

บทความวิจัย (Research Article)

การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพลวัตของโพลีเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระทำ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ

เสาวนีย์ จันทร์สว่าง^{1,*}, อนุวัช แสนพงษ์¹, อภิชน มุ่งชู¹ และ ไฉไล ชาแสน¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: sawanee.ja@ksu.ac.th โทรศัพท์: 088-7981158

(รับบทความ: 17 มีนาคม 2569; แก้ไขบทความ: 16 มิถุนายน 2569; ตอรับบทความ: 1 กรกฎาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองเชิงพลวัตของโพลีเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระทำ และประยุกต์ใช้ผลลัพธ์เพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ โดยใช้โพลีเซลล์ร่วมกับโมดูลขยายสัญญาณ HX711 และบอร์ด Arduino Uno ในการเก็บข้อมูลแบบเวลาจริง (Real-Time) การทดลองดำเนินการโดยปล่อยวัตถุที่มีมวล 30, 50, 120 และ 250 กรัม ภายใต้เงื่อนไขการควบคุมตำแหน่งและความสูงให้คงที่ ผลการทดลองพบว่าสัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะการสั่นแบบลดทอนในช่วงทรานเซียนต์ และระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (Settling Time: T_s) เพิ่มขึ้นตามมวลของวัตถุอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 50.22, 65.14, 100.02 และ 145.03 มิลลิวินาที ตามลำดับ เพื่อหลีกเลี่ยงการซ้อนทับของสัญญาณ จึงกำหนดช่วงเวลาการปล่อยวัตถุขั้นต่ำเป็น $2T_s$ ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพและลดความคลาดเคลื่อนของระบบ นอกจากนี้พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างมวลของวัตถุและช่วงเวลาการปล่อยวัตถุมีลักษณะเชิงเส้น จึงสามารถพัฒนาสมการเชิงประจักษ์ได้เป็น $T_{\text{release}} = 0.832M + 86.46$ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ $R^2 = 0.982$ แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองในระดับสูง ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำพฤติกรรมการตอบสนองเชิงพลวัตของโพลีเซลล์มาใช้ในการกำหนดช่วงเวลาการทำงานของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากสัญญาณรบกวนและการซ้อนทับของสัญญาณ และเพิ่มความแม่นยำรวมถึงเสถียรภาพของระบบโดยรวม

คำสำคัญ: โพลีเซลล์ การตอบสนองเชิงพลวัต ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ ระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ การวัดแรงกระทำ

การอ้างอิงบทความ: เสาวนีย์ จันทร์สว่าง, อนุวัช แสนพงษ์, อภิชน มุ่งชู และ ไฉไล ชาแสน, "การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพลวัตของโพลีเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระทำเพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 4, หน้า 65-77, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

Dynamic Response Analysis of a Strain Gauge Load Cell under Impact Loading for Accuracy Improvement in an Automatic Bottle Sorting System

Sawanee Jansawang^{1,*}, Anuwat Saenpong¹, Aphichon Mungchu¹ and Chailai Sasen¹

¹ Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology

*Corresponding Author: sawanee.ja@ksu.ac.th, Tel: 088-7981158

(Received: March 17, 2026; Revised: June 16, 2026; Accepted: July 1, 2026)

Abstract

This study aims to investigate the dynamic response behavior of a strain gauge load cell under impact conditions and to apply the findings to improve the accuracy of an automatic sorting system. The experimental setup employed a load cell integrated with an HX711 signal amplification module and an Arduino Uno microcontroller for real-time data acquisition. Experiments were conducted by dropping objects with masses of 30, 50, 120, and 250 grams under controlled position and height conditions. The results showed that the output signal exhibited damped oscillation behavior during the transient period, and the settling time (T_s) increased significantly with the mass of the object. The average settling times for 30, 50, 120, and 250 grams were 50.22, 65.14, 100.02, and 145.03 milliseconds, respectively. To prevent signal overlapping in continuous measurements, the minimum release time was defined as approximately $2T_s$, which improved system stability and reduced measurement errors. Furthermore, a linear relationship between object mass and release time was observed, leading to the development of an empirical calibration equation $T_{\text{release}} = 0.832M + 86.46$ with a coefficient of determination $R^2 = 0.982$, indicating a high level of model accuracy. The findings demonstrate that the dynamic response characteristics of the load cell can be effectively utilized to determine optimal timing in automatic sorting systems, thereby reducing noise effects and signal overlap while enhancing overall system accuracy and stability.

Keywords: Load Cell, Dynamic Response, Settling Time, Automatic Sorting System, Impact Measurement

Please cite this article as: S. Jansawang, A. Saenpong, A. Mungchu and C. Sasen, "Dynamic Response Analysis of a Strain Gauge Load Cell under Impact Loading for Accuracy Improvement in an Automatic Bottle Sorting System," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 4, pp. 65-77, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ในภาคอุตสาหกรรมปัจจุบัน ระบบคัดแยกอัตโนมัติมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพ ความรวดเร็ว และความแม่นยำของกระบวนการผลิต โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม และบรรจุภัณฑ์ ซึ่งมักใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์หลักในการจำแนกวัตถุ เนื่องจากสามารถตรวจวัดได้โดยตรงและมีความน่าเชื่อถือสูง โหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจจึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความไวและความแม่นยำสูง และสามารถทำงานร่วมกับระบบประมวลผลดิจิทัล เช่น HX711 และ Arduino Uno ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริง โดยเฉพาะระบบที่ปล่อยวัตถุจากที่สูงลงสู่แท่นชั่ง (เช่น ระบบสายพานลำเลียงหรือระบบแรงโน้มถ่วง) มักเกิดแรงกระแทกในช่วงเวลาสั้น ส่งผลให้โหลดเซลล์แสดงพฤติกรรมการตอบสนองเชิงพลวัตในรูปของสัญญาณทรานเซียนต์ ซึ่งประกอบด้วยค่าสัญญาณพิกการันต์สเฟีย และการลดทอนก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ พฤติกรรมดังกล่าวอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนหากอ่านค่าทันทีหลังการกระแทก นอกจากนี้ ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (Settling Time) ยังเป็นปัจจัยสำคัญ เนื่องจากหากระบบยังไม่กลับสู่ศูนย์ก่อนที่วัตถุชิ้นถัดไปจะมาถึง จะก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนสะสมและลดความน่าเชื่อถือของระบบ

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมของโหลดเซลล์ในสภาวะแรงคงที่หรือเทคนิคการกรองสัญญาณ [1,2] ขณะที่การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตภายใต้แรงกระแทกจริงและการสร้างความสัมพันธ์กับมวลของวัตถุยังมีอยู่อย่างจำกัด [3-7] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการตอบสนองเชิงพลวัตของโหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระแทกจากการปล่อยวัตถุที่มีมวลแตกต่างกัน โดยเน้นการวิเคราะห์ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (T_s) และสร้างความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ระหว่างมวลของวัตถุกับ T_s

เพื่อใช้กำหนดช่วงเวลาการปล่อยวัตถุที่เหมาะสมในระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ การศึกษานี้จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการซ้อนทับของสัญญาณ เพิ่มความแม่นยำ และยกระดับเสถียรภาพของระบบภายใต้สภาวะการทำงานจริง

องค์ความรู้ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ การสร้างความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ระหว่างมวลของวัตถุกับระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (T_s) ภายใต้แรงกระแทกจริง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดช่วงเวลาการทำงานของระบบคัดแยกอัตโนมัติได้โดยตรง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ทบทวนหลักการทำงานของโหลดเซลล์และพฤติกรรมการตอบสนองภายใต้แรงกระแทกแบบพลวัต รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบคัดแยกอัตโนมัติและกำหนดแนวทางการทดลอง

2.1 หลักการทำงานของโหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจ

โหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจ (Strain Gauge Load Cell) เป็นเซนเซอร์ที่แปลงแรงกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสเตรนเกจเมื่อเกิดความเครียด (Strain) [1,3] เมื่อวัตถุกระทำแรงต่อโหลดเซลล์ โครงสร้างยืดหยุ่นภายในจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างน้อย ทำให้ความยาวและพื้นที่หน้าตัดของตัวนำในสเตรนเกจเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไปตามหลัก Gauge Factor [2,8]

สเตรนเกจมักถูกติดตั้งในรูปแบบวงจร Wheatstone Bridge เพื่อเพิ่มความไวและลดสัญญาณรบกวน [9] เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตมีขนาดเล็ก จึงจำเป็นต้องใช้โมดูล HX711 ซึ่งเป็นตัว

บทความวิจัย (Research Article)

ขยายสัญญาณและแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบ 24 บิต ก่อนส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น Arduino Uno [1,10] หลักการดังกล่าวทำให้โหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจมีทั้งความแม่นยำสูงและความเป็นเชิงเส้นที่ดี เหมาะสำหรับงานวัดน้ำหนักทั้งแบบคงที่และแบบพลวัต

2.2 พฤติกรรมของโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระแทก

ภายใต้สภาวะแรงกระแทก (Impact Loading) โหลดเซลล์จะแสดงพฤติกรรมเชิงพลวัตที่แตกต่างจากแรงคงที่ (Static Load) อย่างมีนัยสำคัญ [4,5] เมื่อวัตถุตกกระทบจะเกิดแรงกระแทกแบบฉับพลันทำให้สัญญาณเอาต์พุตพุ่งขึ้นถึงค่าสูงสุด (Peak Signal) ที่สูงกว่าน้ำหนักจริง จากนั้นสัญญาณจะเกิดการแกว่งแบบลดทอน (Damped Oscillation) ก่อนค่อย ๆ เข้าสู่สถานะคงที่ [7,11] ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อพฤติกรรมนี้ ได้แก่ คุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างรองรับ ความแข็งของวัสดุ และอัตราการดูดซับพลังงาน [9] งานวิจัยพบว่าระยะเวลาในการนิ่งตัวของสัญญาณ (Settling Time) ขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานจลน์ที่ถ่ายโอนเข้าสู่ระบบ [5] หากอ่านค่าก่อนที่สัญญาณจะนิ่งสนิท จะก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในระบบคัดแยกอัตโนมัติที่ต้องการความเร็วและความต่อเนื่อง [7]

2.3 ผลของมวลวัตถุต่อการตอบสนองของสัญญาณ

มวลของวัตถุเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อขนาดแรงกระแทกและพฤติกรรมของสัญญาณ [12] แรงกระแทกมีความสัมพันธ์กับโมเมนตัม ยิ่งมวลมากยิ่งก่อให้เกิดพลังงานจลน์สูง ส่งผลให้แอมพลิจูดของสัญญาณพีกและระยะเวลาการแกว่งเพิ่มขึ้น [3,6] จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าระยะเวลาการคืนค่าเป็น

ศูนย์ (Zero Recovery Time) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับมวลของวัตถุ [11] เมื่อมวลเพิ่มขึ้น โครงสร้างจะเกิดการสั่นสะเทือนรุนแรงและใช้เวลานานขึ้นในการลดทอนสัญญาณ [6] ความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปสร้างสมการเปรียบเทียบเพื่อกำหนดช่วงเวลาการทำงานของระบบได้

2.4 ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ของโหลดเซลล์

ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (Set Zero Time หรือ Settling Time) คือระยะเวลาที่สัญญาณใช้ในการกลับสู่ค่าอ้างอิงศูนย์หลังการปลดโหลด [4,5] หากระบบปล่อยวัตถุขึ้นถัดไปก่อนที่สัญญาณจะคืนศูนย์สมบูรณ์ จะเกิดสัญญาณตกค้างและความคลาดเคลื่อนสะสม [6,7] ปัจจัยที่ส่งผล ได้แก่ มวลของวัตถุ โครงสร้างรองรับ และคุณสมบัติของวัสดุซับแรง [8] งานวิจัยชี้ว่าการกำหนดระยะเวลาหน่วงอย่างน้อย $2T_s$ (โดยที่ T_s คือ Settling Time) สามารถลดการซ้อนทับของสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการวัดในสภาวะคงที่หรือการกรองสัญญาณ [1,2] ขณะที่การศึกษาพฤติกรรมของโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระแทกจริงและการสร้างความสัมพันธ์เชิงพลวัตยังมีจำกัด [3,6] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมดังกล่าวเพื่อสร้างความสัมพันธ์เชิงประจักษ์สำหรับกำหนดช่วงเวลาการทำงานที่เหมาะสมของระบบคัดแยกอัตโนมัติ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำ ลดความคลาดเคลื่อนสะสม และยกระดับประสิทธิภาพของระบบในสภาวะจริง

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระแทกและการคืนค่าเป็นศูนย์ โดยจำลองสภาวะ

บทความวิจัย (Research Article)

การทำงานของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ กระบวนการดำเนินงานประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของโพลีเซลล์

ความแม่นยำของการวัดน้ำหนักแบบพลวัตได้รับอิทธิพลจากทั้งปัจจัยทางกลและทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยโพลีเซลล์สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองมวล-สปริง-แดมเปอร์ ซึ่งเมื่อเกิดแรงกระทำจะทำให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดการสั่นแบบลดทอนและมีค่าสัญญาณฟิคในช่วงเริ่มต้น ส่งผลให้การอ่านค่าในทันทีอาจเกิดความคลาดเคลื่อน

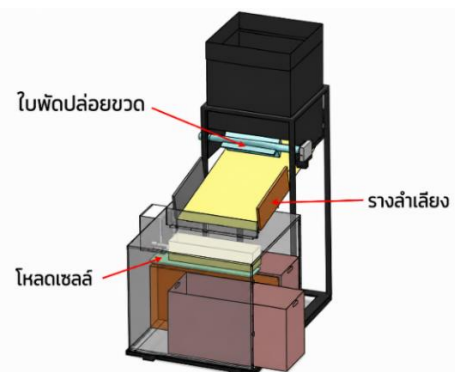
โครงสร้างแท่นรองรับเป็นปัจจัยสำคัญต่อเสถียรภาพของสัญญาณ หากมีความแข็งแรงไม่เพียงพอจะเกิดการสั่นสะเทือนต่อเนื่อง ทำให้แรงที่ส่งถึงโพลีเซลล์ไม่คงที่ ขณะเดียวกันมวลของวัตถุที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงกระทำและระดับการสั่นสะเทือนของระบบสูงขึ้น ส่งผลให้สัญญาณฟิคมีค่ามากขึ้น พารามิเตอร์สำคัญในการประเมินผลการวัดได้แก่ ระยะเวลาการนิ่งตัว (Settling Time) และระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (Zero Recovery Time) เนื่องจากการอ่านค่าในช่วงที่สัญญาณยังไม่คงที่อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนสะสม โดยเฉพาะในระบบที่ทำงานต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนภายนอก เช่น สนามแม่เหล็กไฟฟ้า แหล่งจ่ายไฟ และอุณหภูมิแวดล้อม

ดังนั้นการศึกษาค่าปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองของโพลีเซลล์จึงมีความสำคัญต่อการออกแบบการทดลอง การกำหนดตัวแปรควบคุม และการวางแผนการเก็บข้อมูล เพื่อให้ผลการทดลองมีความถูกต้องและสะท้อนสถานะการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบสำหรับการทดลองมีขนาด $80 \times 100 \times 160$ เซนติเมตร ออกแบบเพื่อรองรับระบบลำเลียง ระบบชั่งน้ำหนัก และกลไกคัดแยกวัตถุ โดยใช้โครงสร้างเหล็กซึ่งมีความแข็งแรงและช่วยลดการสั่นสะเทือนที่อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของสัญญาณจากโพลีเซลล์ โครงสร้างแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนลำเลียงและปล่อยวัตถุ ส่วนแท่นชั่งน้ำหนัก และส่วนกลไกคัดแยกวัตถุ

ส่วนลำเลียงและปล่อยวัตถุประกอบด้วยถังบรรจุและกลไกใบพัดสำหรับควบคุมการปล่อยวัตถุทีละชิ้น เพื่อลดการชนกันและควบคุมแรงกระทำให้สม่ำเสมอ วัตถุเคลื่อนที่ผ่านรางเอียงที่มุม 30 องศา เพื่อควบคุมความเร็วและตำแหน่งการตกกระทบให้คงที่ ช่วยเพิ่มความเที่ยงตรงและความสามารถในการเปรียบเทียบผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องคัดแยกขวดอัตโนมัติที่ออกแบบ

ส่วนแท่นชั่งน้ำหนักติดตั้งโพลีเซลล์ชนิดสเตรนเกจในแนวรับแรงโดยตรง พร้อมวัสดุซับแรงกระทำอย่างสังเคราะห์ Neoprene (CR) หนา 2 เซนติเมตร เพื่อลดแรงกระทำ การสั่นสะเทือน และช่วยให้สัญญาณกลับสู่ค่าอ้างอิงได้รวดเร็วและสม่ำเสมอ

บทความวิจัย (Research Article)

ขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดความเสียหายและยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์

ส่วนกลไกคัตแยกใช้เซอร์โวมอเตอร์ควบคุมการหมุนของใบพัดเพื่อกำหนดทิศทางวัตถุตามผลการประมวลผล โดยมีตัวควบคุมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าและวงจรควบคุม เพื่อป้องกันความเสียหาย ลดสัญญาณรบกวน และเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน



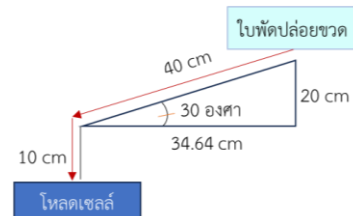
รูปที่ 2 เครื่องคัตแยกขวดอัตโนมัติ

โดยรวมเครื่องต้นแบบสามารถจำลองสภาวะการทำงานจากระบบคัตแยกขวดอัตโนมัติได้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของโหลตเซลล์ภายใต้แรงกระแทก รวมถึงการพัฒนาและปรับปรุงระบบในอนาคต ดังแสดงในรูปที่ 2

3.3 การคำนวณแรงที่กระทำต่อโหลตเซลล์

ในการออกแบบเครื่องทดสอบ ได้วิเคราะห์น้ำหนักที่กระทำต่อโหลตเซลล์จากการปล่อยวัตถุ โดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่ภายใต้แรงโน้มถ่วงเพื่อประเมินความเร็วขณะกระทบและน้ำหนักพลวัตที่เกิดขึ้น ข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการ

ออกแบบโครงสร้างและการเลือกโหลตเซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 มุมของรางลำเลียง

ความเร็วของวัตถุขณะกระทบแท่นรองรับ (v) คำนวณจากสมการการเคลื่อนที่ของวัตถุตกอิสระภายใต้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ดังแสดงในสมการที่ 1

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

โดยที่

v คือ ความเร็วของวัตถุขณะกระทบ, (เมตรต่อวินาที)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง มีค่าเท่ากับ 9.81, (เมตรต่อวินาทียกกำลังสอง)

h คือ ความสูงที่ปล่อยวัตถุ, (เมตร)

เมื่อทราบค่าความเร็วแล้ว ค่าแรงกระแทกเฉลี่ยที่กระทำต่อโหลตเซลล์ (F) สามารถคำนวณได้จากหลักการงานและพลังงาน ดังแสดงในสมการที่ 2

บทความวิจัย (Research Article)

$$F = \frac{mv^2}{2s} \quad (2)$$

โดยที่

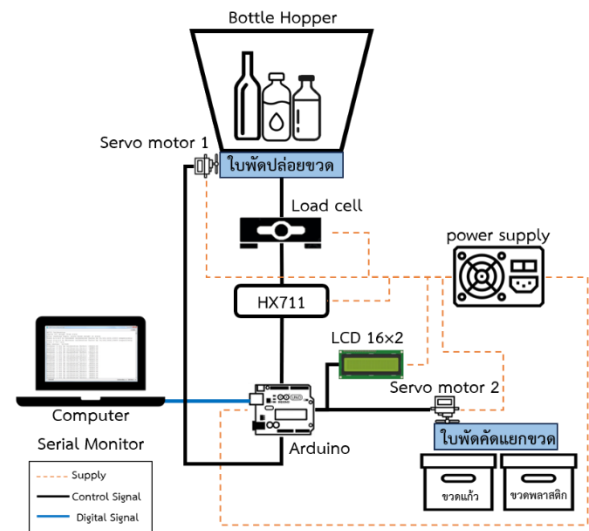
- F คือ แรงกระแทกที่กระทำต่อโหลดเซลล์, (นิวตัน)
- m คือ มวลของวัตถุที่ปล่อยตก, (กิโลกรัม)
- v คือ ความเร็วของวัตถุขณะกระทบ, (เมตรต่อวินาที)
- s คือ ระยะหยุดหรือระยะยุบตัวของระบบขณะเกิดการกระทบ, (เมตร)

ผลการคำนวณภายใต้เงื่อนไขการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงกระแทกมีค่าสูงกว่าน้ำหนักสถิตหลายเท่า ดังนั้นจึงเลือกใช้โหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจพิกัด 5,000 กรัม ซึ่งมีพิกัดรับน้ำหนักสูงกว่าน้ำหนักสูงสุดของวัตถุทดลอง (250 กรัม) อย่างเพียงพอ สามารถรองรับแรงกระแทกได้อย่างปลอดภัย และยังคงมีความละเอียดเหมาะสมสำหรับการวัดน้ำหนักในระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรม การตอบสนองเชิงพลวัตของโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระแทกจากการปล่อยวัตถุ โดยใช้โหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจพิกัด 5,000 กรัม ร่วมกับโมดูล HX711 และ Arduino Uno สำหรับบันทึกข้อมูลแบบเวลาจริง

โครงสร้างทางกลและการเชื่อมต่อของระบบทดลอง ประกอบด้วย รางปล่อยวัตถุแบบเอียงมุม 30 องศา วัตถุทดลอง (ขวด) แท่นซึ่งพร้อมโหลดเซลล์สเตรนเกจ วัสดุซับแรงกระแทก Neoprene โมดูล HX711 บอร์ด Arduino Uno และ การเชื่อมต่อ กับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูล แสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพโครงสร้างของชุดทดลองการวัดพฤติกรรมโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระแทก

วัตถุทดลองเป็นขวดพลาสติกและขวดแก้ว 4 ระดับน้ำหนัก (30, 50, 120 และ 250 กรัม) โดยกำหนดตำแหน่งและความสูงในการปล่อยคงที่ การทดลองดำเนินการซ้ำ 100 ครั้งต่อระดับ สัญญาณจากโหลดเซลล์ถูกประมวลผลผ่าน HX711 และ Arduino Uno แล้วบันทึกผ่าน Serial Monitor ข้อมูลถูกวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และแนวโน้มของสัญญาณ ขั้นตอนการทดลองประกอบด้วย

- 1) เตรียมตัวอย่างขวด 4 ระดับน้ำหนัก ระดับละ 100 ตัวอย่าง
- 2) เปิดโปรแกรม Serial Monitor
- 3) บ้อนขวดเข้าสู่ระบบ
- 4) เริ่มการทำงานของระบบ
- 5) ปล่อยขวดจากตำแหน่งที่กำหนดให้ตกกระทบบนแท่นซึ่ง
- 6) บันทึกข้อมูลสัญญาณ
- 7) ทำการทดลองซ้ำจนครบ 100 ครั้งในแต่ละระดับ
- 8) วิเคราะห์ข้อมูล

เสาวนีย์ จันทร์สว่าง และคณะ, การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพลวัตของโหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระแทก เพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ

บทความวิจัย (Research Article)

การทดลองนี้เลือกใช้วิธีปล่อยวัตถุจากความสูง (Free-Fall Impact) เพื่อจำลองสภาวะการทำงานจริงของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติที่ใช้วิธีลำเลียงด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งแตกต่างจากวิธี Dynamic Load แบบควบคุมด้วยเครื่องจักรในงานวิจัยส่วนใหญ่ วิธีการนี้ช่วยให้ผลการทดลองสะท้อนพฤติกรรมและแรงกระทบในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมได้อย่างใกล้เคียง และสอดคล้องกับหลักการทดสอบแบบ Drop Test ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมเซนเซอร์

3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการการวิจัย

ข้อมูลการทดลองถูกจัดเก็บในรูปแบบข้อมูลเชิงเวลา (Time-Series Data) ซึ่งประกอบด้วยค่าความเร็ว แรงกระทบ ค่าสัญญาณฟิค และระยะเวลาการคืนค่าเสถียรของโหลดเซลล์ โดยใช้โหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจพิคัด 0–5,000 กรัม ที่มีความแม่นยำ $\pm 0.05\%$ FS ร่วมกับโมดูลขยายสัญญาณ HX711 ซึ่งมีอัตราการสุ่มข้อมูลสูงสุด 80 Hz และความละเอียด 24 บิต และใช้บอร์ด Arduino Uno ที่มีความถี่สัญญาณนาฬิกา 16 MHz เป็นหน่วยประมวลผลหลักของระบบ และเพื่อรองรับแรงกระทบจากการตกของวัตถุ ได้ติดตั้งวัสดุดูดซับแรงกระทบชนิดยางสังเคราะห์ Neoprene (CR) ความหนา 2 เซนติเมตร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$ ข้อมูลที่ได้ถูกตรวจสอบค่าผิดปกติ (Outliers) และวิเคราะห์ทางสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) ช่วงความเชื่อมั่น 95% และค่าความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability Error) เพื่อประเมินความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบ โดยนำเสนอผลในรูปแบบตารางและกราฟ พร้อมใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ในการแปลผลการทดลอง

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

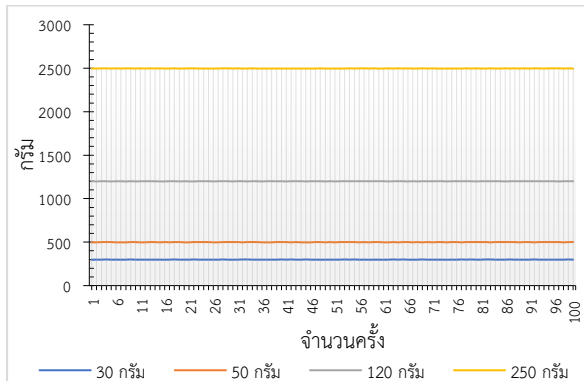
การทดลองนี้ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของโหลดเซลล์ภายใต้แรงกระทบจากการปล่อยวัตถุ 4 ระดับน้ำหนัก ได้แก่ 30, 50, 120 และ 250 กรัม ภายใต้เงื่อนไขคงที่ โดยวิเคราะห์ค่าสัญญาณฟิค ระยะเวลาการนิ่งตัว และระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญต่อความแม่นยำและการกำหนดช่วงเวลาการทำงานของระบบคัดแยกอัตโนมัติ เพื่อลดการซ้อนทับของสัญญาณ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

4.1 วิเคราะห์น้ำหนักที่มากระทำต่อโหลดเซลล์ช่วงเริ่มต้น

จากการทดลองวัตถุ 4 ระดับน้ำหนัก ได้แก่ 30, 50, 120 และ 250 กรัม โดยทำซ้ำ 100 ครั้งต่อระดับ พบว่าค่าเฉลี่ยสูงสุดที่โหลดเซลล์ตรวจวัดได้มีค่า 299.58, 499.17, 1198.79 และ 2497.64 กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5 ค่าที่วัดได้สูงกว่าน้ำหนักจริงเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากน้ำหนักพลวัต (Dynamic Load) ซึ่งรวมผลของพลังงานจลน์ขณะกระทบ ส่งผลให้เกิดแรงตอบสนองที่สูงกว่าน้ำหนักสถิต

เมื่อพิจารณาผลการทดลองตลอด 100 รอบ พบว่าค่าที่ตรวจวัดได้มีความคงที่และไม่ปรากฏแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างต่อเนื่อง (Drift) โดยข้อมูลมีการกระจายตัวต่ำและไม่พบค่าผิดปกติ (Outlier) ที่ส่งผลต่อแนวโน้มของข้อมูล ค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับน้ำหนักมีความสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นว่าระบบมีความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability) อยู่ในระดับดี

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 5 ค่าสูงสุดที่โหลดเซลล์ตรวจวัดได้ในช่วงเริ่มต้นการกระทบ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) อยู่ในช่วง 0.51–0.76 กรัม และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) อยู่ระหว่าง 0.02–0.26% เท่านั้น ขณะที่ค่าความสามารถในการวัดซ้ำ (Repeatability Error) มีค่าเพียง 0.08–1.02% และช่วงความเชื่อมั่น 95% (95% CI) ของทุกระดับน้ำหนักมีช่วงแคบ สะท้อนว่าระบบมีความเสถียรสูง และให้ผลการวัดที่สม่ำเสมอตลอดการทดลอง

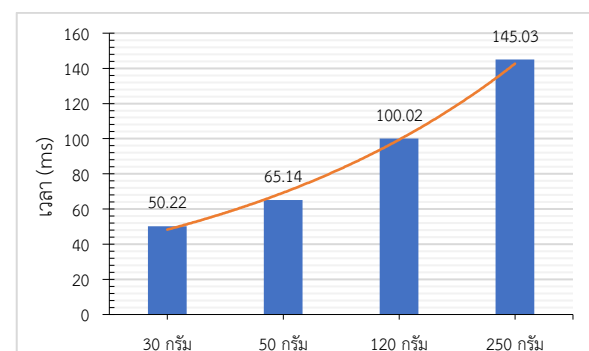
นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างมวลของวัตถุกับค่าสูงสุดที่โหลดเซลล์ตรวจวัดได้ โดยเมื่อมวลของวัตถุเพิ่มขึ้น ค่าสูงสุดของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจาก 299.58 กรัม สำหรับวัตถุมวล 30 กรัม เป็น 2,497.64 กรัม สำหรับวัตถุมวล 250 กรัม ซึ่งสะท้อนอิทธิพลของพลังงานจลน์ที่เพิ่มขึ้นตามมวลของวัตถุ [3,6,12] ในทางกลับกัน วัตถุที่มีมวลน้อยให้ค่าการตอบสนองและการสั่นสะเทือนของระบบต่ำกว่า ส่งผลให้แอมพลิจูดของสัญญาณลดลงและเข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วขึ้น [6,11]

ผลการทดลองยังยืนยันว่าโหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจพิกัด 5,000 กรัม มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งาน เนื่องจากค่าการตอบสนองสูงสุดเฉลี่ยที่ตรวจวัดได้จากวัตถุมวล 250 กรัม เท่ากับ 2,497.64 กรัม

ซึ่งคิดเป็น 49.95% ของพิกัดรับน้ำหนักสูงสุดของโหลดเซลล์ จึงยังมีช่วงความปลอดภัยเพียงพอสำหรับรองรับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในการทดลองโดยไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาและยืนยันว่าโหลดเซลล์ที่เลือกใช้งานสามารถให้ผลการวัดที่มีความแม่นยำ เสถียรภาพ และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติภายใต้สภาวะการทำงานจริง [3,12]

4.2 วิเคราะห์ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ของสัญญาณ

ผลการทดลองพบว่าภายหลังการยกวัตถุออกจากแท่นชั่ง สัญญาณจากโหลดเซลล์เกิดการสั่นแบบลดทอน (Damped Oscillation) ก่อนกลับเข้าสู่ค่าอ้างอิงศูนย์ ซึ่งเป็นลักษณะการตอบสนองของระบบอันดับสอง (Second-Order System) ภายใต้แรงกระแทก โดยวัตถุมวล 30, 50, 120 และ 250 กรัม มีค่า Settling Time เฉลี่ยเท่ากับ 50.22, 65.14, 100.02 และ 145.03 มิลลิวินาที ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมวลของวัตถุเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ของระบบจะเพิ่มขึ้นตามอย่างชัดเจน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลของวัตถุและระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (T_s) ของโหลดเซลล์

เสาวนีย์ จันทร์สว่าง และคณะ, การวิเคราะห์การตอบสนองเชิงพลวัตของโหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระแทก เพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ

บทความวิจัย (Research Article)

กราฟแสดงค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 100 ครั้ง ต่อระดับมวล (รวม 400 ชุดข้อมูล) โดยใช้โมดูล HX711 ที่มีอัตราการสุ่มข้อมูล 80 Hz (ทุก 12.5 มิลลิวินาที) ทำให้ข้อมูลมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) ส่วนเส้นแนวโน้ม (Trend Line) แสดงความสัมพันธ์โดยรวมระหว่างมวลของวัตถุกับ T_s

ในการศึกษานี้กำหนดให้ T_s เป็นช่วงเวลาที่สัญญาณเข้าสู่ช่วง $\pm 5\%$ ของค่าอ้างอิงสุดท้าย ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานที่นิยมใช้ในการประเมินเสถียรภาพของระบบทางวิศวกรรม [4,7] พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองมวล-สปริง-แดมเปอร์ (Mass-Spring-Damper System) โดยเมื่อมวลเพิ่มขึ้น พลังงานจลน์ที่เข้าสู่ระบบจะสูงขึ้น ส่งผลให้แอมพลิจูดการสั่นเพิ่มขึ้นและใช้เวลานานขึ้นในการสลายพลังงาน [6,7] นอกจากนี้ระบบมีลักษณะเป็น Underdamped System ซึ่งเกิดการสั่นก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ และเมื่อมวลเพิ่มขึ้น ความถี่ธรรมชาติของระบบจะลดลง ส่งผลให้ค่า T_s เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับทฤษฎีระบบเชิงกลและงานวิจัยที่ผ่านมา [4,6,7]

ดังนั้นค่า T_s จึงเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการออกแบบระบบคัดแยกอัตโนมัติ เนื่องจากการปล่อยวัตถุใหม่ก่อนที่สัญญาณจะเข้าสู่สภาวะคงที่ อาจทำให้เกิดการซ้อนทับของสัญญาณและเพิ่มความคลาดเคลื่อนในการวัด ส่งผลต่อความแม่นยำและเสถียรภาพของระบบโดยรวม [5,6]

4.3 วิเคราะห์ระยะเวลาที่เหมาะสมของการปล่อยวัตถุ

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 พบว่าระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (T_s) เพิ่มขึ้นตามมวลของวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 6 จึงนำข้อมูลทั้งหมด 400 ชุด (4 ระดับน้ำหนัก $\times$ 100 ครั้ง) มาสร้างความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) สมการ 3 ที่ได้ คือ

$$T_s = 0.416M + 43.23 \quad (3)$$

โดยที่

T_s คือ ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ของสัญญาณ, (มิลลิวินาที)

M คือ มวลของวัตถุ, (กรัม)

การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA พบว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและมีนัยสำคัญสูง ($F = 10,874.6$, $p < 0.001$) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ $R^2 = 0.982$ แสดงว่ามวลของวัตถุสามารถอธิบายความแปรปรวนของ T_s ได้ถึง 98.2% แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อทดสอบนัยสำคัญของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้น

Source	Regression	Residual	Total
DF	1	398	399
SS	458,723.8	16,792.2	475,516.0
MS	458,723.8	42.19	-
F-value	10,874.6	-	-
p-value	< 0.001	-	-

หมายเหตุ: การวิเคราะห์ดำเนินการจากข้อมูลทั้งหมด 400 ชุด (4 ระดับน้ำหนัก $\times$ 100 ครั้ง)

เพื่อป้องกันการซ้อนทับของสัญญาณระหว่างวัตถุชิ้นปัจจุบันกับชิ้นถัดไป จึงกำหนดระยะเวลาการปล่อยวัตถุ (T_{release}) ไม่น้อยกว่า $2T_s$ ดังแสดงในสมการที่ 4

$$T_{\text{release}} = 2T_s \quad (4)$$

บทความวิจัย (Research Article)

โดยที่

T_{release} คือ ช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปล่อยวัตถุ, (มิลลิวินาที)

เมื่อนำสมการที่ 3 มาแทนค่าในสมการที่ 4 จะได้สมการสำหรับคำนวณระยะเวลาการปล่อยวัตถุโดยตรง ดังแสดงในสมการที่ 5

$$T_{\text{release}} = 0.832M + 86.46 \quad (5)$$

สมการนี้ช่วยให้ระบบสามารถคำนวณช่วงเวลาที่เหมาะสมของการปล่อยวัตถุตามมวลที่แตกต่างกันได้โดยอัตโนมัติ ซึ่งจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนสะสมและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองเชิงพลวัตของโหลดเซลล์ชนิดสเตรนเกจภายใต้แรงกระแทก และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างมวลของวัตถุกับระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (T_s) เพื่อกำหนดช่วงเวลาการทำงานที่เหมาะสมของระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ ผลการทดลองที่สำคัญสรุปได้ดังนี้

1) ค่าน้ำหนักที่โหลดเซลล์ตรวจวัดได้มีค่าเฉลี่ย 299, 499, 1,199 และ 2,497 กรัม สำหรับวัตถุมวล 30, 50, 120 และ 250 กรัม ตามลำดับ ค่าที่ได้สูงกว่าน้ำหนักสถิตเนื่องจากอิทธิพลของพลังงานจลน์ขณะเริ่มต้น และยังคงอยู่ในพิสัยรับน้ำหนักของโหลดเซลล์ 5,000 กรัม แสดงถึงความเหมาะสมของอุปกรณ์ [3,12]

2) ระยะเวลาการคืนค่าเป็นศูนย์ (T_s) เพิ่มขึ้นตามมวลของวัตถุ โดยมีค่าเฉลี่ย 50.22, 65.14,

100.02 และ 145.03 มิลลิวินาที ตามลำดับ ระบบแสดงพฤติกรรมแบบ Underdamped ของแบบจำลองมวล-สปริง-แดมเปอร์ โดยเมื่อมวลเพิ่มขึ้น พลังงานจลน์ที่เข้าสู่ระบบสูงขึ้น ส่งผลให้แอมพลิจูดการสั่นเพิ่มและใช้เวลานานขึ้นในการเข้าสู่สมดุล [6,7]

3) พบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างมวลกับ T_s สามารถสร้างสมการ $T_s = 0.416M + 43.23$ และสมการสำหรับช่วงเวลาการปล่อยวัตถุ $T_{\text{release}} = 0.832M + 86.46$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.982 ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองในระดับสูง การกำหนดช่วงเวลาปล่อยวัตถุขั้นต่ำที่ $2T_s$ ช่วยลดการซ้อนทับของสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5,6]

งานวิจัยนี้สามารถสร้างความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ระหว่างมวลของวัตถุกับพฤติกรรมเชิงพลวัตของโหลดเซลล์ได้อย่างชัดเจน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบคัดแยกขวดอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ลดความคลาดเคลื่อนสะสม และยกระดับเสถียรภาพของระบบภายใต้สภาวะการทำงานจริง

6. ข้อเสนอแนะ

- 1) เพิ่มช่วงและจำนวนระดับน้ำหนักของวัตถุเพื่อปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลอง
- 2) ประยุกต์ใช้เทคนิคกรองสัญญาณเพื่อลดผลกระทบจากแรงกระแทกและการสั่นสะเทือน
- 3) พัฒนาระบบควบคุมการปล่อยวัตถุแบบปรับตัวตามมวล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบคัดแยกอัตโนมัติ

บทความวิจัย (Research Article)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Avia Semiconductor, “HX711 24-bit analog-to-digital converter (ADC) for weigh scales,” datasheet, ver. 2.0. [Online]. Available: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf
- [2] M. N. Annisa, F. N. Fadilla, M. Luthfi, S. Hidayat, and C. A. Rosalia, “Rancang Bangun Sistem Load Cell untuk Pengujian Beban Tekan Berbasis Arduino,” in *Proc. 16th Industrial Research Workshop and National Seminar (IRWNS)*, Bandung, Indonesia, Jul. 2025, pp. 303–309, doi: 10.35313/irwns.v16i1.6676.
- [3] O. S. Al-Dahiree et al., “Design and Shape Optimization of Strain Gauge Load Cell for Axial Force Measurement for Test Benches,” *Sensors*, vol. 22, no. 19, Art. no. 7508, 2022, doi: 10.3390/s22197508.
- [4] G. I. Zarate Garnica, E. O. L. Lantsoght, and Y. Yang, “Monitoring structural responses during load testing of reinforced concrete bridges: a review,” *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 18, no. 10–11, pp. 1558–1580, 2022, doi: 10.1080/15732479.2022.2063906.
- [5] C. T. Noh et al., “Measurement of Force and Position Using a Cantilever Beam and Multiple Strain Gauges: Sensing Principles and Design Considerations,” *Sensors*, vol. 25, no. 21, Art. no. 6561, 2025, doi: 10.3390/s25216561.
- [6] M. Tiboni, R. Bussola, F. Aggogeri, and C. Amici, “Experimental and Model-Based Study of the Vibrations in the Load Cell Response of Automatic Weight Fillers,” *Electronics*, vol. 9, no. 6, Art. no. 995, Jun. 2020, doi: 10.3390/electronics9060995.
- [7] L. Xiong, T. Zhang, A. Yuan, and Z. Zhang, “Research on Filtering Algorithm of Vehicle Dynamic Weighing Signal,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 15, no. 6, Art. no. 254, 2024, doi: 10.3390/wevj15060254.
- [8] J. Gajda, R. Sroka, P. Burnos, and M. Daniol, “Long-Term Assessment of the Properties of Load Sensors Applied in Weigh-in-Motion Systems,” *Sensors*, vol. 25, no. 8, Art. no. 2421, 2025, doi: 10.3390/s25082421.
- [9] PCB Load & Torque Division, *Load Cell Handbook: A Technical Overview and Selection Guide*, Farmington Hills, MI, USA: PCB Piezotronics, 2023.
- [10] Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd., “TML Transducers 2025–2026: Load Cells, Displacement Transducers, Pressure Transducers, Acceleration Transducers, Product Catalog, Version 2,” [Online]. Available: <https://tml.jp/eng/documents/Catalog/transducers2025-2026.pdf>. [Accessed: July 2026].

บทความวิจัย (Research Article)

- [11] G. Guo et al., “Effect of Additional Mass on Natural Frequencies of Weight-Sensing Structures,” *Sensors*, vol. 23, no. 17, Art. no. 7585, 2023, doi: 10.3390/s23177585.
- [12] R. Ouyang and R. D. Howe, “Low-Cost Fiducial-based 6-Axis Force-Torque Sensor,” in *Proc. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020, pp. 1653–1659, doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9196925.