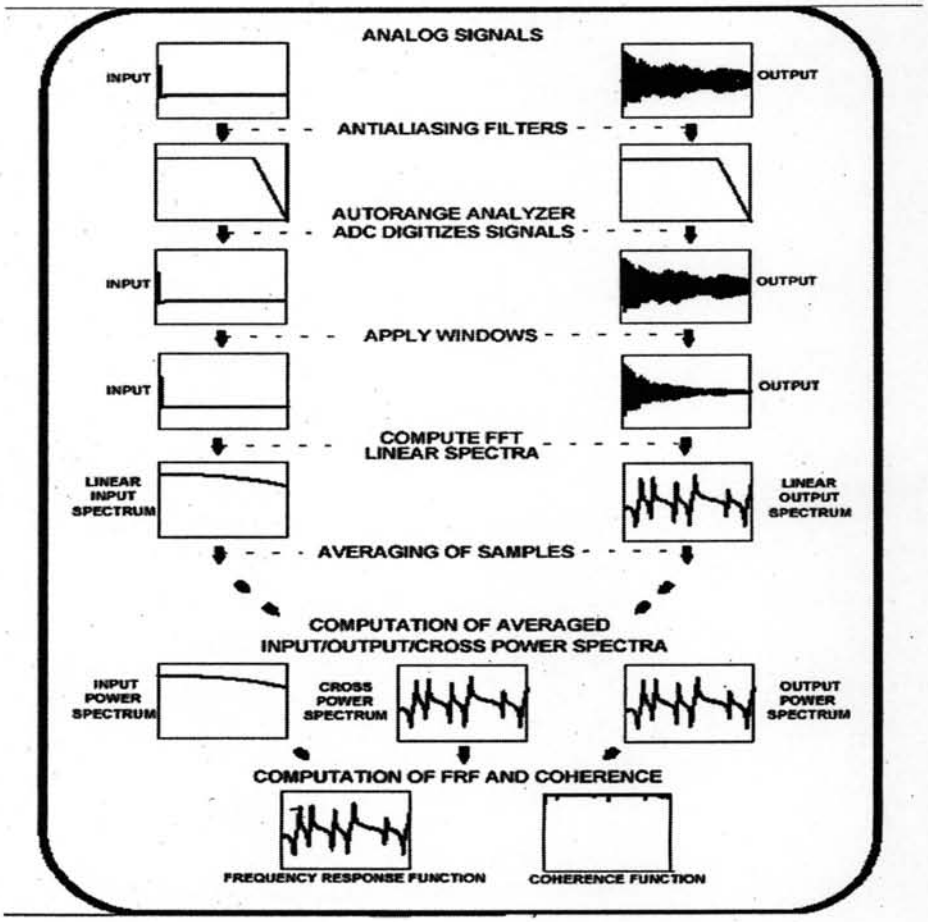
บทที่ 4
การทดสอบโมดัล (Modal testing) ในระบบการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์

4.1 วิธีการทดสอบและตั้งค่า

การทดสอบจะใช้วิธีที่เรียกว่า Impact test โดยใช้แรงกระตุ้นจากการกระแทก (Impact excitation) ซึ่งเป็น Transient energy transfer ทำให้ได้สเปกตรัมที่ต่อเนื่องโดยมี Maximum amplitude ที่ 0 Hz เปรียบเสมือนเกิดการกระตุ้นขึ้นตลอดในช่วงความถี่ที่ต้องการ สามารถแสดงขั้นตอนการทำงานในภาพรวมได้ดังรูปที่ 4.1 ข้อได้เปรียบของการทดสอบรูปแบบนี้คือ สามารถทดสอบได้อย่างรวดเร็วโดยใช้การเคาะโครงสร้างทดสอบเพียงไม่กี่ครั้ง การติดตั้งไม่ซับซ้อนและพกพาได้สะดวก



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดง Impact test flow diagram [10]

4.1.1 **อุปกรณ์ในการทดสอบ (Measuring equipment)**

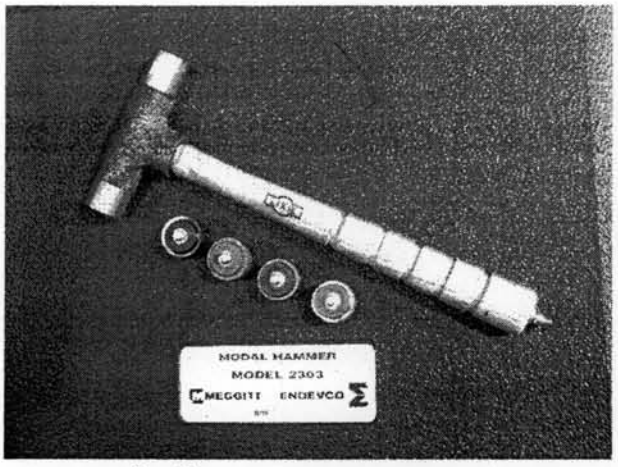
- เครื่องยนต์ทดสอบ

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบใช้เครื่องยนต์ของ มิตซูบิชิ โมเดลของเครื่องคือ G 32B AW5841 เครื่องยนต์เบนซิน OHC. 4 สูบแถวเรียง ระบบจ่ายเชื้อเพลิงแบบคาร์บูเรเตอร์ ปริมาตรกระบอกสูบ 1597 cc. แรงม้าสูงสุด 100 แรงม้า

- The impact hammer

รูปแบบการทดสอบที่ใช้ในการศึกษาคือการใช้แรงกระตุ้นจากค้อนด้วยการกระแทก (Impact excitation) บนโครงสร้างทางกลที่สนใจ โดยในการเคาะแต่ละครั้งจะต้องพิจารณาถึงขนาด (ความสูง) และช่วงเวลา (ความกว้าง) ของสัญญาณกระตุ้น รูปแบบกระแทกก็จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของค้อนได้แก่ น้ำหนักของตัวค้อนและความแข็งของหัวค้อน (ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ทำซึ่งเป็น เหล็ก พลาสติก หรือยาง)

อุปกรณ์ในการเคาะนี้เรียกว่า Impact hammers ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือตัวหยั่งสัญญาณแรงกระทำ (Force Transducer) เป็นวัสดุประเภทปิโซอิเลกทริก รูปต่อไปนี้แสดงค้อนที่ใช้ในการศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์



รูปที่ 4.2 Impact hammer สำหรับการทดสอบของ ENDEVCO Model 2303

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเฉพาะของ Impact hammer

Maximum force	**35.5**	**kN**
Resonance frequency	**50**	**kHz**
Frequency range (Max)	**10**	**kHz**
Head weight	**454**	**grams**
Impact diameter	**2.5**	**cm.**
Overall length	**30**	**cm.**
Sensor sensitivity	**0.227**	**mV/N**

- ตัวหยั่งสัญญาณความเร่ง (Accelerometer)

ตัวหยั่งสัญญาณความเร่ง (Accelerometers) มีหลายชนิดให้เลือกใช้งานตามช่วงความถี่ทำงานของระบบ สำหรับในการทดสอบเลือกใช้คุณสมบัติของตัวหยั่งสัญญาณความเร่งตามตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นคุณสมบัติทั่วไปตามท้องตลาดและมีช่วงการใช้งานค่อนข้างกว้าง

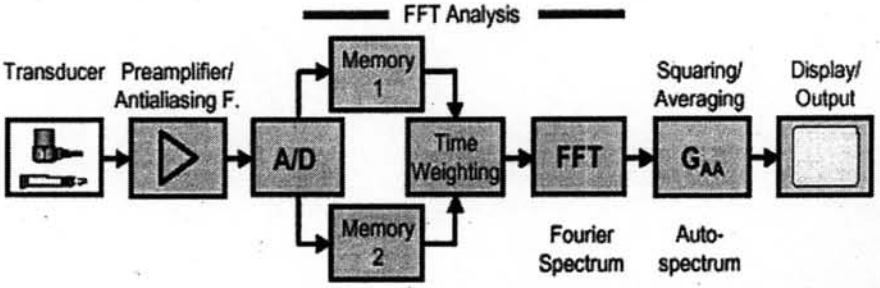
รูปที่ 4.3 Accelerometer ของ Brüel & Kjær

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเฉพาะของ Accelerometers Type 4508 B 001

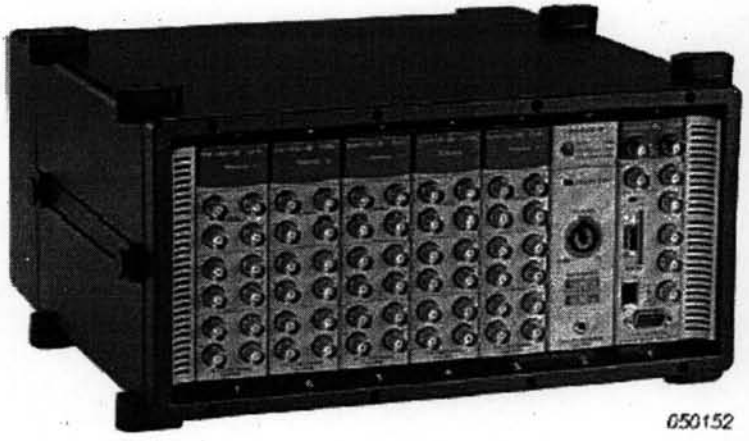
Sensitivity	**0.976 mV/ms^{-2}**
Frequency range	
Amplitude	**0.1 Hz -8 kHz**
Phase	**0.5 Hz – 5 kHz**
Case material	**Titanium ASTM Grade 2**
Sensing element	**Piezoelectric , Type Pz 23**
Weight	**4.8 grams**

- The dynamic signal analyzer

มีการพัฒนาระบบเพื่อที่จะทำให้มีการทดสอบไปอย่างรวดเร็วโดยมีการใช้อุปกรณ์ใหม่ ๆ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ระบบ ทำให้สามารถทำงานได้ง่ายมากขึ้น เครื่องมือนี้คือเครื่องวิเคราะห์ความถี่แบบ FFT โดยมีรูปแบบของระบบของอุปกรณ์อธิบายได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ความถี่แบบ FFT [17]



รูปที่ 4.5 เครื่องวิเคราะห์ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ Model 3560D

สำหรับเครื่องวิเคราะห์ความถี่หรือเรียกว่า "Pulse-Multi analyzer" ของ Brüel & Kjær มีระดับความสามารถในการใช้ช่องสัญญาณได้มากสูงสุดถึง 18 ช่องสัญญาณ สำหรับในการทดสอบนี้จะใช้เพียง 6 ช่อง สัญญาณอินท์พุทโดยจะใช้ตามระดับขั้นเสรีตามสมมุติฐาน โดยเครื่องวิเคราะห์จะรับสัญญาณของแรงกระตุ้นที่เกิดขึ้นเป็นอินท์พุทและได้เอาท์พุทคือความเร่งจากตัวหยั่งสัญญาณซึ่งอยู่ในรูปของโดเมนเวลาให้เป็นฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่

4.1.2 จุดติดตั้งการทดสอบ (The measurement point)

ในการพิจารณาเพื่อเลือกจุดติดตั้งตัวหยั่งสัญญาณความเร่ง (Accelerometers) สำหรับตรวจวัดจะต้องมีการตอบสนองเพียงพอและครอบคลุมที่จะสามารถแสดงถึงรูปร่างการสั่นที่สนใจสอดคล้องกับโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ นั่นคือจะต้องแสดงถึง 6 ระดับขั้นเสรีที่เกิดขึ้นบนเครื่องยนต์

4.1.1 อุปกรณ์ในการทดสอบ (Measuring equipment)

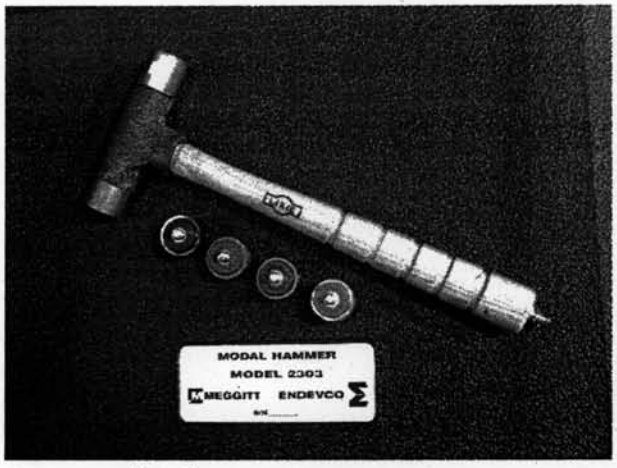
- เครื่องยนต์ทดสอบ

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบใช้เครื่องยนต์ของ มิตซูบิชิ โมเดลของเครื่องคือ G 32B AW5841 เครื่องยนต์เบนซิน OHC. 4 สูบแถวเรียง ระบบจ่ายเชื้อเพลิงแบบคาร์บูเรเตอร์ ปริมาตรกระบอกสูบ 1597 cc. แรงม้าสูงสุด 100 แรงม้า

- The impact hammer

รูปแบบการทดสอบที่ใช้ในการศึกษาคือการใช้แรงกระตุ้นจากค้อนด้วยการกระแทก (Impact excitation) บนโครงสร้างทางกลที่สนใจ โดยในการเคาะแต่ละครั้งจะต้องพิจารณาถึงขนาด (ความสูง) และช่วงเวลา (ความกว้าง) ของสัญญาณกระตุ้น รูปแบบกระแทกก็จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของค้อนได้แก่ น้ำหนักของตัวค้อนและความแข็งของหัวค้อน (ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ทำซึ่งเป็น เหล็ก พลาสติก หรือยาง)

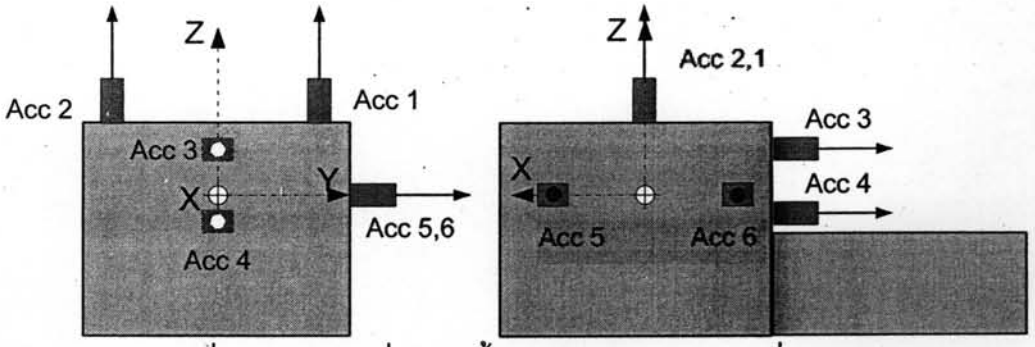
อุปกรณ์ในการเคาะนี้เรียกว่า Impact hammers ซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือตัวหยั่งสัญญาณแรงกระทำ (Force Transducer) เป็นวัสดุประเภทปิโซอิเลกทริก รูปต่อไปนี้แสดงค้อนที่ใช้ในการศึกษาการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์



รูปที่ 4.2 Impact hammer สำหรับการทดสอบของ ENDEVCO Model 2303

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเฉพาะของ Impact hammer

Maximum force	**35.5**	**kN**
Resonance frequency	**50**	**kHz**
Frequency range (Max)	**10**	**kHz**
Head weight	**454**	**grams**
Impact diameter	**2.5**	**cm.**
Overall length	**30**	**cm.**
Sensor sensitivity	**0.227**	**mV/N**



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งที่ควรติดตั้ง Accelerometer บนเครื่องยนต์

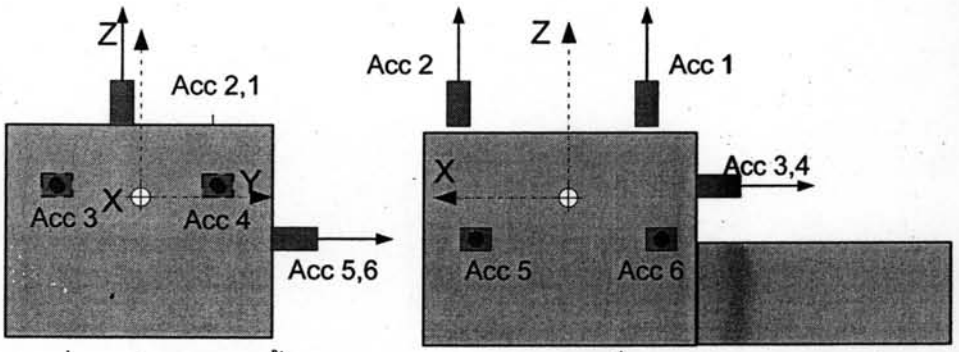
จากรูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งที่ควรติดตั้งของ Accelerometer โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ Acc มีรายละเอียดดังนี้

Acc 1 และ 2 เป็นจุดติดตั้งสำหรับการวัดสัญญาณของ Bounce และ Roll

Acc 3 และ 4 เป็นจุดติดตั้งสำหรับการวัดสัญญาณของ Longitudinal และ Pitch

Acc 5 และ 6 เป็นจุดติดตั้งสำหรับการวัดสัญญาณของ Lateral และ Yaw

เมื่อทดสอบพบว่าตำแหน่งติดตั้งดังกล่าวไม่สามารถแสดงถึงสัญญาณของรูปร่างของการสั่นที่ได้ชัดเจน ทำให้ยากต่อการวิเคราะห์จึงต้องขยับจุดติดตั้งออกไปแล้ววัดสัญญาณที่เกิดขึ้นอีกครั้ง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งติดตั้งของ Accelerometer บนเครื่องยนต์สำหรับทดสอบใหม่

Acc 1 และ 2 เป็นจุดติดตั้งสำหรับการวัดสัญญาณของ Bounce Pitch และ Roll

Acc 3 และ 4 เป็นจุดติดตั้งสำหรับการวัดสัญญาณของ Longitudinal และ Yaw

Acc 5 และ 6 เป็นจุดติดตั้งสำหรับการวัดสัญญาณของ Lateral Yaw และ Roll

4.1.3 วิธีการทดสอบ[16]

1) ติดตั้ง Accelerometer ตามตำแหน่งที่กำหนดทั้งหมด 6 จุด

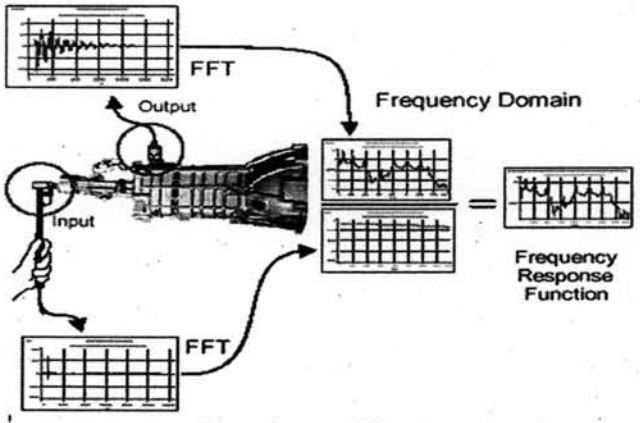
2) ตั้งค่า Pulse-Multi analyzer เหมาะสมกับการทดสอบตามฟังก์ชันการใช้งานดังนี้

- **Frequency range** เป็นการเลือกความกว้างของช่วงความถี่ที่สนใจสำหรับการทดสอบ โดยจะพิจารณาในเฉพาะความถี่ที่น่าจะเกิดรูปร่างการสั่นที่สำคัญ ทำให้สามารถทำให้เก็บค่าที่ละเอียดขึ้นโดยใช้การประมวลผลที่ไม่มากเกินไป ความถี่ตั้งค่าไว้คือ 0-50 Hz และ N = 1600 lines

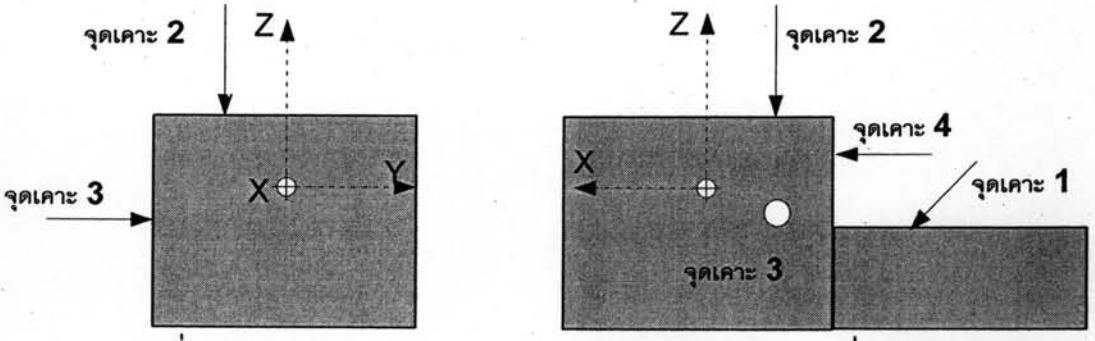
- **Triggering** คือการกำหนดกรอบการตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้นหลังจากการกระตุ้นและตัวสัญญาณการกระตุ้น จะทำการตั้งค่าทั้ง ได้แก่ Level เป็นการกำหนดค่าสูงสุดของการกระแทกซึ่งเป็นค่า Amplitude สูงสุดของสัญญาณในการกระแทกแต่ละครั้งที่ทำให้เกิดผลการตอบสนองในการทดสอบจริง การใช้ Pre-trigger delay เป็นการตั้งค่าเพื่อที่จะทำให้เครื่องตรวจจับสัญญาณก่อนการทดสอบเพื่อที่จะทำให้สามารถตรวจจับสัญญาณได้ทั้งหมด ในการทดสอบจะตั้งค่าไว้ที่ประมาณ -5%

- **Average** สามารถลดค่าความผิดพลาดแบบสุ่มที่เกิดจากผู้ทดสอบ การเฉลี่ยจะสามารถปรับปรุงผลการทดสอบเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการวัด ค่าเฉลี่ยจะเป็นเชิงเส้นโดยในการทดสอบจะกำหนดที่ Average ที่ 10 ครั้ง โดยตั้ง Overload reject เข้าไปด้วย

3) ทำการเคาะเครื่องยนต์ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามลักษณะการกระตุ้นเพื่อให้เกิดผลการตอบสนองตามต้องการ



รูปที่ 4.8 การทดสอบโมดัลโดยการใช้ Impact hammer



รูปที่ 4.9 การใช้ Impact hammer เคาะในตำแหน่งต่างๆบนเครื่องยนต์

จุดเคาะ 1 เคาะเพื่อให้มีการแสดงสัญญาณของการสั่นสะเทือนโดยไม่เน้นรูปแบบการสั่นเฉพาะ

จุดเคาะ 2 เคาะเพื่อให้มีการแสดงสัญญาณของการสั่นสะเทือนใน Bounce Pitch และ Roll

จุดเคาะ 3 เคาะเพื่อให้มีการแสดงสัญญาณของการสั่นสะเทือนใน Lateral Yaw และ Roll

จุดเคาะ 4 เคาะเพื่อให้มีการแสดงสัญญาณของการสั่นสะเทือนใน Longitudinal และ Yaw

4.2 การหาค่าตัวแปรโมดัล (Modal parameter estimation method)

สมมติฐานเบื้องต้นคือเครื่องยนต์มีแบบจำลองเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body model) โดยมีรูปแบบการเคลื่อนที่ (Number of modes) 6 แบบคือ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1 ระบบจะมีพฤติกรรมเป็น Rigid mass บน Flexible mounting ทำให้สอดคล้องกับการสั่นของเครื่องยนต์ที่มีรูปร่างการสั่นของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body mode) ผลของการทดสอบพบว่าค่าอัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio) มีค่าต่ำ (Lightly damp, <10%) มีเทคนิคที่สามารถหาค่าของตัวแปรโมดัลได้จากผลการทดสอบจากส่วนของ Frequency domain ใน FRFs เรียกว่า *Quadrature* สามารถได้ดังนี้ [10]

1) การหาค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของระบบสามารถพิจารณาได้จากหนึ่งในเงื่อนไขต่อไปนี้หรือประกอบกัน

- พิจารณาตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเฟส +/- 90^0
- พิจารณาที่ตำแหน่งค่าสูงสุดของผลตอบสนองในส่วน Imaginary
- พิจารณาที่ตำแหน่งศูนย์ของผลตอบสนองในส่วน Real

2) การหาค่าอัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio) สามารถทำได้โดยใช้กราฟของ FRFs ในการแสดงผลของ Magnitude แล้วหารด้วย Square root $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}|H(\omega)|\right)$ หาตำแหน่งของความถี่ที่ปรากฏช่วงนั้นซึ่งจะมี 2 ค่านั่นคือค่าก่อนความถี่ธรรมชาติและค่าหลังความถี่ธรรมชาติตำแหน่งนั้นเรียกว่า Half power point ทำให้สามารถหาค่าอัตราส่วนการหน่วงได้โดยใช้สมการเดียวกับสมการที่ (4.25)

4) การรูปร่างการสั่น (Mode Shape) ทำได้โดยการอ่านค่าผลตอบสนองสูงสุดที่ได้จากส่วนของจินตภาพของกราฟในฟังก์ชันตอบสนองเชิงความถี่ที่ตำแหน่งของค่าความถี่ธรรมชาติ

4.3 การหาแรงที่กระทำบนจุดรองรับเครื่องยนต์

สำหรับการหาค่าแรงจากเครื่องยนต์ไปยังฐานแท่นเครื่องสามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความถี่หรือเรียกว่า "Pulse-Multi analyzer" บันทึกข้อมูลขณะที่เครื่องยนต์ทำงานรอบต่าง ๆ โดยทดสอบที่ 600 ถึง 1200 รอบต่อนาที ทำการทดสอบวัดสัญญาณเบื้องต้นพบว่ารอบการทำงานของเครื่องยนต์มีผลต่อลักษณะของแรงจากเครื่องยนต์ไปกระทำต่อฐานแท่นเครื่อง ในการทดสอบจะเก็บข้อมูลเป็นระยะกระจัดและความเร็วที่แท่นเครื่องตำแหน่งต่าง ๆ โดยติดตั้งตัวหยั่งสัญญาณความเร่ง ผลการทดสอบแสดงเป็นสเปกตรัมของปริมาณที่ความถี่ใด ๆ ซึ่งจะมีสอดคล้องกับรอบการทำงานของเครื่องยนต์