การตรวจวัดการสั่นสะเทือนเพื่อตรวจสอบสภาพของชุดบอลสกรูขับเคลื่อนแกนของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี

CNC Machines Axes Ball Screw System Vibration Monitoring for Defect Diagnosis

กัมพล บัวพรหม[1*], ชนะ รักษ์ศิริ [2]

[1] ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
[2] ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900
*ติดต่อ: e-mail : kpb_tradss@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์ : 089-051-8268,

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับบอลสกรูในรูปแบบต่างๆของเครื่องจักรกล จากการวัดการสั่นสะเทือนของชุดบอลสกรู โดยการสร้างแบบจำลองชุดการเคลื่อนที่ของบอลสกรูและทำให้มีความเสียหายเกิดขึ้น จากนั้นใช้โปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของบอลสกรู ผลที่ได้มาจะอยู่ในรูปแบบของกราฟ แอมพริจูด เทียบกับ เวลา จากนั้นใช้ทฤษฎี การแปลงฟูริเยร์อย่างเร็ว ทำการแปลงผลที่ได้ให้อยู่ในรูปแบบของกราฟ แอมพริจูด เทียบกับ ความถี่ เรียกว่า สเปกตรัม เมื่อได้แบบจำลองที่ถูกต้องแล้วทำการใส่รูปแบบความเสียหายมากกว่าหนึ่งรูปแบบลงในแบบจำลอง ผลที่ได้ออกมาจากการทดสอบนั้นจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับบอลสกรูในรูปแบบต่างๆกับกราฟของความถี่ ซึ่งจะสามารถทำให้ทราบถึงความเสียหายภายในบอลสกรูได้โดยไม่จำเป็นต้องถอดชิ้นส่วนต่างๆออกมาตรวจสอบ ทำให้การประเมินความเสียหายและการซ่อมบำรุงง่ายและรวดเร็วมากขึ้น

คำหลัก: บอลสกรู, การสั่นสะเทือน, ลูกปืน

Abstract

This research objective to understand the damage that occurred to the ball screw in different forms.By measuring the vibration of the ball screw. By modeling the movement of ball screw and thus damage occurs. The result will come in the form of graphs amplitude vs. time. The theory The fast Fourier transform to convert the result in the form of graphs amplitude vs. frequency. Called is “spectrum”. When the model is correct, then insert more than one form of damage to the model. The results from the test will be the relationship of the damage that occurred to the ball screws in various formats with graphs of frequency. Which will be made known to damage the ball screw without the need to disassemble the parts to check. Make an assessment of the damage and maintenance easier and faster.

Keywords: ballscrew, vibration, bearing

1. บทนำ

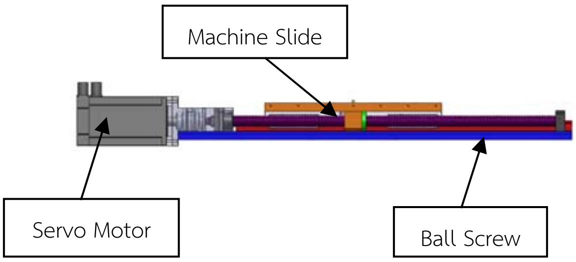
จากการศึกษาพบว่าประเทศไทยมีการนำเข้าเครื่องจักรกลสำเร็จรูปทั้งเครื่องเก่าและเครื่องใหม่จำนวนมาก สมาคมเครื่องจักรกลไทยได้ประเมินไว้ว่ามีเครื่องจักรกลที่มีอายุการใช้งานเกินกว่าสิบปีขึ้นไปและมีสมรรถนะต่ำกว่าความต้องการของผู้ใช้จำนวนหลายหมื่นเครื่องในประเทศไทย ดังนั้นหากประเทศไทยสามารถนำเครื่องจักรกลซีเอ็นซีเหล่านั้นมาทำการฟื้นฟูสภาพ (retrofitting) ให้มีสมรรถนะตรงตามความต้องการของผู้ประกอบการไทยได้จะส่งผลให้สามารถลดปริมาณการนำเข้าเครื่องจักรกลซีเอ็นซีสำเร็จรูปเครื่องใหม่ลงได้ และยังส่งผลทางอ้อมในการพัฒนาขีดความสามารถในการ

ออกแบบและสร้างเครื่องจักรกลซีเอ็นซีเองได้ในอนาคตอีกด้วย จากการศึกษาพบว่าชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางกลที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีมากที่สุด คือ ชุดบอลสกรู (Ball Screw) ซึ่งต้องใช้งบประมาณและความสามารถในการถอดและประกอบติดตั้งสูง ดังนั้น บริษัทไทยอาร์แอนด์ดีโซลูชั่นส์ จำกัด จึงมีความคิดที่จะทำการวิจัยและพัฒนา วิธีการและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพของชุดบอลสกรูขับเคลื่อนแกนของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี ว่ามีสภาพควรเปลี่ยนทั้งระบบหรือเปลี่ยนบางส่วน ก็จะทำให้การประเมินความคุ้มค่าในการฟื้นฟูสภาพเครื่องจักรกลซีเอ็นซีมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะทำการตรวจวัดผลของการสั่นสะเทือนในการเคลื่อนที่เพื่อใช้เป็นดัชนีในการวิเคราะห์ตัดสินใจว่า ควรเปลี่ยนทั้งระบบหรือซ่อมเฉพาะส่วนของบอลสกรู

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

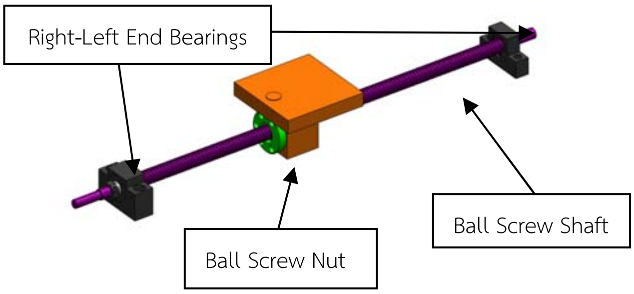
2.1 การทำงานและส่วนประกอบของชุดบอลสกรู

บอลสกรูเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากในเครื่องจักรกลซีเอ็นซี เป็นส่วนที่แปลงการเคลื่อนที่เชิงมุมของเซอร์โวมอเตอร์เป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น ทำให้โต๊ะยึดชิ้นสามารถเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแนวแกนได้ดังรูปที่ 1



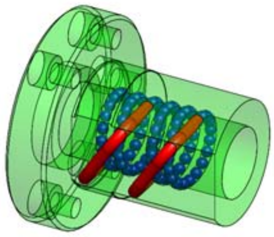
รูปที่ 1 หลักการทำงานของบอลสกรู

ชุดบอลสกรูจะประกอบด้วย Right-Left End Bearings, Ball Screw Shaft และ Ball Screw Nut ภายใน Right-Left End Bearings จะมีเม็ดลูกปืนเม็ดกลมที่รับภาระได้ทั้งในแนวแกนและในแนวรัศมี ทำให้การเคลื่อนที่ได้อย่างมั่นคง ดังรูปที่ 2



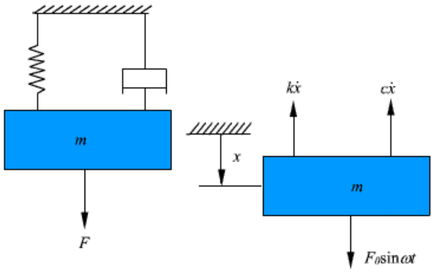
รูปที่ 2 ส่วนประกอบของบอลสกรู

ภายใน Ball Screw Nut จะมีเม็ดลูกปืนกลมเคลื่อนที่อยู่ภายในร่องของ Ball Screw Shaft เพื่อส่งถ่ายแรงในการเคลื่อนที่ให้ Ball Screw Nut เคลื่อนที่พาโต๊ะยึดชิ้นงานไปยังตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 4 ส่วนประกอบภายในของชุด Ball screw Nut

2.2 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน



รูปที่ 5 ระบบการสั่นสะเทือนโดยมีแรงภายนอกกระทำ

การสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงภายนอกกระทำต่อระบบ ดังรูปที่ 5 สมการการเคลื่อนที่ของระบบสามารถเขียนโดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตั้นได้เป็น

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=F_0\sin\omega t \qquad (1)$$

เมื่อ k เป็นค่าความแข็งของสปริง

c เป็นค่าความหน่วงของการเคลื่อนที่

$F_0\sin\omega t$ เป็นแรงภายนอกที่มากระทำ

ในการเคลื่อนที่คงตัว (Steady State Motion) สามารถเขียนได้เป็น

$$x=X\sin(\omega t-\phi) \qquad (2)$$

เมื่อ x คือ ขนาดการสั่นสะเทือน

ϕ คือ มุมเฟส

สามารถเขียนในรูปของเทอมไร้มิติได้เป็น

$$X=\frac{F_0/k}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2+\left[2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} \qquad (3)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left[\frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}\right] \quad (4)$$

โดยที่ ω_n เป็นความถี่ธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{k}{m}}$

c_c เป็นค่าความหน่วงวิกฤติ มีค่าเท่ากับ $2\sqrt{km}$

ζ เป็นค่าอัตราส่วนความหน่วง มีค่าเท่ากับ c/c_c

ผลจากการแก้สมการจะได้ว่า

- ขนาดของการสั่นสะเทือนจะมีค่ามากขึ้น ถ้าอัตราส่วนความหน่วงมีค่าลดลง

- ขนาดของอัตราส่วนความถี่มีผลต่อขนาดของการสั่นสะเทือนเป็นอย่างมาก

- เมื่อความถี่ของแรงภายนอกมีค่าน้อยกว่าความถี่ธรรมชาติมาก อัตาส่วนความหน่วงจะมีผลต่อขนาดของการสั่นสะเทือนน้อยมาก

- เมื่อความถี่ของแรงภายนอกมีค่ามากกว่าความถี่ธรรมชาติมาก ผลการตอบสนองจะมีขนาดค่อนข้างเล็ก

- เมื่อความถี่ของแรงภายนอกมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติ ขนาดของการสั่นสะเทือน X จะมีค่าเท่ากับ $F_0/(2\zeta k)$

- เมื่อความถี่ของแรงภายนอกมีค่าน้อยกว่าความถี่ธรรมชาติมาก การตอบสนองจะมีค่ามุมเฟสน้อยกว่า 90 องศา

- เมื่อความถี่ของแรงภายนอกมีค่ามากกว่าความถี่ธรรมชาติมาก การตอบสนองจะมีค่ามุมเฟสเข้าใกล้มุม 180 องศา

- เมื่อความถี่ของแรงภายนอกมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติ การตอบสนองจะมีค่ามุมเฟสเป็น 90 องศา นั่นคือการสั่นสะเทือนจะเกิดตามหลังแรงเป็นมุม 90 องศา

2.3 การแปลงสัญญาณแบบฟูเรียร์

ในการวัดการสั่นสะเทือนนั้น สัญญาณการสั่นสะเทือนจะอยู่ในรูปแบบของกราฟโดเมนเวลา ซึ่งแกนตั้งจะเป็นขนาดของการสั่นสะเทือน ส่วนแกนนอนจะเป็นแกนของเวลา ทำให้วิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดจากส่วนประกอบต่างๆภายในเครื่องจักรได้ค่อนข้างยาก เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์ ทำได้โดยการแปลงกราฟจากรูปแบบโดเมนของเวลาเป็นกราฟรูปแบบโดเมนของความถี่ เรียกว่า การแปลงสัญญาณแบบฟูเรียร์ (Fourier Transform) หรือเรียกอีกอย่างว่า กราฟสเปกตรัม สามารถเขียนสมการความถี่ $f(t)$ ในรูปแบบสมการฟูเรียร์ (Fourier Transform) ได้ดังนี้

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos(\omega_k t) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin(\omega_k t) \quad (5)$$

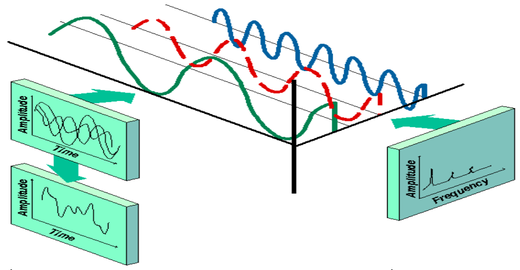
และค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆหาได้จาก

$$A_0 = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} f(t)dt \quad (6)$$

$$a_k = \frac{2}{T_0}\int_0^{T_0} f(t)\cos(k\omega_0 t)dt \quad (7)$$

$$b_k = \frac{2}{T_0}\int_0^{T_0} f(t)\sin(k\omega_0 t)dt \quad (8)$$

ความสัมพันธ์ของกราฟบนโดเมนเวลาและกราฟบนโดเมนความถี่กับขนาดของการสั่นสะเทือนแสดงได้ดังรูปที่ 6 จะเห็นว่าแกนนอนด้านซ้ายจะเป็นแกนของเวลา ส่วนแกนนอนด้านขวาจะเป็นแกนของความถี่ ถ้ามองในแกนนี้จะเห็นเป็นกราฟสเปกตรัม ส่วนแกนตั้งจะเป็นขนาดของการสั่นสะเทือนที่ใช้ร่วมกัน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์แบบ 3 มิติของการสั่นสะเทือน

2.4 การวัดการสั่นสะเทือน

ในปัจุบันมีรูปของการวัดที่นิยมใช้กันอยู่ 3 รูปแบบ คือ

2.4.1 การวัดการสั่นสะเทือนแบบระยะทาง คือ การวัดการเคลื่อนที่จากจุดที่สูงที่สุดไปยังจุดที่ต่ำที่สุดของวัตถุนั้นๆ (Peak to Peak)

2.4.2 การวัดการสั่นสะเทือนแบบความเร็ว คือ การวัดความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมา โดยความเร็วสูงสุดขณะเคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุล โดยมีความสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่ดังสมการ

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (9)$$

2.4.3 การวัดการสั่นสะเทือนแบบความเร่ง คือ การวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมา โดยมีความเร่งสูงสุดขณะอยู่ในตำแหน่งสูงสุดและต่ำสุดจากจุดสมดุล โดยมีความสัมพันธ์กับระยะการเคลื่อนที่และความเร็วดังสมการ

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (10)$$

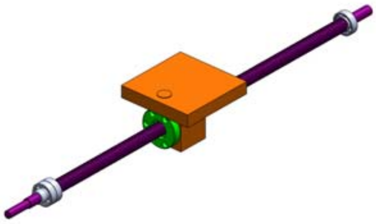
3. อุปกรณ์และวิธีดำเนินวิจัย

3.1 อุปกรณ์

- Computer Note Book
- โปรแกรม Solid Work Version 2012
- โปรแกรม MSC Adam Version 2012
- บอลสกรูของ Hiwin โมเดล FSV20-5C1

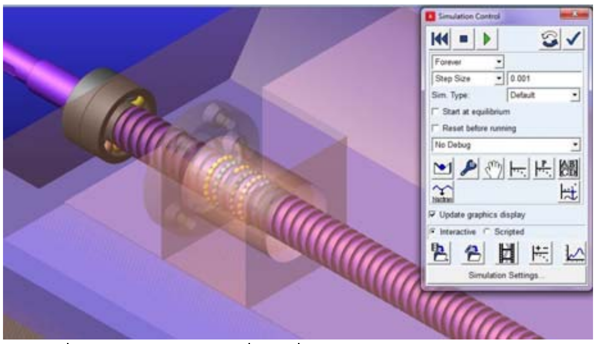
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ทำการสร้างแบบจำลองของบอลสกรู โดยวัดขนาดตามแบบของบอลสกรูของ Hiwin โมเดล FSV20-5C1 ที่มีขนาดความโตของ Ball Screw Shaft 20 mm. ระยะpitch 5.0 mm.โดยใช้โปรแกรม Solid Work Version 2012 ดังรูปที่ 7

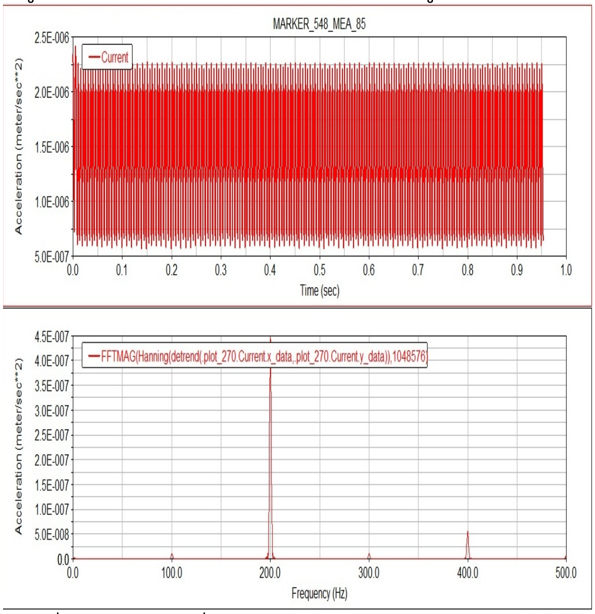


รูปที่ 7 แบบจำลองบอลสกรู Hiwin โมเดล FSV20-5C1

3.2.2 จำลองการเคลื่อนที่ของบอลสกรูในสภาพปกติ โดยใช้โปรแกรม MSC Adam Version 2012 โดยทำให้บอลสกรูเคลื่อนที่ด้วยความเร็วรอบการหมุนที่ 100 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 8 จากนั้นทำการวัดการสั่นสะเทือนที่จุดบน Machine Slide ได้ผลการวัดออกมาในรูปแบบของกราฟโดเมนของเวลา และแปลงค่าจากกราฟโดเมนของเวลา ให้อยู่ในรูปของโดเมนของความถี่ ใช้ทฤษฎี การแปลงฟูริเยร์อย่างเร็ว ดังรูปที่ 9

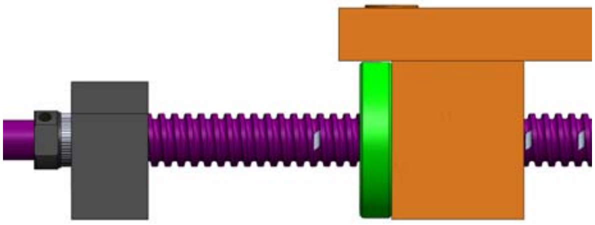


รูปที่ 8 จำลองการเคลื่อนที่ของบอลสกรูในสภาพปกติ



รูปที่ 9 กราฟการสั่นสะเทือนของบอลสกรูในสภาพปกติ

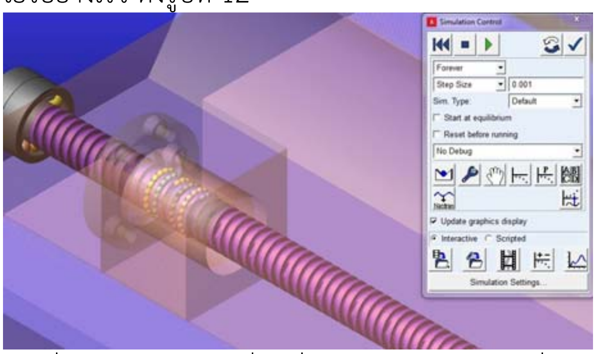
3.2.3 ทำให้แบบจำลองของบอลสกรูให้เกิดความเสียหายแบบที่ 1 โดยทำให้ Ball Screw Shaft เกิดเป็นร่องลึกบริเวณของร่องที่ลูกปืนภายใน Ball Screw Nut วิ่งผ่าน ดังรูปที่ 10



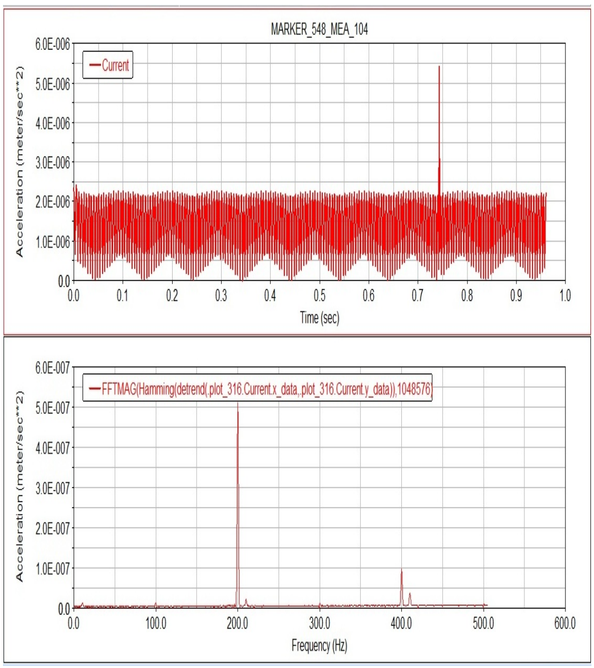
รูปที่ 10 เกิดความเสียหายที่ Ball Screw Shaft

3.2.2 จำลองการเคลื่อนที่ของบอลสกรูในสภาพที่เกิดร่องลึกที่ Ball Screw Shaft โดยทำให้บอลสกรูเคลื่อนที่ด้วยความเร็วรอบการหมุนที่ 100 รอบต่อนาที

ดังรูปที่ 11 จากนั้นทำการวัดการสั่นสะเทือนที่จุดบน Machine Slide ได้ผลการวัดออกมาในรูปแบบของกราฟโดเมนของเวลา และแปลงค่าจากกราฟโดเมนของเวลาให้อยู่ในรูปของโดเมนของความถี่ ใช้ทฤษฎี การแปลงฟูริเยร์อย่างเร็ว ดังรูปที่ 12

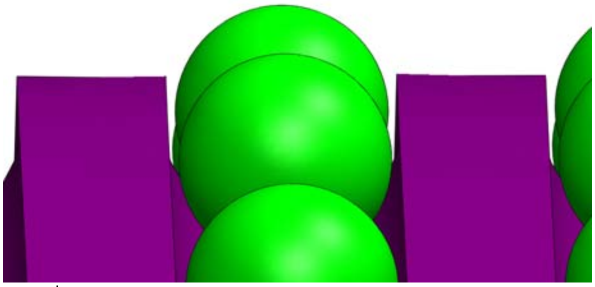


รูปที่ 11 จำลองการเคลื่อนที่ของบอลสกรูในสภาพที่เกิดร่องลึกที่ Ball Screw Shaft



รูปที่ 12 กราฟการสั่นสะเทือนของบอลสกรูในสภาพที่เกิดร่องลึกที่ Ball Screw Shaft

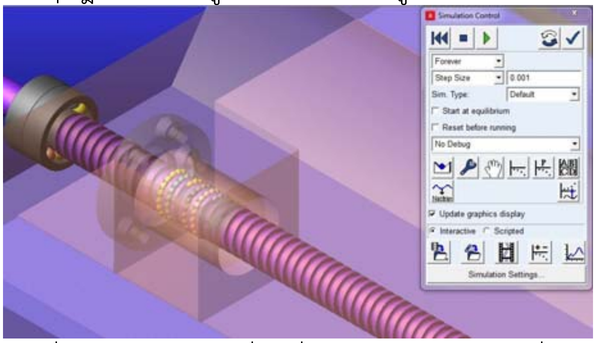
3.2.3 ทำให้แบบจำลองของบอลสกรูให้เกิดความเสียหายแบบที่ 2 โดยทำให้เม็ดลูกปืนที่อยู่ภายในของ Ball Screw Nut มีขนาดเล็กลง 25 ไมคอน ดังรูปที่ 13



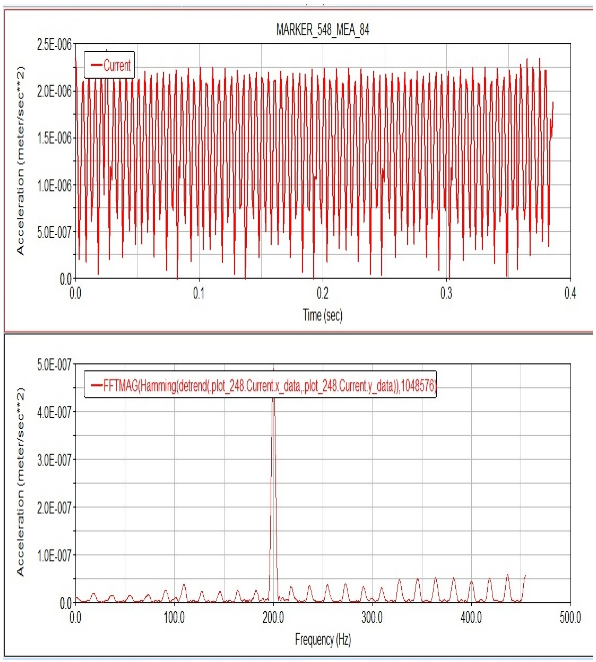
รูปที่ 13 เม็ดลูกปืนมีขนาดเล็กกว่าร่องของ Ball Screw Shaft

3.2.2 จำลองการเคลื่อนที่ของบอลสกรูในสภาพที่เม็ดลูกปืนมีขนาดเล็กกว่าร่องของ Ball Screw Shaft

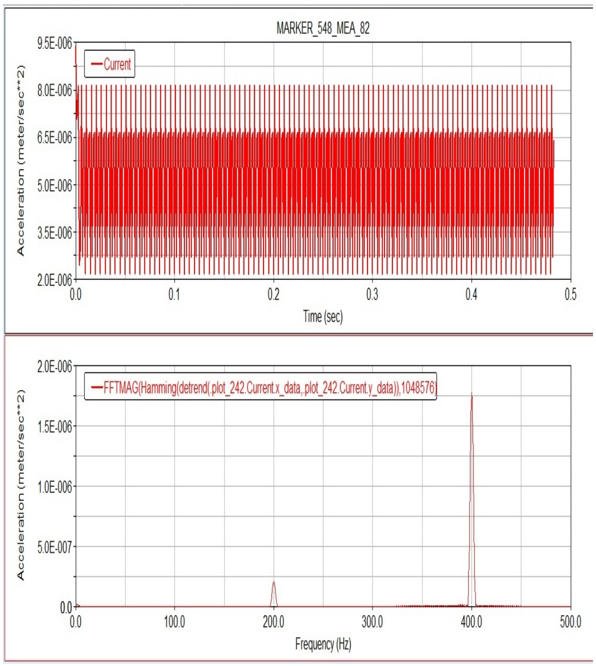
โดยทำให้บอลสกรูเคลื่อนที่ด้วยความเร็วรอบการหมุนที่ 100 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 14 จากนั้นทำการวัดการสั่นสะเทือนที่จุดบน Machine Slide ได้ผลการวัดออกมาในรูปแบบของกราฟโดเมนของเวลาและแปลงค่าจากกราฟโดเมนของเวลา ให้อยู่ในรูปของโดเมนของความถี่ ใช้ทฤษฎี การแปลงฟูริเยร์อย่างเร็ว ดังรูปที่ 15



รูปที่ 14 จำลองการเคลื่อนที่ของบอลสกรูในสภาพที่เม็ดลูกปืนมีขนาดเล็กกว่าร่องของ Ball Screw Shaft

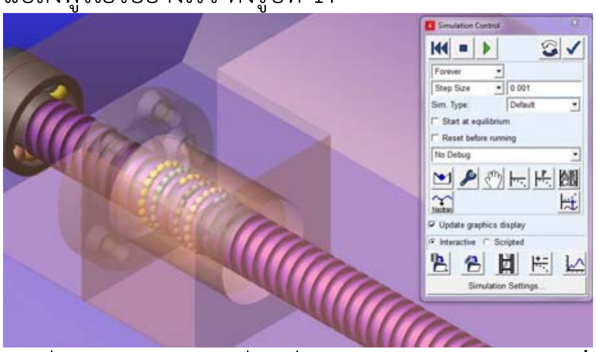


รูปที่ 15 กราฟการสั่นสะเทือนของบอลสกรูในสภาพที่เม็ดลูกปืนมีขนาดเล็กกว่าร่องของ Ball Screw Shaft



รูปที่ 17 กราฟการสั่นสะเทือนของบอลสกรูในสภาพสภาพปกติ**ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที**

3.2.2 จำลองการเคลื่อนที่ของบอลสกรูในสภาพปกติ โดยใช้โปรแกรม MSC Adam Version 2012 โดยทำให้บอลสกรูเคลื่อนที่ด้วยความเร็วรอบการหมุนที่ 200 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 16 จากนั้นทำการวัดการสั่นสะเทือนที่จุดบน Machine Slide ได้ผลการวัดออกมาในรูปแบบของกราฟโดเมนของเวลาและแปลงค่าจากกราฟโดเมนของเวลา ให้อยู่ในรูปของโดเมนของความถี่ ใช้ทฤษฎี การแปลงฟูริเยร์อย่างเร็ว ดังรูปที่ 17



รูปที่ 16 จำลองการเคลื่อนที่ของบอลสกรูในสภาพปกติ**ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที**

จากการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของชุดบอลสกรูในสภาพปกติ คือไม่มีความเสียหายใดๆเกิดขึ้นกับในสภาพที่ไม่ปกติคือมีความเสียหายที่เกิดกับ Ball Screw Shaft โดยเกิดเป็นร่องลึกภายในร่องที่เม็ดลูกปืนภายใน Ball Screw Nut วิ่งผ่าน และเกิดความผิดปกติกับเม็ดลูกปืนภายใน Ball Screw Nut โดยที่ขนาดของเม็ดลูกปืนมีขนาดเล็กกว่าร่องของ Ball Shaft อยู่ 25 ไมคอน สัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดออกมาได้นั้นมีความแตกต่างกัน

4.สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากผลการวิจัยทำให้ทราบว่าหากเกิดความผิดปกติกับชุดบอลสกรูจะทำให้สัญญาณการสั่นสะเทือนที่อยู่ในรูปแบบของกราฟในโดเมนของความถี่ หรือกราฟสเปกตรัม มีความแตกต่างกัน ทำให้สามารถนำผลจากกราฟนี้ ไปทำนายความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชุดบอลสกรูได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนในการวิจัยจาก สกว.-อุตสาหกรรม ประจำปี 2555 และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และบริษัทไทยอาร์แอนดีโซลูชั่นจำกัด รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความร่วมมือ และ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ชนะ รักษ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ค่อยให้คำปรึกษา แนะนำ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

7.1 บทความจากวารสาร (Journal)

[1] Jerzy Z. Sobolewski. Vibration of the ball screw drive. Institute of Machine Design Fundamentals, Warsaw University and Technology, Narbutta 84, 02-524 Warsaw, Poland

[2] A. Garinei, R. Marsili. A new diagnostic technique for ball screw actuators. DMII. Universita degli Guglielmo Marconi, Roma 00193, Italy, DII, Universita degli Studi di Perugia 06125, Italy

[3] Xuesong Mei, Masaomi Tsutsumi, Tao Tao, Nuogang Sun, Study on the load distribution of ball screws with error, Department of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, PR Chaina, Bio Application of System Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo, 184-8858, Japan.

[4] A. Kamalzadeh, K. Erkorkmaz. Compensation of Axial Vibrations in Ball Screw Drives. Precision Controls Laboratory, Department of Mechanical and Mechatronics Engineering University of Waterloo, Waterloo, Canada

7.2 หนังสือ

[1] Thomson, William T. Theory of Vibrations with Applications. Prentice Hall, Inc. 2 nd Edition, 1981

[2] Bruel & Kjaer. Mechanical Vibration and Shock Measurements, April 1984

[3] ก่อเกียรติ บุญชูกุศล และคณะ. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน. กรุงเทพ. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2540