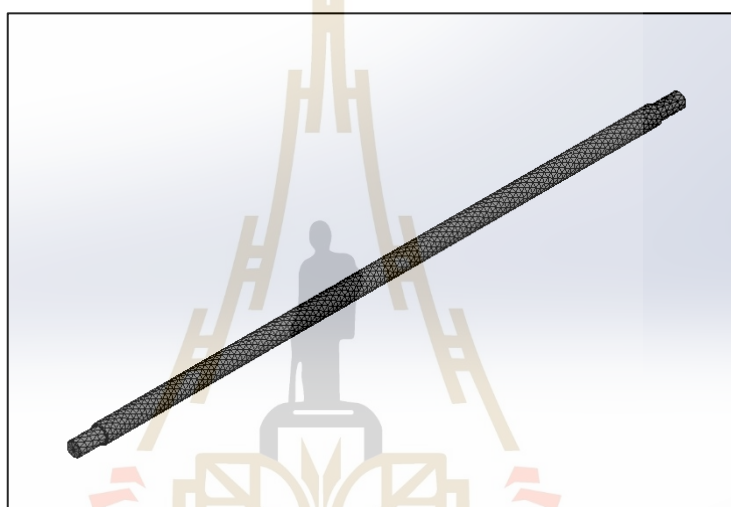
รูปที่ ก.3 ชิ้นงานเมื่ออยู่ใน โปรแกรม SolidWorks



รูปที่ ก.4 การกำหนดขนาดเมช

- ขั้นตอนการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติ
 - กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material properties)
 - กำหนดเงื่อนไขการยึดจับของชิ้นงาน (Boundary condition)

- กำหนดขนาดของเมช (Mesh) ให้เหมาะสม เพื่อให้การประมาณค่าความถี่ธรรมชาติมีความแม่นยำ โดยต้องกำหนด ขนาดเมชที่ใหญ่ที่สุด ขนาดเมชที่เล็กที่สุด และจำนวนเมชบริเวณรอบวงกลม ดังแสดงในรูปที่ ก.4
- สร้างเมชเพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ ก.5
- เริ่มการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติด้วยโปรแกรม SolidWorks
- สิ้นสุดการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติ โปรแกรมจะสามารถบอกถึง ความถี่ธรรมชาติของชิ้นงานและรูปร่างการสั่นสะเทือนที่ความถี่ธรรมชาติใด ๆ ของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.5 การสร้างเมชที่ชิ้นงาน



รูปที่ ก.6 ผลลัพธ์จากการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติด้วยโปรแกรม SolidW

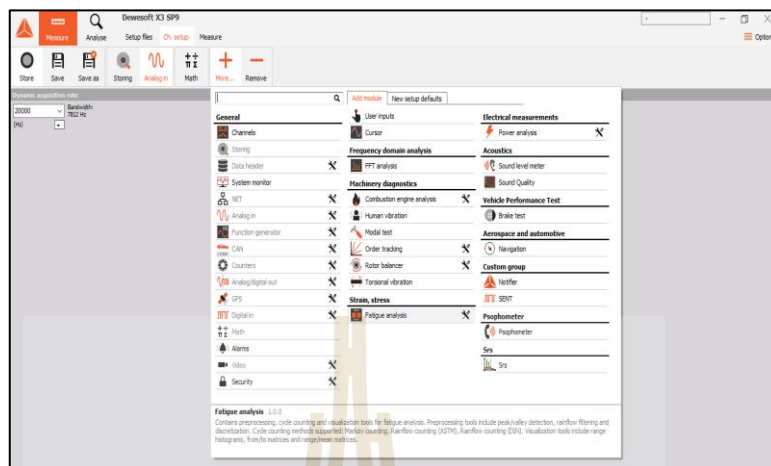
The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, stylized emblem. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular base with a scalloped edge. Above the figure are several vertical lines of varying heights, resembling a stylized 'H' or a traditional architectural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

ภาคผนวก ข

การใช้โปรแกรม DEWESOFT ในการทดสอบโมดอล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- โปรแกรม DEWESOFT X3

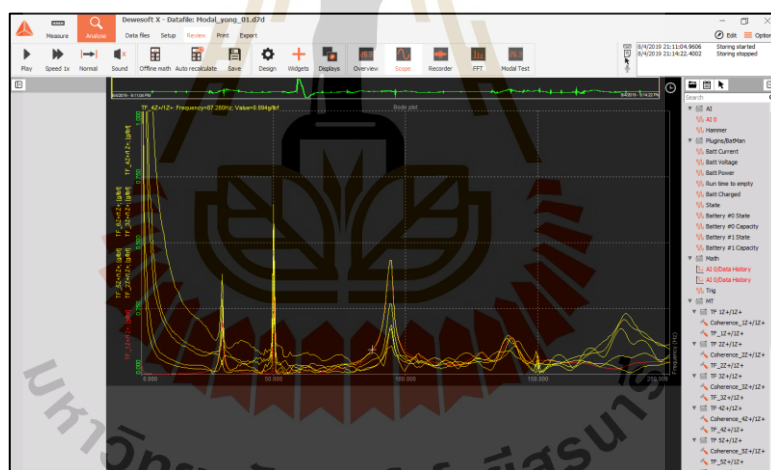


รูปที่ ข.1 โปรแกรม DEWESOFT X3



รูปที่ ข.2 ตำแหน่งการเกาะและติดตั้งทรานสดิวเซอร์

- ขั้นตอนการประมาณค่าความถี่ธรรมชาติด้วยการทดสอบ โมดอล
 - ติดตั้งค้อนและทรานสดิวเซอร์ความเร่งเข้ากับเครื่องเก็บสัญญาณการสั่นสะเทือน
 - ตั้งค่าข้อมูลทางเทคนิคของค้อนและทรานสดิวเซอร์ความเร่งที่ตามทีผู้ผลิตระบุ
 - ติดตั้งทรานสดิวเซอร์ความเร่งไว้ที่ตำแหน่งจุดสี่แดงตำแหน่งที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ ข.2
 - จากนั้นเคาะด้วยค้อนที่ตำแหน่งจุดสี่เขียวให้ครบตามจำนวนที่ตั้ง Averaging เอาไว้
 - จากนั้นถือว่าการเก็บผลการสัญญาณการสั่นสะเทือนแล้วเสร็จแล้ว 1 จุด ทำการเปลี่ยนตำแหน่งทรานสดิวเซอร์ความเร่งไปตำแหน่งจุดสี่แดง ตำแหน่งที่ 2
 - ทำการเคาะที่ตำแหน่งจุดสี่เขียวให้ครบตาม Averaging ที่ตั้งไว้ จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งของทรานสดิวเซอร์ความเร่งไปตำแหน่งอื่นตามที่วางแผนไว้ และเคาะที่ตำแหน่งจุดสี่เขียวให้ครบ
- ใช้คำสั่งการสร้างกราฟ 2D graph เพื่อแสดงผลการทดสอบหาความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างด้วยการทดสอบโมดอล ดังแสดงในรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 ผลลัพธ์จากการทดสอบความถี่ธรรมชาติด้วยการทดสอบโมดอล

ประวัติผู้เขียน

นายวรมช ทองตัน เกิดเมื่อวันที่ 19 สิงหาคม พ.ศ. 2538 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา, ประเทศไทย เริ่มการศึกษาในระดับอนุบาลศึกษาตลอดจนสำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลนครราชสีมา, ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2561 และได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ขณะศึกษาได้ปฏิบัติงานเป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลจำนวน 5 รายวิชา ได้แก่

- (1) ปฏิบัติการระบบควบคุมและอัตโนมัติ
- (2) ปฏิบัติการกรรมวิธีการผลิตสำหรับวิศวกรเครื่องกล
- (3) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1
- (4) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 2
- (5) เขียนแบบทางกล

เป็นระยะเวลา 2 ปี ขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้นำเสนอผลงานวิชาการจำนวน 1 เรื่อง ในการประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ 2019 International Conference on Mechanical, Electronic and Robotics Engineering (MERE 2019) November 9th-11th, 2019 Wuhan, China

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี