การพัฒนาเครื่องต้นแบบอัดกระป๋องเพื่อสนับสนุนการจัดการขยะรีไซเคิล

Development of a Prototype Can Compactor to Support Recyclable Waste Management

ณัฐวุฒิ เหร็มแอ[1] มะยูกี มะลี[1] ซอลาฮุดีน อาแว[1] มุสตาฟา หมานอินทร์[1] ศรีวรรณ ขำตรี[2] และ วีรชัย มัฏฐารักษ์[*3]

Nattawut Rem-ae[1] Maukee Malee[1] Solahuding Awae[1] Mustafa Man-in[1] Sriwan Khamtree[2] and Weerachai Madtharuk[*3]

นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา[1]
Undergraduate Students, Major of Industrial Management Technology; Faculty of Industry Technology; Songkhla Rajabhat University[1]
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา[2]
Assistant Professor Dr., Major of Industrial Technology; Faculty of Industry Technology; Songkhla Rajabhat University[2]
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา[*3]
Assistant Professor Dr., Major of Industrial Management Technology; Faculty of Industry Technology; Songkhla Rajabhat University[*3]
*Corresponding author, weerachai.ma@skru.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบอัดกระป๋องอลูมิเนียมที่สามารถลดขนาดกระป๋องได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อการใช้งานจริง และ 2) ประเมินสมรรถนะของเครื่องต้นแบบด้านร้อยละการลดขนาด เวลาต่อรอบการทำงาน ความเสถียรของการทำงาน และความสามารถในการเพิ่มการจัดเก็บในภาชนะมาตรฐาน รวมถึงประเมินความคิดเห็นของผู้ใช้ต่อการใช้งานเครื่อง การทดสอบสมรรถนะกำหนดปัจจัย 2 ปัจจัย คือ (1) แรงดันลม 4.0–6.5 บาร์ และ (2) ขนาดกระป๋อง 240 และ 490 มิลลิลิตร โดยประเมินผลลัพธ์จาก 3 ตัวชี้วัด คือ (1) ร้อยละการลดขนาด (2) เวลาต่อรอบการทำงาน และ (3) ความสามารถในการเพิ่มการจัดเก็บในภาชนะมาตรฐาน 4 ลิตร

ผลการวิจัย พบว่า แรงดันลม 5.5–6.5 บาร์ ให้ประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุด โดยกระป๋องขนาด 240 มิลลิลิตรเพิ่มจำนวนการจัดเก็บจาก 44 เป็น 112 กระป๋อง (ร้อยละ 154.55) และขนาด 490 มิลลิลิตรเพิ่มจาก 17 เป็น 73 กระป๋อง (ร้อยละ 329.41) ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดขนาดเท่ากับ 80.40 (S.D. = 1.25) เวลาต่อรอบเฉลี่ย 4.62 วินาที ระบบทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ และผลการประเมินผู้ใช้ 32 คนอยู่ในระดับดี ($\overline{X}$ = 4.05, S.D. = 0.64) แสดงให้เห็นว่า เครื่องต้นแบบสามารถสนับสนุนการจัดการขยะรีไซเคิลในระดับต้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การรีไซเคิล เครื่องอัดกระป๋อง ความสามารถในการจัดเก็บ ระบบนิวเมติกส์

Abstract

This research aimed to (1) design and develop a prototype aluminum can compactor capable of effectively reducing can size and suitable for practical use, and (2) evaluate the prototype performance in terms of size reduction percentage, cycle time, operational stability, and storage capacity improvement in a standardized container, as well as user perceptions of usability. The performance test investigated two factors: pneumatic pressure (4.0–6.5 bar) and can sizes (240 and 490 ml). Outcomes were assessed using three key indicators: (1) size reduction percentage, (2) cycle time, and (3) storage capacity improvement in a 4-liter container.

The results indicated that a pressure range of 5.5–6.5 bar provided the most suitable performance. In a 4-liter container, storage capacity increased from 44 to 112 cans for 240 ml cans (154.55%) and from 17 to 73 cans for 490 ml cans (329.41%). The mean size reduction percentage was

80.40 (S.D. = 1.25), and the mean cycle time was 4.62 s. The system operated stably throughout the tests. Usability evaluation by 32 users showed an overall good level of satisfaction ($\overline{X}$ = 4.05, S.D. = 0.64). These findings demonstrate that the developed prototype can effectively support recyclable waste management at the source.

Keywords: Recycling, Can Compactor, Storage Capacity, Pneumatic System

บทนำ

ประเทศไทยเผชิญปัญหาปริมาณขยะมูลฝอยที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มประเภทกระป๋องอลูมิเนียมซึ่งพบมากในกิจกรรมการบริโภคประจำวัน รวมถึงกิจกรรมในสถานศึกษาและพื้นที่สาธารณะ ขยะดังกล่าวมักถูกทิ้งรวมกับขยะทั่วไปโดยไม่ได้ผ่านการคัดแยกอย่างถูกต้อง ส่งผลให้สูญเสียโอกาสในการนำทรัพยากรกลับมาใช้ประโยชน์และเพิ่มภาระต่อระบบจัดการขยะของท้องถิ่นและชุมชน (กรมควบคุมมลพิษ, 2565); (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2566) แม้ว่ากระป๋องอลูมิเนียมจะเป็นวัสดุที่มีศักยภาพต่อการรีไซเคิลสูงและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ปัญหาเชิงปฏิบัติยังคงอยู่ที่การคัดแยกและการรวบรวมที่ไม่เป็นระบบ รวมถึงข้อจำกัดด้านพื้นที่จัดเก็บและการขนส่งวัสดุรีไซเคิล (กรมควบคุมมลพิษ, 2566); (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2563) ทิศทางนโยบายของประเทศให้ความสำคัญกับการยกระดับการจัดการขยะรีไซเคิลและการขับเคลื่อนเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพระบบตั้งแต่ต้นทาง ได้แก่ การคัดแยก การรวบรวม การจัดเก็บ และการขนส่ง เพื่อให้เกิดการนำกลับมาใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิผล (กรมควบคุมมลพิษ, 2565); (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2563) ดังนั้น เทคโนโลยีหรืออุปกรณ์สนับสนุนที่ช่วยลดข้อจำกัดเชิงพื้นที่ ลดภาระการขนย้าย และเอื้อต่อการรวบรวมอย่างเป็นระบบจึงมีความจำเป็นต่อการนำไปใช้จริงในชุมชนและสถานศึกษา

แนวทางหนึ่งที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บและขนส่งวัสดุรีไซเคิล คือ การลดปริมาตรของบรรจุภัณฑ์ก่อนนำส่ง โดยเฉพาะกระป๋องอลูมิเนียมซึ่งมีลักษณะกินพื้นที่ การพัฒนาเครื่องลดขนาดหรือเครื่องอัดกระป๋องจึงได้รับความสนใจทั้งในรูปแบบเครื่องต้นแบบเชิงวิศวกรรมและระบบอัตโนมัติที่ผสานการตรวจจับวัสดุและการบีบอัด เพื่อเพิ่มความถูกต้องและความสะดวกในการจัดการ (ปิยมน พัวพงศกร, 2561); (เอกรินทร์ วทัญญูเลิศสกุล, วนษา สินจังหรีด และ สุระเจตน์ อ่อนฤทธิ์, 2562) นอกจากนี้ งานพัฒนาระยะหลังยังมุ่งประเด็นด้านความอัจฉริยะของระบบ การใช้งานในบริบทจริง และการประยุกต์กับบรรจุภัณฑ์หลายชนิด เช่น กระป๋องและขวดน้ำ ซึ่งสะท้อนความพยายามในการขยายขอบเขตการใช้งานและความเหมาะสมเชิงปฏิบัติ (อิษฎ์ รานอก, ธาดา คำแดง และ วิจิตกร คำรัตน์, 2567); (ชุติมา เกตุษา, ดิฐศิญะภัทร ฤกษ์ดี และ ชูเกียรติ์ อัคเนวุธ, 2568); (ธนภรณ์ อินชูใจ, ชัชฤทธิ์ บุญมีโพธิ์ และ กฤษฎา อ้นอ้าย, 2568) อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนงานที่เกี่ยวข้องยังพบประเด็นที่ควรพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อการประยุกต์ใช้ระดับฐานราก ได้แก่ ความเหมาะสมด้านต้นทุนและความซับซ้อนของระบบ ความปลอดภัยและความง่ายต่อการใช้งานสำหรับผู้ใช้ทั่วไป ความเสถียรของการทำงานเมื่อใช้งานต่อเนื่อง รวมถึงการรายงานผลเชิงสมรรถนะที่ควรครอบคลุมมิติสำคัญต่อการตัดสินใจนำไปใช้จริง เช่น ความสัมพันธ์ของระดับแรงอัดกับร้อยละการลดขนาด เวลาในการทำงานต่อรอบ ความสามารถในการเพิ่มการจัดเก็บ และการยอมรับของผู้ใช้

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาเครื่องต้นแบบอัดกระป๋องที่สามารถใช้งานได้จริงในชุมชนและสถานศึกษา โดยเน้นความง่าย ความปลอดภัย และต้นทุนที่เหมาะสม พร้อมทั้งประเมินสมรรถนะของเครื่องด้วยตัวชี้วัดด้านการลดขนาดกระป๋อง เวลาในการทำงาน ความเสถียรของระบบ ความสามารถในการเพิ่มการจัดเก็บ และการประเมินความคิดเห็นของผู้ใช้ เพื่อสนับสนุนการจัดการขยะรีไซเคิลในระดับต้นทางให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และสอดคล้องกับทิศทางเศรษฐกิจหมุนเวียนและการพัฒนาอย่างยั่งยืน (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2568); (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2566)

วัตถุประสงค์การวิจัย

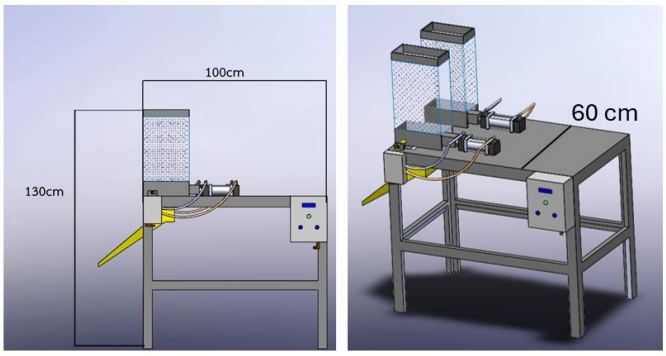
1. เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบอัดกระป๋องอลูมิเนียมที่สามารถลดขนาดกระป๋องได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อการใช้งานจริง

2. เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องต้นแบบด้านร้อยละการลดขนาด เวลาในการทำงานต่อรอบ ความเสถียรของการทำงาน และความสามารถในการเพิ่มการจัดเก็บในภาชนะมาตรฐาน รวมถึงประเมินความคิดเห็นของผู้ใช้ต่อการใช้งานเครื่อง

วิธีการวิจัย

1. การออกแบบเครื่องต้นแบบ

ศึกษาและวิเคราะห์การทำงานของเครื่องต้นแบบเดิมที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า พบว่า การควบคุมแรงบีบอัดและความเร็วรอบการทำงานมีความแปรปรวน ส่งผลให้ผลการลดขนาดกระป๋องไม่สม่ำเสมอ จึงได้พัฒนาเครื่องต้นแบบรุ่นใหม่โดยปรับเปลี่ยนระบบขับเคลื่อนเป็นระบบนิวเมติกส์ เพื่อให้สามารถกำหนดและควบคุมแรงดันการบีบอัดได้ตามค่าที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและปลอดภัย พร้อมบูรณาการระบบควบคุมด้วยเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุเพื่อสั่งเริ่มรอบการบีบเฉพาะเมื่อมีการวางกระป๋องในตำแหน่งที่กำหนด โดยเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นเป็นโครงสร้างแบบตั้งโต๊ะ ประกอบด้วยโครงเฟรมโลหะและพื้นโต๊ะทำงานรองรับชุดอัดกระป๋อง มีมิติหลักประมาณความยาว 100 เซนติเมตร ความกว้าง 60 เซนติเมตร และความสูง 130 เซนติเมตร (รูปที่ 1) ชุดอัดกระป๋องติดตั้งบริเวณด้านซ้ายของโต๊ะ ประกอบด้วยกระบอกลมนิวเมติกส์ติดตั้งแนวตั้งร่วมกับแท่นกดสำหรับลดขนาดกระป๋อง พร้อมช่องทางสำหรับป้อนและนำกระป๋องออกหลังการอัด ขณะที่ด้านหน้าของโต๊ะติดตั้งกล่องควบคุมสำหรับสั่งงานซึ่งประกอบด้วยปุ่มควบคุมและไฟแสดงสถานะ การปรับปรุงดังกล่าวมุ่งลดการทำงานเปล่าของระบบ ลดการเกิดการติดขัดระหว่างรอบการทำงาน และลดการสึกหรอของชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง ส่งผลให้เครื่องมีความเสถียรและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในบริบทชุมชนและสถานศึกษา



รูปที่ 1 แบบร่างของเครื่องต้นแบบอัดกระป๋องระบบนิวเมติกส์

2. การจัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

2.1 ระบบนิวเมติกส์

2.1.1 กระบอกลมนิวเมติกส์ รุ่น SC 50 × 150 มิลลิเมตร จำนวน 2 กระบอก
2.1.2 โซลินอยด์วาล์ว 3/2 ทาง แรงดันไฟฟ้าควบคุม 24 V จำนวน 2 ตัว
2.1.3 ข้อต่อลมแบบฟิตติ้งเกลียว 1/4 นิ้ว สำหรับสายลม 8 มิลลิเมตร จำนวน 6 ตัว
2.1.4 ข้อต่อลมแบบข้อต่อลดขนาด เกลียว 1/4 นิ้ว รองรับสายลม 8 มิลลิเมตร จำนวน 2 ตัว
2.1.5 สายลม 8 มิลลิเมตร ความยาว 5 เมตร จำนวน 1 ม้วน
2.1.6 ชุดปรับแรงดันลม จำนวน 1 ชุด

2.2 ระบบควบคุมและไฟฟ้า

2.2.1 เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ รุ่น E18-D80NK จำนวน 2 ตัว
2.2.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno จำนวน 2 ตัว
2.2.3 Switching power supply 5 V 10 A จำนวน 1 ตัว
2.2.4 Switching power supply 24 V 2 A จำนวน 1 ตัว
2.2.5 ปุ่มควบคุม จำนวน 3 ตัว
2.2.6 หน้าจอแสดงผล LCD จำนวน 1 ตัว
2.2.7 สายไฟเชื่อมต่อภายในกล่องควบคุม จำนวน 1 ชุด
2.2.8 สายไฟเชื่อมต่อระบบเซนเซอร์และโซลินอยด์วาล์ว ความยาว 3 เมตร จำนวน 1 ชุด

2.3 โครงสร้างและอุปกรณ์ประกอบ

2.3.1 ท่อ PVC สีขาว เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 มิลลิเมตร ความยาว 3 เมตร จำนวน 2 เส้น

2.3.2 กล่องกันน้ำสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า ขนาด 6 × 12 นิ้ว จำนวน 2 กล่อง

2.3.3 กล่องกันน้ำสำหรับชุดควบคุม ขนาด 8 × 12 นิ้ว จำนวน 1 กล่อง

2.3.4 เทปพันเกลียวข้อต่อ จำนวน 1 ม้วน

3. การพัฒนาเครื่องต้นแบบอัดกระป๋อง

3.1 วิเคราะห์ข้อจำกัดของเครื่องต้นแบบเดิมโดยศึกษาการทำงานของเครื่องต้นแบบเดิมที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า พบข้อจำกัดด้านการควบคุมแรงอัดและจังหวะการทำงาน ส่งผลให้ผลการอัดกระป๋องมีความไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังขาดองค์ประกอบการควบคุมพื้นฐาน เช่น สวิตช์สั่งงานและกลไกหยุดการทำงานเมื่อไม่มีวัสดุในตำแหน่งอัด ซึ่งเพิ่มความเสี่ยงด้านความปลอดภัยและก่อให้เกิดการทำงานเปล่าของระบบ เป็นต้น

3.2 การออกแบบแนวทางปรับปรุงและคัดเลือกอุปกรณ์กำหนดแนวทางปรับปรุงโดยเปลี่ยนระบบขับเคลื่อนเป็นระบบนิวเมติกส์ เพื่อให้สามารถควบคุมแรงดันการอัดได้ตามค่าที่กำหนด เลือกใช้กระบอกลมนิวเมติกส์ขนาด 50 × 150 มิลลิเมตร และควบคุมการทำงานผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ร่วมกับโซลินอยด์วาล์ว 3/2 ทาง พร้อมติดตั้งชุดปรับแรงดันลมเพื่อปรับระดับแรงอัดให้เหมาะสมกับการใช้งาน

3.3 การปรับปรุงโครงสร้างและการจัดวางอุปกรณ์ปรับปรุงโครงสร้างเครื่องให้มีความมั่นคงและเหมาะสมต่อการใช้งานจริง โดยจัดวางชุดอัดและชุดควบคุมให้อยู่ในตำแหน่งที่เข้าถึงได้สะดวกต่อการใช้งานและการบำรุงรักษา รวมถึงจัดระเบียบการเดินสายลมและสายไฟให้อยู่ในแนวทางเดียวกันเพื่อลดความเสี่ยงจากการเกี่ยวพันหรือการชำรุดของสาย ทั้งนี้รายละเอียดการจัดวางอุปกรณ์และมิติหลักของเครื่อง (รูปที่ 1)

3.4 การตรวจสอบการทำงานก่อนการทดลองสมรรถนะตรวจสอบการรั่วของระบบลม การทำงานของเซนเซอร์และโซลินอยด์วาล์ว และการตอบสนองของระบบควบคุมก่อนเข้าสู่การทดลองตามแผน

4. ปัจจัยการทดสอบสมรรถนะและตัวชี้วัดผลลัพธ์การทำงานของเครื่องต้นแบบอัดกระป๋อง

4.1 ปัจจัยการทดสอบสมรรถนะ

1) แรงดันลมของระบบนิวเมติกส์ ได้แก่ ระดับ 4.0 บาร์ ถึง 6.5 บาร์

2) ขนาดกระป๋อง ได้แก่ 240 มิลลิลิตร และ 490 มิลลิลิตร

4.2 ตัวชี้วัดผลลัพธ์การทำงาน

ตัวชี้วัดที่ 1

$$\% \text{ การลดขนาด} = \left(\frac{H_0 - H_1}{H_0}\right) \times 100$$

โดย H_0 คือ ความสูงก่อนอัด H_1 คือ ความสูงหลังการอัด

ตัวชี้วัดที่ 2

เวลา/รอบการทำงาน: เวลาที่ใช้ในการอัด 1 ครั้ง (รอบต่อนาที)

ตัวชี้วัดที่ 3

$$\%\text{ความจุ} = \frac{N_2 - N_1}{N_1} \times 100$$

โดย N_1 คือ จำนวนกระป๋องก่อนอัด N_2 คือ จำนวนกระป๋องหลังอัด

5. การประเมินผู้ใช้

5.1 กลุ่มตัวอย่าง การประเมินการใช้งานเครื่องต้นแบบอัดกระป๋องดำเนินการกับ นักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จำนวน 32 คน ซึ่งเป็นผู้ที่ได้รับการอธิบายวิธีการใช้งานเครื่องและได้ทดลองใช้งานจริงทั้งในโหมดอัตโนมัติและโหมดควบคุมด้วยตนเอง เพื่อให้สามารถประเมินการใช้งานได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง

5.2. เครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูล คือ แบบสอบถาม (Questionnaire) เพื่อประเมินความเหมาะสมในการ

ใช้งาน ความปลอดภัย และระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อเครื่องต้นแบบอัดกระป๋อง โดยมีแนวคิดจากงานวิจัยของ วีรพล ทองคุปต์, กฤษฎา พรหมแก้ว, ทรงยศ สารภาพ และ อำนาจ วันริโก (2563) ซึ่งก่อนนำแบบสอบถามไปใช้จริง ได้ตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่าน และคำนวณค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์การวิจัย (IOC) ผลการประเมิน พบว่า ค่า IOC ของข้อคำถามอยู่ในช่วง 0.67-1.00 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ยอมรับได้ จึงนำแบบสอบถามไปใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลกับกลุ่มตัวอย่าง โดยแบบสอบถามแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นคำถามเกี่ยวกับข้อมูลพื้นฐานของผู้ทดลองใช้งาน มีลักษณะเป็นแบบตรวจสอบรายการ (Check List) เพื่อใช้ในการอธิบายลักษณะทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ เพศ อายุ และประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ลักษณะใกล้เคียง

ส่วนที่ 2 เป็นคำถามเพื่อประเมินความคิดเห็นของผู้ใช้งานที่มีต่อเครื่องต้นแบบอัดกระป๋องในด้านความง่ายต่อการใช้งานและความปลอดภัยในการใช้งาน รวม 10 ข้อคำถาม โดยใช้มาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ตามหลักการวัดทัศนคติแบบลิเคิร์ต (Likert's Scale) (วิทวัส สุขทอง, เจตรินทร์ จันฉาย, ชัยวัฒน์ ทองศรีแก้ว, ทศพร พลเมือง, สรรเพชร ด้วงมา, อรินทร์ ทองแก้ว และ เสรี หนูหลง, 2568) ระดับคะแนนที่ใช้ในการประเมินกำหนดไว้ดังนี้

5 หมายถึง ดีมาก
4 หมายถึง ดี
3 หมายถึง ปานกลาง
2 หมายถึง น้อย
1 หมายถึง ควรปรับปรุง

ส่วนที่ 3 เป็นข้อคิดเห็นเพิ่มเติม เพื่อเปิดโอกาสให้ผู้ทดลองใช้งานแสดงความคิดเห็น ข้อเสนอแนะ หรือข้อควรปรับปรุงเพิ่มเติมเกี่ยวกับเครื่องต้นแบบอัดกระป๋อง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาให้มีความเหมาะสมและตอบสนองต่อการใช้งานได้ดียิ่งขึ้น

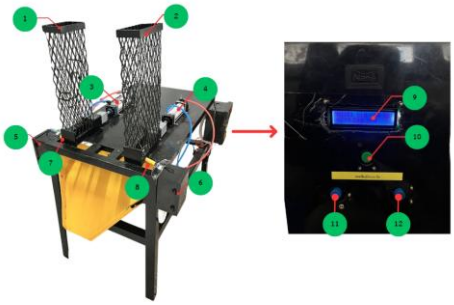
5.3. การวิเคราะห์ข้อมูลและการแปลผลคะแนน

คะแนนเฉลี่ย 4.50 - 5.00 หมายความว่า อยู่ในเกณฑ์ ดีมาก
คะแนนเฉลี่ย 3.50 - 4.49 หมายความว่า อยู่ในเกณฑ์ ดี
คะแนนเฉลี่ย 2.50 - 3.49 หมายความว่า อยู่ในเกณฑ์ ปานกลาง
คะแนนเฉลี่ย 1.50 - 2.49 หมายความว่า อยู่ในเกณฑ์ น้อย
คะแนนเฉลี่ย 1.00 - 1.49 หมายความว่า อยู่ในเกณฑ์ ควรปรับปรุง

ผลการวิจัย

1. การพัฒนาเครื่องต้นแบบอัดกระป๋อง

เครื่องต้นแบบอัดกระป๋องที่พัฒนาขึ้นเป็นระบบกึ่งอัตโนมัติ ใช้ระบบนิวเมติกส์เป็นแหล่งกำลังหลักเพื่อให้สามารถกำหนดและควบคุมแรงดันการอัดได้ตามค่าที่ต้องการอย่างต่อเนื่อง โดยระบบควบคุมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ในการสั่งงานโซลินอยด์วาล์วแบบสามต่อสองทางเพื่อควบคุมการจ่ายลมและการระบายลมเข้าสู่กระบอกลมสำหรับการอัดกระป๋อง การทำงานประกอบด้วยสถานะรอ สถานะอัด และสถานะคืนกลับ ซึ่งเริ่มรอบการอัดเมื่อเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุตรวจพบกระป๋องในตำแหน่งอัด พร้อมทั้งมีชุดควบคุมด้านหน้าสำหรับสั่งงานและแสดงสถานะการทำงาน เครื่องต้นแบบถูกออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัดและติดตั้งบนโต๊ะได้ โดยมีมิติหลักประมาณความยาว 100 เซนติเมตร ความกว้าง 60 เซนติเมตร และความสูง 130 เซนติเมตร ตามรูปที่ 2 องค์ประกอบเชิงโครงสร้างและการจัดวางดังกล่าวช่วยให้เข้าถึงจุดป้อนวัสดุ จุดอัด และชุดควบคุมได้สะดวก ลดการทำงานเปล่าด้วยการเริ่มรอบเมื่อมีวัสดุ และเพิ่มความเสถียรของจังหวะการทำงานเมื่อใช้งานต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาเครื่องอัดหรือเครื่องลดขนาดบรรจุภัณฑ์ในบริบทการจัดการขยะรีไซเคิลระดับต้นทางที่มุ่งเน้นความเหมาะสมเชิงปฏิบัติและการใช้งานจริง (เอกรินทร์ วทัญญูเลิศสกุล และคณะ, 2562), (อิษฎ์ รานอก, ธาดา คำแดง และ วิจิตกร คำรัตน์, 2567)

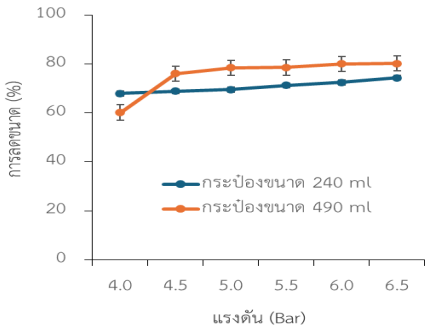


รูปที่ 2 รายละเอียดเครื่องต้นแบบอัดกระป๋อง

1.1 เครื่องต้นแบบอัดกระป๋องมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 คือ ช่อง A บรรจุกระป๋องขนาดความจุ 180-245 ml
หมายเลข 2 คือ ช่อง B บรรจุใส่กระป๋องขนาดความจุ 325-490 ml
หมายเลข 3 คือ กระบอกลมนิวเมติกส์ ใช้สำหรับอัดกระป๋อง ฝั่ง A อัดกระป๋องขนาด 180-245 ml
หมายเลข 4 คือ กระบอกลมนิวเมติกส์ ใช้สำหรับอัดกระป๋อง ฝั่ง B อัดกระป๋องขนาด 325-490 ml
หมายเลข 5 คือ กล่องบรรจุโซลินอยด์วาล์ว และสายไฟ Sensor ฝั่ง A
หมายเลข 6 คือ กล่องบรรจุโซลินอยด์วาล์ว และสายไฟ Sensor ฝั่ง B
หมายเลข 7 คือ Sensor ตรวจจับวัตถุ ฝั่ง A
หมายเลข 8 คือ Sensor ตรวจจับวัตถุ ฝั่ง B
หมายเลข 9 คือ หน้าจอบอกสถานะ
หมายเลข 10 คือ ปุ่มกดทำงานเครื่องแบบอัตโนมัติ
หมายเลข 11 คือ ปุ่มกดแบบควบคุมด้วยตัวเอง ฝั่ง A
หมายเลข 12 คือ ปุ่มกดแบบควบคุมด้วยตัวเอง ฝั่ง B

2. ผลของแรงดันที่มีต่อการลดขนาดของกระป๋อง



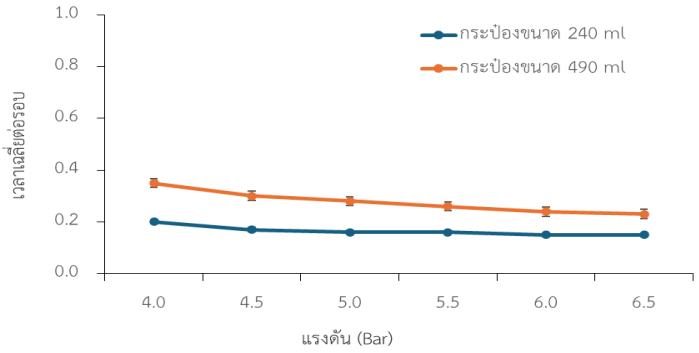
รูปที่ 3 ผลของแรงดันมีต่อการลดขนาดของกระป๋อง

ผลการทดสอบร้อยละการลดขนาดของกระป๋องอลูมิเนียมภายใต้แรงดันลมอัด 4.0 ถึง 6.5 บาร์ (รูปที่ 3) พบว่า เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น ร้อยละการลดขนาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งกระป๋องขนาด 240 และ 490 มิลลิลิตร โดยกระป๋องขนาด 490 มิลลิลิตรมีค่าร้อยละการลดขนาดสูงกว่าในช่วงแรงดันตั้งแต่ 4.5 บาร์ขึ้นไป และค่ามีแนวโน้มทรงตัวมากขึ้นในช่วงแรงดัน 5.5–6.5 บาร์ ขณะที่กระป๋องขนาด 240 มิลลิลิตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแต่ช้ากว่า ลักษณะของกระป๋องก่อนอัดและหลังอัด (รูปที่ 4) แสดงให้เห็นว่า เครื่องต้นแบบเริ่มเข้าสู่ช่วงการทำงานที่ให้แรงอัดเพียงพอในการเอาชนะความต้านทานต่อการยุบตัวของกระป๋องอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ ความแตกต่างของขนาดกระป๋องมีผลต่อค่าร้อยละการลดขนาด เนื่องจากรูปทรง ความหนา

และความแข็งเชิงโครงสร้างของกระป๋องต่างขนาดย่อมแตกต่างกัน ทำให้การตอบสนองต่อแรงอัดไม่เท่ากัน ผลดังกล่าวชี้ว่า การกำหนดแรงดันใช้งานควรพิจารณาร่วมกับขนาดกระป๋องเพื่อให้ได้ผลการลดขนาดที่เหมาะสมสำหรับการจัดเก็บและขนส่งต่อไป

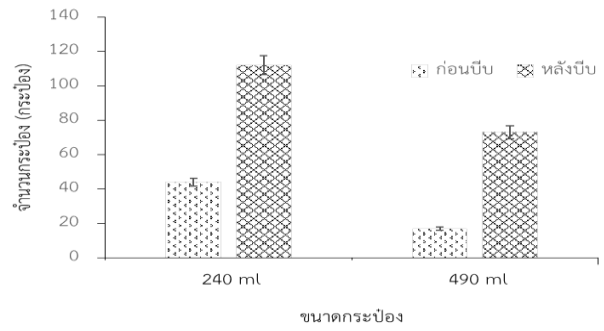
รูปที่ 4 ลักษณะของกระป๋องก่อนอัดและหลังอัด

3. ผลของแรงดันที่มีต่อเวลาต่อรอบการทำงาน



จากรูปที่ 5 เมื่อเพิ่มแรงดันลมอัดจาก 4.0 เป็น 6.5 บาร์ พบว่า เวลาเฉลี่ยต่อรอบของการอัดกระป๋องมีแนวโน้มลดลงทั้งกระป๋องขนาด 240 และ 490 มิลลิลิตร โดยกระป๋องขนาด 240 มิลลิลิตรใช้เวลาต่อรอบต่ำกว่ากระป๋องขนาด 490 มิลลิลิตรในทุกระดับแรงดัน และแนวโน้มของเวลาเริ่มลดลงชัดในช่วงแรงดันต่ำถึงปานกลาง ก่อนจะเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อเข้าสู่ช่วงแรงดันสูง ทั้งนี้ผลการทดลองสะท้อนว่า แรงดันที่สูงขึ้นช่วยให้การทำงานต่อรอบของระบบมีความรวดเร็วขึ้นและมีความคงที่มากขึ้นในช่วงแรงดันปลาย

4. ผลของขนาดกระป๋องที่มีต่อการจัดเก็บ



รูปที่ 6 ผลของขนาดกระป๋องที่มีต่อการจัดเก็บ

ผลการทดสอบความสามารถในการจัดเก็บในภาชนะมาตรฐานปริมาตร 4 ลิตร (รูปที่ 6) พบว่า หลังการอัดกระป๋องจำนวนที่จัดเก็บได้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยกระป๋องขนาด 240 มิลลิลิตรเพิ่มจาก 44 เป็น 112 กระป๋อง (เพิ่มขึ้นร้อยละ 154.55) และกระป๋องขนาด 490 มิลลิลิตรเพิ่มจาก 17 เป็น 73 กระป๋อง (เพิ่มขึ้นร้อยละ 329.41)

5. การประเมินผู้ใช้

จากตารางที่ 1 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ พบว่า ค่าเฉลี่ยภาพรวมเท่ากับ 4.05 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.64 อยู่ในระดับดี เมื่อพิจารณาเป็นรายมิติ พบว่า ความง่ายต่อการใช้งานมีค่าเฉลี่ยรายข้ออยู่ในช่วง 4.31 – 4.65 โดยข้อที่ได้คะแนนสูงสุด คือ ผู้ใช้สามารถเรียนรู้การใช้งานได้รวดเร็ว ($\overline{X}$ = 4.65, S.D. = 0.48) ขณะที่ความปลอดภัยในการใช้งานมีค่าเฉลี่ยรายข้ออยู่ในช่วง 3.90 - 4.56 โดยข้อที่ได้คะแนนต่ำสุด คือ มาตรการป้องกันบริเวณจุดเสี่ยงอันตราย เช่น จุดหนีบหรือชิ้นส่วนเคลื่อนที่ ($\overline{X}$ = 3.90, S.D. = 0.85)

ตารางที่ 1 การประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้

รายการประเมิน	$\overline{X}$	S.D.	การแปลผล
1. ความง่ายต่อการใช้งาน			
1.1. ขั้นตอนการใช้งานเครื่องมีความชัดเจนและเข้าใจได้ง่าย	4.53	0.62	ดีมาก
1.2. ตำแหน่งและการทำงานของปุ่มควบคุมมีความชัดเจน	4.62	0.49	ดีมาก
1.3. การวางกระป๋องในตำแหน่งอัดทำได้สะดวก	4.31	0.69	ดี
1.4. ผู้ใช้สามารถเรียนรู้การใช้งานได้รวดเร็วโดยไม่ต้องอาศัยทักษะเฉพาะ	4.65	0.48	ดีมาก
1.5. การใช้งานเครื่องโดยรวมมีความสะดวกและไม่ซับซ้อน	4.59	0.49	ดีมาก
2. ความปลอดภัยในการใช้งาน			
2.1 การใช้งานเครื่องโดยรวมมีความปลอดภัย	4.50	0.56	ดีมาก
2.2. มีมาตรการป้องกันบริเวณจุดเสี่ยงอันตราย (เช่น จุดหนีบ/ชิ้นส่วนเคลื่อนที่) อย่างเหมาะสม	3.90	0.85	ดี
2.3. ระบบหยุดการทำงาน/ปุ่มหยุดฉุกเฉินมีความชัดเจนและสามารถใช้งานได้ทันที	4.56	0.56	ดีมาก
2.4. การแก้ไขเหตุขัดข้อง (เช่น กระป๋องติดขัด) สามารถดำเนินการได้อย่างปลอดภัย	4.31	0.82	ดี
2.5. ความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บจากการใช้งานอยู่ในระดับต่ำ	4.50	0.56	ดีมาก
เฉลี่ยภาพรวม	**4.05**	**0.64**	**ดี**

อภิปรายผลการวิจัย

ร้อยละการลดขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันสูงขึ้นสอดคล้องกับหลักการทำงานของระบบนิวเมติกส์ที่แรงดันเป็นปัจจัยกำหนดแรงอัดที่ส่งผ่านกระบอกลมไปยังชุดกดอัด ส่งผลให้กระป๋องเกิดการเสียรูปถาวรและยุบตัวมากขึ้นเมื่อแรงอัดสูงขึ้น นอกจากนี้การที่ค่าร้อยละการลดขนาดเริ่มเปลี่ยนแปลงน้อยลงในช่วงแรงดัน 5.5 ถึง 6.5 บาร์ สะท้อนให้เห็นว่า เครื่องเข้าสู่ช่วงการทำงานที่ให้แรงอัดเพียงพอและผลการลดขนาดมีความคงที่มากขึ้น ซึ่งเหมาะต่อการกำหนดเป็นช่วงแรงดันใช้งานสำหรับการใช้งานจริง ความแตกต่างระหว่างกระป๋องขนาด 240 และ 490 มิลลิลิตร สะท้อนอิทธิพลของขนาดและลักษณะโครงสร้างกระป๋องต่อการเสียรูปภายใต้แรงอัดเดียวกัน โดยกระป๋องต่างขนาดตอบสนองต่อแรงอัดไม่เท่ากัน จึงควรกำหนดแรงดันใช้งานโดยพิจารณาร่วมกับขนาดกระป๋องเพื่อให้ได้ผลการลดขนาดที่เหมาะสมต่อการจัดเก็บและการขนส่งในขั้นตอนต้นทาง ทั้งนี้ แนวคิดการลดขนาดบรรจุภัณฑ์เพื่อเพิ่มความสะดวกต่อการรวบรวมและจัดการรีไซเคิลสอดคล้องกับงานต้นแบบเครื่องจัดการบรรจุภัณฑ์รีไซเคิลอัตโนมัติของ เอกรินทร์ วทัญญูเลิศสกุล และ คณะ (2562) และงานพัฒนาเครื่องทับแบนขวดน้ำพลาสติกและกระป๋องอลูมิเนียมของ ธนภรณ์ อินชูใจ และ คณะ (2568) ซึ่งต่างชี้ให้เห็นว่า การลดขนาดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเก็บและเอื้อต่อการจัดการวัสดุรีไซเคิลในระดับต้นทาง

เวลาเฉลี่ยต่อรอบลดลงเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้จากหลักการทำงานของระบบนิวเมติกส์ที่แรงดันเป็นตัวกำหนดแรงขับและอัตราการเคลื่อนที่ของกระบอกลม ส่งผลให้จังหวะอัดและคืนกลับเกิดได้รวดเร็วขึ้นเมื่อแรงดันสูงขึ้น ขณะเดียวกัน การที่เส้นกราฟเริ่มลดลงแบบช้าลงในช่วงแรงดันสูงสะท้อนว่า ระบบเข้าใกล้ข้อจำกัดด้านกลไกและลำดับการ

ทำงาน ทำให้การเพิ่มแรงดันเพิ่มเติมให้ผลลดเวลาแบบจำกัดมากขึ้น นอกจากนี้ กระป๋องขนาด 490 มิลลิลิตร ใช้เวลาต่อรอบมากกว่ากระป๋องขนาด 240 มิลลิลิตร สอดคล้องกับข้อเท็จจริงเชิงโครงสร้างที่วัสดุต่างขนาดมีพฤติกรรมการเสียรูปและแรงต้านทานต่อการยุบตัวต่างกัน จึงต้องใช้แรงและเวลามากกว่าเพื่อให้เกิดการยุบตัวในระดับเดียวกัน โดยแนวคิดนี้สอดคล้องกับงานพัฒนาเครื่องทับแบนขวดน้ำพลาสติกและกระป๋องอลูมิเนียมของ ธนภรณ์ อินชูใจ และ คณะ (2568) ที่รายงานการลดขนาดของบรรจุภัณฑ์หลายขนาดภายใต้เงื่อนไขการกดอัดและชี้ให้เห็นความแตกต่างของผลตามขนาดวัสดุ อีกทั้งการรายงานสมรรถนะของเครื่องต้นแบบด้วยตัวชี้วัดด้านเวลาและประสิทธิภาพการทำงานเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับงานของ วีรพล ทองคุปต์ และ คณะ (2563) ที่ใช้กรอบการทดสอบสมรรถนะของเครื่องย่อยกระป๋องอลูมิเนียมและรายงานผลเชิงประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบ รวมถึงงานเครื่องบีบอัดขยะขนาดเล็กของ อิษฎ์ รานอก และ คณะ (2567) ที่เน้นการเลือกเงื่อนไขการทำงานให้เหมาะสมเพื่อให้ระบบทำงานต่อเนื่องและใช้งานได้จริงในระดับชุมชน

เครื่องต้นแบบสามารถเพิ่มความหนาแน่นการจัดเก็บของวัสดุรีไซเคิลได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการลดขนาดช่วยลดช่องว่างระหว่างชิ้นงานและเพิ่มจำนวนชิ้นงานที่บรรจุได้ในภาชนะปริมาตรคงที่ โดยกระป๋องขนาด 490 มิลลิลิตรมีร้อยละการเพิ่มขึ้นสูงกว่า เพราะจำนวนก่อนอัดมีน้อยและถูกจำกัดด้วยปริมาตรเดิมมากกว่า เมื่ออัดแล้วจึงเห็นผลการเพิ่มจำนวนแบบก้าวกระโดด ข้อค้นพบนี้สอดคล้องกับงานของ ธนภรณ์ อินชูใจ และ คณะ (2568) ที่พัฒนาเครื่องทับแบนบรรจุภัณฑ์และรายงานประโยชน์ของการลดขนาดต่อการจัดเก็บและการจัดการรีไซเคิลในทางปฏิบัติ อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานต้นแบบเครื่องรับซื้อบรรจุภัณฑ์รีไซเคิลอัตโนมัติของ วนษา สินจังหรีด, สุระเจตน์ อ่อนฤทธิ์ และ เอกรินทร์ วทัญญูเลิศสกุล และ คณะ (2562) ที่ชี้ให้เห็น บทบาทของระบบต้นแบบในการสนับสนุนการรวบรวมวัสดุรีไซเคิลระดับต้นทาง ซึ่งการลดขนาดเป็นกลไกสำคัญในการลดภาระพื้นที่จัดเก็บและเพิ่มความสะดวกต่อการรวบรวม

นอกจากนี้ผลการประเมินสะท้อนว่า เครื่องต้นแบบมีความเหมาะสมด้านความง่ายต่อการใช้งานและการเรียนรู้ระบบ โดยคะแนนรายข้ออยู่ในระดับดีถึงดีมาก ขณะที่ประเด็นมาตรการป้องกันบริเวณจุดเสี่ยงอันตรายได้คะแนนต่ำสุดและมีความแปรปรวนสูงสุด แสดงว่า ผู้ใช้ยังมีความมั่นใจด้านการป้องกันจุดหนีบไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น ควรพัฒนาเพิ่มด้านความปลอดภัยเชิงวิศวกรรม เช่น การติดตั้งฝาครอบหรือการ์ดกั้นบริเวณจุดหนีบ การกำหนดระยะปลอดภัยในการป้อนและนำกระป๋องออก และการปรับตำแหน่งปุ่มหยุดให้เข้าถึงได้ง่ายเพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นและรองรับการใช้งานจริงในสถานศึกษาและชุมชน ทั้งนี้ ประเด็นการพัฒนาเครื่องต้นแบบเพื่อสนับสนุนการจัดการวัสดุรีไซเคิล (วีรพล ทองคุปต์ และ คณะ, 2563)

สรุป

งานวิจัยนี้สามารถออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบอัดกระป๋องอลูมิเนียมเพื่อสนับสนุนการจัดการขยะรีไซเคิลในระดับต้นทางได้สำเร็จ เครื่องต้นแบบปรับระบบขับเคลื่อนเป็นระบบนิวเมติกส์เพื่อให้ควบคุมแรงดันการอัดได้อย่างต่อเนื่องและปลอดภัย และบูรณาการระบบควบคุมกึ่งอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ร่วมกับเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุให้เริ่มรอบการอัดเมื่อมีกระป๋องอยู่ในตำแหน่งที่กำหนด ส่งผลให้เครื่องมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงและทำงานได้ต่อเนื่องภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด สำหรับการประเมินสมรรถนะภายใต้แรงดันลมอัด 4.0–6.5 บาร์ และกระป๋องขนาด 240 และ 490 มิลลิลิตร พบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันลม ร้อยละการลดขนาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเวลาต่อรอบมีแนวโน้มลดลง โดยช่วงแรงดัน 5.5–6.5 บาร์ ให้สมรรถนะเหมาะสมต่อการใช้งานจริง ค่าเฉลี่ยร้อยละการลดขนาดเท่ากับ 80.40 (S.D. = 1.25) และเวลาต่อรอบเฉลี่ย 4.62 วินาที อีกทั้งระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ นอกจากนี้การอัดกระป๋องช่วยเพิ่มความสามารถในการจัดเก็บในภาชนะมาตรฐาน 4 ลิตร อย่างชัดเจน โดยกระป๋อง 240 มิลลิลิตร เพิ่มจำนวนจัดเก็บจาก 44 เป็น 112 กระป๋อง (เพิ่มขึ้นร้อยละ 154.55) และกระป๋อง 490 มิลลิลิตร เพิ่มจาก 17 เป็น 73 กระป๋อง (เพิ่มขึ้นร้อยละ 329.41) สะท้อนว่าการลดขนาดช่วยเพิ่มความหนาแน่นการจัดเก็บและเอื้อต่อการรวบรวมและขนส่งวัสดุรีไซเคิลในระดับต้นทาง ส่วนผลการประเมินผู้ใช้จำนวน 32 คน อยู่ในระดับดี ($\overline{X}$ = 4.05, S.D. = 0.64) แสดงว่า เครื่องมีความง่ายในการใช้งานและความปลอดภัยโดยรวมที่น่าพอใจ ทั้งนี้ข้อเสนอแนะสำคัญ คือ ควรเสริมมาตรการป้องกันบริเวณจุดเสี่ยงอันตรายเพื่อเพิ่มความมั่นใจและรองรับการนำไปใช้งานจริงในชุมชนและสถานศึกษาอย่างยั่งยืน

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการนำผลไปใช้ประโยชน์

1. ควรนำเครื่องต้นแบบไปทดลองใช้งานจริงในสถานศึกษาและชุมชน เช่น จุดคัดแยกขยะหรือธนาคารขยะ เพื่อประเมินความเหมาะสมของกระบวนการใช้งานและผลต่อการลดพื้นที่จัดเก็บและการขนส่ง

2. ควรจัดทำคู่มือการใช้งานและการบำรุงรักษาเบื้องต้น พร้อมกำหนดแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัย เพื่อเพิ่มความมั่นใจและลดความเสี่ยงในการใช้งานจริง

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาการประยุกต์ใช้กับวัสดุรีไซเคิลประเภทอื่น เช่น ขวดพลาสติก เป็นต้น เพื่อขยายขอบเขตการใช้งานของเครื่อง

2. ควรพัฒนามาตรการความปลอดภัยเชิงวิศวกรรมเพิ่มเติม เช่น ฝาครอบบริเวณจุดเสี่ยงและระบบตัดการทำงานอัตโนมัติเมื่อเกิดความผิดปกติ เป็นต้น เพื่อรองรับการใช้งานในพื้นที่ที่มีผู้ใช้หลากหลาย

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2565). *แผนปฏิบัติการด้านการจัดการขยะของประเทศ ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2565 – 2570).* ค้นเมื่อ 24 กันยายน 2568, จาก https://eqmplatform.onep.go.th/public-plan/detail/1054

———————. (2566). *รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ประจำปี 2566.* ค้นเมื่อ 24 กันยายน 2568, จาก https://epo10.pcd.go.th/th/news/detail/175897

กระทรวงอุตสาหกรรม. (2568). *รายงานภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2567 และแนวโน้มปี 2568.* ค้นเมื่อ 12 พฤศจิกายน 2568, จาก https://www.industry.go.th/th/agencypr/15176

ชุติมา เกตุษา, ดิฐศิญะภัทร ฤกษ์ดี และ ชูเกียรติ์ อัคเนวุธ. (2568). การพัฒนาเครื่องบีบอัดขยะขวดน้ำและกระป๋องอัจฉริยะ. *ใน การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ เบญจมิตรวิชาการ ครั้งที่ 15*, 15 เมษายน 2568 (น. 409-422). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธนบุรี.

ธนภรณ์ อินชูใจ, ชัชฤทธิ์ บุญมีโพธิ์ และ กฤษฎา อ้นอ้าย. (2568). การพัฒนาเครื่องทับแบนขวดน้ำพลาสติกและกระป๋องอลูมิเนียม. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม*, 7(1), 51-60.

ปิยมน พัวพงศกร. (2561). *การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับลดขนาดกระป๋องอะลูมิเนียมแบบอัตโนมัติ* (รายงานการวิจัย). นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วนษา สินจังหรีด, สุระเจตน์ อ่อนฤทธิ์ และ เอกรินทร์ วทัญญูเลิศสกุล. (2562). ต้นแบบเครื่องรับซื้อบรรจุภัณฑ์รีไซเคิลสำหรับโครงการธนาคารขยะ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล*, 7(1), 7-14.

วีรพล ทองคุปต์, กฤษฎา พรหมแก้ว, ทรงยศ สารภาพ และ อำนาจ วันริโก. (2563). การสร้างและหาประสิทธิภาพเครื่องย่อยกระป๋องอลูมิเนียม. *วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์*, *12*(2), 124-136.

วิทวัส สุขทอง, เจตรินทร์ จันฉาย, ชัยวัฒน์ ทองศรีแก้ว, ทศพร พลเมือง, สรรเพชร ด้วงมา, อรินทร์ ทองแก้ว และ เสรี หนูหลง. (2568). การออกแบบและสร้างเตาโดยใช้น้ำมันเหลือทิ้งเป็นเชื้อเพลิง. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 15,* 28 กุมภาพันธ์ 2568 (น. BO1–9). นครศรีธรรมราช: วิทยาลัยเทคโนโลยีภาคใต้.

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2566). *รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2566.* ค้นเมื่อ 12 พฤศจิกายน 2568, จาก https://www.onep.go.th/book/soe2566/

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2563). *แนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมไทยตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน.* ค้นเมื่อ 26 กันยายน 2568, จาก https://www.oie.go.th/portals/files/study_report

เอกรินทร์ วทัญญูเลิศสกุล, วนษา สินจังหรีด และ สุระเจตน์ อ่อนฤทธิ์. (2562). ต้นแบบเครื่องรับซื้อบรรจุภัณฑ์รีไซเคิลอัตโนมัติ. *วารสารเทคโนโลยีไทย–ญี่ปุ่น,* 7(2), 7–14.

อิษฎ์ รานอก, ธาดา คำแดง และ วิจิตกร คำรัตน์. (2567). เครื่องบีบอัดขยะขนาดเล็กควบคุมด้วยระบบไฮดรอลิก. *วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,* 9(2), 173–175.