

การสิ้นเปลืองพลังงานและการสั่นสะเทือนของกระบวนการหยอดกาวและ ติดหัวอ่านเขียนในกรณีลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่อง

Energy consumption and vibration of auto core adhesive mouter machine
in case of linear bearing failures

ธนศักดิ์ หวังล้อมกลาง¹ ประธาน ชมเมืองปัก¹ และ จิระพล ศรีเสริฐผล^{1*}

Thanasak Wanglomklang¹, Prathan Chommaungpuck¹ and Jiraphon Srisertpol^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการวิเคราะห์การสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องจักรอัตโนมัติในกระบวนการหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เมื่อลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่อง ในการทดลองจะวัดค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ซึ่งบันทึกค่าผ่านโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่และวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง (accelerometer) ซึ่งได้กำหนดสภาพข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงไว้ 5 กรณีเพื่อเปรียบเทียบกับสภาพปกติ และทดสอบที่ความเร็ว 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตรต่อวินาที ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อลิเนียร์มอเตอร์ทำงานในสภาพที่ลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องจะมีการใช้กระแสไฟฟ้ามากขึ้น โดยพบว่าความเร็วที่อัตราการผลิต 0.50 เมตรต่อวินาที ของเครื่องจักรในสายการผลิตปัจจุบันมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 594,323.29 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี เมื่อชุดลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องเครื่องจักรจะใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 681,890.25 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.74 เปอร์เซนต์จากสภาพปกติ และผลจากการวัดการสั่นสะเทือนแสดงให้เห็นว่าขนาดการสั่นสะเทือนในแต่ละกรณีแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคนิคตรวจจับข้อบกพร่อง (fault detection and isolation) ของชุดลิเนียร์แบร์ริง โดยการวิเคราะห์ค่ากระแสของมอเตอร์และสัญญาณการสั่นสะเทือน จะสามารถทราบถึงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชุดลิเนียร์แบร์ริงก่อนส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นส่วนอื่นๆ รวมไปถึงสามารถลดการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องจักรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริง การวิเคราะห์การสูญเสียพลังงาน ลิเนียร์มอเตอร์ การตรวจจับและระบุข้อบกพร่อง

Abstract

This research presented the analysis of energy losses of automatic machine in the adhesive dispensing and slider attaching process of Hard Disk Drive (HDD) industries caused by the faulty linear bearing by measuring the linear motor current and vibration signal. Five different defect conditions of linear bearing were simulated compare with the healthy condition. At test speed, referring to the actual production process, of 0.25, 0.50 and 1.00 m/s. The

¹ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

¹ Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author. E-mail: jiraphon@sut.ac.th

result indicates that when the linear motor operated in the faulty bearing situation the current will be increased. Analysis of the production rate at 0.50 m/s, which is the current speed used in the production line, the machine has the electricity consumption of 594,323.29 kWh/year. When the linear bearing has defect, the machine will consume energy at 681,890.25 kWh/year, which increase 14.74% more than when the machine is in a healthy condition. In addition, the results from the vibration measurement show the vibration magnitude in each case is significantly different. Therefore, utilizing fault detection and isolation techniques for linear bearing by analyzing motor current values and vibration signals can identify the defects in linear bearings before causing damage to other parts. Moreover, the method can help reducing the energy consumption of the machine efficiently.

Keywords: linear bearing faults, energy loss analysis, linear motor, fault detection and isolation

บทนำ

เนื่องจากอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง (Chuwong, Cheewananthacha, & Phisitsangkakarn, 2015) ความต้องการพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี ทั้งนี้เพื่อตอบสนองของความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจโดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมที่มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าถึงร้อยละ 37.1 ของการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งประเทศ (Nidhirithdikrai, Arunsawatwong, & Eua-arporn, 2013) ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตมีการพัฒนาและก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ทำให้ในบางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เริ่มมีการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ มาปรับใช้เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตให้สูงขึ้น ดังนั้นจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะใช้เครื่องจักรที่มีความแม่นยำและความเร็วในการเคลื่อนที่สูงมาใช้ในกระบวนการ ส่งผลทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรทางด้านเชื้อเพลิงและด้านพลังงานเป็นอย่างมากในกระบวนการผลิต (Kasemcharoenwong, & Rattanakuakangwan, 2014) แนวทางการประหยัดพลังงานอย่างหนึ่งที่มีให้เห็นคือ มาตรการประหยัดด้านพลังงานที่ได้นำมารณรงค์ในบริษัทหลายแห่ง

ซึ่งการพิจารณาความเหมาะสมคุ้มค่าของการใช้พลังงาน โดยสามารถใช้ดัชนีตรวจติดตามการใช้พลังงานต่อปริมาณการผลิตที่เรียกว่า ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (specific energy consumption : SEC) มาติดตามประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตได้ (Phoolee, & Chutima, 2012)

ในอุตสาหกรรมการผลิต วอยซ์ คอยล์ มอเตอร์ (voice coil motor) การวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงการใช้พลังงานของห้องสะอาด (cleanroom) ได้ถูกนำมาศึกษาด้วยวิธีการเชิงสถิติเนื่องจากการควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในห้อง เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และอุณหภูมิ ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขทำให้ระบบปรับอากาศต้องทำงานตลอดเวลา (Promthi, 2012) ตลอดจนกลุ่มอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอากาศยานยนต์ก็มีระบบการวางแผนและควบคุมการใช้พลังงานเนื่องจากขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่เกินกว่า 1,175 kVA ทำให้ในบริษัทต้องวางแผนจัดการพลังงานให้อยู่ในข้อกำหนดของกฎหมายเพื่อไม่ให้เสียค่าปรับ (Thiamsawet, & Rattanakuakangwan, 2014) จะเห็นว่าในภาคอุตสาหกรรมมีแนวทางในการประหยัดพลังงานไฟฟ้า ซึ่งคำนึงถึงการลดต้นทุนการ

ผลิต ดังนั้นการประหยัดพลังงานเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้บริษัททำกำไรได้สูงสุด และกระบวนการผลิตเกิดประสิทธิภาพมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคธุรกิจอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันสูง จึงจำเป็นต้องหาแนวทางประหยัดและลดต้นทุนด้านพลังงานลงเพื่อให้สามารถแข่งขันในตลาดโลกได้ เช่นเดียวกับอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีการแข่งขันสูง (Deeying, Asawarungsaengkul, & Chutima, 2018)

ปัจจุบันอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในเรื่องของความเร็วที่เพิ่มขึ้นและความเร็วในการอ่านเขียนข้อมูลเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน ดังนั้นกระบวนการผลิตชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานและการอ่านเขียนข้อมูล ซึ่งหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์คือหัวอ่านเขียนข้อมูลโดยในการผลิตหัวอ่านเขียนข้อมูลนั้นจะใช้เครื่องจักรแบบอัตโนมัติ โดยมีกระบวนการทำงานที่สำคัญ คือ หยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนกระบวนการดังกล่าวจะทำโดยเครื่อง auto core adhesive mouter machine (ACAM) แสดงดังใน (Figure 1) ซึ่งการทำงานของเครื่องจักรจะใช้ชุดลิเนียร์มอเตอร์ (linear motor) เป็นอุปกรณ์สำหรับเคลื่อนชิ้นงานไปยังตำแหน่งที่ต้องการก่อนจะทำการหาตำแหน่งอ้างอิงบนแขนจับหัวอ่านเขียนเพื่อหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนให้ตรงตามตำแหน่งที่ต้องการซึ่งส่วนที่สำคัญในการช่วยรองรับการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ก็คือชุดลิเนียร์แบร์ริง โดยด้านบนของลิเนียร์แบร์ริงจะติดตั้งชุดฟลักเจอร์สำหรับจับยึดชิ้นงาน ซึ่งลิเนียร์แบร์ริงจะทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของชิ้นส่วนนี้ขณะขับเคลื่อนดังนั้นจึงมีโอกาที่ลิเนียร์แบร์ริง

จะเกิดข้อบกพร่องในขณะเคลื่อนที่ ซึ่งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการการตรวจจับข้อบกพร่องของแบร์ริง การวิเคราะห์ค่าขอบของสัญญาณในโดเมนความถี่ถูกใช้ในการตรวจจับความเสียหายของลูกบอลแบร์ริงโดยมีการประยุกต์ใช้คูโตซิสในการแยกความแตกต่างของค่าขอบสัญญาณโดยวิธีที่ใช้สามารถวิเคราะห์กรณีที่ลูกบอลแบร์ริงเสียหายได้อย่างชัดเจนในขณะที่มีความเร็วรอบมีค่าเปลี่ยนแปลง (Guo, Liu, Na, & Fung, 2012) นอกจากนี้วิธีการเรียนรู้แบบโครงข่ายประสาทเทียมก็ถูกนำมาใช้ในการตรวจจับข้อบกพร่องของแบร์ริงในแต่ละกรณีโดยการสร้างโมเดลเพื่อจำแนกข้อมูลจากการวัด ซึ่งให้ความแม่นยำในการจำแนก 90 เปอร์เซนต์ (Lu, Wang, & Zhou, 2017; Chommaungpuck, Lawbootsa, & Srisertpol, 2019)



Figure 1 Auto core adhesive mouter machine (ACAM).

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การสูญเสียพลังงานเมื่อชุดลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องในเครื่องหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนอัตโนมัติ โดยพิจารณาข้อบกพร่อง 5

กรณี ได้แก่ 1) สภาวะขาดสารหล่อลื่น 2) สภาวะลูกบอลแข็งสูญเสีย 3) สภาวะลูกบอลแข็งเสียหาย 4) สภาวะลูกบอลแข็งเสียหายและขาดสารหล่อลื่น และ 5) สภาวะลูกบอลแข็งสูญเสียและขาดสารหล่อลื่น เปรียบเทียบกับสภาวะปกติของชุดลิเนียร์-แบร์ริง และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อบกพร่องและความเร็วของมอเตอร์ทั้ง 3 ระดับ คือ 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตรต่อวินาที เพื่อให้ทราบถึงแนวโน้มการใช้พลังงานของชุดลิเนียร์มอเตอร์เมื่อลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องที่ความเร็วต่างๆ โดยวิเคราะห์จากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้เมื่อลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง จะส่งผลให้มอเตอร์รับภาระโหลดมากขึ้นและทำให้เครื่องจักรใช้พลังงานมากขึ้น ทำให้ใช้พลังงานสิ้นเปลือง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น

วิธีการศึกษา

1. สถานที่ทำการทดลองและเก็บข้อมูล

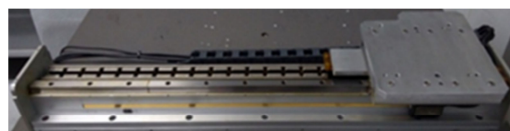
แผนก HGA assembly and automation development บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด เลขที่ 140 หมู่ 2 ตำบลคลองจิก อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13160 ช่วงเวลาระหว่าง เดือน มีนาคม 2561 - มกราคม 2562

2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลิเนียร์มอเตอร์และลิเนียร์แบร์ริง

เครื่องจักรในกระบวนการหอยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หรือเครื่อง ACAM จะใช้ลิเนียร์มอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้ากระแสตรง (magnetic linear DC motor) ดัง (Figure 2) ในการเคลื่อนชิ้นงานไปยังตำแหน่งที่ต้องการ เนื่องจากมี

ความเร็วและสามารถควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการทำงานของลิเนียร์มอเตอร์จะอาศัยระบบควบคุมแบบ PIV (proportional integral velocity controller) ดังแสดงใน (Figure 3) มาใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่



Magnetic Linear DC motor
(Akribis SGL 100-AUM3-PS4J)

Figure 2 Magnetic linear DC motor.

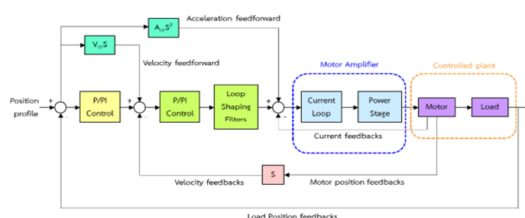


Figure 3 Schematic PIV controller of linear motor.

โดยโครงสร้างของระบบควบคุมจะมีการเพิ่มลูบบการป้อนกลับความเร็ว (velocity loop) ข้างในลูบบของตำแหน่ง (position loop) ซึ่งนอกจากการควบคุมตำแหน่งแล้วยังทำให้สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำซึ่งจะส่งผ่านความเร็วที่ต้องการผ่านเทอมของตัวป้อนความเร็วไปข้างหน้า (velocity feedforward term) ในการทำงานของตัวควบคุมเพื่อรักษาตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ให้เป็นไปตามต้องการภายในจะมีการชดเชยค่าความผิดพลาดโดยการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้มอเตอร์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภาระโหลดที่มอเตอร์กระทำอยู่

ณ ตอนนั้น ซึ่งส่วนประกอบสำคัญที่ช่วยให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพคือลิเนียร์แบร์ริง ดังแสดงใน (Figure 4) ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของโหลดและช่วยให้การเคลื่อนที่มีความรวดเร็วและต่อเนื่อง

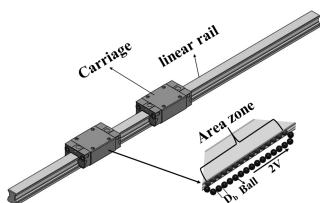


Figure 4 The linear bearing component.

2.2 การตรวจจับและระบุข้อบกพร่อง (fault detection and isolation; FDI)

การตรวจจับและระบุตำแหน่งของข้อบกพร่องเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์และประเมินสภาพการทำงานที่ผิดปกติของเครื่องจักร แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือการใช้แบบจำลองของระบบ (model based approach) และการตรวจสอบสภาพการทำงานของเครื่องจักร (condition based monitoring) บนพื้นฐานของการวัดและวิเคราะห์สัญญาณ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นการใช้เทคนิคการตรวจจับและระบุข้อบกพร่องแบบการตรวจสอบสภาพการทำงานของเครื่องจักร โดยการวัดค่าปริมาณการใช้กระแสของลิเนียร์มอเตอร์ที่ทำงานในสถานะที่ลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องเทียบกับสถานะการทำงานปกติ และการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของลิเนียร์มอเตอร์เมื่อลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องในกรณี ต่างๆ ข้อมูลการใช้กระแสและการสั่นที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (predictive maintenance) เพื่อลดผลกระทบต่อ

ความเสียหายของชิ้นส่วนอื่นๆ ซึ่งจะส่งผลให้เครื่องจักรทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องจักรลดน้อยลง

2.3 การคำนวณอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า

ปริมาณการใช้พลังงานของเครื่องหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียน จะเน้นวิเคราะห์เฉพาะลิเนียร์มอเตอร์ซึ่งอ้างอิงจากการทำงานจริงของเครื่องจักรในกระบวนการผลิต อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีเครื่องหยอดกาวและติดหัวอ่านอัตโนมัติในสายการผลิตทั้งหมด 48 เครื่อง ในแต่ละเครื่องจะติดตั้งลิเนียร์มอเตอร์ 4 แกน และลิเนียร์มอเตอร์มีการทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ซึ่งการคำนวณปริมาณการใช้พลังงานหาได้จากสมการที่ 1 (Von Meier, 2006) ดังนี้

$$P = I \times V \quad (1)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์)

I คือ กระแสไฟฟ้าของลิเนียร์มอเตอร์ (แอมแปร์)

V คือ แรงดันไฟฟ้าของลิเนียร์มอเตอร์ (โวลต์)

โดยหากพิจารณาลิเนียร์มอเตอร์ทั้งหมดในกระบวนการผลิตปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีหาได้จากสมการที่ 2 ซึ่งจะพิจารณาเมื่อเครื่องจักรทำงานตลอดเวลา ดังนั้นสามารถประเมินปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตได้

หน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปี (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี) =

กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) × จำนวนแกนของมอเตอร์ ×
จำนวนเครื่องจักร × 8640 ชั่วโมงต่อปี

(2)

โดยที่	จำนวนแกนของมอเตอร์	=	4 แกน
	จำนวนเครื่องจักร	=	48 เครื่อง
	ชั่วโมงการทำงานต่อวัน	=	24 ชั่วโมง
	จำนวนวันในหนึ่งเดือน	=	30 วัน

3. การทดลอง

3.1 ออกแบบการทดลองและเก็บข้อมูล

การทดลองจะใช้ลิเนียร์มอเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้า กระแสตรง (magnetic linear DC motor) รุ่น Akribis SGL 100-AUM3-PS4J ที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องหยอดกาว และติดหัวอ่านเขียนอัตโนมัติ และชุดรองรับการ

เคลื่อนที่ของลิเนียร์มอเตอร์จะมีลิเนียร์แบร์ริง รุ่น SGL 100-AUM3-PS4J ซึ่งมีการใช้งานในกระบวนการผลิตปัจจุบัน สำหรับการทดสอบชุดจับยึดชิ้นงาน (clamping unit) จะถูกติดตั้งไว้ด้านบนของลิเนียร์แบร์ริง ดังแสดงใน (Figure 5) ซึ่งทำให้ภาระกรรมโหลดโดยรวมที่กระทำกับลิเนียร์แบร์ริงจะอยู่ที่ 7 กิโลกรัม

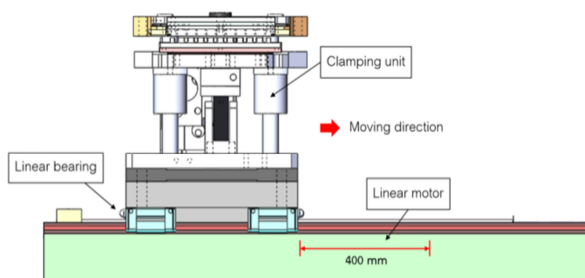


Figure 5 The linear motor setup.

ในการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเก็บข้อมูล แสดงใน (Figure 6) จะทำการเก็บค่ากระแสที่ลิเนียร์มอเตอร์ ใช้จากโปรแกรม Akribis ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานของมอเตอร์เพื่อนำมาวิเคราะห์ต่อไปได้ โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรมตามเครื่องจักรในกระบวนการผลิตจริง และการวัดการสั่นสะเทือนจะใช้ อุปกรณ์วัดสัญญาณพลวัตการสั่น (dynamic signal analyst) รุ่น IO-tech 640u และหัววัดการสั่นสะเทือนแบบความเร่ง 3 แกน (3 axis acceleration sensor) ร่วมกับโปรแกรม eZ-Analyst เพื่อวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

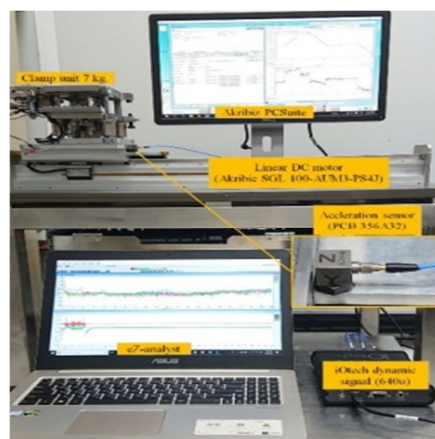


Figure 6 The experiment module test component.

สำหรับข้อมูลการทดลองจะพิจารณาความบกพร่องที่เกิดขึ้นกับลิเนียร์แบร์ริงจำนวน 5 กรณีเปรียบเทียบกับสภาวะปกติ ได้แก่ สภาวะลูกบอลแบร์ริงเสียหายหนึ่งลูก สภาวะลูกบอลแบร์ริงสูญหายหนึ่งลูก สภาวะการขาดสารหล่อลื่น สภาวะลูกบอลแบร์ริงเสียหายหนึ่งลูกร่วมกับการขาดสารหล่อลื่น และสภาวะลูกบอลแบร์ริงสูญหายหนึ่งลูกร่วมกับการขาดสารหล่อลื่น ซึ่งในแต่ละกรณีจะทดลอง 3 ความเร็วของมอเตอร์คือ 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตรต่อวินาที โดยที่ระยะการเคลื่อนที่ของลิเนียร์มอเตอร์ในแต่ละความเร็วจะอยู่ที่ 400 มิลลิเมตร ขั้นตอนในการทดลองแสดงดัง (Figure 7) โดยข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่ลิเนียร์มอเตอร์ใช้ในแต่ละกรณีจะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานต่อไป

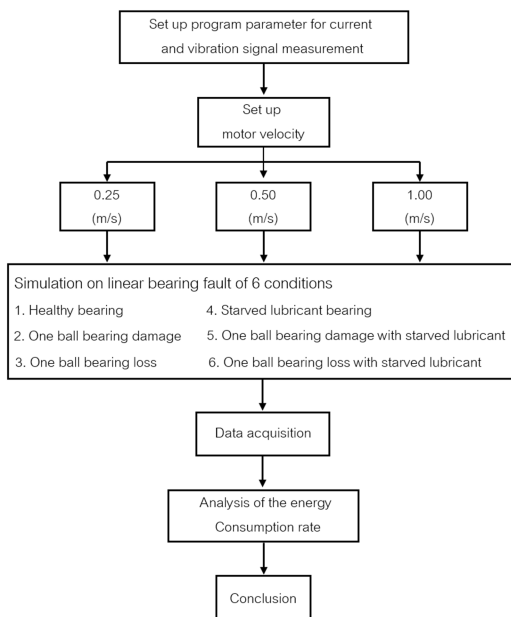


Figure 7 Experimental procedure.

3.2 ลักษณะของลิเนียร์แบร์ริง

3.2.1 กรณีลิเนียร์แบร์ริงสภาพปกติ

ลิเนียร์แบร์ริงในสภาวะปกติจะต้องมีสารหล่อลื่นที่เหมาะสมเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานทำให้ลิเนียร์มอเตอร์ทำงานได้มีประสิทธิภาพ และลูกบอลแบร์ริงในรางแต่ละด้านจะมีทั้งหมด 32 ลูก ดังแสดงใน (Figure 8)

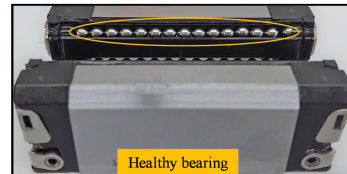


Figure 8 The condition of healthy linear bearing.

3.2.2 กรณีลูกบอลแบร์ริงเสียหาย

การจำลองความเสียหายที่เกิดกับลูกบอลแบร์ริงทำโดยการขัดลูกบอลแบร์ริงให้เกิดรอยหยาบที่ไม่สม่ำเสมอที่ผิว โดยมีพื้นที่ความเสียหายเท่ากับ 1.32 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 1 ลูก ดังแสดงใน (Figure 9) เพื่อสร้างข้อบกพร่องทำให้การหมุนของลูกบอลแบร์ริงไม่ต่อเนื่องในขณะทีลิเนียร์มอเตอร์เคลื่อนที่

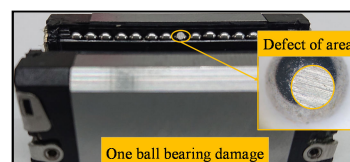


Figure 9 The condition of ball bearing damage.

3.2.3 กรณีลูกบอลแบร์ริงสูญหาย

ลิเนียร์แบร์ริงที่รองรับการเคลื่อนที่จะมีการทำงานต่อเนื่องภายใต้ภาระกรรมโหลดที่กระทำอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงมีโอกาสูงที่ลูกบอลแบร์ริงที่ถูก

แรงกดจะหลุดออกจากราง ซึ่งในการทดลองจะจำลองสภาวะของลูกบอลแบริ่งสูญหายโดยจะทำการนำลูกบอลแบริ่งออก 1 ลูก ดังแสดงใน (Figure 10)

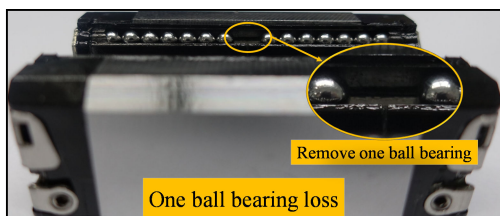


Figure 10 The condition of ball bearing loss.

3.2.4 กรณีลิเนียร์แบริ่งสภาพขาดสารหล่อลื่น

สารหล่อลื่นในลิเนียร์แบริ่งมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากช่วยลดแรงเสียดทานในการเคลื่อนที่และทำให้การเคลื่อนที่มีความราบรื่นขณะทำงาน โดยหากลิเนียร์แบริ่งขาดสารหล่อลื่นหรือมีปริมาณที่ไม่เพียงพอจะทำให้เกิดแรงเสียดทานในระหว่างการเคลื่อนที่ซึ่งก่อให้เกิดความร้อน จนนำไปสู่ความเสียหายของลิเนียร์แบริ่งได้ ในการทดลองจึงได้จำลองการทำงานในสภาวะที่ไม่มีสารหล่อลื่นโดยนำสารหล่อลื่นออกและใช้น้ำยาทำความสะอาดไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) กับเครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก ดังแสดงใน (Figure 11)



Figure 11 Removal of lubricants from the linear bearing.

3.2.5 กรณีลูกบอลแบริ่งเสียหายร่วมกับการขาดสารหล่อลื่น

ในกระบวนการผลิตข้อบกพร่องของลิเนียร์แบริ่งสามารถเกิดขึ้นได้หลายจุดพร้อมกันเนื่องจากเมื่อลิเนียร์แบริ่งทำงานในสภาวะขาดสารหล่อลื่นจะส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานที่สูงในระหว่างการเคลื่อนที่ซึ่งจะทำให้ลูกบอลแบริ่งเสียดสีกับราง จึงมีโอกาสสูงที่พื้นผิวของลูกบอลจะเกิดการสึกหรบ และส่งผลกระทบต่อชิ้นส่วนอื่นๆ นอกจากนี้ยังทำให้ลิเนียร์มอเตอร์ต้องรับภาระโหลดที่สูง ซึ่งจะต้องใช้พลังงานในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นด้วย

3.2.6 กรณีลูกบอลแบริ่งสูญหายร่วมกับการขาดสารหล่อลื่น

สถานการณ์เมื่อลิเนียร์แบริ่งขาดสารหล่อลื่นร่วมกับลูกบอลแบริ่งสูญหาย เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์ทำงานด้วยความเร็วสูงอย่างต่อเนื่องภายใต้การกระทำของโหลดซึ่งจะทำให้ลูกบอลหลุดจากรางของแบริ่ง ในกรณีนี้จะส่งผลให้ความราบเรียบในการเคลื่อนที่ลดลง หากมีสภาวะการขาดสารหล่อลื่นร่วมด้วยการใช้พลังงานของลิเนียร์มอเตอร์จะยิ่งสูงขึ้นและหากเกิดขึ้นเป็นระยะเวลานานอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อลิเนียร์มอเตอร์ได้

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงาน

จากแนวคิดการสูญเสียพลังงานจากภาระโหลดของมอเตอร์ที่สูงขึ้นเนื่องจากลิเนียร์แบริ่งเกิดข้อบกพร่องจึงได้จำลองลักษณะของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับลิเนียร์แบริ่ง 5 กรณีเปรียบเทียบกับสภาวะการทำงานปกติ ซึ่งในการเก็บรวบรวมข้อมูลแต่ละกรณีจะพิจารณา 3

ความเร็วของลิเนียร์มอเตอร์ คือ 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตรต่อวินาที เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานในแต่ละกรณี แสดงใน (Figure 12 and 14) ของเครื่องจักรเมื่อทำงานในขณะที่เกิดข้อบกพร่อง

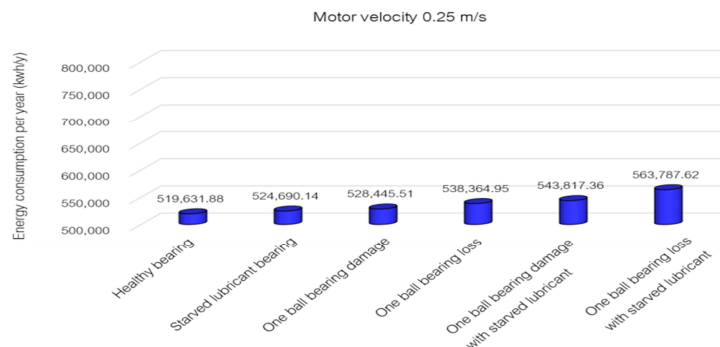


Figure12 The electrical consumption unit per year of linear motor at speed 0.25 m/s.

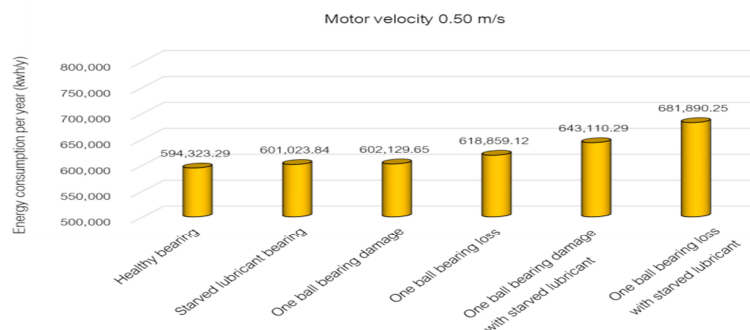


Figure 13 The electrical consumption unit per year of linear motor at speed 0.50 m/s.

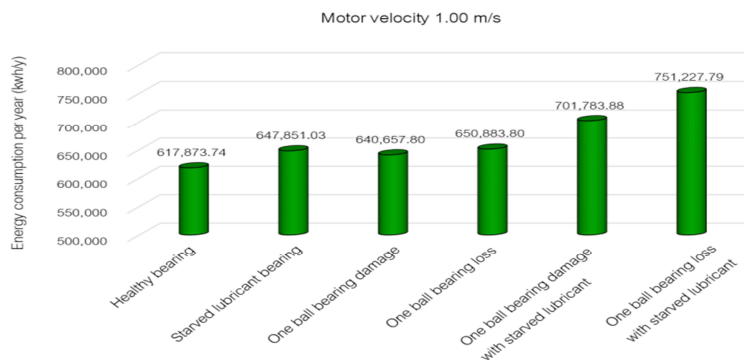


Figure 14 The electrical consumption unit per year of linear motor at speed 1.00 m/s.

จาก (Figure 12) ความเร็วของมอเตอร์ที่ 0.25 เมตรต่อวินาที พบว่าลิเนียร์แบร์ริงในสภาวะปกติจะใช้พลังงานน้อยที่สุด ประมาณ 519,631.88 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อปี และเมื่อพิจารณาที่ข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงทั้ง 5 กรณี จะเห็นว่าข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงที่เกิดจากสภาวะการขาดสารหล่อลื่น สภาวะลูกบอลแบร์ริงสูญหาย สภาวะลูกบอลเสียหาย สภาวะลูกบอลเสียหายร่วมกับการขาดสารหล่อลื่น และสภาวะลูกบอลแบร์ริงสูญหายร่วมกับการขาดสารหล่อลื่น มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ โดยการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นสูงสุดคือ 8.50 เปอร์เซ็นต์ วิเคราะห์ (Figure 13) ความเร็วของมอเตอร์ที่ 0.50 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วของกระบวนการผลิตชิ้นงานในปัจจุบัน การใช้พลังงานในสภาวะปกติประมาณ 594,323.29 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อปี โดยหากพิจารณาเปรียบเทียบเมื่อลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องกรณีสภาวะลูกบอลสูญหายร่วมกับการขาดสารหล่อลื่น พบว่าปริมาณการใช้พลังงานจะสูงขึ้นจากเดิมถึง 14.73 เปอร์เซ็นต์ โดยผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abu-Zeid, & Abdel-Rahman (2013) ที่ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบปั๊มเมื่อแบร์ริงเกิดข้อบกพร่องในสภาวะที่ลูกบอลแบร์ริงเกิดความ

เสียหาย ซึ่งผลแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของปั๊มลดลง 18 เปอร์เซ็นต์ และการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 14 เปอร์เซ็นต์ และจาก (Figure 14) แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 1.00 เมตรต่อวินาที จะทำให้มอเตอร์มีการใช้พลังงานที่มากขึ้นในการขับเคลื่อน ซึ่งสภาวะปกติของลิเนียร์แบร์ริงจะมีการใช้พลังงาน 617,873.74 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อปี จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ในการเคลื่อนที่ การใช้พลังงานจะเพิ่มมากขึ้นในทุกกรณี

2. การวิเคราะห์ผลการวัดการสั่นสะเทือน

ข้อบกพร่องของลิเนียร์แบร์ริงอาจส่งผลทำให้การเคลื่อนที่เกิดความไม่ราบเรียบ ซึ่งการวัดค่าขนาดการสั่นสะเทือนของลิเนียร์มอเตอร์ในขณะทำงานเป็นแนวทางที่จะช่วยวิเคราะห์ถึงสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Bianchini, Immovilli, Cocconcelli, Rubini, & Bellini (2011); Saruhan, Saridemir, Qicek, & Uygur (2014) ได้นำการวิเคราะห์ขนาดการสั่นสะเทือนมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับข้อบกพร่องของแบร์ริงด้วยเช่นกัน จากรูปใน (Figure 15 and 17) พิจารณาลักษณะการทดลองในแต่ละความเร็วคือ 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตรต่อวินาที

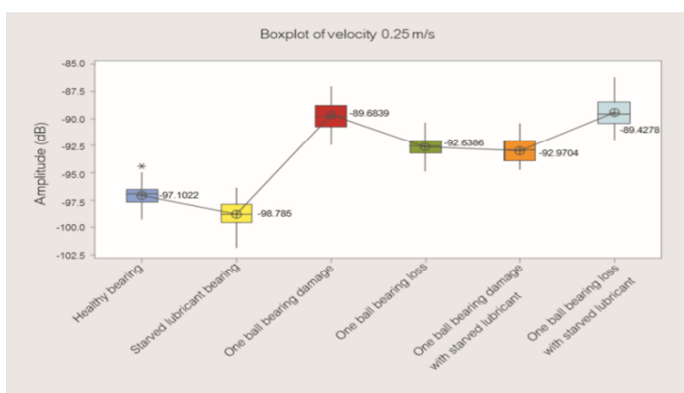


Figure 15 The vibration amplitude at speed 0.25 m/s.

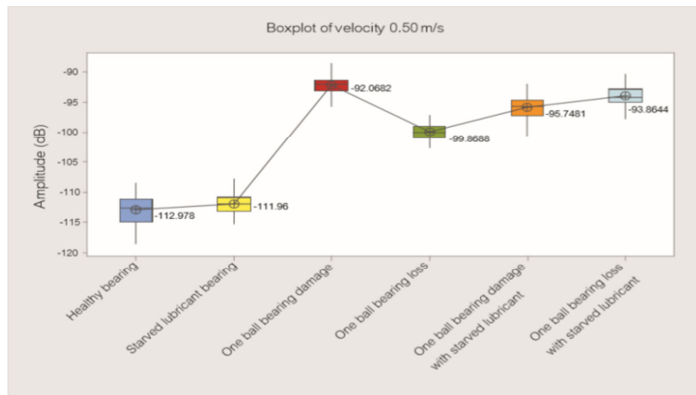


Figure 16 The vibration amplitude at speed 0.50 m/s.

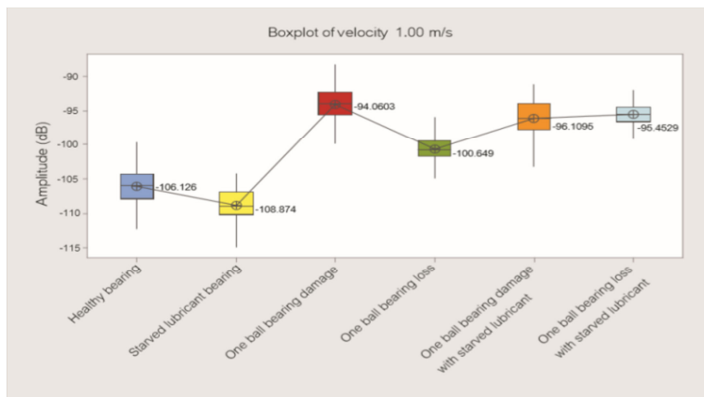


Figure 17 The vibration amplitude at speed 1.00 m/s.

จะเห็นว่าขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อลิเนียร์เบร้งที่เกิดสภาพข้อบกพร่องในแต่ละความเร็วของลิเนียร์มอเตอร์ ซึ่งสภาวะที่ลิเนียร์เบร้งขาดสารหล่อลื่นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับสภาวะปกติ แต่หากพิจารณาที่ลักษณะของข้อบกพร่องอื่นๆ พบว่าขนาดการสั่นสะเทือนจะแตกต่างจากสภาวะปกติอย่างชัดเจน ทั้งนี้หากเปรียบเทียบในแต่ละความเร็ว การเพิ่มความเร็วของลิเนียร์มอเตอร์จะทำให้ขนาดการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น ในกรณีที่ลูกบอลเบร้งเสียหาย ลูกบอลเบร้งสูญหาย และสภาวะที่เกิดร่วมกับการขาดสารหล่อลื่น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chinchusak,

& Pannawan (2017) ที่ทำการหาสมการความสัมพันธ์ของความเร็วและขนาดการสั่นสะเทือนกับปริมาณการใช้พลังงานในมอเตอร์เหนี่ยวนำ พบว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วและขนาดการสั่นสะเทือนจะส่งผลให้การใช้พลังงานของมอเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ในกรณีสภาวะลูกบอลเบร้งสูญหาย สภาวะลูกบอลเสียหาย สภาวะลูกบอลเสียหายร่วมกับการขาดสารหล่อลื่น และสภาวะลูกบอลเบร้งสูญหายร่วมกับการขาดสารหล่อลื่น ดังนั้นการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าการวัดขนาดการสั่นสะเทือนสามารถใช้ตรวจจับและระบุสาเหตุของข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับ

ลิเนียร์แบร์ริงในเครื่องหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้

สรุป

ผลการศึกษาแนวโน้มการสิ้นเปลืองพลังงานเมื่อลิเนียร์แบร์ริงเกิดข้อบกพร่องทั้ง 5 กรณี ในกระบวนการหยอดกาวและติดหัวอ่านเขียนข้อมูลของอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่ความเร็วของมอเตอร์ในการขับเคลื่อนเท่ากับ 0.25, 0.50 และ 1.00 เมตรต่อวินาที สอดคล้องกับกระบวนการผลิตจริง โดยใช้หลักการ fault detection and isolation (FDI) ตรวจจับข้อบกพร่องเพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงาน ได้แก่ กรณีสภาพขาดสารหล่อลื่น กรณีลูกบอลแบร์ริงสูญหาย กรณีลูกบอลแบร์ริงเสียหาย กรณีสภาพขาดสารหล่อลื่นร่วมกับลูกบอลแบร์ริงเสียหาย และกรณีสภาพขาดสารหล่อลื่นร่วมกับลูกบอลแบร์ริงสูญหาย เปรียบเทียบกับสภาพปกติของลิเนียร์แบร์ริง ตามลำดับ พบว่าลิเนียร์มอเตอร์มีการใช้พลังงานเรียงลำดับจากน้อยไปมากคือ 1) สภาพปกติของลิเนียร์แบร์ริง 2) สภาพขาดสารหล่อลื่น 3) ลูกบอลแบร์ริงเสียหาย 4) ลูกบอลแบร์ริงสูญหาย 5) สภาพการขาดสารหล่อลื่นและลูกบอลแบร์ริงเสียหาย และ 6) สภาพการขาดสารหล่อลื่นและลูกบอลแบร์ริงสูญหาย และการเพิ่มความเร็วของลิเนียร์มอเตอร์ส่งผลให้สูญเสียพลังงานจะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ชุดลิเนียร์แบร์ริงที่เกิดข้อบกพร่องพร้อมกันทั้ง 2 กรณี มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 8-21 เปอร์เซ็นต์ต่อปีเมื่อเทียบกับสภาพปกติ การใช้พลังงานกับขนาดการสันตะเทียนพบว่าเมื่อเพิ่มสันตะเทียนเมื่อเกิดข้อบกพร่องทั้ง 4 กรณียกเว้นกรณีลิเนียร์แบร์ริงที่เกิดจากสภาวะการขาดสารหล่อลื่น

ซึ่งส่งผลต่อค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นของกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังนั้นการวิเคราะห์การใช้พลังงานและวัดสัญญาณการสันตะเทียนสามารถใช้ตรวจจับและระบุข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับลิเนียร์แบร์ริงได้ และช่วยแจ้งเตือนให้ผู้ควบคุมสามารถแก้ปัญหาได้ทันก่อนจะเกิดความเสียหายรุนแรง ลดการใช้พลังงานและสามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตหัวอ่านเขียนในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากบริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล ประเทศไทย (จำกัด) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และทุนพัฒนานักวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม ระดับปริญญาเอก PHD60I0043

เอกสารอ้างอิง

- Abu-Zeid, M. A., & Abdel-Rahman, S. M. (2013). Bearing problems' effects on the dynamic performance of pumping stations. *Alexandria Engineering Journal*, 52(3), 241-248.
- Bianchini, C., Immovilli, F., Cocconcelli, M., Rubini, R., & Bellini, A. (2011). Fault detection of linear bearings in brushless AC linear motors by vibration analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(5), 1684-1694.
- Chinchusak, N., & Pannawan, A. (2017). Investigation of relationship between mechanical vibration and energy consumption of an induction motor. *The Journal of Industrial Technology*, 13(3), 101-110.
- Chommaungpuck, P., Lawbootsa, S., & Srisertpol, J. (2019). Fault detection of linear bearing in auto core adhesion mounting machine using artificial neural

- network. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 14, 31-42.
- Chuwong, P., Cheewananthacha, T., & phisitsangkakarn, S. (2015). Reduction of electrical energy consumption in metal sheet cutting plant. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 5(1), 42-52. (in Thai)
- Deeying, J., Asawarungsaengkul, K., & Chutima, P. (2018). Multi-objective optimization on laser solder jet bonding process in head gimbal assembly using the response surface methodology. *Optics & Laser Technology*, 98, 158-168.
- Guo, Y., Liu, T. W., Na, J., & Fung, R. F., (2012). Envelope order tracking for fault detection in rolling element bearings. *Journal of Sound and Vibration*, 331(25), 5644-5654.
- Kasemcharoenwong, P., & Rattanakuakangwan, S. (2014). A baseline study of energy consumption in electrical cable production. *Journal of Energy Research*, 11(1), 15-24. (in Thai)
- Lu, C., Wang, Z., & Zhou, B., (2017). Intelligent fault diagnosis of rolling bearing using hierarchical convolutional network-based health state classification. *Advanced Engineering Informatics*, 32, 139-151.
- Nidhiritdhikrai, R., Arunsawatwong, S., & Eua-arporn, B. (2013). Design of automatic generation control using the method of inequalities. *Journal of Energy Research*, 10(3), 57-71. (in Thai)
- Phoolee, S., & Chutima, P. (2012). Maintenance improvement to increase energy efficiency in a production process. *Journal of Energy Research*, 9(1), 30-46. (in Thai)
- Promthi, K. (2012). Energy analysis for improvement of cleanroom via statistical method: A case study of Voice coil motor manufacturing industry. *Journal of Energy Research*, 9(3), 24-35. (in Thai)
- Saruhan, H., Saridemir, S., Qicek, A., & Uygun, I. (2014). Vibration analysis of rolling element bearings defects. *Journal of applied research and technology*, 12(3), 384-395.
- Thiamsawet, A., & Ratanakuakangwan, S. (2014). Planning and control system for energy consumption of motorcycles spare parts industry. *Journal of Energy Research*, 11(2), 1-13. (in Thai)
- Von Meier, A. (2006). *Electric power systems: A conceptual introduction*. New Jersey: John Wiley & Sons.