

การศึกษาและจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าชนิดฝาบนในสภาวะปั่นเหวี่ยง

Vibration Analysis and Balancing of Top-loaded Washing Machine in Spinning Mode

รัชพล รัชมิโรจน์^{*1}, ณัฐวุฒิ เดิโปว¹ และ อนันต์ พิณโสภณ¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

* ผู้ติดต่อ : E-mail: mr_oni10@hotmail.com , โทรศัพท์: (662) 326-4197, โทรสาร: (662) 326-4198

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาและจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าชนิดฝาบน (Top loaded washing machine) ในสภาวะปั่นเหวี่ยง (Spinning mode) ซึ่งเป็นสภาวะที่มีการสั่นสะเทือนค่อนข้างสูง การสั่นสะเทือน ความถี่ธรรมชาติและขนาดการสั่นก้ำก๋อน (vibration mode) จะถูกคำนวณด้วยแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลจากการคำนวณทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะถูกเปรียบเทียบกับผลจากการวัดของการทดลองกับตัวเครื่องซักผ้าตัวอย่าง แบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะถูกปรับเพื่อให้ผลจากการคำนวณใกล้เคียงกับผลจากการทดลองมากที่สุด ซึ่งการจำลองการเคลื่อนที่นี้มีตัวแปรที่สำคัญ คือ ตัวถ่วงสมดุลชนิดของเหลว (Liquid balancer) , ตะกร้าใส่ผ้า (spinning basket) , ถังพลาสติก (Tub) , มวลที่ทำให้เกิดความไม่สมดุล (Unbalance mass) , มอเตอร์ไฟฟ้า (Motor) และตัวลดการสั่นสะเทือน (Absorber) จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากการวัดจริงของเครื่องซักผ้าตัวอย่างมีความใกล้เคียงกันเป็นที่น่าสนใจ และสามารถนำผลจากการปรับปรุงแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้เป็นแนวทางในการออกแบบเพื่อปรับปรุงโครงสร้างของเครื่องซักผ้าเพื่อเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงแบบสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องซักผ้าในอนาคต

คำสำคัญ: เครื่องซักผ้าชนิดฝาบน , การสั่นสะเทือน , ตัววัดความเร่ง

Abstract

Vibration characteristic become an important performance index of washing machine. In this paper, the simulation model of the top-loaded washing machine will be simulated and the dynamic simulation of the vibration characteristic will be calculated numerically with various excitations in order to obtain the acceptable vibration level. The important parameters of simulation model, such as the liquid balancer , spinning basket , tub , unbalance mass , electric motor, spring stiffness and damper coefficient of a suspension system will be adjusted and compared with the results from vibration measurements of the example washing machine in order to obtain the correct simulation model. As the results, the simulated results were similar to the real measurement results. The next step is to design the new simulation model of the washing machine in order to obtain best possible dynamic characteristics.

Key words : top-loaded washing machine , vibration , accelerometer

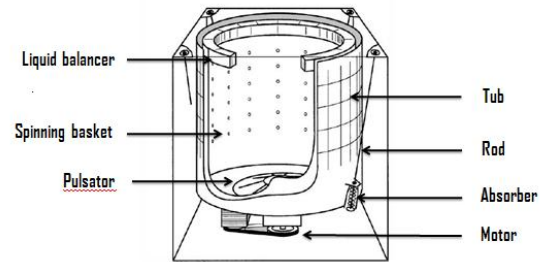
1. บทนำ

เครื่องซักผ้าในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท คือ แบบ drum , แบบ agitator และ แบบ pulsator โดยแบบ drum จะมีลักษณะการวางตะกร้าใส่ผ้าในแนวนอน หรือที่เรียกกันว่าเครื่องซักผ้าแบบฝาหน้า (horizontal washing machine) ส่วนแบบ agitator และแบบ pulsator จะมีการวางตะกร้าใส่ผ้าในแนวตั้ง หรือที่เรียกกันว่า เครื่องซักผ้าแบบฝาดบน (vertical washing machine) และขั้นตอนในการซักผ้าของเครื่องซักผ้าชนิดนี้จะมี 3 ขั้นตอน คือ การซัก , การล้าง และ การปั่นแห้ง ซึ่งขั้นตอนการปั่นแห้งนั้นจะมีการเกิดการสั่นสะเทือนมากที่สุด [1] สาเหตุที่ทำให้ขั้นตอนการปั่นแห้งนั้นมีการสั่นสะเทือนมากที่สุด เพราะหลังจากผ่านขั้นตอนการซักและการล้างแล้วจะทำให้เกิดผ้าที่ซักนั้นไปกองอยู่บริเวณหนึ่งซึ่งจะทำให้เกิดความไม่สมดุล ซึ่งเราจะเรียก ผ้าที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลนั้นว่า unbalance mass ซึ่งจุดประสงค์ในงานวิจัยนี้คือการสร้างแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาแนวโน้มของการเปลี่ยนค่าตัวแปรของระบบที่ส่งผลให้การสั่นสะเทือนลดลง

2. ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างของเครื่องซักผ้าแบบฝาดบน

โครงสร้างและส่วนประกอบของเครื่องซักผ้าชนิดฝาดบนดังรูปที่ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบได้แก่ ตะกร้าใส่ผ้า (spinning basket) , ตัวกวนผ้า (pulsator) , ถัง (tub) , ก้านโลหะ (rod) , มอเตอร์ไฟฟ้า (motor) , ตัวดูดซับแรง (absorber) นี้จะประกอบไปด้วยสปริงและกระบอกกลม และ ตัวทำสมดุลชนิดของเหลว (liquid balancer) ซึ่งภายในจะมีน้ำเกลือบรรจุอยู่เพื่อช่วยลดการสั่นสะเทือน [2]



รูปที่ 1 โครงสร้างของเครื่องซักผ้าชนิดฝาดบน

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวทำสมดุล

ชนิดของเหลว (Liquid balancer) [2]

ตัวทำสมดุลชนิดของเหลวซึ่งทำจากพลาสติกภายในบรรจุด้วยน้ำเกลือ ซึ่งในการปั่นแห้งน้ำเกลือจะทำหน้าที่สำคัญในการลดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจาก unbalance mass โดยน้ำเกลือจะเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกับ unbalance mass ดังรูปที่ 2 เมื่อ R_o และ R_i คือ รัศมีภายนอกและภายในของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว ตามลำดับ , V คือ ปริมาตรของน้ำเกลือ , ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำเกลือ , ω คือ ความเร็วในการหมุน , S คือ จุดศูนย์กลางของรูปร่างของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว , c คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S , O คือ จุดศูนย์กลางของการหมุน , e คือ ระยะห่างการเอียงศูนย์กลางเมื่อเทียบกับตำแหน่ง S , R_s คือ รัศมีภายในของผิวหน้าเกลือเมื่อ O เป็นจุดศูนย์กลาง , $\bar{e}$ คือ ค่าการเอียงศูนย์กลางสูงสุดที่ยังมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น และ q คือ ปริมาณน้ำเกลือทั้งหมด

แรงหนีศูนย์กลางของตัวทำสมดุลมีทิศทางดังรูปที่ 3 และขนาดของแรงหนีศูนย์กลางสามารถหาได้จากสมการที่ (1) โดย θ คือมุมระหว่างตำแหน่ง S และ O ดังรูปที่ 3

$$F = \int dF \cos \theta = \rho \omega^2 e \int dV + \rho \omega^2 \int x dV \quad (1)$$

ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S มีค่าเท่ากับ

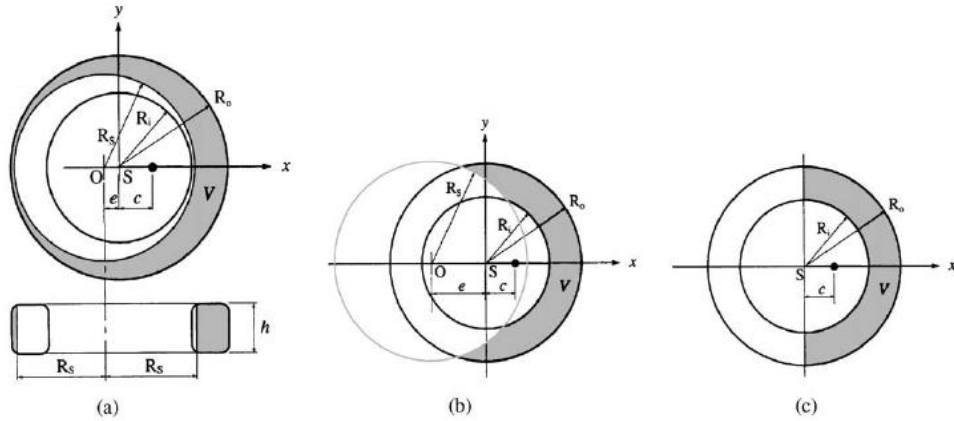
$$c = \int x dV / \int dV \quad (2)$$

และปริมาตรของน้ำเกลือหาได้จากสมการที่ 3

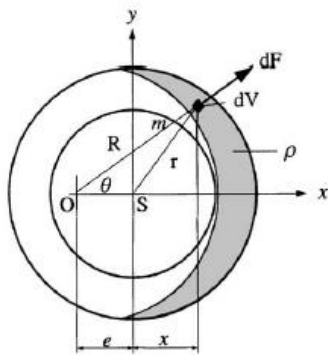
$$V = \pi \cdot h(R_o^2 - R_s^2) \quad (3)$$

เมื่อ

$$R_s = \sqrt{(1-q)R_o^2 - qR_i^2} \quad (4)$$



รูปที่ 2 จุดศูนย์กลางของน้ำเกลือที่การหมุน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ

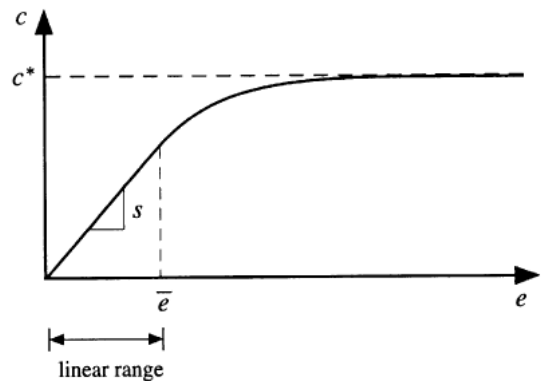


รูปที่ 3 ทิศทางของแรงหนีศูนย์กลางของตัวทำสมดุล
ชนิดของเหลว

จากรูปที่ 2 (a) คือรูปที่แสดงการเคลื่อนที่ของตัว
ทำสมดุลชนิดของเหลวที่มี ค่า $e < \bar{e}$ และนำสมการที่
(3) และ (4) ไปแทนค่าในสมการที่ (2) จะได้สมการ
ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} \int x dV &= \left(\int_{-R_o}^{R_o} x \sqrt{R_o^2 - x^2} dx \right. \\ &\quad \left. - \int_{-R_s}^{R_s} x \sqrt{R_s^2 - (x+e)^2} dx \right) \\ &= \pi R_o^2 e h \end{aligned} \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) สามารถเขียนกราฟระหว่าง
ระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S
(c) กับระยะห่างการเอียงศูนย์กลางเมื่อเทียบกับตำแหน่ง
S (e) จะได้ผลดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจุดศูนย์กลาง
ของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S กับ ระยะ
ห่างการเอียงศูนย์กลางเมื่อเทียบกับตำแหน่ง S

จากรูปที่ 4 ค่าความชันของกราฟจะพบว่า
ช่วงหนึ่งที่ค่า c และ e มีค่าแปรผันตรงกันซึ่งเรียกว่า
ช่วงที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (linear range) โดย
ค่า $\bar{e}$ เป็นค่าการเอียงศูนย์กลางสูงสุดที่ยังมีความสัมพันธ์
แบบเชิงเส้น ส่วน c^* จะเป็นค่าระยะห่างมากที่สุด
ระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S
และค่าความชันของรูปที่ 4 ในช่วง linear range จะบ่ง
บอกถึงค่าระหว่างระยะห่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือ
เทียบกับตำแหน่ง S ได้ดังสมการที่ (6)

$$c = \frac{R_s^2 e}{R_o^2 - R_s^2} \equiv se \quad (6)$$

ข้อจำกัดของสมการที่ (6) จะมีข้อจำกัดคือค่า $e < \bar{e}$ เท่านั้น ส่วนรูปที่ 2(b) และ 2(c) คือรูปที่แสดงการเคลื่อนที่ของตัวทำสมดุลชนิดของเหลวที่มี ค่า $e > \bar{e}$ และค่า $e \gg \bar{e}$ ตามลำดับ จะพบว่าเมื่อค่า $e > \bar{e}$ จะทำให้น้ำเกลือเคลื่อนที่ไปรวมอยู่บริเวณหนึ่งจึงทำให้คุณสมบัติเหมือนมวลแข็งเกร็ง จึงพบว่าค่าระยะห่างมากที่สุดระหว่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S จะสามารถหาได้จากสมการที่ (7)

$$C^* = \frac{2h \int_0^{qhR_o} \int_{R_i} r^2 \cos\theta \cdot dr \cdot d\theta}{2h \int_0^{qhR_o} \int_{R_i} r dr \cdot d\theta} = \frac{2(R_o^2 + R_o R_i + R_i^2) \sin(q\pi)}{3(R_o + R_i) (q\pi)} \quad (7)$$

และจากสมการที่ (6) และ (7) จะสามารถเขียนสมการที่บ่งบอกค่าระยะห่างจุดศูนย์กลางของน้ำเกลือเทียบกับตำแหน่ง S (c) แบบมีเงื่อนไขได้ดังสมการที่ (8)

$$c = \begin{cases} se, & e < \bar{e} \\ C^*, & e \rightarrow \infty \end{cases} \quad (8)$$

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เครื่องซักผ้าชนิด

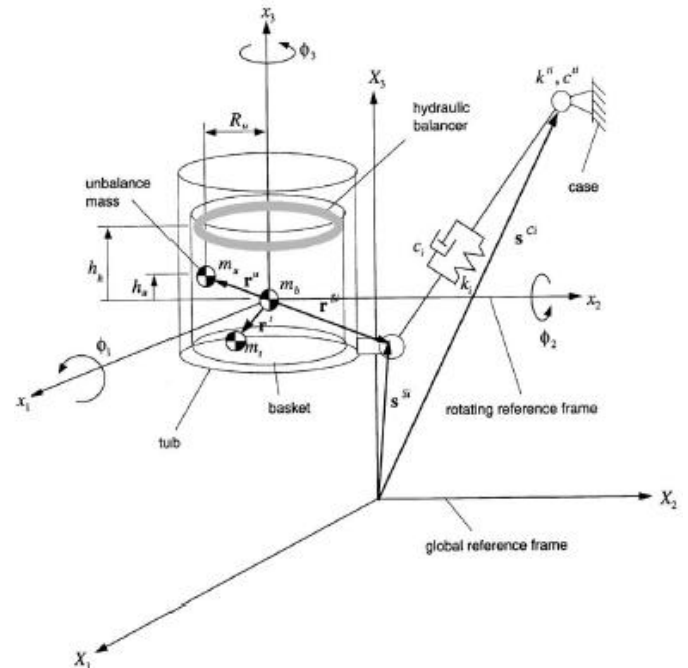
ฝาบอน (Vertical washing machine)

[2],[3],[5],[6]

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบฝาบอน จะถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 5 โดย X_1 , X_2 และ X_3 คือ พิกัดอ้างอิงโดยรวม (global reference) x_1 , x_2 และ x_3 คือ พิกัดอ้างอิงของการหมุน (rotating reference) โดยอยู่ที่จุดศูนย์กลางมวลของตะกร้าใส่ผ้า เวกเตอร์ s คือ เวกเตอร์ตำแหน่งที่อ้างอิงกับพิกัดอ้างอิงโดยรวม เวกเตอร์ r คือ เวกเตอร์ตำแหน่งที่อ้างอิงกับพิกัดอ้างอิงของการหมุน เวกเตอร์ x คือ เวกเตอร์ของการกระจัดในแนวแกนเทียบกับพิกัดอ้างอิงโดยรวม เวกเตอร์ ϕ คือ เวกเตอร์ของการจัดการหมุนเทียบกับพิกัดอ้างอิงโดยรวม และตัวอักษรยก

$(\bullet)^b, (\bullet)^t, (\bullet)^u, (\bullet)^h$ หมายถึง ตะกร้าใส่ผ้า, ถัง, มวลที่ทำให้เกิดความไม่สมดุล, ตัวทำสมดุลชนิดของเหลว ส่วน $(\bullet)^{S_i}$ คือ ตำแหน่งของก้านโลหะ

(rod) ที่ติดกับถัง และ $(\bullet)^{C_i}$ ตำแหน่งของก้านโลหะ (rod) ที่ติดกับโครงสร้าง(case)



รูปที่ 5 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าแบบฝาบอน

ถ้าเครื่องซักผ้าเกิดการหมุนขึ้นจะสามารถหาเวกเตอร์การกระจัดในแนวแกนของถังและมวลที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลได้ดังนี้

$$\mathbf{x}^t = \mathbf{x}^b + \mathbf{Q}\mathbf{r}^t \quad (9)$$

$$\mathbf{x}^u = \mathbf{x}^b + \mathbf{Q}\mathbf{r}^u \quad (10)$$

เมื่อ

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & \phi_3 & -\phi_2 \\ -\phi_3 & 1 & \phi_1 \\ \phi_2 & -\phi_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{r}^t = [r_1^t, r_2^t, r_3^t]^T \quad (12)$$

และ

$$\mathbf{r}^u = [R_u \cos\theta, R_u h_u \cos\theta]^T \quad (13)$$

เวกเตอร์ความเร็วในการหมุนของตะกร้าใส่ผ้าและถังสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{\psi}^b = \mathbf{Q}\dot{\phi} + \omega \quad (14)$$

$$\dot{\psi}^t = \mathbf{Q}\dot{\phi} \quad (15)$$

เมื่อ $\omega = [0, 0, \dot{\theta}]^T$ คือ เวกเตอร์ในการหมุนเชิงมุมของตะกร้าใส่ผ้าเมื่อเทียบกับถึง และ θ คือ มุมการหมุน

จากสมการที่ (9) ถึง (15) จะสามารถหาพลังงานจลน์และพลังงานศักย์เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของระบบได้ดังนี้

$$T = \frac{1}{2} m_b \|\dot{x}^b\|^2 + \frac{1}{2} m_t \|\dot{x}^t\|^2 + \frac{1}{2} m_u \|\dot{x}^u\|^2 + \frac{1}{2} (\dot{\psi}^b)^T I_b \dot{\psi}^b + \frac{1}{2} (\dot{\psi}^t)^T I_t \dot{\psi}^t \quad (16)$$

$$V_g = (m_b x_3^b + m_t x_3^t + m_u x_3^u) g \quad (17)$$

เมื่อ I_b และ I_t คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของตะกร้าใส่ผ้าและถึง ตามลำดับ

แรงที่เกิดจากสปริงและตัวหน่วงในตัวดูดซับแรงทั้งสี่ชิ้นสามารถหาได้จาก

$$F_{SDx_j} = -\sum_{i=1}^4 (k_i \delta_i + c_i v_i) \frac{\partial L_i}{\partial x_j^b} \quad (18)$$

$$F_{SD\phi_j} = -\sum_{i=1}^4 (k_i \delta_i + c_i v_i) \frac{\partial L_i}{\partial \phi_j} \quad (19)$$

$$L_i = \|x^{Si} - x^{Ci}\| \quad (20)$$

$$\delta_i = L_i - L_{oi} \quad (21)$$

$$v_i = x^{Si} \cdot e^i \quad (22)$$

เมื่อ $j = (1, 2, 3)$, k_i คือ ค่านิขของสปริง, c_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง, L_{oi} คือความยาวเริ่มต้นของก้านโลหะ, L_i คือความยาวสุดท้ายที่พิจารณาของก้านโลหะ และ e^i คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศของก้านโลหะ

นอกจากนั้นจะพบว่าตัวทำสมดุลชนิดของเหลวที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ (steady state) จะมีจุดศูนย์กลางมวลห่างจากพิกัดอ้างอิงโดยรวมในแกน X_3 เป็นระยะคงที่โดยมีค่าเท่ากับ $e + c$ ดังรูปที่ 5 ซึ่งจากความสัมพันธ์ข้างต้นจะทำให้สามารถเขียนสมการของเวกเตอร์ s^h ซึ่งเป็นเวกเตอร์การกระจัดของจุดศูนย์กลางของตัวทำสมดุลชนิดของเหลวที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ได้ดังสมการที่(23)

$$s^h = \begin{Bmatrix} s_1^h \\ s_2^h \\ s_3^h \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (1 + c/e) (s_{o1}^b + x_1^b + h_h \phi_2) \\ (1 + c/e) (s_{o2}^b + x_2^b + h_h \phi_1) \\ (s_{o3}^b + x_3^b + h_h) \end{Bmatrix} \quad (23)$$

เมื่อ s_o^b คือ เวกเตอร์เริ่มต้นของตะกร้าใส่ผ้าจากสมการที่(23)จึงทำให้หาค่าความเร่งของตัวทำสมดุลชนิดของเหลวได้ด้วยเช่นกัน

$$\ddot{x}^h = \frac{\partial^2}{\partial t^2} s^h = \begin{Bmatrix} (1 + c/e) (\ddot{x}_1^b + h_h \ddot{\phi}_2) \\ (1 + c/e) (\ddot{x}_2^b + h_h \ddot{\phi}_1) \\ \ddot{x}_3^b \end{Bmatrix} \quad (24)$$

จากสมการที่(24)จะทำให้หาแรงเหวี่ยงสู่ศูนย์กลางและแรงน้ำหนักของตะกร้าใส่ผ้าได้ดังสมการ

$$F_{HB} = m_h \begin{Bmatrix} -\ddot{x}_1^h \\ -\ddot{x}_2^h \\ -\ddot{x}_3^h + g \end{Bmatrix} \equiv \begin{Bmatrix} F_{HBx_1} \\ F_{HBx_2} \\ F_{HBx_3} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

จากสมการที่(25)จะนำไปหาโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางมวลของตะกร้าใส่ผ้าได้ดังนี้

$$M_{HB} = (s^h - s_o^b - x^b) \times F_{HB} \equiv \begin{Bmatrix} F_{HB\phi_1} \\ F_{HB\phi_2} \\ F_{HB\phi_3} \end{Bmatrix} \quad (26)$$

จากสมการทั้งหมดที่กล่าวมานี้มาเขียนเป็นสมการการเคลื่อนที่ของเครื่องซักผ้าชนิดฝาบนได้โดยเขียนเป็นสมการลากรางจ์ได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_j^b} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_j^b} + \frac{\partial V}{\partial x_j^b} = F_{SDx_j} + F_{HBx_j} \quad (27)$$

เมื่อ $j = (1, 2, 3)$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial \phi_j} + \frac{\partial V}{\partial \phi_j} = F_{SD\phi_j} + F_{HB\phi_j} \quad (28)$$

เมื่อ $j = (1, 2, 3)$

จากการแก้สมการที่(27)และ(28)จะสามารถหาความเร่งของตะกร้าใส่ผ้าที่ตำแหน่งใดๆได้ทั้งสามแกน [2] แต่การหาความถี่ธรรมชาติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบนี้ค่อนข้างซับซ้อนและยากต่อการ

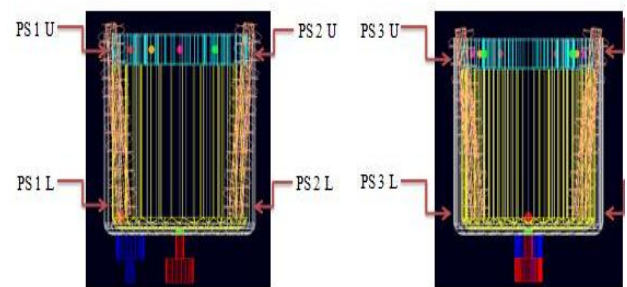
คำนวณ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้โปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในโดเมนของความถี่และสามารถแสดงลักษณะการสั่นในรูปแบบทางกราฟฟิคได้

3. การสร้างแบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

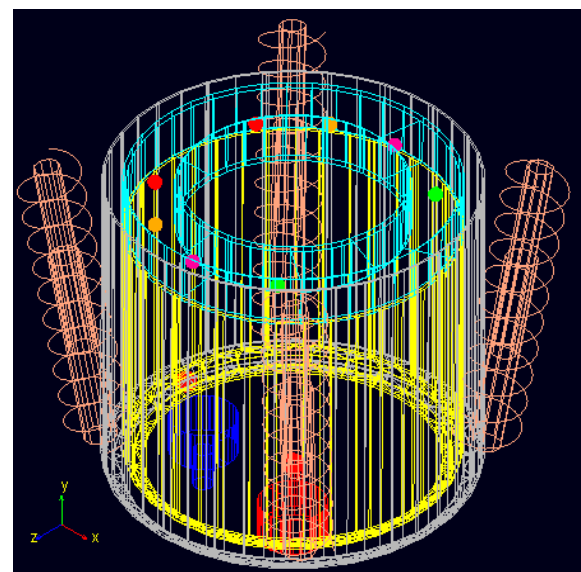
การศึกษาการเคลื่อนที่ของเครื่องชักผ้าชนิดผาแบนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่หนึ่งเป็นการตรวจวัดความสั่นสะเทือนของเครื่องชักผ้าจริงจากหัววัดความสั่นสะเทือนชนิดความเร่ง (Accelerometer) แล้วส่งผ่านตัวรวบรวมข้อมูล (Data acquisition) ผ่านไปยังโปรแกรมประมวลผล [4],[7] แล้วประมวลผลออกมาเป็นกราฟของโดเมนของเวลา ซึ่งตำแหน่งที่ทำการวัดมีทั้งหมด 8 จุด ดังรูปที่ 6 ส่วนที่สองเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องชักผ้าผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งแบบจำลองนี้มีลักษณะดังรูปที่ 6 โดยส่วนของตัวทำสมดุลชนิดเหลว (liquid balancer) จะถูกจำลองโดยใช้ลูกตุ้ม 8 ลูกวางอย่างอิสระแทนการทำงานของน้ำเกลือ ค่าของตัวแปรเริ่มต้น (initial condition) มีค่าดังตารางที่ 1 แล้วนำผลของส่วนที่หนึ่งและสองมาเปรียบเทียบกันเพื่อตรวจสอบว่าผลการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้มีความใกล้เคียงกับการวัดจากระบบจริงหรือไม่ โดยกำหนดรูปแบบความเร็วรอบของเครื่องชักผ้าตามรูปแบบที่ใช้จริงในขั้นตอนการปั่นแห้งซึ่งแสดงดังรูปที่ 8

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรเริ่มต้นของเครื่องชักผ้า

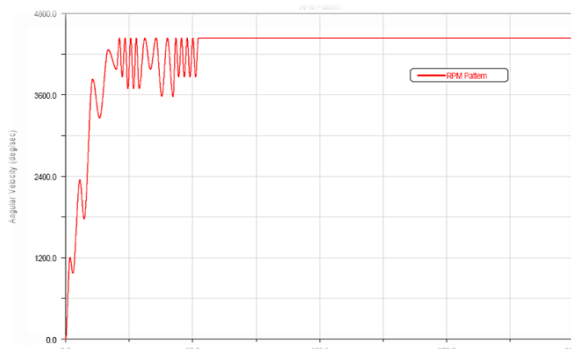
ตัวแปรเริ่มต้นของเครื่องชักผ้า	
มวลของตะกร้าใส่ผ้า	4 กิโลกรัม
มวลของถัง	4 กิโลกรัม
มวลของมอเตอร์	7 กิโลกรัม
มวลของระบบส่งกำลัง	5 กิโลกรัม
มวลของผ้าที่ชัก	1.2 กิโลกรัม
มวลของตัวทำสมดุลชนิดเหลว (ไม่รวมมวลของน้ำเกลือ)	1.1 กิโลกรัม
ค่า নিজของสปริง	2.5 นิวตัน / มิลลิเมตร
สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง	0.1 นิวตัน - วินาที/มม.



รูปที่ 6 ตำแหน่งที่ทำการวัดความสั่นสะเทือนของเครื่องชักผ้า



รูปที่ 7 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องชักผ้าและตำแหน่งพิกัด X , Y และ Z



รูปที่ 8 ความเร็วรอบของเครื่องซักผ้า ณ เวลาใด ๆ



รูปที่ 9 อุปกรณ์ในการวัดการสั่นสะเทือนประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ ตัวรวบรวมข้อมูล และ หัววัดความ สั่นสะเทือนชนิดความเร่ง



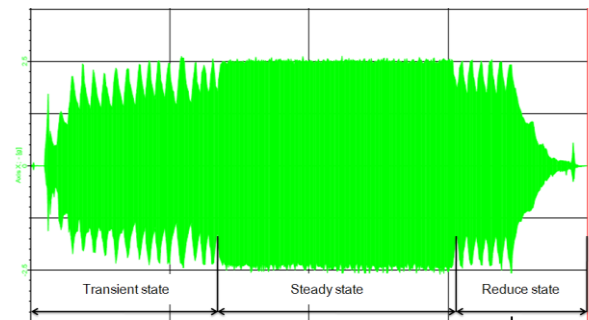
รูปที่ 10 การวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องซักผ้าใน ตำแหน่งต่าง ๆ

4. ผลการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์

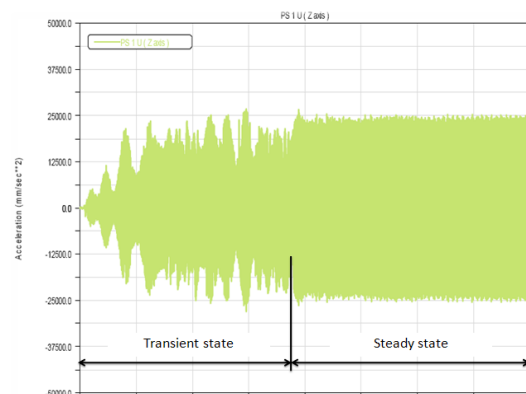
เทียบกับการวัดจริง

จากการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับการวัดจริงจะพบว่าความเร่งที่สภาวะปั่นป่วนในแต่ละตำแหน่งนั้นจะมีค่าสูงที่สุดในช่วงความเร็วคงที่ (steady state) ดัง รูปที่ 11 และ 12

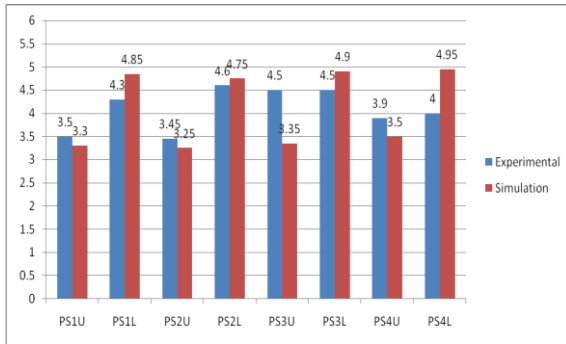
จากรูปที่ 13 , 14 และ 15 เป็นกราฟของความเร่งเฉลี่ยในตำแหน่งต่าง ๆ ทั้งแกน X , Y และ Z ในช่วงความเร็วรอบคงที่ของการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับการวัดจริง และพบว่าระนาบที่เกิดการสั่นสะเทือนมากที่สุดคือระนาบ XZ และรูปที่ 16 เป็นขนาดความเร่งในช่วงเวลา 1 วินาทีของการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์เทียบกับการวัดจริง ในช่วงความเร็วรอบคงที่ (Steady state)



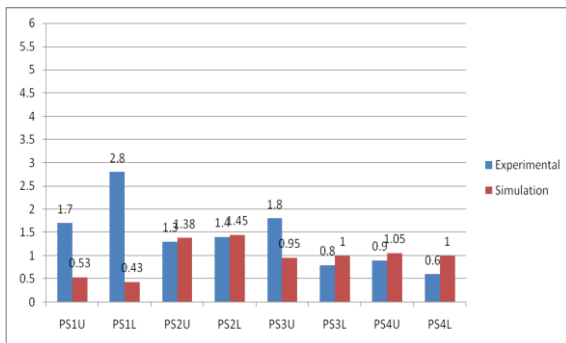
รูปที่ 11 กราฟโดเมนของเวลาในช่วงสภาวะปั่นป่วนในการวัดจริง



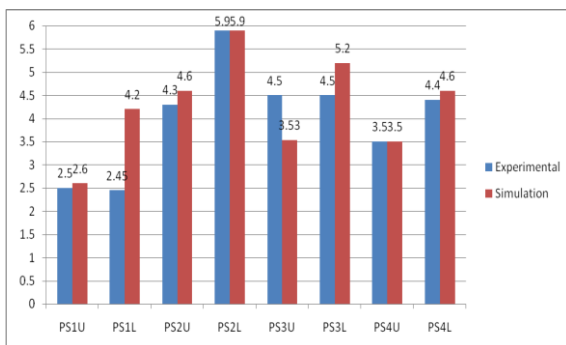
รูปที่ 12 กราฟโดเมนของเวลาในช่วงสภาวะปั่นป่วนในแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์



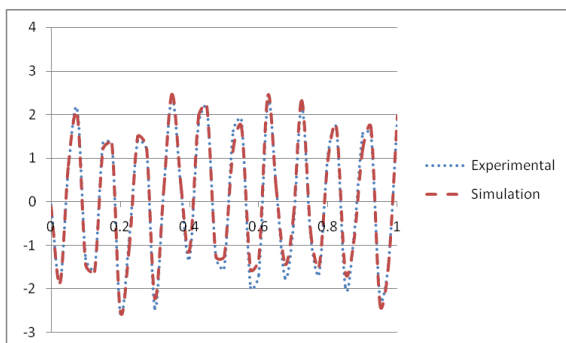
รูปที่ 13 ความเร่งในตำแหน่งต่าง ๆ ในแกน X



รูปที่ 14 ความเร่งในตำแหน่งต่าง ๆ ในแกน Y

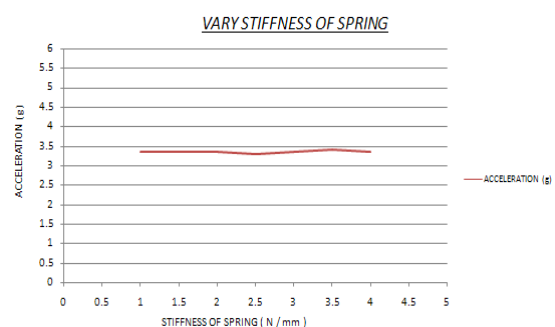


รูปที่ 15 ความเร่งในตำแหน่งต่าง ๆ ในแกน Z

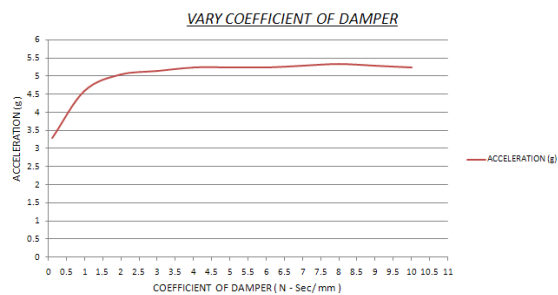


รูปที่ 16 ขนาดของความเร่งในช่วงความถี่รอบคงที่ของการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เทียบกับการวัดจริงภายในเวลา 1 วินาที

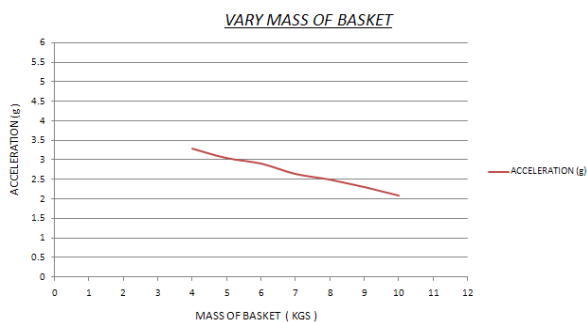
จากรูปที่ 11 - 16 จะพบว่าในส่วนของการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการวัดจริงนั้นมีความใกล้เคียงเป็นที่น่าสนใจ จึงสามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้สามารถแสดงแนวโน้มของการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรผ้าจริงได้ ค่าตัวแปรดังกล่าว อาทิเช่น น้ำหนักของตะกร้าใส่ผ้า , น้ำหนักของถัง ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง ค่านิยของสปริง เป็นต้น ผลจากการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนจะได้ผลดังรูปที่ 16-20 ซึ่งในรูปที่ 16-20 นั้นเป็นการวัดการสั่นสะเทือนแบบความเร่งที่ตำแหน่ง PS1U ในแกน X เพียงตำแหน่งเดียว และสามารถหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องจักรผ้าได้อยู่ที่ประมาณ 50 Hz ซึ่งมีค่ามากกว่าความถี่ทำงาน (Operational frequency) ของเครื่องจักรผ้าอยู่มาก โดยความถี่ทำงานของเครื่องจักรผ้าอยู่ที่ 11 Hz ดังนั้นจึงไม่เกิดการสั่นแบบเรโซแนนซ์เกิดขึ้นง่าย ๆ ในการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรของระบบดังกล่าวในสภาวะการทำงานของเครื่องจักรผ้าจริง และจากผลของการเปลี่ยนตัวแปร ตัวแปรที่ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนมากที่สุดคือค่ามวลต่างๆ และค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง



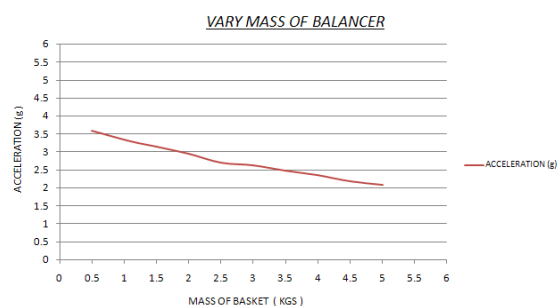
รูปที่ 16 ขนาดของการสั่นสะเทือนเมื่อปรับเปลี่ยนค่านิยของสปริง



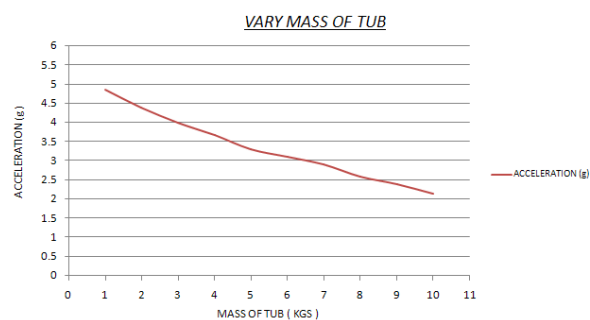
รูปที่ 17 ขนาดของการสั่นสะเทือนเมื่อปรับเปลี่ยน
ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วง



รูปที่ 18 ขนาดของการสั่นสะเทือนเมื่อปรับเปลี่ยน
มวลของตะกร้าใส่ผ้า



รูปที่ 19 ขนาดของการสั่นสะเทือนเมื่อปรับเปลี่ยน
มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว



รูปที่ 20 ขนาดของการสั่นสะเทือนเมื่อปรับเปลี่ยน
มวลของถัง

5.สรุปผลการทดลอง

จากการเปรียบเทียบผลการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทดลองวัดจริงนั้นพบว่ามีความใกล้เคียงกัน จึงสามารถใช้แบบจำลองนี้ศึกษาแนวโน้มของการเปลี่ยนตัวแปรที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนได้ และจากผลการทดลองวัดจริงพบว่าการสั่นสะเทือนมีมากในระนาบ XZ เมื่อเทียบกับแกน Y และหลังจากสั่นสะเทือนพบว่า ถ้าเพิ่มมวลของตะกร้าใส่ผ้า , มวลของตัวทำสมดุลชนิดของเหลว และมวลของถัง จะสามารถลดการสั่นสะเทือนลงได้ ส่วนการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้น และการปรับเปลี่ยนค่า n ของสปริงไม่สามารถลดค่าการสั่นสะเทือนได้มากเท่าที่ควร

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร. ณัฐวุฒิ เดิโปว และ รศ.ดร. อุณนัต พิณโสภณ ในการให้คำปรึกษาทางด้านเทคนิคต่าง ๆ และขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

7.1บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] Conrad, D.C. and Soedel, W., On the Problem of Oscillatory Walk of Automatic Washing Machines , Journal of Sound and Vibration, 1995, Vol. 188, No. 3, page 301-314.
- [2] S.Bae , J.M. Lee , Y.J. Kang , J.S. Kang and J. R. Yun , DYNAMIC ANALYSIS OF AN AUTOMATIC WASHING MACHINE WITH A HYDRAULIC BALANCER , Journal of Sound and Vibration , 2002 , Vol. 257 , No.1 , Page 3-18

- [3] Hai-Wei Chen , Qiu-Ju Zhang , Stability analyses of vertical axis automatic washing machine without balancer , Journal of Sound and Vibration , 24 May 2010 , Issue. 11 , Page 2177 - 2192

7.2 บทความจากเอกสารประกอบการประชุม (Proceedings)

- [4] HOON H.S. , YOUNG L. J. , SUZUKI S. and GU H. W. A , Study on the Dynamic Behaviour of an Automatic Washing Machine , 2001 Korea ADAMS User Conference , 2001. 11. 8~9, Page 1-6

7.3 หนังสือ

- [5] Rao, S. S. (2005), Mechanical Vibration , SI Edition, Prentice Hall.
- [6] De Silva, C. W. (2005), Vibration and Shock Handbook , CRC Press.

7.4 เว็บไซต์

- [7] Mechanical Department , Carnegie Mellon University “ ADAMS TUTORIAL ” URL : http://www.me.cmu.edu/academics/courses/N_SF_Edu_Proj/Dynamics_Adams/adams_tutor.Html