

# การวิเคราะห์และออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงความเร็วสูง Analysis and Design for High Speed Hematocrit Centrifuge Machine

อภิสิทธิ์ ทวีอภิรดีรัตน์<sup>1</sup> ศิริพงษ์ ปะวะโก<sup>1</sup> อัษฎายุทธ รอดพ่าย<sup>1</sup> และจิระพล ศรีเสริฐผล<sup>1\*</sup>  
Apisit Taweepiradeerattana<sup>1</sup> Siripong Pawako<sup>1</sup> Autsadayut Rodpai<sup>1</sup> and  
Jiraphon Srisertpol<sup>1\*</sup>

Received: May 15, 2019; Revised: September 16, 2019; Accepted: September 26, 2019

## บทคัดย่อ

เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกเซลล์เม็ดเลือดแดงออกจากน้ำเลือด โดยอาศัยมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วรอบระหว่าง 10,000 - 14,000 รอบต่อนาที สร้างแรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ให้กับตัวอย่างเลือดแล้วนำตัวอย่างนั้นไปประมาณหาค่าเปอร์เซ็นต์เม็ดเลือดแดงอัดแน่นเพื่อใช้วิเคราะห์ผลทางการแพทย์ ปัจจุบันเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง ดังนั้นการพัฒนาเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงความเร็วสูงให้มีประสิทธิภาพสูงเป็นการเพิ่มความสามารถผู้ผลิตภายในประเทศให้สามารถแข่งขันกับต่างประเทศและเป็นไปตามมาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุข บทความนี้ได้เสนอผลการวิเคราะห์หลักการทำงานและการออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงต้นแบบ โดยออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน สร้างเครื่องถ่วงสมดุลแนวตั้งใช้ถ่วงสมดุลจานหมุนที่บรรจุหลอดเลือดทดสอบ เพื่อลดขนาดการสั่นเนื่องจากการเสียสมดุลของจานหมุนที่ผลิตใช้ และการวิเคราะห์เพื่อเลือกใช้ฉนวนการสั่นสะเทือนที่ลดแรงส่งผ่านการสั่นจากโรเตอร์สู่ตัวเครื่อง ซึ่งทำให้เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงต้นแบบมีประสิทธิภาพในการทำงานเทียบเท่าผลิตภัณฑ์นำเข้าจากต่างประเทศได้

คำสำคัญ : เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง; แรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์; การออกแบบระบบควบคุม; การถ่วงสมดุลแนวตั้ง; ฉนวนการสั่นสะเทือน

<sup>1</sup> สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<sup>1</sup> Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

\* Corresponding Author E - mail Address: jiraphon@sut.ac.th

## Abstract

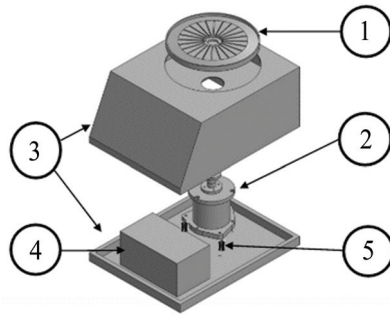
Hematocrit Centrifuge Machine (HCM) is a tool used for separating red blood cells from blood. By using a motor that rotates at a speed between 10,000 and 14,000 rpm, it generates a relative centrifugal force (RCF) for the blood sample. Prior to medical analysis process, the blood samples were estimated percent of red blood cells. Currently, most of HCM's products imported from other countries are expensive. Therefore, creating knowledge and increasing efficiency of high speed HCM that meets the standards of the Ministry of Public Health can help domestic manufacturers compete with international companies. This paper present the analysis of working principle and the design of HCM prototype, with brushless direct current motor speed control system for controlling the speed of work with stable condition. The Vertical Balancing Device (VBD) is used to balance the disk, which packs up the micro-hematocrit tube test, it can reduce vibration from its unbalance. Moreover, the analysis for accurate vibration isolators can reduce the vibration's force transmissibility from disk rotor to body-chamber. This allows the HCM prototype to have the same working efficiency as imported products.

**Keywords:** Hematocrit Centrifuge Machine; Relative Centrifugal Force (RCF); Control System Design; Vertical Balancing; Vibration Isolator

## บทนำ

เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง (Hematocrit Centrifuge Machine: HCM) คือเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) ที่เกิดจากการหมุนรอบจุดหมุน (Center of Rotation) ในการเร่งการตกตะกอนของเม็ดเลือดแดง [1] - [2] เพื่อแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมาและเซลล์เม็ดเลือดขาวภายในเลือด แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานปริมาณของเซลล์เม็ดเลือดแดงในเลือด เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์เม็ดเลือดแดงอัดแน่นที่ใช้วิเคราะห์ผลทางการแพทย์เบื้องต้น [2] - [3] ดังนั้นเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงจึงเป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นอย่างมากทั้งในทางการแพทย์และวิทยาศาสตร์องค์ประกอบหลักโดยทั่วไปของเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบไปด้วย

1. จานหมุนเหวี่ยง (Centrifuge Disk)
2. มอเตอร์
3. ตัวเครื่อง
4. ระบบควบคุมและแสดงผลการทำงาน
5. ฉนวนการสั่นสะเทือน



รูปที่ 1 (ก) เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง (ข) องค์ประกอบหลักของเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง  
รูปที่ 1 เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงและองค์ประกอบแบบแยกส่วน

ปัจจุบันเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงส่วนมากที่ใช้ภายในประเทศนั้นนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพงประมาณเครื่องละ 30,000 - 90,000 บาท ส่วนเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงที่สามารถผลิตใช้ได้ภายในประเทศนั้นก็ยังมีประสิทธิภาพในการแข่งขันพอเพียงกับเครื่องที่นำเข้าจากต่างประเทศได้ [2]

เพื่อสร้างกระบวนการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงความเร็วสูงให้กับผู้ผลิตภายในประเทศให้สามารถแข่งขันกับต่างประเทศและเป็นไปตามรายละเอียดและคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงความเร็วสูงที่แต่ละโรงพยาบาลได้ประกาศเป็นหลักเกณฑ์ที่เทียบเคียงการจัดซื้อของกระทรวงสาธารณสุข บทความนี้ได้เสนอผลกรวิเคราะห์หลักการทำงานและการออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงเครื่องต้นแบบ โดยออกแบบจานหมุนเหวี่ยงพร้อมระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless Direct Current Motor: BLDC motor) สำหรับเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนานั้น ผู้ผลิตต้องการให้จานหมุนเหวี่ยงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 165 mm ดังนั้นความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่จะมีแรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ (Relative Centrifugal Force: RCF) ที่พอเพียงต่อการแยกเซลล์เม็ดเลือดแดงออกจากพลาสมาและเซลล์เม็ดเลือดขาวภายในเลือดได้จะต้องสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำที่  $12,000 \text{ rpm} \pm 5\%$  เพื่อทำให้เกิดการแยกตัวของเลือดอย่างสมบูรณ์ภายในเวลาที่กำหนดตามได้ออกแบบเครื่องถ่วงสมดุลแนวตั้ง (Vertical Balancing Device: VBD) เพื่อใช้ในการถ่วงสมดุล (Balancing) ให้แผ่นจานหมุนเหวี่ยงมีการเสียสมดุล (Unbalance) น้อยที่สุดเป็นการลดปัญหาการสั่นสะเทือนเนื่องจากการเสียสมดุลของจานหมุนเหวี่ยง การวิเคราะห์และเลือกจนวนการสั่นเพื่อลดแรงส่งผ่านการสั่นจากโรเตอร์สู่ตัวเครื่อง

การออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง โดยการเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนเหวี่ยงที่สัมพันธ์กับความเร็วรอบใช้งานของมอเตอร์ให้มีแรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ วัสดุที่ใช้สร้างจานหมุนเหวี่ยงน้ำหนักของจานหมุนเหวี่ยง กำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าที่สามารถหมุนจานหมุนได้หรือขนาดของมอเตอร์ที่เหมาะสม และในส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง คือการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์สามารถทำงานได้ในขอบเขตเงื่อนไขที่กำหนด การวิเคราะห์และเลือกจนวนการสั่นสะเทือนสำหรับลดแรงสั่นสะเทือนที่ส่งจากโรเตอร์จานหมุนเหวี่ยงมาสู่ตัวเครื่อง และเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตด้วยการออกแบบเครื่องถ่วงสมดุลแนวตั้งสำหรับถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยง ซึ่งเป็นการลดการสั่นสะเทือนเนื่องจากการเสียสมดุลของจานหมุนเหวี่ยง [4] - [5]

## หลักการวิเคราะห์และการออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดง

หลักการสำคัญที่ทำให้เครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงสามารถแยกเม็ดเลือดแดงออกจากน้ำเลือดนั้นคือ แรงหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ที่เกิดจากการหมุนของจานหมุนเหวี่ยงที่มีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนเหวี่ยงและความเร็วรอบจากมอเตอร์จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญของเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงที่เป็นหัวใจสำคัญของเครื่องที่ต้องพิจารณาก่อนเป็นอันดับแรก เพื่อให้เครื่องสามารถสร้าง RCF ที่มีขนาดอย่างน้อย 1,000 G และกระทำเป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 5 นาที เป็นไปตามหลักการ ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกเม็ดเลือดแดงออกจากน้ำเลือดได้อย่างสมบูรณ์ [1] - [2], [6] และสามารถนำตัวอย่างเลือดไปวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง ในการออกแบบขนาด วัสดุของจานหมุนเหวี่ยง ความเร็วรอบการทำงานของเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงจะใช้ข้อมูลเบื้องต้นจากเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงของบริษัทสุรนารีแพทยภัณฑ์ จำกัด

จานหมุนเหวี่ยง คือแผ่นจานสำหรับบรรจุเลือดทดสอบใน Capillary Tube ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\phi$  1.5 mm ยาว 75 mm ในจำนวน 24 หลอด โดยมีทิศทางการวางหลอดทดลองอยู่ในแนวรัศมีของจานหมุนเหวี่ยง ขนาดของจานหมุนจะขึ้นอยู่กับขนาดของหลอดทดลอง และเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบต่ำสุดที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากขนาดของจานหมุนเหวี่ยงและความเร็วรอบของมอเตอร์ แปรผันตรงกับ RCF หรือเรียกอีกชื่อว่า แรงจี (G-Force) โดยค่า RCF คือความเร่งหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจากการหมุนเทียบเป็นจำนวนเท่าของความเร่งโน้มถ่วงของโลก (ความเร่งโน้มถ่วงของโลกที่ระดับน้ำทะเลมีขนาดเท่ากับ  $9.80665 \text{ m/s}^2$ ) ซึ่งจากสมการที่ (1) พบว่าขนาดของจานหมุนเหวี่ยงแปรผกผันกับความเร็วรอบที่ใช้ งาน เช่น หากเครื่องทำงานที่ความเร็วรอบสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนเหวี่ยงของเครื่องจะมีขนาดเล็ก เป็นต้น สมการแรงหนีศูนย์กลาง [3], [6] - [7]

$$RCF_{(g)} = r_{(mm)} \times N_{(rpm)}^2 \times 1.1182 \times 10^{-6} \quad (1)$$

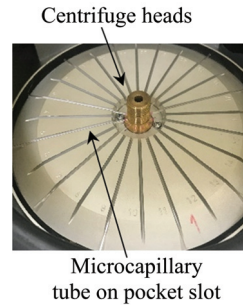
สามารถหาขนาดรัศมีต่ำสุดของจานหมุนเหวี่ยง ( $r_{\min}$ : มิลลิเมตร, mm) ได้จาก

$$r_{(\min)} = \frac{RCF}{N_{rpm}^2 \times 1.1182439 \times 10^{-6}} \quad \text{โดย } RCF = 1,000 \text{ G, ความเร็วรอบการทำงาน } N = 12,000 \text{ rpm}$$

ซึ่งจะได้  $r_{\min} = 6.21 \text{ mm}$  เมื่อรวมกับขนาดของหลอดทดลองที่มีขนาด 75 mm จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนไม่น้อยกว่า 162 mm และเพื่อให้มีระยะเผื่อสำหรับหนีบจับหลอดทดลองและขอบวงนอกรองรับปลายหลอดทดลอง จะออกแบบจานหมุนเหวี่ยงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุนเหวี่ยง 175 mm โดยวัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียม 6063 และเคลือบอบโนโคซ์ ซึ่งมีความแข็งแรง ทนทานและไม่ทำปฏิกิริยากับเลือดไม่เป็นสนิมและความสวยงาม ดังแสดงในรูปที่ 2



(ก) งานหมุนเหวี่ยง



(ข) การติดตั้งงานหมุนเหวี่ยงกับมอเตอร์ และการวางหลอดทดสอบ

รูปที่ 2 ลักษณะงานหมุนเหวี่ยง การติดตั้งกับมอเตอร์ และการวางหลอดทดสอบ

เพื่อให้งานหมุนเหวี่ยงสามารถสร้าง RCF ได้คงที่ตลอดการทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่หมุนงานหมุนเหวี่ยงให้สามารถหมุนด้วยความเร็วรอบที่คงที่หรือมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 5\%$  ของความเร็วรอบการทำงาน มอเตอร์ที่ใช้กับเครื่องปั่นเมล็ดเลือดแดงได้เลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยมีบอร์ดขับเคลื่อนทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ขดลวดเหนี่ยวนำภายในมอเตอร์ เพื่อสร้างแรงแม่เหล็กขับเคลื่อนแกนหมุนที่เป็นแม่เหล็กถาวร ในส่วนนี้ต้องมี การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยอาศัย Hall-Effect Sensor ที่มีอยู่ในมอเตอร์เป็นตัวตรวจรู้ความเร็วรอบของมอเตอร์ [4], [8] - [9] เพื่อให้มอเตอร์สามารถรักษาความเร็วรอบการทำงานที่ 12,000 rpm ให้คงที่ตลอดการทำงาน จึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ โดยใช้การควบคุมแบบวงปิด และตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller)

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ ในการปั่นเมล็ดเลือดแดงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และสร้างความน่าเชื่อถือของเครื่องปั่นเมล็ดเลือดแดง ซึ่งสามารถแบ่งงานออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. ประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ BLDC-motor [5], [8]- [9]
2. ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับ BLDC-motor [10] - [13]

สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ BLDC-motor จะใช้แรงดันไฟฟ้า ( $v$ ) กระแสตรงเป็น Input และความเร็วรอบ ( $\omega$ ) เป็น Output เราสามารถประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนของ BLDC-motor ดังแสดงในสมการที่ (2)

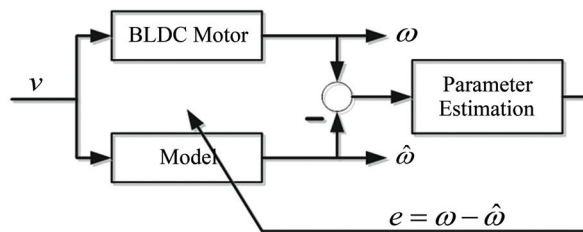
$$\frac{\omega(s)}{v(s)} = \frac{K_t}{JLs^2 + (JR + BL)s + (BR + K_t K_b)} \quad (2)$$

นิยามของตัวแปรแสดงดังตารางที่ 1 ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ BLDC-motor ใช้เครื่องมือParameter Estimation Toolbox ในโปรแกรม MATLAB ในการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลการตอบสนองข้อมูลจากระบบจริงกับแบบจำลอง เมื่อความเร็วรอบอ้างอิง  $\hat{\omega}$  คือความเร็วรอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ  $e$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความต่างของความเร็วรอบจากข้อมูลทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 3(ก) และค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ของ BLDC-motor ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของ BLDC-motor และตัวควบคุมแบบพีไอดี

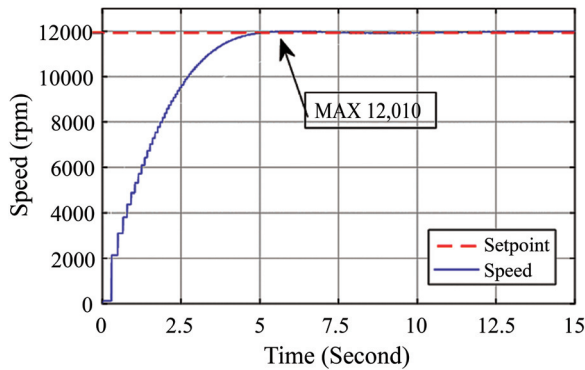
คำอธิบาย	พารามิเตอร์	ค่า	
<b>BLDC motor</b>			
โมเมนต์ความเฉื่อย	$J$	4.37	Kg.m <sup>2</sup>
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	$B$	4.88	Nm.s/rad
ค่าความต้านทาน	$R$	28.94	$\Omega$
ค่าการเหนี่ยวนำ	$L$	27.17	mH
แรงเคลื่อนไฟฟ้าฟลักกลับ	$K_b$	$0.1 \times 10^{-3}$	V/1000 rpm
ค่าคงที่ของแรงบิด	$K_t$	0.912	kNm/A
<b>PID Controller</b>			
ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน	$K_p$	0.0100	-
ค่าอัตราขยายแบบอินทิกรัล	$K_i$	0.0045	sec <sup>-1</sup>
ค่าอัตราขยายแบบอนุพันธ์	$K_d$	0.0010	sec

ใช้เครื่องมือ PID Tuner ใน MATLAB/Simulink® ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี [5] ใช้การตอบสนองแบบขั้นบันได (Step Input) โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้ ความเร็วรอบการทำงานที่ 12,000 รอบต่อนาที Maximum Overshoot ไม่เกิน 5 % Settling Time ไม่เกิน 5 วินาทีที่ 2 % error และมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะคงตัว (Steady-State Error) ไม่เกิน 3 % ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีดังแสดงในตารางที่ 1 และเมื่อนำค่าไปใช้สามารถควบคุมความเร็วรอบให้มีผลการตอบสนองจริงที่เกิดขึ้นได้ตามเงื่อนไขดังแสดงในรูปที่ 3(ข)



(ก) แผนภาพการประมาณค่าพารามิเตอร์ของ BLDC-motor

รูปที่ 3 แผนภาพการประมาณค่าพารามิเตอร์และผลการตอบสนองความเร็วรอบของ BLDC-motor



(ข) ผลการตอบสนองความเร็วรอบของ BLDC-motor ที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอคือรูปที่ 3 แผนภาพการประมาณค่าพารามิเตอร์และผลการตอบสนองความเร็วรอบของ BLDC-motor (ต่อ)

### เครื่องถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยง

ในกระบวนการผลิตจานหมุนเหวี่ยงสำหรับเครื่องปั่นแม่เหล็กเล็ดแดงจำเป็นต้องผลิตให้มีความสมดุลในการหมุนเหวี่ยงให้มีขนาดการสั่นที่น้อยที่สุด ดังนั้นเราจำเป็นต้องสร้างเครื่องถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยงก่อนนำไปติดตั้งในเครื่องปั่นแม่เหล็กเล็ดแดงความเร็วสูง การถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยงจำเป็นที่จะต้องทราบสัญญาณการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นรูปแบบฟังก์ชันแบบคลื่นฮาร์โมนิก [14] ดังแสดงในสมการที่ (3) โดย  $A$  คือแอมพลิจูดการสั่นสะเทือน

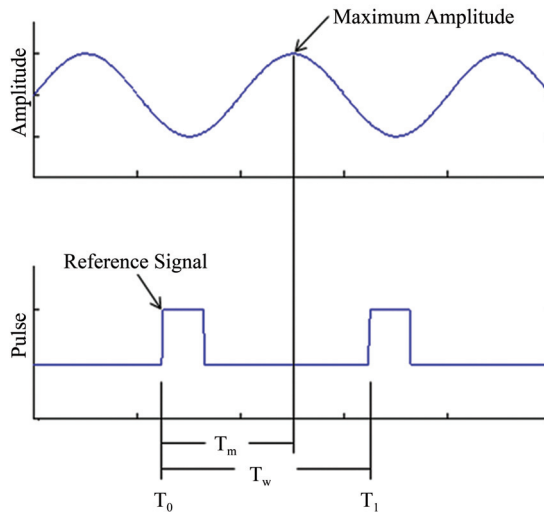
$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi) \tag{3}$$

เราสามารถวัดขนาดการสั่นได้โดยใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง 3-แกน (ADXL-335) และตำแหน่งมุมเฟสของแรงหนีศูนย์กลางนั้น โดย Hall-Effect Sensor ในการวัดสัญญาณความเร็วรอบของมอเตอร์ มาเปรียบเทียบกับสัญญาณความเร่ง เพื่อหามุมเฟสของการสั่นสูงสุด ( $\phi$ ) ดังสมการที่ (4)

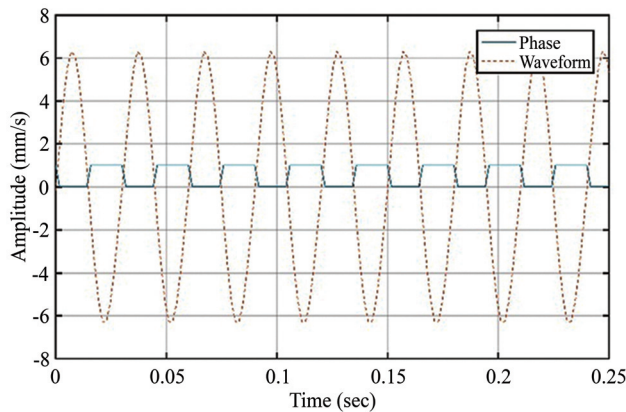
$$\phi = \frac{(T_m - T_0) \times 360}{T_w} \tag{4}$$

โดย

- $T_m$  คือ เวลาที่เกิดการสั่นสูงสุด
- $T_0$  คือ เวลาเริ่มต้นของ Pulse สัญญาณ Hall-Effect
- $T_1$  คือ เวลาสิ้นสุดของ Pulse สัญญาณ Hall-Effect
- $T_w$  คือ ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดของ Pulse สัญญาณ Hall-Effect หรือ  $T_w = T_1 - T_0$  แสดงรูปแบบการเปรียบเทียบสัญญาณในการวัดมุมเฟส ดังแสดงในรูปที่ 4(ก) และสัญญาณที่วัดได้จริงดังแสดงในรูปที่ 4(ข)



(ก) การเปรียบเทียบสัญญาณในการวัดมุมเฟส



(ข) สัญญาณที่วัดได้จริง

รูปที่ 4 รูปแบบการเปรียบเทียบสัญญาณในการวัดเฟส และสัญญาณ Hall-Effect

หลักการการแก้ไขการเสียสมดุลแบบระนาบเดียว (Single-Plane Balancing) โดยใช้หลักการคำนวณเวกเตอร์บนพิกัดโพลาร์ (Polar Coordinate) เป็นพื้นฐาน [4], [15] แสดงขั้นตอนการดำเนินการใน (i) - (iv) และแผนภูมิรูปที่ 5

(i) ขั้นตอนแรกให้ทำการหมุนจานหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบคงที่เพื่อการวัดค่าแอมพลิจูดเริ่มต้น  $A_0$ , มุมเฟสเริ่มต้น  $\phi_0$  และทิศทางให้ในพิกัดโพลาร์ การคำนวณมุมเฟส เป็นการวัดจากตำแหน่งอ้างอิงเป็นสัญลักษณ์ที่ทำไว้บนโรเตอร์ และนับมุมในทิศทางตรงกันข้ามกับการหมุนของโรเตอร์

(ii) ติดตั้งมวลทดสอบ (Trial Mass,  $M_T$ ) ที่มุมทดสอบ  $\theta_T$  บนจานหมุนเหวี่ยง และวัดค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสอีกครั้งโดยกำหนดในเทอมของ  $A_1$  และ  $\phi_1$  ตามลำดับ



(iii) แปลงค่าแอมพลิจูดและมุมเฟสใน (i) และ (ii) ให้อยู่ในพิกัดฉาก (Rectangular Coordinate) และการคำนวณค่าแอมพลิจูดสุทธิ  $A_T$  ระหว่าง  $A_0$  และ  $A_1$  สามารถเขียนได้สมการที่ (5) คือ

$$A_T = \sqrt{(A_x)^2 + (A_y)^2} \tag{5}$$

เมื่อ  $A_x = A_1 \cos \phi_1 - A_0 \cos \phi_0$  และ  $A_y = A_1 \sin \phi_1 - A_0 \sin \phi_0$

(iv) คำนวณหามุมเฟสสุทธิ  $\phi_T$  จากสมการในตารางที่ 2 และ  $A^\dagger = A_y / A_x$

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการคำนวณหาค่ามุมเฟสสุทธิใน Phase Quadrant

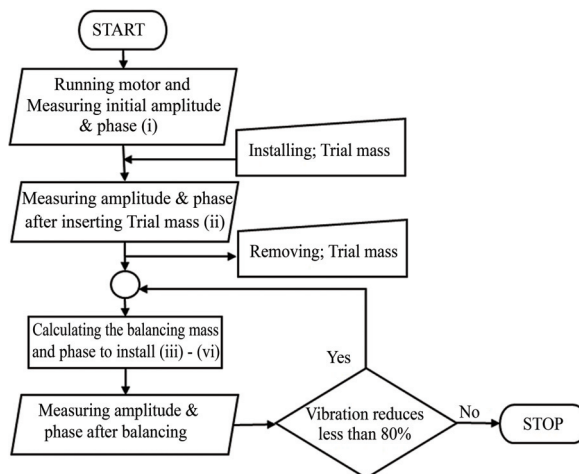
เงื่อนไข	สูตรมุมเฟสสุทธิ
$A_y > 0$ and $A_x > 0$	$\phi_T = \tan^{-1}(A^\dagger)$
$A_y > 0$ and $A_x < 0$	$\phi_T = 180^\circ - \tan^{-1}(A^\dagger)$
$A_y < 0$ and $A_x < 0$	$\phi_T = 180^\circ + \tan^{-1}(A^\dagger)$
$A_y < 0$ and $A_x > 0$	$\phi_T = 360^\circ - \tan^{-1}(A^\dagger)$

(v) คำนวณขนาดของมวลเสียสมดุล  $M_B$  ดังสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6) - (7)

$$M_B = \frac{A_0}{A_T} M_T \tag{6}$$

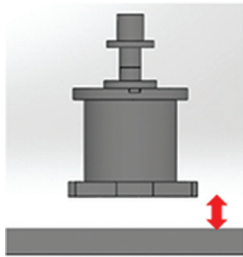
(vi) หาค่าแห่งติดตั้ง  $\theta_B$

$$\theta_B = \theta_T + \phi_T - \phi_0 \left\{ \begin{array}{l} \phi_B = \phi_0 + 180^\circ \quad ; \quad 0^\circ \leq \phi_0 < 179^\circ \\ \phi_B = \phi_0 - 180^\circ \quad ; \quad 180^\circ \leq \phi_0 < 359^\circ \end{array} \right\} \tag{7}$$

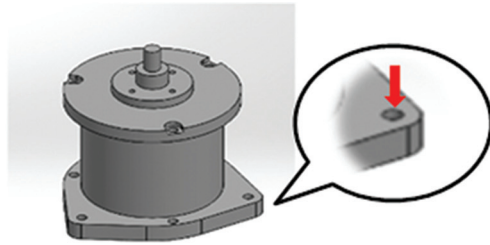


รูปที่ 5 ฟังงานโปรแกรมการตรวจวัดและถ่วงสมดุลของเครื่องถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยง

### หลักการวิเคราะห์และการเลือกใช้ฉนวนการสั่นสะเทือน



(ก) ระยะห่างระหว่างมอเตอร์กับฐานเครื่อง



(ข) รูปร่างยึดของมอเตอร์

รูปที่ 6 ระยะห่างระหว่างมอเตอร์กับฐานเครื่อง และบริเวณรูยึดของมอเตอร์

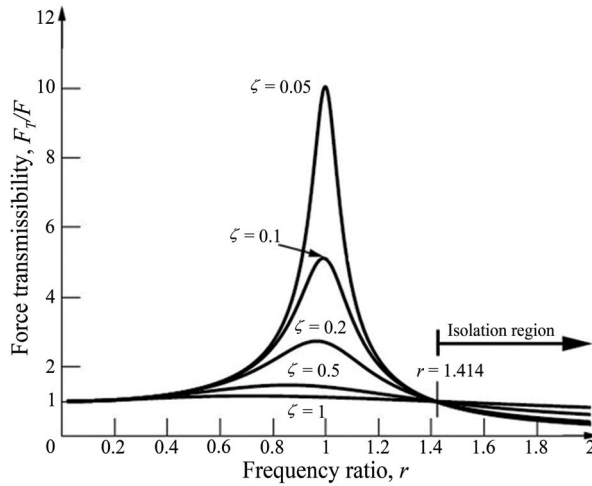
ตัวเครื่อง จะประกอบด้วย ส่วนฐานที่รองรับมอเตอร์ และมีกล่องปิด เพื่อช่วยป้องกันอันตรายจากการปั่นเหวี่ยงในขณะที่เครื่องกำลังทำงาน ซึ่งขนาดพื้นที่ของภายในตัวเครื่องจะเป็นตัวช่วยกำหนดขนาดของฉนวนการสั่นที่เป็นตัวกลางระหว่างมอเตอร์กับตัวเครื่อง โดยความสูงของฉนวนการสั่นต้องไม่เกิน 24 mm กว้าง 70 mm ยาว 70 mm และขนาดรูเจาะสำหรับยึดฐานของมอเตอร์ไม่เกิน 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 6

ฉนวนการสั่นสะเทือน (Vibration Isolators) คืออุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อช่วยลดการส่งผ่านการสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดการสั่นสู่พื้นหรือที่ที่ไม่ต้องการให้การสั่นสะเทือนเกิดขึ้น [15] ในที่นี้คือการส่งถ่ายการสั่นจาก BLDC-motor สู่ตัวเครื่อง ซึ่งสมการความสามารถการส่งผ่านแรง (Force Transmissibility) ของการสั่นสะเทือน คือ

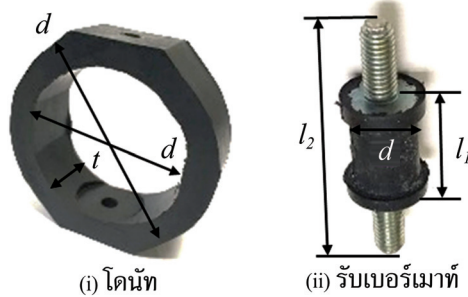
$$\frac{F_T}{F} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\omega)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta\omega)^2}} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) เราสามารถคำนวณหาค่าความแข็งของฉนวนการสั่น ( $k$ ) ที่ทำให้แรงส่งผ่านการสั่นลดลง จากรูปที่ 7(ก) จะสรุปได้ว่าต้องออกแบบค่าความแข็งของฉนวนที่ทำให้ระบบมีความถี่ธรรมชาติที่ทำให้อัตราส่วนความถี่ไม่ต่ำกว่า 1.414 จึงสามารถคำนวณค่าความแข็งของฉนวนการสั่นที่ต้องมีขนาดไม่เกิน 492.16 N/mm เมื่อพิจารณามอเตอร์มีจุดจับยึดอยู่ 3 ตำแหน่ง ดังนั้นจะมีฉนวนการสั่นทั้งหมด 3 ตัวที่ต่อขนานกัน และค่าความแข็งเมื่อรวมกันแล้วต้องไม่เกินค่าที่คำนวณได้หรือฉนวนแต่ละตัวจะได้มีค่าความแข็งไม่เกิน 164.05 N/mm

ดังนั้นเมื่อพิจารณาปัจจัยเรื่องขนาด จุดจับยึด ค่าความแข็ง และการรับน้ำหนักได้เกิน 2.5 กิโลกรัม สามารถเลือกฉนวนการสั่นที่มีในท้องตลาดดังนี้ คือ ฉนวนการสั่นแบบรับเบอร์เมท และแบบโคนที่ทำงานอยู่ก่อน โดยแสดงรายละเอียดของฉนวนการสั่น ในรูปที่ 7(ข) และตารางที่ 3



(ก) กราฟการส่งผ่านแรงกับอัตราส่วนความถี่  $r$



(ข) ลักษณะของฉนวนการสั่น

รูปที่ 7 กราฟการส่งผ่านแรงกับอัตราส่วนความถี่ และลักษณะฉนวนการสั่นสะเทือน

ตารางที่ 3 รายละเอียดของฉนวนการสั่นสะเทือน

ประเภทฉนวนการสั่นสะเทือน	แบบ	ขนาด (mm)	ค่าความแข็ง (N/mm)
โคนัท รูปที่ 7(ข)(i)	A	$d_i = 70.0, d_o = 93.0, t = 30.0$	N/A
รับเบอร์เม้าท์ รูปที่ 7(ข)(ii)	B	$d = 10.0, l_1 = 15.5, l_2 = 39.0$	25
	C	$d = 12.0, l_1 = 15.0, l_2 = 44.0$	44
	D	$d = 12.0, l_1 = 15.0, l_2 = 44.0$	74
	E	$d = 13.5, l_1 = 11.0, l_2 = 28.0$	130

เมื่อได้ฉนวนการสั่นที่ต้องการแล้ว ต่อไปเป็นการทดสอบใช้จริงกับเครื่องเพื่อหาฉนวนการสั่นที่สามารถลดขนาดแอมพลิจูดแรงสั่นสะเทือนที่ส่งจากจานหมุนเหวี่ยงสู่ตัวเครื่องได้ตามเงื่อนไขมาตรฐานสากล ISO 10816-1 [8] ดังนี้

- ขณะทำงานที่ความเร็วรอบคงตัว 12,000 rpm มีขนาดการสั่นไม่เกิน 2.80 mm/sec
- ขณะหยุดจ่ายไฟฟ้า (ตั้งแต่ 12,000 rpm ถึงเครื่องหยุดหมุน) ที่ขนาดการสั่นสูงสุดไม่เกิน 7.10 mm/sec

### อุปกรณ์ที่เลือกใช้ในการวิจัยทดสอบ

1. เครื่อง HCM สำหรับทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งประกอบด้วย
  - มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านรุ่น F72-201105-220 ขนาด 300 Watt, 220 - 240 VDC พร้อมชุดบอร์ดขับเคลื่อน BLMD-8TC39-1P
  - จานหมุนเหวี่ยง (Centrifuge Disk) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 175 mm น้ำหนัก 420 g ผลิตจากวัสดุอะลูมิเนียม 6063 จำนวน 2 จาน พร้อมฝาปิด
  - ฉนวนการสั่นขนาด (A) ดั้งเดิม, (B) 25 N/mm, (C) 44 N/mm, (D) 74 N/mm และ (E) 130 N/mm อย่างละ 3 ตัว
2. เครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานและแสดงผล พร้อมโปรแกรม MATLAB/Simulink® สำหรับช่วยในการคำนวณทางคณิตศาสตร์และแสดงผล
3. โปรแกรม Arduino พร้อมบอร์ด UNO-R3 สำหรับใช้เป็น Microcontroller และ 3-axis Accelerometer Module (ADXL335) จำนวน 1 ตัว เพื่อใช้เป็นเซนเซอร์วัดความเร่งแบบ 3 แกน ในเครื่องถ่วงสมดุลแกนตั้ง
4. เซนเซอร์ Accelerometer 3-axis ขนาด 50 G จำนวน 2 ตัว พร้อมอุปกรณ์ต่อพ่วง
5. เครื่องมือประมวลผลและวิเคราะห์ Dewesoft Miniature พร้อมอุปกรณ์ต่อพ่วง



รูปที่ 8 อุปกรณ์ในการทดสอบ

### ผลการทดสอบ

การทดสอบเครื่องถ่วงสมดุลแกนตั้ง เพื่อเป็นการยืนยันว่าหลักการและขั้นตอนการถ่วงสมดุลข้างต้นสามารถใช้ได้จริง โดยกำหนดการทดสอบจริงโดยการถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยง จำนวน 2 แผ่นคือ Disk I กับ Disk II และถ่วงสมดุลโดยเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งมวลทดสอบไปจำนวน 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งมวลทดสอบในกรณีทดสอบ Case I, II, III ตามลำดับ

Cases	Disk I		Disk II	
	$M_T$ (grams)	$\theta_T$ (degree)	$M_T$ (grams)	$\theta_T$ (degree)
Case I	0.53	0	0.53	0
Case II	0.79	0	0.71	170
Case III	0.21	120	0.35	300

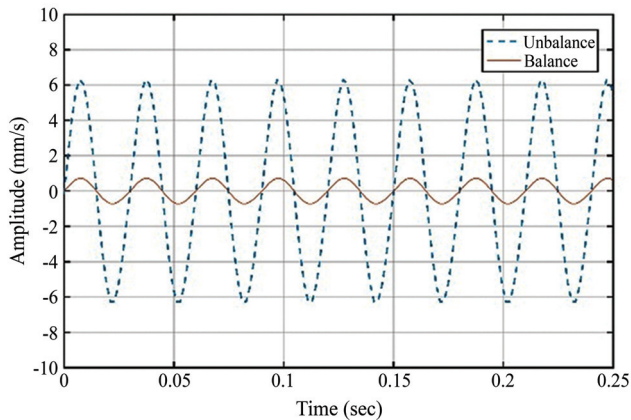
จากการทดสอบการถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยงทั้ง 2 แผ่น แต่ละแผ่นมี 3 กรณี โดยเริ่มต้น Disk I มีค่าแอมพลิจูดการสั่นสูงสุดที่ 6.40 mm/sec และ Disk II มีขนาดการสั่น 7.40 mm/sec ซึ่งทั้ง 3 กรณี การติดตั้งมวลทดสอบในจานหมุนแต่ละแผ่น จะให้ผลลัพธ์ไม่แตกต่างกันเนื่องจากมีมวลเสียสมดุลอยู่ในตำแหน่งเดิม ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 9

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการถ่วงสมดุล

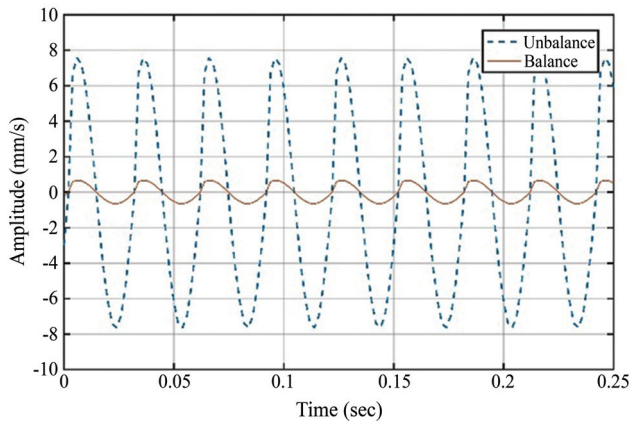
	$A_0$ (mm/sec)	$\phi_0$ (°)	Trial in Case						Balancing Parameters		Results	
			$A_1$ (mm/sec)			$\phi_1$ (°)			$M_B$ (g)	$\theta_B$ (°)	$A_B$ (mm/sec)	% Reduce
			I	II	III	I	II	III				
Disk I	6.40	255	9.10	14.70	4.80	315	334	186	0.42	77	0.70	89.06
Disk II	7.60	261	11.01	14.20	12.56	311	200	272	0.48	87	0.65	91.45

(°); degree, (g); grams

ผลลัพธ์จากการถ่วงสมดุลให้จานหมุนเหวี่ยงคือ ขนาดของมวลเสียสมดุล 0.42 กรัมที่มุม 77° สำหรับ Disk I และ 0.48 กรัม ที่มุม 87° สำหรับ Disk II ผลการทดสอบค่าขนาดการสั่นหลังจากถ่วงสมดุล ซึ่งสามารถลดขนาดการสั่นได้เกิน 80 % จากเดิมทั้ง 2 จานหมุนเหวี่ยง แสดงกราฟเปรียบเทียบขนาดการสั่นของจานหมุนเหวี่ยงทั้ง 2 ทั้งก่อนถ่วงสมดุล (เส้นประ) หลังถ่วงสมดุล (เส้นทึบ) ดังแสดงในรูปที่ 9



(ก) สัญญาณการสั่นสะเทือนก่อน - หลังถ่วงสมดุลของ Disk I



(ข) สัญญาณการสั่นสะเทือนก่อน - หลังถ่วงสมดุลของ Disk II

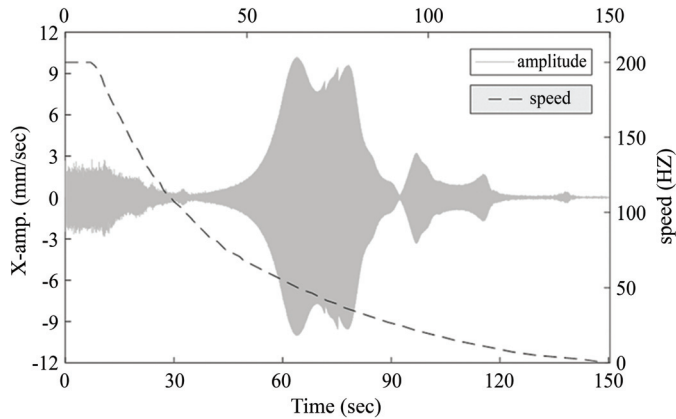
รูปที่ 9 สัญญาณการสั่นสะเทือนเปรียบเทียบก่อน - หลังการถ่วงสมดุล Disk I และ Disk II

### การทดสอบฉนวนการสั่นสะเทือน

ในการทดสอบเพื่อเลือกฉนวนการสั่น ถูกแบ่งตามช่วงการทำงานจริงของเครื่อง HCM ดังนี้

1. วัดค่าการสั่นสะเทือนขณะเครื่องทำงานด้วยความเร็วคงที่ที่ 12,000 rpm
2. วัดค่าการสั่นสะเทือนขณะเครื่องเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ในช่วงเสริ้การทำงานจาก 12,000 rpm ถึงหยุดนิ่ง (Speed-Down) หรือที่ความเร็วรอบ 200 - 0 Hz

และใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง 3-แกน ติดตั้งไว้ที่มอเตอร์ 1 ตำแหน่ง และที่ฐานเครื่องอีก 1 ตำแหน่ง โดยจัดทิศทางของเซนเซอร์ให้ทิศทางของแกน-x แกน-y แกน-z มีทิศเดียวกัน เพื่อสามารถเปรียบเทียบสัญญาณในแต่ละแกนร่วมกันได้ รูปที่ 10 เป็นกราฟข้อมูล 1 ในการทดสอบทั้งหมด 20 ครั้ง โดยทดสอบกับฉนวนการสั่นชนิดละ 4 ครั้ง จาก 5 ชนิด



รูปที่ 10 ผลการวัดค่าการสั่นสะเทือน และความเร็วรอบตั้งแต่ 200 - 0 Hz

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบจนวนสั่นของเครื่องปั้นเม็คเล็คแรงที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

Freq.	Isolators types										Axis
	Max Amp. at motor (mm/sec)					Max Amp. at chamber (mm/sec)					
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	
12,000 rpm	1.340	0.840	1.740	1.160	0.284	0.171	0.081	0.130	0.149	0.069	x
	1.410	2.480	1.770	1.140	0.265	0.153	0.272	0.110	0.058	0.004	y
	2.970	3.710	3.860	0.971	0.822	2.210	0.759	0.822	0.291	0.048	z
Resonance 3,300 rpm	0.074	0.293	1.160	0.137	0.105	0.346	0.549	1.080	0.589	0.127	x
	0.050	0.603	1.050	0.139	0.089	0.222	0.350	0.844	0.070	0.124	y
	0.422	0.716	1.950	0.094	0.142	0.018	0.041	0.090	0.018	0.036	z

จากผลการทดสอบตารางที่ 6 พบว่าขนาดการสั่นเมื่อติดตั้งจนวนการสั่นแบบต่าง ๆ ทำให้ขนาดการสั่นที่ส่งจากมอเตอร์สู่ตัวเครื่องมีขนาดลดลง และจนวนการสั่นที่ทำให้การสั่นมีขนาดน้อยที่สุดขณะทำงานที่ 12,000 rpm และขณะผ่านความถี่ธรรมชาติหรือช่วงการสั่นพ้องคือ จนวนการสั่น E ซึ่งมีขนาดการสั่นขณะทำงานที่ 12,000 rpm ในแกน x y และ z ตามลำดับ ที่มอเตอร์ 0.284 0.265 และ 0.822 mm/sec ซึ่งมีขนาดการสั่นน้อยกว่าจนวนการสั่นชนิดอื่นทั้งหมด ขนาดการสั่นที่ตัวเครื่อง 0.069 0.004 และ 0.048 mm/sec ก็มีขนาดการสั่นที่น้อยกว่าการสั่นจากจนวนการสั่นชนิดอื่น ขนาดการสั่นพ้องที่มอเตอร์ 0.105 0.089 และ 0.142 mm/sec พบว่าในแกน x และ y มีขนาดการสั่นน้อยที่สุด แต่ที่แกน z มีขนาดการสั่นน้อยกว่า A B และ C แต่มากกว่า D ส่วนขนาดการสั่นพ้องที่ตัวเครื่อง 0.127 0.124 และ 0.036 mm/sec ที่แกน x มีขนาดการสั่นน้อยที่สุด แต่ที่แกน y มีขนาดการสั่นน้อยกว่า A B และ C แต่มากกว่า D ที่แกน z มีขนาดการสั่นน้อยกว่า A และ B แต่มากกว่า C และ D ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากลักษณะการทำงานของเครื่องที่ทำงานที่ความเร็วรอบทำงานนานอย่างน้อย 5 นาที กับขณะที่เกิดการสั่นพ้องที่เกิดขึ้นเพียงชั่วขณะ สามารถกล่าวได้ว่าจนวนการสั่นที่ช่วยลดการสั่นสะเทือนได้มากที่สุดคือ จนวน E ที่มีค่าความแข็ง 130 N/mm

## สรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงต้นแบบนี้สามารถสร้างแรงหนีศูนย์กลางมากกว่า 1,000 G ที่ความเร็วรอบการทำงานตั้งแต่ 10,000 - 13,000 rpm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจานหมุนเหวี่ยงมีขนาด 175 mm ระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านควบคุมแบบวงปิดที่มีตัวควบคุมพีไอดีที่ทำให้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า  $\pm 3\%$  ของความเร็วรอบที่ต้องการควบคุม และ Settling Time น้อยกว่า 5 วินาทีที่ 2% error สร้างเครื่องถ่วงสมดุลแกนตั้งที่อาศัยการจัดการสัญญาณระหว่างสัญญาณ Hall-Effect กับขนาดการสั่น ซึ่งสามารถถ่วงสมดุลจานหมุนเหวี่ยงเพื่อลดขนาดการสั่นได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีต้นทุนต่ำ จนวนการสั่นสะท้อนแบบ E ที่มีขนาด 130 N/mm นั้นสามารถลดขนาดการสั่นที่ส่งผ่านจากมอเตอร์มาสู่ตัวเครื่องได้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องปั่นเม็ดเลือดแดงที่ผลิตโดยผู้ประกอบการคนไทยมีคุณภาพเทียบเคียงผลิตภัณฑ์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศได้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี บริษัท สุรนารีแพทยภัณฑ์ จำกัด และห้างหุ้นส่วนจำกัด อาร์เอพี เอ็นเตอร์ไพรส์แอนด์เซอร์วิสเซส ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ข้อมูลความรู้ อุปกรณ์เครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

## References

- [1] Areejitranusorn, C. (1991). **Scientific Instruments**. Khonk Kaen. Klang Nana Vithaya Printing (in Thai)
- [2] Dujdao, B., Noppadol, P., Anothai, S., and Natthaphat, R. (2016). Performance Evaluation of Microhematocrit Centrifuge in the Primary Care Units in Phitsanulok Province. **Bulletin of the Department of Medical Sciences**. Vol. 58, No. 4, pp.221-228 (in Thai)
- [3] Tassaneya, C., Wilairat, N., Suwalee, I., and Tulaya, U. (2013). Study of Clinical Chemistry Parameter in Plasma Separated by Various Relative Centrifugal Forces. In **Proceeding of First Annual Academic Conference of Golden Jubilee Medical Center**. Mahidol University. pp. 235-247 (in Thai)
- [4] Srisertpol, J. (2013). **Mechanical Vibration 2<sup>nd</sup> edition**. Nakhon Ratchasima: School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology
- [5] Taweeapiradeerattana, A., Pawako, S., Rodpai, A., Numanoy, N., and Srisertpol, J. (2018). Analytical Design the Vertical Balancing Device for Hematocrit Centrifuge Machine. **Journal of Physics Conference Series**. pp. 1-7. DOI: 10.1088/1742-6596/1074/1/012064



- [6] Gitte, W. (2004). **Hematocrit-a Review of Different Analytical Method**. Access (10 July 2019). Available (<https://acutecaretesting.org/en/articles/hematocrit--a-review-of-different-analytical-methods>)
- [7] Max, M. S., Albert, B. S., and Eleanor, D. H. (1954). An Improved Micro Hematocrit Method. **American Journal of Clinical Pathology**. Vol. 24, Issue 9, pp. 1016-1024. DOI: 10.1093/ajcp/24.9.1016
- [8] Pawin, J. and Jiraphon, S. (2013). Speed Estimation of 3-Phase BLDC Motor Using Genetic Algorithm. **International Journal of Engineering Science and Innovation Technology**. Vol. 2, Issue 1, pp. 254-263
- [9] Prasad, G., Venkateswara Reddy M., P. V. N. Prasad, and G. Tulasi Ram Das. (2012). Speed Control of Brushless DC Motor with DSP Controller using MATLAB. **International Journal of Engineering Research and Applications**. Vol. 2, Issue 3, pp. 2120-2125
- [10] Pawako, S., Taweepiradeerattana, A., Odngam, S., and Srisertpol, J. (2017). Speed Control System Design of the Brushless DC Motor for Hematocrit Centrifuge Machine. In **Proceeding of National Conference “2017 Innovation and Technology”**. Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus. (in Thai)
- [11] Åström, K. J. and Hägglund, T. (2006). **Advanced PID Control**. ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society
- [12] Manjita, S., Srivastava, M. C., and Smriti, B. (2009). **Control System - MATLAB and Simulink Tutorial**. 7 West Patel Nagar, New Delhi: Tata McGraw-Hill
- [13] Manjusha, P. (2014). Modelling and Simulation of DC Drive using PI and PID Controller. **International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronic, Instrumentation and Control Engineering**. Vol. 2, Issue 12, pp. 2263-2266
- [14] Guilherme, K. Y., Cesar da Costa and João Sinohara da S. S. (2016). A Smart Experimental Setup for Vibration Measurement and Imbalance Fault Detection in Rotating Machinery. **Case Study in Mechanical System and Signal Processing**. Vol. 4, pp. 8 -18. DOI: 10.1016/j.csmssp.2016.07.001
- [15] ISO 10816-1. (1995). **Mechanical vibration - Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts - Part 1**. General guidelines (Switzerland: ISO)