

การสั่นสะเทือนภายใต้การหมุนไม่สมดุลกับค่าเหมาะสมตัวดูดซับ
ด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค

VIBRATION UNDER ROTATING UNBALANCE WITH OPTIMAL
ABSORBER USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION METHOD

พุดธา จินครวั

Puttha Jeenkour

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี ประเทศไทย 20131

Faculty of Engineering, Burapha University, Muang, Chonburi, Thailand, 20131

Corresponding author e-mail: puttha@eng.buu.ac.th

วันที่รับระบบ 18 เมษายน 2566

วันที่แก้ไขบทความ 24 พฤศจิกายน 2566

วันที่ตอบรับบทความ 26 พฤศจิกายน 2566

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการสั่นสะเทือนภายใต้การหมุนที่ไม่สมดุลโดยเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและโมเดลทางคณิตศาสตร์ ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมที่สุดสามารถแก้ปัญหาโดยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค ชุดทดสอบเป็นคานที่ปลายด้านหนึ่งยึดกับสลัก ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งติดตั้งมอเตอร์หมุนที่ไม่สมดุล ตัวสปริงและตัวหน่วง การวัดการสั่นสะเทือนดำเนินการโดยใช้หัววัดความเร่งโมดูล ADXL345 ที่ต่อกับบอร์ดอา두โนชนิด MEGA 2560 R3 ประมวลผลและส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกผลเป็นข้อมูลโดเมนของเวลาและโดเมนความถี่ ผลการศึกษาพบว่าโมเดลทางคณิตศาสตร์ให้ค่าผลการตอบสนองการสั่นในรูปแบบความเร่งที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองเมื่อกำหนดค่าอัตราส่วนความหน่วงเป็น 0.1 ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 220 rpm การประยุกต์ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคมีประสิทธิภาพที่จะหาค่าตัวดูดซับการสั่นสะเทือนและเมื่อระบบประกอบด้วยตัวดูดซับการสั่นสะเทือนผลแสดงให้เห็นว่าแอมพลิจูดความเร่งของการสั่นที่มอเตอร์ไม่สมดุลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: ค่าที่เหมาะสมที่สุด, กลุ่มอนุภาค, ตัวดูดซับการสั่น, การหมุนที่ไม่สมดุล

Abstract

This paper presents the study of vibrations under rotating unbalance, comparing the results between the experiment and the mathematical model. The optimal vibration absorber can be solved using the particle swarm optimization (PSO) method. The test unit is a beam with a pinned support. The unbalanced motor, a spring and a damper are attached to another end beam. The vibration measurement is performed with the ADXL345 accelerometer, which is connected to the MEGA 2560 R3 board. The data is processed and sent to the computer to record the results in the time domain and frequency domain. The results show that the mathematical model has a similar acceleration behavior to the experimental results at a damping ratio of 0.1 and a motor speed of 220 rpm. The particle swarm optimization method is effective for determining the vibration absorber. If the system consists of a vibration absorber, the results show that the amplitude of vibration acceleration decreases significantly with an unbalanced motor.

Keywords: Optimization, Particle swarm, Absorber, Rotational unbalance

1. บทนำ

การสั่นเนื่องจากการหมุนที่ไม่สมดุลนั้นเป็นปัญหาที่สำคัญที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนทางกลที่เคลื่อนที่แบบเชิงมุมอันเนื่องมาจากชิ้นส่วนมีการสึกหรอ (Wear) หรือเกิดการการผลิตที่ไม่ได้มาตรฐานทำให้เมื่อนำมาประกอบและทำงานจึงเกิดการสั่นในระดับที่เกินค่าที่ยอมรับได้ ในอุตสาหกรรมวิศวกรรมบำรุงรักษาจำเป็นที่จะต้องตรวจวัดค่าการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรและวิเคราะห์ผลอยู่ตลอดเวลาเพื่อวางแผนในการดำเนินการซ่อมบำรุง ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนและการลดการสั่นสะเทือนเนื่องจากการหมุนที่ไม่สมดุลจึงมีความสำคัญ อย่างไรก็ตามการศึกษาเพียงภาคทฤษฎีนั้นส่วนใหญ่ไม่เห็นภาพถึงปรากฏการณ์อย่างชัดเจน ดังนั้นการใช้ชุดเครื่องมือทดสอบจึงทำให้เข้าใจได้ดียิ่งขึ้น (วีรพล และคณะ, 2556) สำหรับเครื่องมืออุปกรณ์ที่มีอยู่ในท้องตลาดที่สามารถวัดได้ละเอียดและแสดงผลเป็นโดเมนความถี่หรือสเปกตรัมนั้นมีราคาแพงดังนั้นเพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายในการสร้างชุดทดสอบการสั่นสะเทือนเนื่องจากการหมุนที่ไม่สมดุลอย่างง่ายและชุดเครื่องมือวัดความเร่งพร้อมกับการเขียนโปรแกรมเพื่อแปลงค่าจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่จึงถูกพัฒนาขึ้น สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการสั่นสะเทือนทางกลและการวัดการสั่นสะเทือนสามารถที่จะสรุปได้ดังนี้

การวัดการสั่นสะเทือนโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 Version 1.58 ถูกนำมาใช้เพื่อวัดการสั่นสะเทือนของพื้นผิวถนนยางมะตอย (นิธิโรจน์, 2561) การศึกษาแสดงให้เห็นว่า

ชุดการวัดดังกล่าวสามารถที่จะวัดความถี่ได้ตั้งแต่ 10-1,000 Hz และสามารถที่จะประมวลผลเป็นแรงที่กระทำกับพื้นถนนได้ สมศักดิ์ (2562) ได้นำเสนอการวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืนโดยการวิเคราะห์ความถี่ โดยในบทความได้นำเสนอการวิเคราะห์ความถี่โดยการใช้เครื่องวัด Spectrum Analysis & Field Balancing ความถี่ที่ถูกนำมาวิเคราะห์นั้นจะมีค่าตั้งแต่ 7 -140 Hz จากนั้นการศึกษารณวิเคราะห์หารูปแบบโดเมนความถี่ของตลับลูกปืนที่ขาดสารหล่อลื่นได้ถูกนำเสนอ โดยทำการวัดสัญญาณการสั่นในรูปโดเมนเวลาที่มีค่า sampling rate 51.2 kHz (กิตติพงศ์ และ พุทธา, 2564) จากนั้นพบว่าหัววัดความเร่งสามแกนรุ่น ADXL345 ได้ถูกนำมาใช้เพื่อที่จะติดตามการสั่น (Holovatyy *et al.*, 2017) ในบทความได้อธิบายถึงประสิทธิภาพของหัววัด การสอบเทียบ และค่า Sampling rate ของค่าความเร่งจากการสั่นที่เหมาะสมสำหรับโหมดมาตรฐาน สำหรับงานวิจัยที่ได้ศึกษาการลดการสั่นสะเทือนสามารถที่จะสรุปได้ดังนี้ หลักการของตัวดูดซับการสั่นได้ถูกนำมาติดที่ไม้เทนนิส (เมชันท์ และคณะ, 2563) โดยทำการศึกษการสั่นที่เกิดขึ้นที่ด้ามจับในกรณีการเสิร์ฟโดยลูกเทนนิสกระทบกับไม้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เซนเซอร์วัดแรง Flexi-force sensor โดยส่งสัญญาณไร้สายและใช้การแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) วิเคราะห์ความถี่ที่เกิดขึ้นกับไม้เทนนิส งานวิจัยโดยการสร้างตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้ถูกนำเสนอ (สุรัตน์, 2557) โดยตัวดูดซับการสั่นจะปรับค่าโดยใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ จากการศึกษาการใช้ตัวดูดซับการสั่นสะเทือนสามารถที่จะลดการสั่นได้ กลไกแยกการสั่นสะเทือนโดยใช้สปริงลมที่ความถี่ต่ำได้ถูกนำเสนอ (พงษ์พันธ์ และประเสริฐ, 2552) โดยศึกษาที่ความถี่ 1-5 Hz และปรับแรงดันลมระหว่าง 2-4 bar และการสร้างแรงการสั่นสะเทือนกระทำกับโครงสร้างโดยใช้ลำโพง กลไกดังกล่าวสามารถที่จะลดแรงการสั่นสะเทือนได้ งานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีกลุ่มอนุภาคสรุปได้ดังนี้ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ได้ถูกศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีอัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งเทียม (Artificial bee colony algorithm, ABC) (ลัดนา และจักรพันธ์, 2562) โดยทดสอบกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาตรฐาน 8 ฟังก์ชัน และทดสอบที่ตัวแปรออกแบบ 1 ตัวแปร ผลแสดงให้เห็นว่าวิธีแบบกลุ่มอนุภาคจะลู่เข้าคำตอบได้เร็วกว่าเมื่อทดสอบใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบ Rosenrock และ Schwefel วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคได้ประยุกต์ใช้ในการจัดการจราจรข้อมูลในเครือข่ายไอเอสพีเอฟ (กายรัฐ, 2558) อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบพบว่ามีงานวิจัยจำนวนน้อยได้ใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคกับการหาค่าตัวดูดซับการสั่นสะเทือน

สำหรับบทความนี้ชุดทดสอบอย่างง่ายได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อศึกษาการสั่นสะเทือนเนื่องจากการหมุนที่ไม่สมดุล โดยการศึกษาการสั่นสะเทือนได้เลือกใช้หัววัดความเร่งสามแกนรุ่น ADXL345 ร่วมกับบอร์ดอาดูโนรุ่น MEGA 2560 R3 ในบทความนี้ได้เปรียบเทียบการสั่นสะเทือนกรณีติดตัวดูดซับการสั่นสะเทือนกับกรณีที่ไม่มีตัวดูดซับการสั่นสะเทือน สำหรับตัวดูดซับการสั่นสะเทือนได้ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle swarm optimization method,

PSO) ในการออกแบบหาค่าคงที่สปริงและมวล สำหรับวิธีแบบกลุ่มอนุภาคเป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ไม่ต้องหาค่าอนุพันธ์ของสมการเป้าหมายซึ่งมีความแตกต่างจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบดั้งเดิม

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

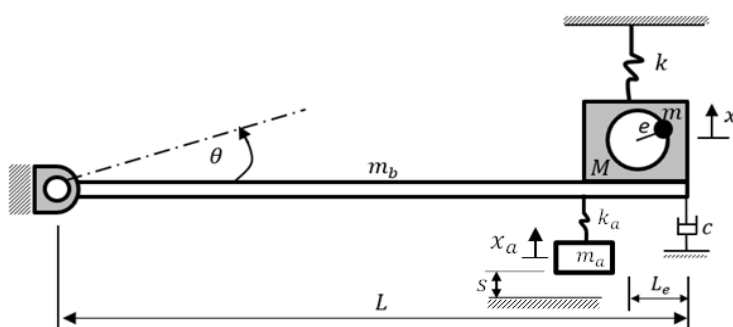
- 2.1 เพื่อศึกษาการสั่นเนื่องจากการหมุนที่ไม่สมดุลทั้งโมเดลทางคณิตศาสตร์และทดลอง
- 2.2 เพื่อศึกษาวิธีการลดการสั่นเนื่องจากการหมุนที่ไม่สมดุลด้วยตัวดูดซับการสั่น
- 2.3 เพื่อทดสอบวิธีการหาค่าเหมาะสมด้วยตัวดูดซับการสั่นด้วยวิธีการคำนวณหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคสำหรับพัฒนาระบบการควบคุมการสั่นแบบอัตโนมัติต่อไป

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

สำหรับวิธีดำเนินการวิจัยจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ (1) การคำนวณเชิงตัวเลขหาผลการตอบสนองการสั่นในรูปความเร่งและคำนวณหาขนาดตัวดูดซับการสั่นด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกลุ่มอนุภาค และ (2) จะเป็นการทดสอบการสั่นด้วยชุดทดสอบการหมุนที่ไม่สมดุล

3.1 การคำนวณเชิงตัวเลข

ภาพที่ 1 แสดงแบบจำลองชุดทดสอบการสั่นสะเทือนที่ออกแบบเพื่อศึกษาการสั่นเนื่องจากการหมุนที่ไม่สมดุล



ภาพที่ 1 แบบจำลองชุดทดสอบการสั่นสะเทือน

โดยที่มวล M [kg] คือ มวลของมอเตอร์ที่ติดที่ปลายของคาน m [kg] คือ มวลที่ทำให้เกิดการหมุนที่ไม่สมดุลมี โดยมีระยะเยื้องศูนย์ e [m] มอเตอร์จะติดสปริงที่มีค่าคงที่สปริง k [N/m] และตัวหน่วงที่มีค่าคงที่ความหน่วง c [N.s/m] ในขณะที่คานมีมวล m_b [kg] มีความยาว L [m] โดยที่ปลาย

อีกด้านหนึ่งถูกรองรับแบบสลัก (Pinned end) ซึ่งทำให้คานาหมุนได้อิสระตามทิศทางมุม θ [rad] และระยะ L_e [m] เป็นระยะจากจุดศูนย์กลางมอเตอร์ไปที่ปลายอิสระของคานา ระบบจะเกิดการสั่นเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนด้วยความเร็วรอบ ω [rad/s] ดังนั้นจำลองระบบให้เป็นระบบหนึ่งตัวแปรอิสระ, x (One degree of freedom) ในรูปแบบการเคลื่อนที่เชิงเส้นในแนวดิ่งของจุดศูนย์กลางมวลมอเตอร์สำหรับในกรณีที่ยังไม่ติดตัวดูดซับการสั่น ($m_a - k_a$) โดยที่ m_a [kg] คือ มวลตัวดูดซับการสั่นและ k_a [N/m] คือค่าคงที่สปริงของตัวดูดซับการสั่น สมการการเคลื่อนที่ของระบบสามารถที่จะเขียนขึ้นโดยใช้สมการของ Lagrange ตามที่แสดงในสมการที่ (1) ตัวแปร t [s] คือเวลา และตัวแปร x_i [m], $\dot{x}_i$ [m/s] คือ การกระจัดและความเร็วเชิงเส้นของมอเตอร์ ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{dT}{d\dot{x}_i} \right) - \frac{dT}{dx_i} + \frac{dR}{dx_i} + \frac{dV}{dx_i} = F_i \quad (1)$$

โดยที่ T คือ พลังงานจลน์ของระบบ V คือ พลังงานศักย์ของระบบ R คือ ฟังก์ชันกระจายของ Rayleigh (Rayleigh's dissipation function) ซึ่งมีค่าสัมพันธ์กับตัวหน่วงและความเร็ว และ F คือแรงที่เกิดจากการหมุนที่ไม่สมดุล ดังนั้นเมื่อแทนค่าดังกล่าวข้างต้นลงในสมการที่ (1) สมการการเคลื่อนที่ที่จะอยู่ในรูปแบบตามสมการที่ (2) โดยที่ค่า c_t คือ ค่าความหน่วงเนื่องจากแรงเสียดทานที่จุดยึดด้วยสลักและ c คือค่าคงที่ความหน่วงจากกระบอกลูกสูบที่บรรจุของเหลว

$$\left\{ \frac{7}{12} \left(\frac{L}{L-L_e} \right)^2 m_b + M + m \right\} \frac{d^2x}{dt^2} + \left\{ c \left(\frac{L}{L-L_e} \right)^2 + c_t \left(\frac{1}{L-L_e} \right) \right\} \frac{dx}{dt} + kx = m\omega^2 \sin(\omega t) \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio, ξ) ของระบบจะคำนวณได้ตามสมการที่ (3)

$$\xi = \frac{\left(c \left(\frac{L}{L-L_e} \right)^2 + c_t \left(\frac{1}{L-L_e} \right) \right)}{2 \sqrt{\left(\frac{7}{12} \left(\frac{L}{L-L_e} \right)^2 m_b + M + m \right) k}} \quad (3)$$

อย่างไรก็ตามเมื่อติดตัวดูดซับการสั่น (Vibration absorber, $m_a - k_a$) ระบบจะถูกจำลองเป็นระบบสองตัวแปรอิสระ (Two degree of freedoms) ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ที่สามารถที่จะเขียนได้ตามสมการที่ (4) และ (5) โดยใช้หลักการของสมการของ Lagrange ตัวแปร x_a [m] คือ การกระจัดของมวลตัวดูดซับการสั่น

$$\left\{ \frac{7}{12} \left(\frac{L}{L-L_e} \right)^2 m_b + M + m \right\} \frac{d^2 x}{dt^2} + \left\{ c \left(\frac{L}{L-L_e} \right)^2 + c_t \left(\frac{1}{L-L_e} \right) \right\} \frac{dx}{dt} + \left\{ k + \left(\frac{L-2L_e}{L-L_e} \right)^2 k_a \right\} x - \left(\frac{L-2L_e}{L-L_e} \right) k_a x_a = m e \omega^2 \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$m_a \frac{d^2 x_a}{dt^2} - k_a \left(\frac{L-2L_e}{L-L_e} \right) x + k_a x_a = 0 \quad (5)$$

จากสมการ (4) และ (5) จะนิยามเขียนอยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ ตามที่ได้แสดงในสมการที่ (6)

$$[m]\ddot{x}_i + [c]\dot{x}_i + [k]x_i = f_i \quad (6)$$

โดยที่ $[m]$ $[c]$ และ $[k]$ เป็น เมตริกซ์มวล ตัวหน่วงและค่าคงที่ของสปริง ตามลำดับ การหาผลการตอบสนองการสั่นของการกระจัด ความเร็วและความเร่งของระบบจะถูกคำนวณโดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยวิธีผลต่างสลับเนื่อง (Finite difference method, FDM) โดยอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองในสมการที่ (6) จะถูกประมาณด้วยวิธีผลต่างตรงกลาง (Central difference) ตามสมการที่ (7)

$$\dot{x}_i = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\Delta t} ; \quad \ddot{x}_i = \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{(\Delta t)^2} \quad (7)$$

แทนสมการ (7) ลงใน (6) จะได้เวกเตอร์การกระจัดที่เวลาถัดไปได้ตามสมการที่ (8)

$$x_{i+1} = [A1]^{-1} (f_i - [A2]\dot{x}_i - [A3]x_{i-1}) \quad (8)$$

โดยที่เมตริกซ์ $[A1]$ $[A2]$ และ $[A3]$ หาได้ตามสมการดังนี้

$$[A1] = \left\{ \frac{1}{(\Delta t)^2} [m] + \frac{1}{2\Delta t} [c] \right\}; \quad [A2] = \left\{ \frac{-2}{(\Delta t)^2} [m] + [k] \right\} ; \quad [A3] = \left\{ \frac{1}{(\Delta t)^2} [m] - \frac{1}{2\Delta t} [c] \right\} \quad (9)$$

สำหรับที่เวลาเริ่มต้น $t=0$ หรือที่ $i=0$ ค่า $x_{i-1} = x_{-1}$ ถูกแก้ปัญหโดยการใช้อนุกรมของ Taylor ตามสมการที่ (10)

$$x_{-1} = x_0 - \Delta t \dot{x}_0 + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{x}_0 \quad (10)$$

โดยที่ $\dot{x}_0$, $\ddot{x}_0$ และ $\ddot{x}_0$ เป็นเวกเตอร์การกระจัด ความเร็วและความเร่งเริ่มต้นตามลำดับ สำหรับตัวดูดซับการสั่นนั้นเป้าหมายของการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นคือเพื่อที่จะลดการสั่นสะเทือนที่โครงสร้างหลัก ดังนั้นการออกแบบตัวดูดซับการสั่นนั้นจะใช้วิธีหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ของปัญหาเป็นค่าแอมพลิจูดของการกระจัด (Displacement amplitude) ของโครงสร้างหลักต่ำที่สุด X_{min} ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการการเคลื่อนที่ดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะอยู่ในรูปแบบปัญหาค่าความเหมาะสมที่ต่ำที่สุดตามสมการที่ (11) และมีเงื่อนไขบังคับตามสมการที่ (12)

$$\min: f(x_i) = X \quad (11)$$

$$x_a \leq s \quad ; \quad L_i \leq x_i \leq U_i \quad (12)$$

โดยที่ ตัวแปรออกแบบคือ $x_i = [m_a, k_a]$ ตัวแปร s [m] คือระยะจำกัดที่มวลตัวดูดซับการสั่นจะเคลื่อนที่ได้ L_i และ U_i เป็นค่าจำกัดขอบล่างและขอบบนของตัวแปรออกแบบ สำหรับในบทความนี้ได้ใช้วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบวิถีกุ่มอนุภาค (PSO) สำหรับขั้นตอนในการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคได้ถูกนำเสนอโดย Yang, (2010) และมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดจำนวนอนุภาค จำนวนครั้งในการเคลื่อนที่ของอนุภาคหรือจำนวนการคำนวณซ้ำ (Iterations number) และสุ่มค่าตำแหน่งของอนุภาคและความเร็วของอนุภาคทุกตัวในขอบเขตค้นหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาค (Global best, G^*) สำหรับรอบการคำนวณปัจจุบันและเทียบกับค่าก่อนหน้าโดยคำนวณเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละอนุภาค และคำนวณหาตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาคตัวเองแต่ละตัว (Personal best, x_i^*) โดยเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ปัจจุบันกับค่าก่อนหน้า ดังนั้นค่า G^* และ x_i^* จึงถูกปรับปรุงให้เป็นปัจจุบัน

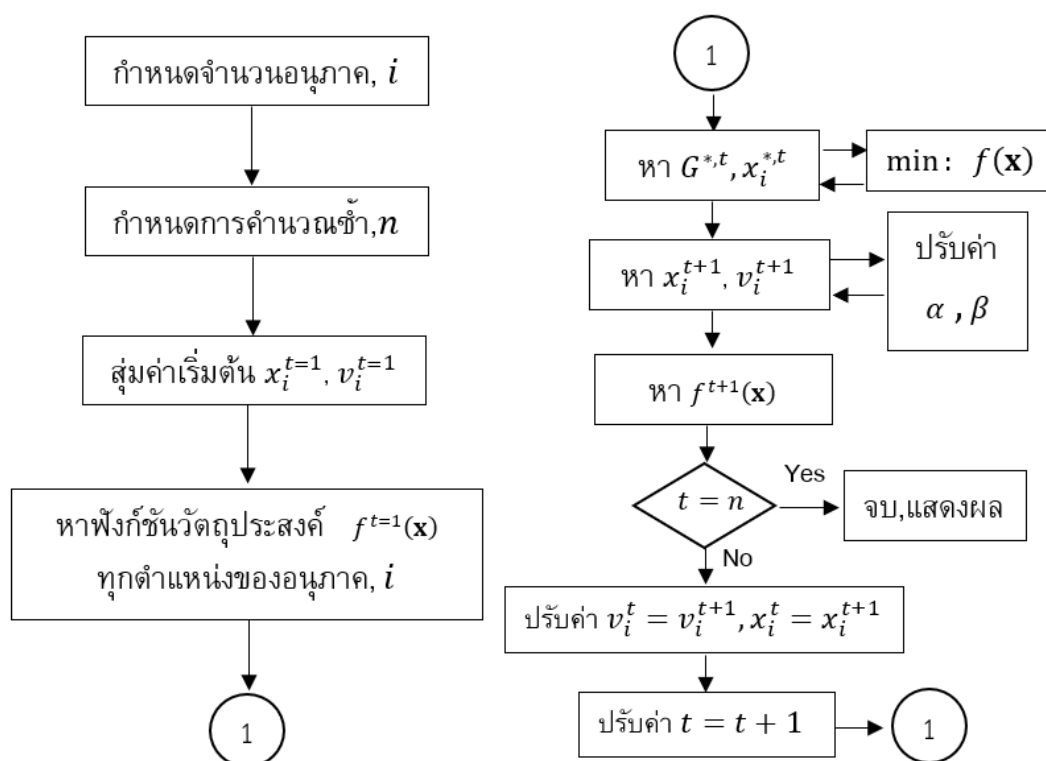
ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาตำแหน่งใหม่ของแต่ละอนุภาค โดยการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคจะอ้างอิงตำแหน่ง G^* และ x_i^* เป็นตัวกำหนดทิศทาง โดยตำแหน่งใหม่ของแต่ละอนุภาคคำนวณได้ตามสมการที่ (13) และ (14) ตามลำดับ

$$v_i^{t+1} = \phi v_i^t + \alpha \varepsilon_1 (G^* - x_i^t) + \beta \varepsilon_2 (x_i^* - x_i^t) \quad (13)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (14)$$

โดยที่ v_i^{t+1} คือค่าความเร็วรอบใหม่ v_i^t คือค่าความเร็วรอบเดิม โดยในการคำนวณที่ค่าเริ่มต้นนั้นจะกำหนดให้เป็นศูนย์ ($v_i^{t=0} = 0$) สำหรับ α และ β คือค่าตัวแปรการเรียนรู้ซึ่งเป็นค่าคงที่ ϕ เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก $\varepsilon_{1,2}$ เป็นค่าสุ่มในช่วง $[0, 1]$ x_i^{t+1} และ x_i^t คือค่าตำแหน่งของแต่ละอนุภาครอบใหม่และรอบเดิมตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 4 วนกลับไปคำนวณซ้ำในขั้นตอนที่ 2 และ 3 จนลู่เข้าคำตอบตามเงื่อนไขหรือสิ้นสุดจำนวนรอบการคำนวณซ้ำที่กำหนด จากขั้นตอน 1 – 4 สามารถที่จะเขียนแสดงเป็นแผนภาพได้ตามภาพที่ 2



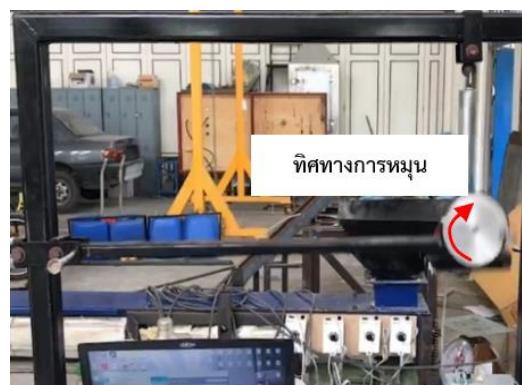
ภาพที่ 2 แผนภาพขั้นตอนการคำนวณโดยวิธีกลุ่มอนุภาค (PSO)

3.2 การทดสอบการสั่นสะเทือน

ภาพที่ 3 แสดงชุดทดสอบการสั่นสะเทือนทางกลเนื่องจากการหมุนที่ไม่สมดุล ภาพที่ 3 (ก) แสดงกลไกหลักของชุดทดสอบประกอบด้วยมอเตอร์พร้อมจานหมุนที่ติดมวลที่ไม่สมดุล ด้านบนของมอเตอร์ติดกับสปริง ที่ฐานของมอเตอร์จะติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะเทือนและตัวหน่วง ตัวหน่วงออกแบบให้เป็นกระบอกสูบทำจากอะคริลิคโดยตัวลูกสูบจะเจาะรูและภายในกระบอกสูบจะบรรจุของเหลว สำหรับในบทความนี้ใช้น้ำบรรจุในกระบอกสูบ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 3 ชุดทดสอบการสั่นเทือนขณะทำการทดสอบ (ก) ก่อนการทดสอบ (ข) มอเตอร์เริ่มหมุน
(ค) แอมพลิจูดการสั่น (+x) (ง) แอมพลิจูดการสั่น (-x)

ภาพที่ 3 (ข) แสดงทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ทันทีที่มอเตอร์เริ่มหมุนจะทำให้มีแรงจากการหมุนที่ไม่สมดุลทำให้โครงสร้างเกิดการสั่นในลักษณะที่มีแอมพลิจูดของการกระจัดของมอเตอร์ทางบวก (+x) และทางลบ (-x) แสดงตามภาพที่ 3 (ค) และ (ง) ตามลำดับ

ภาพที่ 4 แสดงชุดอุปกรณ์การวัดและการควบคุม โดยกระแสไฟฟ้า AC จะถูกแปลงเป็น DC ก่อนเข้ามอเตอร์ และแรงดันไฟฟ้าจะถูกปรับเพื่อควบคุมความเร็วรอบ ความเร็วรอบที่วัดได้จะแสดงผลที่จอตามที่แสดงในภาพที่ 4 (ก) ในขณะที่ภาพที่ 4 (ข) และ ภาพที่ 4 (ค) แสดงหัววัดและตำแหน่งที่วัดของความเร็วรอบและความเร่ง ตามลำดับ โดยที่หัววัดความเร่งเป็นโมเดล ADXL345 หัววัดความเร่งจะส่งข้อมูลไปที่บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 R3 ซึ่งแสดงในภาพที่ 4 (ง) เพื่อประมวลผลส่งข้อมูลและบันทึกผลเป็นโดเมนของเวลาที่คอมพิวเตอร์ ตามลำดับ โดยค่า Sampling rate (SR) สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1000 Hz ซึ่งมีข้อมูลเพียงพอสำหรับการทดสอบเมื่อมอเตอร์ทำงานที่

ความเร็วรอบ 150 – 300 rpm (2.5-5 Hz) ดังนั้นจำนวนข้อมูล (N) ในช่วงการสั่นหนึ่งรอบเนื่องจากแรงที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ ω ในหน่วย rad/s คำนวณได้ตามสมการที่ (15)

$$N = \frac{2\pi}{\omega} \times SR \quad (15)$$

สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้ $SR = 100$ Hz และทดสอบที่ความเร็วรอบ 220 rpm ดังนั้นในการหมุนมอเตอร์หนึ่งรอบจะมีข้อมูลประมาณ 27 ข้อมูล สำหรับแปลงข้อมูลจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่นั้นจำนวนข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะต้องอยู่ในรูปกำลังสอง เช่น 16, 32, 64 หรือ 128 เป็นต้น (Singiresu, 2011) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ 128 ข้อมูลหมายถึงจะต้องเก็บข้อมูลการสั่นในขณะที่มอเตอร์หมุนอย่างน้อย 4.74 รอบซึ่งเพียงพอในการประมวลผลหาค่าผลการตอบสนองในรูปโดเมนความถี่ เนื่องจากการสั่นเกิดจากการกระตุ้นจากการหมุนที่ไม่สมดุลของมอเตอร์เพียงอย่างเดียว จึงไม่ต้องอาศัยข้อมูลจำนวนมากในช่วง 1 คาบเวลาในการแยกสัญญาณเนื่องจากปัจจัยอื่น

สำหรับการแปลงข้อมูลที่เป็นโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่จะเรียกใช้ฟังก์ชันการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier transform, FFT) โดยรับข้อมูลความถี่ในรูปโดเมนเวลา สำหรับข้อมูลความถี่จากหัววัด a_p จำเป็นที่จะต้องปรับค่าเนื่องจากหัววัดความถี่จะแสดงค่าเป็นหน่วยจำนวนเท่าของค่าความถี่โน้มถ่วง ดังนั้นในกรณีที่ไม่มีเกิดการสั่นในแนวตั้งหัววัดจะแสดงค่าเป็น $1g$ ($g=9.81 \text{ m/s}^2$) เพื่อที่จะปรับเป็นในหน่วย m/s^2 และกำหนดค่าความถี่เป็นศูนย์เมื่อไม่มีการสั่น ดังนั้นข้อมูลจากหัววัดความถี่สามารถที่จะปรับค่าได้ความถี่ทดลอง $a_{exp} [\text{m/s}^2]$ ตามสมการที่ (16)

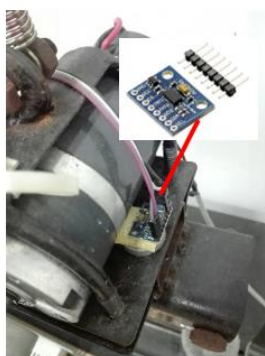
$$a_{exp} = (a_p - 1) \times g \quad (16)$$



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 4 อุปกรณ์การวัดความเร่งและความเร็วรอบ (ก) ตัวปรับความเร็วรอบ (ข) หัววัดความเร็วรอบ
(ค) ตำแหน่งวัดความเร็วรอบ (ง) บอร์ดประมวลผล

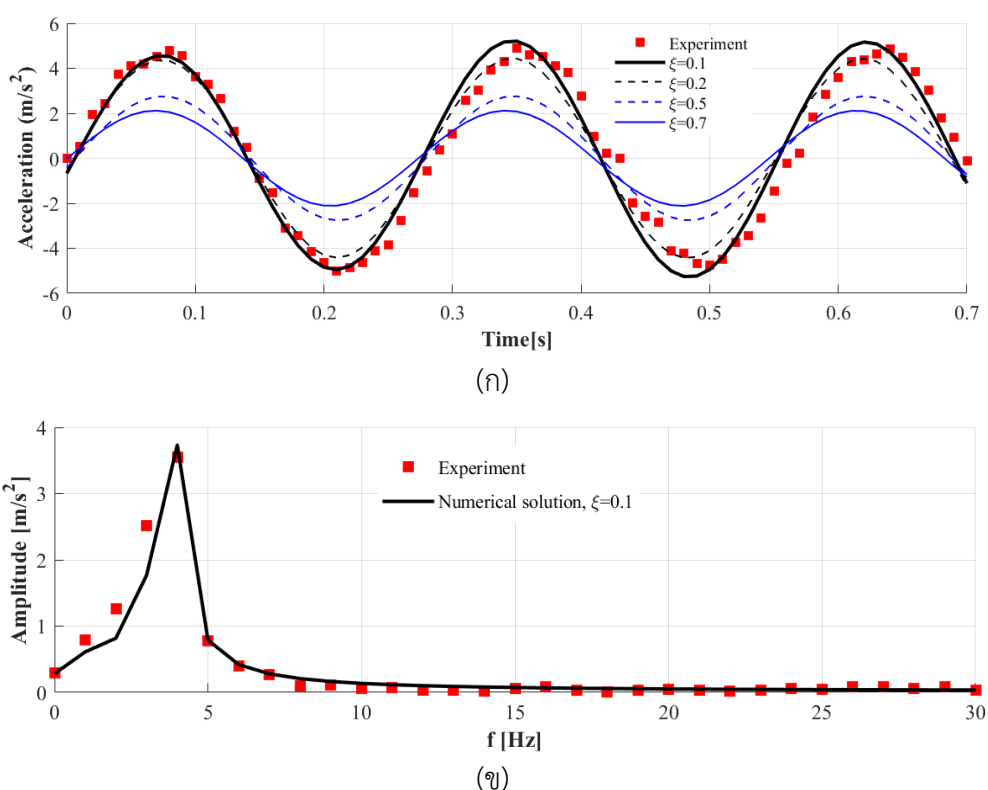
สำหรับขนาดของตัวแปรต่าง ๆ ของชุดทดสอบและค่าที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดตัวแปรและค่าที่ใช้ในการคำนวณ

ตัวแปร	ขนาด
ความยาวคัน L [m]	1.0
ระยะมอเตอร์ L_e [m]	0.1
ระยะจำกัด S [m]	0.2
มวลมอเตอร์ M [kg]	2.5
มวลไม่สมดุล m [kg]	0.2
มวลคัน m_b [kg]	1.2
ระยะเยื้องศูนย์ e [m]	0.08
ค่าคงที่สปริง k [N/m]	1033
ค่าคงที่สปริงตัวดูดซับ k_a [N/m]	350~1,120
มวลตัวดูดซับการสั่น m_a [kg]	1.0 ~ 4.5
ความเร็วรอบมอเตอร์ ω [rpm]	220
ค่าตัวแปรการเรียนรู้ α	0.1~0.7
ค่าตัวแปรการเรียนรู้ β	0.1~0.7

4. ผลการวิจัย

ผลการศึกษาได้แบ่งออกเป็นสามส่วนได้แก่ การเปรียบเทียบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับการทดลองเพื่อปรับค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าให้เหมาะสม ส่วนที่สองจะเป็นการคำนวณหาตัวดูดซับการสั่นด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคและส่วนที่สามเป็นผลการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสะท้อน ภาพที่ 5 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าผลการตอบสนองการสั่นในรูปความเร่งทั้งแบบแสดงโดยโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความหน่วง ξ เนื่องจากค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบสำหรับโมเดลทางคณิตศาสตร์ในบทความนี้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าอย่างชัดเจนดังนั้นจึงทำการปรับค่าให้เหมาะสมโดยอ้างอิงค่าจากผลการทดลองที่วัดได้ในช่วงสภาวะคงตัว (Steady state) จากผลการปรับค่า ξ ตามภาพที่ 5 (ก) ในกรณี $\xi = 0.1$ ได้ความเร่งในรูปโดเมนเวลาที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดและเมื่อนำค่าความเร่งทั้งผลการทดลองและผลการคำนวณที่ $\xi = 0.1$ มาคำนวณหาความเร่งในรูปโดเมนความถี่ตามภาพที่ 5 (ข) พบว่าได้ค่าความถี่ที่ตรงกัน ดังนั้นค่าอัตราส่วนความหน่วง ξ ที่เลือกใช้ในโมเดลคณิตศาสตร์ที่จะใช้คำนวณหาค่าเหมาะสมตัวดูดซับการสั่นมีค่าเป็น 0.1



ภาพที่ 5 ผลการตอบสนองการสั่นก่อนติดตั้งตัวดูดซับการสั่นในรูปความเร่ง
(ก) ความเร่ง (ข) โดเมนความถี่

ตารางที่ 2 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เมื่อปรับค่าตัวแปรการเรียนรู้ α ที่ $\beta = 0.1$

รอบการคำนวณ	$f(x), \alpha=0.1$	$f(x), \alpha=0.2$	$f(x), \alpha=0.3$	$f(x), \alpha=0.4$	$f(x), \alpha=0.5$	$f(x), \alpha=0.6$	$f(x), \alpha=0.7$
1	1.31575	1.31575	1.31575	1.31575	1.31575	1.31575	1.31575
2	0.63491	0.79148	1.33877	0.98947	0.34969	1.19455	0.30717
3	0.44519	1.23827	1.11716	0.92909	0.86466	0.16046	0.33877
4	0.70314	0.30281	0.93234	0.56598	0.21675	0.35662	0.45275
5	0.78404	0.92257	1.24287	0.72108	0.04544	0.10702	0.35175
6	0.04340	1.69301	0.49477	0.82604	0.03149	0.15730	1.19431
7	0.72827	1.32646	0.20109	1.56421	1.57049	1.06570	0.81365
8	0.87022	1.05393	0.04874	0.07517	0.85457	0.10321	0.27236
9	1.44014	0.41619	0.62865	0.11724	0.30995	0.12089	0.18585
10	1.28979	0.07577	0.07068	0.53966	0.04177	0.18470	0.81918

ตารางที่ 3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เมื่อปรับค่าตัวแปรการเรียนรู้ β ที่ $\alpha=0.5$

รอบการคำนวณ	$f(x), \beta=0.1$	$f(x), \beta=0.2$	$f(x), \beta=0.3$	$f(x), \beta=0.4$	$f(x), \beta=0.5$	$f(x), \beta=0.6$	$f(x), \beta=0.7$
1	1.31575	1.31575	1.31575	1.31575	1.31575	1.31575	1.31575
2	0.74479	0.92007	0.53316	0.28560	0.48545	0.23280	0.12017
3	1.17992	0.13831	0.21078	0.17930	0.09867	0.71386	0.35955
4	1.36455	0.39195	0.45542	0.41444	0.28840	0.29135	0.11779
5	0.50594	0.44005	0.56209	0.21933	0.16751	0.14649	0.19824
6	1.63880	0.32195	0.02938	0.04941	0.22868	0.15332	0.10901
7	0.34840	0.22985	0.29839	0.03412	0.04186	0.31404	0.25661
8	1.89148	0.35983	0.71179	0.15698	0.30976	0.26259	0.32007
9	1.13600	0.05664	0.34215	0.14605	0.06811	0.11511	0.12981
10	0.23312	0.05197	0.17229	0.03111	0.13043	0.13417	0.37388

สำหรับขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคนั้นค่าตัวแปรการเรียนรู้ α และ β จะส่งผลต่อการลู่เข้าคำตอบ (Xin-She Yang, 2010) ดังนั้นจึงได้ทำการตรวจสอบค่าตัวแปรการเรียนรู้ โดยทำการปรับค่า α ตั้งแต่ 0.1 ~ 0.7 และให้ค่า $\beta=0.1$ ตามที่ได้แสดงค่าการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในตารางที่ 2 โดยที่ทำการสุ่มค่าตำแหน่งอนุภาคที่รอบคำนวณเริ่มต้นที่เหมือนกันทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรอบคำนวณที่ 1 นั้นจะมีค่าเท่ากัน จากการคำนวณพบว่าที่ $\alpha = 0.5$ จะได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่ำที่สุด (0.03149) และใช้การคำนวณซ้ำที่น้อยสุดตามที่แสดงด้วยแท็บสีส้ม ดังนั้นจึงเลือกค่า $\alpha = 0.5$ และทำการปรับค่า β ตั้งแต่ 0.1 ~ 0.7 ตามที่ได้แสดงในตารางที่ 3 จากการคำนวณพบว่าการใช้ค่า $\beta=0.3$ จะได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่ำที่สุด (0.02938) และใช้การคำนวณซ้ำที่น้อยสุด (6 รอบ) ตามที่แสดงด้วยแท็บสีส้ม จากการคำนวณตามตารางที่ 2 และ 3 พบว่าการใช้ค่า α และ β ที่มากเกินไปจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เร็วเกินไปและเลยตำแหน่งที่เป็นคำตอบ

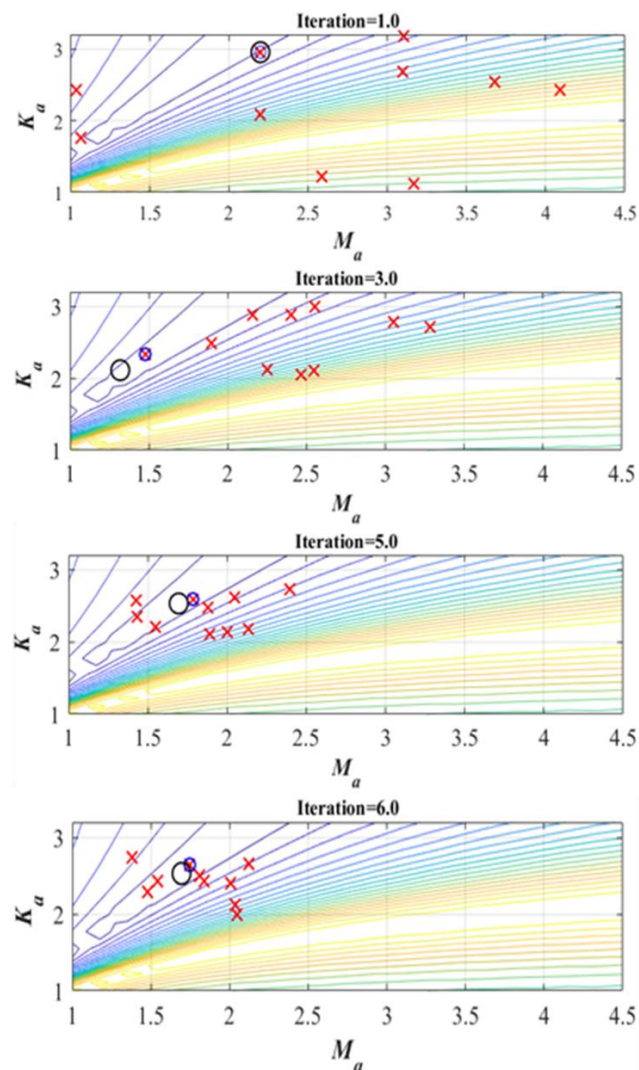
ในขณะที่ใช้ค่าน้อยก็จะเคลื่อนที่ช้า ทั้งสองกรณีมีข้อดีและข้อเสีย ดังนั้นในบทความนี้จึงได้แนวคิดที่จะใช้ค่า α และ β ในรอบการคำนวณต้น ๆ ให้มีค่าที่จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าสู่ค่าตอบที่เร็วคือใช้ $\alpha=0.5$, $\beta=0.3$ และในช่วงรอบคำนวณซ้ำท้าย ๆ จะปรับค่า $\alpha=0.1$, $\beta=0.1$ เพื่อให้กลุ่มอนุภาคไม่เคลื่อนที่เร็วเกินไปจนเลยค่าตอบ

ภาพที่ 6 แสดงตำแหน่งของกลุ่มอนุภาคสำหรับรอบการคำนวณซ้ำที่ 1.0 - 6.0 ซึ่งอยู่ในช่วงต้นของการคำนวณซ้ำ โดยเครื่องหมายกากบาทแสดงตำแหน่งอนุภาคที่รอบปัจจุบัน x_i และตำแหน่งอนุภาคที่มีวงกลมสีน้ำเงินวงรอบเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดในรอบการคำนวณนั้น x_i^* (Personal best) และตำแหน่งที่เป็นวงกลมสีดำเป็นตำแหน่งของ G^* (Global best) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เปรียบเทียบค่า x_i^* ก่อนหน้านี้ทั้งหมด ตำแหน่งของอนุภาคแทนค่าของตัวแปรออกแบบ (Design of variable) แกน x เป็นค่ามวลตัวดูดซับการสั่นในรูปไร้หน่วย $M_a = m_a/m_0$ โดย $m_0 = 1.0$ kg แกน y เป็นค่าคงที่สปริงตัวดูดซับการสั่นในรูปไร้หน่วย $K_a = k_a/k_0$ โดย $k_0 = 350$ N/m สำหรับรอบการคำนวณที่ 1 (Iteration=1.0) ตำแหน่งอนุภาคเกิดจากการสุ่มค่าซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคแต่ละตัวจะกระจายและอยู่ห่างจากตำแหน่งของ G^* และเมื่อจำนวนการคำนวณซ้ำเพิ่มขึ้นตามที่แสดงในรอบการคำนวณซ้ำที่ 3, 5 และ 6 (Iteration= 3, 5, 6) อนุภาคจะเคลื่อนตัวเข้าใกล้กับตำแหน่งของ G^* มากขึ้น ในทางอุดมคติตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดนั้นอนุภาคทุกตัวก็จะเคลื่อนที่มากกระจุกหรืออยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด ซึ่งต้องอาศัยจำนวนรอบการคำนวณที่มากขึ้นและการปรับค่าตัวแปรการเรียนรู้ α และ β

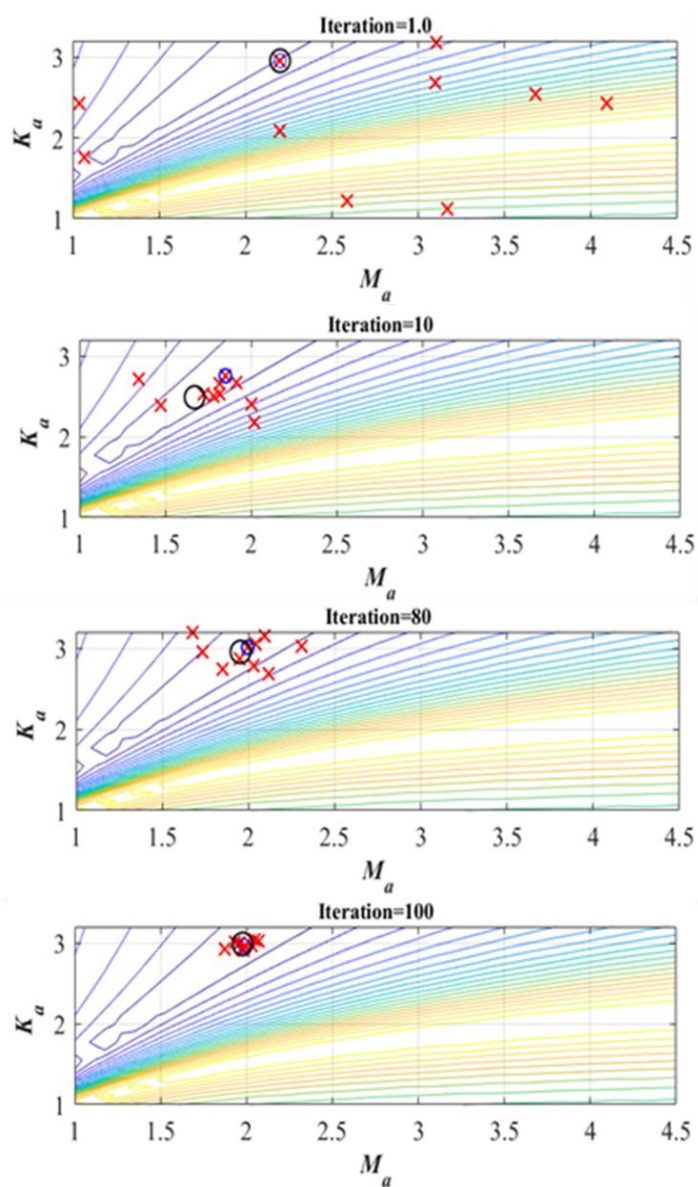
ภาพที่ 7 แสดงการคำนวณหาค่าเหมาะสมที่สุดในภาพรวมทั้งหมดตั้งแต่รอบการคำนวณที่ 1 (Iteration=1.0) จนถึงการคำนวณในรอบสุดท้ายซึ่งกำหนดไว้ที่ 100 (Iteration=100) โดยในภาพจะแสดงเฉพาะรอบที่ 1, 10, 80 และ 100 (Iteration=1, 10, 80, 100) ซึ่งกำหนดให้ในช่วงการคำนวณในรอบตั้งแต่ 80 - 100 จะใช้ค่าตัวแปรการเรียนรู้เป็น $\alpha=0.1$, $\beta=0.1$ ส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่ช้าลงหรือหมายถึงระยะการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุภาคสั้นลงเพื่อไม่ให้เคลื่อนตัวเลยจุดที่เป็นคำตอบ จากการคำนวณจะพบว่าที่รอบการคำนวณที่ 100 อนุภาคทุกตัวแทบจะกระจุกอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน โดยตำแหน่งดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งตรงกับ $M_a \approx 2.0$ และ $K_a \approx 3.0$ หรือถ้าแปลงเป็นตัวแปรที่มีหน่วยจะได้มวลตัวดูดซับการสั่น $m_a = 2.0$ kg และค่าคงที่สปริงของตัวดูดซับการสั่น $k_a = 1,050$ N/m

สำหรับส่วนสุดท้ายแสดงผลการติดตั้งตัวดูดซับการสั่นที่เหมาะสมในระบบที่มีการหมุนที่ไม่สมดุล โดยที่ภาพที่ 8 แสดงผลการคำนวณการตอบสนองของระบบในรูปความเร่ง $a(t)$ และการกระจัด $x(t)$ ที่โครงสร้างหลักหรือมอเตอร์ที่หมุนไม่สมดุล (Unbalanced motor) และที่ตัวดูดซับการสั่น (Absorber) จากภาพจะเห็นได้ว่าตัวดูดซับจะดูดซับพลังงานในระบบเอาไว้จึงทำให้การสั่นส่วนใหญ่ของระบบจะเกิดขึ้นที่ตัวดูดซับการสั่นแทนที่การสั่นที่มอเตอร์ตามที่แสดงด้วยกราฟเส้นสีแดง ส่งผลให้ที่โครงสร้างหลักหรือมอเตอร์มีการสั่นทั้งในรูปความเร่งและการกระจัดที่เข้าใกล้ศูนย์

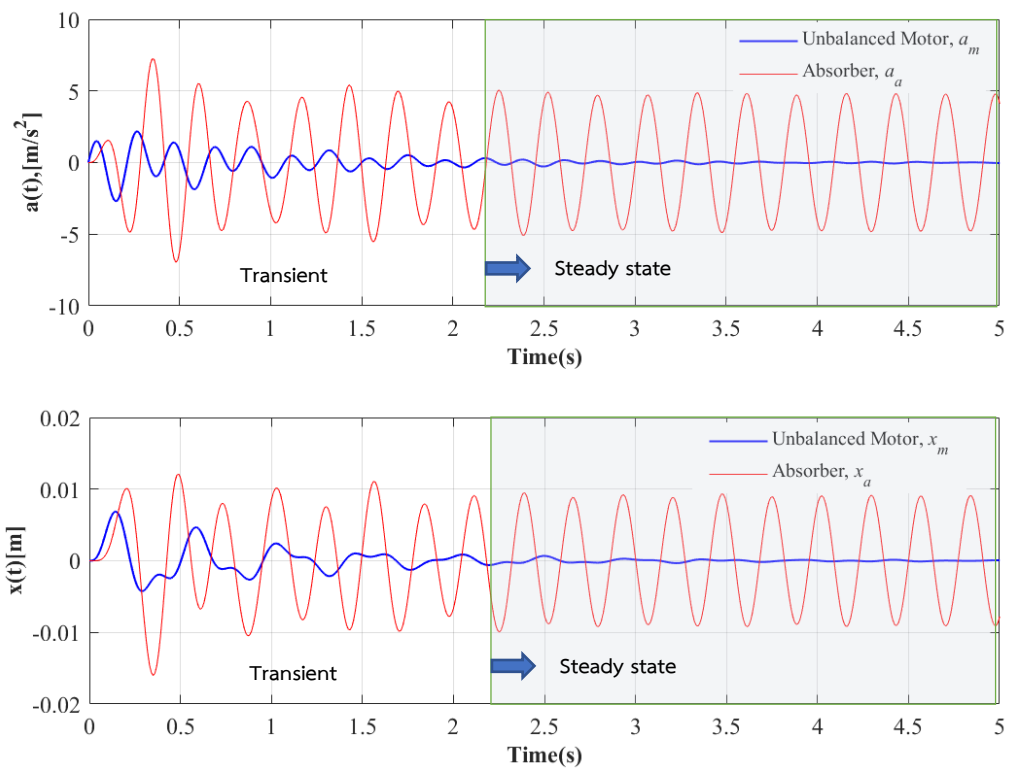
โดยเฉพาะในช่วงที่เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ที่เวลามากกว่า 2.2 s เป็นต้นไป (Time > 2.2 s) ตามที่ได้แสดงเป็นกราฟสีน้ำเงิน ภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร่งระหว่างผลจากการคำนวณและผลการทดลองที่โครงสร้างหลักหรือที่มอเตอร์ที่หมุนไม่สมดุลในกรณีไม่ติดตัวดูดซับและกรณีที่ติดตัวดูดซับการสั่น โดยทำการเปรียบเทียบในช่วงที่เป็นสภาวะคงตัว ดังนั้นข้อมูลค่าความเร่ง $a(t)$ ที่ได้จากการคำนวณตามภาพที่ 8 จะถูกตัดมาในช่วงเวลา 2.2 s – 3.2 s และทำการปรับค่าแกนเวลาใหม่เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว จากผลการคำนวณและผลการทดลองพบว่ามีค่าสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน คือระบบที่ติดตัวดูดซับการสั่นทำให้การสั่นที่มอเตอร์ลดลงและเข้าใกล้ศูนย์ที่สภาวะคงตัวและไม่สามารถหาโดเมนความถี่ได้ในกรณีติดตัวดูดซับหรือค่าแอมพลิจูดของความเร่งเข้าใกล้ศูนย์



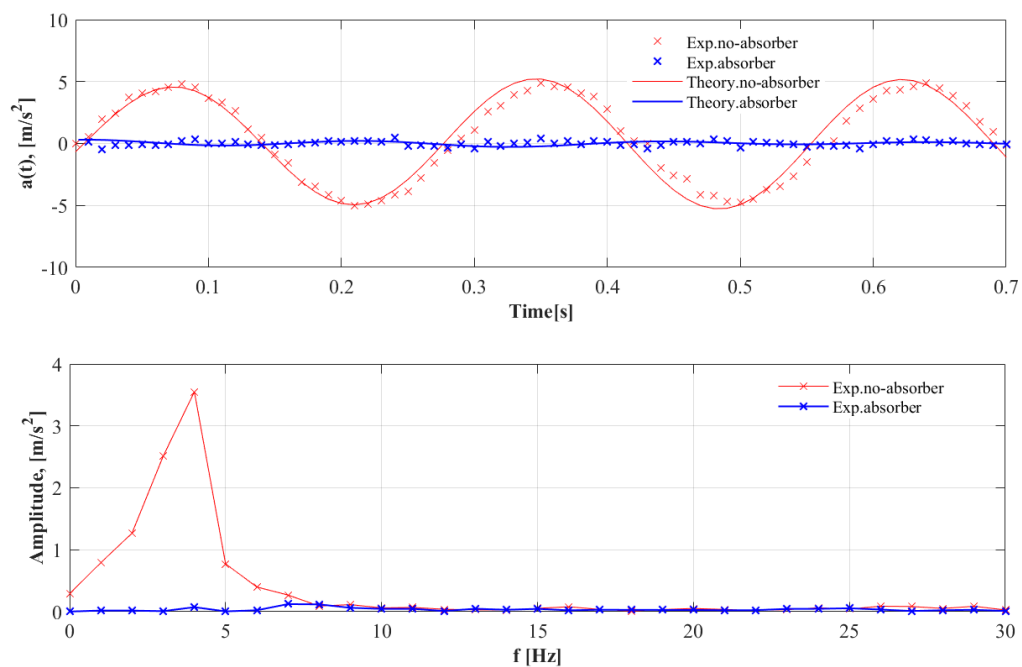
ภาพที่ 6 การวนซ้ำหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคในช่วงต้น ($\alpha=0.5$, $\beta=0.3$)



ภาพที่ 7 การวนซ้ำหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของกลุ่มอนุภาคทั้งช่วงต้นและช่วงสุดท้าย



ภาพที่ 8 ผลการตอบสนองการสั่นสะเทือนของระบบหลังติดตั้งตัวดูดซับการสั่น



ภาพที่ 9 การสั่นที่มอเตอร์หมุนไม่สมดุลก่อนและหลังติดตั้งตัวดูดซับการสั่นในช่วงสภาวะคงตัว

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

บทความนี้ได้ทำการศึกษาศักยภาพการสันสะเทือนจากการหมุนที่ไม่สมดุลและทำการออกแบบตัวดูดซับการสั่นเพื่อลดการสั่นสะเทือน จากการศึกษาสามารถที่จะสรุปผลได้ดังนี้

- 1) การสันสะเทือนจากการหมุนที่ไม่สมดุลทั้งโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณกับชุดทดสอบจะมีความสอดคล้องกันเมื่อใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงในโมเดลทางคณิตศาสตร์เป็น 0.1 ($\xi=0.1$)
- 2) การติดตั้งตัวดูดซับการสั่นสามารถที่จะลดการสั่นสะเทือนในโครงสร้างหลักได้ดี
- 3) การหาค่าตัวดูดซับการสั่นที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคมีประสิทธิภาพที่จะหาคำตอบ มีแนวโน้มที่ดีที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมการสั่นแบบอัตโนมัติ
- 4) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค ควรใช้ค่าตัวแปรการเรียนรู้ α และ β แบบไม่คงที่ โดยที่รอบการคำนวณช่วงแรกควรใช้ค่าตัวแปรการเรียนรู้ที่ทำให้เข้าสู่คำตอบที่เร็วและในรอบการคำนวณช่วงท้ายควรใช้ค่าตัวแปรการเรียนรู้ที่มีค่าน้อยลงเพื่อจะเดินเข้าหาคำตอบโดยไม่เลยจุดคำตอบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาที่สนับสนุนสถานที่และสนับสนุนค่าใช้จ่ายต่าง ๆ

7. เอกสารอ้างอิง

- กิตติพงศ์ บุญโสง, และพุทธา จินครวั. (2564, กรกฎาคม). การศึกษาเชิงทดลองโดเมนความถี่ของบอลเบริงภายใต้การทำงานที่ขาดสารหล่อลื่น. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 35, จังหวัดนครปฐม.
- กายรัฐ เจริญราษฎร์. (2558). การใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคจัดการจราจรข้อมูลในเครือข่ายโอเอสพีเอฟ. วารสารเทคโนโลยีสารสนเทศ, 11(1), 43-52.
- นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ. (2561). วิธีการตรวจวัดการสั่นสะเทือนแบบพลวัตของพื้นผิวถนนยางมะตอยด้วยข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 28(1), 135-145.
- พงษ์พันธุ์ ฤกษ์ชุมทรัพย์, และประเสริฐ ปรากฏประยูร. (2552). การพัฒนากลไกแยกแรงสั่นสะเทือนความถี่ต่ำแบบด้วยสปริงลม. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา, 20(2), 40-44.

- เมษันท์ ประมาธิกุล, จูติ มีโอภาสมงคล, บุญศักดิ์ หล่อพิพัฒน์, เฉลิม ชัยวัชรารณ , และทศพร ยิ้มล
มัย. (2563). ผลของตัวขับเคลื่อนต่อการสั่นที่บริเวณด้ามจับขณะตีลูกเทนนิส. **วารสารเวชศาสตร์เขตเมือง**, 64(3), 181-192.
- ลัดนา เพิ่มพูน, และจักรพันธ์ ปิ่นทอง. (2562). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึม
อาณานิคมผึ้งเทียบกับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี**, 7(1), 33-46.
- วีรพล ทองคุปต์, อุไร อภิชาติบันลือ, และบัณฑิต สุขสวัสดิ์. (2556). การสร้างชุดทดลองการ
สั่นสะเทือนอย่างง่าย. **วารสารวิชาการและวิจัย**, 7(2), 24-34.
- สมศักดิ์ สิริโพรานนท์. (2562). การวิเคราะห์ความเสียหายของตลับลูกปืนโดยการวัดการ
สั่นสะเทือน. **วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต**, 9(1), 54-68.
- สุรัตน์ ปัญญาแก้ว. (2557). การออกแบบและสร้างตัวดูดซับการสั่นสะเทือนแบบปรับค่าได้.
วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร, 9(1), 25-30.
- Holovatyy, A., Teslyuk, V., Iwaniec, M., & Mashevska, M. (2017). Development of A
System for Monitoring vibration Accelerations based on The Raspberry PI
Microcomputer and The ADXL345 Accelerometer. **Eastern-European Journal of
Enterprise Technologies**, 90(1), 52-62.
- Singiresu, S. RAO. (2011). **Mechanical Vibration** (5th ed.). Prentice Hall: Pearson
Education.
- Yang, X. S. (2010). **Engineering Optimization An Introduction with Metaheuristic
Applications**. New Jersey: John Wiley & Sons.