

# ศึกษาการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

คณาธิป แก้วกุลศรี, สมพร เรืองสินชัยวานิช

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิจนุ โลก 65000  
E-mail: joga-bonito\_ee@hotmail.com, sompormru@yahoo.co.uk

**บทคัดย่อ** – งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการสั่นสะเทือนในมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามโครงสร้างหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำ คือ โรเตอร์, สเตเตอร์ และโครงมอเตอร์ พบว่าเมื่อความถี่ธรรมชาติของส่วนประกอบต่าง ๆ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรง, ขนาดและชนิดของวัสดุ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของส่วนประกอบต่าง ๆ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างนั้นๆ ทั้งนี้ผลที่ได้จากการศึกษานี้ สามารถเป็นแนวทางให้นักออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำการหลีกเลี่ยงความถี่ที่อาจก่อให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อมอเตอร์ได้

**คำสำคัญ** – มอเตอร์เหนี่ยวนำ, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ความถี่ธรรมชาติ, ความถี่เรโซแนนซ์, การสั่นสะเทือน

**Abstract** - The research paper presents the study of the vibration in the induction motor by using the finite element method. The study proposes to investigate 3 parts of a motor, i.e., rotor, stator and motor frame. The results show that the nature frequencies of the motor components are different depending on its shape, dimension and material. Moreover, when the motor component's dimension is adjusted, the amplitude and nature frequencies are changed. The research findings can be used a guideline for motor designers to avoid frequencies causing resonance that maybe effect to the motor.

**Keyword** - Induction Motor, Finite Element Method: FEM, Natural Frequencies, Resonance, Vibration

## 1. บทนำ

การทำงานของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม บ่อยครั้งพบว่า เครื่องจักรเหล่านั้นต้องทำงานติดต่อกันเป็นเวลานาน (เครื่องจักรบางตัวถูกใช้งาน มากกว่า 24 ชั่วโมง) เพราะคำนึงถึงประสิทธิภาพการผลิตเป็นหลัก และเมื่อเครื่องจักรเกิดการ

เสียหาย (Breakdown)ย่อมส่งผลให้เกิดความสูญเสีย ทั้งในแง่ อัตราการผลิตที่ลดลงและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม ปัจจุบันการดูแลรักษาเครื่องจักรทำได้หลากหลายวิธี เช่น การซ่อม บำรุงเมื่อเครื่องจักรเสื่อมสภาพ (Breakdown Maintenance), การซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) หรือ การซ่อมบำรุงตามสภาพของเครื่องจักร (ConditionBased Maintenance) ทั้งนี้ผู้ดูแลเครื่องจักรอาจเลือกวิธีใด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการทำงานของเครื่องจักรและความชำนาญของผู้ดูแลเอง

เครื่องจักรในกระบวนการผลิตเกือบทุกประเภท ขณะทำงาน เครื่องจักร มักจะ สร้าง ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) ขึ้น ความถี่ธรรมชาติเหล่านั้น บ่อยครั้งอาจส่งผลกระทบต่อเครื่องจักร โดยเฉพาอย่างยิ่ง กรณีที่ การสั่นของเครื่องจักร (สร้างความถี่ให้เกิดขึ้น) ไปสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติทั้งความถี่และทิศทาง ส่งผลให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance) ขึ้นมีผลทำให้เกิดความเสียหายขึ้น เครื่องจักรนั้น ๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า เครื่องจักรไฟฟ้าแบบหมุนได้ (Rotating Electric Machinery) จึงมักถูกใช้เป็นอุปกรณ์หลักของกระบวนการผลิตประเภทต่าง ๆ

ด้วยเหตุนี้ การศึกษาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM)เป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง เช่นการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural) โดยที่วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยแก้สมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ทำให้สามารถทำนายผลออกมา เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการคำนวณทางด้านคณิตศาสตร์และเรขาคณิตที่ซับซ้อนลง และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลองจริง [1], [2]

ในบทความนี้ จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้สามารถแจกแจงความถี่ย่านต่าง ๆ ที่มีผลต่อโครงสร้างภายในมอเตอร์ไฟฟ้า

ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับผู้ดูแลเครื่องจักร เพื่อหลีกเลี่ยง ความถี่ที่อาจก่อให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์

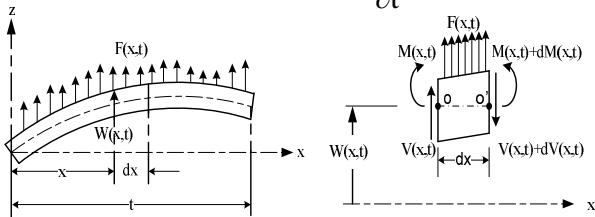
## 2. ทฤษฎีพื้นฐานของการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรม

การเคลื่อนที่ของวัตถุรอบ ๆ จุดสมดุลในช่วงเวลาหนึ่งของการเคลื่อนที่ ไม่ว่าจะเคลื่อนที่รอบจุดสมดุลนั้นจะเกิดขึ้นในแบบซ้ำตัวเองหรือไม่ก็ตามจะเรียกการเคลื่อนที่นั้นว่า การสั่นสะเทือน (Vibration) หรือ การแกว่ง (Oscillation) ตัวอย่างเช่นการแกว่งตัวของลูกตุ้มนาฬิกาการโยกตัวของเสาสูงหรือการเคลื่อนที่ของมวลที่ติดอยู่บนสปริง เป็นต้น การศึกษาเรื่องการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรมจึงเป็นการศึกษาเพื่อให้ความเข้าใจถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของโครงสร้าง หรือของเครื่องจักรว่ามีคุณลักษณะเฉพาะเป็นอย่างไร รวมถึงการวัดการควบคุมการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้าง [4]

### • การสั่นตามแนวขวางของคาน

พิจารณาคานที่มีความยืดหยุ่นยาว  $L$  ที่มีพื้นที่หน้าตัด  $A(x)$  โมเมนต์ดัด  $M(x,t)$  มีแรงเฉือนภายในของคาน  $V(x,t)$  และ  $f(x,t)$  แรงกระทำภายนอกต่อหนึ่งหน่วยความยาวของคาน ดังรูปที่ 1 ขณะที่แรงเฉื่อยกระทำต่อพื้นที่หน้าตัดเล็กๆ ของคาน มีค่าเท่ากับ

$$\text{แรงเฉื่อยของคาน} = \rho A(x) dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, t) \quad (1)$$



รูปที่ 1 การสั่นตามแนวขวางของคาน

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของคานนี้ ภายใต้อิทธิพลของแรงกระทำจากภายนอกจะเป็น

$$-(V + dV) + f(x, t)dx + V = \rho A(x) dx \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(x, t) \quad (2)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของคาน ( $m^3$ )  
 $A(x)$  คือ พื้นที่หน้าตัดของคาน ( $m^2$ )

โดยค่าความถี่ธรรมชาติของคานจะได้รับการพิจารณา คือ

$$\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = (\beta_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}} \quad (3)$$

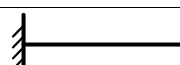

เมื่อ

$\omega_n$  คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ (rad/sec)  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของคาน ( $m^2$ )  
 $I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดของคาน ( $m^4$ )  
 $E$  คือ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ (GPa)  
 $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ( $kg/m^3$ )  
 $L$  คือ ความยาวของคาน (m)  
 $(\beta_n L)^2$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของเงื่อนไข

สำหรับคานใด ๆ ก็จะมีค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นบรรทัดฐานที่ความถี่ธรรมชาตินั้นได้ไม่จำกัดจำนวนโหมด ส่วนการสั่นโดยทั่วไปนั้นอาจเป็นการสั่นที่ประกอบด้วยโหมดบรรทัดฐานหลายๆ โหมดสั่นอยู่ร่วมกันได้

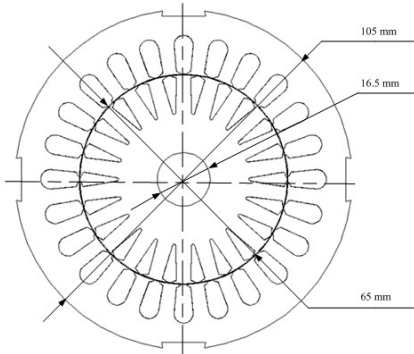
โดยค่า  $\beta_n$  สามารถหาได้จากสภาพที่ขอบเขตหรือสภาพที่จูดรองรับของคาน ซึ่งมีค่า  $(\beta_n L)^2$  ดังตารางที่ 1 แสดงเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของคาน โดยทั่วไปจะมีจูดรองรับของคาน อยู่ด้วยกัน 3 แบบ ซึ่งก็คือจูดรองรับอิสระ, จูดรองรับอย่างง่าย และจูดรองรับแบบยึดแน่น โดยจูดรองรับแต่ละแบบก็จะให้ค่าสภาพที่จูดรองรับนั้นแตกต่างกันออกไป

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการเคลื่อนที่ของคาน [4]

Beam Configuration	$(\beta_1 L)^2$ Fundamental	$(\beta_2 L)^2$ Second Mode	$(\beta_3 L)^2$ Third Mode
 Cantilever	3.52	22.0	61.7
 Free-Free	22.4	61.7	121.0

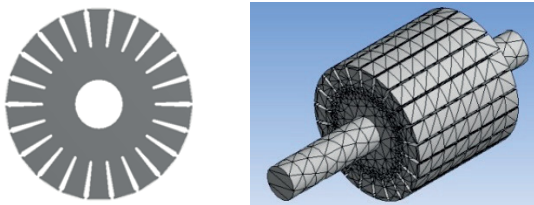
### 3. ศึกษาความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทั้งนี้มอเตอร์มีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ กำลังไฟฟ้า 373 วัตต์ ระดับแรงดันพิกัด 380 โวลต์ ความถี่ 50 Hz โรเตอร์ 4 ขั้วแม่เหล็ก จำนวนร่องสเตเตอร์ 24 จำนวนร่องโรเตอร์ 22 และกำหนดให้เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน และมีขนาดดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 พิกัดขนาดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

#### 3.1 โรเตอร์



รูปที่ 3 รูปทรงของโรเตอร์

รูปที่ 3 เป็นรูปทรงของโรเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในเบื้องต้นเป็นการหาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของโรเตอร์ จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS ใช้วัสดุ Stainless Steel (AISI 303) แกนเหล็กยาว 145 มิลลิเมตร และกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของแกนเหล็กเป็นแบบคานยึด[6]

จากการศึกษา ได้ทำการวิเคราะห์ที่ย่านความถี่ 0 - 20,000 Hz ซึ่งจะได้รูปแบบของการสั่นสะเทือนที่ใช้เปรียบเทียบอยู่ด้วยกัน 3 โหมด คือ โหมดที่เป็นลักษณะของการแกว่งตัว หรือ งอตัวในทิศทางแนวระนาบของโรเตอร์ (Rotor Sway Mode) โหมดที่เป็นลักษณะของการงอตัวของโรเตอร์ (Rotor Bending Mode) และโหมดที่เป็นลักษณะของการยึดหยุ่นของโรเตอร์

(Rotor Flexible Mode) โดยลักษณะของรูปแบบการสั่นสะเทือนทั้ง 3 โหมด ได้แสดงในรูปที่ 4 ตามลำดับ



Rotor 1<sup>st</sup> Sway Mode – 3,470 Hz



Rotor 1<sup>st</sup> Bending Mode – 17,730 Hz



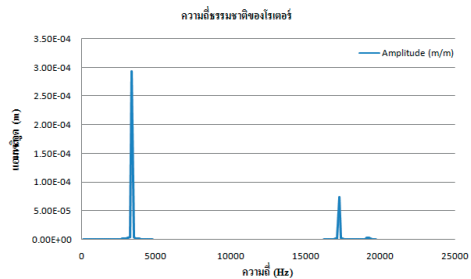
Rotor 1<sup>st</sup> Flexible Mode – 19,723 Hz



Rotor Rotational Modes – 14,098 Hz

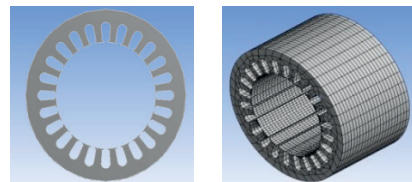
รูปที่ 4 รูปแบบการสั่นสะเทือนของโรเตอร์

จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของโรเตอร์โดยใช้โปรแกรม ANSYS ผลตอบสนองความถี่ของการสั่นสะเทือนได้แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลตอบสนองความถี่การสั่นสะเทือนของโรเตอร์

#### 3.2 สเตเตอร์



รูปที่ 6 รูปทรงของสเตเตอร์

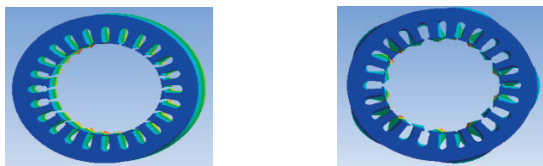
รูปที่ 6 เป็นรูปทรงของสเตเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในเบื้องต้นเป็นการหาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของสเตเตอร์ จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS ใช้วัสดุ Stainless Steel (AISI 303) และกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของแกนเหล็กเป็นแบบคานยึด [12]

จากการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์ที่ย่านความถี่ 0 - 20,000 Hz ซึ่งจะได้รูปแบบของการสั่นสะเทือนที่ใช้เปรียบเทียบอยู่ด้วยกัน 2 โหมด คือ โหมดที่เป็นลักษณะของการงอตัวของ สเตเตอร์ (Stator Bending Mode) และ โหมดที่เป็นลักษณะของการแกว่งตัว หรือการงอตัวในทิศทางแนวระนาบของสเตเตอร์ (Stator Sway Mode) โดยลักษณะของรูปแบบการสั่นสะเทือนทั้ง 2 โหมดได้แสดงในรูปที่ 7 ตามลำดับ



Stator 3<sup>rd</sup> Bending Mode (16,953 Hz)

Stator 4<sup>th</sup> Bending Mode (18,094 Hz)

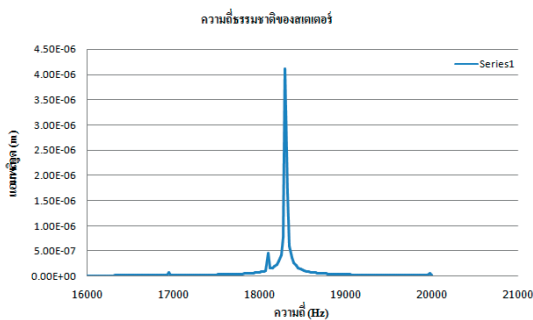


Stator 1<sup>st</sup> Sway Mode (18,305 Hz)

Stator 5<sup>th</sup> Bending Mode (19,976 Hz)

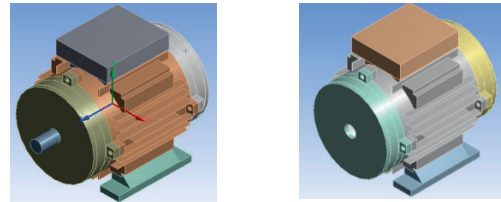
รูปที่ 7 รูปแบบการสั่นสะเทือนของสเตเตอร์

จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของสเตเตอร์โดยใช้โปรแกรม ANSYS ผลตอบสนองความถี่ของการสั่นสะเทือนได้แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลตอบสนองความถี่การสั่นสะเทือนของสเตเตอร์

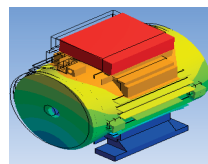
### 3.3 โครงมอเตอร์



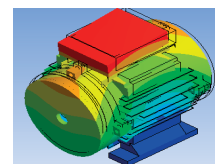
รูปที่ 9 มอเตอร์เหนี่ยวนำและโครงมอเตอร์

รูปที่ 9 เป็นรูปทรงของมอเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในเบื้องต้นเป็นการหาค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS ใช้วัสดุ Stainless Steel (AISI 303) และกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของแกนเหล็กเป็นแบบคานยึด [9]

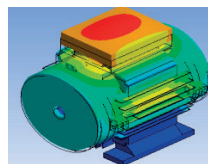
ได้ทำการวิเคราะห์ที่ย่านความถี่ 0 - 6,000 Hz ซึ่งจะได้รูปแบบของการสั่นสะเทือนที่ใช้เปรียบเทียบอยู่ด้วยกัน 3 โหมด คือ โหมดที่เป็นลักษณะของการแกว่งตัว หรือ การงอตัวในทิศทางแนวระนาบของโครงมอเตอร์ (Frame Sway Mode), โหมดที่เป็นลักษณะของการงอของโครงมอเตอร์ (Frame Bending Mode) และ โหมดที่เป็นลักษณะของการยืดหยุ่นของโครงมอเตอร์ (Frame Flexible Mode) โดยลักษณะของรูปแบบการสั่นสะเทือนทั้ง 3 โหมดได้แสดงในรูปที่ 10 ตามลำดับ



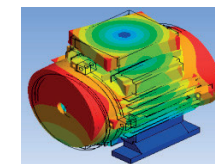
Frame 1<sup>st</sup> Sway Mode (833.79 Hz)



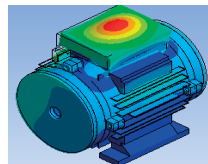
Frame 1<sup>st</sup> Bending Mode (1,304 Hz)



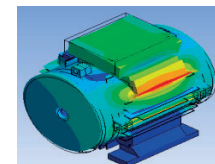
Frame 1<sup>st</sup> Flexible Mode (1,994 Hz)



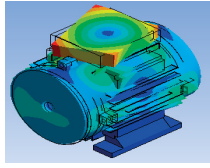
Frame 2<sup>nd</sup> Sway Mode (3,128.4 Hz)



Frame 2<sup>nd</sup> Bending Mode (4,441.8 Hz)



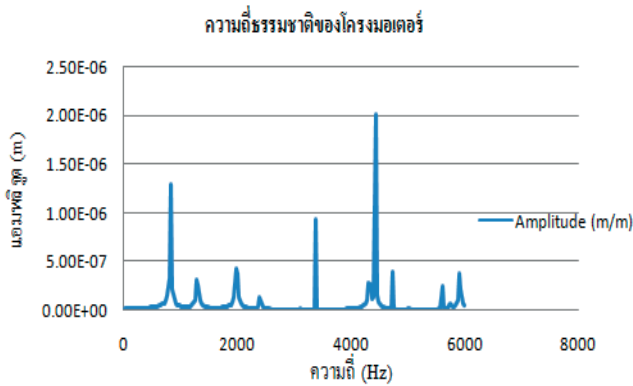
Frame 3<sup>rd</sup> Sway Mode (4,741.4 Hz)



Frame 3<sup>rd</sup> Bending Mode  
(5,606.5 Hz)

รูปที่ 10 รูปแบบการสั่นสะเทือนของโครงมอเตอร์

จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของโครงมอเตอร์โดยใช้โปรแกรม ANSYS ผลตอบสนองความถี่ของการสั่นสะเทือนได้แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลตอบสนองความถี่การสั่นสะเทือนของโครงมอเตอร์

#### 4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางโครงสร้างของชิ้นงาน

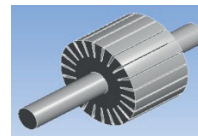
จากการศึกษาทฤษฎีการสั่นสะเทือนของโครงสร้างของชิ้นงานพบว่า เมื่อโครงสร้างของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จากเหตุผลดังกล่าว โครงสร้างของชิ้นงานอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบได้

ในกรณีนี้ได้ใช้โปรแกรม ANSYS วิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นสะเทือนจากการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางโครงสร้างของชิ้นงาน โดยยังคงใช้คุณสมบัติทางกลเหมือนเดิม

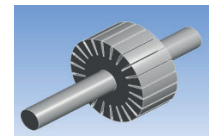
##### 4.1 โรเตอร์

จากโรเตอร์ต้นแบบนำมาทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างดังนี้

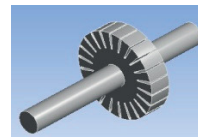
1. โรเตอร์ Class B-1 คือ การลดขนาดความหนาของโรเตอร์ไป 25 เปอร์เซ็นต์
2. โรเตอร์ Class B-2 คือ การลดขนาดความหนาของโรเตอร์ไป 50 เปอร์เซ็นต์
3. โรเตอร์ Class B-3 คือ การลดขนาดความหนาของโรเตอร์ไป 75 เปอร์เซ็นต์
4. โรเตอร์ Class B-4 คือ การลดขนาดความหนาของร่องไป 50 เปอร์เซ็นต์
5. โรเตอร์ Class B-5 คือ การเพิ่มขนาดความหนาของร่องไป 50 เปอร์เซ็นต์
6. โรเตอร์ Class B-6 คือ การเพิ่มขนาดแกนเหล็ก



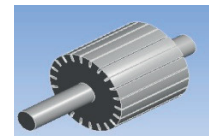
Class B-1



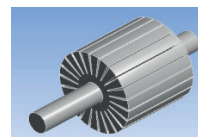
Class B-2



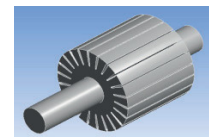
Class B-3



Class B-4



Class B-5



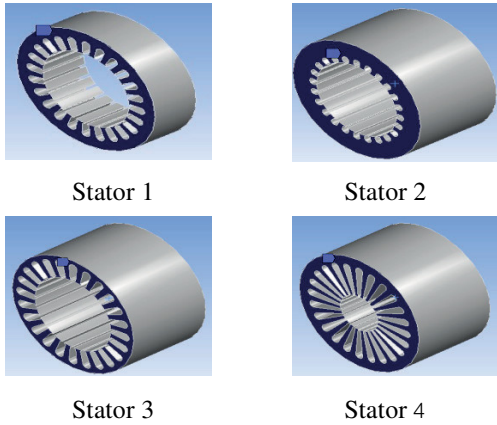
Class B-6

รูปที่ 11 รูปแบบโรเตอร์ที่ใช้ทดสอบ

##### 4.2 สเตเตอร์

จากสเตเตอร์ต้นแบบนำมาทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างดังนี้

1. สเตเตอร์ 1 (Stator 1) คือ การลดขนาดความหนาของสเตเตอร์ไป 50 เปอร์เซ็นต์
2. สเตเตอร์ 2 (Stator 2) คือ การลดขนาดความหนาของร่อง
3. สเตเตอร์ 3 (Stator 3) คือ การเพิ่มขนาดความหนาของร่อง
4. สเตเตอร์ 4 (Stator 4) คือ การลดขนาดโรเตอร์

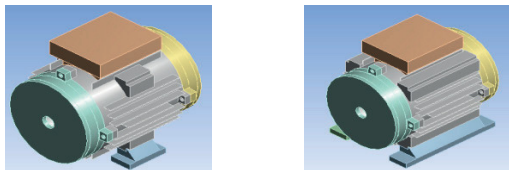


รูปที่ 12 รูปแบบสเตเตอร์ที่ใช้ทดสอบ

### 1.3 โครงมอเตอร์

จากโครงมอเตอร์ต้นแบบนำมาทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างดังนี้

1. โครงมอเตอร์ 1 (Frame 1) คือ ลดขนาดความยาวของฐาน 50 เปอร์เซ็นต์
2. โครงมอเตอร์ 2 (Frame 2) คือ เพิ่มขนาดความยาวของฐาน 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 13 รูปแบบโครงมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ

## 5. ผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางโครงสร้างของชิ้นงาน

ในส่วนของการทดลองเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติและขนาดของการสั่นสะเทือนจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางโครงสร้างของชิ้นงาน ดังนี้

### 5.1 โรเตอร์

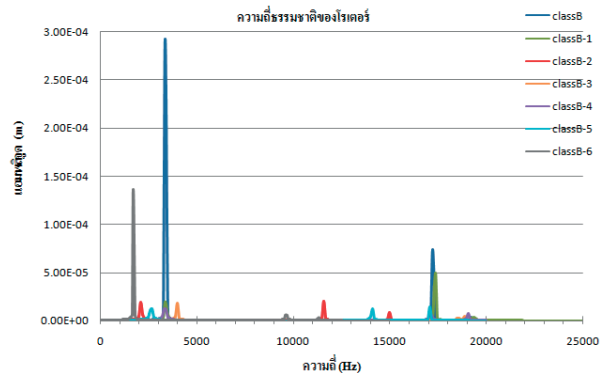
ได้ทำการวิเคราะห์ที่ย่านความถี่ 0 - 20,000 Hz ซึ่งจะได้รูปแบบของการสั่นสะเทือนที่ใช้เปรียบเทียบอยู่ด้วยกัน 3 โหมด คือ โหมดที่เป็นลักษณะของการแกว่งตัว หรือ งอตัวในทิศทางแนวระนาบของโรเตอร์ (Rotor Sway Mode) โหมดที่

เป็นลักษณะของการงอตัวของโรเตอร์ (Rotor Bending Mode) และ โหมดที่เป็นลักษณะของการยืดหยุ่นของโรเตอร์ (Rotor Flexible Mode) โดยลักษณะของรูปแบบการสั่นสะเทือนทั้ง 3 โหมด จะแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความถี่ธรรมชาติของโรเตอร์ Class B (Hz)

Class	Sway	First	Flexible	Rotational
<b>B</b>	3,470	17,730	19,723	14,098
<b>B-1</b>	2,655.7	14,056	17,088	12,076
<b>B-2</b>	2,126.8	11,611	15,018	10,768
<b>B-3</b>	1,722	9,636.1	11,294	9,703.8
<b>B-4</b>	3,406.3	17,369	19,322	13,793
<b>B-5</b>	3,347.7	17,143	19,073	13,546
<b>B-6</b>	3,979.5	18,942	18,551	13,501

จากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติโครงสร้างของโรเตอร์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS วิเคราะห์ ได้แสดงผลในรูปแบบของผลตอบสนองค่าความถี่ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ผลตอบสนองความถี่การสั่นสะเทือนของโรเตอร์

จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ค่าความถี่ธรรมชาติจะมีการเปลี่ยนแปลง และขนาดของการสั่นก็จะเกิดขึ้นในโหมดของการแกว่งตัว หรือ การงอตัวในทิศทางแนวระนาบของโรเตอร์ (Rotor Sway Mode), โหมดการงอตัวของโรเตอร์ (Rotor Bending Mode) และ โหมดการยืดหยุ่นของโรเตอร์ (Rotor Flexible Mode) เป็นรูปแบบของการสั่นสะเทือนของโรเตอร์ จากเหตุผลดังกล่าวสามารถบอกได้ว่า การปรับเปลี่ยนโครงสร้างของชิ้นงาน ส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติและขนาดของการสั่นสะเทือนในโรเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง

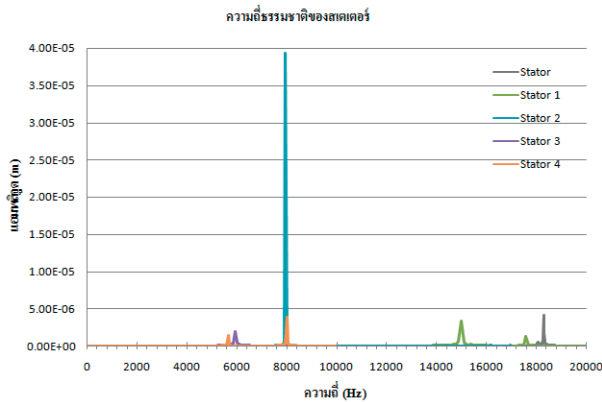
### 5.2 สเตเตอร์

จากการศึกษา ได้ทำการวิเคราะห์ที่ย่านความถี่ 0 – 20,000 Hz ซึ่งจะได้รูปแบบของการสั่นสะเทือนที่ใช้เปรียบเทียบอยู่ด้วยกัน 2 โหมด คือ โหมดที่เป็นลักษณะของการงอตัวของสเตเตอร์ (Stator Bending Mode) และโหมดที่เป็นลักษณะของการแกว่งตัว หรือ การงอตัวในทิศทางแนวระนาบของสเตเตอร์ (Stator Sway Mode) โดยลักษณะของรูปแบบการสั่นสะเทือนทั้ง 2 โหมด จะแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความถี่ธรรมชาติของสเตเตอร์ (Hz)

Class	Third	4 <sup>th</sup>	Sway	5 <sup>th</sup>
Sta	16,953	18,098	18,313	19,976
Sta 1	13,725	15,403	14,989	17,852
Sta 2	7,948.6	19,324	7,949.4	-
Sta 3	4,382.2	5,439.2	5,926.5	6,808.4
Sta 4	9,028.2	-	5,655.6	-

จากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติโครงสร้างของสเตเตอร์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS วิเคราะห์ ได้แสดงผลในรูปแบบของผลตอบสนองค่าความถี่ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ผลตอบสนองความถี่การสั่นสะเทือนของสเตเตอร์

จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ค่าความถี่ธรรมชาติจะลดลง และขนาดของการสั่นก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในโหมดของการแกว่งตัว หรือ การงอตัวในทิศทางแนวระนาบของสเตเตอร์ (Stator Sway Mode) เป็นรูปแบบการสั่นสะเทือนของสเตเตอร์

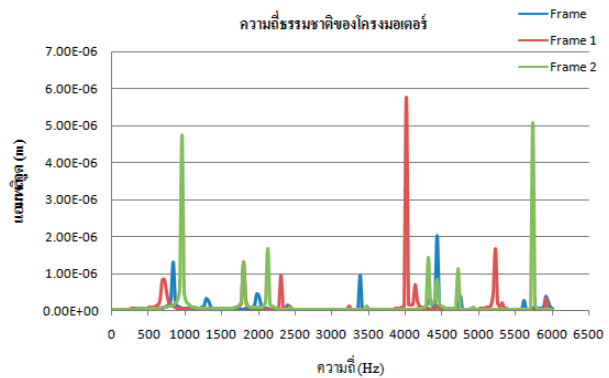
### 5.3 โครงมอเตอร์

จากการศึกษา ได้ทำการวิเคราะห์ที่ย่านความถี่ 0 – 6,000 Hz จะได้รูปแบบของการสั่นสะเทือนที่ใช้เปรียบเทียบอยู่ด้วยกัน 3 โหมด คือ โหมดที่เป็นลักษณะของการแกว่งตัว หรือ การงอตัวในทิศทางแนวระนาบของโครงมอเตอร์ (Frame Sway Mode) โหมดที่เป็นลักษณะการงอตัวของโครงมอเตอร์ (Frame Bending Mode) และโหมดที่เป็นลักษณะของการยืดหยุ่นของโครงมอเตอร์ (Frame Flexible Mode) โดยลักษณะของรูปแบบการสั่นสะเทือนทั้ง 3 โหมด จะแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความถี่ธรรมชาติของโครงมอเตอร์ (Hz)

Class	Frame	Frame 1	Frame 2
1 <sup>st</sup> Sway	833.79	702.56	956.54
1 <sup>st</sup> Bending	1,304	732.89	1,794.8
1 <sup>st</sup> Flexible	1,994	1,805.5	2,128.3
2 <sup>nd</sup> Sway	3,128.4	2,431.1	3,481.7
2 <sup>nd</sup> Bending	4,441.8	4,148	4,431.9
3 <sup>rd</sup> Sway	4,741.4	4,452.1	5,754.3
3 <sup>rd</sup> Bending	5,606.5	5,196.6	4,711.6

จากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติโครงสร้างของโครงมอเตอร์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS วิเคราะห์ ได้แสดงผลในรูปแบบของผลตอบสนองค่าความถี่ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ผลตอบสนองความถี่การสั่นสะเทือนของโครงมอเตอร์

จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ค่าความถี่ธรรมชาติจะมีการเปลี่ยนแปลง และขนาดของการสั่นก็จะเกิดขึ้นในโหมดของการแกว่งตัว หรือ การงอตัวในทิศทางแนวระนาบของโครงมอเตอร์ (Frame Sway Mode), โหมดการ

การงอตัวของโครงมอเตอร์ (Frame Bending Mode) และ โหมดการยืดหยุ่น (Frame Flexible Mode) เป็นรูปแบบของการ สั่นสะเทือนของมอเตอร์ จากเหตุผลดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าการปรับเปลี่ยน โครงสร้างของชิ้นงานส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติและขนาดของการสั่นสะเทือนในโครงมอเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง

## 6. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองประกอบด้วย 3 ส่วน ตามโครงสร้างหลักของมอเตอร์เหนี่ยวนำ คือ โรเตอร์, สเตเตอร์ และ โครงมอเตอร์

ส่วนที่ 1 เป็นผลการวิเคราะห์ของโรเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชิ้นงาน ค่าความถี่ธรรมชาติจะมีการเปลี่ยนแปลง และขนาดของการสั่นก็จะเกิดขึ้นในโหมดของการแกว่งตัว หรือ การงอตัวในทิศทางแนวระนาบของโรเตอร์ (Rotor Sway Mode), โหมดการการงอตัวของโรเตอร์ (Rotor Bending Mode) และโหมดการยืดหยุ่น (Rotor Flexible Mode)

ส่วนที่ 2 เป็นผลการวิเคราะห์ของสเตเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ค่าความถี่ธรรมชาติจะลดลง และขนาดของการสั่นก็จะเกิดขึ้นในโหมดของการแกว่งตัว หรือ การงอตัวในทิศทางแนวระนาบของโรเตอร์ (Rotor Sway Mode)

ส่วนที่ 3 เป็นผลการวิเคราะห์ของโครงมอเตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ค่าความถี่ธรรมชาติจะมีการเปลี่ยนแปลง และขนาดของการสั่นก็จะเกิดขึ้นในโหมดของการแกว่งตัว หรือ การงอตัวในทิศทางแนวระนาบของโรเตอร์ (Rotor Sway Mode), โหมดการงอตัวของโรเตอร์ (Rotor Bending Mode) และโหมดการยืดหยุ่น (Rotor Flexible Mode)

จากผลการทดลองทั้งหมด พบว่า เมื่อความถี่ธรรมชาติของส่วนประกอบต่าง ๆ ในมอเตอร์เหนี่ยวนำมีความแตกต่างกัน

กันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรง, ขนาดและชนิดของวัสดุ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของส่วนประกอบต่าง ๆ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างนั้น ๆ ทั้งนี้ผลที่ได้จากการศึกษานี้ สามารถเป็นแนวทางให้นักออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำการหลีกเลี่ยงความถี่ที่อาจก่อให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อมอเตอร์ได้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [2] เดช พุทธเจริญทอง, การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ: ศูนย์สื่อ เสริมกรุงเทพ, 1998.
- [3] มงคล ทองสงคราม, เครื่องกลไฟฟ้ากระแสสลับ. กรุงเทพฯ : รามาการพิมพ์ 2535.
- [4] พรชัย จงจิตรไพศาล, กลศาสตร์การสั่นสะเทือน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด, 2547.
- [5] ประดิษฐ์ หมูเมืองสอง, การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด, 2550.
- [6] Jomon D. Ede, "Rotor Resonances of High-Speed Permanent-Magnet Brushless Machines", in *Proc. 2002 IEEE Transactions.*, pp. 0093-9994.
- [7] William R. Finley, "An Analytical Approach to Solving Motor Vibration Problems", in *Proc. 2002 IEEE Transactions.*, pp. 00936-9994.
- [8] C. Wang, "Vibration Analysis of An Induction Mortor" in *Journal of Sound and Vibration*, 733-756.
- [9] Scott Kreitzer, "The Effect of Structural and Localized Resonances on Induction Motor Performance", Material, in *Proc. 2006 IEEE Transactions.*, pp. .0559-4244
- [10] L. Durantay, "Lage Band Reduction of Magnetic Vibrations of Induction Machines with Breakingn of Impedance Interface", in *Proc. 1999 IEEE Transactions.*, pp. 7803-5293.
- [11] เฉลิมพล คงเขียว. "เทคนิคการตรวจวัดความบกพร่องทางไฟฟ้าของมอเตอร์ด้วยการสั่นสะเทือนที่แกนเพลลา"การประชุมวิชาการทาง วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่6, 2551.
- [12] Zhang Fengge, "Analysis of Vibration Modes for Large Induction Motor", in *Proc. 2004 IEEE Transactions.*
- [13] Mariana Iorgulescu, "Rotor bars diagnosis in single phase induction motor based on the vibration and current spectrum analysis", OPTIM, in *Proc. 2010 IEEE Transactions*, vol. 978, pp. 4244-7020.