ME-NETT23 The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

DRC-004217

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23
4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

เครื่องถ่วงสมดุลสถิตด้วยโปรแกรม LabVIEW

Static Balancing Machine Using LabVIEW Program

วราคม เนิดน้อย และ พรชัย นิเวศน์รังสรรค์*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร หนองจอก กรุงเทพฯ 10530

*ผู้ติดต่อ: E-mail: nporncha@mut.ac.th, โทรศัพท์: (662) 9883666 ต่อ 3110, โทรสาร: (662) 9883666 ต่อ 3106

บทคัดย่อ

การเสียสมดุลเป็นปัญหาที่พบมากในเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนเช่น พัดลม ปั๊ม เพลา กังหัน เป็นต้น เครื่องจักรเหล่านี้จึงต้องทำการถ่วงสมดุลก่อนการใช้งานเสมอ แต่เมื่อใช้งานไปได้สักช่วงเวลาหนึ่งการไม่สมดุลนี้ก็จะเกิดขึ้นได้อีก การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดปฏิบัติการเครื่องถ่วงสมดุลด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อนำไปใช้สำหรับการสอนวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล ชุดปฏิบัติการนี้ประกอบด้วยจานถ่วงสมดุล เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ เซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือน ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมวิเคราะห์การถ่วงสมดุล ซึ่งพัฒนาด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยโปรแกรมสามารถคำนวณได้เฉพาะการสมดุลสถิต ซึ่งเป็นปัญหาการสมดุลแบบระนาบเดียว จากการศึกษาพบว่า ค่าผิดพลาดจากการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นกับตำแหน่งของมวลไม่สมดุล และขนาดมวลแก้ไข มีค่า $\pm 2^{\circ}$ และ $\pm 6\%$ ตามลำดับ เมื่อติดตั้งมวลทดสอบให้มีผลต่างระหว่างตำแหน่งมวลไม่สมดุลเริ่มต้น และตำแหน่งมวลทดสอบไม่เกิน $\pm 90^{\circ}$ ทั้งนี้โปรแกรมใช้การแปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนเวลา เป็นสัญญาณบนโดเมนความถี่ เพื่อใช้วิเคราะห์ความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นที่ความถี่ 1xRPM

คำหลัก: เครื่องถ่วงสมดุล สัญญาณการสั่นสะเทือน การวิเคราะห์สัญญาณ และโปรแกรม LabVIEW

Abstract

Unbalance is the typical problem found in various rotating machines such as fan, pump, shaft, turbine, etc. All rotating machines need to be balanced before operating these machines. After all of these machines are running at some periods of time, unbalance problem will be occurred. The aim of this study is to develop a laboratory rig of a balancing machine in order to use for teaching in a mechanical engineering laboratory subject. This laboratory rig composes of a balancing disk, a proximity sensor, an accelerometer, a signal conditioning unit, a data acquisition device and a desktop computer with balancing analysis program based on LabVIEW. This program is able to analyse only static balance on a single plane problem. From the results, the unbalancing mass location error and correcting mass error determined from the experiments in this study are about $\pm 2^{\circ}$ and $\pm 6\%$, respectively, when the difference between original unbalancing location and trial mass location is less than $\pm 90^{\circ}$. This program transforms vibration signal which based on time domain to frequency domain. Then the location and the mass of unbalance can be observed more easily at frequency 1xRPM.

Keywords: Balancing machine, Vibration signal, Signal analysis, LabVIEW Program.

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพภายใต้การผลิตที่ต้นทุนต่ำ ดังนั้นเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องมีความสมบูรณ์ในการทำงาน เพื่อทำให้การผลิตมีประสิทธิภาพ และมีของเสียน้อยที่สุด ปัญหาพื้นฐานที่เกิดกับเครื่องจักรทุกเครื่อง คือ ปัญหาเรื่องการสั่นสะเทือน ซึ่งเกิดได้จากหลายสาเหตุ ปัญหานี้ทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ภายในเครื่องจักรได้รับความเสียหาย เป็นเหตุให้อายุการใช้งานของเครื่องจักรสั้นลงอย่างรวดเร็ว และอาจเกิดอันตรายกับผู้ควบคุมเครื่องจักรได้ การตรวจสอบการสั่นสะเทือนเครื่องจักร เริ่มต้นจากการใช้ประสาทการรับรู้ของมนุษย์จากการฟัง การดู และการสัมผัสเครื่องจักร เพื่อที่จะหาสาเหตุของการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ซึ่งวิธีการนี้จะต้องใช้ประสบการณ์ และความชำนาญของช่าง จึงจะสามารถระบุสาเหตุความผิดปกติของเครื่องจักรได้ แต่ในปัจจุบันเครื่องจักรมีการออกแบบให้มีการทำงานที่ซับซ้อนทำให้มีชิ้นส่วนภายในเครื่องมากมาย ดังนั้นการใช้เพียงประสาทการรับรู้ของมนุษย์ และประสบการณ์ของช่าง ไม่สามารถหาสาเหตุความผิดปกติของเครื่องจักรได้ ด้วยเทคโนโลยีปัจจุบัน สัญญาณการทำงานทางกลต่างๆ ถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ด้วยเซ็นเซอร์ต่างๆ เช่น เซ็นเซอร์วัดรอบการหมุน เซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือนเป็นต้น โดยเชื่อมต่อสัญญาณไฟฟ้าเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูล และใช้โปรแกรมประมวลผลเพื่อค้นหาสาเหตุความผิดปกติของเครื่องจักรซึ่งจะสามารถวิเคราะห์สาเหตุได้ละเอียดง่าย และเร็วยิ่งขึ้น

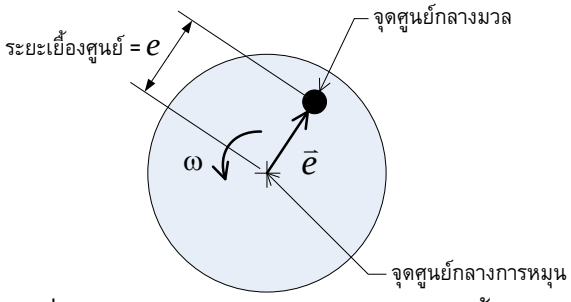
ปัญหาการสั่นสะเทือนที่พบในเครื่องจักรกลประเภทหมุนทุกชนิด มีสาเหตุมาจากการไม่สมดุล การไม่อยู่ในแนวเส้นตรง การบิดเบี้ยว การบิดตัวไปมา ความถี่กำธรที่ความเร็ววิกฤต นอกจากนั้นการสั่นสะเทือนอาจเกิดจากการคายตัว การเสียดทานภายใน ภาระไม่สม่ำเสมอ ชิ้นส่วนที่ได้รับความเสียหาย เป็นต้น [1-7] การสั่นสะเทือนเนื่องจากการไม่สมดุลมวล ของชิ้นส่วนหมุนเป็นปัญหาพื้นฐานที่พบได้มากที่สุด และเป็นปัญหาหลักของเครื่องจักรกล ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่จุดศูนย์ถ่วงไม่อยู่ที่จุดศูนย์กลางของการหมุน [1-3] สาเหตุนี้เกิดได้จากการผลิต วัสดุมีความหนาแน่นไม่เท่ากันตลอดชิ้นงาน รูเจาะไม่ขนานกับแนวเส้นศูนย์กลางการหมุน ความไม่สมบูรณ์ของกระบวนการผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างกลม หรือการเพิ่มชิ้นส่วนให้กับเครื่องจักรเป็นต้น ส่วนสาเหตุของความไม่สมดุลของชิ้นงานระหว่างการทำงานของเครื่องจักรอาจเกิดขึ้นจาก การเพิ่มขึ้นของสิ่งสกปรกรอบ ๆ ชิ้นส่วนหมุน หรือการสึกหรอของชิ้นส่วนหมุน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่แกนหมุน เนื่องจากเกิดการเพิ่มอุณหภูมิระหว่างการทำงาน เป็นต้น การแก้ไขปัญหาการไม่สมดุลของเครื่องจักรนั้นจะมีส่วนช่วยป้องกันการชำรุดเสียหายของโครงสร้าง การลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับระบบรองรับเช่น บู๊ช หรือแบริ่ง และลดการเกิดเสียงดังที่ผิดปกติ ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายของการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลลดน้อยลง

การสมดุลชิ้นส่วนหมุนแบ่งเป็น การสมดุลสถิตย์ (Static balancing) และการสมดุลแบบพลวัต (Dynamic balancing) การสมดุลสถิตย์คือการสมดุลชิ้นงานเป็นระนาบ เช่น แผ่นจาน ใบพัดลม เฟือง เป็นต้น ซึ่งมิติด้านยาวตามแกนหมุนไม่มีผลต่อการสมดุล ส่วนการสมดุลพลวัตเป็นการสมดุลแบบ 2 ระนาบที่มิติด้านยาวตามแกนหมุนมีผลต่อการสมดุล [1-3] การสมดุลชิ้นส่วนหมุนสามารถกระทำได้ด้วยการเพิ่มมวลหรือเอามวลออกจากชิ้นส่วน ซึ่งจำเป็นต้องรู้ข้อมูลขนาดของมวลที่ไม่สมดุล และตำแหน่งที่ไม่สมดุลบนชิ้นงาน ข้อมูลเหล่านี้สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้สัญญาณการสั่นสะเทือน และสัญญาณรอบการหมุน ปัจจุบันเครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจสอบการสมดุลของเครื่องจักรที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดนิยมใช้เซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือนร่วมกับเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ โดยเครื่องมือนี้จะรับข้อมูล และสามารถประมวลผลด้วยโปรแกรมภายในเครื่องที่ถูกออกแบบไว้ และให้คำตอบที่ผู้ใช้งานต้องการ เครื่องมือที่จำหน่ายในท้องตลาดนี้ราคาค่อนข้างสูง และสามารถทำการสมดุลสถิตย์ และสมดุลพลวัตได้ สำหรับ

การศึกษาเบื้องต้นนี้มีความประสงค์ที่จะพัฒนาชุดปฏิบัติการเครื่องถ่วงสมดุลสถิตย์ ด้วยเซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือน และเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ ชิ้นส่วนประกอบ และอุปกรณ์ต่างๆ ใช้จากสินค้ามาตรฐานที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ส่วนโปรแกรมประมวลผลพัฒนาด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้เป็นชุดปฏิบัติการสำหรับการสอนวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล

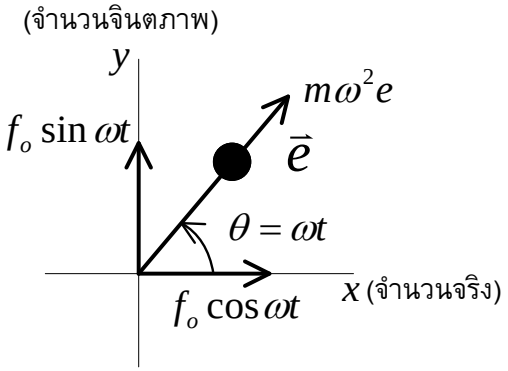
2. สมดุลสถิตย์

ชิ้นส่วนที่ลักษณะคล้ายกับแผ่นจานเช่น พัดลม เฟือง หินเจียรไน ล้อตุนกำลัง เป็นต้น ถ้าจุดศูนย์กลางมวลของแผ่นจานไม่อยู่บนแนวแกนหมุน ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุดังที่กล่าวมา แผ่นจานนี้จะไม่สมดุล [1-4] วิธีการทำให้แผ่นจานสมดุลอย่างง่าย ทำได้โดยนำเพลาติดตั้งในตำแหน่งแกนหมุนของแผ่นจาน และมีแบริ่งรองรับเพลานั้น ขั้นตอนการตรวจสอบจะทำการหมุนแผ่นจาน และปล่อยให้แผ่นจานหยุดเอง จากนั้นทำเครื่องหมายที่จุดที่ต่ำสุดของขอบแผ่นจาน ทำการตรวจสอบโดยการหมุนแบบนี้ซ้ำหลายๆ ครั้ง พร้อมทั้งทำเครื่องหมายดังกล่าว จากนั้นพิจารณาจุดที่ทำเครื่องหมายไว้ ถ้าจุดเหล่านั้นเกิดขึ้นกระจัดกระจาย หรือตำแหน่งไม่แน่นอน แสดงว่าแผ่นจานสมดุล แต่ถ้าจุดเหล่านั้นเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ๆกัน แสดงว่าแผ่นจานนี้ไม่สมดุล และบริเวณจุดนั้นคือบริเวณที่มวลมากกว่าบริเวณอื่น แต่ขนาดมวลที่ไม่สมดุลจะไม่สามารถระบุได้ วิธีการดังกล่าวนี้ เป็นวิธีการทำสมดุลชิ้นงานเบื้องต้น และใช้วิธีการเอามวลออก แต่ปริมาณมวลที่ต้องนำออก จะต้องคาดเดาเอาเอง จากนั้นก็ทดสอบสมดุลใหม่ และทำกระบวนการเหล่านี้จนชิ้นงานสมดุล อย่างไรก็ตามถ้าต้องการทำสมดุลชิ้นงานได้อย่างถูกต้อง และรวดเร็ว ก็ต้องใช้เครื่องมือสำหรับถ่วงสมดุล ซึ่งเครื่องมือจะสามารถตรวจสอบ เพื่อให้ค่ามวลที่ไม่สมดุล และตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุลได้อย่างถูกต้อง และรวดเร็ว หลักการคำนวณเพื่อทำสมดุลชิ้นงานมีสมการพื้นฐาน และรายละเอียดของอุปกรณ์ ดังนี้



รูปที่ 1 การไม่สมดุลของแผ่นจานของมวลเยื้องศูนย์

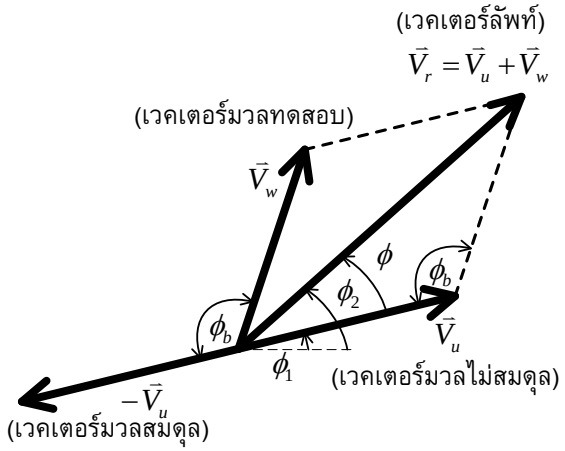
จากรูปที่ 1 แผ่นจานหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω รอบจุดหมุน สมมติว่าจุดศูนย์กลางมวลของแผ่นจานอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางการหมุนของแผ่นจานเท่ากับ e (เรียกว่าระยะเยื้องศูนย์) จากรูปที่ 2 กำหนดให้จุดศูนย์กลางการหมุนของแผ่นจานอยู่ที่ตำแหน่ง Origin ของแกนพิกัด $x-y$ ดังนั้นตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลแสดงได้ด้วยเวคเตอร์ $\vec{e}$ ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω โดยประกอบด้วยจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งแกน x แทนด้วยจำนวนจริง และแกน y แทนด้วยจำนวนจินตภาพ แรงหนีศูนย์กลางเนื่องจากมวลเยื้องศูนย์คือเวคเตอร์ที่มีทิศทางพุ่งออกจากจุด e และมีขนาดเท่ากับ $f_o = m\omega^2 e$ ซึ่งมีส่วนประกอบฮาร์โมนิกในแนวแกน x และ y มีค่าเท่ากับ $f_o \cos\omega t$ และ $f_o \sin\omega t$ ตามลำดับ เมื่อ $\theta = \omega t$ คือ มุมที่แสดงทิศทางของแรงหนีศูนย์เทียบกับแกน x การทำให้แผ่นจานสมดุล จะสามารถกระทำได้ด้วยการเพิ่มมวล m ที่ตำแหน่งเวคเตอร์ $-\vec{e}$ นั้นคือขนาดมวล m และตำแหน่งของเวคเตอร์ $\vec{e}$ ต้องสามารถวิเคราะห์ได้



รูปที่ 2 แรงหนีศูนย์กลางเนื่องจากมวลที่ไม่สมดุล

การวิเคราะห์เพื่อหาค่ามวล m และตำแหน่งของเวคเตอร์ $\vec{e}$ จำเป็นต้องนำเครื่องมือวัดมาช่วยวิเคราะห์ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ใช้เซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือนในการเก็บข้อมูล หรือสัญญาณการสั่นที่เกิดขึ้นที่เพลาของชุดทดลอง ขั้นตอนการวิเคราะห์สมดุลจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงเรขาคณิต ซึ่งมีขั้นตอนการตรวจสอบ และวิเคราะห์ผลดังนี้ ดูรูปที่ 3

- วัดความไม่สมดุลเริ่มต้น ทำได้โดยวัดขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือน (V_u) และมุมเฟส ϕ_1 ของแรงหนีศูนย์กลางเนื่องจากมวลเยื้องศูนย์ m โดยมุมเฟส จะวัดเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง
- การเพิ่มมวลทดสอบ ทำได้โดยนำมวลทดสอบ m_b ที่ทราบขนาด ไปติดตั้งบนแผ่นจานในตำแหน่งที่กำหนดไว้ ซึ่งมวลที่เพิ่มเข้าไปจะทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง $\vec{V}_w$ และแรงลัพท์ที่เกิดขึ้นกับจานหมุนคือ $\vec{V}_r$ ซึ่งเป็นแรงหนีศูนย์กลางที่เป็นผลรวมของมวลไม่สมดุลเริ่มต้น และมวลทดสอบที่เพิ่มเข้าไป
- ขนาดความไม่สมดุลรวมของมวล m และ m_b และตำแหน่งของ $\vec{V}_r$ สามารถวัดได้โดยวัดจากขนาดสัญญาณการสั่นสะเทือน ($\vec{V}_r$) และ มุมเฟส ϕ_2 ซึ่งวัดเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงเดียวกันกับ มุมเฟส ϕ_1



รูปที่ 3 ผังเวคเตอร์ของสมดุลสถิตย์

จากผังเวคเตอร์ดังรูปที่ 3 แรงหนีศูนย์กลาง $\vec{V}_u$ และ $\vec{V}_w$ เกิดจากมวลไม่สมดุลเริ่มต้น และมวลทดสอบตามลำดับ ผลของความไม่สมดุลจากมวลทั้งสองคือ $\vec{V}_r = \vec{V}_u + \vec{V}_w$ ดังนั้นการถ่วงสมดุลมวลเพื่อให้จานหมุนอย่างสมดุลกระทำได้ด้วยการหาค่าขนาด และทิศทางของเวคเตอร์ $-\vec{V}_u$ ซึ่งถ้าทราบค่ามุม ϕ_b จะทำให้ทราบทิศทางของเวคเตอร์ $-\vec{V}_u$ สมมติให้มวลถ่วงที่เพิ่มเพื่อให้เกิดสมดุลมีค่าเท่ากับ m_b และเพิ่มเข้าไปที่ระยะเยื้องศูนย์เท่ากับตำแหน่งของมวลทดสอบ มวลถ่วง m_b คำนวณได้จากสมการ

$$\frac{m_b}{m_t} = \frac{V_u}{V_w} \qquad (1)$$

ดังนั้นการคำนวณหามวลถ่วง m_b จำเป็นต้องทราบอัตราส่วน V_u/V_w ซึ่งขนาดของ $\vec{V}_w$ (รูปที่ 3) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (2)$$

$$V_w^2 = V_u^2 + V_r^2 - 2V_uV_r\cos\phi \quad (3)$$

จากสมการ (2) และ (3) ทำให้ทราบค่า V_w ส่วนมุม ϕ_b (รูปที่ 3) คำนวณได้จาก

$$V_r^2 = V_u^2 + V_w^2 - 2V_uV_w\cos\phi_b$$

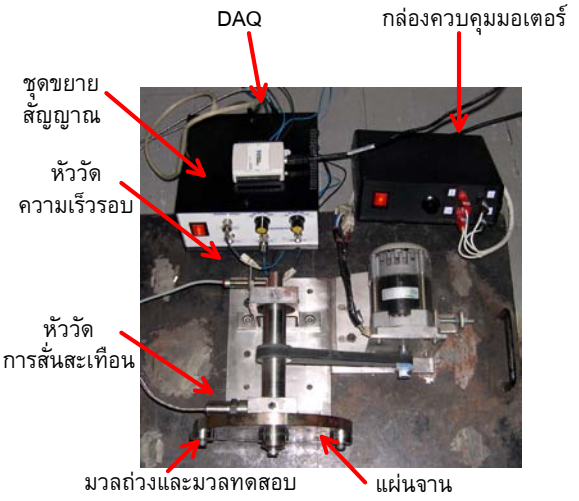
$$\phi_b = \cos^{-1}\frac{V_u^2 + V_w^2 - V_r^2}{2V_uV_w} \qquad (4)$$

มุม ϕ_b ที่คำนวณจากสมการที่ (4) อาจจะหาค่าได้จากผังเวคเตอร์ดังรูปที่ 3 โดยการวัดมุมระหว่างเวคเตอร์ $-\vec{V}_u$ และ $\vec{V}_w$ ดังนั้นตำแหน่งของมวลไม่สมดุลเริ่มต้น (Original unbalance) จะวัดจากตำแหน่งของมวลทดสอบออกไปเท่ากับ ϕ_b และมีขนาดเท่ากับมวลที่คำนวณได้ตามสมการที่ (1) ถ้าต้องการใช้วิธีแก้ไขด้วยการเพิ่มมวลจะต้องบวกมุมเพิ่มอีก 180° จากตำแหน่งของมวลไม่สมดุลเริ่มต้นที่คำนวณได้

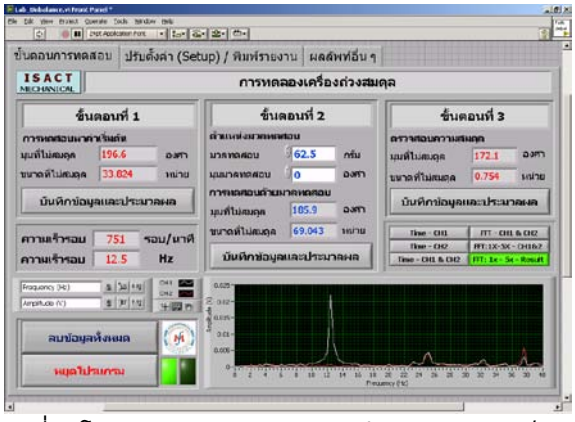
3. การทดลอง

ชุดปฏิบัติการเครื่องถ่วงสมดุลนี้เป็นชุดที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นโดยใช้วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ชุดปฏิบัติการนี้ประกอบด้วย เครื่องถ่วงสมดุล เซ็นเซอร์ วัดการสั่นสะเทือน เซ็นเซอร์ วัดความเร็วรอบ อุปกรณ์เก็บ และแปลงข้อมูล พร้อม ชุดปรับปรุงสัญญาณการสั่นสะเทือน สัญญาณทั้งหมดจะถูกบันทึก และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม LabVIEW [8] ซึ่งการพัฒนาโปรแกรมในขั้นต้นนี้ ใช้สำหรับ กรณี การถ่วงสมดุลแบบสถิตย์เท่านั้น ชุดปฏิบัติการ และโปรแกรมการถ่วงสมดุลสถิตย์แสดง ไว้ในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ เซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ Monitran รุ่น MTN/1100CQ มีความไวประมาณ 100 mV/g และเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบเป็น Proximity switch แบบ NPN ซึ่งจะให้สัญญาณหนึ่งลูกคลื่นต่อรอบ โดยที่เซ็นเซอร์วัดทั้งสองจะถูกติดตั้งในแนวนอนดังรูปที่ 4 เซ็นเซอร์ วัดการสั่นสะเทือนจะติดตั้งที่ โครง แบริ่งตัวหน้าที่ติดกับแผ่นจาน ส่วน เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบจะติดตั้งที่ด้านท้ายของเพลา เซ็นเซอร์ทั้งสองจะต้องใช้ร่วมกับชุดปรับปรุงสัญญาณซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับเซ็นเซอร์ทั้งสอง โดยสัญญาณขาออกของเซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือนสามารถที่จะปรับอัตราขยายสัญญาณได้ดังนี้คือ อัตราขยายที่ 1, 5, 10, 30 และ 100 เท่า

สัญญาณการสั่นสะเทือน และสัญญาณความเร็วรอบจะถูกบันทึกพร้อมกันด้วยโปรแกรมการถ่วงสมดุลย์สถิตย์ที่พัฒนาบนโปรแกรม LabVIEW ชุดปฏิบัติการจะมีความเร็วรอบที่ใช้ทดสอบประมาณ 750 รอบต่อนาที และเงื่อนไขการเก็บข้อมูลขณะทดสอบคือ อัตราการเก็บข้อมูล (Sampling rate) จะกำหนดไว้ที่ 20,000 ข้อมูลต่อวินาที จำนวนข้อมูลที่บันทึกเท่ากับ 50,000 ข้อมูล การทดลองการสมดุลสถิตย์บนแผ่นจานทำได้จากการจำลอง ความไม่สมดุลของแผ่นจานด้วยมวลขนาด 62.5 กรัม ซึ่งถูกติดตั้งบนแผ่นจาน ที่รัศมีเท่ากับ 9 เซนติเมตร ณ ตำแหน่งดัง ต่อนี้ 22.5°, 67.5°, 112.5°, 157.5°, 202.5°, 247.5°, 292.5° และ 337.5° ส่วนขนาดมวลทดสอบที่ใช้มีขนาดเท่ากับ 62.5 กรัม และถ่วงที่ตำแหน่ง 0 ° ตลอดการจำลองความไม่สมดุล ซึ่งตำแหน่งต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6



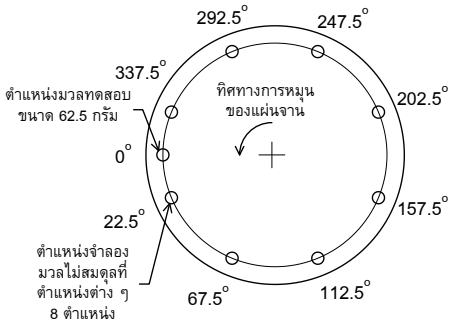
รูปที่ 4 ชุดปฏิบัติการเครื่องถ่วงสมดุล



รูปที่ 5 โปรแกรม LabVIEW สำหรับการวิเคราะห์การถ่วงสมดุลย์สถิต

ขั้นตอนการทดลองมี 4 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก การจำลองการไม่สมดุลให้ถ่วงมวล ตาม ตำแหน่งที่ต้องการ ขั้นตอนที่สองวัดขนาดการสั่นสะเทือน และมุมเฟส ของ สัญญาณการสั่นสะเทือนของมวลที่ไม่สมดุล ขั้นตอนที่สามถ่วงมวลทดสอบ และขั้นตอนสุดท้ายวัดขนาดการสั่นสะเทือน และมุมเฟส ของสัญญาณการสั่นสะเทือน รวมของมวลไม่สมดุล และมวลทดสอบ ขั้นตอนการทดลองที่กล่าวถึงนี้ และขั้นตอนการวิเคราะห์ได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 2 การทดลองของแต่ละการจำลองจะทำการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน ตำแหน่งละ 5 ครั้ง สัญญาณ

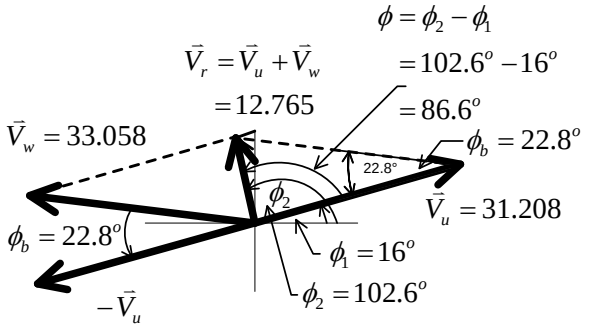
การสั่นสะเทือนที่บันทึกได้จากชุดทดลองในการศึกษาครั้งนี้จะใช้อัตราขยายที่ 10 เท่าเพื่อทำให้สัญญาณอยู่ที่ระดับที่สังเกตได้ชัด สัญญาณที่บันทึกจากการทดลองจะไม่คำนึงถึงค่าการสั่นสะเทือนจริงเนื่องจากไม่มีผลต่อการคำนวณ (หากต้องการขนาดของค่าการสั่นสะเทือนจริง จะต้องนำเอาอัตราขยาย และค่าความไวของเซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือนมาคำนวณจึงจะได้ค่าจริง)



รูปที่ 6 ตำแหน่งการจำลองมวลไม่สมดุล และตำแหน่งมวลทดสอบ

4. ผลการทดลอง

สัญญาณการสั่นสะเทือน และสัญญาณความเร็วรอบจะถูกบันทึกพร้อมกันซึ่งสัญญาณทั้งสองจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อหาตำแหน่งของมวลไม่สมดุลเริ่มต้นบนจานหมุน ตัวอย่างการวิเคราะห์การสมดุลสถิตย์ของแผ่นจานแสดงรายละเอียด ของผังเวคเตอร์ ดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็นผลการทดลองของการจำลองมวลไม่สมดุลขนาด 62.5 กรัม ที่ตำแหน่ง 202.5° เมื่อนำสัญญาณการสั่นสะเทือนที่บันทึกได้มาวิเคราะห์พบว่ามีขนาดแอมปริจูด $\vec{V}_u$ เท่ากับ 31.208 หน่วย และมุมเฟส ϕ_1 เท่ากับ 16° เมื่อทำการทดสอบด้วยมวลทดสอบขนาด 62.5 กรัมที่ตำแหน่ง 0° พบว่ามีขนาดแอมปริจูดของ $\vec{V}_r$ เท่ากับ 12.765 หน่วย และมุมเฟส ϕ_2 เท่ากับ 86.6° ขนาดแอมปริจูดการสั่นเนื่องจากมวลทดสอบ $\vec{V}_w$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3) โดยใช้ค่า $\vec{V}_u$, $\vec{V}_r$, ϕ_1 และ ϕ_2 ส่วนมุม ϕ_b ที่นำมาใช้สำหรับหาตำแหน่งสมดุลของแผ่นจานคำนวณได้จากสมการที่ (4) โดยใช้ค่าแอมปริจูดของ $\vec{V}_u$, $\vec{V}_r$ และ $\vec{V}_w$ จากการวิเคราะห์พบว่าขนาดของ $\vec{V}_w$ เท่ากับ 33.058 หน่วย ทิศทางของ $\vec{V}_w$ จะเริ่มต้นที่ปลายของ $\vec{V}_u$ พุ่งเข้าหาปลายของ $\vec{V}_r$ และมุม ϕ_b เป็นมุมระหว่าง $\vec{V}_u$ และ $\vec{V}_w$ มีค่าเท่ากับ 22.8° นอกจากนี้การหาขนาดของ $\vec{V}_w$ และ ϕ_b ยังสามารถกระทำได้โดยการวัดขนาดจากผังเวคเตอร์ดังรูป 7 เมื่อเวคเตอร์ต่าง ๆ ถูกเขียนอยู่บนสเกลที่ถูกต้อง

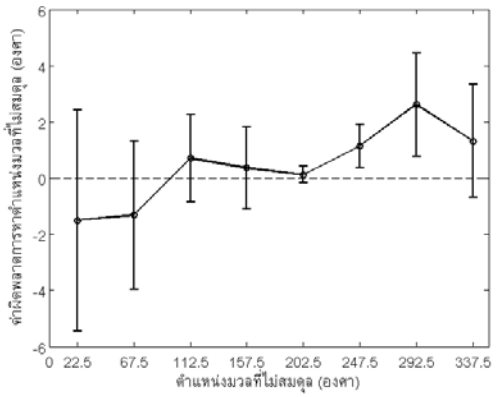


รูปที่ 7 ตัวอย่างการวิเคราะห์การสมดุลย์สถิตย์

มวลแก้ไขที่ทำให้แผ่นจานสมดุลสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (1) มีขนาดเท่ากับ 59.0 กรัม และตำแหน่งของมวลไม่สมดุลเริ่มต้นจะวัดจากตำแหน่งของมวลทดสอบที่ 0° พบว่าเท่ากับตำแหน่ง 22.8° บนแผ่นจาน จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าตำแหน่งที่คำนวณได้มีค่าผิดพลาดของตำแหน่งเท่ากับ 0.4 ° แต่ค่าผิดพลาดของมวลที่คำนวณได้จะผิดพลาดไปเท่ากับ 3.5 กรัม หรือประมาณ 5.6 % นอกจากนี้โปรแกรมการถ่วงสมดุลสถิตย์ดังรูปที่ 5 ยังสามารถวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงฟูเรียร์จึงทำให้สามารถสังเกตเห็นได้ชัดว่าเมื่อแผ่นจานไม่สมดุลจะมีค่าความถี่ที่ 1xRPM (ความถี่ 1 เท่าของความเร็วรอบ) เกิดขึ้นอย่างชัดเจน แต่เมื่อใส่มวลแก้ไขเพิ่มเข้าไปจะทำให้ความถี่ที่ 1 xRPM ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถใช้กราฟความถี่ช่วยตรวจสอบการสมดุลของแผ่นจานได้

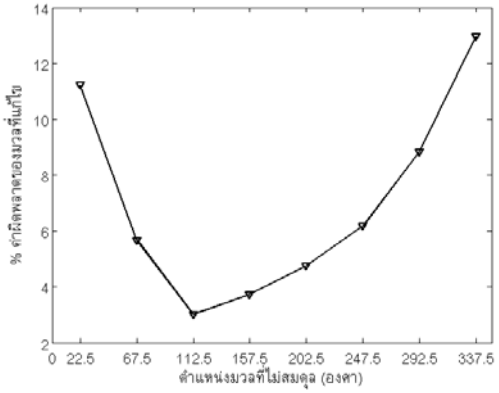
การหาตำแหน่งมวลไม่สมดุลที่ตำแหน่ง 22.5 ° – 337.5° (8 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 6) พบว่าการหาตำแหน่งมีค่าผิดพลาดดังรูปที่ 8 โดยที่วงกลมหมายถึงค่าผิดพลาดเฉลี่ยของ การหาค่า แต่ละตำแหน่ง ส่วน

Error-bar แสดงถึงค่า สองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อทำการวิเคราะห์หาตำแหน่งมวลไม่สมดุลพบว่า 95 % ของตำแหน่งที่คำนวณได้จะมีค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะไม่เกิน Error-bar [9-10] ที่แสดงในรูปที่ 8 ส่วนเส้นประ เป็นเส้นแสดงถึงค่าผิดพลาดการหาตำแหน่งเท่ากับศูนย์ ค่าผิดพลาดของการจำลองมวลไม่สมดุลที่ตำแหน่ง 112.5° – 247.5° เป็นตำแหน่งที่มีค่าผิดพลาดน้อยกว่าตำแหน่งที่เหลือ

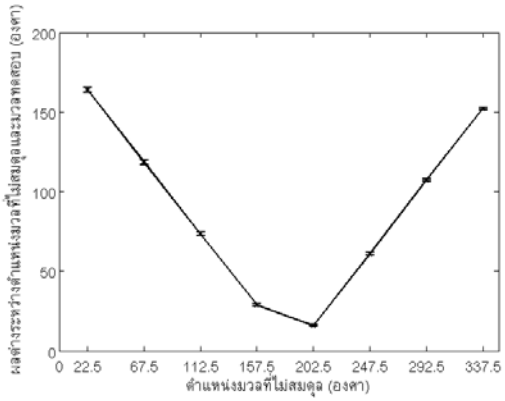


รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบค่าผิดพลาดการหาตำแหน่งมวลไม่สมดุลที่ตำแหน่งต่าง ๆ

เปอร์เซนต์ค่าผิดพลาดของมวลที่แก้ไขที่คำนวณมาจากสมการที่ (1) เทียบกับมวลไม่สมดุลขนาด 62.5 กรัมที่ใช้ในการจำลองการไม่สมดุลของแผ่นจานแสดงดังรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซนต์ค่าผิดพลาดของมวลที่แก้ไขตลอดการจำลองที่ตำแหน่งต่าง ๆ ไม่เกิน 13% ถ้าพิจารณาเฉพาะช่วงตำแหน่ง 112.5° – 247.5° จะพบว่าค่าผิดพลาดจะมีค่าประมาณไม่เกิน 6%



รูปที่ 9 กราฟเปอร์เซนต์ค่าผิดพลาดของมวลที่แก้ไข



รูปที่ 10 กราฟผลต่างระหว่างตำแหน่งของมวลไม่สมดุลและมวลทดสอบ

กราฟรูปที่ 10 เป็นการเปรียบเทียบผลต่างระหว่างตำแหน่งของมวลไม่สมดุลและตำแหน่งมวลทดสอบ ซึ่งตำแหน่งมวลไม่สมดุลก็คือมุมเฟส ϕ_1 ที่วัดได้ และตำแหน่งมวลทดสอบคือ ตำแหน่ง 0 ° บนแผ่นจาน จะเห็นได้ว่าถ้าผลต่างของตำแหน่งระหว่างมวลไม่สมดุล (ϕ_1) และมวลทดสอบดังรูปที่ 10 มีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าผิดพลาดของตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุลดังรูปที่ 8 และเปอร์เซนต์ค่าผิดพลาดของมวลที่แก้ไขก็จะมีค่ามากโดยเฉพาะที่ตำแหน่ง 22.5°, 67.5°, 292.5 และ 337.5° จากการสังเกตกราฟรูปที่ 8 – 10 อาจกล่าวได้ว่าถ้าต้องการให้ค่าผิดพลาดการหาตำแหน่งไม่สมดุล และค่าผิดพลาดของมวลที่แก้ไขมีค่าน้อยควรจะถ่วงมวลทดสอบในตำแหน่งที่ผลต่างระหว่างตำแหน่งของมวลไม่สมดุล (ϕ_1) และตำแหน่งของมวลทดสอบอยู่ในช่วงไม่เกิน ±90° ของตำแหน่งมวลไม่สมดุล (ϕ_1) จะทำให้ค่าผิดพลาดของการหาตำแหน่งประมาณ ±2° และ เปอร์เซนต์ค่าผิดพลาดของการหามวลแก้ไขไม่เกิน 6% หรือไม่เกิน 3.75 กรัม

5. สรุป

การศึกษานี้ได้พัฒนาชุดปฏิบัติการเครื่องถ่วงสมดุลซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นชุดปฏิบัติการสำหรับการเรียนการสอนในวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกลของนักศึกษาประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ชุดปฏิบัติการที่

พัฒนาขึ้นประกอบด้วย เครื่องถ่วงสมดุล ชุดปรับปรุงสัญญาณ อุปกรณ์เก็บข้อมูล เซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือน เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ และคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมวิเคราะห์การถ่วงสมดุล ค่าผิดพลาดต่างๆ จากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นในชุดปฏิบัติการนี้ ทั้งตำแหน่งของมวลไม่สมดุล และขนาดมวลแก้ไขมีค่าประมาณ $\pm 2^{\circ}$ และ ไม่เกิน 6% ตามลำดับเมื่อการถ่วงมวลทดสอบมีผลต่างระหว่างตำแหน่งมวลไม่สมดุลเริ่มต้น (ϕ_1) และตำแหน่งมวลทดสอบไม่เกิน $\pm 90^{\circ}$ ของตำแหน่งมวลไม่สมดุล (ϕ_1) ส่วนชุดปฏิบัติการนี้ยังต้องปรับปรุงและพัฒนาต่อไปเพื่อให้สามารถทำการสมดุลแบบพลวัต ซึ่งเป็นการสมดุลแบบ 2 ระนาบได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายวิเชน เสริมกลิ่น และ นาย เทอดศักดิ์ ใจงาม นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ช่วยพัฒนาและปรับปรุงชุดปฏิบัติการเครื่องถ่วงสมดุลสถิตย์นี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] De Silva, C. W. (2000), *Vibration: Fundamentals and Practice*, CRC Press.

[2] De Silva, C. W. (2005), *Vibration and Shock Handbook*, CRC Press.

[3] Rao, S. S. (2005), *Mechanical Vibration*, SI Edition, Prentice Hall.

[4] Girdhar, P. (2004), *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance:- Practical Professional*, Elsevier.

[5] Norfield, D. (2006), *Practical Balancing of Rotating Machinery*, Elsevier.

[6] McMillan, R. B. (2004), *Rotating Machinery - Practical Solutions to Unbalance and Misalignment*, Fairmont Press, Inc. & Marcel Dekker, Inc.

[7] Eisenmann, R. C., Sr. and Eisenmann, R. C., Jr. (1997), *Machinery Malfunction Diagnosis and Correction: Vibration Analysis and Troubleshooting for the Process Industries*, Prentice Hall

[8] National Instruments (2003), LabVIEW – User Manual, National Instruments.

[9] Galyer, J. F. W. and Shotbolt, C. R. (1995), *Metrology for Engineers*, 5th Edition, Cassell.

[10] Beckwith, T. G. and Marangoni, R. D. (1990), *Mechanical Measurements*, 4th Edition, Addison-Wesley.