

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในเนื้อหาของบทนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของตลับลูกปืน การสันสะเทือนและการวิเคราะห์สัญญาณ การศึกษาตัวแปลที่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของตลับลูกปืน การใช้สัญญาณ Demodulation Enveloping วิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืน รวมทั้งทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องด้วย

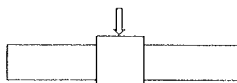
#### 2.1 ตลับลูกปืน [4]

ตลับลูกปืน ( Bearing ) เป็นอุปกรณ์ซึ่งช่วยในการค้ำจุนแกนที่มีการหมุน หรืออีกลักษณะหนึ่งเป็นตัวค้ำจุนการเลื่อนไปมาระหว่างชิ้นงานสองชิ้น นอกจากหน้าที่ในการค้ำจุนแล้ว ตลับลูกปืนยังถูกออกแบบให้มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างส่วนประกอบที่แยกกันเป็น 2 ชั้น ให้ปรากฏว่าเกิดความต้านทานฝืดระหว่างผิวงานทั้งสองน้อยที่สุด กลไกส่วนใหญ่ด้านงานอุตสาหกรรมยังคงมีส่วนซึ่งต้องการความสัมพัทธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่างผิวหน้าสัมผัส พิจารณาตามแรงที่ตลับลูกปืนรับแรงจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

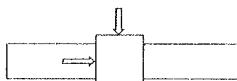
1. แบริ่งรับแรงในแนวรัศมี ( Radial ) ดังแสดงในรูป 5 ก
2. แบริ่งรับแรงในแนวแกน ( Axial ) ดังแสดงในรูป 5 ข
3. แบริ่งรับแรงในแนวรัศมีและแนวแกน ( Combination ) ดังแสดงในรูป 5 ค



(ก) รับแรงตามแนวแกน



(ข) รับแรงตามแนวรัศมี



(ค) รับแรงตามแนวแกนและแนวรัศมี

รูปที่ 5 แสดงลักษณะการรับแรงของตลับลูกปืน

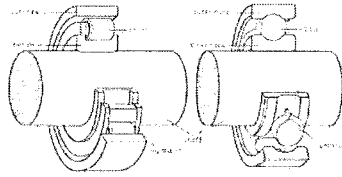
โดยหลักสำคัญแล้วตลับลูกปืนแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท คือ

1. ตลับลูกปืนกาบ ( Plain Bearing ) เป็นลักษณะของผิวหน้าส่วนประกอบชนิดหนึ่งที่เลื่อนไถลบนผิวหน้าของส่วนประกอบอีกชิ้นหนึ่ง ซึ่งระหว่างผิวหน้าที่สัมผัสกันนี้จะลดแรงเสียดทานและการสึกหรอในการใช้งาน



รูปที่ 6 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนกาบ

2. ตลับลูกปืนแบบลูกกลิ้ง ( Rolling Element Bearing ) ชุดลูกกลิ้งเป็นรูปทรงกระบอกหรือทรงกลมหลายๆขนาดประกอบอยู่ตรงกลางระหว่างผิวหน้าทั้งสอง เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ได้สะดวกระหว่างผิวงานทั้งสอง ตลับลูกปืนชนิดนี้บางครั้งเรียกว่าเป็นชนิดต่อต้านความเสียดทาน เพราะที่สัมผัสของตลับลูกปืนชนิดนี้มีน้อย จึงช่วยลดความต้านทานในการเคลื่อนที่



รูปที่ 7 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนแบบลูกกลิ้ง

3. เจอร์นัลแบร์ริง ( Journal Bearing ) เป็นตลับลูกปืนซึ่งใช้ค้ำจุนการหมุนของแกนเพลลาในการเคลื่อนที่แนวรัศมี



รูปที่ 8 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนแบบเจอร์นัล

4. แบร์ริงกันรุน ( Thrust Bearing ) เป็นตลับลูกปืนป้องกันการรุนของเพลลา



รูปที่ 9 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนแบบกันรุน

5. ลิเนียร์แบร์ริง ( Linear Bearing ) เป็นตลับลูกปืนใช้ค้ำจุนความสัมพันธการเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นส่วนในแนวเส้นตรง



รูปที่ 10 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนแบบลิเนียร์

## 2.2 การสันสะเทือนและการวิเคราะห์สัญญาณ [5]

ก่อนจะทำการวิเคราะห์การสันสะเทือนในเครื่องจักรกลนั้น จะต้องทำความเข้าใจรูปแบบของกราฟแสดงผลของการสันสะเทือนของเครื่องจักรก่อน ซึ่งถ้าไม่เข้าใจความหมายและความ

เป็นมาของกราฟแล้ว การที่จะทำการวิเคราะห์หาความเสียหายของเครื่องจักรก็จะเป็นไปได้ยากลำบาก ซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นไม่สามารถระบุปัญหาที่แท้จริงของเครื่องจักรได้ กราฟแสดงผลของการสั่นสะเทือนที่จะนำมาวิเคราะห์หาความเสียหายของเครื่องจักรกล ซึ่งจะประกอบด้วยกราฟโดเมนเวลา (Time Domain Plot) กราฟสเปกตรัม (Spectrum Plot) กราฟแนวโน้ม (Trend Plot) นอกจากกราฟแสดงผลแล้ว ยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญของการสั่นสะเทือน ซึ่งประกอบด้วยความถี่ (Frequency) ขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) มุมเฟส (Phase) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หลักของการสั่นสะเทือน เพื่อช่วยในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกล

### 2.2.1 การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

เครื่องจักรกลแบบหมุนทุกชนิดจะมีการสั่นสะเทือน และต้นเหตุของการสั่นสะเทือนก็คือปัญหาต่างๆ ในเครื่องจักรเอง เช่น การไม่สมดุล การเอียงแนวแกน การเอียงศูนย์ ความเสียหายในตลับลูกปืน ความเสียหายของชุดเฟือง แต่ละปัญหาในเครื่องจักรจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่แตกต่างกัน สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะแสดงส่วนประกอบของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ เราสามารถแบ่งช่วงความถี่บนโดเมนความถี่ออกเป็นสองช่วงกว้างๆ โดยที่แต่ละช่วงความถี่จะปรากฏสัญญาณการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนทางกลต่างชนิดกันดังนี้

ก. โดเมนความถี่ต่ำ (Low Frequency Domain) เป็นช่วงความถี่ต่ำกว่าฮาร์โมนิกอันดับที่สี่ถึงหกของความถี่รอบการหมุนของเพลลา สัญญาณนั้นจะบอกข้อมูลเกี่ยวกับการไม่สมดุล การเอียงแนวแกน เพลลาแอ่น (Bent Shaft) ความเสียหายในตลับลูกปืน (Bearing Damage) และการหลุดหลวมทางกล (Mechanical Looseness) สัญญาณการสั่นสะเทือนจากสาเหตุเหล่านี้ประกอบไปด้วยฮาร์โมนิกหรือซัพฮาร์โมนิกของความถี่การหมุนของเพลลาที่ประกอบกับชิ้นส่วนที่มีปัญหา

ข. โดเมนความถี่สูง (High Frequency Domain) เป็นช่วงความถี่สูง สัญญาณจะบอกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายในเฟือง (Gear Box) และความเสียหายในตลับลูกปืน สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองประกอบไปด้วยฮาร์โมนิกของความถี่การขบกันของเฟืองและแถบความถี่รอบข้าง ส่วนสัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนประกอบไปด้วย ความถี่ของแหวนใน ความถี่ของแหวนนอก ความถี่เม็ดลูกปืน และความถี่ธรรมชาติของตลับลูกปืนและโครงสร้าง เมื่อตรวจพบว่าการสั่นสะเทือนมีระดับสูงขึ้น และทราบว่ายู่ในช่วงพิกัดความถี่ใด ก็อาจจะวิเคราะห์และหาว่าความเสียหายเกิดจากอะไร แต่เนื่องจากความซับซ้อนของสัญญาณซึ่งอาจเกิดจากหลายๆ สาเหตุ ดังนั้นการวิเคราะห์ความถี่ด้วยสเปกตรัมอาจจะทำได้ลำบาก จึงต้องใช้วิธีการอื่นๆ เข้ามาช่วยในการบ่งชี้สาเหตุของความผิดปกตินั้นๆ ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ด้วยเซปัสตรัมซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์เกี่ยวกับอนุกรมของฮาร์โมนิกและแถบความถี่ข้างในสเปกตรัม

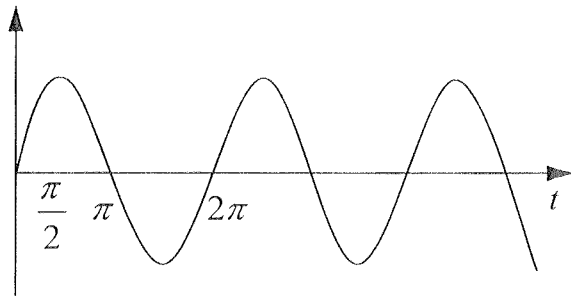
### 2.2.2 ความถี่ (Frequency)

สัญญาณการสั่นสะเทือนบนกราฟโดเมนของความถี่ ในที่นี้ก็คือจำนวนรอบของการสั่นสะเทือนต่อหน่วยเวลา และหน่วยที่นิยมใช้จะเป็นรอบต่อนาที (CPM) และบางครั้งใช้เป็นรอบต่อวินาทีหรือหน่วยเฮิร์ตซ์ (Hz) ความถี่นี้จะเป็นปัจจัยที่สำคัญมากตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงแหล่งที่มาและปัญหาของเครื่องจักร ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการวิเคราะห์ถึงปัญหาหรือความเสียหายต่างๆ ในเครื่องจักรกล

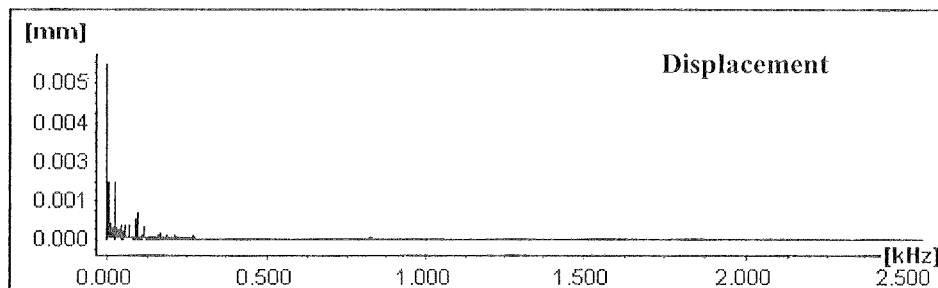
### 2.2.3. ขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude)

การที่จะบอกถึงระดับความรุนแรงของเครื่องจักรนั้น จะอาศัยการบอกเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน ถ้าขนาดของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับภาวะปกติแสดงว่าเครื่องจักรนั้นเริ่มมีปัญหา ซึ่งขนาดของการสั่นสะเทือนที่ใช้ในปัจจุบันและเป็นที่ยอมรับกันมากที่สุดมีอยู่ 3 แบบคือ

ก. การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ (Displacement) หมายถึงระยะการเคลื่อนที่ของวัตถุ หรือมวัดจากจุดสมดุลเคลื่อนที่ไปสู่จุดที่สูงสุดแล้วเคลื่อนที่ไปสู่จุดที่ต่ำสุด (Peak to Peak) ซึ่งเป็นค่าระยะทางทั้งหมดที่วัตถุเคลื่อนที่จากจุดสูงสุดไปสู่จุดต่ำสุดในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่ของวัตถุ นั้นๆ ดังสมการที่ 1 และรูปที่ 11 ซึ่งแสดงกราฟการขจัด

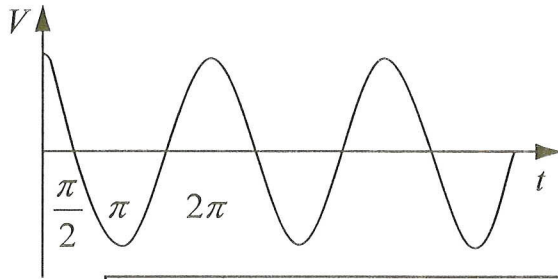


$$\begin{aligned}y(t) &= y_{\max} \sin(\omega t + \phi) \\V(t) &= \frac{dy}{dt} \\y(t) &= \int V(t) dt\end{aligned} \quad (1)$$



รูปที่ 11 แสดงกราฟการขจัด

ข. ความเร็ว (Velocity) หมายถึงความเร็วของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุ วัตถุจะมีความเร็วเป็นศูนย์เมื่อเคลื่อนที่อยู่ที่จุดสูงสุดและต่ำสุด และมีความเร็วสูงสุดในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุล ซึ่งค่าการขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็ว ดังสมการ 2 และรูปที่ 12 ซึ่งแสดงกราฟความเร็ว

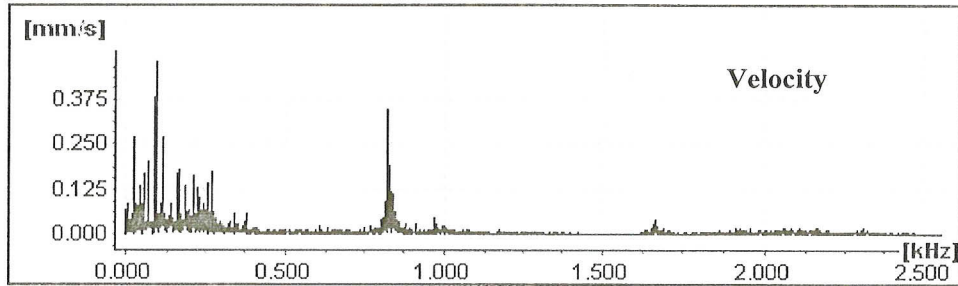


$$V_{\max} = y_{\max} \omega$$

$$V(t) = V_{\max} \cos(\omega t + \phi)$$

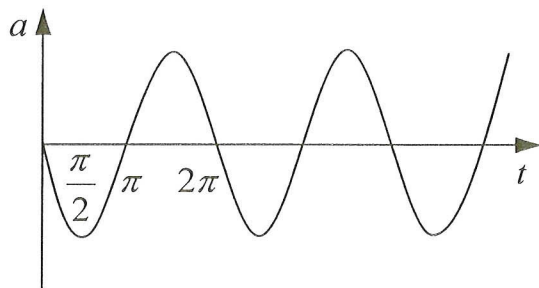
$$V(t) = y_{\max} \omega \sin(\omega t + \phi + 2/\pi) \quad (2)$$

$$V(t) = V_{\max} \omega \cos(\omega t + \phi)$$



รูปที่ 12 แสดงกราฟความเร็ว

ค. ความเร่ง (Acceleration) หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุในขณะที่วัตถุที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมา โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่ออยู่ในตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดเมื่อผ่านจุดสมดุล ดังสมการ 3 และรูปที่ 13 ซึ่งแสดงกราฟความเร่ง

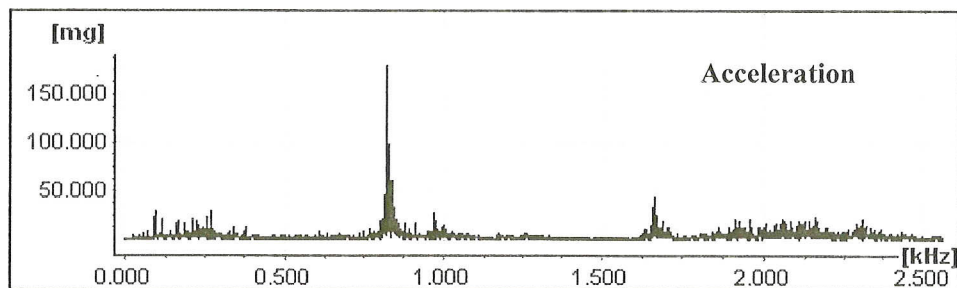


$$a_{\max} = y_{\max} \omega^2$$

$$a(t) = -a_{\max} \sin(\omega t + \phi) \quad (3)$$

$$a(t) = y_{\max} \omega^2 \sin(\omega t + \phi + \pi)$$

$$a(t) = -y_{\max} \omega^2 \sin(\omega t + \phi)$$



รูปที่ 13 แสดงกราฟความเร่ง

#### 2.2.4 มุมเฟส (Phase)

สำหรับมุมเฟสของการสั่นสะเทือน คือความแตกต่างของตำแหน่งขึ้นส่วนหรือวัตถุที่มีการสั่นสะเทือนขึ้นหนึ่ง เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงหรือขึ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนอีกขึ้นหนึ่ง ประโยชน์เรื่องมุมเฟสของการสั่นสะเทือนสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของ

เครื่องจักรได้ เช่น ปัญหาการเยื้องแนวแกนของเพลลา ปัญหาการหลวมคลอน ปัญหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักร เป็นต้น และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการลดปัญหาการสั่นสะเทือนโดยการทำดุลยภาพในเครื่องจักรหมุนอีกด้วย

### 2.2.5 หน่วยวัดขนาดการสั่นสะเทือน

ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านั้นในเรื่องขนาดของการสั่นสะเทือนไม่ว่าจะเป็น การขจัดความเร็ว หรือความเร่ง สัญญาณทั้ง 3 แบบนี้จะอยู่ในรูปของคลื่นไซน์ ซึ่งจะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ โดยมีค่าแปรเปลี่ยนตามเวลา สำหรับการบอกขนาดของการสั่นสะเทือนจะบอกในลักษณะการสั่นสะเทือนแบบรวม (Overall Vibration) ที่ใช้กันทั่วไปประกอบด้วย

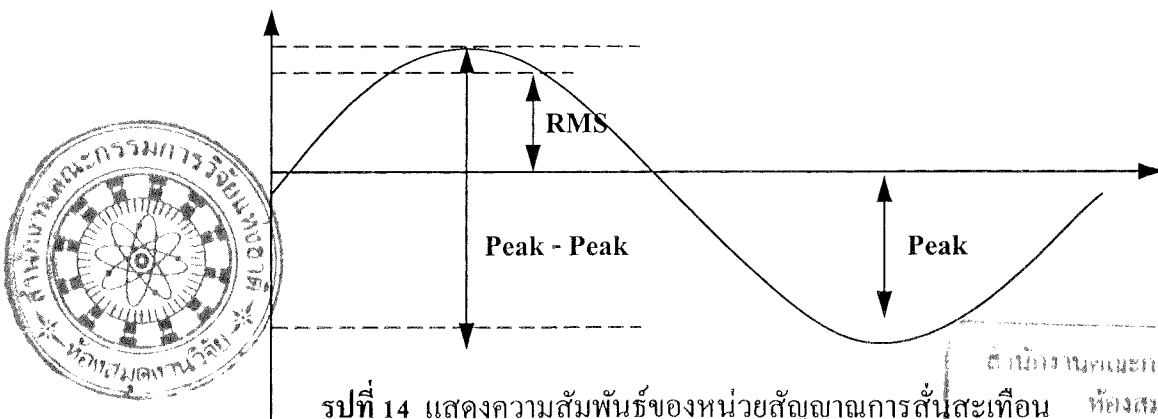
ก. ค่ายอดสูงสุด (Peak) จะบอกค่าระดับสูงสุดของการสั่นสะเทือนที่เบี่ยงเบนไปจากระดับอ้างอิง (ศูนย์) โดยไม่ได้คำนึงถึงลักษณะการสั่นสะเทือนแบบอย่างอื่น ซึ่งค่านี้ส่วนมากจะใช้วัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระแทกในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น การเคาะเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของวัตถุ (Bump Test) เป็นต้น

ข. ค่ายอดสูงสุดถึงยอดสูงสุดด้านตรงข้าม (Peak to Peak) เป็นค่าขนาดการสั่นสะเทือนที่วัดจากจุดสูงสุดของคลื่นไซน์กับจุดต่ำสุดของคลื่นไซน์

ค. ค่า RMS (Root Mean Square) เป็นค่าของขนาดการสั่นสะเทือนที่ได้จากการนำค่าที่วัดได้ในโดเมนเวลา (Time Domain) ที่เกิดขึ้นในช่วงหนึ่งๆ มายกกำลังสอง แล้วทำการเฉลี่ยตลอดคาบและถอดรากที่สองออกมา ดังสมการ

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (4)$$

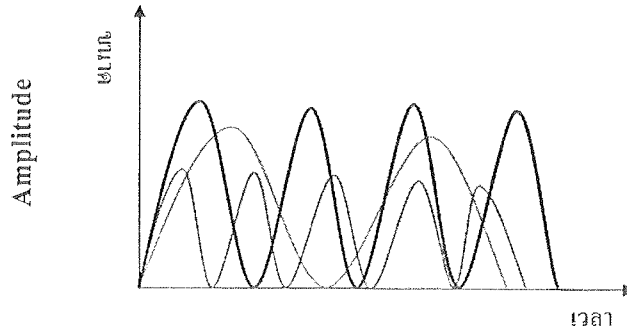
ความสัมพันธ์ของขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนทั้ง 3 แบบ รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยสัญญาณการสั่นสะเทือน ซึ่งใช้ในกรณีสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นแบบฮาร์มอนิกรูปไซน์ โดยการสั่นสะเทือนที่มีลักษณะเป็นคาบเหล่านี้ก็จะสามารถแยกออกเป็นผลรวมของสัญญาณรูปไซน์ของความถี่ได้ตามทฤษฎีของฟูรีเยร์ (Fourier) ดังนั้นความสัมพันธ์และความหมายของหน่วยวัดขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่กล่าวมาแล้วจะสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ได้



รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยสัญญาณการสั่นสะเทือน

### 2.2.6 กราฟโดเมนเวลา

ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขนาดการสั่นสะเทือนกับเวลาโดยแกนนอนจะเป็นแกนของเวลา ส่วนในแกนตั้งจะเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน รูปที่ 15 แสดงกราฟโดเมนเวลาที่ประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่

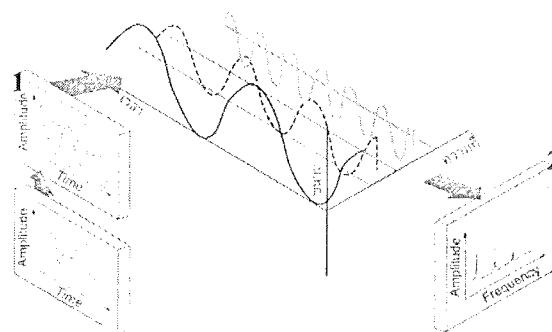


รูปที่ 15 แสดงกราฟโดเมนเวลาที่ประกอบไปด้วยความถี่ซ้อนกันหลายความถี่

Time

### 2.2.7 กราฟสเปกตรัม

ในกราฟสเปกตรัมนั้นจะเป็นการแสดงผลการสั่นสะเทือนบนแกนของความถี่ การแสดงผลในลักษณะนี้หากนำไปใช้วิเคราะห์ความเสียหายในเครื่องจักรกลแล้ว ก็จะทำให้เห็นรายละเอียดของสัญญาณการสั่นสะเทือนได้มากกว่าการวิเคราะห์สัญญาณจากกราฟโดเมนของเวลา เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนถึงความสัมพันธ์ของการแปลงสัญญาณจากกราฟโดเมนเวลาไปสู่สัญญาณบนโดเมนความถี่ ดังนั้นการมองแบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถที่จะอธิบายให้เข้าใจความหมายได้ง่าย และชัดเจน รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลากับโดเมนความถี่

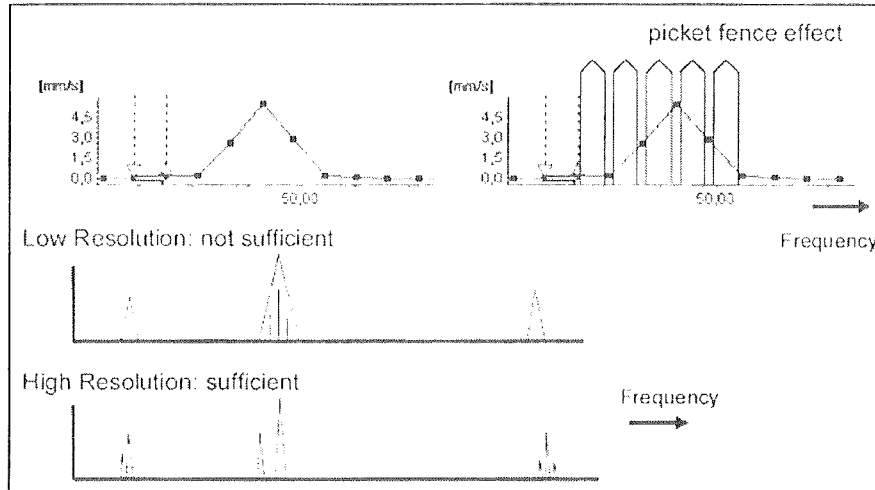


รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลากับโดเมนความถี่

ซึ่งขนาดของการสั่นสะเทือนนี้จะเป็นตัวบอกลถึงความรุนแรงของความเสียหายในเครื่องจักรนั้น ถ้าหากขนาดของการสั่นสะเทือนสูงเกินค่ามาตรฐาน ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้เครื่องจักรนั้นเสียหายเร็วยิ่งขึ้น โดยในแกนนอนที่ 1 จะเป็นแกนของเวลาและแนวแกนนอนที่ 2 ซึ่งตั้งฉากกับแกนที่ 1 จะเป็นแกนของความถี่ ซึ่งจะบ่งชี้ถึงสาเหตุและที่มาของความเสียหาย

### 2.2.8 ความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่ (Resolution In The Spectrum)

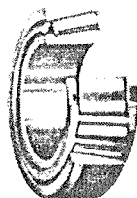
ความละเอียดในกราฟแสดงผลนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าจำนวนเส้น (Lines) ที่ได้มีการกำหนดไว้ในตอนแรกจากเงื่อนไขในการวัดอีกทั้งยังขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องวัดนั้นๆ ด้วย ทั้งนี้ในการตั้งค่าให้มีความละเอียดในการแสดงผลที่สูงขึ้นนั้นก็จะต้องใช้ระยะเวลาในการวัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน รูปที่ 17 แสดงความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่



รูปที่ 17 แสดงความละเอียดที่ใช้แสดงผลของความถี่

### 2.3 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของตลับลูกปืน [5]

สัญญาณการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนนั้น จะมีองค์ประกอบจากความถี่ธรรมชาติของตลับลูกปืนและฐานรองรับ (Natural Frequency of Installed Bearing Components and Supported Structure) ซึ่งเป็นความถี่โดยรวม ส่วนความถี่เสียหายของตลับลูกปืน (Damage Frequency of Bearing) ซึ่งจะมีส่วนประกอบด้วยกัน 4 ส่วนคือ แหวนนอก (Outer Ring) แหวนใน (Inner Ring) เม็ดลูกปืน (Roller) และตัวรัง (Cage) ดังรูปที่ 18 แสดงตลับลูกปืนแบบ Taper Roller Bearing เมื่อตลับลูกปืนเกิดความเสียหายจะก่อกำเนิดความถี่ออกมาเป็น 4 ความถี่ด้วยกันคือค่า BPFO, BPFI, BSF และ FTF ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาด้านซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์มากขึ้น ทำให้ผู้วิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องคำนวณหาค่าด้วยตัวเองเพียงมีเบอร์ของตลับลูกปืน แล้วทำการป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมแปลผลทางสเปกตรัมก็จะได้ค่าความถี่ต่างๆ ของตลับลูกปืน แต่ถึงกระนั้นผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องรู้และสามารถใช้สมการดังกล่าวได้เพื่อยืนยันความถูกต้องในกรณีที่ไม่แน่ใจจากการกำหนดเงื่อนไขในการวัด



รูปที่ 18 แสดงตลับลูกปืนแบบ Taper Roller Bearing

สมการในการคำนวณหาความถี่ของชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายโดยจะแปรผันกับความเร็วยรอบ [6]

ความถี่แหวนนอก Outer Ring Frequency (BPFO)

$$BPFO = \frac{N_b}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_c} \cos \theta \right) RPM \quad (5)$$

ความถี่แหวนใน Inner Ring Frequency (BPFI)

$$BPFI = \frac{N_b}{2} \left( 1 + \frac{B_d}{P_c} \cos \theta \right) RPM \quad (6)$$

ความถี่ของการหมุนเม็ดลูกปืน Ball Spin Frequency (BSF)

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left( 1 - \left( \frac{B_d}{P_c} \right)^2 \cos^2 \theta \right) RPM \quad (7)$$

ความถี่รังพื้นฐาน Fundamental Cage (Train) Frequency (FTF)

$$FTF = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_c} \cos \theta \right) RPM \quad (8)$$

เมื่อ	RPM	คือความเร็วยรอบ (รอบต่อนาที)
	$N_b$	คือจำนวนเม็ดลูกปืน
	$B_d$	คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเม็ดลูกปืน
	$P_c$	คือเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของตลับลูกปืน
	$\theta$	คือมุมสัมผัส

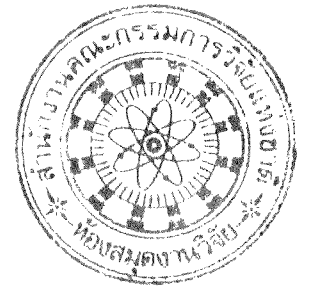
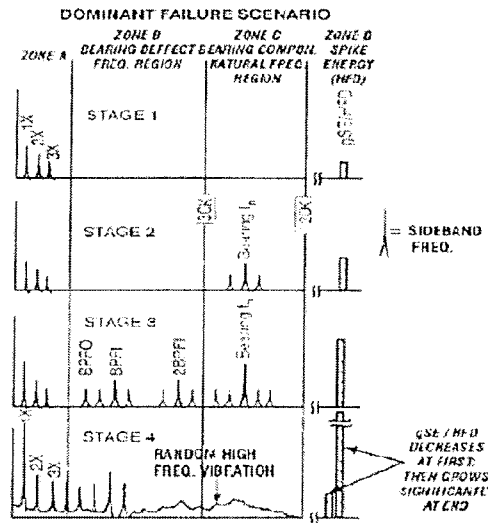
โดยสมการที่ใช้คำนวณนี้จะมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที ซึ่งสามารถทำให้เป็นเฮิรตซ์ (Hz) ได้โดยหารด้วย 60 ให้เป็นรอบต่อวินาที ลักษณะการชำรุดของตลับลูกปืนนั้นแบ่งออกเป็นช่วงๆ หลังจากเริ่มเกิดการชำรุด ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วง รูปที่ 19 แสดงลักษณะสเปกตรัมที่เกิดการชำรุดทั้ง 4 ขั้นตอน

สภาวะที่ 1 เป็นสภาวะการเสียหายของตลับลูกปืนในช่วงแรกซึ่งมักไม่สามารถบ่งบอกได้จากสัญญาณการสั่นสะเทือนปกติ สัญญาณความเสียหายจะไปปรากฏที่ความถี่อุตสาหกรรม 250,000 – 350,000 Hz และเมื่อการสึกหรอเพิ่มขึ้นสัญญาณมักจะเคลื่อนตัวไปปรากฏที่ความถี่ต่ำลงมาคือประมาณ 20,000 – 60,000 Hz

สภาวะที่ 2 เป็นสภาวะการเสียหายที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะแรก ทำให้เกิดการกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของชิ้นส่วนตลับลูกปืน ซึ่งโดยทั่วไปมักจะเกิดอยู่ช่วง 30,000 – 120,000 รอบต่อนาที

สภาวะที่ 3 เป็นสภาวะการเสียหายของตลับลูกปืนที่เพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดสัญญาณการสั่นสะเทือนขึ้นที่ความถี่เสียหายของตลับลูกปืน

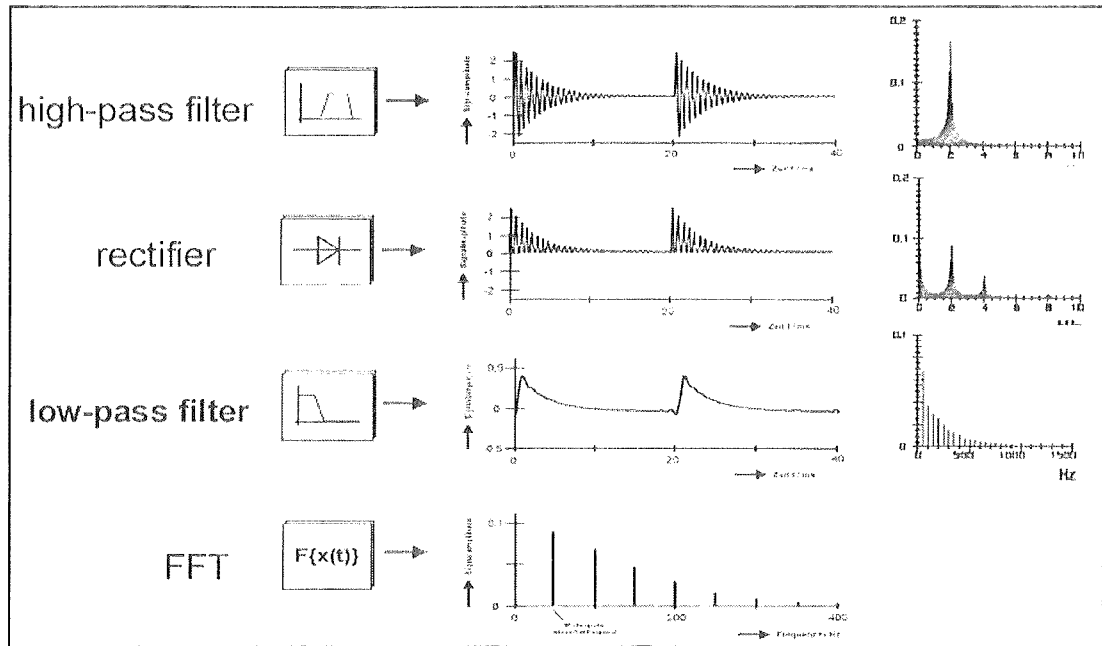
สถานะที่ 4 เป็นสถานะที่ตลับลูกปืนเสียหายมาก ซึ่งสถานะนี้สัญญาณการสั่นสะเทือนจะเพิ่มมากขึ้นจนส่งผลกระทบต่อไปสู่นาฬิกาของสัญญาณที่ความถี่ 1 เท่าของรอบการหมุนและชุดฮาร์มอนิกของสัญญาณดังกล่าว สัญญาณที่ความถี่เสียหายของตลับลูกปืนและความถี่ธรรมชาติที่เป็นลักษณะแยกกันจะถูกทำให้หายไปกลายเป็นสัญญาณที่คลุมกว้างตลอดช่วงความถี่สูง



รูปที่ 19 แสดงลักษณะสเปกตรัมที่เกิดการชำรุดทั้ง 4 ขั้นตอน [7]

## 2.4 การใช้สัญญาณ Demodulation Enveloping วิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืน [5]

ในการวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืนนั้น จะใช้หลักการปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulation Enveloping [8] ซึ่งเป็นการปรับปรุงสัญญาณที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนที่มีขนาดต่ำ (Low Amplitude) แต่ความถี่ของการสั่นสะเทือนจะอยู่ในย่านความถี่สูงภายในชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล เช่น การกระแทกของชิ้นส่วนภายในตลับลูกปืนหรือระหว่างเม็ดลูกปืนกับบริเวณที่เกิดความเสียหาย และการขบกันของฟันเกียร์ เป็นต้น สำหรับขั้นตอนในการปรับปรุงสัญญาณแบบนี้ จะทำโดยการดึงเอาสัญญาณที่มีขนาดของการสั่นสะเทือนต่ำที่อยู่ในย่านความถี่สูงออกมา เรียกว่า Band Pass Filter (BP-Filter) จากนั้นนำเอาสัญญาณไปปรับให้มีค่าเป็นสัญญาณบวกโดยผ่านชุด Rectifier แล้วทำการกรองเอาเฉพาะสัญญาณที่ย่านความถี่ต่ำที่เรียกว่า Low Pass Filter (LP-Filter) เพื่อให้ง่ายต่อการแปลผล และนำไปแสดงผลในกราฟสเปกตรัม รูปที่ 20 แสดงขั้นตอนการปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulation Enveloping



รูปที่ 20 แสดงขั้นตอนการปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulation Enveloping

การวัดสัญญาณความเสียหายของตลับลูกปืนแบบลูกกลิ้งจะใช้หัวรับสัญญาณแบบความถี่ ซึ่งเริ่มต้นตั้งแต่ที่ตลับลูกปืนเริ่มชำรุดโดยใช้เทคโนโลยีแบบ SEE (Spectral Emitted Energy) เมื่อความเสียหายเพิ่มขึ้นในระดับหนึ่งการตรวจวัดแบบ Demodulation Enveloping ก็จะสามารถตรวจพบได้ และถ้าการชำรุดของตลับลูกปืนนั้นเริ่มรุนแรงขึ้น จะสามารถตรวจพบโดยการวัดค่าการสั่นสะเทือนโดยทั่วไป ซึ่งการวัดค่าการสั่นสะเทือนโดยทั่วไปจะนิยมวัดค่าในหน่วยความเร็ว (Velocity Measurement) และเมื่อการชำรุดรุนแรงมากขึ้นก็จะสามารถตรวจวัดโดยการฟังเสียงได้ ซึ่งเป็นช่วงระยะสุดท้ายของอายุการใช้งานของตลับลูกปืน

การวัดสัญญาณที่ส่งออกมาจากบริเวณที่เกิดความเสียหายบนแหวนนอกของตลับลูกปืนจะทำโดยใช้หัววัดสัญญาณแบบความถี่ที่สอดคล้องกับเสียด้านนอกของตลับลูกปืนเป็นตัวรับสัญญาณที่ส่งออกมา สัญญาณที่ส่งออกมาครั้งแรกจะผ่านมาทางเสื่อของตลับลูกปืนและผ่านมาถึงหัวรับสัญญาณ เมื่อตลับลูกปืนเกิดความเสียหาย จะส่งกระตุ้น โครงสร้างตลับลูกปืนทำให้เกิดเรโซแนนซ์ (Structural Resonance) แล้วหัวรับสัญญาณก็จะนำสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนไปเข้าสู่ขั้นตอนการปรับปรุงสัญญาณแบบ Enveloping เพื่อการวิเคราะห์หาความเสียหายต่อไป

## 2.5 ทบทวนวรรณกรรม

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาถึงทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน การจำแนกความเสียหายเพื่อหาอายุการใช้งานของตลับลูกปืน โดยเครื่องกลึงล้อ และการสร้างเครื่องทดสอบตลับลูกปืน ซึ่งได้ศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัย บทความ และตำราต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้นำแนวทาง และข้อเสนอแนะมาประยุกต์ใช้ และทำการศึกษาเพิ่มจากงานวิจัยต่างๆ ดังนี้

**2.5.1 ประศาสน์ สุบรรพวงศ์ [9]** ศึกษาการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนแบบ ลูก กลิ้งในบ่ม ไฮดรอลิกแบบเฟือง ด้วยวิธีการทดลองจากเครื่องจักรจริง เพื่อกำหนดวิธีการในทาง ปฏิบัติในการติดตามสภาพของตลับลูกปืนในบ่ม ไฮดรอลิกแบบเฟือง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การ สั่นสะเทือนในรูปของ Frequency Domain ในการเก็บข้อมูล จำนวน BPF และจำนวนค่าอัตราส่วน ของแอมพลิจูด โดยใช้หัววัดความเร่งแบบ Piezoelectric และวัดค่าการสั่นสะเทือนในหน่วยของ ความเร่ง เพื่อทำการทดสอบหาอัตราการแตกที่ผิวแหวนนอกของตลับลูกปืน เพื่อกำหนดช่วงเวลาทำ การวัดที่เหมาะสม ทำการวัดที่ช่วงความถี่ 2 ช่วง คือ ช่วงความถี่สูง 20-30,000 Hz เพื่อตรวจสอบการ เกิดเรโซแนนซ์ของโครงสร้างและช่วงความถี่ต่ำ 0.5-400 Hz เพื่อตรวจสอบความถี่ที่เม็ดลูกปืนวิ่ง ผ่านรอยแตกของแหวนนอกของตลับลูกปืน การเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดมีค่าสูงและเกิดขึ้นอย่าง สม่าเสมอใน 3 ช่วงความถี่ คือ 7-9 kHz 15-18 kHz และ 24-27 kHz ส่วนการวัดในช่วงความถี่ต่ำ แบบวัดโดยตรง (Liner) ไม่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนและน่าเชื่อถือได้ว่าตลับลูกปืนเกิด การชำรุด แต่การวัดโดยใช้วิธีการปรับปรุงสัญญาณแบบ Demodulate พบว่าการปรากฏของ FTF (Fundamental Train Frequency) และ GMF (Gear Mesh Frequency) ที่มีความถี่ด้านข้าง (Side Band) เป็นการสนับสนุนให้เห็นว่าตลับลูกปืนเกิดการชำรุด เมื่อเริ่มเกิดการชำรุดแล้ว จะมีอายุการ ใช้งานต่อไปโดยไม่เกิดผลกระทบต่อระบบได้อีกไม่เกิน 22% ของอายุการใช้งานรวมหรือ 260 ชั่วโมง ช่วงระยะเวลาที่ควรทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนไม่ควรห่างกันเกิน 130 ชั่วโมงใช้งานของ เครื่องจักร (หรือ 50% ของอายุตลับลูกปืนที่เหลืออยู่) เพื่อป้องกันการชำรุดรุนแรงที่จะเกิดขึ้น ใน ระบบไฮดรอลิก

**2.5.2 สมชาย เดโชธรรมสถิต [10]** ศึกษาการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองด้วย สเปกตรัมและเซปส์ตรัม โดยทำการทดลองวิเคราะห์สัญญาณจากชุดทดลองซึ่งจำลองให้ชุดเฟืองมี การสึกหรอของซี่ฟันเฟืองและมีการเยื้องศูนย์กลางของเฟืองในระดับต่างๆ กันและผลการแปลงสัญญาณ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลียนแบบสัญญาณการสั่นสะเทือนของชุดเฟืองในลักษณะจำเพาะ บนโดเมนเวลา โดเมนความถี่ ตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณ แล้วเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จาก สเปกตรัมและเซปส์ตรัม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือน ของชุดเฟืองในสภาพปกติประกอบด้วย ชุดฮาร์โมนิกของ GMF และแถบความถี่ข้าง ขณะที่ยอด เซปส์ ตรัมแสดงยอดสัญญาณที่ฮาร์โมนิกของเฟืองขับและเฟืองตามที่มีแกมมาจุดระดับหนึ่ง ในกรณี

ชุดเฟืองมีปัญหาการสึกหรอของซี่ฟันจะพบว่า การสั่นสะเทือนจะมีระดับสูงขึ้นกว่าเดิมสเปกตรัมจะมีแถบความถี่ข้างที่สูงขึ้น พร้อมกับมีสัญญาณแถบความถี่กว้างและมีฮาร์มอนิกของ GMF เพิ่มขึ้น ส่วนฮาร์มอนิกของเฟืองซี่ที่สึกหรอจะมีแอมพลิจูดสูงขึ้นแต่ฮาร์มอนิกของเฟืองตามกลับมีแอมพลิจูดลดลงแตกต่างกัน ในกรณีที่เฟืองชุดมีปัญหาการเยื้องศูนย์เพิ่มมากขึ้นจะพบว่า การสั่นสะเทือนอาจมีระดับสูงขึ้นหรือลดลง สเปกตรัมจะมีแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างและแอมพลิจูดของความถี่การหมุนของเฟืองที่เยื้องศูนย์เพิ่มสูงขึ้น แต่การเพิ่มของแอมพลิจูดดังกล่าวมีรูปแบบไม่ชัดเจน ขณะที่ฮาร์มอนิกของเฟืองที่เยื้องศูนย์มีขนาดสูงขึ้นเด่นชัดเมื่อเทียบกับเฟืองปกติ

2.5.3 กมลวรรณ พงสาพิชญ์ [11] การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและระดับการสึกหรอของเฟือง โดยจำลองการสึกหรอของฟันเฟืองซี่ที่ระดับต่างๆ กันทำการทดลองที่หลายสภาวะด้วยการปรับระดับภาระและความเร็วรอบ สัญญาณการสั่นสะเทือนที่นำมาใช้วิเคราะห์อยู่ในรูปแบบของสัญญาณโดเมนเวลา สเปกตรัม และเซปส์ตรัม จากผลของสัญญาณโดเมนเวลา ค่า Peak ของสัญญาณมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระดับสึกหรอของฟันเฟืองมากขึ้น ในขณะที่ค่า RMS มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ามาก ผลของสัญญาณสเปกตรัม ค่าแอมพลิจูดที่ความถี่ 1 GMF 2 GMF และ 3 GMF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับสึกหรอมากขึ้น ค่าแอมพลิจูดของแถบความถี่ข้างเนื่องจากเฟืองซี่และเฟืองตามมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความถี่ GMF ผลของสัญญาณเซปส์ตรัม ค่าแอมพลิจูดที่ความเร็วรอบเฟืองซี่ (1/P) มีค่าสูงขึ้นเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 40% ของความหนาของฟัน จากค่านั้นแอมพลิจูดจึงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระดับสึกหรอเพิ่มขึ้นจนถึงค่าการสึกหรอสูงสุดที่ทดลอง จากรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณการสั่นสะเทือนและการสึกหรอของเฟืองพบว่า การวิเคราะห์เซปส์ตรัมเป็นวิธีที่ชัดเจนที่สุดในการวิเคราะห์สภาพชุดเฟือง ซึ่งอาจใช้ค่าแอมพลิจูดสูงสุดเป็นเกณฑ์กำหนดระดับสึกหรอที่สามารถยอมรับได้

2.5.4 จุติโรจน์ เบ็ญจลักษณ์ [12] การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลหมุน ซึ่งได้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลหมุน การพัฒนาโปรแกรมอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 10816-1, ISO 10816-2, และ ISO 10816-3 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานในลักษณะต่อเนื่องในเวลาจริง เปลี่ยนสัญญาณการสั่นสะเทือนในแกนเวลาให้อยู่ในแกนความถี่ วิเคราะห์ความบกพร่องของเครื่องจักรกลหมุน เก็บข้อมูลสำหรับการแสดงข้อมูลในอดีต และเตือนเมื่อเครื่องจักรกลหมุนเริ่มเสียหาย โดยเป็นการพัฒนาโปรแกรมสำหรับตรวจและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลหมุน โดยได้ทำการพัฒนาตามความต้องการของผู้ใช้

2.5.5 ประดิษฐ์ หมูเมืองสอง และสุชญา นรรัชช [13] การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร กล่าวถึงความเสียหายที่เกิดขึ้น ในเครื่องจักรกลเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นแล้วจะเป็นผลให้

เครื่องจักรมีอายุสั้นลง ซึ่งความเสียหายที่พบในเครื่องจักร โดยทั่วไป เช่น การไม่สมดุลของเครื่องจักร (Unbalance) การเอียงแนวแกนของเครื่องจักร (Misalignment) การหลวมคอนทางกล การโค้งของเพลลา การเสียดสีกันของชิ้นส่วน การเอียงศูนย์กลาง (Eccentric) การชำรุดของเฟืองเกียร์ เป็นต้น ในการวิเคราะห์ความเสียหายโดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ในรูปแบบของกราฟโดเมนความถี่ (Frequency Analysis) หรือการแสดงผลในรูปแบบของกราฟสเปกตรัม (Spectrum Plot) โดยแกนตั้งจะเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) โดยจะใช้หน่วยวัดแบบระยะทาง ความเร็ว หรือ ความเร่ง และแกนอนจะแสดงค่าความถี่ (Frequency) ของการสั่นสะเทือนที่เกิดจากเครื่องจักรนั้น ในการวิเคราะห์แบบกราฟสเปกตรัมนี้ สามารถแปลความหมายโดยแกนตั้งจะบ่งบอกถึงความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ส่วนแกนอนจะบอกลักษณะปัญหาหรือแหล่งที่มาของการสั่นสะเทือนนั้นว่าอยู่ตรงตำแหน่งไหนของเครื่องจักร

2.5.6 วินัย เวชวิทยาลัง [14] ได้อธิบายการวัดการสั่นสะเทือนว่าเป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจ สอบการทำงานของเครื่องจักร โดยการวัดการสั่นสะเทือนเป็นวิวัฒนาการและใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะสามารถวิเคราะห์สาเหตุความผิดปกติของเครื่องจักรได้ครอบคลุมเกือบทุกปัญหา ทั้งการติดตั้งประกอบ การสึกหรอ การหลวมคลาย การยึดไม่แน่น แท่นไม่แข็งแรง การเสียหายของเฟืองเกียร์ ตลับลูกปืน โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปแก้ไขปัญหา และข้อมูลที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนนั้น จะช่วยในการวางแผนการบำรุงรักษา

2.5.7 ญัฐพร ไร่แข็ง, วุฒิสักดิ์ บุตนะ [15] ได้ศึกษาการออกแบบแบร็งก์ในโครงสร้างการศึกษาแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งศึกษาหน้าที่ การทำงานของแบร็งก์ชนิดต่างๆ ได้แก่ แบร็งก์เชิงกล แบร็งก์ยาง แบร็งก์แบบเลื่อนไถล และแบบจุดหมุนคอนกรีต ผลการศึกษาสรุปได้ว่าหน้าที่ การทำงานของแบร็งก์ คือ 1) เป็นตัวถ่ายแรงจากโครงสร้างตัวสะพานไปยังโครงสร้างส่วนที่รองรับ 2) ยอมให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ต้องการสำหรับโครงสร้าง และ 3) บังคับการเคลื่อนที่ของสะพานให้ไปในทิศทางที่กำหนด แบร็งก์แต่ละชนิดส่วนใหญ่จะให้หน้าที่คล้ายกัน แต่จะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป จากข้อดีข้อเสียนี้จะทำให้ผู้ทำการศึกษา สามารถเลือกใช้แบร็งก์ได้อย่างเหมาะสมกับโครงสร้าง ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาการออกแบบแบร็งก์ โดยใช้มาตรฐานอังกฤษ (British Standards Institution) เป็นข้อกำหนดในการออกแบบ เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่นิยมใช้กันมาก และยังเป็นที่ยอมรับในหน่วยงานราชการ ในการศึกษาการออกแบบทำให้ได้หลักการ และวิธีการออกแบบ ภายใต้ข้อกำหนดในการออกแบบ เพื่อสามารถใช้ในการคำนวณออกแบบแบร็งก์ในโครงสร้างได้นอกจากนี้ มีตัวอย่างในการออกแบบแบร็งก์ชนิดต่างๆหลายตัวอย่าง

2.5.8 ประจวบ ปานเพชร, ประทีป มุขศรี, ประเสริฐ กลับริด [16] ได้ศึกษาเครื่องสาธิตการทดลองความเสียหายของเบร้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องสาธิตการทดลองความเสียหายของเบร้ง เพื่อใช้ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของเบร้งผิวเรียบที่ทำมาจากทองเหลือง เหล็กหล่อ แกรไฟต์และเบร้งตลับลูกปืน ทั้งแบบไม่ใช้สารหล่อลื่นและแบบใช้สารหล่อลื่น ที่ใช้กับเพลลาขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร เครื่องสาธิตการทดลองความเสียหายของเบร้งมีขนาด โครงฐาน กว้าง 390 มิลลิเมตร ยาว 580 มิลลิเมตร และสูง 140 มิลลิเมตร ล้อหมุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตรและหนา 40 มิลลิเมตร หลังจากศึกษาถึงความเสียหายของเบร้งผิวเรียบ เบร้งตลับลูกปืนและลักษณะ โครงสร้าง ของเครื่องสาธิตความเสียหายของเบร้ง จึงทำการเขียนแบบ กำหนดและเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ จากนั้นจึงดำเนินการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ แล้วนำมาประกอบเข้าด้วยกัน เป็นเครื่องสาธิตการทดลอง ความเสียหายของเบร้งที่สมบูรณ์และสามารถใช้งานได้ตามต้องการ

การทดลองหาน้ำหนักถ่วงเพื่อคำนวณหาแรงเสียหาย ทั้งขณะที่ไม่ใช้สารหล่อลื่นและใช้ สารหล่อลื่น แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) ทดลองหาเวลาที่คงที่ และ 2) ทดลองหาน้ำหนักถ่วงที่เวลาคงที่

ผลการทดลองสรุปได้ว่า เบร้งทองเหลืองมีความเสียหายมากที่สุด รองลงมาคือเบร้งเหล็กหล่อ เบร้งแกรไฟต์ และเบร้งตลับลูกปืน ทั้งการทดลองแบบไม่ใช้สารหล่อลื่นและแบบใช้สารหล่อลื่น ในเบร้งชนิดเดียวกันการทดลองแบบไม่ใช้สารหล่อลื่นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมากกว่า แบบใช้สารหล่อลื่น