

การพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงสำหรับสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงกดกระดาษ Development of force control equipment for paper crush testers calibration

สุรวุฒิ พวงมาลี^{1*}

Surawut Puangmalee^{1*}

บทคัดย่อ

คุณสมบัติเชิงกลของบรรจุภัณฑ์กระดาษเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่บ่งชี้ศักยภาพในการใช้งาน ซึ่งในการทดสอบที่แม่นยำและเชื่อถือได้ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจำเป็นต้องมีการสอบเทียบเครื่องมือวัดเพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องมือวัดสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการสอบเทียบหลาย ๆ ครั้งยังแสดงให้เห็นคุณลักษณะทางด้านความเสถียรของเครื่องมือวัดอีกด้วย ความต้านทานแรงกดวงแหวน เป็นความสามารถต้านทานแรงกดของกระดาษเหนียวและกระดาษทำลอนตามมาตรฐาน TAPPI 818 [1] ISO 12192 [2] และ มอก.321 [3] โดยอุปกรณ์สอบเทียบหลักประกอบด้วย โหลดเซลล์ และจอแสดงผลแบบดิจิทัล ในการสอบเทียบเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน ผู้ทดสอบต้องปรับควบคุมแรงที่กดด้วยตนเอง แรงดังกล่าวจำเป็นต้องปรับแรงให้ได้เท่ากับค่าที่มาตรฐานระบุไว้ ซึ่งใช้แรงและเวลาในการปรับควบคุมมากทำให้มีความคลาดเคลื่อนสูง ความเที่ยงตรงในการปรับควบคุมแรงต่ำ ทั้งหมดนี้ทำให้ผลการสอบเทียบคลาดเคลื่อน

งานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมแรงที่คิดในงานสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงกดวงแหวน โดยประยุกต์หลักการทดแรงของเฟือง ผลการวิจัยพบว่า เมื่อใช้อุปกรณ์ต้นแบบนี้ช่วยในการสอบเทียบทำให้สามารถควบคุมแรงกดได้เสถียรมากกว่า ใช้เวลาในการปรับควบคุมแรงลดลงมา 20-25% จากเดิม ค่าเฉลี่ยจากการสอบเทียบภายหลังใช้อุปกรณ์ต้นแบบเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากขึ้น 2-8 นิวตัน และความไม่แน่นอนของการวัดมีค่าน้อยลงในช่วง 10.4-37.5% เมื่อเปรียบเทียบ repeatability และ reproducibility ดีขึ้น 19% และ 48% ตามลำดับ นอกจากนี้อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถควบคุมแรงด้วยอัตราการหมุนและมีการเคลื่อนที่ด้วย Guide way linear ทำให้ได้ค่าแรงที่มีความเที่ยงตรงมากขึ้น

Abstract

Mechanical properties of paper packaging are one of the indicators for the capabilities of the final products. According to the consistency, accuracy, and effectiveness of the testing equipment, it needs to be calibrated with the standard calibration equipment to ensure that the testing equipment could be worked properly and efficiency. In addition, the repetitiveness of the calibration also indicates the stability of the testing equipment. The ring crush tester is used to determine the ring crush resistance of a paper strip formed into a ring with a standardized length and width. This test is performed corresponding to TAPPI 818, ISO 12192 and TISI 321 standard. The main calibration equipment are load cell and monitor, which the calibrated person needs to adjust the force of the load cell himself which the value of the adjusted force needs to be exactly equal to the given standard. As a consequence of this adjustment, too much time of adjustment is taken, and the force of the load cell is not accurate, imprecise and various, leading to the inaccurate calibration.

In this work, the add-on equipment for controlling the force adjustment of the load cell is developed using the gearing ratio and the motor. The results show the increase of stability of the force adjustment, in other words, the adjusted force is 2-8 newtons closer to the given standard, 20-25% of lower adjusted

¹ กรมวิทยาศาสตร์บริการ

* e-mail address : surawut@dss.go.th

time taken, and 10.4-37.5% lower of uncertainty. The repeatability and reproducibility also 19% and 48% improved, respectively. Furthermore, this add-on equipment is controlled by rotational rate and the linear guide way, which leads to the higher precision and accuracy.

คำสำคัญ : เครื่องวัดแรงกดวงแหวน สอบเทียบแรงกด โหลดเซลล์

Keywords : Ring crush tester machine,

Compression calibration, Load cell

1. บทนำ (Introduction)

การผลิตกระดาษและบรรจุภัณฑ์กระดาษ จำเป็นต้องควบคุมสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มีคุณสมบัติต่าง ๆ ตามมาตรฐาน โดยคุณสมบัติที่สำคัญ ประกอบด้วย

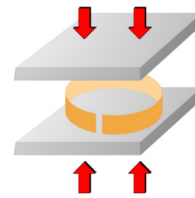
1. คุณสมบัติทางโครงสร้าง (Structural Properties) เป็นตัวบ่งชี้ถึงการจัดเรียงตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเนื้อกระดาษ โดยเฉพาะเส้นใย ซึ่งได้แก่ การกระจายตัวของเส้นใย ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย

2. คุณสมบัติด้านทัศนศาสตร์ (Optical properties) หมายถึง สมบัติทางแสงของกระดาษที่ปรากฏแก่สายตาโดยเกิดจากสัมพัทธ์กิริยาระหว่างแสงกับกระดาษ

3. คุณสมบัติทางเชิงกล (Mechanical Properties) เป็นตัวบ่งชี้ถึงศักยภาพในการใช้งานของกระดาษซึ่งหมายถึง การที่กระดาษมีความทนทานต่อการใช้งาน (durability) และความสามารถในการต้านทานแรงที่มากระทำในลักษณะต่าง ๆ เช่น แรงดึง แรงเฉือน แรงบิดและแรงที่ทำให้กระดาษโค้งงอ ซึ่งแรงเหล่านี้เกิดขึ้นในขั้นตอนต่าง ๆ ตั้งแต่การผลิต การแปรรูป จนถึงการใช้งานกระดาษจะตอบสนองแรงที่มากระทำเหล่านี้ได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของกระดาษ โดยสามารถวัดออกมาได้ในรูปของสมบัติเชิงกลได้ ดังนั้นในการเลือกกระดาษเพื่อนำไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงสมบัติทางเชิงกลของกระดาษด้วย ซึ่งกระดาษสำหรับนำไปผลิตบรรจุภัณฑ์หรือกล่องกระดาษ มีค่าแรงกดที่ควรนำมาพิจารณา ดังต่อไปนี้ [4]

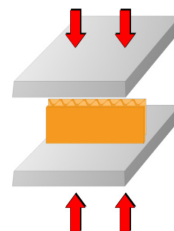
1) ความต้านทานแรงกดวงแหวน (Ring crush resistance) เป็นความสามารถของกระดาษความยาวคงที่นำมาโค้งงอเป็นวงแหวน เพื่อที่จะต้านแรงกด มีหน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) ค่าความต้านแรงกดวงแหวนของกระดาษในแนวขวางเครื่องจะมีความสัมพันธ์กับความต้านแรง

กด หรือความแข็งแรงในการเรียงซ้อนของกล่องกระดาษ โดยลักษณะการทดสอบและทิศทางแรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 1



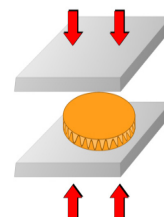
รูปที่ 1 : การทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน

2) ความต้านทานแรงกดลอนในแนวตั้ง (Edge crush resistance) เป็นความสามารถของแผ่นกระดาษลูกฟูกรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่จะต้านแรงกดเมื่อกระทำในทิศทางเดียวกับแนวตั้งของลอนลูกฟูกจนกระทั่งแผ่นลูกฟูกหักหรือยุบตัวลง มีหน่วยเป็น กิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) การทดสอบนี้บอกถึงความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูก ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งแรงในการเรียงซ้อนของกล่องกระดาษลูกฟูกหรือค่าการรับแรงกดกล่อง โดยลักษณะการทดสอบและทิศทางแรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 : การทดสอบความต้านทานแรงกดลอนในแนวตั้ง

3) ความต้านทานแรงกดลอนในแนวนอน (Flat crush resistance) เป็นความสามารถของลอนในแผ่นกระดาษที่ต้านทานแรงกดลงบนลอน ในแนวราบจนลอนเสียรูป มีหน่วยเป็น กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร (kgf/cm²) ความสัมพันธ์กับความสามารถในการรับน้ำหนักกดทับและการป้องกันการกระแทกโดยใช้เครื่องมือ โดยลักษณะของการทดสอบและทิศทางแรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบแสดงได้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 : ความต้านทานแรงกดลอนในแนวนอน (Flat Crush)

เนื่องจากเครื่องมือทดสอบจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำและเชื่อถือได้ของข้อมูลค่าผลทดสอบ จึงจำเป็นต้องดำเนินการให้แน่ใจว่าเครื่องมือทดสอบสามารถให้ผลการวัดที่แม่นยำตามความต้องการ การสอบเทียบเครื่องมือวัด (Calibration) [4] เป็นกิจกรรมที่จำเป็นสำหรับการทำให้แน่ใจว่าเครื่องมือวัดที่ใช้งานยังสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำตามที่ต้องการ ซึ่งผลจากการสอบเทียบเมื่อนำมาวิเคราะห์ จะทำให้สามารถกำหนดได้ว่าเครื่องมือวัดควรจะใช้ต่อไปหรือจำเป็นต้องปรับแต่งผลจากการสอบเทียบ ทำให้มั่นใจได้ว่าเครื่องมือทดสอบยังคงทำงานได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ และผลการสอบเทียบหลาย ๆ ครั้งยังแสดงให้เห็นคุณลักษณะทางด้านความเสถียร (Stability) ของเครื่องมือวัดได้อีกด้วย

ซึ่งสำหรับเครื่องทดสอบแรงกดในกระดาศ ตามมาตรฐาน ISO 12192 ข้อที่ 4.3 เครื่องทดสอบแรงกดแบบใช้แผ่นเพลทผ่านมอเตอร์ขับเคลื่อน การสอบเทียบให้เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 13820 [5] โดยส่วนที่สำคัญ คือ การวัดค่าความต้านแรงกดหรือค่าแรงกด เพื่อตรวจสอบว่าโหลดเซลล์ (Load Cell) ของเครื่องทดสอบมีความถูกต้องสามารถใช้งานได้ปกติ โดยเทียบกับค่าโหลดเซลล์มาตรฐานที่กำหนดว่า ค่าที่อ่านจากเครื่องทดสอบกับค่าที่อ่านค่าการสอบเทียบตรงกันหรือไม่ โดยอุปกรณ์สอบเทียบหลัก ประกอบด้วย

1) ตัวรับค่าแรงหรือโหลดเซลล์ (Load Cell) [6] เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนจากแรงที่กระทำต่อโหลดเซลล์เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แสดงค่าที่จอแสดงผล (Display) โดยแสดงค่าเป็นแรง (N) มีหลากหลายรูปแบบขึ้นกับแรงที่ใช้ทดสอบและขนาดของเครื่องมือที่สอบเทียบ

2) จอแสดงผลแบบดิจิทัล (มาตรวัดแรงกด) รับค่าแรงแปลงสัญญาณ แสดงผลค่าตัวเลขการสอบเทียบด้วยมาตรวัดแรงกดและโหลดเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 : การสอบเทียบเครื่องวัดแรงกดวงแหวน

ข้อสังเกตที่เป็นประเด็นสำคัญ ในการสอบเทียบแรงกดในเครื่องทดสอบกระดาศ ดังต่อไปนี้

1. เครื่องทดสอบที่ทำการการสอบเทียบมีความเปลี่ยนแปลงรุ่นใหม่ ๆ เสมอ ทำให้เกิดความหลากหลายของเครื่องทดสอบ เช่น ขนาด มิติ ทิศทางการทดสอบ อัตราเร็วการทดสอบ
2. ช่วงค่าแรงที่เป็นมาตรฐานจากมาตรวัดแรงกดและโหลดเซลล์ที่มีค่าคงที่เฉพาะ ทำให้การสอบเทียบกับเครื่องทดสอบต้องออกแรงให้ได้เท่ากับค่าที่ระบุไว้ ทำให้เกิดการออกแรงกลับไปกลับมาเพื่อให้ถึงค่ารวมทั้งใช้เวลาในการปรับมากเกินไป
3. ความขนานและความเรียบระหว่างเครื่องทดสอบกับโหลดเซลล์เครื่องสอบเทียบ ในบางตำแหน่งจะสัมผัสก่อนแทนที่เป็นทั้งระนาบสัมผัสกันทำให้ค่าคลาดเคลื่อน

4. ความนิ่ง ความละเอียดของค่าที่สอบเทียบมีความอ่อนไหว (Sensibility) มากเกินไป เบื้องต้นมีการพยายามเก็บเป็นไฟล์ภาพหรือวิดีโอเพื่อจับภาพเปรียบเทียบ แต่พบว่ายังแก้ไขได้ไม่ดีเท่าที่ควรซึ่งทำให้การบันทึกค่าขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของผู้สอบเทียบ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาเทคโนโลยีนวัตกรรมเพื่อใช้สำหรับปรับควบคุมแรงที่กดในงานสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงกดของกระดาศ เพื่อให้การสอบเทียบสามารถอ่านและวัดค่าแรงกดได้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีด้านตัวควบคุมแรง การทดแรงของเฟือง ระบบเชื่อมต่อ ระบบควบคุมความเรียบขนาน เป็นประโยชน์สำหรับการนำไปใช้เพื่อควบคุมคุณภาพการสอบเทียบเครื่องทดสอบด้านแรงกดต่อสินค้าและผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรมกระดาศ ที่ต้องการผลการวัดที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูง เพื่อการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตสินค้าให้เป็นไปตามมาตรฐานมากยิ่งขึ้น

2. วิธีการวิจัย (Experimental methods)

2.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย ผู้วิจัยได้กำหนดกลุ่มตัวอย่างในการวิจัย ดังนี้

2.1.1 เครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน จำนวน 5 เครื่อง จากกลุ่มภาคอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาศ ลูกฟูก 3 ห้องปฏิบัติการ

2.1.2 ผู้เชี่ยวชาญที่จะประเมินคุณภาพของเครื่องมือที่ออกแบบ โดยผู้วิจัยเลือกผู้เชี่ยวชาญจากผู้ปฏิบัติการสอบเทียบด้านเครื่องทดสอบกระดาศแบบเจาะจง จำนวน 4 คน

2.2 เครื่องที่ใช้ในการวิจัย หรือเครื่องมือที่ใช้ในการสอบเทียบ

2.2.1 เครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน/ลอนลูกฟูก (Crush tester machine) แบบโหลดเซลล์กดจากด้านบนลงล่าง ดังแสดงในรูปที่ 5 จากข้อมูลเครื่องมือมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $\pm 1\%$ ความจำแนกชัด 1 นิวตัน ช่วงการใช้งาน 0 - 2,000 นิวตัน



รูปที่ 5 : ตัวอย่างเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน/ลอนลูกฟูกของกระดาศ

2.2.2 มาตราวัดแรงกดพร้อมโหลดเซลล์ โดยมีรายงานการสอบเทียบหมายเลขปฏิบัติการ L62/08089.1 จากกองความสามารถห้องปฏิบัติการและรับรองผลิตภัณฑ์ (สผ.) เบื้องต้น ช่วงการวัด 0-2,000 นิวตัน ดังนี้

ค่าแรงระบุ 489.15 นิวตัน	ค่าความผิดพลาด 1.45 นิวตัน	ค่าความไม่แน่นอน 0.73 นิวตัน
ค่าแรงระบุ 978.30 นิวตัน	ค่าความผิดพลาด 3.62 นิวตัน	ค่าความไม่แน่นอน 1.37 นิวตัน
ค่าแรงระบุ 1,467.45 นิวตัน	ค่าความผิดพลาด 5.72 นิวตัน	ค่าความไม่แน่นอน 1.90 นิวตัน
ค่าแรงระบุ 1,956.60 นิวตัน	ค่าความผิดพลาด 7.63 นิวตัน	ค่าความไม่แน่นอน 2.74 นิวตัน

2.2.3 ชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ร่วมในการสอบเทียบ เช่น ประแจไขหกเหลี่ยม อุปกรณ์ควบคุมแรง เป็นต้น เนื่องจากมีขนาดเครื่องมือที่เหมาะสม สามารถบังคับแรงควบคุมการกดโดยผู้ใช้งานได้ โดยสิ่งที่ต้องคำนึงสำหรับการสอบเทียบเครื่องทดสอบมีดังต่อไปนี้

- การปรับควบคุมแรงกดในงานสอบเทียบเครื่องทดสอบให้ช้าลงเพื่อความแม่นยำมากขึ้น แนวทางแก้ปัญหา คือ อุปกรณ์ช่วยควบคุมแรง
- ความเสถียรและความละเอียดของค่าจากเครื่องมือทดสอบกับเครื่องมือสอบเทียบมีความอ่อนไหว แนวทางแก้ปัญหา คือ อุปกรณ์ช่วยควบคุมแรง

มีข้อมูลเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน/ลอนลูกฟูก ดังต่อไปนี้

ลักษณะแรงที่กระทำ	กดจากบนลงล่าง
ช่วงการวัด (Measurement range)	(50-5,000) นิวตัน
ระยะกดหรือช่วงชัก (Stroke length)	76 มิลลิเมตร
ความเร็วการเปลี่ยนรูป (Deformation speed)	(1-50) มิลลิเมตร/นาที
ความเร็วเคลื่อนที่กลับ (Return speed)	60 มิลลิเมตร/นาที
ขนาดแผ่นเพลท	125 × 125 มิลลิเมตร

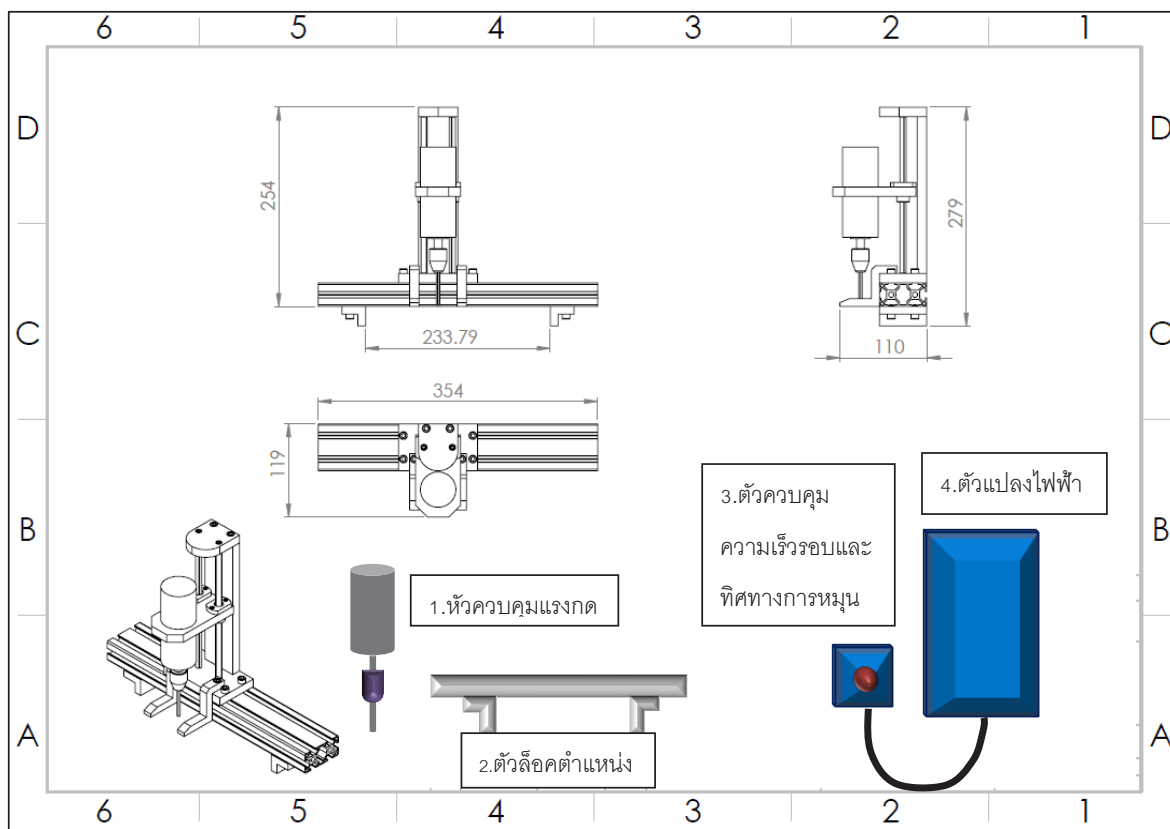
2.3 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบแรงกดของกระดาด

2.3.1 การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบแรงกดของกระดาด แนวทางในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบแรงกดของกระดาด ประกอบด้วย ตัวควบคุมแรง ความเร็วรอบในการหมุน ทิศทางการหมุน แกนรางเลื่อนและระบบล้อคตำแหน่ง โดยทำงานร่วมกับบุคลากรจากกลุ่มนวัตกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ (นอ.) ทั้งนี้สามารถกำหนดขอบเขตเงื่อนไข คือ ไม่ใช้แรงคนในการควบคุมและสามารถปรับแรงได้ ช่วยลดแรงและเวลาในการทำงาน โดยมีตัวแปรสำคัญดังต่อไปนี้

- ค่าแรงสูงสุดที่ต้องปรับได้ (F_{max}) 5,000 นิวตัน (509.8 กิโลกรัมแรง)
- ต้องการความเร็วรอบที่หมุนน้อยเพื่อควบคุมค่าที่กำหนดได้และสามารถอ่านค่าแม่นยำขึ้น (RPM_{min} 1 รอบต่อนาที)
- ระยะหมุนที่ต้องการจากเดิมความยาวประแจเบอร์ 5 ที่ใช้ คือ 0.08 เมตร เป็นขนาดหัวประแจเบอร์ 5 คือ 0.003 เมตร

จากสูตร	Power (W)	= Torque (N.m) × Speed (RPM) / 9.55 [7]
จากการทำงานจริงได้	Power (W)	= 5000*0.08 × 1 /9.55 = 41.9 W
งานที่ต้องการ	41.9 W	= 5000*0.003 × RPM/9.55
	Speed	= 41.9*9.55/(5000*0.003) = 26.4 RPM

ดังนั้น อัตราทดรอบที่ควรได้น้อยคือ 26.4 : 1 แต่เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้และความเหมาะสมของเครื่องมือ จึงเห็นควรใช้อัตราทดรอบที่สูง คือ 500 : 1 (3000 RPM : 5 RPM) และได้แบบจัดทำอุปกรณ์และข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 : แบบและข้อมูลอุปกรณ์ที่ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบกระดาศ

2.3.2 จัดหาและสร้างอุปกรณ์ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบกระดาศ ภายหลังได้แบบจัดทำอุปกรณ์แล้ว ทำการคัดเลือกวัสดุส่วนประกอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) หัวควบคุมแรงกด ส่วนประแจที่ใช้หมุนวัสดุเป็นเหล็กกล้าวานาเดียมโครเมียม (cr-v) เพราะความต้านทานการกัดกร่อนสูง ไม่เป็นสนิม ความต้านทานแรงดึงสูงเป็นพิเศษเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ๆ

2) แกนรางเลื่อนและตัวลีดตำแหน่งใช้วัสดุเป็นอะลูมิเนียมเพราะมีความแข็งแรง สามารถใช้งานทดแทนเหล็กได้เป็นอย่างดี ไม่เป็นสนิม ทนความชื้นได้ มีน้ำหนักเบา ทนความร้อนได้ดี คงรูปไม่เกิดการบิดงอ

3) ตัวควบคุมแรง ความเร็วรอบในการหมุนและทิศทางการหมุน รวมทั้งกล่องแปลงไฟจากกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง (220 V เป็น 12 V) ใช้วัสดุเป็นกล่องพลาสติก เพราะ น้ำหนักเบาไม่นำความร้อน ไม่นำไฟฟ้า มีความเหนียว

2.3.3 ทดลองใช้งานเบื้องต้น ภายหลังสร้างอุปกรณ์เสร็จสิ้นแล้ว ทดลองใช้งานด้านความเร็วรอบ ทิศทางการหมุน เวลาในการใช้งาน กำลังไฟที่ใช้ได้

2.3.4 ทดลองสอบเทียบเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน/ลอนลูกฟูก โดยเปรียบเทียบระหว่างการสอบเทียบปกติและการสอบเทียบโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้น จากค่าแรงที่ระบุเทียบกับค่าที่ได้จากกปฏิบัติให้สอดคล้องกับมาตรฐาน ISO 12192 ที่ระบุว่า ค่าแรงจากเครื่องทดสอบมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1% โดยใช้ค่าสถิติ ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และความไม่แน่นอน และเวลาการสอบเทียบตั้งแต่ค่าแรงระบุแรกจนถึงค่าสุดท้าย

2.4 การประเมินคุณภาพของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้กำหนดผู้เชี่ยวชาญจากผู้ปฏิบัติการสอบเทียบด้านเครื่องทดสอบกระดาษ จำนวน 4 คน มีขั้นตอนดังนี้

2.4.1 จัดทำแบบฟอร์มการประเมินหาคุณภาพของอุปกรณ์ จากการหาค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับจุดประสงค์ (Item-Objective Congruence Index : IOC) [8] แบ่งออกเป็น 2 ด้าน 1) ด้านการออกแบบและสร้างเครื่อง 2) ด้านการใช้งานเครื่อง

2.4.2 สาคิตการทำงานและการสอบเทียบด้วยอุปกรณ์ช่วยควบคุมแรงที่สร้างขึ้น

2.4.3 นำผลที่ได้จากการประเมินคุณภาพเครื่องโดยผู้เชี่ยวชาญ มาหาค่าทางสถิติ ตามสูตรที่ 1 ดังนี้

$$\text{สูตร IOC} = \frac{\Sigma R}{N} \quad (1)$$

เมื่อ IOC คือ ค่าดัชนีสอดคล้องตามสมมติฐานของการวิจัย

ΣR คือ ค่าผลรวมของคะแนนจากผู้เชี่ยวชาญ

N คือ จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

กำหนดคะแนนความคิดเห็นมีไว้ ดังนี้

+1 หมายถึง แนใจว่าจุดประเมินวัดได้ตรงตามที่ระบุไว้จริง

0 หมายถึง ไม่แนใจว่าจุดประเมินวัดได้ตรงตามที่ระบุไว้จริง

-1 หมายถึง แนใจว่าจุดประเมินไม่ได้วัด

ได้ตรงตามที่ระบุไว้จริง

เกณฑ์การแปลความหมาย ค่าดัชนีความสอดคล้องที่ยอมรับได้ต้องมีค่าตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไป

2.5 วิธีสอบเทียบ (In-House Method based on ISO 13820: 2014 ฝ่ายสอบเทียบ กลุ่มเส้นใยธรรมชาติจัดทำขึ้น)

ในการสอบเทียบเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน ควรตรวจสอบปัจจัยเหล่านี้ก่อนทำการสอบเทียบเครื่องทดสอบ

2.5.1 การเตรียมความพร้อมของสภาพพื้นที่ตั้งของเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน

2.5.1.1 ตรวจสอบแท่นวางเครื่อง ต้องมั่นคง แข็งแรงผิวเรียบเสมอกัน

2.5.1.2 มีแสงสว่างมากพอในการสอบเทียบ

2.5.2 การเตรียมความพร้อมของเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน

2.5.2.1 ตรวจสอบสภาพทั่วไป เช่น ตรวจสอบ

ความสะอาดและฝุ่นละออง เป็นต้น

2.5.2.2 ตรวจสอบระบบไฟฟ้า

2.5.2.3 ตรวจสอบสภาพชุดอ่านค่า

2.5.2.4 ตรวจสอบอุปกรณ์ควบคุม

2.5.2.5 ตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์/สายพาน

2.5.2.6 ตรวจสอบระบบ safety

2.5.3 การเตรียมความพร้อมของมาตรวัดแรงกดพร้อมโหลดเซลล์และชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ วางไว้ในห้องปฏิบัติการ ใกล้กับเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ก่อนดำเนินการสอบเทียบ ดูแลรักษาเรื่องความสะอาดและครบสกปรก เพื่อไม่ให้ส่งผลต่อการใช้งาน

2.5.4 สภาวะการสอบเทียบอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 187:1990

อุณหภูมิ (27 ± 1) องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ (65 ± 2)

เมื่อพบว่า การดำเนินการมีความพร้อมเป็นไปตามปกติ ผ่านข้อ 2.5.1 - 2.5.4 ให้ดำเนินการสอบเทียบต่อไป แต่ถ้าสภาวะการสอบเทียบไม่เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดก็ให้หยุดการสอบเทียบรอจนกว่าห้องทดสอบจะมีสภาวะเป็นไปตามมาตรฐานจึงดำเนินการสอบเทียบ

2.5.5 เปิดเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวนเพื่อทำการอุ่นเครื่อง (warm up) เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที

2.5.6 ทำ pre load ความต้านแรงกดวงแหวนโดยใช้ตามค่าความสามารถสูงสุดของแรงที่รับได้ (2,000 นิวตัน)

2.5.6.1 ติดตั้งมาตรวัดแรงกดพร้อมโหลดเซลล์เข้ากับเครื่องทดสอบ

2.5.6.2 ปรับการอ่านค่าของเครื่องทดสอบเป็นศูนย์

2.5.6.3 ใช้ประแจหกเหลี่ยมไขหรือใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงหมุนช่องปรับแรงบนตัวเครื่องทดสอบจนมาตรวัดแรงกดมีค่า 2,000 นิวตัน ทั้งนี้เป็นเวลาประมาณ 5-10 วินาที

2.5.6.4 คลายการหมุนปรับแรงออกจากเครื่องทดสอบ จนการอ่านค่าของเครื่องเป็นศูนย์

2.5.6.5 ดำเนินการตามข้อ 2.5.6.3 ถึง 2.5.6.4 จนครบ 3 รอบ

2.5.7 สอบเทียบเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน

2.5.7.1 ปรับการอ่านค่าของเครื่องทดสอบให้เป็นศูนย์

2.5.7.2 ใช้ประแจหกเหลี่ยมไขหรือใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงหมุนช่องปรับแรงบนตัวเครื่องทดสอบจนมาตรวัดแรงกดมีค่า 487.7 นิวตัน ตามรูปที่ 7 อ่านค่าและบันทึกค่าเครื่องทดสอบให้ลงในแบบบันทึกข้อมูลการสอบเทียบ

2.5.7.3 คลายการหมุนปรับแรงออกจากเครื่องทดสอบ จนการอ่านค่าของเครื่องเป็นศูนย์

2.5.7.4 ใช้ประแจหกเหลี่ยมไขหรือใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงหมุนช่องปรับแรงบนตัวเครื่องทดสอบจนมาตรวัดแรงกดมีค่า 974.7 นิวตัน อ่านค่าและบันทึกค่าเครื่องทดสอบให้ลงในแบบบันทึกข้อมูลการสอบเทียบ

2.5.7.5 คลายการหมุนปรับแรงออกจากเครื่องทดสอบ จนการอ่านค่าของเครื่องเป็นศูนย์

2.5.7.6 ใช้ประแจหกเหลี่ยมไขหรือใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงหมุนช่องปรับแรงบนตัวเครื่องทดสอบจนมาตรวัดแรงกดมีค่า 1,461.7 นิวตัน อ่านค่าและบันทึกค่าเครื่องทดสอบให้ลงในแบบบันทึกข้อมูลการสอบเทียบ

2.5.7.7 คลายการหมุนปรับแรงออกจากเครื่องทดสอบ จนการอ่านค่าของเครื่องเป็นศูนย์

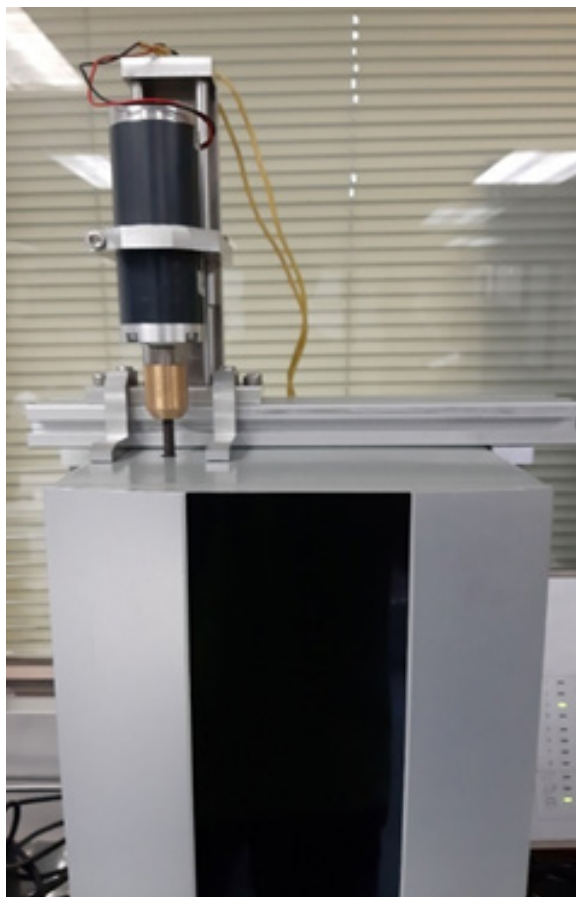
2.5.7.8 ใช้ประแจหกเหลี่ยมไขหรือใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงหมุนช่องปรับแรงบนตัวเครื่องทดสอบจนมาตรวัดแรงกดมีค่า 1,949 นิวตัน อ่านค่าและบันทึกค่าเครื่องทดสอบให้ลงในแบบบันทึกข้อมูลการสอบเทียบ

2.5.7.9 คลายการหมุนปรับแรงออกจากเครื่องทดสอบ จนการอ่านค่าของเครื่องเป็นศูนย์

2.5.7.10 ดำเนินการตามข้อ 2.5.7.2 ถึง 2.5.7.9 จนครบ 8 รอบ

2.5.7.11 นำค่าที่บันทึกในแบบบันทึกค่าของแต่ละระดับคำนวณหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าแก้ ค่าความไม่แน่นอนขยายในการวัดตาม M3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Mea-

surement: Edition 4 October 2019 [9] และความสามารถในการทำซ้ำได้ (Precision) โดยพิจารณาผ่านความผันแปรภายในกลุ่ม (Repeatability) และ ความผันแปรระหว่างกลุ่ม (Reproducibility) ตาม Range & Average Method [10]



รูปที่ 7 : การใช้อุปกรณ์ควบคุมแรงหมุนช่องปรับแรงบนตัวเครื่องทดสอบ

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 ผลการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบแรงกดของกระดาศ แบ่งเป็นส่วนต่าง ๆ 4 ส่วน ดังนี้

- 1) หัวควบคุมแรงกด
- 2) ตัวล็อคตำแหน่ง
- 3) ตัวปรับความเร็วรอบและทิศทาง
- 4) ตัวแปลงไฟ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 : อุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดต่อเครื่องทดสอบกระดาษ

โดยทั้ง 4 ส่วนทำงานรวมกันทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์เป็นดังนี้

- | | | |
|--------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 1) ใช้งานด้านความเร็วรอบ | 0 - 5 รอบ/นาที | (เป็นไปตามที่ออกแบบไว้) |
| 2) ทิศทางการหมุน | ตามเข็มนาฬิกา , ทวนเข็มนาฬิกา | (เป็นไปตามที่ออกแบบไว้) |
| 3) เวลาในการใช้งาน | มากกว่า 240 นาที | (มากกว่าเวลาที่ใช้สอบเทียบจริง) |
| 4) กำลังไฟที่ใช้ได้ | 220 V แปลงเป็น 12 V | (เป็นไปตามที่ออกแบบไว้) |

ข้อดีของอุปกรณ์ช่วยควบคุมแรงที่กด

1. สามารถควบคุมแรงที่กดด้วยการควบคุมอัตราการหมุนและทิศทางการหมุน (ทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกา) ได้
2. เคลื่อนที่ด้วย Guide way linear ทำให้ได้แรงที่ดีที่สุด มีความเที่ยงตรง รวมศูนย์กลางเครื่องมือทดสอบ
3. มีตัวลีดตำแหน่งอุปกรณ์ช่วยควบคุมแรงที่กดกับเครื่องทดสอบโดยเลื่อนตำแหน่งรองรับขนาดที่แตกต่างกัน

โดยแสดงการติดตั้งเบื้องต้นในการสอบเทียบอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดเข้ากับเครื่องทดสอบกระดาษ

และมาตรวัดแรงกดพร้อมโหลดเซลล์ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 : การติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรงที่กดเข้ากับเครื่องทดสอบกระดาษ

3.2 ผลการทดลองใช้อุปกรณ์สอบเทียบโดยผู้วิจัยและทดสอบประสิทธิภาพ

3.2.1 ค่าแรงจากการสอบเทียบเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวนแบบกดจากบนลงล่าง ทั้งหมด 5 เครื่องโดยทำการสอบเทียบในช่วงการใช้งาน 0 นิวตัน-2,000 นิวตัน จำนวนค่าแรงระบุ (X_i) 4 จุด ได้แก่ 487.7, 974.7, 1,461.7 และ 1,949.0 นิวตัน เปรียบเทียบระหว่างการสอบเทียบปกติและการสอบเทียบโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้นแสดงผล การวัดสอบเทียบได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 8 ครั้ง รวมกับค่าความไม่แน่นอนขยายของการวัด (Expanded Uncertainty) ($\bar{X} \pm U$) ให้สอดคล้องกับค่าที่ระบุในมาตรฐาน ISO 13820 Accuracy within $\pm 1\%$ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการสอบเทียบค่าแรงระหว่างการสอบเทียบปกติกับการสอบเทียบโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบ

ค่าแรงระบุ ($X_i \pm U$) (นิวตัน)	สถานะการทำงาน สอบเทียบ	ค่าแรงเครื่อง A ($\bar{X} \pm U$) (นิวตัน)	ค่าแรงเครื่อง B ($\bar{X} \pm U$) (นิวตัน)	ค่าแรงเครื่อง C ($\bar{X} \pm U$) (นิวตัน)	ค่าแรงเครื่อง D ($\bar{X} \pm U$) (นิวตัน)	ค่าแรงเครื่อง E ($\bar{X} \pm U$) (นิวตัน)
487.7 $\pm$ 0.73	ปกติ(ประจําหมุน)	488 $\pm$ 1.7	490 $\pm$ 2.2	487 $\pm$ 1.5	488 $\pm$ 1.6	488 $\pm$ 1.5
	ใช้อุปกรณ์ต้นแบบ	488 $\pm$ 1.2	488 $\pm$ 1.6	488 $\pm$ 1.1	488 $\pm$ 1.0	488 $\pm$ 1.0
974.7 $\pm$ 1.37	ปกติ(ประจําหมุน)	975 $\pm$ 2.8	981 $\pm$ 3.0	974 $\pm$ 2.1	978 $\pm$ 2.3	978 $\pm$ 2.5
	ใช้อุปกรณ์ต้นแบบ	975 $\pm$ 2.0	978 $\pm$ 2.2	975 $\pm$ 1.5	976 $\pm$ 1.7	976 $\pm$ 2.0
1,461.7 $\pm$ 1.90	ปกติ(ประจําหมุน)	1,465 $\pm$ 3.5	1,471 $\pm$ 3.7	1,461 $\pm$ 3.1	1,468 $\pm$ 3.2	1,467 $\pm$ 3.1
	ใช้อุปกรณ์ต้นแบบ	1,463 $\pm$ 2.9	1,468 $\pm$ 3.1	1,462 $\pm$ 2.6	1,464 $\pm$ 2.6	1,464 $\pm$ 2.6
1,949.0 $\pm$ 2.74	ปกติ(ประจําหมุน)	1,954 $\pm$ 4.7	1,965 $\pm$ 4.8	1,948 $\pm$ 4.4	1,958 $\pm$ 4.4	1,955 $\pm$ 4.4
	ใช้อุปกรณ์ต้นแบบ	1,950 $\pm$ 4.1	1,959 $\pm$ 4.3	1,948 $\pm$ 3.8	1,952 $\pm$ 3.7	1,950 $\pm$ 3.9

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการสอบเทียบปกติและการสอบเทียบโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้นแล้ว ทุกจุดค่าแรงระบุและทุกเครื่อง ค่าเฉลี่ยจากการสอบเทียบภายหลังใช้อุปกรณ์ต้นแบบเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากยิ่งขึ้นแสดงถึงความแม่นยำที่เพิ่มขึ้น ตามข้อมูลดังนี้ ค่าแรงระบุ 487.7 นิวตัน ค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากถึง 2 นิวตัน คิดเป็น 0.41% ค่าแรงระบุ 974.7 นิวตัน ค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากถึง 3 นิวตัน คิดเป็น 0.31% ค่าแรงระบุ 1,461.7 นิวตัน ค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากถึง 4 นิวตัน คิดเป็น 0.27% ค่าแรงระบุ 1,949.0 นิวตัน ค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากถึง 6 นิวตัน คิดเป็น 0.31% รวมทั้งค่าความไม่แน่นอนของการวัดจากการสอบเทียบภายหลังใช้อุปกรณ์ต้นแบบมีค่าลดลงทุกค่าแรงระบุ และทุกเครื่องทดสอบ ลดลงในช่วง 10.4%-37.5% เนื่องจากอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมแรง ความเร็วรอบการหมุนและความเสถียรของการสอบเทียบได้ดีกว่าการทำงานโดยผู้ใช้งานเองได้

3.2.2 ค่าความสามารถในการทำซ้ำได้หรือความเที่ยงตรง (Precision) ดังต่อไปนี้

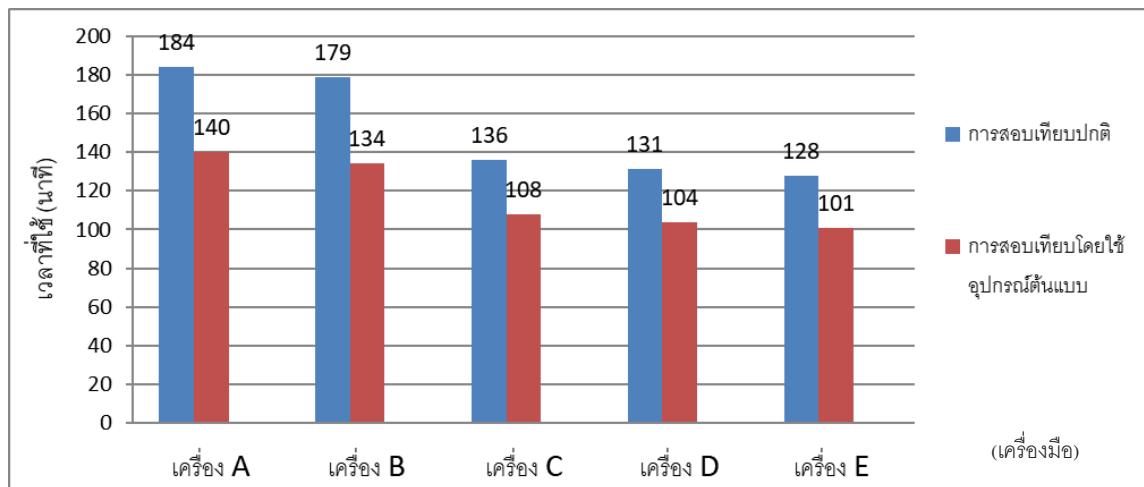
สถานะการทำงานสอบเทียบปกติ(ประจําหมุน) ค่าความผันแปรภายในกลุ่มรวม (Repeatability) 13.68 นิวตัน ความผันแปรระหว่างกลุ่ม (Reproducibility) 9.25 นิวตัน

สถานะการทำงานสอบเทียบใช้อุปกรณ์ต้นแบบ ค่าความผันแปรภายในกลุ่มรวม (Repeatability) 11.06 นิวตัน ความผันแปรระหว่างกลุ่ม (Reproducibility) 4.75 นิวตัน

เมื่อเปรียบเทียบ Repeatability และ Reproducibility ของการวัดจากการสอบเทียบภายหลังใช้อุปกรณ์ต้นแบบดีขึ้น 19% และ 48% ตามลำดับ

3.3 ผลเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องทดสอบความต้านแรงกดวงแหวน

เมื่อใช้อุปกรณ์ต้นแบบกับการสอบเทียบปกติ ทั้งหมด 5 เครื่อง โดยใช้นาฬิกาจับเวลาโดยรวมในหน่วยนาที จากเริ่มต้นสอบเทียบช่วงค่าระบุแรกจนถึงค่าสุดท้าย ดังรูปที่ 10



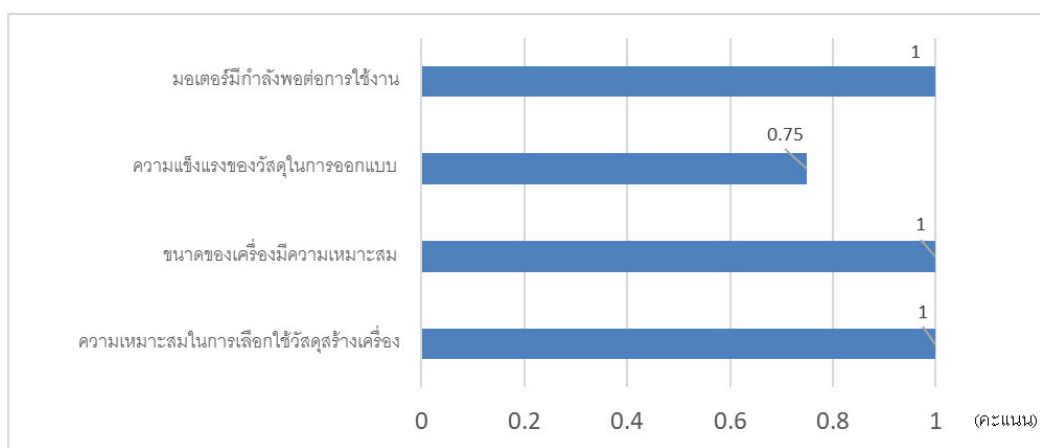
รูปที่ 10 : ผลของเวลาที่ใช้ในการการสอบเทียบระหว่างการสอบเทียบปกติกับการสอบเทียบโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบ

จากรูปที่ 10 พบว่า การสอบเทียบแบบปกติใช้เวลาสอบเทียบอยู่ที่ช่วง 128 นาที -184 นาที และการสอบเทียบโดยใช้อุปกรณ์ต้นแบบใช้เวลาสอบเทียบอยู่ที่ช่วง 101 นาที -140 นาที เวลาลดลงอยู่ในช่วง 27 นาที- 45 นาที คิดเป็นการลดลงจากเดิมโดยเฉลี่ย 20%-25% เนื่องจากการสอบเทียบแบบปกติ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องควบคุมความเสถียรค่าแรงระบุ และต้องปรับระดับค่าด้วยตนเองซึ่งใช้เวลานาน ประกอบกับมีความเหนื่อยล้าสะสมจากการปรับหลายระดับซึ่งใช้เวลานานกว่าใช้อุปกรณ์ต้นแบบ

3.4 ผลการประเมินคุณภาพของอุปกรณ์ต้นแบบที่ช่วยควบคุมแรง

การประเมินสมรรถนะของเครื่องตามหัวข้อ 2 ด้าน ได้แก่ ด้านการออกแบบและสร้างเครื่อง และด้านการใช้งาน โดยมีการวิเคราะห์ดังนี้

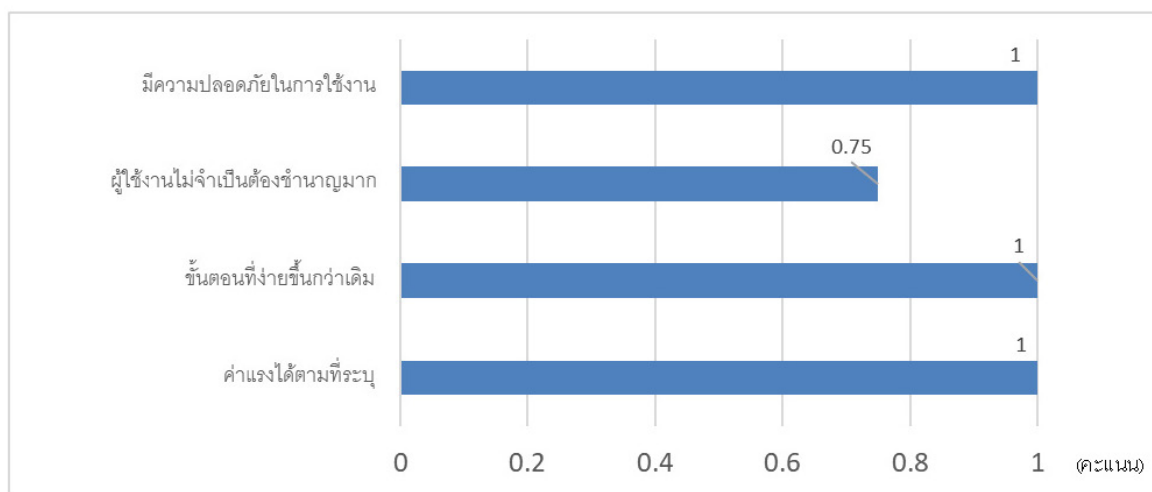
3.4.1 ผลความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญในด้านการออกแบบและสร้างเครื่อง โดยแบ่งประเด็นเป็นข้อ จำนวน 4 ข้อ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 : ผลความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญในด้านการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ

จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญมีความคิดเห็นในด้านการออกแบบและการสร้าง ดังนี้ อุปกรณ์ต้นแบบมอเตอร์มีกำลังเพียงพอต่อการใช้งาน ได้ความเร็วรอบตามที่ต้องการได้ ผู้ปฏิบัติงานใช้แรงในการสอบเทียบน้อยลง เพราะไม่จำเป็นต้องควบคุมความเสถียรค่าแรงระบุ และต้องปรับระดับค่าด้วยตนเอง วัสดุที่ใช้ทำมีความแข็งแรงเหมาะสมกับงาน ขนาดเครื่องมือเหมาะสมมีส่วนล็อกและเลื่อนตำแหน่งตามเครื่องมือที่สอบเทียบได้ เพิ่มเดิมการติดตามใช้งานในระยะยาวต่อไป โดยมีค่าดัชนีความคิดเห็นสอดคล้องรวมของด้านนี้ (IOC) จากการคำนวณตามสูตรที่ (1) เท่ากับ 0.94 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

3.4.2 ผลความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญในด้านการใช้เครื่อง โดยแบ่งประเด็นเป็นข้อ จำนวน 4 ข้อ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 : ผลความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญในด้านการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ

จากรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่า ผู้เชี่ยวชาญมีความคิดเห็นในด้านการใช้งานเครื่อง ดังนี้ เมื่อสาธิตการทำงานแล้ว อุปกรณ์ต้นแบบ ปรับค่าแรงได้ตามที่ระบุทุกช่วงค่า มีความปลอดภัยในการใช้งาน จากการมีปุ่มปิด และการสลับทิศทาง การหมุน ขั้นตอนใช้งานไม่ซับซ้อน ไม่จำเป็นต้องมีประสบการณ์ใช้งานแต่ควรมีความรู้พื้นฐานด้านเครื่องมือทดสอบของกระดาศเบื้องต้น โดยมีค่าดัชนีความคิดเห็นสอดคล้องรวมของด้านนี้ (IOC) จากการคำนวณตามสูตรที่ (1) เท่ากับ 0.94 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4. สรุป (Conclusions)

อุปกรณ์ต้นแบบช่วยควบคุมแรงกดที่สร้างขึ้นมีองค์ประกอบ คือ หัวควบคุมแรงกด ตัวปรับความเร็วรอบและทิศทางการหมุน ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือทดสอบความต้านแรงกดของกระดาศ โดยผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบพบว่า ค่าเฉลี่ยจากการสอบเทียบภายหลังใช้อุปกรณ์ต้นแบบเข้าใกล้ค่าแรงระบุมากขึ้น 2-8 นิวตัน และความไม่แน่นอน

ของการวัดมีค่าน้อยลงในช่วง 10.4%-37.5% เมื่อเปรียบเทียบ repeatability และ reproducibility ที่ขึ้น 19% และ 48% ตามลำดับ ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น เวลาที่ใช้งานลดลงจากเดิมโดยเฉลี่ย 20-25% ด้วย เพราะอุปกรณ์ต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมแรง ความเร็วรอบการหมุน และความเสถียรได้ และผู้ปฏิบัติงานใช้แรงในการสอบเทียบน้อยลง เพราะไม่จำเป็นต้องควบคุมความเสถียรค่าแรงระบุ และต้องปรับระดับค่าด้วยตนเอง

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้บังคับบัญชาและเจ้าหน้าที่กลุ่มเส้นใยธรรมชาติ (สธ.) ทุกท่านที่ช่วยสนับสนุนการทำโครงการวิจัยนี้ และกลุ่มนวัตกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ (นอ.) ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ขอขอบคุณกลุ่มภาคอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาศลูกฟูก 5 ห้องปฏิบัติการที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และเครื่องมือ ดำเนินการทดลองเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนางานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] THE TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. *TAPPI 818 cm-07. Ring crush of paperboard*. 2007.
- [2] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 12192:2011. Paper and board--Determination of compressive strength--Ring crush method*. 2011.
- [3] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก.321-2560. กระดาษทำลูกฟูก*. 2560.
- [4] จรวย ชงไชย. *การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความต้านแรงกดของกระดาษทำลูกฟูก*. กรุงเทพฯ: กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2542. 64 หน้า.
- [5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 13820:2014. Paper, board and corrugated fibreboard —Description and calibration of compression-testing equipment*. 2014.
- [6] โหลดเซลล์ (Load Cell) คืออะไร ราคาเท่าไร [ออนไลน์]. 2562 [อ้างถึงวันที่ 2 พฤษภาคม 2562] เข้าถึงจาก: <http://www.svs-en.com/load-cell/>
- [7] กฤษ เฉยไสย. *พื้นฐานการควบคุมมอเตอร์ (เอกสารการสอน)*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2547.
- [8] ปราณี หลาเบ็ญสะ. *การหาคุณภาพของเครื่องมือวัดและประเมินผล (เอกสารการสอน)*. คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา, 2559.
- [9] UNITED KINGDOM ACCREDITATION SERVICE. *M3003. The expression of uncertainty and confidence in measurement*. Edition 4. Middlesex: UKAS, October 2019.
- [10] ENGINEERED SOFTWARE, INC. *Repeatability and reproducibility*. [online]. [viewed 12 January 2021]. Available from: http://www.engineered-software.com/papers/msa_rr.pdf