



การออกแบบการทดลองปัจจัยรูปทรงปลายวีลของระบบจัดเก็บสะสมพลังงานปลายวีล

อภิชาติ เสมศรี*

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 06 4536 9415 อีเมล: aphichit@southeast.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.02.002

รับเมื่อ 10 มกราคม 2565 แก้ไขเมื่อ 26 เมษายน 2565 ตอรับเมื่อ 5 พฤษภาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 16 กุมภาพันธ์ 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบการทดลองรูปทรงปลายวีลของระบบกักเก็บพลังงานปลายวีล ระหว่างปลายวีล ขอบหน้ากับปลายวีลติสก์ทรงกรวย โดยเปรียบเทียบจากปัจจัยรูปทรง : K เพื่อเลือกรูปแบบการใช้งานที่ดีที่สุด การออกแบบ ปลายวีลจะใช้วัสดุเกรด SS400 และเพลารองรับปลายวีลใช้วัสดุเกรด S45C จากนั้นนำรูปแบบของปลายวีลมาจำลองด้วย โปรแกรม Solidwork Simulation และนำไปทดลองด้วยเงื่อนไขในสภาวะแบบไม่มีโหลด ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ค่าความเค้นสูงสุดของปลายวีลและเพลารองรับปลายวีลมีค่าต่ำกว่าความต้านทานแรงดึง งานวิจัยได้เปรียบเทียบข้อมูลจาก คุณสมบัติทางกลของวัสดุทั้งสองชนิด ค่าความเครียดจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปในขณะทำงาน ระยะการบิดงอสูงสุดอยู่ที่ บริเวณขอบด้านบนของปลายวีลทรงกรวยและปลายวีลขอบหน้าจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.020–1.134 มิลลิเมตร และ 0.763–0.848 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าความปลอดภัยสำหรับปลายวีลติสก์ทรงกรวยมีค่าเท่ากับ 1.23 และปลายวีลขอบหน้ามีค่าเท่ากับ 1.608 จากผลการทดลองเพื่อพิจารณาปัจจัยด้านเวลาการหมุนของปลายวีลพบว่า ปลายวีลติสก์ทรงกรวยจะมีเวลาในการ หมุนอยู่ที่ 180 วินาที และปลายวีลขอบหน้ามีเวลาในการหมุนอยู่ที่ 120 วินาที ปัจจัยด้านความเร็วพบว่า ความเร็วในการ หมุนที่ช่วงเวลาเดียวกันปลายวีลติสก์ทรงกรวยจะมีค่าความเร็วที่สูงกว่า ปลายวีลขอบหน้า ผลการศึกษาพบว่า ปลายวีลติสก์ ทรงกรวยจะมีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำไปใช้งาน เนื่องจากมีการกักเก็บพลังงานในระยะยาวได้ดีกว่า ในการวิจัยครั้ง ต่อไปผู้วิจัยคาดการณ์สำหรับการทดลองที่จะทำให้การหมุนของปลายวีลติสก์ทรงกรวยสามารถกักเก็บพลังงานได้นานขึ้นและ มีประสิทธิภาพทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

คำสำคัญ: ปลายวีล ระบบกักเก็บพลังงานปลายวีล การจำลอง การออกแบบการทดลอง



Experimental Design for Shape Factor of Flywheel Rotor with a Flywheel Energy Storage System

Aphichit Semsri*

Department of Industrial Engineering Technology, Faculty of Science and Technology, Southeast Bangkok College, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 06 4536 9415, E-mail: aphichit@southeast.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.02.002

Received 10 January 2021; Revised 26 April 2022; Accepted 5 May 2022; Published online: 16 February 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This experimental research design aims at the study and design of flywheel shape factors on a flywheel energy storage system between thick rim flywheels and conical disc flywheels, and to compare their K-shape for choosing the best application. To design flywheels, the metal used was SS400 and S45C was selected for a flywheel support shaft. Then, flywheel pattern design and motion was investigated using solidworks modeling. Simulations were implemented under no-load conditions. As results, the von Mises stress of both the flywheels and flywheel support shaft have lower values than the tensile strength. A comparison of mechanical properties of both materials revealed that the stress value will not affect the deformation while working. The highest URES values were at the top edge, and the maximum values of the conical disc flywheel and thick rim flywheel were in the ranges of 1.020–1.134 mm and 0.763–0.848 mm respectively. The safety values of the conical disc flywheel and thick rim flywheel were 1.23 and 1.608 respectively. Taking the time of flywheel energy storage into account, the conical disc flywheel had a time value of 180 s and a thick rim flywheel with a time value of 120 s. Considering the speed factor, the conical disc flywheel has a higher rotational speed than that of the thick rim flywheel at every test time. Conical disc flywheels are ideal for applications because of their long-term energy storage. The researcher assumes for the next experiment that conical disc flywheel rotation can store energy longer with effective continuous performance.

Keywords: Flywheel, Flywheel Energy Storage System, Simulation, Experiment Design

1. บทนำ

จากแผนยุทธศาสตร์ชาติและแผนปฏิรูปด้านพลังงานภายในประเทศไทย โดยมีประเด็นด้านพลังงานเป็นส่วนขับเคลื่อนที่สำคัญ จึงได้มีการกำหนดยุทธศาสตร์เพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบัน ยุทธศาสตร์ที่มีความสำคัญในด้านของพลังงานภายในประเทศ ได้แก่ ยุทธศาสตร์การจัดหาพลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการใช้ของประเทศ และมีโครงสร้างพื้นฐานและระบบบริหารจัดการที่เสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงาน ยุทธศาสตร์การพัฒนาพลังงานที่ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและนโยบายที่สำคัญอีกประการคือการส่งเสริมการใช้งานพลังงานหมุนเวียน [1]

ระบบพลังงานหมุนเวียนเป็นพลังงานที่มีความสำคัญในยุคปัจจุบัน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม แต่พลังงานเหล่านี้ไม่สามารถผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการในการกักเก็บพลังงานที่มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้า [2], [3]

ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลเป็นระบบหนึ่งที่ได้รับ ความนิยมที่สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว [4], [5] เป็น พลังงานสะอาดและได้ถูกนำมาใช้งานที่มีความแตกต่างกัน [4], [8] ด้วยปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และด้านพลังงาน ที่เพิ่มขึ้น การจัดเก็บพลังงานในรูปแบบของฟลายวีลจึง เป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอวกาศ [6] ยานพาหนะ โรงไฟฟ้า [7] และในเทคโนโลยีขั้นสูง เนื่องจาก มีประสิทธิภาพสูงมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน บำรุงรักษา ย่อมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมต่ำและมีประสิทธิภาพที่ความเร็วรอบสูง [9]–[11] ในการกักเก็บพลังงานฟลายวีลเกิดขึ้นในขณะที่มีการหมุนที่ความเร็วรอบสูงและมีความสามารถในการส่งกำลัง ขับที่สูงออกมาด้วยความหนาแน่นของพลังงานและปริมาณ พลังงานเนื่องจากการหมุนจะเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญใน การประเมินประสิทธิภาพของการกักเก็บสะสมพลังงาน [12] การเพิ่มขีดความสามารถในการกักเก็บพลังงานของฟลายวีล สามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาดหรือความหนาแน่นของวัสดุ [13] ปัจจัยที่สำคัญของเทคโนโลยีระบบการกักเก็บพลังงาน ฟลายวีล เช่น วัสดุ ขนาดรูปทรง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณ

การจัดเก็บพลังงานและพลังงานจำเพาะของ ฟลายวีล และ ความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน [14] ความสำคัญ ของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล จากงานวิจัยที่ผ่านมา ผู้วิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1.1 วัสดุที่ใช้ทำฟลายวีล

จากการวิจัยและพัฒนาฟลายวีลที่ผ่านมาจะมีสองวิธีใน การเพิ่มปริมาณพลังงานและสามารถกักเก็บพลังงานได้ดีของ ฟลายวีล ได้แก่ วิธีการเพิ่มความเร็วในการหมุนของ ฟลายวีล และวิธีการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย [15] การเพิ่มความเร็ว สูงสุดของฟลายวีลสามารถกำหนดได้จากความต้านทาน แรงดึงของฟลายวีล ด้วยเหตุนี้จึงมีการวิจัยอย่างกว้างขวาง เกี่ยวกับวัสดุที่มีความแข็งแรงและมีความต้านทานแรงดึงสูง เพื่อเพิ่มปริมาณพลังงานที่เก็บไว้ [16] วัสดุที่นำมาใช้ทำ ฟลายวีล ได้แก่ วัสดุโลหะหนักจำพวกเหล็ก เหมาะสำหรับ การใช้งานที่ความเร็วรอบต่ำ และวัสดุคอมโพสิตเหมาะใ้ใช้งาน ที่ความเร็วรอบสูงๆ เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับราคาของฟลายวีลที่ความเร็วสูง อาจ จะมีราคาสูงขึ้นถึงห้าเท่ากว่าราคาของฟลายวีลที่ความเร็วต่ำ [17]–[19] วัสดุเหล็กมีข้อได้เปรียบในด้านการผลิตที่มี ต้นทุนต่ำ เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและง่ายต่อการนำ กลับมาใช้ใหม่เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ [20] ฟลายวีลที่นิยม ใช้มีอยู่ 2 ประเภท ในระบบการกักเก็บในอุตสาหกรรม ได้แก่ ฟลายวีลที่ทำมาจากวัสดุเหล็กทำงานที่ความเร็วรอบ ต่ำกว่า 6,000 รอบต่อนาที และฟลายวีลที่ทำมาจากคอมโพสิต ทำงานที่ความเร็วรอบสูง ระหว่าง 10,000 ถึง 100,000 รอบต่อนาที จากข้อเสียบางประการที่เกิดขึ้นกับฟลายวีล ในเรื่องของความปลอดภัย รวมถึงอาการล่าเนื่องจากการ หยุด-สตาร์ท การทำงานของฟลายวีลที่มีความเร็วที่สูง-ต่ำ ความผันผวนของความเครียด และการสั่นสะเทือนที่เกิด จากความไม่สมดุลของฟลายวีล จากการทำงานที่ความเร็ว รอบสูง [21], [22]

ในงานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการพัฒนา ฟลายวีลให้มีการทำงานที่ความเร็วรอบสูงๆ ด้วยการพัฒนา เกี่ยวกับแบร์ริงเพื่อลดแรงเสียดทานและวัสดุในการทำฟลายวีล

จากข้อเสียในเรื่องของความปลอดภัย การเกิดความล้มเหลวของวัสดุ การเกิดความผันผวนของความเครียด และการสั่นสะเทือนที่เกิดจากความไม่สมดุลของฟลายวีล เพื่อลดปัญหาในสิ่งเหล่านี้ จึงเป็นแนวทางของงานวิจัยนี้ที่ศึกษาในการสร้างฟลายวีลที่ทำมาจากวัสดุเหล็กที่ใช้ต้นทุนต่ำ และการนำมาใช้งานที่ความเร็วรอบต่ำๆ ที่ไม่เกิน 1,500 รอบต่อนาที โดยพิจารณาวัสดุที่นำมาใช้สร้างฟลายวีล 3 ชนิด ได้แก่ SS400, ASTM A283 Steel และ High tensile Steel AISI 4340 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ แสดงดังตารางที่ 1 เมื่อนำวัสดุทั้งสามชนิดมาพิจารณา ค่าความเค้น ความหนาแน่น และพลังงานต่อหน่วยมวล ในที่นี้ผู้วิจัยได้เลือกวัสดุเหล็กชนิดเกรด SS400 ในการสร้างฟลายวีล เหล็กชนิดนี้เป็นคุณสมบัติด้านความแข็งแรง ทนทาน เหมาะสำหรับการนำไปในงานอุตสาหกรรมในประเภทต่างๆ ได้ดี และสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด ราคาไม่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น สำหรับวัสดุที่นำมาใช้ทำเพลารองรับฟลายวีลจะเป็นชนิดเกรด S45C

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ [23]

คุณสมบัติของวัสดุ	วัสดุสำหรับฟลายวีล			วัสดุสำหรับเพลารองรับฟลายวีล
	SS400	ASTM A283 Steel	High Tensile Steel AISI 4340	
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	7,860	7,800	7,830	7,700
มอดูลัสของยัง (จิกะปาสกาล)	190	200	210	190
ความแข็งแรงของวัสดุ (เมกะปาสกาล)	400	310	850	569
จุดคราก (เมกะปาสกาล)	205	165	635	343
อัตราส่วนปัวซอง	0.26	0.25	0.29	0.27-0.3

1.2 แบร็ง

การออกแบบแบร็งเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการ

กักเก็บพลังงานฟลายวีล ถ้าการออกแบบไม่ดีจะทำให้เกิดการเพิ่มแรงเสียดทานและเกิดการสูญเสียมากขึ้น รวมถึงมีค่าใช้จ่ายและการดูแลบำรุงรักษาที่สูงขึ้นอีกด้วย [24], [25] แบร็งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญทางกลแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักๆ ได้แก่ แบร็งลูกปืนและแบร็งแม่เหล็กแบร็งลูกปืนเหมาะสำหรับใช้งานสำหรับฟลายวีลที่ความเร็วรอบต่ำ สำหรับแบร็งแม่เหล็กเหมาะสำหรับใช้งานที่ความเร็วรอบสูง ขณะหมุนจะไม่สัมผัสกับโรเตอร์จะเกิดการลอยตัวไปรอบๆ ของเพลารอเตอร์ที่เคลื่อนตัวในระบบจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานที่ต่ำ และลดความสูญเสียจากการรองรับของระบบ [26], [27] แบร็งแม่เหล็กแบ่งออกเป็น 3 ประเภทที่ถูกนำมาใช้งาน ได้แก่ แบร็งแม่เหล็ก (AMB) แบร็งแม่เหล็กถาวร (PMB) และแบร็งแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด (SMB) [28], [29] เมื่อเปรียบเทียบข้อดีของแบร็งแม่เหล็กถาวรพบว่า จะมีความแข็งแรงสูง มีโครงสร้างและการติดตั้งที่ต้นทุนต่ำ และการสูญเสียต่ำ [30], [31] ผู้วิจัยสรุปข้อดีและข้อเสียของแบร็งในแต่ละแบบ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อดีและข้อเสียของแบร็ง

ชนิดแบร็ง	ข้อดี	ข้อเสีย
แบร็งลูกปืน	- เหมาะใช้งานที่ความเร็วรอบต่ำ และปานกลาง - มีความเรียบง่าย - ราคาประหยัด - มีความกะทัดรัด	- ต้องมีการบำรุงรักษา - ต้องการหล่อลื่น - มีแรงเสียดทานสูง
แบร็งแม่เหล็ก	- เหมาะใช้งานที่ความเร็วรอบสูง - มีความสามารถในการรับน้ำหนักสูง - มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น - มีการตอบสนองที่เร็วขึ้น - มีการสูญเสียที่ต่ำ	- ค่าใช้จ่ายสูง - ระบบควบคุมการทำงานที่ซับซ้อน

จากการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบร็งพบว่า แบร็งแม่เหล็กจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานได้ดีกว่า แต่เนื่องจากมีปัจจัยในเรื่องค่าใช้จ่ายและมีความซับซ้อนของระบบควบคุมการทำงาน ผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือก



รูปที่ 1 แบร์ริงลูกปืนกันรุนเมื่อดกลมรับแรงสองทิศทาง

แบร์ริงที่เป็นแบบลูกปืน สามารถรองรับการหมุนที่มีการกำหนดค่าความเร็วรอบในการทดสอบที่ไม่เกิน 1,500 รอบต่อนาที และสามารถรองรับน้ำหนักรวมถึงแรงที่กระทำ แบร์ริงลูกปืนที่ผู้วิจัยเลือกเป็นแบบแบร์ริงลูกปืนกันรุนเมื่อดกลมรับแรงสองทิศทาง เพราะแบร์ริงชนิดนี้มีความแข็งแรงคงทนต่อความเร็วที่รอบสูงได้ [32], [33] แสดงดังรูปที่ 1

1.3 คุณลักษณะฟลายวีล

การออกแบบฟลายวีลเป็นสิ่งสำคัญในการทำวิจัยและการพัฒนาระบบการกักเก็บพลังงาน พารามิเตอร์ทางเรขาคณิตเป็นรากฐานสำหรับการออกแบบและการวิเคราะห์ฟลายวีลที่เหมาะสมที่สุด [34] ฟลายวีลสามารถจัดเก็บหรือการกระจายพลังงานจนได้โดยมีแรงเฉื่อยที่เกิดจากการหมุน ซึ่งมี 3 องค์ประกอบหลัก ที่จะกำหนดความจุและประสิทธิภาพการจัดเก็บพลังงานจากฟลายวีล ได้แก่

1) ความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ วัสดุที่มีความแข็งแรงจะสามารถรับความเครียดได้มากขึ้นจึงสามารถดำเนินการได้ที่ความเร็วสูงขึ้น




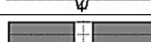
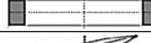

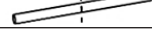


2) รายละเอียดทางเรขาคณิตของฟลายวีล (ปัจจัยรูปทรง; K) เรขาคณิตของดิสก์ (โมเมนต์ความเฉื่อยของข้อ) ที่เป็นสัดส่วนกับการผลิตพลังงานของระบบฟลายวีล

3) ความเร็วในการหมุน จะเป็นกำลังสองของความเร็วในการหมุนที่เป็นสัดส่วนกับการผลิตพลังงานของระบบฟลายวีล [21], [23]

จากข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา ผู้วิจัยจึงได้พิจารณารูปทรงฟลายวีล 2 รูปแบบ ที่มีค่าปัจจัยรูปทรง : K ที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาออกแบบและทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการ

ทำงานที่ดีที่สุด ได้แก่ ฟลายวีลดิสก์ทรงกรวยโดยมีค่า K ที่มีค่าที่สูงเท่ากับ 0.806 และได้เลือก ฟลายวีลขอบหนาที่มีค่า K ที่มีค่าที่ต่ำ เท่ากับ 0.305 แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปัจจัยรูปทรงฟลายวีล ไอโซเมตริกที่เป็นเนื้อเดียวกัน [35], [36]

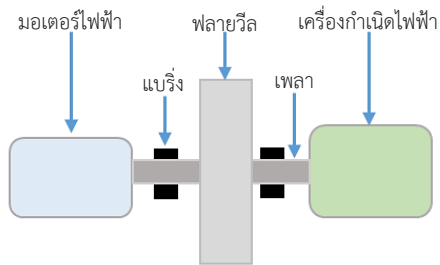
Flywheel Geometry	Cross-Section	Shape Factor K
Disc		1.000
Modified Constant Stress Disc		0.931
Conical Disc		0.806
Flat Unpierced Disc		0.606
Thick Rim		0.305
Thin Rim		0.500
Shaped Bar		0.500
Rim with Web		0.400
Single Bar		0.333

ในปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้กับโซลาร์รูฟที่อบมากขึ้นในส่วนของอาคารและที่พักอาศัย แต่ยังมีพลังงานหมุนเวียนในรูปแบบอื่นๆ อีก ที่สามารถนำมาประยุกต์เพื่อนำมาใช้งานได้อีกหลายประเภท พลังงานแสงอาทิตย์มีข้อจำกัดในเรื่องการสะสมพลังงานเพราะไม่สามารถผลิตได้อย่างต่อเนื่อง รวมถึงค่าใช้จ่ายที่ยังคงสูงอยู่ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการกักเก็บสะสมพลังงานให้เพียงพอต่อการใช้งาน ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลใช้งานที่ความเร็วรอบต่ำ เป็นทางเลือกเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับที่พักอยู่อาศัยในส่วนของพลังงานหมุนเวียน เพื่อตอบสนองนโยบายของภาครัฐอีกด้วย

ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการศึกษาดังนี้

1) การออกแบบฟลายวีล รูปทรงฟลายวีลที่ใช้ศึกษา ได้แก่ ฟลายวีลขอบหนากับฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย

2) การทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพการนำไปใช้งาน โดยพิจารณาปัจจัยในด้านของเวลาในการหมุนของฟลายวีลและปัจจัยด้านความเร็วรอบการหมุนของฟลายวีล



รูปที่ 2 ส่วนประกอบระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์ระบบกักเก็บสะสมพลังงานแบบ ฟลายวีล

ส่วนประกอบระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล แสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญดังนี้

2.1.1 มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นชนิดแบบเหนี่ยวนำ (Induction Motor) 1 เฟส 220 โวลต์ มีขนาด 3.7 กิโลวัตต์ กำลังมอเตอร์ 5 แรงม้า จำนวนโพล 4 โพล ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

2.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เครื่องกำเนิดเป็นชนิดกระแสสลับ (AC Generator) 1 เฟส 220 โวลต์ กำลังการผลิต 3.5 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

2.1.3 แบริ่งลูกปืน

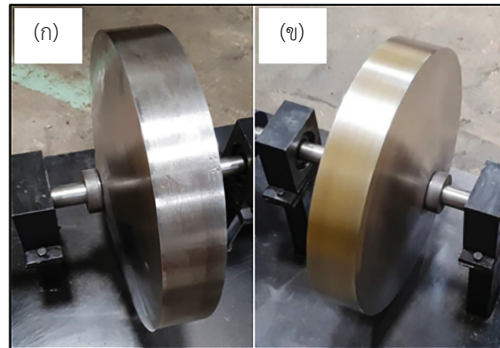
แบริ่งที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นแบบแบริ่งลูกปืนกันรุนเม็ดกลมรับแรงสองทิศทาง

2.1.4 เฟลารองรับฟลายวีล

เฟลาทำมาจากวัสดุเหล็กเกรด A45C เป็นอุปกรณ์รองรับฟลายวีลและดัลบลูกปืน การออกแบบขนาดเฟลาประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 มิลลิเมตร ความยาวมีค่าเท่ากับ 530 มิลลิเมตร

2.1.5 ฟลายวีล

1) การออกแบบรูปทรงฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย โดยมีการกำหนดขนาดดังนี้ รัศมีด้านวงในมีค่าเท่ากับ 0.03 เมตร รัศมีด้านวงนอกมีค่าเท่ากับ 0.4 เมตร และความหนาฟลายวีลมีค่าเท่ากับ 0.07 เมตร ความยาวแกนมีค่าเท่ากับ 0.13 เมตร และรัศมีมุมเอียงทำมุม 9 องศา แสดงดังรูปที่ 3 (ก) ฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย



รูปที่ 3 รูปทรงฟลายวีล (ก) ฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย และ (ข) ฟลายวีลขอบหนา

2) การออกแบบรูปทรงฟลายวีลขอบหนา โดยมีการกำหนดขนาดดังนี้ รัศมีด้านวงในมีค่าเท่ากับ 0.03 เมตร รัศมีด้านวงนอกมีค่าเท่ากับ 0.4 เมตร และความหนาฟลายวีลมีค่าเท่ากับ 0.07 เมตร แสดงดังรูปที่ 3 (ข) ฟลายวีลขอบหนา

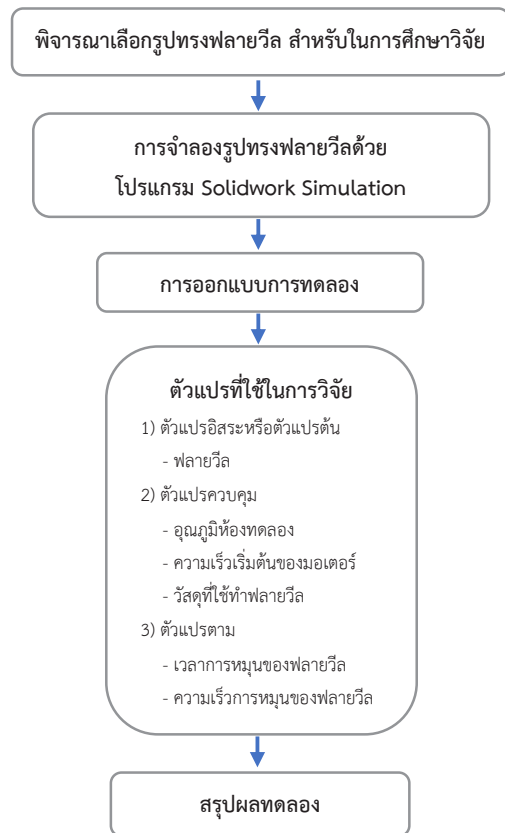
2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย แสดงดังรูปที่ 4 เริ่มต้นกระบวนการด้วยการเลือกรูปแบบของฟลายวีลที่จะทำการศึกษา กระบวนการต่อมาคือการจัดการเรขาคณิตของ ฟลายวีล ทั้งสองรูปแบบ กระบวนการต่อมาคือการจำลองด้วยโปรแกรม Solidwork Simulation ทำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เมช (Finite Element Mesh) และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและโหลด (Boundary Conditions) และทำการ Simulation เพื่อพิจารณาปัจจัย 1) ความเค้น (von Mises Stress) 2) ความเครียด (ESTRN) 3) ระยะการบิดงอ (URES) และ 4) ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) กระบวนการต่อมาก็คือการออกแบบการทดลอง ซึ่งผู้วิจัยกำหนดเป็นรูปแบบ Multiple Time Series Design และกระบวนการสุดท้ายคือการทดสอบและประเมินผลประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุด เพื่อเปรียบเทียบกับรูปทรงฟลายวีลทั้ง 2 รูปแบบ

2.3 การจำลองด้วยโปรแกรม Solidwork Simulation

2.3.1 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เมช

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่า



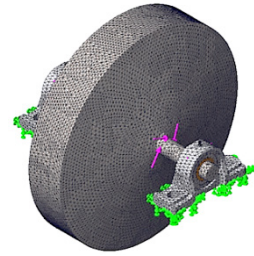
รูปที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

สูงสุดของความเร็วฟลายวีลที่สามารถหมุนได้โดยไม่มีข้อผิดพลาดและจำนวนของพลังงานจลน์ที่ฟลายวีลสามารถเก็บได้ที่ความเร็วสูงสุด การวิเคราะห์ที่โครงสร้างแบบคงที่ใช้เพื่อค้นหาการหมุนสูงสุดของความเร็วและ Explicit Dynamics เพื่อใช้ในการคำนวณจำนวนพลังงานจลน์ในฟลายวีล

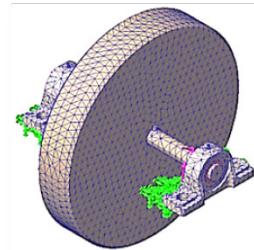
วิธีการเมส (Mesh Method) จะเป็นเอลิเมนต์ที่มีจุดโหนด (Node) อยู่บริเวณจุดตรงมุมของเอลิเมนต์ คุณภาพของการเมสในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีคุณภาพสูง (High Quality) ซึ่งจะมีความละเอียดมากเพียงพอต่อการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 5 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมสของฟลายวีลดีस्कทรงกรวย และดังรูปที่ 6 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมสของฟลายวีลขอบหนา

2.3.2 เงื่อนไขขอบเขตและโหลด

ขอบเขตในการพิจารณา จะพิจารณาในส่วนบริเวณ



รูปที่ 5 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมสของฟลายวีลดีस्कทรงกรวย



รูปที่ 6 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมสของฟลายวีลขอบหนา

ที่เป็นพื้นที่ของฟลายวีลทั้งหมด บริเวณเพลารองรับฟลายวีลและบริเวณชุดแปรง ประเภทเงื่อนไขขอบเขต คือ การเคลื่อนตัว การหมุน ทุกองศาที่เป็นอิสระของโหนดบนพื้นผิว การพิจารณาโหลดในการหมุนจะถูกเลือกด้วยความเร็วในการหมุน 1,500 รอบต่อนาที

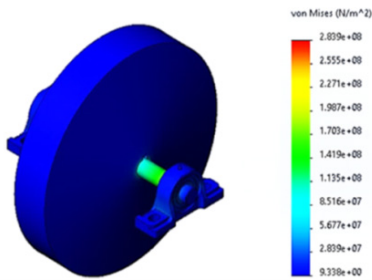
2.3.3 การจำลองฟลายวีล (Simulation)

การจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ผู้วิจัยทำการศึกษาปัจจัยดังนี้ 1) ความเค้น 2) ความเครียด 3) ระยะการบิดงอ และ 4) ค่าความปลอดภัย

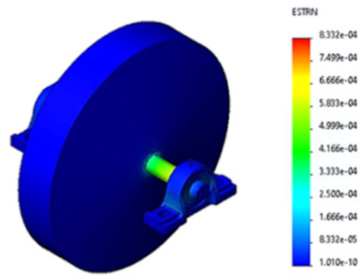
ผลที่ได้จากการจำลองในด้านของปัจจัยต่างๆ จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าวัสดุที่นำมาใช้นั้นมีความสามารถในการทนต่อความเค้นสูงสุดได้หรือไม่ เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่จะสามารถใช้งานได้ในการทำงานดังกล่าว

1) ผลการจำลองค่าความเค้น

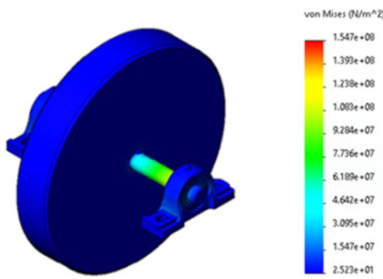
ความเค้นของฟลายวีลทั้ง 2 รูปแบบ และเพลารองรับ แสดงดังรูปที่ 7 รูปทรงฟลายวีลดีस्कทรงกรวยและรูปที่ 8 แสดงรูปทรงฟลายวีลขอบหนา พบว่าค่าที่อ่านได้จะมีค่าที่ต่ำกว่าความสามารถในการทนต่อความเค้นสูงสุด เมื่อ



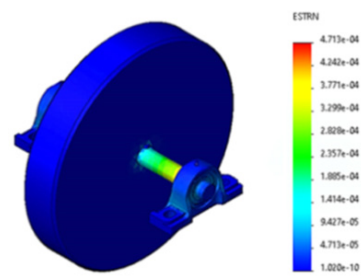
รูปที่ 7 ความเค้นพลาวยิลติสก์ทรงกรวย ทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 9 ความเครียดพลาวยิลติสก์ทรงกรวยทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 8 ความเค้นพลาวยิลขอบหนาทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 10 ความเครียดพลาวยิลขอบหนาทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที

เปรียบกับคุณสมบัติทางกลของวัสดุ จากตารางที่ 1 เพราะ ฉะนั้นวัสดุที่นำมาใช้ทำพลาวยิลที่เป็นชนิด SS400 และเพลารองรับพลาวยิลชนิด S45C สามารถนำมาใช้ในการผลิตได้ โดยไม่มีผลกระทบ

2) ผลการจำลองความเครียด

ความเครียดของรูปทรงพลาวยิลทั้ง 2 รูปแบบ และเพลารองรับ แสดงดังรูปที่ 9 รูปทรงพลาวยิลติสก์ทรงกรวย และรูปที่ 10 แสดงรูปทรงพลาวยิลขอบหนาพบว่า ค่าที่อ่านได้ จะที่ไม่ความแตกต่างกัน ค่าความเครียดจะอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ ซึ่งประเมินผลได้ว่าจะไม่ผลกระทบต่อการบิดตัวหรือเสียหาย ในขณะที่มีการหมุนด้วยความเร็วรอบที่กำหนดไว้

3) ผลการจำลองระยะการบิดงอ

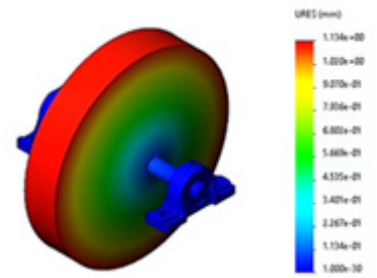
ระยะการบิดงอของรูปทรงพลาวยิลทั้ง 2 รูปแบบ และเพลารองรับ แสดงดังรูปที่ 11 รูปทรงพลาวยิลติสก์ทรงกรวย และรูปที่ 12 แสดงรูปทรงพลาวยิลขอบหนาพบว่า ค่าสูงสุด จะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบด้านบน ซึ่งจะไม่ผลกระทบต่องาน

ของพลาวยิลขณะที่มีการหมุน

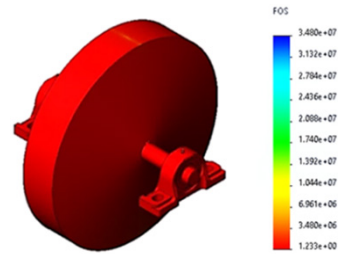
4) ผลการจำลองค่าความปลอดภัย

ปัจจัยด้านความปลอดภัยคือ อัตราส่วนของสภาวะไหลตสูงสุด ที่ส่วนประกอบสามารถทนภายใต้การทดสอบที่รุนแรงโดยไม่มีการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่บรรทุกได้จริง ภายใต้สภาวะปกติ ปัจจัยด้านความปลอดภัยต้องมีค่าระหว่าง 1.23-4 โดยประมาณ [36] จากผลการจำลองค่าความปลอดภัยรูปทรงพลาวยิลติสก์ทรงกรวยและเพลารองรับพลาวยิลมีค่าเท่ากับ 1.23 สำหรับพลาวยิลขอบหนา และเพลารองรับพลาวยิลมีค่าเท่ากับ 1.068 แสดงดังรูปที่ 13 แสดงรูปทรงพลาวยิลติสก์ทรงกรวย และรูปที่ 14 แสดงรูปทรงพลาวยิลขอบหนา สามารถสรุปได้ว่าค่าความปลอดภัยทั้ง 2 รูปแบบ มีค่าความปลอดภัยที่ไม่เกินค่ากำหนด

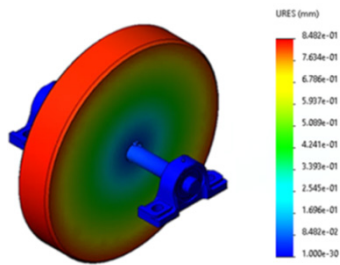
สรุปผลที่ได้จากการจำลองเพื่อเปรียบเทียบรูปทรงพลาวยิลติสก์ทรงกรวยกับรูปทรงพลาวยิลขอบหนา และ



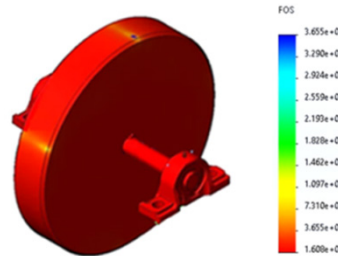
รูปที่ 11 ระยะการบิดงอฟลายวีลดีสก์ทรงกรวยทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 13 ค่าความปลอดภัยฟลายวีลดีสก์ทรงกรวยทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 12 ระยะการบิดงอฟลายวีลขอบหนาทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 14 ค่าความปลอดภัยฟลายวีลขอบหนาทดสอบที่ความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที

เพลารองรับฟลายวีล ปัจจัยด้านความเค้นสำหรับฟลายวีล ทั้ง 2 รูปแบบ สามารถทนต่อความเค้นถึงสูงสุดได้ ปัจจัยด้านความเครียด ค่าความเครียดจะอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ ซึ่งจะประเมินผลได้ว่าจะไม่มีการบิดหรือเสียรูป ปัจจัยด้านระยะการบิดงอ รูปทรงฟลายวีลดีสก์ทรงกรวยจะมีค่าที่สูงกว่ารูปทรงฟลายวีลขอบหนา ระยะการบิดงอจะอยู่

ในเกณฑ์ที่ต่ำ ซึ่งก็ไม่มีผลกระทบต่อการใช้งาน ปัจจัยด้านความปลอดภัย อยู่ในเกณฑ์ที่มีความปลอดภัยที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นผู้วิจัยสรุปได้ว่าที่ความเร็วไม่เกิน 1,500 รอบต่อนาที ในการทดสอบจะไม่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนรูปของฟลายวีลทั้ง 2 รูปแบบ ผลที่ได้จากการอ่านค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างฟลายวีลดีสก์ทรงกรวยกับฟลายวีลขอบหนา

ปัจจัย	ผลการจำลองฟลายวีล		ผลการจำลองเพลารองรับฟลายวีล	
	ฟลายวีลดีสก์ทรงกรวย	ฟลายวีลขอบหนา	ฟลายวีลดีสก์ทรงกรวย	ฟลายวีลขอบหนา
ความเค้น (เมกะปาสคาล)	28.39	15.47	56.7-198.7	46.4-180
ความเครียด	0.0000833	0.000047	0.00025-0.00066	0.000141-0.000377
ระยะการบิดงอ (มิลลิเมตร)	1.020-1.134	0.763-0.848	0.11	0.0848
ค่าความปลอดภัย	1.23	1.608	1.23	1.608



$$E \quad O_{10} \quad O_{11} \quad O_{12} \quad \times \quad O_{20} \quad O_{21} \quad O_{22}$$

$$C \quad O_{10} \quad O_{11} \quad O_{12} \quad - \quad O_{20} \quad O_{21} \quad O_{22}$$

รูปที่ 15 Multiple Time Series Design

3. ผลการทดลอง

3.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองจะแสดงถึง รูปแบบการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง หรือกระบวนการในการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต้น ตัวแปรควบคุม และตัวแปรตาม แบบแผนการทดลองมีด้วยกันหลายแบบ ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกแบบแผนการทดลองที่นำมาใช้ในครั้งนี้อยู่เป็นแบบ Multiple Time Series Design แสดงดังรูปที่ 15 [37] โดยเป็นการเก็บข้อมูลหลายครั้งในช่วงเวลาที่ต่างกันและมีกลุ่มควบคุม ในกระบวนการทดลอง แต่ไม่ได้กระทำใดๆ กับกลุ่มควบคุม สัญลักษณ์ที่ใช้ประกอบไปด้วย

- E หมายถึง กลุ่มทดลอง
- C หมายถึง กลุ่มควบคุม
- X หมายถึง การทดลองหรือการกระทำ
- O_1 หมายถึง การวัดผลก่อนการทดลอง
- O_2 หมายถึง การวัดผลหลังการทดลอง

3.2 กรอบแนวความคิดในการทำวิจัย

ในการออกแบบการทดลองผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ตัวแปรต้น
 - 1.1 ฟลายวีลขอบหนา
 - 1.2 ฟลายวีลดีส์ทรวงกรวย
- 2) ตัวแปรควบคุม
 - 2.1 อุณหภูมิห้องการทดลอง อยู่ที่ 25 °C
 - 2.2 ความเร็วมอเตอร์เริ่มต้น 1,500 รอบต่อนาที
 - 2.3 ชนิดของวัสดุ เป็นแบบ SS400 ทั้ง 2 รูปแบบ
- 3) ตัวแปรตาม
 - 3.1 เวลาการหมุนของฟลายวีล

3.2 ความเร็วรอบการหมุนของฟลายวีล

3.3 วิธีการทดสอบ

ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ เวลาในการหมุนของฟลายวีลและความเร็วรอบการหมุนของฟลายวีล ในการทดสอบผู้วิจัยได้ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง เพื่อยืนยันผลการทดลองจากการเก็บข้อมูลให้มีความแม่นยำมากขึ้นและหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ต่อไป หลังจากสิ้นสุดการทดลองในแต่ละครั้งจะมีการเปรียบเทียบค่าเครื่องมือวัดทุกครั้ง

การทดสอบเริ่มต้นจากการเปิดสวิทช์ไปตำแหน่ง ON ของมอเตอร์ จากนั้นจะเกิดการหมุนของมอเตอร์และส่งกำลังโดยตรงไปยังฟลายวีล จึงทำให้ฟลายวีลเกิดการหมุนตามความเร็วรอบของมอเตอร์และฟลายวีลจะส่งกำลังการหมุนไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อความเร็วรอบสูงสุดที่ 1,500 รอบต่อนาที ให้ทำการปิดสวิทช์ไปตำแหน่ง OFF ของมอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์หยุดการทำงาน ในขณะเดียวกันฟลายวีลก็ยังคงหมุนอยู่ด้วยแรงเฉื่อย ให้วัดค่าความเร็วรอบการหมุน โดยใช้เครื่องมือวัดแบบ Digital Tachometer RPM Speed และจับเวลาการหมุนตั้งแต่เริ่มต้นจนหยุดหมุนด้วย Timer และทำการจดบันทึกค่าผลต่างๆ ในช่วงที่มีการทดสอบ เพื่อนำมาประเมินผลที่ได้จากการทดลองต่อไป

3.4 ผลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างเวลาการหมุนกับความเร็วการหมุนของฟลายวีล ของฟลายวีลทั้ง 2 รูปทรง ปัจจัยด้านเวลาการหมุนพบว่า ฟลายวีลขอบหนามีเวลาการหมุนรวมเท่ากับ 120 วินาที และฟลายวีลดีส์ทรวงกรวยมีเวลาการหมุนรวมเท่ากับ 180 วินาที บทสรุปพบว่า ฟลายวีลดีส์ทรวงกรวยจะมีเวลาในการกักเก็บพลังงานได้นานกว่าฟลายวีลขอบหนาอยู่ที่ 60 วินาที ปัจจัยด้านความเร็วการหมุนพบว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ช่วงเวลาเดียวกัน ฟลายวีลดีส์ทรวงกรวยจะมีความเร็วสูงกว่าฟลายวีลขอบหนา ความเร็วที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ได้จริงจะมีความเร็วรอบตั้งแต่ 1,000–1,495 รอบต่อนาที



ตารางที่ 5 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบระหว่างเวลาการหมุนกับความเร็วกการหมุนของฟลายวีล ทั้ง 2 รูปทรง

ตารางผลการทดลอง												
เวลาการหมุน ของฟลายวีล (วินาที)	ความเร็วการหมุนของฟลายวีลขอบหนา (รอบต่อนาที)						ความเร็วการหมุนของฟลายวีลคัสท์ทรงกรวย (รอบต่อนาที)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย ความเร็ว	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย ความเร็ว
1	1,495	1,495	1,495	1,495	1,495	1,495	1,495	1,495	1,495	1,495	1,495	1,495
5	1,350	1,348	1,352	1,350	1,350	1,350	1,386	1,382	1,386	1,385	1,386	1,385
10	1,238	1,235	1,235	1,237	1,238	1,237	1,288	1,283	1,285	1,285	1,285	1,285
15	1,197	1,193	1,195	1,197	1,197	1,196	1,218	1,218	1,220	1,220	1,220	1,219
20	1,122	1,120	1,121	1,122	1,122	1,121	1,160	1,160	1,162	1,160	1,160	1,160
25	1,040	1,038	1,040	1,040	1,040	1,040	1,107	1,107	1,110	1,107	1,107	1,108
30	976	970	975	976	976	975	1,049	1,049	1,051	1,049	1,049	1,049
35	915	914	915	915	915	915	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
40	706	704	706	706	706	706	956	963	964	956	956	959
45	517	516	516	517	517	517	914	914	914	914	914	914
50	472	470	472	472	472	472	876	876	877	876	876	876
55	433	430	432	432	433	432	670	670	670	670	670	670
60	393	392	393	393	393	393	521	521	523	521	521	521
65	354	352	353	354	354	353	489	489	489	489	489	489
70	314	312	313	314	314	313	464	464	465	464	464	464
75	282	278	280	282	282	281	437	437	437	437	437	437
80	242	247	243	242	242	243	414	416	416	414	414	415
85	211	208	210	211	211	210	393	392	393	393	393	393
90	179	175	173	176	179	176	370	373	373	372	370	372
95	145	141	142	144	145	143	348	348	350	348	348	348
100	120	118	120	120	120	120	329	329	332	329	329	330
105	89	87	89	89	89	89	305	305	308	305	305	306
110	65	63	64	65	65	64	288	288	289	288	288	288
115	40	40	40	40	40	40	266	265	266	266	266	266
120	24	24	24	24	24	24	246	247	251	246	246	247
125	0	0	0	0	0	0	205	204	207	205	205	205
130	0	0	0	0	0	0	190	194	196	190	190	192
135	0	0	0	0	0	0	165	168	168	165	165	166
140	0	0	0	0	0	0	148	148	150	148	148	148
145	0	0	0	0	0	0	129	129	132	129	129	130
150	0	0	0	0	0	0	113	113	115	113	113	113
155	0	0	0	0	0	0	95	94	95	95	95	95
160	0	0	0	0	0	0	80	80	80	80	80	80
165	0	0	0	0	0	0	61	61	61	61	61	61
170	0	0	0	0	0	0	45	46	46	45	45	45
175	0	0	0	0	0	0	37	37	37	37	37	37
180	0	0	0	0	0	0	22	22	22	22	22	22
185	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



ตัวแปรที่ส่งผลให้ความเร็วการหมุนของฟลายวีลดิסקทรงกรวยมีเวลาที่นานกว่า ขึ้นอยู่กับปัจจัยรูปทรง : K ของฟลายวีล ที่มีผลกับความหนาแน่นพลังงาน และน้ำหนักของฟลายวีลที่มีผลกับแรงเฉื่อยในการหมุนของฟลายวีล

4. อภิปรายผลและสรุป

ผลจากการจำลองค่าความเค้นของฟลายวีลทั้ง 2 รูปแบบ และเพลารองรับฟลายวีลจะมีค่าที่ต่ำกว่าความสามารถในการทนต่อความเค้นแรงดึงสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ค่าความเครียดจะไม่มีแตกต่างกัน ค่าระยะการบิดงอสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบด้านบน ฟลายวีลดิस्कทรงกรวยมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 1.020–1.134 มิลลิเมตร และฟลายวีลขอบหอนามีค่าสูงสุดค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.763–0.848 มิลลิเมตร และค่าความปลอดภัยสำหรับฟลายวีลดิस्कทรงกรวยจะมีค่าเท่ากับ 1.23 และฟลายวีลขอบหอนามีค่าเท่ากับ 1.608

สรุปผลจากการทดลอง ปัจจัยที่ 1 ด้านความเร็วในการหมุนของฟลายวีล ฟลายวีลดิस्कทรงกรวยจะมีเวลาการหมุนเท่ากับ 180 วินาที สำหรับฟลายวีลขอบหอนามีเวลาการหมุนเท่ากับ 120 วินาที ซึ่งมีความต่างกันอยู่ที่ 60 วินาที

ปัจจัยที่ 2 ด้านความเร็วการหมุนของฟลายวีล เมื่อเปรียบเทียบในช่วงเวลาเดียวกัน ฟลายวีลดิस्कทรงกรวยจะมีความเร็วในการหมุนที่สูงกว่าฟลายวีลขอบหอนา

จากข้อมูลผลการทดลองทำให้ผู้วิจัยพบว่า ความเร็วที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ได้จริงที่ความเร็วรอบตั้งแต่ 1,000–1,495 รอบต่อนาที และผลของตัวแปรที่มีต่อความเร็วรอบลดของ ฟลายวีลดิस्कทั้ง 2 รูปทรง ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบ และความเร็วเชิงมุม จะส่งผลต่อพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้น ถ้าพลังงานจลน์มีค่าสูงๆ จะทำให้ความเร็วการหมุนได้นานขึ้น

สรุปผลจากการวิจัย การทำงานรูปแบบฟลายวีลดิस्कทรงกรวยจะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่ารูปแบบฟลายวีลขอบหอนา

ข้อเสนอแนะ ผู้วิจัยมีข้อเสนอในการพัฒนางานวิจัยเพิ่มเติม ดังนี้ 1) การพัฒนาฟลายวีลให้มีเวลาในการหมุนได้

นานขึ้นและมีการทำงานอย่างต่อเนื่อง และ 2) การพัฒนาประสิทธิภาพของระบบกักเก็บสะสมพลังงาน ให้สามารถนำพลังงานไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ministry of Energy in Thailand, 2020. [Online]. Available: <https://weben.dede.go.th/webmax/>
- [2] S. Koochi-Fayegh and M. A. Rosen, "A review of energy storage types applications and recent developments," *Journal of Energy Storage*, vol. 27, pp. 1–23, 2020.
- [3] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. E. Rhafiki, and Y. Zeraouli, "Energy storage: Applications and challenges," *Solar Energy Mater & Solar Cells*, vol. 120, pp. 59–80, 2014.
- [4] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015.
- [5] A. A. Khodadoost, H. Karami, G. B. Gharehpetian, and M. S. A. Hejazib, "Review of flywheel energy storage systems structures and applications in power systems and microgrids," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 9–18, 2017.
- [6] D. Christopher, and R. Beach, "Flywheel technology development program for aerospace applications," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 13, no. 6, pp. 9–14, 1998.



- [7] G. Cimuca, C. Saudemont, B. Robyns, and M. M. Radulescu, "Control and performance evaluation of a flywheel energy-storage system associated to a variable-speed wind generator," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1074–1085, 2006.
- [8] H. Zhao, Q. Wu, S. Hu, H. Xu, and C. N. Rasmussen, "Review of energy storage system for wind power integration support," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 545–553, 2015.
- [9] B. Bolund, H. Bernhoff, and M. Leijon, "Flywheel energy and power storage systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 2, pp. 235–258, 2007.
- [10] Y. Li, P. Ji, and J. Yang, "Development of energy storage industry in China : A technical and economic point of review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 805–812, 2015.
- [11] N. S. Pearre and L. G. Swan, "Technoeconomic feasibility of grid storage : mapping electrical services and energy storage technologies," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 501–510, 2015.
- [12] L. Jiang, W. Zhang, G. J. Ma, and C. W. Wu, "Shape optimization of energy storage flywheel rotor," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 55, no. 2, pp. 739–750, 2017.
- [13] P. C. Riccardella and W. H. Bamford, "Reactor coolant pump flywheel over speed evaluation," *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 96, no. 4, pp. 279–285, 1974.
- [14] M. Mahmoud, M. Ramadan, A. G. Olabi, K. Pullen, and S. Naher, "A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 210, pp. 1–14, 2020.
- [15] H. Liu and J. Jiang, "Flywheel energy storage an upswing technology for energy sustainability," *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 5, pp. 599–604, 2007.
- [16] A. Dhand and K. Pullen, "Review of flywheel based internal combustion engine hybrid vehicles," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 14, pp. 797–804, 2013.
- [17] V. Kale and M. Secanell, "A comparative study between optimal metal and composite rotors for flywheel energy storage systems," *Energy Reports*, vol. 4, pp. 576–585, 2018.
- [18] D. Gerada, A. Mebarki, N. L. Brown, C. Gerada, A. Cavnagnino, and A. Boglietti, "High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 6, pp. 2946–2959, 2014.
- [19] A. Cansiz, I. Yildizer, E. A. Oral, and Y. Kaya, "An effective noncontact torque mechanism and design considerations for an evershed-type superconducting magnetic bearing system," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 1, pp. 22–29, 2013.
- [20] S. Choudhury, "Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 9, pp. 1–26, 2021.
- [21] S. Bankston and C. Mo, "Geometry Modification of Flywheels and its Effect on Energy Storage," *Energy Research Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 54–63, 2015.
- [22] G. Genta, *Kinetic Energy Storage: Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems*,



- 1st ed. Butterworths, London, 1985, pp. 362.
- [23] M. A. Arslan, "Flywheel geometry design for improved energy storage using finite element analysis," *Material and Design*, vol. 29, no. 2, pp. 514–518, 2008.
- [24] A. G. Olabi, T. Wilberforce, M. A. Abdelkareem, and M. Ramadan, "Critical review of flywheel energy storage system," *Energies*, vol. 14, no. 8, pp. 1–23, 2021.
- [25] R. Hebner, J. Beno, and A. Walls, "Flywheel batteries come around again," *IEEE Spectrum*, vol. 39, no. 4, pp. 46–51, 2002.
- [26] G. G. Sotelo, R. D. Andrade, and A. C. Ferreira, "Magnetic bearing sets for a flywheel system," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, pp. 2150–2153, 2007.
- [27] F. N. Werfel, U. Floegel-Delor, R. Rothfeld, T. Riedel, B. Goebel, D. Wippich, and P. Schirmeister, "Superconductor bearings, flywheels and transportation," *Superconductor Science and Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 1–17, 2012.
- [28] M. Ren, Y. Shen, Z. Li, and K. Nonami, "Modeling and control of a flywheel energy storage system using active magnetic bearing for vehicle," in *International Conference on Information Engineering and Computer Science*, 2009, pp. 1–5.
- [29] G. S. Mousavi, F. Faraji, A. Majazi, and K. Al-Haddad, "A comprehensive review of flywheel energy storage system technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 477–490, 2017.
- [30] B. Warberger, R. Kaelin, T. Nussbaumer, and J. W. Kolar, "50-N_m/2500-W bearing less motor for High-Purity Pharmaceutical Mixing," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 5, pp. 2236–2247, 2012.
- [31] L. Chen and W. Hofmann, "Speed regulation technique of one bearing less 8/6 switched reluctance motor with simpler single winding structure," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 6, pp. 2592–2600, 2012.
- [32] Luoyang Huigong Bearing Technology Co., Ltd. (2014). *Double-direction thrust ball bearings*. [Online]. Available: <https://www.lyhgbearing.com/thrust-ball-bearings/angular-contact-thrust-ball-bearings.html>
- [33] Qualitybearings. (2010). *Bearing Load Type*. [Online]. Available: <https://qualitybearings.wordpress.com/2010/08/31/bearing-load-type>
- [34] Y. Hana, Z. Ren, and Y. Tong, "General design method of flywheel rotor for energy storage system," *Energy Procedia*, vol. 16, pp. 359–364, 2012.
- [35] B. Yue, G. Qingjia, L. Haiwen, W. Yihui, and X. Ming, "Design of composite flywheel rotor," *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, vol. 3, no. 3, pp. 288–292, 2008.
- [36] A. C. Ugural and S. K. Fenster, *Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity*. 1st ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2011, pp. 680.
- [37] H. P. Phan and B. H. Ngu, "Undertaking experiments in social sciences: Sequential, multiple time series designs for consideration," *Educational Psychology Review*, vol. 29, no. 4, 2016.